



Masterarbeit

von

Robert Koller BSc.

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

der Technischen Universität Graz

Thema der Masterarbeit

Der Konuszugversuch zur Beurteilung des Verklebungspotenzials bindiger Böden bei Schildmaschinen im Tunnelbau

Betreuer

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Graz, August 2020

Eidstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich während des Studiums unterstützt haben.

Besonderen Dank widme ich:

Meinen Eltern, die mich während des Studiums finanziell unterstützt haben. Ohne euch wäre das Studium nicht möglich gewesen!

Meiner Freundin Lorena, die auch während meines Auslandssemesters in Singapur an meiner Seite blieb und mich mit positiven Worten während des Studiums immer aufmunterte.

Hr. Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz für die Möglichkeit diesen Laborversuch zu entwickeln. Unsere Diskussionen und Meetings werden mir immer positiv in Erinnerung bleiben.

Den Mitarbeitern des Labors für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der TU Graz, die für Fragen und ehrliche Diskussionen immer zur Verfügung standen.

Dem Beton- und Holzbauzeichensaal: Dem Zeichensaal beizutreten war die beste Entscheidung, ohne diese Freunde wäre ich nicht so weit gekommen. Danke Kollegen!

Auch ein Dankeschön geht an die Leute des Geotechnik-ZeichensaaLS, mit denen ich viele Tage und besonders lange Nächte verbracht habe.

Kurzfassung

Der „Konuszugversuch“ ist ein Laborversuch, um die Verklebungseigenschaften bindiger Böden zu untersuchen. Mit diesem „Konuszugversuch“ ist der Boden ähnlichen Belastungen ausgesetzt, die auf der Baustelle bei einer Schildmaschine auftreten, wie zum Beispiel in der Förderschnecke, sowie in der Abbaukammer oder auf der Vorderseite des rotierenden Schildes.

In dieser Arbeit wurde der Konuszugversuch an einer einaxialen Druckpresse nach Azam et al., 2012 nachgebaut und an drei verschiedenen Versuchsböden geprobt. Anschließend wurden Vergleichsversuche mit RWTH Aachen University, Geotechnik im Bauwesen durchgeführt und miteinander verglichen. Mit diesem Versuch lässt sich erkennen, bei welcher Konsistenzzahl das Verklebungspotenzial vom geprobteten Boden am höchsten ist.

Abstract

The "cone pull-out test" is a laboratory test to investigate the adhesive properties of cohesive soils. With this cone pull-out test, the soil is exposed to similar loads that occur on the construction site with a shield machine, such as in the screw conveyor, as well as in the extraction chamber or on the front of the rotating shield. In this work, the cone pull-out test was reconstructed on the uniaxial pressure machine according to Azzam et al., 2012. The tests were made on three different soil samples. Afterwards, comparative tests with "RWTH Aachen University, Geotechnical Engineering in Construction" were started and compared with each other. With this experiment it can be seen at which consistency number the bonding potential of the tested soil is highest.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Einführung in den Tunnelbau	2
2.1	Der konventionelle Tunnelbau	2
2.2	Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen	2
2.3	Schildmaschinen	2
2.3.1	Mixschild	3
2.3.2	Hydroschild	3
2.3.3	Erddruckschilde EPB	3
2.3.4	Multi-Mode-Tunnelbohrmaschine	5
3	Verklebungen an Schildmaschinen	5
3.1	Einflüsse auf die Verklebung	5
3.2	Maßnahmen gegen Verklebung beim Mixschild	6
4	Plastizität und Konsistenz	7
4.1	Bestimmung der Fließgrenze	8
4.2	Bestimmung der Plastizitätsgrenze	11
5	Kornverteilung	12
5.1	Allgemeines	12
5.2	Siebanalyse	12

5.3	Schlämmanalyse	12
5.3.1	Probenvorbereitung	12
5.3.2	Versuchsdurchführung	13
6	Identifikation der verwendeten Böden	14
6.1	Allgemein	14
6.2	Bodenprobe S	14
6.3	Bodenprobe N	15
6.4	Bodenprobe T	15
6.5	Bodenprobe R	16
7	Der Konuszugversuch	17
7.1	Allgemeines	17
7.2	Programmierung an der einaxialen Druckpresse	17
7.2.1.1	Änderung der Programmierung	18
7.3	Eigenschaften des Konus	18
7.4	Der Konusbohrkopf	19
7.5	Einbauvergleich – Verdichten des Bodenmaterials in einen Proctortopf	21
7.5.1	Allgemein	21
7.5.2	Hydraulikpresse	21
7.5.3	Proctorhammer	22
7.5.4	Händisch bzw. mit Spatel	22
7.5.5	Ergebnisse	22

7.6	Versuchsaufbau und Durchführung	23
7.6.1	Einbau in den Proctortopf	24
7.6.1.1	Allgemein	24
7.6.1.2	Konsistenzzahl IC 0,55 – 0,25	24
7.6.1.3	Konsistenzzahl IC > 0,55	24
7.6.2	Vertiefung in der Bodenprobe	25
7.6.3	Aufbau des Konuszugversuches an der einaxialen Druckpresse	25
7.6.4	Versuchsdurchführung an der einaxialen Druckmaschine	27
7.6.4.1	Erstversuch	27
7.6.4.2	Vergleichsversuch	28
7.6.4.3	Die Verklebung	28
7.7	Auswertung der Erstversuche vom Konuszugversuch der Bodenprobe T, Bodenprobe S und Bodenprobe N	29
7.7.1	Druckspannung-Weg Diagramm	29
7.7.1.1	Allgemein	29
7.7.1.2	Bodenprobe T	30
7.7.1.3	Bodenprobe S	30
7.7.1.4	Bodenprobe N	30
		32
7.7.2	Zugspannung-Weg Diagramm	34
7.7.2.1	Allgemein	34
7.7.2.2	Bodenprobe T	34
7.7.2.3	Bodenprobe S	34
7.7.2.4	Bodenprobe N	34

7.7.3	Verklebung	38
7.7.3.1	Allgemein	38
7.7.3.2	Bodenprobe T	38
7.7.3.3	Bodenprobe S	38
7.7.3.4	Bodenprobe N	38
7.8	Auswertung Maximalwerte der jeweiligen Böden	41
7.8.1	Maximale Druckspannung der jeweiligen Böden	41
7.8.2	Maximale Zugspannung der jeweiligen Böden	41
7.8.3	Maximale Verklebung der jeweiligen Böden	41
7.9	Vergleichsuntersuchung mit Universität Aachen	45
7.9.1	Allgemein	45
7.9.2	Druckspannung-Weg Diagramme	45
7.9.2.1	Allgemein	45
7.9.3	Druckspannung- Konsistenzzahl Diagramme	48
7.9.3.1	Allgemein	48
7.9.3.2	Bodenprobe S	48
7.9.3.3	Bodenprobe R	48
		50
7.9.4	Zugspannung-Weg Diagramme	51
7.9.4.1	Allgemein	51
7.9.4.2	Bodenprobe S	51
7.9.4.3	Bodenprobe R	51
7.9.5	Zugspannung- Konsistenzzahl Diagramme	54

7.9.5.1 Allgemein	54
7.9.5.2 Bodenprobe S	54
7.9.5.3 Bodenprobe R	54
	56
7.9.6 Verklebung	57
7.9.6.1 Allgemein	57
7.9.6.2 Bodenprobe S	57
7.9.6.3 Bodenprobe R	57
7.10 Ergebnisse der Universität Aachen	61
7.11 Vergleich	72
7.11.1 Allgemein	72
7.11.2 Bodenprobe S	72
7.11.2.1 Allgemein	72
7.11.2.2 Zugspannung – Weg	73
7.11.2.3 Zugspannung – IC	73
7.11.2.4 Druckspannung – Weg	73
7.11.2.5 Druckspannung – IC	73
7.11.2.6 Verklebungspotenzial	73
7.11.3 Bodenprobe R	73
7.11.3.1 Zugspannung – Weg	73
7.11.3.2 Zugspannung – IC	74
7.11.3.3 Druckspannung – IC	74
7.11.3.4 Verklebungspotenzial	74

8	Schwierigkeiten	74
9	Schlussfolgerung	75
9.1	Allgemein	75
9.2	Vergleichsversuch	75
10	Literaturverzeichnis	76

1 Einleitung

Beim maschinellen Tunnelvortrieb treten in fein- bis feinstkörnigen Böden häufig folgende Probleme auf: Bei Wasserzutritt kommt es zwischen Schneidrad und dem Abbau-material bzw. in den Fördereinrichtungen zu einer Adhäsion. In Abb. 1 sieht man die Verklebung der Öffnungen am Bohrkopf durch das Bodenmaterial. Durch die große Oberfläche der Tonminerale kommt es zur Verstopfung der Förderanlagen, Ausfall von Abbauwerkzeugen (z.B. Rollenmeißel) und ähnlichen Problemen. Ein höherer Energieaufwand wird für den Vortrieb benötigt und dadurch steigen die Kosten. Der maschinelle Tunnelvortrieb ist für die Auffahrung von Tunneln ein weltweit bewährtes Verfahren, dabei werden die Anforderungen (Durchmesser, Länge, Überlagerung, Wasserdruck, etc.) ständig erweitert. Es werden auch bindige Böden oder Gebirgsformationen mit unterschiedlichsten Bodeneigenschaften durchfahren. (nach Azzam et al., 2012)



Abb. 1: Verklebtes Schneidrad, Sydney Airport Line - Slurry TBM 10.8 m Diameter, break-out (nach Azzam et al., 2012)

Die Probleme im Tunnelvortrieb sind je nach geologisch/geotechnischen und baubetrieblichen Parametern unterschiedlich. Für einen erfolgreichen Tunnelvortrieb ist es wichtig, Kenntnisse über die geologischen und geotechnischen Verhältnisse zu haben. Die Wahl des Bauverfahrens (Ortsbruststützung, Materialtransport, Sicherung, etc.) ist von diesen Kenntnissen abhängig. (nach Azzam et al., 2012)

2 Einführung in den Tunnelbau

2.1 Der konventionelle Tunnelbau

Beim Tunnelbau gibt es zwei verschiedene Verfahren, die zu unterscheiden sind: Der konventionelle „bergmännische“ Tunnelbau und der maschinelle Tunnelvortrieb. Im bergmännischen Tunnelbau wird mit Hilfe von Baggen, Teilschnittmaschinen, Rippern oder Sprengung vorgetrieben. Dort muss eine entsprechende Standsicherheit an der Ortsbrust gegeben sein, eintretendes Gebirgswasser wird üblicherweise bei offener Wasserhaltung abgeführt. Dadurch kommt es kaum zu Verklebungen. (nach Azzam et al., 2012)

2.2 Unterteilung von Tunnelvortriebsmaschinen

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Tunnelvortriebsmaschinen. Diese kommen je nach Art des Bodens bzw. Gesteins zum Einsatz. Es gibt die Tunnelbohrmaschinen (TBM), die im Festgestein, und die Schildmaschinen (SM), die im Lockergestein eingesetzt werden. Der Baugrund kann je nach Kohäsion bzw. Reibungswinkel des Bodens standsicher oder auch nicht standsicher sein. Ist der Boden nicht standsicher, so ist eine Stützung an der Ortsbrust erforderlich, entweder mit Flüssigkeits- oder mit Erddruckstützung. Bei Schildmaschinen können auch Tunnelquerschnitte im Grundwasser hergestellt werden. In der Maschine wird ein Stützdruck erzeugt, der dem Außendruck entgegenwirkt. (nach Azzam et al., 2012)

2.3 Schildmaschinen

Man unterscheidet zwischen offenem Schild, Erddruckschild und flüssigkeitsgestütztem Schild. Offene Schilde kommen bei standfestem Boden zum Einsatz. Dort ist kein Stützdruck an der Ortsbrust erforderlich. Erddruckschilde nutzen den abgetragenen Boden als Stützdruck falls erforderlich. Flüssigkeitsgestützte Schilde verwenden eine Suspension, um den nötigen Stützdruck an der Ortsbrust zu erhalten (nach Herrenknecht AG, 2020).

2.3.1 Mixschild

Mixschilde kommen bei heterogenem Baugrund mit hoher Wasserdurchlässigkeit und hohen Wasserdrücken zum Einsatz. Das Mixschild hat zwei Kammern, die durch eine Tauchwand getrennt ist (siehe Abb. 2). Sie können mit einer Öffnung miteinander kommunizieren. Die vordere Kammer ist vollständig und die hintere Kammer ist knapp über der Maschinenachse mit Suspension gefüllt. Im oberen Bereich der hinteren Kammer wird ein kompressibles Luftpolster, mit dem an der Ortsbrust benötigten Gegendruck beaufschlagt. Das Luftpolster dient zu einer präzisen Steuerung des Stützdrucks. Mixschilde sind bei Wasserdrücken von 15 bar sicher einsetzbar und sind deshalb mit einem mehrfachen Dichtungssystem ausgestattet. (nach Herrenknecht AG, 2020)

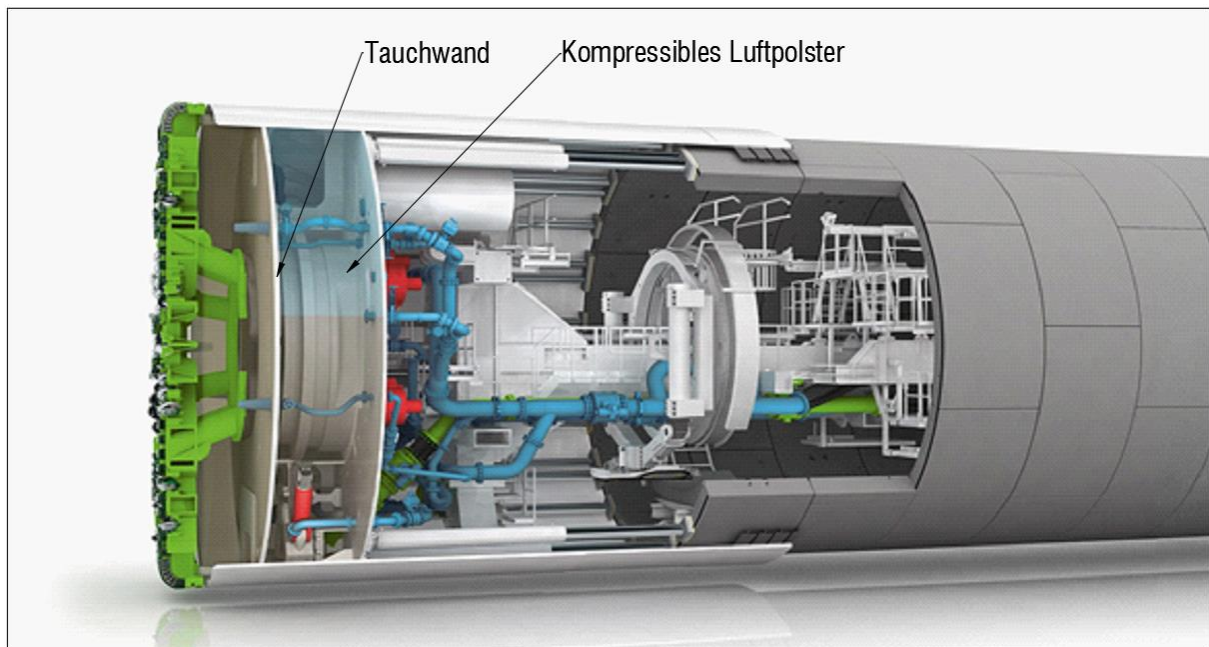


Abb. 2: Darstellung eines Mixschildes (nach Herrenknecht AG, 2020)

2.3.2 Hydroschild

Die Funktion eines Hydroschildes gleicht dem Mixschild, nur dass es keine Luftpolsterbeaufschlagung gibt. Das Mixschild ist eine Weiterentwicklung des Hydroschildes (nach Herrenknecht, 2020).

2.3.3 Erddruckschilde EPB

Erddruckschilde (engl. Earth Pressure Balance Shield, kurz EPB) kommen bei weichen Böden bzw. weichen Baugrund mit geringer Wasserdurchlässigkeit wie Ton, Schluff

oder Lehm zum Einsatz. Bei den Erddruckschilden wird das Abbaumaterial als Stützmaterial an der Ortsbrust eingesetzt, um ein unkontrolliertes Eindringen des Bodens zu verhindern (siehe Abb. 3). Um den Boden auf die erforderliche Konsistenz, plastische Verformbarkeit und Wasserdurchlässigkeit zu bringen, kann durch Injektionen in der Ortsbrust eine Bodenconditionierung eingebracht werden. Die Einbringung erfolgt durch Düsen, die im Schneidrad integriert sind. Als Conditionierungsmittel können Wasser, Bentonit oder Schaum zum Einsatz kommen. Die Schneidräder vom Schild werden gegen die Ortsbrust gedrückt und lösen das Bodenmaterial. Durch Öffnungen am Schild gelangt das Material in die Abbaukammer. Dort vermischt sich das Material mit dem schon vorhandenen Erdbrei. Mischflügel am Schneidrad und Druckwand kne-ten das Material in der Abbaukammer. Vortriebspresen stützen sich von den Tübbingringen ab und leiten die Kräfte über die Druckwand auf den Erdbrei weiter. Der Druck des stützenden Erdbreis soll mit dem äußeren Erd- und Wasserdruck im Gleichgewichtszustand sein. Eine Förderschnecke transportiert den Erdbrei vom Boden der Abbaukammer auf ein Förderband hoch. Die Geschwindigkeit der Förderschnecke kann gesteuert werden, um so den benötigten Stützdruck zu erreichen. Erddrucksensoren sind als Überwachung für den geeigneten Stützdruck eingebaut (nach Herrenknecht AG, 2020).

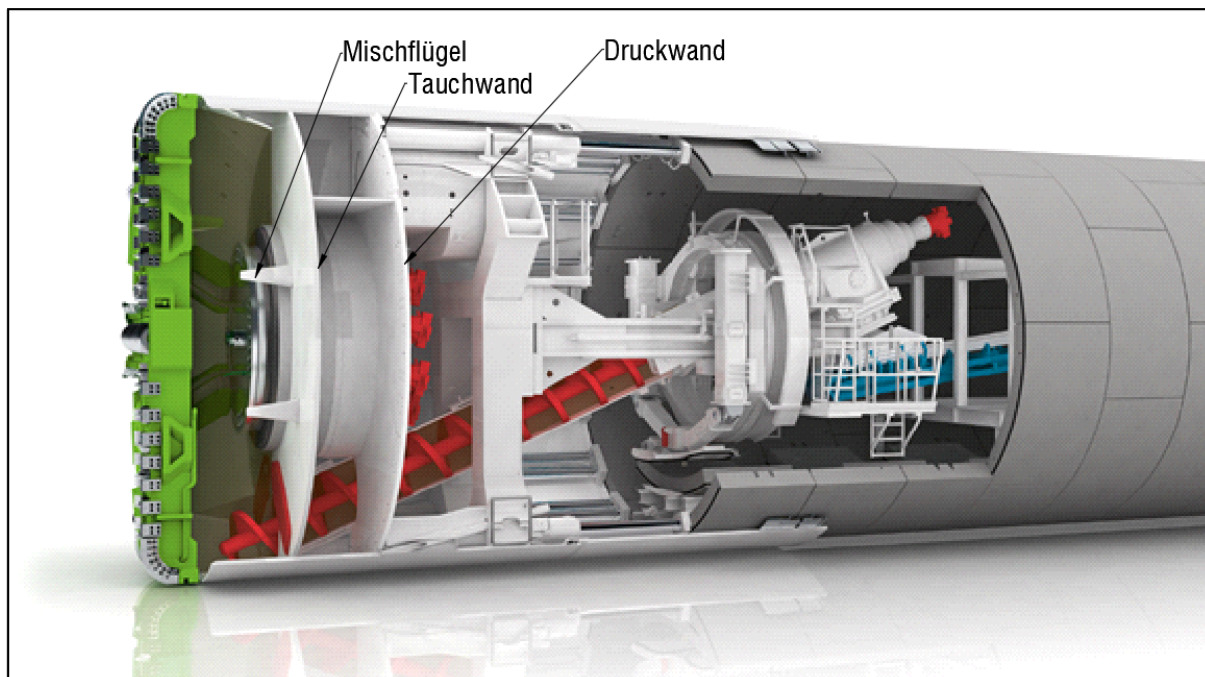


Abb. 3: Darstellung eines EPB-Schildes (nach Herrenknecht AG, 2020)

2.3.4 Multi-Mode-Tunnelbohrmaschine

Multi-Mode-Tunnelbohrmaschinen kommen bei wechselhaftem Baugrund entlang der Tunneltrasse zum Einsatz. Der Vortriebsmodus ist an die Geologie anpassbar und erreicht somit eine hohe Flexibilität. Es können Passagen mit unterschiedlichen Geologien und hydrologischen Verhältnissen durchfahren werden. Der Vortriebsmodus kann durch Umbau zwischen EPB Vortrieb mit Förderschnecke und offenen Modus mit Maschinenband gewechselt werden (siehe Abb. 4) (nach Herrenknecht AG, 2020).

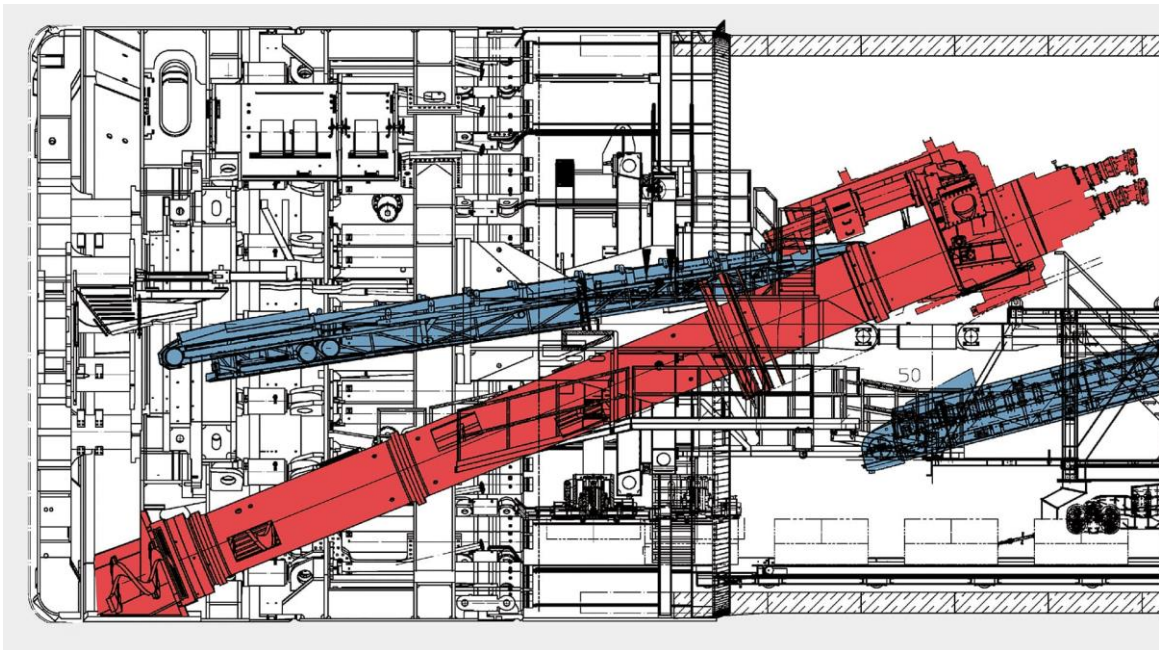


Abb. 4: Multi-Mode-TBM - Wechsel von EPB-Modus mit Förderschnecke auf offenen Modus mit Förderband (Herrenknecht AG, 2020)

3 Verklebungen an Schildmaschinen

3.1 Einflüsse auf die Verklebung

Das Auftreten von Adhäsion und den daraus resultierenden Verklebungen ist vom vorhandenen Wasser und quellfähigen Tonmineralen sowie von mechanischen Wirkmechanismen abhängig. Die Wirkmechanismen können in drei Kriterien definiert werden (Abb. 5) (Azzam et al., 2012):

- 1) Die Belastungsart (Scher-Druck- / Scher-Zug-Beanspruchung),
- 2) Die Belastungsrichtung (Normal-/ Tangentialanteile),
- 3) Das Verhältnis Adhäsion – Widerstände im Boden

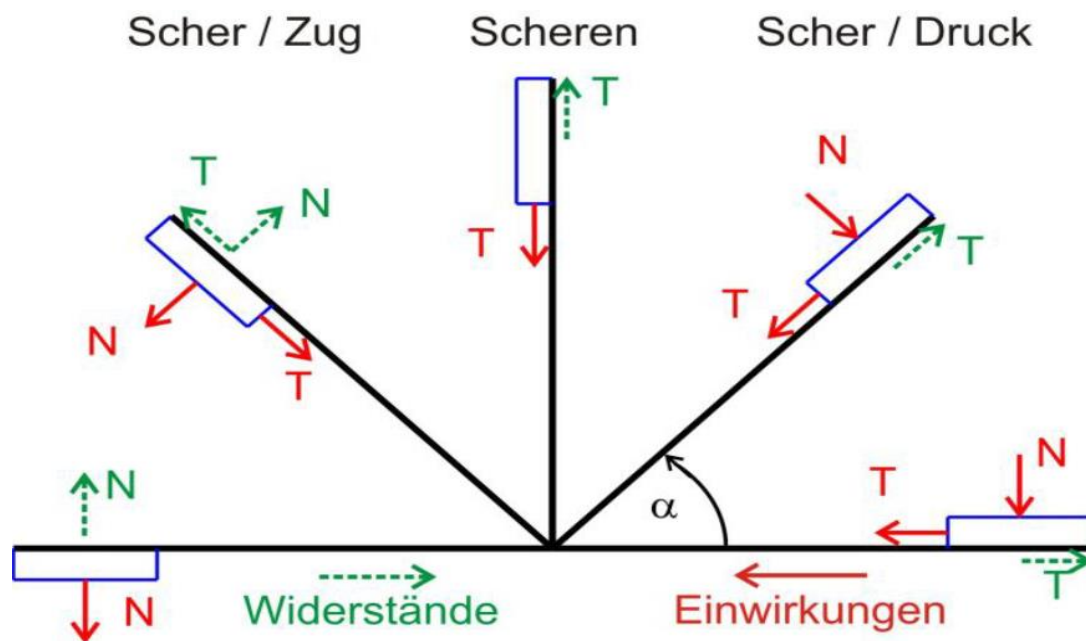


Abb. 5: Wirkmechanismen der Adhäsion (Azzam et al., 2012).

Durch die komplexe Geometrie einer Tunnelvortriebsmaschine wird die Menge des anhaftenden Bodens immer von einer Kombination dieser Faktoren bestimmt. Scher-Druck-Beanspruchungen treten auf der Vorderseite des rotierenden Schildes einer TBM auf, Scher-Zug-Kräfte an der Rückseite des Schneidrads. Das Verhältnis der Adhäsion zu den Widerständen im Boden ist für eine Anhaftung zwischen zwei Materialien (z.B. Stahl und Ton) von Bedeutung. Es ist entscheidend, ob das Versagen in der Grenzfläche oder im Boden selbst auftritt. Ist die Adhäsion zwischen dem Boden und dem Abbauwerkzeug größer als die Kohäsion des Bodens, bleibt der Boden an der Stahloberfläche haften. Sind die Widerstände im Boden größer als die Adhäsion, tritt Versagen in der Grenzfläche auf und es kommt zu keinen Anhaftungen des Bodens mit der Stahlfläche. (nach Azzam et al., 2012)

3.2 Maßnahmen gegen Verklebung beim Mixschild

Herrenknecht hat beim Mixschild gegen die Verklebung Speziallösungen entwickelt:

- Schneidräder mit offenem Zentrumsbereich für einen optimalen Durchlass des Abraums.
- Erhöhte Strömungsgeschwindigkeit der Suspensionen in verklebungsfälligen Zonen
- Separate Spülsysteme mit schwenkbaren Düsen im Bereich der Tauchwandöffnung.

Um die Verklebung zu reduzieren werden hauptsächlich glatte Oberflächen in den Bereichen, wie z.B. der Tauchwandöffnung eingebaut (nach Herrenknecht, 2020).

4 Plastizität und Konsistenz

Der plastische Bereich eines Bodens wird über die Fließgrenze und der Plastizitätsgrenze bestimmt. Der Wassergehalt w einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers m_w zur Trockenmasse m_d der Bodenprobe (gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2019).

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (1)$$

w	[%]	Wassergehalt des Bodens
m_w	[kg]	Das vorhandene Wasser im Boden
m_d	[kg]	Trockenmasse des Bodens

Mit Abnahme des Wassergehaltes geht die Zustandsform eines bindigen Bodens von der flüssigen über eine breiige, sehr weiche, weiche, steife, halbfeste, und feste Konsistenz über (siehe Abb. 6) (gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2019).

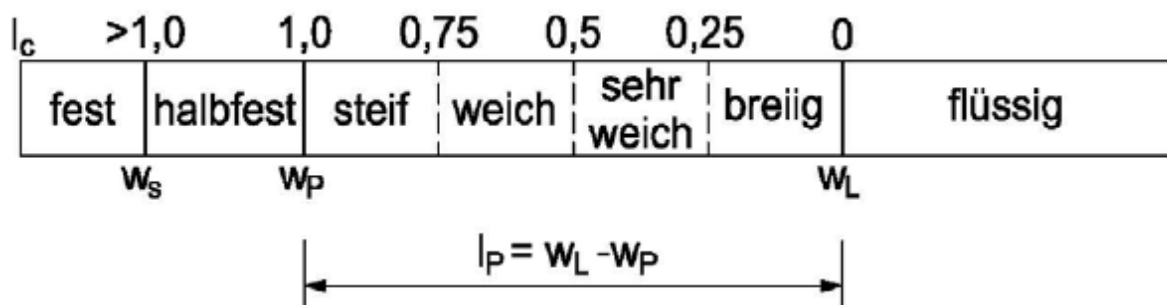


Abb. 6: Konsistenzband (ÖNORM EN ISO 14688-2:2019)

Der Wechsel von flüssiger zu breiiger Konsistenz des Bodens wird als Fließgrenze w_L bezeichnet und als Plastizitätsgrenze w_P der Übergang von der steifen zur halbfesten Konsistenz. Die Plastizitätszahl I_P gibt die Größe des plastischen Bereiches an und liegt zwischen der Fließgrenze und der Plastizitätsgrenze. Die Schumpfungsgrenze w_S ist zwischen halbfester und fester Zustandsform und kann näherungsweise bei $I_C = 1,25$ angenommen werden. (gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2019)

$$I_P = w_L - w_P \quad (2)$$

w_S	[%]	Schrumpfgrenze des Bodens
w_L	[%]	Fließgrenze des Bodens
w_P	[%]	Ausrollgrenze des Bodens
I_P	[%]	Plastizitätszahl

Die Konsistenzzahl I_C beschreibt die Zustandsform eines Bodens. Im Quotienten steht die Differenz der Fließgrenze w_L zum Wassergehalt w und wird durch die Plastizitätszahl I_P dividiert. (gemäß ÖNORM EN 17892-12:2018)

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad (3)$$

I_C	[-]	Konsistenzzahl
w_L	[%]	Fließgrenze des Bodens
w	[%]	Wassergehalt des Bodens
w_P	[%]	Ausrollgrenze des Bodens

4.1 Bestimmung der Fließgrenze

Die Fließgrenze wurde in diesem Projekt bei allen Böden durch das Verfahren nach Casagrande bestimmt. Die Versuchseinrichtung besteht aus einem Probenbehälter und hat die Form einer Schale (siehe Abb. 7). Die Schale besteht aus Messing und ist mit dem Unterbau durch einen Mitnehmer verbunden. Der Mitnehmer ist motorisch angetrieben. Er hebt die Schale an und lässt sie auf dem Unterbau mit einer Fallhöhe von 10 mm 2-mal pro Sekunde fallen. (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

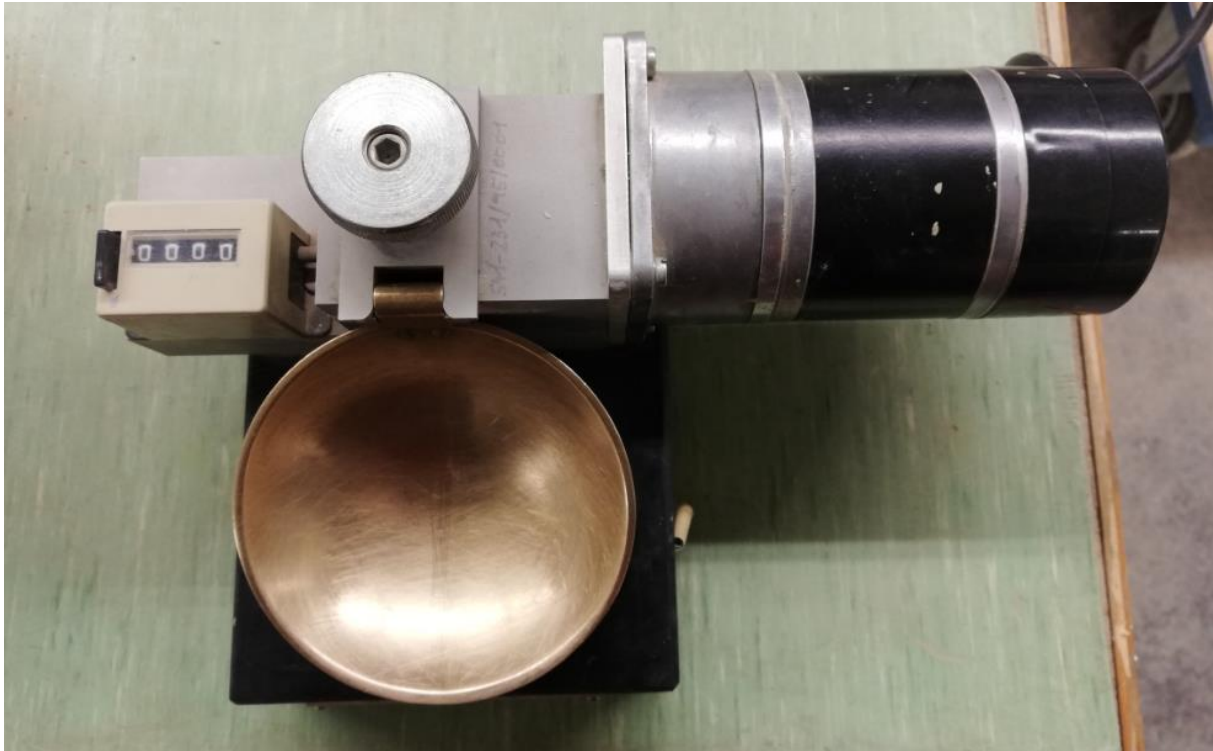
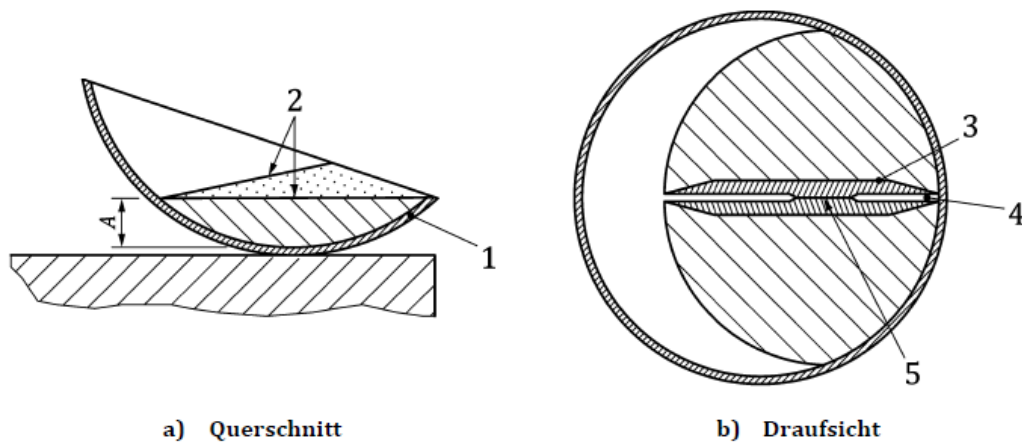


Abb. 7: Draufsicht der Versuchseinrichtung für den Versuch nach Casagrande

Für die Bestimmung der Fließgrenze sind ca. 200 g vom Boden mit einer Korngröße $< 0,4$ mm erforderlich. Der Versuchsboden wird mit einem Spatel in die Schale gestrichen und soll eine Höhe von mindestens 10 mm an der tiefsten Stelle aufweisen. Der Boden wird mit dem Spatel nach unten gedrückt und es soll eine glatte horizontale Oberfläche entstehen. In Abb. 8 ist der beschriebene Vorgang schematisch dargestellt.

Mit einem Furchenzieher wird in der Mitte der Schale eine Furche gezogen, die bis zum Boden der Schale reicht. Die Furche soll sich durch Fließen des Bodens schließen. Die Anzahl der Klopfe wird gezählt und gestoppt bis sich die Furche über eine Länge von 10 mm geschlossen hat. (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

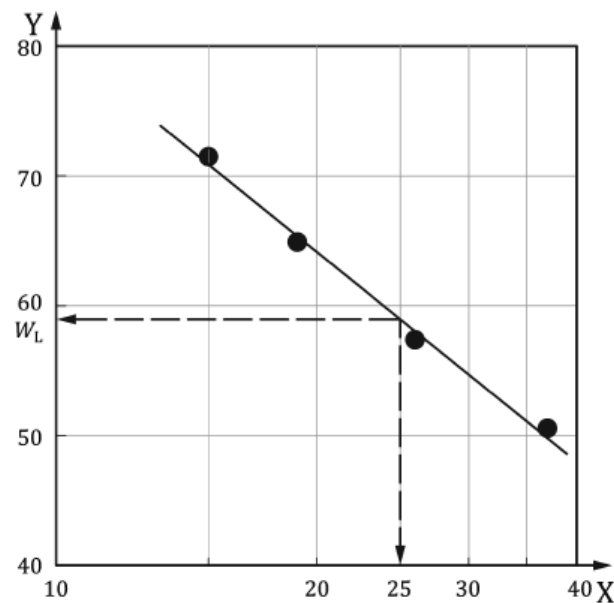


Legende

- 1 Behälter
- 2 Oberflächenebene für den Versuch
- 3 Prinzipskizze der profilierten Seite der Furche als Schnitt
- 4 Boden des Behälters, exponiert durch Furche als Schnitt
- 5 10 mm Schließung der Furche am Endpunkt des Versuchs
- A 10 mm

Abb. 8: Befüllung der Schale und Darstellung der Furche (ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

Die Klopfe sind aufzuzeichnen. Der Wertebereich soll zwischen 15 und 40 Klopfe liegen. Eine Probe aus dem geschlossenen Furchenbereich wird zur Wassergehaltsbestimmung genommen. Für die Bestimmung der Fließgrenze muss der Vorgang wiederholt werden, um mindestens 4 Versuchspunkte bei unterschiedlichem Wassergehalt zu erreichen. Abb. 9 zeigt ein beispielhaftes Diagramm. (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

**Legende**

X Anzahl der Umdrehungen N
Y Wassergehalt (%)

Abb. 9: Fließgrenzenbestimmung nach dem Verfahren nach Casagrande (schematisch) (ÖNORM ISO 17892-12:2018)

Die Bodenprobe soll mindestens einmal unter und einmal über der Schlaganzahl 25 liegen. Eine gerade Linie wird durch die Punkte gezogen. Die Fließgrenze w_L wird nach einer Schlaganzahl von 25 Umdrehungen abgelesen. (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

4.2 Bestimmung der Plastizitätsgrenze

Für die Plastizitätsgrenze werden 15 g bis 20 g der Bodenprobe genommen. Man benutzt eine saugende Unterlage, die das Wasser der Bodenprobe entzieht. Die Bodenprobe formt man zu einer Kugel und rollt sie auf der saugenden Unterlage mit einem Durchmesser von 3 mm aus. Die Walze soll gleichmäßig sein und so lange ausgerollt werden bis die Walze zu bröckeln beginnt und abreißt. Die abgerissenen Portionen kommen in ein Behältnis, um den Wassergehalt zu bestimmen. Der Vorgang wird wiederholt und das Mittel aus jedem Wassergehalt genommen. (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12:2018)

Die Auswertungen der Konsistenzgrenzen sind notwendig, um die Bodenprobe auf die jeweilige Konsistenz zu bringen. Je nach Konsistenz verhält sich der Boden anders und ist deshalb wichtig zu kennen. Die Ergebnisse für die Fließ- und Plastizitätsgrenze der jeweiligen Böden befinden sich in Kapitel 6.

5 Kornverteilung

5.1 Allgemeines

Korngrößen unter 0,125 mm werden durch Sedimentation bestimmt. Größere Körnungen bestimmt man durch Siebanalyse (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-4: 2017).

5.2 Siebanalyse

Eine Trockenprobe von den jeweiligen Bodenproben wurde durch Siebe der Maschenweite 2,0 mm, 0,63 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, und 0,125 mm nass durchgesiebt. Anschließend wurden die Größen von 2,0 bis 0,125 mm getrocknet, gewogen und ausgewertet. Korngrößen die kleiner als 0,125 mm sind, wurden für die Schlämmanalyse benutzt (siehe Kap. 5.3). (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-4: 2017)

5.3 Schlämmanalyse

5.3.1 Probenvorbereitung

Der Versuchsboden passiert mit Hilfe eines Wasserstrahles durch das Sieb mit einer Maschenweite von 0,125 mm und fällt mit dem Wasser in einem Auffangbehälter. Der Feinanteil setzt sich nach einigen Stunden am Grund des Auffangbehälters ab. Nach Absaugung des Wassers wird das Bodenmaterial in den Ofen gestellt und bei $105^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ getrocknet. Nach der Trocknung gibt man 40 g vom Bodenmaterial und 30 g Dispergierungsmittel (Natrium Diphosphat) in einen Glaszylinder und befüllt ihn bis zur Hälfte mit 1 l destilliertem Wasser. Durch 4 h langem hin- und her Kippen der Suspension in einer geeigneten Einrichtung kommt es zum Lösen der zusammenhaftenden Tonminerale (siehe Abb. 10). (gemäß ÖNORM EN ISO 17892-4: 2017)



Abb. 10: Einrichtung zum Durchmischen der Suspension

5.3.2 Versuchsdurchführung

Für die Schlämmanalyse wurde bei allen Bodenproben das Aräometerverfahren angewendet. Das Aräometer wird in die Referenzlösung getaucht und schwebt kontaktfrei im Zylinderglas. Für das Freischweben der Feinanteile von der Bodenprobe wird die Suspension im Zylinder 2 Minuten lang durch 60-mal hin- und her gekippt. Man nimmt das Aräometer aus der Lösung und taucht es ohne Verzögerung in die Suspension. Der Ablesewert ist am Meniskusrand vom Aräometer abzulesen. Drei Ablesungen sind im Intervall von 0,5 min, 1 min und 2 min durchzuführen. Anschließend kann das Aräometer wieder entnommen und abgewaschen werden. Drei zusätzliche Ablesungen sind im Intervall von 2 h, 6 h und 24 h durchzuführen. Die Zeit und der Ablesewert werden aufgezeichnet. In den ersten 15 min der Ablesungen misst man die Temperatur der Suspension auf $0,1^\circ$ gerundet, danach misst man die Temperatur nach jeder Ablesung. Die Ablesungen sollen auf eine Genauigkeit von 0,005 g/ml bestimmt werden (gemäß ÖNORM ISO EN 17892-4:2017).

6 Identifikation der verwendeten Böden

6.1 Allgemein

Für die Erstversuche brachte man die Bodenprobe auf 4 Konsistenzzahlen, die zwischen den Werten 0,15 und 0,65 liegen. Die Konsistenzzahlen sind auf eine Genauigkeit von 0,05 gerundet. Für die Vergleichsversuche sind die Böden auf Konsistenzzahlen zwischen 0,25 und 0,85 in ca. 0,15er Schritte gebracht worden und auf eine Genauigkeit von 0,01 ausgewertet. Erstversuche wurden bei Bodenprobe S, T und N durchgeführt, Vergleichsversuche bei Bodenprobe S und R.

6.2 Bodenprobe S

Bezeichnung: Schwarzer Ton

Name laut Produkthersteller: Terra 502

Zusätzliches: 30% Schamotte

Herkunft: Westerwald, Deutschland

Wie im Kap.4 beschrieben, sind die Konsistenzgrenzen bestimmt worden. Die Ergebnisse für Bodenprobe S sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Konsistenzgrenzen und Plastizitätszahl von Bodenprobe S

Fließgrenze	w_L	34,4	%
Plastizitätsgrenze	w_P	12,7	%
Plastizitätszahl	I_P	18,4	%

Die Ergebnisse für die Kornverteilung der Bodenprobe S sind in Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Kornanteil aus Körnungslinie von Bodenprobe S

Ton	< 0,002 mm	40,3	%
Schluff	0,002 – 0,063 mm	36,6	%
Sand	0,063 – 2 mm	23,1	%

Die Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe S ist für den Erstversuch in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe S (Erstversuch)

Konsistenzzahl	I_c	0,20	0,40	0,50	0,60
Wassergehalt	w	29,0	25,1	23,0	21,0

Die Bodenprobe S wurde für die Vergleichsversuche nochmals geprobt und auf folgende Konsistenzzahlen gebracht (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe S (Vergleichsversuch)

Konsistenzzahl	I_c	0,22	0,42	0,54	0,69	0,81
Wassergehalt	w	29,7	25,3	22,7	19,32	16,8

6.3 Bodenprobe N

Diese Bodenprobe wurde von einer Prüfanstalt aus Niederösterreich zur Verfügung gestellt.

Bezeichnung: Grauer Schluff

Herkunft: Baustelle Asfinag, Österreich (genauere Herkunft unbekannt).

Tab. 5: Konsistenzgrenzen von Bodenprobe N

Fließgrenze	w_L	38,5	%
Plastizitätsgrenze	w_P	19,7	%
Plastizitätszahl	I_P	18,8	%

Tab. 6: Kornanteil aus Körnungslinie von Bodenprobe N

Ton	< 0,002 mm	21,8	%
Schluff	0,002 – 0,063 mm	71,9	%
Sand	0,063 – 2 mm	6,3	%

Tab. 7: Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe N

Konsistenzzahl	I_c	0,25	0,45	0,50	0,60
Wassergehalt	w	32,3	29,5	28,2	26,2

6.4 Bodenprobe T

Bezeichnung: Brauner Ton

Herkunft: Obersteiermark, Österreich

Tab. 8: Konsistenzgrenzen von Bodenprobe T

Fließgrenze	w_L	36,5	%
Plastizitätsgrenze	w_P	11,6	%
Plastizitätszahl	I_P	24,9	%

Tab. 9: Kornanteil aus Körnungslinie von Bodenprobe T

Ton	< 0,002 mm	36,3	%
Schluff	0,002 – 0,063 mm	59,3	%
Sand	0,063 – 2 mm	4,4	%

Tab. 10: Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe T

Konsistenzzahl	I_c	0,25	0,35	0,50	0,60
Wassergehalt	w	30,3	27,2	24,1	21,6

6.5 Bodenprobe R

Bezeichnung: Roter Ton,

Herkunft: Bauvorhaben Amprion Allegro, Baugrube VS4, Aachen-Brand, Deutschland

Diese Bodenprobe wurde von RWTH Aachen zu Verfügung gestellt.

Tab. 11: Konsistenzgrenzen von Bodenprobe R

Fließgrenze	w_L	37,6	%
Plastizitätsgrenze	w_P	14,8	%
Plastizitätszahl	I_P	22,8	%

Tab. 12: Kornanteil aus Körnungslinie von Bodenprobe R

Ton	< 0,002 mm	35,7	%
Schluff	0,002 – 0,063 mm	24,5	%
Sand	0,063 – 2 mm	39,8	%

Tab. 13: Konsistenzzahl zum jeweiligen Wassergehalt von Bodenprobe R

Konsistenzzahl	I_c	0,23	0,42	0,52	0,67	0,83
Wassergehalt	w	32,3	28,1	25,7	22,3	18,7

7 Der Konuszugversuch

7.1 Allgemeines

Der KZV wurde nach RWTH Aachen University, Geotechnik im Bauwesen entwickelt und im Labor für Bodenmechanik und Grundbau an der TU Graz nachgebaut.

Mit dem beschriebenen Konuszugversuch wurde ein Versuch entwickelt, um die Verklebungseigenschaften bzw. die Adhäsion von Böden zu untersuchen. Der Boden wird beim Konuszugversuch zumindest qualitativ ähnlichen Belastungen ausgesetzt wie das Material an Tunnelvortriebsmaschinen, wo die Probe entsprechenden Beanspruchungen unterliegt (siehe Kap. 3.1).

Beim Herausziehen des Konus an einem verklebungsfähigen Boden treten Kräfte, wie bei Abb. 11 gezeigt, auf. Wenn Anhaftungen beim Konus auftreten geht man von einem Versagen im Boden aus (nach Azzam et al., 2012).

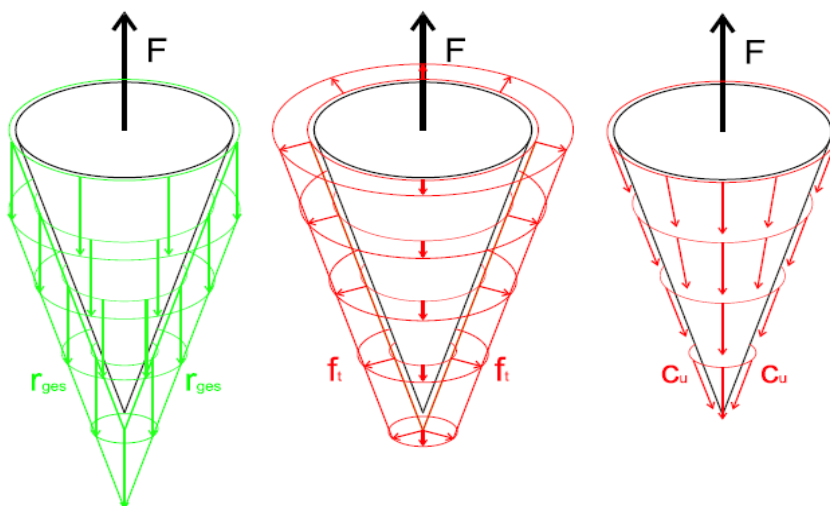


Abb. 11: Kraftkomponenten beim Konuszugversuch (Azzam et al., 2012)

- r_{ges} = gesamte Zugkraft, aufgeteilt in die Komponenten:
- f_t = Zugfestigkeit, normal zur Konusoberfläche
- c_u = Kohäsion, parallel zur Konusoberfläche

7.2 Programmierung an der einaxialen Druckpresse

Um bessere Ergebnisse zu erzielen, passte man die Prüfvorschrift für den Konuszugversuch an. Da im Programmteil unbekannte Formelzeichen auftraten, wurde nach mehrmaligen und langandauernden Versuchen ohne Ergebnis die Fa. "Wille Geotechnik",

die die entsprechende Prüfvorschrift entwickelt hat beauftragt, die Programmierung anzupassen.

7.2.1.1 Änderung der Programmierung

Um den Erstkontakt mit dem Konus und der Bodenprobe herzustellen, hatten wir eine Erstkontaktspannung mit 5 KN/m^2 angesetzt. Bei sehr weichen Bodenproben dringt der Konus tiefer ein als bei weichen bzw. steifen Bodenproben. Statt der kraftgesteuerten Erstkontaktspannung stellt man den Kontakt selbst her, indem der Teller weggesteuert hochfährt. Das Hochfahren wird bei vollflächigem Kontakt zwischen Konus und Bodenprobe manuell gestoppt.

In der Auswertung der Zugphase sollte die Zugspannung wieder auf 0 abfallen da es ohne Kontakt zwischen Boden und Bodenprobe keine Spannung gibt. Nach der Druckphase wird die Druckspannung auf 0 abgenommen bevor die Zugphase beginnt. Die Zugspannung fängt bei Kraft und Weg Null an, steigt beim Herausziehen kurz an und fällt nach Beendigung des Kontakts zwischen Boden und Konus wieder ab.

7.3 Eigenschaften des Konus

An der RWTH Aachen wurden zahlreiche Konusneigungen ausprobiert, von 10° bis $72,6^\circ$. Für die Verklebung lieferte der Konus mit einer Neigung von 58° die besten Ergebnisse. Dort wurde auch über „Konusdrehversuche“ geforscht, da aber die Ergebnisse nicht zufriedenstellend waren, wurden diese Versuche nicht mehr verfolgt. (nach Azzam et al., 2012)

Beim Konuszugversuch verwendet man einen Konus mit einer Neigung von 58° und einer Mantelfläche von $37,05 \text{ cm}^2$. Durch Rückrechnen ergibt sich ein Durchmesser $d = 5,00 \text{ cm}$ und eine Höhe $h = 4,00 \text{ cm}$. Der Werkstoff besteht aus Edelstahl. Bei der Herstellung vom Konus wird die Oberfläche nach dem Drehen poliert und zusätzlich gebeizt (siehe Abb. 12)

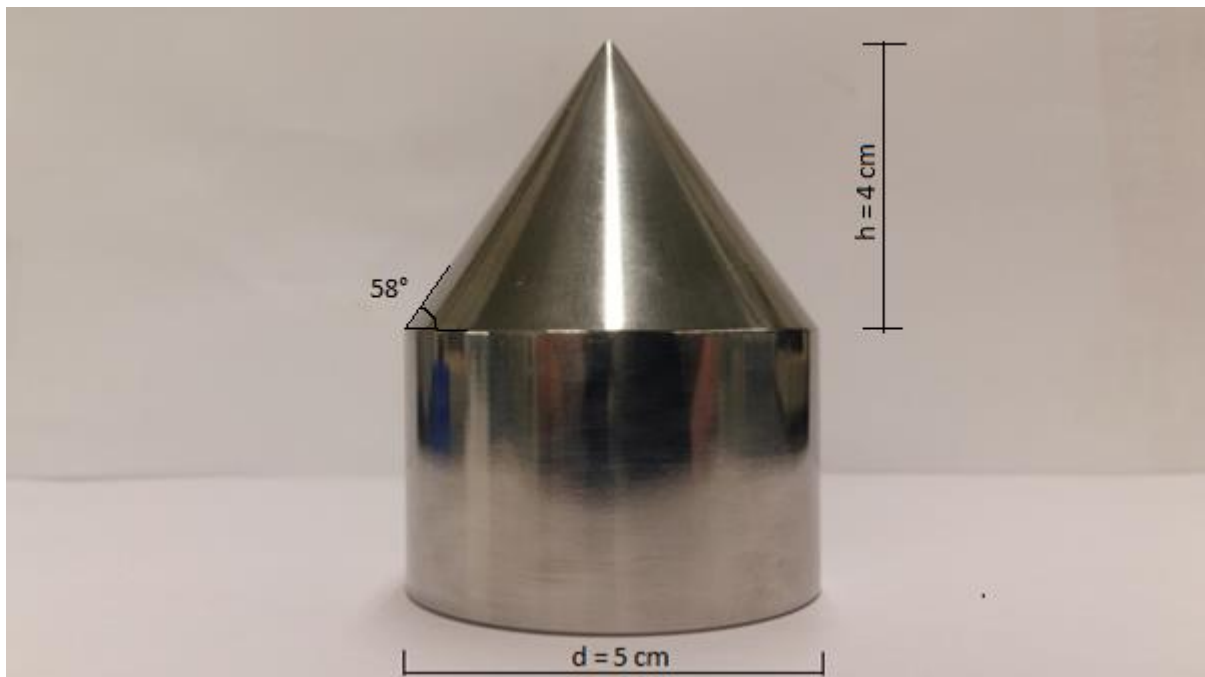


Abb. 12: Konus mit 58° Neigung

7.4 Der Konusbohrkopf

Der Konusbohrkopf ist an einer Verlängerungsstange befestigt und in einer Standbohrmaschine eingespannt. Mit dem Konusbohrkopf kann man eine Vertiefung in der Bodenprobe herstellen, die man für das Einsetzen des Konus benötigt (siehe Kap.7.6.2). Der Konusbohrkopf muss dieselbe Neigung wie der Konus haben. Um eine Vertiefung an der Bodenprobe herauszuschneiden wurde der Konusbohrkopf zusätzlich an einer Seite geschärft (siehe Abb. 14).

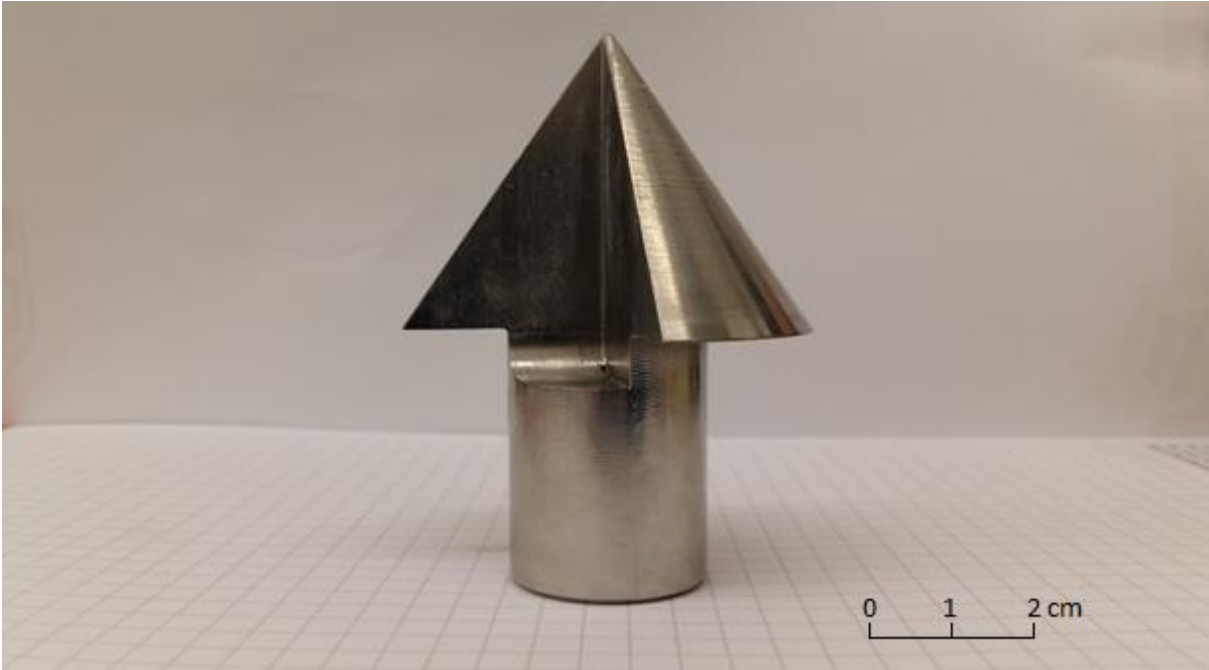


Abb. 13: Der Konusbohrkopf (alte Version)

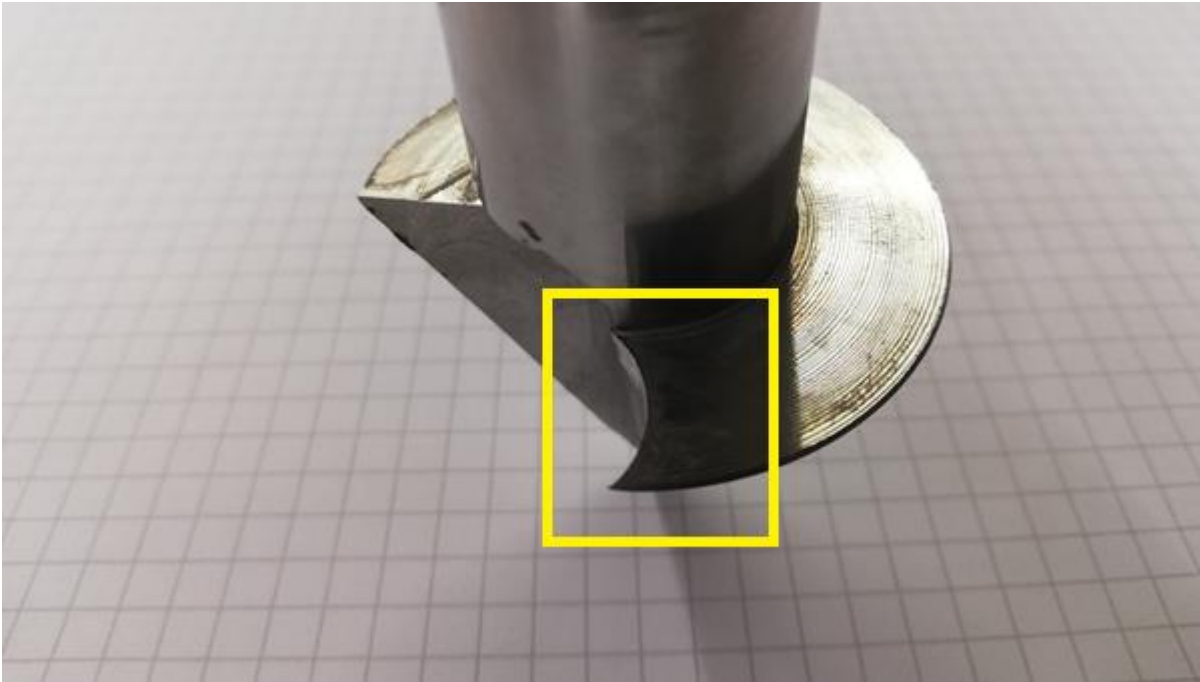


Abb. 14: Konusbohrkopf mit zusätzlicher Schärfung

7.5 Einbauvergleich – Verdichten des Bodenmaterials in einen Proctortopf

7.5.1 Allgemein

Für den Vergleich der Verdichtung des Bodenmaterials in den Proctortopf wurde die Bodenprobe S mit einer Konsistenzzahl von 0,25 genommen. Zu vergleichen war das Einbringen des Bodenmaterials mit dem Proctorhammer, der Hydraulikpresse und händisch bzw. mit dem Spatel. Die Oberfläche der Bodenprobe ist nach dem Verdichten bei allen drei Einbauversuchen mit dem Stahllineal glatt abzuziehen.

7.5.2 Hydraulikpresse

Beim Einbau der Bodenprobe in den Proctortopf samt Aufsatzring presst man das Bodenmaterial mit einer geeigneten Pressvorrichtung hinein (siehe Abb. 15). Nach dem Einbringen der Probe ist der Aufsatzring vom Proctortopf abzunehmen. Bei einer Konsistenzzahl von 0,25 drückt es den Versuchsboden oberhalb zwischen Proctortopf und dem Druckstempel heraus. Durch den hohen Wassergehalt im Boden lässt sich der Versuchsboden kaum komprimieren.



Abb. 15: Verdichten mit Hydraulikpresse der Bodenprobe S

7.5.3 Proctorhammer

Der Versuchsboden wird in 3 Lagen in den Proctortopf eingebaut. Die Bodenschichten werden mit dem Proctorhammer bei 25 Schlägen verdichtet. Beim Hineinklopfen benutzt man eine Folie zwischen Proctorhammer und den Versuchsboden, um Verklebungen am Proctorhammer zu vermeiden.

Bei einer Konsistenzzahl von 0,25 erzielt man keine sinnvollen Ergebnisse. Auf der einen Seite im Topf hämmert man auf den Versuchsboden und verdichtet ihn, auf der anderen Seite kommt der Versuchsboden wieder hoch und lockert sich. (siehe Abb. 16).



Abb. 16: Einbau mit Proctorhammer der Tonprobe S

7.5.4 Händisch bzw. mit Spatel

Den Versuchsboden baut man in einen Proctortopf ein. Nach Einstreichen des Materials mit einem Spatel kann die Probe händisch verdichtet werden. Beim händischen Verdichten sind Handschuhe wegen der Feuchtigkeitsaufnahme zu tragen.

7.5.5 Ergebnisse

Beim Einstreichen mit dem Spatel bzw. beim händischen Hineindrücken erreichte man die besten Ergebnisse (siehe Tab. 14).

Tab. 14: Massenvergleich einen Proctortopf bei Konsistenzzahl $I_C = 0,25$

Verdichtungsmethode	Masse vom Boden [g]
Proctorhammer	3950,3
Hydraulikpresse	3896,8
Händisch bzw. mit Spatel	3971,1

7.6 Versuchsaufbau und Durchführung

Als Anfangsversuch wurde der Versuchsboden in geeigneten Laboreinrichtungen homogenisiert (siehe Abb. 17). 5500 Gramm vom Boden wurden durch das Andrehen der Maschine durch die Schneidmesser gefahren und zerkleinert. Durch Wasserzugabe konnte man den Boden auf die entsprechende Konsistenz bringen (siehe Kapitel 4).

**Abb. 17:** Homogenisiergerät (Erstversuche)

Bei weichem Boden verklebt das Bodenmaterial zwischen dem Deckel und dem rotierenden Drehteller. Lange Putzarbeiten sind bei jedem neuen Durchmischen nötig. Das Homogenisiergerät wurde durch ein Knetgerät für das Durchmischen des Bodens mit dem Wasser ersetzt (siehe Abb. 18). Zur Kontrolle der Konsistenz wird von der fertig gemischten Masse eine Probe zur Wassergehaltsbestimmung genommen und darauf kontrolliert.



Abb. 18: Knetgerät zum Durchmischen des Bodens

7.6.1 Einbau in den Proctortopf

7.6.1.1 Allgemein

Die Oberfläche der Bodenprobe wird mit einem Stahllineal glatt abgezogen und soll luftporenfrei sein. Nach dem Einbau soll eine Folie über der Oberfläche vor dem Austrocknen schützen.

7.6.1.2 Konsistenzzahl I_C 0,55 – 0,25

Das Bodenmaterial verdichtet man bei einer Konsistenzzahl $I_C < 0,55$ händisch bzw. mit einem Spatel. (siehe Kap. 7.5.4.).

7.6.1.3 Konsistenzzahl $I_C > 0,55$

Bei einer Konsistenzzahl $I_C > 0,55$ verdichtet man den Boden mit einem Proctorhammer. Den Proctortopf verdichtet man in drei Lagen mit 25 Schlägen. Die Fallhöhe und das Fallgewicht vom Proctorhammer sind 280 mm hoch und 2500 g schwer.

7.6.2 Vertiefung in der Bodenprobe

Nach Abnahme der Folie bohrt man eine Vertiefung mit dem Standbohrer in die glatte Oberfläche der Bodenprobe (siehe Abb. 19). Der Proctortopf samt Bodenprobe wird direkt unter dem Standbohrer gesetzt und zentriert. Den Standbohrer stellt man auf eine Umdrehungszahl von 100 Umdrehungen pro Minute ein. Nach der Bohrung bleibt eine kegelförmige Vertiefung in der Bodenprobe, sodass die gesamte Mantelfläche vom Konus Kontakt mit der Bodenprobe hat. Mit der Folie deckt man die Oberfläche der Bodenprobe bis zur Versuchsdurchführung an der einaxialen Druckmaschine ab.



Abb. 19: Kegelförmige Vertiefung in der Bodenprobe S bei weichem Boden

7.6.3 Aufbau des Konuszugversuches an der einaxialen Druckpresse

Um einen Überblick für den Versuchsablauf zu bekommen, ist eine Darstellung vom Konuszugversuch an der einaxialen Druckpresse abgebildet (siehe Abb. 20).

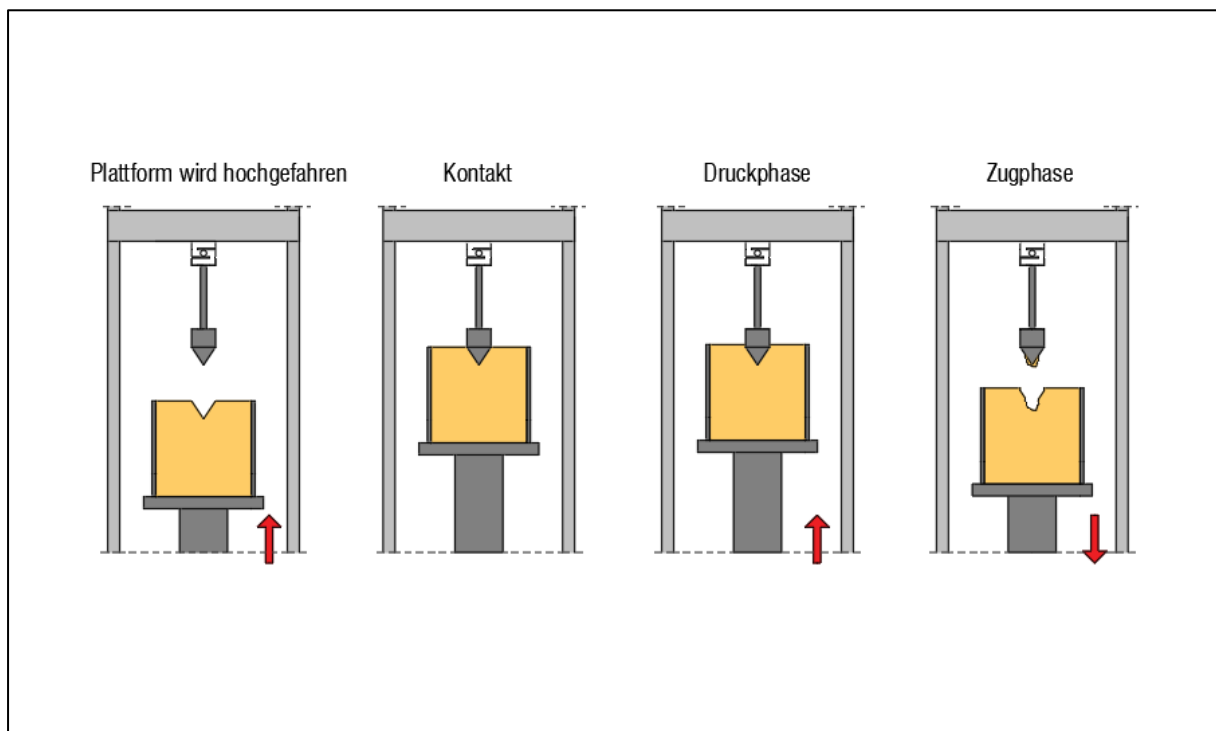


Abb. 20: Darstellung Konuszugversuch an der einaxialen Druckmaschine

Der Proctortopf mit dem Versuchsboden wird auf die Hebeplattform der einaxialen Druckmaschine gestellt. Am Querbalken oberhalb der Druckpresse kann die Kraftmessdose (KMD) mittig montiert werden. Am unteren Ende der KMD ist eine Verlängerungsstange mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 150 mm montiert. Am anderen Ende der Stange kann man den Konus durch ein Gewinde an der Verlängerungsstange anschrauben bzw. nach dem Versuch für das Abwiegen des Konus samt Bodenprobe abschrauben. Auf der Stange ist ein Wegaufnehmer für die Wegmessung montiert. Um den Weg messen zu können ist eine Stange samt Ausleger am Unterbau vom Proctortopf montiert (siehe Abb. 21).



Abb. 21: Einaxiale Druckmaschine

7.6.4 Versuchsdurchführung an der einaxialen Druckmaschine

7.6.4.1 Erstversuch

Die Hebeplattform von der Druckmaschine, an dem der Proctortopf samt Bodenprobe montiert ist, fährt manuell hoch, bis sich der Konus über der Vertiefung befindet. Die Programmierung wird gestartet. Die Kraftmessung wird auf 0 gesetzt. Die Probe fährt so lange in Richtung Konus, bis der Konus in der vom Konusbohrkopf erzeugten Vertiefung sitzt und eine Erstkontaktspannung von 5 KN/m^2 aufweist. Die Wegmessung wird auf null gestellt, die Erstkontaktspannung bleibt. Die Hebeplattform fährt 10 Minuten lang mit einer Geschwindigkeit von $0,2 \text{ mm/min}$ hoch und der Konus dringt 2 mm in die Bodenprobe ein. Daten der Druckphase werden gespeichert. Die Zugphase beginnt und der Weg wird neu tariert. Der Teller mit dem montierten Proctortopf senkt sich mit einer Geschwindigkeit von $5,83 \text{ mm/min}$, bis der Kontakt vom Konus und der Versuchsprobe bzw. vom angehafteten Boden am Konus und des Versuchsbodens nicht mehr vorhanden ist. Danach werden die Messdaten von der Zugphase gespeichert. Man stoppt die Routine und schaltet die einaxiale Druckpresse auf manuell und die Bodenprobe senkt sich mit einer Geschwindigkeit von 60 mm/min bis man den Konus ohne weiteren Kontakt mit der Bodenprobe abnehmen kann. Nach den 3 Versuchen wird eine Bodenprobe von ca. $100 - 150 \text{ g}$ vom Versuchsboden zur Wassergehaltsbestimmung entnommen.

7.6.4.2 Vergleichsversuch

Man fährt die Hebeplattform mit dem Proctortopf samt Bodenprobe hoch, bis sich der Konus ca. 5 mm oberhalb der Vertiefung befindet. Die Routine startet. Die Kraftmessung wird auf 0 gesetzt. Den Teller kann man durch die Handbedienung selbst steuern. Zuerst fährt man mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 mm/s die Vertiefung an. Wenn der Konus die Bodenprobe fast verschlossen hat, fährt man mit 0,1 mm/s in die Vertiefung, bis der Spalt verschlossen ist und sich eine Erstkontaktspannung aufgebaut hat. Die Wegmessung wird auf null gestellt. Die Hebeplattform, auf dem der Proctortopf mit dem Versuchsboden montiert ist, wird 10 Minuten lang mit einer Geschwindigkeit von 0,23 mm/min hochgefahren. Danach ist der Konus 2,3 mm in die Bodenprobe eingedrungen und die Routine wird gestoppt. Die Druckkraft nimmt auf 0 ab. Die Zugphase beginnt. Die Hebeplattform wird mit einer Geschwindigkeit von 5,83 mm/min gesenkt, bis der Kontakt vom Konus und der Versuchsprobe bzw. vom angehafteten Boden am Konus und des Versuchsbodens nicht mehr vorhanden ist. Danach werden die Messdaten gestoppt und gespeichert. Die einaxiale Druckpresse schaltet man auf manuell und der Teller samt Bodenprobe senkt sich mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s bis man den Konus ohne weiteren Kontakt mit der Bodenprobe abnehmen kann. Der Versuch wird mindestens 3-mal durchgeführt. Nach dem 2. Versuch entnimmt man 100 – 150 g von der Bodenprobe, um den Wassergehalt im Zeitraum der Versuchsdurchführung zu bestimmen.

7.6.4.3 Die Verklebung

In Abb. 22 ist die Verklebung von der Bodenprobe am Konus zu sehen. Man demontiert den Konus mit der angehafteten Bodenprobe von der Stange und wiegt ihn samt Verklebung ab. Die Masse der Anhaftung kann ermittelt und auf die Mantelfläche bezogen werden. Somit ergibt sich die „Verklebung“.

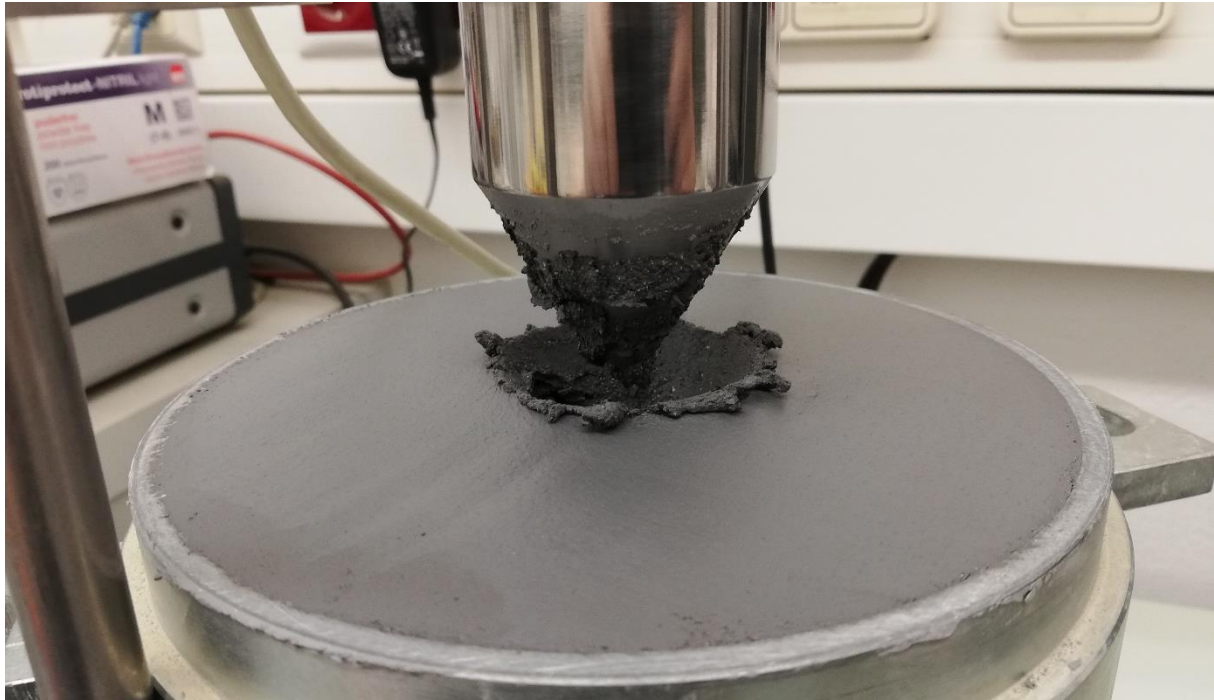


Abb. 22: Verklebung der Bodenprobe S am Konus

7.7 Auswertung der Erstversuche vom Konuszugversuch der Bodenprobe T, Bodenprobe S und Bodenprobe N

Die Erstversuche sind an drei Bodenarten dreimal pro Konsistenz des jeweiligen Bodens getestet worden. Davon war der Mittelwert zu nehmen. Ausreißer wurden in der Auswertung berücksichtigt und nicht miteinbezogen. Die Konsistenzzahlen sind auf eine Genauigkeit von 0,05 gerundet. Die Daten von der Druckmaschine sind als txt. Datei im Programm Microsoft Excel geladen und dort entsprechend mit Diagrammen ausgewertet.

7.7.1 Druckspannung-Weg Diagramm

7.7.1.1 Allgemein

Die Mittelwerte der Druckspannung der jeweiligen Konsistenzzahl über dem Weg sind grafisch dargestellt. Die Druckspannungen über dem Weg verhalten sich nahezu linear. Je tiefer man den Konus in die Bodenprobe hineindrückt, desto höher sind die Druckspannungen. Der aufgezeichnete Weg ist 2 mm.

7.7.1.2 Bodenprobe T

Bei dieser Bodenprobe ist zu erkennen, dass die Druckspannung bei hoher Konsistenzzahl steigt. Die höchste Druckspannung liest man bei $I_C = 0,6$ ab. Dieser Wert liegt bei 27 KN/m². Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,3$ und beträgt 12 KN/m² (siehe Abb. 23)

7.7.1.3 Bodenprobe S

Auch bei dieser Bodenprobe ist zu erkennen, dass die Druckspannung bei hoher Konsistenzzahl steigt. Die höchste Druckspannung liest man bei $I_C = 0,6$ ab. Dieser Wert liegt bei 23,9 KN/m². Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,3$ und beträgt 8,5 KN/m². (siehe Abb. 24)

7.7.1.4 Bodenprobe N

Die höchste Druckspannung liest man bei $I_C = 0,5$ ab. Dieser Wert liegt bei 28,2 KN/m². Der niedrigste Wert ist bei bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,3$ und beträgt 14,0 KN/m². (siehe Abb. 25) Durch zu geringe Bodenmasse von Bodenprobe N, musste der Boden immer wieder getrocknet werden und auf die neue Konsistenzzahl gebracht werden.

Bodenprobe T

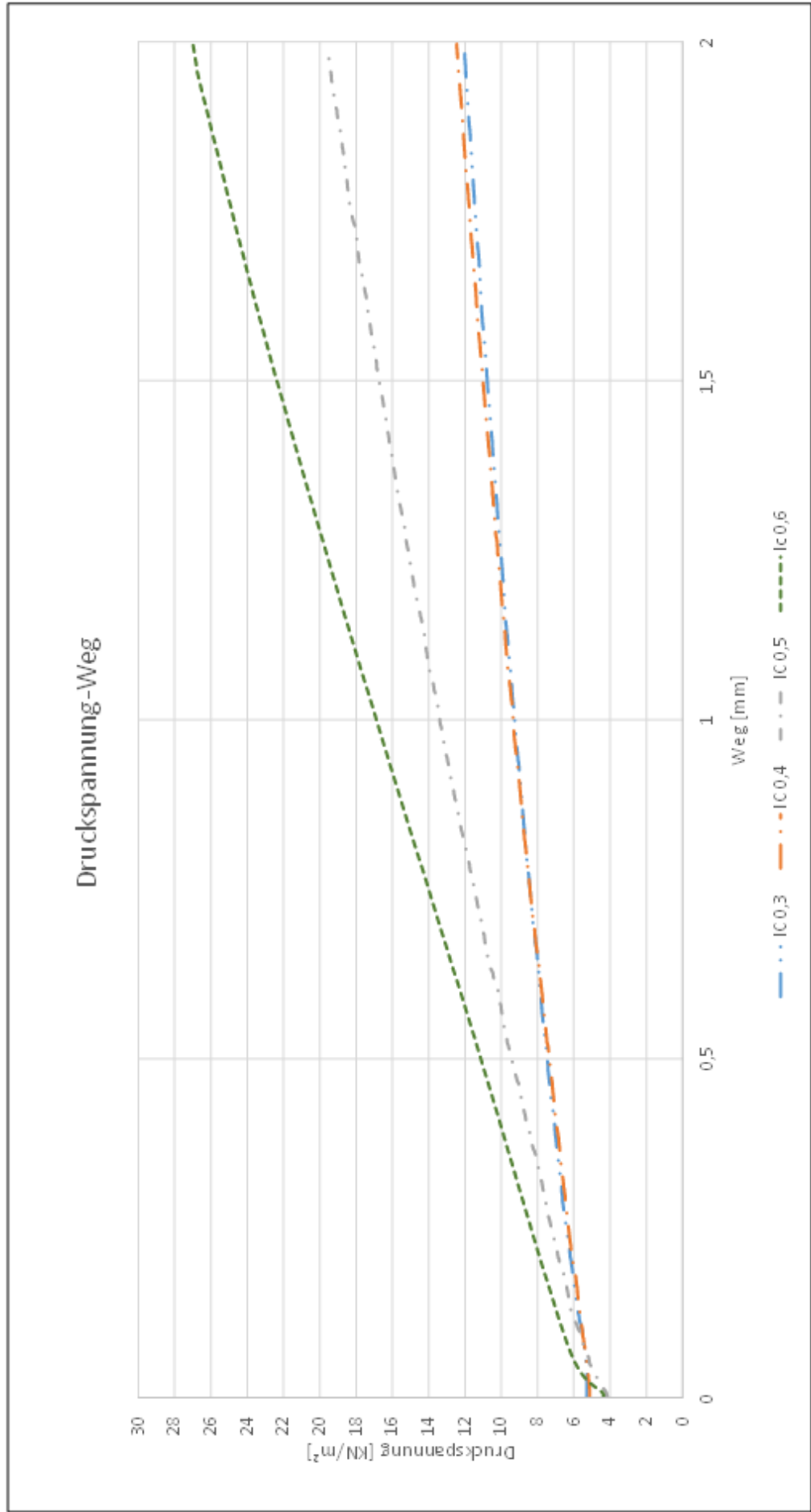


Abb. 23: Druckspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe T

Bodenprobe S

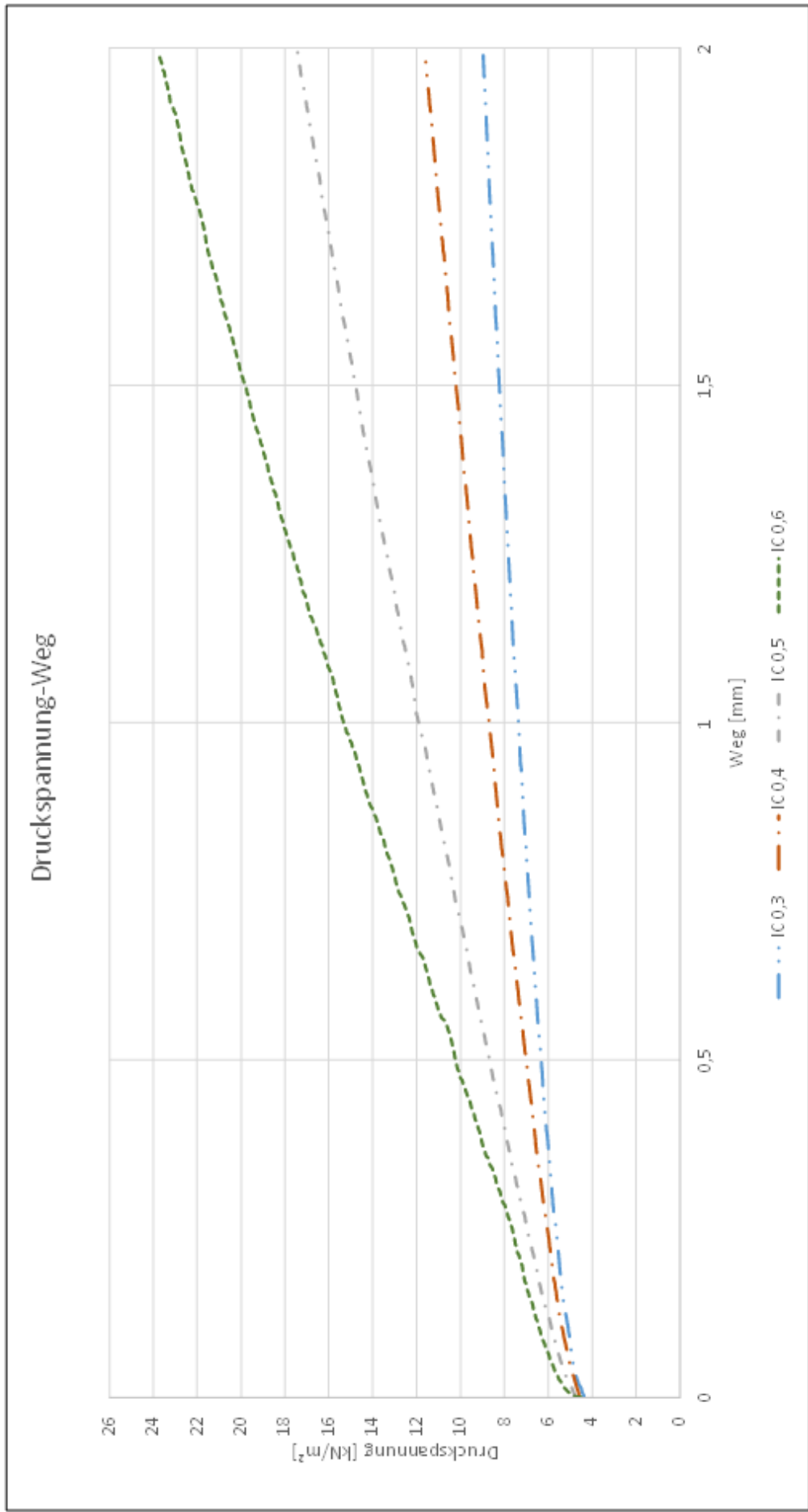


Abb. 24: Druckspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe S

Bodenprobe N

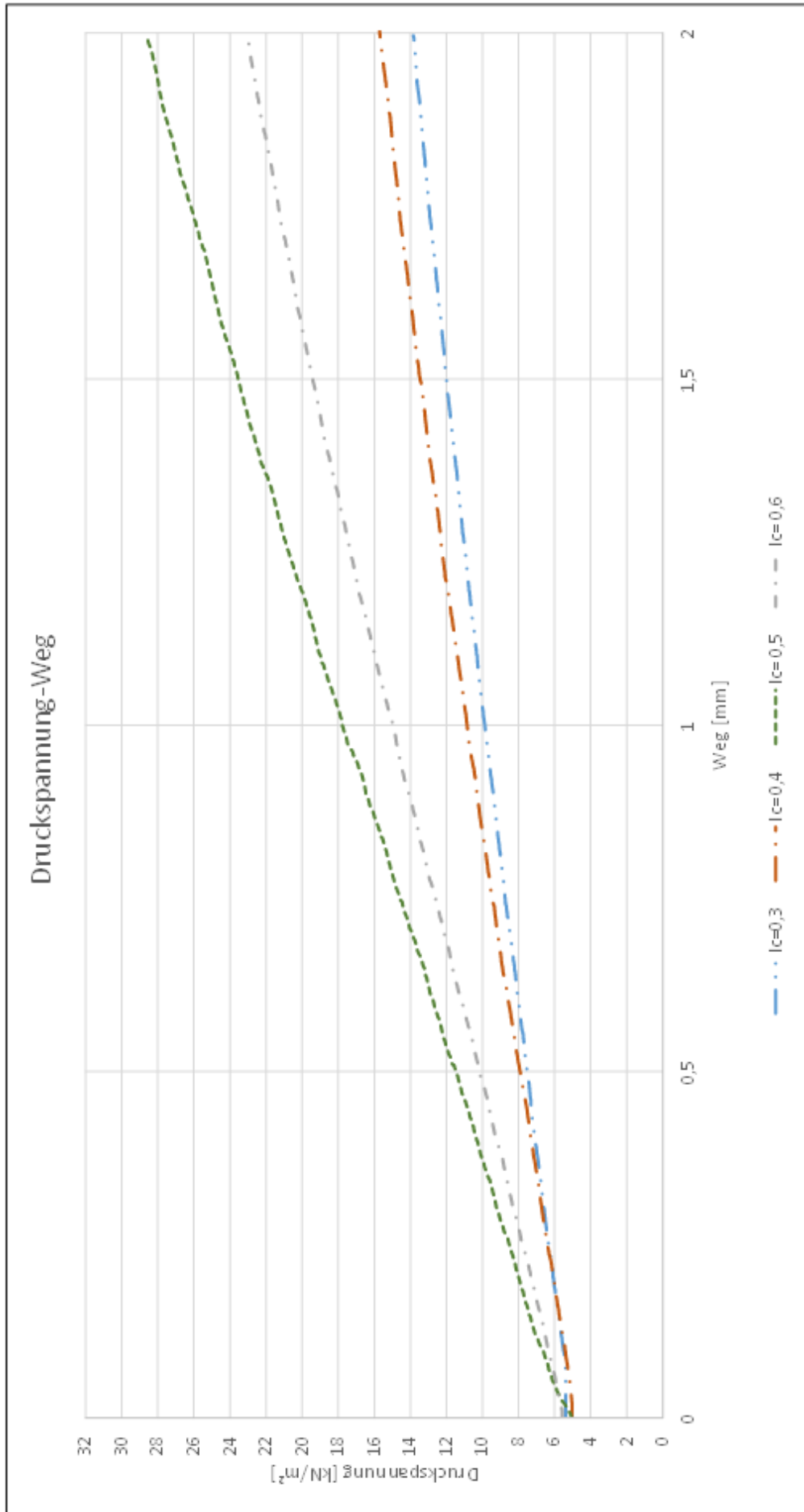


Abb. 25: Druckspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe N

7.7.2 Zugspannung-Weg Diagramm

7.7.2.1 Allgemein

Die Mittelwerte der Zugspannung der jeweiligen Konsistenzzahl über dem Weg sind grafisch dargestellt. Die Zugspannung fängt im Ursprung des Koordinatensystems an und steigt sehr schnell an. Die höchste Zugspannung entsteht kurz vor dem Abreisen des Bodenmaterials vom Konus bzw. vom anhaftenden Material am Konus und dem eingebauten Boden im Proctortopf. Die Kurve fällt nach dem Abreißen wieder ab und bekommt einen konstanten Wert. Bei diesen Werten sind noch die Aufzeichnung der Druckspannung vorhanden. Eine Korrektur wurde bei den Vergleichsversuchen durchgeführt. (siehe Kap. 7.9.4).

7.7.2.2 Bodenprobe T

Die höchste abgelesene Zugspannung ergibt sich bei der Konsistenzzahl $I_C = 0,5$ und ist 25 KN/m^2 (siehe Abb. 26).

7.7.2.3 Bodenprobe S

Die höchste abgelesene Zugspannung ergibt sich bei der Konsistenzzahl $I_C = 0,6$ und ist 35 KN/m^2 (siehe Abb. 27).

7.7.2.4 Bodenprobe N

Die höchste abgelesene Zugspannung ergibt sich bei der Konsistenzzahl $I_C = 0,5$ und ist 29 KN/m^2 (siehe Abb. 28).

Bodenprobe T

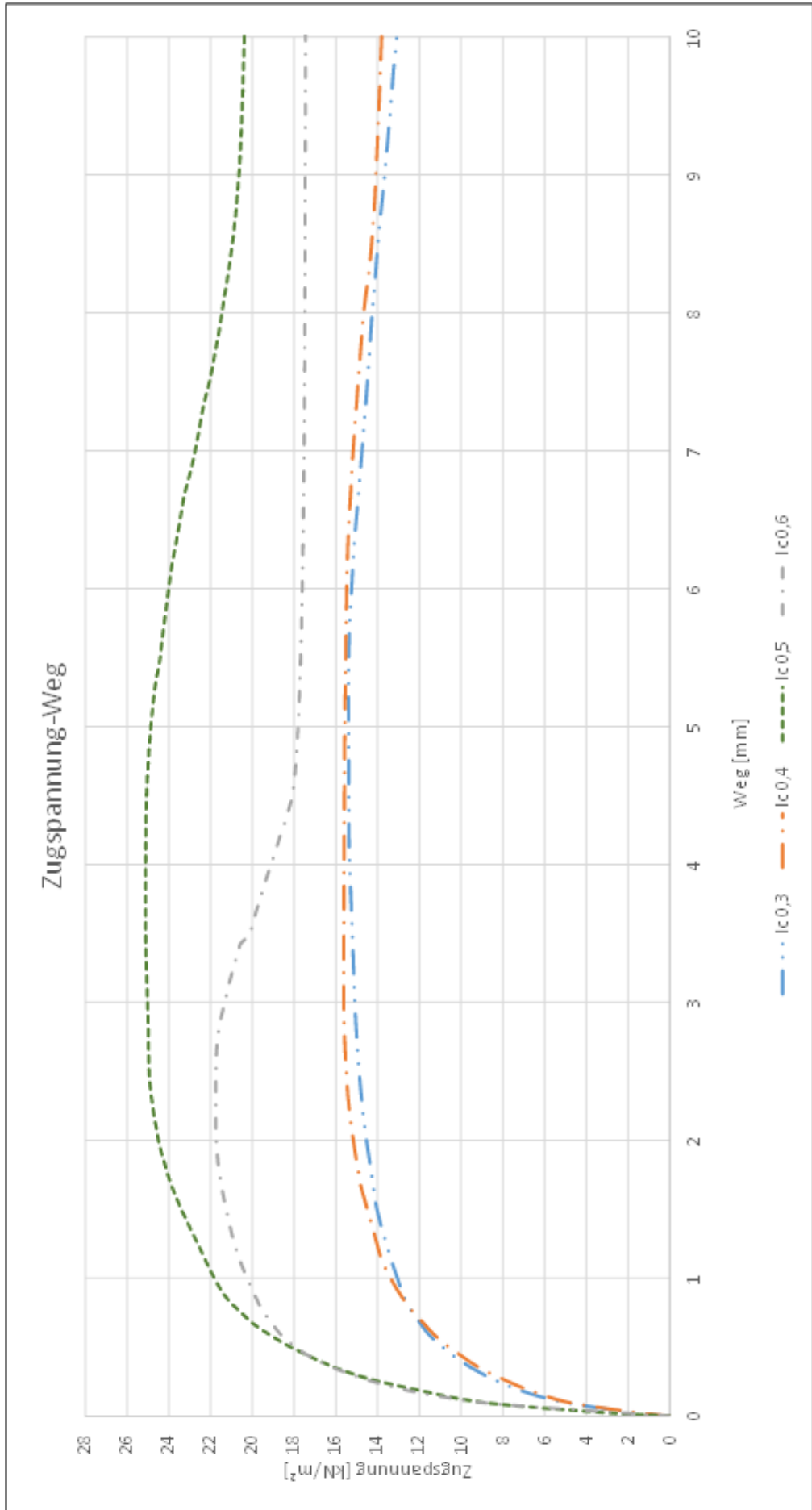


Abb. 26: Zugspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe T

Bodenprobe S

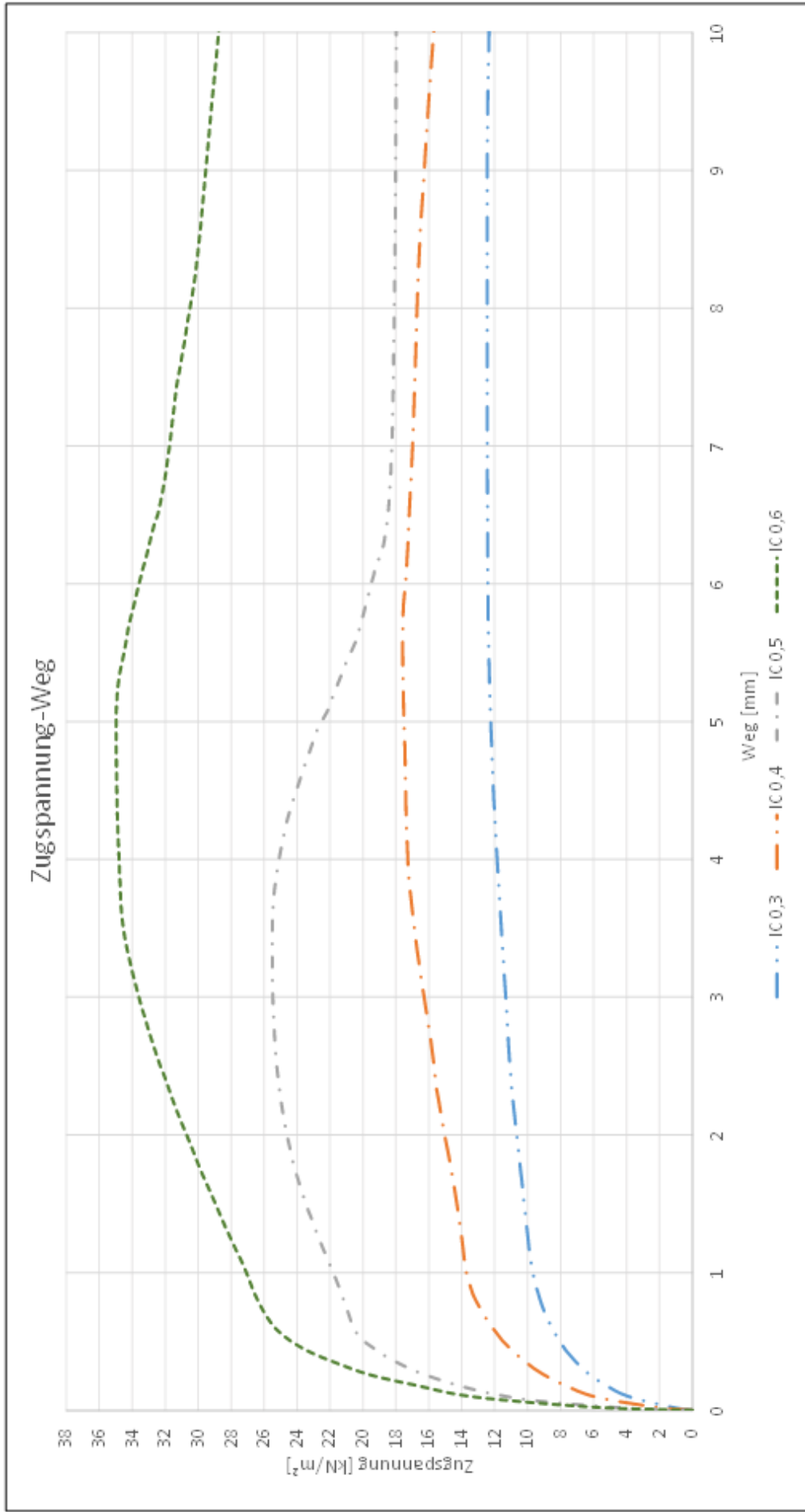


Abb. 27: Zugspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe S

	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND NUMERISCHE GEOTECHNIK GEOTECHNISCHES LABOR A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA
	

Bodenprobe N

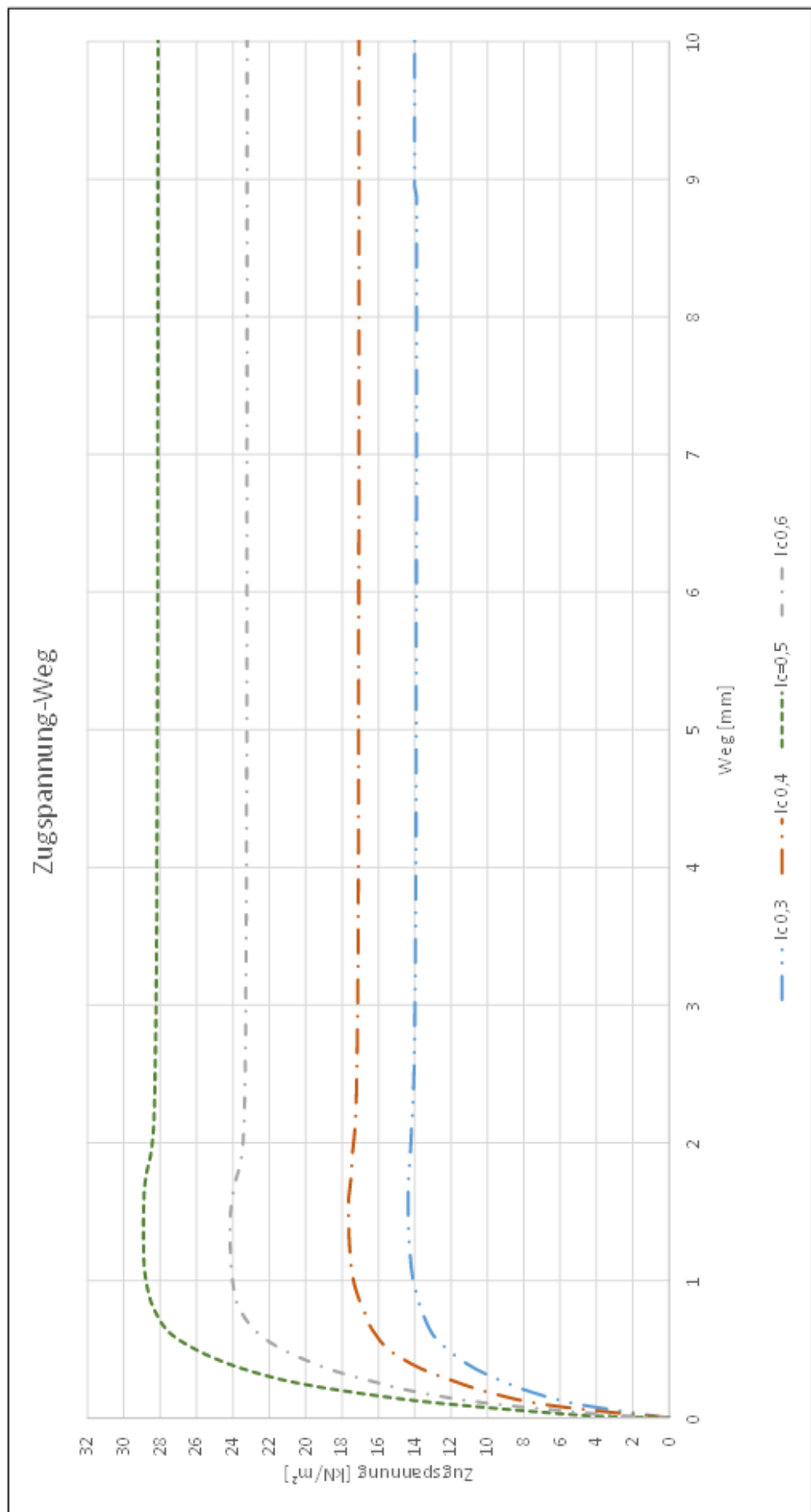


Abb. 28: Zugspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe N

7.7.3 Verklebung

7.7.3.1 Allgemein

Der anhaftende Boden ist auf die Mantelfläche ($37,05 * 10^{-4}m^2$) vom Konus bezogen. Daraus ergibt sich die Verklebung. Der Mittelwert von 3 durchgeführten Versuchen je Konsistenz ist ausgewertet (siehe Abb. 29 und Abb. 30). Die Konsistenzzahlen wurden miteinander verbunden, um so einen gesamten Verlauf der Verklebung darzustellen. Die Verbindungslinie der Konsistenzzahlen sind knickfrei. Die dazwischenliegenden Werte sind prognostiziert.

7.7.3.2 Bodenprobe T

Die größte Verklebung bei dieser Bodenprobe ist bei Konsistenzzahl $I_C = 0,50$. Die Anhaftung ist 828 g/m^2 (siehe Abb. 30). Nach der Konsistenzzahl $I_C = 0,35$ steigt die Kurve bis $I_C = 0,50$ stark an und fällt zur nächsten Konsistenzzahl von $I_C = 0,60$ ab. Zwischen der Konsistenzzahl $I_C = 0,35$ und $I_C = 0,60$ gibt es die höchste Verklebung.

7.7.3.3 Bodenprobe S

Die größte Verklebung der Bodenprobe S ist beim durchgeführten Versuch der Konsistenzzahl $I_C = 0,40$. Die Anhaftung ist 1781 g/m^2 (siehe Abb. 31). Der Höchstwert liegt bei einer Konsistenzzahl zwischen $I_C = 0,20$ und $I_C = 0,50$.

7.7.3.4 Bodenprobe N

Bodenprobe N weist keine Verklebungen auf.

Bodenprobe T

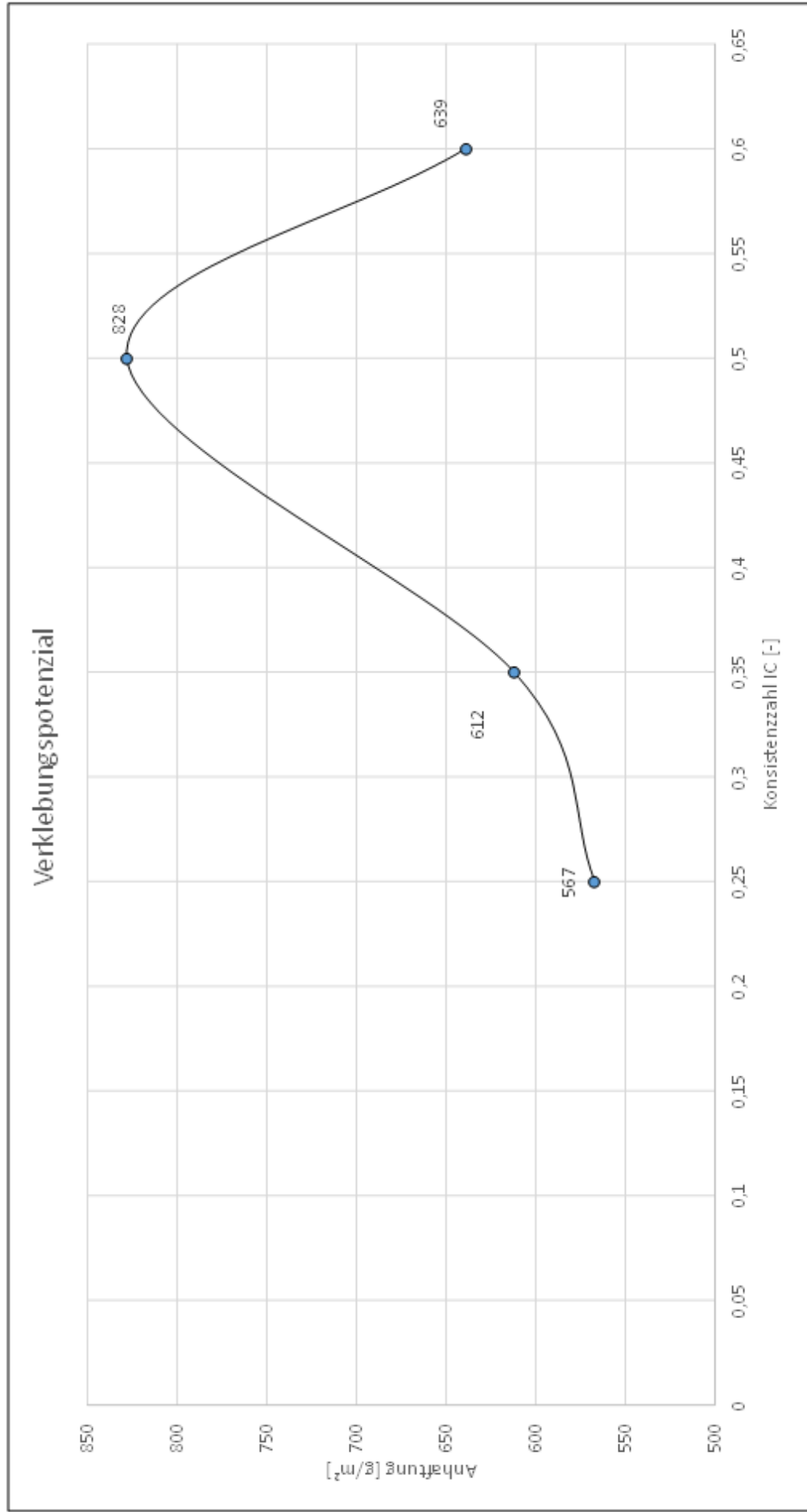


Abb. 29: Verklebungspotenzial von Bodenprobe T

Bodenprobe S

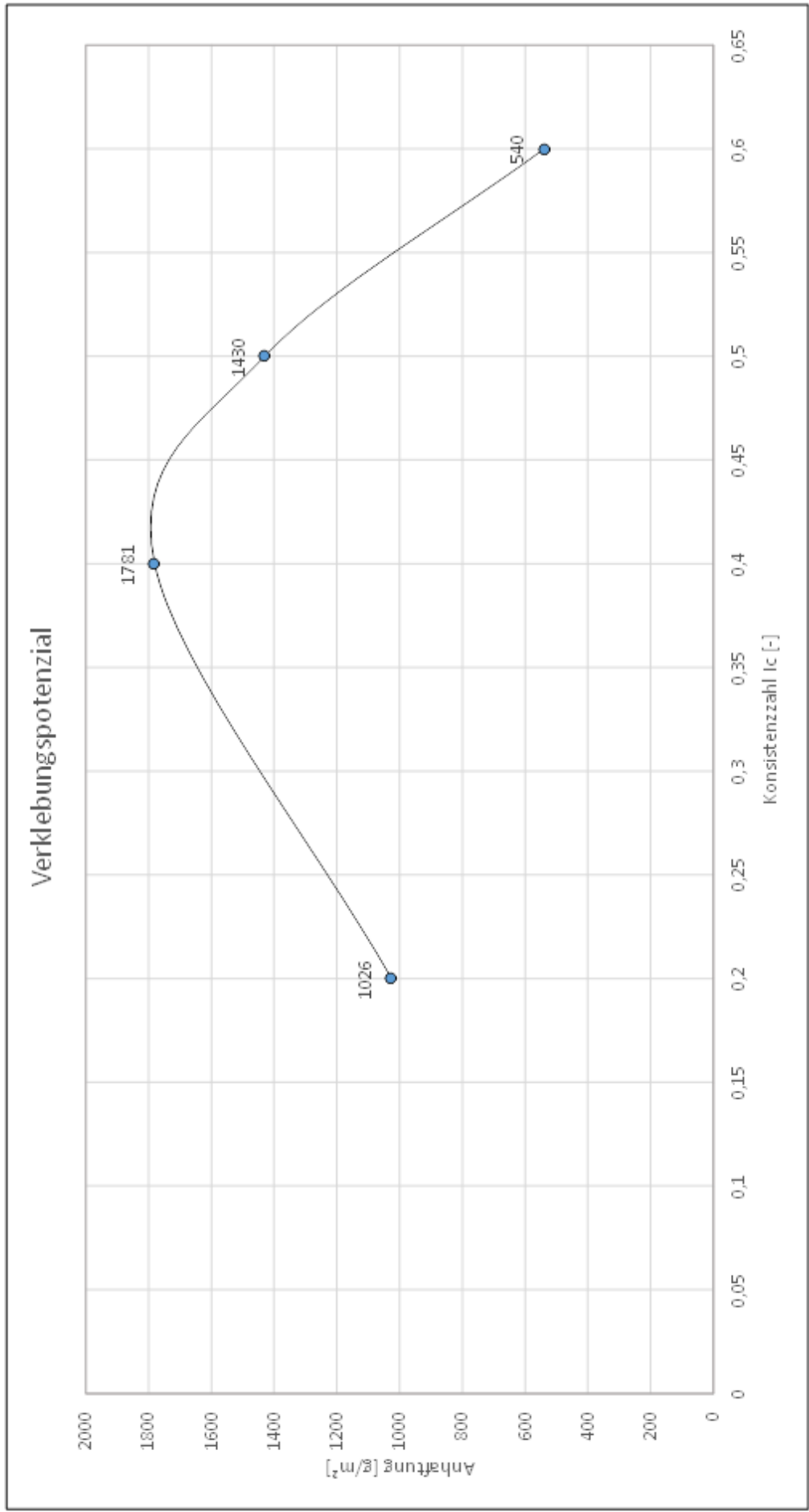


Abb. 30: Verklebungspotenzial von Bodenprobe S

7.8 Auswertung Maximalwerte der jeweiligen Böden

Die maximale Zugspannung, Druckspannung und Verklebung der jeweiligen Böden sind verglichen worden.

7.8.1 Maximale Druckspannung der jeweiligen Böden

Die Druckspannungen sind nahezu linear. Je tiefer der Konus in die Bodenprobe eindringt, desto höher sind die Druckspannungen. Die höchste Druckspannung gab es bei Bodenprobe N mit einer Konsistenzzahl von 0,5 mit $28,8 \text{ kN/m}^2$ (siehe Abb. 31).

7.8.2 Maximale Zugspannung der jeweiligen Böden

Die Maximale Zugspannung erreichte die Bodenprobe S mit der Konsistenzzahl 0,6 und einen Wert von 35 KN/m^2 (siehe Abb. 32).

7.8.3 Maximale Verklebung der jeweiligen Böden

Das Verklebungspotenzial ist bei Bodenprobe S deutlich höher. Die Verklebung am Konus von Bodenprobe S ist mehr als das Doppelte, als von der Bodenprobe T. Es ist zu erkennen, dass auch die Werte von Bodenprobe S bei einer Konsistenzzahl von 0,3 und 0,5 höher sind als die Maximalverklebung der Bodenprobe T.

Maximalwerte

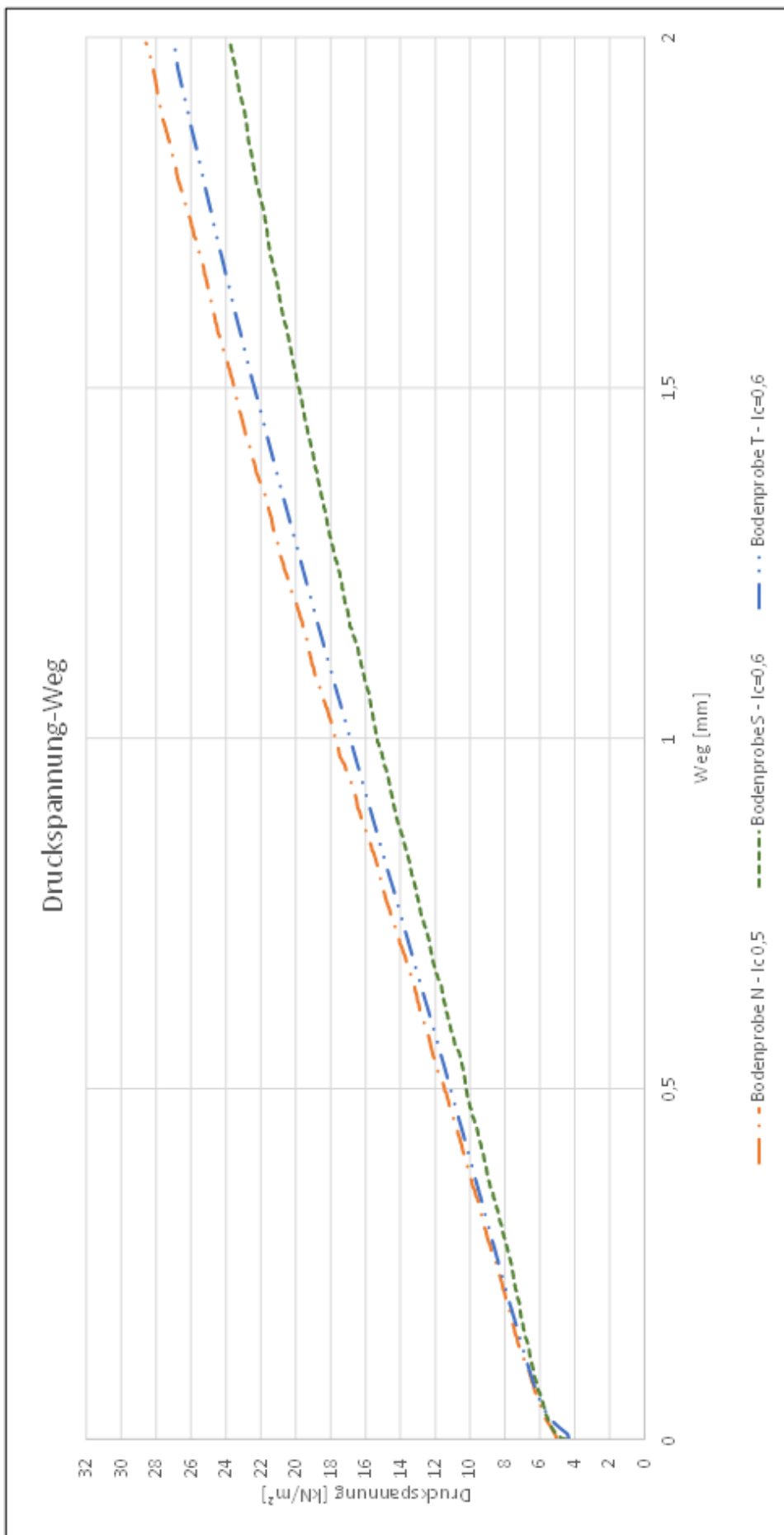


Abb. 31: Druckspannung - Weg Maximalwerte

Maximalwerte

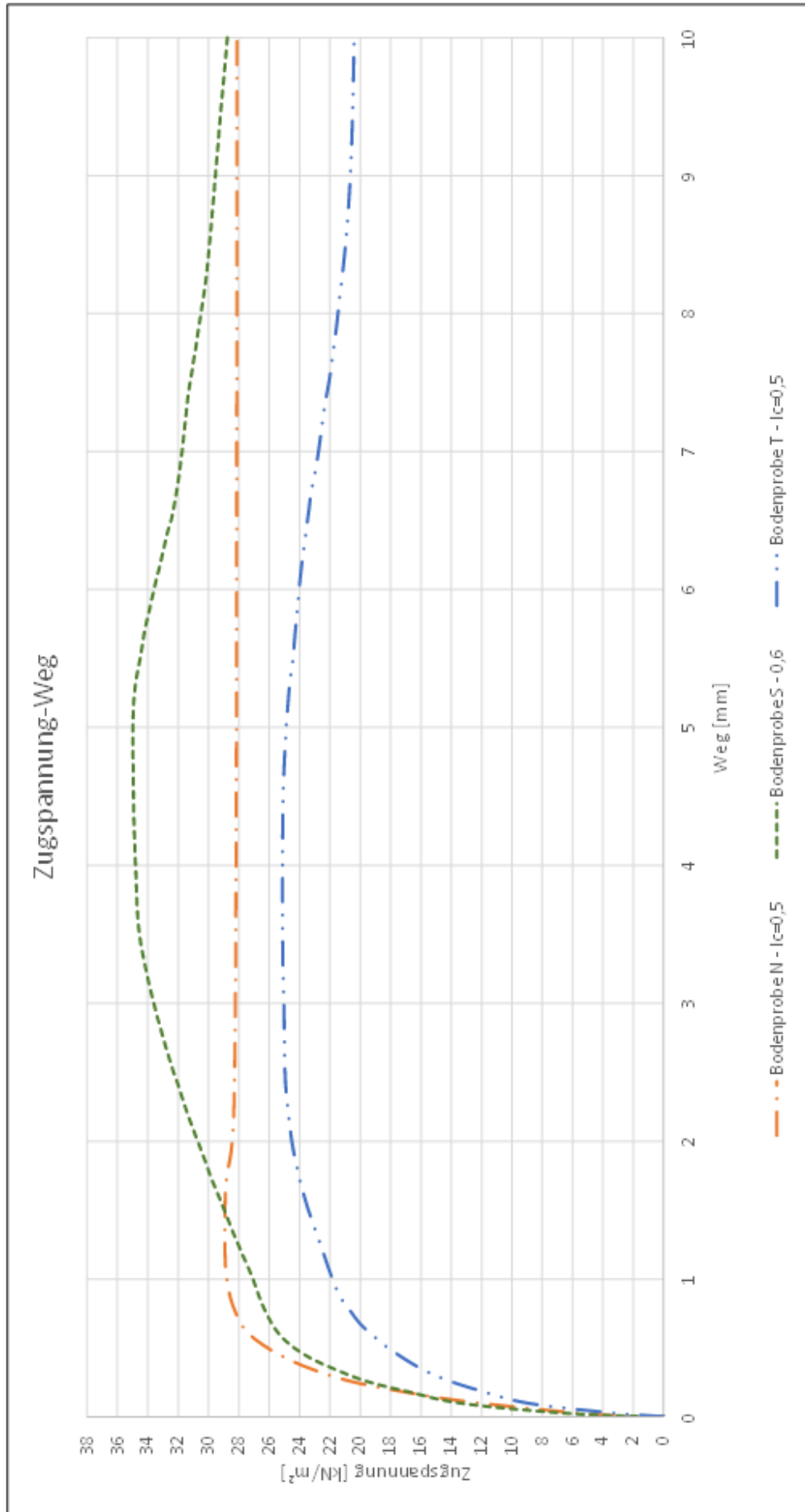


Abb. 32: Zugspannung - Weg Maximalwerte

Maximalwerte

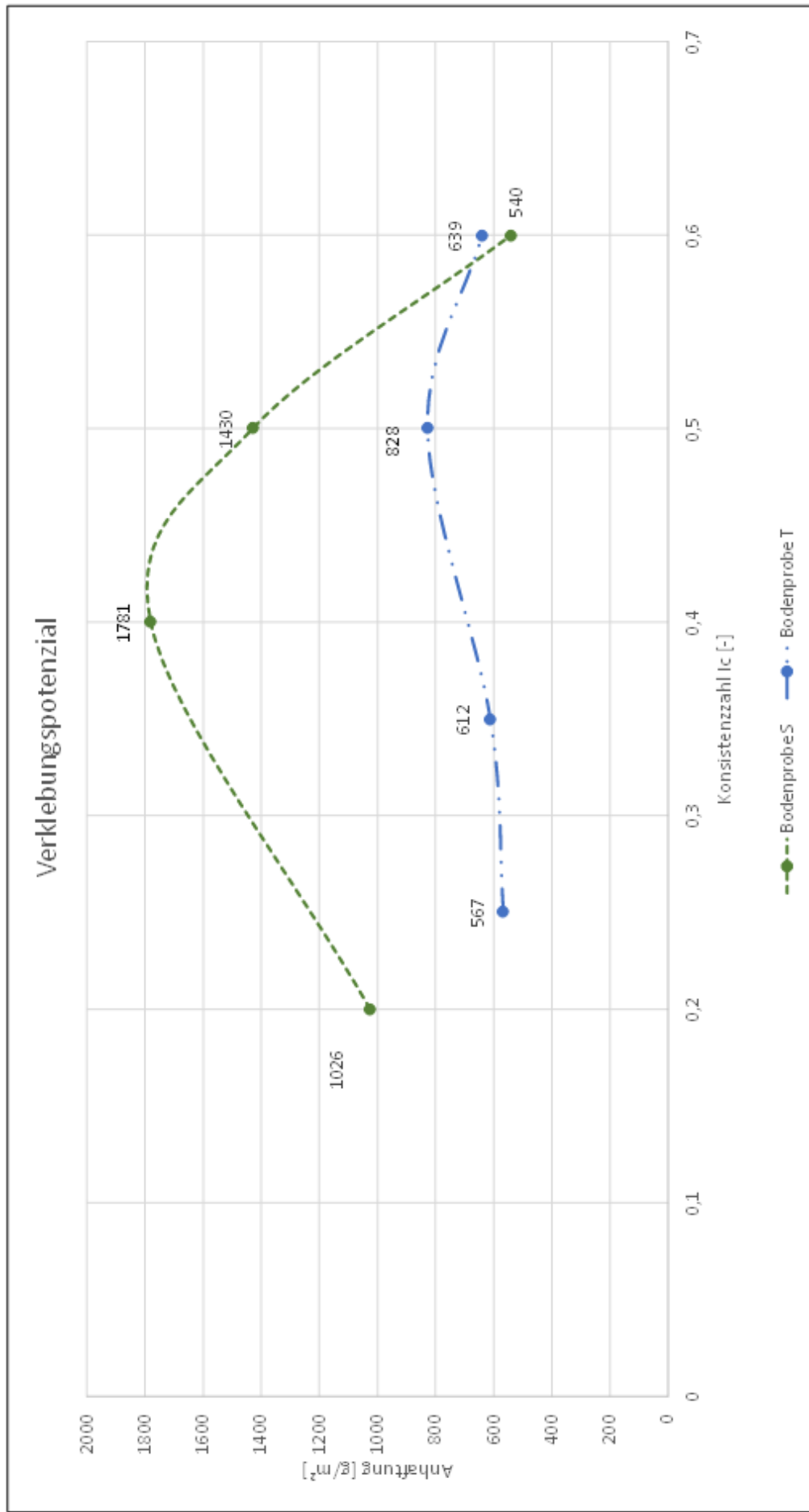


Abb. 33: Verklebung Maximalwerte

7.9 Vergleichsuntersuchung mit Universität Aachen

7.9.1 Allgemein

Es wurden 2 Bodenarten mit der RWTH Aachen University, Geotechnik im Bauwesen verglichen. Einmal die Bodenprobe S mit neuen Konsistenzahlen und einmal die Bodenprobe R. Die Bodenprobe S wurde für Vergleichsversuche nach Aachen verschickt und die Bodenprobe R ist von der Universität Aachen zu uns geschickt worden. Die Böden sind auf Konsistenzahlen zwischen 0,25 und 0,85 in ca. 0,15er Schritte zu bringen. Bei hohem Verklebungspotenzial kann noch ein Versuch mit einer Konsistenzahl unter $I_c = 0,25$ durchgeführt werden.

Die 2 Bodenarten hat man 3-mal pro Konsistenz des jeweiligen Bodens getestet. Davon war der Mittelwert zu nehmen. Die Einzelversuche sind bei der Verklebung sowie bei der Auswertung von Zugspannung - Konsistenzahl und Druckspannung - Konsistenzahl dargestellt, um die Streuung der Einzelwerte zu sehen. Die Auswertungen sind mit dem Programm Excel durchgeführt.

7.9.2 Druckspannung-Weg Diagramme

7.9.2.1 Allgemein

In dieser Auswertung ist die Erstkontaktspannung aufgezeichnet. Je fester der Boden ist, desto mehr Widerstand ergibt sich beim Einsetzen des Konus in die geeignete Vertiefung. Die Erstkontaktspannung ist bei hohen Konsistenzahlen höher. Je höher die Konsistenzahl ist, desto größer ist die Druckspannung. Der maximale Weg der Druckspannung ist 2,3 mm. Der Verlauf der Druckspannung über den Weg ist in Abb. 34 und Abb. 35 zu sehen. Die Maximalwerte sind in den Druckspannung – Konsistenzahl Diagrammen dargestellt und abzulesen (siehe Abb. 36 und Abb. 37).

Bodenprobe S

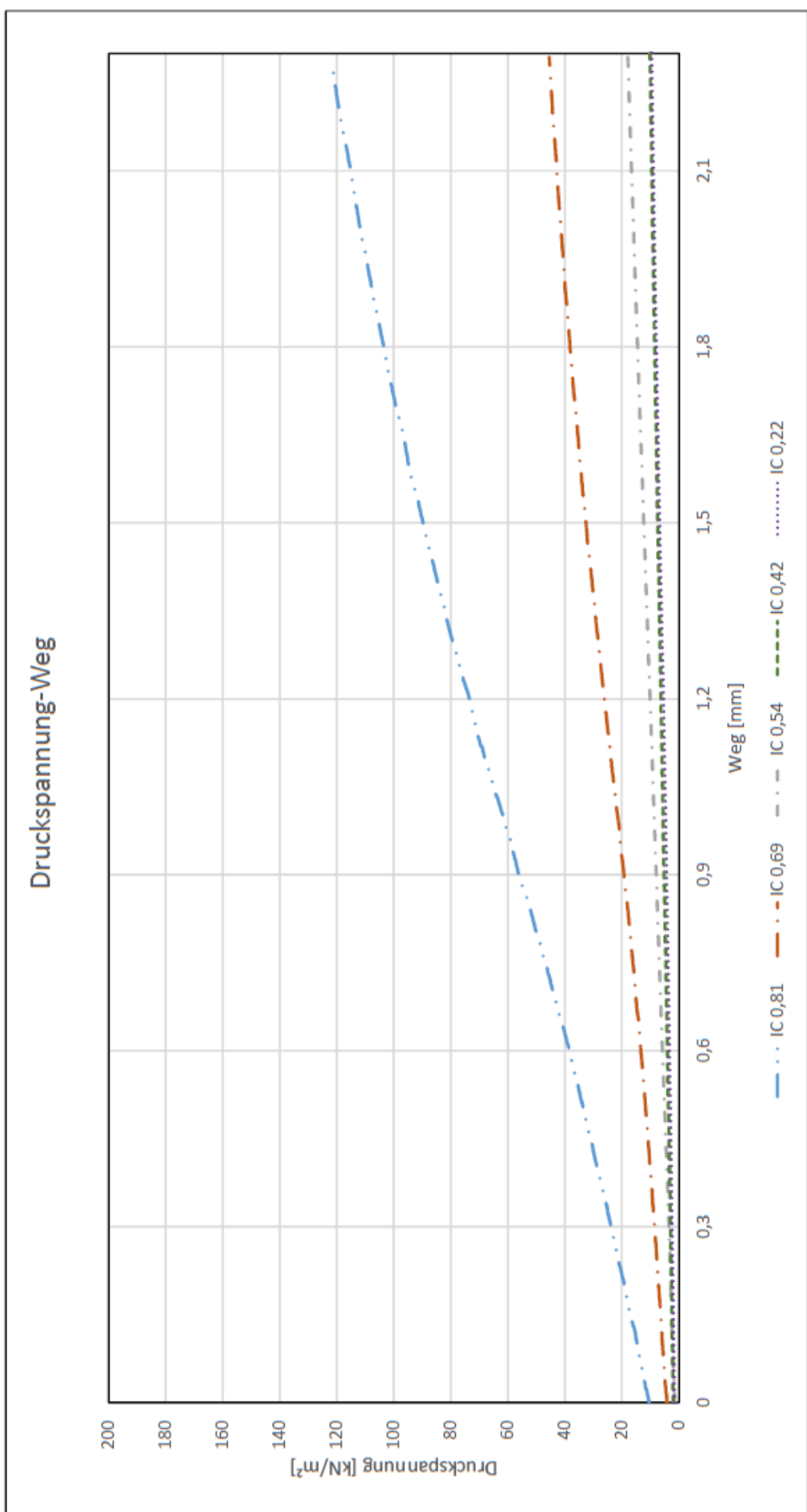


Abb. 34: Druckspannung - Weg von Tonprobe S (Vergleichsversuch)

Bodenprobe R

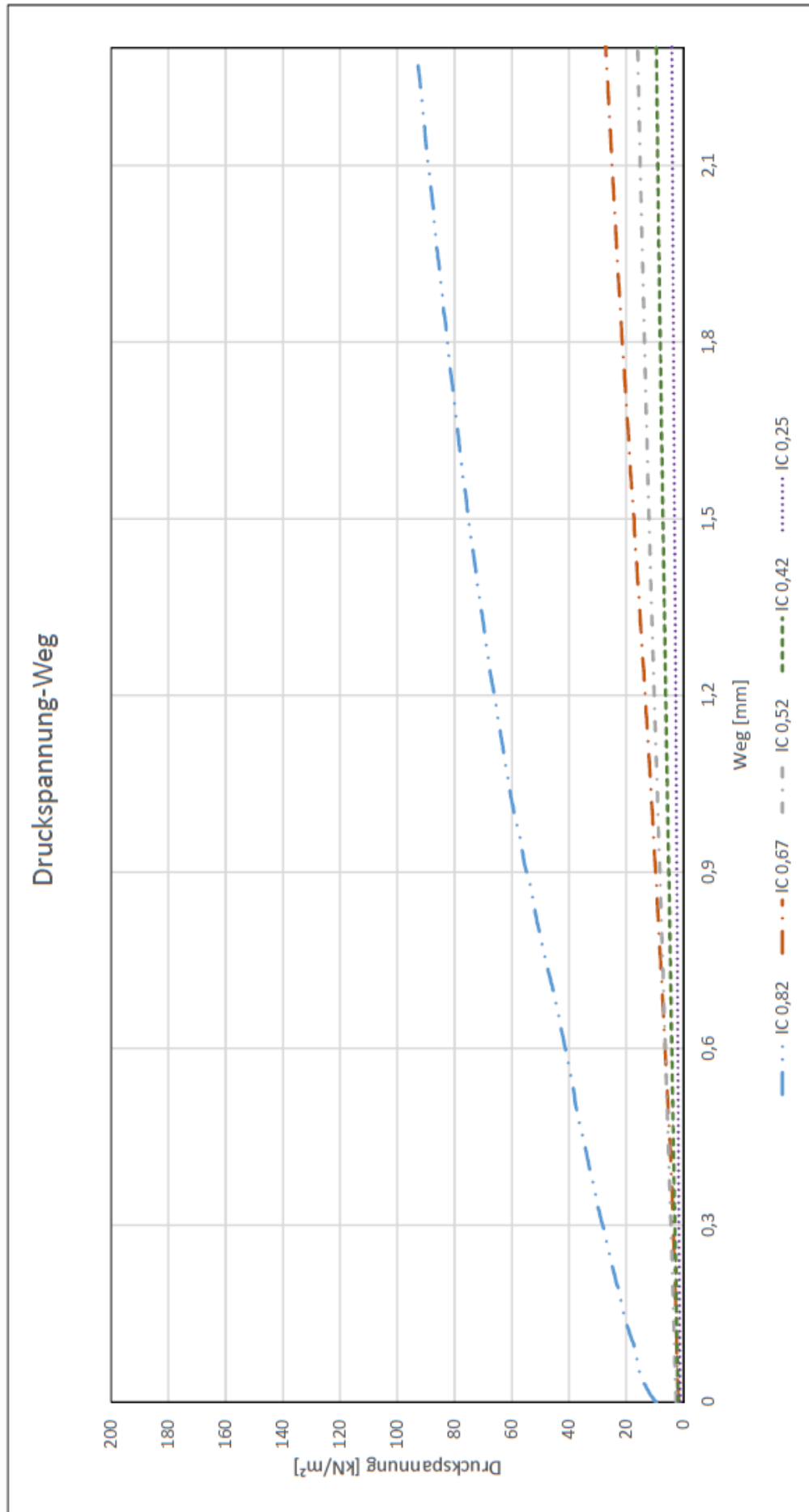


Abb. 35: Druckspannung - Weg von Bodenprobe R

7.9.3 Druckspannung- Konsistenzzahl Diagramme

7.9.3.1 Allgemein

Um die Maximalspannungen der jeweiligen Konsistenzzahl besser darzustellen, wurden Druckspannung-Konsistenz Diagramme erstellt (siehe Abb. 36 und Abb. 37). Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Druckspannung mit der Konsistenzzahl steigt. In den Auswertungen ist Druckspannung negativ dargestellt.

7.9.3.2 Bodenprobe S

Die höchste Druckspannung liest man bei $I_c = 0,81$ ab. Der Mittelwert liegt von dieser Konsistenzzahl ist $-121,8 \text{ KN/m}^2$. Die Streuung ist bei dieser Konsistenzzahl auch am höchsten. Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_c = 0,22$ und der Mittelwert davon beträgt $-9,6 \text{ KN/m}^2$ (siehe Abb. 36).

7.9.3.3 Bodenprobe R

Die höchste Druckspannung liest man bei $I_c = 0,83$ ab. Dort ist wieder zu höchste Streuung zu sehen. Dieser Mittelwert liegt bei $-92,9 \text{ KN/m}^2$. Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_c = 0,23$ und beträgt $-4,1 \text{ KN/m}^2$ (siehe Abb. 37).

Bodenprobe S

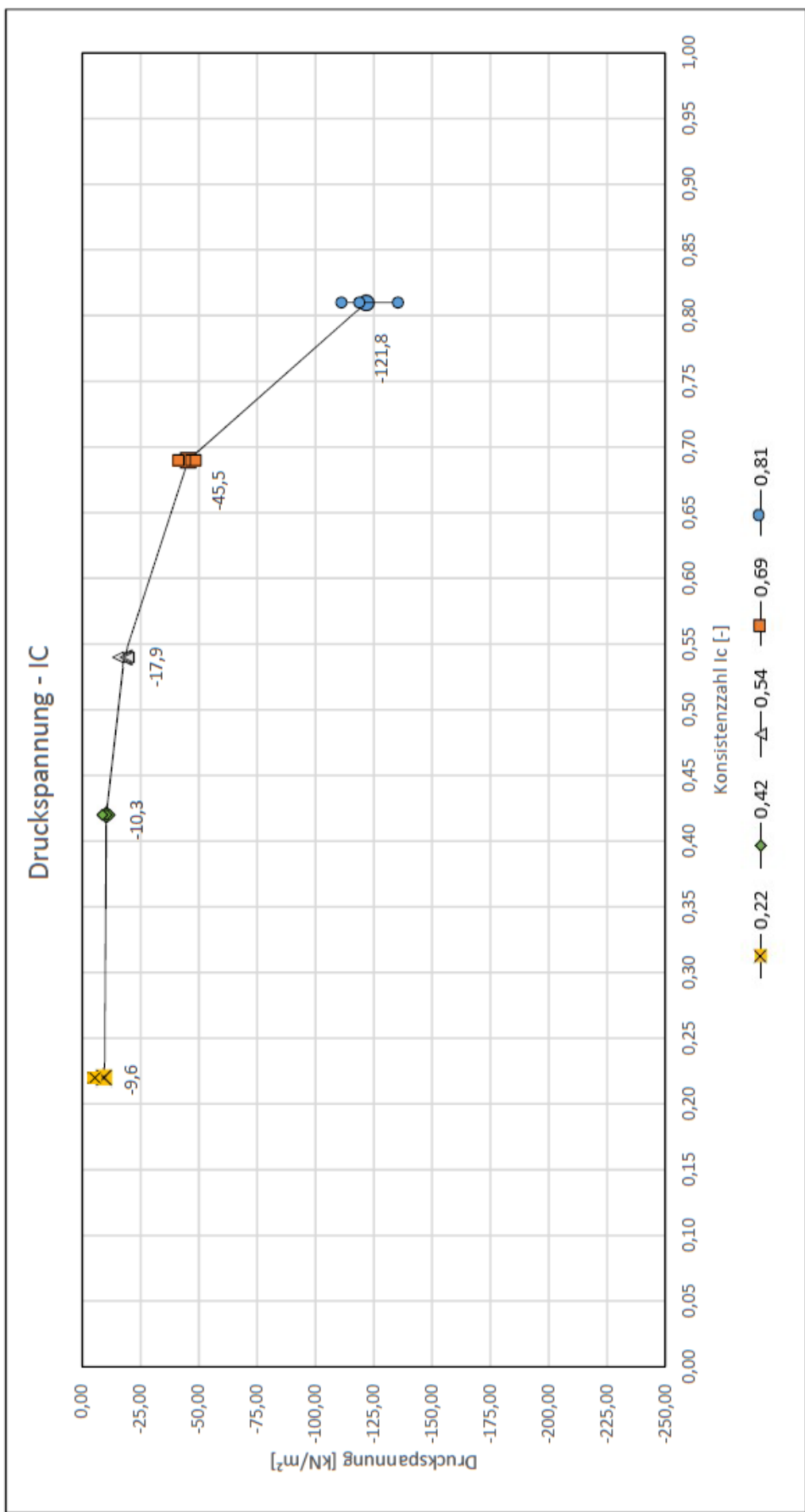


Abb. 36: Druckspannung - IC von Bodenprobe S

Bodenprobe R

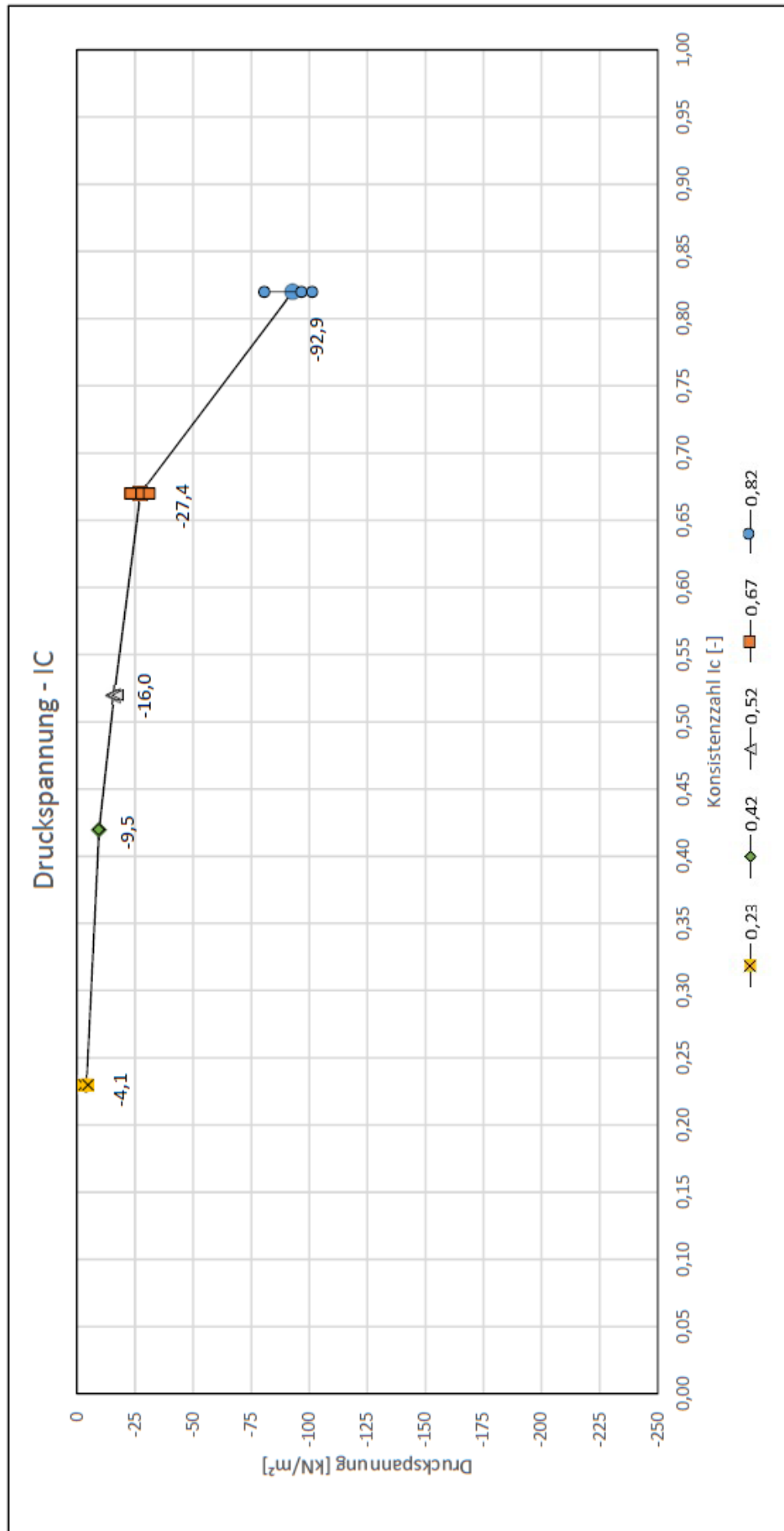


Abb. 37: Druckspannung - IC von Bodenprobe R

7.9.4 Zugspannung-Weg Diagramme

7.9.4.1 Allgemein

In der Zugphase steigt die Kurve bis zu einem Maximalwert rasant an. Die Kurve fällt nach dem Höhepunkt ab und geht je nach Konsistenzzahl flach bzw. steil in Richtung 0. Ein kleiner Restwert in der Zugspannung bleibt welches ein Teilgewicht vom Konus selbst ist, da dieser auf der Kraftmessdose montiert ist. Je höher die Konsistenzzahl, desto höher ist die Zugspannung.

7.9.4.2 Bodenprobe S

Bei niedriger Konsistenzzahl dauert die Zugphase länger. Der Konus zieht das Bodenmaterial aus der Vertiefung heraus. Hier ist zu erkennen, dass die Zugphase bei niedriger Konsistenzzahl einen deutlich längeren Weg hat. Je niedriger die Konsistenzzahl, desto niedriger die Zugspannung, desto länger die Zugphase.

7.9.4.3 Bodenprobe R

Auch in dieser Auswertung ist zu erkennen, dass je höher die Konsistenzzahl vom Boden ist, desto höher ist die Zugspannung. Bei den Konsistenzzahlen $I_C = 0,23$ und $I_C = 0,42$ liegt die Verklebung bei fast 0. Dadurch ergibt sich auch keine langandauernde bzw. hohe Zugphase, da kein Material am Konus haftet. Deshalb ist diese Zugspannung sehr gering und kurzandauernd.

Bodenprobe S

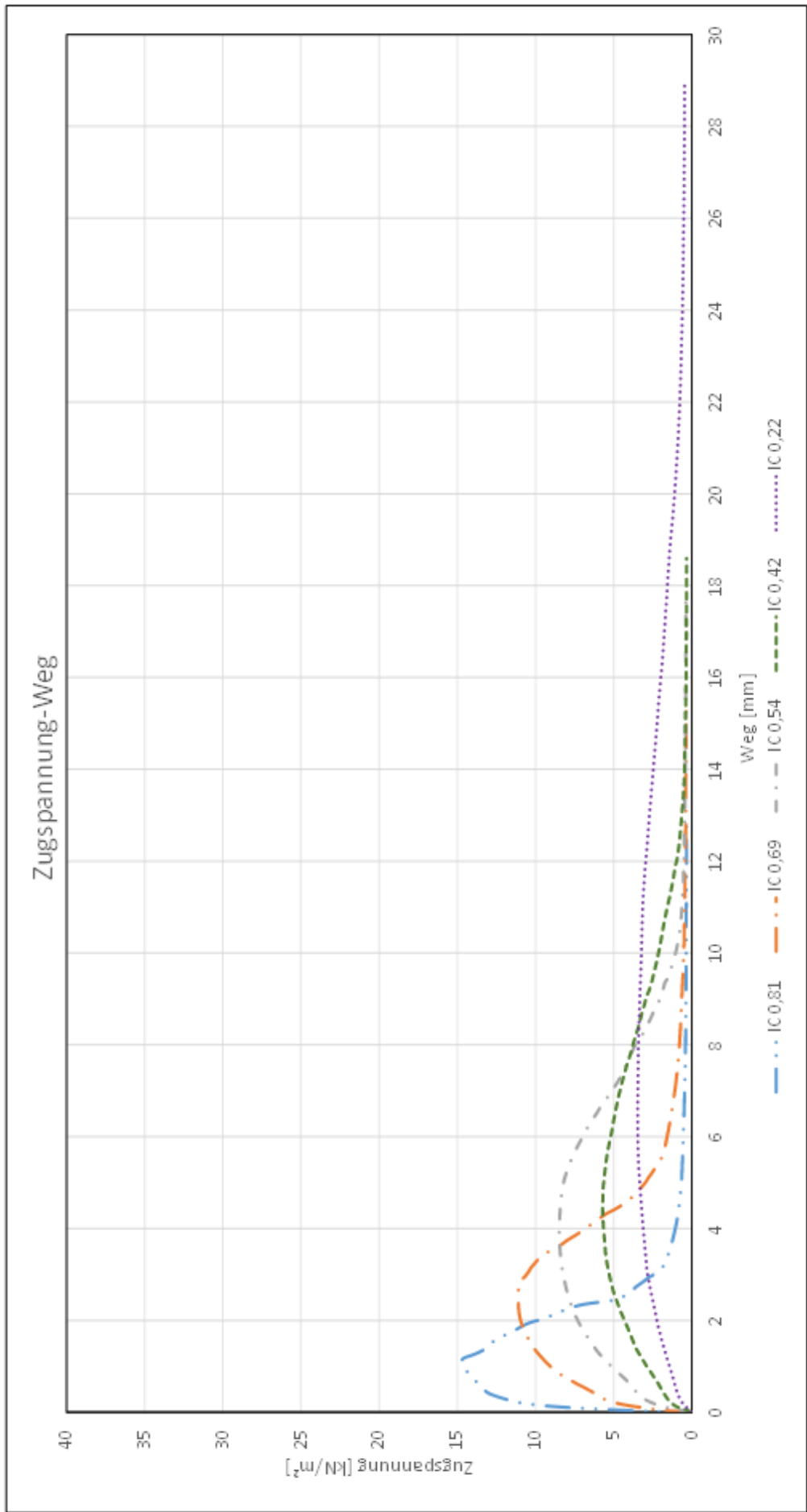


Abb. 38: Zugspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe S

Bodenprobe R

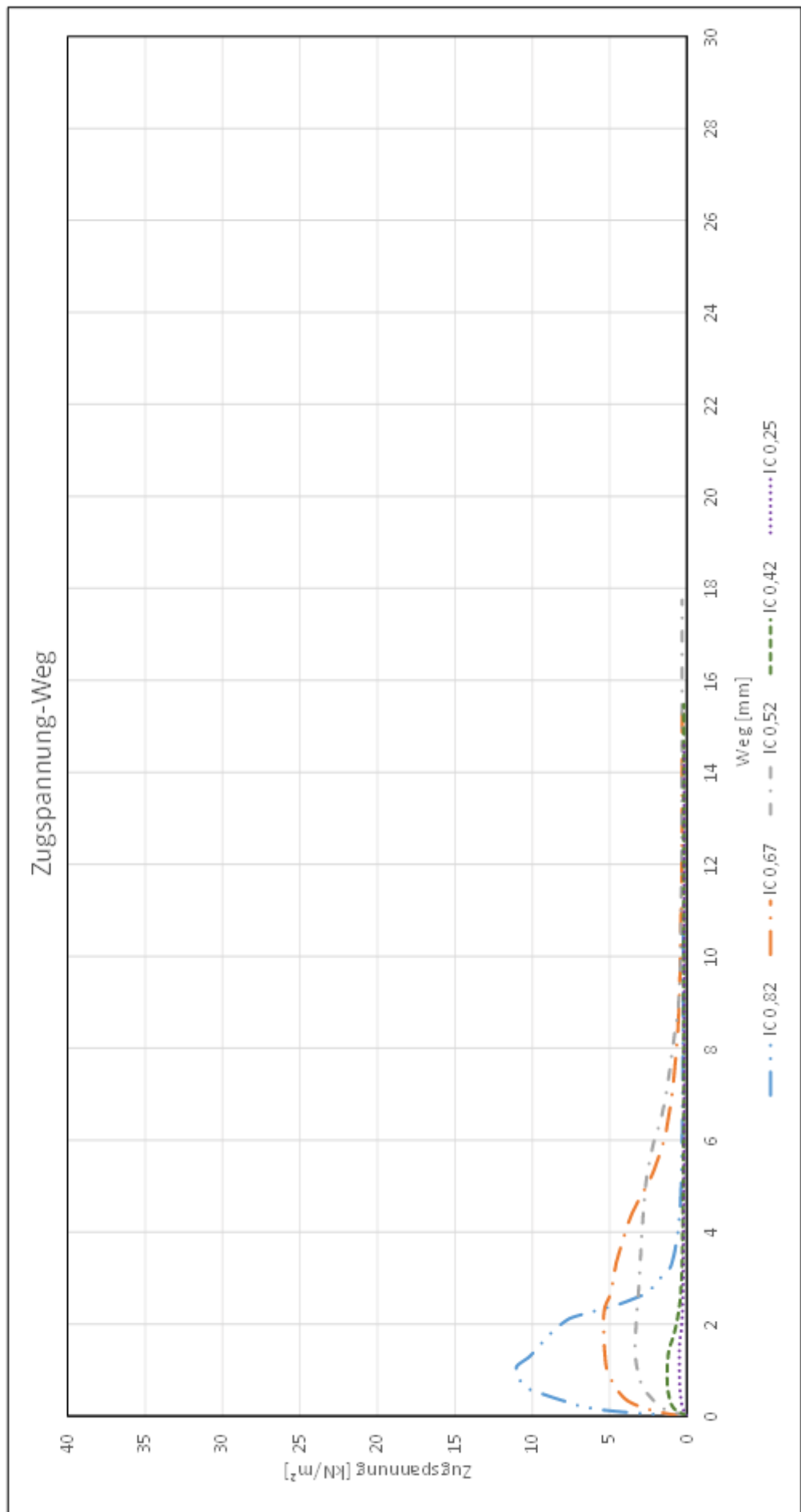


Abb. 39: Zugspannung - Weg Diagramm von Bodenprobe R

7.9.5 Zugspannung- Konsistenzzahl Diagramme

7.9.5.1 Allgemein

Um die Maximalspannungen der jeweiligen Konsistenzzahl besser darzustellen, wurde ein Zugspannung-Konsistenz Diagramm erstellt (siehe Abb. 40 und Abb. 41). Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Zugspannung mit der Konsistenzzahl steigt.

7.9.5.2 Bodenprobe S

Die höchste Zugspannung liest man bei $I_C = 0,81$ ab. Dieser Wert liegt bei $14,7 \text{ KN/m}^2$. Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,22$ und beträgt $3,5 \text{ KN/m}^2$ (siehe Abb. 40).

7.9.5.3 Bodenprobe R

Die höchste Druckspannung liest man bei $I_C = 0,83$ ab. Dieser Wert liegt bei $11,0 \text{ KN/m}^2$. Der niedrigste Wert ist bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,23$ und beträgt $0,5 \text{ KN/m}^2$ (siehe Abb. 41).

Bodenprobe S

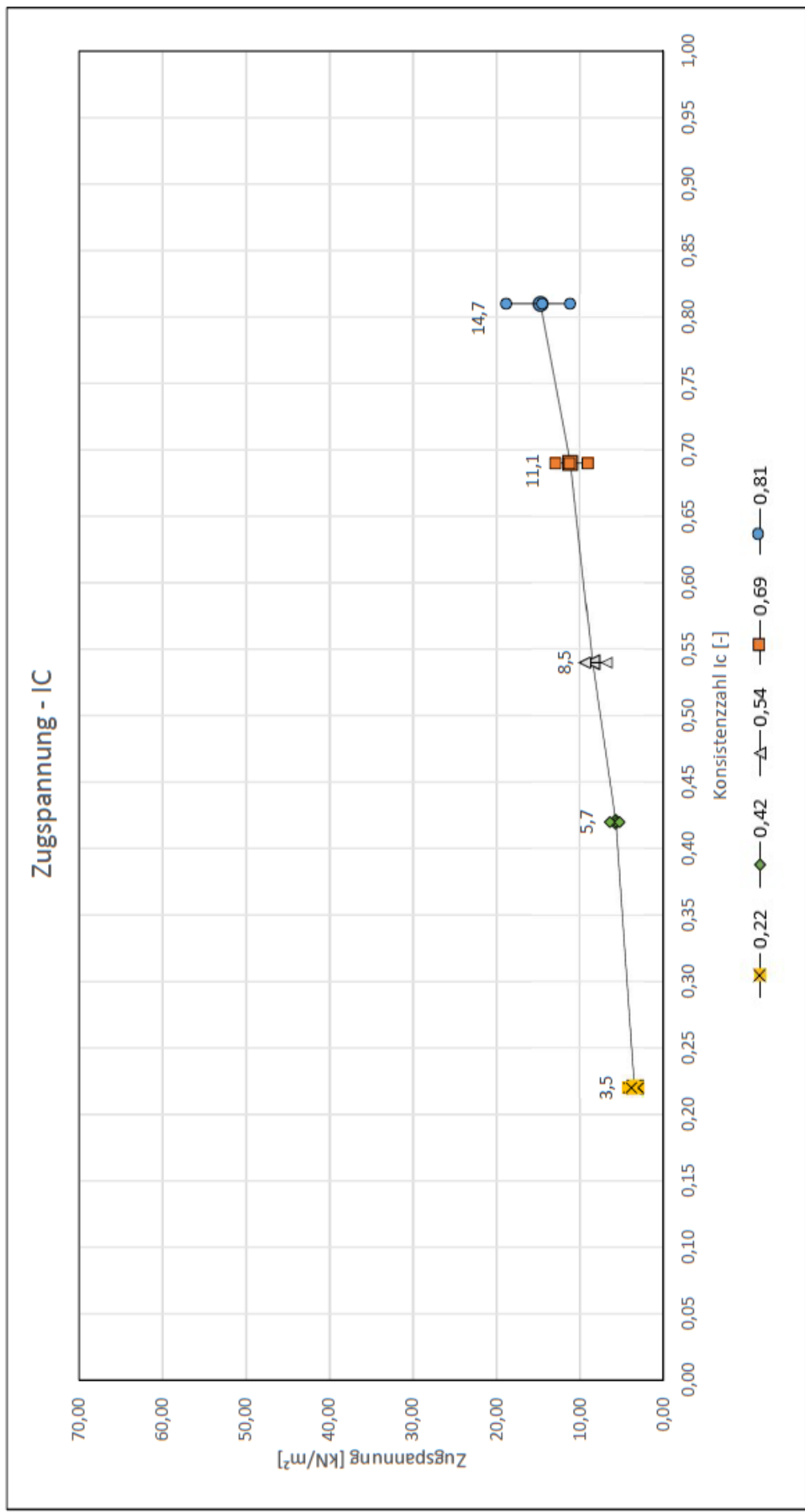


Abb. 40: Zugspannung - IC Diagramm von Bodenprobe S

Bodenprobe R

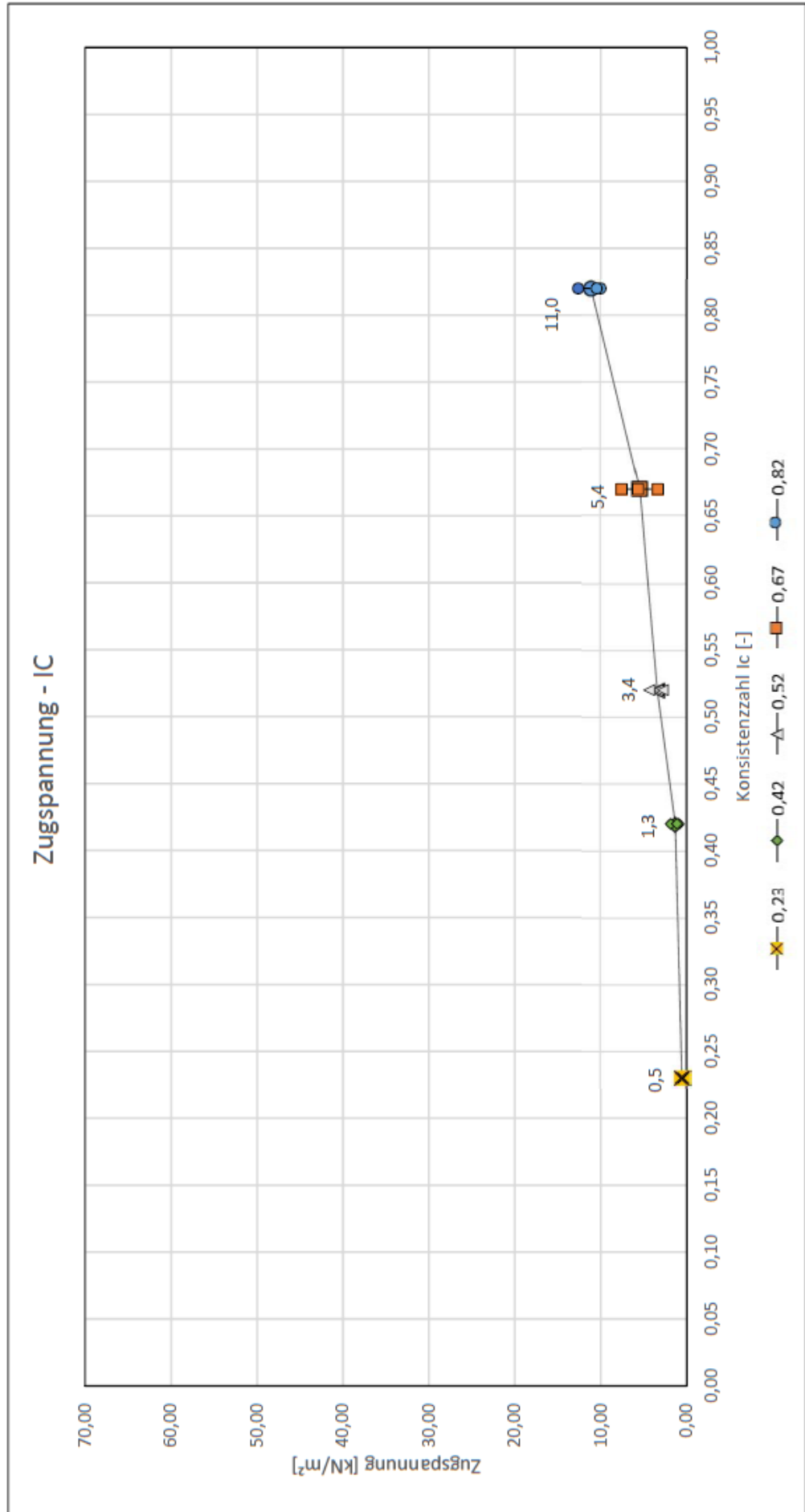


Abb. 41: Zugspannung - IC von Bodenprobe R

7.9.6 Verklebung

7.9.6.1 Allgemein

Der anhaftende Boden ist auf die Mantelfläche ($37,05 * 10^{-4} m^2$) vom Konus bezogen. Daraus ergibt sich die Verklebung. In Tab. 15 und Tab. 16 ist die Entstehung der Anhaftung von den Mittelwerten zu sehen. Um einen besseren Bezug zur Verklebung zu bekommen, ist die Verklebung der Einzelversuche in Gramm abzulesen.

Die Konsistenzahlen sind linear miteinander verbunden, um so einen gesamten Verlauf der Verklebung darzustellen. Die dazwischenliegenden Werte sind prognostiziert. Es ist zu erkennen, dass es zwischen den Einzelversuchen eine Große Streuung gibt.

7.9.6.2 Bodenprobe S

In Abb. 43 ist deutlich zu erkennen, dass die Tonprobe bei einer Konsistenzahl von $I_C = 0,25$ zu einer höheren Konsistenzahl steigt und bei der Konsistenzahl von $I_C = 0,52$ ihren Höhepunkt erreicht. Die nächsthöhere durchgeführte Konsistenzahl ist $I_C = 0,67$ und weist eine geringere Verklebung auf.

Tab. 15: Werte der Verklebung von Einzelversuchen der Bodenprobe S

I_C	Versuch 01	Versuch 02	Versuch 03	Mittelwert	Mantelfläche	Anhaftung der Mittelwerte
-	g	g	g	g	m ²	g/m ²
0,81	0,60	0,31	0,29	0,40	0,003705	108
0,69	3,75	2,58	4,95	3,76		115
0,54	4,65	4,55	4,80	4,67		1260
0,42	3,0	4,82	4,72	4,18		1128
0,22	2,12	4,27	4,33	3,57		964

7.9.6.3 Bodenprobe R

In Abb. 42 sieht man, dass es bis zur Konsistenzahl von $I_C = 0,42$ kaum zu Verklebungen geführt hat. Der Höchstwert liegt bei der durchgeführten Konsistenzahl $I_C = 0,67$.

Tab. 16: Werte der Verklebung von Einzelversuchen der Bodenprobe R

I_c	Versuch 01	Versuch 02	Versuch 03	Mittel- wert	Mantel- fläche	Anhaftung der Mittelwerte
-	g	g	g	g	m ²	g/m ²
0,82	0,67	0,43	0,35	0,48	0,003705	130
0,67	1,55	1,58	2,53	1,89		509
0,52	0,74	1,45	2,15	1,45		390
0,42	0,06	0,05	0,04	0,05		13
0,23	0,06	0,065	0,02	0,04		5

Bodenprobe S

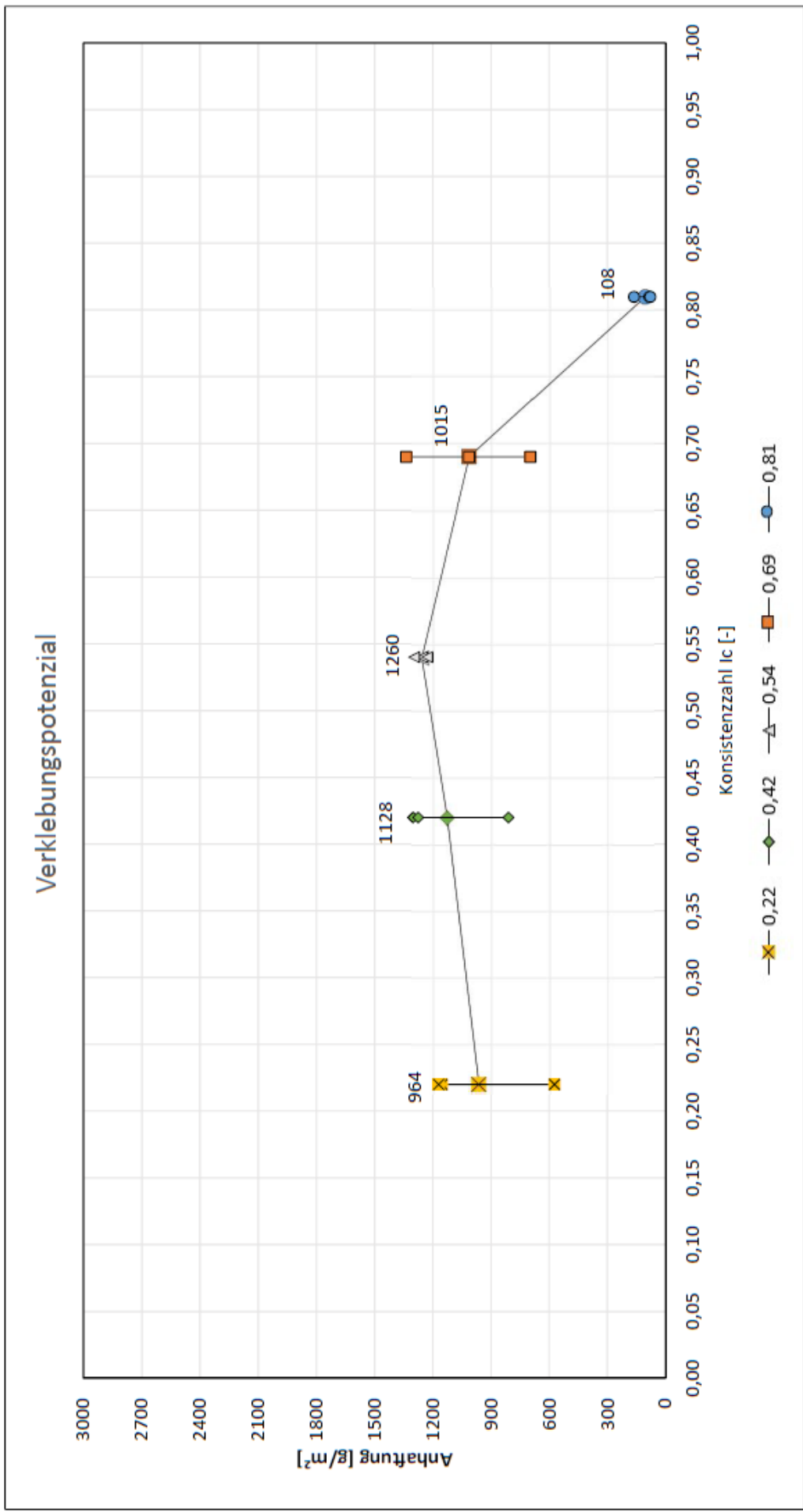


Abb. 42: Verklebungspotenzial von Bodenprobe S

Bodenprobe R

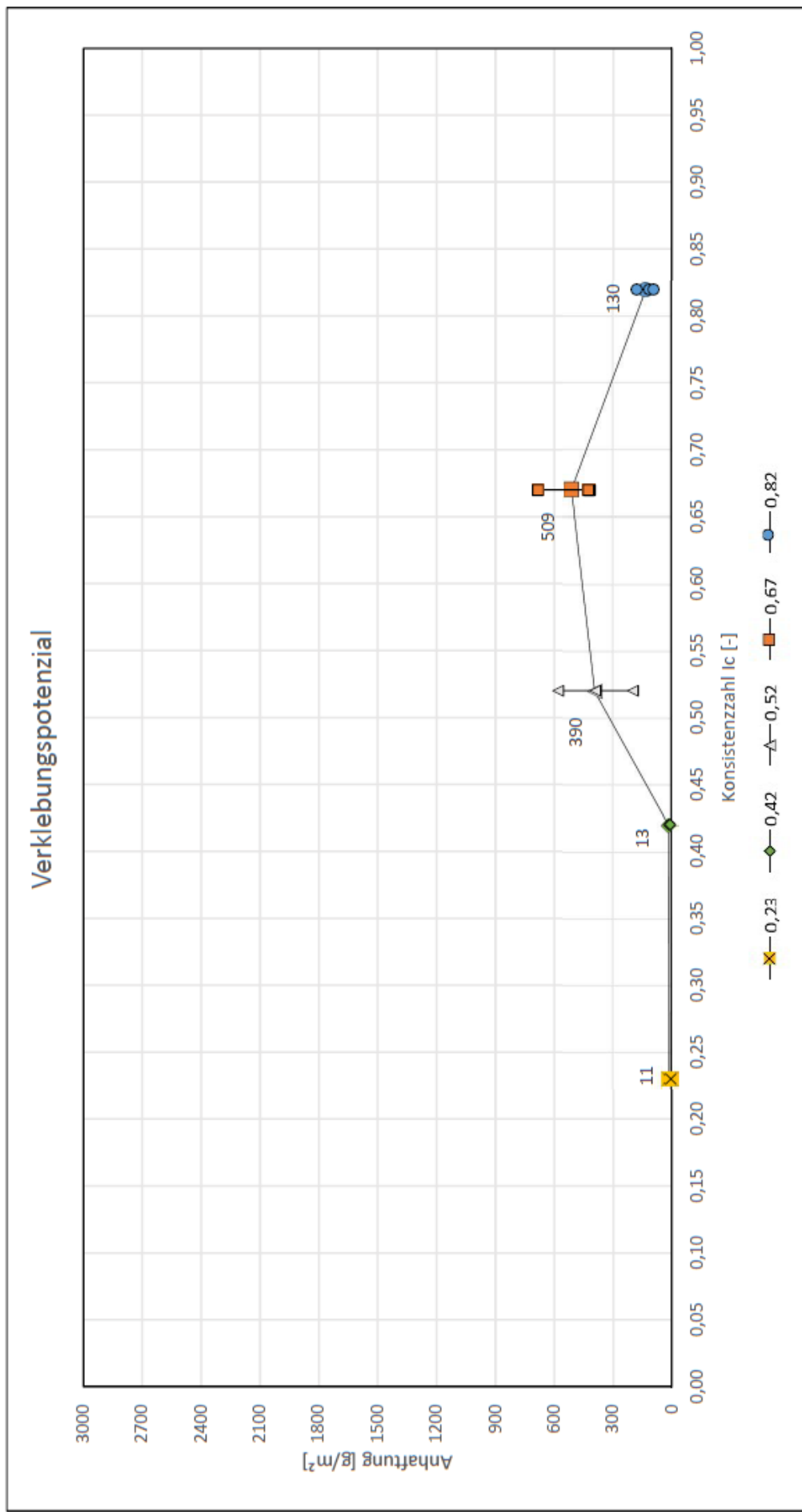


Abb. 43: Verklebungspotenzial von Bodenprobe R

7.10 Ergebnisse der Universität Aachen

Alle Auswertungen in diesem Kapitel wurden von RWTH Aachen University, Geotechnik im Bauwesen vom Herrn Dipl.-Ing. Martin Feinendegen, Akad. Direktor geschickt. Die Bodenprobe S entspricht dem „Ton 45 Boesner“ und die Bodenprobe R entspricht dem „Ton 46 allegro“.

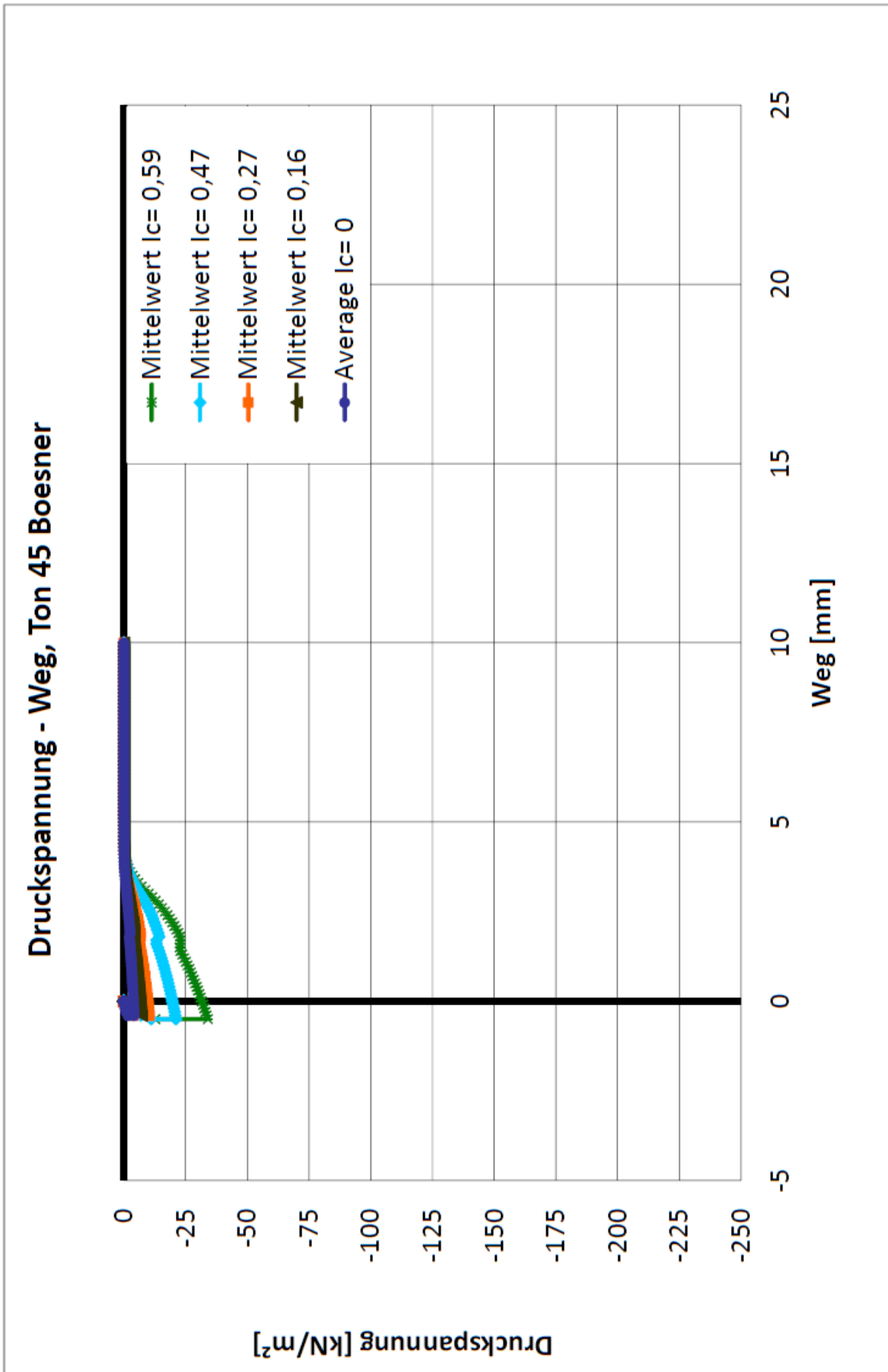


Abb. 44: Druckspannung – Weg Diagramm der Bodenprobe S, RWTH Aachen

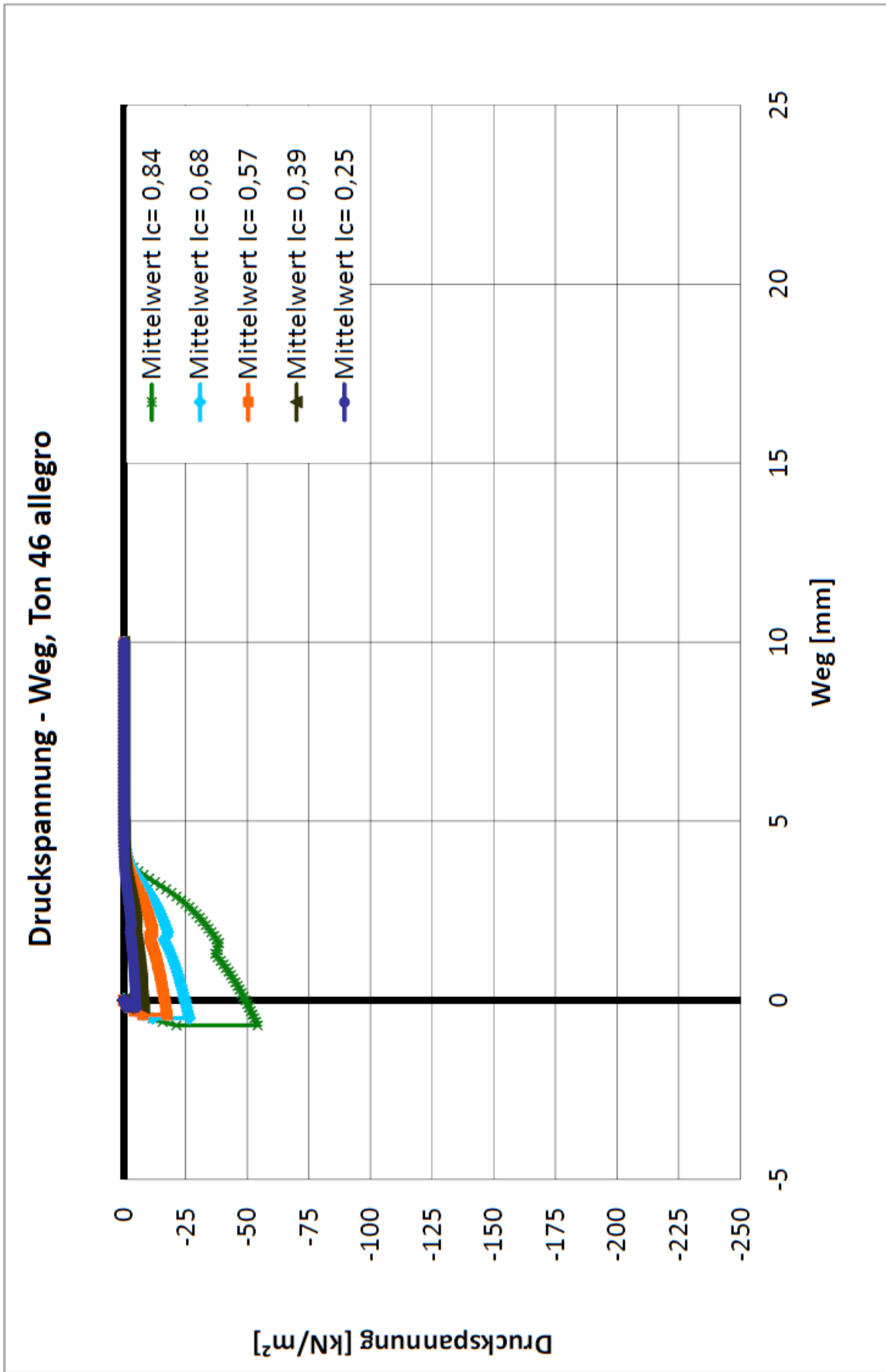


Abb. 45: Druckspannung – Weg Diagramm der Bodenprobe R, RWTH Aachen

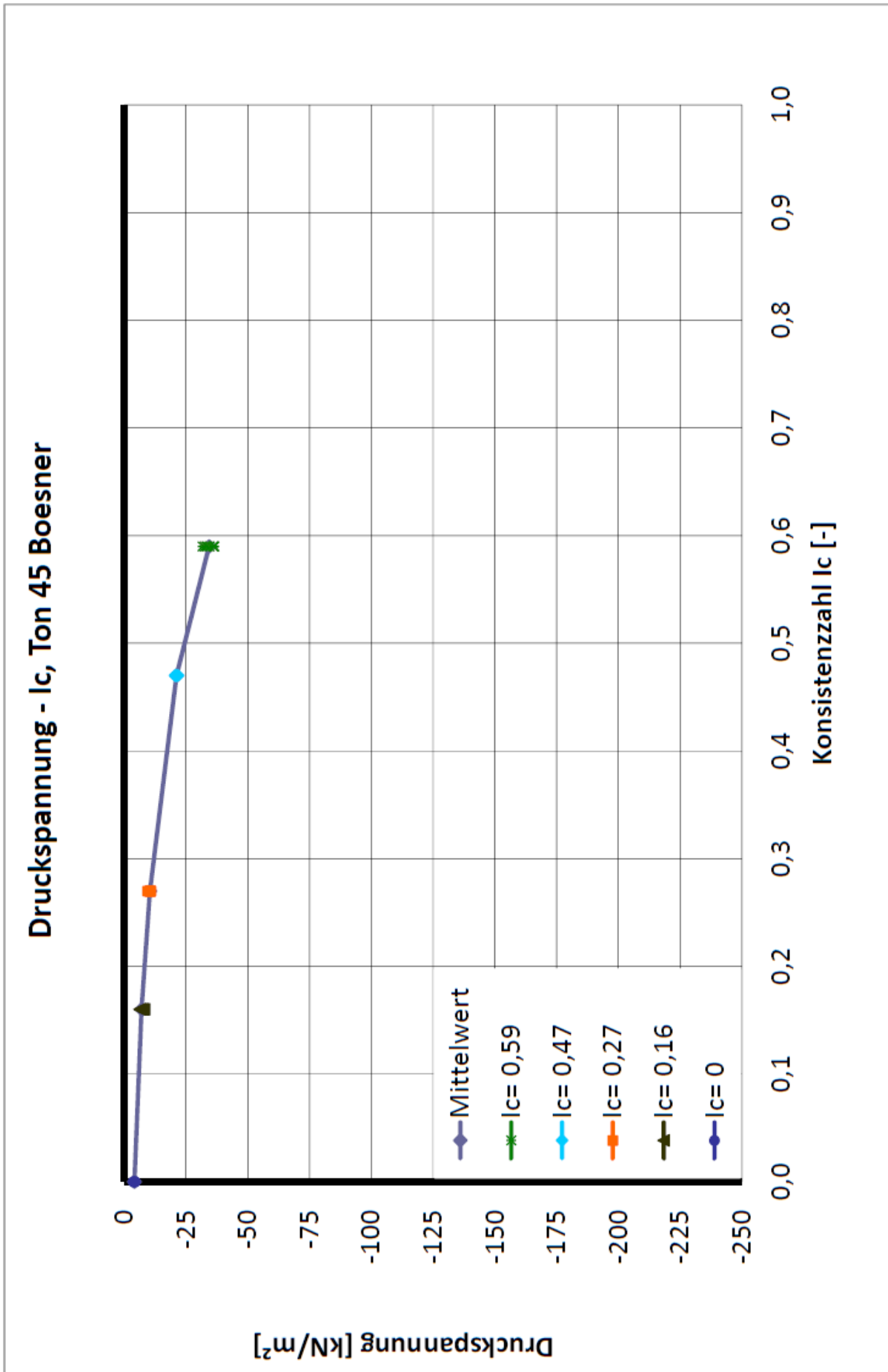


Abb. 46: Druckspannung - Ic Diagramm der Bodenprobe S, RWTH Aachen

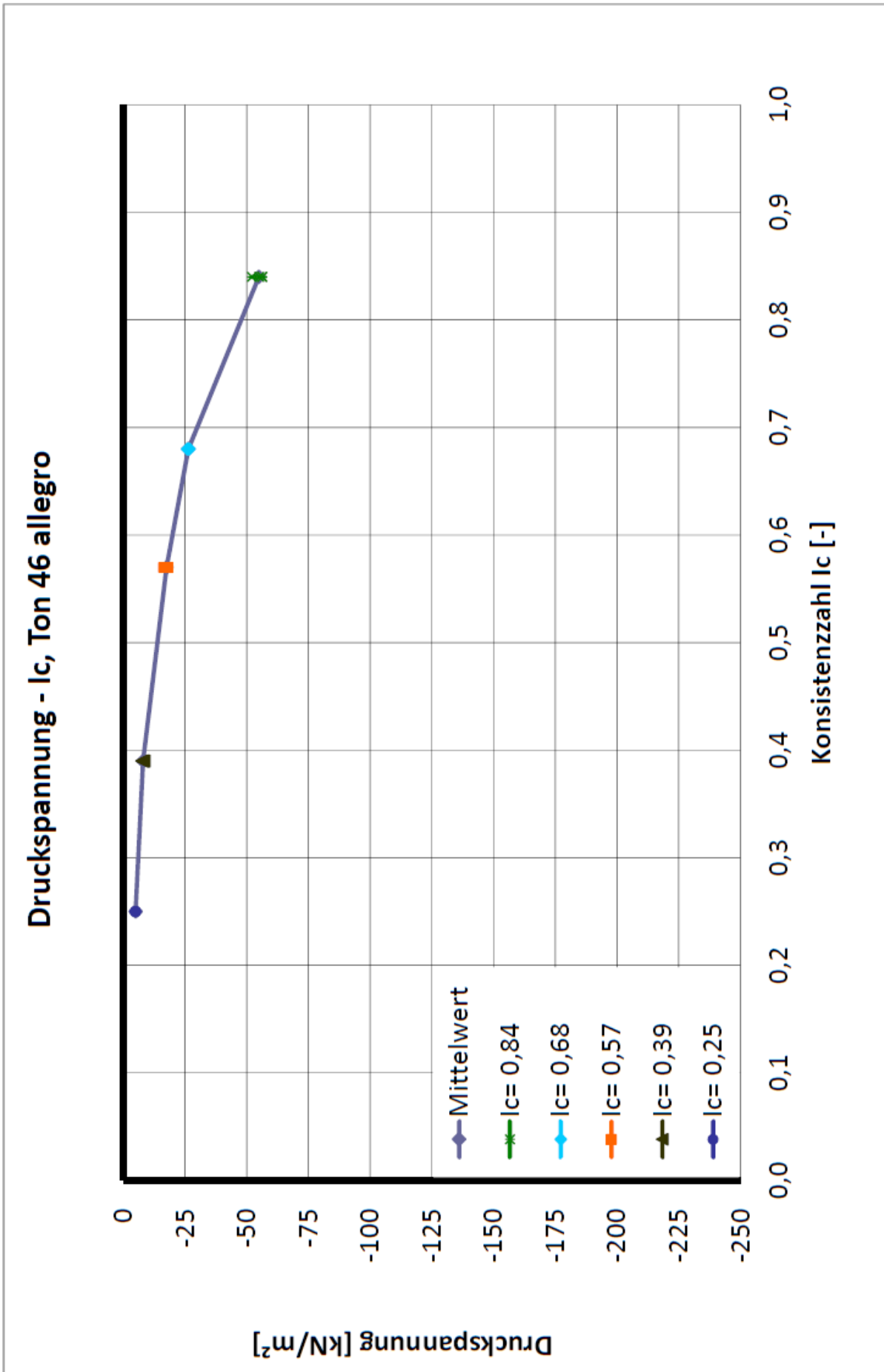


Abb. 47: Druckspannung - Ic Diagramm der Bodenprobe R, RWTH Aachen

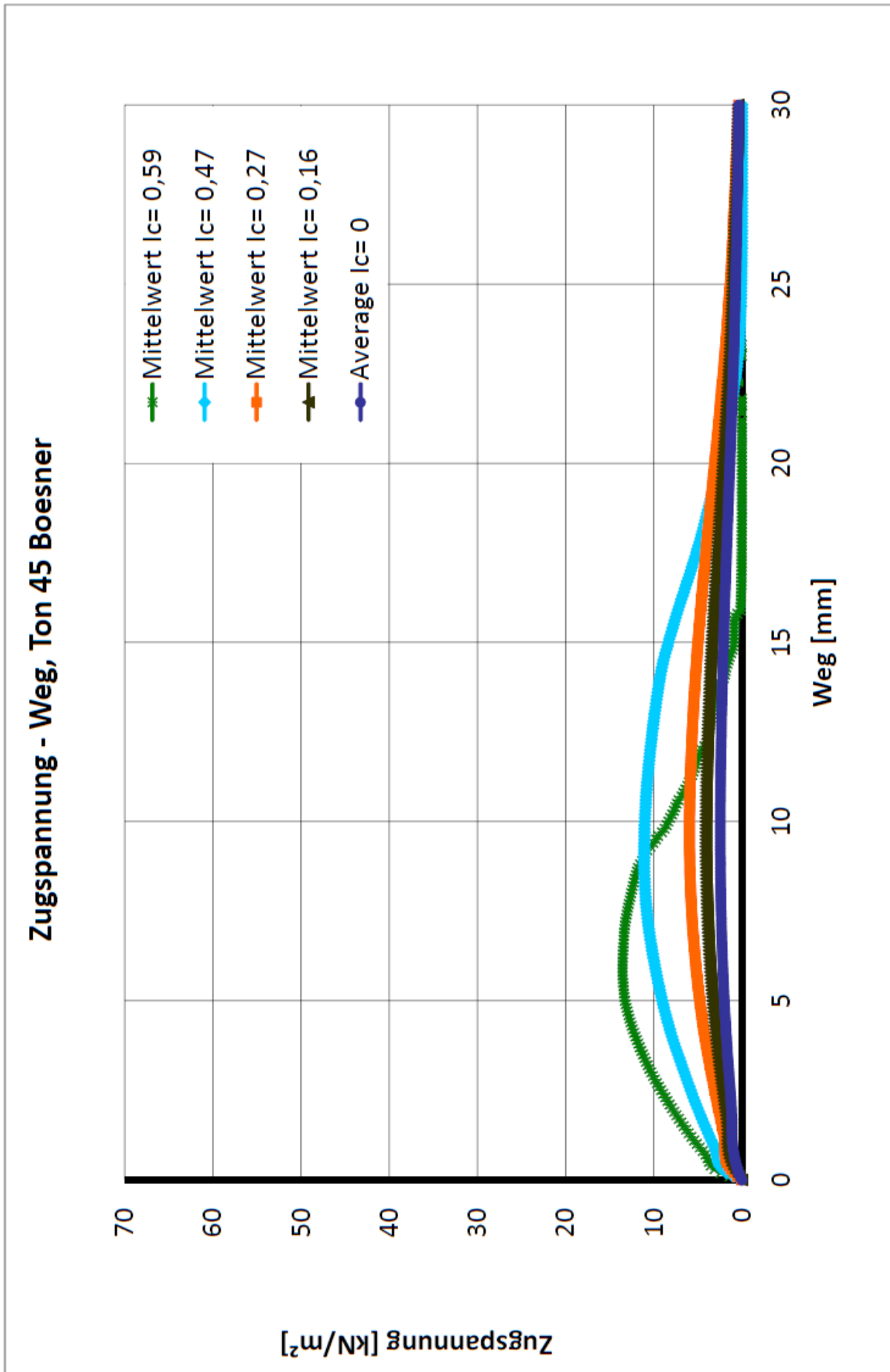


Abb. 48: Zugspannung - Weg Diagramm der Bodenprobe S, RWTH Aachen

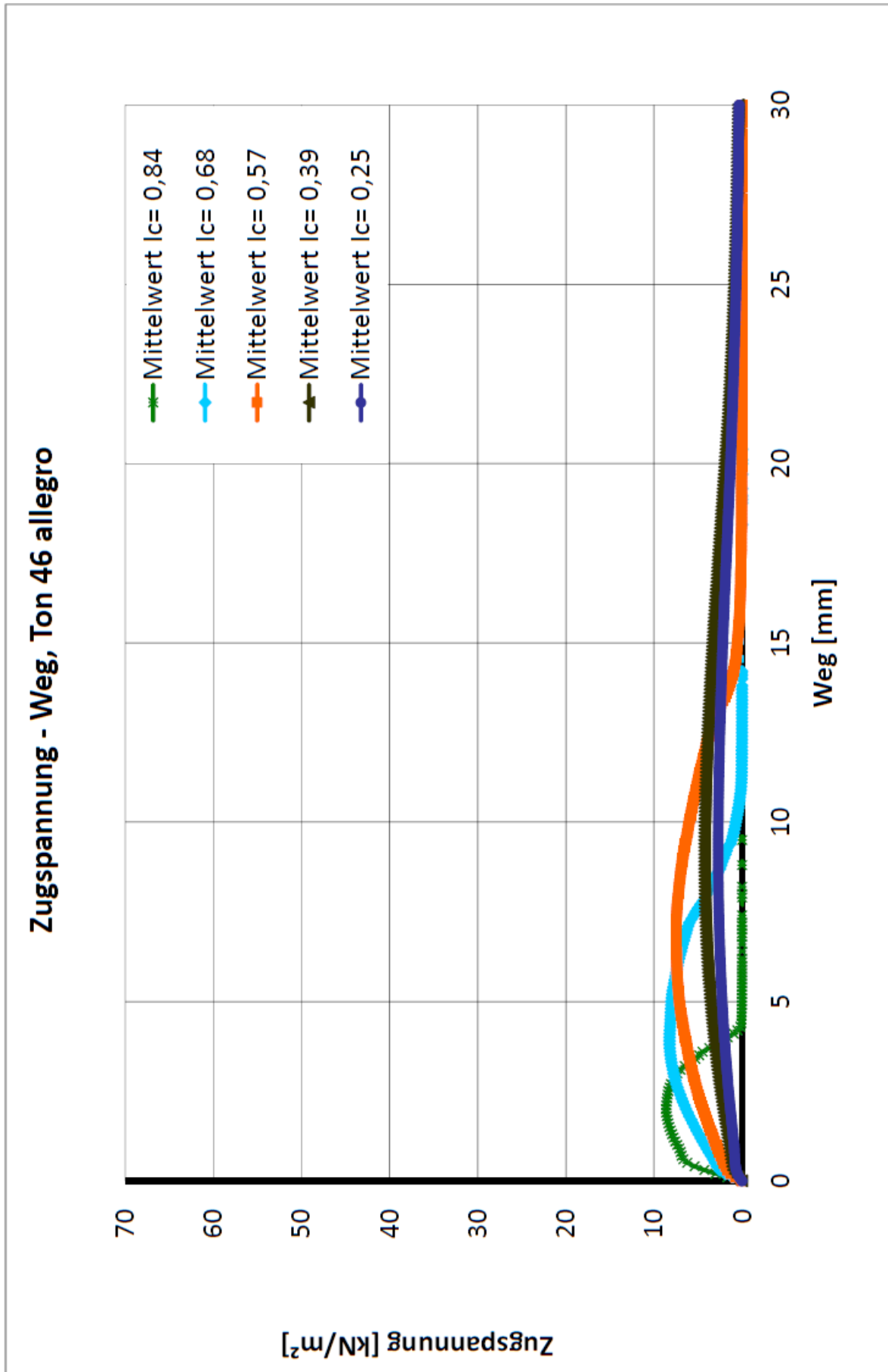


Abb. 49: Zugspannung - Weg Diagramm der Bodenprobe R, RWTH Aachen

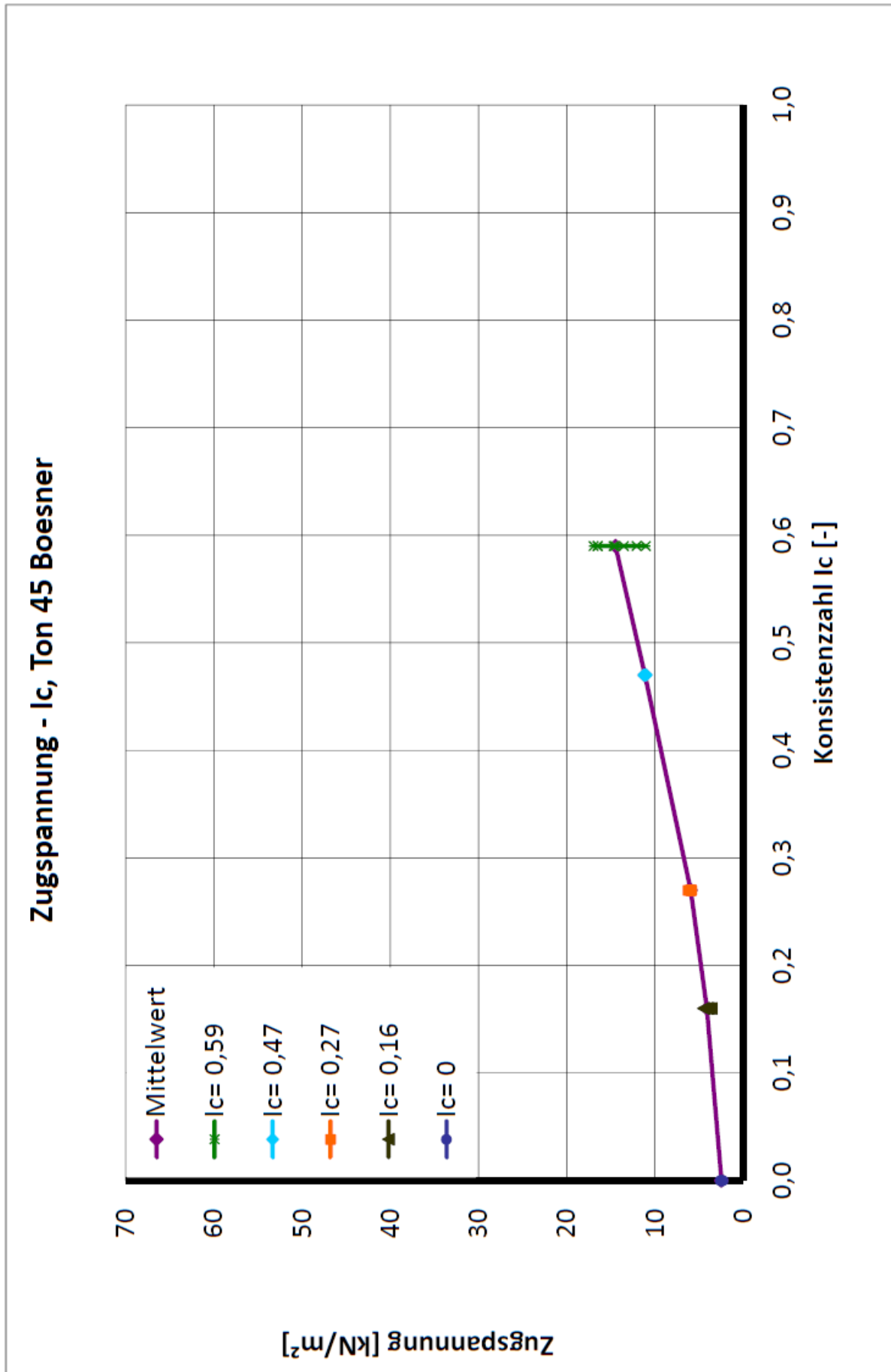


Abb. 50: Zugspannung - I_c Diagramm der Bodenprobe S, RWTH Aachen

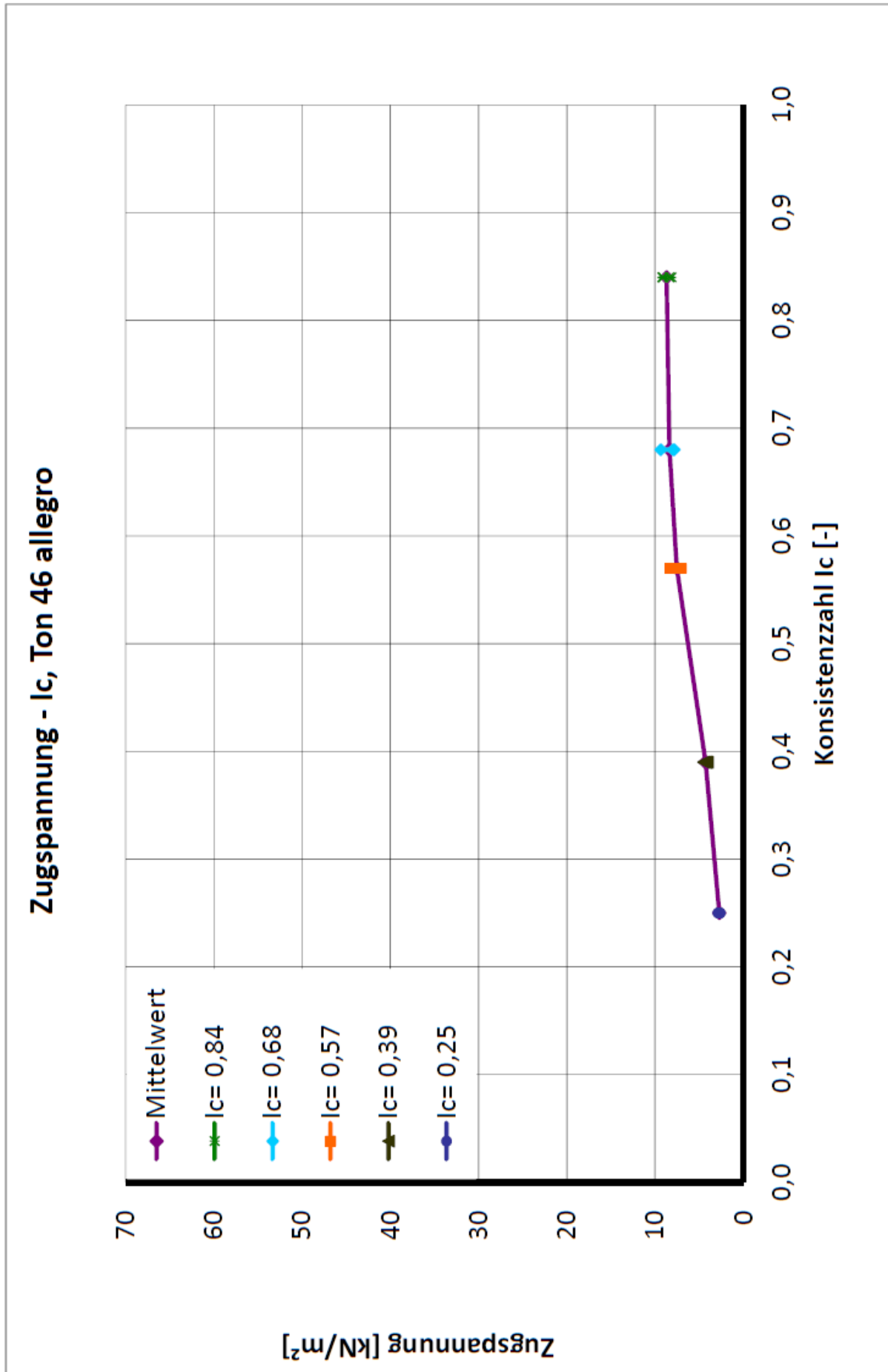


Abb. 51: Zugspannung - I_c Diagramm der Bodenprobe R, RWTH Aachen

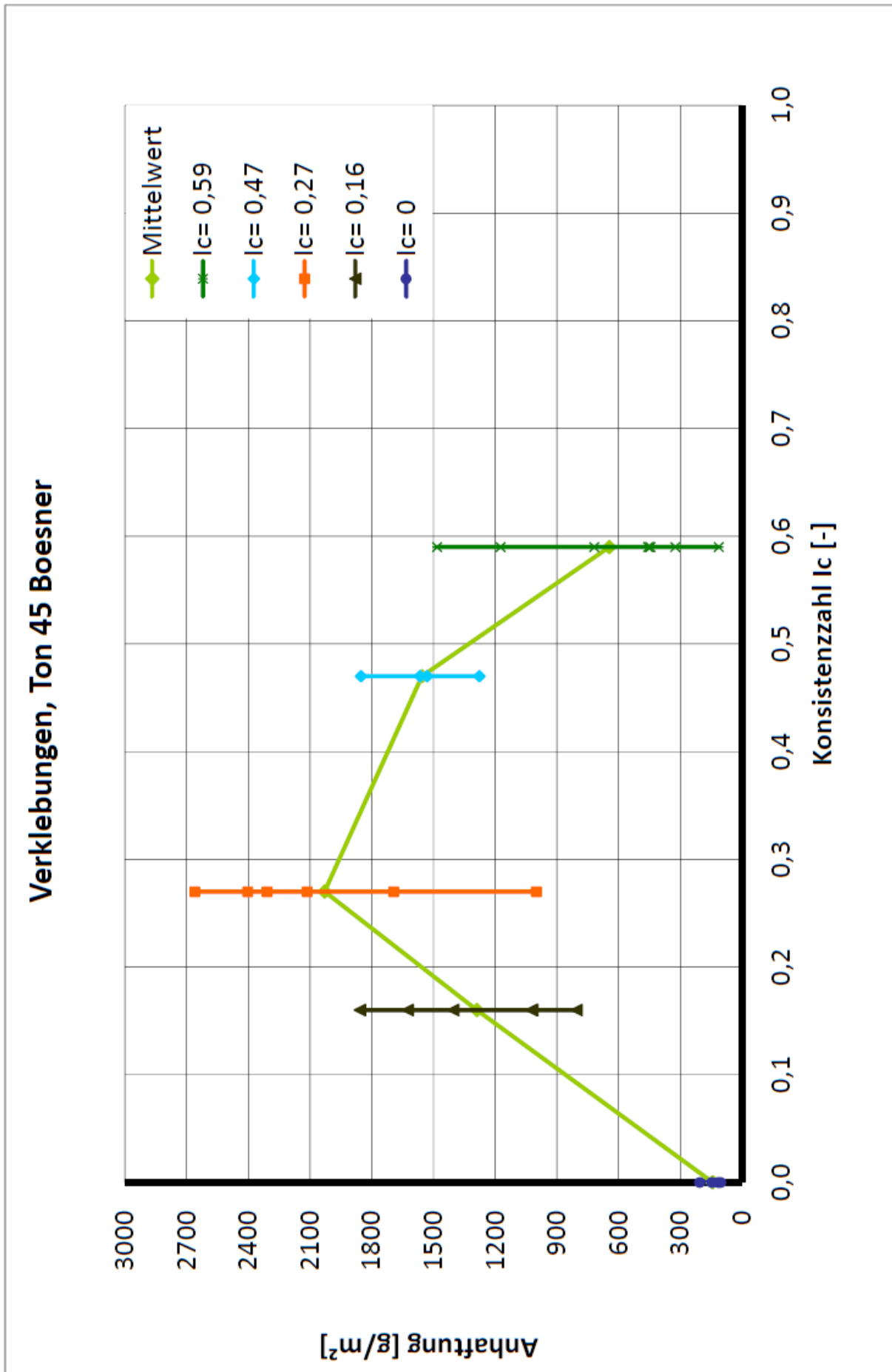


Abb. 52: Verklebungen der Bodenprobe S, RWTH Aachen

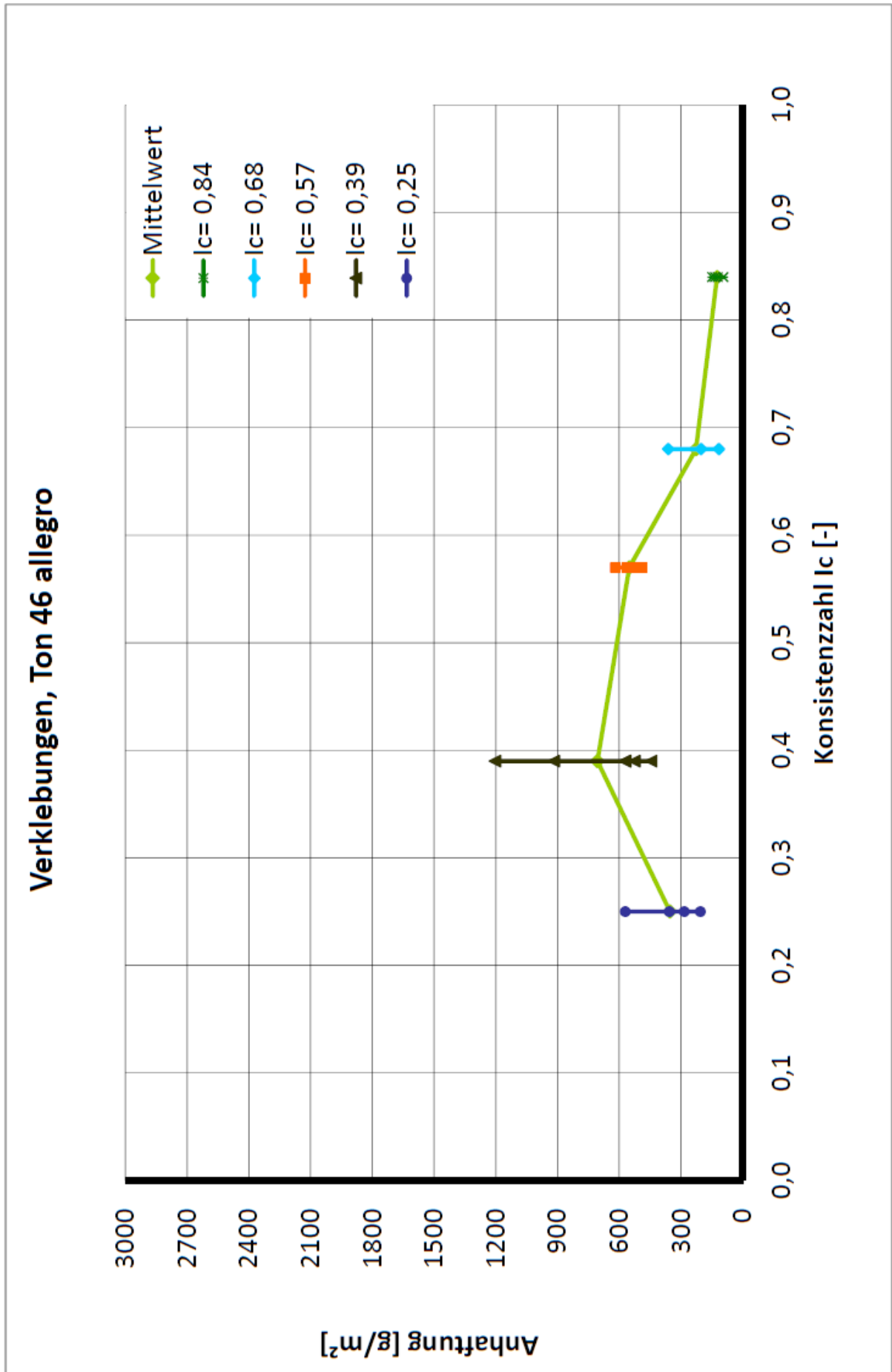


Abb. 53: Verklebungen der Bodenprobe R, RWTH Aachen

7.11 Vergleich

7.11.1 Allgemein

In Tab. 17 sind die Fließ- und Plastizitätsgrenzen der Bodenproben dargestellt. Der Schluff- und Tonanteil wurde miteinander verglichen (siehe Tab. 18). Durch die Lufttrocknung und anderer Parameter kann die Konsistenzzahl nicht auf einer Genauigkeit von 0,01 gebracht werden. Der Boden ist bei einer Konsistenzzahl $I_C < 0,55$ händisch bzw. mit einem Spatel eingebaut (siehe Kap.7.6.1). Bei RWTH Aachen wurde bei jeder Konsistenzzahl mit dem Proctortopf verdichtet und die Einzelversuche wurden mind. 4 - mal geprobt.

Tab. 17: Vergleich der Fließ- und Plastizitätsgrenze

Bodenart	Fließ- und Plastizitätsgrenze	TU Graz	RWTH Aachen
Bodenprobe R	w_L	37,6 %	35,8 %
	w_P	14,8 %	17,5 %
Bodenprobe S	w_L	34,4 %	32,8 %
	w_P	12,7 %	13,6 %

Tab. 18: Vergleich vom Schluff- und Tonanteil der Bodenproben

Bodenart	Kornanteil	TU Graz	RWTH Aachen
Bodenprobe R	Ton	35,7 %	34,3 %
	Schluff	24,5 %	27,5 %
Bodenprobe S	Ton	40,3 %	38,3 %
	Schluff	36,6 %	38,2 %

7.11.2 Bodenprobe S

7.11.2.1 Allgemein

Die Konsistenzzahlen sind unterschiedlich. An der RWTH Aachen war die höchste Konsistenzzahl $I_C = 0,59$ da der natürliche Wassergehalt so hoch war und Sie den Boden nicht rücktrockneten, weil dies zu verfälschten Ergebnissen kommen kann. In unserem Versuch wurden kleine Stücke der Bodenprobe geschnitten, um so eine große Oberfläche zu schaffen welche bei Raumtemperatur für ca. 24 h trockneten. So konnte eine Konsistenzzahl von $I_C = 0,81$ erreicht werden. Die Universität Aachen hat zusätzlich eine Auswertung bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0$ durchgeführt.

7.11.2.2 Zugspannung – Weg

Beim Vergleich der Zugspannungen ist der Verlauf sehr ähnlich. Die Konsistenzzahl $I_C = 0,59$ fällt früher auf 0 herab und hat deshalb eine kürzere Zugphase.

7.11.2.3 Zugspannung – IC

Die Auswertungen der Zugspannung zur Konsistenzzahl zeigen denselben Verlauf. Die Auswertung liegt auch hier innerhalb der Streuungspunkte der Einzelversuche.

7.11.2.4 Druckspannung – Weg

Die Diagramme sind schwer miteinander zu vergleichen. Im Diagramm sind die Erstkontaktspannung abzulesen und die Druckspannung nach einem Weg von 2,3 mm. Dieser Weg wurde eingestellt, um die gleiche Eindringtiefe vom Konus in der Bodenprobe mit RWTH Aachen zu erreichen.

7.11.2.5 Druckspannung – IC

Die Auswertungen der Druckspannung zur Konsistenzzahl zeigen denselben Verlauf. Bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,22$ und $I_C = 0,42$ sind die Werte gleich groß und bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,54$ ist unsere Auswertung um 7 KN/m^2 niedriger. Bei $I_C = 0,59$ sind die Werte wieder fast gleich groß.

7.11.2.6 Verklebungspotenzial

Es ist zu erkennen, dass die Streuung der Einzelversuche hoch ist. Beim Vergleich der Auswertungen sind die Mittelwerte unterschiedlich. Beide Auswertungen liegen aber innerhalb der Streuungswerte der Einzelversuche.

7.11.3 Bodenprobe R

7.11.3.1 Zugspannung – Weg

Die Zugspannung bei einer Konsistenzzahl von $I_C = 0,82$ ist um ca. 4 KN/m^2 höher. Die Konsistenzzahlen $I_C = 0,42$ und $I_C = 0,25$ weisen bei unseren Versuchen kaum Verklebungen auf. Daher ist auch die Zugspannung sehr gering. Bei der Auswertung

von der RWTH Aachen ist die Zugphase bei beiden Werten höher und geht über einen weiten Weg hinaus.

7.11.3.2 **Zugspannung – IC**

Die Zugspannung erhöht sich bei unserem Versuch bei einer Konsistenzzahl von 0,67 und 0,82 um mehr als das Doppelte, während die Steigung in der Auswertung der Universität Aachen flach ist. Im Allgemeinen liegt die Zugspannung bei allen Konsistenzahlen höher als bei der Universität Aachen, nur bei $I_C = 0,82$ ist sie geringer.

7.11.3.3 **Druckspannung – IC**

Die Druckspannungen sind beim Vergleich sehr ähnlich. Nur bei der Konsistenzzahl von $I_C = 0,82$ ist der Wert deutlich höher als bei der RWTH Aachen.

7.11.3.4 **Verklebungspotenzial**

Bis zur Konsistenzzahl 0,4 weißt dieser Boden keine Verklebungen auf, wohingegen bei der Auswertung aus der RWTH Aachen bei einer Konsistenzzahl 0,4 die höchste Verklebung stattfindet, aber auch eine hohe Streuung vorkommt. Die höchste Verklebung kommt bei $I_C = 0,67$ vor wohingegen bei der Auswertung aus der Universität Aachen die Anhaftung bei der Konsistenzzahl $I_C = 0,67$ schon stark abgefallen ist.

8 Schwierigkeiten

Eine Problemdarstellung ergibt sich beim Herausschneiden der Vertiefung bei sehr weichen Böden. Der Konusbohrkopf schneidet den Boden nicht mehr zur Gänze heraus. Ein Teil vom Boden wird im Proctortopf verdrängt. Man hat keine horizontale Oberfläche mehr. Rund um die Vertiefung hebt sich der Boden. Der visuelle Kontakt zwischen Konus und Bodenprobe ist schwierig einzuschätzen.

Die Versuchsböden sind schwierig auf eine Genauigkeit von 0,01 zu bringen. Die Konsistenzzahl ändert sich während der Versuchsdurchführung trotz einer Abdeckfolie um ca. 0,03.

9 Schlussfolgerung

9.1 Allgemein

Dieser Versuch hat gezeigt, dass das Verklebungspotenzial ab einen bestimmten Wassergehalt am höchsten ist. Je nach Tonanteil ist das Verklebungspotenzial unterschiedlich. Durch die Versuche hat man gesehen, dass bei höheren Tonanteil im Boden das Verklebungspotenzial höher ist. Bei niedrigem Tonanteil (siehe Kap. 6.3) treten keine Verklebungen auf. Das Verklebungspotenzial sinkt bei sehr niedriger Konsistenzzahl bzw. bei sehr weichem bis breiigen Boden, da sich zwischen Versuchsboden und Konus ein Wasserfilm bildet. Bei einer sehr hohen Konsistenzzahl bzw. bei steifem Boden fällt die Verklebung genauso ab. Der Boden benötigt einen höheren Wassergehalt bzw. eine niedrigere Konsistenzzahl, um bessere Verklebungseigenschaften zu erreichen.

Es ist zu sehen, dass je höher die Druckspannung ist, desto höher ist die Zugspannung. Man kann auch sagen, dass je höher die Konsistenz ist, desto höher ist die Druckspannung und auch folgend die Zugspannung. Je höher die Erstkontaktspannung ist, desto höher ist die max. Druckspannung am Ende der Belastung. Es ist auch gezeigt, dass bei niedriger Konsistenzzahl die Zugphase länger andauert, falls es zu einer Verklebung kommt. Wenn am Konus nichts haften bleibt, gibt es auch nur eine sehr geringe Zugspannung die auch nach ein paar mm wieder abfällt.

9.2 Vergleichsversuch

Im Allgemeinen ist es schwierig die Versuche miteinander zu vergleichen, da die Streuung der Einzelversuche hoch ist. Die Mittelwerte sind miteinander linear verbunden und die Zwischenwerte sind prognostiziert. Die Konsistenzzahlen sind im Vergleich bei einer Genauigkeit von 0,01 unterschiedlich. Durch die hohe Streuung und der unterschiedlichen Konsistenzzahlen lässt sich die Auswertung schwer miteinander vergleichen. Dennoch hat man bei Bodenprobe S Ähnlichkeiten bei den Auswertungen gesehen. Beim Vergleich mit RWTH Aachen liegt die Auswertung der Verklebung innerhalb der Streuungswerte der Einzelversuche und auch die Auswertungen der Druck- und Zugphase zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf.

10 Literaturverzeichnis

Azzam, R., Feinendegen, M., Fernandez-Steeger, T., Spagnoli, G., Stanjek, H., & Ziegler, M. (2012 Januar). InProTunnel - Grenzflächenprozesse zwischen Mineral- und Werkzeugoberflächen - Ursachen, Probleme und Lösungsansätze am Beispiel des maschinellen Tunnelbaus. RWTH Aachen.

Herrenknecht AG. (2020). Herrenknecht-Pioneering Underground Together. Von Produktdetail EPB Schild:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/epb-schild/> abgerufen

Herrenknecht AG. (2020). Herrenknecht-Pioneering Underground Together. Von Produktdetail Mixschild:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/> abgerufen

Herrenknecht AG. (2020). Herrenknecht-Pioneering Underground Together - Herrenknecht AG. Von Produktdetail Multi-Mode-TBM:
<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/multi-mode-tbm/> abgerufen

ÖNORM EN ISO 14688-2. (2019). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Wien.

ÖNORM EN ISO 17892-12. (2018). Geotechnische Erkundung und Untersuchung- Laborversuche an Bodenproben Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen. Wien.

ÖNORM EN ISO 17892-4. (2017). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung.