

# Masterarbeit

Zum Erwerb  
des akademischen Grades Diplomingenieur  
des Studienganges Bauingenieurwissenschaften – Geotechnik und Wasserbau

verfasst von

**Karin Poprask**

eingereicht am  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau  
der Technischen Universität Graz  
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

**Experimentelle Untersuchungen zur Visualisierung von  
Boden-Bauwerksinteraktionen mit Hilfe synthetischem,  
transparentem Boden**

Begutachter: Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich  
Mitbetreuender Assistent: Dipl.-Ing. Gregor Supp

Graz, im September 2013

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 04.09.2013

Poprask Kevin  
(Unterschrift)

## Statutory Declaration

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.

Graz, 04/09/2013  
(date)

Poprask Kevin  
(signature)

**MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL**  
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

**Masterarbeit:**

<b>KANDIDAT: Poprask Karin</b> (Name)	<b>0130153 / F610</b> (Mat.Nr.)/(Studienrichtung)
	<i>Poprask Karin</i> (Unterschrift)
<b>THEMA</b> der Masterarbeit: Experimentelle Untersuchungen zur Visualisierung von Boden-Bauwerksinteraktionen mit Hilfe synthetisch hergestellter, transparenter Böden	
<b>ZIELSETZUNG</b> (stichwortartig): *)Literaturstudie hinsichtlich a) synthetisch hergestellter, transparenter Böden b) Möglichkeiten zur Visualisierung von Boden-Bauwerksinteraktionen *)Fluidmechanische Charakterisierung der verwendeten Porenfluide *)Beschreibung des Aufbaues und der Durchführung von Vor- und Laborversuchen *)Durchführung von Laborversuchen *)Auswertung und Visualisierung der Versuchsergebnisse *)Gegenüberstellung: experimentelle Ergebnisse / Modellvorstellungen aus Regelwerken	
<b>FACHGEBIET:</b> Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET: -----	
<b>BETREUER:</b> O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich (Name)	<i>Stephan Semprich</i> (Unterschrift)
<b>mitbetreuender Assistent:</b> Dipl.-Ing. Gregor Supp (Name)	<i>Gregor Supp</i> (Unterschrift)
<b>AUSGABEDATUM:</b> 29.09.2011	
<b>SPÄTESTER ABGABETERMIN:</b> 30.05.2012 (inkl. 3 Monate Studium)	

**Beurteilung:**

Beurteilung erfolgt durch den Betreuer
--

*22.10.11 [Signature]*  
.....  
Datum und Unterschrift des Studiendekans

## Kurzfassung

In dieser Masterarbeit wird das Ausziehverhalten von Stahlstäben aus Bodenkörpern unterschiedlicher Lagerungsdichten und Trockendichten betrachtet. Untersucht werden Stäbe mit einer glatten Oberfläche und einer Gewindeoberfläche. Die hier benutzten Gewindestäbe werden zurzeit für ein neuartiges Konstruktionselement im Anwendungsgebiet von Gründungen und Hangstabilisierungen verwendet – dem Spinnanker (Supp & Semprich, 2010).

Ziel dieser Masterarbeit ist es, den Einfluss der Tragfähigkeit eines Zugstabes in Bezug auf seine Oberfläche, den Durchmesser sowie dessen Einbautiefe zu messen und zu visualisieren. Besonderes Augenmerk galt dabei der Darstellung des sich ausbildenden Bruchkörpers. Die Ergebnisse der Ausziehversuche werden in Weg-Kraft-Diagrammen dargestellt und visuell durch Aufnahmen des Bodenkörpers mit Hilfe eines Lasers und einer Hochgeschwindigkeitskamera belegt.

Die Grundlage der durchgeführten Versuche stellt die Herstellung eines transparenten Bodens dar. Die Bestandteile des transparenten Bodens sind Silicapartikel sowie ein Porenfluid, das denselben Lichtbrechungsindex besitzt wie die hier benutzten Silicapartikel. Mit diesem Porenfluid werden die Partikel gesättigt, um eine optimale Transparenz zu erreichen. Die Zusammensetzung dieses Porenfluids wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelt.

Des Weiteren wird durch Ausziehversuche der Stäbe aus einem rundkörnigen Kies gezeigt, dass die Ergebnisse auch auf natürlichen Boden umgelegt werden können.



## **Abstract**

In this master thesis the pull-out behavior of steel bars from soil bodies with different compactness and density will be considered. Two types of steel bars are examined. Bars with a plain surface and ones with a threaded surface. These threaded steel bars are currently used for a novel structural element in the application area for foundations and slope stabilization - the Spinnanker (Supp & Semprich, 2010).

The aim of this master thesis is to measure and visualize the influence the surface, the diameter and the installation depth of a steel bar have on the load capacity. Particular attention was paid to displaying the developing failure body of the soil.

The results of the pull-out tests are visualized in force/distance diagrams and by means of photos of the soil body taken using a laser and a high-speed camera.

The basis of the experiments performed is the production of the transparent soil body. The components of this soil body are silica particles and a pore fluid. These two components must have the same refractive index. The silica particles are saturated with this pore fluid in order to achieve the optimum transparency. The composition of the pore fluid is also determined in this master thesis.

Furthermore, by pulling the bars out from a round-grained gravel body it is shown that the results of the pull-out tests from a transparent soil body can be compared with the pull-out behavior from natural soil.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung .....	I
Statutory Declaration .....	I
Ausgabeprotokoll .....	II
Kurzfassung .....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	XIV
Symbolverzeichnis .....	XV
Abkürzungsverzeichnis .....	XVII
<b>1. Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand der Technik .....</b>	<b>2</b>
2.1. Allgemein .....	2
2.2. Visualisierungsmethoden .....	2
2.3. Synthetisch hergestellter transparenter Boden .....	6
2.3.1. Silica Gel.....	9
2.3.2. Porenfluid.....	11
2.4. Modellvorstellungen.....	13
2.4.1. Jelinek und Ostermayer.....	13
2.4.2. Wernick.....	14
2.4.3. Blinde und Witt .....	15
2.4.4. Hettler .....	15
2.4.5. Chattopadhyay und Pise .....	16
2.4.6. Mors.....	16
2.4.7. Quarg-Vonscheidt.....	17
2.4.8. Wernick.....	17
<b>3. Fluidmechanische Charakterisierung des Porenfluids .....</b>	<b>18</b>
3.1. Brechungsindex $n_D$ .....	18
3.2. Dichte des Porenfluids.....	30
3.3. Kinematische Viskosität $\nu$ und dynamische Viskosität $\eta$ .....	31
3.4. Oberflächenspannung $\sigma$ .....	32
3.5. Durchlässigkeit $k_f$ .....	34
3.6. Permeabilität $K$ .....	37
3.7. Kapillare Steighöhe $h$ .....	38

3.8. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	40
<b>4. Modellversuch .....</b>	<b>41</b>
4.1. Versuchskonzept .....	41
4.2. Versuchseinrichtung .....	43
4.3. Versuchsreihen und Versuchsablauf.....	55
4.3.1. Versuchsreihe 1.....	55
4.3.2. Versuchsreihe 2.....	57
4.3.3. Versuchsreihe 3.....	58
4.3.4. Versuchsreihe 4.....	60
<b>5. Versuchsergebnisse .....</b>	<b>62</b>
5.1. Versuchsauswertung der Messergebnisse .....	63
5.1.1. Versuchsreihe 1.....	63
5.1.2. Versuchsreihe 2.....	69
5.1.3. Versuchsreihe 3.....	76
5.1.4. Versuchsreihe 4.....	77
5.2. Visualisierung der Ergebnisse.....	81
5.2.1. Versuchsreihe 1.....	85
5.2.2. Versuchsreihe 2.....	99
5.2.3. Versuchsreihe 3.....	108
<b>6. Gegenüberstellung Versuchsergebnisse und Modellvorstellungen .....</b>	<b>115</b>
<b>7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>116</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>118</b>
<b>Linkverzeichnis.....</b>	<b>122</b>
 <b>Anhang</b>	
<b>A: Ergebnisse der Untersuchungen für ein geeignetes Fluid .....</b>	<b>123</b>
<b>B: Modelle der Restbruchkörper der Versuchsreihe 2.....</b>	<b>132</b>
<b>C: Weg-Kraft Diagramme der Versuchsreihe 3 .....</b>	<b>138</b>
<b>D: Bodenmechanische Laborergebnisse Kies.....</b>	<b>140</b>
<b>E: Screenshots der zitierten Internetquellen .....</b>	<b>147</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Spannungsoptik: Druckgewölbe einer Modell-Pfahlgruppe unter Belastung .....	3
Abb. 2-2: Verformtes Netz einer Berechnung mit Finite Elemente Methode .....	3
Abb. 2-3: Beobachtung von Verschiebungen an einer Grenzfläche durch farbige Markierungen .....	3
Abb. 2-4: Ermittlung der Korngrößen mit Hilfe von Stereologie .....	4
Abb. 2-5: Scan Electron Microscope: Analyse eines Mutterbodens .....	4
Abb. 2-6: Abbildung eines Vision Cone Penetrometer .....	4
Abb. 2-7: Historische Steinfundamente, welche mit Hilfe eines Bodenradars entdeckt wurden .....	5
Abb. 2-8: Mittels Particle Image Velocimetry (PIV) gemessene Geschwindigkeitsfelder in einem Porenraum .....	5
Abb. 2-9: Elektromagnetische Welle des Lichtes .....	6
Abb. 2-10: Brechungsgesetz von Snellius .....	7
Abb. 2-11: Verschiedene Arten von Aquabeads vor dem Sättigen mit Wasser .....	9
Abb. 2-12: Verschiedene Arten von Aquabeads nach dem Sättigen mit Wasser .....	9
Abb. 2-13: Silica Gel der Firma ThoMar OHG .....	11
Abb. 2-14: Beispiel eines Silica Gels Porenraum, bestehend aus einem dreidimensionalem Netzwerk an Partikelketten .....	11
Abb. 2-15: Modellvorstellung nach Jelinek und Ostermayer (1964) .....	13
Abb. 2-16: Modellvorstellung nach Wernick (1978) .....	14
Abb. 2-17: Steifemodul $M_V$ aus Triaxial - Versuchen in Abhängigkeit zur Lagerungsdichte.....	14
Abb. 2-18: Modellvorstellung nach Blinde und Witt (1980) .....	15
Abb. 2-19: Berechnungsansatz und Geometrie nach Chattopadhyay und Pise (1986) .....	16
Abb. 2-20: Zugkrafthebungscurven und die Abhängigkeit des Widerstandes von der Einbautiefe .....	16
Abb. 2-21: Bodenschalenmodell nach Quarg-Vonscheidt (2000) .....	17
Abb. 3-1: Zusammensetzung des Porenfluids .....	21
Abb. 3-2: Messprinzip Totalreflexion.....	22
Abb. 3-3: Refraktometer RE40D .....	22
Abb. 3-4: Schema der Vorstudie .....	23
Abb. 3-5: Proben der Vorstudie .....	23
Abb. 3-6: Gesättigtes Silica Gel .....	25
Abb. 3-7: Probengefäß mit Metallstab .....	26
Abb. 3-8: Ungesättigtes Silica Gel mit farbigem Hintergrund .....	26
Abb. 3-9: Ablichtungseinrichtung .....	26
Abb. 3-10: Reines Porenfluid mit darin befindlichem Metallstab.....	26
Abb. 3-11: Probengefäß mit farbigem Hintergrund .....	26
Abb. 3-12: Gesättigte Silica Gel Proben mit variiertem Brechungsindex des Porenfluids und darin befindlichem Metallstab .....	27
Abb. 3-13: Gesättigte Silica Gel Proben mit variiertem Brechungsindex des Porenfluids und farbigem Hintergrund.....	27

Abb. 3-14: Gesättigtes Silica Gel nach Iskander (2010) und Porenfluid mit Brechungsindex nach Zhao (2007) .....	27
Abb. 3-15: Farbscheinschlüsse der Silica Gel Partikel .....	28
Abb. 3-16: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex $n_D$ .....	29
Abb. 3-17: Mischungsverhältnis Toluol/2-Propanol.....	29
Abb. 3-18: Schemaskizze des Ubbelohde – Kapillarviskosimeter .....	32
Abb. 3-19: Ubbelohde - Kapillarviskosimeter .....	32
Abb. 3-20: Interfacial Tensiometer K8 (Vorderansicht) .....	33
Abb. 3-21: Interfacial Tensiometer K8 (Seitenansicht).....	33
Abb. 3-22: Schema des Messprinzips des Tensiometers .....	34
Abb. 3-23: Entwickelter Versuchsaufbau zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Silica Gels .....	36
Abb. 3-24: Schema Kontaktwinkel .....	39
Abb. 3-25: Kapillare Steighöhe h.....	39
Abb. 4-1: Versuchsdurchführung .....	42
Abb. 4-2: Versuchseinrichtung.....	43
Abb. 4-3: Versuchsstücke aus Plexiglas (Links ohne Toluol Kontakt, rechts mit Toluol Kontakt) ....	44
Abb. 4-4: Versuchsbehälter nach Verkleinerung des Versuchsbereiches.....	45
Abb. 4-5: Anschluss Glasscheibe an den Versuchsbehälter .....	45
Abb. 4-6: Versuchsbehälter.....	45
Abb. 4-7: Befüllen des Behälters mit gesättigtem Silica Gel.....	46
Abb. 4-8: Durch Laserlicht sichtbare Silica Gel Partikel .....	46
Abb. 4-9: Gewindestäbe und Glattstäbe .....	47
Abb. 4-10: SAS 900/1100 – Typ F .....	47
Abb. 4-11: Eindrehhilfe für Versuchsreihe 2 .....	48
Abb. 4-12: Eindrehhilfe für Versuchsreihe 1 .....	48
Abb. 4-13: Detail Zugvorrichtung.....	48
Abb. 4-14: Diagramm der Hubspindelgeschwindigkeit .....	49
Abb. 4-15: Laser mit Führungsschlitten.....	49
Abb. 4-16: Linearer Laserantrieb.....	50
Abb. 4-17: Diagramm des linearen Laserantriebs.....	50
Abb. 4-18: Laser MGL-N-532 .....	51
Abb. 4-19: CCD-Kamera auf dem Stativ .....	52
Abb. 4-20: Prosilica GX .....	52
Abb. 4-21: Innenansicht Steuerkasten .....	53
Abb. 4-22: Aussenansicht Steuerkasten .....	53
Abb. 4-23: Induktiver Wegaufnehmer.....	54
Abb. 4-24: Wägezelle .....	54
Abb. 4-25: Versuchsreihe 1: Grundriss .....	56
Abb. 4-26: Versuchsreihe 1: Aufriss, Einbautiefe 70 cm.....	56
Abb. 4-27: Versuchsreihe 1: Aufriss, Einbautiefe 50 cm.....	56
Abb. 4-28: Versuchsreihe 2: Grundriss .....	57

Abb. 4-29: Glatter Stab, Einbauwinkel 20° .....	57
Abb. 4-30: Versuchsreihe 2: Aufriss .....	57
Abb. 4-31: Versuchsreihe 3: Grundriss .....	58
Abb. 4-32: Versuchsreihe 3: Aufriss, Einbautiefe 70 cm .....	58
Abb. 4-33: Versuchsreihe 3: Aufriss, Einbautiefe 50 cm .....	58
Abb. 4-34: Detail Anschluss: Stab an Scheibe .....	58
Abb. 4-35: Versuchsreihe 3: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm in Silica Gel nach 50 mm Zug .....	59
Abb. 4-36: Versuchsreihe 3: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm in Referenzmaterial nach 50 mm Zug .....	59
Abb. 4-37: Versuchsreihe 4: Grundriss .....	60
Abb. 4-38: Versuchsreihe 4: Aufriss, Einbautiefe 70 cm .....	60
Abb. 4-39: Versuchsreihe 4: Aufriss, Einbautiefe 50 cm .....	60
Abb. 4-40: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm in teilgesättigtem Silica Gel .....	61
Abb. 4-41: Bodenkörper wird um den Stab eingefüllt .....	61
Abb. 5-1: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm .....	65
Abb. 5-2: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm .....	65
Abb. 5-3: Arbeitslinie des Gewindestabes $\varnothing$ 20 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm .....	66
Abb. 5-4: Gewindestab in transparentem Bodenkörper mit sichtbarer Laserebene .....	66
Abb. 5-5: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 26,5 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm ..	67
Abb. 5-6: Spannungsrisse an der Scheibe des Versuchsbehälters während des Zugvorganges des Gewindestabes $\varnothing$ 26,5 mm .....	68
Abb. 5-7: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 5° .....	70
Abb. 5-8: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 10° .....	71
Abb. 5-9: Geneigter Gewindestab in transparentem Bodenkörper .....	71
Abb. 5-10: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 15° .....	72
Abb. 5-11: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 20° .....	73
Abb. 5-12: Schematische Darstellung des Zugvorganges mit horizontalem Ausweichen des Gewindestabes unter 20° Neigung .....	73
Abb. 5-13: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 25° .....	74
Abb. 5-14: Schematische Darstellung des Zugvorganges mit Abstützung gegen horizontales Ausweichen des Gewindestabes unter 25° Neigung .....	74
Abb. 5-15: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 30° .....	75
Abb. 5-16: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm in Silica Gel und Kies vor Zugbeginn .....	76
Abb. 5-17: Arbeitslinie des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers .....	78

Abb. 5-18: Arbeitslinie des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers .....	78
Abb. 5-19: Arbeitslinie des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers .....	79
Abb. 5-20: Arbeitslinie des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers .....	79
Abb. 5-21: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm ohne Eindrehvorgang .....	80
Abb. 5-22: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes $\varnothing$ 15 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm ohne Eindrehvorgang .....	80
Abb. 5-23: Grundriss des Versuchsbehälters mit gewählten Bildebenen .....	81
Abb. 5-24: Weg-Kraft-Bereiche des maximalen Bruchkörpers und des Restbruchkörpers .....	82
Abb. 5-25: Skala der Velocity Magnitude Auswertung mit einer Skaleneinteilung von 0 – 0,7 cm.....	82
Abb. 5-26: Skala der Auswertung mit einer Bewegungsrichtung (horizontaler oder vertikaler Anteil) mit einer Skaleneinteilung von -0,4 – 0,4 cm .....	83
Abb. 5-27: Bildausschnitt einer Auswertung mit Vektorpfeilen .....	83
Abb. 5-28: Bildausschnitt einer Auswertung mit Vektorpfeilen und exemplarischen Stromlinien .....	83
Abb. 5-29: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm .....	84
Abb. 5-30: Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm.....	84
Abb. 5-31: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Vektorpfeilen .....	87
Abb. 5-32: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	88
Abb. 5-33: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien (3D-Modell) .....	89
Abb. 5-34: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	89
Abb. 5-35: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	90
Abb. 5-36: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	90
Abb. 5-37: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	91
Abb. 5-38: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	91
Abb. 5-39: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	92
Abb. 5-40: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	92
Abb. 5-41: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: V-Komponente .....	93

Abb. 5-42: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: H-Komponente .....	93
Abb. 5-43: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	94
Abb. 5-44: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude .....	95
Abb. 5-45: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: V-Komponente .....	96
Abb. 5-46: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: U-Komponente .....	96
Abb. 5-47: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 26,5 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: V-Komponente .....	97
Abb. 5-48: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 26,5 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: U-Komponente .....	98
Abb. 5-49: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen $5^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	100
Abb. 5-50: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen $5^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	100
Abb. 5-51: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen $10^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	101
Abb. 5-52: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen $10^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	101
Abb. 5-53: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	102
Abb. 5-54: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	102
Abb. 5-55: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 42 cm, Neigung zur Vertikalen $20^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	103
Abb. 5-56: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 48 cm, Neigung zur Vertikalen $20^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	103
Abb. 5-57: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 42 cm, Neigung zur Vertikalen $25^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	104
Abb. 5-58: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 45 cm, Neigung zur Vertikalen $25^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	104
Abb. 5-59: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 41 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien .....	105
Abb. 5-60: Bruchkörper nach $\sim$ 7,5 mm Zug des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 39 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude .....	105
Abb. 5-61: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ , Auswertung: U-Komponente .....	106



Abb. 5-62: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ , Auswertung: V-Komponente .....	106
Abb. 5-63: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~43 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ , Auswertung: U-Komponente .....	107
Abb. 5-64: Eindrehvorgang des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~43 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ , Auswertung: V-Komponente .....	107
Abb. 5-65: Verschiebungsbild des Gewindestabes nach 50 mm Zug in Silica Gel .....	108
Abb. 5-66: Verschiebungsbild des Gewindestabes nach 50 mm Zug in Kies.....	108
Abb. 5-67: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies .....	109
Abb. 5-68: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica .....	109
Abb. 5-69: Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies.....	110
Abb. 5-70: Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica .....	110
Abb. 5-71: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies .....	111
Abb. 5-72: Gewindestab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica .....	111
Abb. 5-73: Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies.....	112
Abb. 5-74: Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica .....	112
Abb. 5-75: Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies .....	113
Abb. 5-76: Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica .....	113
Abb. 5-77: Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies .....	114
Abb. 5-78: Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica .....	114
Abb. 7-1: Gewindestab im transparenten Bodenkörper mit gut sichtbarer Laserebene .....	116
Abb. A-1: Mischungsverhältnis Toluol/Iso-Butanol.....	124
Abb. A-2: Mischungsverhältnis Toluol/2-Butanon .....	125
Abb. A-3: Mischungsverhältnis Xylol/Iso-Butanol.....	126
Abb. A-4: Mischungsverhältnis Xylol/2-Propanol .....	127
Abb. A-5: Mischungsverhältnis Xylol/2-Butanon .....	128
Abb. A-6: Transparenzverlauf bei unterschiedlichem Brechungsindex $n_D$ des Porenfluids.....	129
Abb. A-7: Transparenzverlauf bei unterschiedlichem Brechungsindex $n_D$ des Porenfluids.....	130
Abb. A-8: Transparenzvergleiche bei unterschiedlichem Brechungsindex $n_D$ des Porenfluids .....	131
Abb. B-1: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen $5^\circ$ .....	132
Abb. B-2: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen $5^\circ$ .....	132
Abb. B-3: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen $10^\circ$ .....	133
Abb. B-4: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen $10^\circ$ .....	133
Abb. B-5: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~47 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ .....	134
Abb. B-6: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~47 cm, Neigung zur Vertikalen $15^\circ$ .....	134

Abb. B-7: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~47 cm, Neigung zur Vertikalen $20^\circ$ .....	135
Abb. B-8: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~47 cm, Neigung zur Vertikalen $20^\circ$ .....	135
Abb. B-9: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~42 cm, Neigung zur Vertikalen $25^\circ$ .....	136
Abb. B-10: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~45 cm, Neigung zur Vertikalen $25^\circ$ .....	136
Abb. B-11: Restbruchkörper des Gewindestabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~41 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ .....	137
Abb. B-12: Restbruchkörper des Glattstabes $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe ~39 cm, Neigung zur Vertikalen $30^\circ$ .....	137
Abb. C-1: Arbeitslinie Gewindestab und Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm in Silica und Kies .....	138
Abb. C-2: Arbeitslinie Gewindestab und Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 70 cm in Silica und Kies .....	138
Abb. C-3: Arbeitslinie Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm in Silica und Kies .....	139
Abb. C-4: Arbeitslinie Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 50 cm in Silica und Kies .....	139
Abb. D-1: Zusammenstellung der Bodenmechanischen Laborergebnisse .....	140
Abb. D-2: Ergebnisse des Scherversuches .....	141
Abb. D-3: Korngrößenverteilung .....	142
Abb. D-4: Kornverteilungskurve Kies .....	143
Abb. D-5: Kompressionsversuch 1 .....	144
Abb. D-6: Kompressionsversuch 2 .....	145
Abb. D-7: Kompressionsversuch 3 .....	146
Abb. E-1: Bildverweis <a href="http://www12.ovgu.de">www12.ovgu.de</a> , 2012 (Abb. 2-4) .....	147
Abb. E-2: Homepage der Carl Roth GmbH & Co.KG .....	147
Abb. E-3: Bildverweis <a href="http://www.geophysik.uni-muenchen.de">www.geophysik.uni-muenchen.de</a> , 2012 (Abb. 2-7) .....	148
Abb. E-4: Homepage der Spinnanker GmbH .....	148
Abb. E-5: Bildverweis <a href="http://www.unilabkorea.com">www.unilabkorea.com</a> , 2012 (Abb. 2-14) .....	149
Abb. E-6: Bildverweis <a href="http://web.physik.rwth-aachen.de">http://web.physik.rwth-aachen.de</a> , 2012 (Abb. 2-9) .....	149
Abb. E-7: Homepage des Stahlwerks Annahütte .....	150

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bodenmechanische Parameter des Silica Gels .....	10
Tabelle 3-1: Zusammenfassung der chemischen Eigenschaften der möglichen Fluide.....	20
Tabelle 3-2: Bewertungsmatrix der Vorstudie .....	24
Tabelle 3-3: Entscheidungsmatrix für den Brechungsindex $n_D$ des Porenfluid.....	28
Tabelle 3-4: Berechnung der Oberflächenspannung $\sigma$ .....	34
Tabelle 3-5: Durchlässigkeit $k_f$ des Silica Gels mit unterschiedlichen Fluiden.....	38
Tabelle 3-6: Kapillare Steighöhe $h$ unterschiedlicher Fluide .....	39
Tabelle 3-7: Zusammenfassung der Ergebnisse der fluidmechanischen Charakterisierung.....	40
Tabelle 4-1: Kennwerte der Gewindestäbe .....	47
Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 1.....	55
Tabelle 4-3: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 2.....	57
Tabelle 4-4: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 3.....	58
Tabelle 4-5: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 4.....	60
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 1 .....	64
Tabelle 5-2: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 2.....	69
Tabelle 5-3: Silica Gel und Referenzmaterial Kies im Vergleich.....	76
Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 4.....	77
Tabelle A-1: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex .....	123
Tabelle A-2: Mischungsverhältnis Toluol/2-Propanol für unterschiedliche Brechungsindizes.....	123
Tabelle A-3: Mischungsverhältnis Toluol/Iso-Butanol .....	124
Tabelle A-4: Mischungsverhältnis Toluol/2-Butanon.....	125
Tabelle A-5: Mischungsverhältnis Xylol/Iso-Butanol .....	126
Tabelle A-6: Mischungsverhältnis Xylol/2-Propanol.....	127
Tabelle A-7: Mischungsverhältnis Xylol/2-Butanon.....	128

## Symbolverzeichnis

### Griechische Buchstaben

$\alpha_s$	[°]	Winkel der einfallenden Welle (Snellius)
$\beta$	[°]	Öffnungswinkel (Jelinek & Ostermayer, 1964)
$\beta_s$	[°]	Winkel der weitergeleiteten Welle (Snellius)
$\gamma$	[N/m <sup>3</sup> ]	Wichte
$\delta$	[°]	Wandreibungswinkel (Jelinek & Ostermayer, 1964)
$\eta$	[kg/sm]	dynamische Viskosität
$\eta_{\text{Porenfluid}}$	[kg/sm]	dynamische Viskosität des Porenfluids
$\eta_{\text{Wasser}}$	[kg/sm]	dynamische Viskosität von Wasser
$\theta$	[°]	Kontaktwinkel
$\kappa$	[-]	Bodenparameter (Hettler, 1984)
$\lambda$	[nm]	Wellenlänge in [Nanometer]
$\nu$	[mm <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\nu_{rl}$	[°]	Dilatanzmaß (Blinde & Witt, 1980)
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte eines Fluid
$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte
$\rho_{\text{Fluid}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte des Fluids
$\rho_{\text{Porenfluid}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte des Porenfluids
$\rho_R$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Reindichte
$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Korndichte
$\rho_{\text{sat, Silica Gel}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	gesättigte Dichte des Silica Gels
$\rho_{\text{tgs}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	teilgesättigte Dichte des Silica Gels
$\rho_{\text{trk}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	getrocknete Dichte des Silica Gels
$\rho_{\text{Wasser}}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser
$\sigma$	[mN/m]	Oberflächenspannung
$\sigma'$	[mN/m]	gemessene Oberflächenspannung
$\sigma^*$	[mN/m]	korrigierte Oberflächenspannung
$\sigma_N$	[mN/m]	Normalspannung
$\sigma_x$	[N/m <sup>2</sup> ]	Vertikalspannung (Jelinek & Ostermayer, 1964)
$\tau_x$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung (Jelinek & Ostermayer, 1964)
$\varphi$	[°]	Reibungswinkel
$\varphi_B$	[°]	Bruchreibungswinkel (Blinde & Witt, 1980)
$\varphi_R$	[°]	Restreibungswinkel

### Lateinische Buchstaben

$\text{Å}$	[10 <sup>-10</sup> m]	Ångström
A	[m <sup>2</sup> ]	durchströmte Querschnittsfläche
B	[T]	magnetisches Feld der Lichtwelle in [Tesla]
c	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit in Vakuum
d	[mm]	Durchmesser
E	[V/m]	elektrisches Feld der Lichtwelle in [Volt pro Meter]

$E_s$	[MPa]	Steifemodul
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdschwerebeschleunigung
$\Delta h$	[m]	Höhendifferenz
$h$	[mm]	Kapillare Steighöhe
$h_1$	[m]	konstanter Fluidpegel im Ausgangsbehälter
$h_2$	[m]	Auslaufhöhe
$h(n)$	[-]	Proportionalitätsfaktor (Hettler, 1984)
$k_f$	[m/s]	Durchlässigkeit
$k_f, \text{ Porenfluid}$	[m/s]	Durchlässigkeit Porenfluid
$k_f, \text{ Wasser}$	[m/s]	Durchlässigkeit Wasser
$K$	[m <sup>2</sup> ]	Permeabilität
$K_{KV}$	[mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Gerätekonstante Ubbelohde Kapillarviskosimeter
$m$	[g]	Masse
$m_{\text{Gesamt}}$	[g]	Gesamtmasse
$m_{\text{Propanol}}$	[g]	Masse Propanol
$m_{\text{Silica Gel}}$	[g]	Masse Silica Gel
$m_{\text{Toluol}}$	[g]	Masse Toluol
$mN$	[10 <sup>-3</sup> N]	Millinewton
$M_v$	[MPa]	volumetrische Steifemodul (Wernick, 1978)
$n$	[-]	Porenraum
$n_D$	[-]	Brechungsindex
$n_{HW}$	[-]	Haufwerksporenraum
$n_{HW,max}$	[-]	maximaler Haufwerksporenraum
$n_{HW,min}$	[-]	minimaler Haufwerksporenraum
$n_{IK}$	[-]	Innerkornporenraum
$n_{IK,gesamt}$	[-]	gesamter Innerkornporenraum
$n_{IK,gesch.}$	[-]	geschlossener Innerkornporenraum
$n_{IK,offen}$	[-]	offener Innerkornporenraum
$n_{tot,Silica Gel}$	[-]	totaler Innerkornporenraum
$nm$	[10 <sup>-9</sup> m]	Nanometer
$\Delta p$	[N/m <sup>2</sup> ]	Druckdifferenz
$P$	[W]	Lichtleistung
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Fließrate
$r_0$	[m]	Ankerradius (Blinde & Witt, 1980)
$r$	[m]	Radius der Kapillare
$t$	[sec]	Messzeit
$T$	[°C]	Messtemperatur
$u_z$	[mm]	Weg
$v, v_1, v_2$	[m/s] bzw. [mm/sec]	Geschwindigkeit in [Meter pro Sekunde] bzw. [Millimeter pro Sekunde]
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen
$V_{IKP}$	[cm <sup>3</sup> /g]	Volumenraum Innerkornporenraum
$V_{Prop.}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen von Propanol
$V_{\text{Silica Gel}}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen des Silica Gels

$V_{\text{Toluol}}$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen von Toluol
W	[W]	Watt

**Symbole**

Massen-%	[%]	Massenprozent
∅	[mm]	Durchmesser
%		Prozent
°C		Grad Celsius
°		Winkel in Grad

(SI-Basiseinheiten sind in diesen Tabellen nicht enthalten)

**Abkürzungsverzeichnis**

CCD	Charge-coupled Device (Bauelement Kamera)
CPT	Cone Penetration Test (Drucksondierung)
FEM	Finite Elemente Methode
LED	Leuchtdiode (engl. light-emitting diode)
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PIV	Particle Image Velocimetry
SEM	Scan Electron Microscope
VisCPT	Vision Cone Penetration Test

## 1. Motivation

Geotechnische Bauvorhaben spielen sich in der Regel in einem nicht sichtbaren Bereich, dem natürlich gewachsenen Baugrund, ab. Man kann Bewegungen und Verschiebungen des Bodens berechnen und messen, sie aber nur an der Oberfläche beobachten. Das Wissen um die Mechanismen im Boden im Zuge eines Bauvorhabens sind durch unzählige Studien und Feldversuche erforscht. Um aber die Bewegungen der Bodenteilchen, z.B. in der Umgebung eines Bodenankers zu beobachten, muss man sich anderer Mittel als der oberflächennahen Betrachtung bedienen. Es gibt zahlreiche Methoden und Techniken, die in den letzten Jahren erprobt wurden, um Deformationen in natürlichem Boden zu visualisieren, wie Röntgenaufnahmen nach Roscoe et al. (1963) in den späten Sechziger Jahren oder neue Techniken wie Computertomographie (Orsi et al., 1992) oder Magnetresonanz (Mandava et al., 1990). Aber aufgrund der hohen Kosten dieser Geräte und der schwierigen Gestaltung der Versuchseinrichtungen, ist diese Art der Messungen von Boden-Bauwerksinteraktionen nur beschränkt möglich.

Eine neue Art der Beobachtung von Interaktionen des Bodens mit dem Bauwerk bieten transparente Böden. Sie bestehen aus einem Silica Gel, dessen Partikel den natürlichen Boden modellieren, das mit einem Porenfluid gesättigt wird. Die Transparenz stellt sich aufgrund des gleichen Brechungsindex der beiden Komponenten ein. Transparente Böden eignen sich gut zur Visualisierung der Interaktion in einem Bodengefüge, da sie je nach Wahl des transparenten Materials die ähnliche mechanische Eigenschaften wie z.B. Sand oder Kies besitzen, mit dem Vorteil, dass man das geotechnische Bauwerk, das sich in diesem transparenten Boden befindet, beobachten kann.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, mit Hilfe von einem synthetisch hergestellten transparenten Boden, diese Boden-Bauwerksinteraktionen an einem Gewindestab zu visualisieren. Der Modellversuch bezieht sich auf eine neue Art eines Bodenstabilisierungs- und Gründungselementes, dem Spinnanker ([www.spinnanker.com](http://www.spinnanker.com), 2013). Bei dem System des Spinnankers werden Gewindestäbe, mit einer Neigung von 30° bzw. 45° zur Vertikalen, mittels einer zuvor auf der Geländeoberfläche fixierten Ankerplatte fächerförmig in den Boden eingeschraubt (Supp & Semprich, 2010). Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die für den Spinnanker verwendeten Stäbe untersucht. Es werden Ausziehversuche mit diesen Stäben durchgeführt um die Veränderungen in der Bodenstruktur zu beobachten und zu interpretieren. Die Versuchseinrichtung und die Herstellung des transparenten Bodens stellen einen weiteren Teil dieser Arbeit dar. Die Visualisierung der Interaktionen am Stab wird mit Hilfe eines Lasers sichtbar gemacht und mit einer CCD-Kamera abgelichtet. Nach den Versuchsreihen wird mit Hilfe der Particle Image Velocimetry eine Bewertung der Bilder durchgeführt. Die Particle Image Velocimetry, kurz PIV, ist ein optisches Verfahren, das eine berührungslose Messung von Geschwindigkeitsfeldern erlaubt. Diese Methode kommt ursprünglich aus der Strömungsmechanik und wird zunehmend auch in der geotechnischen Forschung benutzt.

## 2. Stand der Technik

### 2.1. Allgemein

Im bodenmechanischen Fachbereich kann man zwei Grundarten des Wirkens des Bauingenieurs unterscheiden. Eine Richtung betrifft das Bauen im Baugrund. Dabei befasst man sich mit den Interaktionen, die z.B. Gründungspfähle auf den umgebenden Boden oder die Tunnelbauwerke auf den umgebenden Fels ausüben. Die andere Richtung beinhaltet das Bauen mit dem Baugrund. Hier wird Boden als Baustoff verwendet, z.B. für Dämme im Wasserbau oder Straßenbau. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher geotechnischer Aufgaben, ist es wichtig, das Verständnis für den Baugrund zu vertiefen. Aus diesem Grund spielt die Erforschung von geotechnischen Problemstellungen eine wichtige Rolle. Dabei gibt es für jede Art von Bauen, ob nun im Baugrund oder mit dem Baustoff Boden unterschiedliche Methoden der Forschung. In den folgenden Kapiteln wird ein kurzer Überblick über die gängigen Methoden in der geotechnischen Forschung gegeben.

### 2.2. Visualisierungsmethoden

Die Abbildungsmöglichkeiten im Forschungsgebiet der Geotechnik haben sich in den letzten Jahren in Folge der Fortschritte in der Computertechnologie und der digitalen Fotografie rasant weiterentwickelt. Dem Bauingenieur bietet sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, Forschungsergebnisse, ob im Feld oder im Labor abzubilden, um sie anschließend zu analysieren und zu verstehen. Laut Iskander (2010) kann man fünf Bereiche unterscheiden, in denen sich der Bauingenieur in der Forschung mit Visualisierung auseinandersetzt: (1) Messungen der Spannung im Boden, (2) Messungen der Verformungen im Boden, (3) Charakterisierung des Bodengefüges, (4) Klassifizierung des Bodens und der Korngrößenverteilung und (5) Geoenvironmental - Studies.

**Spannungsmessungen** im Boden werden mit Hilfe der Spannungsoptik visualisiert. Die Technik der Spannungsoptik basiert auf transparenten festen Partikeln, die bei Beanspruchung doppelbrechend werden und dadurch eine Spannungsverteilung durch polarisiertes Licht aufzeigen (Abb. 2-1). Vereinzelt wird das Verfahren noch in der Werkstoffprüfung angewandt, da die Herstellung der durchsichtigen Kunstharzmodelle sehr aufwendig ist. Abgelöst wird diese Methode heutzutage durch die Finite-Elemente-Methode (FEM), da diese schneller und kostengünstiger ist. Hierbei wird ein Bauteil numerisch in ein FE-Netz zerlegt, das aus Finiten Elementen und Knoten besteht (Abb. 2-2). Es werden Bodenparameter, Lasten und Randbedingungen definiert. Anschließend wird mithilfe von Rechenprogrammen aus diesem physikalischen ein mathematisches Modell erstellt. Es wird eine Steifigkeitsmatrix formuliert, welche die Eigenschaften der Elemente repräsentiert und folgend gelöst werden kann. Als Ergebnis dieser Berechnungen erhält man die gesuchten Größen wie z.B. Spannungen oder Verschiebungen.



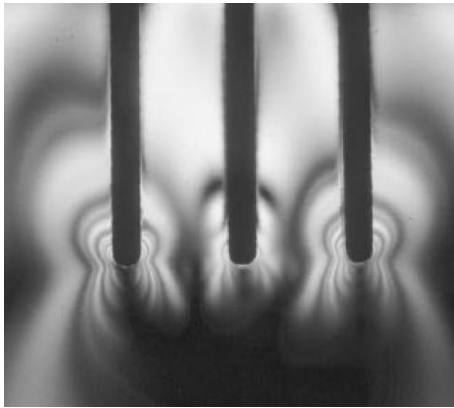


Abb. 2-1: Spannungsoptik: Druckgewölbe einer Modell-Pfahlgruppe unter Belastung (Mörchen, 2003)

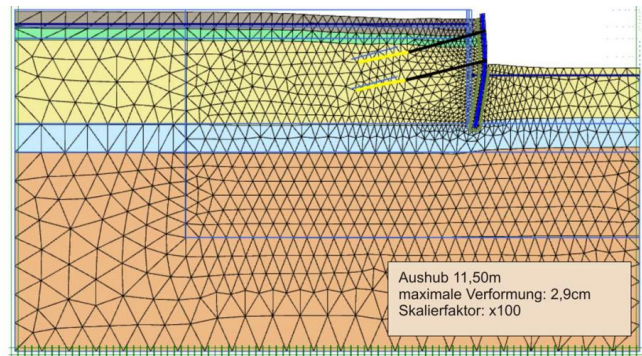


Abb. 2-2: Verformtes Netz einer Berechnung mit Finite Elemente Methode (Kern, 2013)

Zur Messung von **Verformungen** im Boden kann man zwei Arten unterscheiden. Die erste Möglichkeit erkennt Verformungen nur an der sichtbaren Grenzfläche eines Versuchsmodells mithilfe von Markierungen, wie farbige Schichten (Abb. 2-3) oder Raster und deren Lageänderungen während der Belastung des Modells (Butterfield & Andrawes, 1971). Hierbei wird immer eine Kamera benötigt, die diese Lageänderungen festhält. Durch das Aufkommen von computerunterstützten Messungen wurde diese Art der Analyse immer effizienter und vor allem genauer. Diese Methode beschränkt sich aber auf kleine Modelle und vor allem auf die sichtbare Grenzfläche des Modells. Alle Aktionen die innerhalb des Modells stattfinden kann man nicht beobachten.



Abb. 2-3: Beobachtung von Verschiebungen an einer Grenzfläche durch farbige Markierungen

Die zweite Möglichkeit besteht darin, Röntgenstrahlen zu benutzen um mit Hilfe von Computertomographie, Lasertomographie oder Magnetresonanz Verformungen in Bodenmodellen zu betrachten (Bourdeau, 1993; Shi et al., 1999; Ng et al., 1996; Konagai et al., 1992). Das ermöglicht zwar eine Beobachtung der Aktionen innerhalb des Bodenkörpers, aber diese Art der Forschung ist sehr kostenintensiv und kann nur mit sehr aufwendigen Versuchseinrichtungen realisiert werden.

Um das **Gefüge** und den **Porenraum** eines Bodens zu visualisieren, gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen. Muhunthan & Chameau (1992) benutzen dazu die Stereologie, also eine räumliche Interpretation von Schnitten durch Körper, um damit eine Aussage über das Bodengefüge zu gewinnen (Abb. 2-4). Sie fixierten ihre Proben mit Hilfe von Harz um sie dann in Scheiben zu schneiden und diese Bodenprobenscheiben zu analysieren. Unter dem Mikroskop konnten sie die Unterschiede in der Porigkeit des Bodens visualisieren. Eine weitere Methode, um eine Bodenstruktur zu analysieren, bietet das Scan Electron Microscope (SEM) (Abb. 2-5). Dieses Mikroskop stellt eine Variante des Rasterelektronenmikroskops dar und wird vor allem für Ton oder sandigen Boden verwendet (Kuo et al., 1996; Penumadu & Hazan, 1997; Liu et al., 2008). Die neueste Methode, um Bodengefüge zu analysieren, bietet die Kernspinresonanzspektroskopie (engl. nuclear magnetic resonance, NMR). NMR-Spektroskopie ist eine spektroskopische Methode zur Untersuchung der elektronischen Umgebung einzelner Atome und der Wechselwirkungen mit den Nachbaratomen (Ketchman & Carlson, 2001). Diese Studien in der kleinsten Ebene des Bodens, der Partikelebene, helfen die makro-geotechnischen Eigenschaften von natürlichem Sand oder Fels zu verstehen.

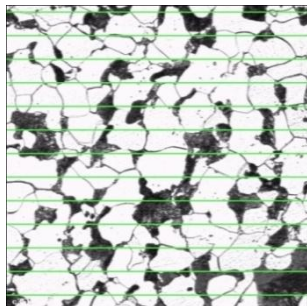


Abb. 2-4: Ermittlung der Korngrößen mit Hilfe von Stereologie (www.12.ovgu.de, 2012)

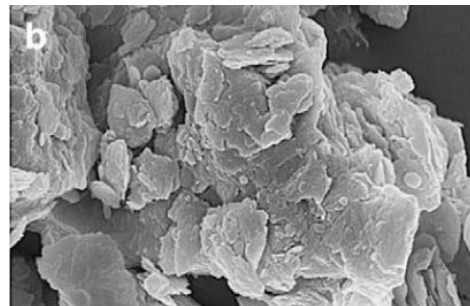


Abb. 2-5: Scan Electron Microscope: Analyse eines Mutterbodens (Liu et al., 2008)

Im Bereich der **Klassifizierung** des **Bodens** und seiner Kornverteilung gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. Eine In-Situ Methode um Boden zu beurteilen, ist eine Weiterentwicklung der Drucksondierung (CPT). Hier werden 2 Kameras und Lichtquellen in die elektrische Spitze eingebaut, um Abbildungen des Bodens während der Sondierung durchführen zu können (Abb. 2-6). Das Verfahren nennt sich Vision Cone Penetrometer (VisCPT) und wird bereits sehr häufig eingesetzt (Hryciw et al., 1998; Hryciw & Ohm, 2013).



Abb. 2-6: Abbildung eines Vision Cone Penetrometer (Hryciw & Ohm, 2013)

Im Bereich der **Geoenvironmental - Studies** werden Visualisierungsmethoden schon seit langer Zeit im Bereich der Grundwasserströmungen eingesetzt, hier vor allem bei Deponien und Schadstoffablagerungen. Zweidimensionale Modelle wurden in Laboratorien mit Hilfe von transparenten Behältern und eingefärbtem Wasser hergestellt, um Fließmuster zu erkennen. Weil et al. (1993) benutzt eine andere Methodik um auf Deponien den Schadstofftransport durch Wasser feststellen zu können, das Bodenradar (Abb. 2-7).

Transparenter Boden, wie er in dieser Arbeit verwendet und im folgenden Kapitel noch näher erläutert wird, wurde ursprünglich zur Modellierung von Fließproblemen im Boden verwendet. Welker et al. (1999) benutzte die Farbsättigung, um Fließvorgänge von Schadstoffen in vertikalen Drainagen in transparentem Boden zu beobachten. Eine weitere Methode ist die Particle Image Velocimetry (PIV) wie sie z.B. Cheng et al. (2000) oder Beguin et al. (2013) benutzen. Auch in der vorliegenden Arbeit wird auf dieses Verfahren zurückgegriffen. Diese Methode beruht auf dem Prinzip der digitalen Fotogrammetrie. Das Verfahren ist berührungslos. Es werden Bilder während einer Belastung in einem gewissen Zeitabstand von einer Oberfläche erstellt und anschließend miteinander verglichen. Dadurch können Geschwindigkeitsfelder der Bewegung erzeugt werden (Abb. 2-8). Eine genaue Erläuterung der PIV-Methode gibt das Bachelor-Projekt (Poprask, 2013), das dieser Masterarbeit vorangegangen ist.

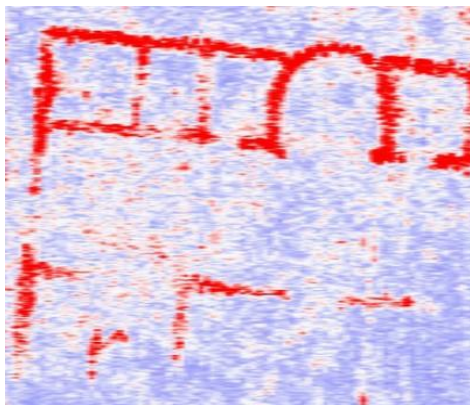


Abb. 2-7: Historische Steinfundamente, welche mit Hilfe eines Bodenradars entdeckt wurden ([www.geophysik.uni-muenchen.de](http://www.geophysik.uni-muenchen.de), 2012)

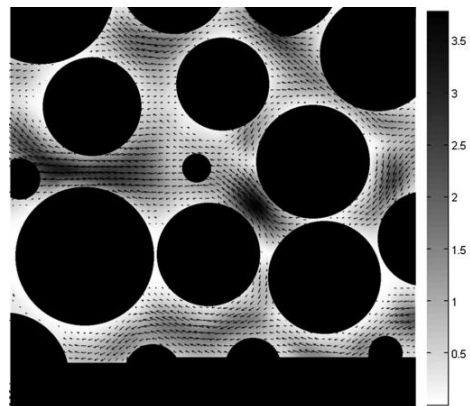
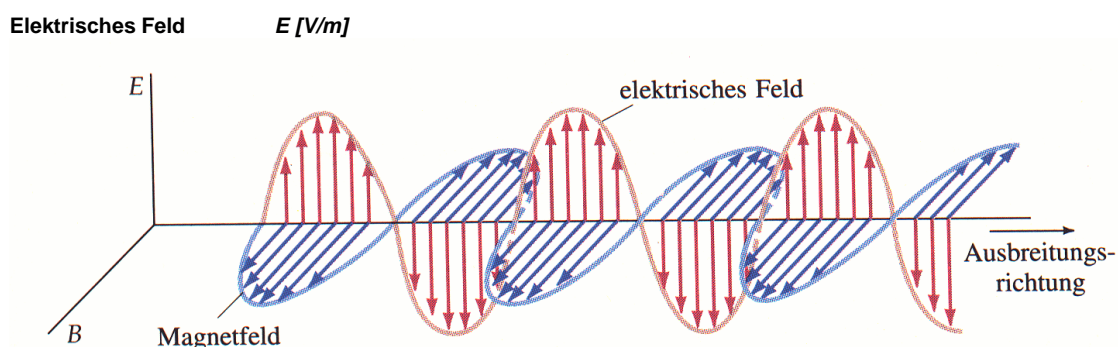


Abb. 2-8: Mittels Particle Image Velocimetry (PIV) gemessene Geschwindigkeitsfelder in einem Porenraum (Beguin et al., 2013)

### 2.3. Synthetisch hergestellter transparenter Boden

Mit transparentem Boden kann man, wie schon erwähnt, Interaktionen - in der Regel Partikelverschiebungen an der Schnittstelle Boden-Bauwerk - visualisieren. Dieser künstliche Boden besteht aus zwei Einzelkomponenten, einem granularem transparenten Material und einem Porenfluid. Wichtig ist, dass sowohl das Granulat als auch das Porenfluid den gleichen Brechungsindex besitzen. Warum der Brechungsindex der ausschlaggebende Grund für die Transparenz des Bodens ist, wird nachfolgend kurz erklärt.

Um die Transparenz des hier verwendeten künstlichen Bodens zu verstehen, muss man sich mit Licht und dem Brechungsindex beschäftigen. Wenn Licht ein Objekt trifft, wird dieses entweder reflektiert oder teilweise/vollständig gebrochen. Dieser Umstand lässt ein Objekt durchsichtig oder undurchlässig erscheinen. Das Thema Licht wird seit dem frühen 16. Jahrhundert diskutiert. Damals gab es zwei Haupttheorien. Die erste wird von Newton bestimmt, der annimmt, dass Licht aus Lichtteilchen (Korpuskeln) besteht. Mit dieser Teilchentheorie konnte er aber nicht alle Lichtphänomene, wie z.B. die Doppelbrechung, erklären. Er versuchte, mit Hilfe der Äthertheorie seine Thesen zu erweitern und diese Phänomene dadurch zu deuten. Die andere Haupttheorie, die von Christiaan Huygens ausging, besagt, dass Licht eine sich ausbreitende Welle ist. Mit dieser Wellentheorie konnte man Lichtbeugung, Polarisation und Farbe erklären. Max Planck vereint diese beiden Theorien in seiner Quantenphysik im 20. Jahrhundert. Auch Einstein hat sich mit Hilfe dieser Quantenphysik mit der Materie Licht beschäftigt. Aus diesen Forschungen geht das heutige Wissen um Licht hervor (Hecht, 2005). Licht besteht also aus einer elektromagnetischen Welle, die zwei Komponenten besitzt. Eine elektrische Welle und eine magnetische Welle. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, deren magnetische und elektrische Vektoren sich senkrecht zueinander und senkrecht auf die Ausbreitungsrichtung fortbewegen (Abb. 2-9). Sie brauchen kein Medium um sich fortzupflanzen und breiten sich im Vakuum mit konstanter Lichtgeschwindigkeit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s aus. Die Geschwindigkeit des Lichtes hängt von der Länge der Lichtwelle und vom Medium ab, in dem sich die Lichtwelle ausbreitet.



Magnetisches Feld  $B$  [T]

Abb. 2-9: Elektromagnetische Welle des Lichtes (<http://web.physik.rwth-aachen.de>, 2012)

Die meisten transparenten Materialien besitzen keine elektrische Leitfähigkeit. Die Elektronen in diesen dielektrischen Substanzen sind nicht wie bei Metallen frei beweglich sondern an das Atom gebunden. Wenn ein Lichtstrahl dieses transparente Medium trifft, dringt es durch dieses Material mit einer anderen Geschwindigkeit  $v$  als der Lichtgeschwindigkeit. Das Ewald-Oseen Theorem erklärt diese Ausbreitung von Licht in einem Medium unter Verwendung der Maxwell'schen Gleichungen. Es wird eine elektromagnetische Welle in diesem Medium generiert, die aus zwei Termen besteht. Eine Komponente löscht die primäre Welle des Lichtes im Medium, die andere Komponente bewegt sich durch das Medium mit einer Geschwindigkeit  $v$  und im Allgemeinen ein von der einfallenden Welle abweichenden Ausbreitungsrichtung (Hecht, 2005).

Das Verhältnis von Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Geschwindigkeit in diesem Medium wird als Brechungsindex  $n_D$  angegeben (Gleichung [1]; Iskander, 2010). Der Brechungsindex ist abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes. Er wird standardmäßig bei der D-Linie, der dominanten Spektrallinie von Natrium (Wellenlänge 589,3 nm), gemessen und somit mit  $n_D$  bezeichnet.

$$n_D = \frac{c}{v} \quad [1]$$

$n_D$	Brechungsindex [-]
$c$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [m/s]
$v$	Geschwindigkeit im Medium [m/s]

Der Brechungsindex von Licht in Luft ist  $n_D = 1,0003$ . Folglich ist die Geschwindigkeit von Licht in Luft und Licht im Vakuum annähernd gleich. Die Geschwindigkeitsänderung des Lichtes in einem transparenten Medium hängt von der Änderung der Richtung der weitergeleiteten Welle ab. Das Brechungsgesetz von Snellius (Abb. 2-10) beschreibt diese Änderung der einfallenden Welle (Gleichung [2]):

$$\frac{\sin \alpha_s}{\sin \beta_s} = \frac{v_1}{v_2} \quad [2]$$

$\alpha_s$	Winkel der einfallenden Welle [°]
$\beta_s$	Winkel der weitergeleiteten Welle [°]
$v_1$	Geschwindigkeit im Medium Luft [m/s]
$v_2$	Geschwindigkeit im Medium Wasser [m/s]

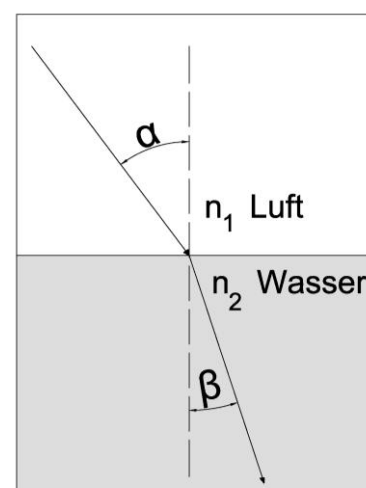


Abb. 2-10: Brechungsgesetz von Snellius



Die Geschwindigkeit in Luft wird vereinfachend der Lichtgeschwindigkeit  $c$  gleichgesetzt. Durch Umformen des Brechungsgesetzes und dem Brechungsindex erhält man Gleichung [3]:

$$\frac{\sin \alpha_S}{\sin \beta_S} = n_D \quad [3]$$

Der Brechungsindex ist somit das Verhältnis von einfallendem zu weitergeleitetem Winkel des Lichtes (Iskander, 2010).

Der Brechungsindex ist temperaturabhängig. Die Standardtemperatur, bei der gemessen wird, liegt bei 20°C. Bei einer anderen Messtemperatur wird dieser Wert dem Brechungsindex hinzugefügt, z.B. im Falle einer Messung bei 25°C, wird der Brechungsindex angegeben als  $n_D^{25}$ . In dieser Arbeit wird die Standardmesstemperatur von 20°C verwendet.

Wenn Licht auf ein granulares Medium, wie z.B. Zucker trifft, wird es an den Oberflächen reflektiert und gebrochen. Aus diesem Grund erscheint Zucker oder Salz, dessen Partikel einzeln betrachtet eigentlich transparent sind, in der Masse weiß. Wenn aber der Raum zwischen den Partikeln mit einem Material gefüllt wird, das den gleichen Brechungsindex besitzt wie die Partikel, erscheint das ganze Medium transparent, weil keine Reflexion oder Brechung des Lichtes an den Oberflächen stattfinden kann, da der Brechungsindex der beiden Medien derselbe ist. Dieses Phänomen wird bei synthetischem transparentem Boden angewandt. Hier wird Silica Gel, dessen einzelne Partikel transparent sind, aber in der Masse weiß erscheinen, mit einem Porenfluid, das den gleichen Brechungsindex besitzt wie diese Partikel, vermischt. Dieses Porenfluid sättigt die Innerkorporen des Silica Gels und die Haufwerksporen und es entsteht dadurch eine transparente Bodenmasse.

Auf die beiden Komponenten des transparenten Bodens wird im Weiteren noch näher eingegangen.

In der Forschung werden drei unterschiedliche Familien von transparenten Materialien verwendet um synthetischen Boden herzustellen (Iskander, 2010). Die erste Familie ist die des amorphen Silica Pulvers. Es weist ähnliche Eigenschaften wie natürlicher Ton auf. Die zweite Familie, die feinkörnigen Kies modelliert, ist die des Silica Gels, das auch in dieser Arbeit benutzt wird. Silica Pulver und Silica Gel kann in ein und demselben Model verwendet werden um unterschiedliche Bodenschichten zu generieren, da sie den gleichen Brechungsindex besitzen und somit das gleiche Porenfluid benötigen. Die dritte Gruppe ist die sogenannte Familie der Aquabeads. Diese werden vor allem zur Durchflussbestimmung von Böden benutzt und modellieren sehr schwache Sedimentböden. Aquabeads besitzen einen abweichenden Brechungsindex zu den beiden ersten Familien und können daher nicht in ein und demselben Versuchsmodell verwendet werden. Diese Familie kann, wie der Name schon andeutet, mit Wasser gesättigt werden, da sie den gleichen Brechungsindex wie Wasser besitzen.

Die beiden ersten Familien, Silica Pulver und Silica Gel, bestehen aus dem amorphen Grundmaterial Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$ . Siliciumdioxid besteht aus den zwei am häufigsten vorkommenden Materialien in der Erdkruste, Silicium und Sauerstoff. Es ist nicht wasserlöslich und besitzt eine sehr große innere Oberfläche auf Grund der Mikroporen.

Aus diesem Grund wirkt es sehr stark hygroskopisch, zieht also Feuchtigkeit aus der Umgebung und bindet diese. Die Herstellung erfolgt in unterschiedlichen Prozessen, je nach Anforderung an das Endprodukt. Silica Gel wird aus Wasserglas, das aus Quarz oder Sand gewonnen wird, hergestellt. Dieses Wasserglas wird mit Säure versetzt, dadurch entsteht Hydrogel dass durch anschließende Trocknung in Xerogel umgewandelt wird. Danach werden die Partikel in die Form gebracht, die benötigt wird, und nach Größe sortiert (Iskander, 2010).

Aquabeads bestehen aus einem wasseradsorbierenden Polymer, das sich aus Isobutylen und Maleinsäureanhydrid Copolymeren zusammensetzt. Der große Vorteil von Aquabeads im Gegensatz zu Silica Pulver und Silica Gel ist das ungefährliche Porenfluid Wasser das benutzt werden kann (Abb. 2-11, Abb. 2-12). Bestrebungen in die Richtung, das chemische Porenfluid der beiden Silica Arten durch ein ungiftiges Porenfluid zu ersetzen, sollten verfolgt werden. Nähere Informationen zu Aquabeads und Silica Pulver Arten findet man bei Iskander (2010).



Abb. 2-11: Verschiedene Arten von Aquabeads vor dem Sättigen mit Wasser (Lo et al., 2008)



Abb. 2-12: Verschiedene Arten von Aquabeads nach dem Sättigen mit Wasser (Lo et al., 2008)

### 2.3.1. Silica Gel

In dieser Arbeit wird als transparentes Material Silica Gel verwendet, da der nachzustellende Bodenkörper feinkörnigem Kies oder grobkörnigen Sand entsprechen soll.

Silica Gel ist seit dem 17. Jahrhundert bekannt, wurde aber erst im ersten Weltkrieg als Adsorptionsmittel in Gasmasken wirklich genutzt (Iskander, 2010). Es wird als Adsorptionsmittel in laboratorischen Einrichtungen verwendet z.B. in einem Exsikkator oder in der Industrie als Katalysator, Reinigungsmittel, Trägermittel in Zahnpasta oder in kleinen Beuteln abgefüllt, dient es in Handtaschen, Koffern oder Schuhen als Trocknungsmittel.

Silica Gel wird in unterschiedlichen Korngrößen und Kornformen hergestellt und vertrieben. Die handelsübliche Korngröße beträgt 0,5 mm bis 5 mm. Die Kornform des Silica Gels wird entweder als Rundkorn oder als Kantkorn ausgeführt. Für die Versuche dieser Masterarbeit wird eine Korngrößenverteilung von 2 bis 5 mm und eine Rundkornvariante gewählt, um natürlichen feinkörnigen Kies zu simulieren. Durch den Herstellungsprozess aus Xerogel besteht ein Silica Gel Korn aus einem dreidimensionalen Netzwerk aus Partikelketten (Abb. 2-14). Diese Partikel haben eine Größe von 3 bis 30 Nanometer (Iler, 1979). Das Netzwerk besitzt einen untereinander verbundenen kugelförmigen Porenraum, deren Poren eine durchschnittliche Größe von 21 Å besitzen. Die Trockendichte  $\rho_d$  des hier verwendeten Silica Gels beträgt 0,80 g/cm<sup>3</sup>, die Reindichte  $\rho_R$  beträgt 2,06 g/cm<sup>3</sup>. Der Volumenraum pro Gramm Silica Gel den die Innerkornporen einnehmen, beträgt ungefähr  $V_{IKP} = 0,41$  cm<sup>3</sup>/g (Supp, 2011). Aufgrund dieser großen inneren Oberfläche durch Mikroporen besitzt es relativ große hygroskopische Kräfte. Es gibt viele verschiedene Firmen, die Silica Gel herstellen und vertreiben. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird Silica Gel der Firma ThoMar OHG genutzt (Abb. 2-13), da mit diesem Produkt schon gute Erfolge in anderen Projekten erzielt werden konnte (Egger, 2010; Oblasser, 2011). Das Silica Gel wurde im Masterprojekt von Marco Oblasser (2011) ausführlich bodenmechanisch untersucht und bewertet. Die Parameter des Silica Gels wurden aus dieser Arbeit übernommen.

Ein wichtiger Kennwert des Silica Gels ist der Porenraum  $n$  des Materials, da er sich gravierend vom Porenraum eines natürlichen Bodens unterscheidet. Silica Gel besitzt wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt ein Netzwerk an verbundenen Innerkornporen. Diese Innerkornporen dürfen im Vergleich mit natürlichem Kies nicht berücksichtigt werden, da Kies nicht über dieses große innere Porenvolumen verfügt. Der Innerkornporenanteil des Silica Gels ist das Produkt aus der Trockendichte  $\rho_d$  des Silica Gels und dem Volumenraum den die Innerkornporen einnehmen. Der Innerkornporenanteil  $n_{IK}$  von Silica Gel beträgt  $n_{IK} = \sim 0,33$ . Der Brechungsindex des Silica Gels wird aus der Literatur (Iskander, 2010) übernommen und beträgt  $n_D = 1,4480$ .

Die nachfolgende Tabelle 2-1 zeigt die wichtigsten bodenmechanischen Parameter.

Silica Gel			
<b>Reindichte</b>	$\rho_R$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,06
<b>Korndichte</b>	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,10
<b>Trockendichte</b>	$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,8
<b>Körnungslinie</b>	$\emptyset$	[mm]	2-5
<b>Innerkornporen</b>	$n_{IK}$		
offen	$n_{IK,offen}$	[-]	0,33
geschlossen	$n_{IK,gesch.}$	[-]	0,0
gesamt	$n_{IK,gesamt}$	[-]	0,33
<b>Haufwerksporen</b>	$n_{HW}$	[-]	0,27
( $\rho_d = 0,79$ g/cm <sup>3</sup> ) lockerste Lagerung	$n_{HW,max}$	[-]	0,28
( $\rho_d = 0,81$ g/cm <sup>3</sup> ) dichteste Lagerung	$n_{HW,min}$	[-]	0,26
<b>Reibungswinkel <sup>*)</sup></b>	$\varphi$	[°]	43,0
<b>Restreibungswinkel <sup>*)</sup></b>	$\varphi_R$	[°]	33,0
<b>E-Modul (<math>\sigma_N = 640 - 1000</math>kPa)</b>	$E_s$	[MPa]	82,0

(<sup>\*)</sup> Ermittelt bei geringem Spannungsniveau)

Tabelle 2-1: Bodenmechanische Parameter des Silica Gels



Die gesättigte Dichte des Silica Gels ergibt sich, wenn man die Trockendichte des Silica Gels mit der Dichte des Porenfluids, das sich im gesamten Porenraum befindet addiert (Gleichung [4]). Die Dichte des Porenfluids  $\rho_{Fluid}$  ist  $0,82 \text{ g/cm}^3$  (Ganster, 2012b).

$$\rho_{sat, Silica\ Gel} = \rho_d + n_{tot, silica\ Gel} * \rho_{Fluid} \quad [4]$$

Der totale Porenraum des Silica Gels setzt sich aus dem Haufwerksporenraum und dem Innerkornporenraum zusammen und beträgt für die Lagerung, die in den Versuchsreihen dieser Masterarbeit immer angestrebt wird,  $n_{tot, Silica\ Gel} = 0,6$ .

Somit ergibt sich eine gesättigte Dichte  $\rho_{sat, Silica\ Gel} = 1,30 \text{ g/cm}^3$ .

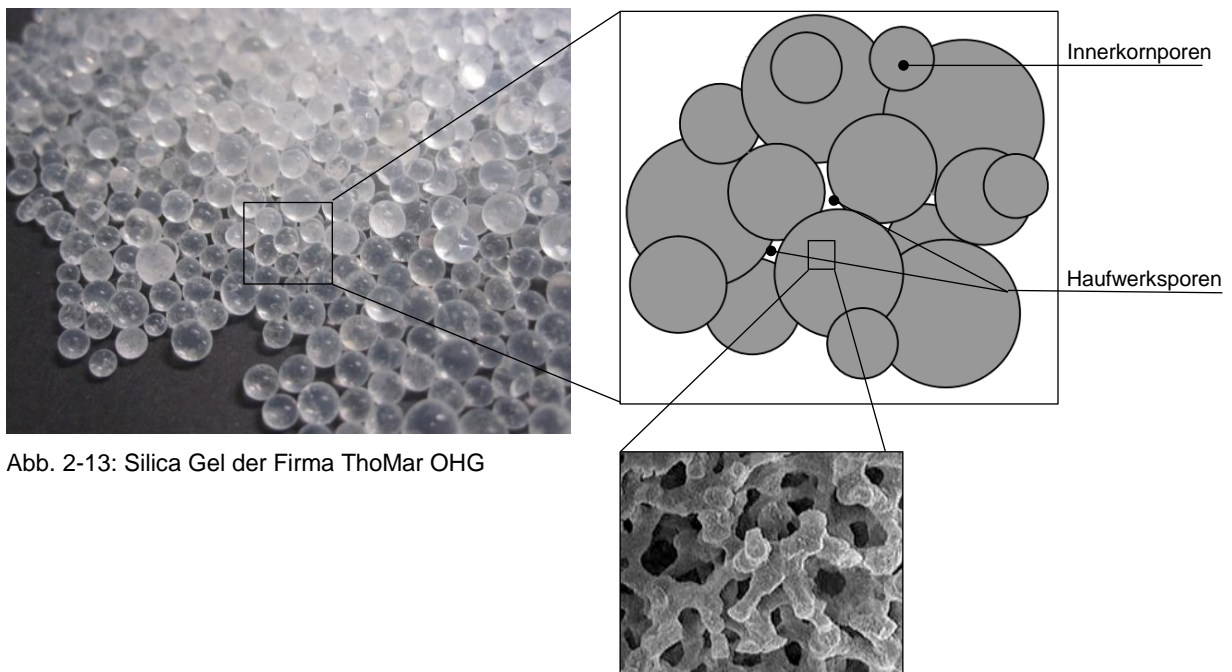


Abb. 2-13: Silica Gel der Firma ThoMar OHG

Abb. 2-14: Beispiel eines Silica Gels Porenraum, bestehend aus einem dreidimensionalem Netzwerk an Partikelketten (www.unilabkorea.com, 2012)

### 2.3.2. Porenfluid

Die wichtigste Eigenschaft, die das Porenfluid besitzen muss, ist derselbe Brechungsindex  $n_D = 1,4480$  des Silica Gels. Da es keine Chemikalie gibt, die exakt diesen Brechungsindex besitzt und die erforderlichen Eigenschaften aufweist, muss das Porenfluid selbst hergestellt werden. Dieses Fluid erhält man, wenn man ein Basisfluid mit höherem Brechungsindex mit einem Sekundärfluid mit niedrigerem Brechungsindex in einem bestimmten Verhältnis mischt.

Neben dem Brechungsindex ist die Viskosität des Porenfluids wesentlich. Nur durch ein sehr fließfähiges Fluid, also durch niedrige Viskosität, werden die Mikroporen schnell und luftporenfrei gesättigt. Auch die Oberflächenspannung des Fluids ist ein zu betrachtender Parameter, da sie ein Maß für die Sättigung des Silica Gels ist. Das Porenfluid muss darüber hinaus inkompressibel und mit geringen Kosten verbunden sein. Die Reaktionen, die durch das chemische Porenfluid mit der Versuchseinrichtung entstehen könnten, müssen auch berücksichtigt werden. Die fluidmechanische Charakterisierung des Porenfluids, welches in den Versuchsreihen dieser Masterarbeit benutzt wird, ist ausführlich in Kapitel 3 beschrieben. Die Wechselwirkungen der Fluide mit der Versuchseinrichtung wird in Kapitel 4.2 behandelt.

Es gibt weltweit eine Vielzahl an Untersuchungen und Forschungen bezüglich des Porenfluids. Iskander (2010) benutzt z.B. zwei unterschiedliche Porenfluide. Zum einem eine 50:50 Mischung eines Mineralöls (Drakeol 35) und eines Paraffinöls (Norpar 12), zum anderen eine Mischung aus Kalziumbromid und Wasser. Er erzielt mit diesen Mischungen und dem von ihm verwendeten transparenten Material sehr gute Ergebnisse. Zhao (2007) hat in ihrer Dissertation eine Vielzahl an chemischen Fluiden und Mischungen getestet. Ein Teil der Fluide, welche in dieser Dissertation Anwendung gefunden haben, wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Versuchsreihen der vorliegenden Masterarbeit untersucht.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Auswahl des Porenfluids ist die chemische Interaktion mit anderen in der Versuchseinrichtung verbauten Materialien. Auch die Sicherheitsmaßnahmen müssen darauf abgestimmt werden, wie z.B. die Belüftung des Raumes oder die persönliche Schutzausrüstung.

Die aktuellen Bemühungen im Forschungsgebiet des transparenten Bodens zielen darauf ab, dass anstelle der schädlichen chemischen Porenfluide und des Silica Gels nach anderen Möglichkeiten gesucht wird, um natürlichen Boden wie Sand oder Kies zu imitieren. Kanadische Wissenschaftler haben ein Quarzglasgemisch getestet, welches sich mit ungefährlichem Mineralöl sättigen lässt (Ezzein & Bathurst, 2011). Diese Bemühungen stecken derzeit noch im Versuchsstadium und können daher für die Versuchsreihen dieser Masterarbeit nicht herangezogen werden.

## 2.4. Modellvorstellungen

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die gängigen Modellvorstellungen, experimentellen Untersuchungen und Berechnungsansätze zum Thema Zugpfahl gegeben werden. Der Versagensmechanismus von Zugpfählen oder einer Pfahlgruppe bietet auch heute noch Grund für Diskussionen in geotechnischen Kreisen, da kein einfaches, allgemeines und anerkanntes mechanisches Modell für die Bestimmung des Tragverhaltens von Zugpfählen existiert.

Des Weiteren werden Modellversuche mit einer ähnlichen Durchführung bezüglich Lagerungsdichte oder Pfahldurchmesser aufgezeigt. Am Ende dieser Arbeit werden die erzielten Versuchsergebnisse mit den hier angeführten, aus der Literatur entnommenen Modellen gegenübergestellt (Kapitel 6).

### 2.4.1. Jelinek und Ostermayer

Jelinek und Ostermayer (1964) betrachten in ihrem Berechnungsansatz für einen Zugpfahl einen Einzelpfahl und leiten über den Mohr'schen Spannungskreis die an der Pfahlmantelfläche übertragene Schubspannung  $\tau_x$  für den ebenen Spannungszustand ab. In ihrem Berechnungsansatz ergibt der durch den Zugpfahl angehobene Bodenkörper im Bruchzustand einen Kegelstumpf mit einem Öffnungswinkel  $\beta$  (Abb. 2-15). Sie treffen die Annahme, dass die Vertikalspannungen  $\sigma_z$  konstant sind und der maximale Wandreibungswinkel  $\delta$  dem Reibungswinkel  $\varphi$  des Bodens entspricht. Außerdem wird angenommen, dass die Gleitflächen im Boden unter dem Winkel  $\beta = \varphi$  bei maximaler Schubspannung oder  $\beta = 0$  bei minimaler Schubspannung gegen die Pfahlachse geneigt sind. Die Eingangsparameter, die den Öffnungswinkel  $\beta$  des Kegelstumpfes bestimmen, sind der Reibungswinkel  $\varphi$  und die Wichte  $\gamma$  des Bodens, der Pfahldurchmesser und die Pfahllänge.

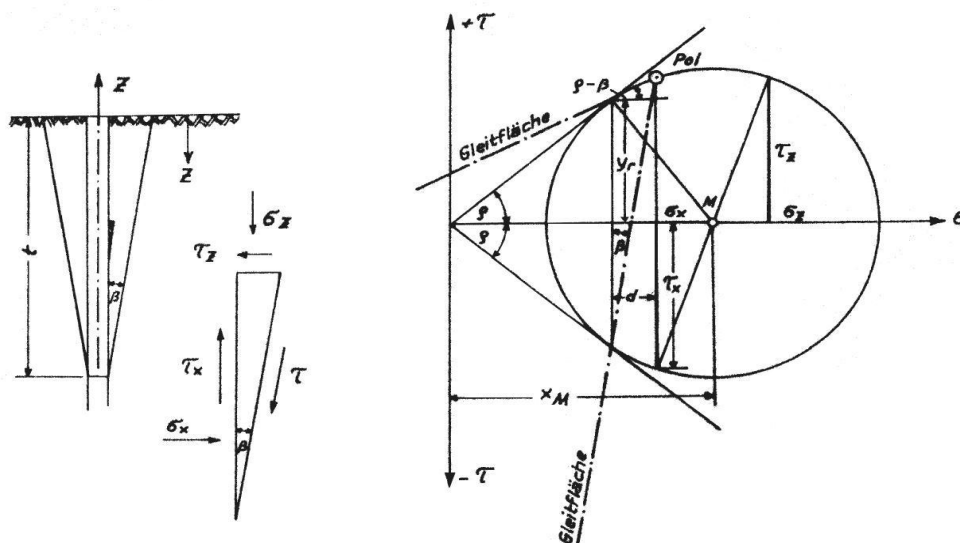


Abb. 2-15: Modellvorstellung nach Jelinek und Ostermayer (1964)

### 2.4.2. Wernick

Wernick (1978) entwickelt in seiner Arbeit über die Tragfähigkeit von Ankern in Sand einen elastizitätstheoretischen Ansatz zur Ermittlung radialer Spannungen auf zylindrischen Ankerkörpern infolge behinderter Dilatanz (Abb. 2-16).

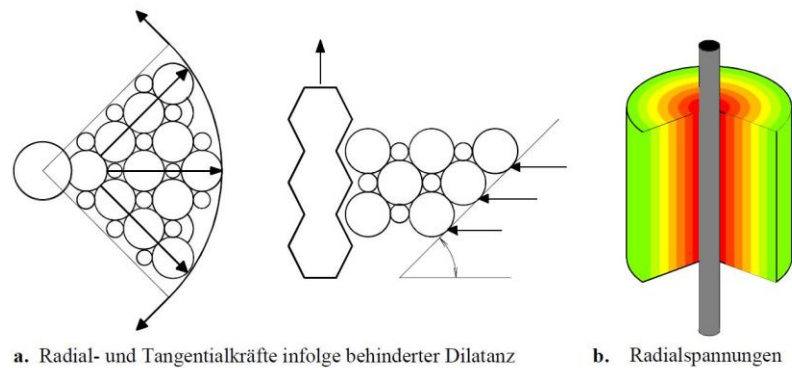


Abb. 2-16: Modellvorstellung nach Wernick (1978)

Die radialen Spannungen werden über einen volumetrischen Steifemodul  $M_V$  bestimmt. Wernick unterscheidet innerhalb der Scherfuge eine dilatante Zone und eine kontraktante Zone im Bodenbereich außerhalb der Scherfuge. Der Steifemodul  $M_V$  wird in Triaxialversuchen bestimmt. Wernick vergleicht diesen Bodenparameter, den er mittels durchgeführter Modellversuche an Ankern, die in Kapitel 2.4.8 näher erklärt werden, erhalten hat mit den durchgeführten Triaxialversuchen und erkennt, dass der Bodenparameter in den Triaxialversuchen deutlich höher ausfällt (Abb. 2-17). Er erklärt dieses Verhalten damit, dass bei den Modellversuchen die Lagerung des Bodens sich während des Zugvorgangs ändert. Die Bodenkörner können sich, wenn ausreichend großer Porenraum vorhanden, ist umlagern. Er kontrolliert diese Annahme damit, dass er sowohl die Triaxialversuche als auch die Modellversuche mit eingerieseltem Sand und mit vibrationsverdichtetem Sand durchführt. Durch das Rütteln ergeben sich deutlich höhere Ankerzugkräfte als bei nur eingerieseltem Sand und so auch ein deutlich höherer Steifemodul  $M_V$ .

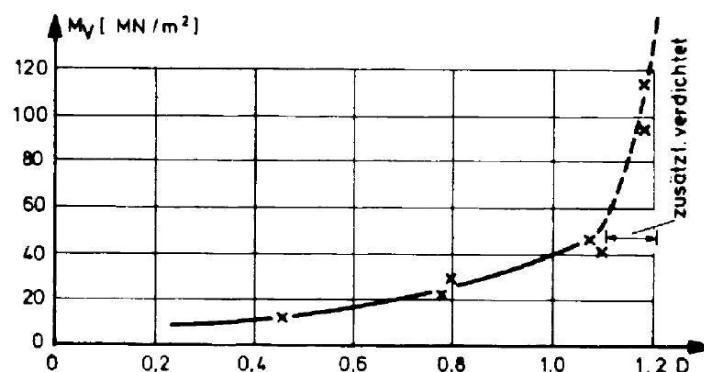


Abb. 2-17: Steifemodul  $M_V$  aus Triaxial - Versuchen in Abhängigkeit zur Lagerungsdichte (Wernick, 1978)

### 2.4.3. Blinde und Witt

Blinde und Witt (1980) entwickeln Wernicks Ansätze weiter und entwerfen ein analytisches Berechnungsverfahren für die Tragfähigkeit von Ankern als Einzelpfahl. Die Grundannahme ist, dass die hohe Tragfähigkeit zylindrischer Körper in Sand auf den durch Wernick entdeckten Verspannungseffekten beruht.

Bei einem Schervorgang in rolligen Böden ergibt sich in der Mantelfläche eines rauen zylindrischen Körpers eine Scherfuge der Dicke  $s$  die sich bis zum Eintreten des Versagens um das Dilatanzmaß  $v_H$  aufweitet (Abb. 2-18). Die Schub- und Radialspannungen auf der Ankermantelfläche im Bruchzustand ergeben sich durch eine Konstante  $c$ , dem Ankerradius  $r_0$  und dem Bruchreibungswinkel  $\varphi_B$ . Die Konstante  $c$  hängt von weiteren acht Parametern ab, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

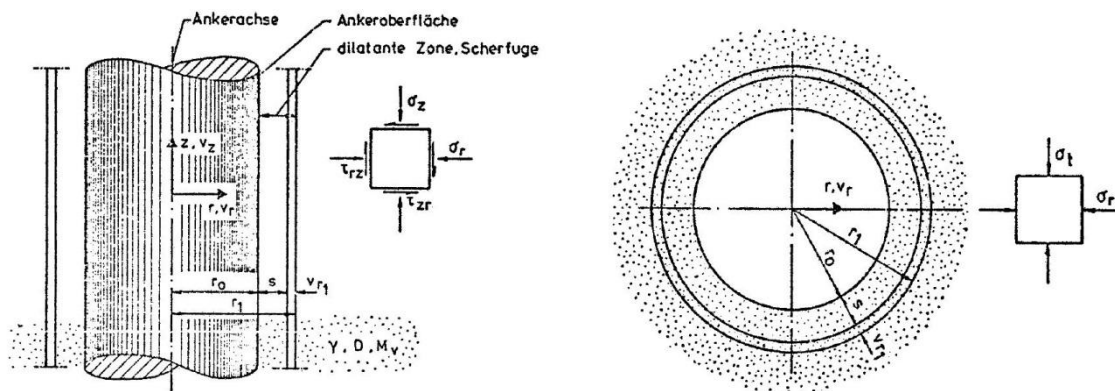


Abb. 2-18: Modellvorstellung nach Blinde und Witt (1980)

### 2.4.4. Hettler

Die Annahme von Hettler (1984) beruht darauf, dass sich die Scherfestigkeit am Pfahlmantel aus einem Anteil des Bodengewichtes und aus einem Verspannungsanteil zusammensetzt. Bei Zugpfählen im Modellmaßstab übersteigt die Mantelreibungsspannung diejenige aus dem Bodeneigengewicht, das heißt der Pfahldurchmesser hat einen erheblichen Einfluss auf die Grenzzugkraft. Seine Eingangsparameter sind die Pfahllänge- und Durchmesser, die Bodenwichte, die Mantelreibung, die aus Scherversuchen bestimmt wird, einem Bodenparameter  $\kappa$ , der in Modellversuchen bestimmt wird und einem Proportionalitätsfaktor  $h(n)$ .

### 2.4.5. Chattopadhyay und Pise

In diesem Berechnungsmodell von Chattopadhyay und Pise (1986) wird der Ausziehwiderstand von Pfählen aus einer Kombination von angehängtem Bodenvolumen und mobilisierten Schubspannungen in der Begrenzungsfuge des mitgehenden Erdkörpers angesetzt. Die Geometrie des Bodenvolumens hängt vom Schlankheitsgrad des Pfahls ab. Die Eingangsparameter sind in diesem Fall die Pfahllänge und der Pfahldurchmesser, die Bodenwichte, der Reibungswinkel des Bodens und der Winkel der Mantelreibung (Abb. 2-19).

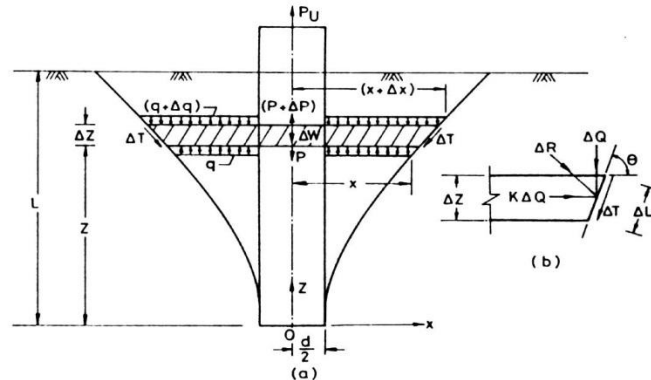


Abb. 2-19: Berechnungsansatz und Geometrie nach Chattopadhyay und Pise (1986)

### 2.4.6. Mors

Mors (1959) hat unterschiedliche Modell- und Großversuche im Hinblick auf unterschiedliche Gründungselemente angeführt. Er stellt dafür drei Ortbetonpfähle mit unterschiedlichen Einbautiefen her und führt anschließend Zugversuche durch. Die Laststeigerungen der Pfahlzugversuche erfolgen immer erst nach dem Abklingen der Verschiebungen aus der vorherigen Laststufe. Die Ergebnisse der Messungen stellt er als Zugkrafthebungscurven dar (Abb. 2-20). Auch die Einbautiefen der Pfähle sind maßgeblich und werden in Abhängigkeit vom Widerstand des Herausziehens dargestellt.

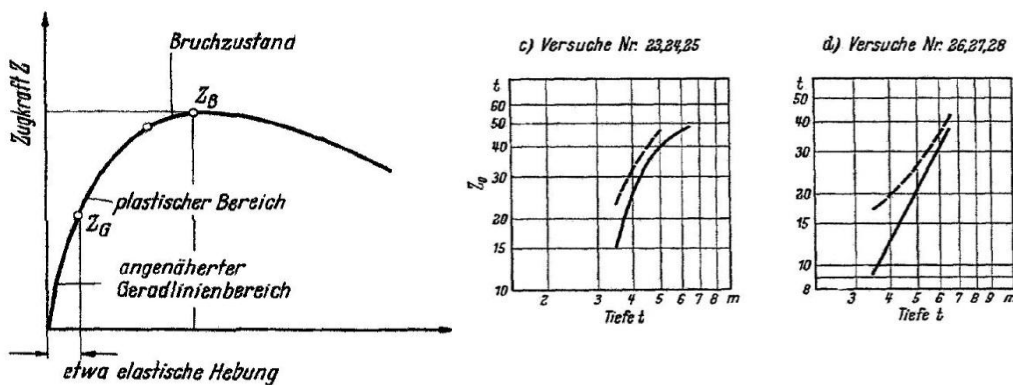


Abb. 2-20: Zugkrafthebungscurven und die Abhängigkeit des Widerstandes von der Einbautiefe (Mors, 1959)



### 2.4.7. Quarg-Vonscheidt

Die Grundlage des rechnerischen Modells von Quarg-Vonscheidt (2000) ist die Vorstellung, dass sich an einem Zugpfahl in rolligem Boden ein Erdkörper anhängt, der durch seine Gewichtskraft die Pfahltragfähigkeit bestimmt. In seiner Modellvorstellung wird dieser Erdkörper durch ein schalenförmiges Tragwerk aus Sandkörnern, der Bodenschale, begrenzt, die sich aber nur ausbilden kann wenn keine Zugspannungen in der Schale auftreten und ein Mindestwert an Ringdruckspannungen vorhanden ist. Für die Berechnung der Tragfähigkeit von Zugpfählen wird diese Bodenschale in einzelne, ineinander gefügte Schalen eingeteilt. Im Ausgangszustand trägt der Boden sein Eigengewicht über dünne Schalen ab, bei einer Zugbelastung lenkt der Boden seine Eigengewichtskräfte in Richtung auf den Pfahl um, und der Bodenbereich hängt sich an den Zugpfahl an (Abb. 2-21).

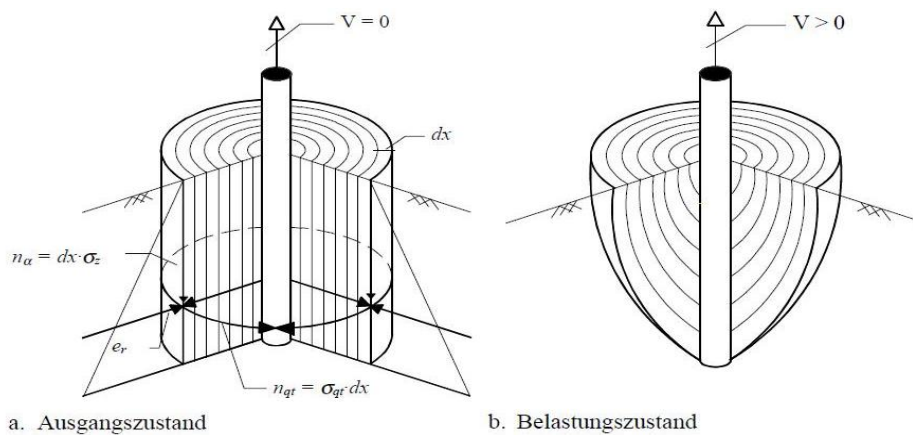


Abb. 2-21: Bodenschalenmodell nach Quarg-Vonscheidt (2000)

### 2.4.8. Wernick

In seinen Modellversuchen (1978) versucht Wernick das Tragverhalten von Ankern in rolligen Böden unter Berücksichtigung der Dilatanz zu untersuchen. Seine Ankermodelle bestehen aus Zugpfählen mit einer Länge von ca. 2,9 m und Durchmessern von 48,8/72,2/103,2 mm. Der Versuchsboden besteht aus einem Quarzsand mittlerer Körnung. Der Einbau des Sandes erfolgt durch Einrieseln um den Pfahl herum. Des Weiteren wurde eine nachträgliche Verdichtung des Bodenkörpers durchgeführt und durch Versuche überprüft. In seinen Pfählen sind Messinstrumente eingebaut, die die Verschiebungen, Reibungen und Spannungen während des Zugvorganges messen.

### 3. Fluidmechanische Charakterisierung des Porenfluids

In dieser Masterarbeit wird die Bodenstruktur von natürlichem Boden mit dem hier selbst hergestellten transparenten Boden gleichgesetzt. Transparenter Boden besteht, wie im Kapitel 2.3 näher erläutert, aus mit Porenfluid gesättigtem Silica Gel. Das Silica Gel wird mit den Eigenschaften von feinkörnigem Kies verglichen und im Nebenschluss wird das Porenfluid des transparenten Bodens Wasser gegenüber gestellt.

Um das natürliche Verhalten von Boden zu simulieren, muss das Porenfluid speziellen Anforderungen entsprechen. Es soll sich in seinen fluidmechanischen Eigenschaften wie Wasser verhalten, muss die erwünschte Transparenz im Silica Gel herstellen und keine chemische Verbindung mit den Materialien der geplanten Versuchseinrichtung. Um dies zu gewährleisten wird eine Reihe von Laborversuchen mit dem Porenfluid durchgeführt. Untersucht werden der Brechungsindex  $n_D$ , die dynamische Viskosität  $\eta$ , die kinematische Viskosität  $\nu$ , die Oberflächenspannung  $\sigma$ , die farblichen Änderungen der gemischten Proben und die chemische Interaktion des Porenfluids mit dem Silica Gel und dem Versuchsbehälter. Alle hier verwendeten Fluide sind Newtonsche Flüssigkeiten und werden als inkompressibel angesehen, sie verändern ihre Dichte unter Druck nicht. Der Kostenfaktor des Porenfluids ist ein weiteres Bewertungskriterium. Nach eingehender Recherche wurde festgestellt, dass sich die ausgewählten Fluide, bis auf Petroleum, in einer ungefähr gleichen Preisklasse bewegen.

Da fluidmechanische Werte in der Literatur nur für reine Fluide vorliegen, mussten die Eigenschaften des hier verwendeten gemischten Porenfluids explizit bestimmt werden. Am Ende des Kapitels 3 findet sich eine Gegenüberstellung der in diesem Kapitel bestimmten Werte des Porenfluids, der Referenzwerte von Wasser und der Referenzwerte des Porenfluids laut Zhao (2007).

#### 3.1. Brechungsindex $n_D$

Im ersten Schritt wurden Fluide mit Hilfe der Dissertation von Zhao (2007), die sich als Porenfluid für diesen Versuch eignen, ausgewählt. Hauptkriterium bei dieser Auswahl war neben den fluidmechanischen Eigenschaften vor allem der Brechungsindex  $n_D$ , da dieser für die Transparenz des Bodens verantwortlich ist, wie im Kapitel 2.2 näher erläutert. Der Brechungsindex wurde standardmäßig bei 20°C bestimmt.

Der Brechungsindex des Silica Gels wurde zu Beginn dieser Arbeit nicht selbst bestimmt, sondern aus der Literatur mit  $n_D = 1,4480$  (Iskander, 2010) übernommen. Um diesen Brechungsindex  $n_D$  des Silica Gels auch mit dem Porenfluid zu erreichen, wurden zwei Fluide miteinander vermischt. Ein Basisfluid mit hohem Brechungsindex mit einem Sekundärfluid mit niedrigem Brechungsindex gemischt im richtigen Verhältnis, ergibt den gewünschten Brechungsindex. Wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, hat sich der Brechungsindex mit  $n_D = 1,4480$  für das in dieser Masterarbeit verwendete Silica Gel, als nicht zutreffend erwiesen.



Als Basisfluid wurden Toluol, Xylol und Petroleum gewählt. Toluol und Xylol besitzen einen höheren Brechungsindex als das Silica Gel. Petroleum, das einen niedrigeren Brechungsindex als Silica Gel besitzt, erwies sich als zu viskos für das Sättigen der Silica Gel Proben. Aus diesem Grund wurde Petroleum aus der Versuchsreihe genommen und nur Toluol und Xylol als Basisfluid weiter getestet. Als Sekundärfluid wurde 2-Propanol, 2-Butanon und Iso-Butanol gewählt.

Im folgenden Abschnitt werden die hier getesteten Chemikalien kurz erläutert. Das Hantieren mit den Chemikalien erfordert die Einhaltung von Sicherheitsvorschriften. Dies beinhaltet gut belüftete Räume, eine persönliche Schutzausrüstung (Handschuhe, Atemmaske), Augendusche und Waschbecken. Bei Einhaltung dieser Maßnahmen stellen die hier verwendeten Chemikalien ein beherrschbares Sicherheits- oder gesundheitsgefährdendes Risiko dar.

### ***Toluol C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>***

ist eine angenehm riechende, farblose und wasserklare Flüssigkeit. Es hat eine Dichte von  $\rho = 0,87 \text{ g/cm}^3$  und einen Brechungsindex von  $n_D = 1,4969$ . Es ist feuergefährlich und verbrennt mit stark leuchtender und rußender Flamme. Toluol wird bei der Verarbeitung von Erdöl gewonnen. Es dient als Ausgangsprodukt für zahlreiche andere organische Verbindungen wie Benzol, Sprengstoff, Phenol sowie als Beimischung zu Motorkraftstoffen. Wegen seines Vorkommens in Motorkraftstoffen und der Verwendung bei zahlreichen Produktionsvorgängen ist Toluol heute ubiquitär verbreitet. Die Konzentration liegt im Jahresdurchschnitt in der Luft städtischer Verkehrsbereiche bei einem Wert von bis zu  $100 \mu\text{g/m}^3$ . Toluol wird in Nitro- und Kunstharzlacken als Verdünner eingesetzt. Durch die Vorgaben der Österreichischen Lösungsmittelverordnung wurde die Verwendung aromatenhaltiger Rezepturen im Bau- und Renovierungsbereich stark eingeschränkt. Der Mensch resorbiert 40 – 60 % des eingeatmeten Toluols. Die Verteilung im Organismus wird durch den Lipidgehalt in den Geweben und Organen bestimmt. Mit zunehmendem Fettgehalt wird vermehrt Toluol resorbiert. Es überschreitet sowohl die Blut-Hirnschranke als auch die Blut-Plazentaschranke. Die Umwandlung erfolgt hauptsächlich in der Leber. Es wird stufenweise zu Benzoesäure umgewandelt und nach weiteren Umwandlungen als Urin ausgeschieden. Die Eliminationshalbwertszeit von Toluol im subkutanen Fettgewebe des Menschen liegt zwischen 0,5 bis 2,7 Tagen, im Blut zwischen 6 bis 8 Stunden. Bei Einhaltung der Grenzwerte und Sicherheitsvorschriften ist kein Risiko der Fruchtschädigung oder anderer gesundheitlicher Schädigungen zu befürchten ([www.carlroth.com](http://www.carlroth.com), 2012).

### ***Xylol C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>***

wird ähnlich wie Toluol verwendet und zählt zu den aromatischen Kohlenwasserstoffen. Die Dichte liegt bei  $\rho = 0,86 \text{ g/cm}^3$  und einem Brechungsindex von  $n_D = 1,4961$ . Es ist ein Lösungsmittel, das in Kunstharzverdünnungen, Universalverdünnern, Nitroverdünnungen und Pinselreinigern ebenso wie in Kunststoffklebern, Kunststofflacken und Kunststofffarben eingesetzt wird. Es ist Bestandteil von Wachsen, Schuhcremes, Möbelpflegemitteln. Als Lösungsmittel wird es Pestiziden beigegeben. Elektrogeräte, die im Betrieb erwärmen, dampfen Xylol in die Raumluft ab. Bei Einhaltung der Sicherheitsvorschriften ist keine Gesundheitsschädigung zu erwarten ([www.carlroth.com](http://www.carlroth.com), 2012).

### **Petroleum**

ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoffen, das aus der Destillation von Erdöl gewonnen wird. Es wird als Brennstoff für Petroleumlampen sowie als Reinigungsmittel verwendet. Petroleum besitzt einen Brechungsindex  $n_D = 1,4390$  und hat eine Dichte von  $\rho = 0,80 \text{ g/cm}^3$  (www.carlroth.com, 2012).

### **2-Propanol $C_3H_8O$**

ist eine farblose, leicht flüchtige und brennbare Flüssigkeit. Es hat eine Dichte von  $\rho = 0,78 \text{ g/cm}^3$  und einen Brechungsindex  $n_D = 1,3770$ . Es besitzt einen leicht süßlichen, bei stärkerem Einatmen stechenden Geruch. 2-Propanol ist Bestandteil vieler Desinfektionsmittel. Dieser Geruch ist daher aus Krankenhäusern und Arztpraxen bekannt. Verwendet wird 2-Propanol als Lösungsmittel für Fette, Harze, Lacke, Tinte, als Reinigungsmittel in Industrie und Haushalt, als Zusatz zu Frostschutzmitteln im Kühlsystem oder in der Scheibenwaschanlage in Autos und LKW. Die Dämpfe wirken betäubend. Der Kontakt verursacht Reizungen der Augen und der Schleimhäute. Beim Umgang mit 2-Propanol muss daher für ausreichende Lüftung gesorgt werden (www.carlroth.com, 2012).

### **2-Butanon $C_4H_8O$**

ist eine farblose, leicht bewegliche Flüssigkeit mit einem typischen süß-scharfen Geruch. Die Dichte beträgt  $\rho = 0,81 \text{ g/cm}^3$  und der Brechungsindex  $n_D = 1,3970$ . 2-Butanon ist ein gutes Lösungsmittel. Es wird vorwiegend für Vinylharze und Lacke verwendet. Es ist nicht zur Reinigung von Kunststoffgegenständen geeignet, da es diese angreift. 2-Butanon wird als Zusatz für Kraftstoffe verwendet um die Oktanzahl zu erhöhen (www.carlroth.com, 2012).

### **Iso-Butanol $C_4H_{10}O$**

ist eine charakteristisch süßlich und durchdringend riechende farblose Flüssigkeit. Es hat eine Dichte von  $\rho = 0,81 \text{ g/cm}^3$  und einen Brechungsindex von  $n_D = 1,3958$ . Iso-Butanol ist Bestandteil in Bremsflüssigkeiten, Mischlösungsmitteln und Abbeizmitteln. Es ist entzündlich und flüchtig. Auch bei Iso-Butanol muss für ausreichende Belüftung gesorgt werden (www.carlroth.com, 2012).

Fluid	Summenformel	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Brechungs- index $n_D$	Siedepunkt [°C]	pH-Wert	Oberflächen- spannung $\sigma$ [mN/m]	dynamische Viskosität $\eta$ [kg/s <sup>2</sup> m]	kinematische Viskosität $\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]
Xylol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	0,86	1,4961	138,0	kein Wert messbar	28,47	0,0006	0,516
Toluol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,87	1,4940	110,0	kein Wert messbar	23,75	0,0006	0,705
2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0,78	1,3770	82,0	7	14,84	0,0026	3,338
2-Butanon	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0,81	1,3970	80,0	7	24,40	0,0004	0,324
Iso-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	0,81	1,3958	108,0	7	23,00	0,0067	5,427
Petroleum	-	0,80	1,4390	178,0	kein Wert messbar	30,00	0,0016	2,000

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der chemischen Eigenschaften der möglichen Fluide

Wie in der Tabelle 3-1 ersichtlich, besitzen die ausgewählten Fluide unterschiedliche Brechungsindizes. Um den Brechungsindex des Silica Gels von  $n_D = 1,4480$  zu erreichen, muss ein Basisfluid (Toluol oder Xylol) mit hohem Brechungsindex und ein Sekundärfluid mit niedrigem Brechungsindex (2-Propanol, 2-Butanon, Iso-Butanol) im richtigen Verhältnis gemischt werden.

Die nachfolgende Abb. 3-1 soll dies veranschaulichen.

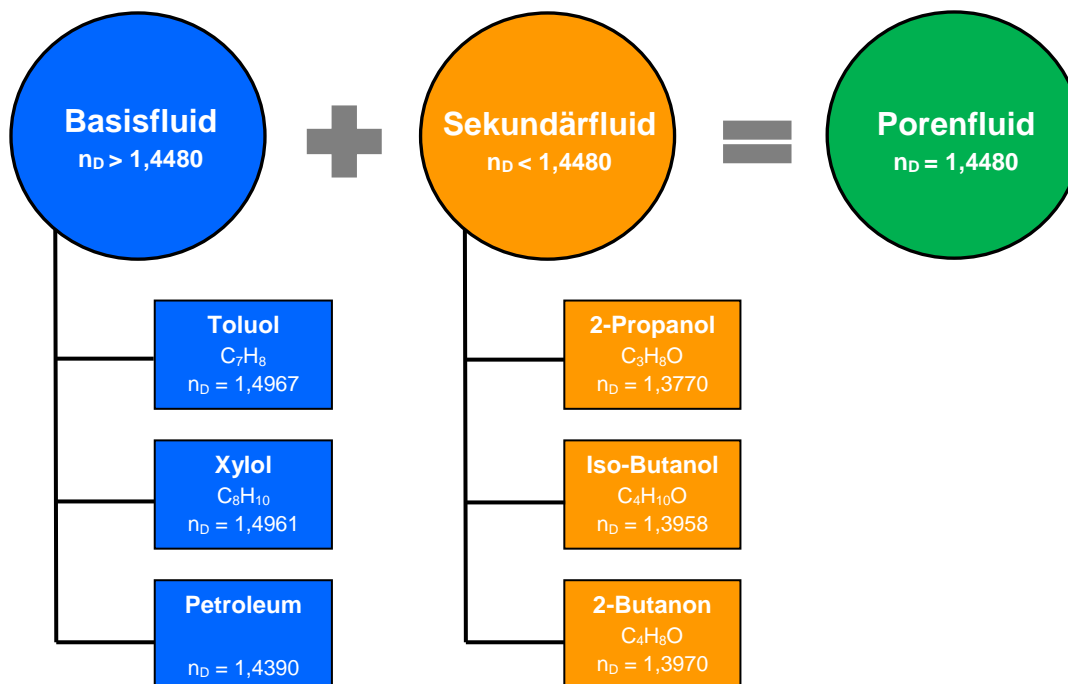


Abb. 3-1: Zusammensetzung des Porenfluids

Die Porenfluidmischungen wurden laut Zhao (2007) hergestellt und der Brechungsindex dieser einzelnen Porenfluidmischungen mit Hilfe eines Refraktometer RE40D der Fa. Toledo gemessen (Abb. 3-3). Dieses nutzt das Messprinzip der Totalreflexion um den Brechungsindex zu bestimmen (Abb. 3-2). Da der Brechungsindex temperaturabhängig ist und das hier benutzte Refraktometer unterschiedliche Messtemperaturen ermöglicht, wird für die Bestimmung des Brechungsindex die Raumtemperatur des Versuchsraums von  $20^\circ\text{C}$  gewählt. Das Refraktometer wurde auf die Messtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  kalibriert, demzufolge wird der Brechungsindex als  $n_D$  bestimmt. Es wird eine geringe Menge des zu messenden Porenfluids auf die Messzelle aufgebracht. Anschließend misst das Refraktometer in Sekunden mit Hilfe der Totalreflexion den Brechungsindex auf vier Nachkommastellen genau. Dieses Messprinzip funktioniert wie folgt: Das Licht, das von einer LED Lichtquelle ausgestrahlt wird, dringt durch das Prisma und trifft dann auf die Probe. Dabei wird das Licht teilweise gebrochen und teilweise reflektiert. Das reflektierte Licht wird mittels eines optischen CCD Sensors erfasst. Die Grenze zwischen dunklem und hellem Bereich ergibt den Grenzwinkel, der dann zur Berechnung des Brechungsindex benötigt wird.

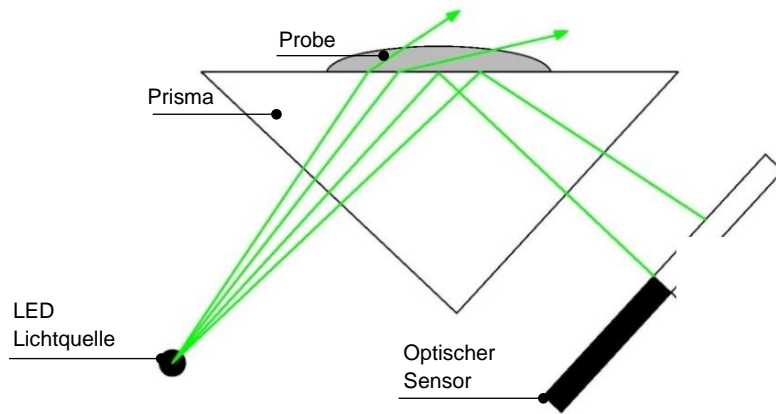


Abb. 3-2: Messprinzip Totalreflexion (© Mettler-Toledo GmbH, 2003)

### Refraktometer RE40D

- Messbereich  $n_D$ : 1,3200 – 1,7000 [-]
- Messgenauigkeit  $n_D$ :  $\pm 0,0001$  [-]
- Messtemperatur T: 15 – 70 [°C]

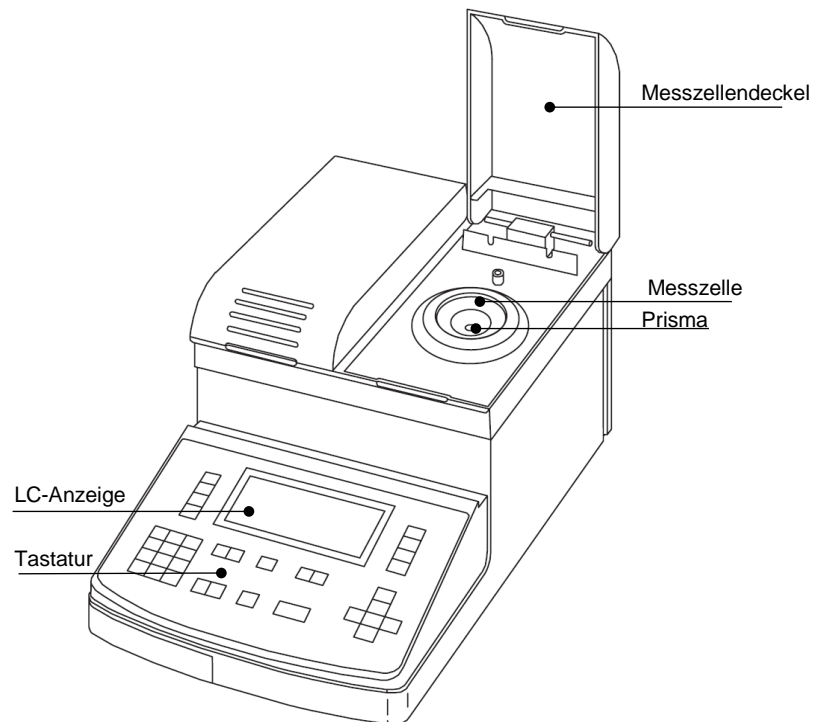


Abb. 3-3: Refraktometer RE40D (© Mettler-Toledo GmbH, 2003)

Um die optimalste Porenfluidmischung bezüglich des Brechungsindex  $n_D$ , der vollständigen Sättigung der Silica Gel Proben, der chemischen Reaktionen der Fluide mit dem Silica Gel und der Farbentwicklung der Silica Gel Proben zu bestimmen, wurde eine systematische Vorgehensweise als Vorstudie festgelegt (Abb. 3-4).

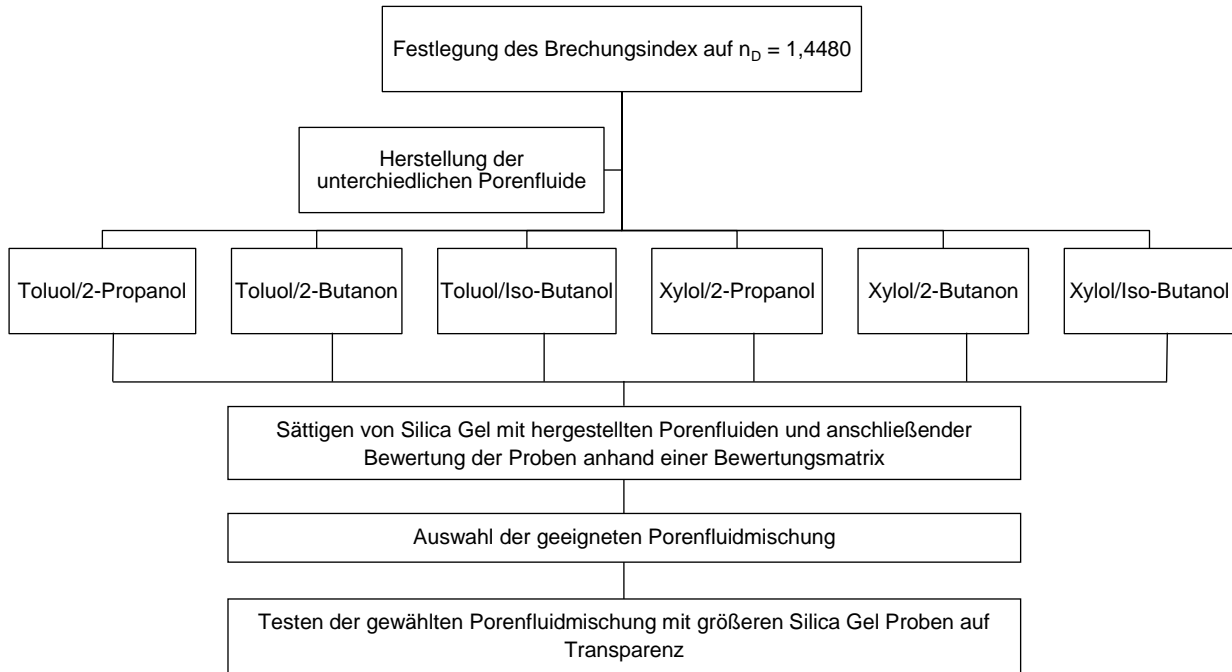


Abb. 3-4: Schema der Vorstudie

In dieser Vorstudie wurden kleine Silica Gel – Porenfluid Proben in dem Mischungsverhältnis hergestellt der dem Brechungsindex  $n_D = 1,4480$  laut Fachliteratur (Iskander, 2010; Zhao, 2007; Ezzein & Bathurst, 2011) entspricht. Jedes Basisfluid wurde mit jedem Sekundärfluid gemischt. Um Fehler bei der Herstellung der Porenfluide auszuschließen, wurde jede Mischung zwei Mal produziert. In ein Probengefäß wurden 100 g ungesättigtes Silica Gel gefüllt und danach mit dem hergestellten Porenfluid gesättigt (Abb. 3-5).

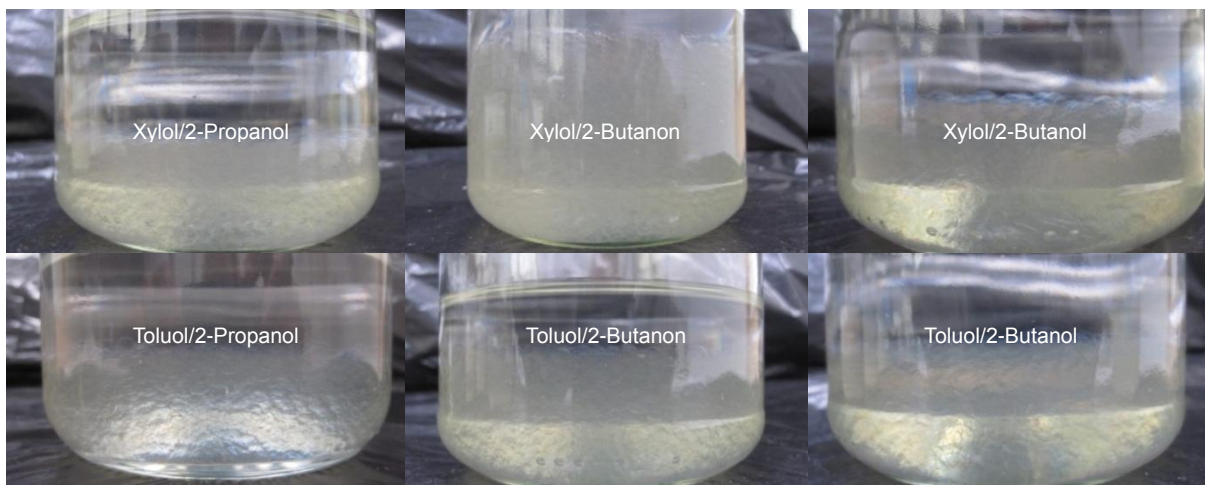


Abb. 3-5: Proben der Vorstudie

Diese zwölf Mischungen wurden anhand von Bewertungskriterien wie Transparenz, Wärmeentwicklung, Farbentwicklung und Sichtbarkeit beurteilt. Die unterschiedliche Farbentwicklung der Proben muss an dieser Stelle erwähnt werden. Silica Gel Proben die das Sekundärfluid 2-Butanon beinhalten, weisen einen deutlicheren Gelbstich auf als andere Proben und eignen sich aus diesem Grund weniger für die Herstellung des transparenten Bodens. Die Gelbfärbung wurde zuerst auf Farbeinschlüsse im Silica Gel zurückgeführt, konnte aber durch eine Überprüfung anhand einer gezielten Silica Gel Probe bestehend aus Partikel nur mit Farbeinschlüssen nicht bestätigt werden (Abb. 3-15). Auch konnte man beim Sättigungsprozess der Proben mit 2-Butanon eine deutlich höhere Wärmeentwicklung als bei den anderen Proben durch chemische Reaktionen des Porenfluids mit dem Silica Gel feststellen.

Für die Bewertung wurde ein Punktesystem entwickelt. Transparenz, Sichtbarkeit und Wärmeentwicklung wurde mit der Abstufung Sehr gut (1) bis Nicht genügend (5) beurteilt. Die Farbentwicklung der Proben wurde beurteilt mit der Abstufung farblos (1) bis gelblich (5). Die Mischung mit den wenigsten Punkten im Ergebnis der Bewertungsmatrix wurde als Porenfluid für diese Versuchsreihen gewählt. Im Anhang befinden sich alle Mischungen der Vorstudie bezüglich des Mischungsverhältnisses bzw. des Brechungsindex detailliert dokumentiert (Anhang A).

Fluid		Brechungsindex $n_D$ [ - ]	Transparenz	Sichtbarkeit	Wärmeentwicklung	Farbentwicklung	Ergebnis
Basis	Sekundär						
Xylol	Iso-Butanol	1,4483	3	2	3	2	10
Xylol	2-Butanon	1,4478	3	2	5	3	13
Xylol	2-Propanol	1,4482	3	2	2	2	9
Toluol	Iso-Butanol	1,4477	3	2	3	2	10
Toluol	2-Butanon	1,4475	3	2	5	3	13
Toluol	2-Propanol	1,4480	2-3	2	2	2	8,5

Tabelle 3-2: Bewertungsmatrix der Vorstudie

**Legende:**

Transparenz, Wärmeentwicklung, Sichtbarkeit: **1 (Sehr gut) – 5 (Nicht genügend)**

Farbentwicklung: **1 (Farblos) – 5 (Gelblich)**

Nach dieser ersten Vorstudie wurde als Porenfluid die Mischung Toluol und 2-Propanol ausgewählt. Das Mischungsverhältnis für den Brechungsindex  $n_D = 1,4480$  bei einer Temperatur von 20°C beträgt 62,66 Massen-% Toluol und 37,34 Massen-% 2-Propanol.

Auch in der Fachliteratur wird diese Mischung aufgrund der guten entlüftenden Wirkung von Toluol und der sehr guten Transparenz der gesättigten Silica Gel Proben mit Toluol/2-Propanol bevorzugt verwendet (Iskander, 2010; Zhao, 2007).

Im Rahmen dieser Vorstudie konnte festgestellt werden, dass sich bei einer Änderung des Brechungsindex in der vierten Nachkommastelle schon eine deutliche Veränderung der Transparenz und der Farbe der Silica Gel Proben einstellte. Mit sinkendem Brechungsindex des Porenfluids wurde die Transparenz der Silica Gel Proben deutlich besser. Aus diesem Grund wurden Versuche mit dem Brechungsindex anhand von weiteren Silica Gel - Porenfluid Proben fortgeführt, um diese Veränderung der Transparenz genauestens zu dokumentieren. Es wurden Silica Gel Proben erstellt, deren Porenfluide einen variierten Brechungsindex besitzen. Ausgehend vom zuvor verwendeten Brechungsindex laut Iskander (2010) mit  $n_D^{25} = 1,4480$  wurde im Folgenden der Brechungsindex des Porenfluids durch Veränderung des Mischungsverhältnisses des Basis- und Sekundärfluids solange verändert bis sich wieder eine Verschlechterung der Transparenz einstellte. Getestet wurde in einem Spektrum zwischen  $n_D = 1,4200$  und  $n_D = 1,4490$ . Aufgrund dieser Proben und ihrer Ergebnisse wird die Schlussfolgerung gezogen, dass das Silica Gel, das für diesen Versuch verwendet wird, einen abweichenden Brechungsindex hat, als das Silica Gel das in der Literatur laut Iskander (2010) benutzt wurde. Somit wird der Brechungsindex für diesen hier verwendeten transparenten Boden neu definiert. Mit Hilfe einer Entscheidungsmatrix wird ein Brechungsindex des Porenfluids und somit auch des Silica Gels mit  $n_D = 1,4290$  festgelegt.

Dieses Porenfluid besteht aus 53,47 Massen-% 2-Propanol und aus 46,53 Massen-% Toluol. In weiterer Folge wird diese Mischung nur mehr als Porenfluid bezeichnet. Die Entscheidungsmatrix beinhaltet eine Bewertung der Transparenz der Proben mithilfe eines Metallstabes, der in die Probe gestellt wurde und einem farbigem Hintergrund (Abb. 3-7 bis Abb. 3-11). Des Weiteren fließt die Farbentwicklung der Proben nach dem Sättigen und die Transparenz der einzelnen Silica Gel Partikel ein (Tabelle 3-3). Die Transparenz der Proben wird mit Sehr Gut (1) bis Nicht genügend (5) beurteilt, die Farbentwicklung wird eingeteilt mit farblos (1) bis gelblich (5). In den Abb. 3-12 und Abb. 3-13 wird die Verbesserung der Transparenz mit Hilfe des Metallstabes ( $\varnothing 10$  mm) und einem farbigen Hintergrund sichtbar gemacht. Die Probengefäße sind 7,0 cm tief. Im Anhang befinden sich alle gesättigten Silica Gel Proben mit variierten Brechungsindizes des Porenfluids Toluol/2-Propanol als Bildbeweis (Anhang A). Das Verhältnis des Silica Gels und der beiden Fluide Toluol und 2-Propanol, aus dem das Porenfluid besteht, ist in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 3-6) auf ein Einheitsvolumen von  $1 \text{ cm}^3$  transparentem Boden dargestellt (Ganster, 2012b).

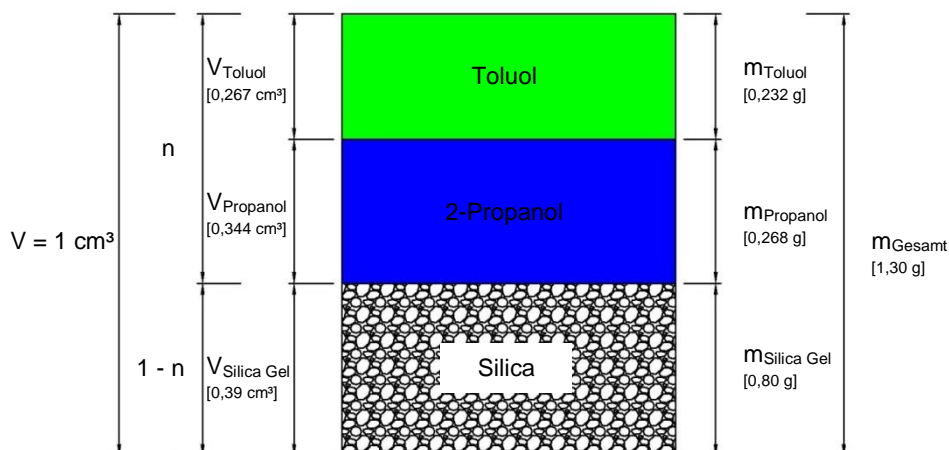


Abb. 3-6: Gesättigtes Silica Gel



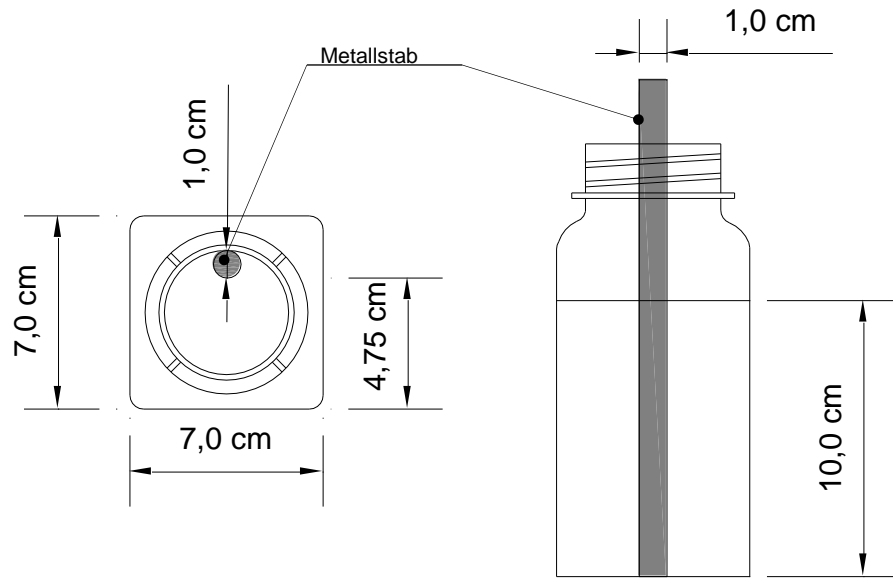


Abb. 3-7: Probengefäß mit Metallstab



Abb. 3-8: Ungesättigtes Silica Gel mit farbigem Hintergrund



Abb. 3-9: Ablichtungseinrichtung

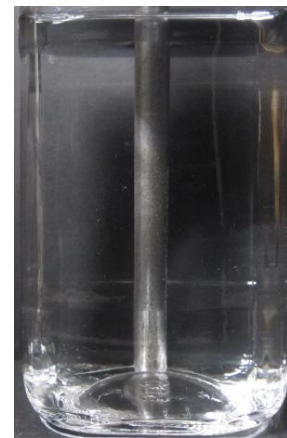


Abb. 3-10: Reines Porenfluid mit darin befindlichem Metallstab

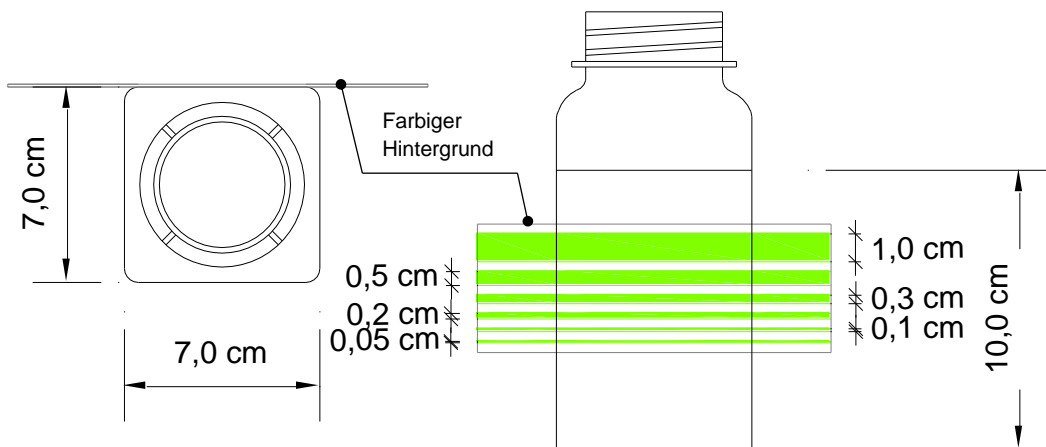


Abb. 3-11: Probengefäß mit farbigem Hintergrund



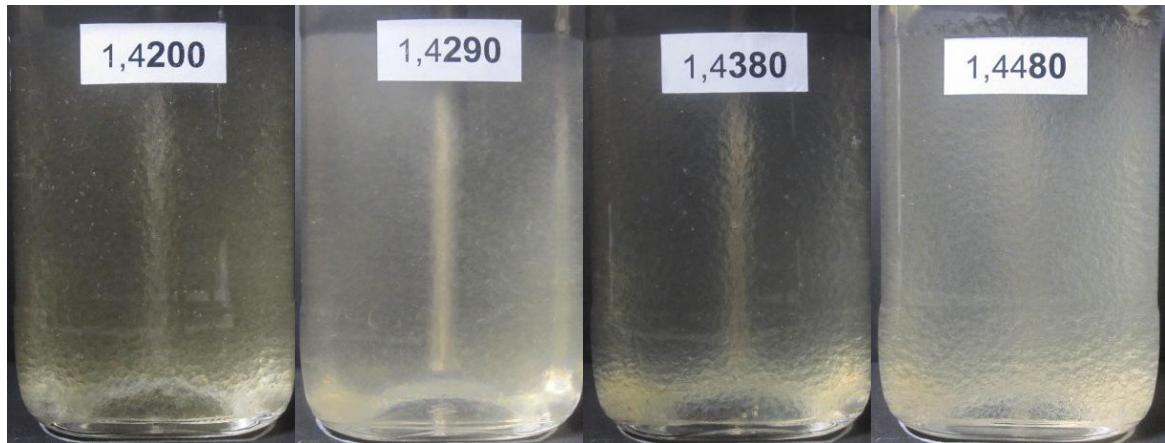


Abb. 3-12: Gesättigte Silica Gel Proben mit variiertem Brechungsindex des Porenfluids und darin befindlichem Metallstab

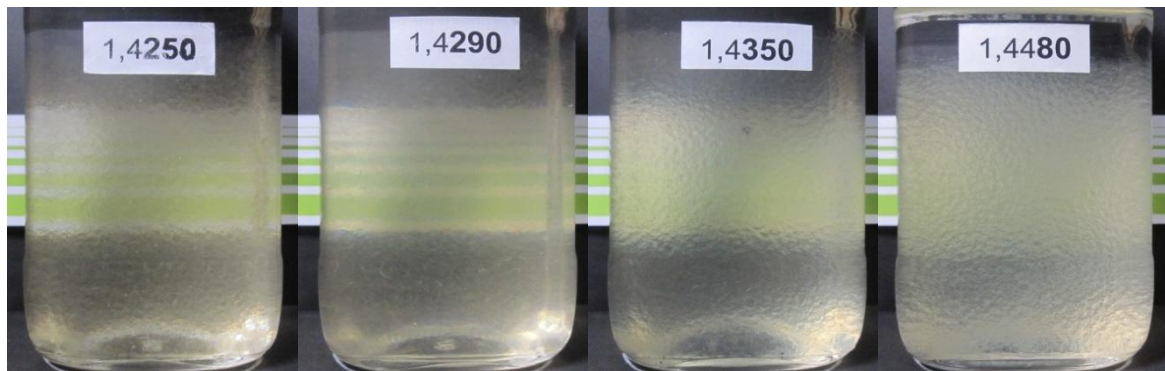


Abb. 3-13: Gesättigte Silica Gel Proben mit variiertem Brechungsindex des Porenfluids und farbigem Hintergrund



Abb. 3-14: Gesättigtes Silica Gel nach Iskander (2010) und Porenfluid mit Brechungsindex nach Zhao (2007)

Toluol [Massen-%]	2-Propanol [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]	Transparenz	Sichtbarkeit farbiger Hintergrund	Farb- entwicklung	Sichtbarkeit Metalstab	Ergebnis
38,92	61,08	1,4200	3	3	4	3	13
43,02	56,98	1,4250	3	3	4	2	12
43,83	56,17	1,4260	3	3	4	2	12
44,76	55,24	1,4270	2	3	4	2	11
45,66	54,34	1,4280	1	2	3	1	7
46,53	53,47	1,4290	1	2	2	1	6
47,38	52,63	1,4300	1	2	3	1	7
48,20	51,80	1,4310	1	2	3	1	7
49,22	50,78	1,4320	1	2	3	2	8
50,11	49,89	1,4330	2	3	3	2	10
50,80	49,20	1,4340	2	3	3	2	10
51,63	48,37	1,4350	2	3	4	2	11
52,48	47,52	1,4360	3	3	4	3	13
53,64	46,36	1,4370	3	3	4	3	13
54,15	45,85	1,4380	3	3	4	3	13
54,98	45,02	1,4390	3	3	3	3	12
57,11	42,89	1,4410	4	4	3	3	14
58,07	41,93	1,4420	4	4	3	3	14
58,52	41,48	1,4430	4	4	3	4	15
59,63	40,37	1,4440	4	4	3	4	15
60,03	39,97	1,4450	4	4	3	4	15
60,87	39,13	1,4460	4	5	3	4	16
62,16	37,84	1,4470	5	5	3	5	18
62,66	37,34	1,4480	5	5	3	5	18
63,33	36,67	1,4490	5	5	3	5	18

Tabelle 3-3: Entscheidungsmatrix für den Brechungsindex  $n_D$  des Porenfluid**Legende:**Transparenz, Sichtbarkeit farbiger Hintergrund und Gegenstand: **1 (Sehr gut) – 5 (Nicht genügend)**Farbentwicklung: **1 (Farblos) – 5 (Gelblich)**

Wie schon erwähnt, wurde untersucht, ob die teilweise Gelbfärbung der Silica Gel Proben mit den Farbeinschlüssen im Silica Gel zusammenhängen könnte (Abb. 3-15). Die Vermutung, dass das Porenfluid diese Verfärbungen im Silica Gel auflöst und es deshalb zu einer Verfärbung der Proben kommt, wurde aber durch Versuche nicht bestätigt. Die Verfärbung der Silica Gel Partikel wird wahrscheinlich durch den Herstellungsprozess verursacht, da farbiges Silica Gel in derselben Produktionskette hergestellt wird wie das transparente Material und es dadurch zu Verunreinigungen in den Maschinen kommen kann

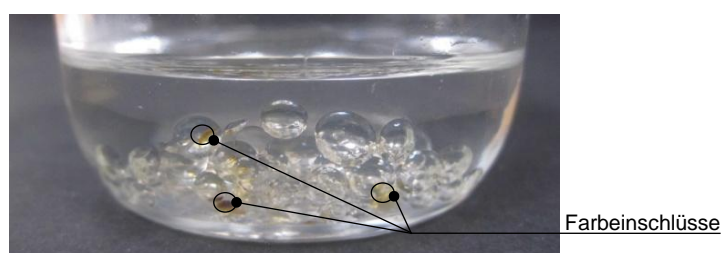


Abb. 3-15: Farbeinschlüsse der Silica Gel Partikel

Das nachstehende Diagramm zeigt die mit Hilfe des Refraktometers ermittelte Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex  $n_D$  (Abb. 3-16). Im Anhang befindet sich eine Tabelle, die die hier benutzen Daten der Versuche enthält (Anhang A).

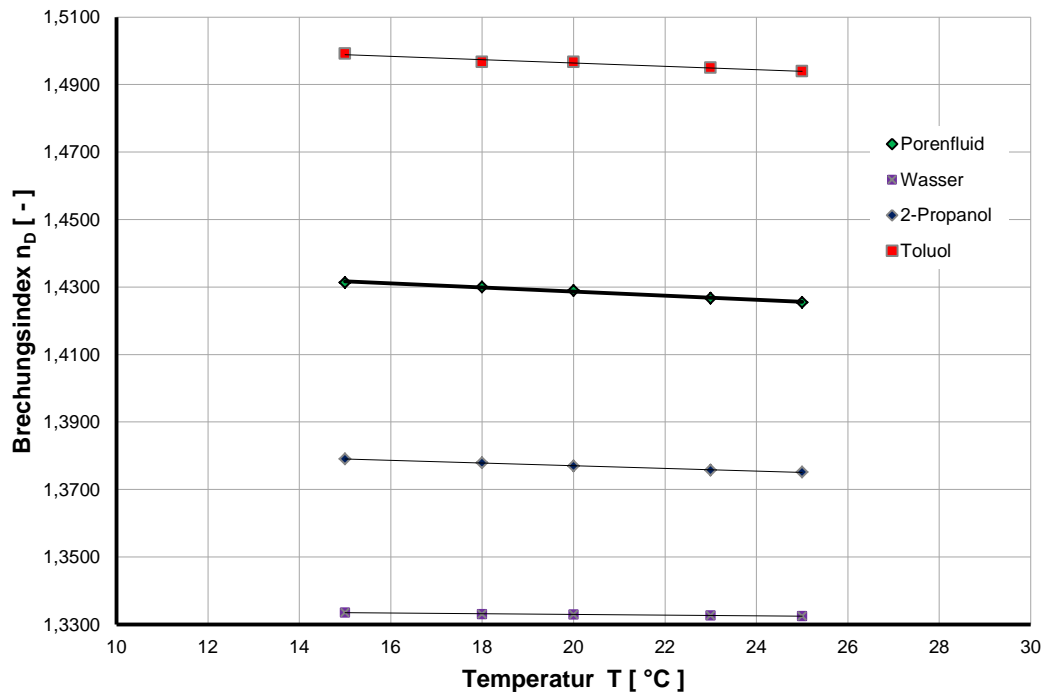


Abb. 3-16: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex  $n_D$

Des Weiteren wurde ein Diagramm erstellt, um die Beziehung zwischen Mischungsverhältnis von Toluol und 2-Propanol des Porenfluids und dem Brechungsindex darzustellen (Abb. 3-17).

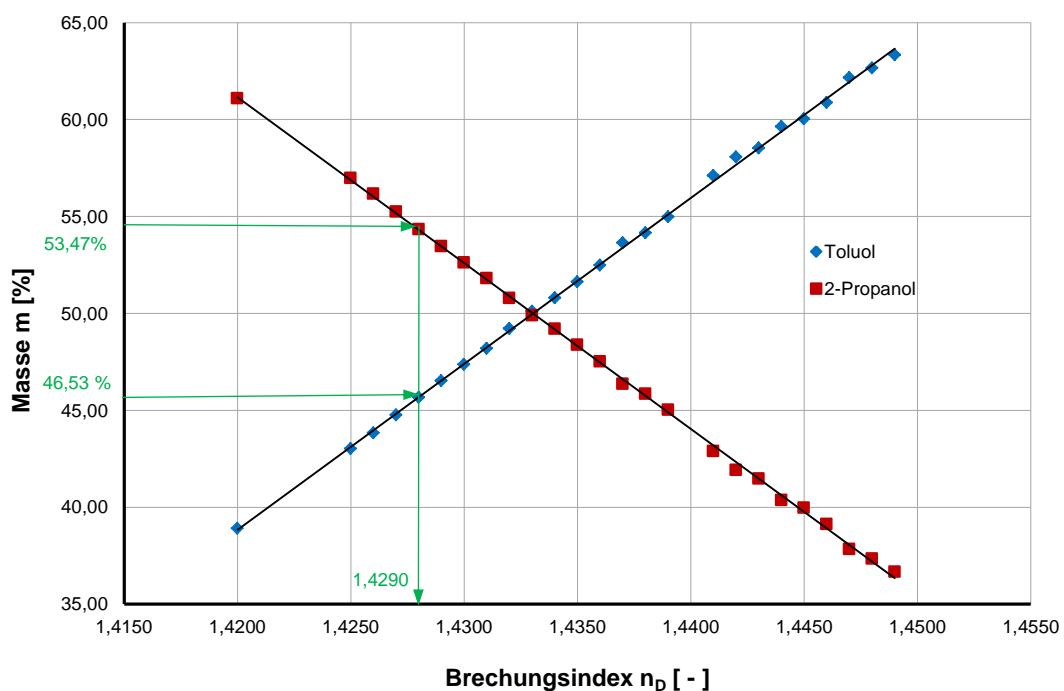


Abb. 3-17: Mischungsverhältnis Toluol/2-Propanol

Nachdem das Porenfluid, bestehend aus Toluol und 2-Propanol, für die beste Transparenz des Bodenkörpers bestimmt wurde, konnten die noch fehlenden fluidmechanischen Eigenschaften bestimmt werden. Des Weiteren wurde der Versuchsbehälter auf das hier benutzte Porenfluid adaptiert. Eine genaue Beschreibung der Versuchseinrichtung und der Problemstellungen, die das chemische und daher aggressive Porenfluid gegenüber verschiedenen Materialien beim Bau der Versuchseinrichtung verursacht hat, wird im Kapitel 4.2 näher erläutert.

### 3.2. Dichte des Porenfluids

Das Porenfluid besteht aus 2 Komponenten, Toluol und 2-Propanol, deshalb wurde die Dichte der hier verwendeten Mischung im Labor durch eine Volumen-Massenmessung bestimmt und mit Gleichung [5] berechnet.

$$\rho_{Fluid} = \frac{m}{V} [\text{g/cm}^3] \quad [5]$$

$\rho_{Fluid}$	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$m$	Masse des Porenfluids [g]
$V$	Volumen des Porenfluids [cm <sup>3</sup> ]

In einem zylindrischen Messgefäß wurde ein bestimmtes Volumen des Porenfluids, in diesem Fall 300 cm<sup>3</sup> eingefüllt. Das Messgefäß wurde anschließend abgewogen und das Gewicht in Gramm abgelesen. Dieser Vorgang wurde dreimal wiederholt und das Ergebnis der errechneten Dichten wurde dann gemittelt. Die Dichte des Porenfluids ergibt sich mit  $\rho_{Fluid} = 0,80 \text{ g/cm}^3$ . Wasser hat im Vergleich eine Dichte von  $\rho_{Wasser} = 0,998 \text{ g/cm}^3$ . Um die Dichte exakt zu bestimmen, wurde diese in Ganster (2012b) berechnet. Sie beläuft sich auf  $\rho_{Fluid} = 0,82 \text{ g/cm}^3$ . In weiterer Folge wird aufgrund eventueller Messungenauigkeiten der errechnete Wert verwendet.

### 3.3. Kinematische Viskosität $\nu$ und dynamische Viskosität $\eta$

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Definiert wird sie durch den Reibungswinkel, den eine Flüssigkeit einer Belastung durch Druck- oder Schubspannungen entgegensetzt. Man unterscheidet die dynamische und die kinematische Viskosität. Die kinematische Viskosität  $\nu$  wird in  $[\text{mm}^2/\text{s}]$  angegeben und entweder durch ein Rotationsviskosimeter oder ein Kapillarviskosimeter bestimmt. Da bei Flüssigkeiten die Viskosität bei fallenden Temperaturen steigt, ist es wichtig, immer den Temperaturbereich in dem gemessen wurde, anzugeben. Die dynamische Viskosität  $\eta$  wird aus dem Produkt der kinematischen Viskosität  $\nu$  und der Dichte  $\rho$  eines Fluids errechnet und in  $[\text{kg}/\text{ms}]$  angegeben (Gleichung [6]).

$$\eta = \nu * \rho \text{ [kg/sm]} \quad [6]$$

$\eta$	<i>dynamische Viskosität [kg/sm]</i>
$\nu$	<i>kinematische Viskosität [mm<sup>2</sup>/s]</i>
$\rho$	<i>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</i>

Je niedriger die Viskosität, desto fließfähiger ist ein Fluid. Für transparenten Boden wird ein Fluid benötigt, welches eine niedrige Viskosität besitzt, damit sich der Innerkorporenraum des Silica Gels leicht und vollständig mit dem Fluid füllen kann. Zur Bestimmung der kinematischen Viskosität  $\nu$  des Porenfluids wurde ein Kapillarviskosimeter, in diesem Fall ein Ubbelohde – Viskosimeter verwendet (Abb. 3-18, Abb. 3-19). Beim Kapillarviskosimeter durchströmt eine definierte Flüssigkeitsmenge, begrenzt durch zwei Messmarken, laminar eine Messkapillare infolge der Schwere der Flüssigkeit. Man misst die Zeit, die die Flüssigkeit benötigt um die Kapillare zu durchströmen und multipliziert diese mit der Gerätekonstanten  $K_{KV}$  der Kapillare. Daraus lässt sich die kinematische Viskosität  $\nu$  ermitteln (Gleichung [7]).

$$\nu = K_{KV} * t \text{ [mm}^2/\text{s]} \quad [7]$$

$\nu$	<i>kinematische Viskosität [mm<sup>2</sup>/s]</i>
$K_{KV}$	<i>Grätekonstante [mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</i>
$t$	<i>Gemessene Zeit [sec]</i>

Die dynamische Viskosität  $\eta$  errechnet sich dann aus der Dichte  $\rho$  des Fluids multipliziert mit der kinematischen Viskosität  $\nu$  (Gleichung [6]). Es wurden beide Einzelkomponenten, 2-Propanol und Toluol, sowie das benötigte Porenfluid mehrmals getestet um die kinematische Viskosität  $\nu$  zu bestimmen. Auch das Referenzfluid Wasser wurde auf seine kinematische Viskosität  $\nu$  getestet. Die Ergebnisse der einzelnen Fluide wurden jeweils gemittelt und anschließend auf die dynamische Viskosität  $\eta$  umgerechnet. Das Ergebnis der Versuche ist, dass die dynamische Viskosität des Porenfluids mit  $\eta = 0,0011 \text{ kg/ms}$  ident mit der dynamischen Viskosität von Wasser  $\eta = 0,001 \text{ kg/ms}$  ist.

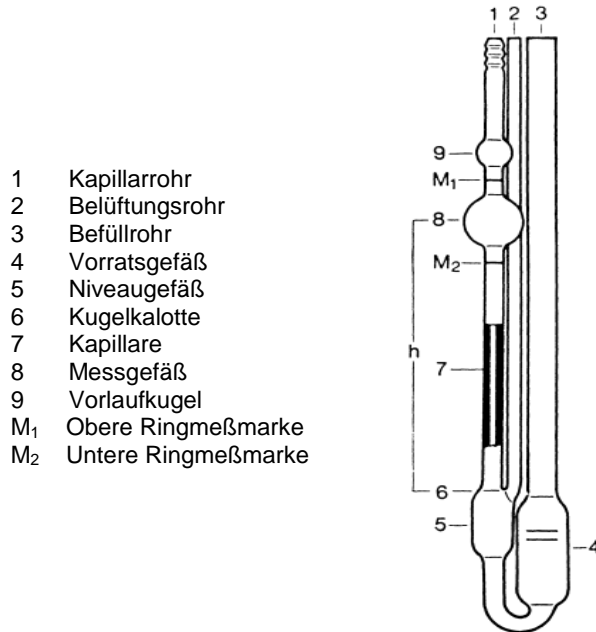


Abb. 3-18: Schemaskizze des Ubbelohde – Kapillarviskosimeter  
 (© Schott-Geräte GmbH)

**Ubbelohde Kapillarviskosimeter**  
**Type 501 03 Kapillare 0c:**

- Gerätekonstante  $K_{KV}$ : 0,002978 [mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- Kapillare Durchmesser  $d$ : 0,47 [mm]
- Meßbereich  $v$ : 0,5 – 3 [mm<sup>2</sup>/s]

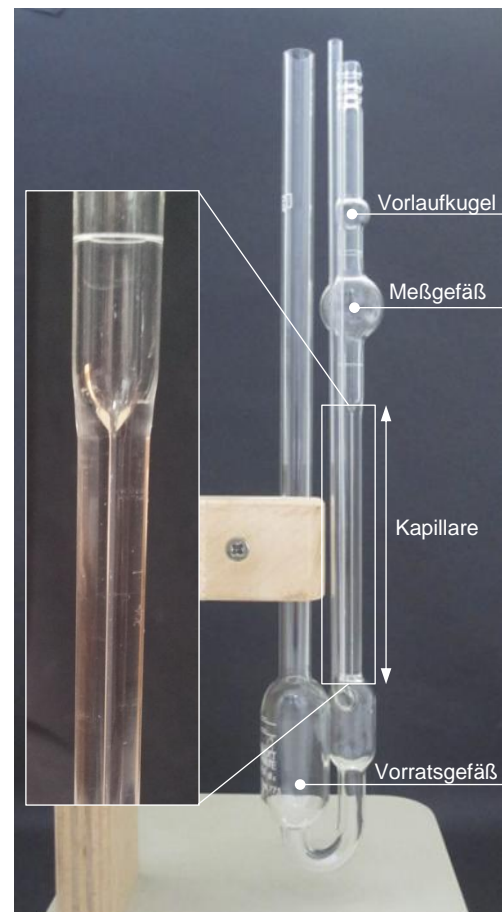


Abb. 3-19: Ubbelohde - Kapillarviskosimeter

### 3.4. Oberflächenspannung $\sigma$

Die an der Oberfläche eines Fluids wirkende Kraft, die bestrebt ist, die Oberfläche so klein wie möglich zu halten, heißt Oberflächenspannung  $\sigma$ . Sie ist definiert als die Spannung, die an der Oberfläche normal in das Medium wirkt. Diese Spannung ist die Ursache dafür, dass Flüssigkeiten immer bestrebt sind kugelähnliche Tropfen zu bilden, da diese die geringste Oberfläche besitzen. Je höher diese Spannung, desto kugelig sind die Tropfen. Dieser Effekt ist bei Quecksilber, aufgrund der sehr großen Oberflächenspannung sehr gut zu beobachten. Die Oberflächenspannung wird mit einem Tensiometer und einem Ring- oder Bügelmesskörper gemessen (Abb. 3-20; Abb. 3-21; ÖNORM EN 14370, 2004). Die Dimension ist Millinewton pro Meter [mN/m].

$$\sigma = \frac{F}{l} \text{ [mN/m]} \quad [8]$$

$\sigma$	Oberflächenspannung [mN/m]
$F$	Kraft, die auf den Messkörper wirkt [mN]
$l$	benetzte Länge des Messkörpers [m]



Die Oberflächenspannung  $\sigma$  der Einzelkomponenten Toluol und 2-Propanol und der Porenfluidmischung der beiden Fluide wurden mit einem Interfacial Tensiometer K8 der Fa. Krüss ermittelt.

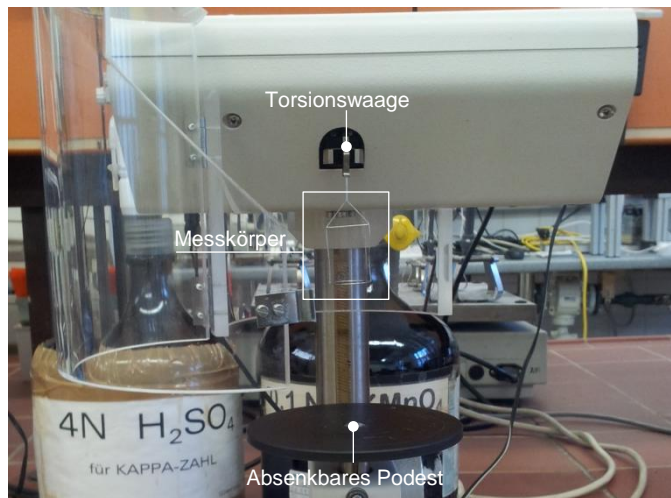


Abb. 3-20: Interfacial Tensiometer K8 (Vorderansicht)

#### Interfacial Tensiometer K8 Fa. Krüss:

- Ringmethode
- Messbereich  $\sigma$ : 0 – 90 [mN/m]
- Messgenauigkeit  $\sigma$ :  $\pm 0,1$  [mN/m]

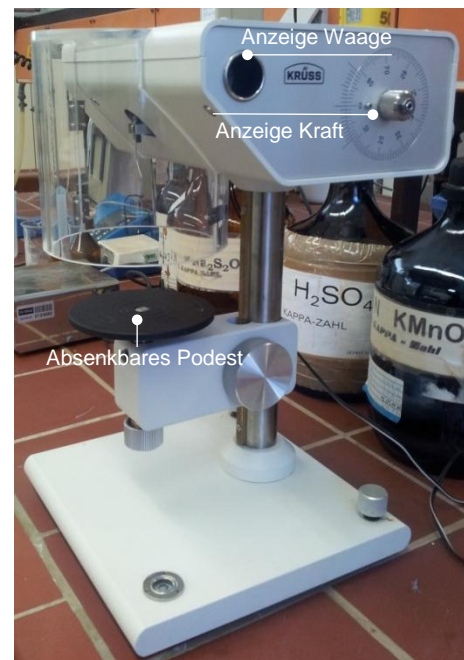


Abb. 3-21: Interfacial Tensiometer K8 (Seitenansicht)

Beim Messverfahren mit dem Tensiometer wird der Messkörper in einen mit der zu messenden Flüssigkeit gefüllten Behälter eingetaucht, bis sich der Körper vollständig unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche befindet. Dieser Zustand wird als sog. Nullpunkt festgelegt. Anschließend wird das Podest, auf dem der offene Behälter mit der Flüssigkeit steht, langsam und kontinuierlich nach unten gefahren. Wenn der Messkörper aus der Flüssigkeit auftaucht, entsteht dabei an der Unterseite eine Flüssigkeitslamelle.

Die durch diese Lamelle auf den Messkörper wirkende Zugkraft wird mit Hilfe einer sensiblen Präzisionswaage solange gemessen, bis die Lamelle unter dem Messkörper abreißt. Aus dieser maximalen Zugkraft und den Abmessungen des Messkörpers wird dann die Oberflächenspannung  $\sigma'$  ermittelt (Abb. 3-22, Gleichung [8]). Am Gerät wird diese Oberflächenspannung  $\sigma'$  abgelesen, diese muss noch mit dem Krüss-Gerätekorrekturfaktor von 1,07 multipliziert werden. Man erhält dann den wahren Messwert. Mit Hilfe einer Formel von Zuidema und Waters wird der Korrekturfaktor  $F_K$  ermittelt, indem die Dichte der zu messenden Flüssigkeit eingeht. Multipliziert man diesen Korrekturfaktor mit dem wahren Messwert erhält man die Oberflächenspannung  $\sigma^*$ . Diese Oberflächenspannung  $\sigma^*$  wurde für jede Einzelkomponente und für das Porenfluid bei einer Temperatur von 20°C zweimal bestimmt. Daraus wurde jeweils ein Mittelwert gebildet (Tabelle 3-4). So erhält man für die Oberflächenspannung des Porenfluids einen Wert von  $\sigma = 19,76$  mN/m, im Vergleich dazu hat Wasser eine bedeutend höhere Oberflächenspannung von  $\sigma = 72,8$  mN/m. Diese niedrige Oberflächenspannung des Porenfluids ist ein Grund für die vollständige Sättigung des Silica Gels.

		Toluol [mN/m]	2-Propanol [mN/m]	Porenfluid [mN/m]
Gemessene Oberflächenspannung	$\sigma'$	23,80	15,50	20,10
		23,70	15,50	20,30
Korrigierte Oberflächenspannung	$\sigma^*$	23,80	14,84	19,65
		23,69	14,84	19,86
Gemittelte Oberflächenspannung	$\sigma$	<b>23,75</b>	<b>14,84</b>	<b>19,76</b>

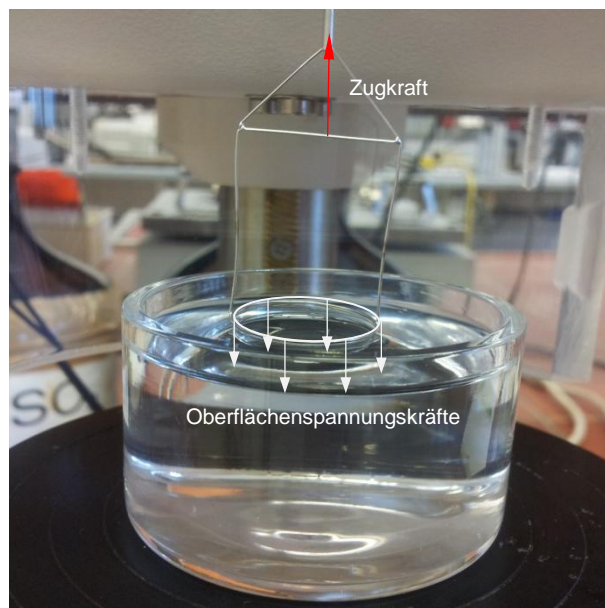
Tabelle 3-4: Berechnung der Oberflächenspannung  $\sigma$ 

Abb. 3-22: Schema des Messprinzips des Tensiometers

### 3.5. Durchlässigkeit $k_f$

Die Durchlässigkeit von Böden hängt in der Regel von verschiedenen Parametern wie z.B. der Korngröße und der Korngrößenverteilung und damit auch vom Porenvolumen des Bodens ab. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  ist ein rechnerischer Wert, der die Durchlässigkeit von Boden oder Fels beschreibt. Der Beiwert wird standardmäßig im Labor mit Hilfe einer triaxialen Durchlässigkeitszelle ermittelt. Bei diesem Versuch wird ein Probenkörper von unten nach oben mit Wasser durchströmt. Der Beiwert berechnet sich nach ÖNORM B 4422-1 (1992) mit Hilfe der Gleichung [9]

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h} \text{ [m/s]} \quad [9]$$

$k_f$	Durchlässigkeit [m/s]
$Q$	Fließrate [m <sup>3</sup> /s]
$l$	durchströmte Länge des Körpers [m]
$A$	durchströmte Querschnittsfläche des Körpers [m <sup>2</sup> ]
$\Delta h$	Höhendifferenz [m]



oder aus dem Zusammenhang dass der Durchlässigkeitsbeiwert von der Permeabilität und der Viskosität abhängt (Gleichung [10]; Hölting & Coldewey, 2009).

$$k_f = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\eta} \text{ [m/s]} \quad [10]$$

$k_f$	Durchlässigkeit [m/s]
$K$	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
$\eta$	dynamische Viskosität [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Dichte des Fluids [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Erdschwerebeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

Die Durchlässigkeit eines Bodens wird, wie am Anfang dieses Kapitels bereits erwähnt, mit Hilfe von Wasser und einem durchströmbar Bodenkörper bestimmt. Um nun die Durchlässigkeit des transparenten Bodens zu bestimmen, musste ein Versuchsaufbau neu entwickelt werden, da nicht auf den Standardversuch zurückgegriffen werden konnte, weil das Silica Gel sich nicht mit Wasser sättigen lässt, der Versuch mit dem Porenfluid durchgeführt werden muss und die üblichen Versuchseinrichtungen mit triaxialen Druckgeräten nicht mit dem chemischen Porenfluid verunreinigt werden soll.

Zu diesem Zweck wurde eine experimentelle Durchführung (Abb. 3-23) mit konstanter Druckhöhe entwickelt. Die Formel zur Berechnung des Beiwertes ist (Gleichung [11]):

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{A \cdot (h_1 - h_2)} \text{ [m/s]} \quad [11]$$

$k_f$	Durchlässigkeit [m/s]
$Q$	Fließrate [m <sup>3</sup> /s]
$l$	durchströmte Länge des Körpers [m]
$A$	durchströmte Querschnittsfläche des Körpers [m <sup>2</sup> ]
$h_1$	konstanter Fluidpegel im Ausgangsbehälter [m]
$h_2$	Auslaufhöhe [m]

Die Bodenprobe, die aus gesättigtem Silica Gel besteht, wird in einen zylindrischen Versuchsbehälter gefüllt und dort von unten nach oben mit dem Porenfluid durchströmt, der Fluidpegel wird konstant auf dem vorgesehenen Niveau mit Hilfe eines Überlaufes gehalten, um die konstante Druckhöhe zu gewährleisten. Gemessen wird die Menge in Liter des Durchflusses durch die Bodenprobe und die Zeit die dafür benötigt wird. Die Querschnittsfläche der Bodenprobe sowie die beiden benötigten Höhen sind bekannt. Aus diesen Eingangsparametern lässt sich mit Hilfe der oben beschriebenen Formel der Durchlässigkeitsbeiwert berechnen. Für den hier verwendeten transparenten Boden ergibt sich ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 6,32 \cdot 10^{-4}$  m/s mit dem Porenfluid. Im Vergleich dazu liegt die Durchlässigkeit  $k_f$  von Kies mit Wasser im Bereich zwischen  $10^{-2}$  und  $10^{-4}$  m/s (Witt, 2008).



Abb. 3-23: Entwickelter Versuchsaufbau zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Silica Gels

### 3.6. Permeabilität K

Die Permeabilität K beschreibt in der Geotechnik die Durchlässigkeit von Böden und Fels für Flüssigkeiten und Gase. Mit ihr verbunden ist die Durchlässigkeit  $k_f$ , die im vorangehenden Abschnitt beschrieben wird. Die Permeabilität K eines Bodenkörpers ist nicht abhängig von der Dichte  $\rho$  und der Viskosität  $\eta$  des Fluids von dem es durchströmt wird. Je höher die Viskosität  $\eta$  des Fluids, desto kleiner ist die Fließrate Q. Die Permeabilität K hängt von den Eigenschaften des durchströmten Mediums ab. Die Permeabilität ist abgeleitet aus dem Gesetz von Darcy und ist definiert als (Gleichung [12]; Hölding & Coldewey, 2009):

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{\Delta p \cdot A} \quad [\text{m}^2] \quad [12]$$

K	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
Q	Fließrate [m <sup>3</sup> /s]
$\eta$	dynamische Viskosität [Ns/m <sup>2</sup> ]
l	durchströmte Länge des Probenkörpers [m]
$\Delta p$	Druckdifferenz die sich nach dem Strömen einstellt [N/m <sup>2</sup> ]
A	durchströmte Querschnittsfläche des Probenkörpers [m <sup>2</sup> ]

Durch Umformen der Gleichung [10] für die Durchlässigkeit  $k_f$  erhält man folgenden Ausdruck (Hölding & Coldewey, 2009):

$$K = \frac{k_f \cdot \eta}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}^2] \quad [13]$$

K	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
$k_f$	Durchlässigkeit [m/s]
$\eta$	dynamische Viskosität [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Dichte des Fluids [kg/m <sup>3</sup> ]
g	Erdschwerebeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]

Die Permeabilität K für den transparenten Boden, berechnet sich mit den in Kapiteln 3.2 bis 3.5 bestimmten Parametern des Porenfluids und Gleichung [13] zu  $K = 8,45 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ .

Die Durchlässigkeit  $k_f$  des Silica Gels für Einzelkomponenten des Porenfluids oder für Wasser kann durch Gleichsetzen der Permeabilität K des transparenten Bodens in Abhängigkeit der Flüssigkeit, die das Medium durchströmt, bestimmt werden (Gleichung [14]).

$$K_{\text{Porenfluid}} = K_{\text{Wasser}} \quad [14]$$

Man erhält somit:

$$\frac{k_{f,Porenfluid} \cdot \eta_{Porenfluid}}{\rho_{Porenfluid} \cdot g} = \frac{k_{f,Wasser} \cdot \eta_{Wasser}}{\rho_{Wasser} \cdot g} \quad [m^2] \quad [15]$$

Durch Umformen von Gleichung [15] kann man die Durchlässigkeit  $k_{f, Wasser}$  des Silica Gels ausrechnen (Gleichung [16]):

$$k_{f,Wasser} = k_{f,Porenfluid} \cdot \frac{\eta_{Porenfluid} \cdot \rho_{Wasser}}{\eta_{Wasser} \cdot \rho_{Porenfluid}} \quad [m/s] \quad [16]$$

Dieser Vorgang wurde für alle Fluide durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind alle Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  angeführt (Tabelle 3-5).

Fluid	Durchlässigkeit $k_f$ [m/s]
Wasser	8,26E-04
Toluol	1,18E-03
2-Propanol	2,48E-04
Porenfluid	6,32E-04

Tabelle 3-5: Durchlässigkeit  $k_f$  des Silica Gels mit unterschiedlichen Fluiden

### 3.7. Kapillare Steighöhe $h$

Kapillarität ist das Verhalten von Flüssigkeiten, das sich bei Kontakt mit Kapillaren einstellt. Fluide steigen in diesen dünnen Glasröhren gegen die Gravitationskraft nach oben. Diese Höhe nennt man kapillare Steighöhe  $h$ . Der Effekt des Hochsteigens wird durch die Oberflächenspannung  $\sigma$  des Fluids und der Grenzflächenspannung des Fluids mit der festen Oberfläche hervorgerufen. Je kleiner die Kapillare umso größer die Steighöhe.

Die Formel (Busch & Luckner, 1974) zur Berechnung der kapillaren Steighöhe  $h$  ist (Gleichung [17]):

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad [m] \quad [17]$$

$h$	kapillare Steighöhe [m]
$\sigma$	Oberflächenspannung [N/m]
$\theta$	Kontaktwinkel [°]
$\rho$	Dichte der Flüssigkeit [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Erdschwerebeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$r$	Radius der Röhre [m]

Aus den Vorversuchen sind die Oberflächenspannungen und die Dichten der Flüssigkeiten bekannt. Der Kontaktwinkel wurde experimentell ermittelt. Wasser besitzt einen Kontaktwinkel  $\theta$  von 20° zu Glas. Die Einzelkomponenten und die Porenfluidmischung bilden aufgrund der geringen Oberflächenspannung keinen kugeligen Tropfen und daher einen fast nicht erfassbaren

Kontaktwinkel. Er wurde mit  $\theta_{\text{Fluid}} = 2^\circ$  für die Einzelkomponenten und mit  $\theta_{\text{Porenfluid}} = 0^\circ$  für das Porenfluid angenommen bzw. ermittelt (Abb. 3-24).

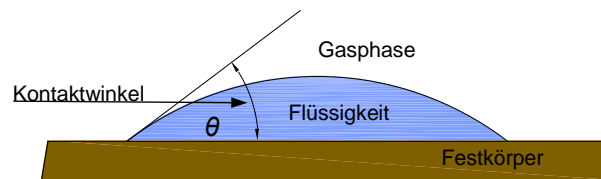


Abb. 3-24: Schema Kontaktwinkel

Die Tabelle 3-6 zeigt die Ergebnisse der errechneten kapillaren Steighöhe laut Gleichung [17] in tabellarischer Form:

Radius der Kapillare R	Kapillare Steighöhe h [mm]			
	Wasser	Toluol	2-Propanol	Porenfluid
1 m	0,014	0,006	0,004	0,005
10 cm	0,139	0,056	0,039	0,049
1 cm	1,395	0,557	0,388	0,491
5 mm	2,789	1,113	0,776	0,983
2 mm	6,973	2,784	1,941	2,457
1 mm	13,947	5,567	3,882	4,914
0,1 mm	139,468	55,672	38,816	49,142

Tabelle 3-6: Kapillare Steighöhe h unterschiedlicher Fluide

Aufgrund der geringen Oberflächenspannung und des daraus resultierenden geringen Kontaktwinkels ergibt sich folglich eine deutlich niedrigere kapillare Steighöhe h für die Einzelkomponenten und das Porenfluid (Abb. 3-25).

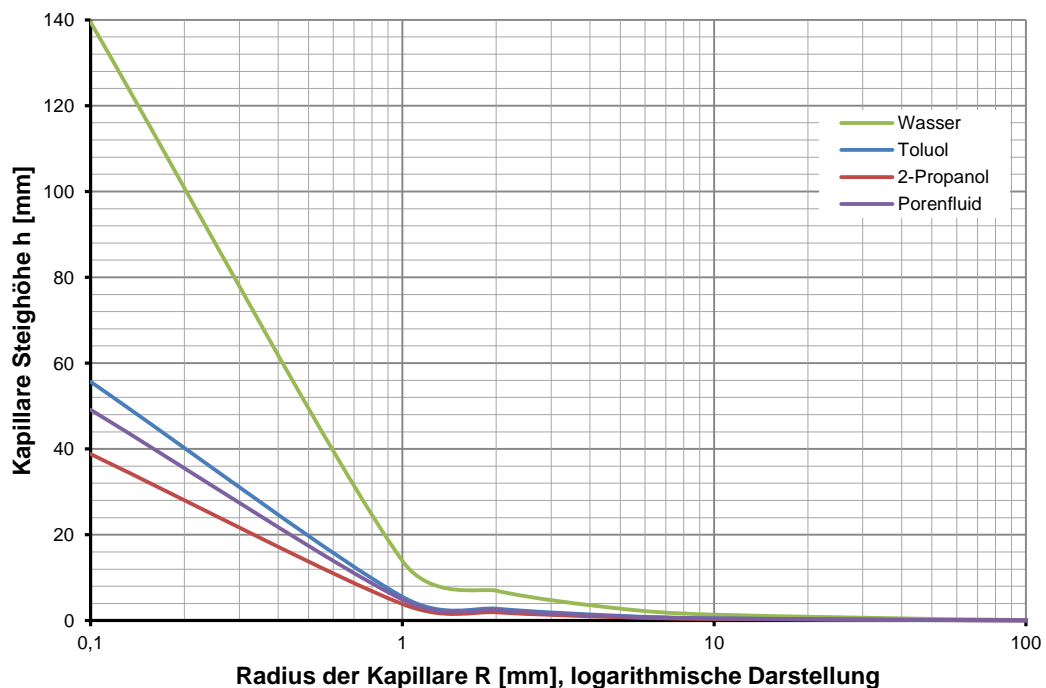


Abb. 3-25: Kapillare Steighöhe h

### 3.8. Zusammenfassung der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 3-7 findet sich eine Auflistung aller hier in diesem Kapitel dargestellten Werte. Untersucht wurde immer das Porenfluid, die reinen Komponenten Toluol und 2-Propanol und das Referenzfluid Wasser. Die gravierendsten Unterschiede des Porenfluids ließen sich im Vergleich zu Wasser vor allem bei der Oberflächenspannung  $\sigma$ , der kinematischen Viskosität  $\nu$  und daraus resultierend auch bei der dynamischen Viskosität  $\eta$  feststellen. Diese Unterschiede sind ausschlaggebend für die vollständige Sättigung, da dadurch eine selbstentlüftende Wirkung des Porenfluids entsteht und die Innerkorporen des Silica Gels sich komplett mit dem Porenfluid füllen können.

Fluid	Summenformel	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Brechungs- index $n_D$	pH-Wert	Oberflächen- spannung $\sigma$ [mN/m]
Wasser	H <sub>2</sub> O	1,00	1,3330 <sup>1)</sup>	7	72,75
Toluol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,87	1,4967 <sup>1)</sup>	kein Wert messbar	23,75
Toluol (Zhao, 2007)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,87	1,4940 <sup>2)</sup>	kein Wert messbar	-
2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0,78	1,3770 <sup>1)</sup>	7	14,84
2-Propanol (Zhao, 2007)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0,79	1,3840 <sup>2)</sup>	7	-
Porenfluid	-	0,82	1,4290 <sup>1)</sup>	7	19,76

Fluid	Summenformel	dynamische Viskosität $\eta$ [kg/s*m]	kinematische Viskosität $\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	Durchlässigkeit $k_f$ <sup>3)</sup> [m/s]	Permeabilität $K$ <sup>3)</sup> [m <sup>2</sup> ]
Wasser	H <sub>2</sub> O	0,0010	1,004	8,26E-04	8,45E-11
Toluol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,0006	0,705	1,18E-03	8,45E-11
Toluol (Zhao, 2007)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,0006	0,634	-	-
2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0,0026	3,338	2,48E-04	8,45E-11
2-Propanol (Zhao, 2007)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0,0019	2,420	-	-
Porenfluid	-	0,0011	1,312	6,32E-04	8,45E-11

Tabelle 3-7: Zusammenfassung der Ergebnisse der fluidmechanischen Charakterisierung

<sup>1)</sup> Messtemperatur des Brechungsindex bei 20°

<sup>2)</sup> Messtemperatur des Brechungsindex bei 25°

<sup>3)</sup> Die Durchlässigkeit  $k_f$  und die Permeabilität  $K$  wird, wie in Kapitel 3.5 und Kapitel 3.6 beschrieben, auf das hier benutzte Silica Gel bezogen.

## 4. Modellversuch

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll untersucht werden, wie sich Bodenpartikel bei einem Zugversuch in der Nähe eines Gewindestabes, wie er für Hangsicherungen mit z.B. Spinnankern (Supp & Semprich, 2010) benutzt wird, verhalten. Da eine Versuchseinrichtung für einen gesamten Spinnanker nur mit erheblichem Aufwand im Labor zu realisieren ist, wurde der Modellversuch auf einen einzelnen Gewindestab reduziert. Der transparente Boden ermöglicht es die Interaktion zwischen Gewindestab und Silica Gel Partikel zu beobachten. In diesem Kapitel wird die Versuchseinrichtung, eine kurze Erläuterung über die Herstellung des transparenten Bodens, den Versuchsablauf und die unterschiedlichen Versuchsreihen erklärt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen finden sich im Kapitel 5.

### 4.1. Versuchskonzept

Die Versuchsreihen dieser Masterarbeit gliedern sich in vier Teile. In den ersten beiden Teilen werden Stäbe in unterschiedlichen Positionen und Längen eingebaut. Mit Hilfe einer Zugvorrichtung werden diese aus dem Material herausgezogen. Der Zugvorgang wird alle 2,5 mm unterbrochen, um mit Hilfe einer generierten vertikalen Laserebene den Bodenkörper abzutasten und die Verschiebungen der Silica Gel Partikel sichtbar zu machen (Abb. 4-1, Abb. 4-8). Diese Laserebenen werden mit einer CCD-Kamera abgelichtet. Aus diesen Verschiebungsbildern wird mit Hilfe einer PIV-Analyse der bewegte Bodenkörper entlang des Gewindestabes sichtbar gemacht. Außerdem wird während des Zuges sowohl der Weg des Stabes, als auch die Kraft, die benötigt wird um den Stab herauszuziehen, gemessen. Im dritten Teil der Versuchsreihe wird ein Gewindestab mit halbem Querschnitt direkt an der Front des Versuchsbehälters eingebaut und ein ungesättigtes Silica Gel und ein Referenzmaterial um den Stab schichtweise eingebaut. Bei diesem Versuch werden die Verschiebungen nur in einer Ebene, direkt an der Front des Behälters, aufgenommen und ausgewertet. Der vierte Teil beschäftigt sich mit der Auswirkung unterschiedlicher Dichten des Silica Gels und dem Einfluss des Eindrehens des Stabes in den Bodenkörper. Bei diesem Versuch werden die Kraft-Weg Messungen ausgewertet, ohne eine Visualisierung. In den anschließenden Kapiteln werden die Versuchsreihen detailliert beschrieben.



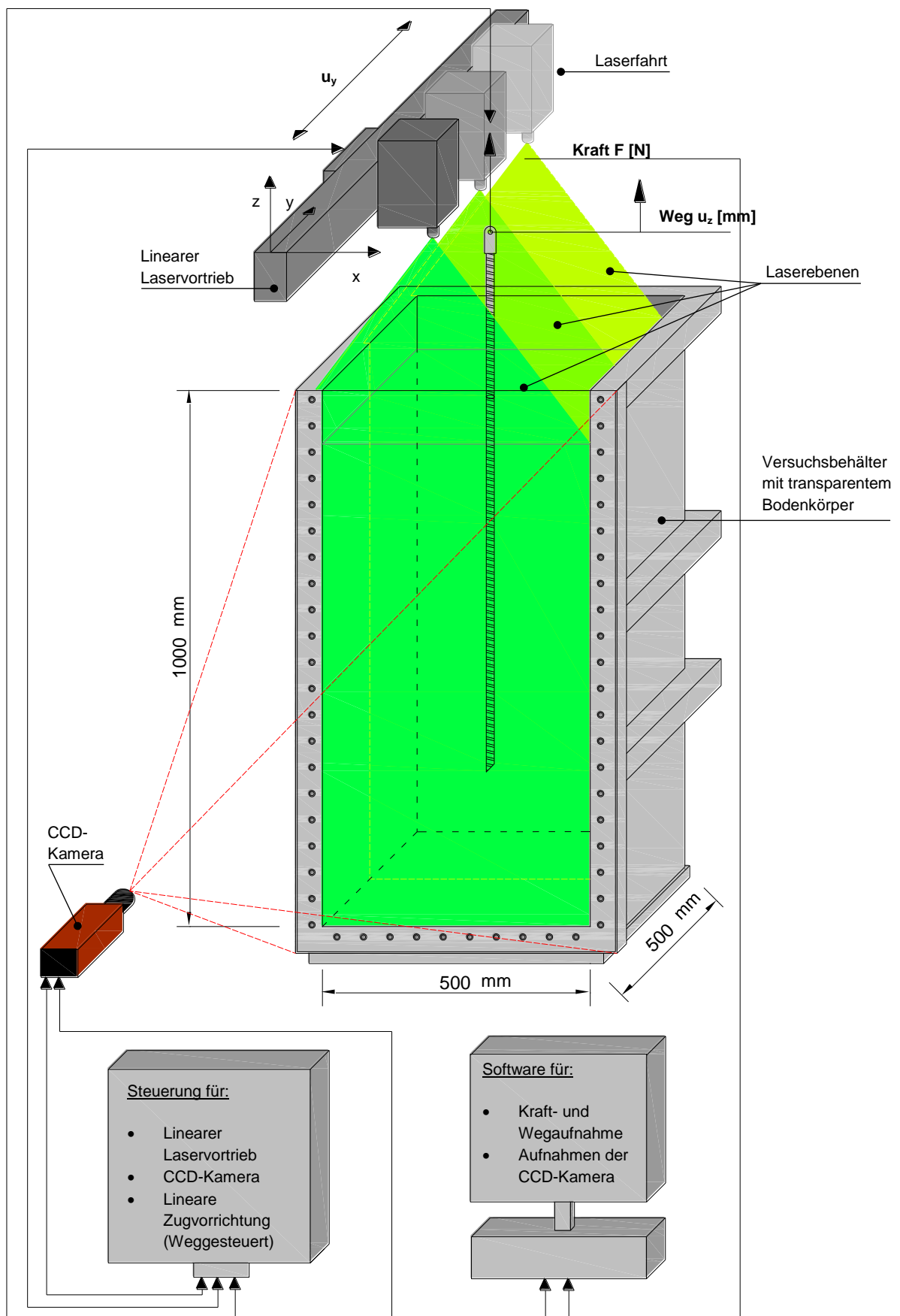


Abb. 4-1: Versuchsdurchführung

## 4.2. Versuchseinrichtung

Um die Versuchsreihen dieser Masterarbeit besser verstehen zu können wird zuerst die Versuchseinrichtung näher erklärt. Die Versuchseinrichtung setzt sich aus dem Traggerüst, dem Versuchsbehälter, der Stahlstäbe, dem transparenten Boden, der Zugvorrichtung, dem linearen Spindeltrieb für den Laser und dem Laser selbst, dem Steuerungskasten für die Antriebe, der CCD-Kamera, der Schutzeinrichtung und der PC-Software zusammen (Abb. 4-2). Die einzelnen Bauteile werden hier kurz erläutert, eine detailliertere Beschreibung der Materialfindung der Versuchseinrichtung findet sich in dem für diese Masterarbeit vorangegangenen Masterprojekt das sich mit der Planung der Versuchseinrichtung beschäftigt (Poprask, 2011).



Abb. 4-2: Versuchseinrichtung

### **Traggerüst**

Das Traggerüst auf dem der Versuchsbehälter steht und auch die Antriebe für die Zugvorrichtung und den Laserantrieb montiert sind, besteht aus einem Profilsystem der Firma ITEM. Dieses System wurde aufgrund der sehr guten Tragfähigkeit, der leichten Montage und der guten Erweiterbarkeit innerhalb des Angebotes der Firma gewählt. Die statische Belastung wurde im Vorfeld ermittelt und daraufhin das Profil 6 60x60 L gewählt. Das Traggerüst wird durch eine geleimte Holzplatte vervollständigt. Unter der Holzplatte wurde ein Rüttelmotor montiert. Dieser dient dazu, immer die gleichen Lagerungsbedingungen innerhalb des Bodenkörpers herzustellen.

### **Versuchsbehälter**

Der Versuchsbehälter muss verschiedenen Anforderungen entsprechen und wurde erst geplant als die richtige Porenfluidmischung gefunden war, um ihn genau auf die benutzten Chemikalien auszulegen. Er soll den statischen und chemischen Beanspruchungen standhalten. Eine Seite des Behälters muss transparent sein, um die Interaktionen im Bodenkörper beobachten zu können. Vor allem die chemische Beanspruchung aufgrund des hier verwendeten Porenfluids, in Besondere dem aggressiven Toluol war zu berücksichtigen. Die ersten Pläne, den Versuchsbehälter aus Plexiglas zu fertigen, wurden nach ersten Tests mit dem Porenfluid und dem Plexiglas verworfen. Selbst nur eine geringe Menge Toluol reagiert schon mit dem Plexiglas. Es zeigten sich milchige Verfärbungen und Fraßspuren. Diese würden die Sichtbarkeit der Interaktionen im transparenten Boden unmöglich machen (Abb. 4-3).



Abb. 4-3: Versuchsstücke aus Plexiglas (Links ohne Toluol Kontakt, rechts mit Toluol Kontakt)

Nach eingehenden Untersuchungen verschiedener Baumaterialien wurde dann ein Behälter aus Edelstahl mit einer Glasfront konzipiert (Poprask, 2011). Der Versuchsbehälter wurde als dreiseitiger Kubus mit den Maßen 50 cm x 50 cm x 100 cm geplant mit einer SVG – Scheibe als vierte Seitenwand. In Vorversuchen (Ganster, 2012b) stellte man fest, dass die Transparenz des Bodens nach 20 cm bereits zu stark abnimmt um Bewegungen im Bodenkörper zu beobachten. Geplant war zuerst, den Stab genau in der Mitte des Behälters einzubauen, also bei 25 cm Tiefe. Auf Grund der Ergebnisse von Vorversuchen wurde jedoch im Behälter eine Trennwand in der Mitte eingezogen und somit die Tiefe auf 25 cm verkürzt, um Silica Gel und Porenfluid zu sparen, da sich der Bodenkörper von 0,25 m<sup>3</sup> auf 0,125 m<sup>3</sup> verringert (Abb. 4-4).

Der Stab wurde bei 12,5 cm eingebaut und garantiert somit eine optimale Sichtbarkeit der Interaktionen am Stab. Um das Entleeren des Behälters zu erleichtern, befindet sich an der Seite eine Auslassöffnung für das Porenfluid mit einem Durchmesser von ½ Zoll. Im Boden vor der Auslassöffnung wurde für das Porenfluid ein rechteckiges Sieb platziert, damit das Silica Gel sich vom Fluid trennen kann und die Öffnung nicht verstopft. Damit die Laserstrahlen so wenig wie möglich von den Wänden reflektiert werden, wird der Behälter mit einer PTFE-Folie ausgekleidet. Die Folie besteht aus Teflon und ist resistent gegenüber allen verwendeten Chemikalien, außerdem ist sie matt schwarz und reflektiert somit den Laserstrahl nur sehr schwach. Die Vorderseite des Behälters besteht aus einer geschliffenen Sicherheitsverbundglasscheibe (SVG), die 10 mm dick und kratzfest ist. Sie wird mit Montageprofilen an dem Behälter verschraubt. Chemikalienbeständige Gummidichtungen verhindern das Austreten der Fluide (Abb. 4-5). Um das Verdunsten der Chemikalien zu verhindern und um die Geruchsbelästigung zu minimieren, wurde eine Abdeckung mit Schnappverschluss und Gummidichtungen für den Versuchsbehälter gebaut (Abb. 4-6).

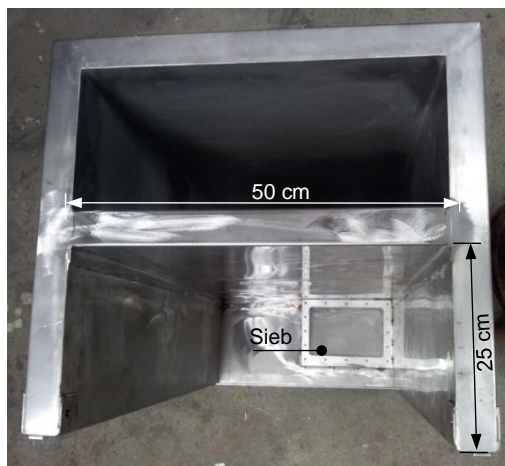


Abb. 4-4: Versuchsbehälter nach Verkleinerung des Versuchsbereiches

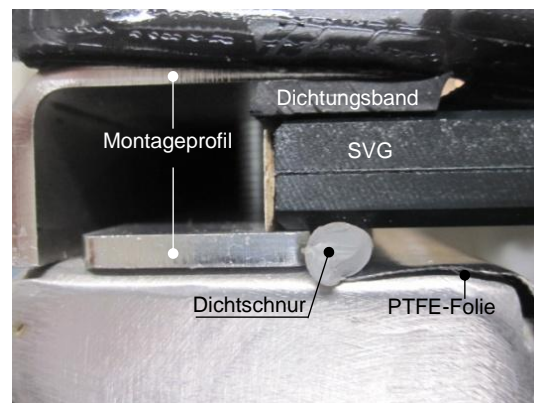


Abb. 4-5: Anschluss Glasscheibe an den Versuchsbehälter

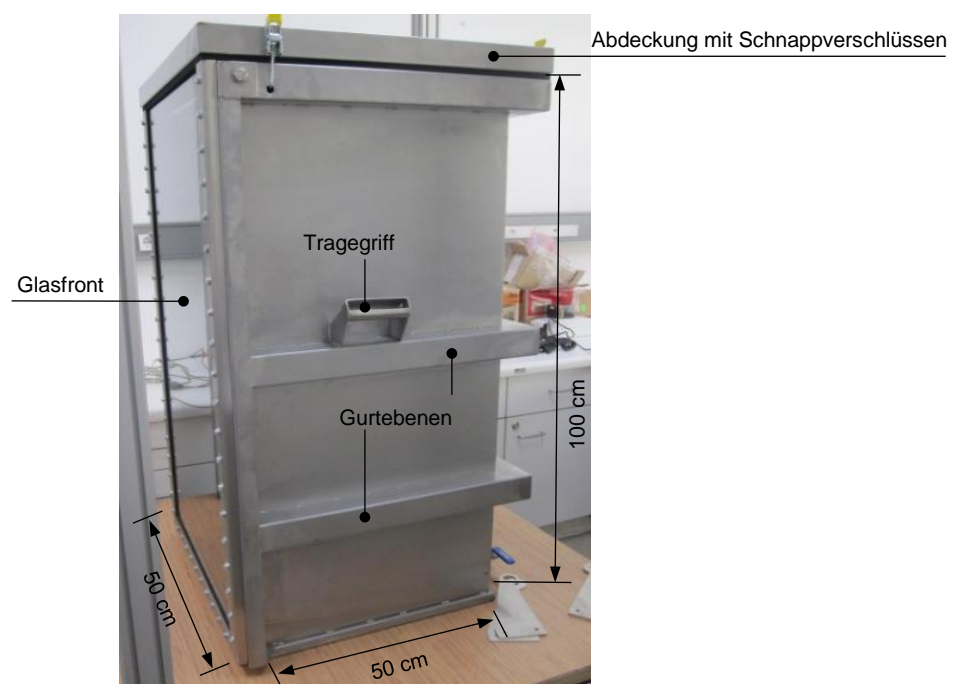


Abb. 4-6: Versuchsbehälter

### **Transparenter Bodenkörper**

Der transparente Bodenkörper besteht, wie schon eingehend im Kapitel 2.3 erklärt, aus Silica Gel und einem Porenfluid. Der Bodenkörper, der am Ende des Füllvorganges eine Höhe von 90 cm besitzt, wird aus neun 10 cm Schichten hergestellt, um eine optimale Sättigung des Silica Gels und der Lagerungsdichte zu gewährleisten. Eine 10 cm Bodenschicht besteht aus 10 kg Silica Gel und 10 kg Porenfluid, somit ergibt sich ein Bodenkörper mit einer Dichte von  $803 \text{ kg/m}^3$ . Da die Proben zur Ermittlung des Porenfluids in kleinen Gefäßen mit der Abmessung  $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  erfolgten, in denen nur 150 g Silica Gel und 150 g Porenfluid eingefüllt wurden, war die Herstellung der größeren Menge an Silica Gel schwieriger zu bewerkstelligen. Es wurde in mehreren Versuchen und Einzelschritten ein optimaler Arbeitsablauf entwickelt, um den transparenten Bodenkörper herzustellen. Diese Entwicklung dauerte einige Wochen, um sie zu perfektionieren, da die Luftporeneinschlüsse zwischen und in den Silica Partikeln immer wieder ein Problem darstellten. Die Arbeitsschritte, die sich entwickelten, sind wie folgt:

- Herstellen von 20 kg Porenfluid im Mischungsverhältnis  $\sim 9,3 \text{ kg}$  Toluol und  $\sim 10,7 \text{ kg}$  2-Propanol für den Brechungsindex  $n_D = 1,4290$  in einem Kanister
- Aufteilen der Mischung auf 2 Kanister à 10 kg
- Befüllen der Kanister mit je 10 kg Silica Gel
- Sättigen des Silica Gels im Kanister. Um eine optimale Sättigung zu erreichen wird dies durch drehen und wenden des Kanisters unterstützt. Dieser Vorgang sollte mindestens einen Tag dauern.
- Einfüllen des gesättigten Silica Gels in den Behälter

Diese Arbeitsschritte ergeben 20 cm Bodenkörper und werden solange wiederholt bis der Bodenkörper mit 90 cm Höhe hergestellt ist (Abb. 4-7; Ganster, 2012b).



Abb. 4-7: Befüllen des Behälters mit gesättigtem Silica Gel

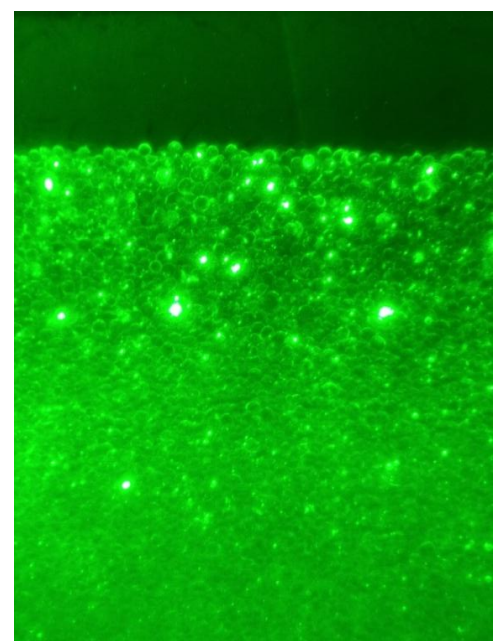


Abb. 4-8: Durch Laserlicht sichtbare Silica Gel Partikel



### Versuchsstäbe

Die Gewindestäbe für die Versuchsreihen 1 – 4 werden in der Beschaffenheit der Oberfläche und der Durchmesser variiert. Es werden Stäbe der Firma Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co KG, wie sie für den Spinnanker zur Anwendung kommen, getestet. Der Gewindestab, ein hochfester Schalungsanker SAS 900/1100 Typ F, wird mit drei unterschiedlichen Durchmessern, 15/20/26,5 mm, untersucht. Der Stab ist warmgewalzt und schweißgeeignet. Zur Feststellung des Einflusses der Gewindeoberfläche werden zusätzlich zwei Glattstäbe derselben Firma mit den Durchmessern 15 mm und 26,5 mm getestet (Abb. 4-9, Abb. 4-10). Die Stäbe besitzen einen 45° Schrägschnitt an ihren Eindrehenden um das Einbringen in den Bodenkörper zu erleichtern. Sie werden mit Hilfe einer Eindrehhilfe, die die exakt gleiche Position des Stabes gewährleistet, in den transparenten Boden geschraubt.

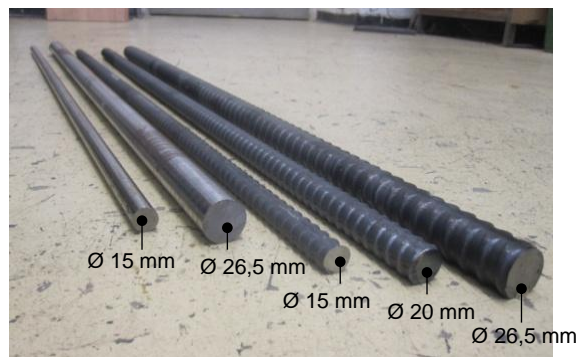


Abb. 4-9: Gewindestäbe und Glattstäbe

Bezeichnung	Durchmesser [mm]	Tragkraft [kN]	Strecklast [kN]	Bruchlast [kN]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Gewicht [kg/m]
St 900/1100 - Typ F	15	90	159	195	177	1,44
St 900/1100 - Typ F	20	160	283	345	314	2,56
St 950/1050 - Typ E	26,5	300	525	580	551	4,48

Tabelle 4-1: Kennwerte der Gewindestäbe (www.annahutte.com, 2012)

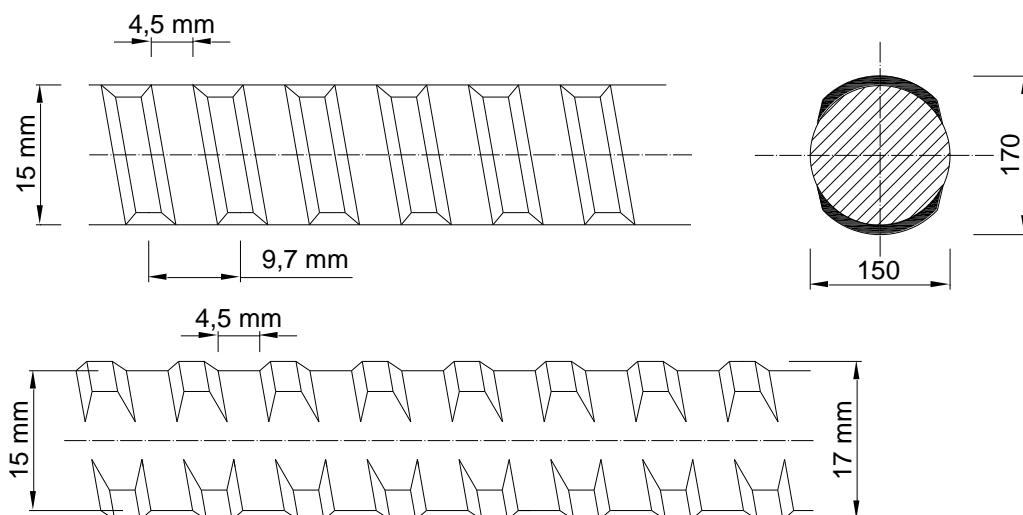


Abb. 4-10: SAS 900/1100 – Typ F

Es wurden zwei verschiedene Eindrehhilfen verwendet. Eine Eindrehhilfe für den Einbau genau in der Mitte des Versuchsbehälters für die Versuchsreihe 1 (Kap. 4.3.1, Abb. 4-12), eine andere für die Versuchsreihe 2 (Kap.4.3.2, Abb. 4-11), für das schräge Eindrehen unter unterschiedlichen Winkeln von  $5^\circ - 30^\circ$ . Die Eindrehhilfen bestehen aus steifen Stahlhohlprofilarmen die am Behälter montiert werden. Sie werden außerdem durch drei Muffen für die drei Durchmesser der Stäbe ergänzt, die aus Verbindungsmuffen der Schalungsanker hergestellt wurden. Die Eindrehhilfen und die Muffen erlauben ein schnelles, leichtes und exaktes Eindrehen der Gewindestäbe.

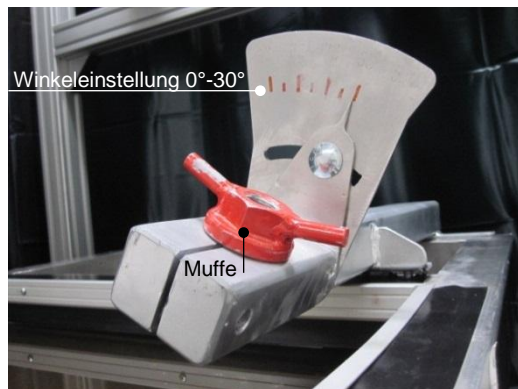


Abb. 4-11: Eindrehhilfe für Versuchsreihe 2

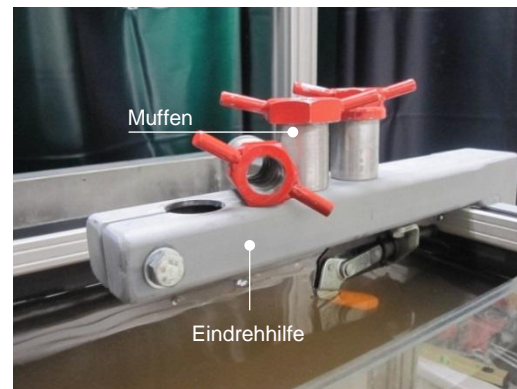


Abb. 4-12: Eindrehhilfe für Versuchsreihe 1

### Zugvorrichtung

Um die Gewindestäbe aus dem transparenten Boden zu ziehen, wird eine Hubspindel mit einer Mutter benutzt. Der Zug in diesem System wird dadurch erreicht, dass sich die Hubspindel nur in axialer Richtung ohne eine Drehung bewegen kann. Damit wird eine Drehung des Zuggestänges mit der integrierten Wägezelle verhindert. Die Hubspindel ist eine hochfeste Gewindespindel mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Steigung von 1,5 mm in der eine axiale Längsnut eingearbeitet ist. Am Ende der Hubspindel befindet sich der Aufnahmekopf für das Zuggestänge. Ein Gleitstein der am Spindelgehäuse befestigt ist, ragt in die Nut der Hubspindel und verhindert dadurch die Drehung der Spindel (Abb. 4-13). Die Hublänge wurde auf ca. 100 mm beschränkt.

Die Mutter der Gewindespindel ist auf ein radiales und axiales Drucklager montiert, welche im Spindelgehäuse eingebaut ist. Auf der Mutter sitzt eine Keilriemenscheibe, die mit einem Getriebemotor der Firma Lenze betrieben wird.

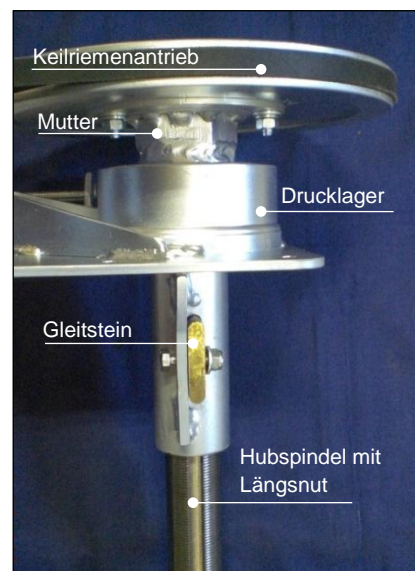


Abb. 4-13: Detail Zugvorrichtung

Die Zuggeschwindigkeit der Hubspindel wurde durch einen Versuch ermittelt und beträgt konstant  $v_{\text{Hubspindel}} = 0,33 \text{ mm/sec}$  (Abb. 4-14). Die maximale Zugkraft der Hubspindel beträgt  $\sim 15 \text{ kN}$ .



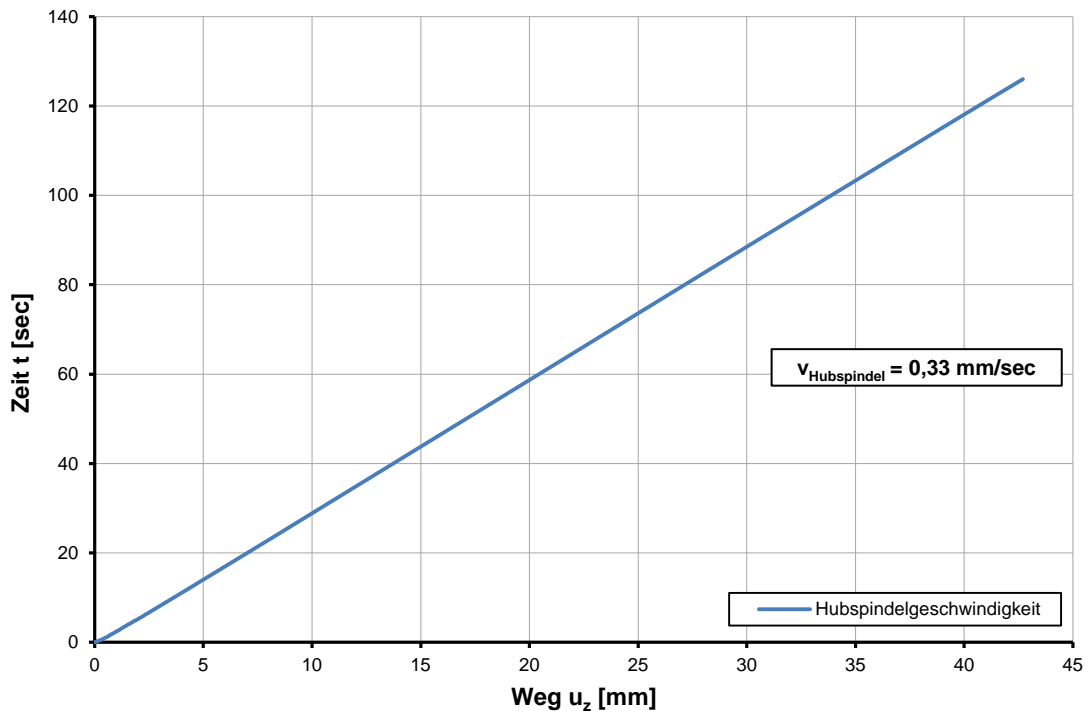


Abb. 4-14: Diagramm der Hubspindelgeschwindigkeit

### Linearer Laservortrieb

Der lineare Laservortrieb, der nötig ist um exakte vertikale Ebenen mit Hilfe des Lasers zu generieren, wird mit Hilfe einer Spindeleinheit mit Kugelgewinde gewährleistet. Die Firma Haberkorn Ulmer bietet mit dem System ITEM, das auch für das Traggerüst des Versuches gewählt wurde, diese Spindeleinheit an. Der Antrieb funktioniert über eine Vielkeilnabe, die mit einem Motor der Firma Lenze betrieben wird (Abb. 4-15).

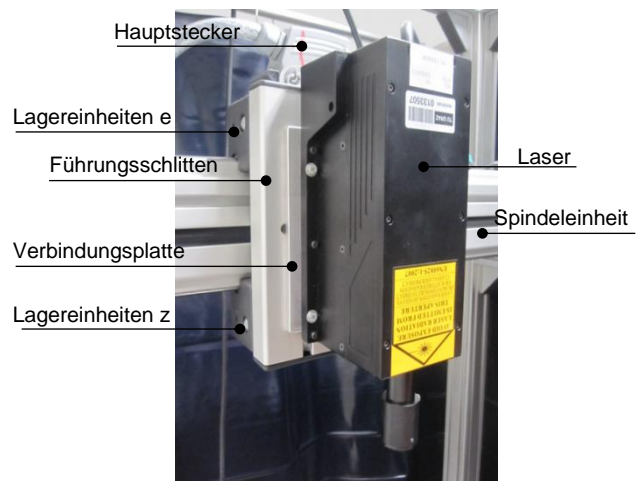


Abb. 4-15: Laser mit Führungsschlitten

Am Kugelgewindespindelgehäuse sind vier Magnetschalter verstellbar in axialer Richtung montiert, welche vom am Schlitten fixierten Magneten ausgelöst werden. Die beiden äußeren Magnetschalter links und rechts am Ende der Spindel verhindern, dass der Führungsschlitten vom Getriebemotor nicht bis zu dessen Ende geführt wird. Die beiden inneren Magnetschalter beschränken das Signal der Kamera für die Fotostrecke (Abb. 4-16).

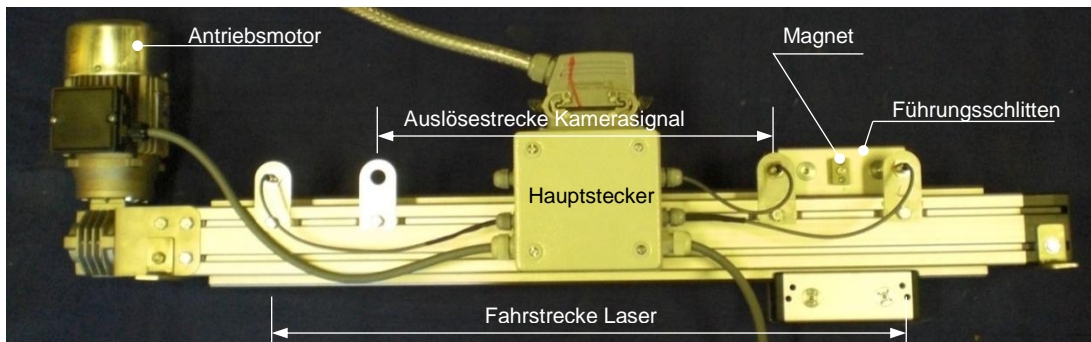


Abb. 4-16: Linearer Laserantrieb

Die Geschwindigkeit des Laservortriebes wurde mit Hilfe des Wegaufnehmers gemessen. Die maximale Geschwindigkeit beträgt  $v_{\max} = 24,66 \text{ mm/sec}$  und die minimalen Geschwindigkeit  $v_{\min} = 9,05 \text{ mm/sec}$ . Die Anfahrtszeit, die der Laservortrieb benötigt um eine konstante Geschwindigkeit des Laserschlittens zu gewährleisten, beträgt aufgrund der Leistungstärke des Antriebsmotors weniger als 0,5 sec und ist schon nach wenigen Millimetern erreicht (Abb. 4-17).

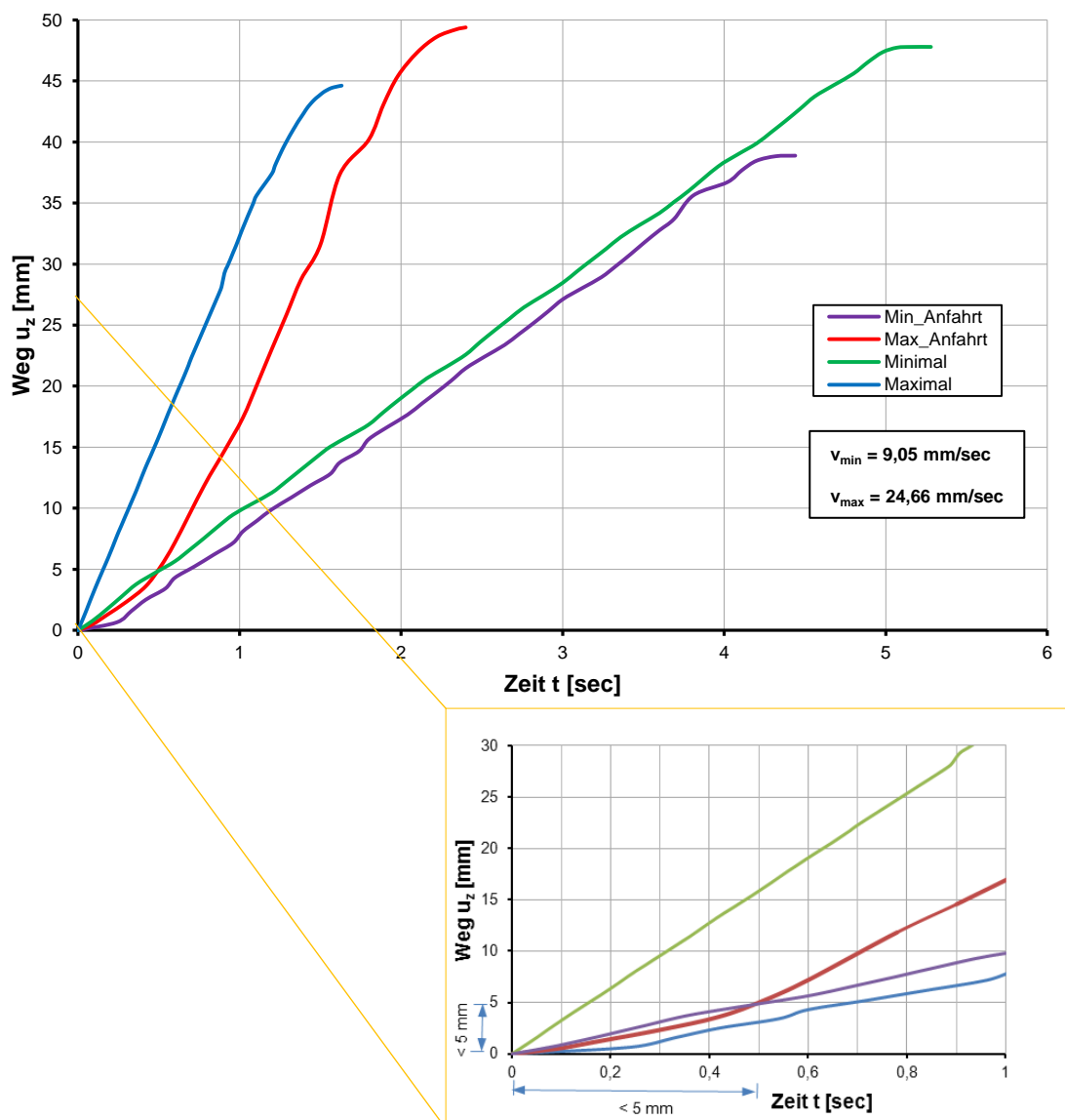


Abb. 4-17: Diagramm des linearen Laserantriebs

### ***Laser MGL-N-532***

Das Lasergerät ist ein Produkt der Firma Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd. Der Laser gehört der Klasse IV an, das heißt, es besteht Gefahr für Auge und Haut, wobei auch diffuse Streustrahlung eine Gefahr darstellt.

Der Laser hat eine Wellenlänge  $\lambda$  von 532 nm (grünes Laserlicht), eine Lichtleistung P von 3,7 Watt und eine konstante Welle (cw – constant wave) als Betriebsart. Es ist ein Festkörperlaser, das heißt, das Lasermedium ist ein Kristall. Die Energiezufuhr erfolgt über Licht. Die Strahlung wird permanent ausgesendet, man spricht daher von einem Dauerstrichlaser (Vees, 2009). Der Rohstrahl wird durch eine Fokussierlinse geführt und weitet sich nach der Optik auf 75° auf (Abb. 4-18). Der Laserfahrbereich wird dadurch kleiner und das Gefahrenpotential sinkt.

### **Laser MGL-N-532**

- Wellenlänge  $\lambda$ : 532 [nm]
- Lichtleistung P: 3,7 [W]
- Betriebsart: cw
- Aufweitungslinse: 75 [°]

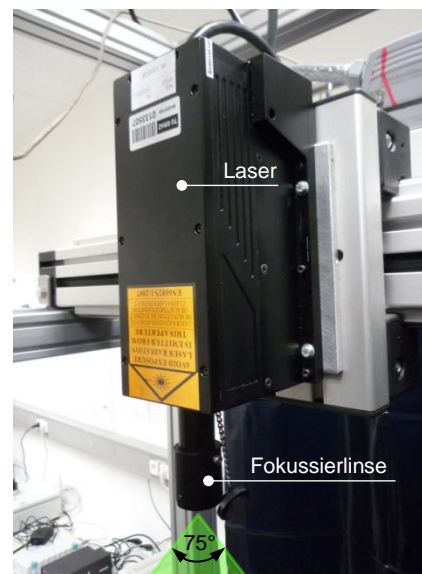


Abb. 4-18: Laser MGL-N-532

### ***CCD-Kamera Prosilica GX***

Um die Verschiebungen im Silica Gel auswerten zu können, werden Ebenen mit Hilfe einer Kamera, die mit dem Laser sichtbar gemacht werden, abgelichtet um mittels PIV-Analyse zu einem Modell zusammengefügt zu werden. Die Kamera wird auf ein Stativ, ungefähr 2 m entfernt vom Behälter, aufgebaut. Die Prosilica GX ist eine HD CCD-Kamera der Firma Allied Vision Technologies. Die Kamera erreicht eine maximale Datenrate von 240 MBytes pro Sekunde und kann daher sehr schnell auslösen (Abb. 4-19). Sie hat eine Auflösung von bis zu 2 Megapixeln und bildet Schwarz-Weiß Bilder ab.

Das Auslösen der Kamera wird mithilfe der Magnetschalter, die am Laserschlitten und an der Führungsschiene montiert sind, und einem Computerprogramm (Ganster, 2012a) automatisch gesteuert. Die Magnetschalter lösen einen Impuls aus, der den Befehl zur Aufnahme von Bildern an die Kamera weiter gibt. Die Länge der Strecke, welche der Impuls aufrecht bleibt, wird durch diese Magnetschalter gesteuert. Für die Versuchsreihen 1 – 2 wurde die Strecke mit 270 mm Länge (250 mm Bodenkörper plus Toleranzen) festgelegt.

Das verwendete Computerprogramm ermöglicht es, die Anzahl der Bilder pro mm Weg des Lasers einzustellen. Für die Versuchsreihe 1 und 2 wurden Bilder im Abstand von 6 mm aufgenommen.

Der Laser muss bei 100 % Leistung geführt werden, da der Laserstrahl die 90 cm Bodenkörper sonst nicht durchdringen kann. Es kommt aber dadurch in den ersten 20 cm zu einer Überbelichtung der Abbildungen. Da das Aufnahmelicht in den oberen Schichten zu hell ist und die Abblendmöglichkeit des Objektivs nicht ausreicht, um dies auszugleichen, wird vor das Objektiv ein Graufilter gesetzt. Dieser Filter hat eine Abstufung von Dunkelgrau bis zu keiner Einfärbung und reduziert im oberen Bildbereich die Überbelichtung der Aufnahme. Man erhält dadurch ein optimal belichtetes Bild vom ganzen Bodenkörper (Abb. 4-20).

### CCD-Kamera Prosilica GX

- 2 Megapixel HD
- Datenrate 240 Mbytes/sec



Abb. 4-19: CCD-Kamera auf dem Stativ

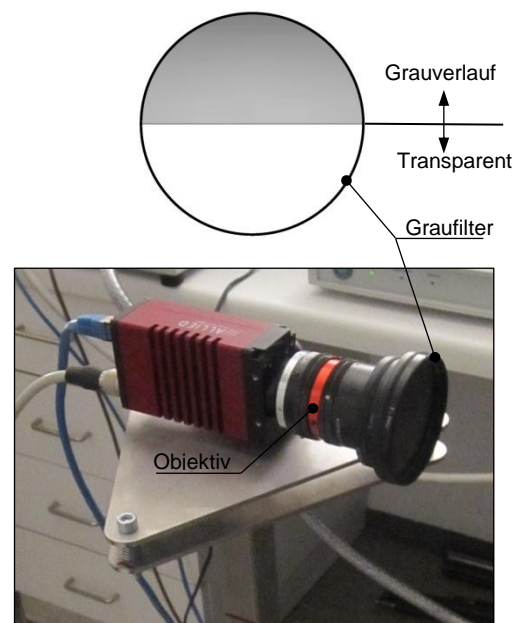


Abb. 4-20: Prosilica GX

### Steuerkasten

Die gesamte Steuerung wird über ein Bedienelement geregelt. In diesem Steuerkasten befinden sich die Steuerung für die beiden Motoren, für die Hubspindel und den Laservortrieb. Auch das Ausgangssignal für die Kamera wird hier geregelt. Dieses Zusammenführen aller Bedienelemente in einem Steuerkasten erleichtert die Versuchsdurchführung, da man die Motoren und die Kamera sehr leicht abwechselnd bedienen kann (Abb. 4-21, Abb. 4-22).

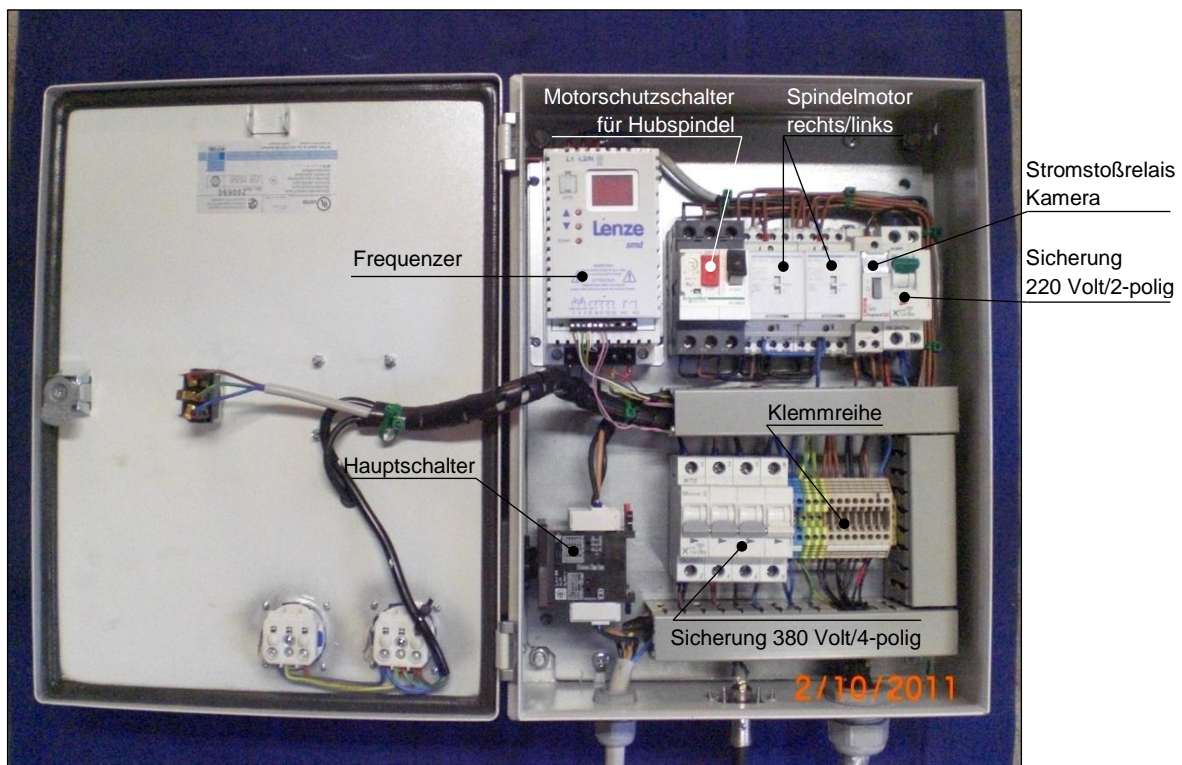


Abb. 4-21: Innenansicht Steuerkasten

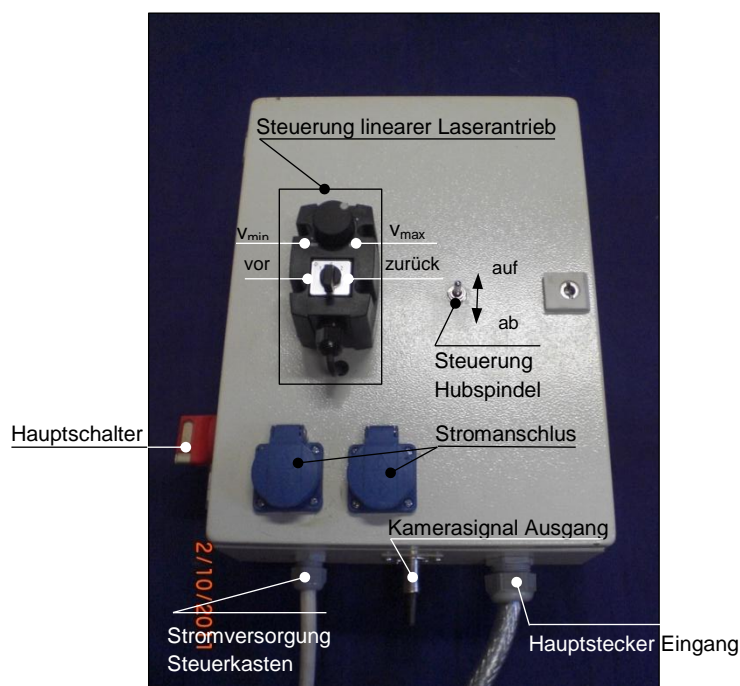


Abb. 4-22: Aussenansicht Steuerkasten



### **Messeinrichtungen (Wegaufnehmer und Wägezelle)**

Die Messeinrichtung für den Weg besteht aus einem induktiven Wegaufnehmer der Firma HBM (Abb. 4-23) und die Messeinrichtung für die Kraft besteht aus einer Wägezelle (Abb. 4-24) die im Hubgestänge eingebaut ist. Der Meßbereich der Wägezelle liegt bei 10 kN. Die Auswertung der Werte aus Kraft und Weg erfolgt über einen Datalogger der mit den Messinstrumenten und einem PC verbunden ist.

#### **Induktiver Wegaufnehmer HBM**

- Tastspitze
- Messweg  $u_z$ : 50 [mm]
- Linearitätsabweichung  $u_z$ :  $\pm 0,2$  [%]



Abb. 4-23: Induktiver Wegaufnehmer

#### **Wägezelle HBM**

- Messbereich F: 10 [kN]
- Messabweichung F:  $\pm 0,2$  [%]

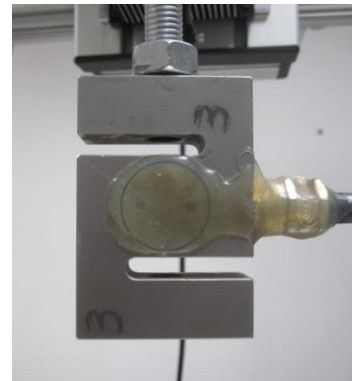


Abb. 4-24: Wägezelle

### **Schutzeinrichtung**

Es wird hier nur kurz auf die Schutzeinrichtung eingegangen, eine genauere Beschreibung findet sich im Masterprojekt (Poprask 2012). Die Schutzeinrichtung wird einerseits für das Arbeiten mit dem Laser und andererseits für das Hantieren mit Chemikalien benötigt. Es gibt in Österreich noch keine einheitliche gesetzliche Regelung für Sicherheitsmaßnahmen in Bezug auf Laser. Die Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA) bietet Kurse und Unterlagen zur Ausbildung eines Laserschutzbeauftragten an, um auf die richtige Anwendung mit Laser vorzubereiten. Die Sicherheitseinrichtungen für den Laser beinhalten einen Schutz vor Laserstreulicht durch einen Schweißvorhang und verschiedene Warnhinweise vor dem Laser. Mit den zusätzlichen Maßnahmen, welche für die Chemikalien getroffen wurden, und der persönlichen Schutzausrüstung ist ein ausreichender Schutz im Versuchsraum gewährleistet.

### 4.3. Versuchsreihen und Versuchsablauf

Wie schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt, wurden vier Versuchsreihen im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt. Dieser Abschnitt soll einen kurzen Überblick über diese liefern und den jeweiligen Versuchsablauf erklären. Der transparente Bodenkörper wurde, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, eingebaut und danach für die ersten beiden Versuchsreihen, die in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 erklärt werden, in dem Versuchsbehälter belassen. Die Transparenz des Bodenkörpers nahm nach ungefähr der Hälfte der Versuche ab, war aber immer noch ausreichend für die visuelle Beobachtung der Interaktionen bis zur Stabachse. Die Auswertungen der Kraft- und Wegaufzeichnungen aller Versuche finden sich im Kapitel 5.1.

#### 4.3.1. Versuchsreihe 1

In der Versuchsreihe 1 wird der Stab vertikal und mittig in den transparenten Bodenkörper mit Hilfe der vertikalen Eindrehhilfe eingedreht. Die Einbindelänge des Stabes mit dem Durchmesser von 15 mm beträgt 70 cm und 50 cm. Die Stäbe mit dem Durchmesser 20 mm und 26,5 mm werden mit 70 cm Einbindelänge eingebaut (Abb. 4-25 bis Abb. 4-27). In Tabelle 4-2 wird das Versuchsprogramm der Versuchsreihe 1 gezeigt.

Durchmesser [mm]	Einbautiefe Stab [cm]	Oberfläche Stab
15	50	Gewinde / glatt
15	70	Gewinde / glatt
20	70	Gewinde
26,5	70	Gewinde / glatt

Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 1

Durch das Eindrehen verspannen sich die Bodenpartikel des Silica Gels mit dem Stab. Nach dem Eindrehen wird der Stab mit dem Zuggestänge verbunden, der Wegaufnehmer und die Wägezelle platziert und deren Anzeige auf Null gestellt. Die Messeinrichtungen zeichnen den gezogenen Weg des Stabes und die dazu benötigte Kraft im CATman Programm auf. Das Kameraprogramm wird gestartet und die Messeinrichtungen beginnen mit der Aufzeichnung. Im nächsten Schritt wird der Stab 2,5 mm gezogen. Dieser Vorgang dauert ungefähr 7,5 sec, da die Hubspindel den Stab pro Sekunde 0,33 mm herauszieht. Der Zugvorgang wird mit einer Stoppuhr gemessen. Nach dem ersten Ziehen wird der Laser über den Behälter mit Hilfe des Spindelvortriebes geführt.



Die CCD-Kamera erhält durch die festgelegte Magnetstrecke den Impuls zum Auslösen und lichtet alle 6 mm Weg des Spindelvortriebes ein Bild ab. Auf einer Fotostrecke ergeben sich somit 44 Bildebenen. Nach dieser Fotostrecke wird der Stab wieder um 2,5 mm gezogen und der Laser danach über den Versuchsbehälter geführt. Dieser Vorgang wird insgesamt 20-mal wiederholt, das ergibt eine Gesamtzugstrecke von 50 mm des Stabes. Das Kameraprogramm speichert die Bilder in der gewünschten Ordnung ab. Man erhält für jede der 44 Bildebenen einen Ordner mit je 20 Bildern, die den Zugvorgang beschreiben. Nach dem Zugvorgang wird der Stab vom Zuggestänge und den Messeinrichtungen gelöst und aus dem Bodenkörper gezogen. Der Rüttelmotor wird dann für 5 min aktiviert um die nötige Lagerungsdichte wieder herzustellen. Nach jedem Versuch wird das Kraft-Weg-Diagramm sofort ausgewertet. Dieser Vorgang wird für die Stäbe, die in der obenstehenden Tabelle angeführt sind, mindestens zweimal durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Versuche werden im Kraft-Weg-Diagramm verglichen und wenn es zu Unstimmigkeiten in den Diagrammen kommt, wird ein weiterer Versuch durchgeführt um die Ergebnisse zu überprüfen.

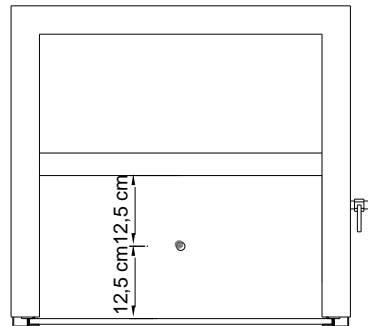


Abb. 4-25: Versuchsreihe 1: Grundriss

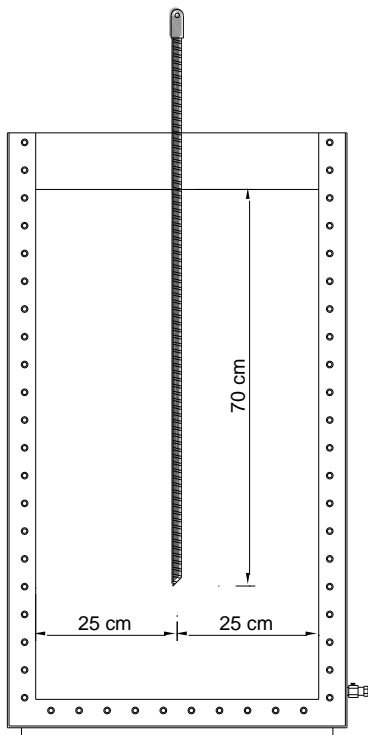


Abb. 4-26: Versuchsreihe 1: Aufriss, Einbautiefe 70 cm

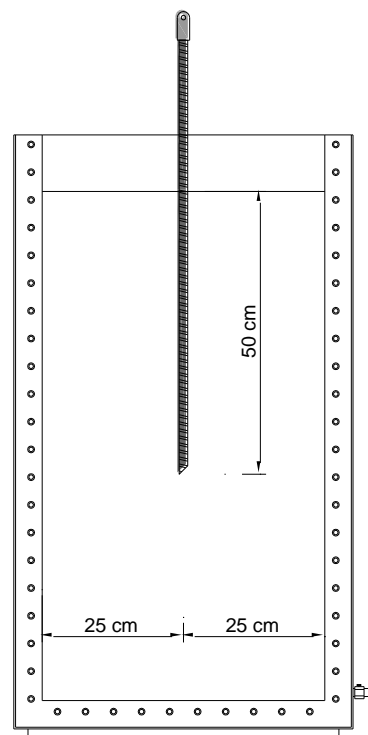


Abb. 4-27: Versuchsreihe 1: Aufriss, Einbautiefe 50 cm

### 4.3.2. Versuchsreihe 2

In der Versuchsreihe 2 wird der Stab mit dem Durchmesser von 15 mm in Winkeln von  $5^\circ$  -  $30^\circ$  gegenüber der Vertikalen in den Boden eingedreht und gezogen. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 4-3 aufgelistet. Die Einbautiefe des Stabes beträgt 50 cm, getestet wird der Gewinde- und der Glattstab (Abb. 4-28 bis Abb. 4-30). Der Stab wird mit Hilfe der schrägen Eindrehhilfe in den Boden eingedreht. Bei dieser Eindrehhilfe kann der Eindrehwinkel eingestellt werden. Die Schritte des Versuchsablaufs, wie Einbau, Messeinrichtungen, Zugvorgang und Laserfahrt, erfolgen in der gleichen Reihenfolge wie in der Versuchsreihe 1 und werden hier nicht weiter erläutert. Jeder Versuch wird mindestens zweimal durchgeführt. Zu erwähnen ist nur, dass ab einem Eindrehwinkel von  $25^\circ$  der Stab gegen seitliches Ausweichen abgestützt wird, da die Steifigkeit des Zugsystems zur Aufnahme der horizontalen Komponenten nicht ausreichend war.

Durchmesser [mm]	Einbautiefe Stab [cm]	Neigung [°]	Oberfläche Stab
15	50	5	Gewinde / glatt
15	50	10	Gewinde / glatt
15	50	15	Gewinde / glatt
15	50	20	Gewinde / glatt
15	50	25	Gewinde / glatt
15	50	30	Gewinde / glatt

Tabelle 4-3: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 2

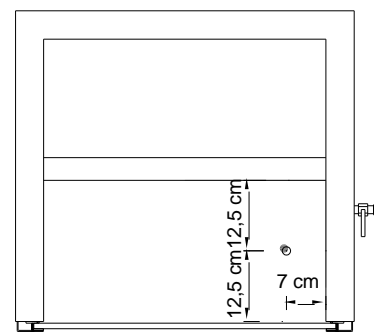


Abb. 4-28: Versuchsreihe 2: Grundriss

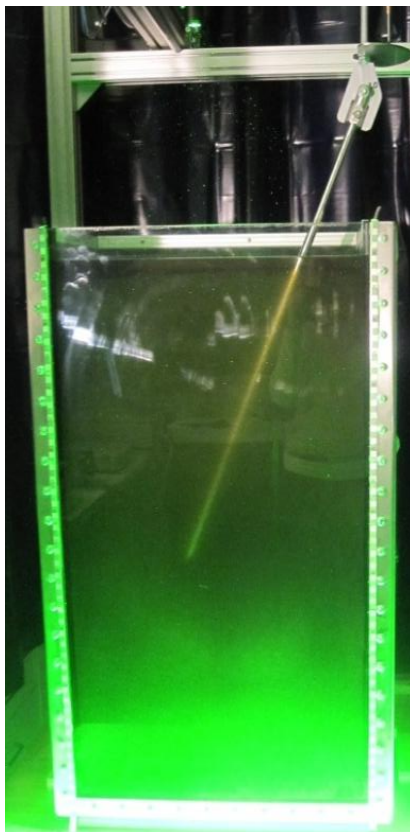
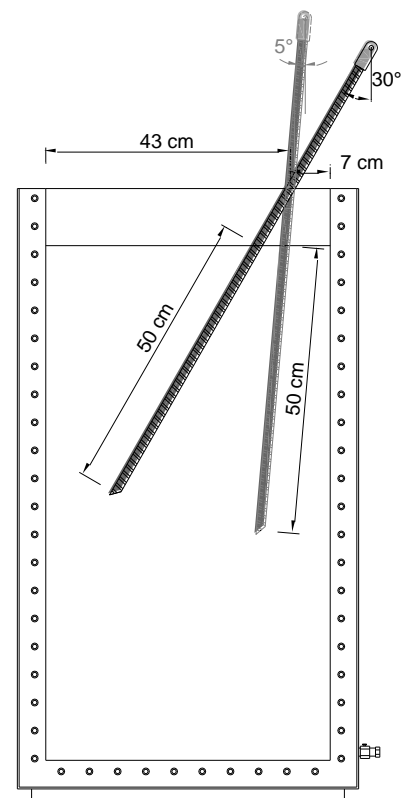
Abb. 4-29: Glatter Stab, Einbauwinkel  $20^\circ$   
(Der Laser befindet sich in Startposition)

Abb. 4-30: Versuchsreihe 2: Aufriss

### 4.3.3. Versuchsreihe 3

Um die Interaktionen in der Stabachse ohne spätere PIV-Analyse erkennen zu können, wurde die dritte Versuchsreihe entwickelt. In dieser wird der Stab genau entlang der Stabachse in zwei Hälften geschnitten. Die Schnittfläche wird geglättet und liegt während des Zugvorganges direkt an der Glasscheibe an (Abb. 4-34).

Die Einbautiefe des Stabes beträgt 50 cm und 70 cm (Abb. 4-31 bis Abb. 4-33). Das Versuchsprogramm wird in Tabelle 4-4 aufgelistet. Diese Versuchsreihe wird mit ungesättigtem Silica Gel und mit einem Referenzmaterial durchgeführt. Das Referenzmaterial besteht aus rundkörnigem Kies mit dem Korndurchmesser 2 - 5 mm. Die Parameter des Referenzmaterials, die mit denen des Silica Gels vergleichbar sind, finden sich in Kapitel 5.1.3.

Durchmesser [mm]	Einbautiefe Stab [cm]	Material	Oberfläche Stab
15	70	Silica Gel	Gewinde / Glatt
20	70	Silica Gel	Gewinde
15	70	Kies	Gewinde / Glatt
20	70	Kies	Gewinde
15	50	Silica Gel	Gewinde / Glatt
20	50	Silica Gel	Gewinde
15	50	Kies	Gewinde / Glatt
20	50	Kies	Gewinde

Tabelle 4-4: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 3

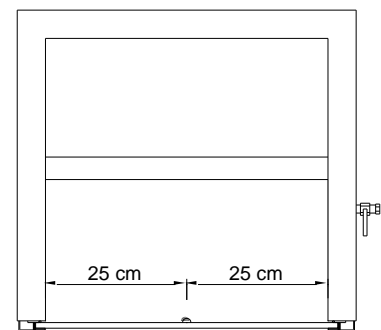


Abb. 4-31: Versuchsreihe 3: Grundriss

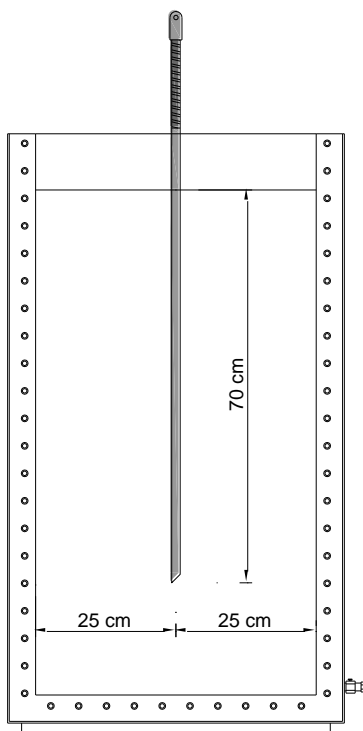


Abb. 4-32: Versuchsreihe 3: Aufriss, Einbautiefe 70 cm

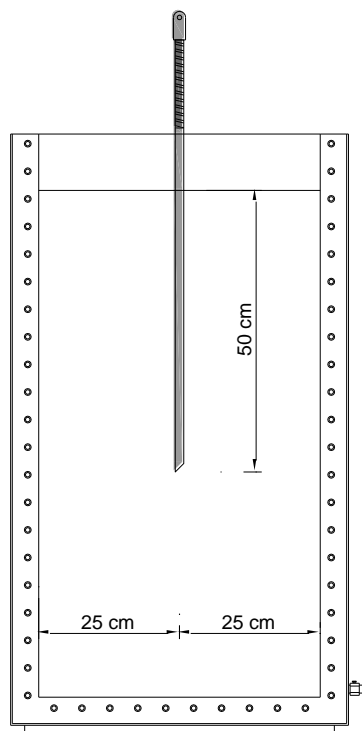


Abb. 4-33: Versuchsreihe 3: Aufriss, Einbautiefe 50 cm

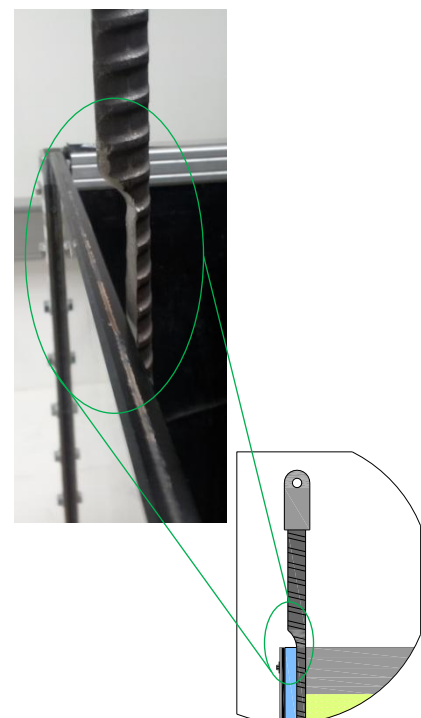


Abb. 4-34: Detail Anschluss: Stab an Scheibe

Zu Beginn dieser Versuchsreihe ist der Behälter zuerst leer. Der Stab wird mit dem Zuggestänge verbunden und in den leeren Behälter gehängt. Danach wird er mit einer Holzverkeilung an die Scheibe gepresst, um zu verhindern, dass Bodenpartikel während des Füllens des Behälters zwischen Scheibe und Stabfläche gelangen. Der Behälter wird dann lagenweise in 10 cm Schritten gefüllt. Nach jeder 10 cm Schicht wird eine dünne Lage farbiger Partikel eingebracht, um die Verschiebungen an der Scheibe deutlicher erkennen zu können (Abb. 4-35 und Abb. 4-36). Die Verkeilung wird während des Füllens mit nach oben geführt, da der schon bedeckte Teil durch den Bodenkörper zu genüge an die Scheibe gepresst wird.

Nach der schrittweisen Herstellung des 90 cm starken Bodenkörpers wird dieser durch ein 5-minütiges Rütteln mit dem Rüttelmotor verdichtet. Anschließend wird die Verkeilung entfernt und die Messeinrichtungen werden eingestellt. Danach wird der Zugvorgang durchgeführt und der Stab wird in 2,5 mm Schritten, 50 mm aus dem Bodenkörper gezogen. Die CCD-Kamera lichtet durch händisches Auslösen des Impulses für das Kamerasignal im Steuerkasten jeweils ein Bild nach einem 2,5 mm Zug ab. Der Weg und die Kraft werden aufgezeichnet und nach jedem Versuch sofort ausgewertet.

In dieser Versuchsreihe ist das Verschiebungsbild an der Scheibe das ausschlaggebende und jeder Versuch wird nur einmal durchgeführt wenn ersichtlich ist, dass der Zugvorgang optimal stattgefunden hat, also der Stab sich nicht von der Scheibe wegbewegt hat oder Partikel sich zwischen Scheibe und Stab befinden.

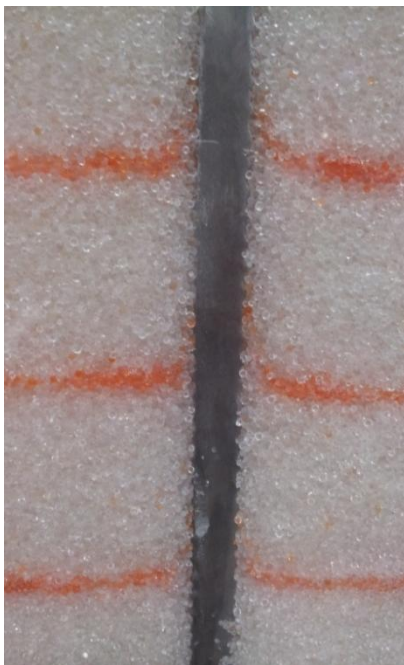


Abb. 4-35: Versuchsreihe 3: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm in Silica Gel nach 50 mm Zug



Abb. 4-36: Versuchsreihe 3: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm in Referenzmaterial nach 50 mm Zug

#### 4.3.4. Versuchsreihe 4

Um die Einwirkungen unterschiedlicher Dichten des Silica Gels festzustellen und miteinander vergleichen zu können, wird in dieser Versuchsreihe der Gewinde- und Glattstab mit einem Durchmesser von 15 mm und der Einbautiefe 50/70 cm in teilgesättigten und fast trockenem Silica Gel eingebaut (Abb. 4-37 bis Abb. 4-39). Des Weiteren soll der wesentliche Einfluss des Eindrehens des Stabes in den Bodenkörper, bei dem sich die Bodenpartikel mit dem Stab verspannen, in dieser Versuchsreihe aufgezeigt werden. Es stand zu diesem Zeitpunkt der Versuchsreihen kein ungesättigtes Silica Gel mehr zu Verfügung. Zwar wurde versucht das gesättigte Silica Gel durch lufttrocknen in den Reinzustand zurückzuführen, aber die Vielzahl an Innerkorporen des Silica Gels konnten dadurch nicht mehr vom Porenfluid befreit werden. Das Trocknen im Trockenofen hätte zu einer großen Geruchsbelästigung im Labor geführt, deshalb wurde davon Abstand genommen. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 4-5 aufgelistet.

Durchmesser [mm]	Einbautiefe Stab [cm]	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Oberfläche Stab
15	50	1,0	Gewinde / Glatt
15	50	0,98	Gewinde / Glatt
15	50	0,95	Gewinde / Glatt
15	70	1,0	Gewinde / Glatt
15	70	0,98	Gewinde / Glatt
15	70	0,95	Gewinde / Glatt

Tabelle 4-5: Versuchsprogramm der Versuchsreihe 4

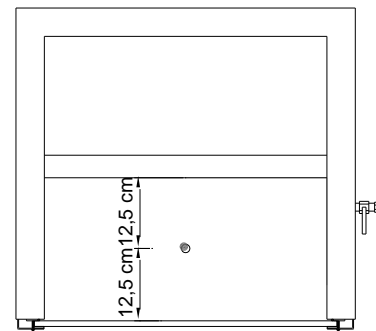


Abb. 4-37: Versuchsreihe 4: Grundriss

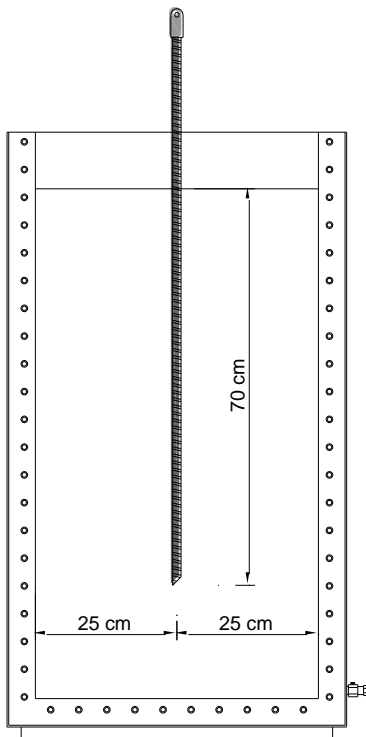


Abb. 4-38: Versuchsreihe 4: Aufriss, Einbautiefe 70 cm

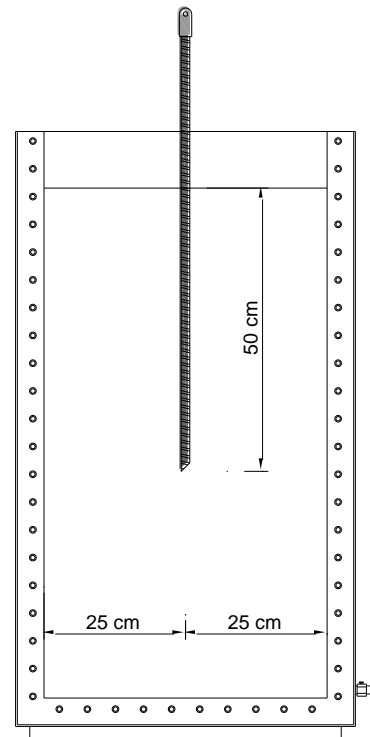


Abb. 4-39: Versuchsreihe 4: Aufriss, Einbautiefe 50 cm

Nach dem letzten Versuch der Versuchsreihe 2 wurde aus dem Behälter das Porenfluid abgelassen und das teilgesättigte Silica Gel im Behälter belassen. Teilgesättigt deswegen, da sich die Innerkorporen des Silica Gels nicht so schnell entleeren können und im Porenraum des Kornes das Porenfluid verbleibt. Nur das Porenfluid in den Haufwerksporen wird entleert. Der Stab wird wie in der Versuchsreihe 1 mittig in den Bodenkörper eingedreht und anschließend mit dem Zuggestänge verbunden. Die Messeinrichtungen werden justiert und der Zugvorgang gestartet. In dieser Reihe wird der Stab 50 mm durchgehend gezogen, da die Laserfahrt und das Ablichten mit der CCD-Kamera entfallen. Nach dem Zugvorgang wird der Stab aus dem Bodenkörper gezogen und die Lagerungsdichte mit Hilfe des Rüttlers wieder hergestellt. Der Versuch mit dem teilgesättigten Material wird für den Stab mit dem Durchmesser von 15 mm sowohl für den Glattstab als auch für den Gewindestab und mit beiden Einbautiefen (50 cm und 70 cm) durchgeführt.

Im zweiten Teil der Versuchsreihe 4 wird der Behälter wieder entleert und das luftgetrocknete Silica Gel eingefüllt. Der Versuchsablauf vom Eindrehen, Ziehen und Rütteln ist in seinen Arbeitsschritten wieder derselbe wie im ersten Teil der Versuchsreihe 4. Auch hier werden Glatt- und Gewindestab mit dem Durchmesser von 15 mm und den beiden Einbautiefen (50 cm und 70 cm) getestet.

Im letzten Teil dieser Versuchsreihe 4 wird der Einfluss des Eindrehens des Stabes betrachtet. Der Stab wird zunächst an dem Zuggestänge mittig in den leeren Behälter gehängt. Danach wird der Behälter mit trockenem Silica Gel bis in 90 cm Höhe gefüllt (Abb. 4-40 und Abb. 4-41). Die Lagerungsdichte wird nicht durch Rütteln verändert. Die Messeinrichtungen werden justiert und der Stab wird durchgehend 50 mm gezogen. Es werden wieder beide Stäbe mit beiden Einbautiefen getestet.



Abb. 4-40: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm in teilgesättigtem Silica Gel



Abb. 4-41: Bodenkörper wird um den Stab eingefüllt



## 5. Versuchsergebnisse

Die gewonnenen Daten der durchgeführten Versuche werden auf zwei Arten ausgewertet. Zum einen wird der Zugvorgang des Einzelstabes, der mit Wegaufnehmer und Kraftzelle aufgezeichnet wurde, durch ein Weg-Kraft-Diagramm dargestellt und bewertet. Zum anderen werden die mit dem Laser erzeugten und der Kamera abgelichteten vertikalen Ebenen des jeweiligen Bodenkörpers ausgewertet. Dies geschieht mit Hilfe eines in MatLab programmierten Programmes namens PIVLab. Die erstellten Bilder werden anschließend zu 3-D Ansichten des Bodenvolumens zusammengeführt.

Insgesamt wurden 110 Versuche abgeschlossen. Davon wurden 36 Vorversuche mit einer Probefüllung der Mischung aus Silica Gel und Porenfluid durchgeführt, da die erste Herstellung des transparenten Bodenkörpers in einer größeren Menge nicht die erwünschten Ergebnisse lieferte und für Fotostrecken mit dem Laser und der Kamera Prosilica GX nicht zu verwenden war.

Diese Vorversuche konnten dazu genutzt werden, um die Kalibrierung der Messgeräte durchzuführen, die notwendigen Schritte in der Durchführung der Versuche zu optimieren und etwaige Probleme im Versuchsablauf infolge der unterschiedlichen notwendigen Gerätschaften zu eliminieren. Von diesen Vorversuchen werden sechs in der Versuchsauswertung in Weg-Kraft-Diagrammen dargestellt, da es aufgrund des Eindrehens des Stabes mit einem Durchmesser von 26,5 mm während der anschließenden Hauptversuche zu einem Scheibenbruch am Versuchsbehälter kam. Diese Versuche wurden in weiterer Folge nicht wiederholt, um ein erneutes Brechen der Scheibe zu vermeiden.

Im Anschluss dieser Vorversuche konnte in mehreren Teilschritten, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ein optimal transparenter Bodenkörper hergestellt werden und 36 Versuche mit Laser und der Kamera Prosilica GX abgeschlossen werden. Um die Einwirkungen des Eindrehens des Stabes und unterschiedlicher Dichten des Silica Gels festzustellen, erfolgten weitere 25 Versuche. Anschließend wurden mit dem halben Querschnitt des Stabes 13 Versuche, wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, durchgeführt.

Von diesen insgesamt 86 verwertbaren Versuchen mussten 20 aufgrund von Messfehlern (dreimal verursachte der Wegaufnehmer Probleme bei der Aufzeichnung des Weges), widersprüchlichen Messergebnissen (fünfzehn Versuche mussten wiederholt werden, um Messergebnisse zu bestätigen) oder Ausführungsfehlern (ein Versuch mit Scheibenbruch und während eines Versuches der Versuchsreihe 3 verschob sich der Stab während des Zuges) aus den Auswertungen genommen werden.



## 5.1. Versuchsauswertung der Messergebnisse

Es wurden alle Versuche, wie im Kapitel 4.3 beschrieben, mindestens zweimal durchgeführt um die Aussagekraft der Ergebnisse zu unterstreichen und zu kontrollieren. In den folgenden Weg-Kraft-Diagrammen werden jeweils zwei Graphen für den Gewindestab sowie für den Glattstab dargestellt, für jeden Durchmesser, jede Einbaulänge und jede Neigung gegen die Vertikale.

Um die Ergebnisse der Versuche den jeweiligen Stäben und ihren Einbaubedingungen zuordnen zu können, wurde ein einheitliches Bezeichnungssystem entwickelt, das nachfolgend beschrieben wird. Der Versuchsname setzt sich aus den Einbaubedingungen und den Eigenschaften des eingedrehten Stabes zusammen:

GW
15
.05
.50
1
\_02

- Oberfläche: GW → Gewinde, GL → Glatt
- Durchmesser: 15/20/26,5 → 15 mm Durchmesser
- Neigung zur Vertikalen: 00/05/10/15/20/25/30 → 5° Neigung
- Einbautiefe: 50/70 → 50 cm Einbautiefe des Stabes in den Bodenkörper
- Dichte des Bodenkörpers:
  - 1 → Vollgesättigtes Silica Gel ( $\rho_{\text{sat}} = 1,30 \text{ g/cm}^3$ )
  - 2 → Teilgesättigtes Silica Gel ( $\rho_{\text{tgs}} = 1,07 \text{ g/cm}^3$ )
  - 3 → Trockenes Silica Gel ( $\rho_{\text{trk}} = 0,90 \text{ g/cm}^3$ )
  - 4 → Trockenes Silica Gel ohne Eindrehen des Stabes
  - 5 → Trockenes Silica Gel und Referenzmaterial Kies
- Anzahl der Versuchsdurchführung: 02 → zweite Durchführung

### 5.1.1. Versuchsreihe 1

Die Messungen der wie in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Versuchsreihe 1 verliefen ohne Komplikationen und liefern aussagekräftige Weg-Zeit-Diagramme. Diese werden im folgenden Kapitel dargestellt und bewertet.

Die Weg-Zeit-Graphen, gewonnen aus Ausziehversuchen der Gewindestäbe, stellen für jeden Durchmesser einen ähnlichen Verlauf dar. Die Zugkraft nimmt bei allen Gewindestäben beider Einbautiefen stetig zu bis sie ein Maximum erreicht. Dieses Maximum wird innerhalb eines Zugweges von 5 bis 8,5 mm erreicht, je nach Einbautiefe und Durchmesser. Danach nimmt die Zugkraft stetig bis zum Ende des Zugvorganges ab.

In den Diagrammen sind der Stopp des Zugvorganges und die während des Stopps durchgeführte Laserfahrt und Bildserie an den punktuell verdichteten Bereichen eindeutig sichtbar (Abb. 5-1). Diese Schwankungen sind aufgrund der empfindlichen Sensoren des Wegaufnehmers und der

Kraftmessdose zu erklären, die durch die Vibrationen des linearen Laservortriebes hervorgerufen wurden.

Beobachtet wurde, dass nach einer Anzahl von Versuchen mit derselben Einbautiefe, sich der Widerstand während des Eindrehvorganges in den Bodenkörper erhöhte. Es wird vermutet, dass sich der Bereich im unteren Drittel des Behälters infolge des Eindrehens des Stabes und des daraus resultierenden Kornbruchs der Silica Gel Partikel verdichtet hat. Dies konnte in der visuellen Darstellung der Versuchsergebnisse nachgewiesen werden und ist in Kapitel 5.2 dargestellt. In der Tabelle 5-1 sind die jeweiligen maximalen Zugkräfte der Versuche der Versuchsreihe 1 aufgelistet.

Durchmesser [mm]	Oberfläche Stab	Neigung [°]	Einbautiefe Stab [cm]	Kraft F [N]	Weg $u_z$ [mm]	Versuchsname
15	Gewinde	0	50	346	6,5	GW15.00.50.1_01
15	Gewinde	0	50	320	6,0	GW15.00.50.1_02
15	Glatt	0	50	100	2,6	GL15.00.50.1_01
15	Glatt	0	50	88	3,9	GL15.00.50.1_02
15	Gewinde	0	70	659	5,2	GW15.00.70.1_03
15	Gewinde	0	70	648	8,5	GW15.00.70.1_04
15	Glatt	0	70	174	4,5	GL15.00.70.1_03
15	Glatt	0	70	176	3,0	GL15.00.70.1_04
20	Gewinde	0	70	1564	5,9	GW20.00.70.1_01
20	Gewinde	0	70	1474	6,1	GW20.00.70.1_02
26,5	Gewinde	0	70	1869	5,2	GW26,5.00.70.1_01
26,5	Gewinde	0	70	1869	5,2	GW26,5.00.70.1_02
26,5	Glatt	0	70	713	7,9	GL26,5.00.70.1_01
26,5	Glatt	0	70	570	5,2	GL26,5.00.70.1_02

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 1

### **Gewinde- und Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 und 70 cm**

Das Kraft - Weg Diagramm (Abb. 5-1), gewonnen aus Ausziehversuchen mit dem Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, zeigt bei einer Einbautiefe von 50 cm nach ca. 6 mm eine maximale Zugkraft von 346 N und fällt dann bis zum Ende des Zugvorganges auf weniger als ein Drittel auf ~80 N ab. Im Vergleich zu dem Gewindestab nimmt die Zugkraft des Glattstabes nur minimal zu, sie erreicht ein Maximum von 100 N, weniger als ein Drittel der maximalen Zugkraft des Gewindestabes. Danach fällt die Zugkraft bis zum Ende des Zugvorganges auf 40 N ab. Diese Unterschiede in den maximalen Zugkräften unterstreichen den großen Einfluss der Oberfläche des Stabes, d.h. wie essentiell das Gewinde der hier benutzen Stäbe für die mögliche Tragfähigkeit eines Spinnankers ist. Bei einer Einbautiefe von 70 cm erreicht der Gewindestab eine maximale Zugkraft von 660 N. Der Glattstab mit der Einbautiefe von 70 cm erreicht eine maximale Zugkraft von 176 N (Abb. 5-2).

Hervorzuheben ist, dass bei einer Einbautiefe von 70 cm die Zugkraft sowohl bei dem Glatt- als auch bei dem Gewindestab die Arbeitslinie des Kraft-Weg Graphen eine kleinere Steigung aufweist als bei einer Einbautiefe von 50 cm. Darüber hinaus ist bei dem Gewindestab die maximale Zugkraft fast doppelt so groß wie bei demselben Stab mit einer Einbautiefe von 50 cm.

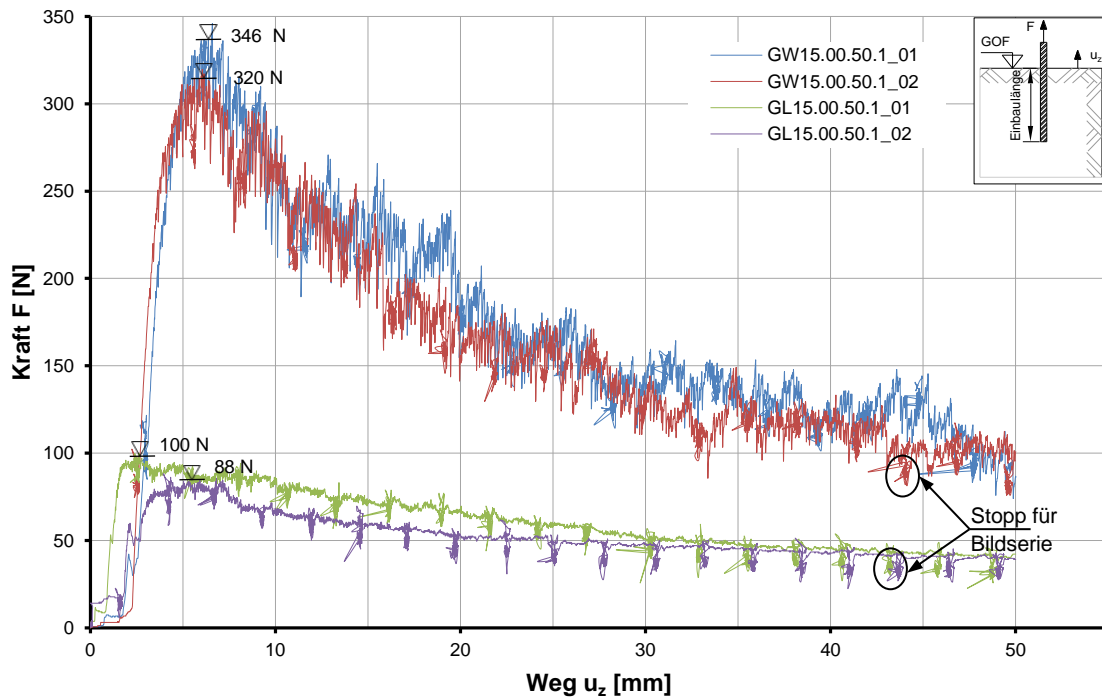


Abb. 5-1: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing$  15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm

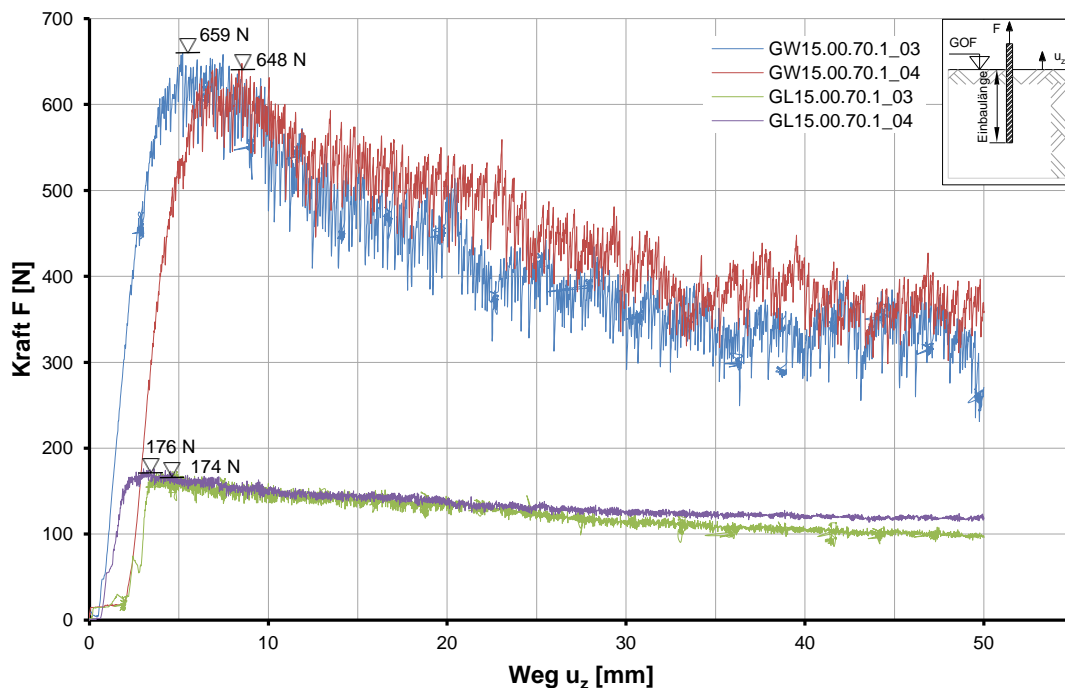


Abb. 5-2: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing$  15 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm

### Gewindestab $\varnothing$ 20 mm, Einbautiefe 70 cm

Das Kraft - Weg Diagramm (Abb. 5-3), gewonnen aus den Ausziehversuchen des Stabes mit dem Durchmesser von 20 mm, zeigen bei ca. 6 mm Zug das Maximum mit 1564 N. Am Ende des Zugvorganges ist nur mehr 40 % der maximalen Zugkraft vorhanden. Dieser Stab wurde nur als Gewindestab und mit einer Einbautiefe von 70 cm getestet.

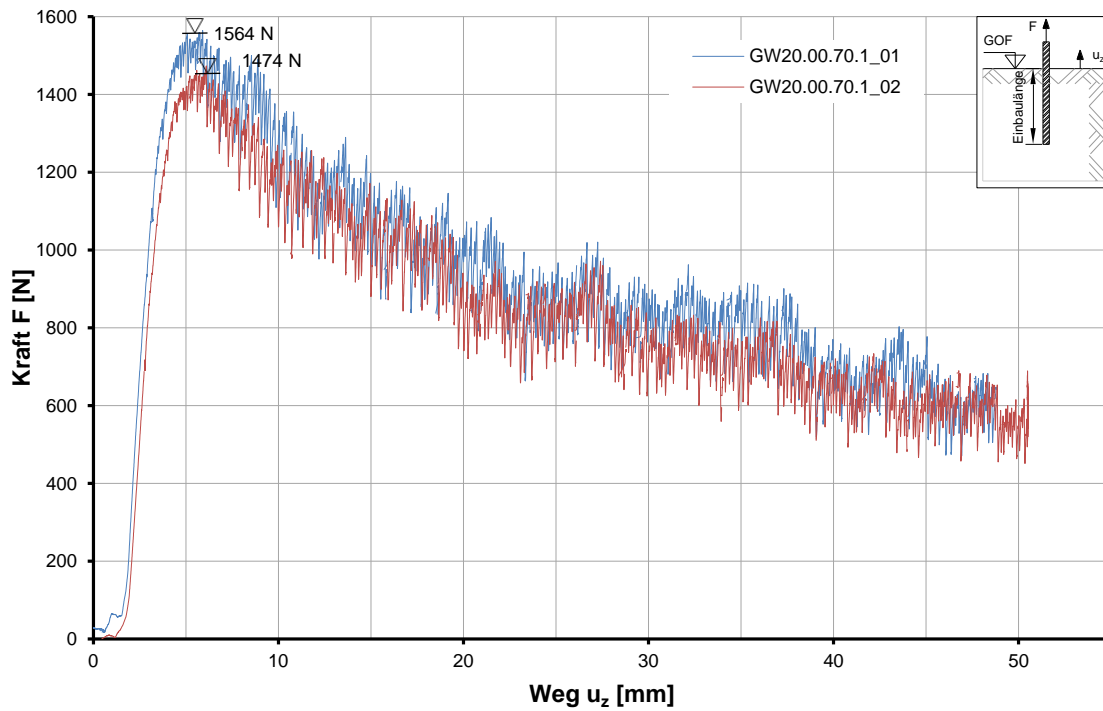


Abb. 5-3: Arbeitslinie des Gewindestabes  $\varnothing$  20 mm mit einer Einbautiefe von 70 cm

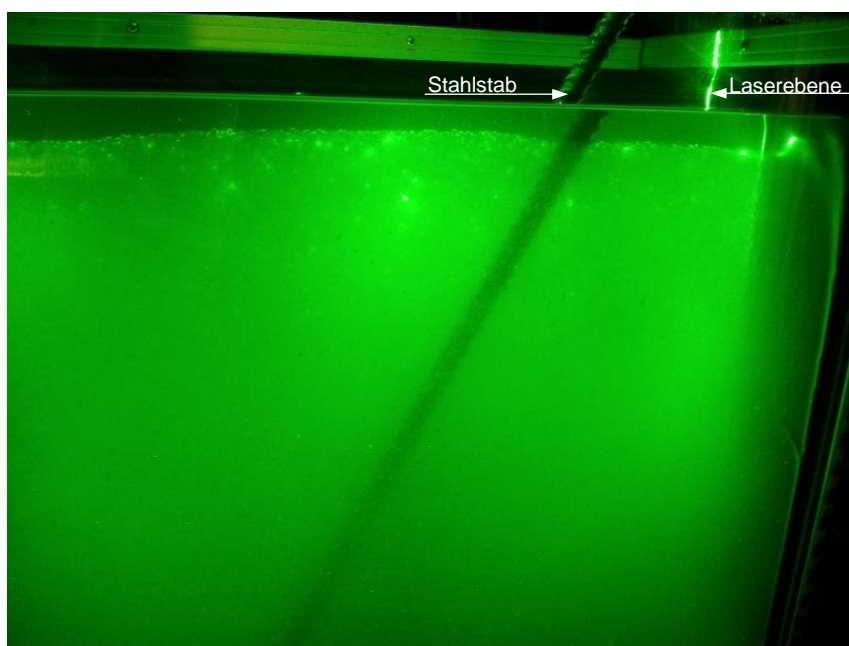


Abb. 5-4: Gewindestab in transparentem Bodenkörper mit sichtbarer Laserebene

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 26,5$ mm, Einbautiefe 70 cm

Für die Darstellung des folgenden Weg-Kraft-Diagrammes (Abb. 5-5) werden die Messergebnisse der Vorversuche dargestellt.

Anhand des Diagrammes ist ersichtlich, dass beide Versuche die gleiche maximale Zugkraft nach 5,2 mm Zug aufweisen. Es ist naheliegend, dass der eingedrehte Stab einen zu großen Durchmesser für den verwendeten Versuchsbehälter besitzt. Aufgrund der räumlichen Eingrenzung wird vermutet, dass sehr große Spannungen im Bodenkörper verursacht worden sind und dass der gesamte Versuchsbehälter während des Zugvorganges mitgehoben wurde. Der Versuchsbehälter mit Füllung hat ein Gewicht von ca. 187 kg, das entspricht annähernd der maximalen Zugkraft in diesem Versuch. In den visuellen Auswertungen konnten die großen Verspannungen, die sich bereits während des Eindrehens einstellen, bestätigt werden.

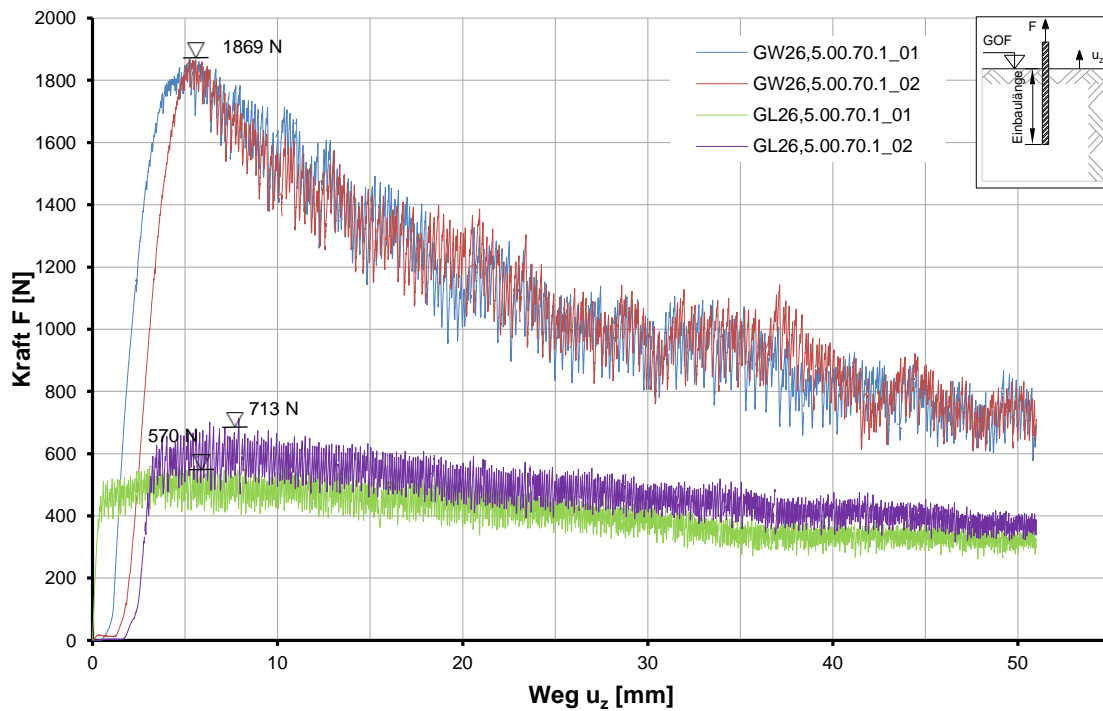


Abb. 5-5: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 26,5$  mm mit einer Einbautiefe von 70 cm

Während des zweiten Zugvorganges, nach ca. 4 mm Weg, kam es aufgrund der großen Verspannungen im Bodenkörper zu einem Scheibenbruch am Versuchsbehälter (Abb. 5-6). Die Spannungsrisse an der Scheibe können mit den Stromlinien, die im Kapitel 5.2 beschrieben werden, gegenübergestellt werden. Auch hier ist der Ausgangspunkt der Risse geringfügig oberhalb des Stabendes.

Da der Stab während des Zugvorganges einen Scheibenbruch verursachte, wurde Abstand davon genommen, diesen Versuch nochmal zu wiederholen. Von dem Gewindestab mit dem Durchmesser von 26,5 mm existieren aus diesem Grund nur verwertbare Bildserien für die visuelle Auswertung für den Eindrehvorgang.

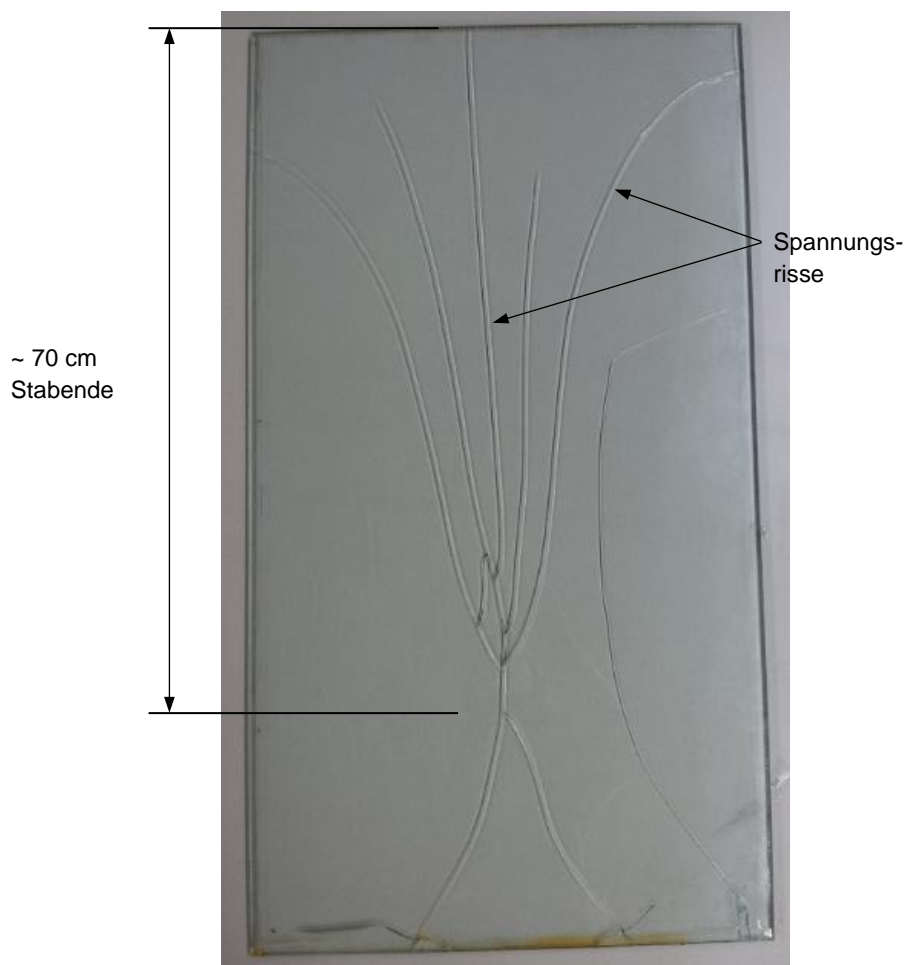


Abb. 5-6: Spannungsrisse an der Scheibe des Versuchsbehälters während des Zugvorganges des Gewindestabes  $\varnothing$  26,5 mm

### 5.1.2. Versuchsreihe 2

Die Versuchsreihe 2 beinhaltet die Eindrehvorgänge der Stäbe mit einem abweichenden Winkel von 5° bis 30° zur Vertikalen. Die maximal erreichten Zugkräfte dieser Versuchsreihe werden in Tabelle 5-2 aufgelistet. Die Zugvorrichtung wurde in den Anfängen der Versuchseinrichtung nicht geplant für eine Zugrichtung in Achse eines geneigten Stabes und verursachte dadurch zwei Problemstellungen. Erstens, ermöglichte sie eine Translation des Stabkopfes zur Vertikalen der Stabachse und zweitens ein Auslenken der Zugvorrichtung. Durch eine Abstützung im Zuggestänge wurde die horizontale Auslenkung der Zugvorrichtung unterbunden. Die Translation des Stabkopfes aus der Stabachse konnte nicht verhindert werden und führte zu einem Aushebeln des Bodenkörpers. In Abb. 5-12 und Abb. 5-14 wird dieses Auslenken schematisch dargestellt.

Durchmesser [mm]	Oberfläche Stab	Neigung [°]	Einbautiefe Stab [cm]	Kraft F [N]	Weg $u_z$ [mm]	Versuchsname
15	Gewinde	5	50	330	7,24	GW15.05.50.1_01
15	Gewinde	5	50	261	6,03	GW15.05.50.1_02
15	Gewinde	5	50	257	8,12	GW15.05.50.1_03
15	Glatt	5	50	101	2,49	GL15.05.50.1_01
15	Glatt	5	50	94	3,39	GL15.05.50.1_02
15	Gewinde	10	50	311	7,26	GW15.10.50.1_01
15	Gewinde	10	50	316	7,51	GW15.10.50.1_02
15	Glatt	10	50	59	5,75	GL15.10.50.1_01
15	Glatt	10	50	92	3,73	GL15.10.50.1_02
15	Gewinde	15	50	303	8,05	GW15.15.50.1_01
15	Gewinde	15	50	293	7,57	GW15.15.50.1_02
15	Glatt	15	50	89	3,49	GL15.15.50.1_01
15	Glatt	15	50	97	8,18	GL15.15.50.1_02
15	Gewinde	20	50	260	8,57	GW15.20.50.1_01
15	Gewinde	20	50	236	8,12	GW15.20.50.1_02
15	Glatt	20	50	129	5,44	GL15.20.50.1_01
15	Glatt	20	50	120	13,88	GL15.20.50.1_02
15	Gewinde	25	50	270	6,44	GW15.25.50.1_01
15	Gewinde	25	50	273	9,70	GW15.25.50.1_03
15	Glatt	25	50	65	11,00	GL15.25.50.1_01
15	Glatt	25	50	70	5,74	GL15.25.50.1_02
15	Gewinde	30	50	230	10,14	GW15.30.50.1_01
15	Gewinde	30	50	223	7,83	GW15.30.50.1_02
15	Glatt	30	50	69	5,62	GL15.30.50.1_01
15	Glatt	30	50	60	15,22	GL15.30.50.1_02

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 2

Wenn man die Messergebnisse der geneigten Gewindestäbe den vertikalen Gewindestäben gegenüberstellt, erkennt man mit beginnender Neigung eine Abnahme der maximalen Zugkraft. Der Glattstab, unter Neigung eingebaut, verhält sich analog zu den vertikalen Stäben, wenn man das seitliche Wegdrücken des Bodens außer Acht lässt.



### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung $5^\circ$

Der Gewindestab erreicht unter dieser Neigung von  $5^\circ$  nicht die gleiche maximale Zugkraft wie im vertikalen Einbau, besitzt aber das gleiche Verhältnis von weniger als einem Drittel der Endzugkraft zum Maximum wie der vertikale Stab. Der Glattstab verändert seine maximale Zugkraft kaum im Vergleich zum vertikalen Glattstab (Abb. 5-7). In dieser Versuchsserie musste ein Versuch mit dem Gewindestab wiederholt werden, da die ersten beiden Versuche widersprüchliche Ergebnisse lieferten.

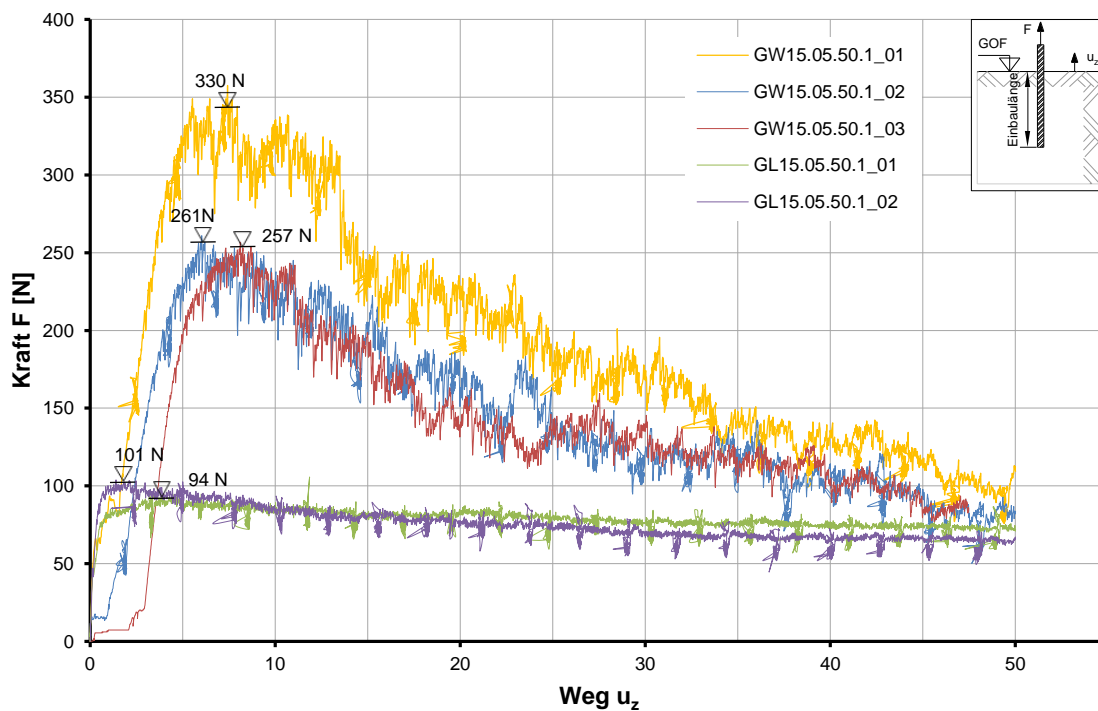


Abb. 5-7: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von  $5^\circ$

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung $10^\circ$

Der Gewindestab bei einer Neigung von  $10^\circ$  erreicht in dieser Versuchsreihe 2 eine maximale Zugkraft von 316 N. Die Endzugkraft liegt bei etwa 30 % des Maximums und nähert sich der Endzugkraft des Glattstabes an (Abb. 5-8).

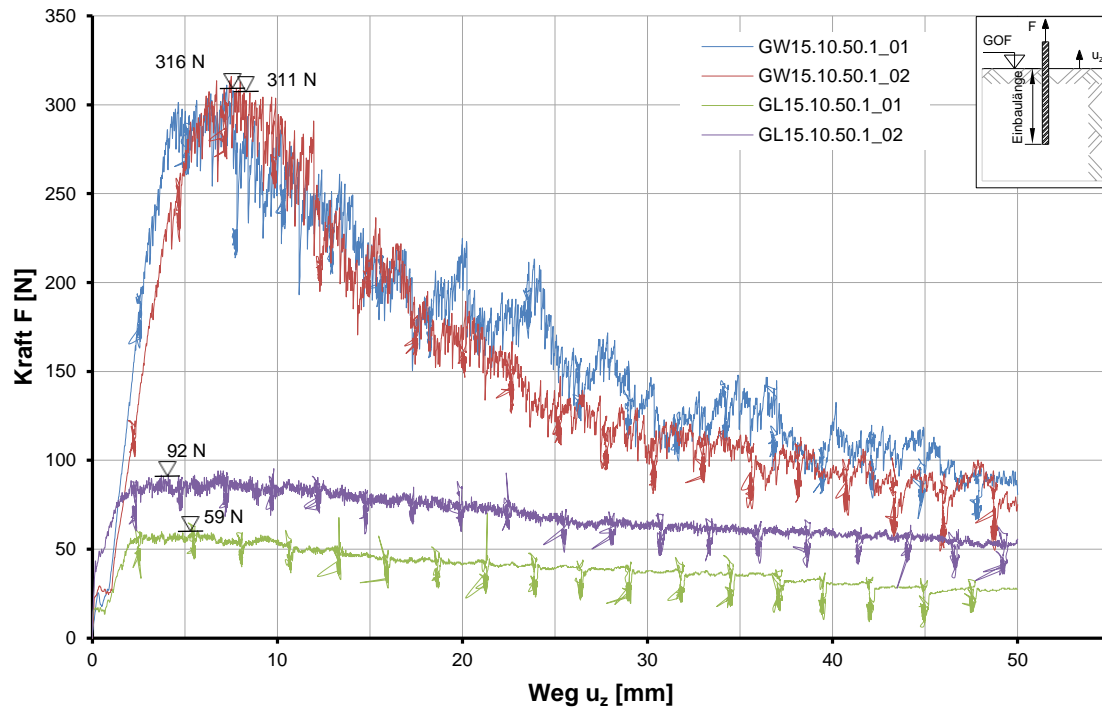


Abb. 5-8: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von  $10^\circ$



Abb. 5-9: Geneigter Gewindestab in transparentem Bodenkörper

**Gewinde- und Glattstab  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung  $15^\circ$** 

Der Gewindestab erreicht hier annähernd eine maximale Zugkraft von 300 N. Die Endzugkraft des Stabes beträgt ein Drittel des Maximums. Der Glattstab verhält sich analog zu den vorangegangenen Versuchen (Abb. 5-10)

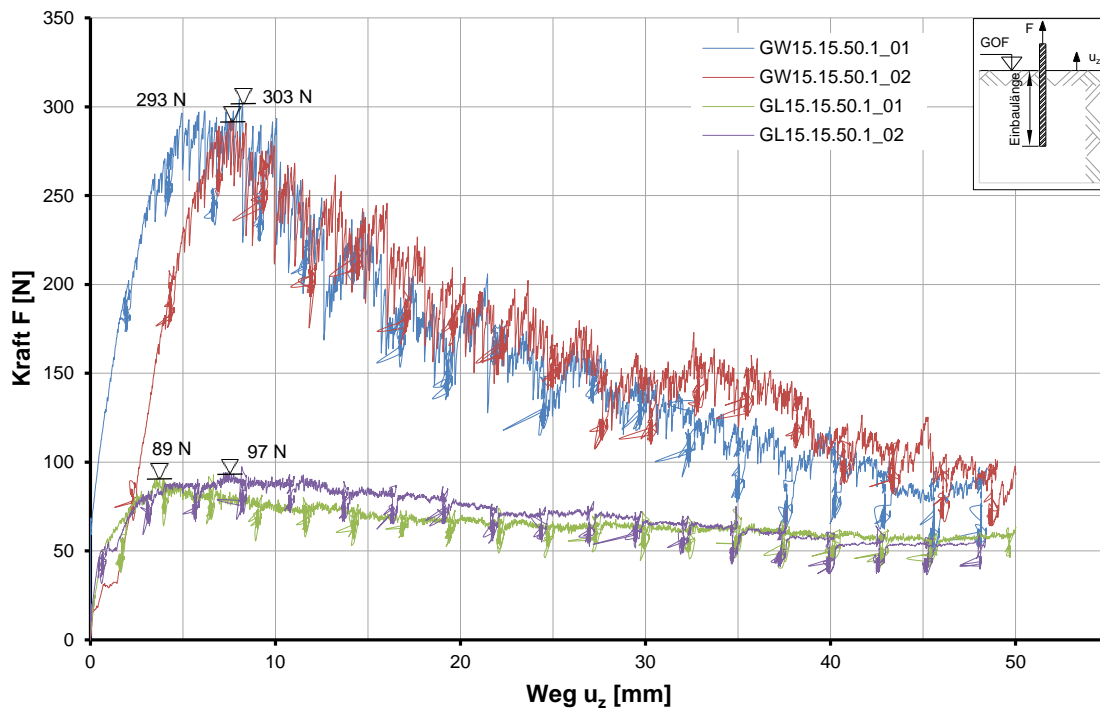


Abb. 5-10: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von  $15^\circ$

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung $20^\circ$

Bei einer Neigung von  $20^\circ$  zur Vertikalen erreicht der Glattstab die höchste Zugkraft (Abb. 5-11). Dies ist durch den ausgelenkten Zugvorgang zu erklären. Der Glattstab hebt durch sein seitliches Ausweichen während des Zugvorganges Bodenkörper aus, der sich in der Zugkraft niederschlägt. Das seitliche Ausweichen wird in Abb. 5-12 dargestellt.

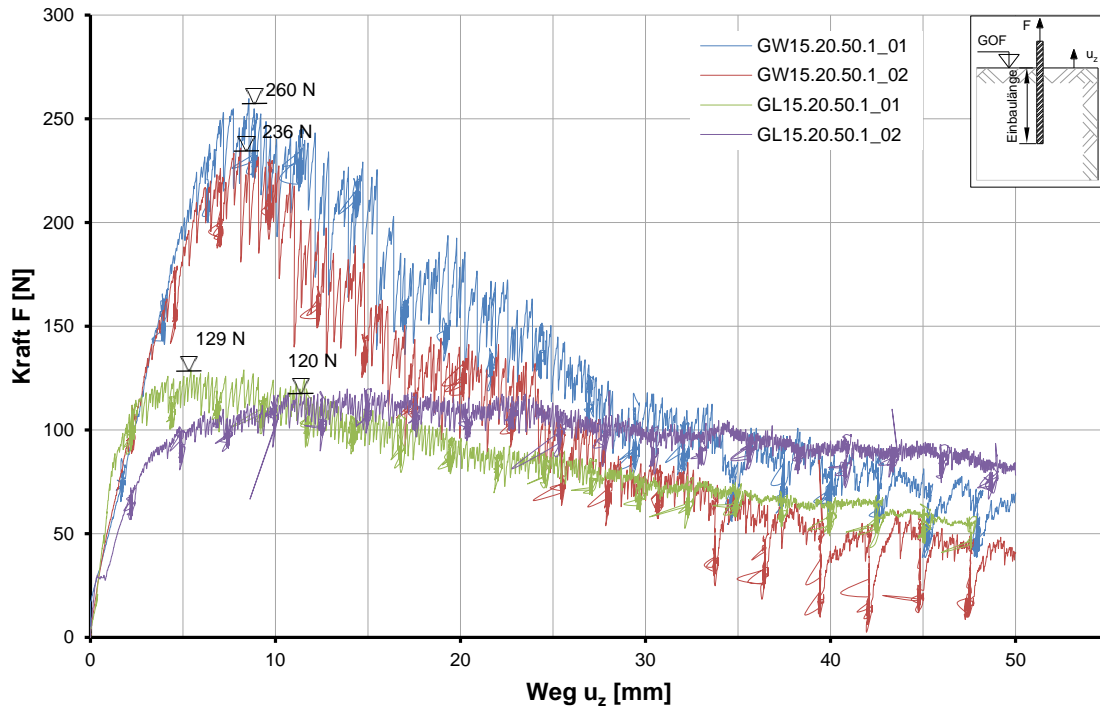


Abb. 5-11: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von  $20^\circ$

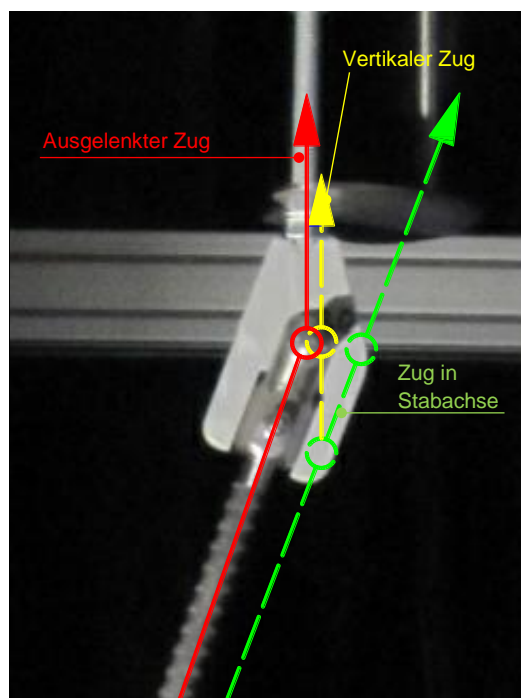


Abb. 5-12: Schematische Darstellung des Zugvorganges mit horizontalem Ausweichen des Gewindestabes unter  $20^\circ$  Neigung

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung 25°

Bei dieser Neigung des Gewindestabes erhöht sich die maximale Zugkraft im Vergleich zum vorangegangenen Versuch. Die beiden Graphen des Glattstabes zeigen nur geringe Abweichungen zu den vorherigen Versuchen (Abb. 5-13). Die Abstützung der Zugvorrichtung und daraus resultierend die Zugrichtung des Stabes wird in Abb. 5-13 abgebildet.

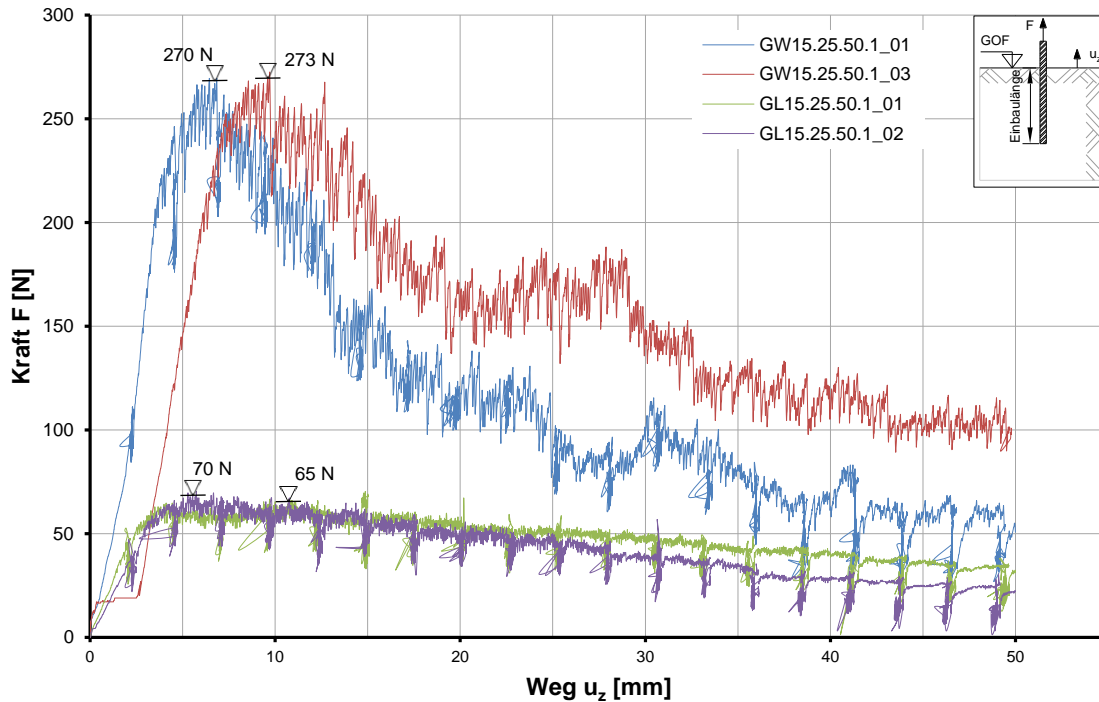


Abb. 5-13: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing$  15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von 25°

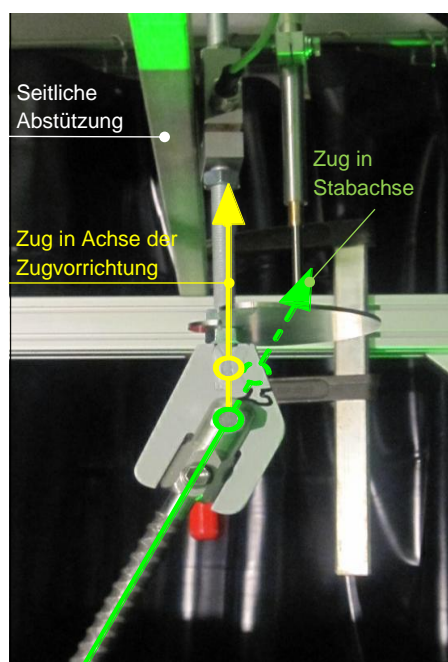


Abb. 5-14: Schematische Darstellung des Zugvorganges mit Abstützung gegen horizontales Ausweichen des Gewindestabes unter 25° Neigung

**Gewinde- und Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm, Neigung  $30^\circ$** 

Der Gewindestab erreicht seine maximale Zugkraft von 230 N nach ca. 7 mm Zug. Der Glattstab verhält sich wie in den vorangegangenen Versuchen (Abb. 5-15).

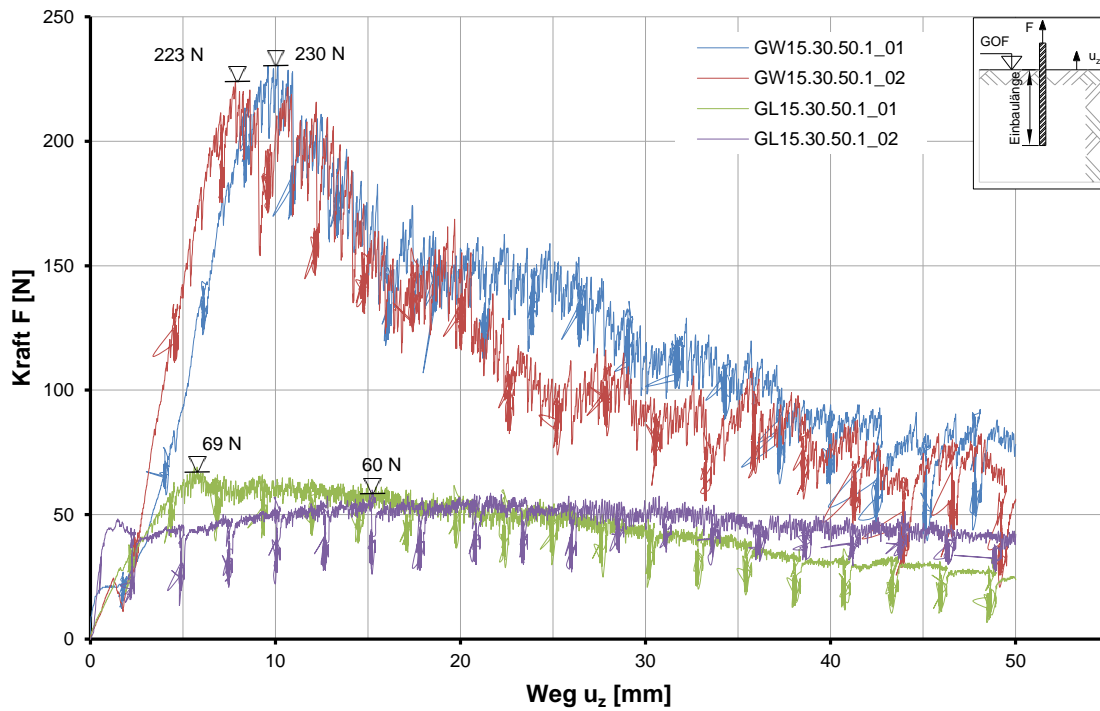


Abb. 5-15: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing$  15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und einer Neigung zur Vertikalen von  $30^\circ$



### 5.1.3. Versuchsreihe 3

In der Versuchsreihe 3 wurde ein halber Stabquerschnitt aus dem Bodenkörper gezogen. Der Bodenkörper besteht, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, aus getrocknetem Silica Gel und einem Referenzmaterial aus rundkörnigem Kies. Um zu gewährleisten, dass die durchgeführten Versuche mit den unterschiedlichen Bodenpartikeln vergleichbar sind, wurde das Silica Gel und der Kies auf unterschiedliche Bodenparameter hin untersucht. In der folgenden Tabelle 5-3 sind die Eigenschaften der beiden Materialien gegenübergestellt. Die bodenmechanischen Ergebnisse der Laborversuche des Referenzmaterial Kies sind in Anhang D ergänzt.

			Kies	Silica Gel
<b>Kornverteilung</b>	-	[mm]	2-4	2-5
<b>Reibungswinkel</b>	$\varphi$	[Grad]	47,8	43,0
<b>Restreibungswinkel</b>	$\varphi_R$	[Grad]	46,8	33,0
<b>Kohäsion</b>	$c'$	[N/cm <sup>2</sup> ]	8,2	-
<b>E-Modul</b> ( $\sigma_N = 320-640$ kPa)	$E_s$	[MPa]	55,0	63,0

Tabelle 5-3: Silica Gel und Referenzmaterial Kies im Vergleich

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe, gewonnen aus den Messungen mit Hilfe von Kraftmessdose und Wegaufnehmer, lieferten keine aussagekräftigen Diagramme. Die Kurven der Gewindestäbe stellen sich in gleicher Weise dar wie in den vorangegangenen Serien, mit einem Maximum innerhalb der ersten 10 mm und einem anschließendem Abfall der Kraft auf weniger als ein Drittel des Maximums. Der Stab scheint sich zwischen der Glasscheibe und dem Bodenkörper zu verspannen. Die erreichten Zugkräfte spiegeln nicht die tatsächlichen Zugkräfte, wie sie in den anderen Versuchen gemessen wurden, wider. Die Versuchsreihe 3 ist nicht direkt mit den anderen Versuchsreihen in Bezug auf die Zugkraft zu vergleichen, da hier nur der halbe Stab getestet wurde und es eine Reibungsfläche zwischen der Schnittfläche des Stabes und der Frontscheibe gibt. Aus diesen Gründen werden diese Diagramme nicht dargestellt, aber dem Anhang beigelegt (Anhang C). Die Versuchsreihe 3 diente dazu, den Zugvorgang optisch an einer Ebene darzustellen und den entstehenden Bruchkörper mit den visuellen Versuchsergebnissen der Versuchsreihe 1 und 2 zu vergleichen. In der Abb. 5-16 wird der hergestellte Bodenkörper, Silica Gel und Kies mit farbigen Zwischenschichten, der Versuchsreihe 3 abgebildet.

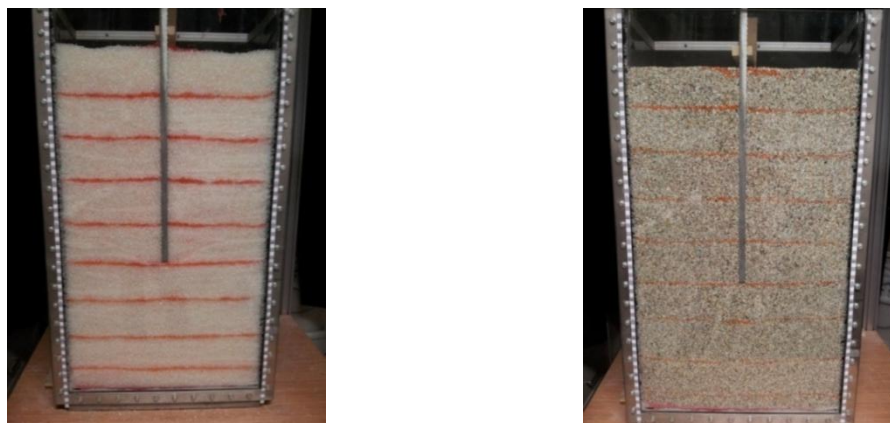


Abb. 5-16: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm mit einer Einbautiefe von 50 cm in Silica Gel und Kies vor Zugbeginn

### 5.1.4. Versuchsreihe 4

Die Versuchsreihe 4 lieferte aussagekräftige Ergebnisse, die folgend dargestellt werden. Die Dichte 1 des Bodenkörpers bezeichnet ein vollgesättigtes Silica Gel mit  $\rho_{\text{sat}} = 1,30 \text{ g/cm}^3$ , wie es in den Versuchsreihen 1 und 2 verwendet wurde. Bei der Dichte 2 handelt es sich um ein teilgesättigtes Material, da das Porenfluid aus dem Behälter abgelassen wurde und nur die Innerkorporen des Silica Gels mit Porenfluid gefüllt sind.

Die teilgesättigte Dichte des Silica Gels beträgt  $\rho_{\text{tgs}} = 1,07 \text{ g/cm}^3$ . Die Dichte 3 bezeichnet das getrocknete Silica Gel mit  $\rho_{\text{trk}} = 0,90 \text{ g/cm}^3$ . Es konnte nicht vollständig wieder in den Reinzustand überführt werden. Um den Einfluss des Eindrehens des Stabes nach-zuweisen, wurde der Stab ohne diesen Eindrehvorgang aus einem lockerem Bodenkörper ohne Verdichten mit  $\rho_{\text{trk}} = 0,90 \text{ g/cm}^3$  gezogen, wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben. Diese Versuchsreihe 4 wird nicht visuell ausgewertet, da kein transparenter Bodenkörper in den Dichten 2 bis 4 vorliegt.

Hervorzuheben ist, dass das teilgesättigte Material eine deutliche Steigerung der Zugkraft zufolge hatte. Bei einer Einbautiefe von 70 cm erhöht sich beim Gewinde- und Glattstab die maximale Zugkraft. Das teilgesättigte Material erreichte die größte maximale Zugkraft. Das getrocknete Material verhält sich annähernd gleich wie das vollgesättigte Material. In Tabelle 5-4 wird die maximal erreichte Zugkraft der einzelnen Stäbe zusammengefasst.

Durchmesser [mm]	Oberfläche Stab	Einbautiefe Stab [cm]	Kraft F [N]	Weg $u_z$ [mm]	Versuchsname	Dichte des Bodenkörpers
15	Gewinde	50	346	6,59	GW15.00.50.1_01	1
15	Gewinde	50	499	5,69	GW15.00.50.2_02	2
15	Gewinde	50	360	8,73	GW15.00.50.3_03	3
15	Gewinde	50	196	4,09	GW15.00.50.4_01	4
15	Glatt	50	99	2,63	GL15.00.50.1_01	1
15	Glatt	50	250	5,91	GL15.00.50.2_01	2
15	Glatt	50	98	5,82	GL15.00.50.3_01	3
15	Glatt	50	28	2,63	GL15.00.50.4_01	4
15	Gewinde	70	660	5,22	GW15.00.70.1_03	1
15	Gewinde	70	1153	10,12	GW15.00.70.2_03	2
15	Gewinde	70	507	8,07	GW15.00.70.3_01	3
15	Gewinde	70	247	4,09	GW15.00.70.4_02	4
15	Glatt	70	176	3,03	GL15.00.70.1_04	1
15	Glatt	70	225	2,35	GL15.00.70.2_01	2
15	Glatt	70	116	5,78	GL15.00.70.3_02	3
15	Glatt	70	19	1,93	GL15.00.70.4_01	4

Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Messergebnisse der Versuchsreihe 4

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 50 cm

In den folgenden zwei Diagrammen werden der Gewindestab und der Glattstab mit den Dichten 1 ( $\rho_{\text{sat}}$ ) bis 3 ( $\rho_{\text{trk}}$ ) des Bodenkörpers dargestellt (Abb. 5-17, Abb. 5-18). Der Einfluss der unterschiedlichen Dichten, sowohl beim Glatt- als auch beim Gewindestab wurde nachgewiesen.

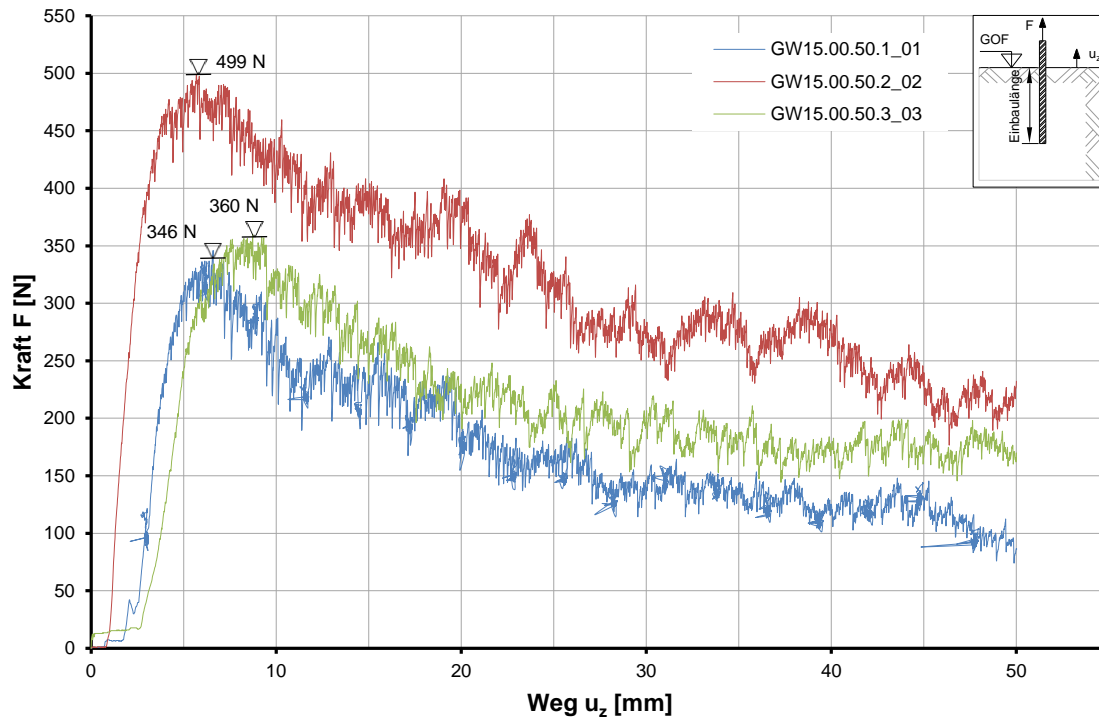


Abb. 5-17: Arbeitslinie des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers

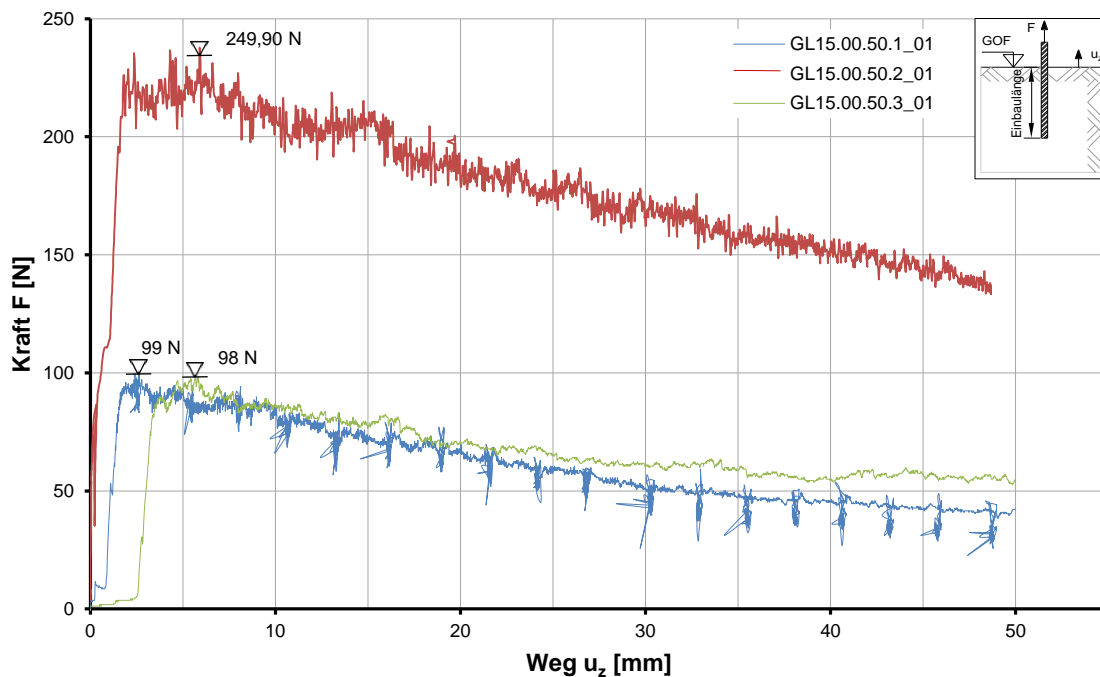


Abb. 5-18: Arbeitslinie des Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 70 cm

Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Dichten und einer Einbautiefe von 70 cm zeigen wieder eine Erhöhung der maximalen Zugkraft und einen langsameren Abfall der Kraft (Abb. 5-19, Abb. 5-20).

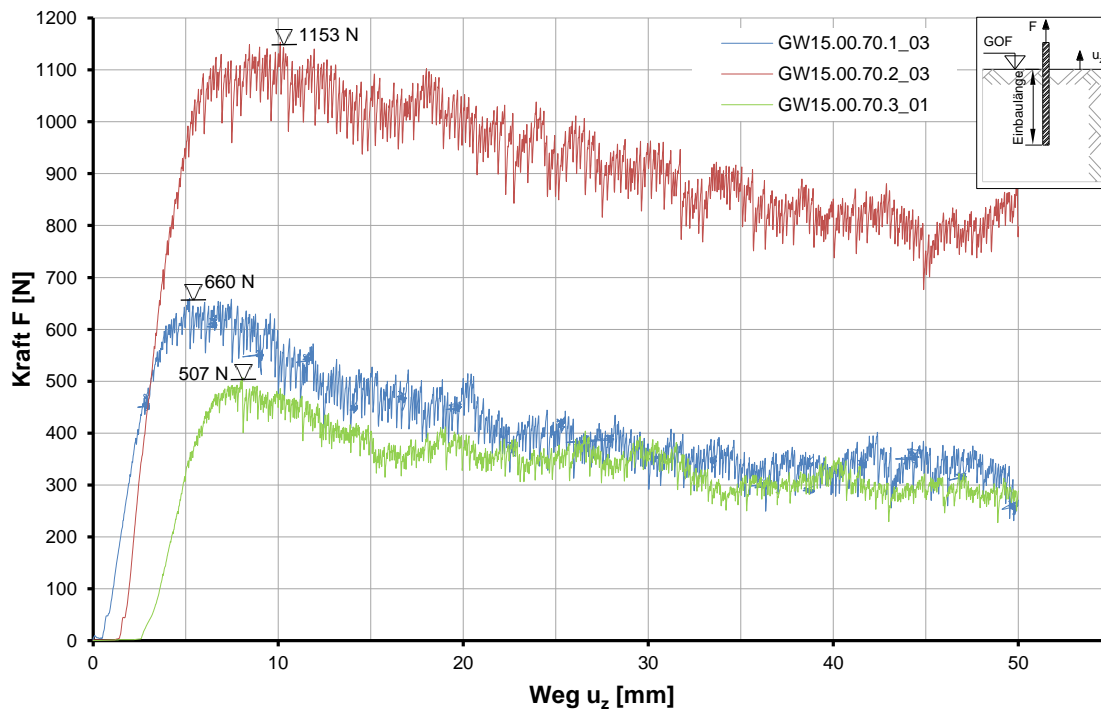


Abb. 5-19: Arbeitslinie des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 70 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers

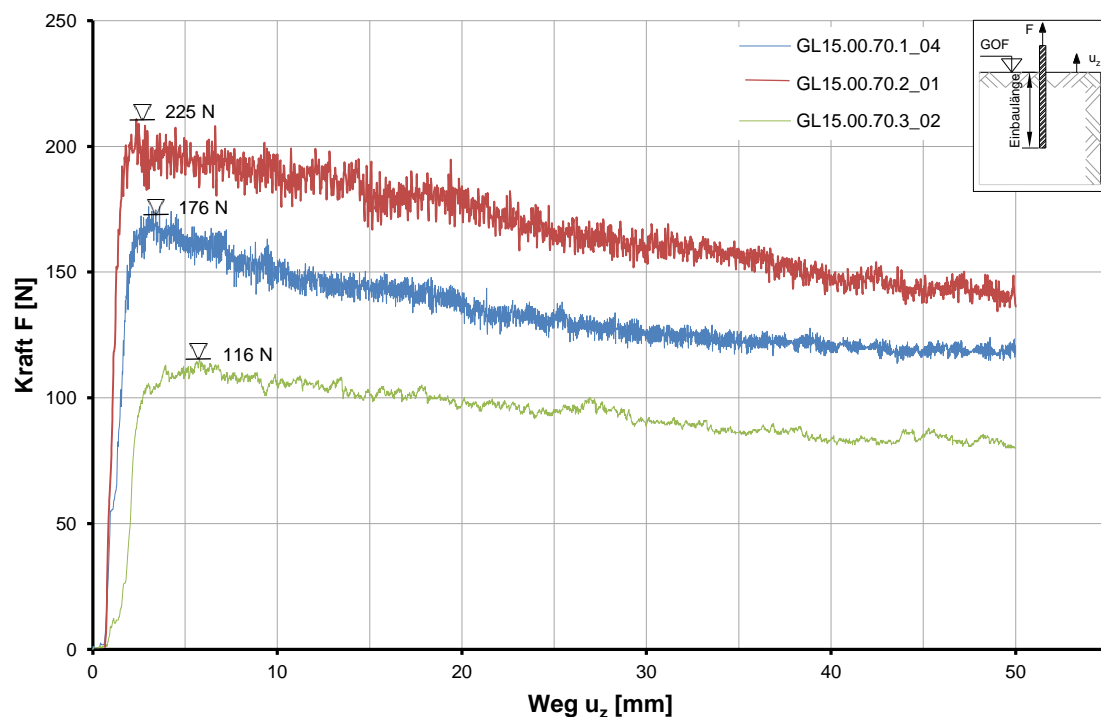


Abb. 5-20: Arbeitslinie des Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 70 cm und unterschiedlichen Dichten des Bodenkörpers

### Gewinde- und Glattstab $\varnothing 15$ mm, Einbautiefe 50 cm

Der Einfluss des Eindrehens des Stabes konnte nachgewiesen werden, da die maximale Zugkraft ohne Eindrehen nur ca. 56 % der maximalen Zugkraft des vertikalen Stabes mit Eindrehen entspricht (Abb. 5-21, Abb. 5-22). Das Verspannen der Bodenpartikel mit dem Gewindestab ist ausschlaggebend für hohe Zugkräfte.

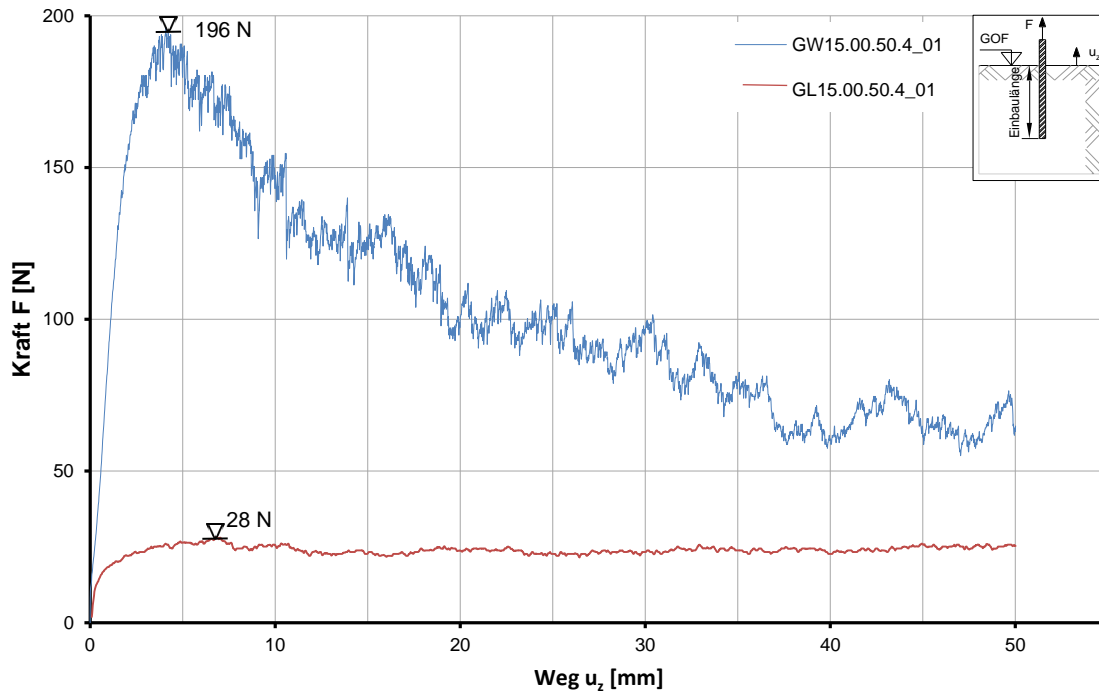


Abb. 5-21: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm ohne Eindrehvorgang

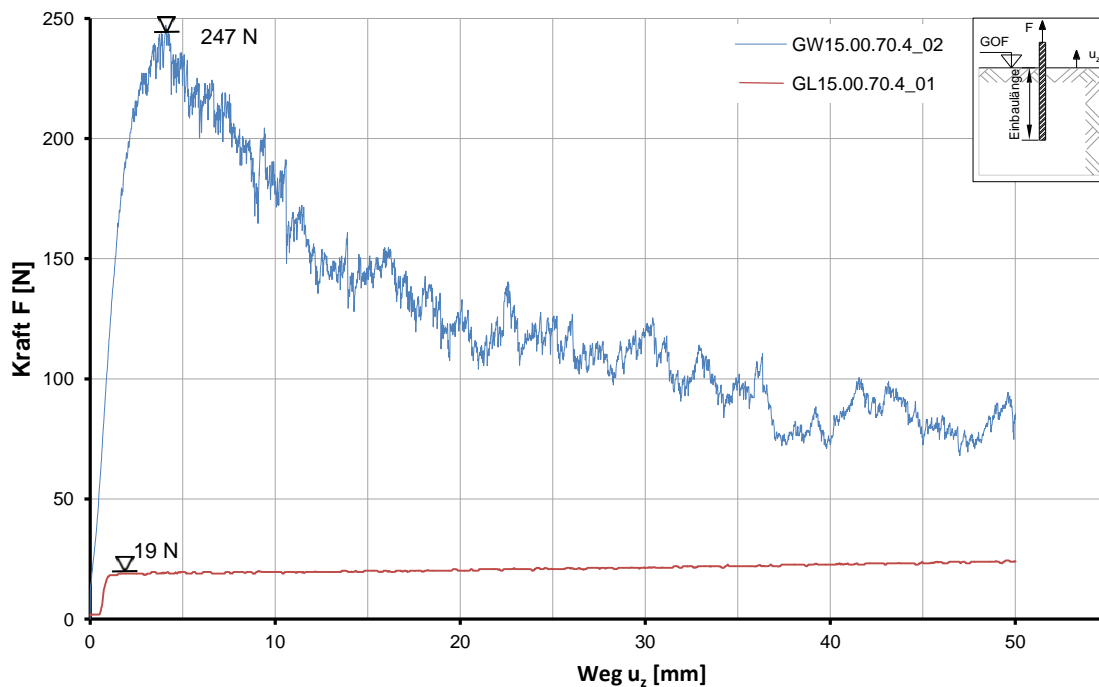


Abb. 5-22: Arbeitslinie des Gewinde- und Glattstabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 70 cm ohne Eindrehvorgang

## 5.2. Visualisierung der Ergebnisse

Die zweite Darstellung der Ergebnisse erfolgte über eine Auswertung, die in Kapitel 2.2 und dem dieser Masterarbeit vorangegangenen Bachelorprojekt (Poprask, 2013) beschriebenen Particle Image Velocimetry Auswertung durch das Programm PIVLab.

In der Versuchsreihe 1 und 2 wurden bis zur Achse des Stabes von der Kamera 21 Bilder abgelichtet. Aus diesen wurden vier Ebenen ausgesucht, die die Vorgänge im Bodenkörper darstellen (Abb. 5-23). Gewählt wurde die Ebene 5, die sich unmittelbar hinter der Frontscheibe des Versuchsbehälters befindet, die Ebene 10 und 15, die den Bodenkörper zwischen der Frontscheibe und der Stabachse beschreiben, und die Ebene 19, die sich in direkter Nähe des Stabes befindet. Diese Ebene 19 liefert mehr Bildinformationen als die nachfolgenden Ebenen in Stabachse. Durch die Stahloberfläche kam es zu Reflektionen des Laserlichtes, welche die Bildinformationen störten. Des Weiteren wurde ab Stabachse nur mehr die rechte Seite des Bildes vom Laser belichtet. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Bruchkörper symmetrisch verhält und die Silica Partikel sich hinter dem Stab auf gleiche Art und Weise verschieben wie vor dem Stab.

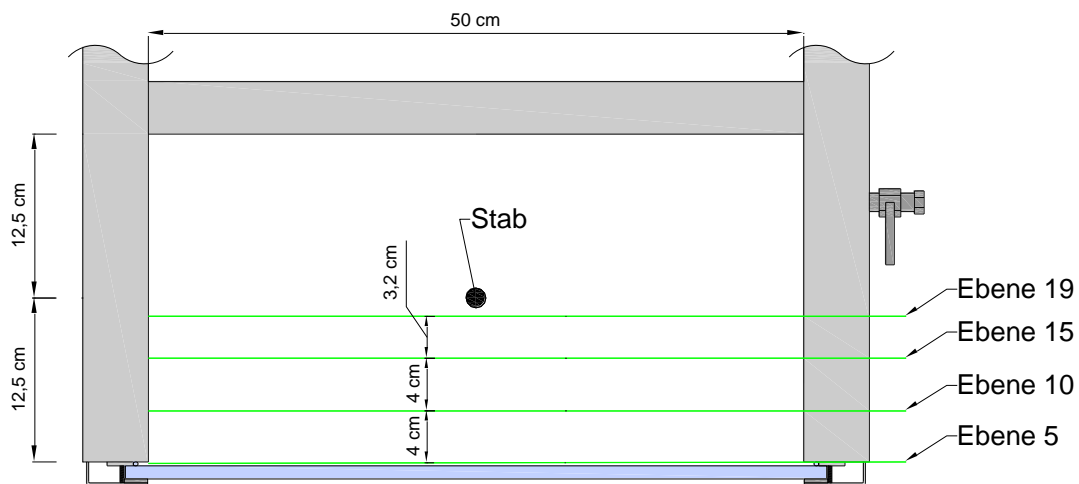


Abb. 5-23: Grundriss des Versuchsbehälters mit gewählten Bildebenen

Für jeden Versuch der Versuchsreihe 1 und 2 werden diese vier Ebenen auf den maximalen Bruchkörper und den Restbruchkörper hin untersucht. Für die PIVLab Auswertung werden immer zwei Bilder einander gegenübergestellt. Um den maximalen Bruchkörper darzustellen, wird das Bild gewählt, das vor dem ersten Zug abgelichtet wurde, und mit dem Bild verglichen, das sich laut Auswertung des Weg-Kraft Diagrammes des jeweiligen Versuches, in der Nähe der maximalen Zugkraft befindet. Durch die punktuelle Verdichtung der Messwerte, wie im vorigen Kapitel beschrieben, konnte der nächstgelegene Stopp und die in diesem Stopp durchgeführte Bildserie eindeutig festgestellt werden. In den meisten Versuchen kam der dritte Stopp der maximalen Zugkraft am nächsten. Dies entspricht dem Bild nach ca. 7,5 mm Zug. Für die Auswertung des Restbruchkörpers werden zwei Bilder gewählt, die sich im absteigenden Ast des Graphen befinden (Abb. 5-24). Die Versuchsreihe 3 liefert nur eine Ansicht des Verschiebungsbildes in Stabebene.



Alle Auswertungen wurden mit den gleichen Einstellungen im PIVLab Programm durchgeführt, damit sie untereinander auch vergleichbar sind. Es wurde in der visuellen Auswertung in Kauf genommen, dass es zu Unschärfen im Bild kommt, aber die Fehleranfälligkeit dafür geringer ist. Die genaue Beschreibung der durchgeführten Auswertung in PIVLab, die gewählten Einstellungen des Programmes und die Schwierigkeiten in der Auswertung wurden im Bachelorprojekt (Poprask, 2013) beschrieben.

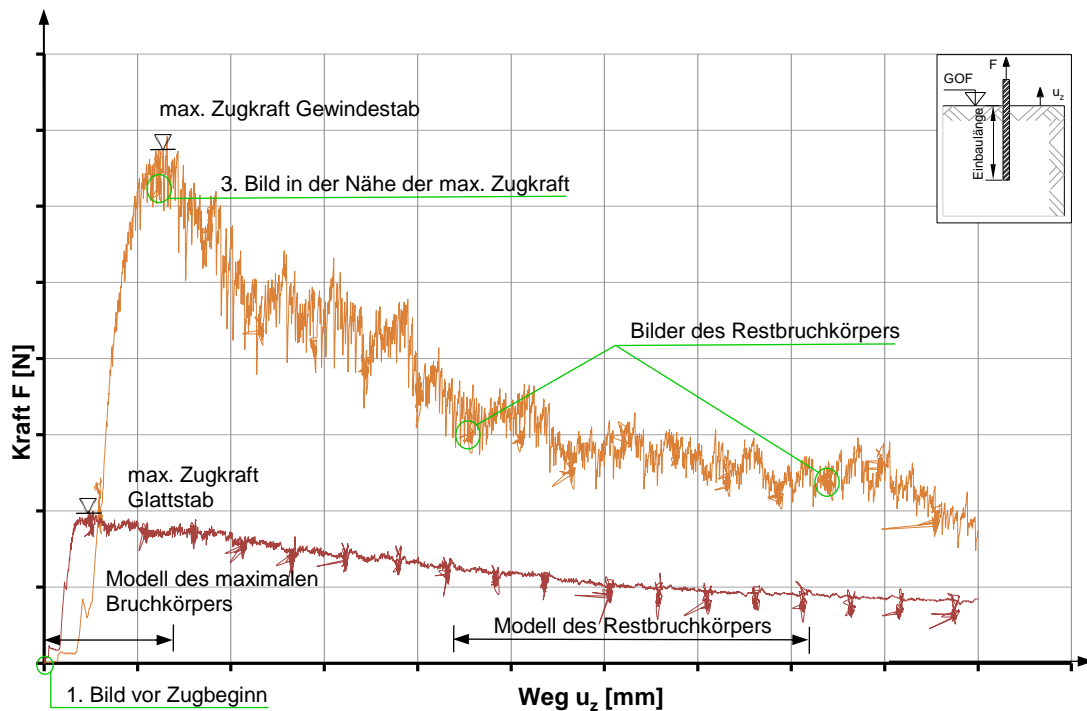


Abb. 5-24: Weg-Kraft-Bereiche des maximalen Bruchkörpers und des Restbruchkörpers

Die Bruchkörper werden mit Hilfe einer Farbskala (Velocity Magnitude, Horizontal- und Vertikalkomponente) und, um die Bewegungsrichtung der Partikel hervorzuheben, über Vektorpfeile/Stromlinien dargestellt. Folgend wird eine Definition dieser Darstellungsmethoden gegeben. Diese Definitionen gelten für die gesamte visuelle Versuchsauswertung in Kapitel 5.2.

### Velocity Magnitude

Diese Art der Auswertung und Darstellung stellt die Bewegungen im Bruchkörper mit Hilfe einer Farbskala dar (Abb. 5-25). Die Velocity Magnitude Bewegung setzt sich aus den vertikalen und horizontalen Bewegungen der Partikel zusammen. Die Skala reicht in den visuellen Auswertungen, die den Zugvorgang beschreiben von 0 bis 0,7 cm. Bereiche mit 0 cm Bewegung werden in Dunkelblau angezeigt, Bereiche mit 0,7 cm Bewegung in Rot. Die Farbe richtet sich nach der Länge des Bewegungsvektors.

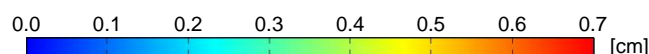


Abb. 5-25: Skala der Velocity Magnitude Auswertung mit einer Skaleneinteilung von 0 – 0,7 cm

### H- und V- Komponente

Die Bewegungen der Partikel werden separat anhand ihrer horizontalen und vertikalen Vektoren dargestellt. Das Farbspektrum reicht von Dunkelblau bis Rot, wobei Rot das obere Ende der Skala mit + 0.4 cm beschreibt und Dunkelblau das untere Ende der Skala mit – 0.4 cm (Abb. 5-26). Die Farbe richtet sich nach Richtung und Länge des Bewegungsvektors.



Abb. 5-26: Skala der Auswertung mit einer Bewegungsrichtung (horizontaler oder vertikaler Anteil) mit einer Skaleneinteilung von -0,4 – 0,4 cm

### Vektorpfeile

Vektorpfeile repräsentieren die Bewegungsrichtung der Partikel. Je länger ein Vektorpfeil umso größer der zurückgelegte Weg des Partikels. Orange Vektorpfeile, wurden vom Programm PIVLab an Stellen, in denen es keine Informationen aus dem Bild entnehmen kann, interpoliert, grüne Vektorpfeile (Abb. 5-27) oder schwarze Vektorpfeile (siehe z.B. Abb. 5-31), sind eindeutig berechnet. Interpolierte Vektorpfeile kommen vor allem im unteren Bereich der Bildauswertung vor, da dort aufgrund von geringerem Laserlicht, weniger Informationen für das Programm vorhanden sind.

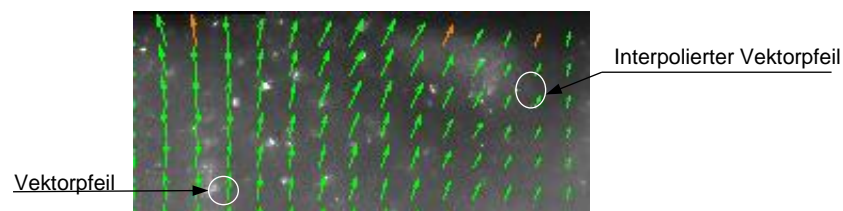


Abb. 5-27: Bildausschnitt einer Auswertung mit Vektorpfeilen

### Stromlinien

Mit Stromlinien werden die Bewegungen der Partikel auf eine weitere Art dargestellt (Abb. 5-28). PIVLab zeichnet eine Stromlinie beginnend bei einem ausgewählten Vektorpfeil und setzt diesen bis an eine Grenze, die das Programm festlegt, fort. Man erkennt an den folgenden visuellen Auswertungen in den folgenden Kapitel, dass Stromlinien annähernd den Bruchkörper des Bodens auf Grund des Zugvorganges beschreiben.

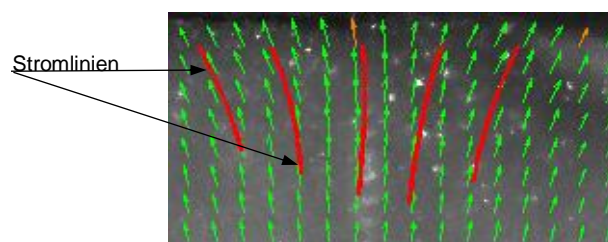


Abb. 5-28: Bildausschnitt einer Auswertung mit Vektorpfeilen und exemplarischen Stromlinien

### Bruchkörper

In weiterer Folge wird vom Bruchkörper gesprochen, wenn die Abbildung die Partikelverschiebung bis zur maximal erreichten Zugkraft darstellt (Abb. 5-24).

### Restbruchkörper

Ein Restbruchkörper stellt die Verschiebungen dar, die nach Erreichen der maximalen Zugkraft auftreten. Man erkennt an den Abbildungen die den Restbruchkörper darstellen, dass sich der Boden nicht mehr an den Stab anhängt und aus dem Bodenkörper herausgleitet, da es zu keinen wesentlichen Bewegungen der Silica Partikel kommt (Abb. 5-24).

Exemplarisch werden folgend 2 Bilder (Abb. 5-29 und Abb. 5-30) der Versuchsreihe 1 abgebildet, die für die PIVLab Auswertung genutzt wurden. Diese beiden Bilder stellen die Ebene 20 des Gewinde- und des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm dar. Die Ebene 20 befindet sich wenige mm vor dem Stab.



Abb. 5-29: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm,  
Einbautiefe 50 cm

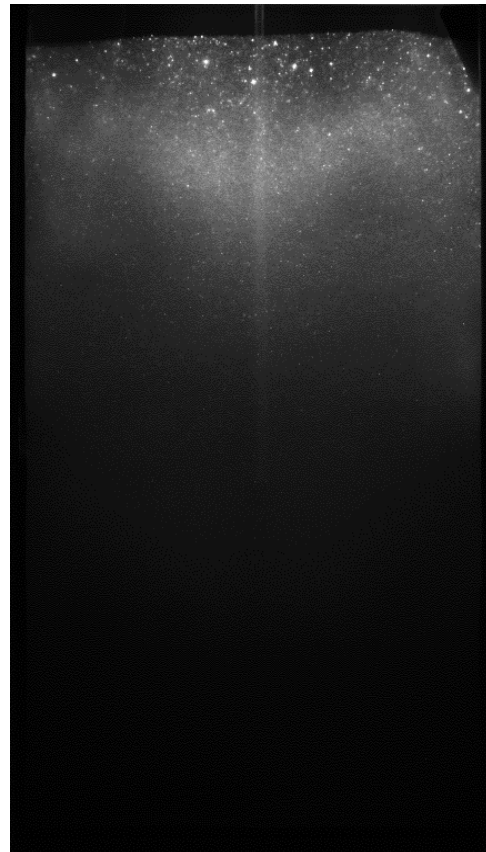


Abb. 5-30: Glattstab  $\varnothing$  15 mm,  
Einbautiefe 50 cm

### 5.2.1. Versuchsreihe 1

Die Versuchsreihe 1 liefert fünf verschiedene Versuche mit je zwei Bruchfiguren (Bruchkörper und Restbruchkörper).

#### ***Gewindestab und Glattstab Ø 15 mm, Einbautiefe 50 cm und 70 cm***

Der Gewindestab mit der Einbautiefe 50 cm verursacht nach den ersten 6 mm Zug einen deutlich ausgeprägten Bruchkörper. Der Körper des Gewindestabes Ø 15 mm und Einbautiefe 50 cm wird in den Abb. 5-31 bis Abb. 5-33 mit denselben Bildern ausgewertet, aber die Darstellungsart des Ergebnisses wurde verändert. Zuerst werden die Ebenen 5/10/15/19 nebeneinander abgebildet und die Bewegungsrichtung der Silica Partikel mit der Auswertung Velocity Magnitude und zusätzlichen Vektorpfeilen (Abb. 5-31) oder Stromlinien (Abb. 5-32) dargestellt. Danach folgt eine Darstellung als 3D-Modell (Abb. 5-33), in denen der Bruchkörper mit Hilfe von Stromlinien und Velocity Magnitude dargestellt wird. Diese Ausführung als 3D-Modell wird anschließend für die folgenden visuellen Auswertungen beibehalten.

Man erkennt in der Abb. 5-31 eine Ausformung eines Bruchkörpers in den oberen zwei Dritteln des Stabes. Dieser stellt sich als Kegelstumpf dar. Die Länge der Vektoren gibt die Intensität der Bewegung der Partikel an. Je länger diese sind, desto größer ist der zurückgelegte Weg des Partikels. Des Weiteren ist an der Oberfläche des Bodenkörpers eine Bewegung nach oben erkennbar, genau in der Mitte des Behälters. In der Ebene 19 und 15 ist der Bruchkörper am deutlichsten ausgebildet. In Richtung der Frontscheibe nimmt dieser, wie in der Abbildung ersichtlich, wieder ab.

In Abb. 5-32 wurden anstelle der Vektorpfeile Stromlinien hinzugefügt, welche die Bewegungsrichtung der Silica Partikel beschreiben. Man kann in den Ebenen eine Verdichtung der Stromlinien im Bereich der Spitze des Stabes erkennen und ein Auffächern entlang des angedeuteten Bruchkörpers.

In Abb. 5-34 ist der Restbruchkörper des Gewindestabes dargestellt. Bei Vergleich der Bilder während der abnehmenden Zugkraft stellt sich kein weiteres Anhängen des Bodenkörpers an den Zugstab ein. Das Maximum ist bereits überschritten. Die Bewegungen im oberen Bereich des Bodenkörpers, in der Abbildung als grüner Bereich erkennbar, deuten auf eine Bewegung während des Zuges aus der Achse des Stabes hin, in der Partikel in den Ebenen vor dem Stab horizontal weggedrückt wurden.

Im Restbruchkörper liefern Stromlinien kein aussagekräftiges Bild, da keine relevanten Bewegungen mehr stattfinden. Vektorpfeile, die mit denselben Einstellungen wie in den vorangegangenen Abbildungen hinzugefügt werden, sind nicht mehr erkennbar, da die Bewegungen der Partikel zu gering sind.

Bei einer Einbautiefe von 70 cm des Gewindestabes (Abb. 5-35) kommt es zu deutlicheren Bewegungen im Bodenkörper. Durch das Verkeilen der Bodenpartikel infolge des Eindrehens bildet sich ein Bruchkörper aus, der durch den Versuchsbehälter begrenzt wird.

Der Restbruchkörper (Abb. 5-36) stellt sich gleich dar wie bei einer Einbautiefe von 50 cm.

In der Serie der Glattstäbe (Abb. 5-37 bis Abb. 5-40) konnte mit der PIVLab Auswertung die Annahmen bestätigt werden, die in den Weg-Zeit-Diagrammen schon ersichtlich wurden. Es kommt nur zu geringen Bewegungen im Bodenkörper aufgrund des Zuges des Glattstabes. Es wird darauf hingewiesen, dass die Skalierung für die Partikelbewegung im Programm, für den Glattstab dieselbe ist, wie die für den Gewindestab.

In den Abb. 5-41 bis Abb. 5-42 wurde versucht, den Eindrehvorgang des Gewindestabes in den Boden auszuwerten. Dies wurde durch eine Bildserie ermöglicht, die vor dem Eindrehen des Stabes vom Bodenkörper gemacht wurde. Diese erste Bildserie kann mit der nachfolgenden Bildserie, die nach dem Eindrehen des Stabes aufgenommen wurde, verglichen werden. Dadurch können die Verschiebungen der Partikel des Bodens nach einem Eindrehvorgang beschrieben werden.

Die Abb. 5-41 zeigt die vertikale Verdrängung des Bodens durch das Eindrehen. Am Stabende verdichtet sich der Bodenkörper durch das Eindrehen. In Abb. 5-42 wird die horizontale Komponente des Eindrehvorganges visualisiert. Man erkennt deutlich, wie der Stab die Bodenpartikel symmetrisch zu beiden Seiten verdrängt.



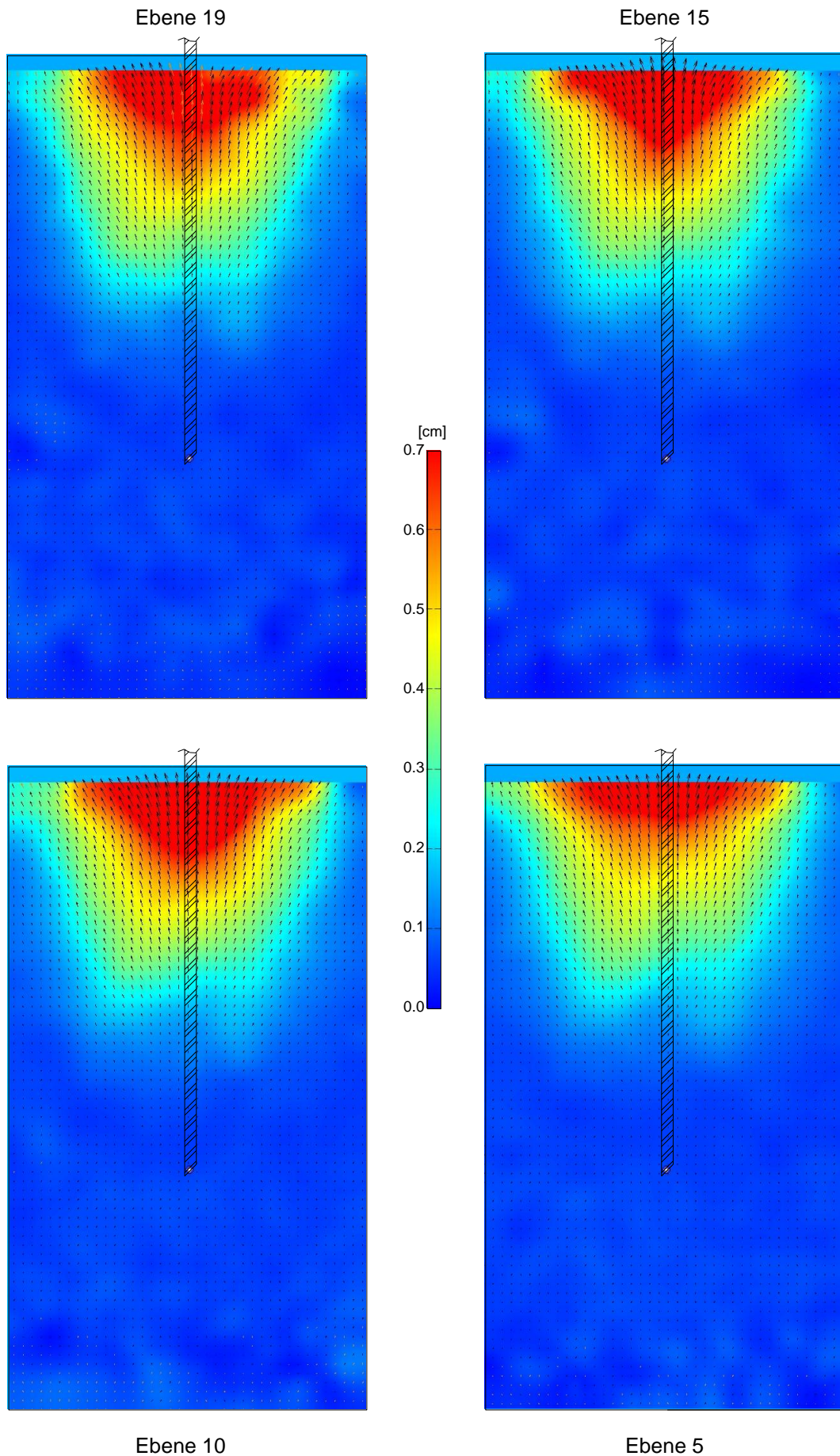


Abb. 5-31: Bruchkörper nach ~7,5 mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Vektorpfeilen



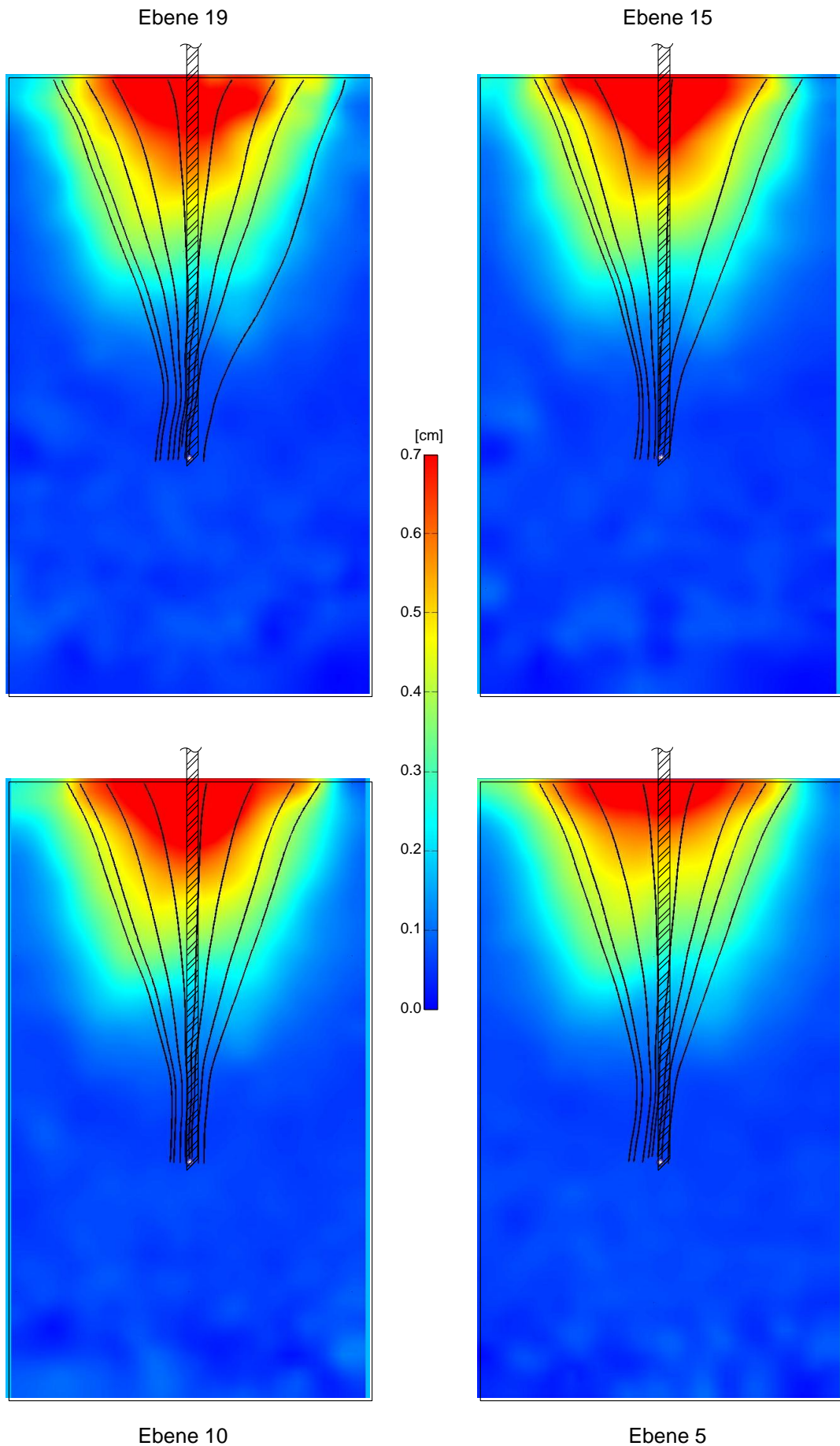


Abb. 5-32: Bruchkörper nach ~7,5 mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

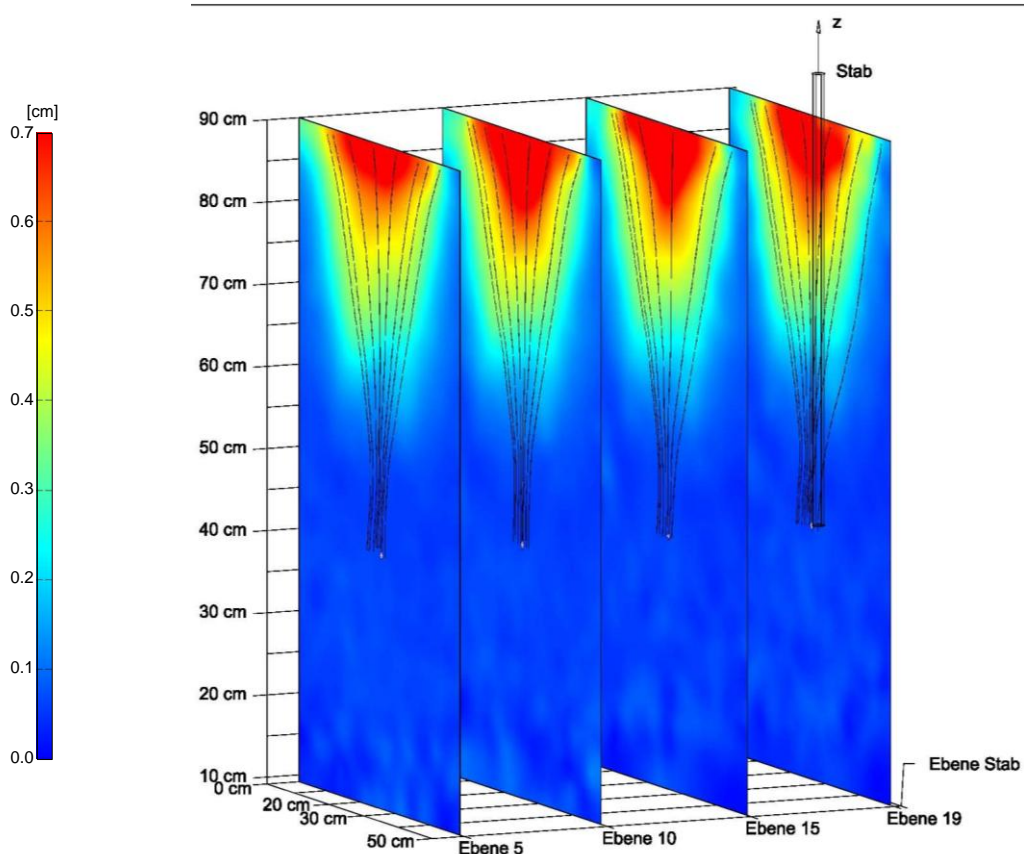


Abb. 5-33: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien (3D-Modell)

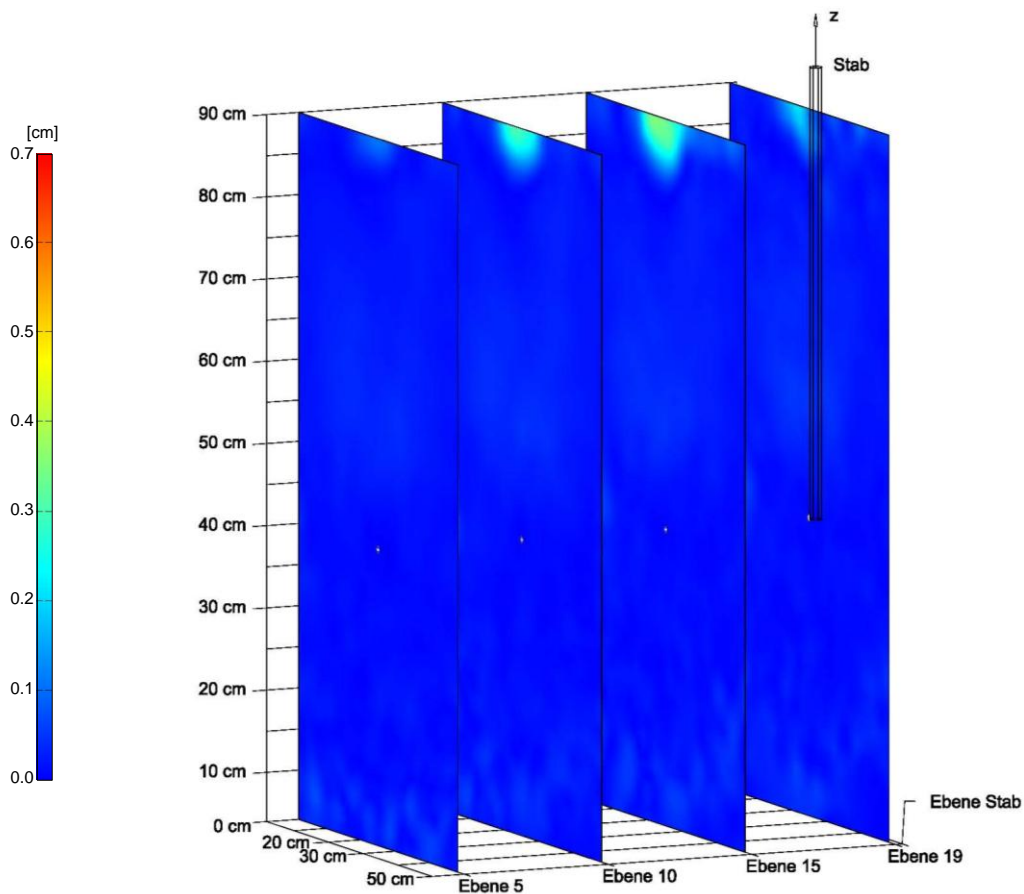


Abb. 5-34: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

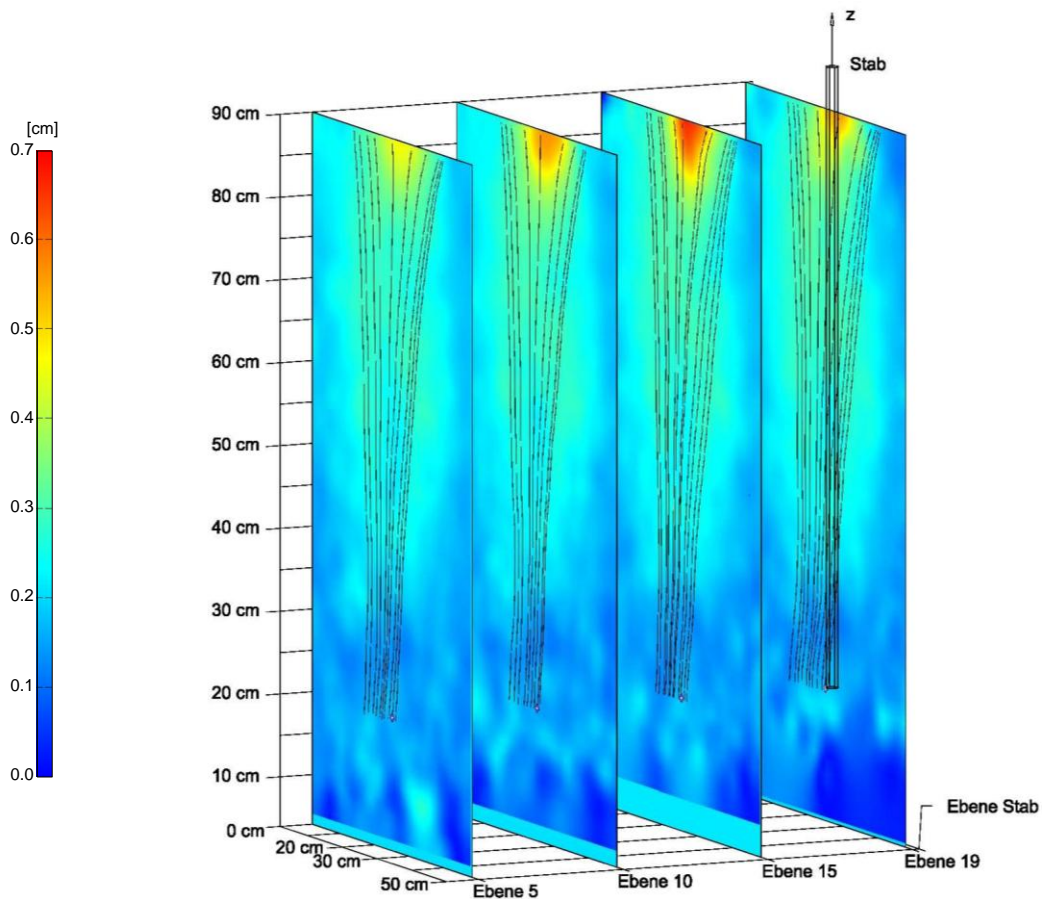


Abb. 5-35: Bruchkörper nach ~7,5 mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

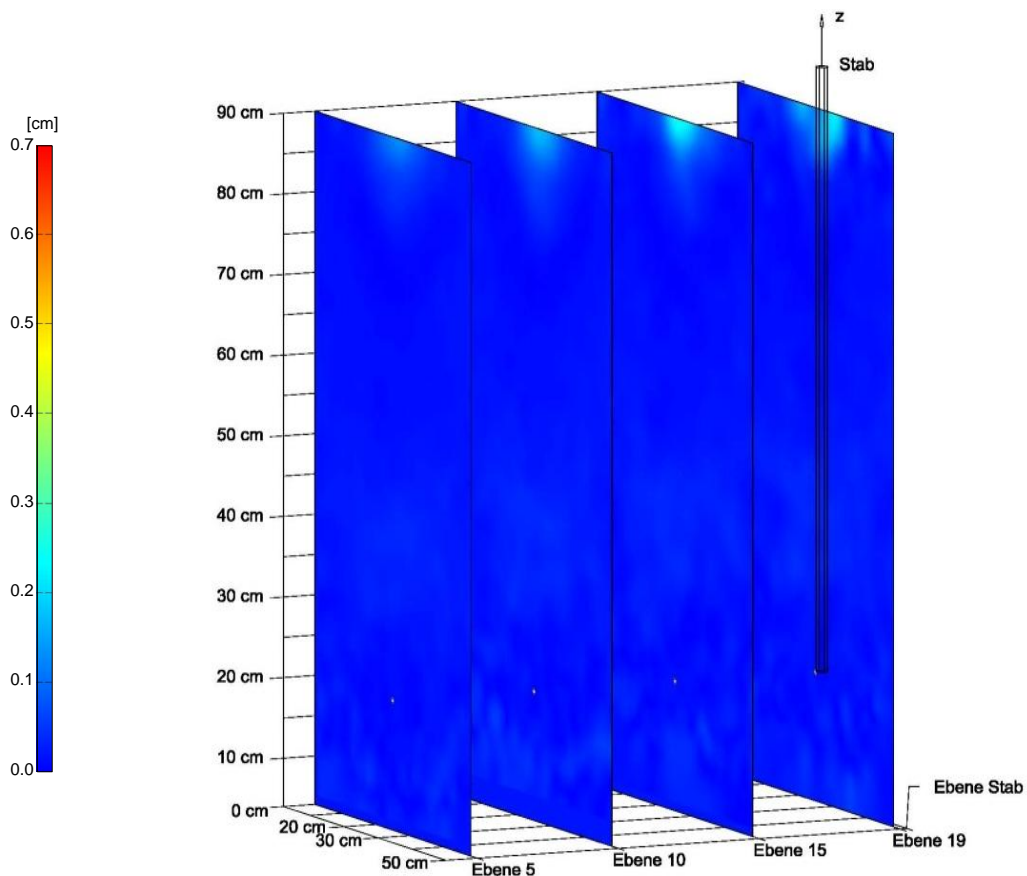


Abb. 5-36: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

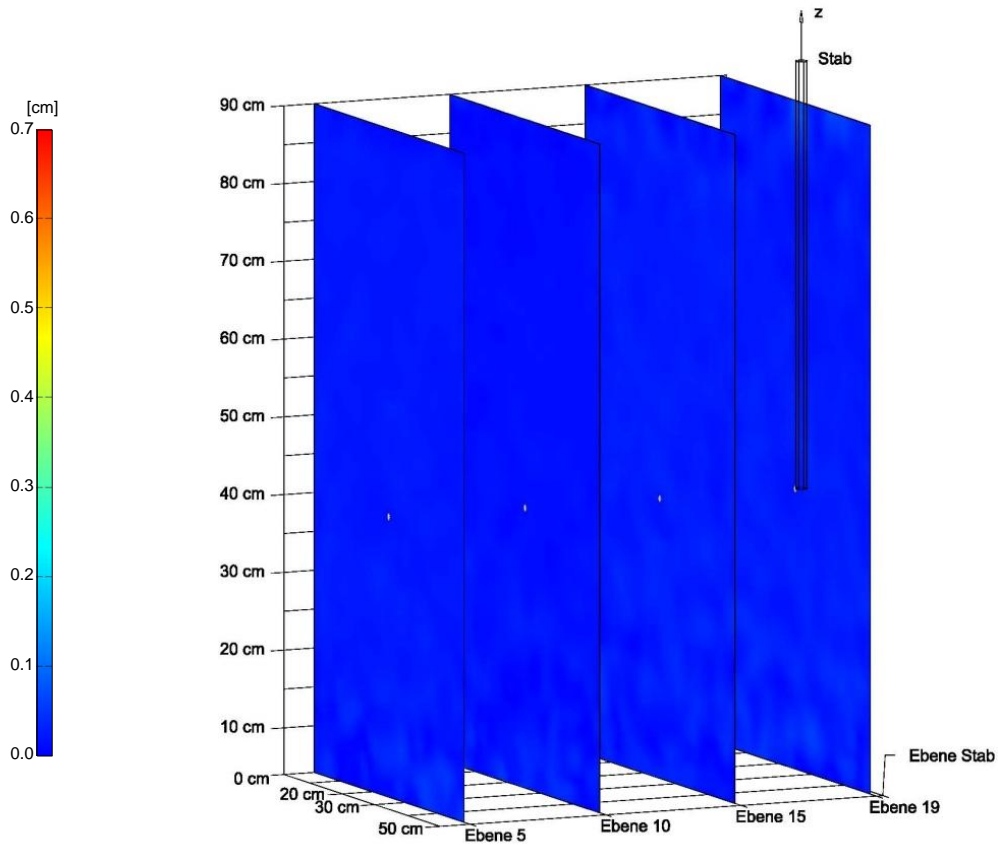


Abb. 5-37: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glattstabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

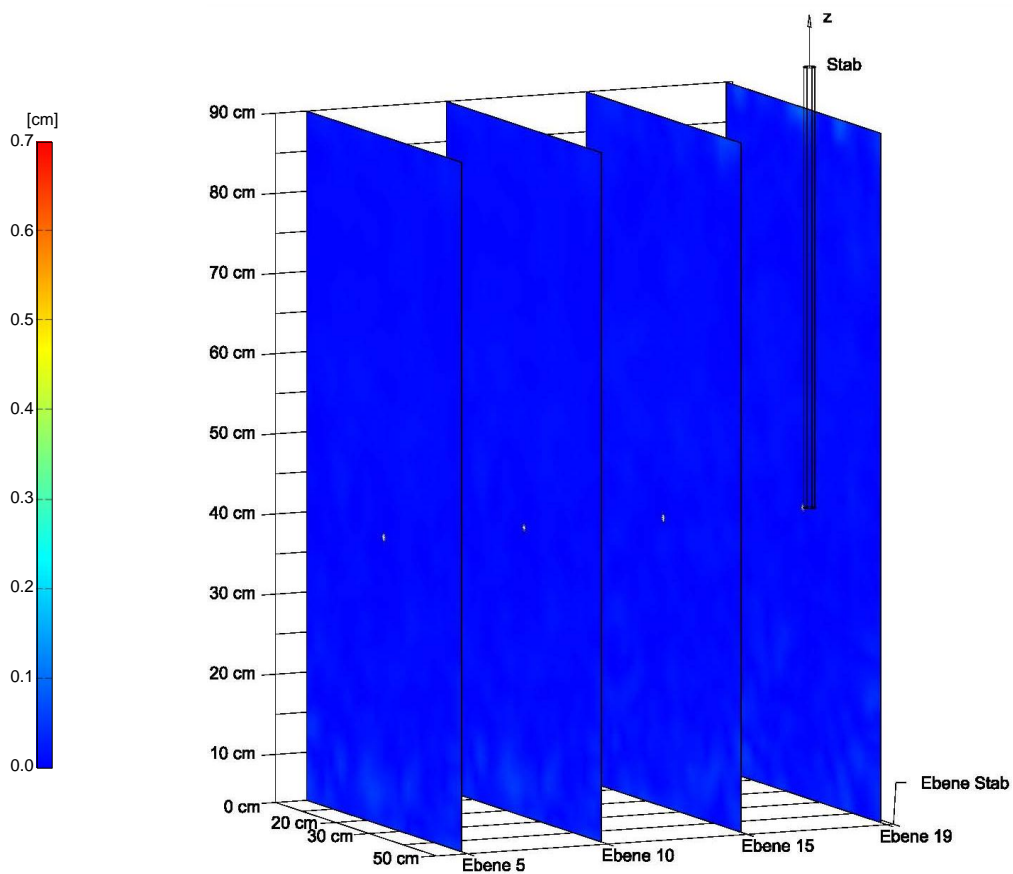


Abb. 5-38: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: Velocity Magnitude



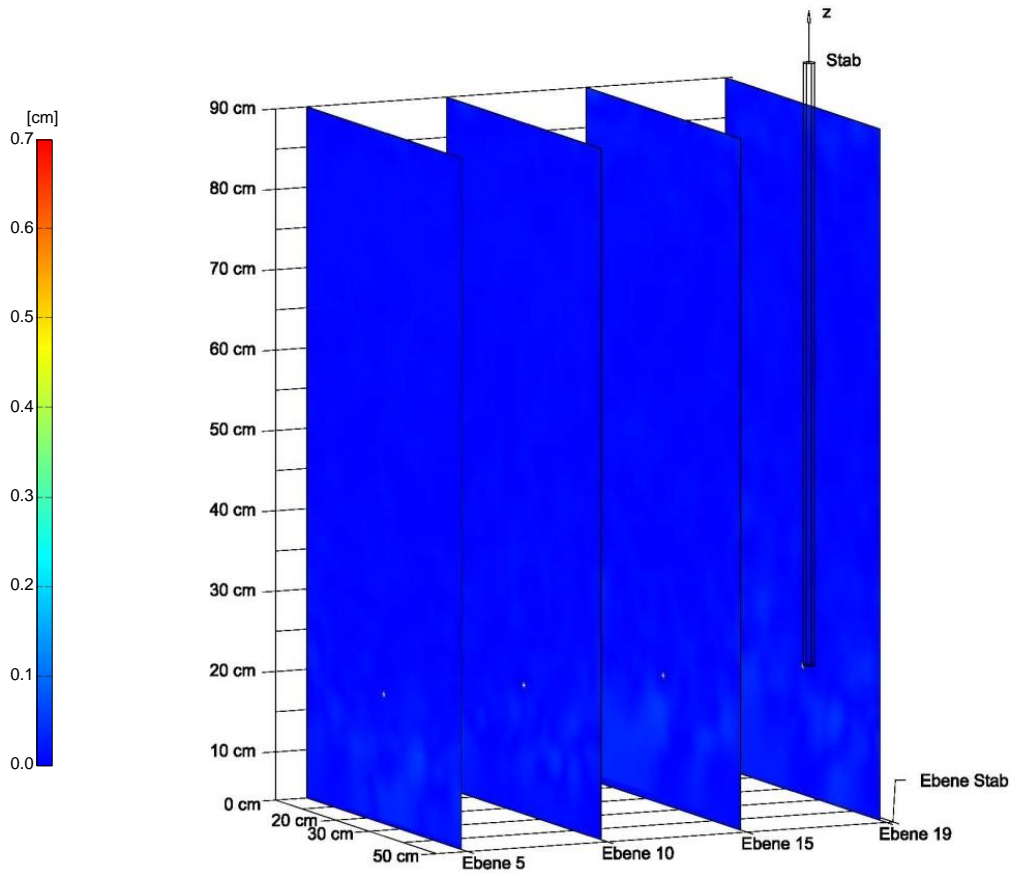


Abb. 5-39: Bruchkörper nach ~7,5 mm Zug des Glatstables Ø 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

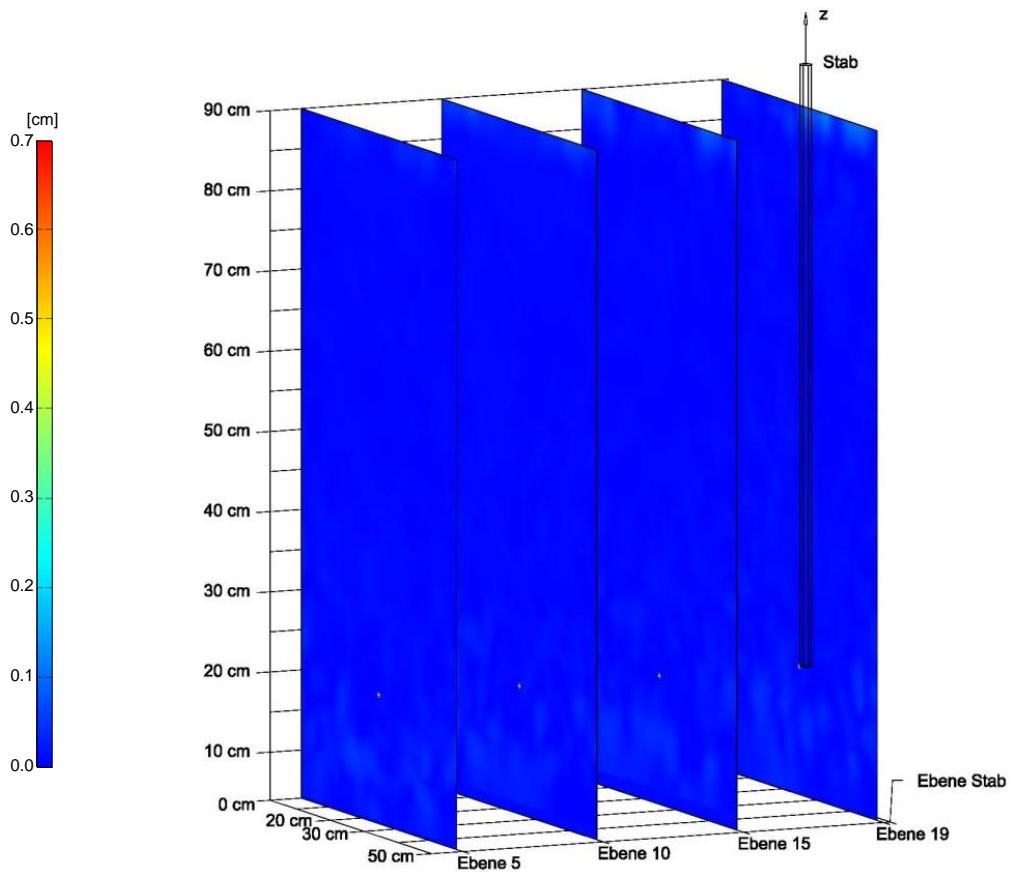


Abb. 5-40: Restbruchkörper des Glatstables Ø 15 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

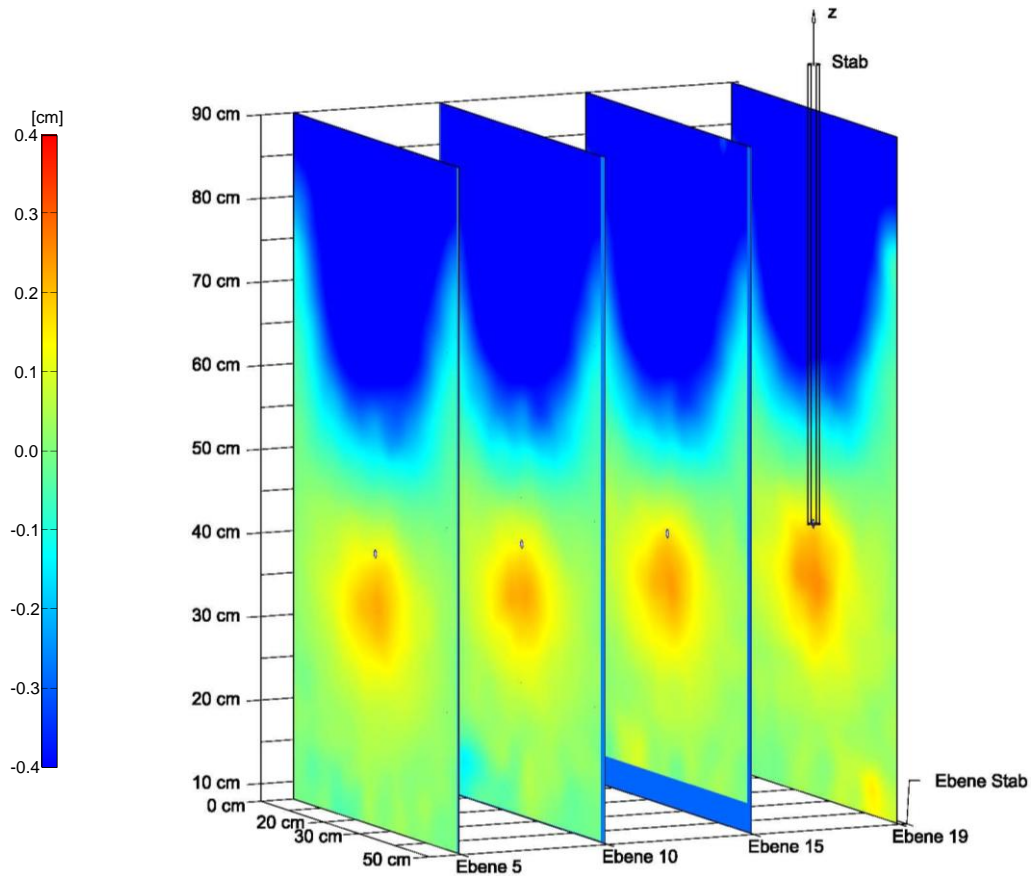


Abb. 5-41: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: V-Komponente

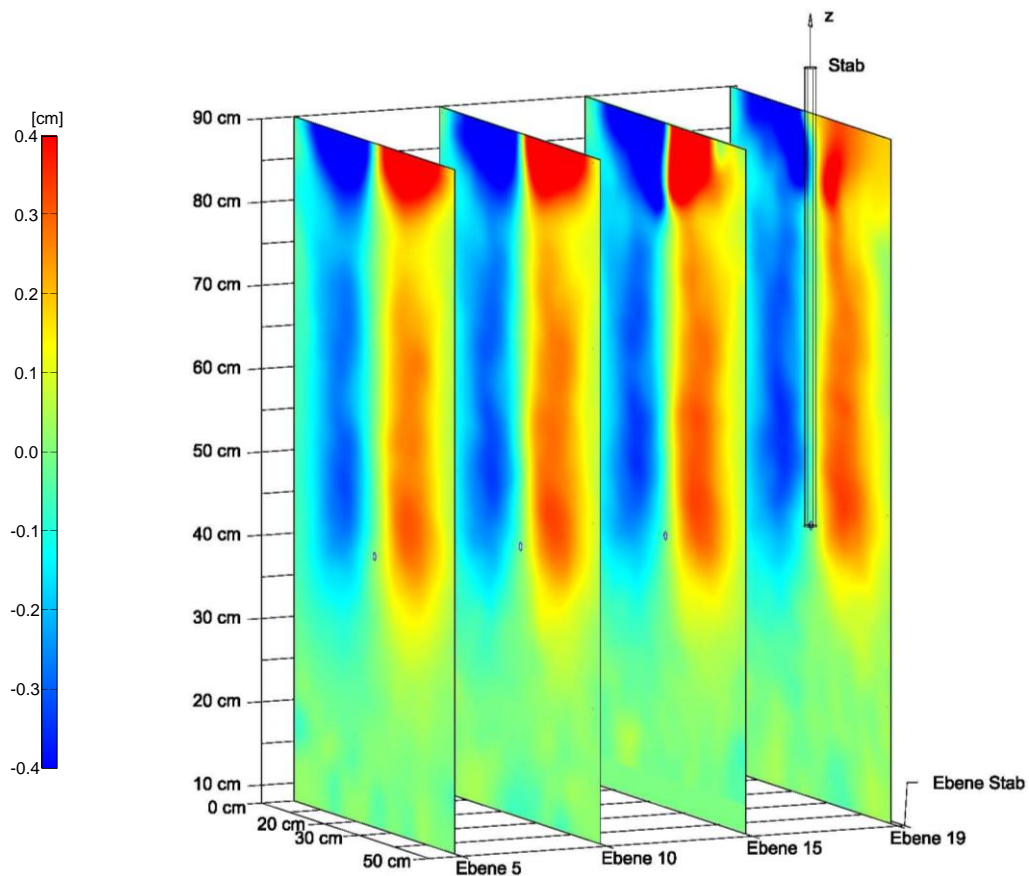


Abb. 5-42: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe 50 cm, Auswertung: H-Komponente



**Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm**

Der Gewindestab mit einem Durchmesser von 20 mm bewegt den Großteil des Bodenvolumens. Die Stromlinien verdichten sich am Ende des Stabes und deuten den Bruchkörper an. Dieser bildet sich in diesem Versuch deutlicher auf eine Seite des Behälters aus (Abb. 5-43). Eine Erklärung dafür könnte eine größere Verspannung der Partikel auf dieser Seite während des Eindrehvorganges sein.

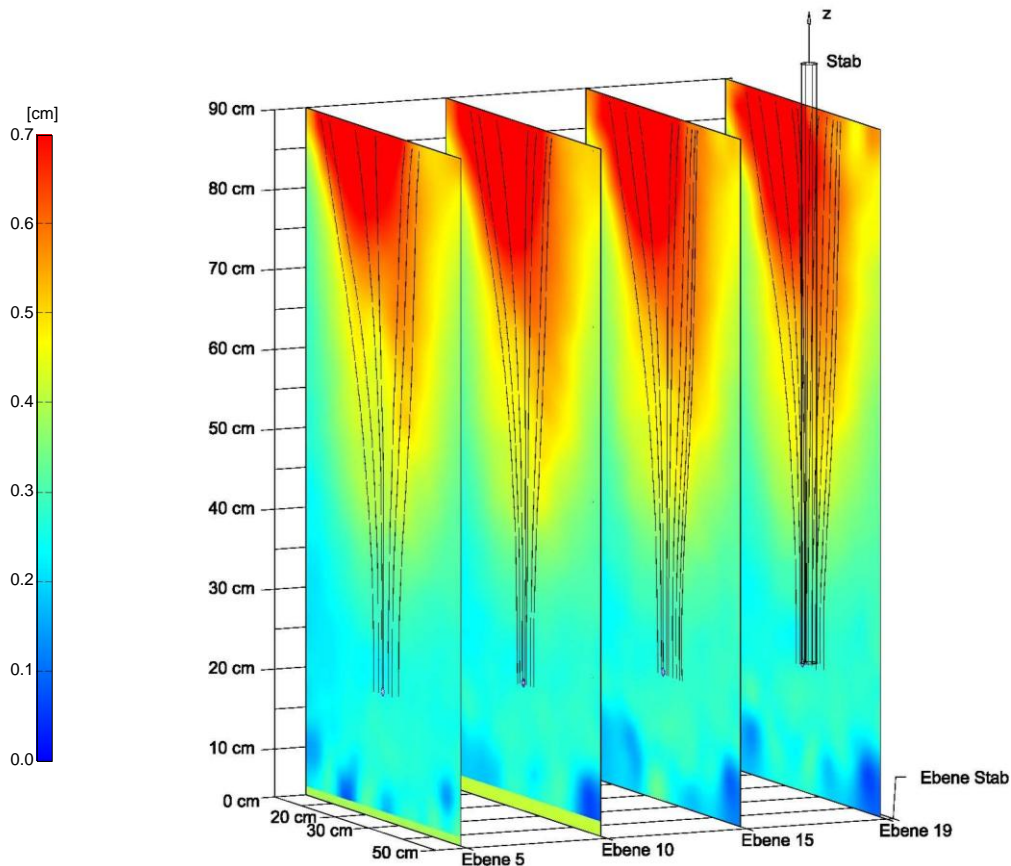


Abb. 5-43: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

Der Restbruchkörper zeigt keine weiteren Bewegungen der Partikel während des weiteren Zugvorganges (Abb. 5-44).

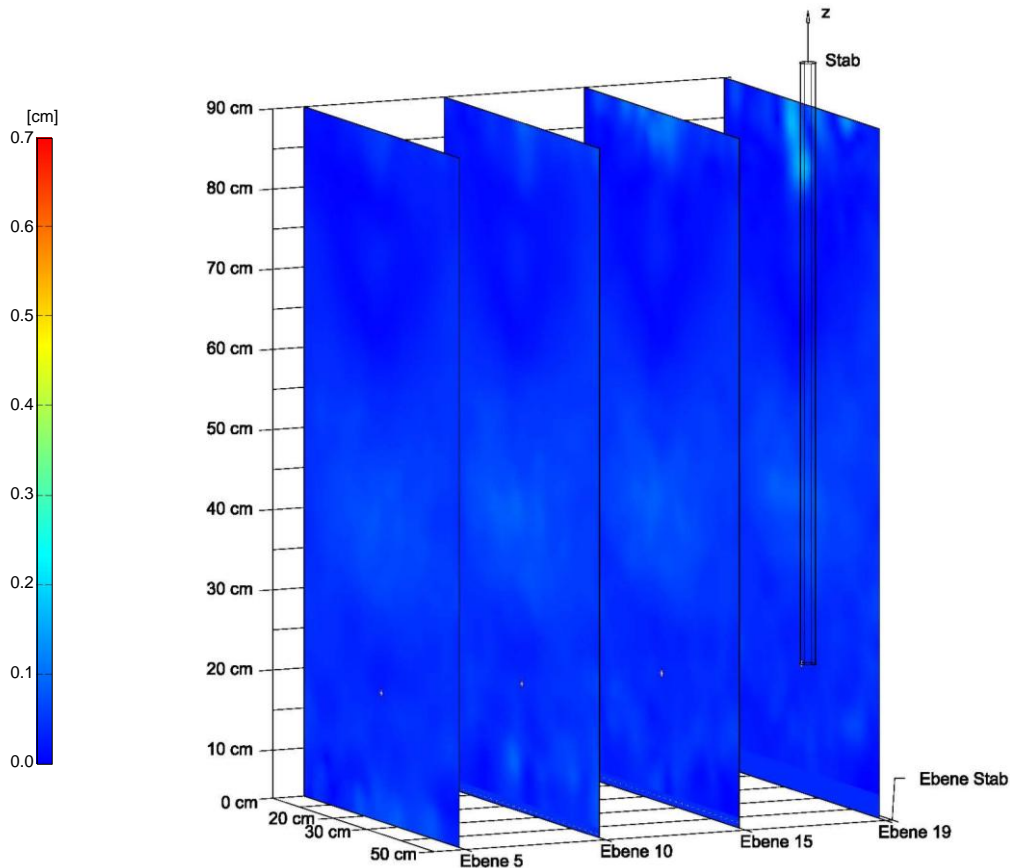


Abb. 5-44: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: Velocity Magnitude

In der Versuchsserie mit dem Gewindestab  $\varnothing$  20 mm wurde, wie auch für den Gewindestab mit  $\varnothing$  15 mm, eine Bildserie vom ungestörten Boden durchgeführt. In den beiden folgenden Modellen (Abb. 5-45, Abb. 5-46) wird diese Bildserie mit der Serie nach dem Eindrehen des Stabes verglichen. Die Bewegungen werden in horizontale und vertikale Komponenten aufgespalten. Das erste Modell (Abb. 5-45) stellt die vertikalen Verschiebungen des Eindrehvorganges dar. Die dunkelblauen Bereiche, auf der Skala mit einer Bewegung von -0,4 cm dargestellt, zeigen eine vertikale Verschiebung nach oben, die roten Bereiche, auf der Skala mit 0,4 cm dargestellt, eine vertikale Verschiebung nach unten. Am Ende des Stabes kommt es zu einer punktuellen Verdichtung des Bodenkörpers aufgrund des Eindrehens des Stabes.

In Abb. 5-46 wurde die Darstellung umgewandelt in die horizontalen Komponenten der Bewegung. Man erkennt eine eindeutige Symmetrie mit gleichmäßigen Bewegungen nach rechts und links im Bodenvolumen. Im oberen Nahbereich des Stabes, in den ersten 10 cm in der Ebene 19, ist aufgrund des Eindrehvorganges eine Drehbewegung der Partikel um die Stabachse ersichtlic.

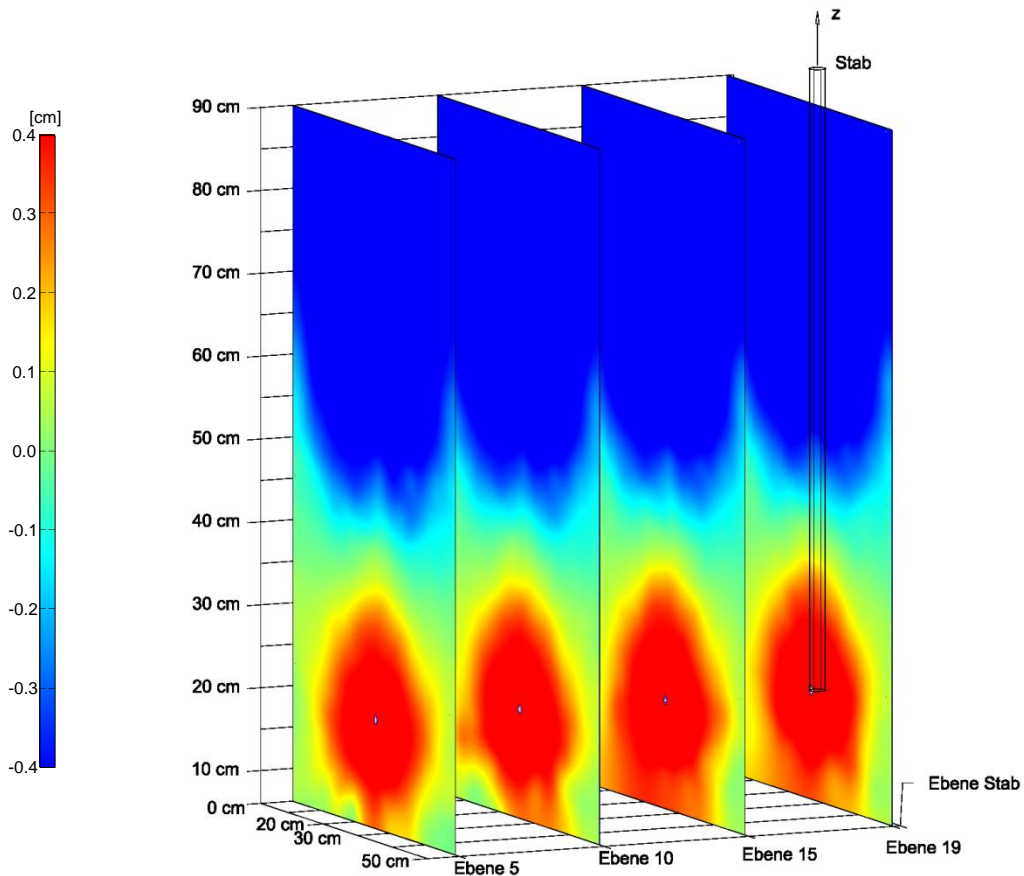


Abb. 5-45: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: V-Komponente

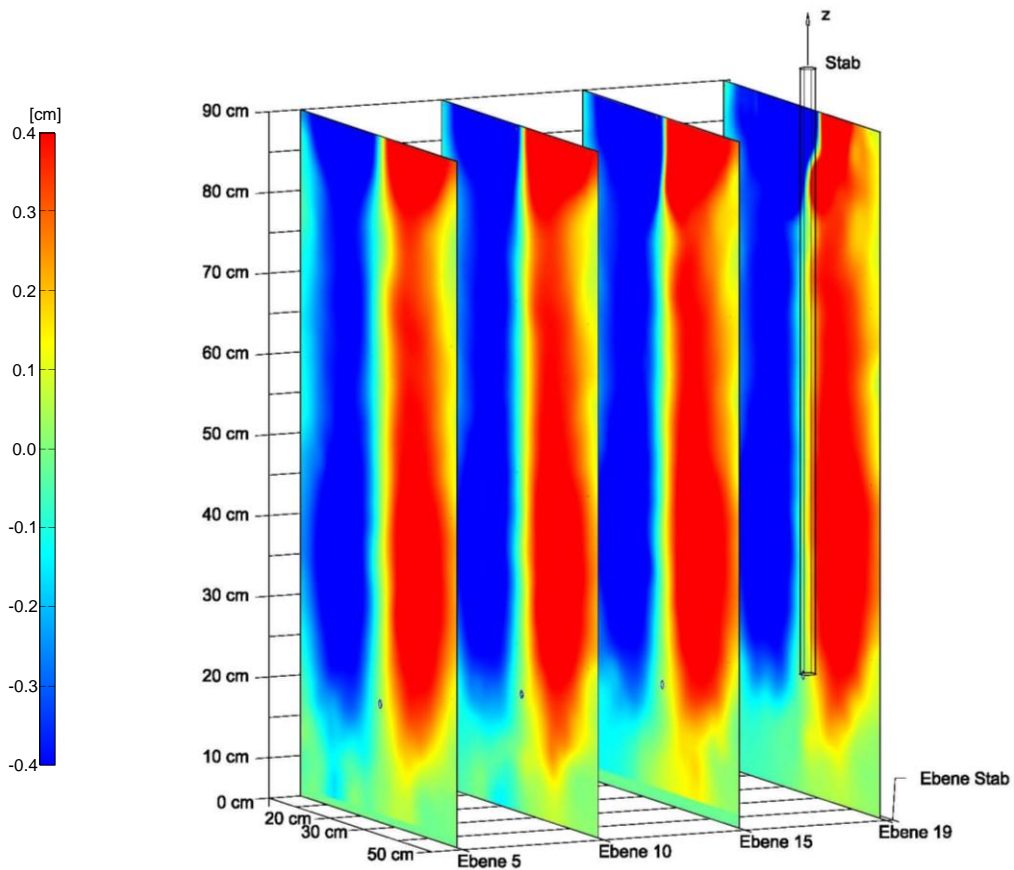


Abb. 5-46: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: U-Komponente

### Gewindestab $\varnothing$ 26,5 mm, Einbautiefe 70 cm

Eine Darstellung des Bruchkörpers des Zugvorganges ist für den Gewindestab mit dem Durchmesser  $\varnothing$  26,5 mm, wie in Kapitel 5.1.1 bereits erläutert, nicht durchführbar. Es kam zu einem Scheibenbruch und der Versuch musste nach den ersten Millimetern Zug des Stabes abgebrochen werden.

Für diesen Durchmesser stehen die Bildserien vor dem Eindrehen des Stabes und nach dem Eindrehen des Stabes zur Verfügung. Diese Bilder wurden für die Darstellung des Eindrehvorganges des Stabes herangezogen.

In Abb. 5-47 wird der Eindrehvorgang in seinen vertikalen Komponenten abgebildet. Man erkennt im Vergleich zu Abb. 5-41 eine erhöhte Bewegung der Partikel, vor allem in den unteren Bereichen des Behälters.

Die horizontalen Komponenten des Eindrehens werden in Abb. 5-48 dargestellt. Die Silica Gel Partikel des gesamten Behälters sind, bis auf wenige Ausnahmen in den Ecken des Behälters, in Bewegung. Diese Modelle bestätigen die Annahme, dass der Versuchsbehälter für diesen Stabdurchmesser zu klein gewählt wurde.

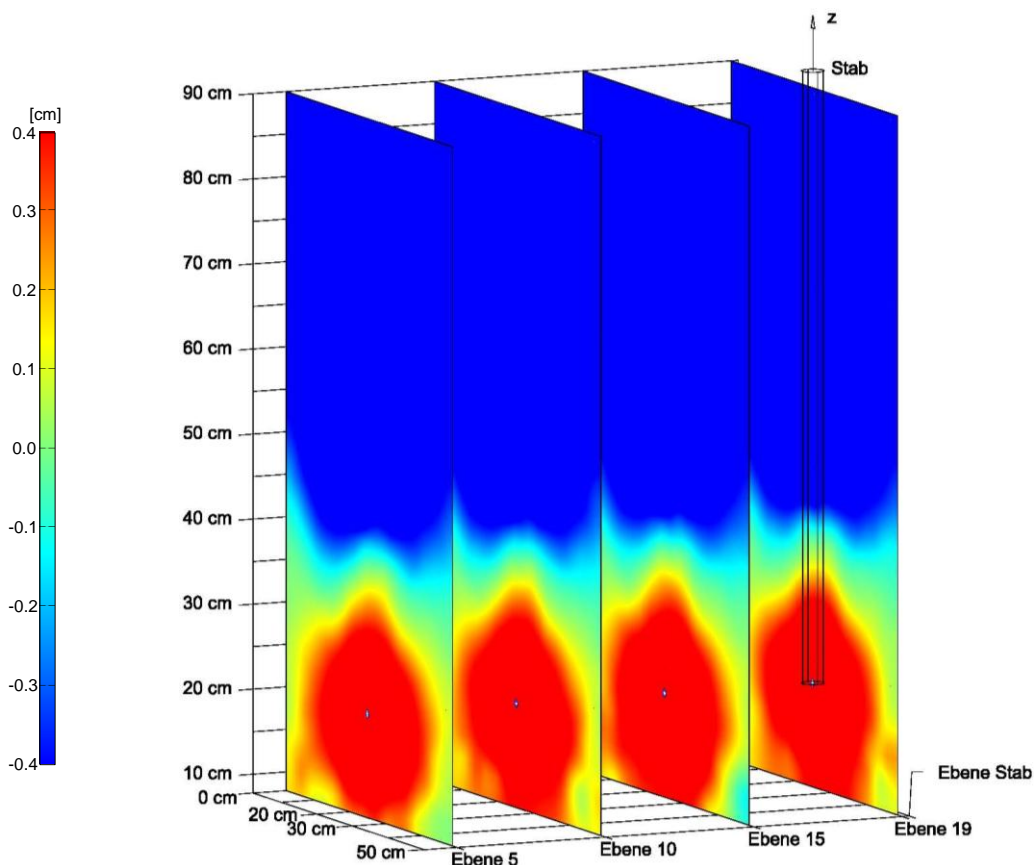


Abb. 5-47: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  26,5 mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: V-Komponente

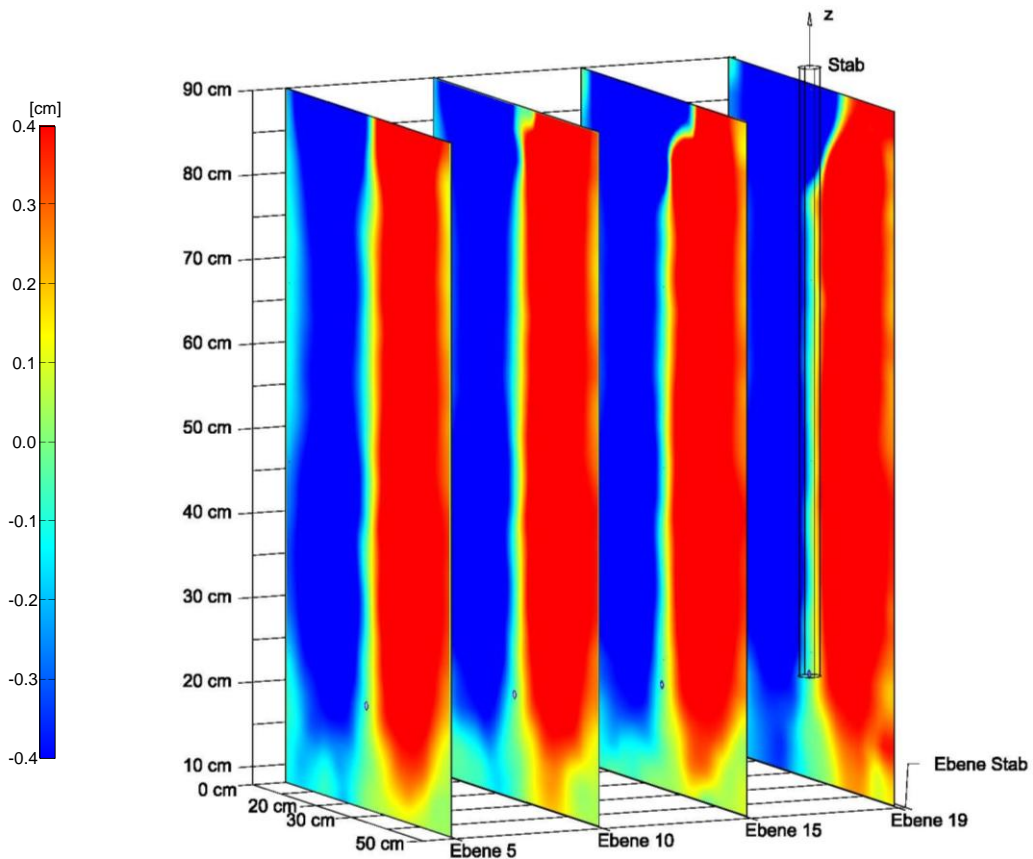


Abb. 5-48: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing 26,5$  mm, Einbautiefe 70 cm, Auswertung: U-Komponente

### **5.2.2. Versuchsreihe 2**

Diese Versuchsreihe liefert sehr gute visuelle Auswertungen. Es werden in den Modellen des maximalen Bruchkörpers Stromlinien hinzugefügt um den Bruchkörper deutlicher beschreiben zu können. In den Auswertungen der Glattstäbe ergaben Stromlinien kein aussagekräftiges Bild.

#### ***Gewinde und Glattstab $\varnothing$ 15 mm, Neigung zur Vertikalen von $5^\circ$ - $30^\circ$***

Alle Bruchkörper des Gewindestabes in dieser Versuchsreihe 2 bilden ihren Bruchkörper nur auf eine Seite des Stabes aus. Die Stromlinien beschreiben eine eindeutige Bewegungsrichtung der Partikel. Es ist naheliegend, dass sich durch die Auslenkung des Stabes während des Zuges, einseitig höhere Verspannungen und Bewegungen im Bodenkörper einstellen. Rechts vom Stab kommt es zu einer Verringerung der Interaktion des Stabes mit den Partikeln. Der Bruchkörper des Gewindestabes setzt sich aus dem angehängten Bodenvolumen in Folge des Zugvorganges und dem verschobenen Volumen durch den ausgelenkten Zug zusammen. Der Bruchkörper nimmt mit größeren Neigungen des Stabes zur Vertikalen ab (Abb. 5-49, Abb. 5-51, Abb. 5-53, Abb. 5-55, Abb. 5-57, Abb. 5-59).

In den Modellen des Bruchkörpers der Glattstäbe dieser Versuchsreihe 2 erkennt man, Bewegungen im oberen Drittel aufgrund des ausgelenkten Zuges aus der Stabachse (siehe Erläuterungen in Kapitel 5.1.2). Die Bewegungen der Partikel entstehen durch das Wegdrücken des Bodenkörpers und nicht durch das Anhängen an den gezogenen Stab (Abb. 5-50, Abb. 5-52, Abb. 5-54, Abb. 5-56, Abb. 5-58, Abb. 5-60). Die Modelle der Restbruchkörper dieser Versuchsreihe 2 sind ohne merkliche Bewegungen und werden im Anhang (Abb. B-1 bis Abb. B-12) angeführt.

Des Weiteren konnte auch in dieser Versuchsreihe 2 für den Gewindestab, unter der Neigung von  $15^\circ$  und  $30^\circ$ , der Eindrehvorgang des Stabes belegt werden. In Abb. 5-61 und in Abb. 5-63 erkennt man eine deutliche Ausbildung der horizontalen Verschiebungen der Partikel. Diese konzentrieren sich entlang des Stabes. Der Eindrehvorgang des Gewindestabes mit einer Neigung von  $15^\circ$  bewegt deutlich mehr Bodenkörper als der Eindrehvorgang des Stabes mit  $30^\circ$  Neigung zur Vertikalen.

In Abb. 5-62 und Abb. 5-64 werden die vertikalen Komponenten des Eindrehvorganges dargestellt. Der Stab mit der geringeren Neigung von  $15^\circ$  zeigt eine deutliche Verdichtung am Stabende nach dem Eindrehvorgang im Gegensatz zum Stab mit einer Neigung von  $30^\circ$ .



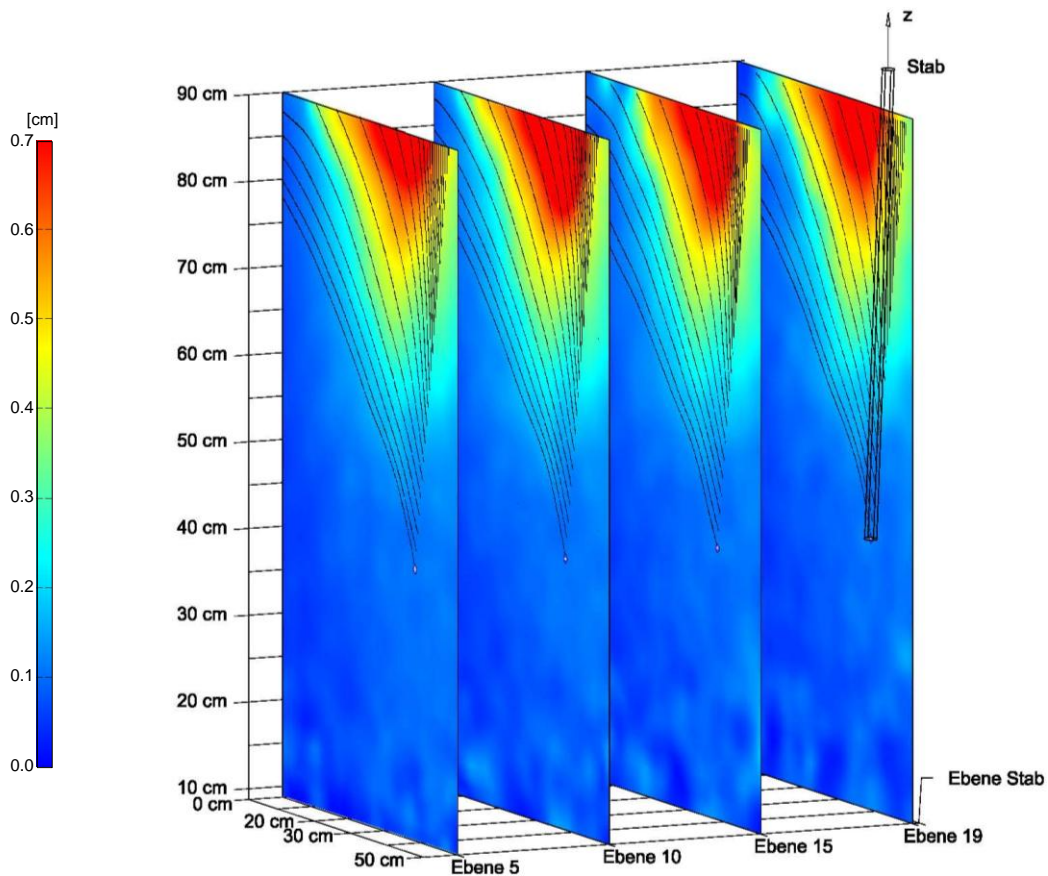


Abb. 5-49: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 50$  cm, Neigung zur Vertikalen  $5^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

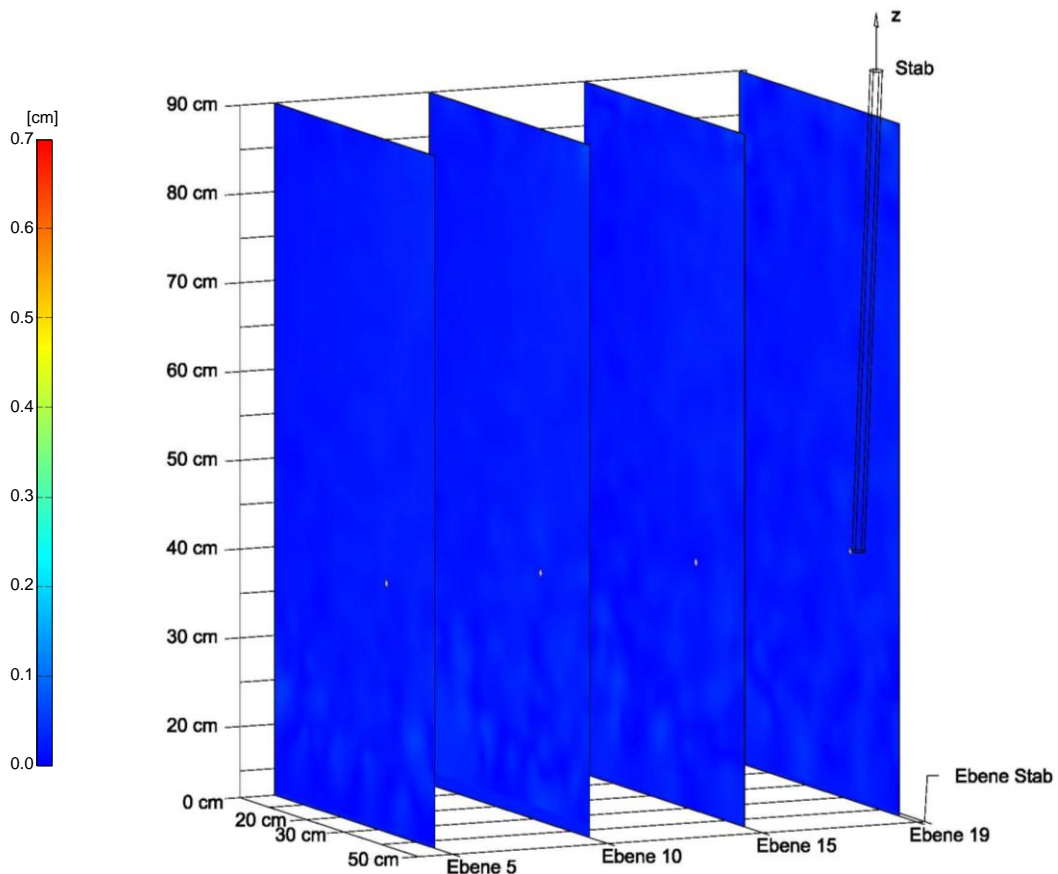


Abb. 5-50: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glatstabetes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 50$  cm, Neigung zur Vertikalen  $5^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude

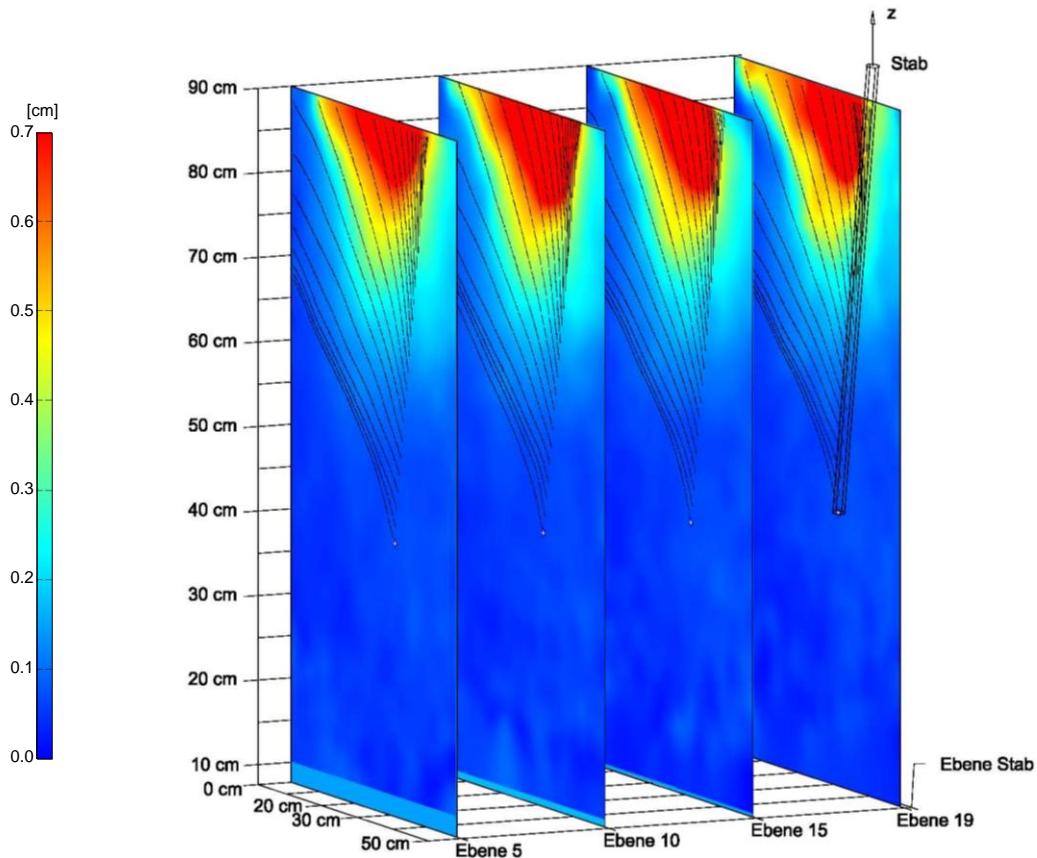


Abb. 5-51: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 50$  cm, Neigung zur Vertikalen  $10^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

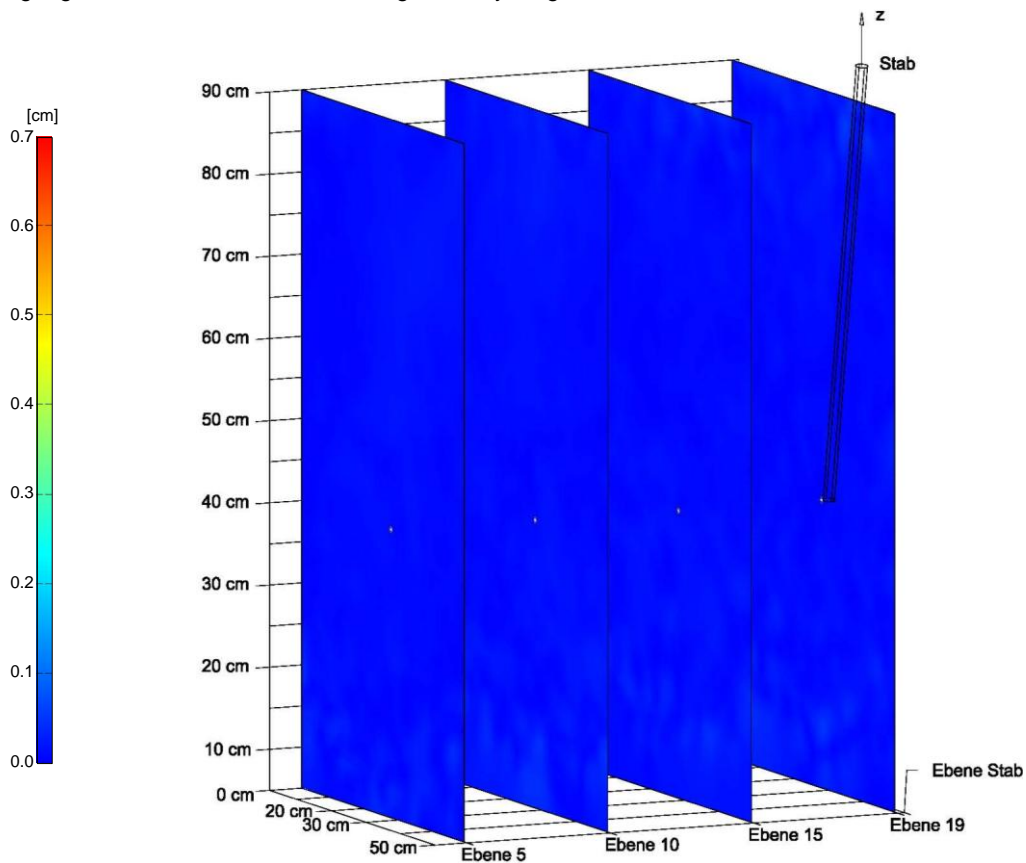


Abb. 5-52: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glattstabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 50$  cm, Neigung zur Vertikalen  $10^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude

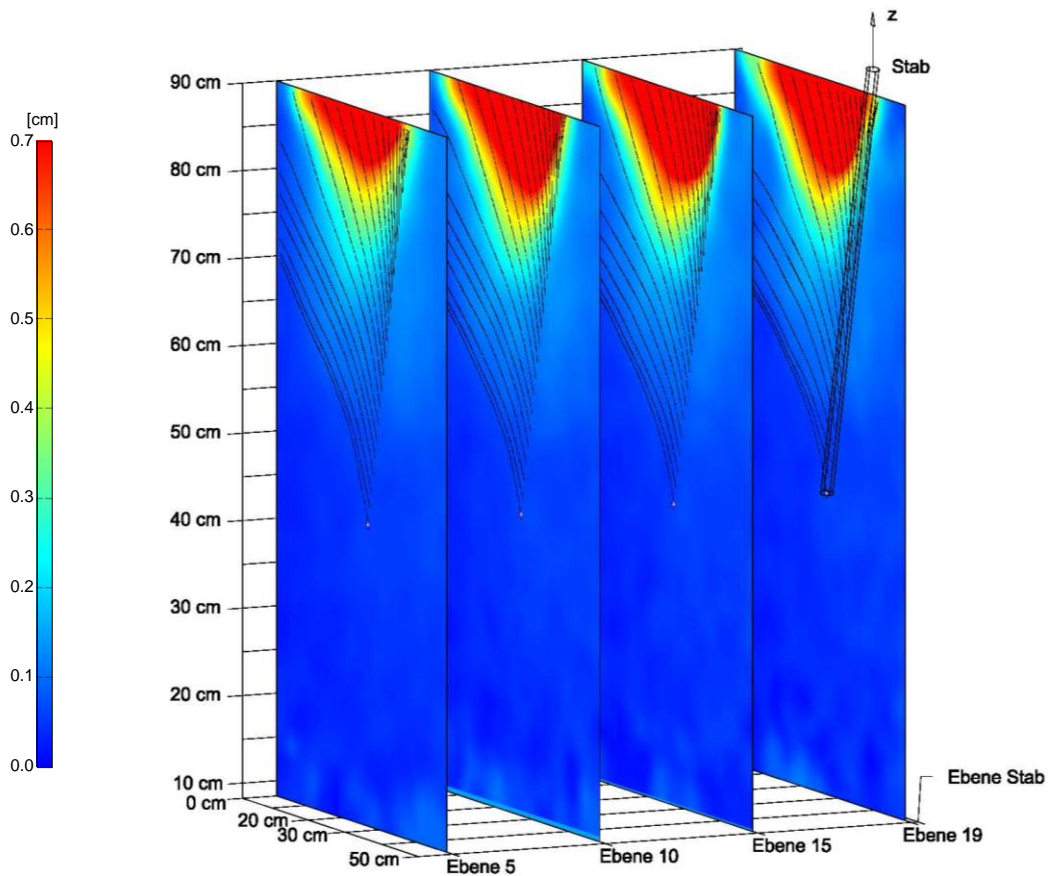


Abb. 5-53: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 47$  cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

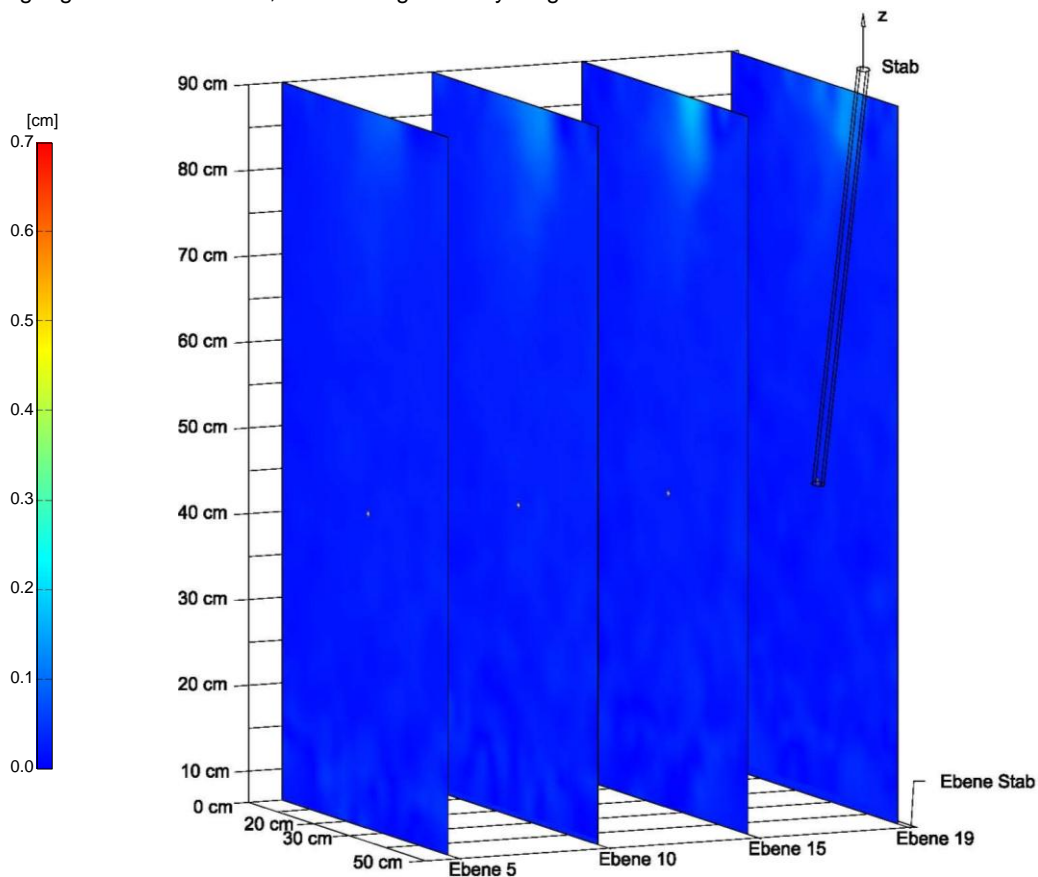


Abb. 5-54: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glatstabetes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 47$  cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude

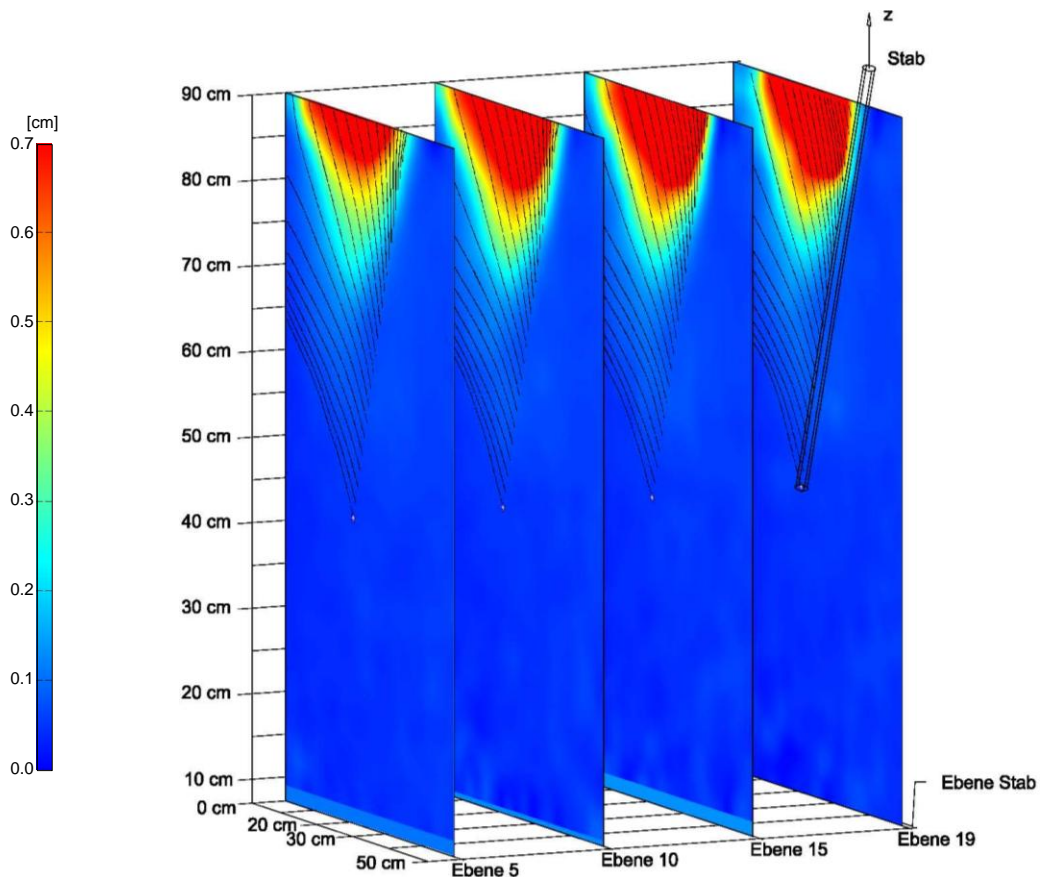


Abb. 5-55: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 42$  cm, Neigung zur Vertikalen  $20^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

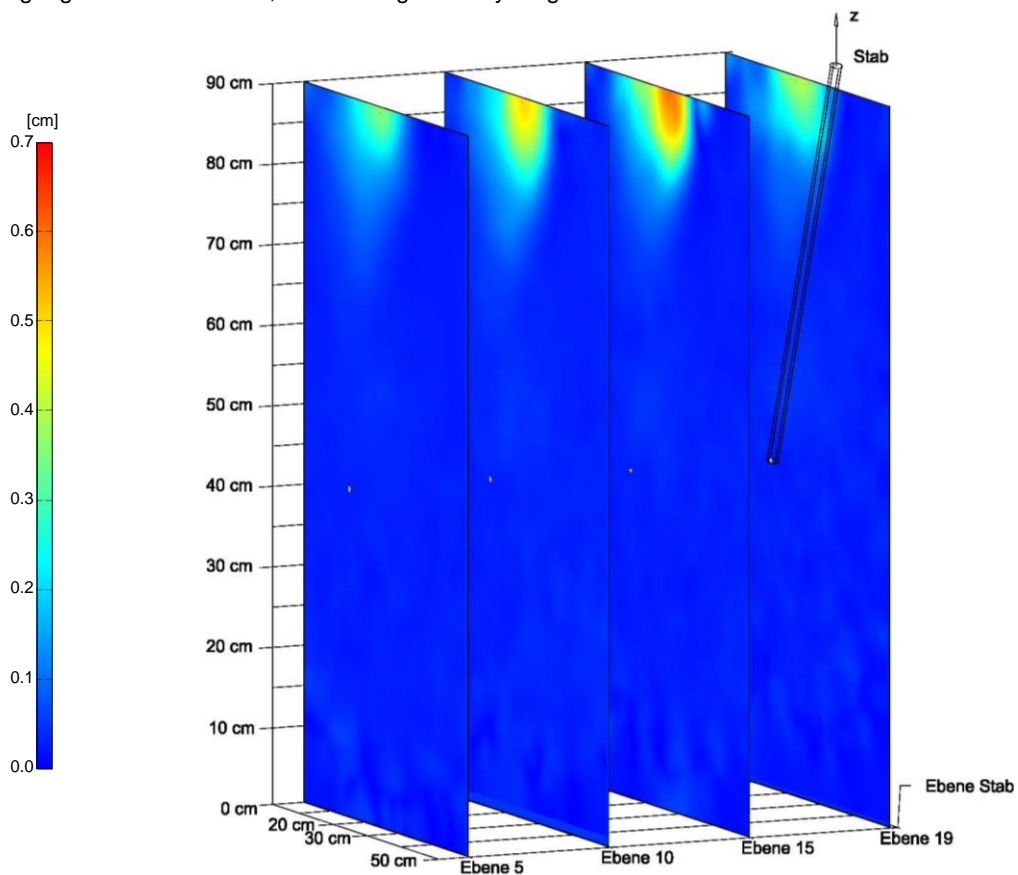


Abb. 5-56: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glatstabetes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 48$  cm, Neigung zur Vertikalen  $20^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude



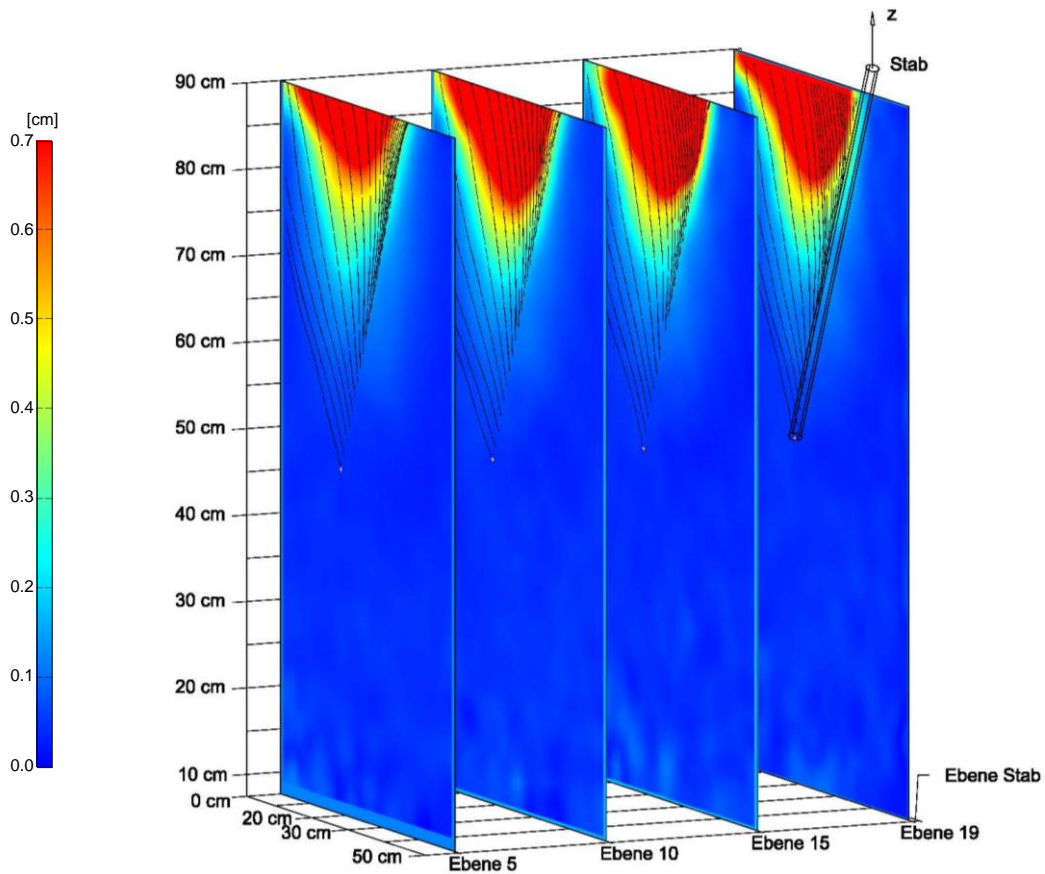


Abb. 5-57: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 42$  cm, Neigung zur Vertikalen  $25^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

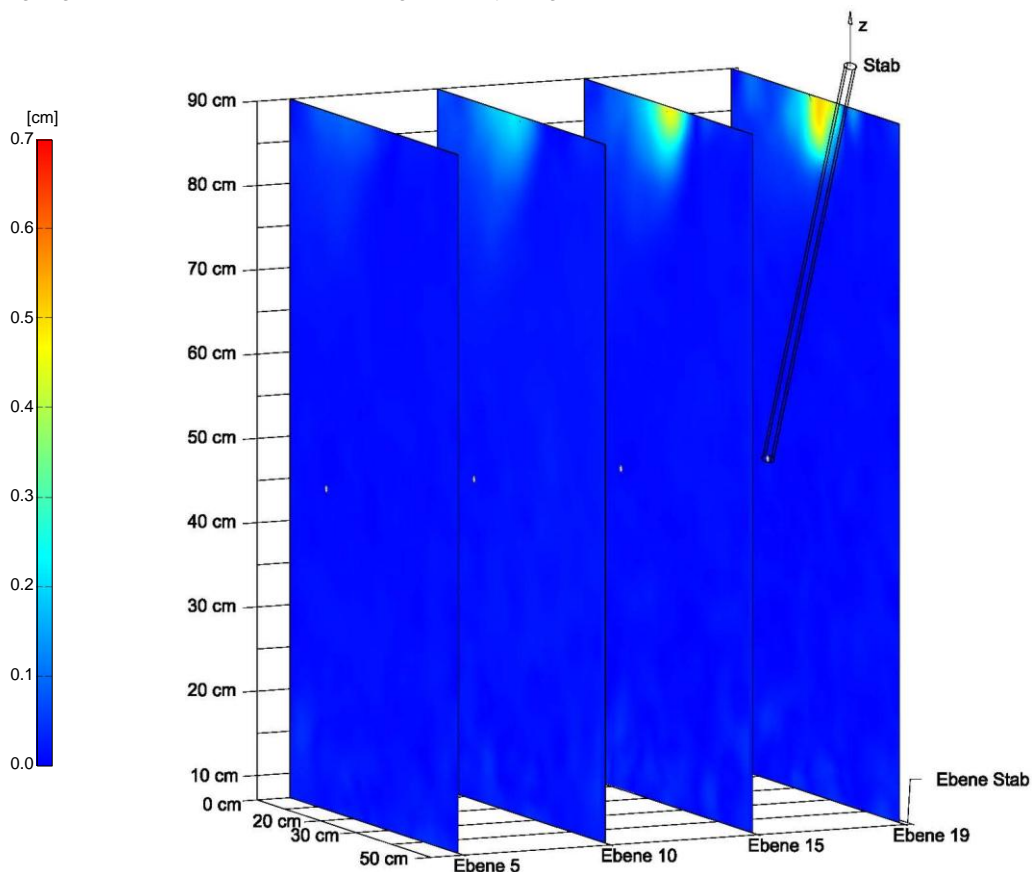


Abb. 5-58: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glatstabetes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 45$  cm, Neigung zur Vertikalen  $25^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude

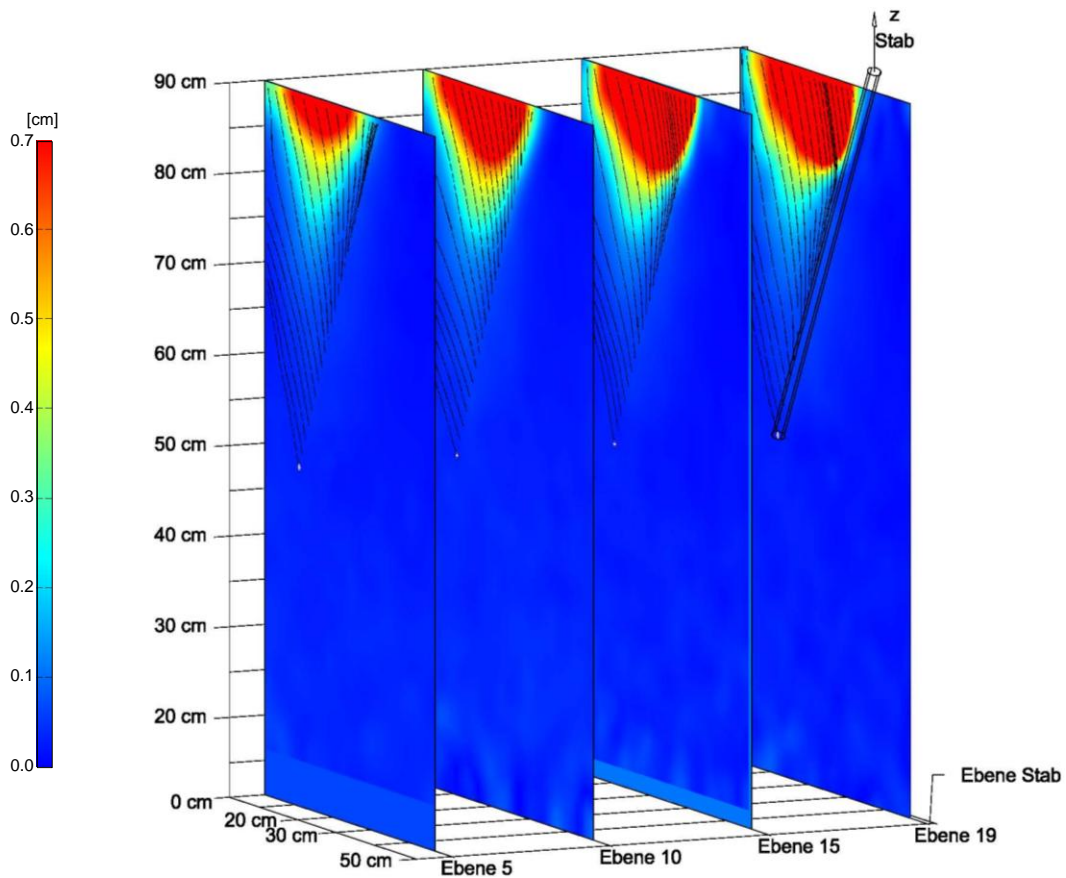


Abb. 5-59: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 41$  cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude mit Stromlinien

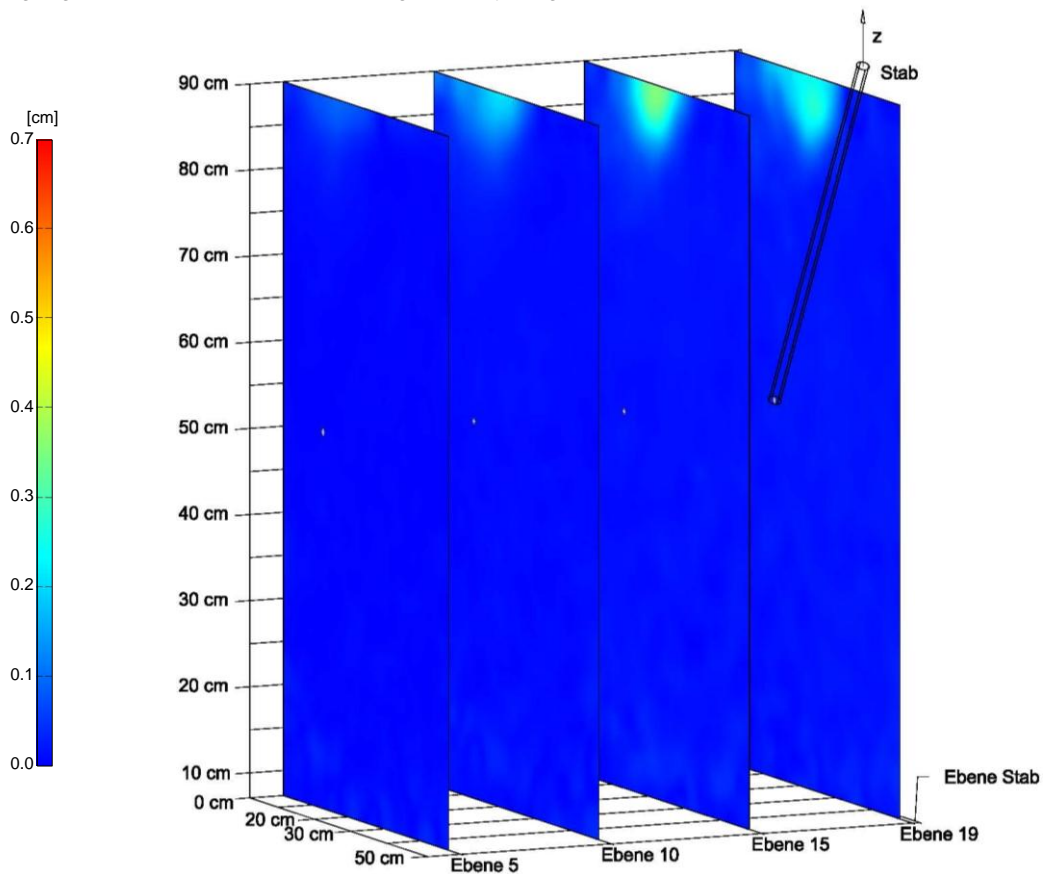


Abb. 5-60: Bruchkörper nach  $\sim 7,5$  mm Zug des Glatstabetes  $\varnothing 15$  mm, Einbautiefe  $\sim 39$  cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$ , Auswertung: Velocity Magnitude



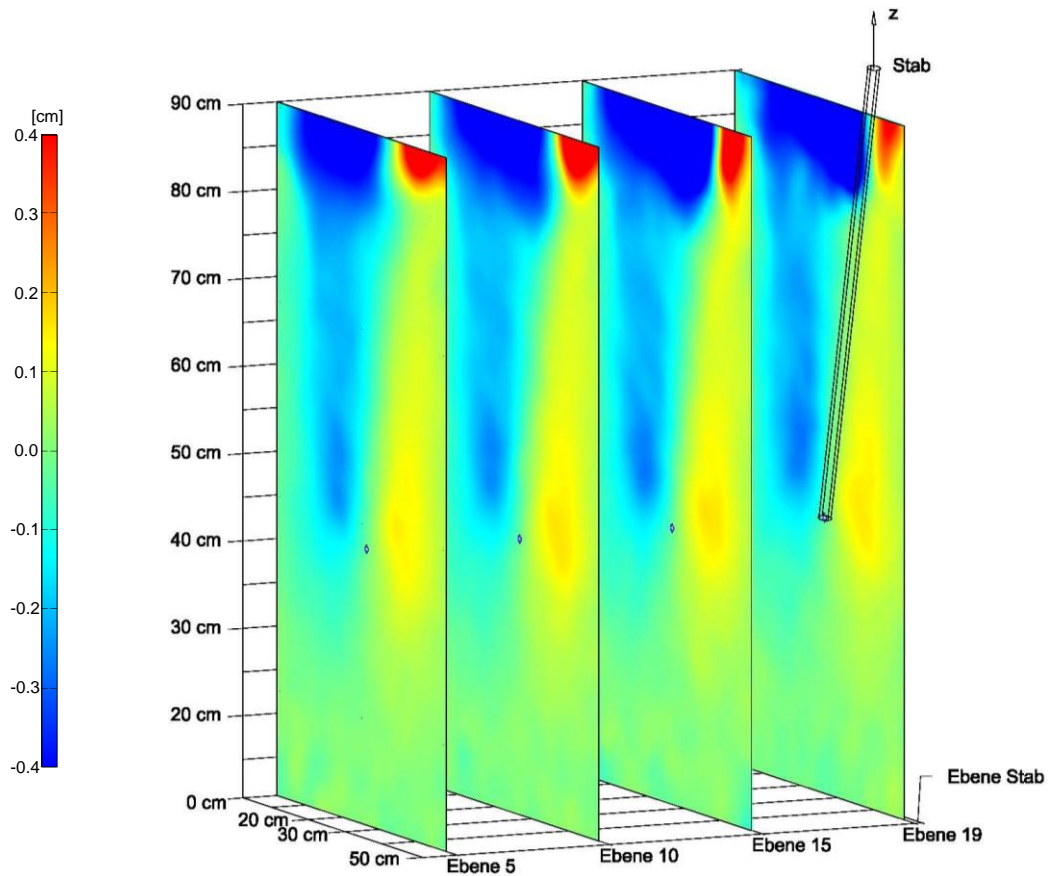


Abb. 5-61: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$ , Auswertung: U-Komponente

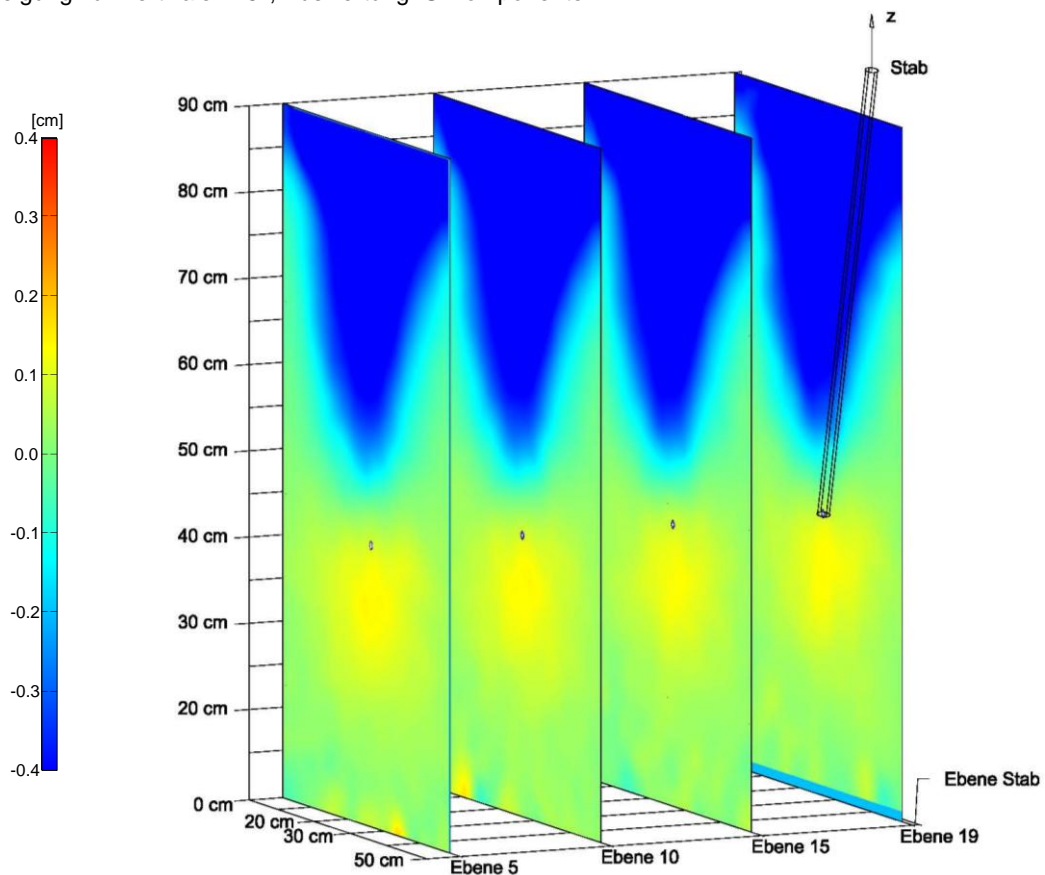


Abb. 5-62: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 50 cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$ , Auswertung: V-Komponente

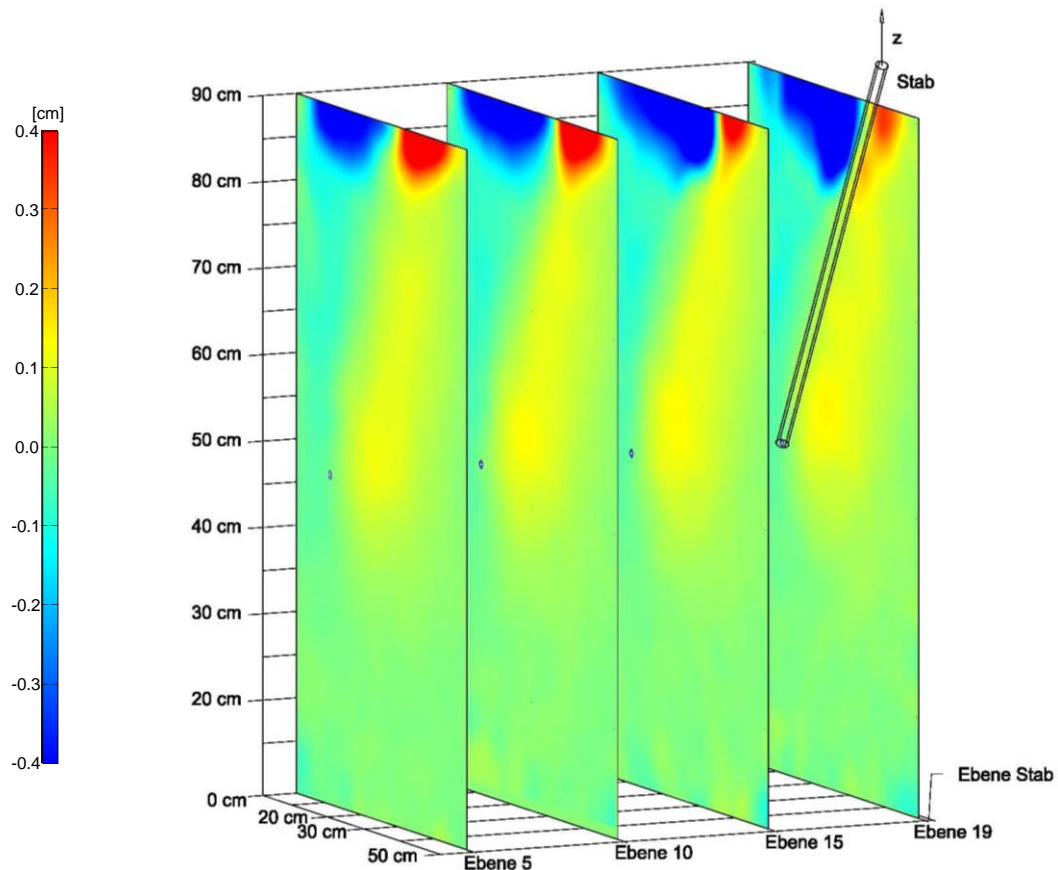


Abb. 5-63: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 43 cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$ , Auswertung: U-Komponente

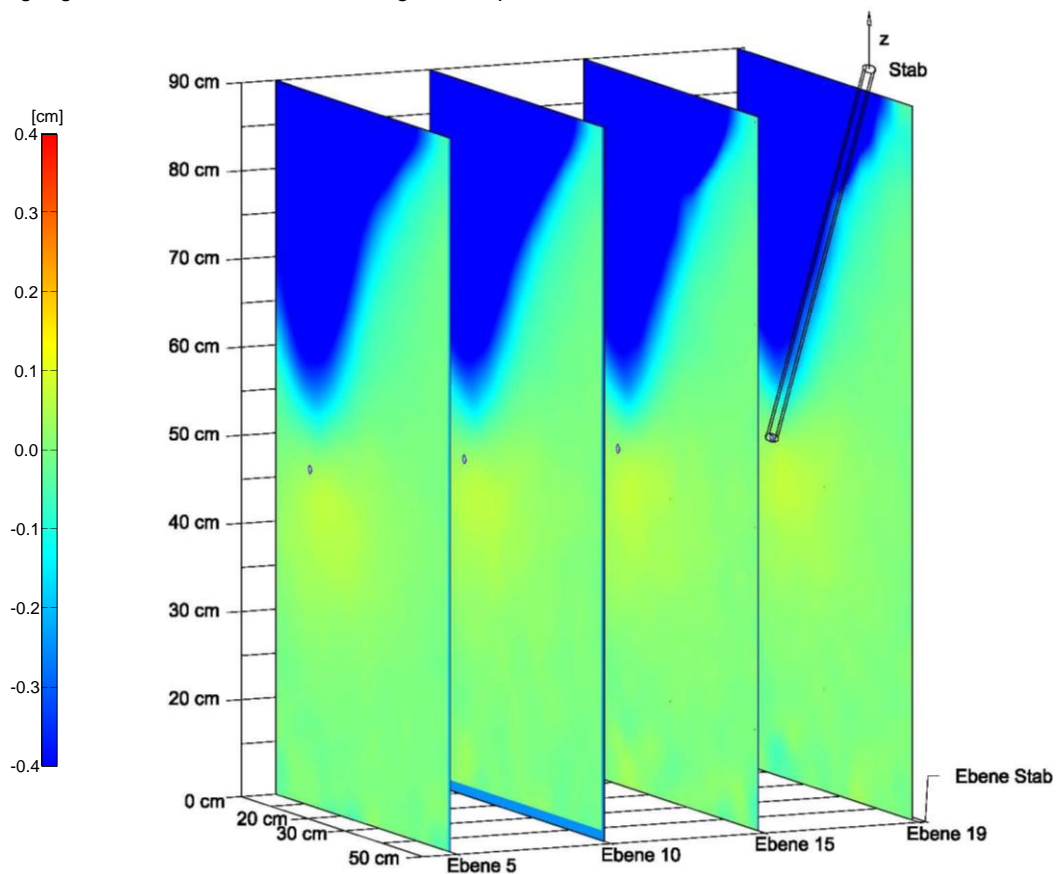


Abb. 5-64: Eindrehvorgang des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 43 cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$ , Auswertung: V-Komponente

### 5.2.3. Versuchsreihe 3

Man erkennt in der Versuchsreihe 3 deutlich ausgeprägte und klar definierte Bruchkörper für den Gewindestab mit dem Durchmesser  $\varnothing 15$  mm und  $\varnothing 20$  mm. Die unterschiedlichen Bodenarten, Silica Gel und Kies, ergeben annähernd gleiche Bruchfiguren. Die Bruchfiguren beginnen wenige Zentimeter oberhalb des eingedrehten Stabendes und bilden annähernd einen Kegelstumpf. Der Durchmesser der Bruchfiguren ändert sich nicht bedeutend mit unterschiedlichen Einbautiefen der Stäbe. Im Restbruchkörper ist an den hellblauen Bereichen in Stabachse ersichtlich, dass Bodenpartikel in den Hohlraum während des Zugvorganges nachrutschen und es aus diesem Grund zu Bewegungen in diesen Bereichen kommt, die von PIVLab ausgewertet werden (Abb. 5-67, Abb. 5-68, Abb. 5-71, Abb. 5-72, Abb. 5-75 bis Abb. 5-78). Der Glattstab gleitet sowohl aus dem Bodenkörper Kies als auch aus dem Bodenkörper Silica Gel heraus ohne einen Bruchkörper zu erzeugen. Dieses Verhalten wurde schon in den vorangegangenen Versuchsreihen 1 - 2 gezeigt (Abb. 5-69, Abb. 5-70, Abb. 5-73, Abb. 5-74).

In den folgenden Detailfotos kann man erkennen, wie die Bodenpartikel von dem Gewindestab mitgenommen werden und dieser Vorgang in den oberen Bereichen ausgeprägter ist als am Stabende (Abb. 5-65, Abb. 5-66).

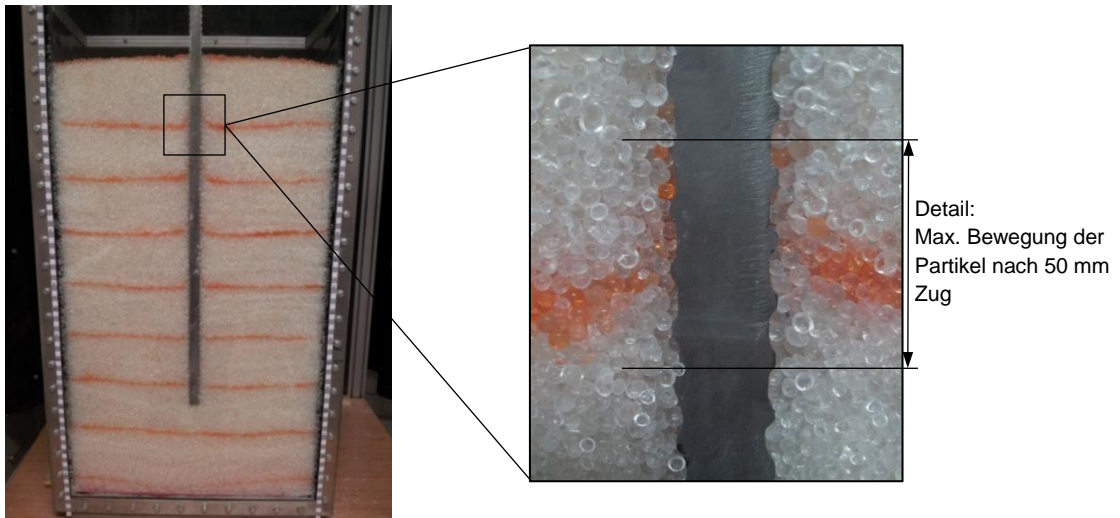


Abb. 5-65: Verschiebungsbild des Gewindestabes nach 50 mm Zug in Silica Gel

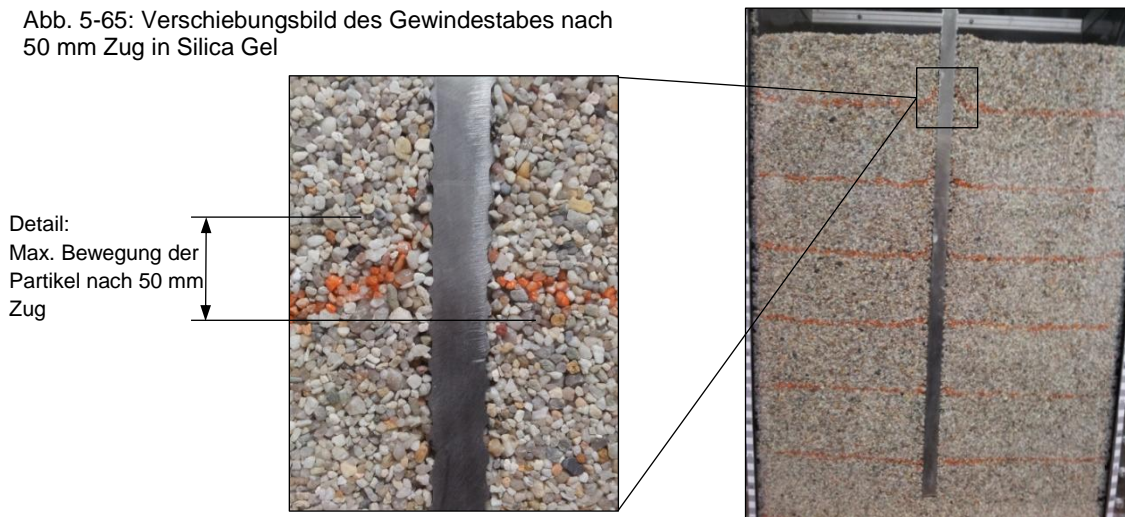


Abb. 5-66: Verschiebungsbild des Gewindestabes nach 50 mm Zug in Kies



**Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm**

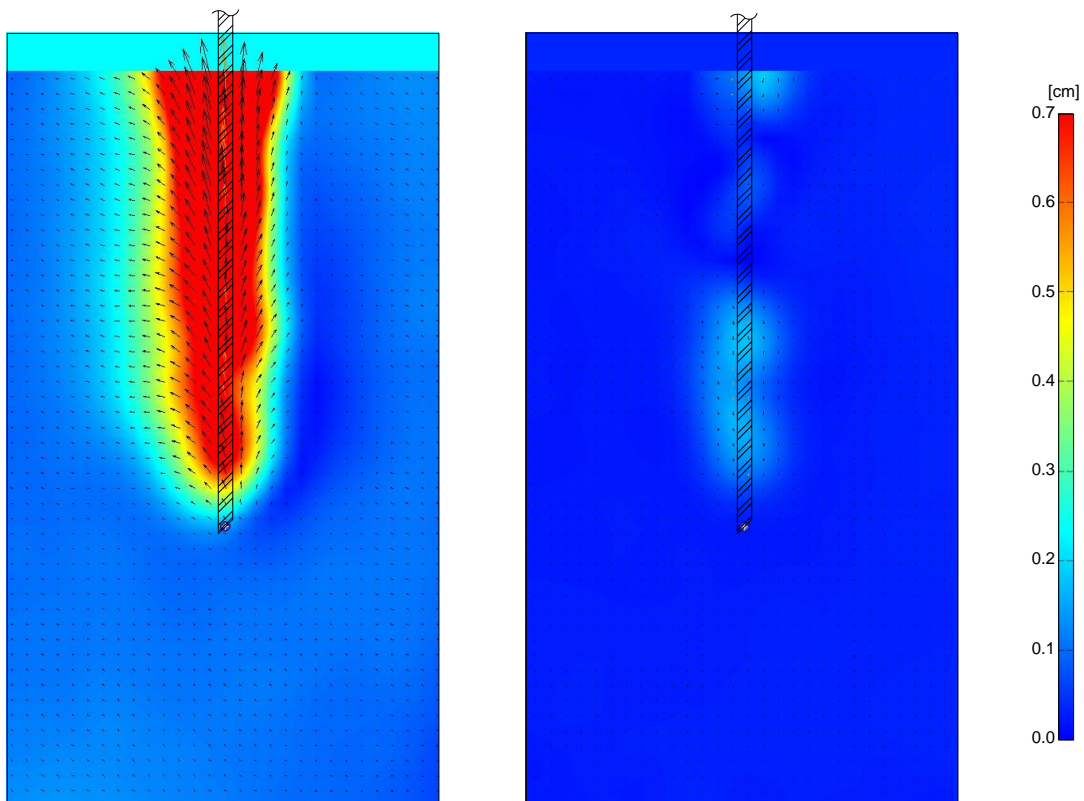


Abb. 5-67: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

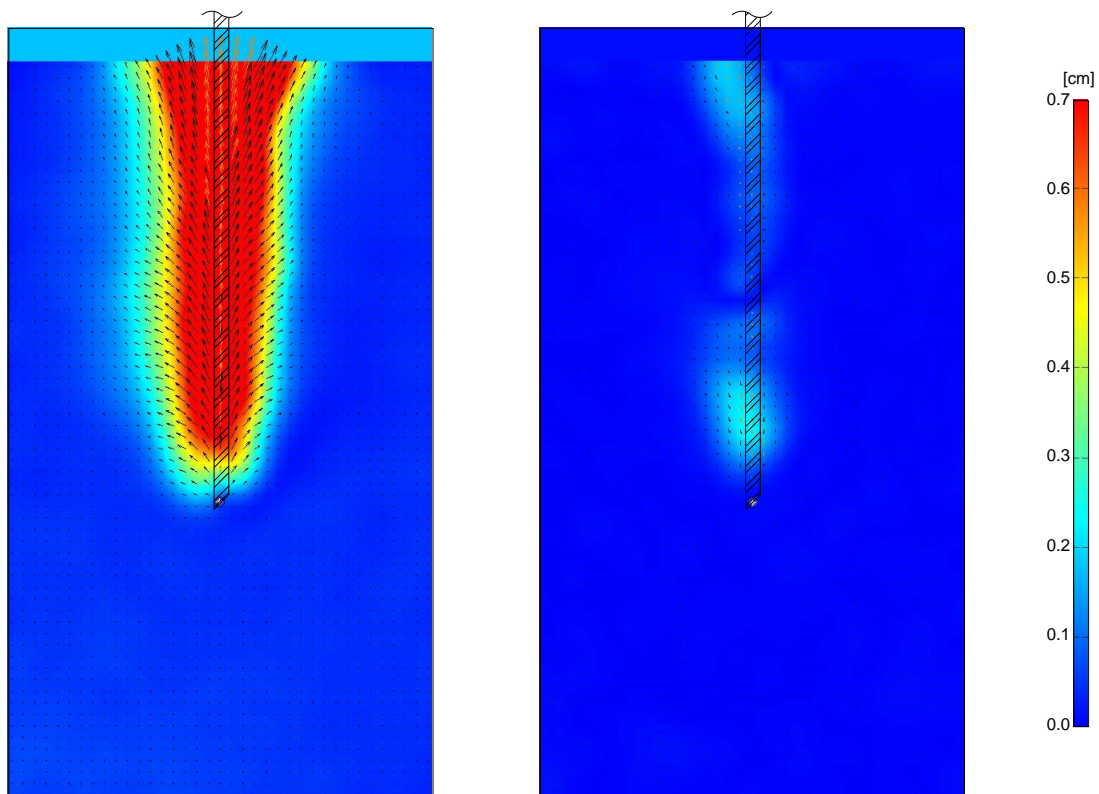


Abb. 5-68: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

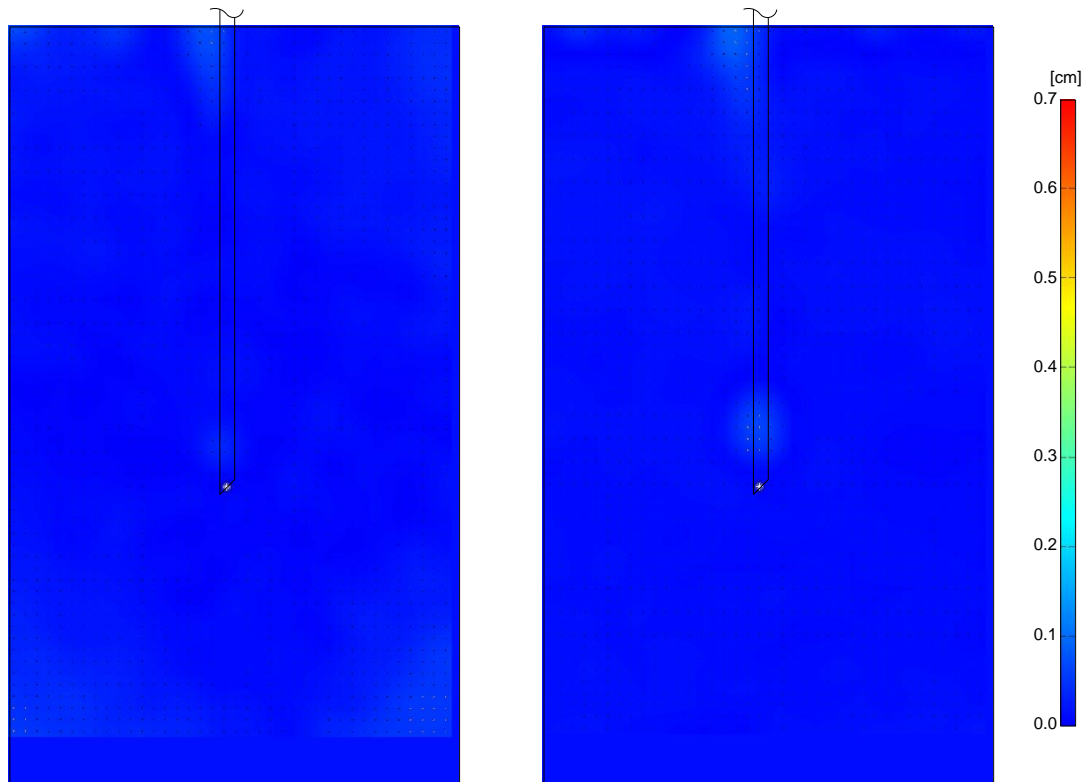
**Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm**


Abb. 5-69: Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

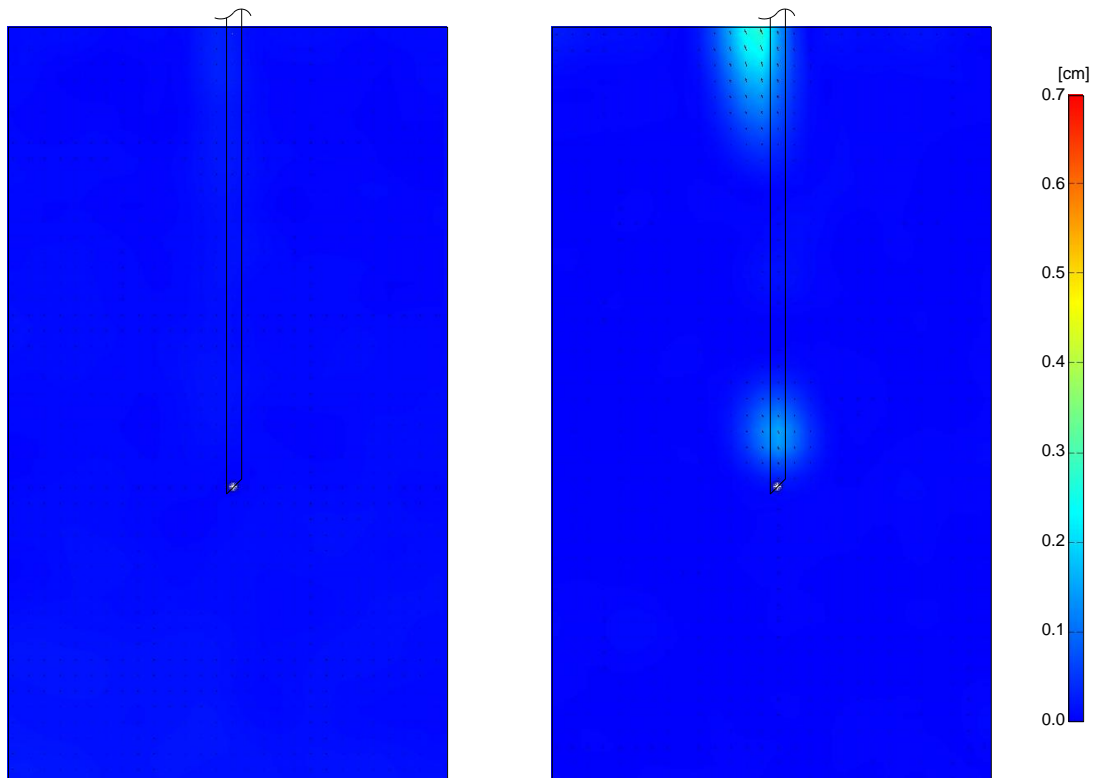


Abb. 5-70: Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

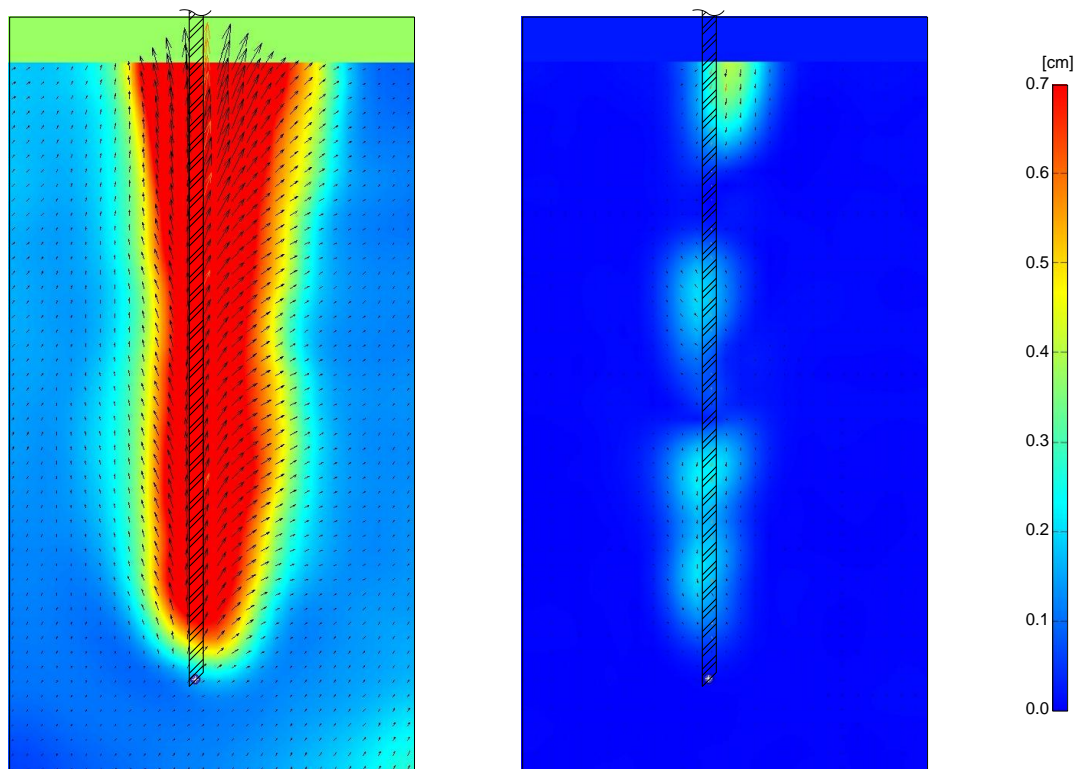
**Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm**


Abb. 5-71: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

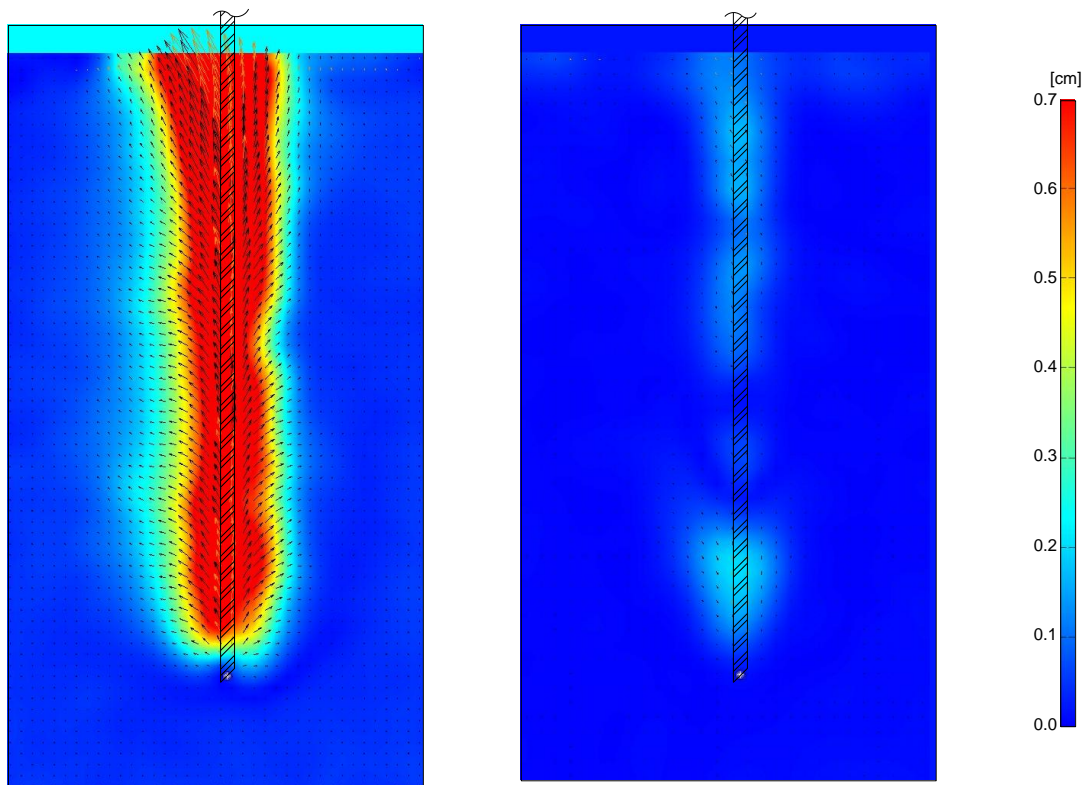


Abb. 5-72: Gewindestab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper



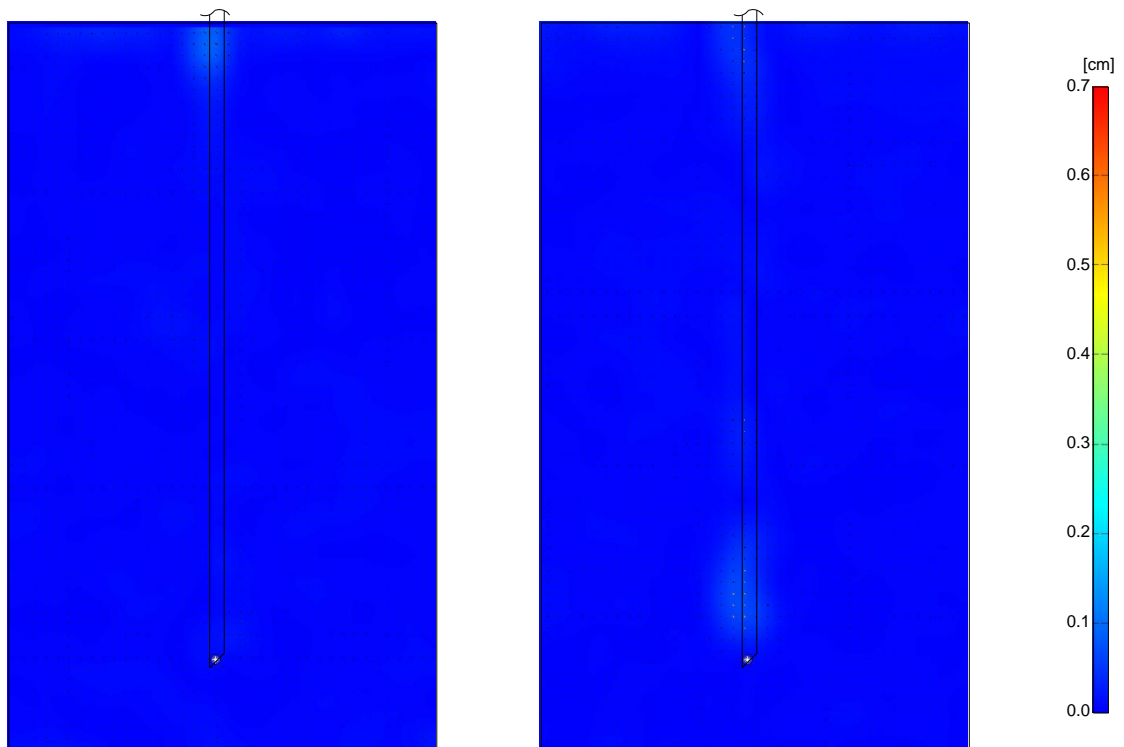
**Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm**

Abb. 5-73: Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies  
Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
Rechtes Bild: Restbruchkörper

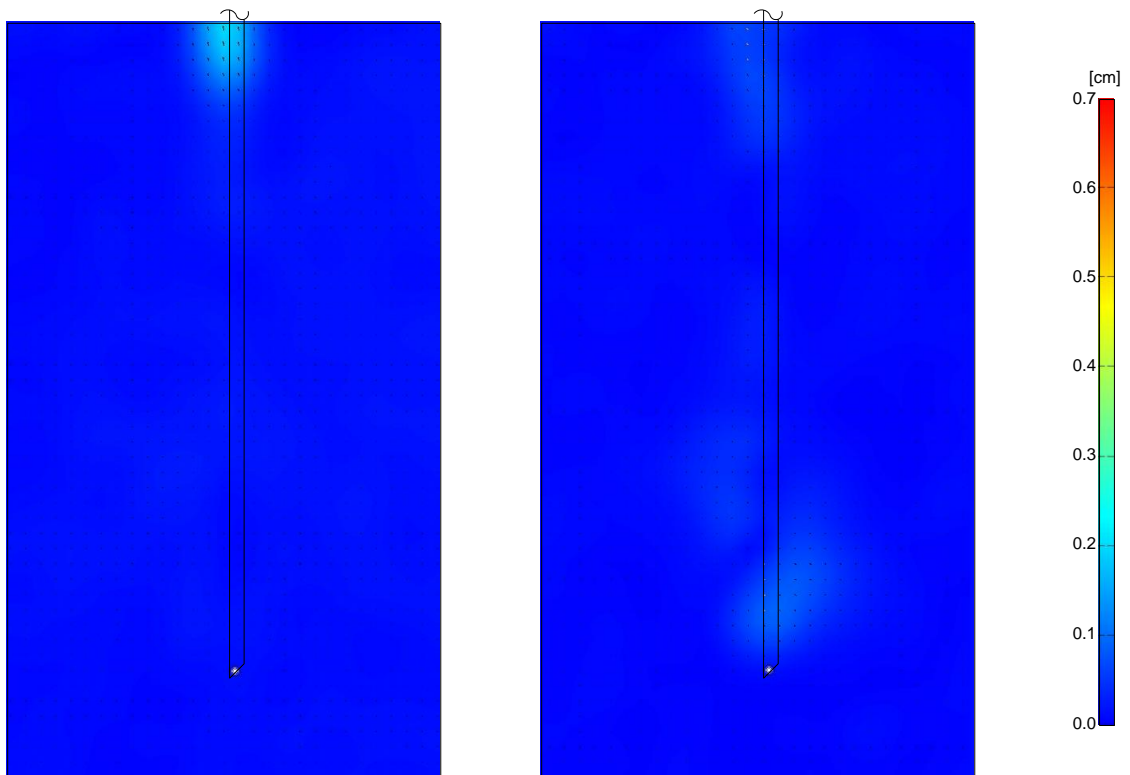


Abb. 5-74: Glattstab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica  
Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
Rechtes Bild: Restbruchkörper

**Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 50 cm**

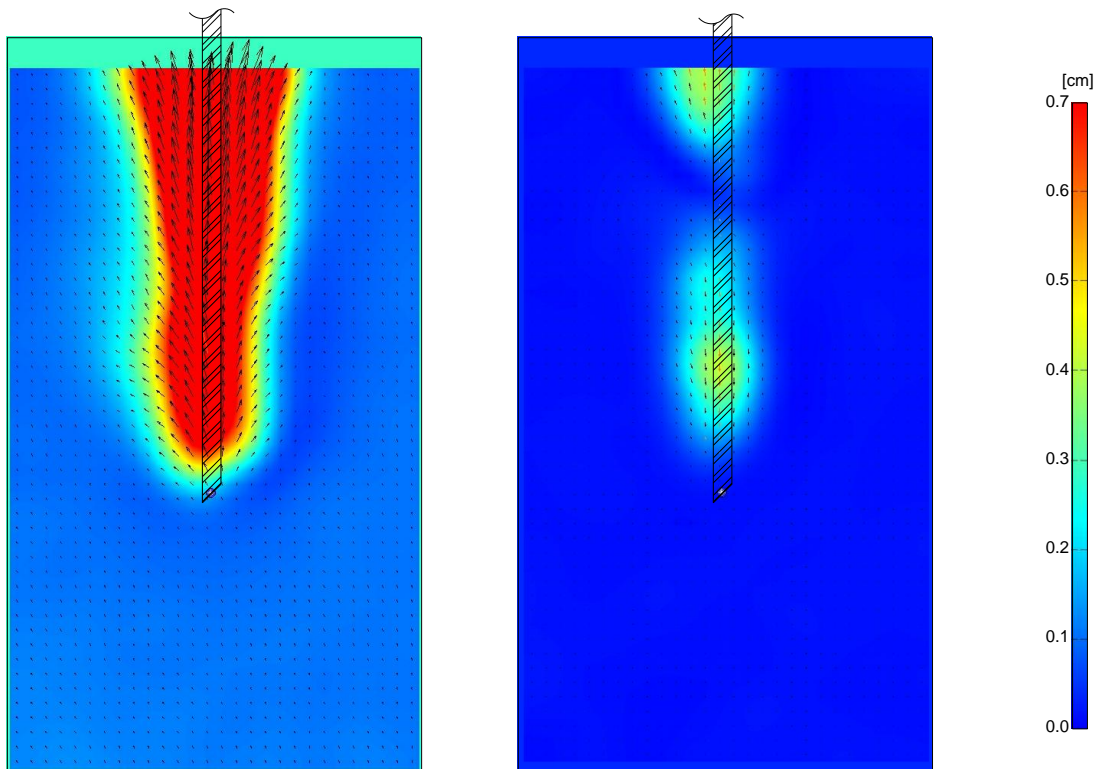


Abb. 5-75: Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 50 cm – Kies

Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug

Rechtes Bild: Restbruchkörper

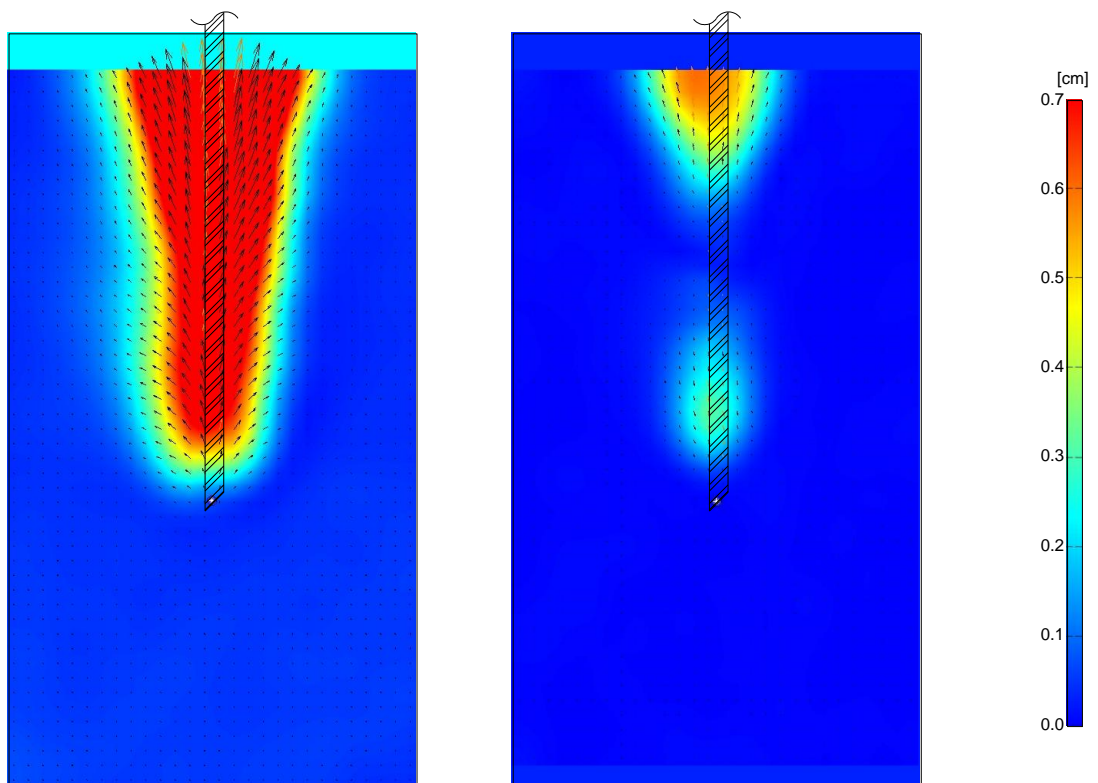


Abb. 5-76: Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 50 cm – Silica

Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug

Rechtes Bild: Restbruchkörper

**Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm**

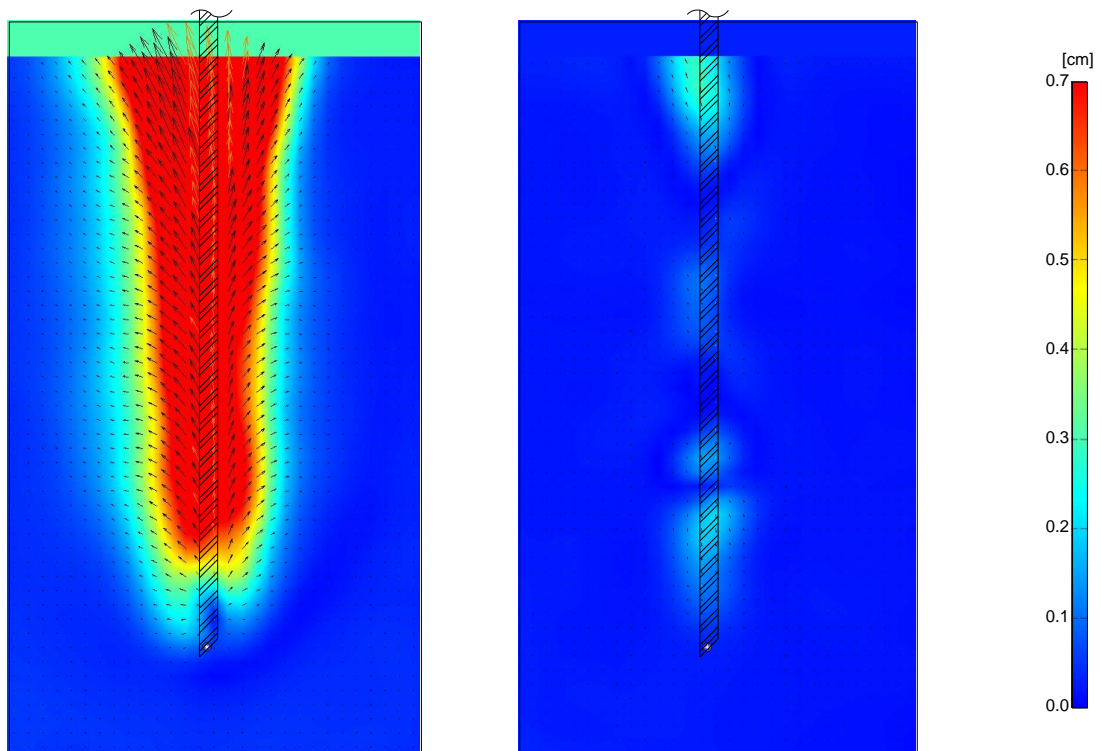


Abb. 5-77: Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm – Kies  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

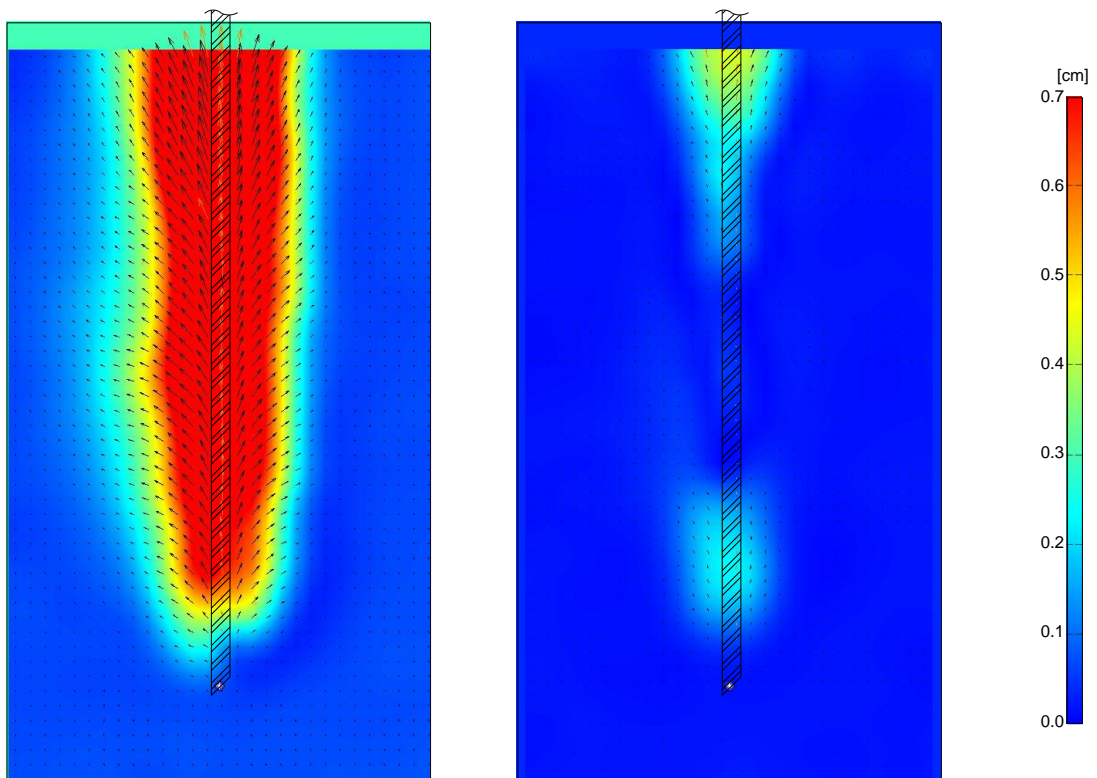


Abb. 5-78: Gewindestab  $\varnothing$  20 mm, Einbautiefe 70 cm – Silica  
 Linkes Bild: Bruchkörper nach 7,5 mm Zug  
 Rechtes Bild: Restbruchkörper

## 6. Gegenüberstellung Versuchsergebnisse und Modellvorstellungen

### Modellvorstellungen

Die Messergebnisse und die visuellen Auswertungen ermöglichen eine allgemeine Aussage über das Ausziehverhalten eines Stabes aus einem Bodenkörper und die Auswirkungen auf diesen.

Durch die Versuche wurde festgestellt, dass ein Gewindestab, der aus einem Bodenkörper gezogen wird, einen sich nach unten verjüngenden Bruchkörper hervorruft. Der den Stab umgebende Boden hängt sich an den Gewindestab an, bis eine maximale Zugkraft erreicht ist. Danach nimmt die Zugkraft ab und der Stab gleitet aus dem Bodenkörper heraus, ohne ein weiteres Anhängen des Bodens an den Stab. Es entsteht um den Stab ein Spannungsbereich infolge Dilatanz während des Zugvorganges.

Dieses Verhalten beschreiben sowohl Quarg-Vonscheidt (2000), Blinde & Witt (1980) und Wernick (1978) wie im Kapitel 2.4 beschrieben.

Die Annahme, dass das Bodenvolumen des Bruchkörpers vom Schlankheitsgrad des Pfahles und der Pfahlänge abhängt, wie Chattopadhyay & Pise (1986) annehmen, wurde in den Versuchen mit unterschiedlichen Einbautiefen und Stabdurchmessern bestätigt, wie in Kapitel 5 ausführlich belegt ist.

Jelinek & Ostermayer (1964) nehmen in ihrem Berechnungsansatz, wie im Kapitel 2.4.1 beschrieben, den Bruchkörper als Kegelstumpf an. Der Bruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing 15$  mm mit einer Einbautiefe von 50 cm, bildet sich in der Versuchsreihe 1 (Kapitel 5.2.1) als Kegelstumpf aus und kann folglich mit dem Berechnungsansatz von Jelinek & Ostermayer (1964) verglichen werden.

Die höheren Zugkräfte infolge des Eindrehens des Stabes und des Verdichtens des Bodenkörpers wurden in den Versuchen bestätigt. Diese Aussage wurde auch von Wernick (1978) getroffen und in seinen Versuchen nachgewiesen.



## 7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Versuche in dieser Masterarbeit konnten die erwünschten Ergebnisse einer visuellen Darstellung von Bruchkörpern liefern.

Forschungen im Bereich transparenter Boden sollten in jedem Fall weiterverfolgt werden, da die Ergebnisse auf diesem Teilgebiet außerordentlich erfolgreich waren. Aufbauend auf die Literatur von Iskander (2010) und Zhao (2007) wurde ein neues Mischungsverhältnis des Porenfluids ermittelt, mit dem die Transparenz des Bodenkörpers um ein vielfaches erhöht wurde. In Abb. 7-1 ist die Transparenz des Bodens und die Sichtbarkeit des Stabes erkennbar.

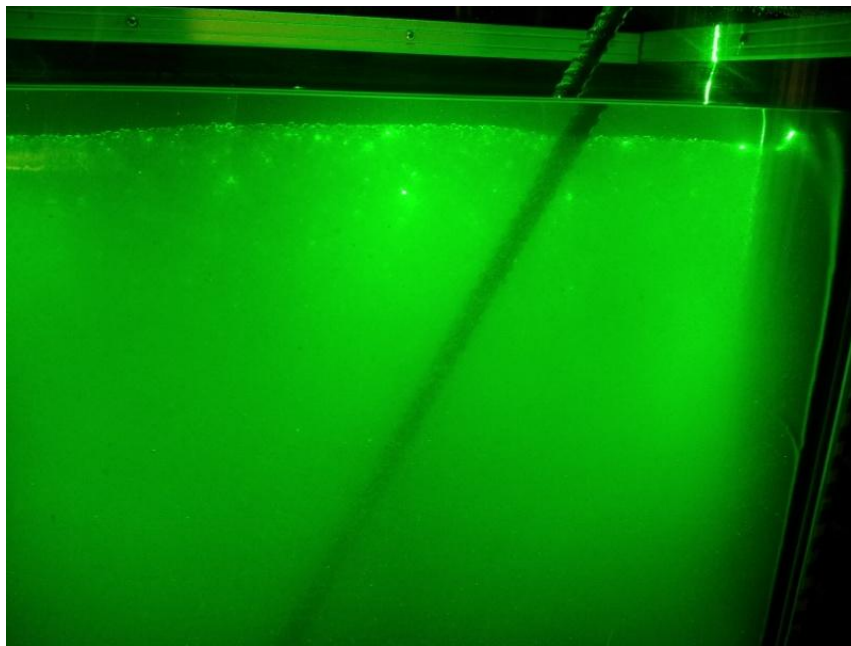


Abb. 7-1: Gewindestab im transparenten Bodenkörper mit gut sichtbarer Laserebene

In der Versuchsreihe 1 (Kapitel 5.2.1), vertikaler Einbau eines Stabes, bildet sich der Bruchkörper bei einem Gewindestab  $\varnothing$  15 mm und einer Einbautiefe von 50 cm bis zwei Drittel der Einbautiefe aus. Bei einer längeren Einbautiefe dieses Gewindestabes ist der Bruchkörper weniger exakt umrissen und daher lässt sich keine eindeutige Aussage über diesen treffen. Die Glattstäbe dieser Versuchsreihe verursachen kein Anhängen des Bodens an den Stab und daher auch keine Verschiebungen im Bodenkörper, sowohl in der Auswertung des maximalen Bruchkörpers als auch in der Auswertung des Restbruchkörpers. Der Restbruchkörper des Gewindestabes zeigt auch das Ausgleiten des Stabes aus dem Bodenkörper. In dieser Versuchsreihe wurde der Einfluss des Stabdurchmessers, der Staboberfläche und der Einbautiefe des Stabes bestätigt.

Auf Grund der visuellen Auswertung der Gewindestäbe mit  $\varnothing$  20 mm und  $\varnothing$  26,5 mm der Versuchsreihe 1 ist festgestellt worden, dass es infolge der zu kleinen Abmessungen des Versuchsbehälters, es zu großen Verspannungen innerhalb des Bodenkörpers kommt. Eine Interpretation der Bruchkörper dieser Stäbe ist nur unter Einschränkungen möglich.

In der Versuchsreihe 2 (Kapitel 5.2.2), geneigter Einbau eines Stabes, wurde der Bodenkörper durch das Auslenken des Stabes aus seiner Achse bewegt. Die entstandenen Bruchkörper sind zusammengesetzt aus angehängtem Bodenvolumen durch den Zugvorgang und einem Verschieben von Bodenvolumen durch das Auslenken. Diese Versuche liefern keine eindeutige Aussage, über einen Bruchkörper infolge eines Zugvorganges eines geneigten Stabes. Der Bruchkörper hat sich hier nur einseitig des Stabes ausgebildet.

In den Ergebnissen der Versuchsreihe 3 (Kapitel 5.2.3) sind deutliche Bruchkörper sichtbar. Die Größe der Bruchkörper des Gewindestabes im Silica Gel sind vergleichbar mit denen, die mit Kies durchgeführt wurden. Hier variiert die Größe des Bruchkörpers je nach Einbautiefe und Stabdurchmesser. Der Glattstab erzeugt keinen Bruchkörper. Diese Ergebnisse beweisen, dass die durchgeführten Versuche mit dem transparenten Bodenmaterial in der Versuchsreihe 1, vergleichbar sind mit Kies. In der Versuchsreihe 3 fehlt der Einfluss des Eindrehens und des daraus resultierenden Verkeilens der Bodenpartikel.

In der Versuchsreihe 4 (Kapitel 5.1.4) wurde bestätigt, dass der Eindrehvorgang des Stabes den wichtigsten Einfluss darstellt. Versuche, die ohne dieses Eindrehen durchgeführt wurden, erreichten eine weitaus geringere maximale Zugkraft.

Weitere Forschungen sollten in die Richtung gehen, den Einfluss der Gewindeart auf die Tragfähigkeit des Stabes zu untersuchen. Dass dieser Faktor maßgebend für die Zugkraft ist, wurde in dieser Masterarbeit in allen Versuchsreihen bewiesen. Modellversuche mit unterschiedlichen Bodenkörpern, wie ein geschichteter Bodenaufbau oder kohäsivem Boden, könnten mit den verschiedenen erhältlichen Silica Varianten (Silica Pulver und Silica Gel) untersucht werden.

Auch Versuche mit unterschiedlichen Einbautiefen des Stabes sollten noch weiter betrachtet werden. Es ist naheliegend, dass der kegelförmige Bruchkörper sich nur in eine gewisse Tiefe ausbreitet und der darunter liegende Bodenkörper nur eine Bewegung entlang der Stabachse ausführt.



## Literaturverzeichnis

- Beguín, R.; Philippe, P.; Faure, Y.-H. (2013)  
*Pore-Scale Flow Measurements at the Interface between a Sandy Layer and a Model Porous Medium: Application to Statistical Modeling of Contact Erosion*  
Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139(1): 1-11.
- Blinde, A. & Witt, K.-J. (1980)  
*Tragfähigkeit von Zugpfählen und Zugankern*  
Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau,  
Forschungsbericht F 1671.
- Bourdeau, P. (1993)  
*Radiographic Visualization in Experimental Soil Mechanics*  
Proc. of the Conference on Digital Image Processing, Kona Hawaii, 125-134.
- Busch, K.-F. & Luckner, L. (1974)  
*Geohydraulik – für Studium und Praxis*  
Stuttgart, Leipzig. Ferdinand Enke Verlag, ISBN: 978-3432023014.
- Butterfield, R. & Andrawes, K. (1971)  
*The visualization of planer displacement field*  
Proc. of the Roscoe Memorial Symposium: Stress Strain Behavior of Soils, Cambridge University, 467-475.
- Chattopadhyay, B.C. & Pise, P.J. (1986)  
*Uplift capacity of Piles in Sand*  
Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112(9): 888-904.
- Cheng, C.-Y.; Atkinson, J.F.; VanBenschoten, J.E.; Bursik, M.I.; DePinto, J.V. (2000)  
*Image-Based System for Particle Counting and Sizing*  
Journal of Environmental Engineering, Vol. 126(3): 258-266.
- Egger, D. (2010)  
*Synthetisch hergestelltes transparentes Lockergestein*  
Bachelor-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Ezzein, F.M. & Bathurst, R.J. (2011)  
*A Transparent Sand for Geotechnical Laboratory Modeling*  
Geotechnical Testing Journal, Vol. 34(6):1-12.
- Ganster, D. (2012a)  
*C++ Programmierung zur automatisierten Erfassung und Verarbeitung von Bildsequenzen*  
Master-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Ganster, K. (2012b)  
*Anleitung zur Herstellung und Einbau von transparentem Boden*  
Master-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Hecht, E. (2005)  
*Optik*  
München, Wien. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, ISBN: 978-3486273595.

- Hettler, A. (1984)  
*Theoretische und experimentelle Untersuchungen vertikaler Zugpfähle in Sand*  
Bauingenieur 59: 87-95.
- Höltling, B. & Coldewey, W.G. (2009)  
*Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*  
Heidelberg. Spektrum Akademischer Verlag, ISBN: 978-3827417138.
- Hryciw, R.D.; Ghalib, A.M.; Raschke, S.A. (1998)  
*Methods for Soil Characterization from Images of Grain Assemblies*  
Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Imaging Technologies, Davos, 88-99.
- Hryciw, R.D. & Ohm, H.-S. (2013)  
*Soil Migration and Piping Susceptibility by the VisCPT*  
Geo-Congress 2013, San Diego, 192-195.
- Iler, R.K. (1979)  
*The Chemistry of Silica*  
New York. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0471024040.
- Iskander, M. (2010)  
*Modeling with Transparent Soils: Visualizing Soil Structure Interaction and Multi Phase Flow, Non-Intrusively*  
Berlin. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, ISBN: 978-3642025006.
- Jelinek, R. & Ostermayer, H. (1964)  
*Zur Tragfähigkeit von Zugpfählen; Rechnerische Grenzbelastung und Versuchsergebnisse bei MV-Pfählen*  
*Felsmechanik, Vol. II/1: 1-8.*
- Kern, M. (2013)  
*FE-Berechnungen von Baugruben im Seeton*  
Masterarbeit, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Ketchman, R.A. & Carlson, W.D. (2001)  
*Acquisition, Optimization and Interpretation of X-ray Computed Tomographic Imagery: Applications to the Geosciences*  
Computers & Geosciences, Vol. 27(4): 381-400.
- Konagai, K.; Tamura, C.; Rangelow, P.; Matsushima, T. (1992)  
*Laser-aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fabric of Granular Assemblage*  
Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.9(3): 193s-201s.
- Kuo, C.; Frost, J.D.; Lai, J.S.; Wang, L.B. (1996)  
*Three-Dimensional Image Analysis of Aggregate Particles from Orthogonal Projections*  
Transportation Research Record, Vol. 1526: 98-103.
- Liu, P.; Zhu, D.; Zhang, H.; Shi, X.; Sun, H.; Dang, F. (2008)  
*Sorption of Polar and Nonpolar Aromatic Compounds to four Surface Soils of Eastern China*  
Environmental Pollution, Vol. 156: 1053-1060.
- Lo, H.-C.; Iskander, M.; Tabe, K. (2008)  
*Modeling of 2D Flow Using Transparent Aquabeads*  
GeoCongress 2008, New Orleans, 838-845.

- Mandava, S.S.; Watson, A.T.; Edwards, C.M. (1990)  
*NMR Imaging of Saturation during Immiscible Displacements*  
AIChE Journal, Vol. 36(11): 1680-1686.
- Mors, H. (1959)  
*Das Verhalten von Mastgründungen bei Zugbeanspruchung*  
Die Bautechnik, Jg.36, Heft 10: 367-378.
- Mörchen, N. (2003)  
*Zur Grenzlast eines Druckpfahls – Untersuchungen für den Einzel- und den Gruppenpfahl*  
Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bergischen Universität – Gesamthochschule Wuppertal.
- Muhunthan, B. & Chameau, J.L. (1992)  
*Mathematical Characterization of Fabric and its Use in Mechanics of Geomaterials*  
Proc. of the 9<sup>th</sup> Conf. Engineering Mechanics, Texas, 725-728.
- Ng, T.; Kelley, M.; Sampson, J. (1996)  
*MRI Results of Direct Shear Tests on Round Particles*  
Proc. of the 11<sup>th</sup> Conf. Engineering Mechanics, Florida, Vol. 1: 572-575.
- Oblasser, M. (2011)  
*Bodenmechanische Charakterisierung eines Silica Gels für eine Korngrößenverteilung von 2 – 5 mm*  
Master-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- ÖNORM B 4422-1 (1992)  
*Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit Laborprüfung*  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM EN 14370 (2004)  
*Grenzflächenaktive Stoffe: Bestimmung der Oberflächenspannung*  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- Orsi, T.H.; Anderson, A.L.; Leonard, J.N.; Bryant, W.R.; Edwards, C.M. (1992)  
*Use of X-Ray Computed Tomography in the Study of Marine Sediments*  
Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. Civil Engineering in the Oceans, Texas, 968-982.
- Penumadu, D. & Hazen, I. (1998)  
*Geo-Material Characterization using Digital Micrograph Analysis*  
Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int.Conf. Imaging Technologies, Davos, 66-75.
- Poprask, K. (2011)  
*Versuchsaufbau für räumlich-visuelle Beobachtungen von Boden-Bauwerks Interaktionen im Rahmen eines Forschungsprojektes*  
Master-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Poprask, K. (2013)  
*Anleitung zur Auswertung von Silica Gel Partikel-Bewegungen an einer Laserlichtwand mit Hilfe der PIV-Methode*  
Bachelor-Projekt, Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.

- Quarg-Vonscheidt, J. (2000)  
*Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit und das Gruppenverhalten von Zugpfählen*  
Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bergischen Universität – Gesamthochschule Wuppertal.
- Roscoe, K.; Arthur, J.; James, R. (1963)  
*The Determination of Strains in Soils by X-ray Method*  
Civil Engineering and Public Works Review 58: 873-876.
- Shi, B.; Murakami, Y.; Wu, Z.; Chen, J.; Inyang, H. (1999)  
*Monitoring of Internal Failure Evolution in Soils using Computerization X-ray Tomography*  
Engineering Geology 54: 321-328.
- Supp, G. & Semprich, S. (2010)  
*Spinnanker – ein neues Konstruktionselement*  
7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern, Technische Akademie Esslingen, 259-284.
- Supp, G. (2011)  
*Tragfähigkeitsuntersuchungen von Fächerankern in synthetisch hergestelltem, transparentem Boden*  
Beitragsband zum 13. Geo-DACH Treffen, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, Deutschland.
- Vees, G. (2009)  
*Grundlagen der Lasersicherheit*  
Wien, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt.
- Weil, G.; Graf, R.; Forister, L. (1993)  
*Non-Destructive Remote Sensing of Hazardous Waste Sites*  
Proc. of the Conference on Digital Image Processing, Kona Hawaii, 279-284.
- Welker, A.L.; Bowders, J.J.; Gilbert, R.B. (1999)  
*Applied Research Using a Transparent Material with Hydraulic Properties Similar to Soil*  
ASTM Geotechnical testing journal, Vol. 22(3): 266-270.
- Wernick, E. (1978)  
*Tragfähigkeit zylindrischer Anker in Sand unter besonderer Berücksichtigung des Dilatanzverhaltens*  
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 75.
- Witt, K.J. (2008)  
*Grundbau Taschenbuch*  
Berlin. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG, ISBN: 978-3433018439.
- Zhao, H. (2007)  
*Development and Assessment of Transparent Soil and Particle Image Velocimetry in Dynamic Soil-structure Interaction*  
Dissertation, University of Missouri-Rolla.

## Linkverzeichnis

URL: [http://www12.ovgu.de/iwf/labore\\_iwf/wt/13/l13bvs.html](http://www12.ovgu.de/iwf/labore_iwf/wt/13/l13bvs.html), Datum des Zugriffs 12.08.2012

URL: <http://www.annahuetten.com>, Datum des Zugriffs 19.08.2012

URL: <http://www.carlroth.com/catalogue/startChemCatalogue.do?lang=de&market=AT>, Datum des Zugriffs 09.08.2012

URL: <http://www.geophysik.uni-muenchen.de/research/archaeologicalprospection/georadar>, Datum des Zugriffs 15.08.2012

URL: <http://www.spinnanker.com>, Datum des Zugriffs 23.02.2013

URL: [http://www.unilabkorea.com/eng/02\\_sili\\_merck\\_hplc.html](http://www.unilabkorea.com/eng/02_sili_merck_hplc.html), Datum des Zugriffs: 02.10.2012

URL: [http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/ph2\\_02/p202\\_l05/p202\\_l05.html](http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/ph2_02/p202_l05/p202_l05.html), Datum des Zugriffs 16.08.2012

## A: Ergebnisse der Untersuchungen für ein geeignetes Fluid

### Fluid

Temperatur T [°C]	Brechungsindex $n_D$ [ - ]										
	Toluol/2-Propanol								H <sub>2</sub> O	2-Propanol	Toluol
	1:1.149	1:1.075	1:0.751	1:0.722	1:0.609	1:0.596	1:0.579	1:0.548			
15	1,4314	1,4330	1,4426	1,4440	1,4492	1,4505	1,4511	1,4562	1,3335	1,3791	1,4992
18	1,4300	1,4315	1,4401	1,4419	1,4478	1,4490	1,4496	1,4547	1,3331	1,3779	1,4967
<b>20</b>	<b>1,4290</b>	<b>1,4310</b>	<b>1,4410</b>	<b>1,4420</b>	<b>1,4470</b>	<b>1,4480</b>	<b>1,4490</b>	<b>1,4584</b>	1,3330	1,3770	1,4967
23	1,4267	1,4290	1,4389	1,4404	1,4451	1,4463	1,4471	1,4518	1,3327	1,3758	1,4950
25	1,4255	1,4281	1,4340	1,4379	1,4441	1,4453	1,4460	1,4480	1,3325	1,3752	1,4940

Tabelle A-1: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex

Temperatur T [°C]	Toluol [g]	2-Propanol [g]	Toluol [Massen-%]	2-Propanol [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [ - ]
20°C	209,90	157,61	57,11	42,89	1,4410
	155,00	111,90	58,07	41,93	1,4420
	175,57	124,43	58,52	41,48	1,4430
	178,89	121,11	59,63	40,37	1,4440
	180,11	119,90	60,03	39,97	1,4450
	182,62	117,38	60,87	39,13	1,4460
	186,48	113,52	62,16	37,84	1,4470
	187,98	112,02	62,66	37,34	1,4480
	197,92	114,58	63,33	36,67	1,4490
	171,24	140,21	54,98	45,02	1,4390
	162,55	137,61	54,15	45,85	1,4380
	168,99	146,07	53,64	46,36	1,4370
	158,49	143,51	52,48	47,52	1,4360
	178,60	167,30	51,63	48,37	1,4350
	145,55	156,45	48,20	51,80	1,4310
	131,09	173,61	43,02	56,98	1,4250
	122,46	192,20	38,92	61,08	1,4200
	142,60	138,10	50,80	49,20	1,4340
	140,52	139,90	50,11	49,89	1,4330
	138,41	142,80	49,22	50,78	1,4320
132,65	147,35	47,38	52,63	1,4300	
<b>130,29</b>	<b>149,71</b>	<b>46,53</b>	<b>53,47</b>	<b>1,4290</b>	
127,85	152,15	45,66	54,34	1,4280	
120,85	149,15	44,76	55,24	1,4270	
118,34	151,66	43,83	56,17	1,4260	

Tabelle A-2: Mischungsverhältnis Toluol/2-Propanol für unterschiedliche Brechungsindizes



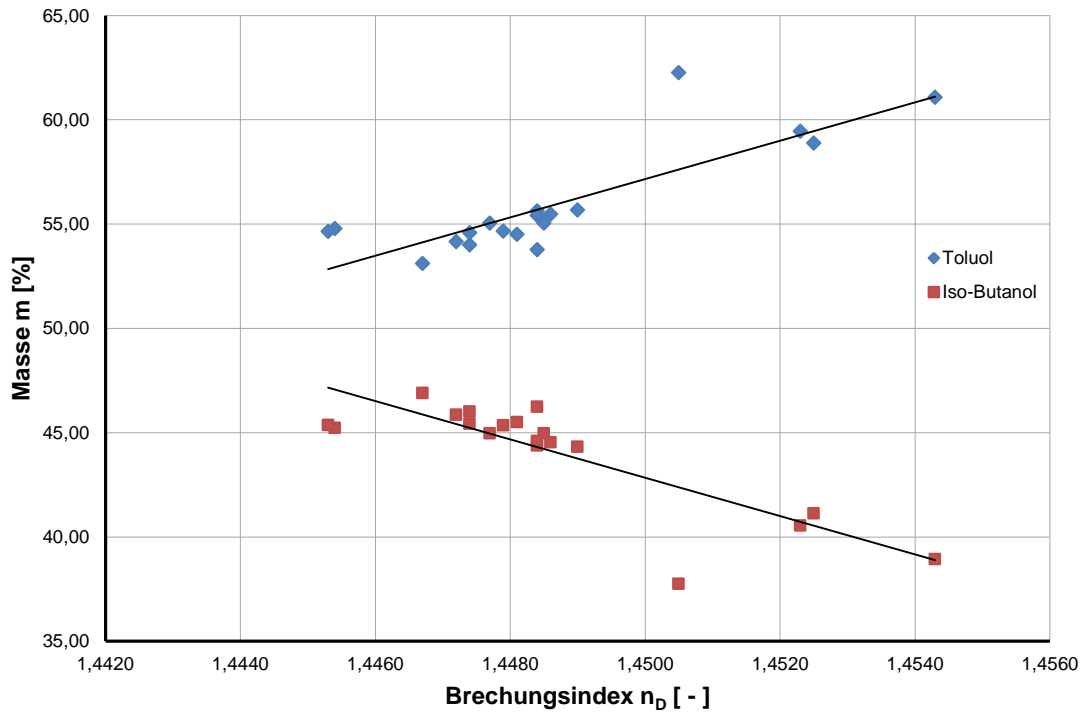


Abb. A-1: Mischungsverhältnis Toluol/Iso-Butanol

Temperatur T [°C]	Toluol [g]	Iso-Butanol [g]	Toluol [Massen-%]	Iso-Butanol [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]
20°C	5,18	3,14	62,26	37,74	1,4505
	5,22	4,19	55,47	44,53	1,4486
	3,05	2,08	59,45	40,55	1,4523
	6,01	3,83	61,08	38,92	1,4543
	6,10	4,26	58,88	41,12	1,4525
	6,24	5,51	53,11	46,89	1,4467
	6,03	4,80	55,68	44,32	1,4490
	6,06	4,95	55,04	44,96	1,4485
	6,07	5,17	54,00	46,00	1,4474
	6,11	5,10	54,50	45,50	1,4481
	6,13	5,10	54,59	45,41	1,4474
	6,11	5,07	54,65	45,35	1,4479
	6,13	5,06	54,78	45,22	1,4454
	6,12	5,08	54,64	45,36	1,4453
	9,77	8,27	54,16	45,84	1,4472
	9,78	7,99	55,04	44,96	1,4477
	9,89	7,89	55,62	44,38	1,4484
183,90	148,00	55,41	44,59	1,4484	
80,00	68,80	53,76	46,24	1,4484	

Tabelle A-3: Mischungsverhältnis Toluol/Iso-Butanol

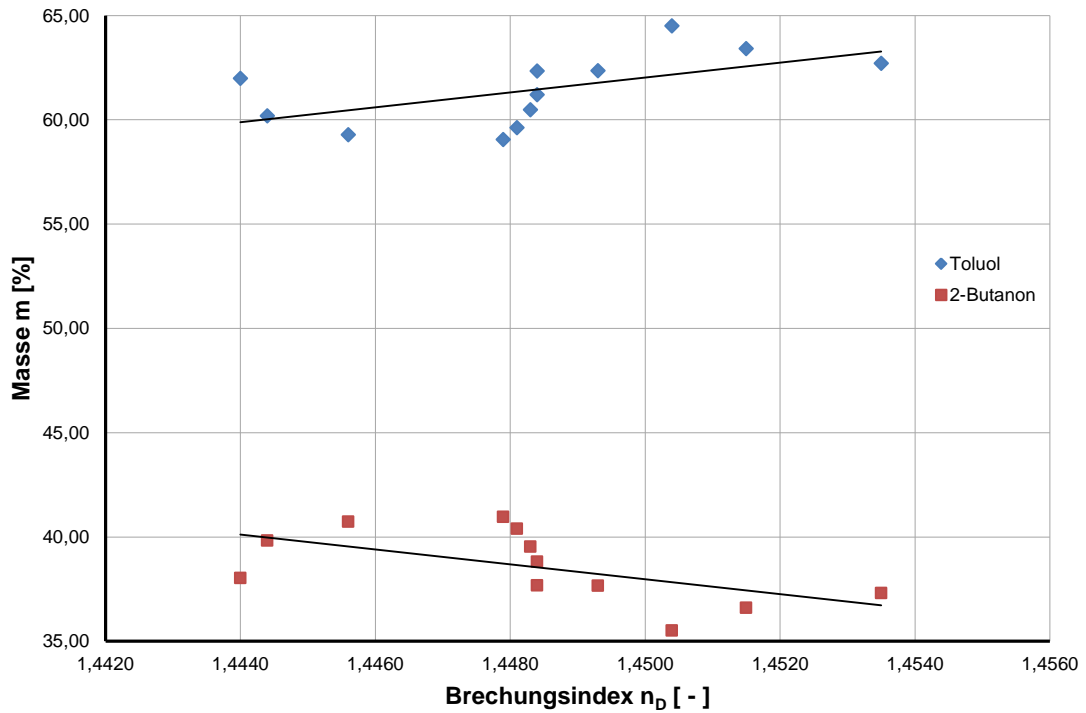


Abb. A-2: Mischungsverhältnis Toluol/2-Butanon

Temperatur T [°C]	Toluol [g]	2-Butanon [g]	Toluol [Massen-%]	2-Butanon [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]
20°C	5,08	3,49	59,28	40,72	1,4456
	4,99	2,88	63,41	36,59	1,4515
	5,85	3,22	64,50	35,50	1,4504
	5,11	3,38	60,19	39,81	1,4444
	5,02	3,08	61,98	38,02	1,4440
	5,01	2,98	62,70	37,30	1,4535
	5,08	3,07	62,33	37,67	1,4484
	8,28	5,00	62,35	37,65	1,4493
	24,82	15,74	61,19	38,81	1,4484
	25,50	16,67	60,47	39,53	1,4483
	200,00	138,74	59,04	40,96	1,4479
	61,40	41,60	59,61	40,39	1,4481

Tabelle A-4: Mischungsverhältnis Toluol/2-Butanon

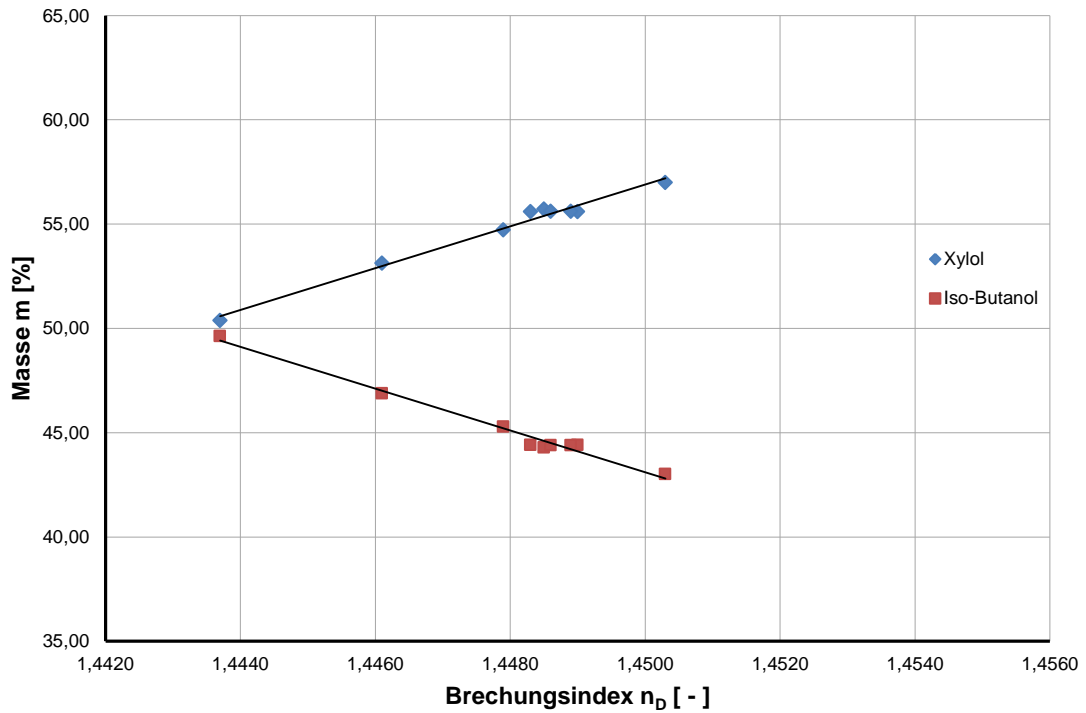


Abb. A-3: Mischungsverhältnis Xylol/Iso-Butanol

Temperatur T [°C]	Xylol [g]	Iso-Butanol [g]	Xylol [Massen-%]	Iso-Butanol [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]
20°C	3,75	1,53	71,02	28,98	1,4649
	5,04	2,04	71,19	28,81	1,4647
	5,38	4,06	56,99	43,01	1,4503
	4,04	3,98	50,37	49,63	1,4437
	3,99	3,52	53,13	46,87	1,4461
	4,00	3,31	54,72	45,28	1,4479
	4,02	3,21	55,60	44,40	1,4483
	7,51	6,00	55,59	44,41	1,4490
	10,02	8,00	55,60	44,40	1,4489
	12,58	10,00	55,71	44,29	1,4485
15,03	12,00	55,60	44,40	1,4486	

Tabelle A-5: Mischungsverhältnis Xylol/Iso-Butanol

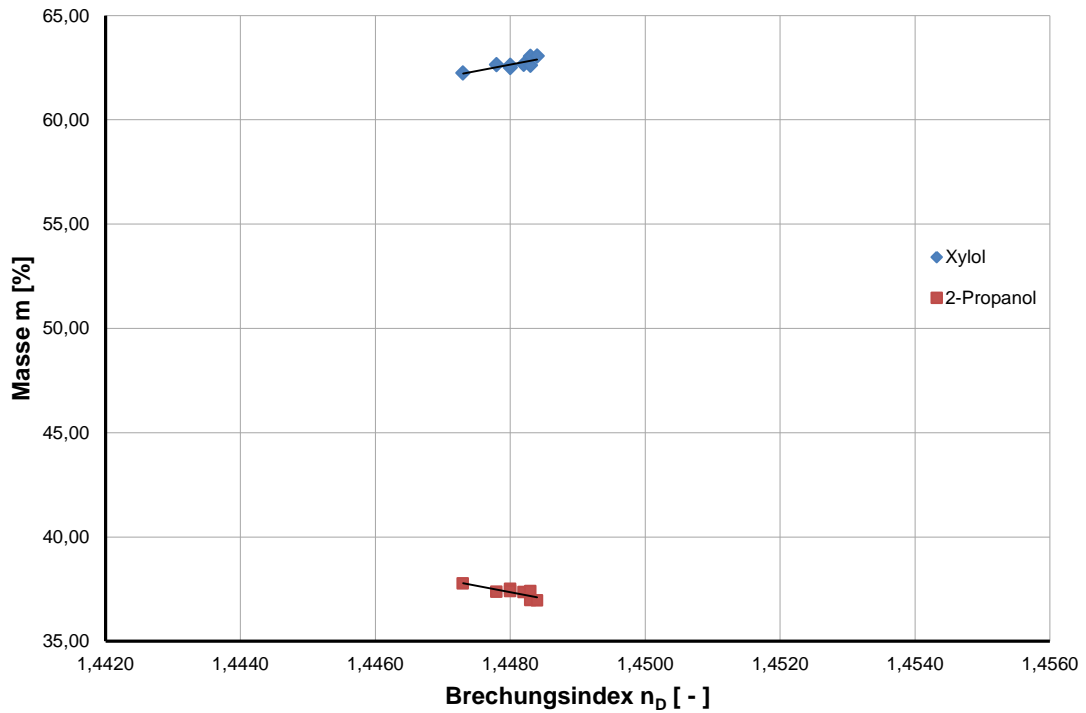


Abb. A-4: Mischungsverhältnis Xylol/2-Propanol

Temperatur T [°C]	Xylol [g]	2-Propanol [g]	Xylol [Massen-%]	2-Propanol [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]
20°C	5,04	2,58	66,14	33,86	1,4521
	5,00	2,13	70,13	29,87	1,4569
	5,01	3,04	62,24	37,76	1,4473
	5,00	3,00	62,50	37,50	1,4480
	5,10	3,04	62,65	37,35	1,4482
	8,37	5,00	62,60	37,40	1,4483
	11,72	7,00	62,61	37,39	1,4480
	16,77	10,00	62,64	37,36	1,4478
	17,06	10,00	63,05	36,95	1,4483
34,13	20,00	63,05	36,95	1,4484	

Tabelle A-6: Mischungsverhältnis Xylol/2-Propanol

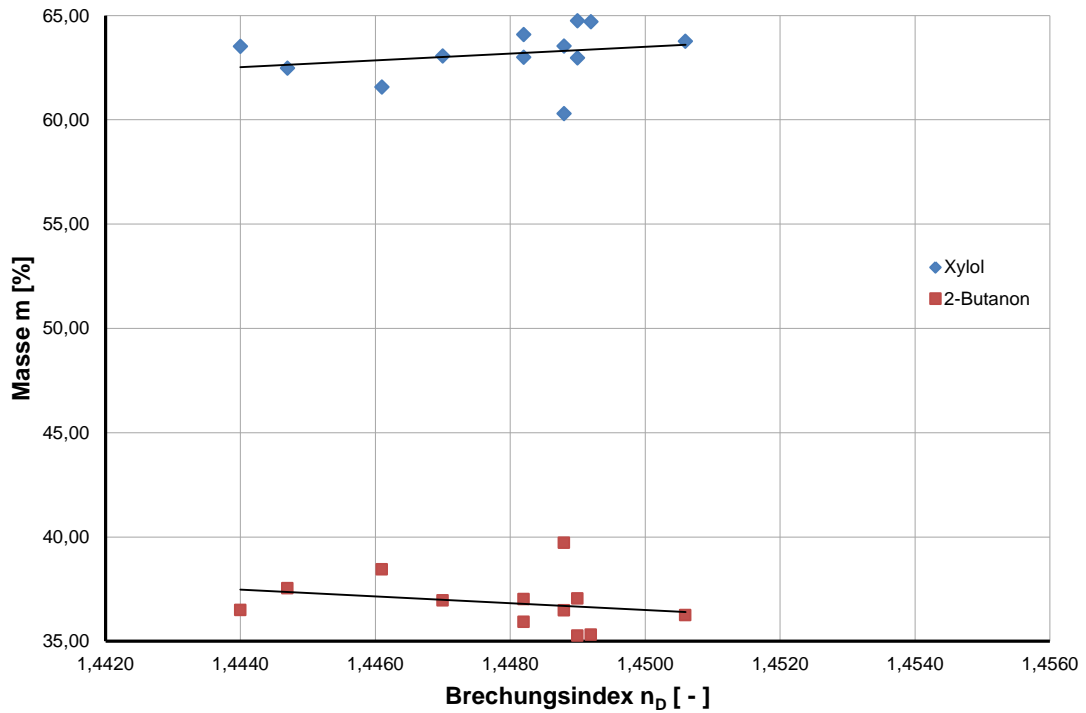


Abb. A-5: Mischungsverhältnis Xylol/2-Butanon

Temperatur T [°C]	Xylol [g]	2-Butanon [g]	Xylol [Massen-%]	2-Butanon [Massen-%]	Brechungsindex $n_D$ [-]
20 °C	5,09	4,96	50,65	49,35	1,4358
	5,30	2,40	68,83	31,17	1,4496
	5,24	2,86	64,69	35,31	1,4492
	5,35	3,04	63,77	36,23	1,4506
	5,09	2,99	63,00	37,00	1,4482
	9,18	5,00	64,74	35,26	1,4490
	17,00	10,00	62,96	37,04	1,4490
	8,71	5,00	63,53	36,47	1,4488
	25,27	16,64	60,30	39,70	1,4488
	7,44	4,36	63,05	36,95	1,4470
	8,34	5,01	62,47	37,53	1,4447
	6,18	3,55	63,51	36,49	1,4440
	8,24	4,62	64,07	35,93	1,4482
	9,32	5,82	61,56	38,44	1,4461

Tabelle A-7: Mischungsverhältnis Xylol/2-Butanon

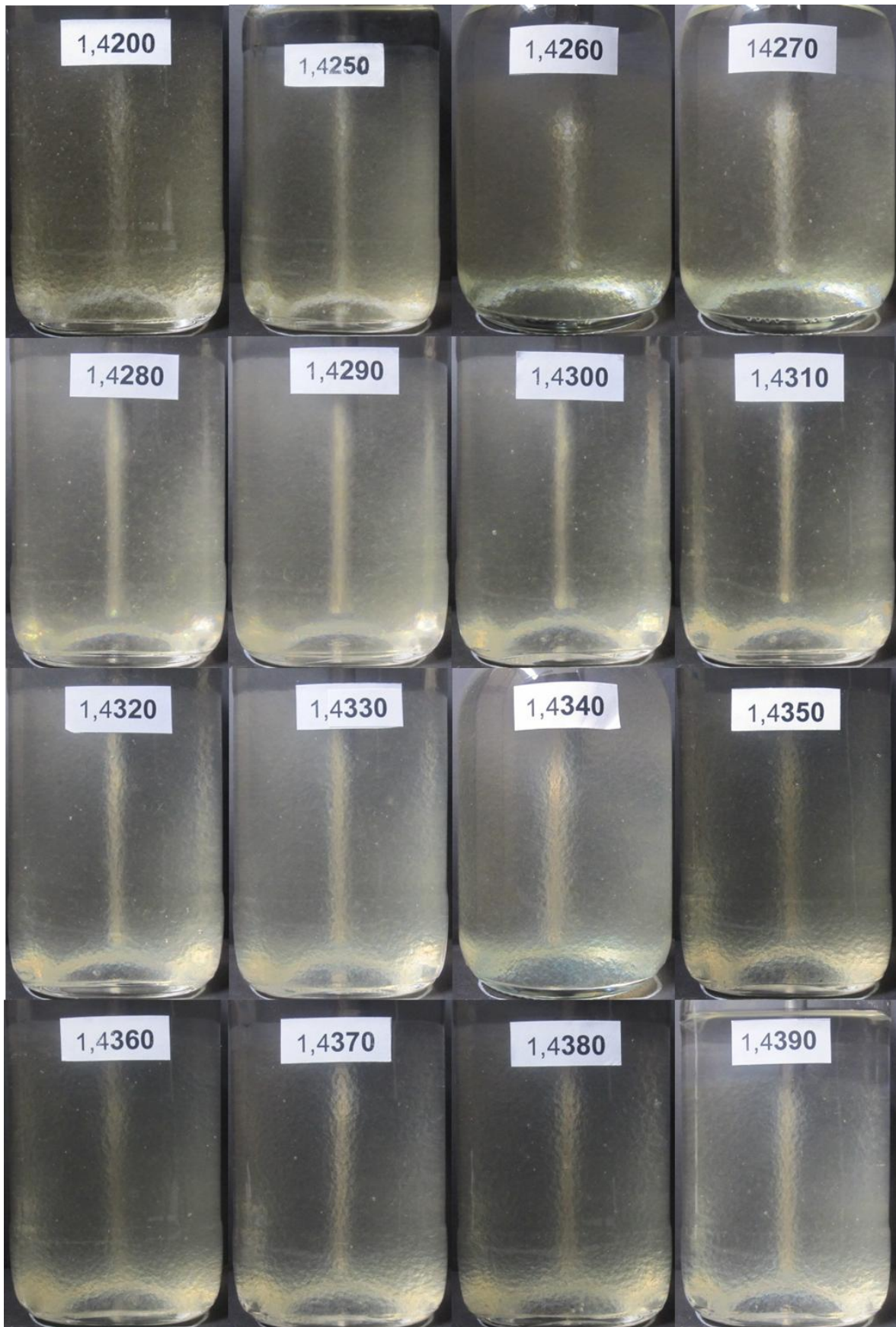


Abb. A-6: Transparenzverlauf bei unterschiedlichem Brechungsindex  $n_D$  des Porenfluids



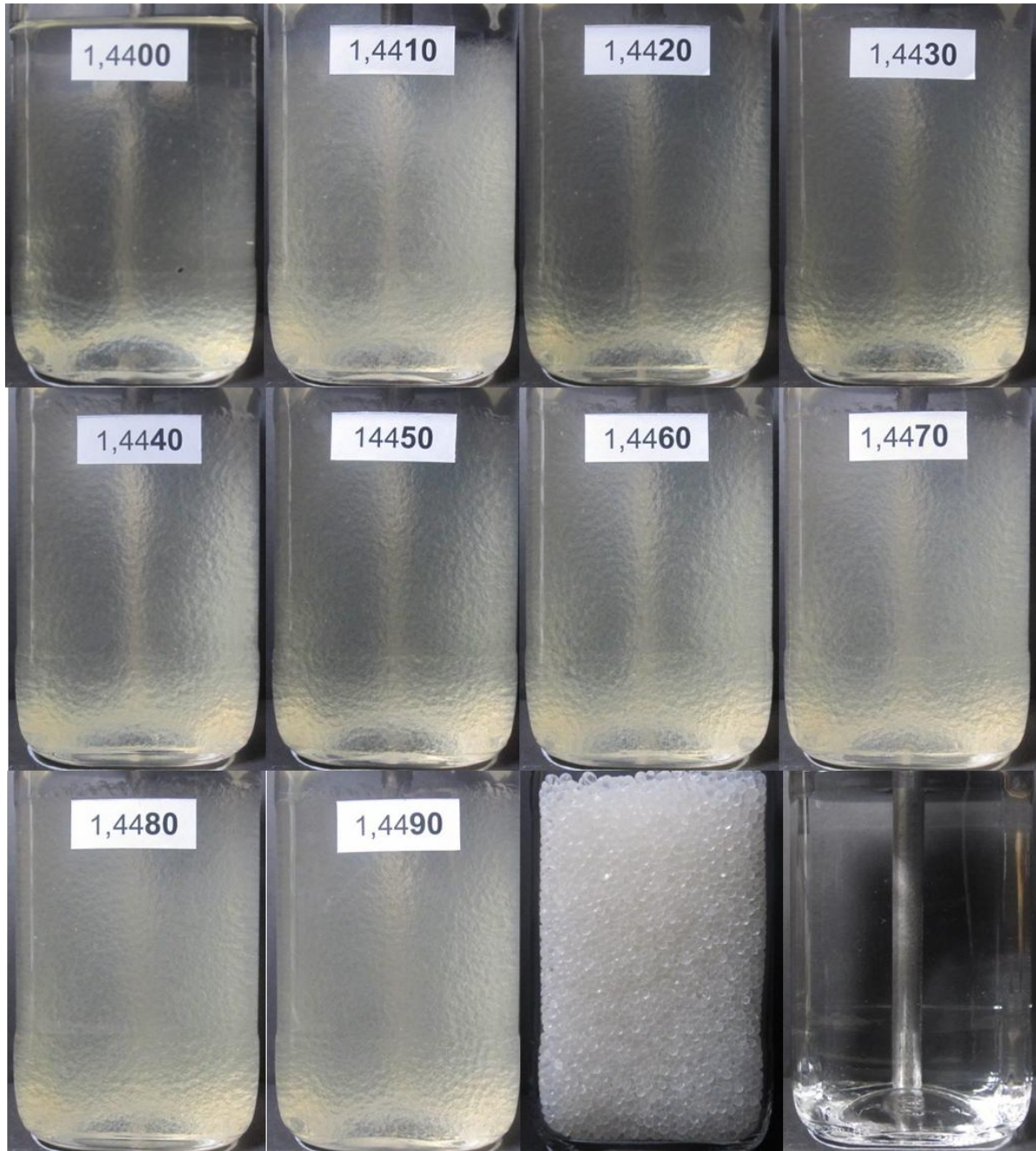


Abb. A-7: Transparenzverlauf bei unterschiedlichem Brechungsindex  $n_D$  des Porenfluids

Vergleichsbilder:

vorletztes Bild: trockenes, reines Silica Gel

letztes Bild: reines Porenfluid

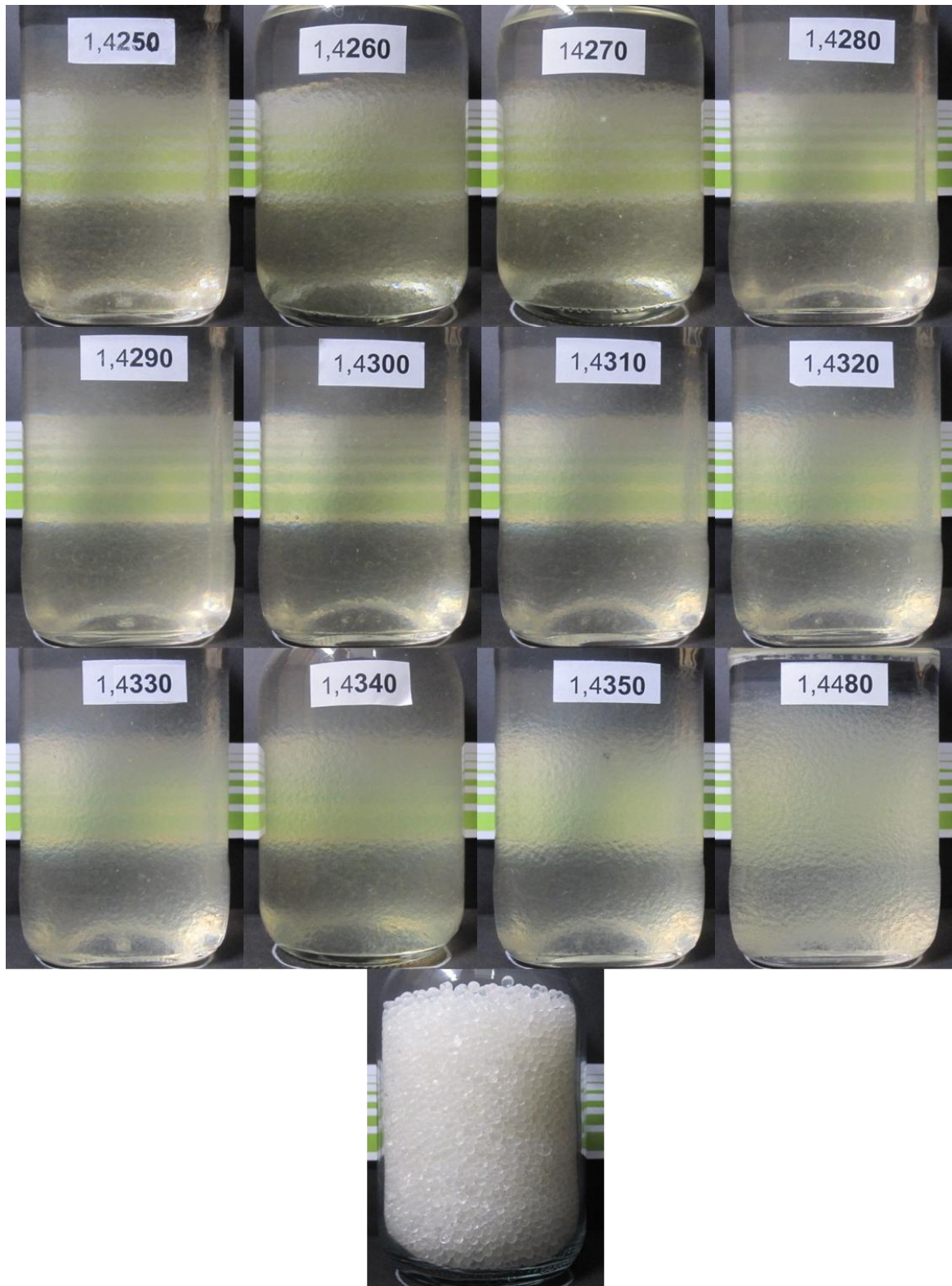


Abb. A-8: Transparenzvergleiche bei unterschiedlichem Brechungsindex  $n_D$  des Porenfluids  
(Im letzten Bild befindet sich ungesättigtes Silica Gel im Messgefäß)

## B: Modelle der Restbruchkörper der Versuchsreihe 2

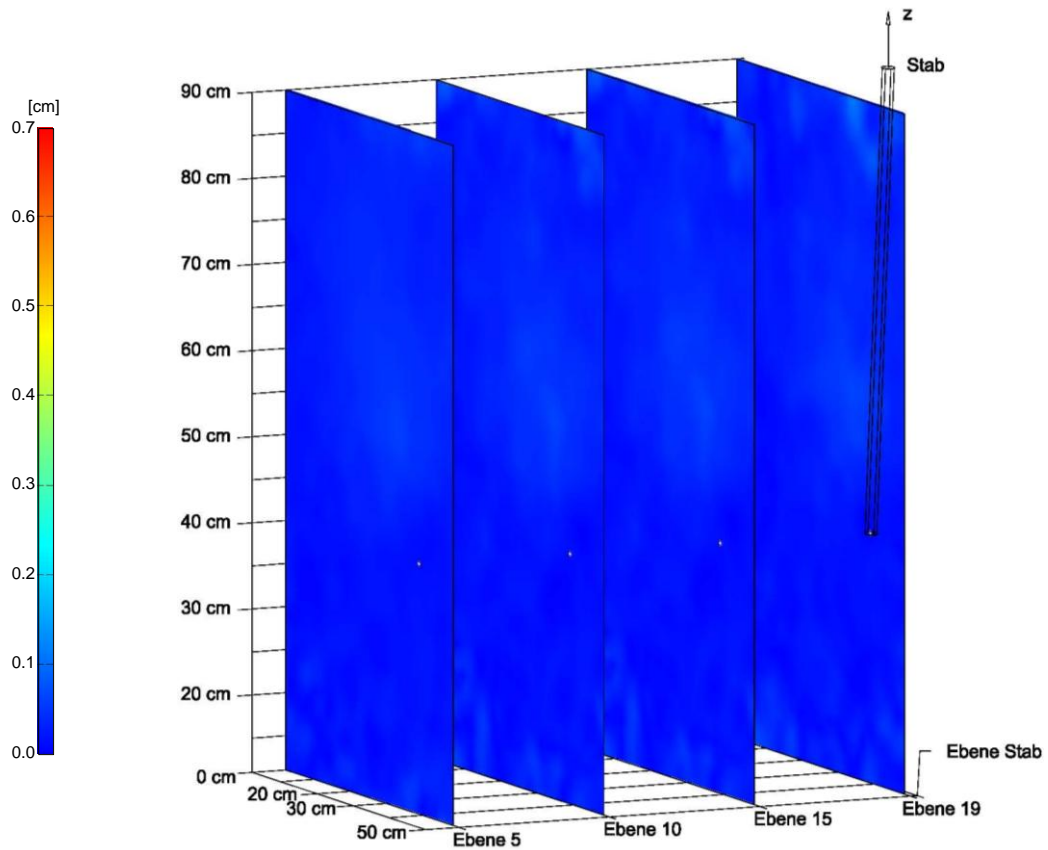


Abb. B-1: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen  $5^\circ$

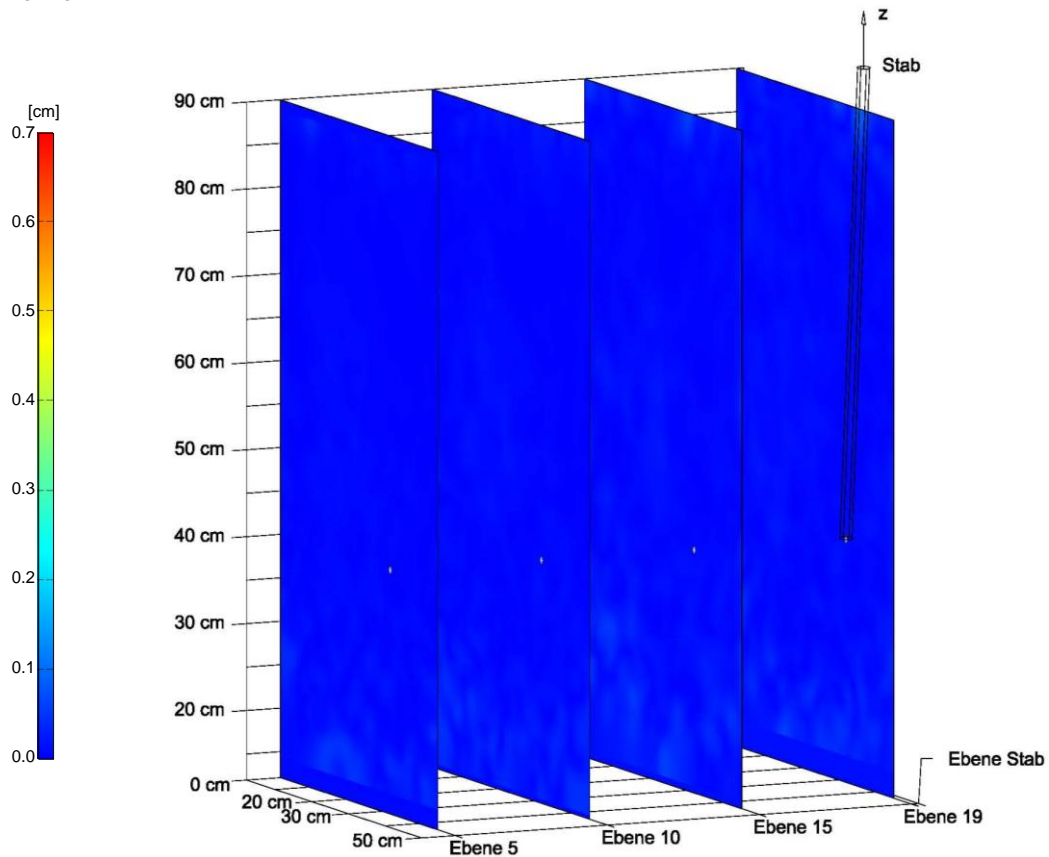


Abb. B-2: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen  $5^\circ$



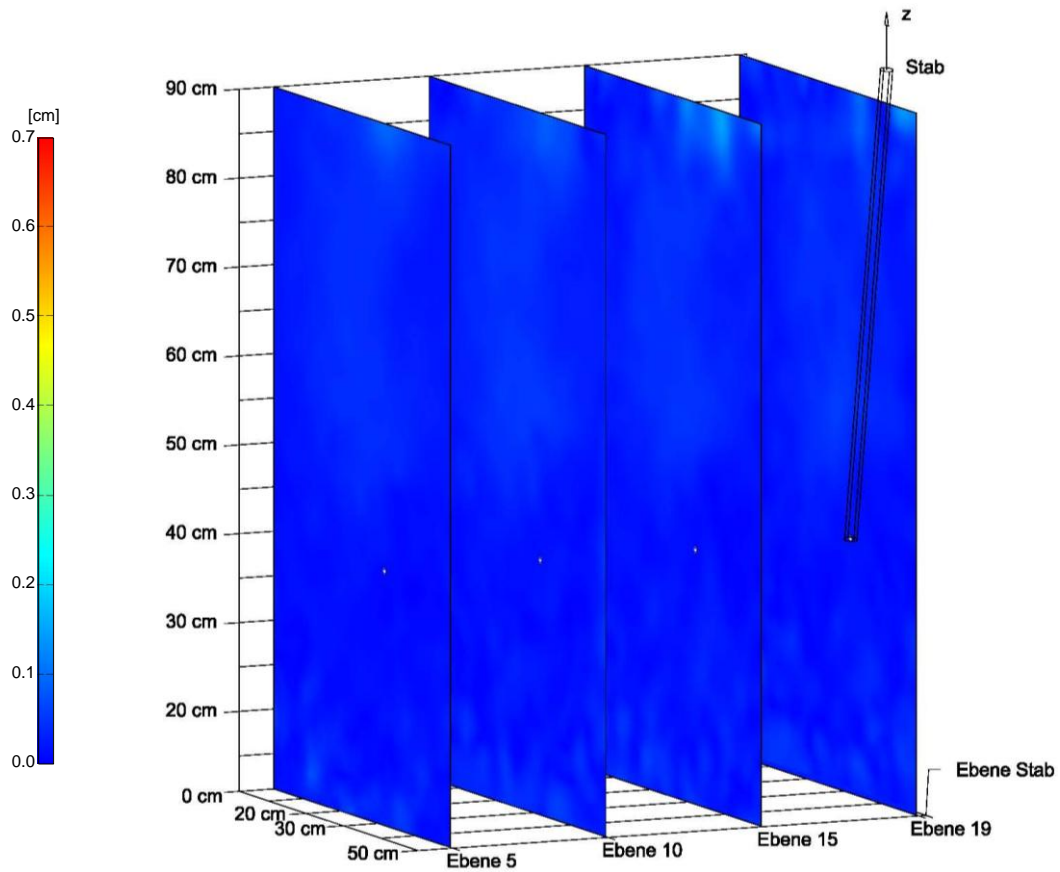


Abb. B-3: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen  $10^\circ$

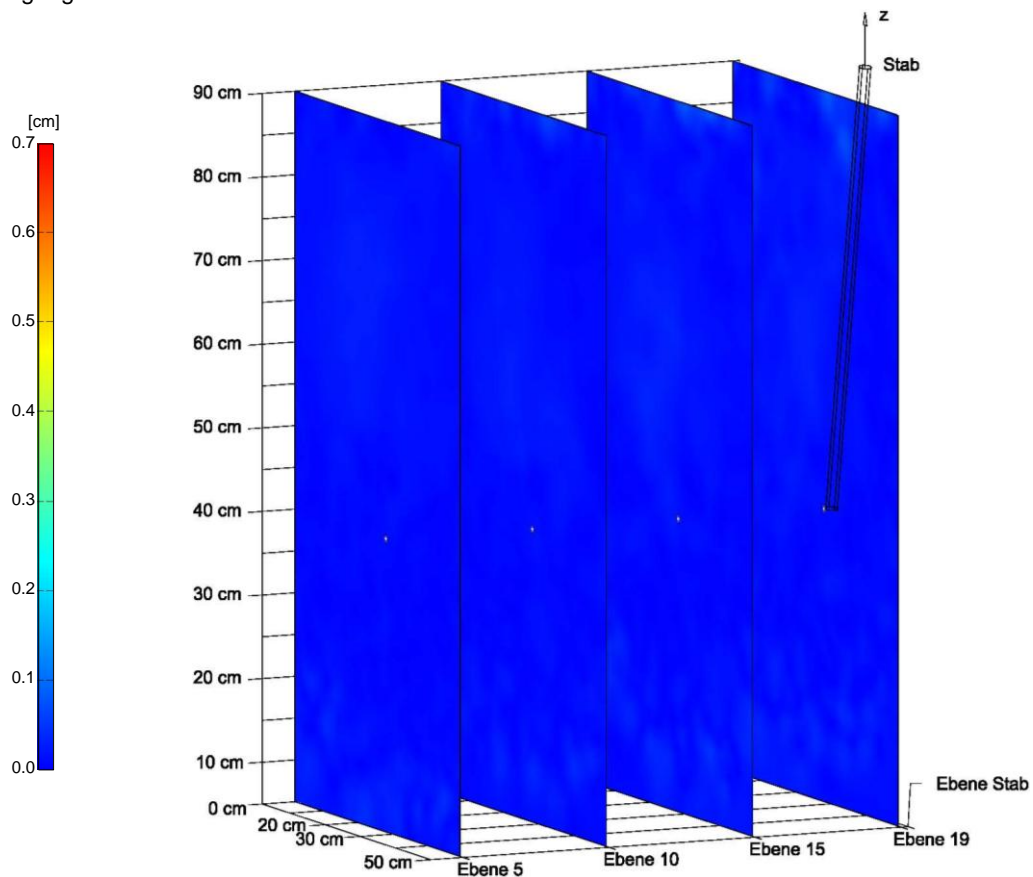


Abb. B-4: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe ~50 cm, Neigung zur Vertikalen  $10^\circ$

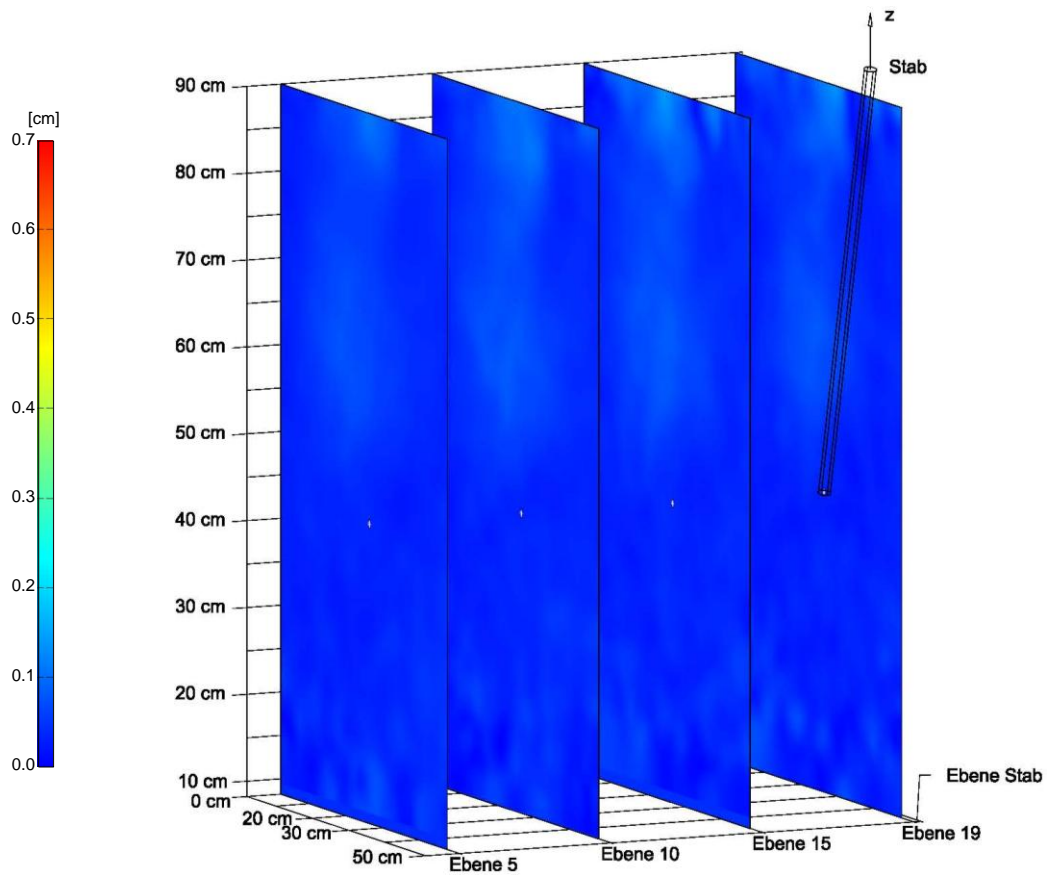


Abb. B-5: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$

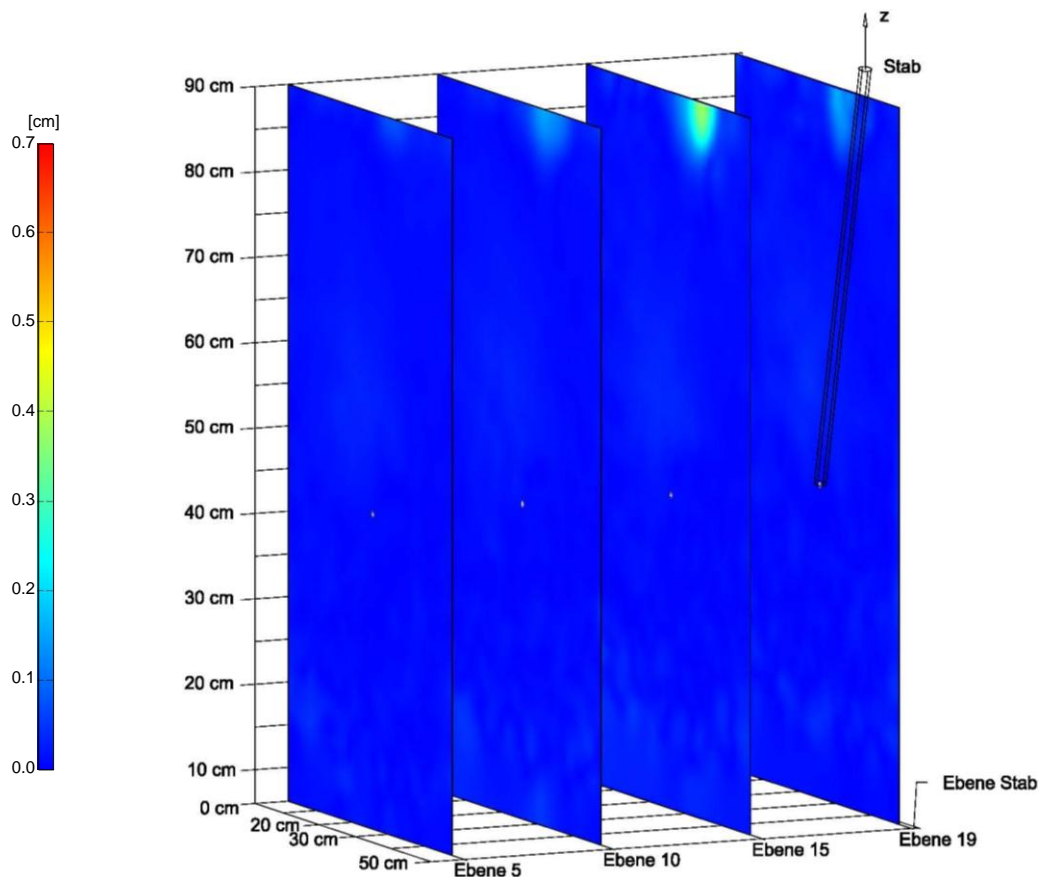


Abb. B-6: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen  $15^\circ$

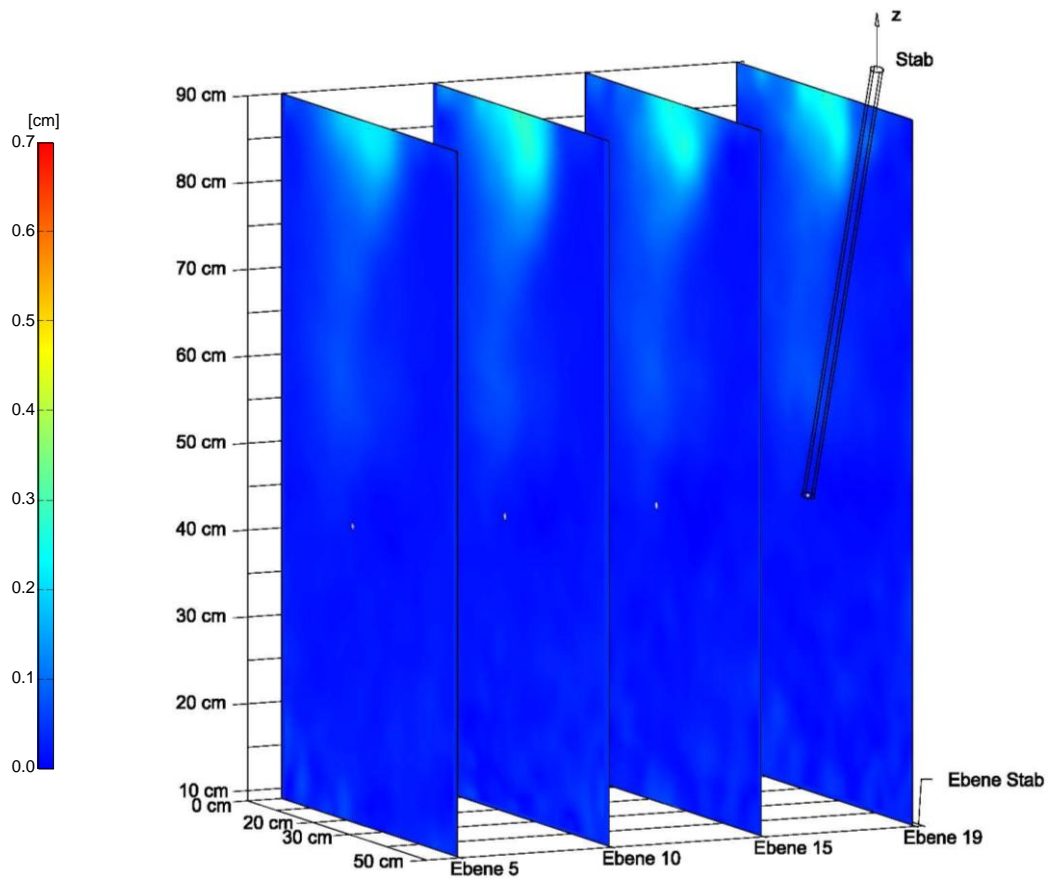


Abb. B-7: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen  $20^\circ$

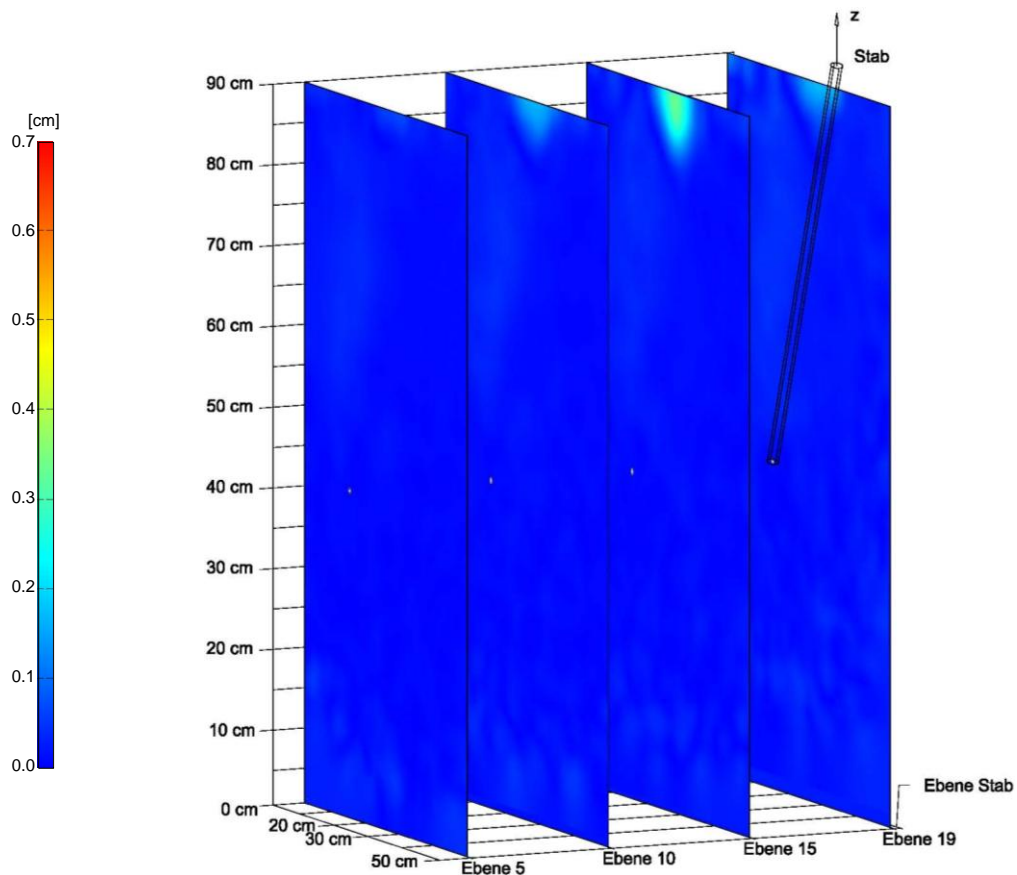


Abb. B-8: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 47 cm, Neigung zur Vertikalen  $20^\circ$



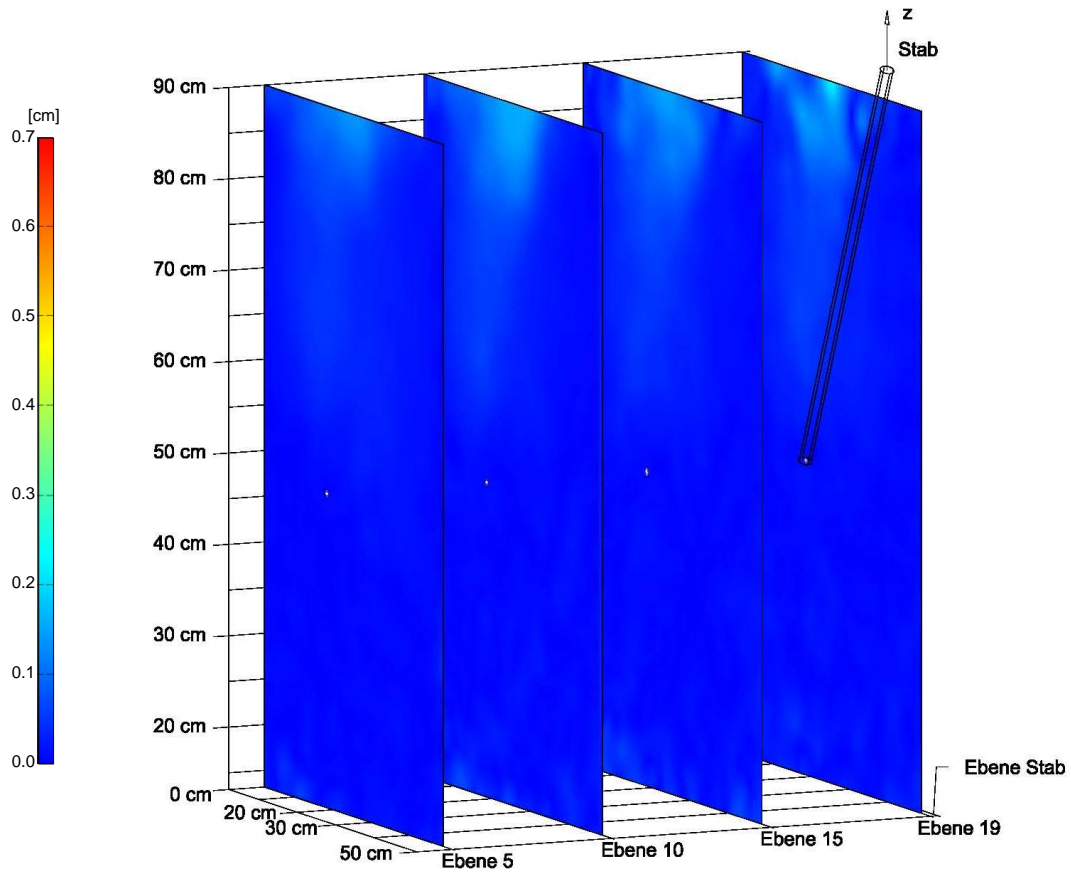


Abb. B-9: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 42 cm, Neigung zur Vertikalen  $25^\circ$

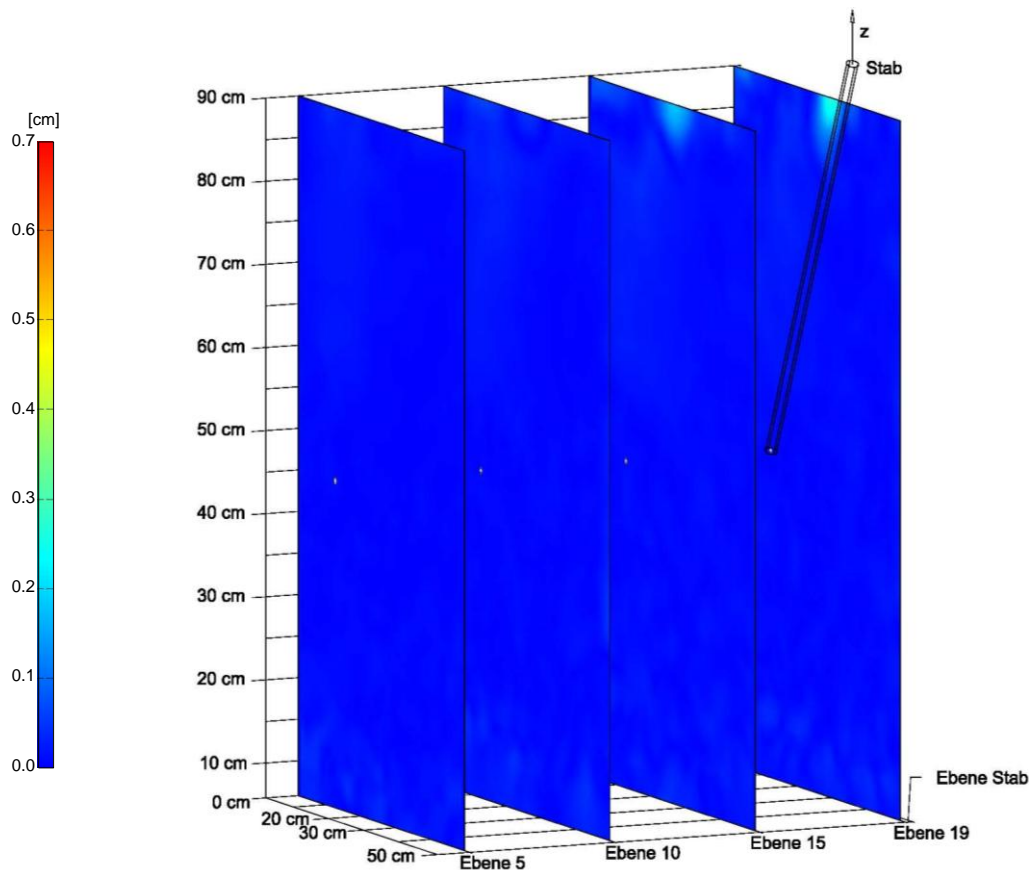


Abb. B-10: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 45 cm, Neigung zur Vertikalen  $25^\circ$

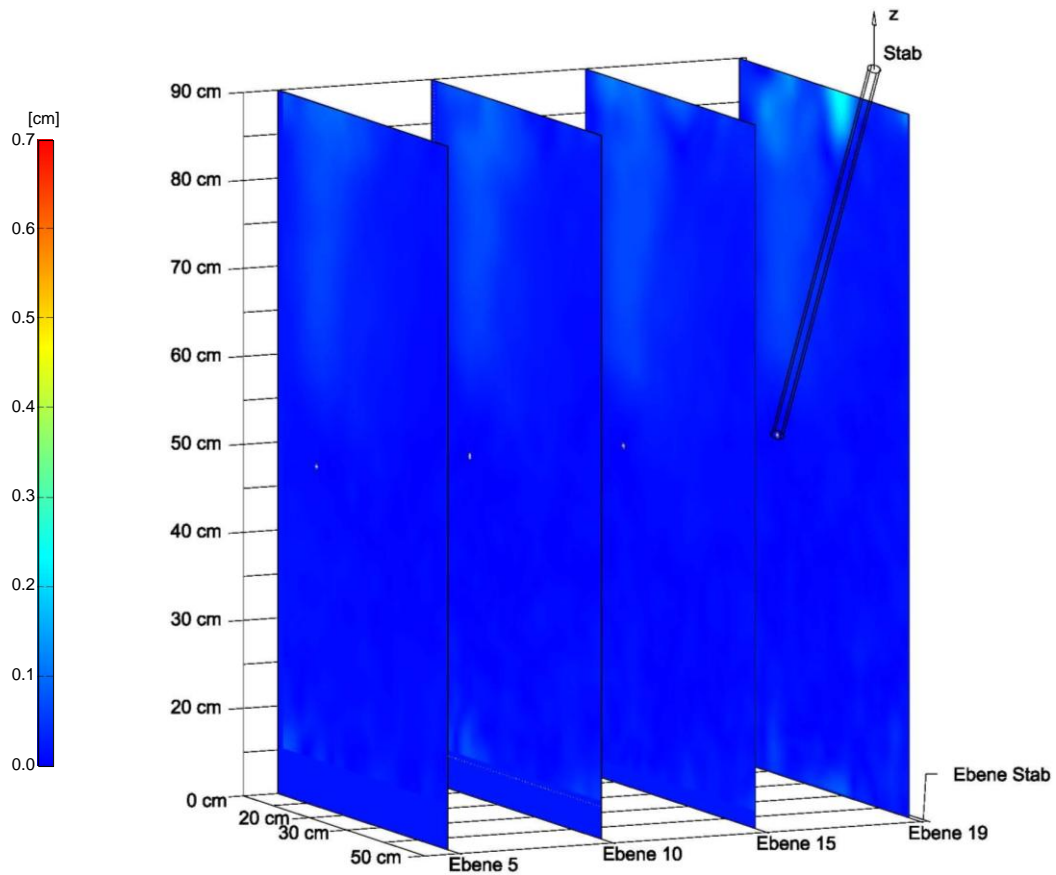


Abb. B-11: Restbruchkörper des Gewindestabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 41 cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$

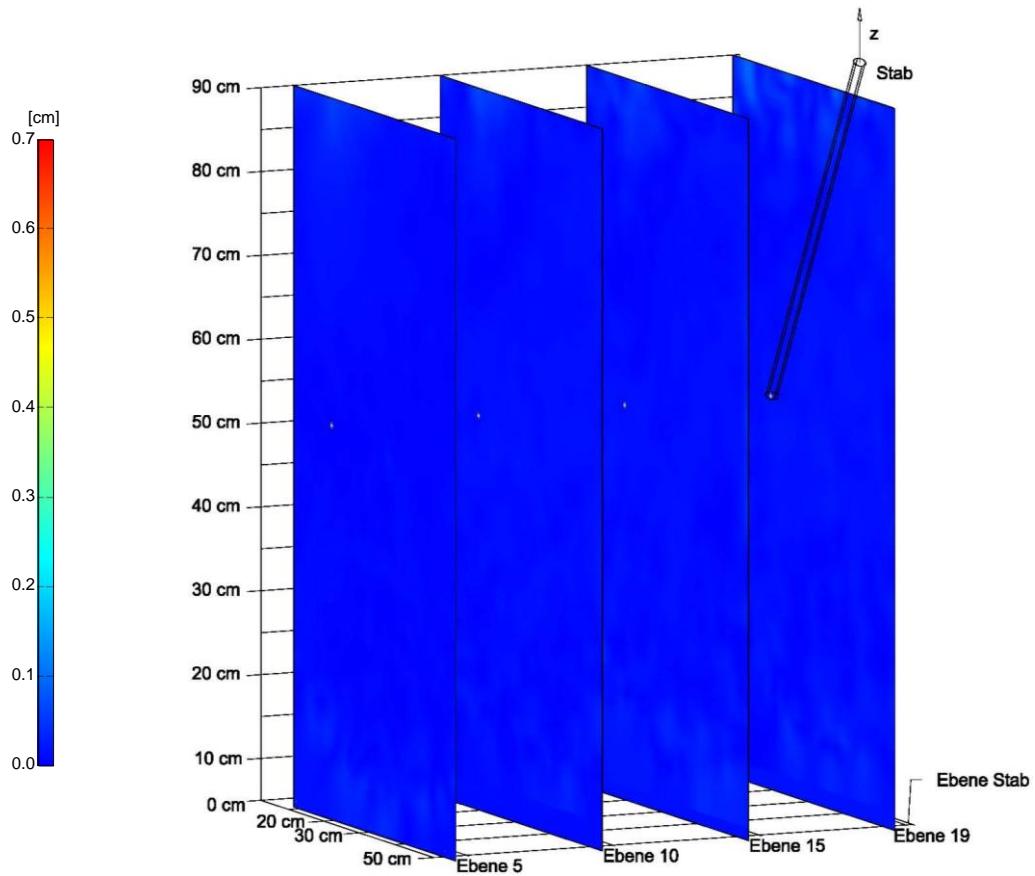


Abb. B-12: Restbruchkörper des Glattstabes  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe  $\sim$ 39 cm, Neigung zur Vertikalen  $30^\circ$

### C: Weg-Kraft Diagramme der Versuchsreihe 3

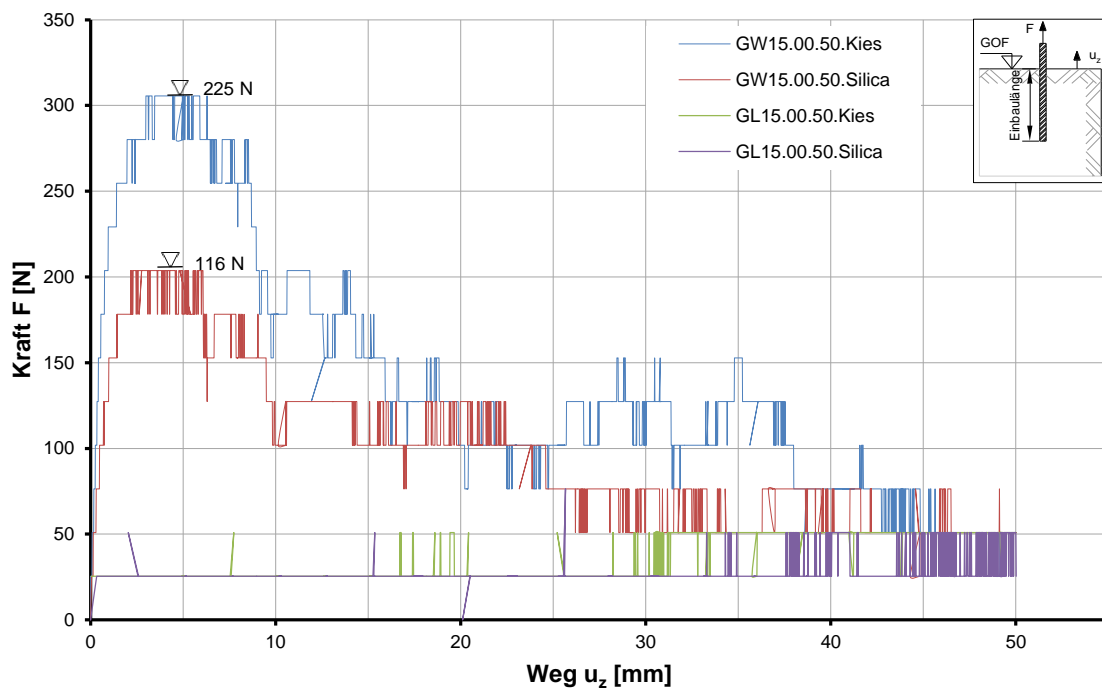


Abb. C-1: Arbeitslinie Gewindestab und Glatststab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 50 cm in Silica und Kies

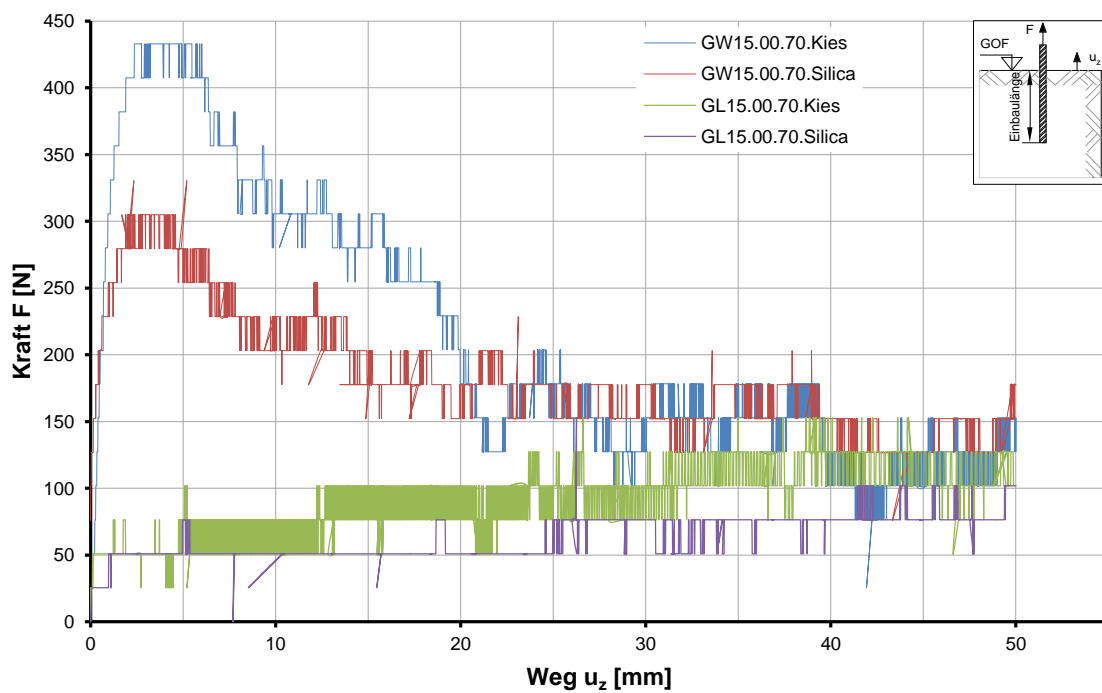


Abb. C-2: Arbeitslinie Gewindestab und Glatststab  $\varnothing$  15 mm, Einbautiefe 70 cm in Silica und Kies

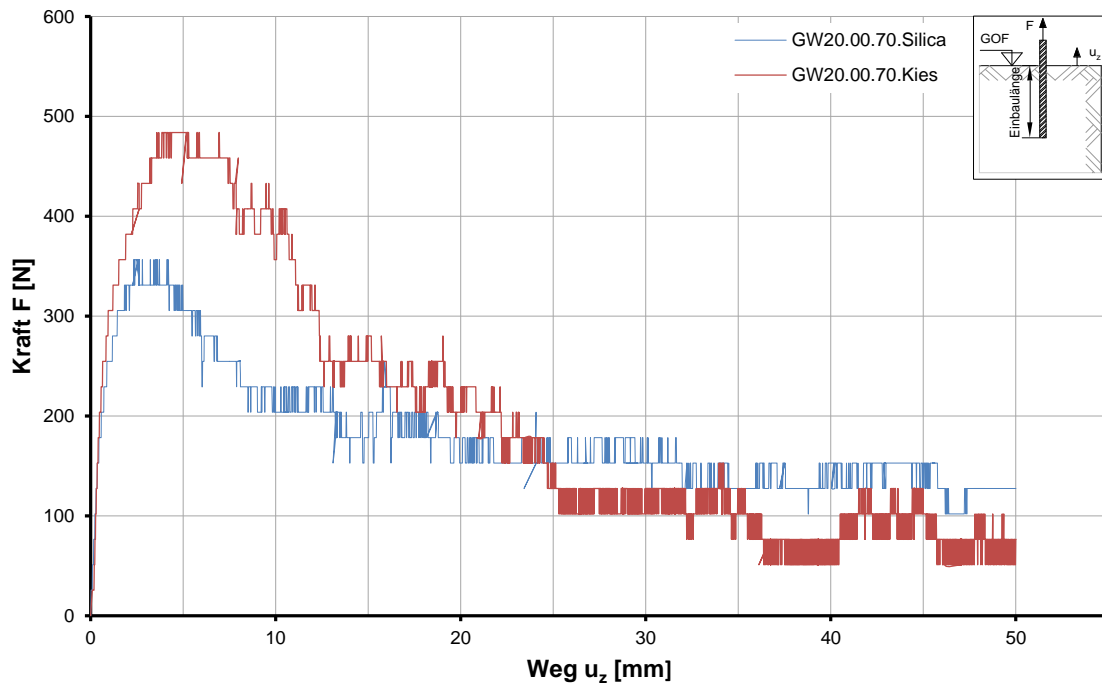


Abb. C-3: Arbeitslinie Gewindestab Ø 20 mm, Einbautiefe 70 cm in Silica und Kies

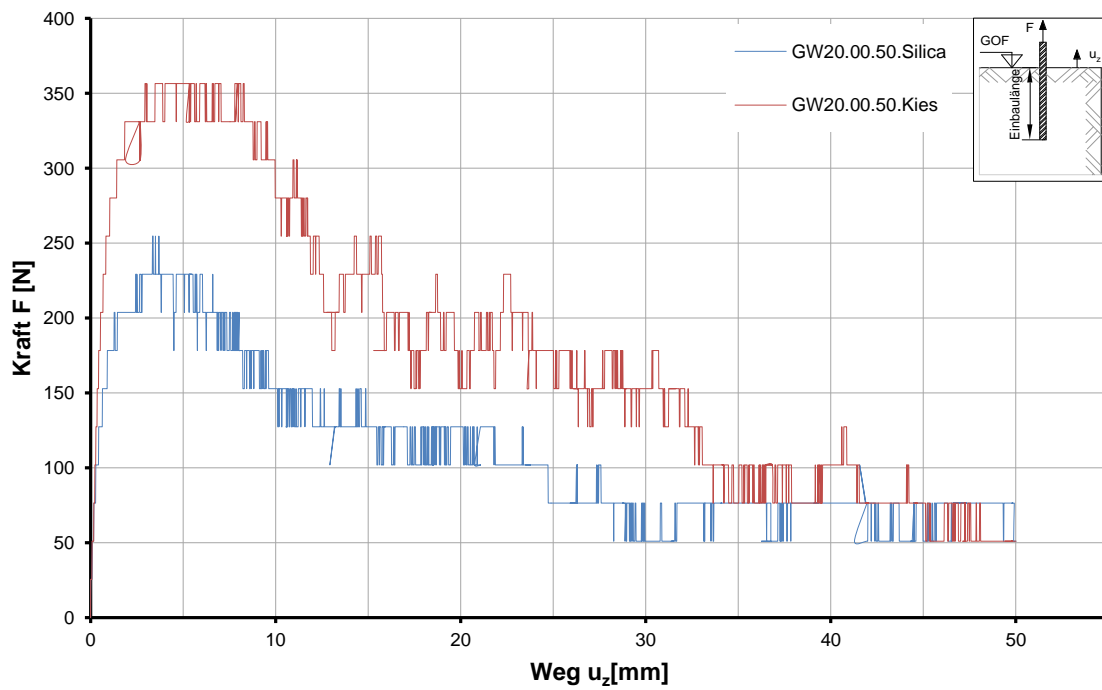


Abb. C-4: Arbeitslinie Gewindestab Ø 20 mm, Einbautiefe 50 cm in Silica und Kies

## D: Bodenmechanische Laborergebnisse Kies

 Graz University of Technology	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR</b> A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA Tel.: +43(0)316 / 873-6237 Fax: +43(0)316 / 873-6238	 IBG
--	--	--

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	PROJEKTNUMMER: 2622	AUFTRAGSNUMMER:
PROJEKT: Vergleichsmaterial Silica Gel Ø 2-5 mm	BEARBEITER: Has	DATUM: 20.08.2012-15.02.2013

### ZUSAMMENSTELLUNG DER BODENMECHANISCHEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Labornummer				17931		
Bezeichnung				<b>Kies Ø 2-5 mm</b>		
Bodenart	ÖN EN 13688-1 bzw. ONR 24400-1			sa'Gr		
Tiefe		t	m			
Korndichte	ÖN B 4413	$\rho_s$	$\text{g/cm}^3$			
Dichte des feuchten Bodens	ÖN B 4414-1 oder ÖN B 4414-2	$\rho$	$\text{g/cm}^3$			
Dichte des trockenen Bodens		$\rho_d$	$\text{g/cm}^3$	1,61		
Porenanteil		n	%			
Porenzahl		e	1			
Wassergehalt	ÖN B 4410	w	%			
Mittelwert Dichte		$\rho_d$	$\text{g/cm}^3$			
Sättigungsgrad		$S_r$	1, %			
Reibungswinkel		$\phi'$	°			
Kohäsion	ÖN B 4416	$c'$	$\text{kN/m}^2$			
Restscherwinkel		$\phi_r$	°			
Einachsiale Druckfestigkeit	ÖN B 4415	$q_u$	$\text{kN/m}^2$			
Reibungswinkel		$\phi'$	°	47,8		
Kohäsion auf	ÖN B 4416	$c'$	$\text{kN/m}^2$	8,2		
Restscherwinkel		$\phi_r$	°	46,8		
Optimaler Wassergehalt	ÖN EN 13286-2 und ÖN B 4418	$w_{opt}$	%			
Proctordichte		$\rho_{Pr}$	$\text{g/cm}^3$			
Wirksame Korngröße	ÖN B 4412 oder ÖN EN 13688-2	$d_{10}$	mm	2,1		
Ungleichkörnigkeitszahl		U	1	2		
Lockerste Lagerung		$\rho_d$	$\text{g/cm}^3$	1,45		
Dichteste Lagerung	DIN 18126	$\rho_d$	$\text{g/cm}^3$	1,53		
Gehalt an organ. Anteilen	DIN 18128	$m_{gl}$	%			
Wärmeleitfähigkeit		$\lambda$	$\text{W/m}^2\text{K}$			

Abb. D-1: Zusammenstellung der Bodenmechanischen Laborergebnisse

	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR</b> A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA Tel.: +43 (0) 316 873/6237 Fax.: +43 (0) 316-873/6238	
--	---	--

AUFTRAGGEBER: <b>Institut für Bodenmechanik und Grundbau</b>	BODENART: <b>sa' Gr</b>	BEZEICHNUNG: <b>Dichte: 1,61g/cm<sup>3</sup></b>	LABORNUMMER: <b>17931-v</b>
PROJEKT: <b>Vergleichsmaterial 2/5</b>		TIEFE:	AUFTRAGSNUMMER: <b>2622</b>
		BEARBEITER: <b>Poprask</b>	DATUM: <b>24.09.12 - 02.10.12</b>

## SCHERVERSUCH

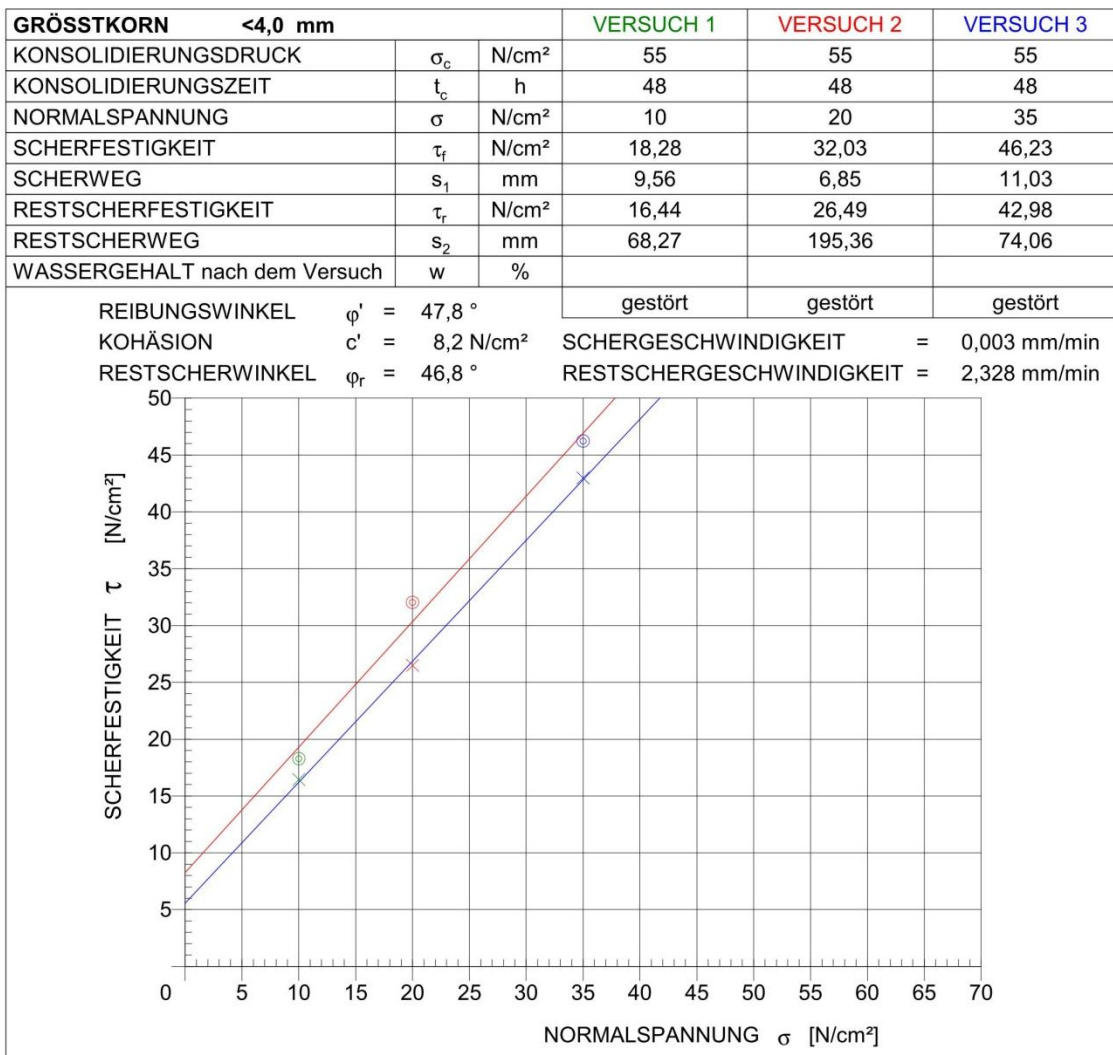


Abb. D-2: Ergebnisse des Scherversuches



	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR</b>  <small>A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA Tel.: +43 (0) 316 / 873 6237 Fax: +43 (0) 316 / 873 6238</small>	
---	--	---

## KORNGRÖSSENVERTEILUNG

### ANGABEN ZUR PROBE

<b>Projekt:</b> Vergleichsmaterial Silica-Gel	<b>Labornummer:</b> 17931	
<b>Auftraggeber:</b> Institut für Bodenmechanik und Grundbau	Bearb.: Poprask	Datum: 15.02.2013
<b>Bezeichnung:</b> Kies 2/5	Höhe:	
<b>Lage:</b>	bezogen auf	
<b>Herkunft:</b>	<input type="checkbox"/> eingebaut	<input type="checkbox"/> nicht eingebaut
<b>Notiz:</b>	<input type="checkbox"/> gestört	<input type="checkbox"/> ungestört

### ZUSAMMENSTELLUNG DER SIEBDURCHGÄNGE

Siebanalyse			Schlammanalyse			
Ø	%	%	Ø	%	Ø	%
200	-					
120	-					
100	-					
63	-					
45	-					
31,5	-					
22,4	-					
16	-					
11,2	-					
8	100,0					
4	84,6					
2	5,7					
1	0,1					
0,5	0,1					
0,25	0,1					
0,125	-					
0,09	-					
0,063	-					

rechnerisches Größtkorn		
0.063	-	
0.02	-	
0.002	-	
U=D60/D10	2	

Sachbearbeiter/Datum:

Abb. D-3: Korngrößenverteilung

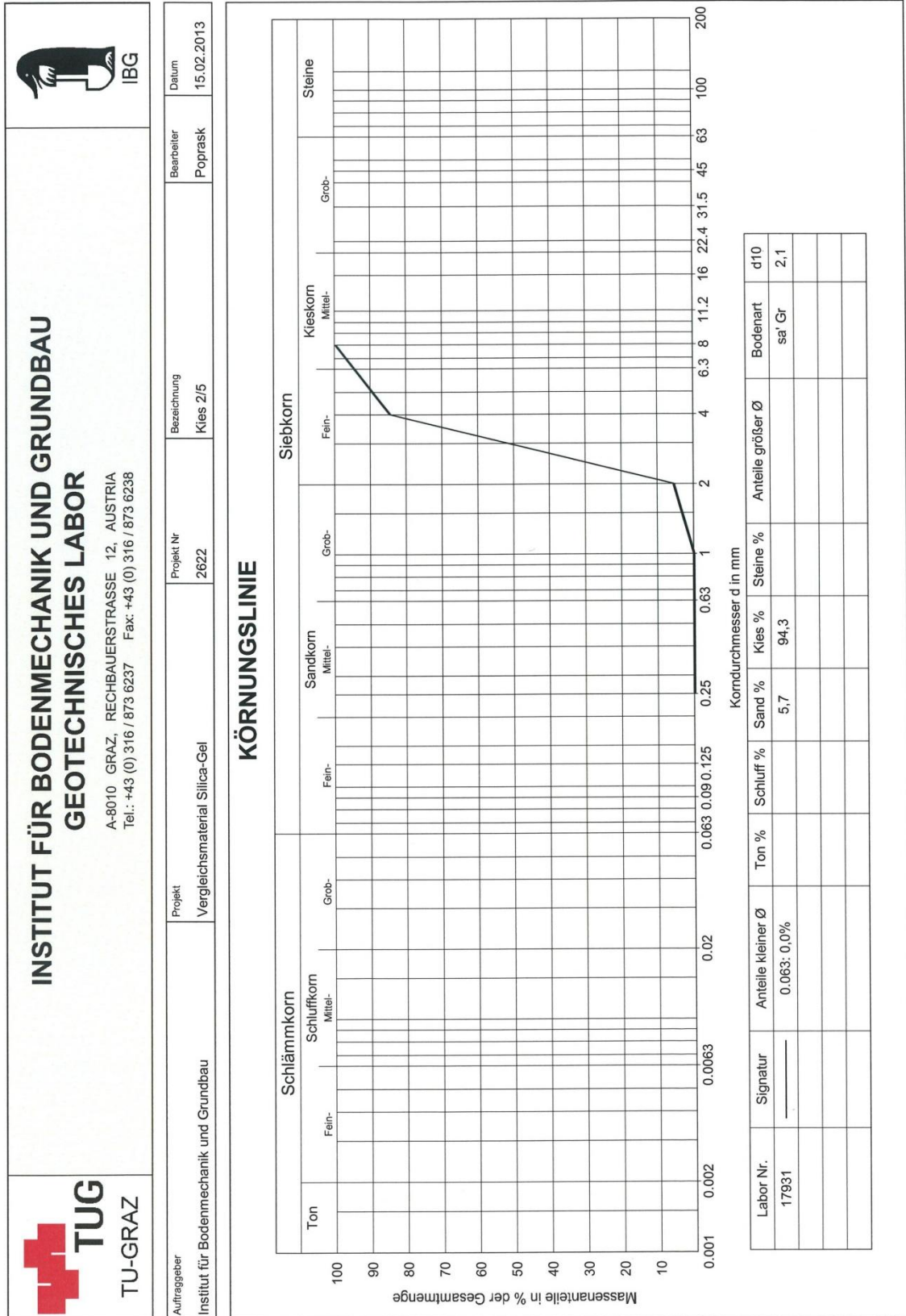
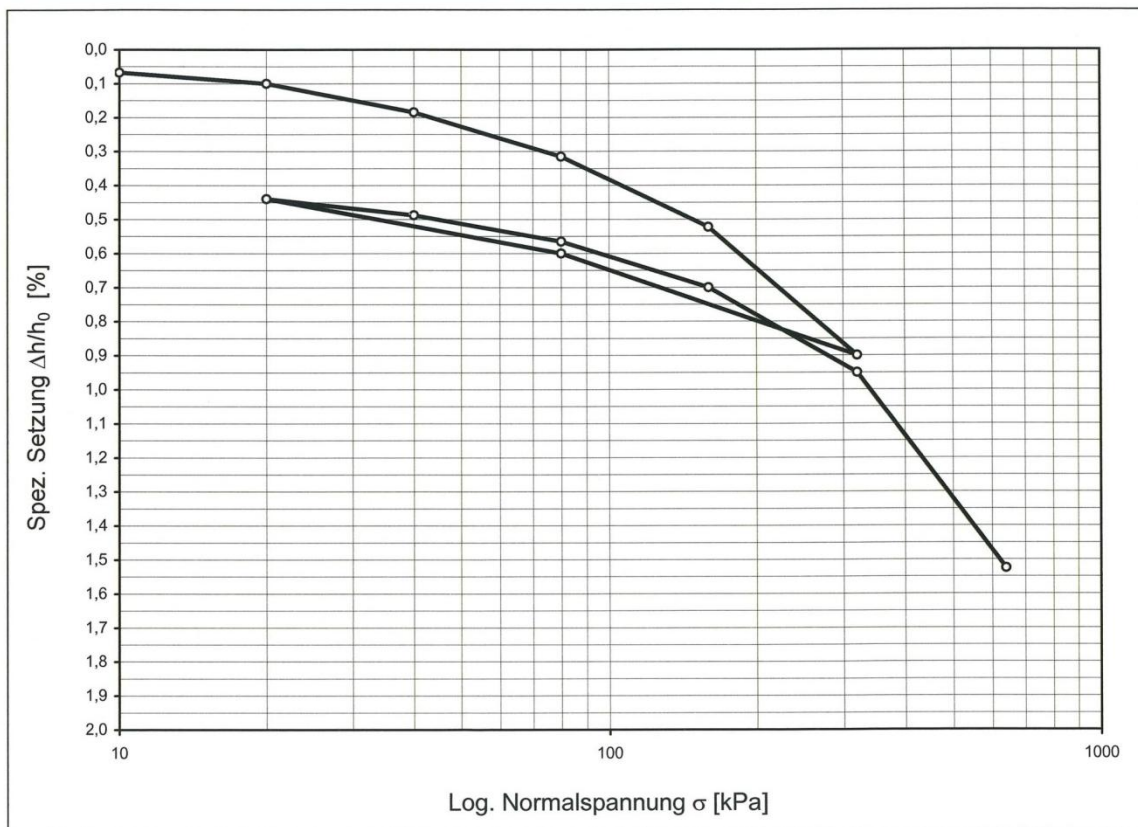


Abb. D-4: Kornverteilungskurve Kies

 TU Graz <small>Graz University of Technology</small>	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU</b> <b>GEOTECHNISCHES LABOR</b> RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	
--	---	--

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Kies Ø 2 - 5mm	LABORNUMMER: 17931
PROJEKT: Vergleichsmaterial Silica-Gel	EINBAUDICHTE: $\rho_d: 1,61 \text{ g/cm}^3$	PROJEKTNUMMER: 2622
	BEARBEITER: Poprask	DATUM: 20.08.2012

## KOMPRESSIONSVERSUCH STEIFEMODULI



Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1000
Steifemodul $E_s$ [kPa]	Erstbelastung	30769	23529	30769	38554	42384		
	Zweitbelastung		42105	51613	59259	64000	55652	

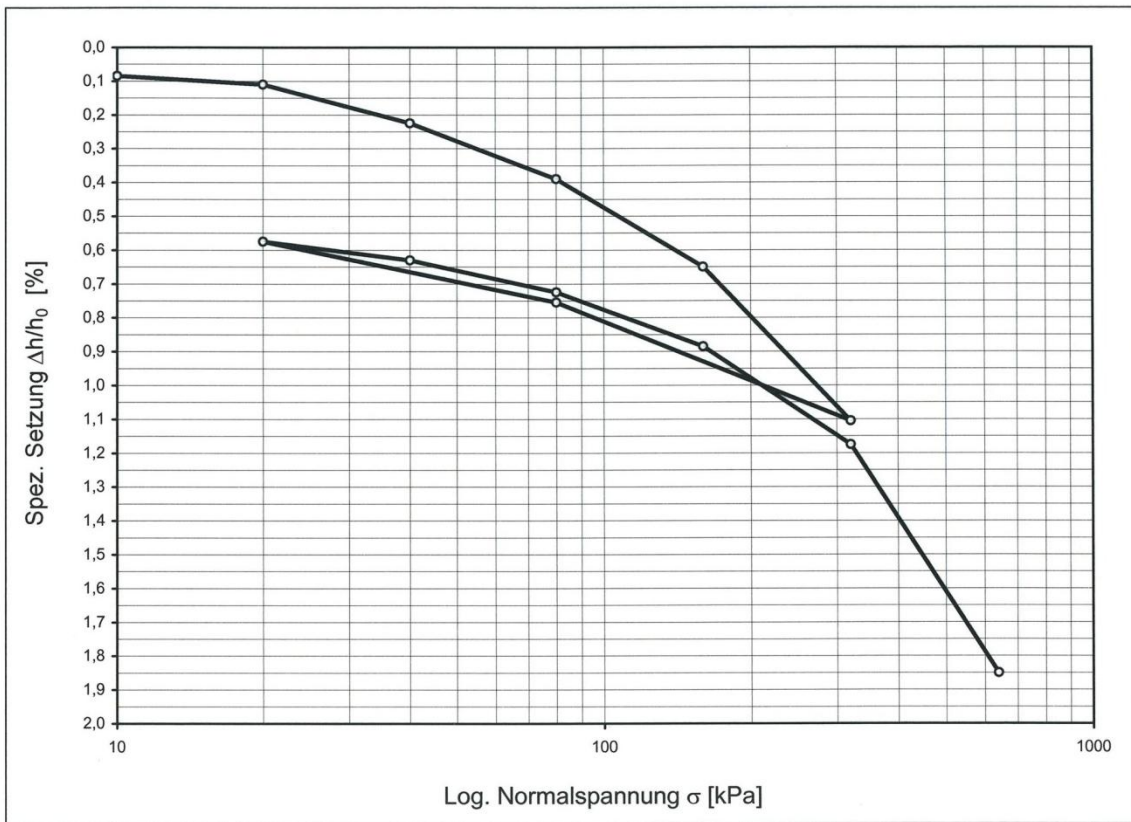
Abb. D-5: Kompressionsversuch 1



 TU Graz <small>Graz University of Technology</small>	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU</b> <b>GEOTECHNISCHES LABOR</b> RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	
--	---	--

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Kies Ø 2 - 5mm	LABORNUMMER: 17931-2
PROJEKT: Vergleichsmaterial Silica-Gel	EINBAUDICHTE: ρ <sub>d</sub> : 1,61 g/cm <sup>3</sup>	PROJEKTNUMMER: 2622
	BEARBEITER: Poprask	DATUM: 20.08.2012

## KOMPRESSIONSVERSUCH STEIFEMODULI



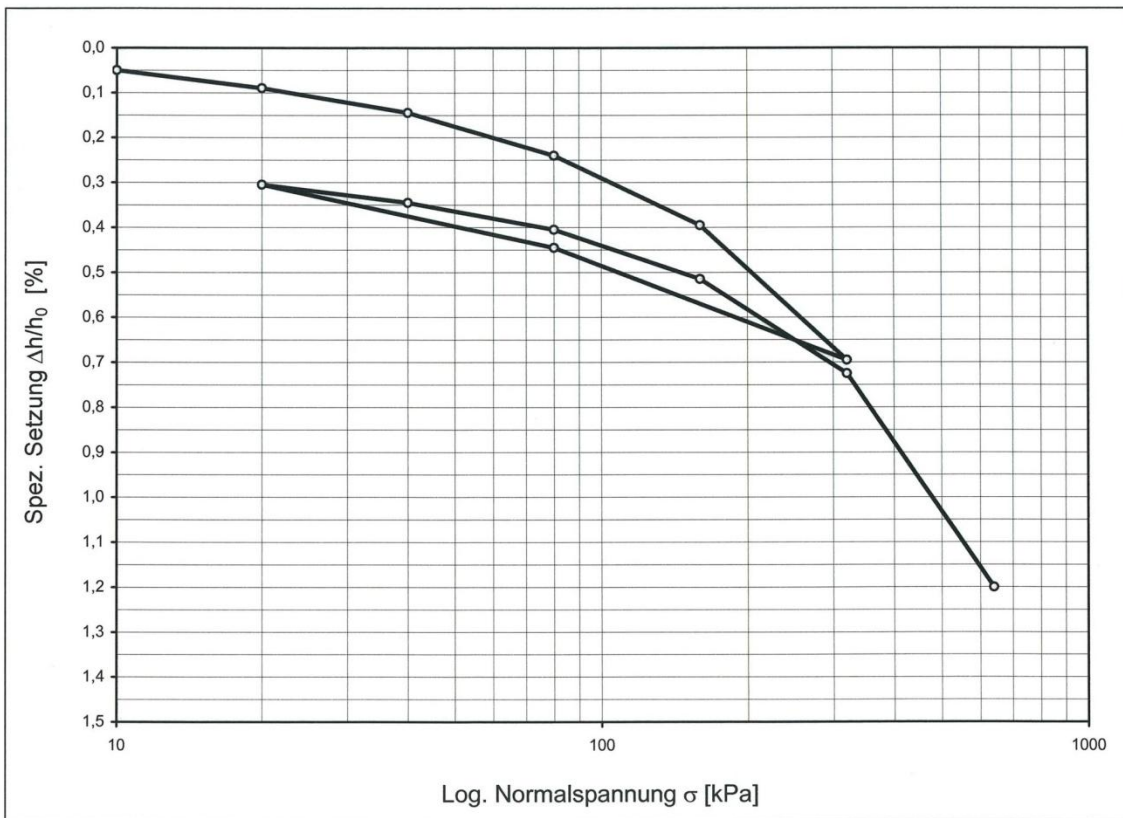
Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1000
Steifemodul E <sub>s</sub> [kPa]	Erstbelastung	40000	17391	24242	30769	35165		
	Zweitbelastung		36364	42105	50000	55172	47407	

Abb. D-6: Kompressionsversuch 2

 TU Graz Graz University of Technology	<b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU</b> <b>GEOTECHNISCHES LABOR</b> RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	
--	---	---

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Kies Ø 2 - 5mm	LABORNUMMER: 17931-3
PROJEKT: Vergleichsmaterial Silica-Gel	EINBAUDICHTE: pd: 1,61 g/cm³	PROJEKTNUMMER: 2622
	BEARBEITER: Poprask	DATUM: 20.08.2012

## KOMPRESSIONSVERSUCH STEIFEMODULI



Laststufen [kPa]		10-20	20-40	40-80	80-160	160-320	320-640	640-1000
Steifemodul $E_s$ [kPa]	Erstbelastung	25000	36364	42105	51613	53333		
	Zweitbelastung		50000	66667	72727	76190	67368	

Abb. D-7: Kompressionsversuch 3

## E: Screenshots der zitierten Internetquellen

### Digitale Bildverarbeitung / Stereologie

#### Geräte:

Bildverarbeitungssystem analySIS / SIS mit CCD-Farbkamera

#### Ziele der digitalen Bildverarbeitung:

##### Bildverbesserung Bildkorrektur

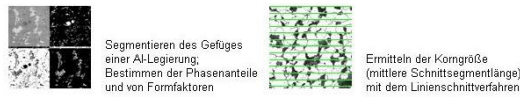
- Verbesserung der visuellen Beurteilbarkeit von Bildern (z.B. durch Kontrastanheben)
- Vorbereitung zur Bildquantifizierung (z.B. Extraktion von relevantem Bildinhalt oder Beseitigen von Abbildungsfehlern)

##### Quantifizieren des Bildinhalts

- Quantifizieren von Gefügebildern. Dabei werden die Gesetze der [Stereologie](#) angewandt.
- Ausmessen und Quantifizieren von topographischen [CLSM](#)- und [STM/AFM](#)-Abbildungen

Als Bildquellen kommen verschiedene Mikroskopieverfahren in Frage: Lichtmikroskopie, Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie, Elektronenstrahlmikroanalyse-Elementverteilung, konfokale Laserastromikroskopie, Rastersondenmikroskopie sowie abbildende Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

#### Beispiele:



#### Anwendungen bei Werkstoffuntersuchungen

- Bestimmen der Volumenanteile von Gefügebestandteilen
- Ausmessen von Größe, Form und Orientierung der Gefügebestandteile
- Quantifizieren von Oberflächentopographien

[Literatur zur digitalen Bildverarbeitung / Stereologie](#)



Abb. E-1: Bildverweis [www12.ovgu.de](http://www12.ovgu.de), 2012 (Abb. 2-4)

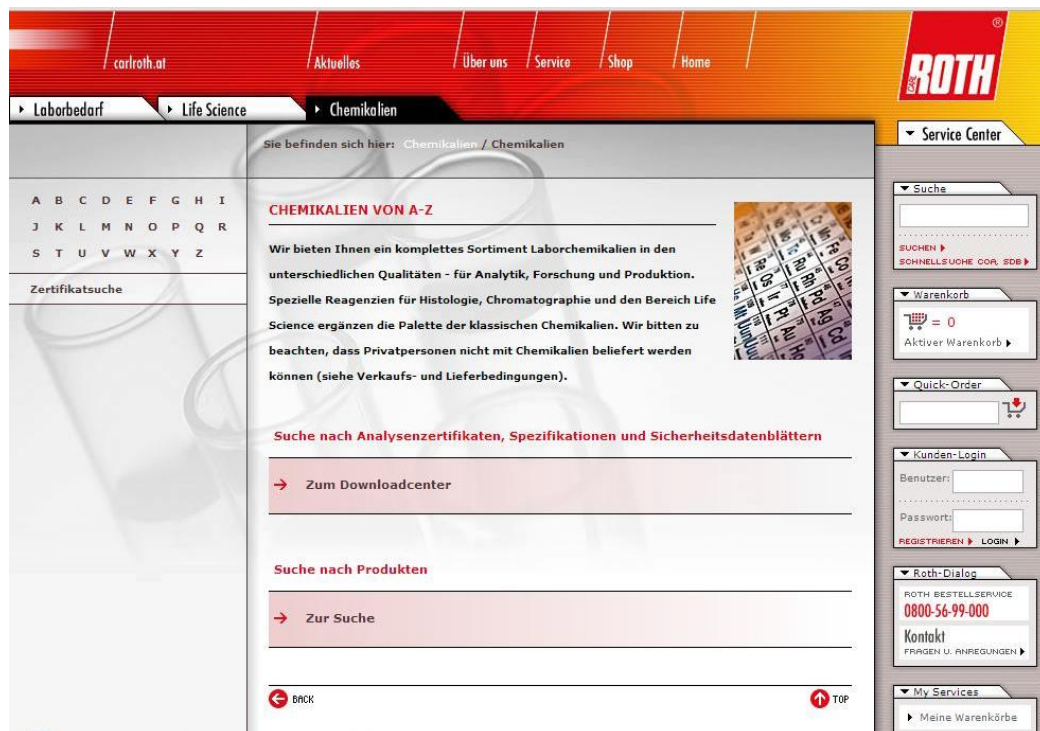


Abb. E-2: Homepage der Carl Roth GmbH & Co.KG ([www.carlroth.com](http://www.carlroth.com), 2012)





Abb. E-3: Bildverweis www.geophysik.uni-muenchen.de, 2012 (Abb. 2-7)

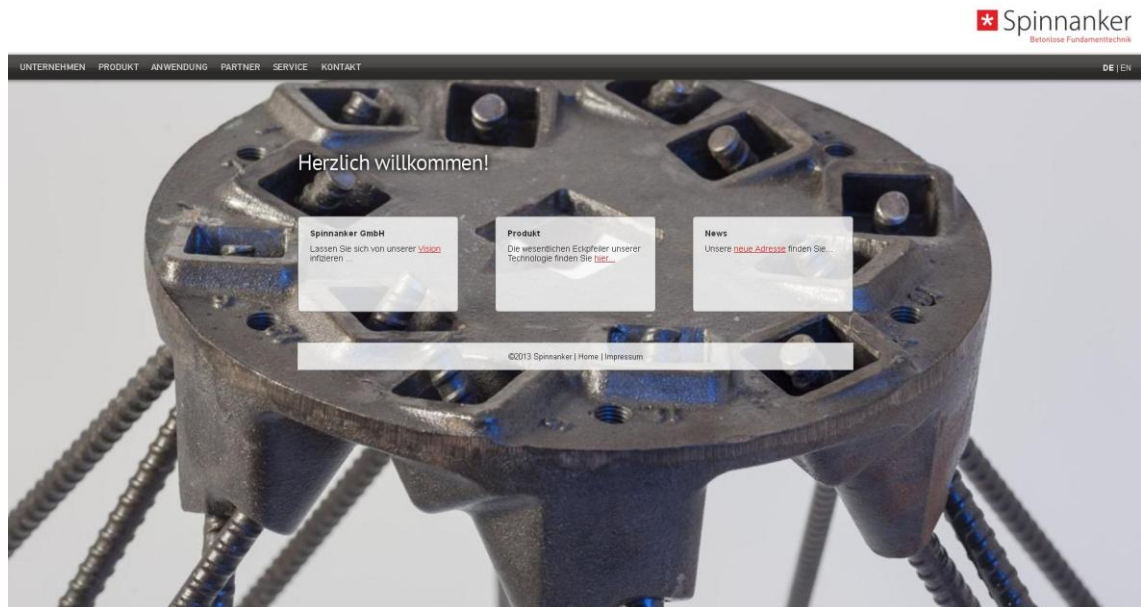


Abb. E-4: Homepage der Spinnanker GmbH (www.spinnanker.com, 2013)

**LABWARE DATA**

- The Omni-Lab
- Nexus II

**Solvent Purification**

- Solvent Purification

**Sample Preprocessor**

- Extraction
- Windy-R
- Air Sampler

**Silicycle**

- SiliaFlash®
- SiliaPlate™
- Merck KGaA/EMD chemicals TLC Plates
- SiliaSip™
- SiliaSorb®
- SiliaGel®
- SiliaPur™
- SiliaChrom®
- Merck KGaA/EMD Chemicals Chromolith® HPLC Columns/MPAQ™
- IMPAQ™
- SiliaSphera™
- Silicycle Accessories
- METTLER TOLEDO
- Minilock®
- Umicore Homogeneous Catalysts

**EMD CHEMICALS SIGNS DISTRIBUTION AGREEMENT WITH SILICYCLE® FOR CHROMATOGRAPHY PRODUCTS IN NORTH AMERICA.**

EMD Chemicals has entered into a strategic specialty distribution partnership with Silicycle, featuring on the sales of EMD's innovative Merck KGaA HPLC Column product line Chromolith® in North America.

With a brand new facility built in 2009 in Quebec City, Silicycle brings complementary resources to EMD Chromatography Products customers in the form of a strong technical direct sales team in both the United States of America and Canada, as well as a state-of-the-art instrumental analysis and applications support laboratory.

Formerly known as EM Science, EMD Chemicals represents the North American chemical sector of Merck KGaA, Germany, the world's largest manufacturer of Chromatographic Silica. EMD provides specialty chemicals and reagents for pharmaceutical, biotech, cosmetic, automotive, plastics and other industrial applications as well as development, manufacture and distribution of a broad array of reagents used for life science research.

**Chromolith HPLC Columns: speed and performance in monolithic form**

Chromolith HPLC columns provide excellent separations in a fraction of the time that standard particulate column will take, because they are made from highly porous monolithic rods of silica with revolutionary bimodal pore structure. The column is no longer packed with small particles but consists of a single piece of high-purity polymeric silica gel.

This revolutionary bimodal pore structure provides a unique combination of macropores and mesopores.

**Macropores: 2µm**

Abb. E-5: Bildverweis [www.unilabkorea.com](http://www.unilabkorea.com), 2012 (Abb. 2-14)

- a) Die E- und B-Felder sind in Phase.
- b) Die B-Feldlinien verlaufen konzentrisch um die Dipolachse, die E-Felder stehen immer senkrecht zu  $\vec{B}$  und senkrecht zum Abstandsvektor  $\vec{r}$  zum Dipolmittelpunkt. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Bächen (oben entgegengesetzte Feldrichtung) bzw. zwei Knoten beträgt  $\lambda/2$ .
- c) Der Betrag der Feldstärken ist gleich bis auf den Faktor c:

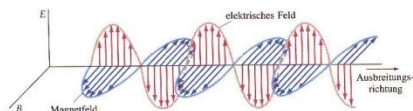
$$|\vec{E}| = c |\vec{B}| \tag{28}$$

- d) Die Abhängigkeit von Dipolmoment  $p_0$ , Kreisfrequenz  $\omega$  (harmonischer Oszillator), Abstand  $r$  und Winkel  $\theta$  zur Dipolachse ist (ohne Beweis)

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{p_0\omega^2}{r} \sin\theta \sin(\omega(t - \frac{r}{c})) \tag{29}$$

- e) In großem Abstand vom Dipol beobachtet man linear polarisierte ebene Wellen. In einer Ebene senkrecht durch das Zentrum des Dipols:  $\vec{E} \parallel \vec{B}$  ( $\vec{B}$  senkrecht dazu):

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - k\vec{r})} \frac{\vec{r}}{r^2} \tag{30}$$



**SIMULATION: Elektromagnetische Wellen**

- f) Die **Energiedensität** (Energie pro Zeit und Fläche) ist ein zentraler Mittel

$$\langle S \rangle = c (w_e + w_m) \tag{31}$$

wobei die Lichtgeschwindigkeit die Geschwindigkeit des Energietransportes beschreibt und die auf das Volumen bezogenen Energiedichten so zusammengefasst werden können:

$$w_e + w_m = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} \vec{B}^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\frac{E}{c})^2 = \epsilon_0 E^2 \tag{32}$$

Abb. E-6: Bildverweis <http://web.physik.rwth-aachen.de>, 2012 (Abb. 2-9)

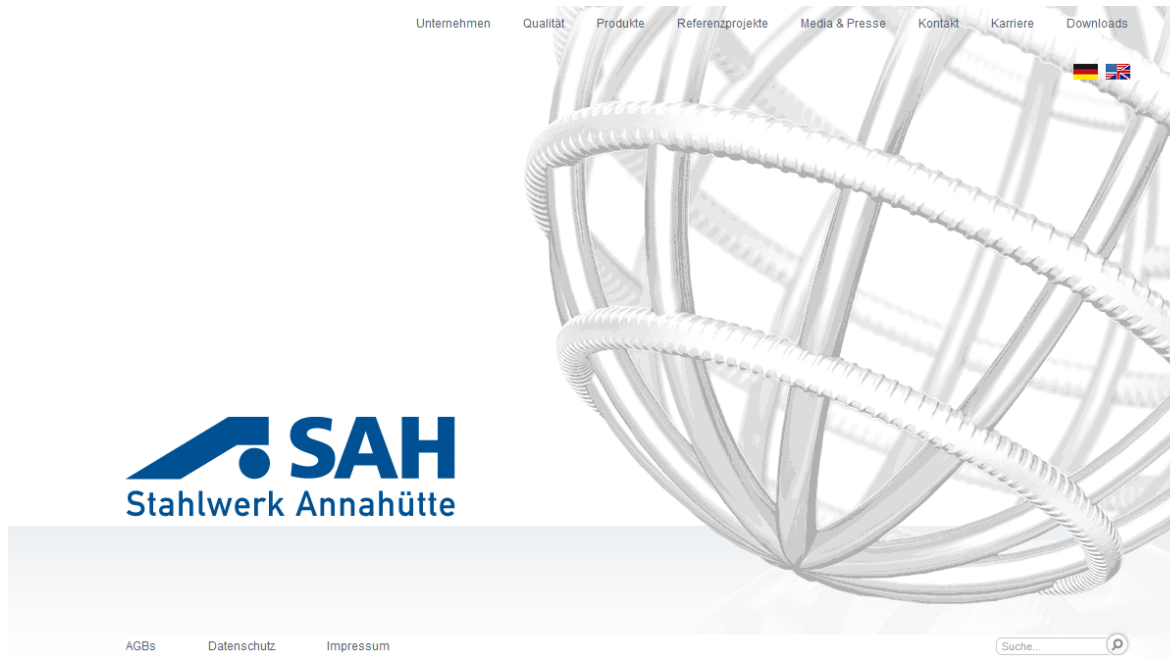


Abb. E-7: Homepage des Stahlwerks Annahütte (www.annahuette.com, 2012)