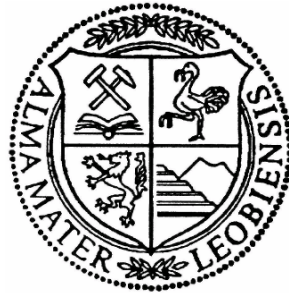


Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering
Montanuniversität Leoben



DIPLOMARBEIT

EXPERIMENTELLE UND RECHNERISCHE CHARAKTERISIERUNG DES BEULVERHALTEN VON PIPELINE-ROHREN

Raimund Michael Fritz

0835186

Studienrichtung G950

Leoben, November 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, 21. November 2013

Ort, Datum

Raimund Michael Fritz

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben und wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Energie Steiermark AG erstellt.

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, dem Leiter des Lehrstuhls, gilt mein besonderer Dank für die Betrauung mit dieser Arbeit und die Betreuung derselben.

Bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Kuss Mario möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Seitens der Energie Steiermark AG bedanke ich mich stellvertretend bei Herrn Ing. Wilhelm Graf für das Zustandekommen dieser Arbeit, sowie für die gute Zusammenarbeit und Hilfestellung bei der Versuchsdurchführung.

Weiters möchte ich mich bei allen Mitarbeiter des Lehrstuhles für Umformtechnik für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung der Versuche und Simulationen bedanken.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern Irmgard und Bertram, meinem Bruder Daniel Roman, meiner Tante Michaela Hölzl und meinem Onkel Martin Parzer die immer ein offenes Ohr für mich gehabt haben.

Großen Dank gebührt auch meinen Freunden in Oberösterreich und in Leoben, die mir stets zur Seite standen. Besonders möchte ich mich bei Hans-Jürgen Luger, Ki Young Kwak und Thomas Müllner bedanken, die mich seit dem Beginn meines Studiums begleiten. Weiters möchte ich mich noch bei Carina Pelka, Damaris Legenstein, Robert Strauss, Florian Nürschinger, Susanna Renhart, Kathrin Hödl und Patrick Trummer bedanken, die stets eine große Hilfe während meines Studiums waren.

Kurzfassung

Beulen sind ein sehr häufiges Schadensbild bei Transportleitungen (Pipeline). Sie haben unterschiedlichste Ursachen, wie zum Beispiel falsches Einbettmaterial oder vergessene Unterlegehölzer. Weitere Ursachen können Beschädigungen durch Dritte, aber auch Fehler bei der Errichtung der Pipeline selbst sein. Ziel dieser Arbeit ist es, in der Literatur mögliche Klassifizierungen von Beulen zu suchen, um diese im Rahmen von Versuchen und Finite Elemente Methoden (FEM) Simulationen gegenüberzustellen. Im ersten Schritt dieser Arbeit werden Möglichkeiten des Auffindens von Beulen beschrieben. Seitens der Literatur existiert bereits eine Vielzahl von Beulklassifikationen, welche hier kurz zusammengefasst wurden. In den folgenden Schritten werden durch Versuche die notwendigen Kräfte, die zum Beulen führen und die Geometrie des Umformganges gemessen. Für ein besseres Verständnis dieses Beulvorganges, werden mittels FEM-Simulationen erstellt, welche einen Blick in das Bauteilinnere ermöglichen. Dadurch konnten Erkenntnisse über die Spannungszustände beim Beulen gewonnen werden. Die Arbeit soll in Zukunft eine Hilfestellung bieten, um die Charakteristik der Beulen besser zu verstehen und diese in der Praxis besser zu beurteilen, sowie geeignete Maßnahmen einleiten zu können.

Abstract

The aim of this diploma thesis is a comparison of different possible classifications of dents in the context of experiments and FEM (finite element method)-simulations. In general dents are high frequently damages in transport pipelines. They have different causes, such as incorrect embedding or forgotten underlay woods. Additional failure may be caused by third parties and occur as well in the construction of the pipeline itself. At the beginning of this thesis possibilities of finding dents in pipelines are described. In literature there already exists a variety of classifications for dents, which are briefly summarized. Subsequently necessary forces, which causes dents and the geometry of the forming process, have been proofed by tests. For a better understanding of the denting process FEM-simulations were created. Those provide a view inside the construction and therefore results of the stress condition in the dents can be achieved. In fact this thesis should improve the knowledge of the characteristical behavior of dents, to advance effected assessment and should help to choose adequate countermeasure.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | III |
| 1. Einleitung und Aufgabenstellung | 1 |
| 2. Stand der Technik | 2 |
| 2.1 Pipeline | 2 |
| 2.1.1 Klassifikation nach Verwendungszweck..... | 2 |
| 2.1.2 Klassifikation nach Art des transportierten Mediums | 3 |
| 2.1.3 Klassifikation nach der Lage | 3 |
| 2.1.4 Aufbau einer Land-Pipeline (Onshorepipeline)..... | 4 |
| 2.2 Rohrherstellung | 8 |
| 2.2.1 Nahtlose Rohre | 8 |
| 2.2.2 Geschweißte Rohre | 11 |
| 2.2.3 Rohrmaterialien | 13 |
| 2.2.4 Korrosionsschutz | 13 |
| 2.3 Pipeline Überwachung..... | 14 |
| 2.3.1 Sichtkontrolle | 14 |
| 2.3.2 Molchung | 14 |
| 2.3.3 Sonstige Methoden | 16 |
| 2.3.4 Festigkeits- und Dichtheitsprüfung | 16 |
| 2.3.5 Reparaturmethoden von Pipelines | 17 |
| 2.4 Charakterisierung von Beulen | 18 |
| 2.4.1 Beulenform: | 18 |
| 2.5 Bewertung von Beulen in der Literatur..... | 19 |
| 2.6 Auslegungsg Grundlagen für Rohre | 22 |
| 2.7 Experimente aus der Literatur | 23 |
| 2.7.1 Versuchsaufbauten | 26 |
| 2.7.2 Hauptversuche..... | 30 |
| 2.7.3 Analytische Lösungen..... | 35 |
| 2.8 Simulationen aus der Literatur..... | 41 |
| 2.8.1 Simulation des Einbeulverhaltens | 41 |
| 3. Experimentelle Überprüfung | 43 |
| 3.1 Erster Vorversuch..... | 43 |
| 3.2 Versuche mit Rohren mit einem Durchmesser von 88,9 mm | 47 |
| 3.2.1 Versuchsaufbau | 47 |
| 3.2.2 Versuchsdurchführung des Einbeulversuchs der 88,9 mm Rohre | 48 |
| 3.2.3 Versuchsauswertung des Einbeulversuches | 50 |
| 3.3 Druckversuch | 52 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Aufbau des Druckversuches | 52 |
| 3.3.2 | Ergebnisse des Druckversuches | 54 |
| 3.4 | Quetschversuch | 61 |
| 3.4.1 | Aufbau des Quetschversuches | 61 |
| 3.4.2 | Ergebnisse des Quetschversuches | 62 |
| 3.5 | Versuche mit Rohren mit 323,9 mm Durchmesser | 65 |
| 3.5.1 | Versuchsaufbau | 65 |
| 3.5.2 | Ergebnisse der Versuche mit den Rohren - 323,9x7,1 mm | 67 |
| 4. | FEM-Simulation | 72 |
| 4.1 | Aufbau der Simulation | 72 |
| 4.2 | Vergleich Simulation-Realität..... | 73 |
| 4.3 | Simulation des Drehwinkels des Eindringkörpers | 74 |
| 4.4 | Isotropes und kinematisches Verfestigungsverhalten beim Ausbeulen..... | 77 |
| 4.4.1 | Ergebnisse mit isotroper Verfestigung..... | 77 |
| 4.4.1 | Ergebnisse mit kinematischer Verfestigung..... | 79 |
| 4.5 | Exzentrisches Einbeulen | 80 |
| 4.6 | Simulation der 329,9x7,1 mm Rohre | 82 |
| 4.7 | Größenvergleich..... | 84 |
| 4.8 | Simulation des Einbeulens mit Innendruck | 85 |
| 5. | Vergleich und Diskussion | 89 |
| 6. | Zusammenfassung | 91 |
| | Literaturverzeichnis | 92 |
| | Abbildungsverzeichnis | 94 |
| | Tabellenverzeichnis | 98 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------------|---|
| b | Fundamentbreite |
| B | Beulenbreite |
| B_G | Grabenbreite in Höhe des Rohrscheitels |
| B_K | Beulenkennzahl |
| C | Bodenkoeffizient |
| d_a | Rohraußendurchmesser |
| Δd_a | zulässige Durchmesseränderung, etwa 0,035 mal d_a |
| $\Delta \varepsilon$ | bezogene Zusammendrückung |
| Δ_{Od} | Ovalität |
| $\Delta \sigma$ | Spannung im Boden |
| D_{\max} | maximaler Außendurchmesser |
| D_{\min} | minimaler Außendurchmesser |
| DP | Auslegungsdruck |
| ε | Dehnung |
| E_M | mittleres Zusammendrückungsmodul |
| E_S | Steifemodul |
| f | Beiwert |
| f_o | Nutzungsgrad |
| KV | Mindestschlagarbeit für die Vollprobe |
| KV_p | die gemessene Schlagarbeit |
| l | Beulenlänge |
| n | Multiplikator entsprechend der Radlast |
| p | Innendruck |
| P_1 | Erdauflast über den Rohrscheitel |
| P_2 | Verkehrsbelastung im Rohrscheitel |
| φ | Schwingbeiwert nach DIN 4033 |
| p_s | Bodenpressung im Rohrscheitel |
| $R_{t,0,5}$ | Dehngrenze bei 0,5% gesamter Dehnung |
| S | Setzung |

| | |
|------------|---|
| s | Rohrwandstärke |
| s_0 | Mindestwandstärke |
| σ | Spannung |
| σ_0 | Sohlspannung |
| σ_a | Axialspannung |
| σ_t | Tangentialspannung |
| S_p | der Querschnitt der Probe unter der Kerbe |
| T | Beultiefe |
| t_{\min} | Mindestwandstärke |
| χ | Korrekturbeiwert |
| γ_E | spezifisches Gewicht der Grabenfüllung |

Analytische Lösungen

| | |
|--------------------|--|
| \bar{a} | Radius einer Flächenlast |
| s | Wanddicke |
| $w_e(0,0)$ | elastische Radialverschiebung im Bereich der Kräfteinleitung |
| w | Gesamtverschiebung, -beultiefe mit elastischem und bleibendem Anteil |
| w_e | elastische Verschiebung in radialer Richtung = elastische Anteil der Beultiefe |
| w_p | bleibende Verschiebung, senkrecht zu Oberfläche = bleibende Anteil der Beultiefe |
| D | Rohrdurchmesser [mm] |
| $E_{s,n}, E_{D,n}$ | Exponent der verbesserten Lösung |
| $F, F(t)$ | Kraft [N] |
| F_0 | Grenzkraft bei Plastifizierung über gesamten Wandquerschnitt [N] |
| $F_{0,s}$ | scheinbare Grenzkraft bei Plastifizierung über gesamte Wanddicke |
| $F_{0,e}$ | elastische Grenzkraft beim Beginn plastischer Verschiebung an der Außenfaser |
| L | Rohrlänge [mm] |
| L_L | Ausdehnung des Beulwerkzeugs in Rohrlängsrichtung |
| L_T | Ausdehnung des Beulwerkzeugs in Tangentialrichtung |

| | |
|----------------|--------------------------------|
| P_{cr} | kritischer Innendruck |
| P_i | Innendruck |
| R | mittlerer Rohrradius |
| \bar{R} | Kreisplattenradius |
| R_1, R_2 | Radien einer beliebigen Schale |
| R_p | Werkstoffstreckgrenze |
| R_m | Zugfestigkeit |
| ν | Querkontraktionszahl |
| θ, ϕ | Winkelkoordinaten |

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Pipelines transportieren über weite Distanzen wichtige Rohstoffe wie Öl, Gas und Wasser. Sie stellen eine Lebensader der Zivilisation dar und müssen sorgfältig gewartet werden. Eine häufige Schädigungsform der Pipelines sind Beulen. Sie entstehen entweder durch Fehler beim Einbau der Pipeline oder durch externe Einflüsse wie unvorsichtige Baggerarbeiten. Baggerschaufeln durchdringen zwar selten das Rohr der Pipeline, aber es bleibt auf Grund der plastischen Verformung eine Beule zurück.

Ziel dieser Arbeit ist, in der Literatur Charakterisierungen von Beulen in Pipelines und nach Möglichkeiten des Auffindens deren, zu suchen. Es ist nach Bewertungsverfahren zu recherchieren, die eine Entscheidungshilfe über den Zustand des eingebeulten Rohres bieten. Weiters sind mögliche Reparaturtechniken für eingebeulte Rohre zu beschreiben. Die Literatur soll auch nach bestehenden Versuchen und Simulationen durchsucht werden, die sich mit dem Beulverhalten von Pipelinerohren befasst haben.

Im nächsten Schritt sind geeignete Versuchsaufbauten zu entwickeln, um das Beulverhalten von Rohren zu überprüfen und zu beschreiben. Dies soll mit einer Presse und mit Hilfe einer Hydraulikpumpe bewerkstelligt werden. Mit einem ersten Vorversuch sind die Grenzen der Prüfparameter der vorhandenen Presse zu ermitteln, um eine Grundlage für die weitere Vorgangsweise der nachfolgenden Versuche zu beschließen. Mit Hilfe der Versuche werden reale Schadensfälle unter Laborbedingungen nachgebildet. Im Rahmen von Druckversuchen soll gezeigt werden, wie sich Beulen unter Druck rückbilden bzw. wie sich der Werkstoff des Rohres verfestigt.

Um auch die Vorgänge im Werkstoff des Rohres sichtbar zu machen, werden mit Finite Elemente Methode Analysen (FEM) der Umformgrad und die Spannungen während des Einbeulvorganges ermittelt. Die Simulation wird durch den Vergleich mit den durchgeführten Versuchen auf ihre Realitätsnähe überprüft. Weiters soll geklärt werden, welchen Einfluss die Stellung des Eindringkörpers auf die Spannungen im Rohr und auf die nötige Einbeulkraft hat. Da Pipelines unterschiedliche Durchmesser aufweisen, ist durch eine Simulation zu klären, inwieweit sich die Größe des Rohres auf die Einbeulkraft auswirkt.

Am Schluss dieser Arbeit sind die Ergebnisse der Literatur, der Versuche und Simulationen zusammenzufassen und zu interpretieren.

2. Stand der Technik

2.1 Pipeline

Pipelines sind Rohrsysteme, die über weite Strecken flüssige oder gasförmige Medien transportieren. Die am häufigsten transportierten Medien sind Wasser, Erdgas und Erdöl. Weiters werden in den Städten Pipelines zum Errichten eines städtischen Fernwärmenetzes verwendet. Die Pipelines können nach ihrem Verwendungszweck, nach Art des transportierten Mediums oder nach ihrer Lage (an Land oder im Wasser) klassifiziert werden [1][18].

2.1.1 Klassifikation nach Verwendungszweck

Sammelleitungen (Gathering Pipelines)

Sammelleitungen sind eine Gruppe von kleineren Pipelines (einige 100m), die den Zweck haben, dass Gas oder Öl von den einzelnen Bohrlochern zu sammeln und zu den Produktionsstätten bzw. zu den Speichertanks zu transportieren [1].

Transportleitungen (Transportation Pipelines)

Diese Art von Pipelines besitzen große Durchmesser für große Volumsströme und erstrecken sich über sehr weite Distanzen von einigen 100 bis 1000 km. Ein gutes Beispiel dafür ist die Südschiene. Sie besitzt einen Durchmesser von 800 mm und erstreckt sich über eine Länge von 200 km. Transportleitungen verbinden Städte, Länder und sogar Kontinente miteinander. Aufgrund der langen Distanzen der Rohrreibung und dem damit verbundenen Druckabfall, werden noch zusätzlich Verdichterstationen für gasförmige Medien, beziehungsweise Pumpstationen für flüssige Medien benötigt [1][21].

Verteilungsleitungen (Distribution Pipeline)

Die Distributions Pipelines haben meist einen kleinen Durchmesser und verbinden den Endverbraucher, wie private Haushalte oder Fabriken, mit den großen Pipeline Netzwerken [1].

2.1.2 Klassifikation nach Art des transportierten Mediums

Rohölleitungen (Crude oil pipeline)

Dieser Typ von Pipeline verbindet Förderstätten mit der Raffinerie oder dem Hafen. Sie können unterschiedlichste Arten oder Qualitäten von Rohöl transportieren. Die Länge der Pipeline kann dabei bis zu mehreren tausend Kilometer betragen [1].

Produktleitungen (Production pipeline)

Produktleitungen transportieren das fertige Produkt oder ein Zwischenprodukt von der Fabrik (Raffinerie) zum Kunden oder einer Abfüllanlage. Das Produkt kann z.B. Benzin, Diesel, Kerosin oder ein Lebensmittel sein [1].

Gas pipeline

Gas Pipelines sind ein einfacher Weg um Gas zu transportieren. Westeuropa besitzt ein Gasleitungssystem mit mehr als 50 000 km. Ein Beispiel dafür ist die Südschiene in der Steiermark. Sie besitzt eine Länge von 200 Kilometer und wird mit einem maximalen Betriebsdruck von 70 bar betrieben [1] [18] [20] [21].

Water pipeline (Wasserleitungen)

Sie verbinden Quellen bzw. Wasseraufbereitungsanlagen mit dem Endverbraucher. Diese Systeme können entweder mit Pumpen oder allein mit Hilfe der Schwerkraft betrieben werden. Die größten Wasser-Pipelines befinden sich auf der Arabischen Halbinsel, so wie in Nordamerika [1][18].

2.1.3 Klassifikation nach der Lage

Pipelines können an Land (onshore) oder auf offener See (offshore) gebaut werden. An Land kann die Pipeline in Gräben versenkt werden, die nach dem Einbau der Pipeline wieder zugeschüttet werden. Unter Bahnschienen und anderen Hindernissen werden die Rohre häufig grabenlos verlegt. Um Flüsse zu queren, muss die Pipeline über eine Brücke oder unter einem Fluss mit einem Düker (Siphon) geführt werden. Unterwasserpipelines auf offener See werden in einem, zuvor unter Wasser angelegten Graben, verlegt. Die J-Typ- und die S-Typ-Verlegetechnik sind die für Unterwasserpipelines üblichen Verlegetechniken [1] [18].

2.1.4 Aufbau einer Land-Pipeline (Onshorepipeline)

Der Graben in dem die Pipeline gelegt wird, wird mit Hilfe eines Baggers ausgehoben. Bei felsigen Untergrund muss entweder gesprengt oder mit einer Grabenfräse gefräst werden. Das ausgehobene Material wird parallel zur Pipeline gelagert. Die Grabenwände müssen gegen Abrutschen abgesichert werden. Der Boden des Grabens wird mit einer Schicht feinem Material, der Bettungslage, aufgeschüttet. Dabei ist zu achten, dass große Steine, organisches Material wie Wurzeln, oder andere Fremdkörper, die die Pipeline beschädigen könnten, nicht in das Bettungsmaterial gelangen. Die fertig geschweißte und gebogene Pipeline wird mit mehreren Pipe-layers auf die Bettungslage gelegt. Dabei muss geachtet werden, dass beim Hineinlegen die Biegekräfte, die durch das Gewicht der Pipeline verursacht werden, möglichst minimal gehalten werden [1][18].

Nach dem Hineinlegen wird der Graben mit dem Aushubmaterial aufgefüllt. Dabei wird das Material gesiebt um große Steine, Müll oder organisches Material zu entfernen. Die Überdeckung der Pipeline muss mindestens 0,8-1,0 m betragen. Mit den Pipelines werden meistens auch Kabeln zur Überwachung und für die Kommunikation zwischen den Pumpstationen und Kontrollstationen verlegt [1] [17][18].

Eine weitere Möglichkeit Rohre zu verlegen, sind die grabenlosen Verlegeverfahren. Sie werden dazu verwendet Pipelines unter Hindernissen, wie Straßen, Bahnschienen, Gebäude usw. zu verlegen. Hierbei wird auf beiden Seiten des Hindernisses eine Grube ausgehoben, von der aus mit unterschiedlichen Verfahren ein Tunnel gegraben wird. Dieses Verfahren kann wie in Abbildung 1 zu sehen ist, der maschinelle Aushub eines Tunnels sein [15].

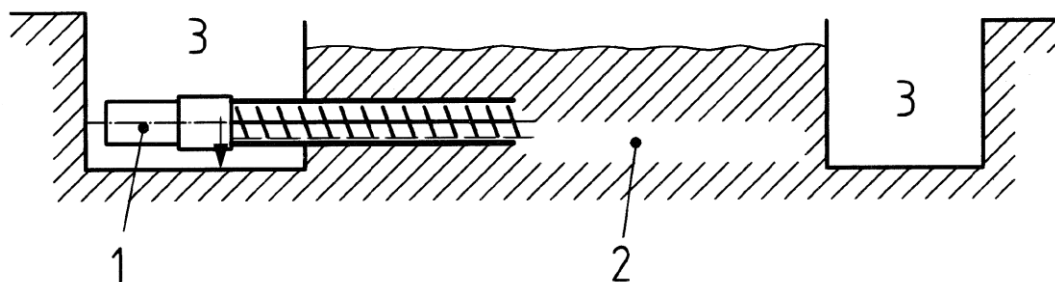


Abbildung 1: Maschineller Aushub unter einem Hindernis. 1.) Hydraulikeinheit, 2.) auszuhebendes Material, 3.) Rohrgraben [15].

Bei eingeebneten elastischen Stahlrohren kommt es aufgrund des Bodendruckes und den zusätzlichen Belastungen, wie einer Strasse oder Schiene, zu einer elliptischen Verformung des Rohres. Hierbei stützt sich das Rohr seitlich am Boden ab. Dabei darf die zulässige Bie-

gespannung nicht überschritten werden. Für die Berechnung dieses Problems sind die elastische Eigenschaften des Bodens zu beachten. In Rahmen von Großversuchen wurde in den USA ein Berechnungsverfahren, siehe Gleichung (2.1), für die nötige Mindestwandstärke entwickelt, das für Rohre bis zu einem Durchmesser von 1300 mm und einer Durchmesseränderung von höchstens 3,5% gültig ist [18].

$$s_0 = \sqrt[3]{\frac{10,71}{\Delta d_a} \cdot (P_1 + P_2) d_a^3 - 1743 d_a^4} \quad (2.1)$$

Die Erdauflast P_1 und die Verkehrsbelastung können über die Gleichung (2.2) und (2.3) berechnet werden. Hierbei ist der Bodenkoeffizient C , für unterschiedliche Böden, aus der Abbildung 2 und Bodenpressung p_s aus der Abbildung 3 zu entnehmen [18].

$$P_1 = C \cdot \gamma_E \cdot B_G \cdot d_a \quad (2.2)$$

$$P_2 = p_s \cdot n \cdot \varphi \cdot d_a \quad (2.3)$$

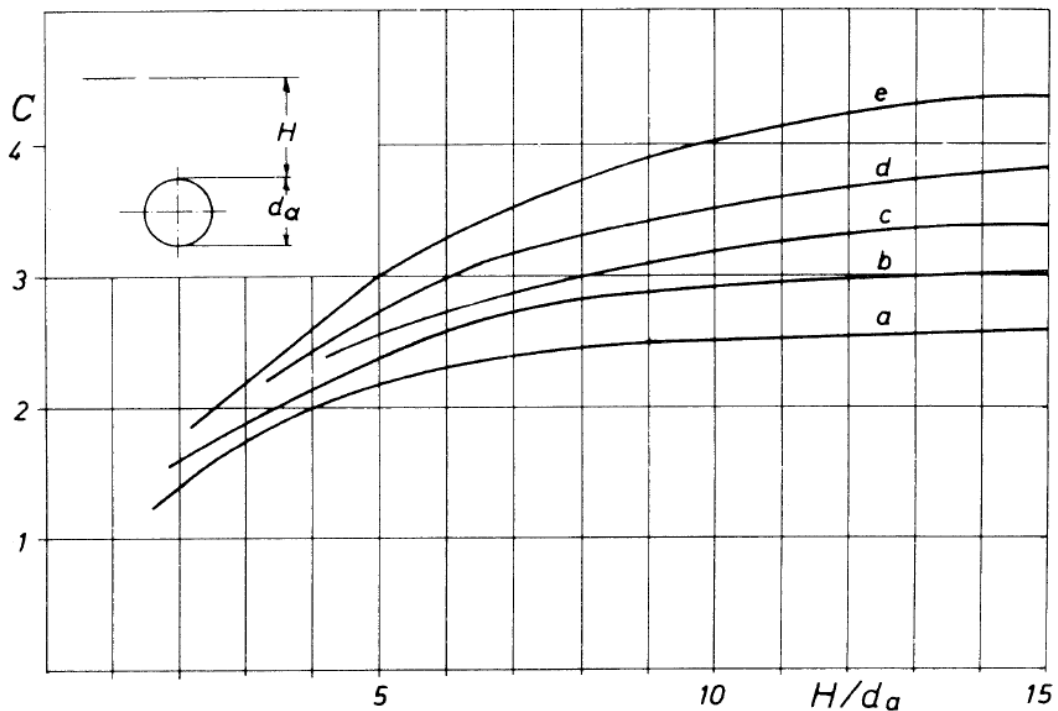


Abbildung 2: Bodenkoeffizient C über dem Tiefen-Rohrdurchmesserverhältnisses. a) körni-ger Boden ohne Kohäsion, b) Sand und Kies, c) feuchte, kultivierbare Erde, d) normale Ton-erde, e) gesättigte Tonerde [18].

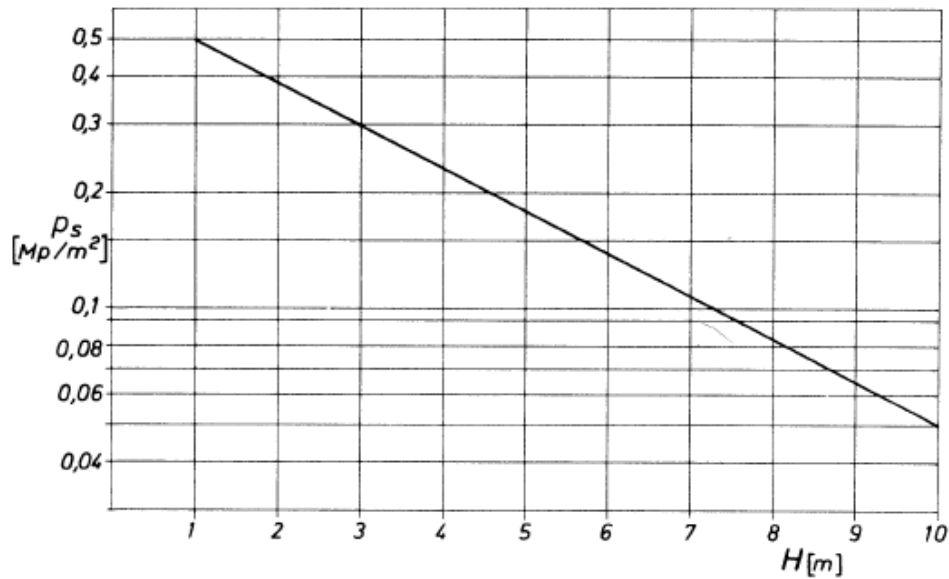


Abbildung 3: Die Bodenpressung im Rohrscheitel über der Bodentiefe [18].

Für Querungen mit Eisenbahnschienen gibt es eigenes dafür von der Deutschen Bahn sogenannte Gaskreuzungsvorschriften, die Mindestwandstärke und eine Überdeckung von 1,5 m vorschreiben. Tabelle 1 zeigt die vorgeschriebenen Mindestwandstärken bezogen auf den Durchmesser [18].

Tabelle 1: Vorgeschriebene Mindestwandstärken nach der Gaskreuzungsvorschrift [18].

| Durchmesser [mm] | Mindestwanddicke [mm] | Werkstoff |
|------------------|-----------------------|---|
| 200 | 5,6 | Nahtlose Rohre: DIN 1629 St 35 Geschweißte Rohre: DIN 1626 St34 oder St 37 |
| 250 | | |
| 300 | | |
| 400 | 6,3 | |
| 500 | 7,1 | |
| 600 | 8,0 | |
| 700 | 8,8 | |
| 800 | 10,0 | |
| 900 | | |
| 1000 | 11,0 | |
| 1100 | 12,0 | |
| 1200 | 14,0 | |

Leitungen können durch einen hohen Grundwasserspiegel aufschwimmen, daher müssen in Gebieten mit hohem Grundwasserspiegel Gegenmaßnahmen, wie eine Betonummantelung, eine zusätzliche Verankerung oder ein Betonreiter, getroffen werden [15].

Setzung

Aufgrund der Masse der Pipeline kann es zu lotrechten Verschiebungen kommen. Hierbei wird zwischen der Sofort- oder Initialsetzung, der Primärsetzung und der Sekundärsetzung

unterschieden. Mit dem Ödometerversuch können für die unterschiedlichsten Böden Zeitsetzungslinien erstellt werden. Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, wie sich ein Boden über die Zeit setzt. Weiters ist zu sehen, welche Setzung zu welchem Zeitpunkt stattfindet [23][24].

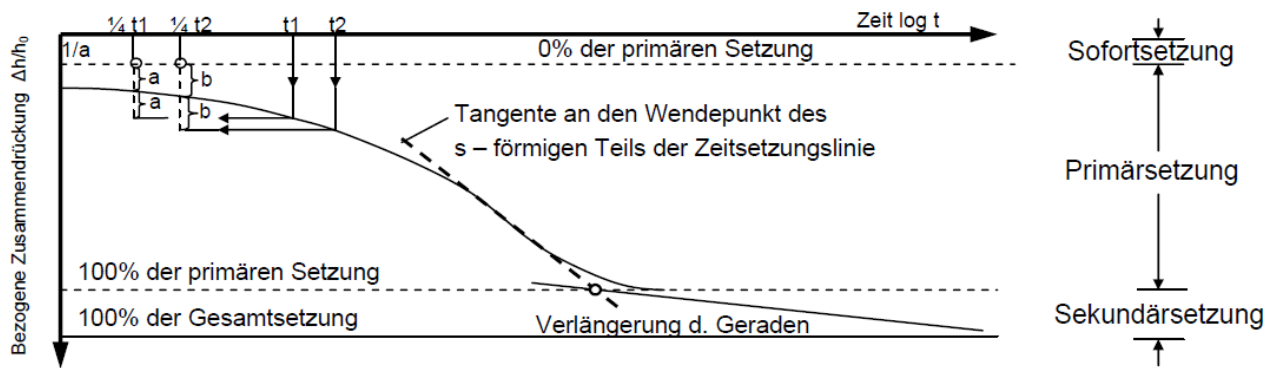


Abbildung 4: Zeitsetzungslinie der spezifischen Setzung über die Zeit [23].

In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass bei unterschiedlichen Böden unter einer bestimmten Last das Setzen und die Setzungstiefe stark variieren [23][24].

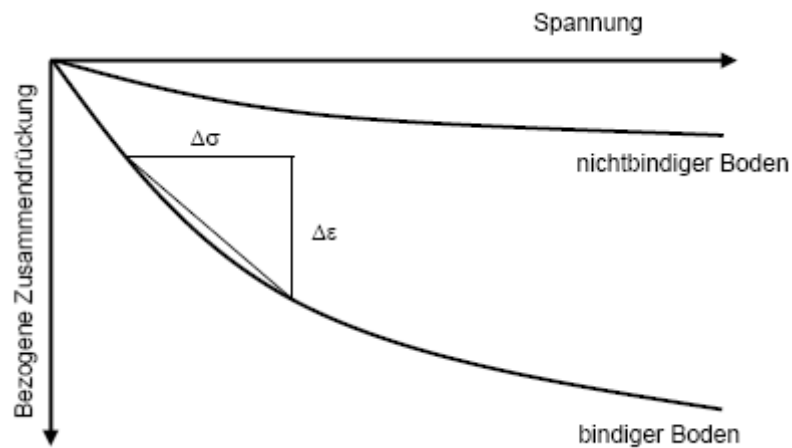


Abbildung 5: Das bezogene Zusammendrücken der unterschiedlichen Böden über der Spannung für den Ödometerversuch [24].

Die Setzung für ein rechteckiges Fundament wird mit folgender Formel (2.4) berechnet [23][24].

$$S = \frac{\sigma_0 \cdot b \cdot f}{E_m} \quad (2.4)$$

Für die Berechnung des mittleren Zusammendrückmoduls wird die Formel (2.5) herangezogen. Dabei wird der Steifemodul mit der Formel (2.6) berechnet. Der Steifemodul ist eine material- und spannungsabhängige Größe, die die Steigung der Setzungslinie in Abbildung 5 beschreibt. Diese Größe kann mit dem Ödometerversuch gemessen werden [23][24].

$$E_m = \frac{E_s}{\chi} \quad (2.5)$$

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.6)$$

Besonders bei Übergängen wie z.B. beim Übergang zwischen grabenlosen und grabenverlegten Pipelines oder beim Übergang von einer Brücke zu grabenverlegten Pipelines, kann es zu unterschiedlichen Setzungen und dadurch zu Biegemomenten im Rohr kommen.[15]

2.2 Rohrherstellung

2.2.1 Nahtlose Rohre

Ausgangsmaterial für nahtlose Rohre sind Halbzeuge mit runden oder quadratischen Querschnitten. Das Lochen des Halbzeuges kann durch das Schrägwalzverfahren nach Mannesmann oder dem Ehrhardt-Verfahren erfolgen. Ein weiteres Verfahren ein Halbzeug zu lochen wäre die Tiefenbohrung. Bei der Tiefenlochbohrung wird ein spezieller Bohrmeißel verwendet, da ein Spiralbohrer die Spanabfuhr nicht mehr bewältigen kann. Der durch die Verfahren erzeugte Hohlblock wird anschließend noch gestreckt [12][27].

Schrägwalzen

Beim Schrägwalzen stehen zwei Walzen, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, mit gleichem Drehsinn 3 bis 6° schräg zueinander. Aufgrund der konischen Form im Einzugsbereich der Walze, wird das Einziehen des runden Halbzeuges erleichtert. Während des Walzens wird das Material gestaucht und es entstehen im Kern Zugspannungen, welche ein Aufreißen des Materials bewirken. Der eingeführte Dorn unterstützt diesen Vorgang. Das Ergebnis sind dickwandige Hohlkörper mit Wandstärken von 20 bis 30 mm, deren Oberfläche mit Hilfe eines Glättungsteils der Walze geglättet werden [12].

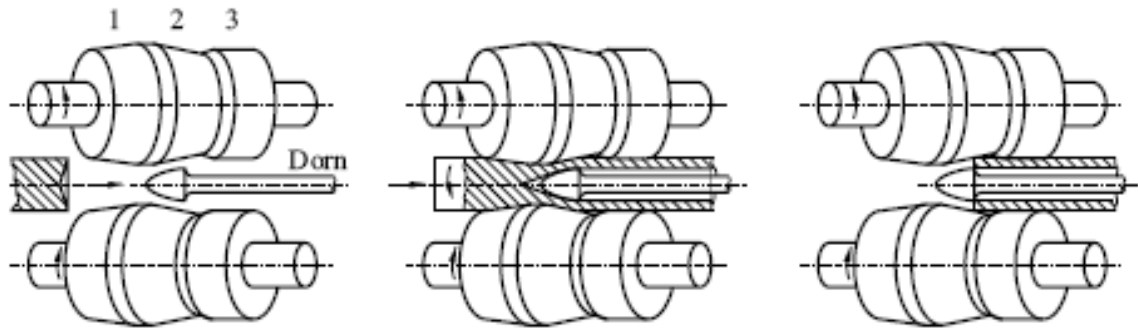


Abbildung 6: Schrägwalzverfahren nach Mannesmann. 1 Lochteil, 2 Querwalzteil, 3 Glättungsteil [13].

Ehrhardt-Verfahren

Ausgangsmaterial für das Verfahren ist ein kubischer zylindrischer Block. Dieser wird mit einer zylindrischen Matrize zu einem Zylinder mit Sackloch gepresst, der anschließend in einem Abstreckvorgang gestreckt wird. Die Abbildung 7 zeigt die einzelnen Schritte des Ehrhardt-Verfahrens [12].

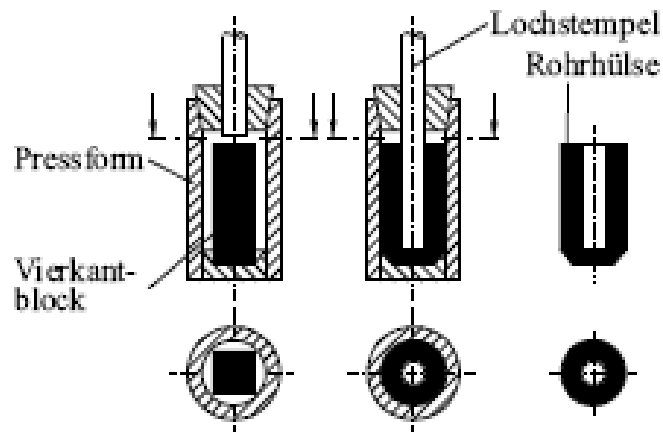


Abbildung 7: Das schrittweise Lochen nach Ehrhardt [13].

Pilgern nach Mannesmann

Das gelochte Halbzeug wird hierbei diskontinuierlich mit zwei zum Teil kalibrierten Walzen und einem eingeführten Dorn zu einem Rohr gewalzt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um einen Walzschmiedevorgang [12].

Wie die Abbildung 8 a) zeigt, kneift das Kalibrierteil eine bestimmte Länge ab, danach erfolgt das Auswalzen auf die fertige Wanddicke mit anschließendem Glätten (Abbildung 8 b). Der Dorn und das Rohr werden dabei zurückgedrängt (Abbildung 8 c) und anschließend freige-

geben. Mit einem Manipulator wird das Rohr soweit vorgeschoben bis wieder ein neues Teilstück abgekniffen, gewalzt und geglättet werden kann [12].

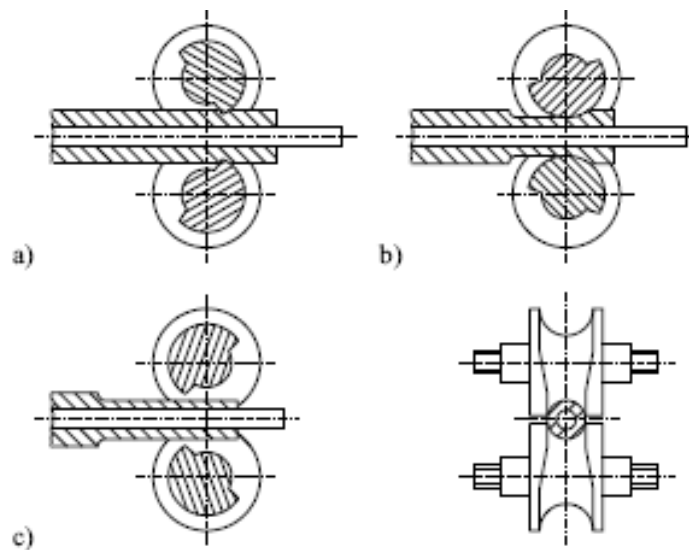


Abbildung 8: Das Pilgerschrittwalzen von Rohren [13]. a) Luppe wird gefasst b) Ausstreckvorgang c) Luppe freigeben zum Vorschieben [13].

Mit diesem Verfahren werden Rohre mit einem Durchmesser von bis zu 600 mm und einer Länge von bis zu 30 m erzeugt [12].

Stoßbank-Verfahren nach Ehrhardt

Bei diesem Verfahren wird das Rohr zum Strecken durch Ziehringe oder durch nicht angetriebene profilierte Rollenpaare gezogen und gestreckt. Dabei wird das Rohr stark gegen den Dorn gepresst. Das hat zur Folge, dass das Rohr unter Umständen, nur schwer abgezogen werden kann. Dieses Verfahren eignet sich für kleine Durchmesser. Die fertigen Rohre können eine Länge bis zu 10 m haben. Abbildung 9 zeigt deutlich, wie sich die Wandstärke des Rohrs nach jedem Rollenpaar reduziert [12].

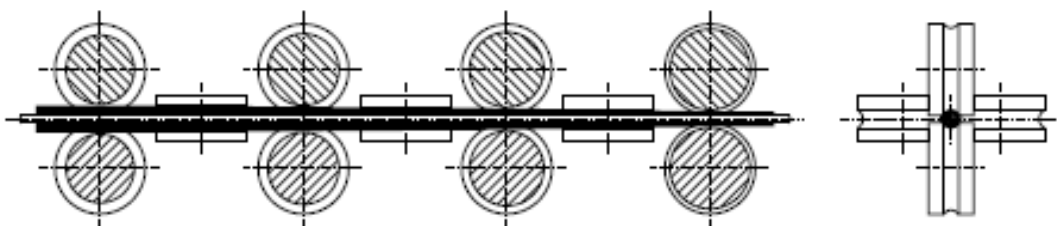


Abbildung 9: Das Stoßbank-Verfahren nach Ehrhardt [13].

Reduzierwalzwerk

Dieses Verfahren eignet sich für Rohre mit Durchmessern kleiner 40 mm, die ohne Dorn im Reduzierwalzwerk gestreckt werden. Das Reduzierwalzwerk besteht aus profilierten Rollenpaaren, die um 90° oder 120° versetzt sind. Der Durchmesser wird von Rollenpaar zu Rollenpaar immer kleiner, bis die gewünschte Größe erreicht ist. Dabei wird die Drehzahl von den Rollenpaaren immer höher, um ein Anstauchen der Wanddicke zu vermeiden. In Abbildung 10 ist zu sehen wie der Durchmesser des Rohres reduziert wird [12].

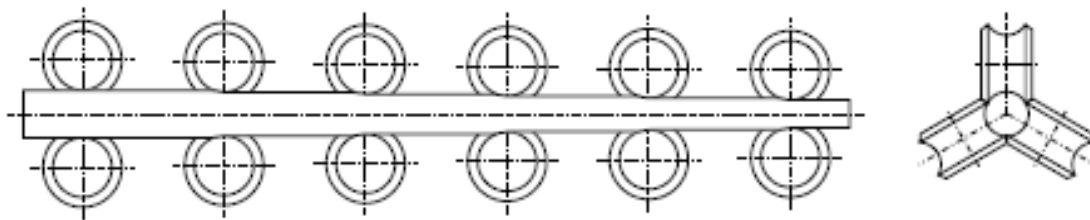


Abbildung 10: Das schrittweise Strecken eines Rohres mit dem Reduzierwalzwerk [13].

2.2.2 Geschweißte Rohre

Bei den geschweißten Rohren werden als Ausgangsmaterial einzelne Bleche oder Blechbänder verwendet. Diese werden in einem Umformprozess zu einem Rohr geformt. Für das Einrollen des Bleches existieren mehrere Verfahren, wie das Profilwalzen oder das Rohrschraubenförmige Einrollen, wie in Abbildung 11. Anschließend werden die so entstandenen Schlitz verschweißt. Als Schweißverfahren eignen sich Widerstandsschweißen, Hochfrequenz-Schweißen und Unterpulverschweißen [12].

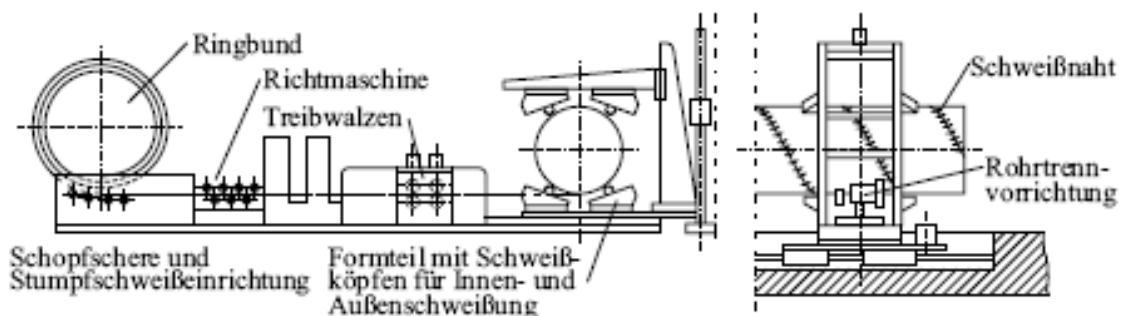


Abbildung 11: Herstellung von Wendelnahtröhen aus einem Blechband [13].

Wendelnahtröhe können eine sehr große Länge von über 12 m besitzen. Sie sind besonders für Wasserpipelines und Pipelines mit niedrigen Drücken geeignet [1].

Die Abbildung 12 zeigt das Widerstandsschweißen und das Hochfrequenz-Schweißen. Beim Widerstandsschweißen wird die Joulesche Wärme ausgenutzt, die bei stromdurchflossenen Körpern entsteht. Hierbei kann der Strom direkt oder induktiv in den Körper eingebracht werden [12][22].

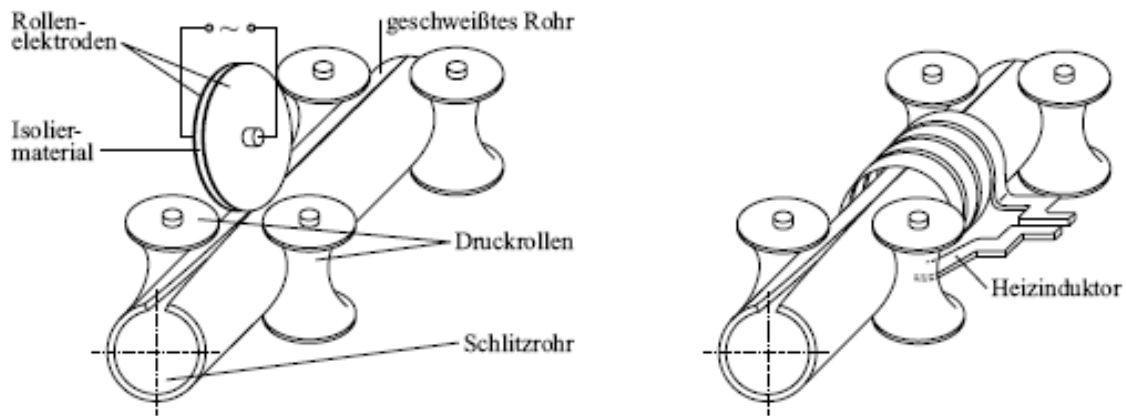


Abbildung 12: Widerstandsschweißen und HF-Schweißen von Rohren [13]

Das Unterpulverschweißverfahren ist ein Schmelzschweißverfahren, bei dem das Schweißgut mit einem Lichtbogen geschmolzen wird und das zugeführte Schweißpulver bildet eine Schlacke, die auf der Schweißnaht aufschwimmt. Sie schirmt somit die nicht erstarrte Schweißnaht von der Umgebung ab [12].

Ein weiteres Verfahren zur Rohrherstellung stellt das U-O-E(SAW) Verfahren da. Wie die Abbildung 13 zeigt, wird ein Blech zuerst in eine U-Form und anschließend in eine O-Form gebogen. Diese entstandene Form wird mit Heftnähten fixiert. Die Längsnaht wird zuerst außen und dann innen mit dem Unterpulverschweißverfahren hergestellt. Anschließend wird das Rohr noch expandiert und auf Fehler überprüft.

Fertigungsschritte der Rohrherstellung (UOE)

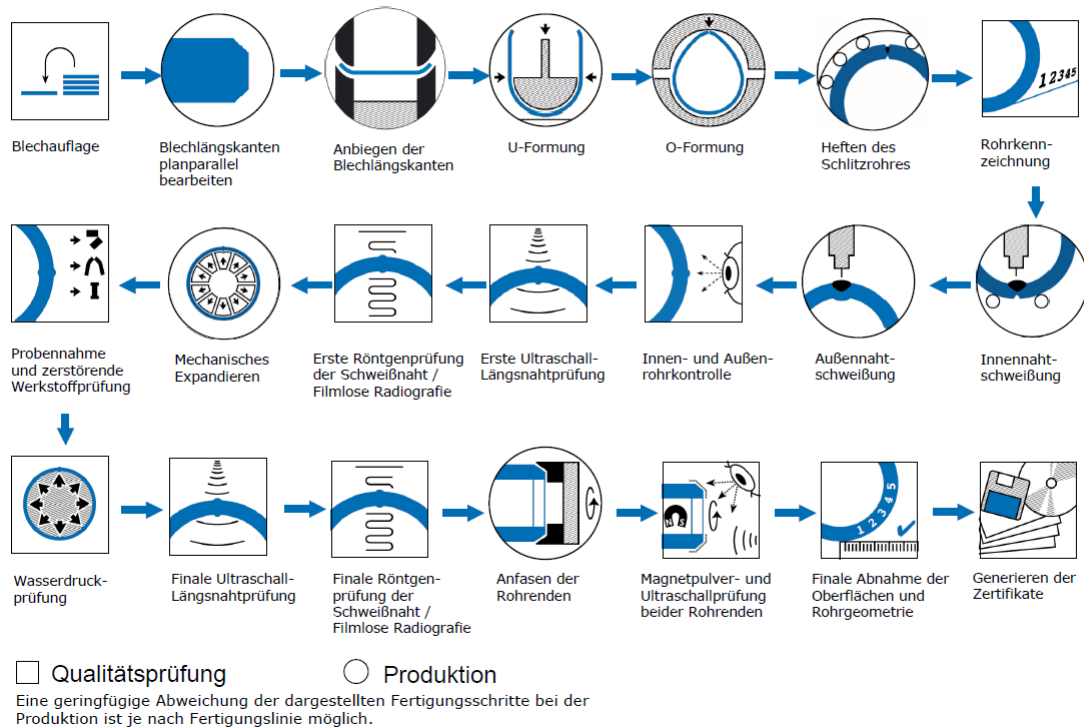


Abbildung 13: Fertigungsschritte des UOE-Verfahren [26].

2.2.3 Rohrmaterialien

Aus wirtschaftlichen Gründen werden möglichst Kohlenstoffstähle mit Mangan als Hauptlegierungselement für Gas- und Ölpipelines verwendet. Diese Stähle sind in der DIN 17172 von 1978 für Deutschland und in der API 5L, API 5LX und der API 5LS aufgelistet. Nach der ÖNORM EN 1594 müssen Rohre und Rohrleitungsteile aus beruhigtem Stahl sein. Dieser darf nicht mit dem Siemens-Martin-Verfahren hergestellt werden. Um die Schweißbarkeit der Rohre zu gewährleisten, darf der Rohrwerkstoff den in der EN 10208-2 vorgeschriebenen Höchstwert für den Kohlenstoffäquivalentwert (CEV-Wert) nicht überschreiten [1][15].

2.2.4 Korrosionsschutz

Bei Pipelines werden zwei grundlegende Verfahren zum Schutz gegen Korrosion unterschieden, den aktiven und den passiven Schutz. Beim aktiven Schutz wird die Pipeline mit einer Opferanode elektrisch mit einem Kabel verbunden und bildet mit dem Bettungsmaterial ein galvanisches Element, wobei die Pipeline als Kathode fungiert. Die Opferanode wird nach einer Zeit verbraucht und muss erneuert werden. Eine weitere Möglichkeit die Pipeline gegen Korrosion zu schützen, ist der kathodische Schutz. Bei diesem Verfahren wird das zu schützende Rohr an einen Fremdstrom oder an eine Fremdstrom-Anode angeschlossen, um

das Spannungsgefälle zwischen Boden und Rohr auszugleichen. Der Fremdstrom muss überwacht werden und bei erhöhtem Fremdstrom kann auf Korrosionsschäden der Pipeline bzw. auf eine Schädigung des Mantelmaterials geschlossen werden. Bei der Errichtung des kathodischen Korrosionsschutzes ist darauf zu achten, dass es durch Fremdbauten, wie Hochspannungsleitungen zu Störungen kommen kann. Aus diesem Grund sind entsprechende Gegenmaßnahmen zu treffen. Laut ÖNORM EN 1594 ist die kathodische Schutzeinrichtung nach Errichten des Leitungssystem, so schnell wie nur möglich in Betrieb zu nehmen. Falls dies nicht möglich ist, sollte die Leitung temporär mit einer Opferanode geschützt werden. Der passive Schutz besteht aus einer Beschichtung der Pipeline und verhindert so das korrosive Medien zur Pipeline gelangen. Diese Beschichtungen bestehen aus Bitumen, Beton oder Lack [1][15].

2.3 Pipeline Überwachung

Es gibt zwei wesentliche Verfahren, Beschädigung wie Beulen oder Risse in einer Pipeline zu finden. Diese sind die Molchung und die Sichtkontrolle.

2.3.1 Sichtkontrolle

Die einfachste Form eine Pipeline auf Schäden zu kontrollieren ist die Sichtkontrolle. Diese wird zu Fuß oder durch Zuhilfenahme von Fahrzeugen, wie Autos oder Helikopter, durchgeführt. Hierbei achtet geschultes Fachpersonal auf sichtbares Öl, Deformationen des Bodens und auf offensichtliche Schäden von Pipelines, die frei auf der Oberfläche liegt (over ground pipe) [1].

Weiters gibt es Versuche, Hunde darauf zu trainieren, die kleinste Mengen von Gas oder Öl aufzuspüren, um so kleine Lecks in Pipelines zu finden [11].

2.3.2 Molchung

Die Molchung ist ein sehr effektiver Weg um lange Pipelines auf Materialschäden zu überprüfen. Hierbei wird ein Molch in der gewünschten Konfiguration mit Hilfe des Förderstromes durch die Pipeline geschickt und mit einer Molchfalle wieder aus der Pipeline geführt [1].

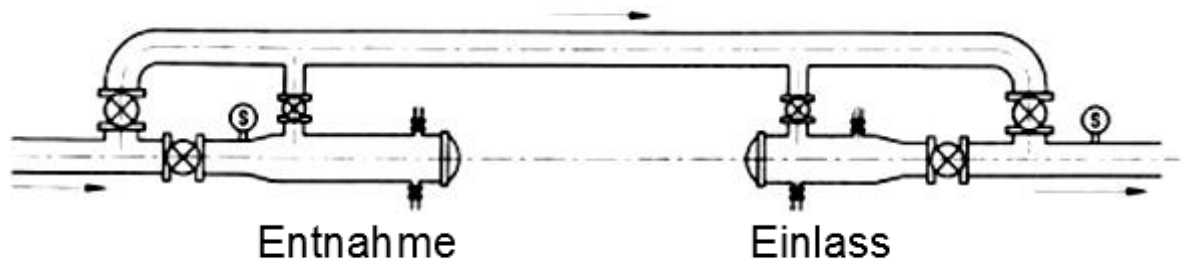


Abbildung 14: Molchfalle zur Entnahme oder Einlass des Molches [1]

Zum Auffinden von Beulen oder anderen Materialschäden gibt es Molche mit Kaliberscheiben und Messmolchen. Ist nach einer Molchung die Kaliberscheibe beschädigt, sind Beulen in der Pipeline vorhanden und es muss ein Messmolch durch die Leitung geschickt werden, um die Größe des Schadens zu ermitteln. Messmolche die mit Ultraschall- oder Magnetstreuflossensoren ausgestattet sind, benötigen eine eigene Stromversorgung (Batterie) und ein Speichermedium auf dem die gemessenen Daten abgespeichert werden können. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Molchen. Diese werden aber nicht nur zur Überwachung von Pipelines verwendet, sondern auch zur Reinigung dieser [1] [14].

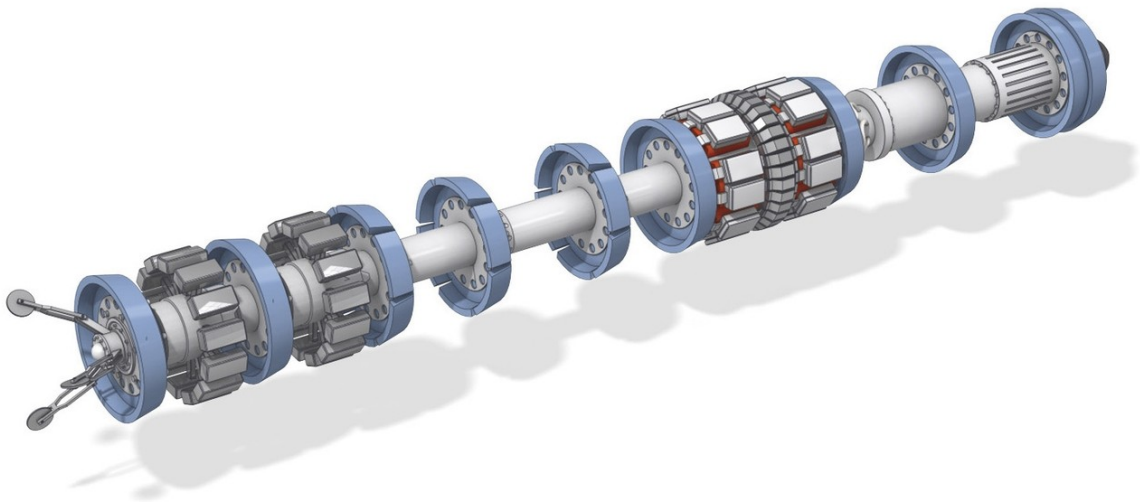


Abbildung 15: Ein intelligenter Molch[2].

Rohre benötigen einen freien Durchmesser von 75% des Außendurchmessers des Rohres um die Molchbarkeit zu gewährleisten [3].

2.3.3 Sonstige Methoden

Sensorkabel

Sensorkabel können, je nach Aufbau, die Änderung des lokalen Temperaturfeldes messen oder Alarm schlagen, wenn sie in Berührung mit einer Flüssigkeit kommen. Mit diesem System kann nur ein Versagen des Rohres detektiert werden. Beulen, Risse die kein Mediumsaustritt verursachen und andere Vorschädigungen können nicht erfasst werden.

Flüssigkeitsüberwachung

Durch ständige Überwachung des Druckes, der Temperatur und des Volumenstroms des Mediums in der Pipeline, können Unregelmäßigkeiten erkannt werden, die auf Beschädigungen der Rohrleitungen hindeuten. Jede Kompressor-/Pumpstation ist mit den nötigen Sensoren ausgestattet. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Beschädigung erst erkannt wird wenn diese schon vorhanden ist. Diese Methode stellt eine Erweiterung des SCADA-Systems dar [1].

2.3.4 Festigkeits- und Dichtheitsprüfung

Bevor eine Pipeline in Betrieb genommen werden kann, muss diese auf Dichtheit und Festigkeit überprüft werden. Dabei darf die Druckprüfung und die Festigkeitsprüfung gleichzeitig durchgeführt werden [15].

Festigkeitsprüfung

Bei der Festigkeitsprüfung wird die Leitung mit Wasser gefüllt. Um Lufteinschlüsse zu vermeiden wird die Befüllung mit Hilfe eines Trennmolches durchgeführt. Nach dem Befüllen des Rohres wird der Druck soweit erhöht, dass in der tiefsten Stelle der Leitung der Auslegungsdruck 15% über dem Grenzdruck im Störfall liegt. Dabei ist zu achten, dass dieser nicht zu weit erhöht wird, da es sonst zu unkontrollierten, plastischen Verformungen der Leitung kommt. Dieser Druck muss mindestens 15 min gehalten werden. Während der Prüfung darf der Druck nicht signifikant abfallen, da ansonsten Fehler in der Leitung vorhanden sind. Es ist auch möglich, eine Festigkeitsprüfung mit Luft oder Inertgas durchzuführen, solange die dafür nötigen Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden [15].

Dichtheitsprüfung

Der Druck der Dichtheitsprüfung darf nicht über dem der Festigkeitsprüfung liegen. Das Rohr wird, wie bei der Festigkeitsprüfung, mit Wasser befüllt und mit Druck beaufschlagt. Die Dichtheitsprüfung dauert mindestens 24 Stunden und darf nur in Sonderfällen, z.B. wenn der

Leitungsinhalt weniger als 20 m³ beinhaltet, verkürzt werden. Wenn sich die Menge des Prüfmediums über die Prüfdauer nicht signifikant verringert, gilt ein Leitungsabschnitt als dicht [15].

2.3.5 Reparaturmethoden von Pipelines

Wenn Pipelines beschädigt sind, können kleinere Schäden mit Manschetten, Composite-Schläuche oder mit Smith-clamps abgedichtet werden. Ist aber die Schädigung des Rohres zu stark, muss der Teilabschnitt ausgewechselt werden. Hierbei wird die Leitung druckfrei gelegt und der Betrieb wird eventuell über eine Bypassleitung wie in Abbildung 16 aufrecht erhalten. Der zu wechselnde Leitungsteil wird mit Hilfe von Trennmolchen vom restlichen Leitungssystem abgetrennt. Das zu wechselnde Rohrteil wird herausgeschnitten und entfernt. Ein neues Rohr kann nun eingebaut werden [1] [4].

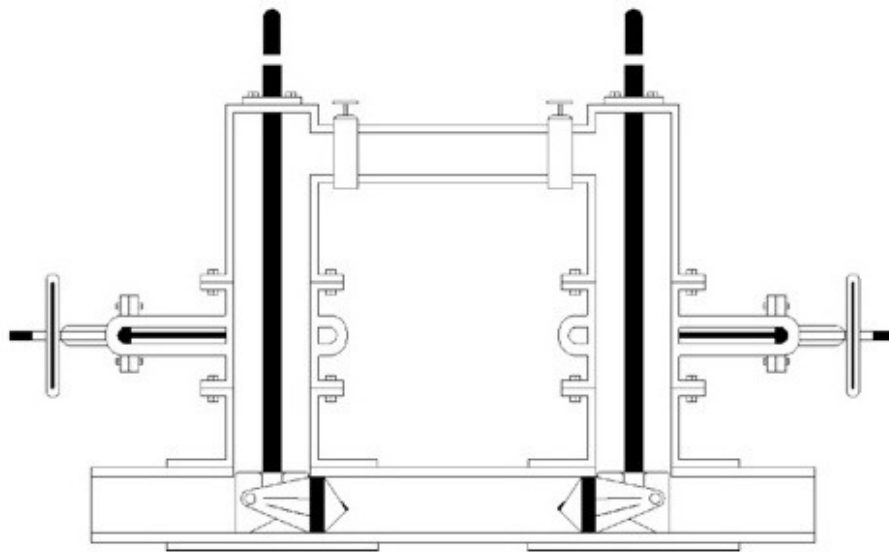


Abbildung 16: Die Bypassleitung einer beschädigten Pipeline[25].

Sind kleine Kerben in der Pipeline vorhanden, können diese durch Herausschleifen entfernt werden. Kerben stellen immer eine Schwachstelle dar und haben in ihrem Grund eine Spannungsspitze. Sie können ein Ausgangspunkt für eine spätere Rissentwicklung sein. [4]

2.4 Charakterisierung von Beulen

2.4.1 Beulenform:

Die Form der Beule ist abhängig vom Eindringkörper und Eindringwinkel. In der Realität sind Beulen nicht klar umrandet und müssen daher für Versuchszwecke idealisiert werden. C. R. Alexander kategorisiert die Beulen in Pipelines in: [4]

- ebene Beulen ohne Furchen/Kratzer (Plain dents)
- Beulen mit Furchen/Kratzer (Dents with gouges)
- gezwungene Beule (Constrained dents)

M. Allouti et al. unterteilt die Beulen wie folgt: [5]

- Beulen mit weicher Kurvenform (Smooth dent)
- Beulen mit spitzer bzw. abrupter Kurvenform (Kinked dent)
- ebene Beulen (Plain dent)
- ungezwungene Beulen (Unconstrained dent)
- gezwungene Beulen (Constrained dent)

K.A Macdonald et al. [9] teilt die Typen, der Schädigungen allgemein mit Hilfe des 'Pipeline Defect Assessment Manual' (PDAM) wie folgt ein:

- fehlerfreie Pipeline (Defect-free pipe)
- Korrosion (Corrosion)
- Furchen/Kratzer (Gouges)
- ebene Beulen (Plain dents)
- Beulen mit spitzer bzw. abrupter Kurvenform (Kinked dents)
- weichgeformte Beule auf einer Schweißnaht (Smooth dents on welds)
- weichgeformte Beule mit Furchen/Kratzer (Smooth dents containing gouges)
- weichgeformte Beule mit anderen Fehlern (Smooth dents containing other types of defects)
- Produktionsfehler (Manufacturing defects in the pipe body)
- Rundnahtfehler (Girth weld defects)
- Liniennahtfehler (Seam weld defects)
- Rissbildung (Cracking)
- Spannungsrisskorrosion (Environmental cracking)

Im Buch Gashochdruckleitungen - Sicherheit und Qualität von Klaus Kesselbarth werden Beulen in 2 Typen eingeteilt [14].

Typ A: Punktförmige Beulen, bei denen die Konturen der Rohrwand sowohl in axialer als auch in tangentialer Richtung Wendepunkte aufweisen, in Abbildung 17 ist der Typ A zu sehen.

Typ B: Beulen quer zur Rohrachse, die nur in axialer Richtung Wendepunkte aufweisen, die also in tangentialer Richtung nur abgeflacht sind, was in Abbildung 18 ersichtlich ist.

Für Versuchszwecke werden kreisförmige bis elliptische und gestreckte Beulen erzeugt.

2.5 Bewertung von Beulen in der Literatur

Nachdem durch eine optische Begutachtung die Beule in den Typ A oder Typ B kategorisiert worden ist, muss die Beulenkennzahl B_K wie folgt berechnet werden.

Für Typ A:

$$B_K = \frac{d_a \cdot T}{S \cdot l \cdot B} \quad (2.7)$$

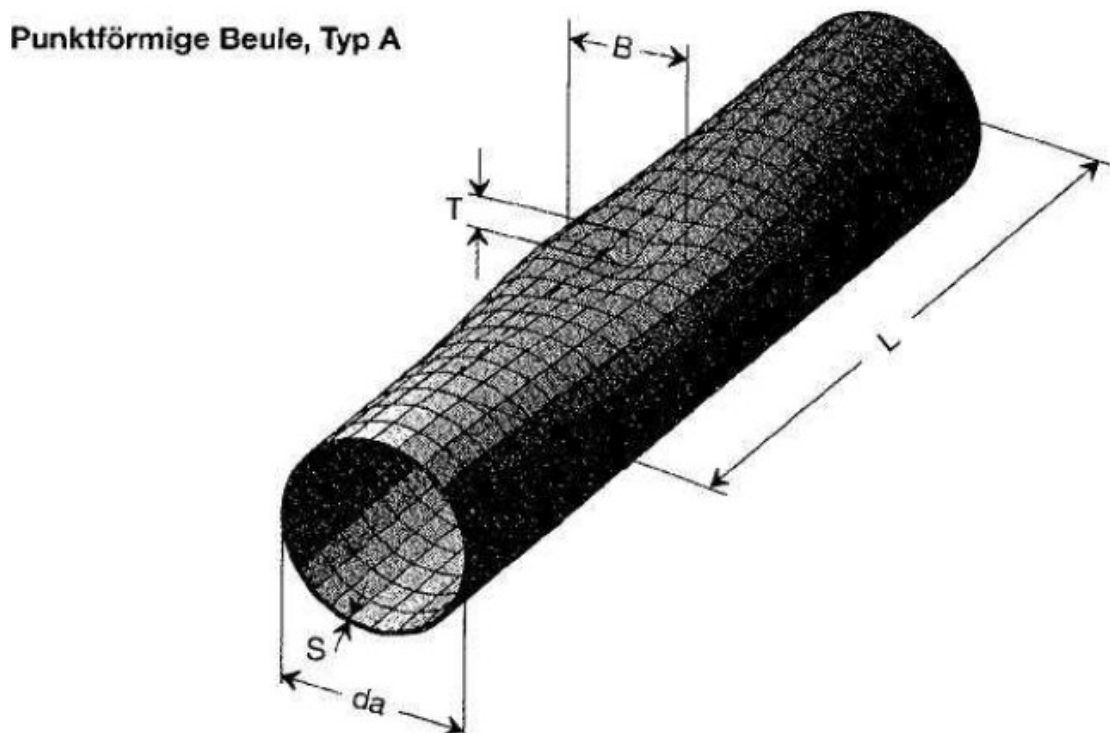


Abbildung 17: Eine punktförmige Beule des Typ A [14].

Für Typ B:

$$B_K = \frac{d_a \cdot T}{S \cdot l} \quad (2.8)$$

Beule quer zur Rohrachse, Typ B

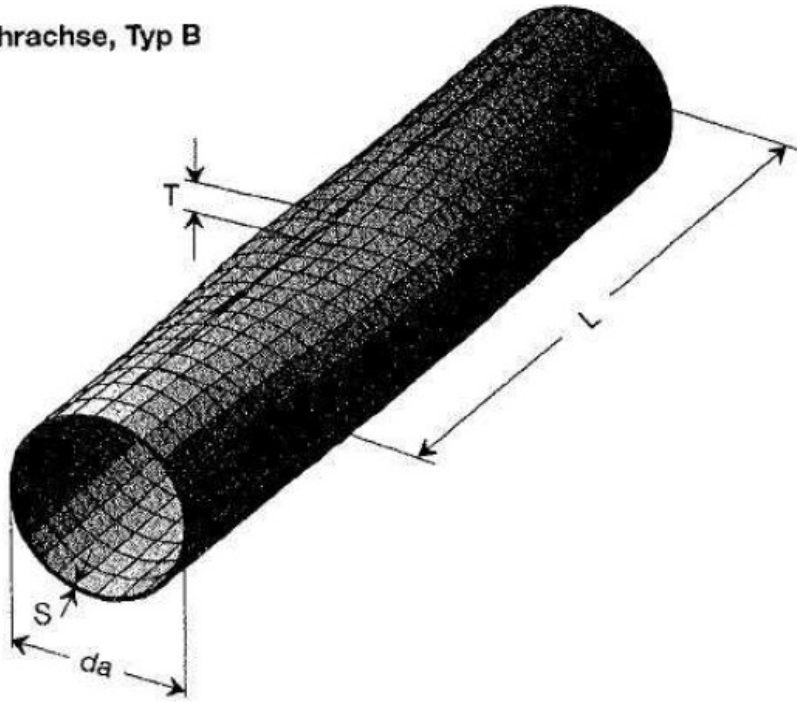


Abbildung 18: Eine taförmige Beule des Typ B [14].

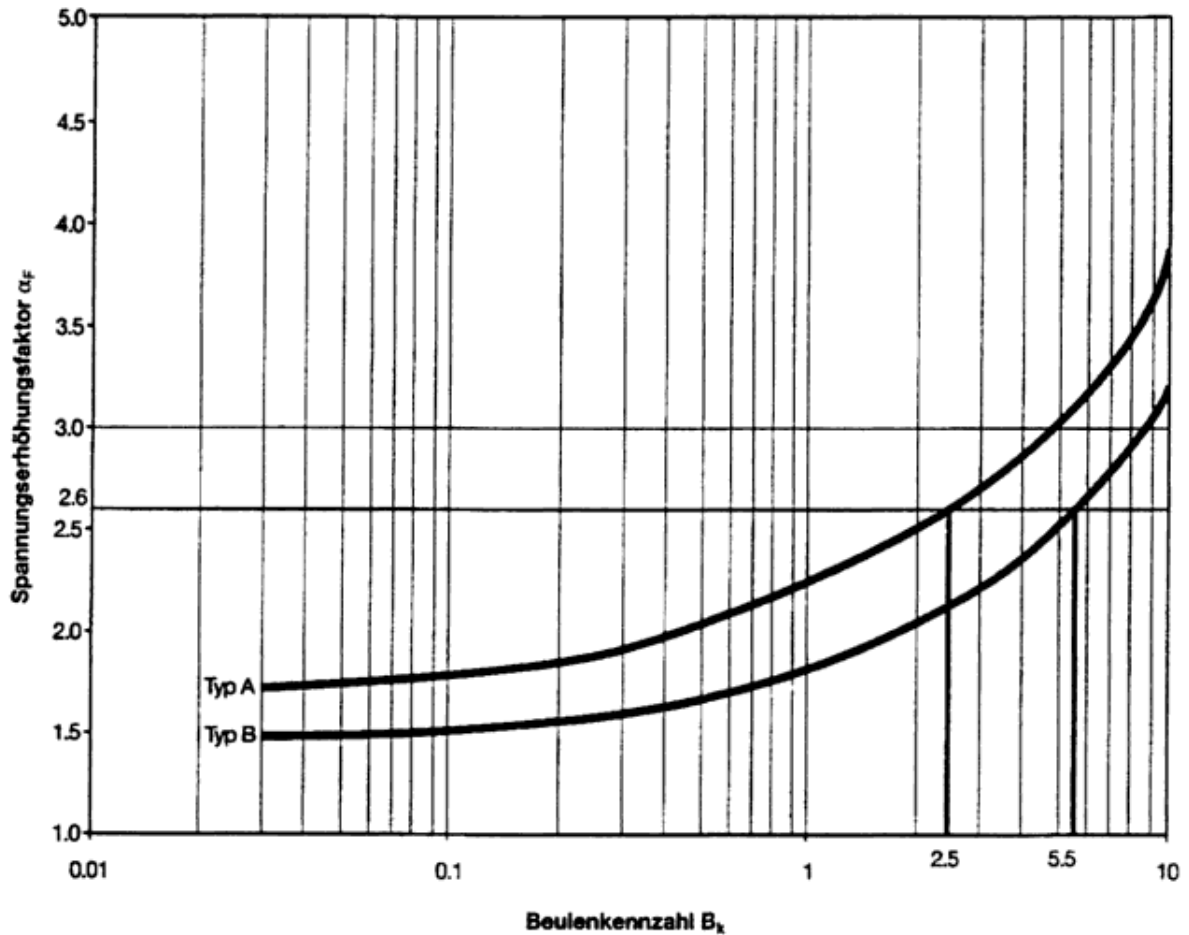


Abbildung 19: Der Spannungserhöhungsfaktor über die berechnete Beulenzahl [14].

In Abbildung 19 ist der Zusammenhang der Beulenzahl B_K und dem Spannungserhöhungsfaktor α_F zu sehen. Auf der Y-Achse ist die Spannungserhöhung aufgetragen und auf der X-Achse ist die Beulenzahl logarithmisch aufgetragen. Im vorwiegend ruhenden Leitungsbetrieb würden Beulen keine Einschränkungen bedeuten. Wenn aber eine dynamische Belastung vorliegt, muss geklärt werden, ob die Beule eine lebensdauerbestimmende Größe ist. Andernfalls sind andere Einflüsse wie Schweißnähte, Ovalitäten, Wanddickenschwankungen usw. für die Lebensdauer bestimmend. Somit müssen die zulässigen Lastwechsel der Beule größer sein, wie die zulässigen Lastwechsel des Rohrs. Aus der DIN 2413 und dem AD-Merkblatt S2 ergibt sich ein Spannungserhöhungsfaktor von [14]:

$$\alpha_F \leq 2,6 \text{ als Ergebnis } (N_{zul})_{Beule} \geq (N_{zul})_{Rohr}$$

Für $\alpha_F > 2,6$ wird angenommen, dass die Beule ein Lebensdauer begrenzender Faktor ist. Ob eine Pipeline dynamisch oder vorwiegend ruhend belastet wird, geht aus der DIN 2413 hervor. Die Abbildung 20 zeigt ein Beispiel für StE 290.7 und für StE 480.7 TM [14].

| Werkstoff Stahlrohr für Ferngas- leitungen gemäß DIN 17172 | Beanspruchungen, bei denen eine Ermittlung der rechnerischen Wanddicke gemäß Geltungsbereich I (DIN 2413, T. 1) zulässig ist | | | | | | |
|--|--|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| | Ruhende Beanspruchung N = 0 | | Vorwiegend ruhende Beanspruchung | | | | |
| | Spannung $\sigma_u = \sigma_o$ (= K/S) N/mm ² | Druck % PN | $N_2 = 365000/S_L = 36500$ | | | | |
| | | | Spannung | | Schwingbreite | | |
| | | $\frac{\sigma_u}{\text{N/mm}^2}$ | $\frac{\sigma_o}{\text{N/mm}^2}$ | Δp % PN | P_{\min} % PN | P_{\max} % PN | |
| StE 290.7 | 193 | 100 % PN | 0 | 120 | 62 % | 0 % | 62 % |
| | | | 103 | 193 | 46 % | 54 % | 100 % |
| StE 480.7 TM | 300 | 100 % PN | 0 | 143 | 48 % | 0 % | 48 % |
| | | | 208 | 300 | 31 % | 69 % | 100 % |

Abbildung 20: Beispiel für die zulässige Schwellbeanspruchung [14].

Rohre mit einer geringen Festigkeit haben eine größere Toleranz gegenüber Druckschwankungen. Somit müssen kritische Beulen nur bei ausgeprägten Druckschwankungen berücksichtigt werden, wie z.B. bei Rohrleitungen, die für Speicherzwecke genutzt werden [14].

2.6 Auslegungsgrundlagen für Rohre

Grundlage für die Berechnung von Rohren mit Innendruck bildet die Kesselgleichung.

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot s} \quad (2.9)$$

$$\sigma_a = \frac{p \cdot D}{4 \cdot s} \quad (2.10)$$

Daraus ergibt sich in der Norm ÖNORM EN 1594 folgende Gleichung für die Mindestwanddicke für das Rohr [15].

$$t_{\min} = \frac{DP \cdot d_a}{20 \cdot f_o \cdot R_{t0,5}(\theta)} \quad (2.11)$$

Wobei DP der Auslegungsdruck, d_a der Rohraußendurchmesser, f_o der Nutzungsgrad und $R_{t0,5}(\theta)$ die Dehngrenze bei 0,5% gesamte Dehnung und Auslegungstemperatur sind [15].

Um Sprödbrüche zu vermeiden, müssen mindestens die Anforderungen der EN 10208-2 an die Kerbschlagzähigkeit erfüllt sein. Bei Rohren, die einen größeren Nenndurchmesser als 150 mm besitzen, müssen Charpy-V-Vollproben am Grundwerkstoff, sowie an Werkschweißnähten gefertigt und überprüft werden. Diese müssen folgende Mindestschlagarbeit erreichen [15]:

- 27 Joule (Durchschnitt) 20 Joule(einzeln)

Bei Bögen und Formstücken aus Stahlsorten mit einer Dehngrenze bei 0,5% der gesamten Dehnung (spezifizierter Mindestwert) bis zu 360 N/mm² und allen sonstigen Rohrleitungsteilen, wie z.B. Armaturen und Flansche [15].

- 40 Joule (Durchschnitt) 30 Joule(einzeln)

Bei Bögen und Formstücken aus Stahlsorten mit einer Dehngrenze bei 0,5% der gesamten Dehnung (spezifizierter Mindestwert) über 360 N/mm² [15].

Falls keine Vollproben zur Verfügung stehen, ist die Schlagarbeit wie folgt umzurechnen:

$$KV = \frac{8 \cdot 10 \cdot KV_p}{S_p} \quad (2.12)$$

Hierbei ist KV_p die gemessene Schlagarbeit und S_p der Querschnitt der Probe unter der Kerbe. Konstruktionsrichtlinien für Sonderlastfälle, wie Gelände und Böschungsbrüche oder zulässige Schwingungen, finden sich im Anhang der ÖNORM EN 1594 [15].

2.7 Experimente aus der Literatur

In der Literatur finden sich die unterschiedlichsten Schädigungsformen von Pipelines. Sie können durch Korrosion, falscher bzw. schlechter Einbettung entstehen oder sie sind Folgen mechanischer Beschädigungen. Die häufigsten Schädigungen sind:

- Beulen
- tiefe Kratzer
- Schädigungen durch Korrosion

An Hand der bekannten Unfallberichte kann zwischen mindestens fünf Leckformen unterscheiden werden, die in Abbildung 21 zu sehen sind [28].

- a) ein Aufriss der Rohrleitung in tangentialer Richtung, meist verursacht von Bodenbewegungen (Erdrutsch) oder durch Überfahren mit schweren Baumaschinen o.ä.
- b) ein Aufriss der Rohrleitungen in axialer Richtung über eine relativ kurze Strecke mit gleichzeitiger Aufweitung quer zur Rohrachse (Fischmaulbruch).
- c) ein Aufriss der Rohrleitung im oberen Scheitelbereich über mehrere Meter.
- d) ein Heraussprengen eines Rohrsegmentes, d.h. eine Freisetzung des gesamten Rohrquerschnittes (Guillotine-Bruch).
- e) eine ovale bis kreisrunde Penetration der Rohrleitung, hervorgerufen durch Baggerschaufeln oder Erdbohrer.

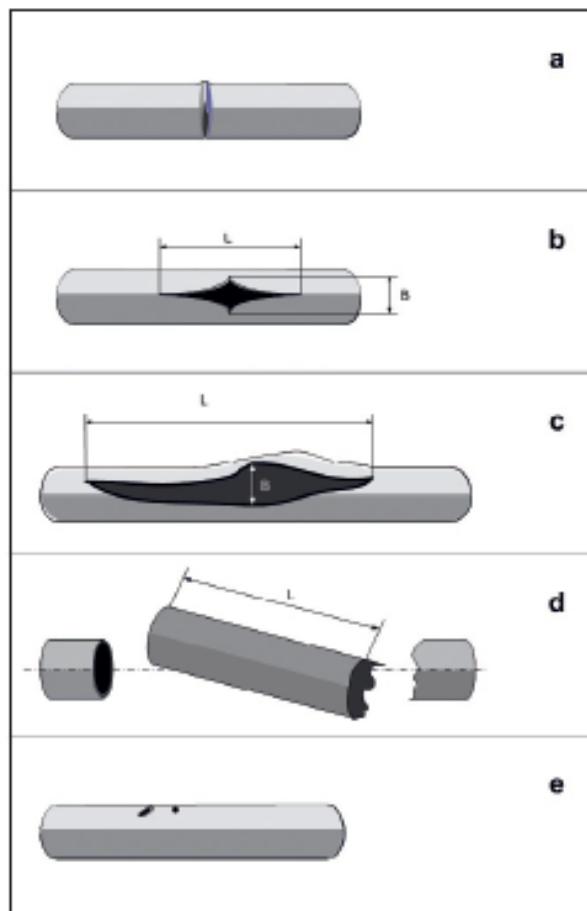


Abbildung 21: Leckformen einer Pipeline [28].

Wie die Studien zeigen, können diese Fehler folgende Ursachen haben [5]:

| Externe Einflüsse | Materialfehler | Korrosion | Bodenbewegungen | Montagefehler | Sonstige |
|-------------------|----------------|-----------|-----------------|---------------|----------|
| 49,6 (%) | 16,5 (%) | 15,3 (%) | 7,3 (%) | 4,6 (%) | 6,7 (%) |

Einer Schädigung durch Korrosion kann mit Hilfe geeigneter Ummantelung und Opferanoden entgegen gewirkt werden. Beulen entstehen infolge äußerer Krafteinwirkung und stellen eine einseitige Kreisformabweichung des Rohres dar. Mögliche Ursachen für Beulen in Pipelines sind [14]:

1. ungenügende Bettung im Rohrgraben
 - große Steine in der Sandbettung
 - Felsauflage
 - „vergessene“ Auflagen der Montagearbeiten
 - unterschiedliche Verdichtung / Rohraufgabe an Übergängen zu Press- und Empfangsgruben
2. mechanische Beeinflussung bei Verlegung
 - durch Bagger, Raupen und Baumaschinen allgemein
 - Zwischenlagerung / Vorstrecken auf ungeeigneten Unterlagen bzw. zu großen Lagerabständen
 - Verlegung in Steilhängen an Ober- und Unterbogen
3. mechanische Beschädigung bei Betrieb
 - Tiefbauarbeiten
 - Landwirtschaftliche Tätigkeit
 - Sonstige (Naturgewalten)

Auf Grund dieser Schädigungen haben sich einige Wissenschaftler [3-9] mit dem Thema Beulen in Rohrleitungen befasst. Meist war das Einbeulen von Rohren nur ein Vorversuch für den eigentlichen danach folgenden Hauptversuch, wie z.B. das Berstverhalten oder die Biegesteifigkeit von eingebeulten Rohren. Der Hauptversuch sollte dabei den Betriebszustand simulieren, um die Beurteilungskriterien zu finden, die helfen sollen, reale Schäden an Pipelines zu beurteilen und zu vermeiden.

2.7.1 Versuchsaufbauten

Die meisten Versuche aus der Literatur haben eines gemeinsam, dass sie einen definierten Eindringkörper in das Rohr drücken und so eine Beule erzeugen. Der Eindringkörper kann entweder ein Keil mit definierter Rundung an der Spitze, wie in Abbildung 22, oder ein Zylinder mit kugelförmigem Ende, wie in Abbildung 23, sein.

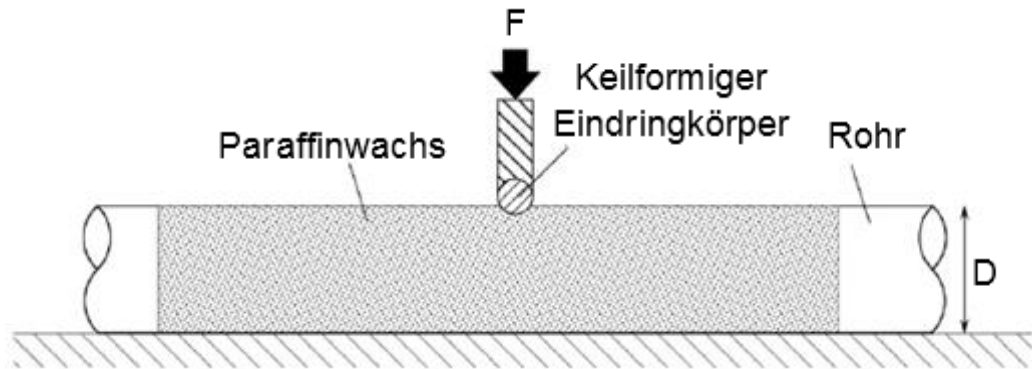


Abbildung 22: Schematischer Versuchsaufbau von A.Liam [8].

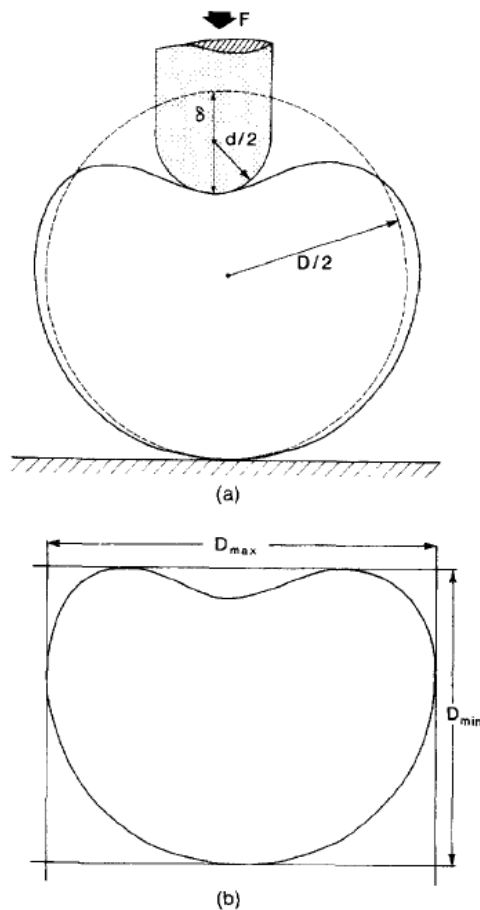


Abbildung 23: Die Stempelgeometrie von T.-D Park [7].

Diese Eindringkörper erzeugen aber nur Beulen, die eine Näherung zu realen Beulen darstellen. Reale Beulen werden durch Fremdkörper wie Steine, Wurzeln usw. erzeugt, die keine genau definierte Geometrie besitzen. Michael Steiner [10] verwendet in seiner Dissertation als Eindringkörper für Rohre einen Baggerschaufelzahn, der in Abbildung 24 zu sehen ist. Da Baggerarbeiten sehr oft für Beulen verantwortlich sein können, ist dieser Eindringkörper als äußerst realitätsnahe einzustufen [10].

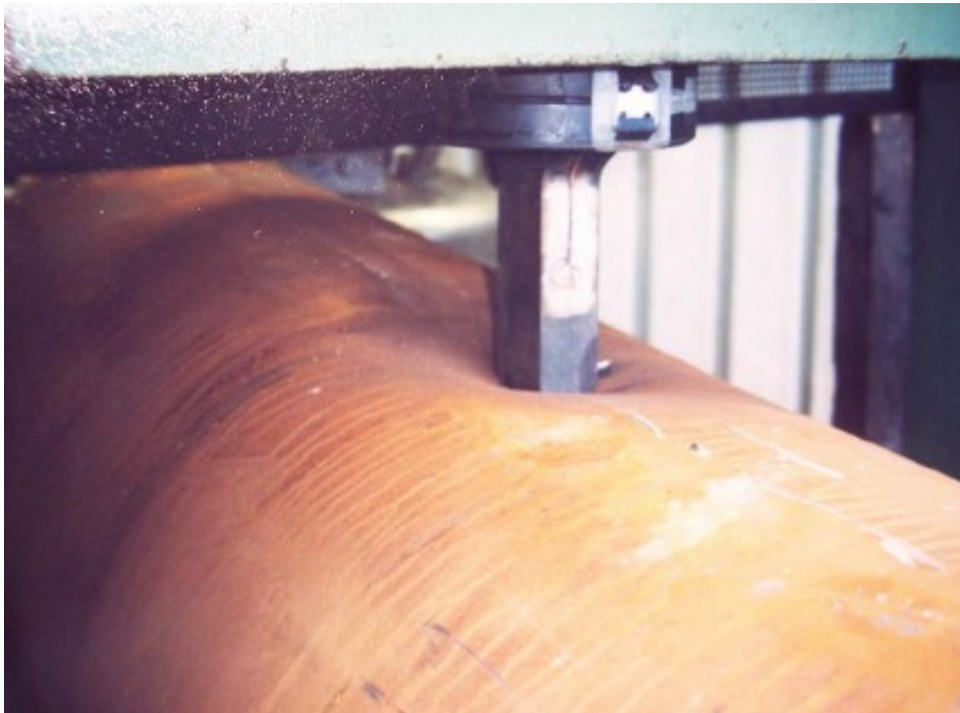


Abbildung 24: Der Baggerzahn von M. Steiner 92[10].

Als Untergrund für den Beulversuch werden Metallplatten verwendet. In Einzelfällen wird eine Gummimatte zwischen Rohr und Platte gelegt um das Verrutschen des Rohres zu verhindern. [7]

Als Prüfkörper wurden Rohre mit einer Länge von 7 mal d_a oder verschlossene Rohre, die für Berstversuche geeignet sind, verwendet. Die Länge von 7 mal d_a sollte verhindern, dass sich die Ränder mitverformen und deshalb keine Stützwirkung leisten. Die Rohre waren meist nahtlos, um den Einfluss der Schweißnaht auf die Festigkeit wegfällen zu lassen. Michael Steiner verwendet längsnahtverschweißte Stahlrohre mit einem Durchmesser zwischen 406,4 mm und 1220 mm. Um den Einfluss der Schweißnaht zu mindern, wurde diese in die drei Uhr Lage gelegt. Dabei ist, wie in Abbildung 25, die zwölf Uhr Lage der höchste Punkt des Rohres bzw. der Ort der Kräfteinleitung und die sechs Uhr Lage der niedrigste Punkt des Rohres bzw. der Bereich des Auflagers [10].

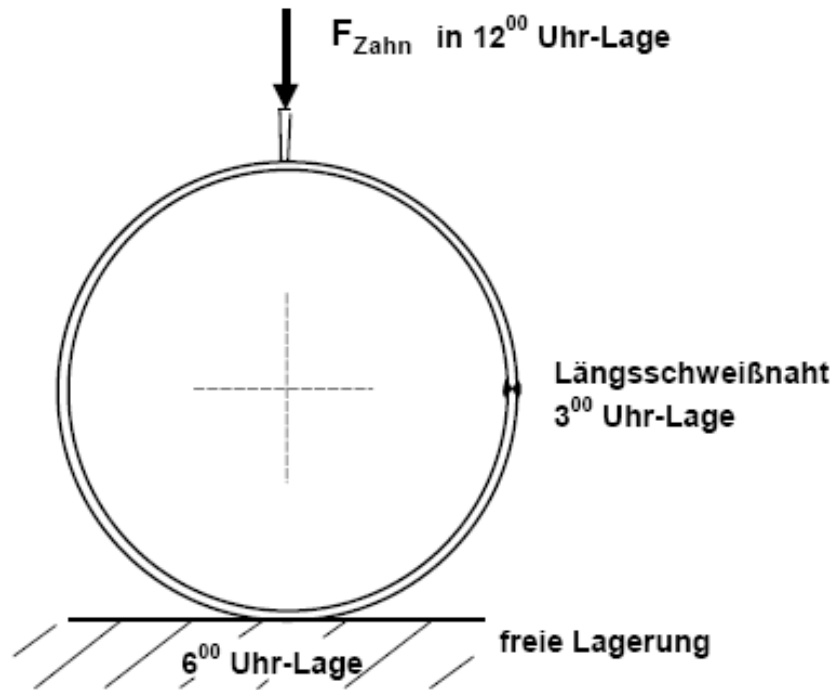


Abbildung 25: Der Versuchsaufbau von M. Steiner[10].

Weiters wurden bei B. de c. Pinheiro et al. [6] am Rohr DMS appliziert, um die Spannungen zu messen. Dabei müssen die DMS sehr nahe an der Einbeulung angebracht werden, um die richtigen Spannungen zu messen.

Die Tiefe der Beulen wurde an den folgenden Hauptversuch angepasst. In der Tabelle 2 sind die Parameter der Versuche, sowie die Form der Eindringkörper und dessen Dimension aufgelistet.

Tabelle 2: Parameter der Versuche [3-9]

| Versuch von | Eindringkörper | Eindringkörperdimension | Beultiefe | Hauptversuch |
|-------------------|----------------|-------------------------|--------------------|--------------|
| T.-D. Park | Kugel | 0.4D und 1.6D | 0-0.35D | Implosion |
| M. Allouti | Kugel | 0.45D | 0.1-0.28D | Bersten |
| B. de C, Pinheiro | Kugel | 63.20 mm | 5%, 10%, 15% von D | Bersten |
| A. Limam | Keil | d=6.35mm | - | Biegen |
| S. Kyriakides | Kugel | 23 | - | Implosion |
| M. Steiner | Baggerzahn | - | unterschiedlich | - |

Um die Beulen zu vermessen wird eine Unebenheit-Messapparatur, wie in Abbildung 26, verwendet. Dabei wird der Beulentiefe besonderer Aufmerksamkeit zu teil, weil sie der Hauptparameter für spätere Versuche und analytischen Methoden ist.

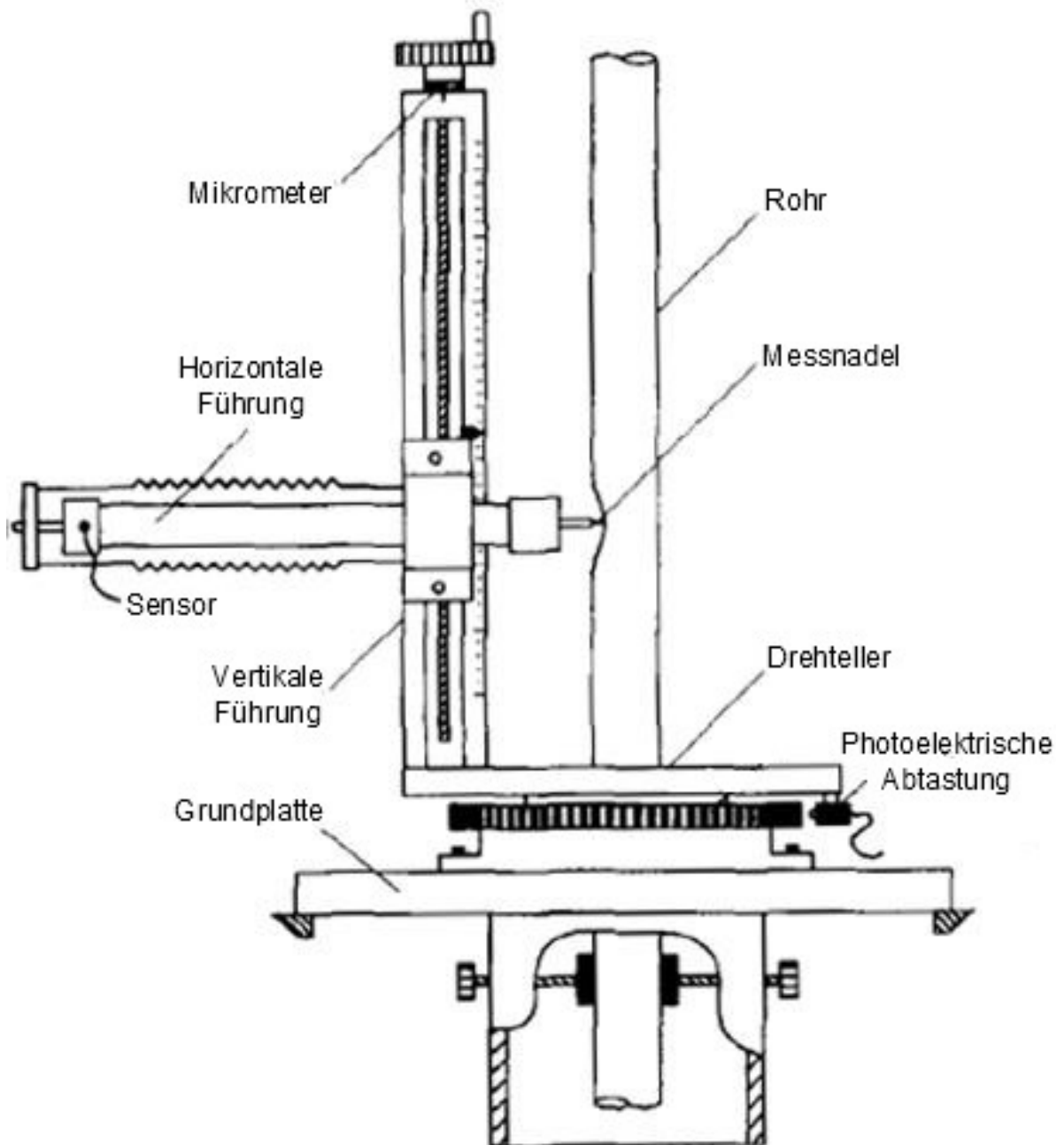


Abbildung 26: Vermessung einer Beule mit einer Unebenheit-Messapparatur [7].

2.7.2 Hauptversuche

Die Hauptversuche simulieren den Betriebszustand einer Pipeline und beobachten dabei das Verhalten der gebeulten Rohre.

Implosion

Wenn Offshore-Pipelines aus Wartungszwecken oder anderen Gründen entleert werden, ist der Innendruck weit kleiner als der Außendruck. Da die Rohre sehr tief im Meer verlegt sind und dort sehr hohe Außendrucke herrschen, kann es passieren, dass das Rohr implodiert. Aus Abbildung 27 sind die einzelnen Schritte des Zusammendrückens bei einer Beule zu sehen, die in einer Implosion des Rohres endet. Die Hauptfaktoren für den Implosionsdruck sind das Durchmesser/Wanddickenverhältnis (D/t), der E-Modul, die Streckgrenze und der Rundlauf des Rohres. Beulen reduzieren lokal den Widerstand gegen Implosion und können ein fortlaufendes Einfalten induzieren. T.-D. Parker [7] fand diese Faktoren in der Literatur und erweiterte sie mit eigenen Versuchen die das Ziel hatten, das Implosionsverhalten von Rohren zu untersuchen, die ein geringeres D/t Verhältnisses haben. Die Rundheit Δ_{Od} des Rohres wurde mit der Gleichung (2.13) berechnet.

$$\Delta_{Od} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (2.13)$$

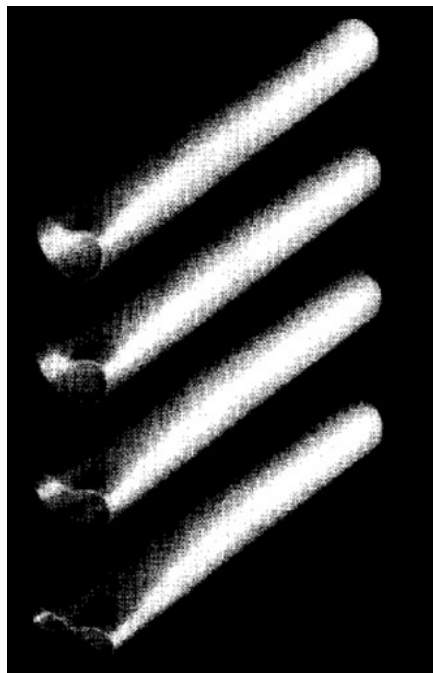


Abbildung 27: Schrittweises Zusammendrücken des Rohres bis zur Implosion [7].

Nach dem Einbeulen und dem Vermessen der Beule, wurden die gebeulten Rohre mit einem Epoxydharz Pfropfen abgedichtet und in einen Druckkessel, wie in Abbildung 28, gegeben. Der Kessel wird mit Wasser gefüllt, verschlossen und der Druck wird langsam gesteigert, um einen quasistatischen Zustand zu erreichen. Der Druck wird so lange gesteigert bis das Rohr kollabiert.

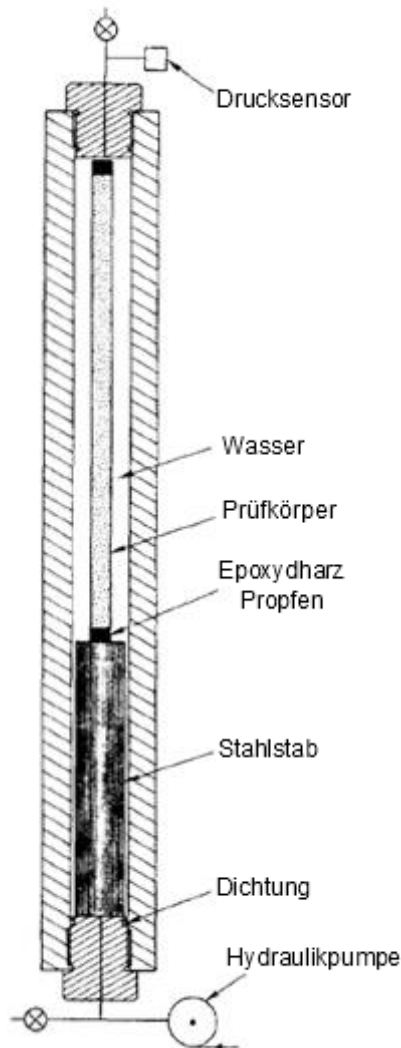


Abbildung 28: Der Druckkessel von T.-D. Parker für den Implosionsversuch [7].

Ergebnisse des Implosionsversuches

Beim Implosionsversuch zeigte sich, dass Beulen signifikant den Widerstand eines Rohres gegen Implosion herabsetzen. Kleine Beulen haben einen höheren Implosionsdruck und nehmen somit mehr Energie von der Umgebung (Druck), bei der Bildung eines eingefalteten Rohres, auf. Bei einem Testdurchlauf mit drei Rohren, die denselben D/t Verhältnissen von 24.2 und unterschiedlichen Beulentiefen besitzen, zeigte sich, dass die kleinste Beule

$\Delta_{Od} = 0.0246$ zwar mehr Druck aushielt, aber dann schlagartig mit einem lauten Knall kollabierte. Dieser laute Knall bzw. Jump ist deutlich in Abbildung 29 zu sehen. Die tieferen Beulen hielten zwar nicht so hohem Drücken stand, der Druckabfall während des Kollabierens verlief aber im Vergleich zu kleinen Beulen sehr sanft aus.

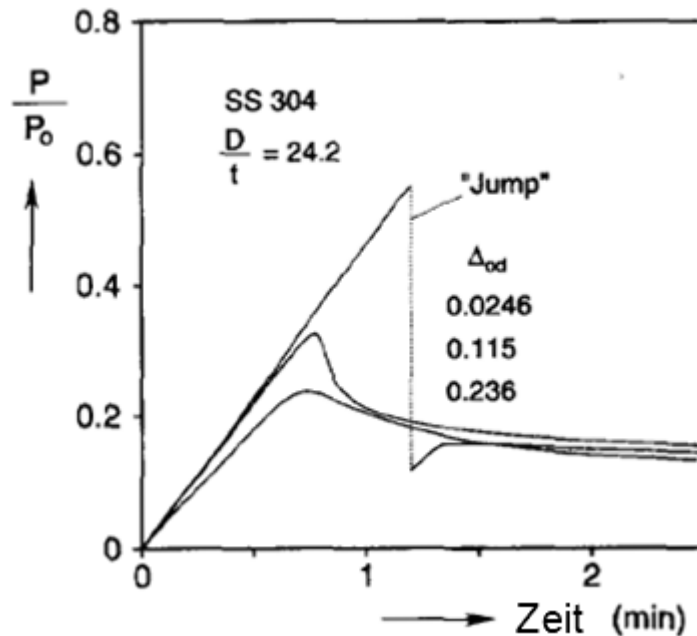


Abbildung 29: Druck-Zeitkurven der unterschiedlichen Versuche [7].

Dieser und weitere Implosionsversuche zeigten, dass schon eine kleine Beule mit einer Ovalität von $\Delta_{Od} = 0.1$ den Implosionsdruck um 40%, 50% und 54% bezogen auf ein D/t Verhältnis von 18.9, 24.2 und 33,6 reduzieren kann. Die Abbildung 30 zeigt wie der Implosionsdruck mit der durch die Beule bedingten Ovalität Δ_{Od} zusammenhängt.

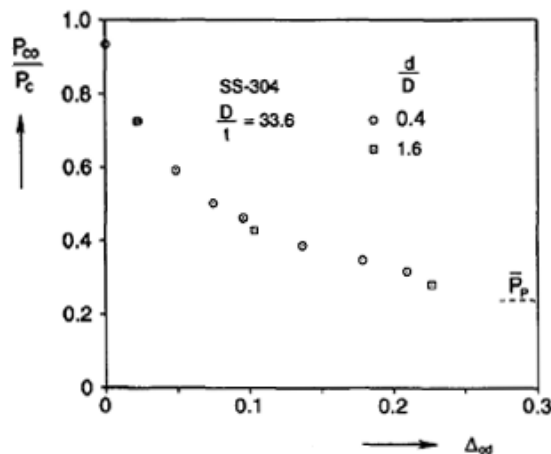


Abbildung 30: Implosionsdruck als Funktion der durch die Beule bedingten Ovalität Δ_{Od} [7].

Nachfolgende Versuche mit Innendruck

Beim Bersttest wird der Druck langsam gesteigert, bis das Rohr reißt. Für diesen Versuch werden Rohre verwendet, die am Anfang und am Ende verschlossen sind und eine Öffnung für die Druckpumpe besitzen. Beim Versuch von M. Allouti et al. sind die Rohre bereits beim Beulen verschlossen, wie aus Abbildung 31 ersichtlich. Die Öffnung für die Druckpumpe ist beim Beulversuch geöffnet, wodurch beim Beulen im Rohr immer konstant atmosphärischer Druck herrscht [5].



Abbildung 31: Die eingebeulten Druckkesseln von M. Allouti [5].

Nach dem Verschließen des Rohres wird der Druck so lange erhöht, bis das Rohr reißt. B.d.C. Pinheiro hat statt den Bersttests untersucht, inwieweit sich Beulen durch den Innendruck wieder ausbeulen. Weiters wurde untersucht, wie sich Beulen auf die Lebensdauer eines Rohres mit innerer Druckbeaufschlagung auswirken [5] [6].

Ergebnisse der Versuche mit Innendruck

Beim Bersttest von M. Allouti et al. rissen die Rohre nicht an der Stelle der Beule auf. Die Berstdrücke und Beulentiefen sind in Tabelle 3 vermerkt. Durch diese Ergebnisse kommt er zu dem Schluss, dass die allgemeine in der Literatur erwähnte Beulentiefe von 10%, bezogen auf den Aussendurchmesser des Rohres, eine sehr konservative Einschätzung ist. Bei Pipelines mit Beulen, aus A 37 Pipelinestahl hätten diese auf den Berstdruck keinen Einfluss [5].

Tabelle 3: Ergebnisse der Berstversuche von M. Allouti et al. [5]

| Versuchsnummer | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| Beultiefe (mm) | ≈25(≈28%Da) | ≈14(≈16%Da) | ≈11.8(≈13%Da) | ≈8.9(≈10%Da) | ≈8.9(≈10%Da) |
| Berstdruck (MPa) | 31,3 | 31,0 | 31,6 | 30,8 | 31,0 |
| Beulenbreite 2c (mm) | - | 50 | 44 | 40 | - |

Biegeversuch

Bei diesem Hauptversuch wurde zuvor das Rohr mit Wachs gefüllt, um während des Beulvorganges zu verhindern, dass sich das Rohr zu stark oval verformt. Als Eindringkörper wurde ein Keil (siehe Abbildung 22) gewählt. Nach dem Einbeulen wurde das Wachs mit heißem Wasser entfernt und die Beule vermessen. Das Rohr wurde an beiden Enden verschweißt. Danach wurde das Rohr mit Öl gefüllt und an ein Drucküberwachungssystem angeschlossen. Das so verschlossene Rohr wurde in die Biegemaschine, wie in Abbildung 32 dargestellt, eingespannt. Um ein Moment auf das Rohr zu bringen, werden die beiden Zahnräder mit Hydraulikzylinder gedreht. Das Rohr wurde so lange gebogen bis es versagt. Der Druck im Rohr wird während des Testes konstant auf 48.3 bar gehalten. Das Moment wurde mit Druckmessdosen und Drehbewegungsmesser gemessen [8].

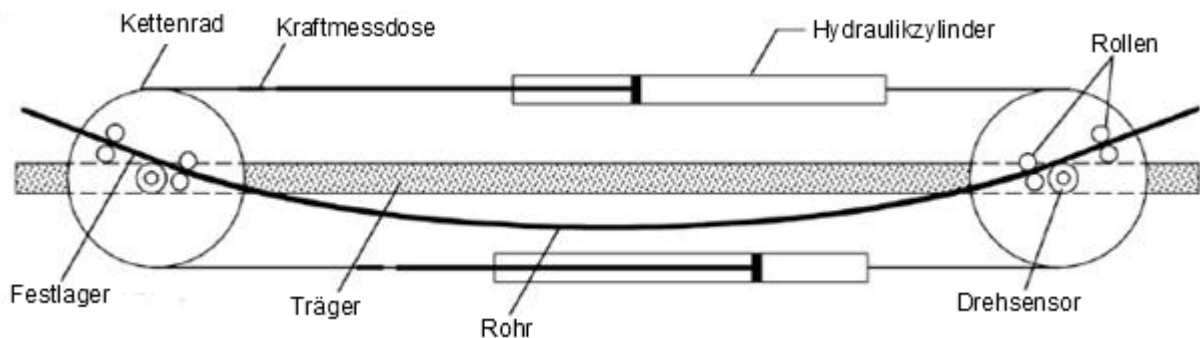


Abbildung 32: Biegeprüfmaschine für gebaute Rohre [8].

Ergebnisse des Biegeversuchs

Wie die Abbildung 33 zeigt, versagt das gebaute Rohr um 58% früher, als das ungebautete Rohr. Weiters ist zu sehen, dass die Beule am elastischen und plastischen Verhalten des Rohres keinen Einfluss hat. Wie weitere Tests gezeigt haben, hat der Radius des Keils keine Folgen auf den Versuch. Weiters haben die Tests gezeigt, dass durch die Stützwirkung des

Wachses, das Rohr nur lokal einbeulte. Eine weitere Erkenntnis des Versuches war, dass drucklose Rohre einen weit niedrigeren Umformgrad haben, wie ein Rohr mit Innendruck [8].

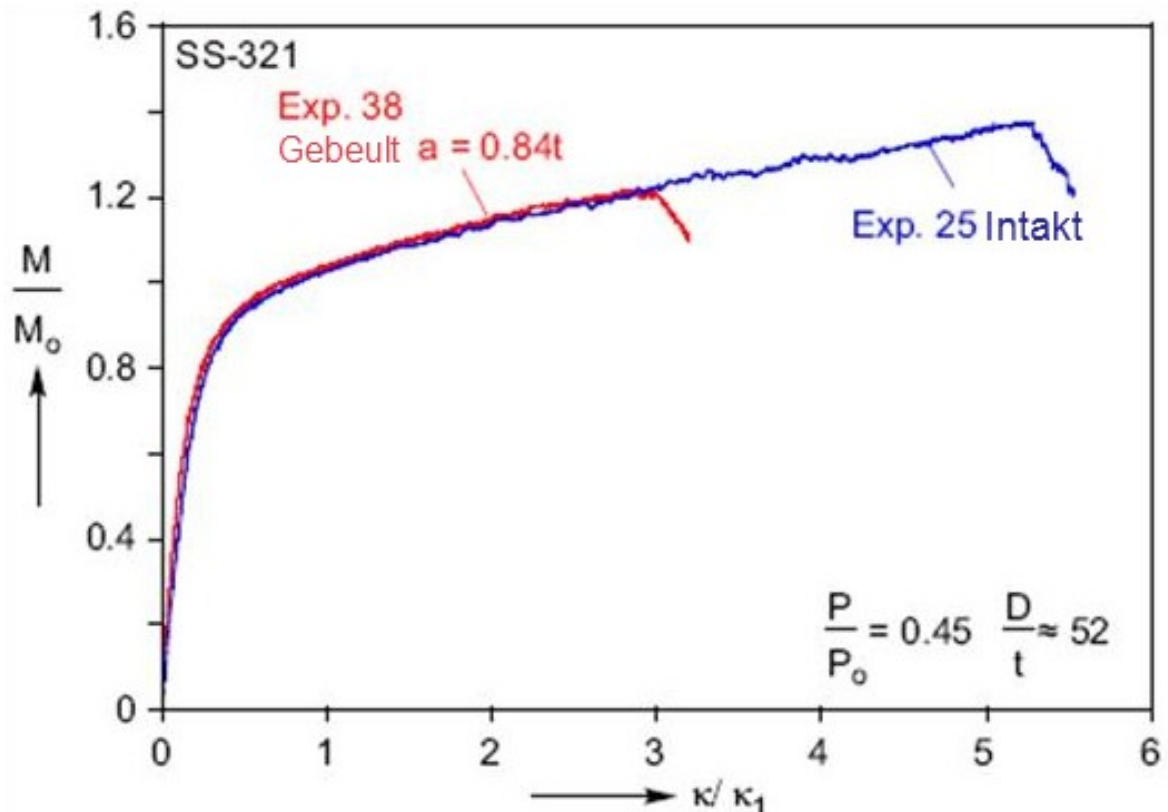


Abbildung 33: Das benötigte Moment bezogen auf die Biegung eines gebeulten und eines intakten Rohres [8].

2.7.3 Analytische Lösungen

M. Steiner fand im Rahmen seiner Dissertation einige theoretische und analytische Lösungsansätze für die Verschiebung im Bereich einer Einzelkraft auf ein Stahlrohr. Weiters fand Steiner Ansätze für die Ermittlung der Kraft, die notwendig ist, um ein Rohr mit einer Einzelkraft plastisch zu verformen [10].

Für die elastische Verschiebung $w_e(0,0)$ wurden folgende theoretisch hergeleitete Ansätze gefunden [10].

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|--------------------------|--|--------|
| Yuan | $w_e(0,0) = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot (1-\nu^2)}{\pi} \cdot \frac{F}{Es^2} \cdot R^2 \cdot f(R,s)$ <p>Mit der Geometriefunktion f(R,s) nach Yuan</p> | (2.14) |
| Yuan, Ting | $w_e(0,0) = f(L,D,s) \cdot \frac{F}{Es}$ <p>Mit der Geometriefunktion f(L,D,S) nach Yuan,Ting</p> | (2.15) |
| Morley | $\frac{w_e(0,0) \cdot Es}{F} = \frac{2K}{\pi} \sum_{H=2;4,\dots}^{k-2} \frac{K^2}{h^2 \cdot (1-h^{-2})^{1,5}} + \frac{\sqrt{2}k^4}{\pi} \sum_{H=K;K+2}^{\infty} \frac{(k_h+1)^{0,5}}{h^3 \cdot \kappa_h}$ <p>mit $4 \cdot K^4 = (1-\nu^2) \frac{12 \cdot R^2}{s^2}$ und $\kappa_h^2 = 1 + \frac{K^4}{4 \cdot h^4}$</p> | (2.16) |
| Buchwald | $w_e(0,0) = \frac{4 \cdot F \cdot K^3}{\pi \cdot Es} \sum k(4 \cdot k^2 - 1)^{-1,5}$ <p>Mit der Geometriefunktion f(R,s) nach Yuan</p> | (2.17) |
| Lukasiewicz | $w_e(0,0) = 0,74 \cdot \frac{F \cdot R}{Es^2} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}}$ | (2.18) |
| Calladine | $w_e(0,0) = \frac{1}{1,23} \cdot \frac{(1-\nu^2) \cdot F \cdot R^{1,5}}{Es^{2,5}}$ | (2.19) |
| Lukasiewicz | $w_e(0,0) = 2 \cdot F^2 \cdot (3 \cdot \pi \cdot 0,19s^{5/2} \cdot E \cdot (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}))^2$ | (2.20) |
| Cannata | $w_e(0,0) = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{(1-\nu^2)F \cdot R^3}{Es^2 \cdot a^2} \cdot f(\varphi, a)$ <p>mit $a^2 = \left(P_i + \frac{Es^3}{12 \cdot R^3 \cdot (1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{Es^3}{12 \cdot R^3 \cdot (1-\nu^2)} \right)^{-1}$</p> | (2.21) |
| Timoshenko, Tin, Yuan | $w_e(0,0) = 0,149 \frac{3 \cdot (1-\nu^2) \cdot F \cdot R^3}{Es^3 \cdot L}$ | (2.22) |

Es gibt auch experimentelle Ansätze, die sich aus Erfahrungen mit Versuchen hergeleitet wurden [10].

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|----------------|--|--------|
| Roark | $w_e(0,0) = 0,135 \cdot \frac{F \cdot R^2}{Es^3}$ | (2.23) |
| Ellinas | $\frac{F}{\frac{1}{4} \cdot R_p \cdot s^2 \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^{0,5}} = 150 \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{w_e(0,0)}{D}\right)^{0,5}$ | (2.24) |
| de Oliviera | $\frac{F}{\frac{1}{4} \cdot R_p \cdot s^2 \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^{0,5}} = 16 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{w_e(0,0)}{D}\right)^{0,5}$ | (2.25) |
| Jones und Shen | $\frac{F}{\frac{1}{4} \cdot R_p \cdot s^2 \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^{0,5}} = 20 \cdot \left(\frac{w_e(0,0)}{D}\right)^{0,5}$ | (2.26) |
| Spiekhout | $w_e(0,0) = 0,149 \cdot \frac{12 \cdot F \cdot R^3}{\left(1,33 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} + L_L\right) \cdot Es^3} \cdot f(P_i)$ <p style="text-align: center;">mit $f(P_i) = \sqrt{\frac{P_{cr}}{P_{cr} + P_i}}$ und $P_{cr} = \frac{3 \cdot Es^3}{12 \cdot R^3}$</p> | (2.27) |
| Peech | $F \approx \frac{s^2}{D^{0,27}} \cdot w_e(0,0)$ <p style="text-align: center;">mit w_e, s und D in Zoll F in Pound</p> $F \approx s^{1,82} \cdot w_e(0,0)$ | (2.28) |
| Enis | $\frac{F}{k_{1R}} = w_e(0,0) \text{ mit dem Parameter } K_{1r} = 8,96 \cdot \left(\frac{s/D}{1-s/D}\right)^3$ | (2.29) |

Bei den Ansätzen von Ellinas, de Oliviera und Jones/Shen wird ein quadratischer Zusammenhang zwischen Kraft und Verschiebung hergestellt. Diese Ansätze sind laut Literatur auch für bleibende plastische Zusammenhänge geeignet [10].

Um den Beginn der bleibenden Verschiebung zu berechnen, finden sich in der Literatur Grenzkkräfte, ab denen sich ein Stahlrohr oder eine Kreisscheibe beginnt sich plastisch zu verformen. Bis zum Beginn der plastischen Verschiebung verhalten sich Kreisplatten und Stahlrohre unter punktförmigen Belastungen gleich [10].

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|--------------------------|---|--------|
| Prager, Hopkins | $F_0 = \frac{\pi}{2} \cdot R_p \cdot s^2$ | (2.30) |
| Lance und Onat | $\bar{F}_0 = \frac{\pi \cdot R_p \cdot s^2}{2 \cdot (1 - \bar{a} / \bar{R})}$ | (2.31) |
| Prager, Hopkins | $\bar{F}_0 = \frac{\pi \cdot R_p \cdot s^2}{2 \cdot (1 - 2\bar{a} / 3\bar{R})}$ | (2.32) |
| Onat, Haythornthwaite | $\bar{F}_0 = \frac{\pi \cdot R_p \cdot s^2}{2 \cdot (1 - 2\bar{a} / 3\bar{R})}$ | (2.33) |
| Enis | $F_{0,e} = \frac{4,48 \cdot 160 \cdot s \cdot E \cdot R_p \cdot D^2}{K_{1r} - K_{2r}} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{s/D}{1-s/D}\right)^3 \cdot \nu \left(1 - \frac{s}{D}\right) + 13,66 \left(\frac{s}{0,886}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,143}{D}\right)^{0,27}$ <p style="text-align: center;">mit $K_{2r} = 9,72 \cdot R_p \cdot D \cdot \frac{(s/D)^2}{1-s/D}$</p> <p style="text-align: center;">und $K_{1r} = 8,96 \cdot E \cdot D \cdot \left(\frac{s/D}{1-s/D}\right)^3$</p> | (2.34) |

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|-----------|--|--------|
| Spiekhout | $F_{0,e} = 1,15 \cdot s^2 \cdot R_p \cdot \left(1 - 0,75 \cdot \left(\frac{P_i R}{s R_p} \right)^2 \right) \cdot \left(0,8 \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} + L_L \right) \cdot \frac{1}{(R - 0,35 L_T)}$ | (2.35) |

Viele in der Literatur auffindbaren Lösungsansätze für die nötige Kraft einer plastischen Verformung des Rohres, stützen sich auf experimentell ermittelte Ergebnisse [10].

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|--------------------|--|--------|
| Calladine | $F = \pi \cdot \sqrt{3/2} \cdot R_p \cdot s^{3/2} \cdot \sqrt{w}$ <p>(hergeleitet für die Kugelschale und übertragen auf Stahlrohr)</p> | (2.36) |
| Enis | $F = F_{0,e} + \left(K_{2r} + \frac{3,12}{D} \cdot \left(\frac{s}{0,886} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,143}{D} \right)^{0,27} \right) \cdot w$ <p>$F_{0,e}$ und K_{2r} nach GL.(3,30) Parameter in SI-Einheiten</p> | (2.37) |
| Ellinas, Walker | $\frac{F}{\frac{1}{4} \cdot R_p \cdot s^2 \cdot \left(\frac{D}{s} \right)^{0,5}} = 150 \cdot \left(\frac{D}{s} \right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{w}{D} \right)^{0,5}$ | (2.38) |
| de Oliviera | $\frac{F}{\frac{1}{4} \cdot R_p \cdot s^2 \cdot \left(\frac{D}{s} \right)^{0,5}} = 16 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{w}{D} \right)^{0,5}$ | (2.39) |
| Jones, Shen | $\frac{F}{\frac{1}{4} R_p s^2 \left(\frac{D}{s} \right)^{0,5}} = 20 \cdot \left(\frac{w}{D} \right)^{0,5}$ | (2.40) |

| Autor | Lösungsansatz | Gl. |
|-----------|--|--------|
| Spiekhout | $F = F_p + F_{P_i} \text{ oder } F = F_M + F_{P_i} \text{ wenn } F_p + F_{P_i} > F_M + F_{P_i}$ <p>Mit den Parametern</p> $F_p = 1,15 \cdot s^2 \cdot R_p \left(1 - 0,75 \cdot \left(\frac{P_i R}{s R_p} \right)^2 \right) \left(0,8 \sqrt{\frac{R}{s}} + L_L \right) \cdot \frac{1}{(R - 0,35 \cdot L_T)}$ $F_M = 1,6 \cdot \frac{R}{8} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} \cdot R_p \cdot s w \cdot \frac{R}{R - 0,35 \cdot L_T} \cdot \left(w^2 + \left(\frac{R}{8} \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} \right)^2 \right)^{-0,5}$ $F_{P_i} = 1,5 \cdot w \cdot P_i \cdot \left(0,4 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} \cdot \frac{3 E s^3 / 12 R^3}{P + 3 E s^3 / 12 R^3} + L_L \right)$ | (2.41) |
| Steiner | $F = 0,31 \cdot \sqrt{P_r} \cdot \sqrt{w} \text{ mit } P_r = \sqrt{s^3 \cdot R_p \cdot L_L} \cdot \left(1 + 0,7 \frac{P_i \cdot D}{s \cdot R_m} \right)$ <p>Mit dem Parameter P_r und der Werkstoffzugfestigkeit R_m (Parameter in Si-Einheiten)</p> | (2.42) |

M. Steiner hat im Rahmen seiner Dissertation ein eigenes Rechenmodell entwickelt, welches sich auf bekannten Formeln der Literatur stützt [10].

Gesamtverschiebung

$$w(F) = w_e(F) + w_p(F) \quad (2.43)$$

Elastische Verschiebung

$$w_e(F) = F \cdot K_e \cdot \frac{D^{0,5}}{s^2} \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E} \cdot \left(1 + \frac{D P_i}{s \cdot R_p} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{L_L}{s \cdot R_p} \right) \quad (2.44)$$

Mit $K_e = 108 \text{mm}^{0,5}$ und $L_0 = 80 \text{mm}$

Übergang von elastischer zu bleibender Verschiebung

$$F_0 = K_0 \cdot R_p \cdot \frac{s^2}{D^{1/4}} \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{D \cdot P_i}{s \cdot R_p} \right) \cdot \left(1 + \frac{L_L}{L_0} \right) \quad (2.45)$$

Mit $K_0 = 8,1 \text{mm}^{1/4}$

Bleibende Verschiebung

$$w_p(F) = s \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^{1/4} \cdot \sqrt{K_{p1} \cdot \left(\frac{F}{F_0} - 1\right)} \cdot \left(1 - \frac{L_L}{4L_0}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{D \cdot P_i}{s \cdot R_p}\right)^{-1} \quad (2.46)$$

für $F_0 < F < 1,5F_0$

mit $K_{p1} = 130$

Oder

$$w_p(F) = K_{p3} \cdot s \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{F}{F_0} - K_{p2}\right) \cdot \left(1 - \frac{L_L}{4 \cdot L_0}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{D \cdot P_i}{s \cdot R_p}\right)^{-1} \quad (2.47)$$

für $F \geq 1,5 \cdot F_0$

mit $K_{p2} = 1/2$ und $K_{p3} = 8$

2.8 Simulationen aus der Literatur

Die Simulationen, die in der Vergangenheit über das Beulverhalten von Rohren gemacht wurden, sollten die bekannten oder parallel ablaufenden Versuche bestätigen bzw. Rohre mit größeren Durchmessern simulieren, die experimentell nicht untersucht werden können. Als Simulationsprogramme für diese Simulationen wurden in der Literatur Abaqus und MARC K.62 erwähnt.

2.8.1 Simulation des Einbeulverhaltens

Beim Einbeulen wurde das Rohr entweder als Schalenelemente, wie in Abbildung 34, die zulässig für ein dünnwandiges Rohr sind, oder als Volumskörper, definiert. Um Rechenleistung zu sparen, wurde eine Hälfte bzw. ein Viertel des Rohres berechnet, welche mit geeigneten Randbedingungen statisch bestimmt gelagert wurde.

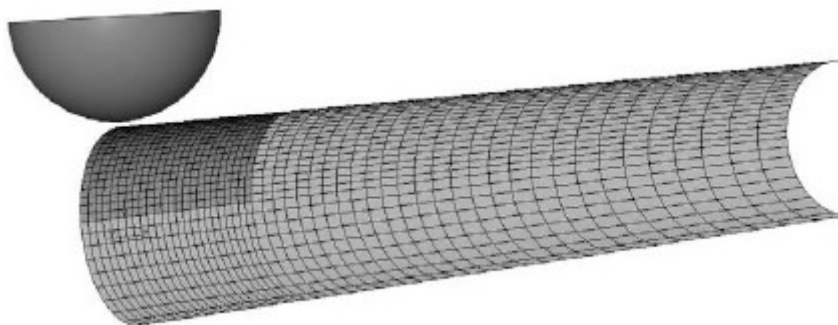


Abbildung 34: Ein Halb-Schalenmodell eines Rohres [6].

Weiters wurde darauf geachtet, dass das Rohr am Ort der Einbeulung deutlich engmaschiger vernetzt ist als über den restlichen Rohrkörper. Als Elemente wurden S4R, S8R5 für Schalenelemente und C3D8 im Abaqus verwendet.

Bei den Simulationen hat sich gezeigt, dass die Simulationen gut mit den Ergebnissen der Versuche übereinstimmen [7].

Es hat sich auch bei den Versuchen herausgestellt, dass Rohre die mit wenig Außendruck beaufschlagt worden sind, weitaus weniger Energie aufnehmen und weniger Widerstand gegen das Einbeulen aufbringen konnten. Somit wird die Steifigkeit des Rohres mit zunehmendem Außendruck weiter herabgesetzt [19].

Wiederum hat sich bestätigt, dass ein Rohr mit Innendruck gegenüber einem Rohr mit atmosphärischem Innendruck, einen höheren Widerstand gegen das Einbeulen aufweist. Auf Grund des Innendruckes formt sich die Beule lokal stark radial [20].

Untersuchungen mit Finite Elemente Methoden haben gezeigt, dass tiefere Beulen entstehen können, je höher die Festigkeit des Bodens ist. Dabei erwies sich, dass gegenüber Rohren die auf der Oberfläche frei liegen, der Effekt des Ausbeulens durch den inneren Druck schwächer ist [4].

3. Experimentelle Überprüfung

3.1 Erster Vorversuch

Mit dem ersten Vorversuch wurden die Grenzen der Versuchsparameter überprüft, die mit der vorhandenen Presse erreicht werden. Als Presse stand eine "Werner & Pfleiderer" Hydraulikpresse mit einer Presskraft von 1 MN zur Verfügung. Aus Platzgründen wurde das Rohr am Obergesenk mit Gewindestangen und die Kraftmessdose mit dem Eindringkörper am Untergesenk befestigt (Abbildung 35).

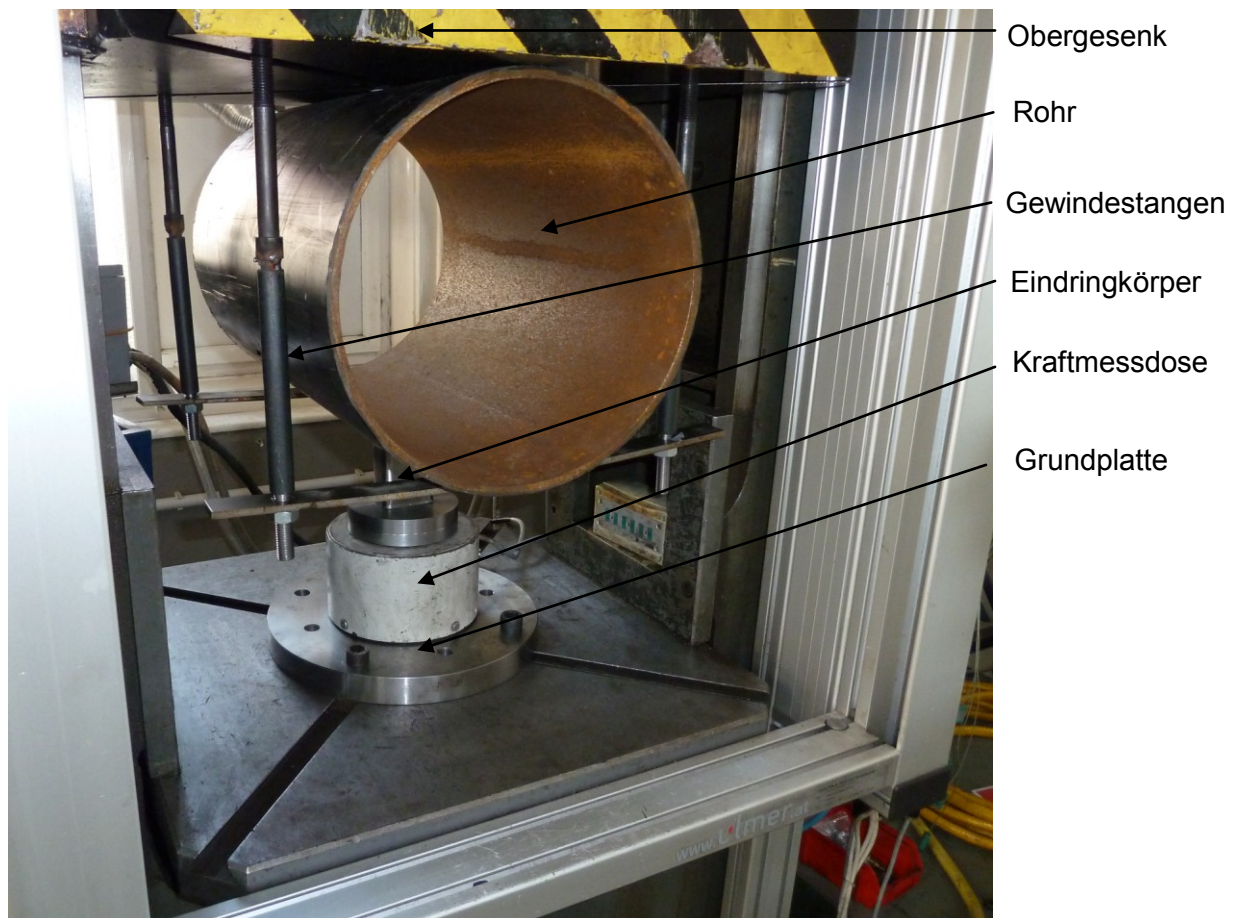


Abbildung 35: Der Versuchsaufbau für 323,9x7,1 mm Rohre.

Die Abbildung 36 zeigt den Eindringkörper, der einem Baggerzahn nachempfunden ist. Er besteht aus dem eigentlichen Eindringkörper, welcher mit einer Grundplatte verschraubt ist. Dieser nachgebildete Baggerzahn soll ein verallgemeinertes Beispiel darstellen. Für diesen ersten Versuch wurden Rohre mit einem Außendurchmesser von 323,9mm, die aus dem Werkstoff 1.0582 (L 360 NB) gefertigt sind, verwendet.



Abbildung 36: Der für die Versuche verwendete Eindringkörper.

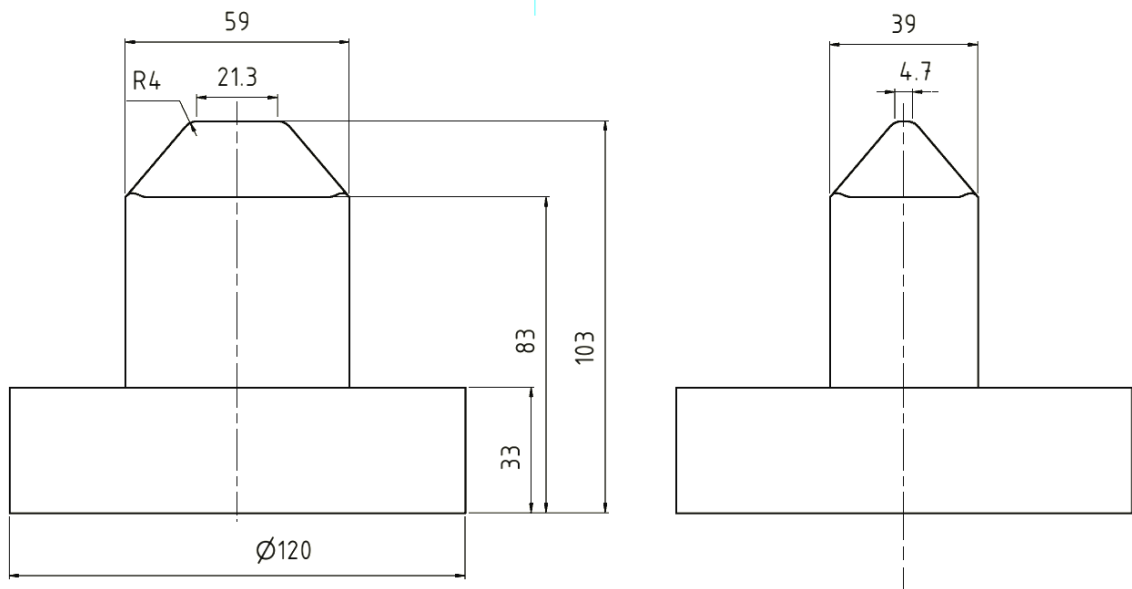


Abbildung 37: Maße des Eindringkörpers, alle nicht bemaßten Rundungen sind 4 mm.

Das Rohr mit einem Außendurchmesser von 323,9 mm und einer Wandstärke von 7,1 mm wurde zuerst auf 4,8% des Ausgangsdurchmessers (d_a) eingebeult. Dabei wurde festgestellt, dass sich das Rohr leicht oval verformt hat und elastisch zurückgefедert ist.

Die plastische Verformung betrug dabei ungefähr 4 mm. Das Mantelmaterial des Rohres wurde dabei leicht beschädigt.

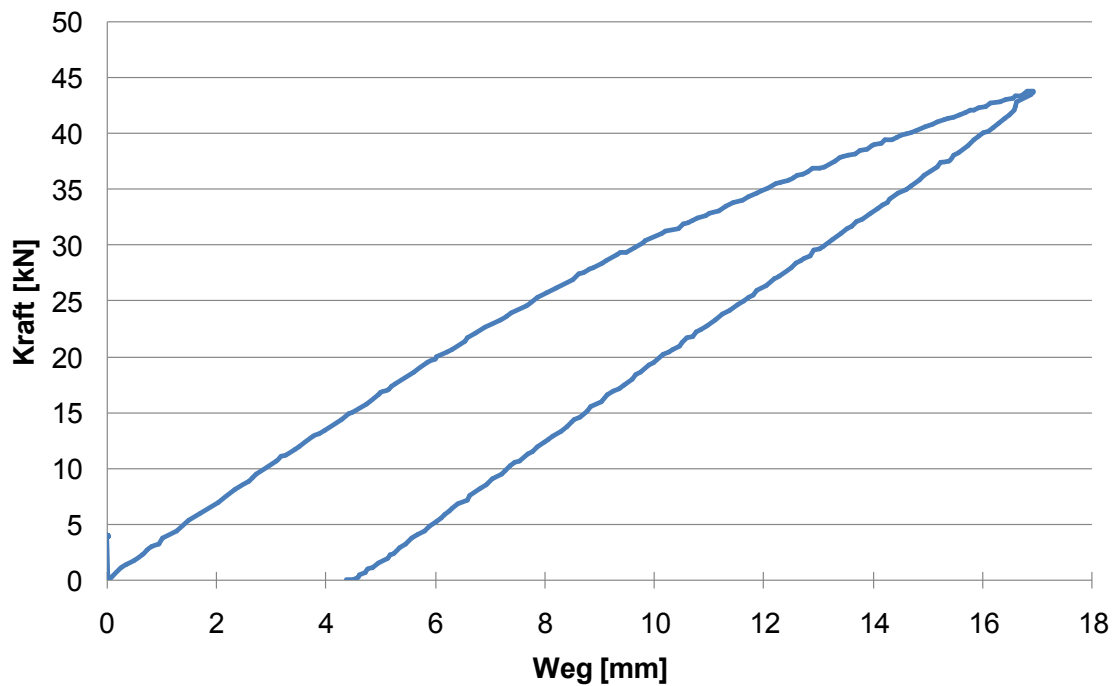


Abbildung 38: Kraft-Weg-Verlauf des 4,8% Versuches.

Beim zweiten Anlauf wurde das selbe Rohr auf 10% des Ausgangsdurchmessers (d_a) eingebeult. Es entstand dadurch eine starke Ovalität des Rohres und eine Beule.

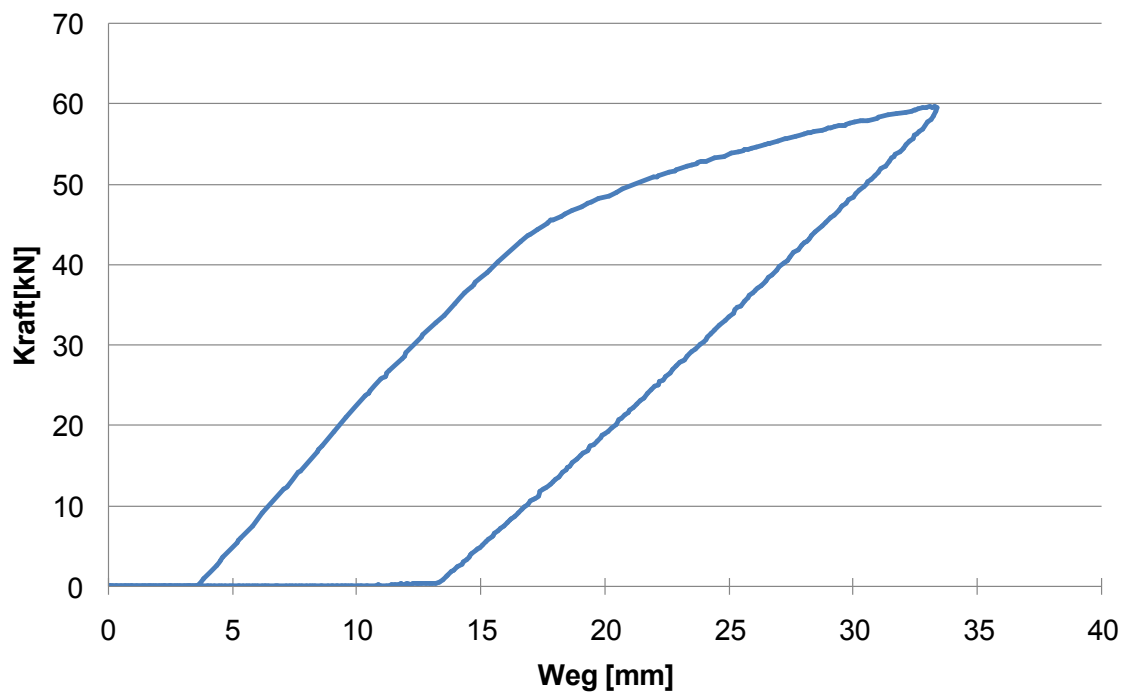


Abbildung 39: Kraft-Weg-Verlauf des 10% Versuches.

Beim dritten und letzten Vortest mit diesem Rohr wurde es auf 20% des Ausgangsdurchmessers eingebeult. Es verformte sich noch stärker elliptisch im Querschnitt und die Beule wurde tiefer.

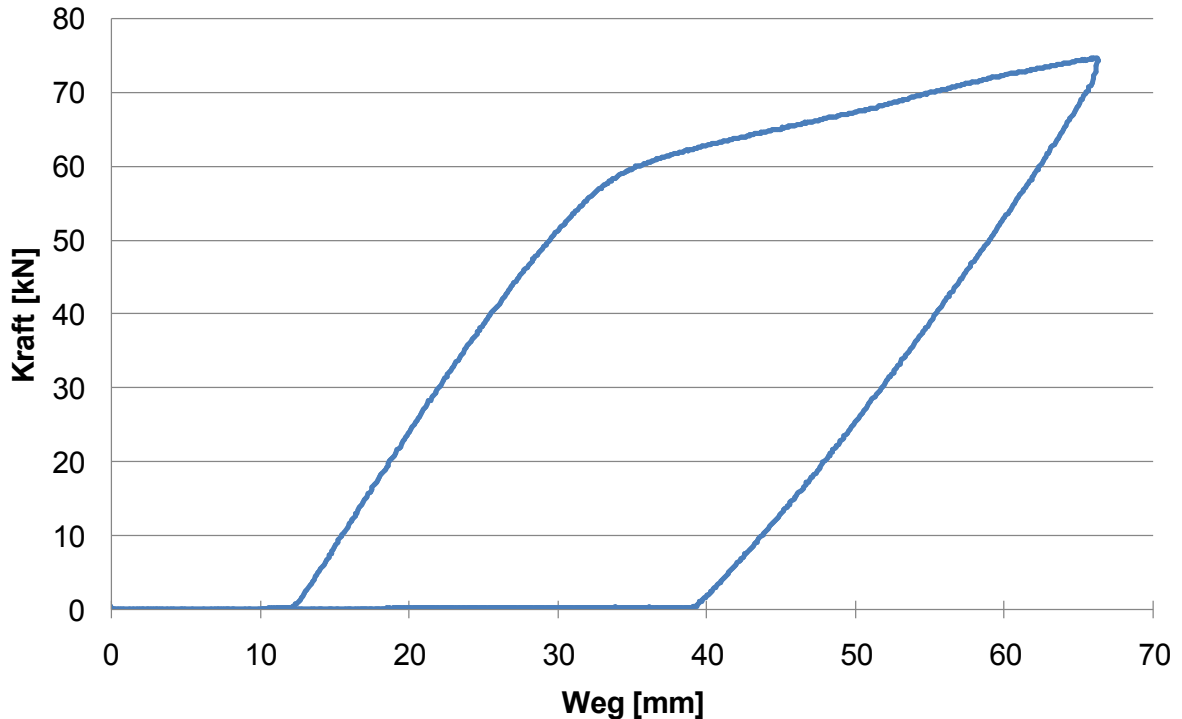


Abbildung 40 Kraft-Weg-Verlauf des 20% Versuches.

Die Ovalität wurde nach Formel (3.1) berechnet und betrug nach dem drittmaligen Einbeulen $\sim \Delta_{od} = 0,072$. Die maximale Einbeultiefe bei entfernter Ummantelung, wie in Abbildung 41 ersichtlich ist, betrug $\sim 13,3$ mm, das sind bezogen auf den Ausgangsdurchmesser 4%. Somit war die elliptische Verformung des Rohres stärker als die Einbeulung selbst.

$$\Delta_{od} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (3.1)$$

Der Versuch hat gezeigt, dass mit der vorhandenen Presse und dem Baggerzahn ein Rohr mit einem Durchmesser von 323,9 mm eingebeult werden kann. Da die seitliche Stützung des Rohres beim Versuch fehlt, ovalisiert das Rohr. Um die Verhältnisse der Realität abzubilden, wurde das Rohr in den weiteren Versuchen seitlich abgestützt. Dies verhinderte die Ovalisierung des Rohres.

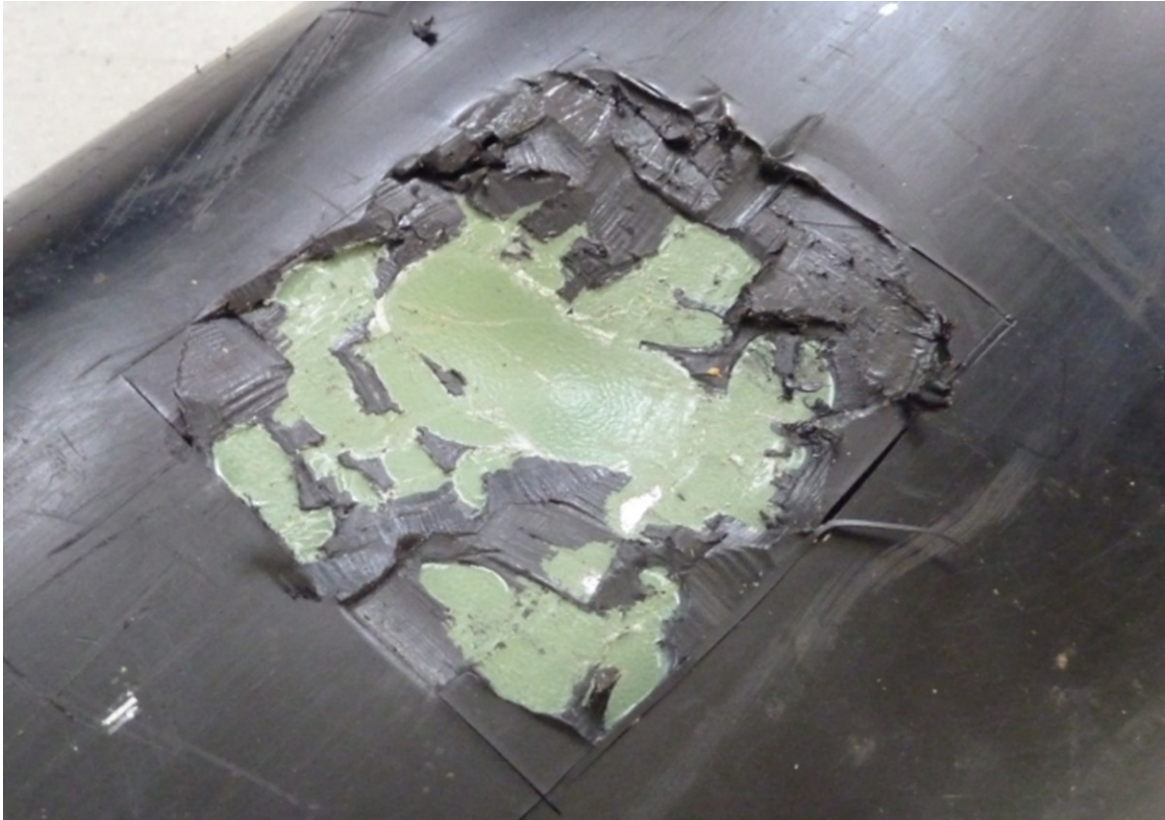


Abbildung 41: Gebeultes Rohr mit entfernten Mantelmaterial.

3.2 Versuche mit Rohren mit einem Durchmesser von 88,9 mm

3.2.1 Versuchsaufbau

Wie beim Vorversuch wurde die "Werner & Pfleiderer" Hydraulikpresse mit einer Presskraft von 1MN verwendet. Als Eindringkörper wurde der bestehende Zahn (Abbildung 36) genommen. Um die Einbettung einer Pipeline zu simulieren und um das nach dem Versuch verformte ovale Rohr wieder auszuformen, wurde eine mit Sand gefüllte Kokille (Kessel) gebaut. Sie besteht, wie in Abbildung 42 zu sehen, aus einem Rohr, welches einen Boden und einen Deckel mit einer exzentrisch liegenden Bohrung besitzt, in die das zu prüfende Rohr gesteckt wird. Anschließend wird der Sand hinein gefüllt und per Hand verdichtet. Der Spalt zwischen dem Rohr und der Kokille wurde mit Panzertape abgedichtet. Damit die axialen Kräfte aufgenommen werden, wurde der Deckel mit Schraubzwingen verspannt. Der Eindringkörper wurde bei diesem Versuch am Obergesenk befestigt.

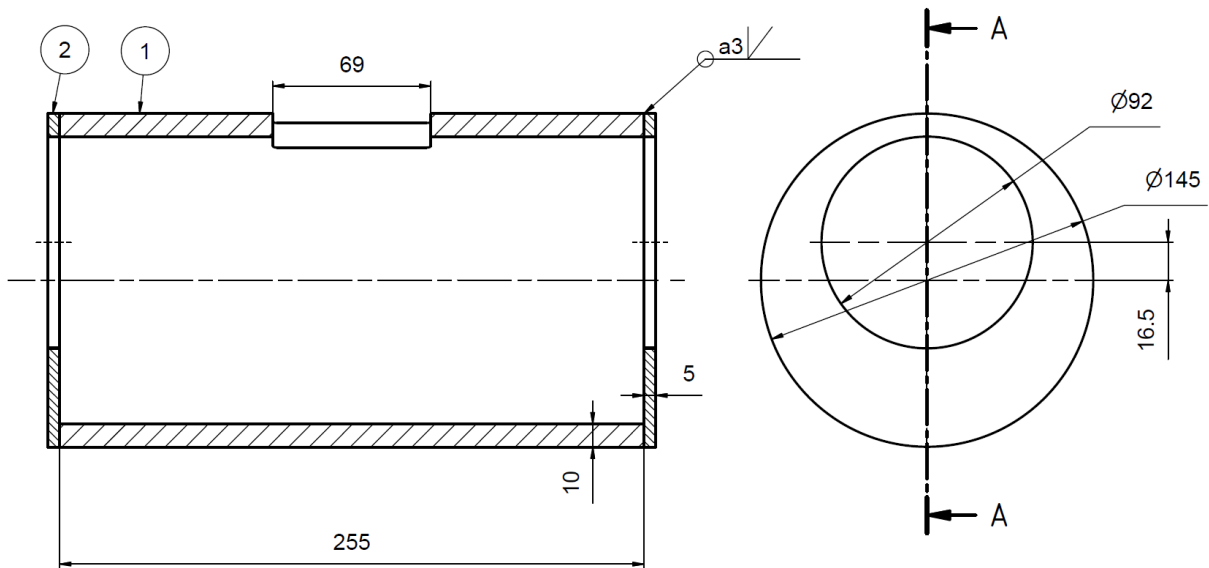


Abbildung 42: Die Kokille für 88,9 mm Rohre zur Simulation der Einbettung.

3.2.2 Versuchsdurchführung des Einbeulversuchs der 88,9 mm Rohre

Nachdem die Kokille mit Rohr und der Eindringkörper in die Presse, wie in Abbildung 43, verbaut wurden, wurde das Obergesenk in Z-Richtung auf 178 mm verfahren, damit zwischen Eindringkörper und Rohr leichter Kontakt besteht. Die Kraftmessdose wurde kalibriert und das Obergesenk bewegte sich wie zuvor in die SPS Steuerung programmiert, in Z-Richtung um 8,9 mm nach unten. Dieser Weg entspricht 10% des Außendurchmessers des zu prüfenden Rohres.

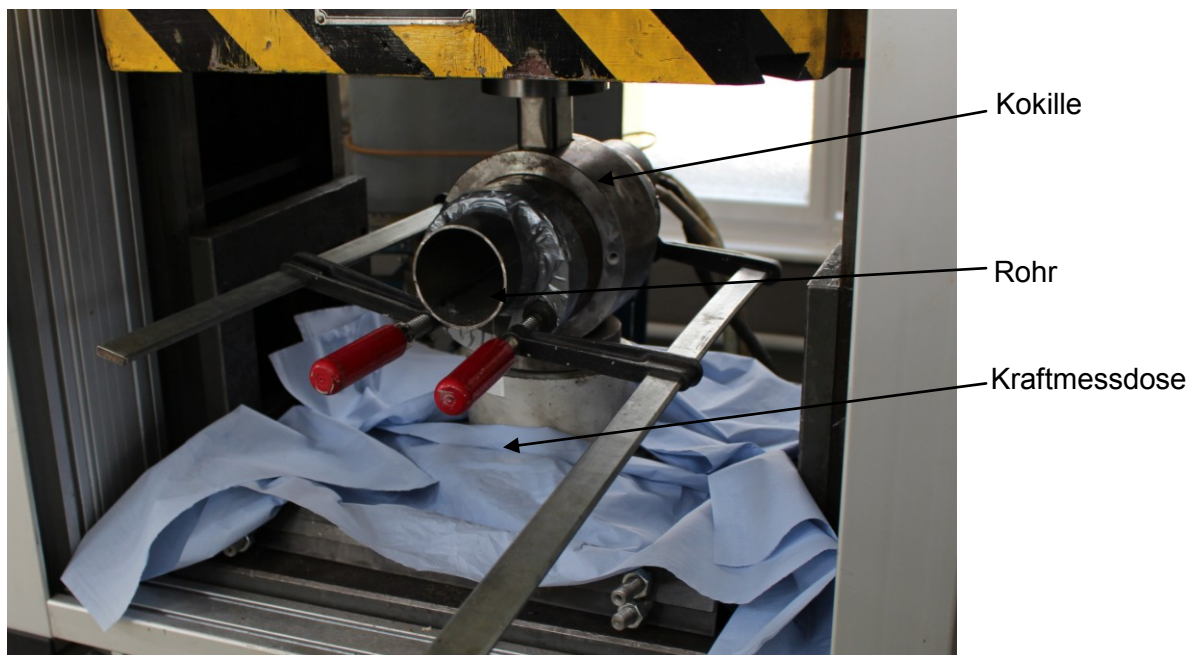


Abbildung 43: Eingebautes 88,9 mm Rohr.

Insgesamt wurden 4 Versuche durchgeführt. Die genauen Spezifikationen der Rohre sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Versuchsparameter der Versuche V1-V4

| Versuch | Rohraußendurchmesser da | Werkstoff | Eindringtiefe | Schweißnahtlage |
|---------|-------------------------|-----------|---------------|-----------------|
| V1 | 88,9 mm | 1.0345 | 8.9 mm | 120° |
| V2 | 88,9 mm | 1.0345 | 8.9mm | 0° |
| V3 | 88,9 mm | 1.4301 | 8.9mm | 0° |
| V4 | 88,9 mm | 1.4301 | 8.9mm | 120° |

Nach dem Versuch wurde die Kokille aus der Presse gehoben. Der Deckel der Kokille wurde entfernt und der Sand und das zu prüfende Rohr wurden aus der Kokille entfernt. Das Rohr wurde mit Druckluft vom haftenden Sand gereinigt. Um die entstandene Beule zu messen wurde das Rohr, wie in Abbildung 44, auf zwei Messprismen gelegt und die Tiefe der Beule mit einer Tiefenlehre gemessen. Da es sich bei allen entstandenen Beulen um Beulen des Typs A handelte, wurden die Breite und die Länge der Beule gemessen, um später die Beulenkenzahl zu beschreiben.



Abbildung 44: Rohr des Versuches V4 auf zwei Messprismen.

3.2.3 Versuchsauswertung des Einbeulversuches

Mit der Beultiefe, Beulenlänge und Beulenbreite wurde die Beulenkennzahl berechnet. Die Beulenkennzahl für den jeweiligen Versuch ist in Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5: Gemessene Versuchsergebnisse der Versuche V1-V4

| Versuch | Beultiefe [mm] | Beulenlänge [mm] | Beulenbreite [mm] | D1 [mm] | D2 [mm] | Beulenkennzahl | Ovalität |
|---------|----------------|------------------|-------------------|---------|---------|----------------|----------|
| V1 | 4,85 | 67,2 | 43,79 | 88,8 | 84,9 | 0,2450 | 0,0225 |
| V2 | 4,7 | 66,9 | 40,36 | 90 | 85 | 0,2508 | 0,0286 |
| V3 | 3,2 | 58 | 32,63 | 88,8 | 86 | 0,1659 | 0,016 |
| V4 | 3,5 | 52,7 | 33,88 | 89,6 | 85,7 | 0,2108 | 0,0222 |

Die Ovalität wurde mit Gleichung (3.1) berechnet. Da alle Beulenkennzahlen unter den für den Typ A vorgeschriebenen Wert von 2,5 liegen, sind alle Beulen nach der Norm als nicht kritisch einzustufen. Die Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche mit demselben Rohrwerkstoff. Die Versuche V1 und V4 hatten die Lage der Schweißnaht bei 120° und die Versuche V2 und V3 hatten die Lage der Schweißnaht bei 0°.

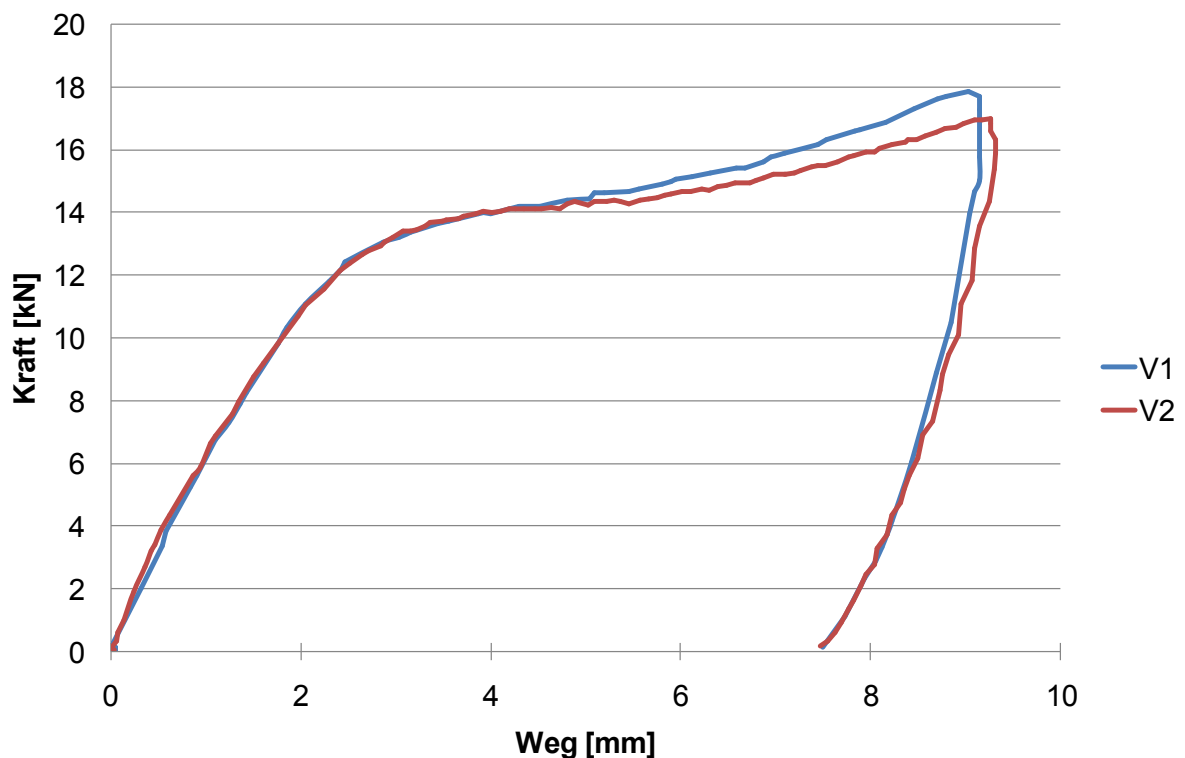


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V1 und V2.

Die Kurven der Abbildung 45 verlaufen bis zu einem Weg von ungefähr 5 mm nahezu ident. Die Abweichung nach einer Eindringtiefe von 5 mm kann einerseits von einer unterschiedlich starken Verdichtung stammen, andererseits auch von dem Einfluss der Lage der Schweißnaht. Wenn von der Verdichtung abgesehen wird hätte somit die Schweißnaht eine leicht schwächende Wirkung auf das Rohr mit dem Werkstoff P 235 GH. Im rechten Teil des Diagrammes ist die elastische Rückfederung des Rohres zu sehen.

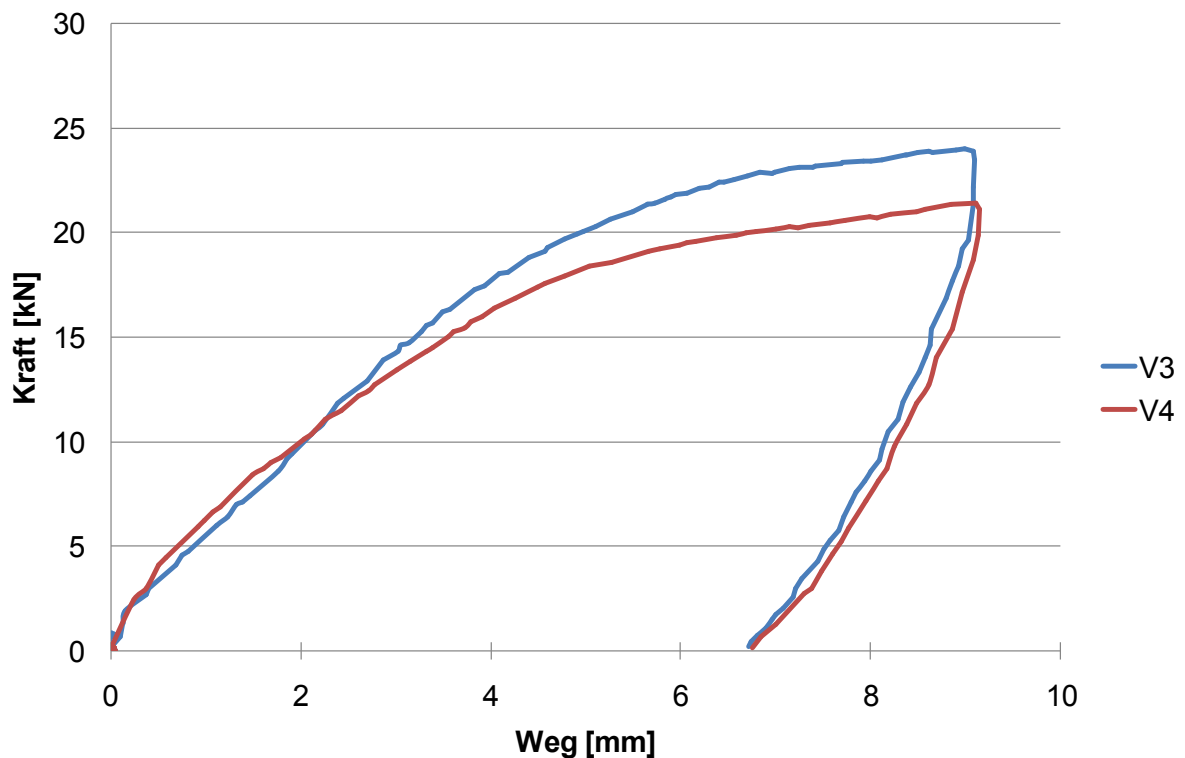


Abbildung 46: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V3 und V4.

Der Verlauf der Kurven der Abbildung 46 zeigt einen deutlichen Unterschied. Dieser wird minimal durch die Verdichtung des Sandes beeinflusst. Der Einfluss der Lage der Schweißnaht ist um vieles größer. Somit kann gesagt werden, dass die Lage der Schweißnaht bei Rohren mit dem austenitischen Stahl X5CrNi18-10 einen Einfluss auf das Beulverhalten hat. Die Schweißnaht wirkt somit für diesen Werkstoff versteifend.

Abbildung 47 zeigt den Kraft-Weg Verlauf aller vier Versuche zusammen. Dabei sind die Einflüsse der unterschiedlichen Werkstoffe ersichtlich. Je höher die Festigkeit eines Werkstoffes ist, desto höher ist die Kraft, die benötigt wird, um ein Rohr einzubeulen.

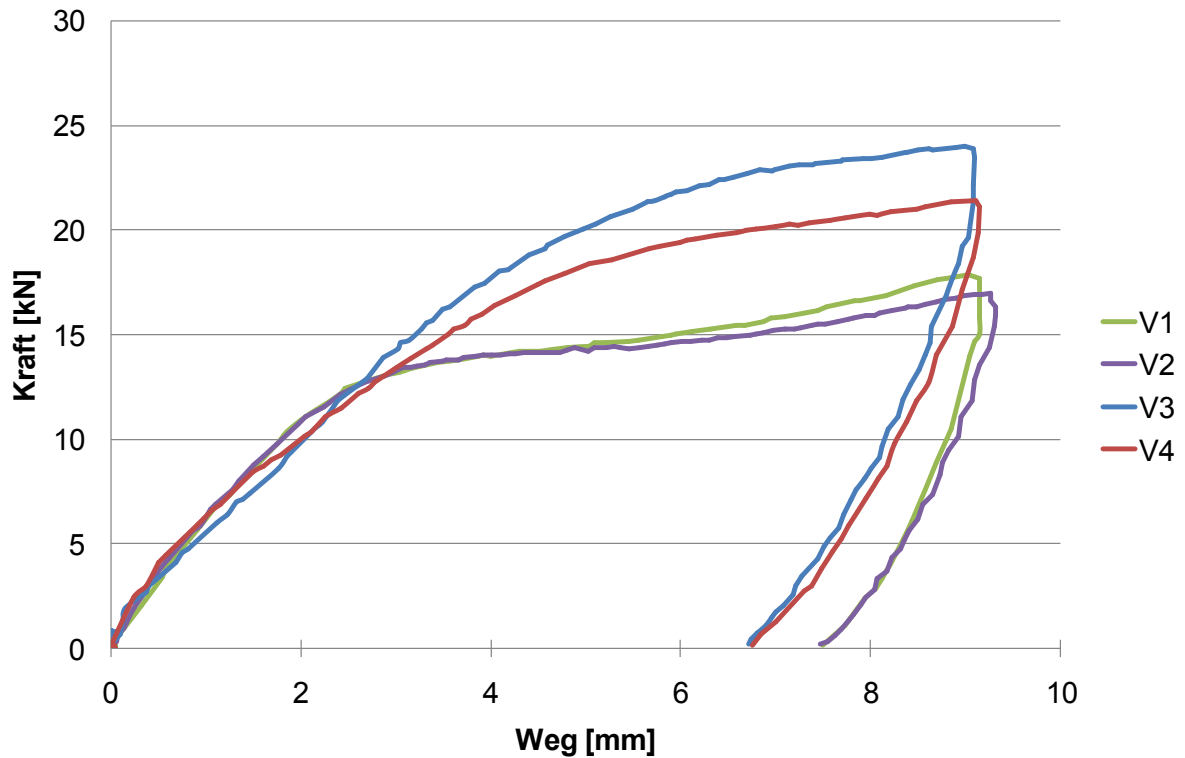


Abbildung 47: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V1-V4.

3.3 Druckversuch

3.3.1 Aufbau des Druckversuches

Das Einbeulen des Rohres erfolgte wie im Kapitel 3.2.1 beschrieben. Für den Druckversuch wurde das Rohr auf 45% des Außendurchmessers eingedrückt. Die Schweißnaht lag dabei auf 0° (12 Uhr). Wie in den Versuchen V1-V4, federte das Rohr leicht zurück. Die endgültige Beulentiefe betrug nach dem Ausfedern 33 mm, was 37% des ursprünglichen Außendurchmessers entspricht. Alle Ergebnisse sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Abmessungen der Beule

| Versuch | Beulentiefe [mm] | Beulenlänge [mm] | Beulenbreite [mm] | D1 [mm] | D2 [mm] | Beulenkennzahl | Ovalität |
|---------|------------------|------------------|-------------------|---------|---------|----------------|----------|
| B1 TypA | 33 | 200 | 89 | 96,7 | 68 | 1,8755 | 0,1743 |
| B1 TypB | 33 | 200 | | 96,7 | 68 | 5,0581 | 0,1743 |



Abbildung 48: Einbeultes Rohr mit deutlich zu sehenden Riefen.

Da optisch nicht eindeutig zwischen einer Beule des Typs A oder B unterschieden werden konnte, wurde die Beulenkennzahl für beide Fälle berechnet. Beide Kennwerte liegen gerade noch leicht unter dem kritischen Wert von 2.5 für den Typ A und 5.5 für den Typ B. Somit wäre die Beule nach der Beulenkennzahl nicht kritisch. Wie in Abbildung 48 erkennbar ist, sind im Beulental Riefen, die vom Eindringkörper verursacht wurden. Dadurch sind sie keine Beulen mit weicher Kurvenform und somit sind sie trotz unterkritischer Beulenkennzahl als kritisch zu bewerten. Bei der Sichtkontrolle konnten keine Risse gefunden werden und auch im Rohrinnenen konnten keine Risse ertastet werden. Es wurde nur eine minimale Einkerbung im Beulengrund, wie es Abbildung 49 zeigt, gefunden. Die Ursache dafür kann ein Span, ein Sandkorn oder ein Produktionsfehler sein.



Abbildung 49: Minimale Einkerbung im Beulental.

Nach dem Einbeulen wurde das Rohr, wie aus Abbildung 50 ersichtlich, auf beiden Seiten verschlossen und radial verschweißt. Anschließend wurde es mit Wasser gefüllt und an die Pumpe angeschlossen (Abbildung 51).

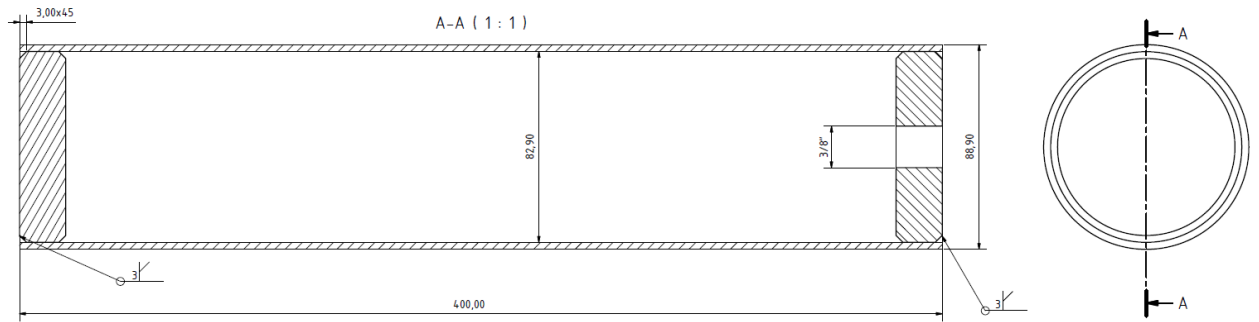


Abbildung 50: Die schematische Darstellung des Burstbehälters.



Abbildung 51: Versuchsaufbau für den Druckversuch.

3.3.2 Ergebnisse des Druckversuches

Beim Vergleich des Kraft-Weg-Verlaufes des Einbeulversuches V2 und mit dem Einbeulen des Druckversuches B1 (Abbildung 52) ist ersichtlich, dass trotz gleicher Aufstellung der Versuche, minimale Unterschiede zu beobachten sind. Die Unterschiede werden vermutlich durch den Sand, der per Hand verdichtet wurde, verursacht.

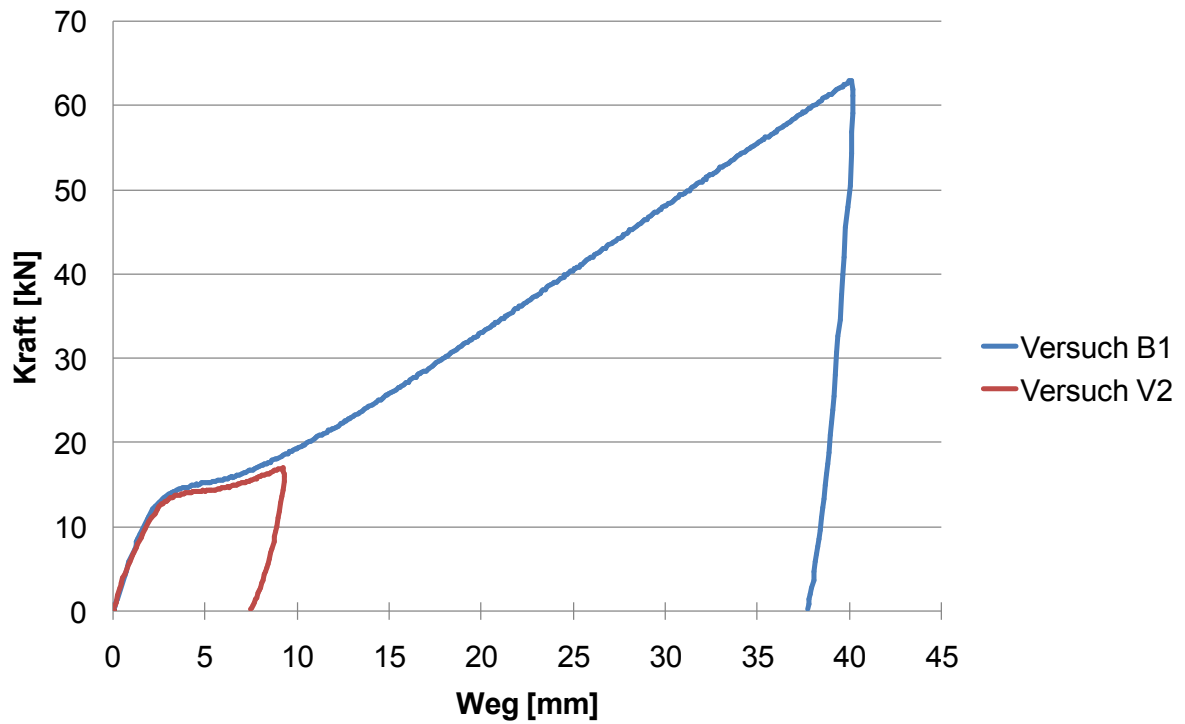


Abbildung 52: Gegenüberstellung des Druckversuches B1 und des Einbeulversuches V2.

Weiters ist in Abbildung 53 zu sehen, dass ab einem Weg von ungefähr 10 mm, die Kurve in eine Gerade mit konstanter Steigung übergeht.

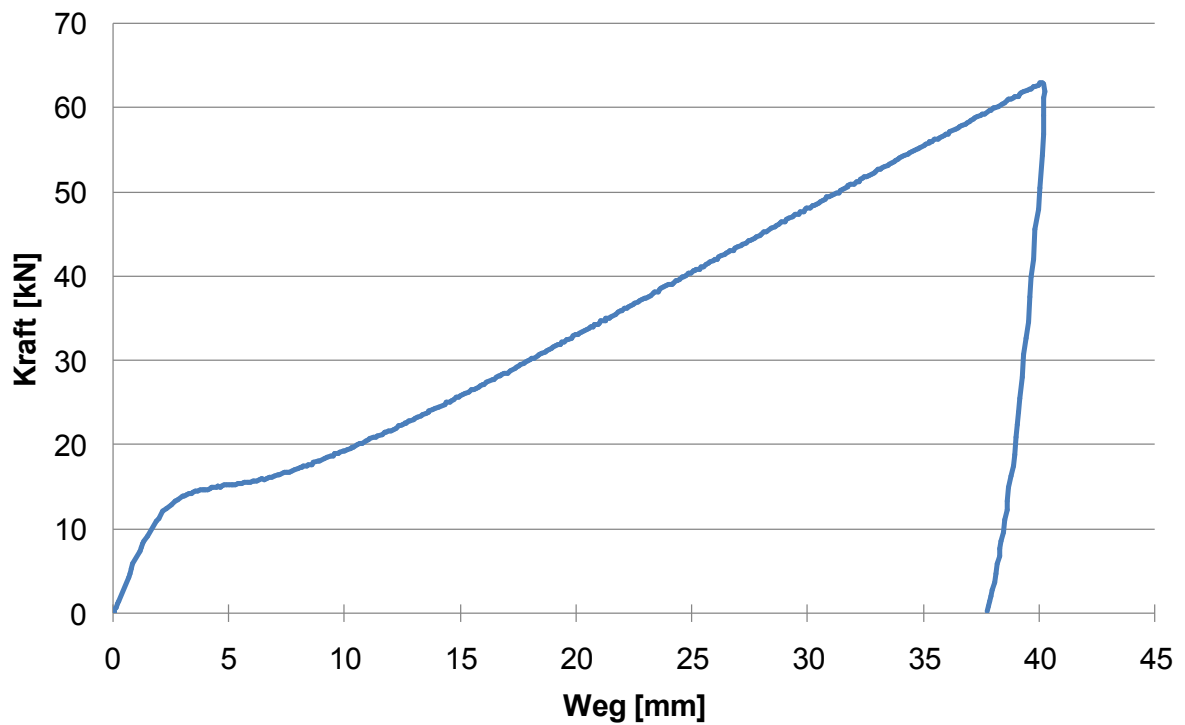


Abbildung 53: Kraft-Weg-Verlauf des Druckversuches B1.

Beim eigentlichen Druckversuch wurde der Innendruck des Rohres per Hand langsam gesteigert. In Abbildung 54 ist der Druckverlauf des ersten Berstversuches über die Zeit ersichtlich. Der Abfall des Druckes bei ungefähr 70 bar ist damit zu begründen, dass die Person an der Pumpe gewechselt wurde. Ab einem Druck von ungefähr 25 bar hat sich das Rohr plastisch verformt.

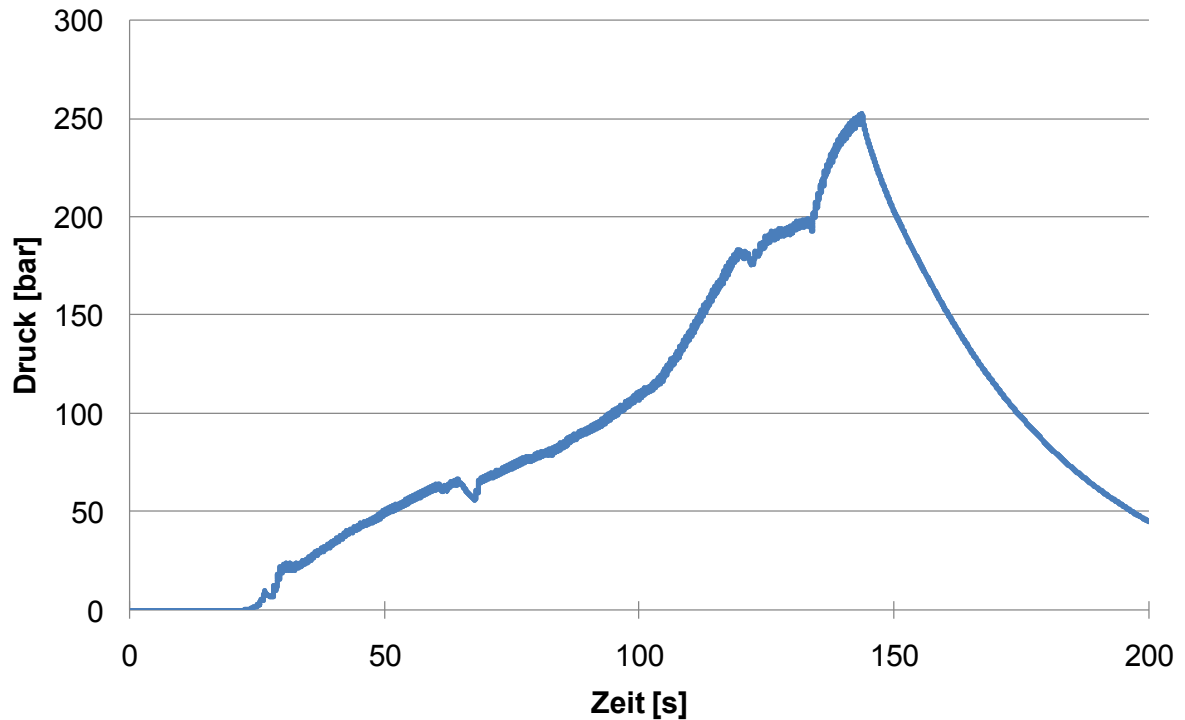


Abbildung 54: Druck-Zeit-Verlauf des Druckversuches B1.

Die Beule wurde bis auf den verfestigten Anteil ausgebeult. Der stark kaltverfestigte Anteil blieb in seinem eingebeulten Zustand. In Tabelle 7 und Abbildung 55 finden sich die Abmessungen und Kennzahlen der neuen Beule.

Tabelle 7: Die Messwerte der ausgebeulten Beule.

| Versuch | Beultiefe [mm] | Beulenlänge [mm] | Beulenbreite [mm] | D1 [mm] | D2 [mm] | Beulenkennzahl | Ovalität |
|---------|----------------|------------------|-------------------|---------|---------|----------------|----------|
| B1 | 4,82 | 49,81 | 48,58 | 88,3 | 90,8 | 0,2943 | -0,014 |

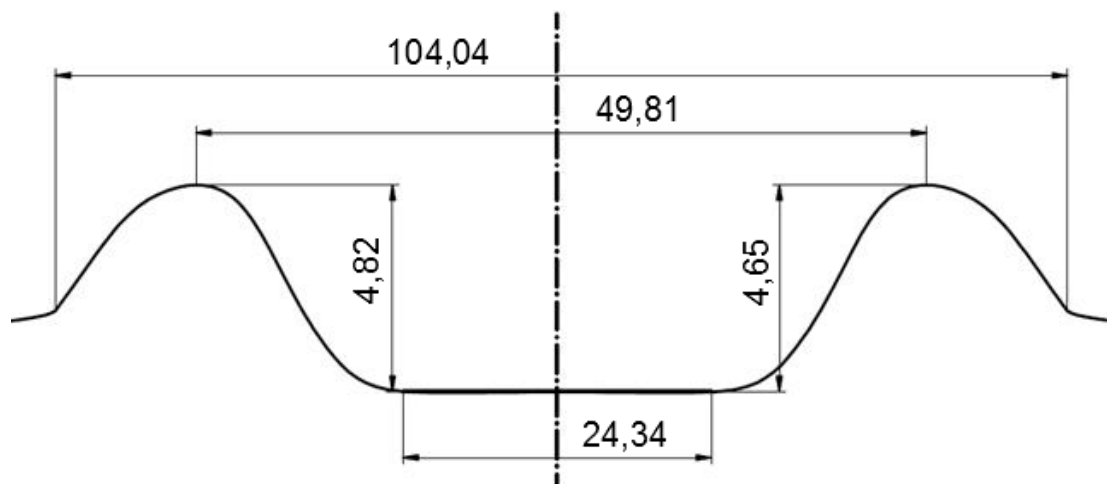


Abbildung 55: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B1

Das eingebeulte Rohr konnte erfolgreich einen Druck von 250 bar widerstehen. Die Schweißnaht des Rohres hat sich als erstaunlich widerstandsfähig herausgestellt und hielt das direkte Einbeulen und den nachfolgenden Druckversuch stand.

Ob dieser Widerstand gegen Innendruck nur für den Werkstoff P 235 GH gilt oder aber auch für den Werkstoff X5CrNi18-10, sollte der Druckversuch B2 klären. Versuchsaufbau und Durchführung waren ident zum Versuch B1. Die Tabelle 8 zeigt die Kennwerte der Beule vor dem Druckversuch und die Abbildung 56 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf des Einbeulens.

Tabelle 8: Die Messwerte der ausgebeulten Beule.

| Versuch | Beultiefe [mm] | Beulenlänge [mm] | Beulenbreite [mm] | D1 [mm] | D2 [mm] | Beulenkennzahl | Ovalität |
|---------|----------------|------------------|-------------------|---------|---------|----------------|----------|
| B2 TypA | 31,8 | 182,03 | 83,07 | 97,3 | 69,4 | 2,0501 | 0,1676 |
| B2 TypB | 31,8 | 182,03 | | 97,3 | 69,4 | 5,3554 | 0,1676 |

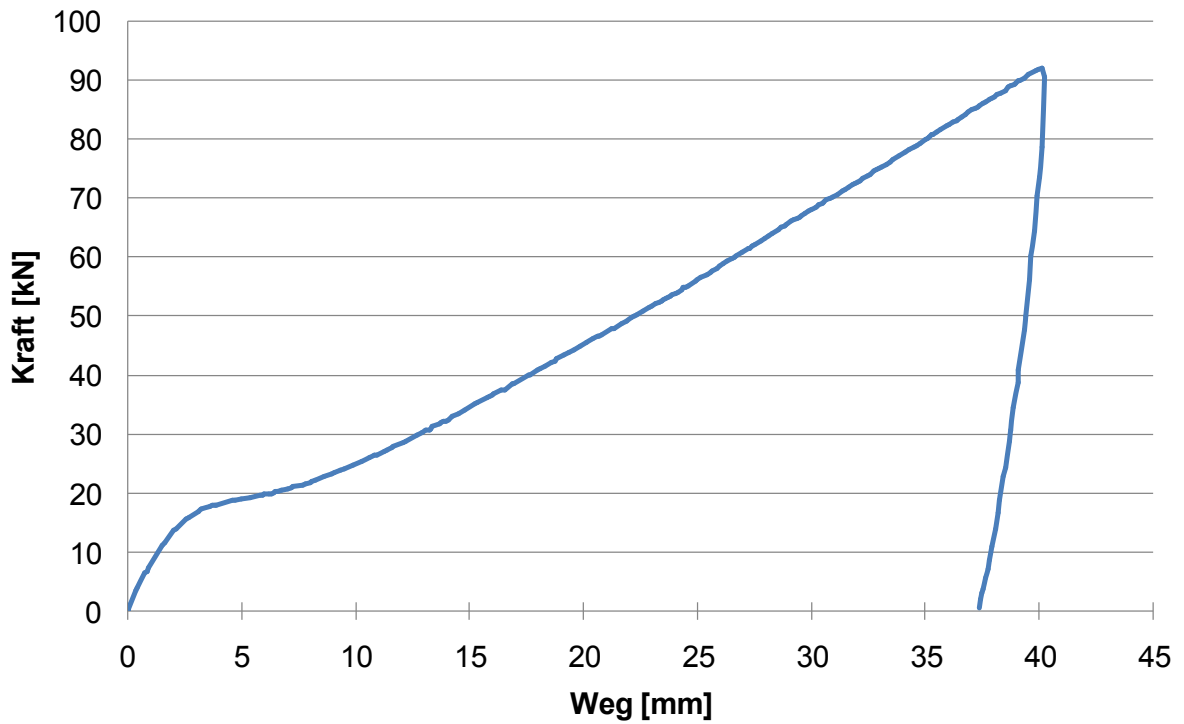


Abbildung 56: Kraft-Weg-Verlauf des Druckversuches B2.

Da davon auszugehen war, dass der höherfeste Werkstoff auch höhere Belastungen aushalten würde, wurde der Druck, wie in Abbildung 57 zu sehen ist, auf 300 bar gesteigert und dabei die Arbeitsgrenze der Handpumpe erreicht.

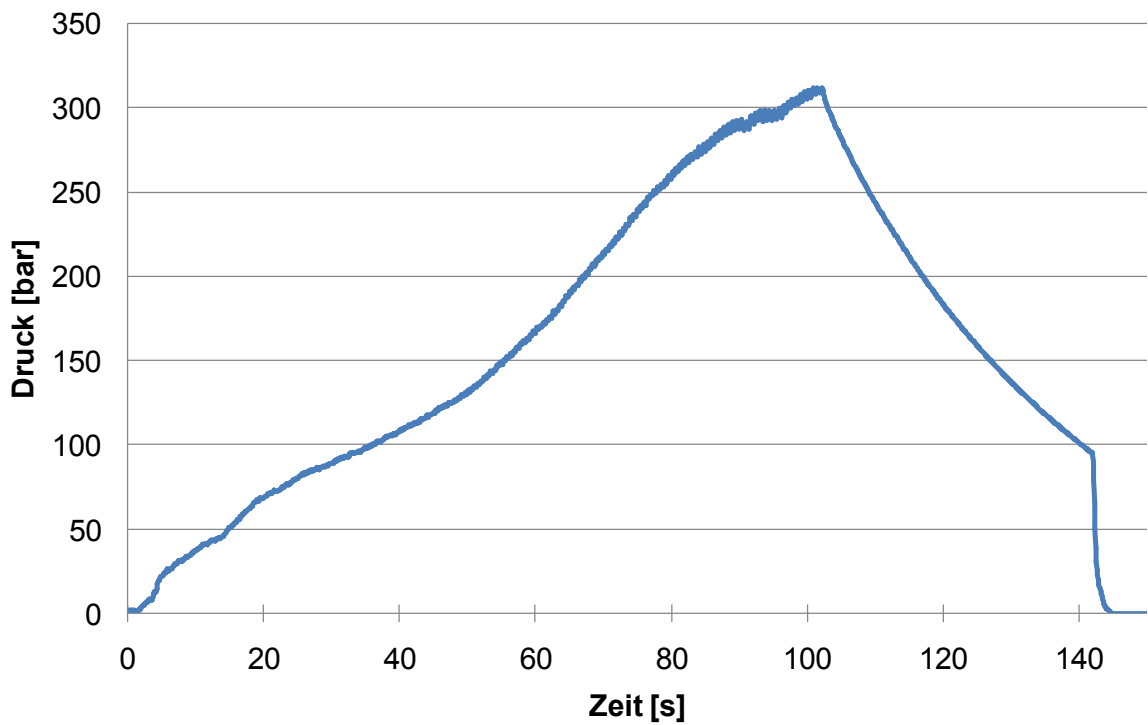


Abbildung 57: Druck-Zeit-Verlauf des Versuches B2

Die Tabelle 9 und die Abbildung 58 zeigen die Messdaten der Beule nach dem Druckversuch.

Tabelle 9: Die Messwerte der ausgebeulten Beule.

| Versuch | Beultiefe [mm] | Beulenlänge [mm] | Beulenbreite [mm] | D1 [mm] | D2 [mm] | Beulenkennzahl | Ovalität |
|---------|----------------|------------------|-------------------|---------|---------|----------------|----------|
| B1 neu | 4,82 | 49,81 | 48,58 | 88,3 | 90,8 | 0,2943 | -0,014 |

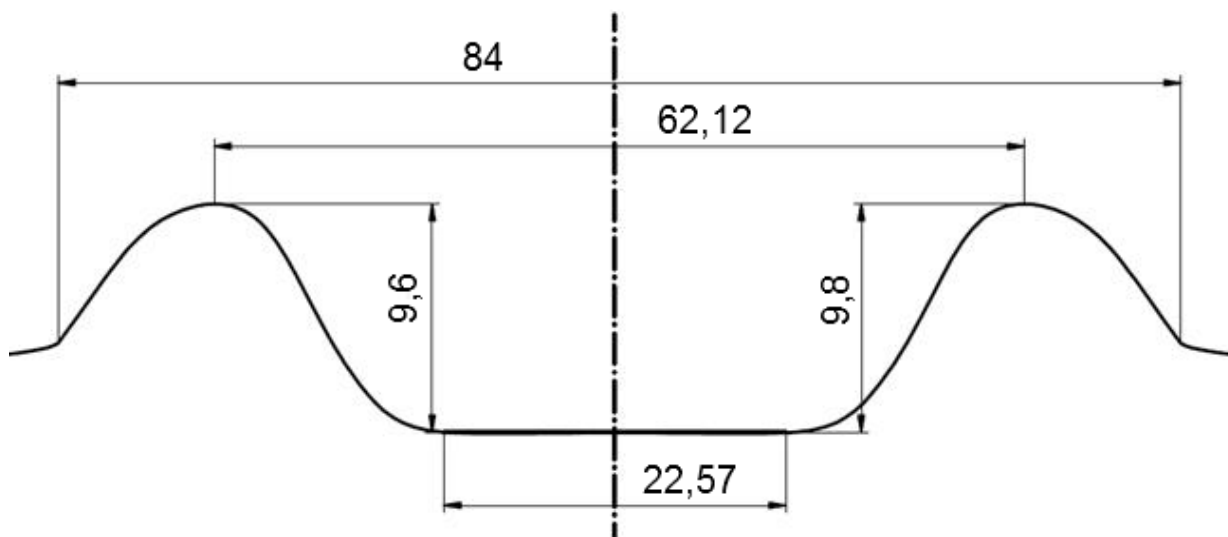


Abbildung 58: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B2

Da bei diesen Druckversuchen nur plastische Verformungen und bei der Sichtkontrolle keine Risse aufgetreten sind, wurde beschlossen, das Rohr des ersten Druckversuch, was eine geringere Festigkeit besitzt, noch einmal zu belasten und mit einem Druck von 300 bar zu beanspruchen.

Die Abbildung 59 zeigt den Druckverlauf des dritten Druckversuches. Aus der Kesselgleichung geht hervor, dass der zulässige Druck bei 153 bar und der Berstdruck zwischen 234 und 313 bar für dieses Rohr liegt. Das Rohr hat sich lediglich plastisch verformt.

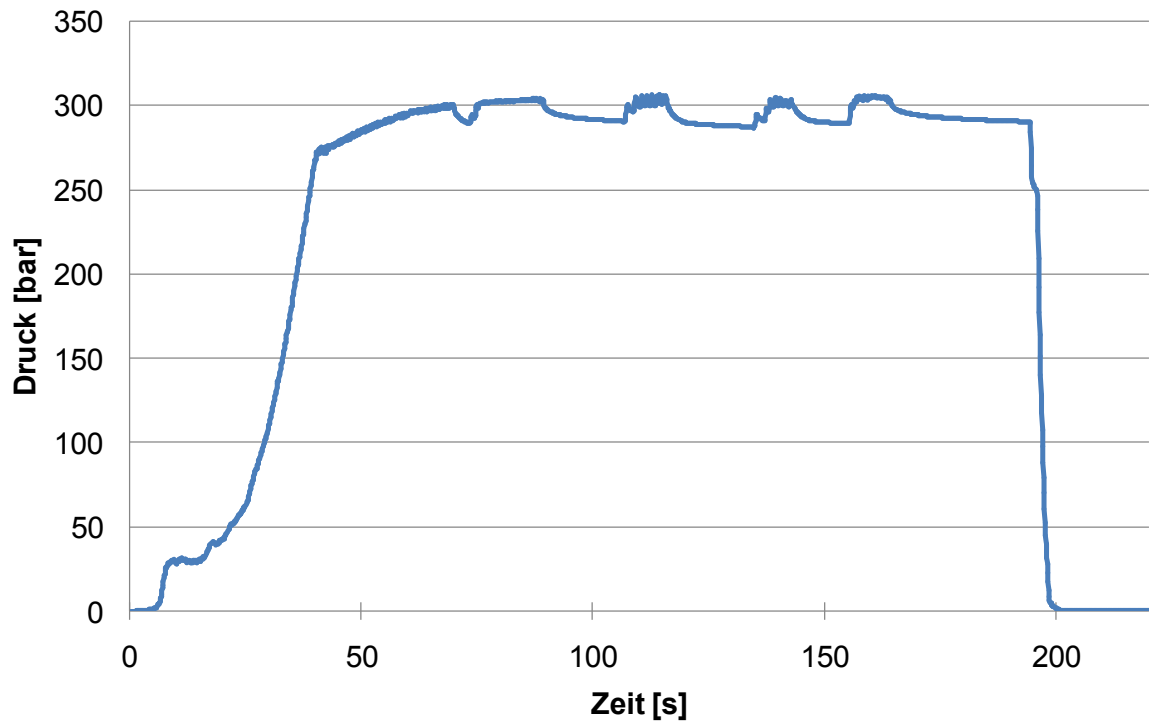


Abbildung 59: Der Druck-Zeit-Verlauf des zweiten Versuches B 1/2

Die Abbildung 60 zeigt die Kennwerte der Beule nach dem dritten Druckversuch.

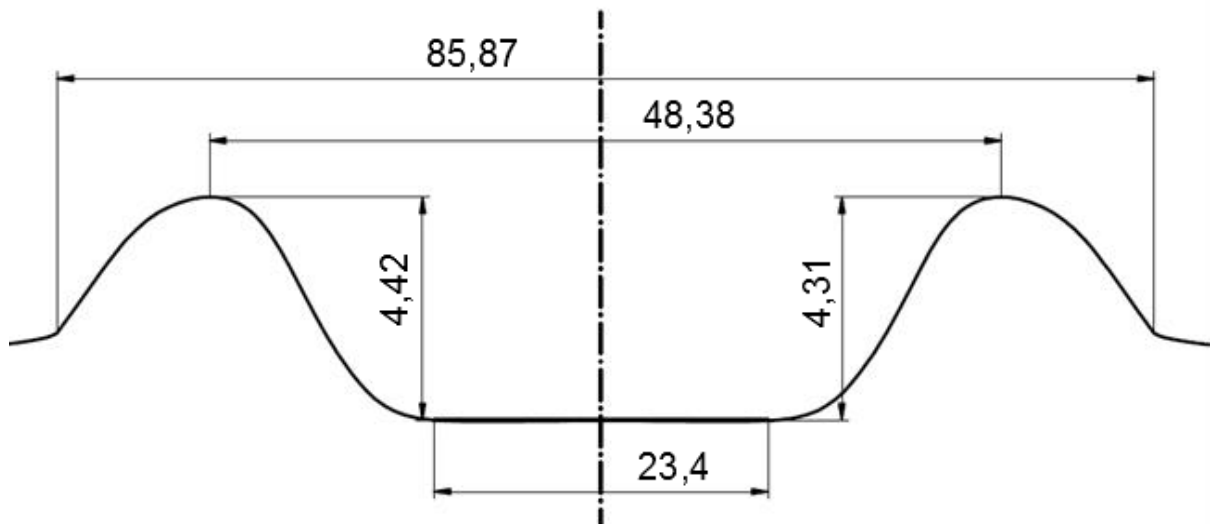


Abbildung 60: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B1/2.

Nach dem Druckversuch kann der Schluss gezogen werden, dass eine Beule die statische Festigkeit eines Rohres, bei einer einmaligen kurzen Innendruckbelastung, nicht beeinflusst. Ob dies auch für die Lebensdauer eines dynamisch beanspruchten Rohres gilt, kann nach diesem Versuch nicht beantwortet werden.

3.4 Quetschversuch

3.4.1 Aufbau des Quetschversuches

Da beim Druckversuch keine Beschädigung des Rohres auftrat, wurde entschieden, dass ein Rohr so massiv eingebeult werden sollte, dass es nach der Beulenkennzahl eindeutig kritisch ist und somit für einen geordneten Betrieb nicht geeignet wäre. Hierzu wurde der Versuchsaufbau des Druckversuches leicht umgeändert.

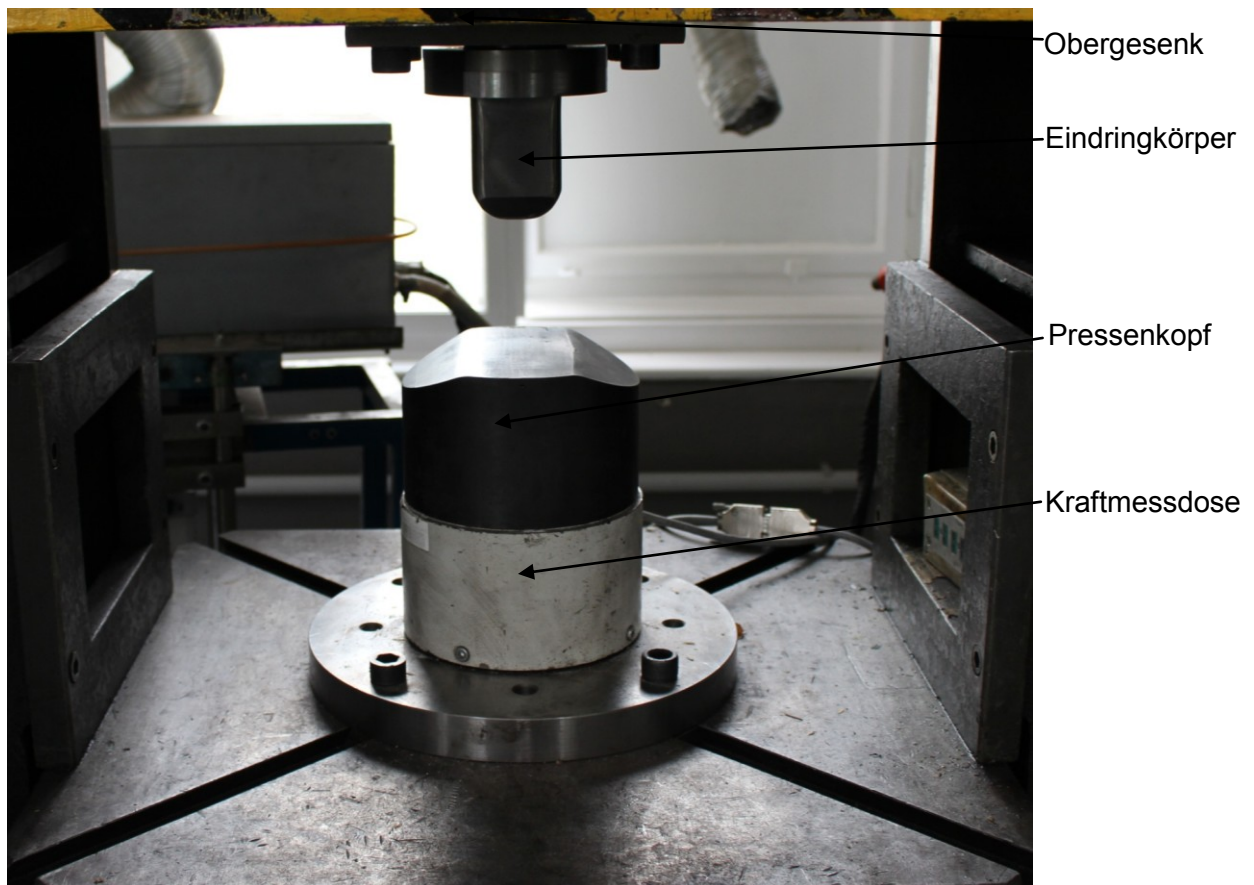


Abbildung 61: Versuchsaufbau des Quetschversuches

Wie in Abbildung 61 zu sehen ist, wurde wie beim Druckversuch der Eindringkörper am Obergesenk montiert. Am Untergesenk wurde ein flacher Pressenkopf mit der Kraftmessdose montiert. Der Versuchsaufbau des anschließend Druckversuches blieb gleich. Das Rohr wurde anders als bei den Druckversuchen (B1-B2), schon vor dem Quetschen verschlossen, aber der Anschluss für die Pumpe blieb während des Quetschens offen. Weiters wurde das Rohr so positioniert, dass der Eindringkörper um 90° zur Rohrlängsachse verdreht ist.

3.4.2 Ergebnisse des Quetschversuches

Die Abbildung 62 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf des ersten Einquetschens. Da die Biegung des Rohres, wie es in Abbildung 63 ersichtlich ist, zu groß für eine Vermessung der Beule war, wurde diese nicht vermessen.

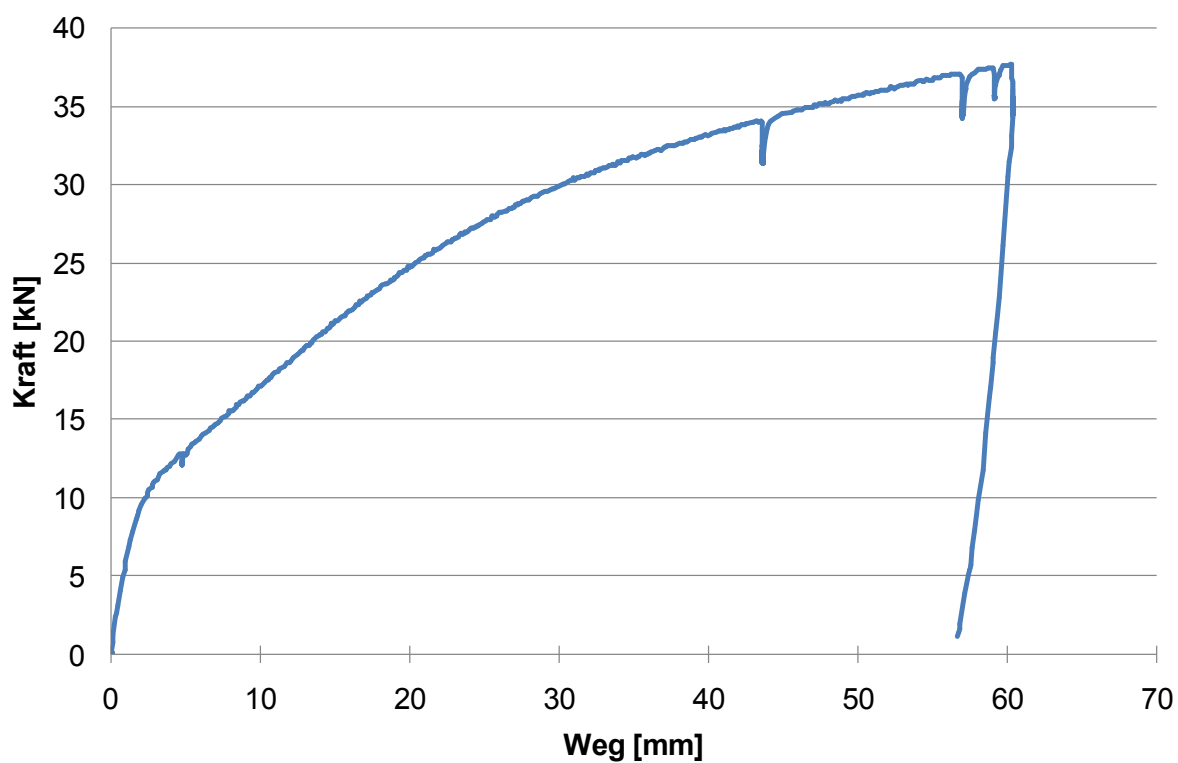


Abbildung 62: Kraft-Weg-Verlauf des Quetschversuches Q1/1.



Abbildung 63: Das gefaltete Rohr des Quetschversuches.

Nach dem Quetschen wurde der Druckkörper mit Wasser gefüllt und an die Pumpe angeschlossen. Wie bei den Druckversuchen zuvor, wurde der Druckkörper aus Sicherheitsgründen in einen Schacht im Hallenboden versenkt. Die Abbildung 64 zeigt den Druck-Zeit-Verlauf des ersten Druckversuches mit gequetschten Rohr. Das Rohr begann sich ab einem Druck von 20 bar auszubeulen.

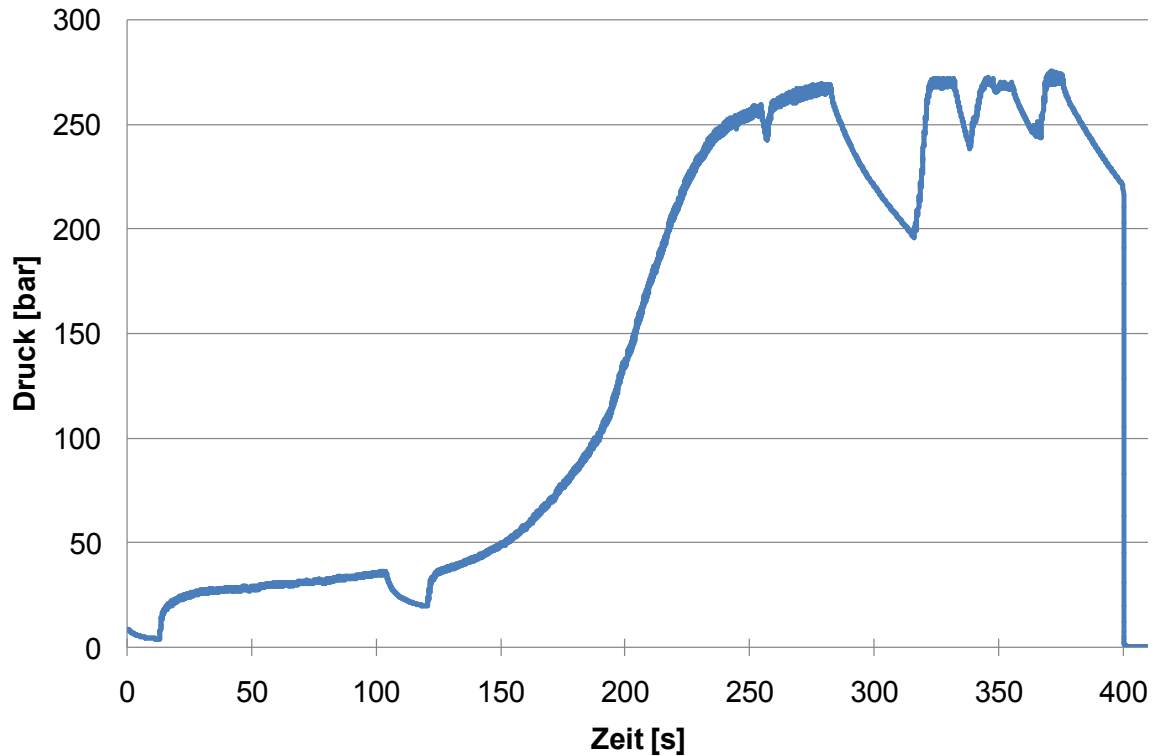


Abbildung 64: Druck-Zeitverlauf des Quetschversuches Q1/1.

Anschließend an dem Druckversuch wurde das Rohr erneut gequetscht. Die Abbildung 65 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf des zweiten Quetschens.

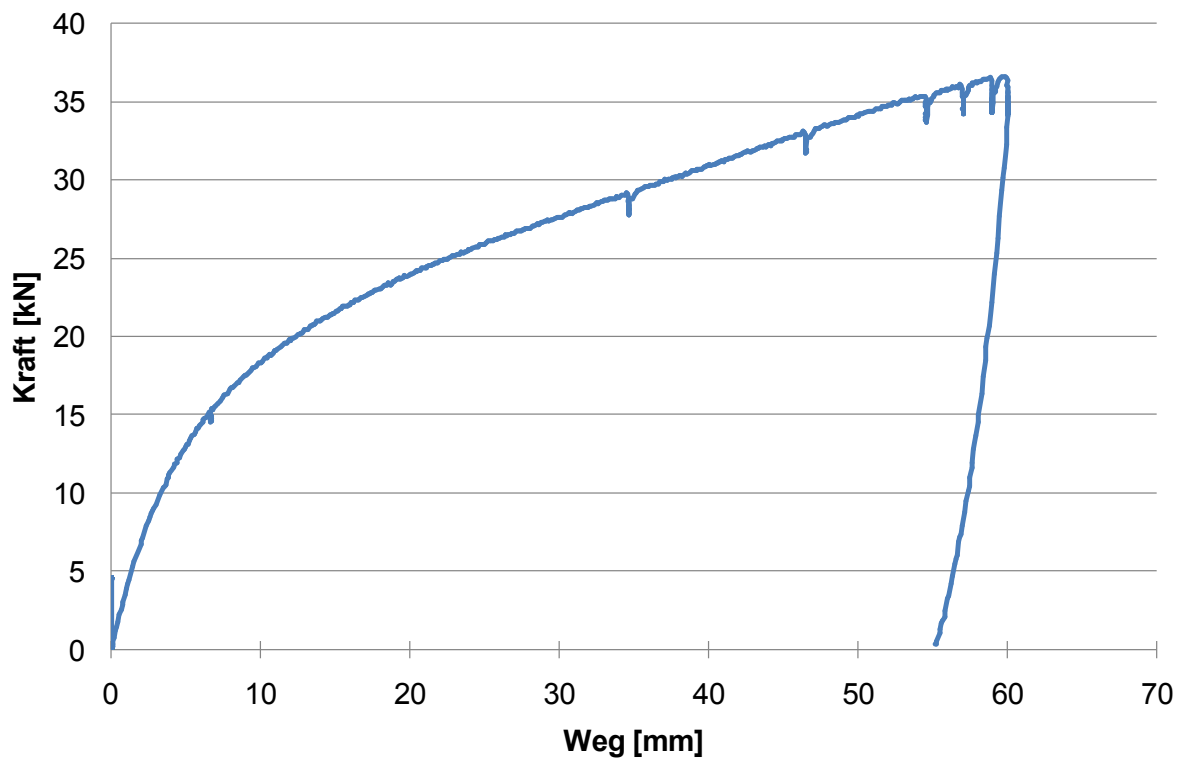


Abbildung 65: Der zweite Kraft-Weg-Verlauf des Quetschversuches Q1/2.

Mit Hilfe der Handpumpe wurde der gequetschte Druckkörper erneut unter Druck gesetzt. Die Abbildung 66 zeigt den Druckverlauf des zweiten Drucktests.

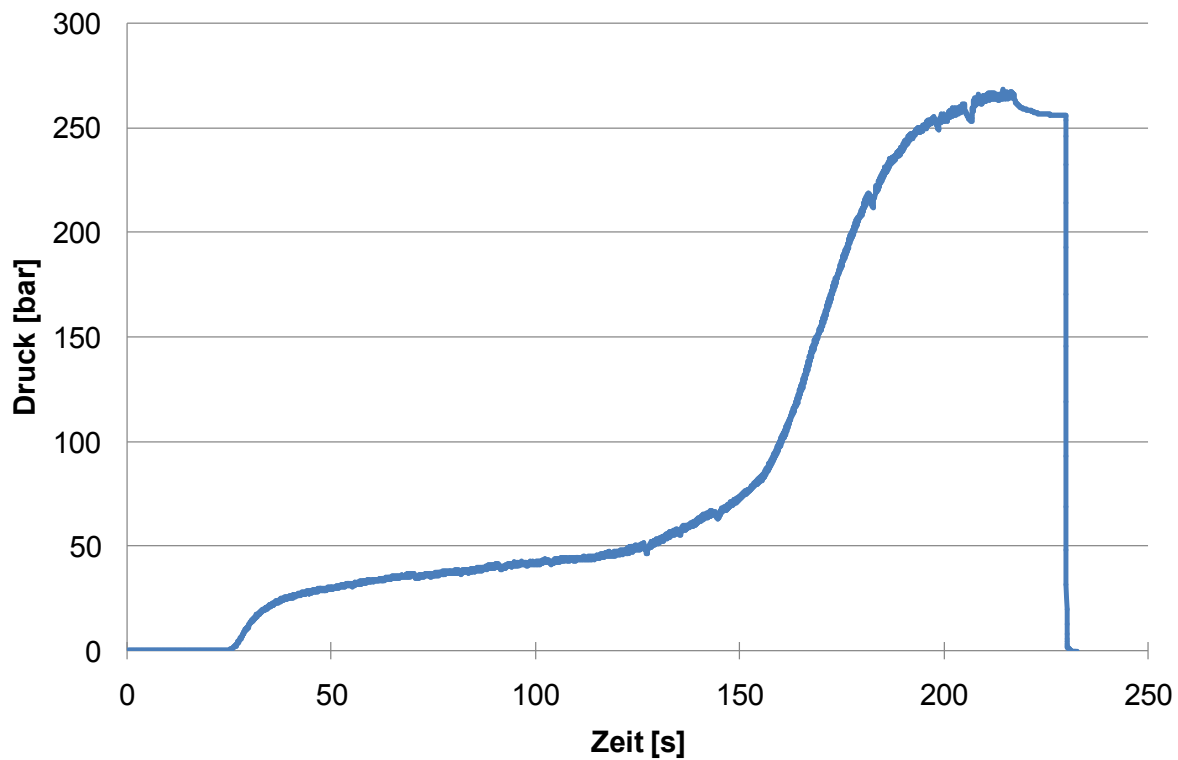


Abbildung 66: Der zweite Druck-Zeitverlauf des Quetschversuches Q1/2.

In der Abbildung 67 finden sich die genauen Abmaße der Beule nach dem zweiten Drucktest.

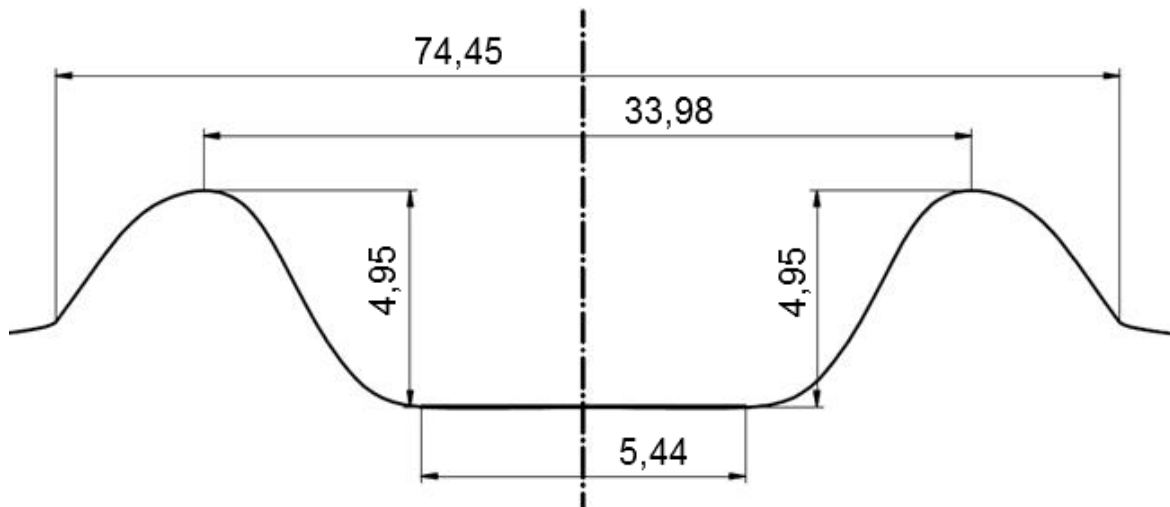


Abbildung 67: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches Q1.

Wie bei den vorhergegangenen Drucktest, liegt der zulässige Druck des Rohres bei 153 bar und der Berstdruck des Rohres zwischen 234 bar und 313 bar. Trotz der kritischen Einbeulung hielt das Rohr einem kurzfristig, langsam steigenden Innendruck stand. Somit kann gesagt werden, dass Beulen in einem Rohr mit dem Werkstoff P 235 GH keinen Einfluss auf die Festigkeit haben. Die Beule war trotz ihrer Tiefe weich ausgeformt und enthielt keinerlei Kratzer oder Furchen.

3.5 Versuche mit Rohren mit 323,9 mm Durchmesser

3.5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau gleicht im Grundaufbau dem des Vorversuches. Bei diesen Versuchen wurden zwei Rohre mit unterschiedlichem Werkstoff und Abmessungen verwendet. Das erste Rohr ist aus dem Werkstoff 1.0582 (L 360 NB) gefertigt und hat einen Außendurchmesser von 323,9 mm, mit einer Wandstärke von 7,1 mm. Das zweite Rohr ist aus dem Werkstoff 1.0484 (St 43.7) gefertigt und besitzt einen Außendurchmesser von 323,9 mm, mit einer Wandstärke von 6,3 mm. Beide Rohre sind längsnahtgeschweißt und wurden je nach Versuch unterschiedlich positioniert. Die Rohre wurden am Obergesenk mit vier Gewindestangen befestigt. Der Eindringkörper und die Kraftmessdose wurden am Untergesenk montiert. Erdgasleitungen sind in Österreich nahezu immer unterirdisch verlegt. Da das Erdreich bzw.

das Verfüllungsmaterial eine Stützwirkung auf das Rohr ausübt, wurde bei den Versuchen das Rohr seitlich mit Unterleghölzern gestützt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 68 zu sehen. Zwischen den Hölzern und dem Rohr war ein Luftspalt von 5 mm, damit das Rohr nach dem Beulvorgang wieder aus der Presse entfernt werden kann. Die genauen Spezifikationen der einzelnen Versuche finden sich in Tabelle 10.

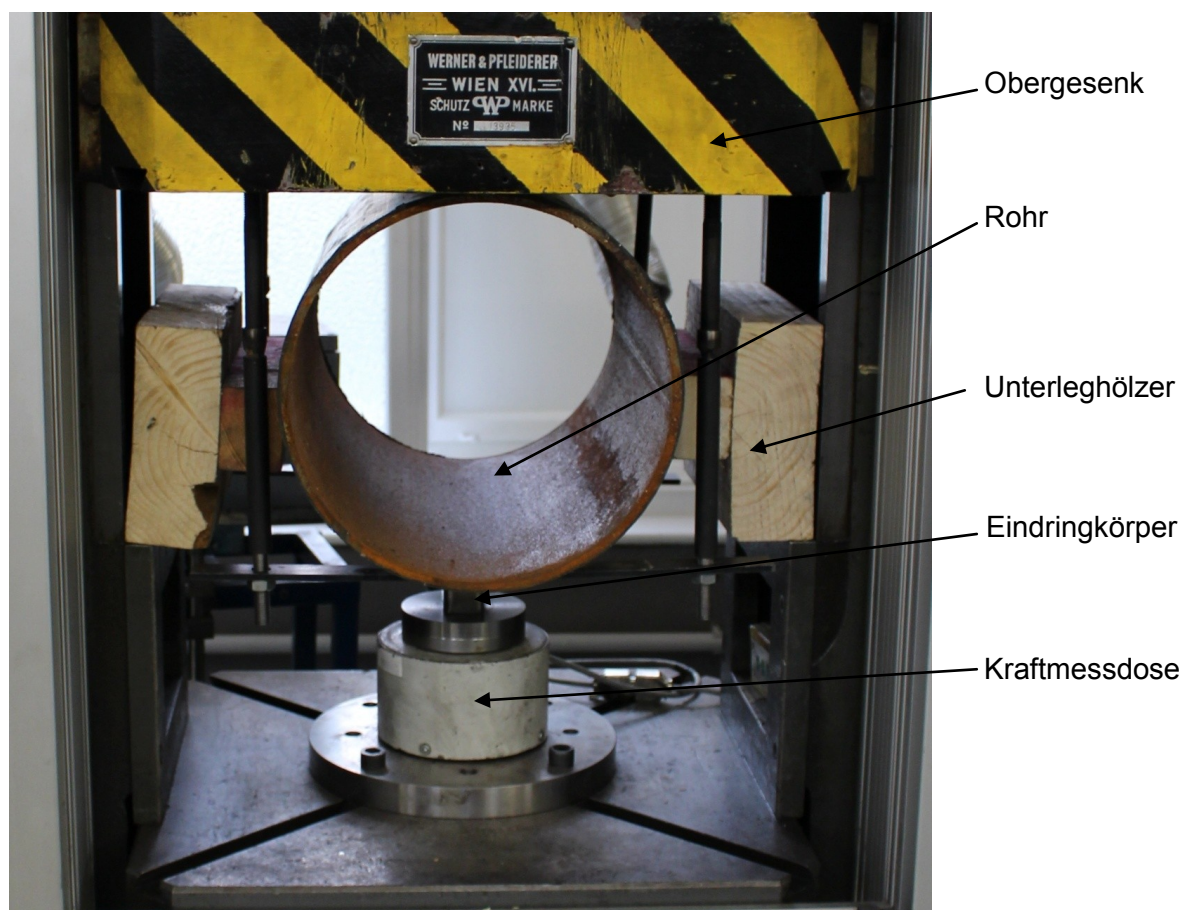


Abbildung 68: Eingebautes 323,9x7,1 mm Rohr, dass seitlich mit Hölzern gestützt ist.

Tabelle 10: Übersicht über die Versuchsparameter.

| Versuch | Werkstoff | Eindringtiefe | Lage der Schweißnaht | Unterleghölzern |
|---------|-----------|---------------|-----------------------|-----------------|
| G1 | L 360 NB | 5-10-20% | 90° | Nein |
| G2 | L 360 NB | 5-10-20% | 90° | Ja |
| G3 | St 43.7 | 20% | 0° | Ja |
| G4 | L 360 NB | 20% | 0° | Ja |
| G5 | St 43.7 | 20% | 90° | Ja |
| G6 | L 360 NB | 20% | 180° | Ja |
| G7 | L 360 NB | 20% | 0° Eindringkörper 90° | Ja |

3.5.2 Ergebnisse der Versuche mit den Rohren - 323,9x7,1 mm

Auswirkung der seitlichen Stützung

Der Versuch G1 ist der Vorversuch und wurde in dieser Arbeit bereits beschrieben. Der Versuch G2 unterscheidet sich vom Versuch G1 darin, dass bei diesem Versuch Unterleghölzer verwendet wurden. Somit wird sichtbar, welchen Einfluss eine seitliche Stützung auf die Einbeulskraft hat. Abbildung 69 bis Abbildung 71 zeigen die Kraft-Weg-Verläufe der Versuche mit den einzelnen Eindringtiefen.

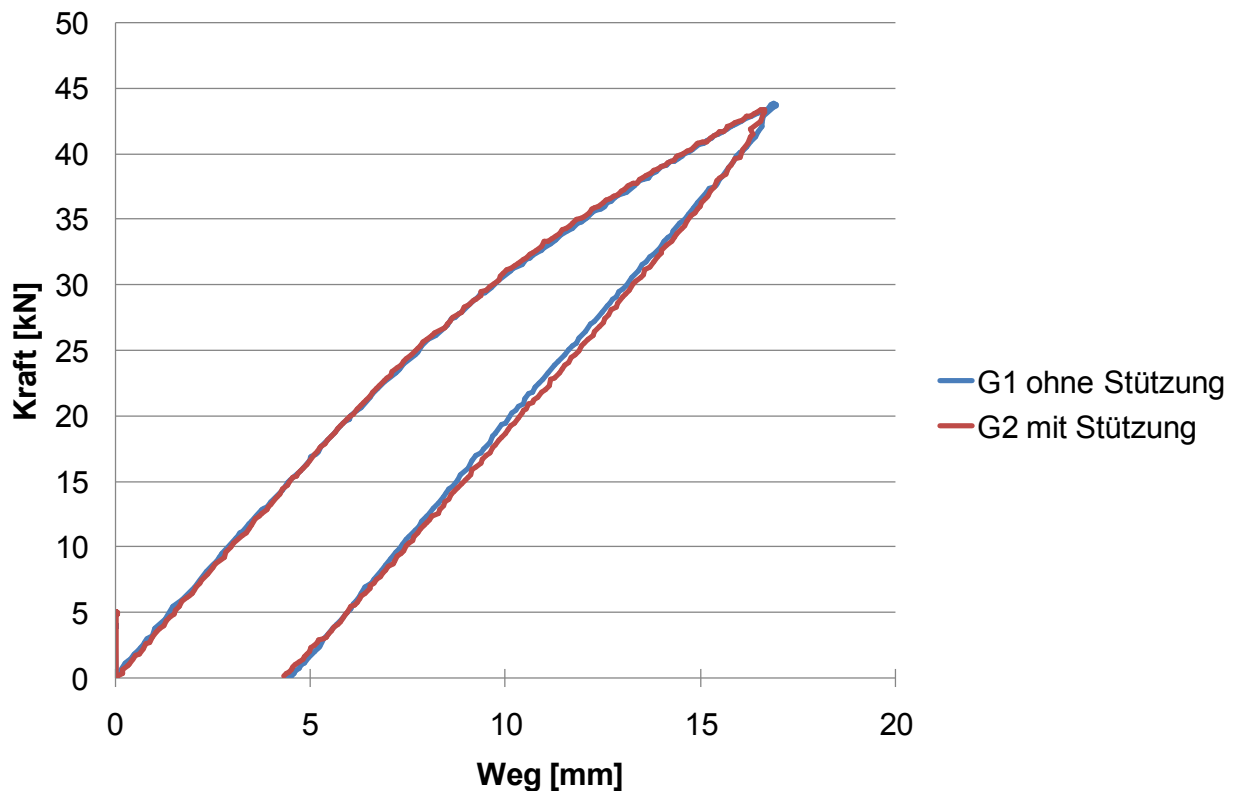


Abbildung 69: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 4,8% der Versuche G1 und G2.

In Abbildung 69 und Abbildung 70 ist zu sehen, dass die Kurven beider Versuche bis zu einer Eindringtiefe von 28 mm ident sind. Ab einer Eindringtiefe von 28 mm steigt die benötigte Einbeulskraft bei dem gestützten Rohr stark an.

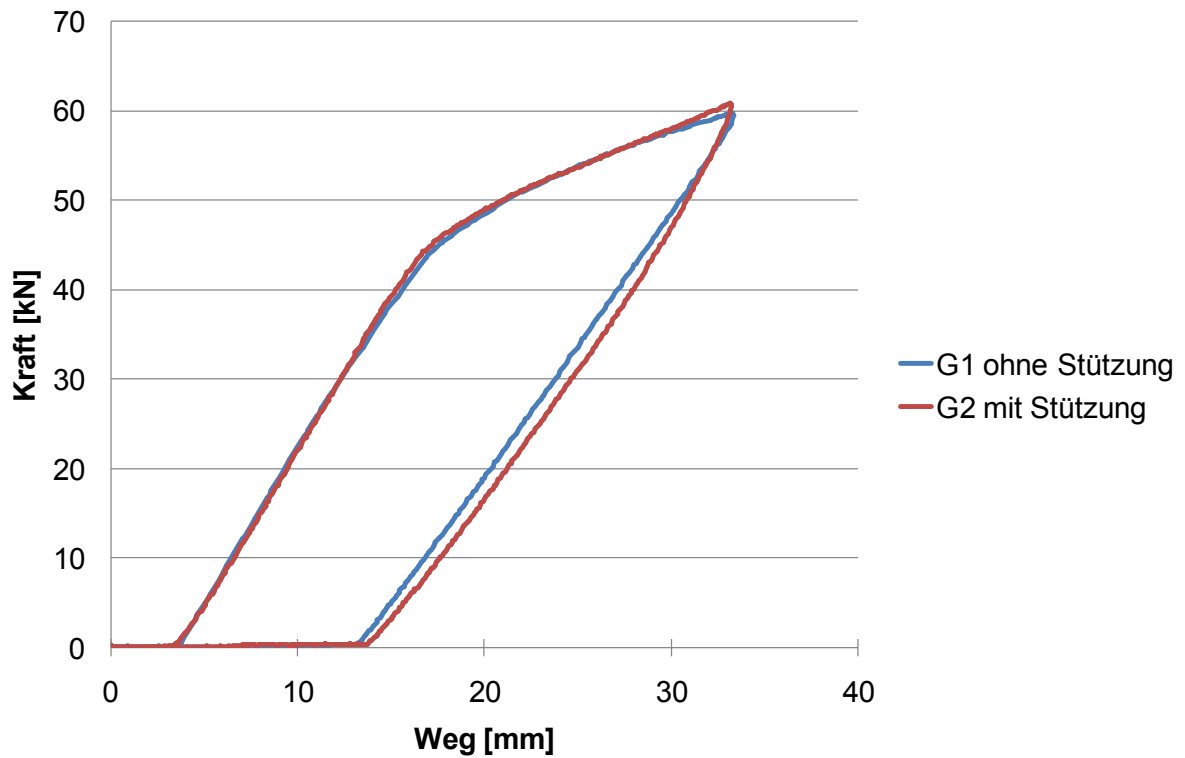


Abbildung 70: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 10% der Versuche G1 und G2.

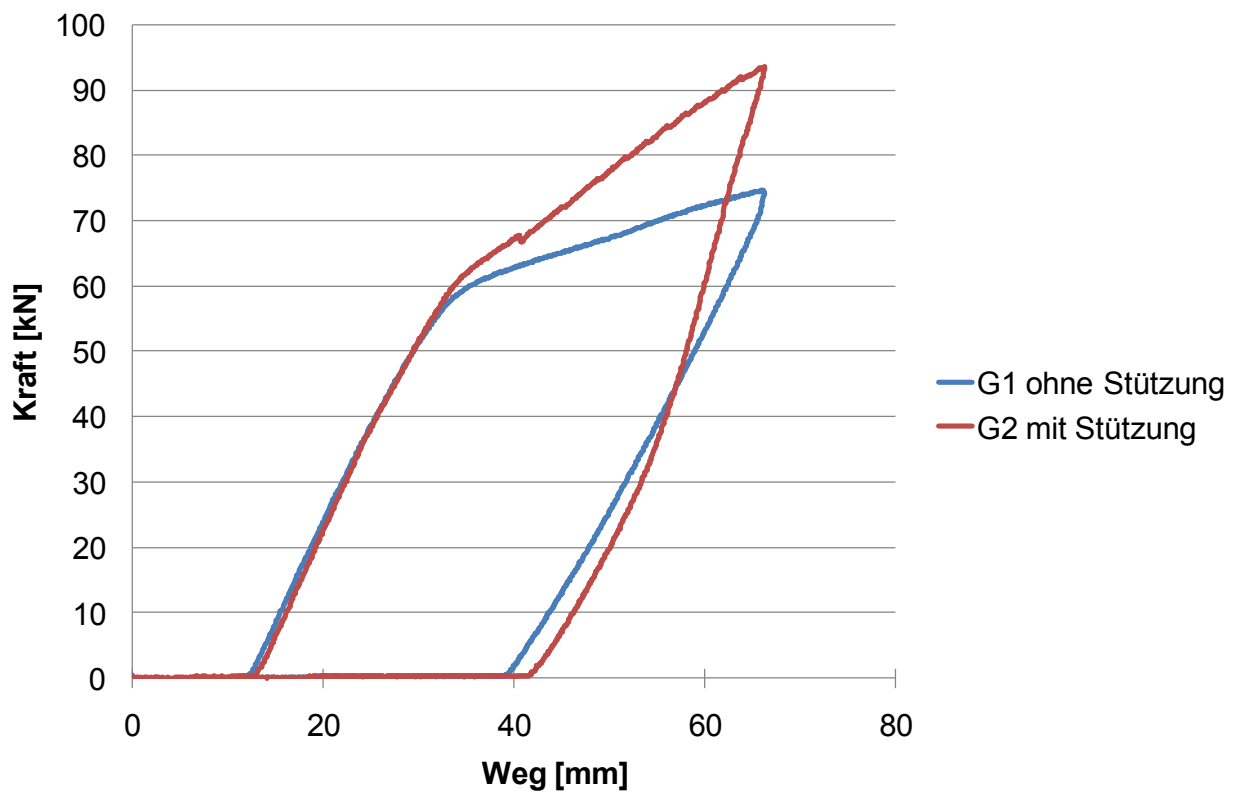


Abbildung 71: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 20% der Versuche G1 und G2.

Abschließend kann gesagt werden, dass bei kleinen Eindringtiefen von bis zu 28 mm die gleiche Kraft aufgewendet werden muss, um ein Rohr einzubeulen. Ab einer Eindringtiefe

von 28 mm wird aufgrund der Stützwirkung eine höhere Kraft beim gestützten Rohr benötigt. Daraus folgt, dass erdverlegte Rohre schwerer einzubeulen sind.

Werkstoffvergleich zwischen 1.0582 und 1.0484

Die Versuche G3 und G4 besitzen die selben Versuchsparameter. Beide Rohre wurden seitlich gestützt und wurden direkt bei der Schweißnaht eingebeult. Der Werkstoff 1.0582 (G4) besitzt eine höhere Festigkeit als der Werkstoff 1.0484 (G3).

Die Abbildung 72 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe der beiden Versuche. Beim Versuch G4 musste eine höhere Kraft aufgewendet werden, als bei dem Versuch G3, um die gleiche Einbeultiefe zu erreichen. Das heißt, die Festigkeit des verwendeten Werkstoffes beeinflusst signifikant die Einbeultiefe bei einer bestimmten Kräfteinleitung auf das Rohr.

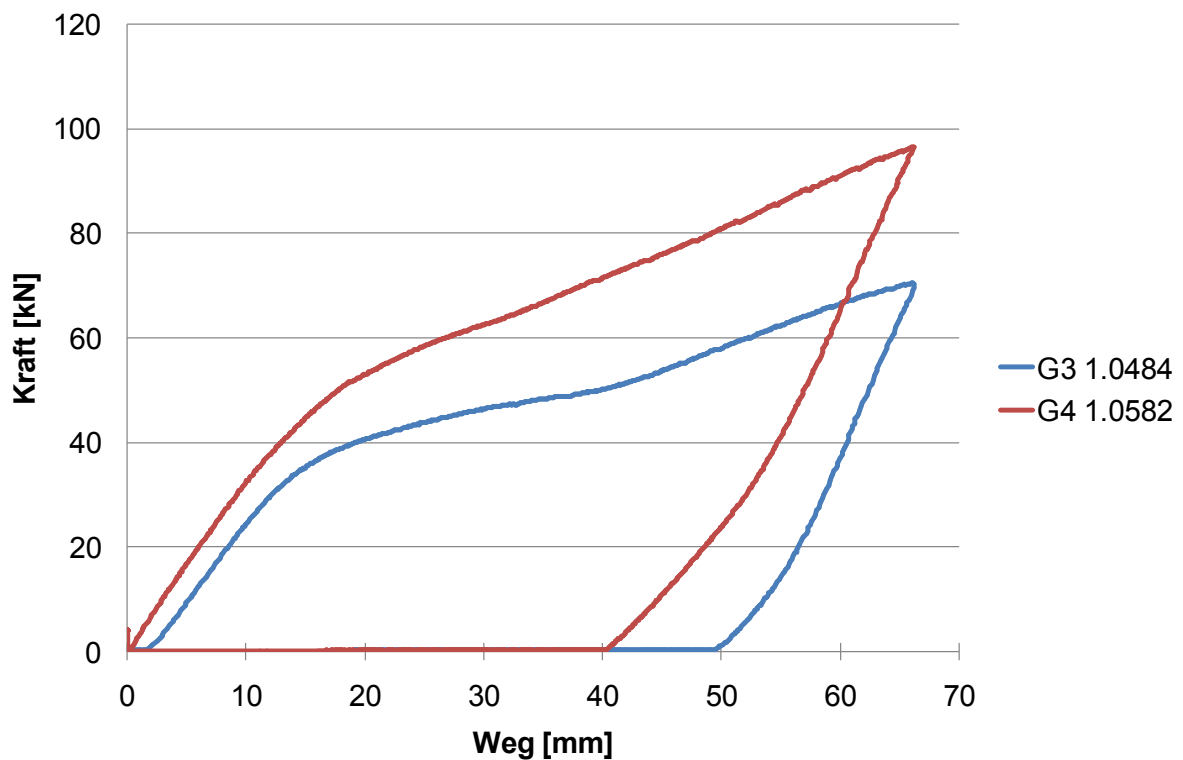


Abbildung 72: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G3 und G4.

Lage der Schweißnaht bei Rohren mit dem Werkstoff 1.0484

Um festzustellen wie sich die Lage der Schweißnaht auf die Einbeulskraft auswirkt, wurden die Versuche G3 und G5 durchgeführt. Beim Versuch G3 wurde direkt auf die Schweißnaht gedrückt. Beim Versuch G5 wurde das Rohr um 90° gedreht, sodass die Schweißnaht in der drei Uhr Stellung lag. Die Abbildung 73 zeigt den Kraft-Weg Verlauf der beiden Versuche.

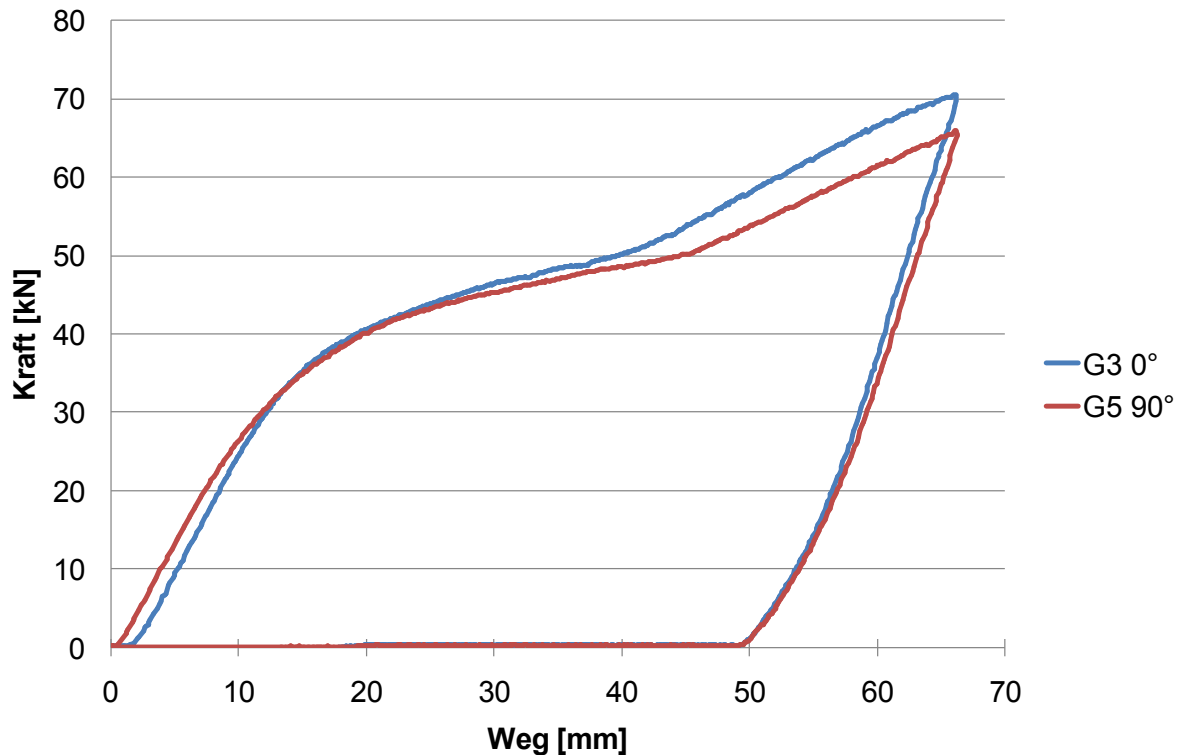


Abbildung 73: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G3 und G5.

Es zeigt sich, dass ab einer Einbeultiefe von ungefähr 35 mm die benötigte Kraft zum Einbeulen der Schweißnaht größer wird, als ins Grundmaterial. Ab einer Einbeultiefe von 35 mm wird eine um 5 kN größere Kraft benötigt. Somit hat die Lage der Schweißnaht bei Rohren mit dem Werkstoff 1.0484 sehr wohl einen Einfluss auf die Einbeulkraft.

Lage des Eindringkörpers und der Schweißnaht

Die Versuche G4, G6 und G7 wurden mit baugleichen Rohren durchgeführt. Die genauen Testparameter dieser Versuche sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Die Versuchsparameter der Versuche G4, G6 und G7.

| Versuch | Werkstoff | Eindringtiefe | Lage der Schweißnaht | Unterleghölzer |
|---------|-----------|---------------|-----------------------|----------------|
| G4 | L 360 NB | 20% | 0° | Ja |
| G6 | L 360 NB | 20% | 180° | Ja |
| G7 | L 360 NB | 20% | 0° Eindringkörper 90° | Ja |

Diese Versuche sollen zeigen, wie sich einerseits die Lage des Eindringkörpers auf die Einbeulkraft auswirkt, andererseits soll gezeigt werden inwieweit sich die Einbeulkraft ändert, wenn sich die Schweißnaht auf der gegenüberliegenden Seite der Einbeulstelle befindet.

Wie die Abbildung 74 zeigt, sind die Kurven der einzelnen Versuche nahezu ident. Somit hat der Drehwinkel des Eindringkörpers keinen Einfluss auf die Einbeulkraft bei Rohren aus dem Werkstoff L360 NB. Weiters zeigt sich, dass die Lage der Schweißnaht, ob 0° oder 180°, keinen Unterschied für diese Rohre darstellt.

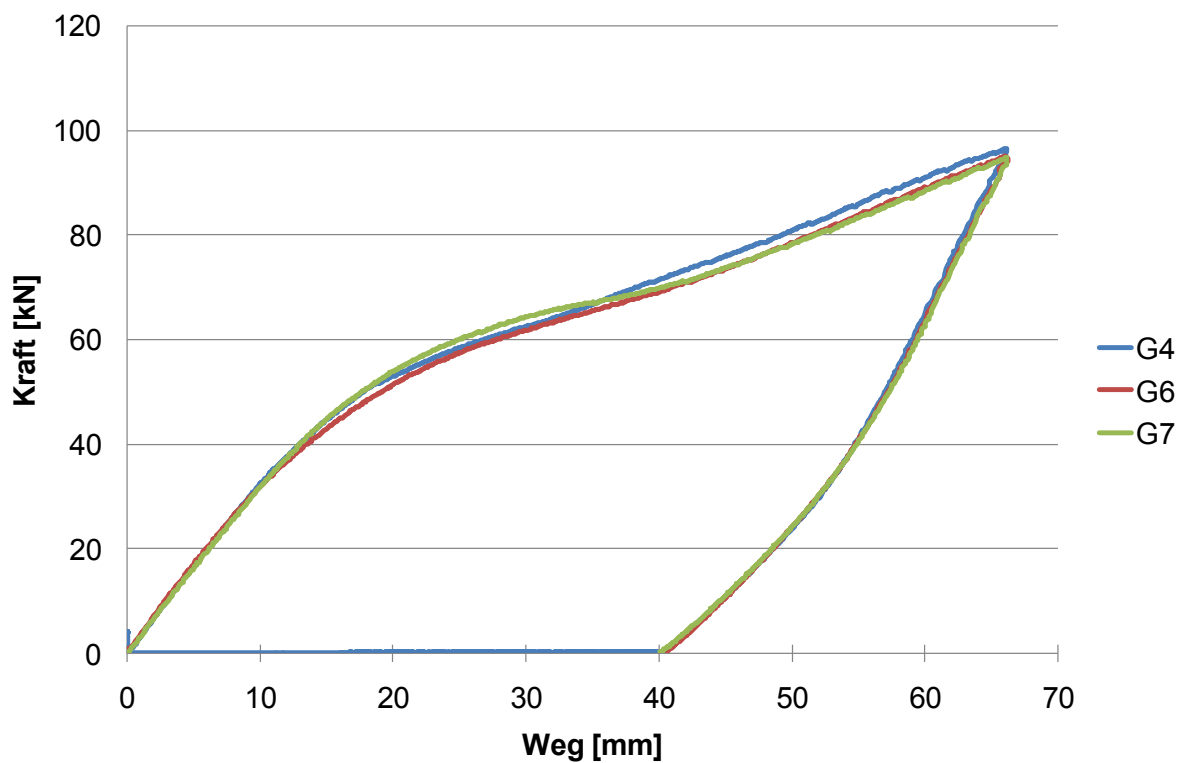


Abbildung 74: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G4, G6 und G7.

4. FEM-Simulation

Die Simulation wurde mit dem Programm Simufact 11.0 und Simufact forming GP durchgeführt. Die 3D CAD Modelle wurden mit einer Studentenversion von Inventor 11 erstellt. Mit Hilfe der Simulation sollen die Vergleichsspannungen sichtbar gemacht werden, die bei einem Versuch mit Dehnmessstreifen (DMS) nur schwer oder gar nicht messbar gewesen wären.

4.1 Aufbau der Simulation

Die Simulation soll die realen Versuche nachstellen und anschließend mit diesen verglichen werden. Der Simulationsaufbau besteht aus einem Eindringkörper, der eine digitale Kopie des Baggerzahnes der Versuche darstellt, einer Aufnahmeschale und dem zu verformenden Rohr. Die Aufnahmeschale ist so geformt, dass das Rohr 180° Grad umschlossen ist und ihre Struktur ist starr angenommen um das seitliche verformen des Rohres zu verhindern.

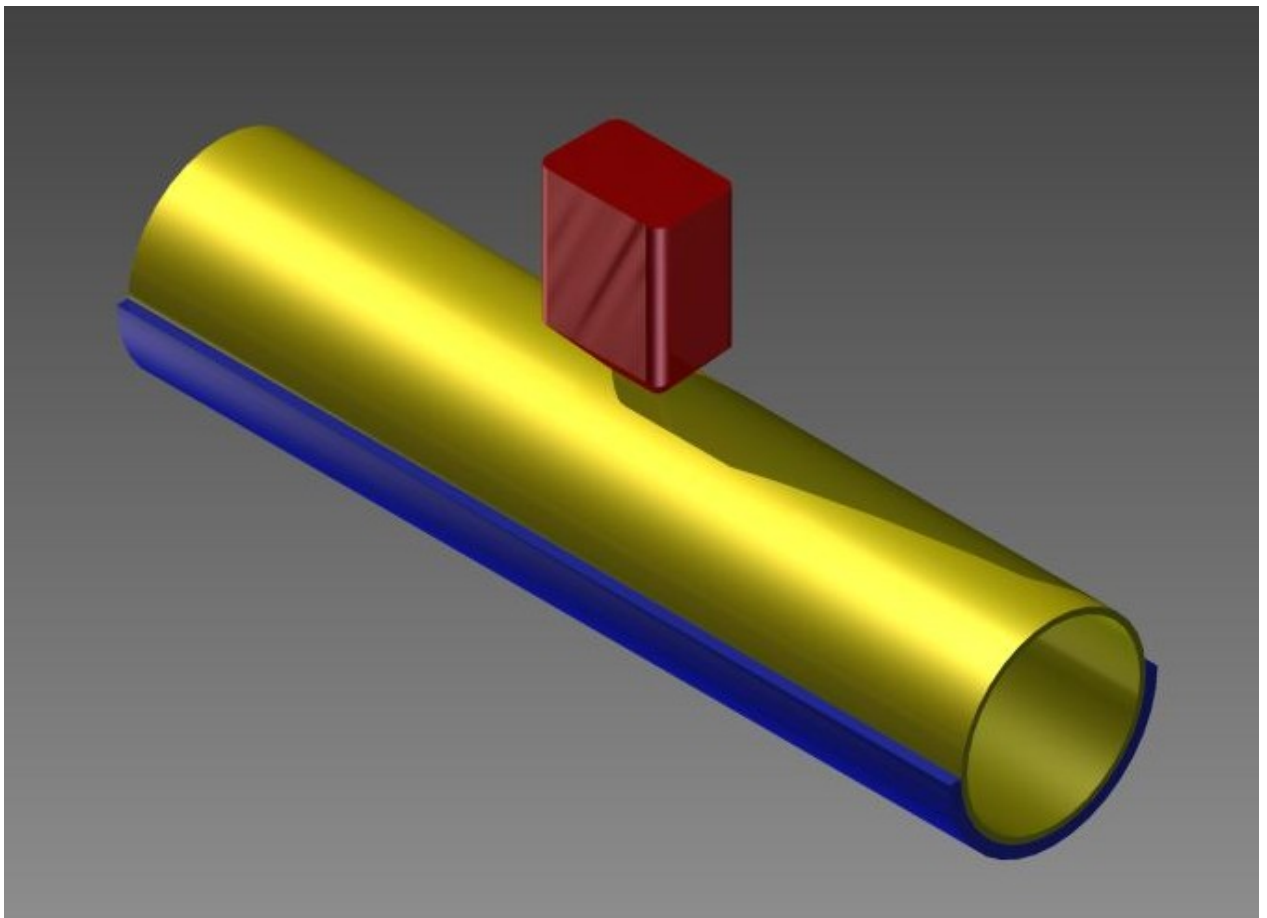


Abbildung 75: Versuchsaufbau der FEM-Simulation.

Im ersten Schritt wurden Simulationen mit unterschiedlicher Vernetzung durchgeführt. Dabei bewährte sich eine gürtelförmige, feinere Vernetzung (Sheetmesh) rund um die Rohrachse am besten. An der Stelle wo der Eindringkörper das Rohr berührt, wurde die besagte gürtelförmige feinere Vernetzung eingesetzt (Abbildung 76). Mit dieser Vernetzung wurde dann die Simulation des Einbeulens durchgeführt.

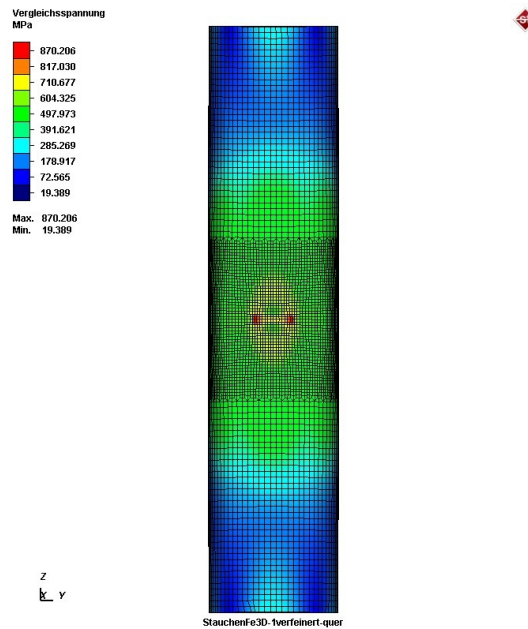


Abbildung 76: Beispiel für die Vernetzung des Rohres.

4.2 Vergleich Simulation-Realität

Diese Simulation sollte zeigen, inwieweit die Simulation die Realität widerspiegelt. Zu diesem Zweck wurde eine Simulation aufgestellt, die dieselben Parameter wie der Einbeulversuch V3 besitzt. Bei der Simulation wurde, wie in Abbildung 77 zu sehen ist, weiter eingedrungen als in der Realität.

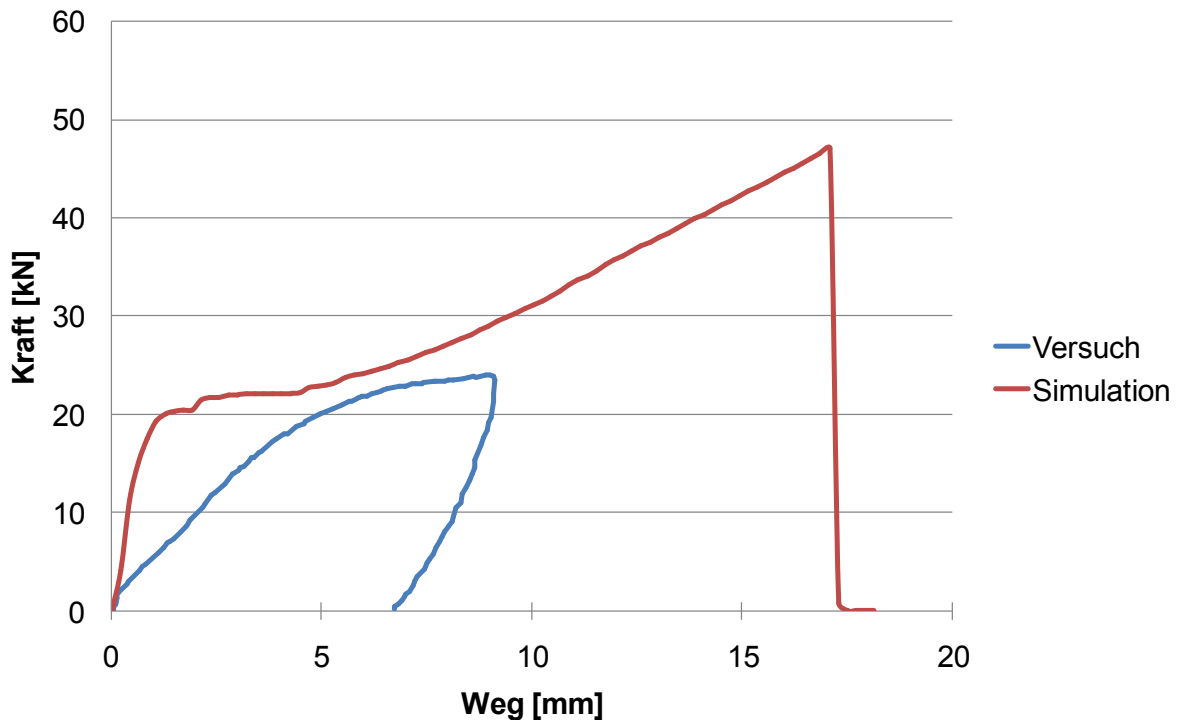


Abbildung 77: Vergleich des Kraft-Weg-Verläufe zwischen Versuch und Simulation.

Beim Versuch wurde das Rohr auf Sand gebettet, der beim Einbeulen nachgibt und dem Rohr die Möglichkeit des seitlichen ausweichens ermöglicht. In der Simulation hingegen ist das Rohr komplett starr eingebettet und es kann keine Setzung erfolgen. Die Versuche G1 und G2 zeigten, dass die Einbettung bzw. seitliche Stützung des Rohres einen deutlichen Einfluss auf die notwendige Einbeulskraft für eine bestimmte Einbeultiefe hat. Weiters besitzt das Rohr im Versuch eine Schweißnaht, welche bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Somit kann gesagt werden, dass die Simulation Rohre darstellt, welche sich in einem sehr stark verdichteten Boden befinden. Dieser konservative Rechenansatz kann durchaus für die Charakterisierung des Beulvorganges verwendet werden.

4.3 Simulation des Drehwinkels des Eindringkörpers

Mit dieser Simulation soll gezeigt werden, welche Vergleichsspannungen in einem Rohr herrschen, wenn es eingebeult wird. Zusätzlich wurde der Eindringkörper in der X-Achse in die 0°, 45° und 90° Position gedreht. Dies soll zeigen, ob die Spannungen bei unterschiedlichem Eindringwinkel, Unterschiede bei der Vergleichsspannung verursachen.

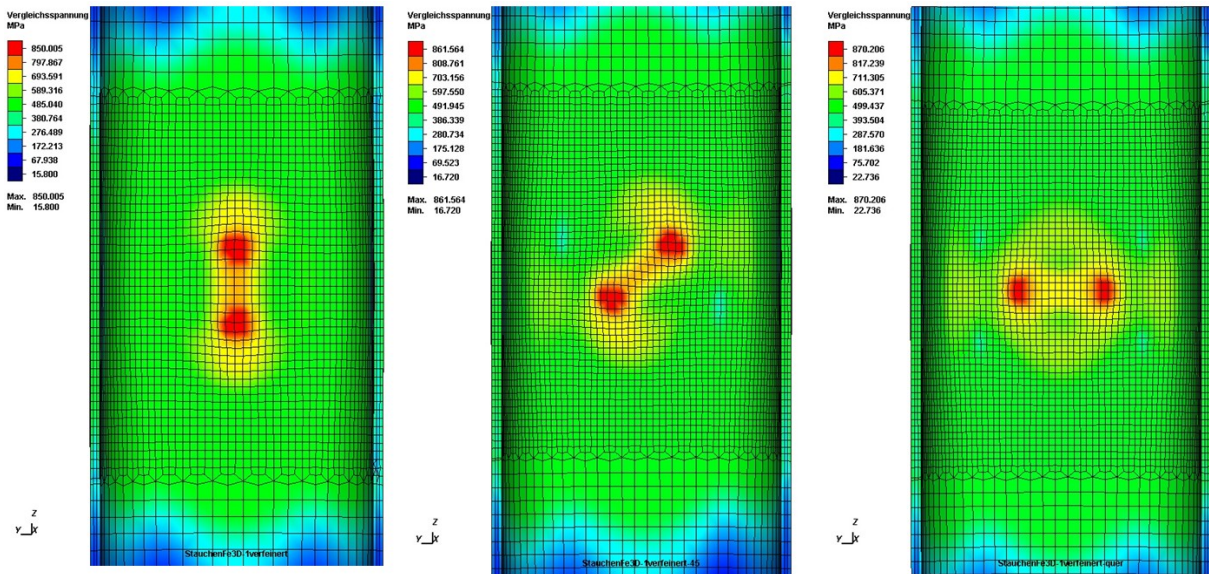


Abbildung 78: Innenansicht der FEM-Simulation mit der Eindringkörperstellung 0° , 45° und 90° .

Die Abbildung 78 zeigt die Vergleichsspannungen beim Eindringen des Eindringkörpers bei der selben Einbeultiefe. Aus der Farbskala ist ersichtlich, dass bei der Vergleichsspannung kaum ein Unterschied herrscht, ob ein Eindringkörper in der 0° , 45° und 90° Position eindringt. Weiters ist zu sehen, dass die maximale Spannung im Beulental zu finden ist. Die seitlichen Kanten des Eindringkörpers erzeugen beim Eindringen die höchsten Spannungen. Die Abbildung 79 zeigt einen Schnitt durch das eingebeulte Rohr. Es ist zu sehen, dass die maximale Spannung ist am Rand des Beulentals zu finden ist. An dieser Stelle treffen die seitlichen Kanten des Eindringkörpers auf das Rohr. Die Spannungen nehmen in Richtung Mitte hin ab. Die Höhe der Spannungen sind in der Simulation nur als Richtwerte anzusehen. Diese sind auf die Diskretisierung der Simulation zurückzuführen und diese hohen Spannungen sind in einzelnen Knoten möglich. Für genauere Ergebnisse müsste das Netz verfeinert werden, was höhere Rechenzeiten zur Folge hätte.

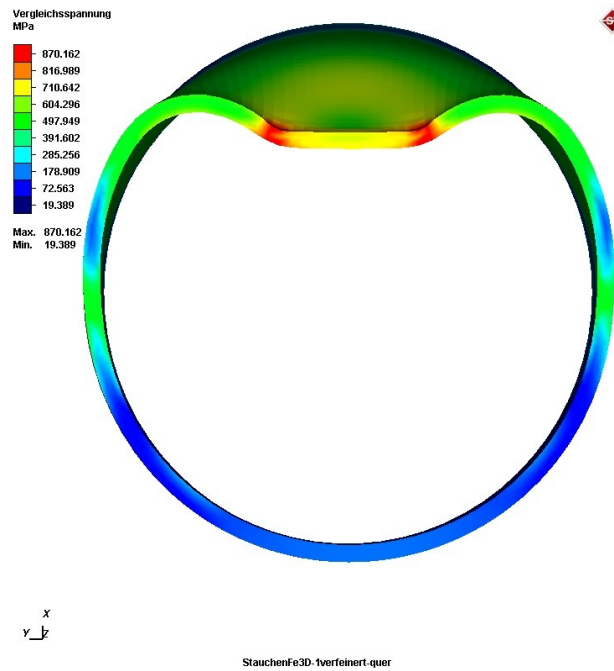


Abbildung 79: Schnitt durch die 90° Simulation.

Die Tabelle 12 zeigt den maximalen Umformgrad und die maximale Spannung bei einem Eindringweg von 9 und 17 mm, bei unterschiedlichen Eindringkörperposition.

Tabelle 12: Ergebnisse der Simulation.

| Lage des Eindringkörpers | Max. Umformgrad bei 9 mm | Max. Umformgrad bei 17 mm | Max. Vergleichsspannung bei 9 mm [N/mm ²] | Max. Vergleichsspannung bei 17 mm [N/mm ²] |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---|--|
| 0° | 0,263 | 0,355 | 817 | 850 |
| 45° | 0,271 | 0,393 | 818 | 861 |
| 90° | 0,265 | 0,423 | 821 | 870 |

Die Abbildung 80 zeigt, die Ergebnisse der drei Simulationen. Der Drehwinkel des Eindringkörpers hat dabei kaum einen Einfluss auf die nötige Kraft und die Spannungen im Rohr während des Eindringens.

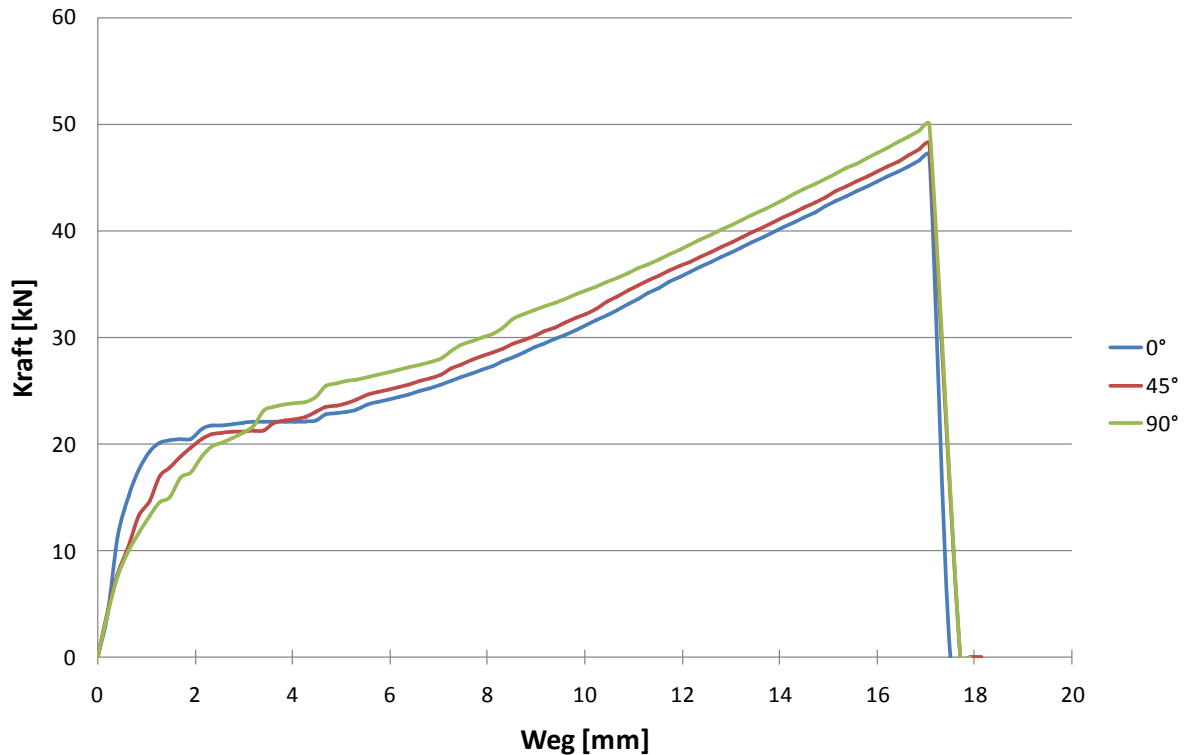


Abbildung 80: Kraft-Weg-Verläufe bei 0°, 45° und 90°.

4.4 Isotropes und kinematisches Verfestigungsverhalten beim Ausbeulen

Diese Simulation entspricht dem Druckversuch B1. Dafür wurde das Rohr mit einem Durchmesser von 88,9 mm und dem Werkstoff P 235 GH zuerst im Simulationsprogramm Simufact GP eingebeult. Anschließend wurde der Innendruck linear in der Simulation aufgebaut und es wurde beobachtet, inwieweit sich das Rohr ausbeult. Das Rohr wurde bei der Simulation mit einem Druck von 100 bar beaufschlagt, welcher dem maximalen zulässigen Innendruck bei einem Sicherheitsfaktor von 1,6, bezogen auf die Streckgrenze, entspricht. Bei diesem Druck wirkt in dem Rohr eine Tangentialspannung von 146,8 N/mm² aufgebaut. Bei der Simulation wird zwischen isotropen und kinematischen Verfestigung unterschieden.

4.4.1 Ergebnisse mit isotroper Verfestigung

Die Simulation der isotropen Verfestigung zeigt, wie in Abbildung 81 und Abbildung 82 zu sehen ist, dass im Beulengrund und in den Beulenflanken die parallel zur Z-Achse verlaufenden, die stärksten Spannungen von 350-386 N/mm² herrschen. Die nicht eingebeulten Bereiche weisen eine Spannung von 137-172 N/mm² auf. Dies entspricht dem über die Kesselformel errechneten Wert von 146,8 N/mm².

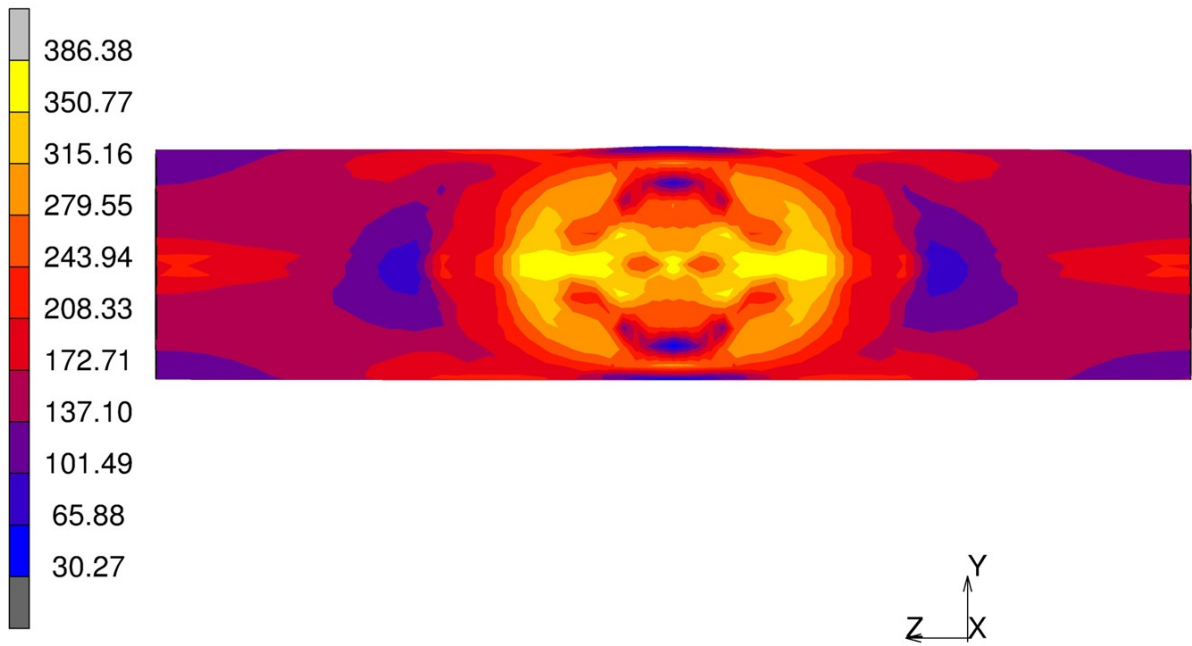


Abbildung 81: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar.

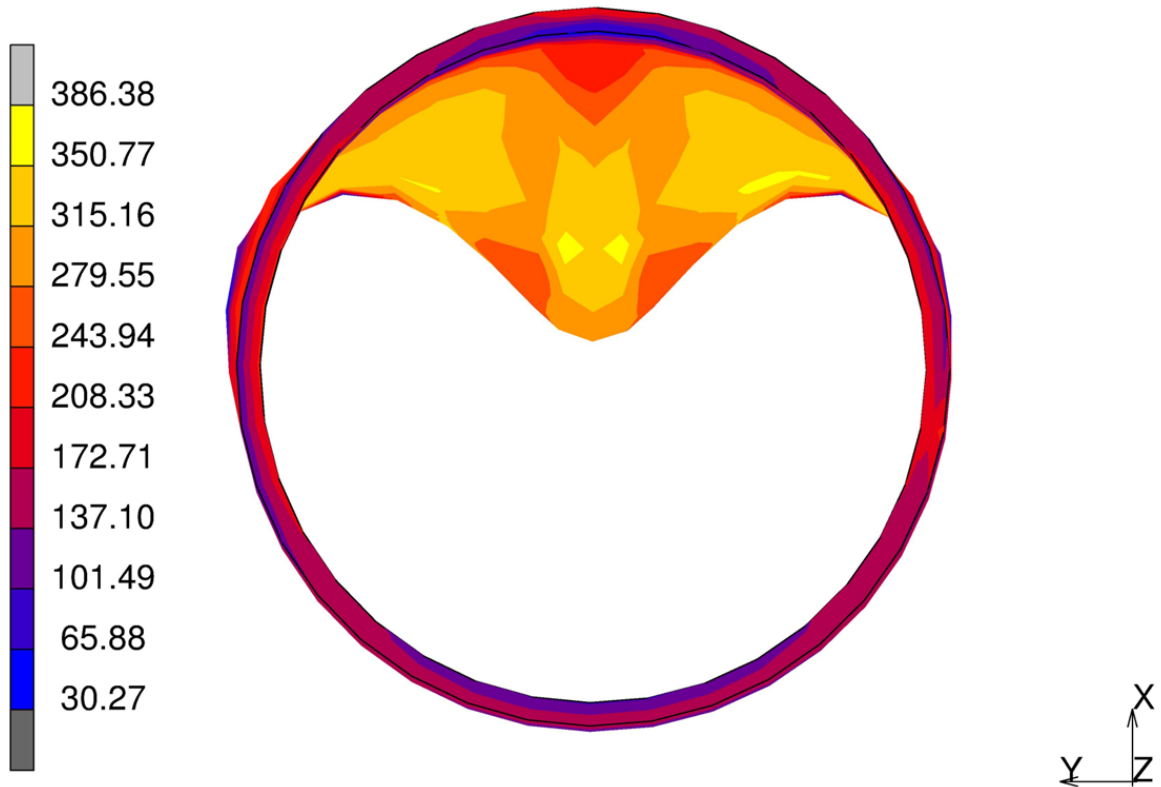


Abbildung 82: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar.

$$\alpha_F = \frac{386,38 \text{ N/mm}^2}{146,8 \text{ N/mm}^2} = 2,6$$

Für den Spannungsüberhöhungsfaktor der Beule ergibt sich ein Wert von 2,6. Der errechnete Spannungsüberhöhungsfaktor beim Druckversuch B1 betrug 2,45. Dieser Unterschied kann damit erklärt werden, dass das Rohr in der Realität nicht rein isotrop oder kinematisch verfestigt.

4.4.1 Ergebnisse mit kinematischer Verfestigung

Die Abbildung 83 und Abbildung 84 zeigen die Ergebnisse der Simulation mit kinematischer Verfestigung. Hier liegen die maximalen Spannungen zwischen 216,57 und 236,96 N/mm². Der ungebeulte Bereich des Rohres liegt bei einer Vergleichsspannung von 135-155,4 N/mm², dieser entspricht dem errechneten Wert mit der Kesselformel. Wenn nun der Spannungserhöhungsfaktor wie bei der isotropen Verfestigung berechnet wird, ergibt sich ein Wert von 1,6. Dieser Wert liegt unter dem Wert des Druckversuches B1. Wie bei der isotropen Verfestigung schon erwähnt wurde, liegt in der Realität eine Mischung aus isotroper und kinematischer Verfestigung vor.

$$\alpha_F = \frac{386,38 \text{ N/mm}^2}{146,8 \text{ N/mm}^2} = 1,6$$

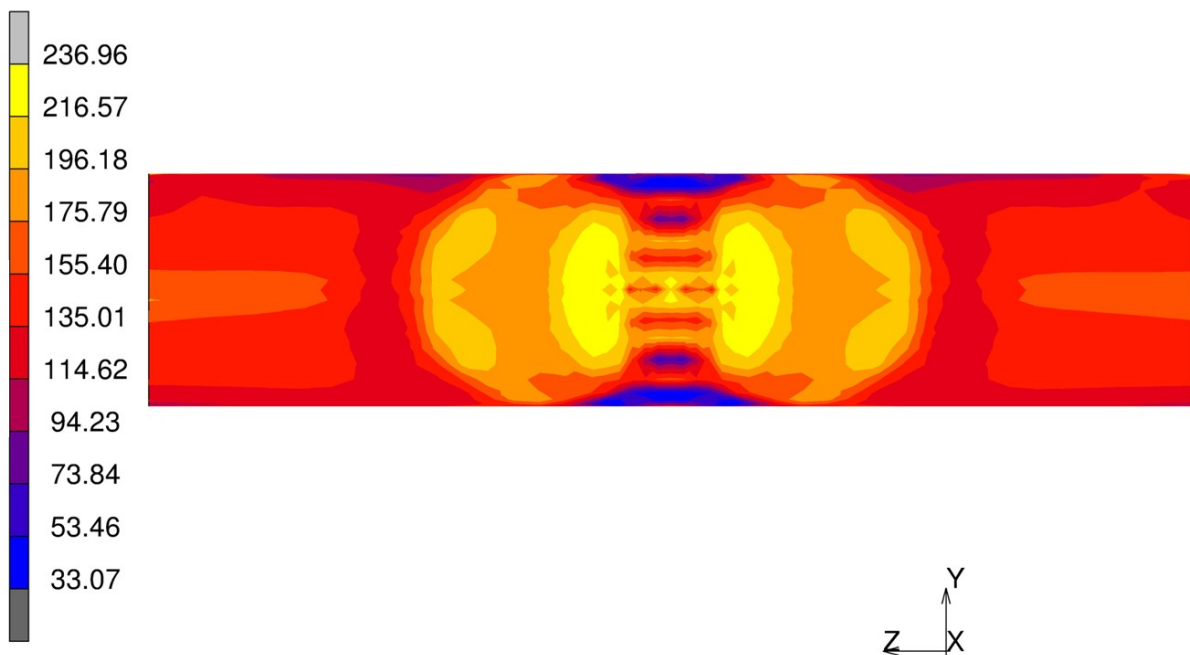


Abbildung 83: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar.

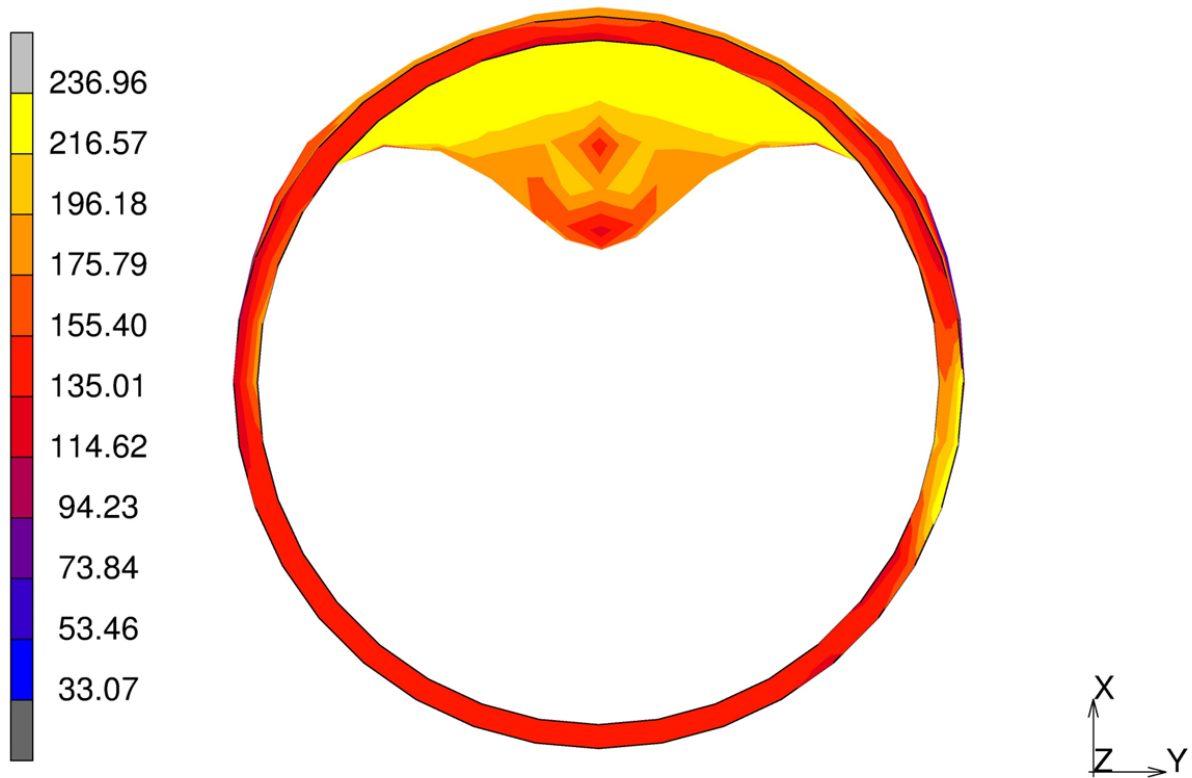


Abbildung 84: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar.

Die Resultate der Ausbeulsimulationen ergeben, dass die Beulenkenzahl und die daraus resultierende Spannungsüberhöhung eine gute Näherung für die im gebeulten Rohr herrschenden Vergleichsspannungen sind. Die Simulationen zeigen auch, dass sich die höchsten Spannungen im Beulental und in den seitlichen Flanken befinden.

4.5 Exzentrisches Einbeulen

Für das Simulieren des exzentrischen Einbeulens, wurde das Modell leicht verändert. Wie die Abbildung 85 zeigt, wurde der Umschlingungswinkel der Aufnahmeschale von 180° auf 270° geändert. Weiters wurde der Eindringkörper um 22,23 mm ($1/4 d_a$) in die Y-Richtung verschoben. Die Einbeultiefe des Eindringkörpers betrug bei dieser Simulation 30 mm.

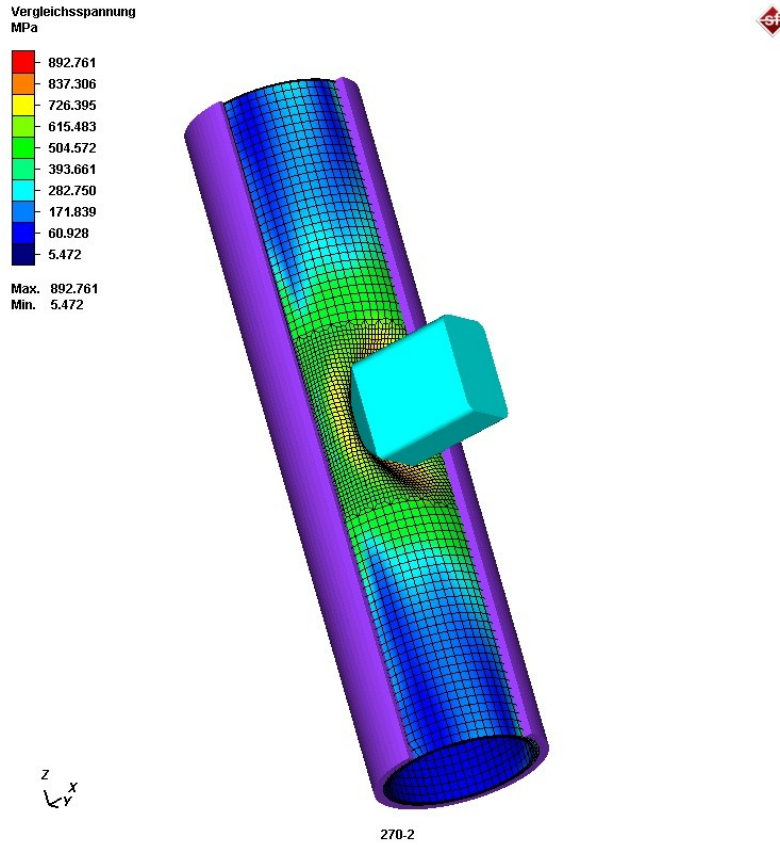


Abbildung 85: Modellaufbau der exzentrischen Simulation.

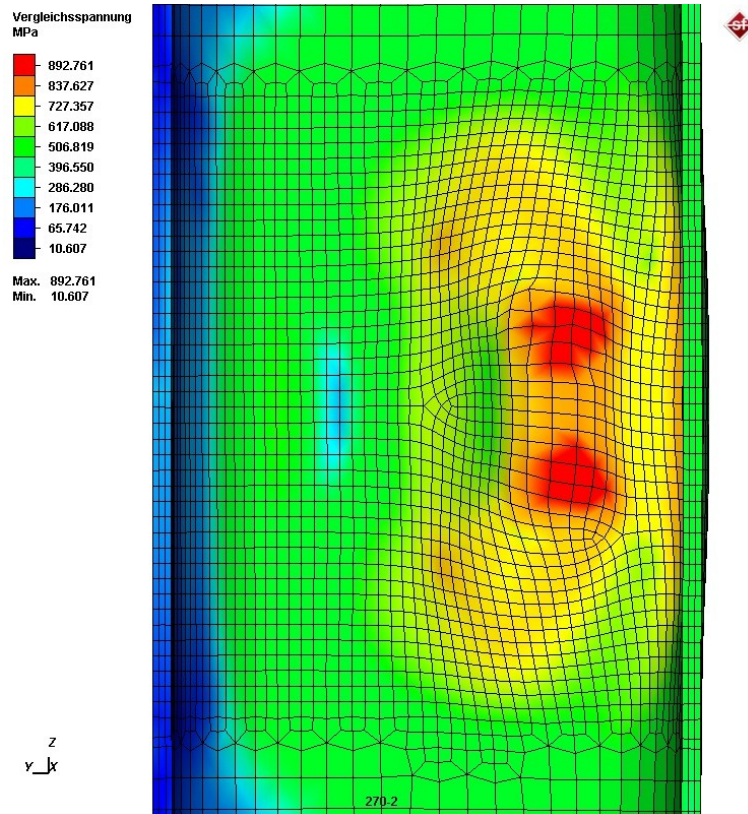


Abbildung 86: Innenansicht des exzentrisch eingebaulten Rohres.

Aus der Abbildung 86 ist ersichtlich, dass die maximale Spannung bei $892,8 \text{ N/mm}^2$ liegt. Dieser Wert liegt im Bereich der Simulation aus Kapitel 4.3. Ein exzentrisches Eindringen des Eindringkörpers, hat gegenüber eines zentrischen Eindringens, kaum einen Einfluss auf die Spannungen im Rohr. Weiters ist in Abbildung 87 ersichtlich, dass beim Eindringen große Seitenkräfte (X-Richtung) herrschen, die in der Realität das Rohr oder den Baggerzahn seitlich wegdrücken würden. Wenn ein Eindringkörper nicht direkt mittig am Rohr ansetzt, wird er durch die herrschenden Seitenkräfte abgelenkt werden.

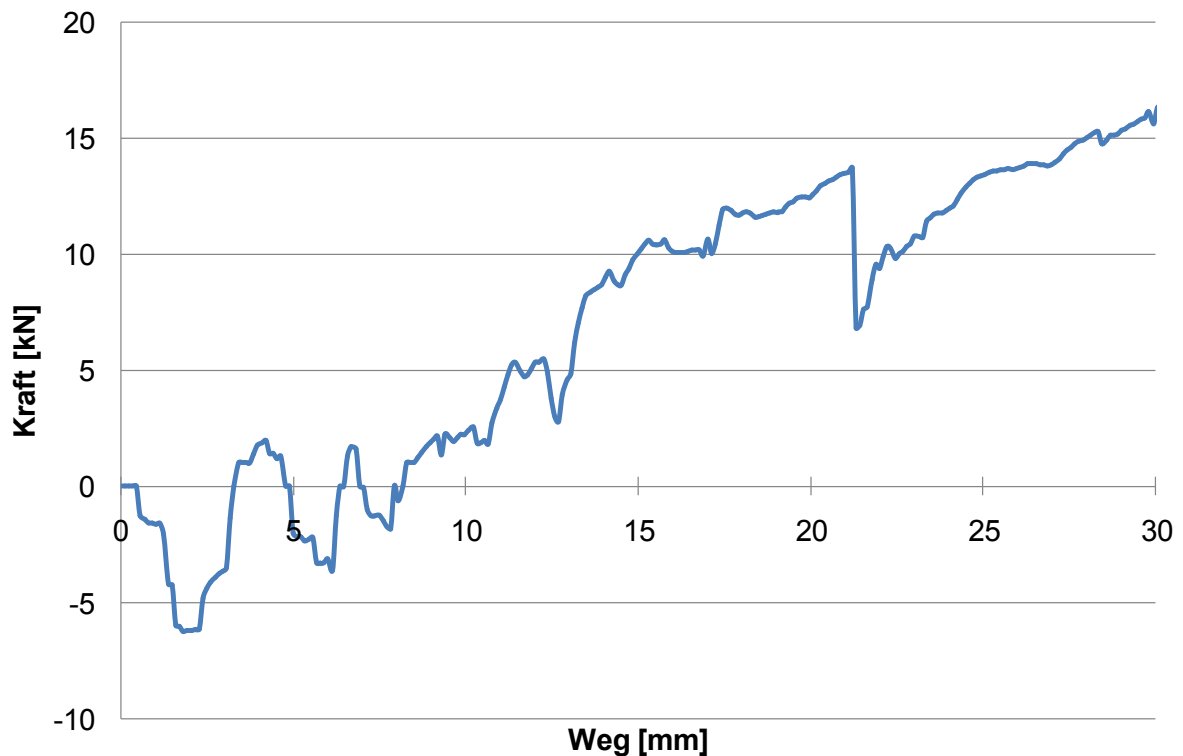


Abbildung 87: Y- Kraft-Weg-Verlauf der exzentrischen Simulation.

4.6 Simulation der 329,9x7,1 mm Rohre

Wie die Abbildung 88 zeigt, sind auch bei Rohren mit einem Durchmesser von 323,9 mm die größten Spannungen im Beulental zu finden. Aus den Simulationen geht hervor, dass die Spannungen bei größeren Rohren niedriger sind wie in den kleineren. Die Abbildung 89 stellt dar, wie sich die Spannungen verändern, wenn das Rohr nach dem Einbeulen entspannt wird.

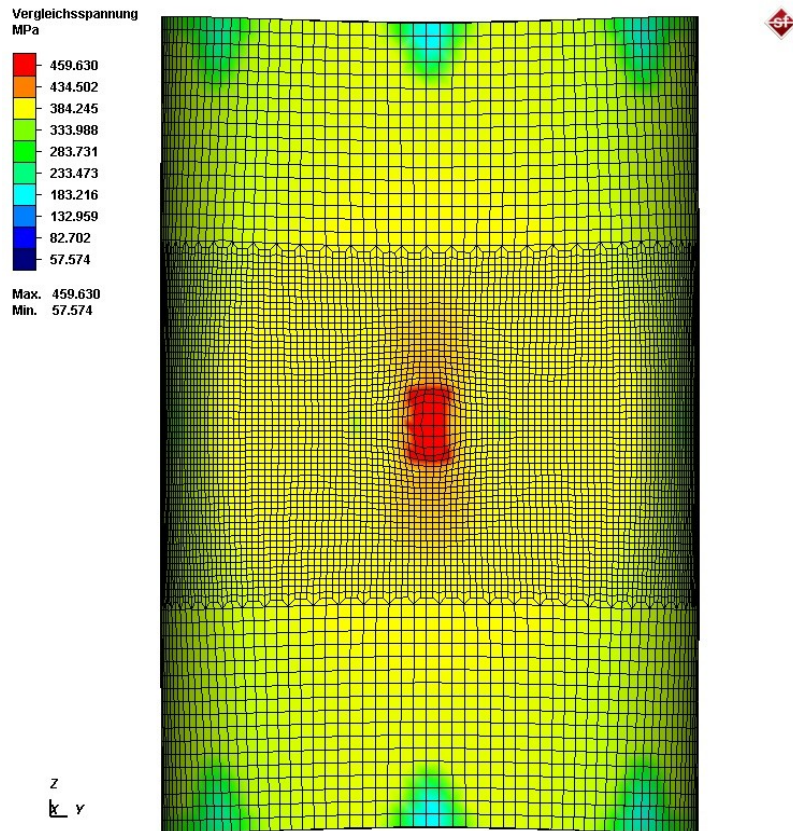


Abbildung 88: Spannungen im eingebeulten 323,9 mm Rohr.

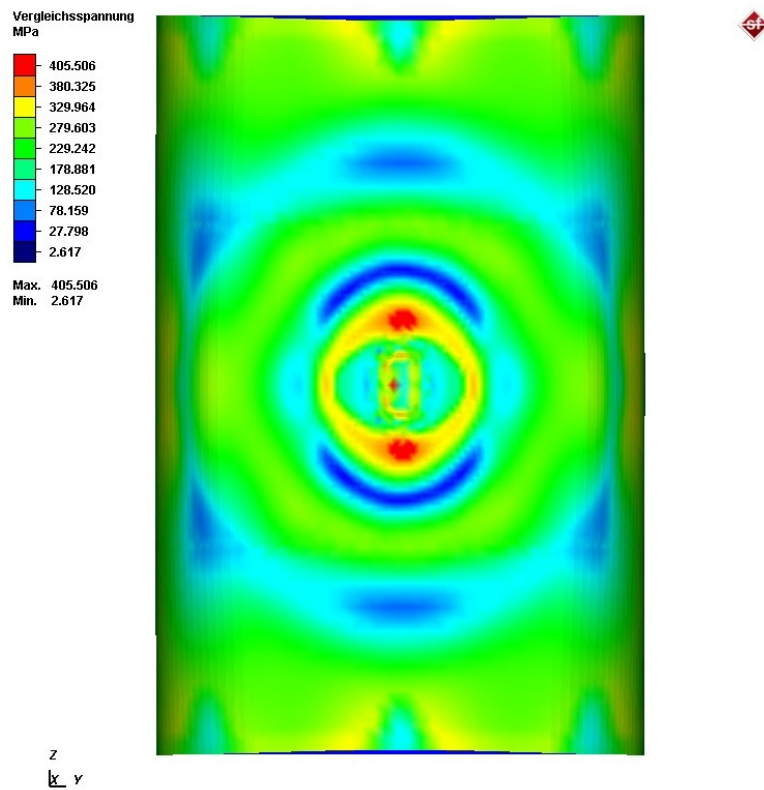


Abbildung 89: Eigenspannungen im eingebeulten 323,9 mm Rohr.

Es ist deutlich zu sehen, dass nach dem Entspannen in der Beulenflanke die größten Eigen-
spannungen herrschen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Simulationen
mit Innendruck, wo die maximalen Spannungen ebenfalls in diesem Bereich gefunden wur-
den.

4.7 Größenvergleich

Der Größenvergleich zeigt welchen Einfluss der Durchmesser des Rohres auf die nötige
Einbeulkraft hat. Hierzu wurde der in Kapitel 4.1 beschriebene Aufbau verwendet. Die Länge
des Rohres, deren Wandstärke und der Eindringkörper blieben dabei immer gleich. Allein der
Außendurchmesser wurde geändert. In Tabelle 13 finden sich die Spezifikationen des Ver-
suches und die Abbildung 90 zeigt die Simulationsmodelle des Größenvergleiches.

Tabelle 13: Parameter der FEM-Simulation des Größenvergleiches

| Simulation | Außendurchmesser |
|------------|------------------|
| D50 | 50 mm |
| D75 | 75 mm |
| D100 | 100 mm |
| D250 | 250 mm |
| D500 | 500 mm |

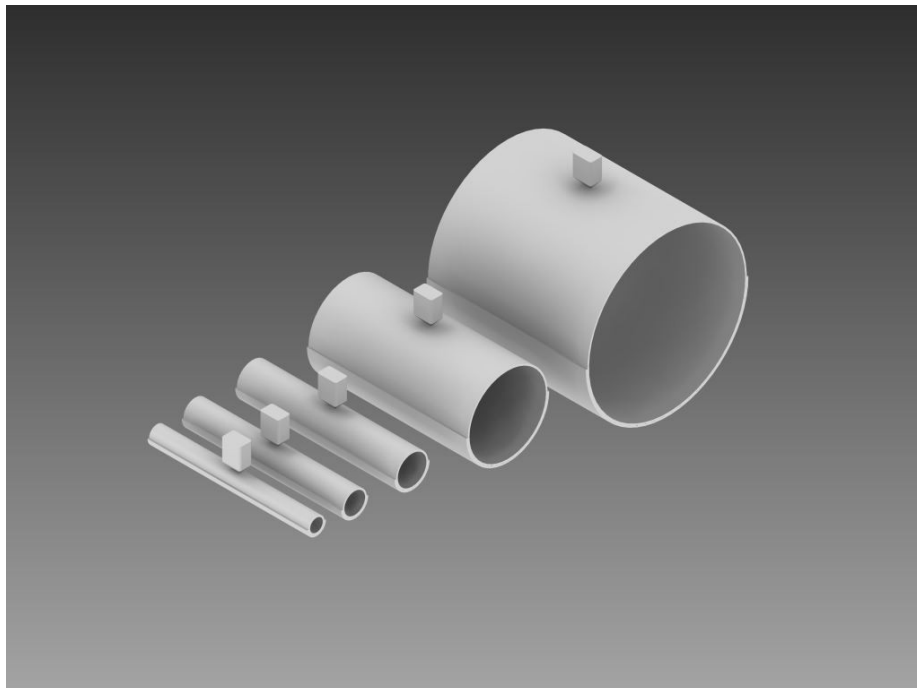


Abbildung 90: Modelle zur Simulation des Einfluss des Rohrdurchmessers.

Die Abbildung 91 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der einzelnen Simulationen bis zu einer Eindringtiefe von 20 mm.

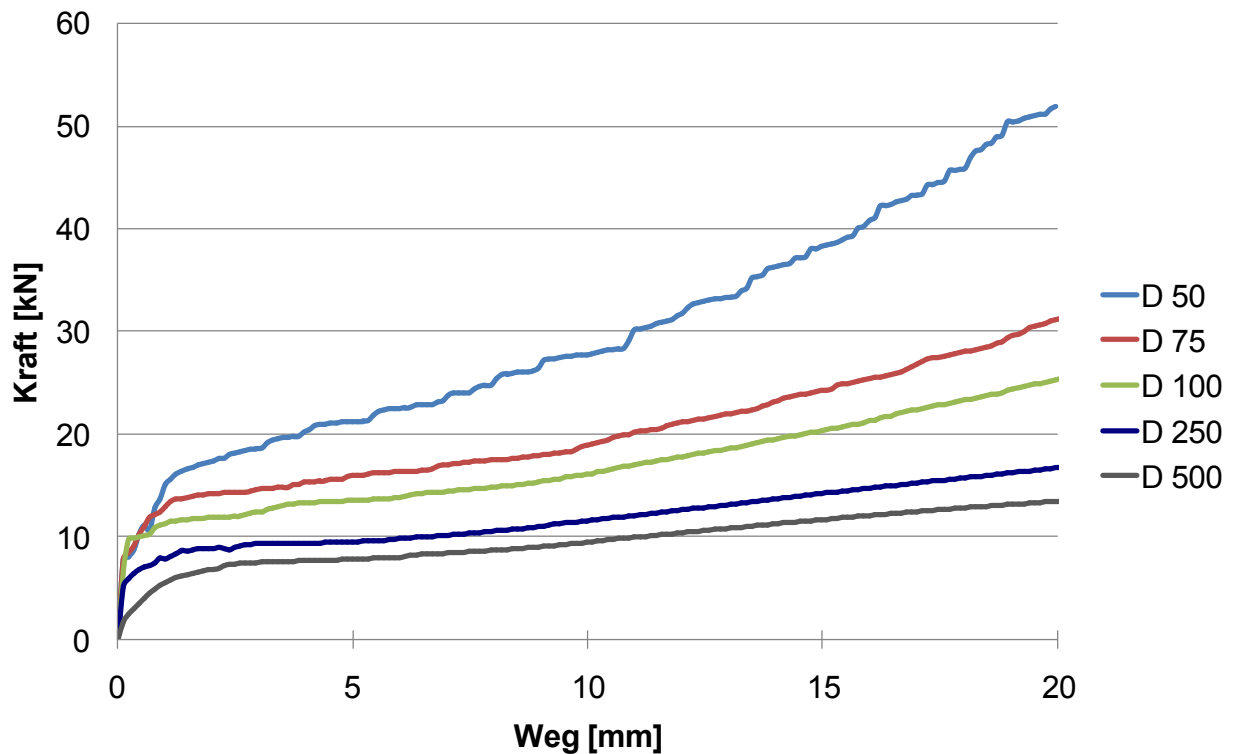


Abbildung 91: Kraft-Weg-Verläufe der Simulationen bis zu einer Eindringtiefe von 20 mm.

Die Simulation ergab, je größer der Durchmesser eines Rohres ist, desto kleiner wird die benötigte Kraft, um ein Rohr einzubeulen. Somit sind größere Rohre eher gefährdet einzubeulen, als kleine. Das kann damit erklärt werden, dass je größer der Durchmesser eines Rohres wird, desto kleiner wird der Stützeffekt des Kreisbogens und die Oberfläche nähert sich immer mehr einer geraden Fläche an.

4.8 Simulation des Einbeulens mit Innendruck

Um zu zeigen, wie sich eine Beule entwickelt, wenn in einem Rohr ein Innendruck von 70 bar herrscht, wurde eine weitere Simulation durchgeführt. Es wurde, wie bei den vorhergehenden Simulationen aus Kapitel 4.3 das Simulationsmodell mit einem 88,9 mm Rohr verwendet. Als Rohrwerkstoff wird der schon verwendete P235 GH herangezogen. Um einen Vergleich zu bilden, wurde das Rohr ohne Innendruck, wie beim Druckversuch, auf eine Tiefe von 40 mm eingeeult. Die Abbildungen 92 und 93 zeigen die Vergleichsspannungen im Rohr während des Einbeulens bei einer Beultiefe von 40 mm. Die maximale Spannung beträgt hierbei 239,1 N/mm². Die Beule formte sich weich aus.

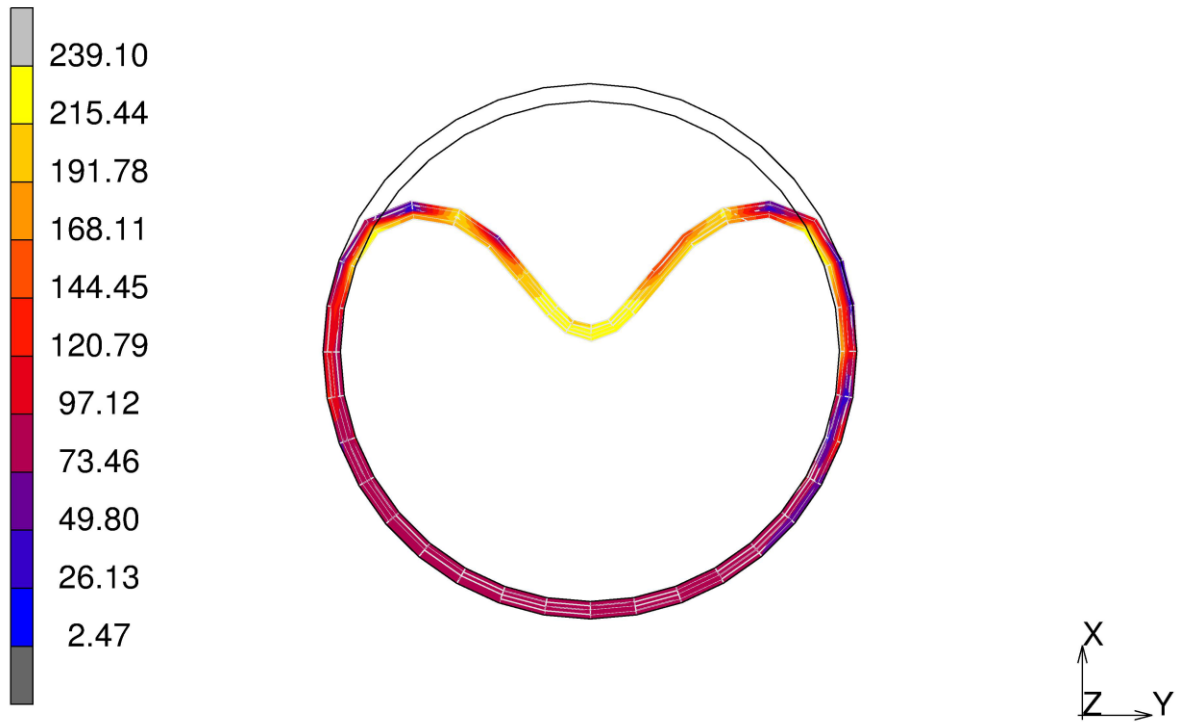


Abbildung 92: Die Spannung der Beule bei 0 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm.

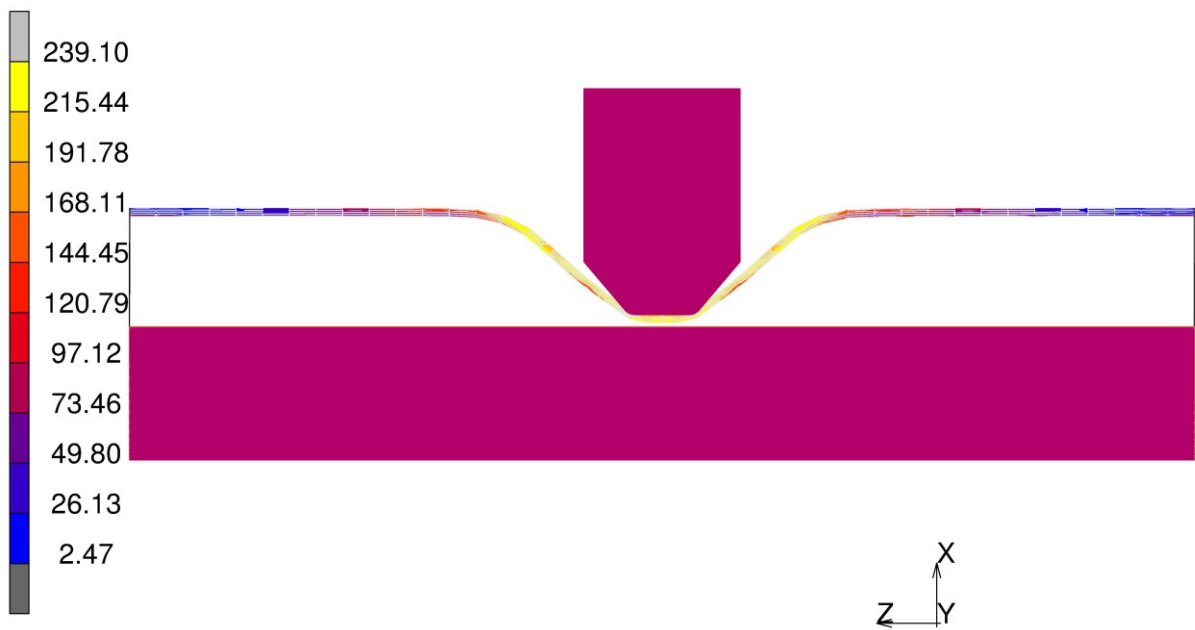


Abbildung 93: Die Spannung der Beule bei 0 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm.

Werden diese Abbildungen mit den Abbildungen 94 und 95 verglichen, ist ersichtlich, dass sich die Beule weit spitzer ausformt, wenn das Rohr mit einem Innendruck beaufschlagt ist. Die Flanken sind weit steiler als bei der Beule ohne Innendruck und bei gleicher Eindringtiefe

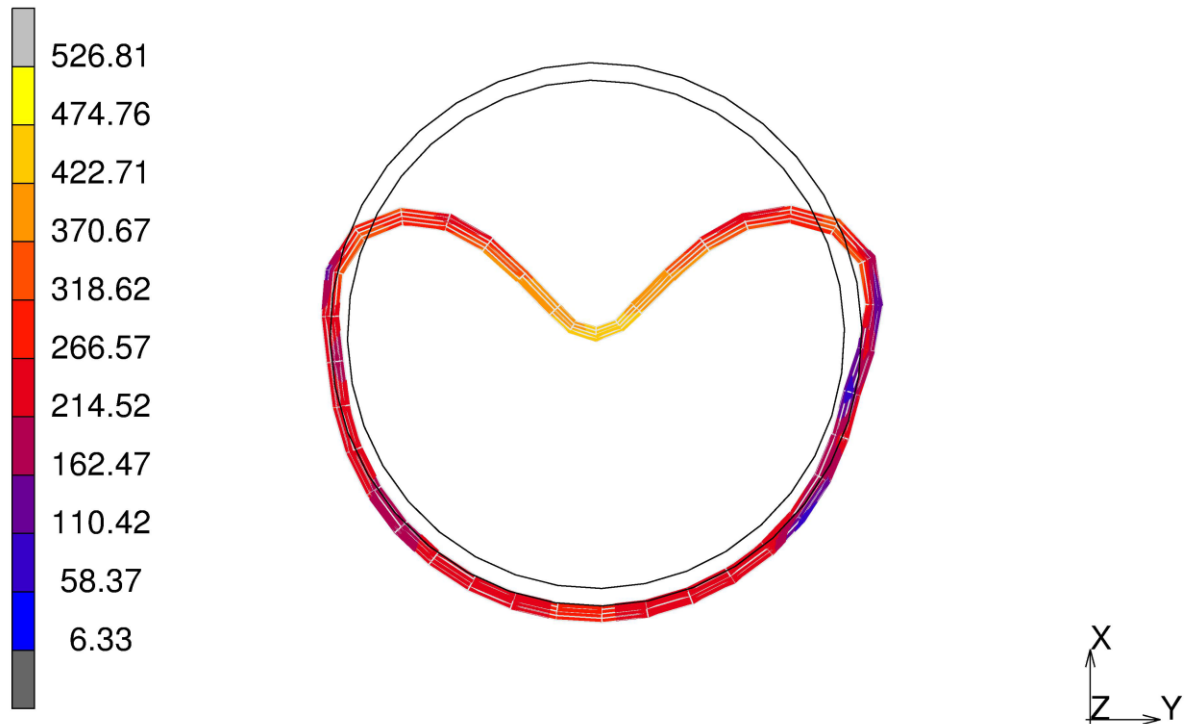


Abbildung 94: Die Spannung der Beule bei 70 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm.

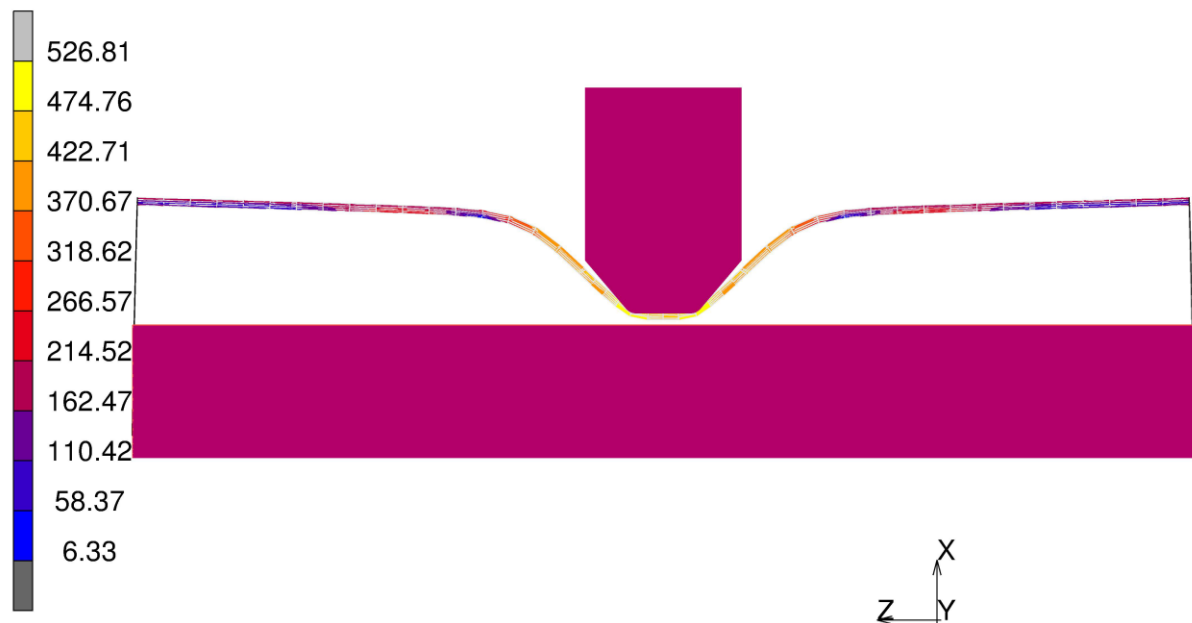


Abbildung 95: Die Spannung der Beule bei 70 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm

Weiters ist zu sehen, dass die Vergleichsspannungen bei dem Rohr mit Innendruck weit höher sind. Der Vergleich zeigt, dass sich bei der Simulation mit Innendruck, die Wand des Rohres regelrecht an den Eindringkörper anschmiegt. Die Abbildung 96 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der beiden Simulationen. Daraus ist zu erkennen, dass bei 70 bar Innendruck eine höhere Einbeulkraft notwendig ist, als bei 0 bar Innendruck. Der gezackte Verlauf ist auf die grobe Vernetzung zurückzuführen.

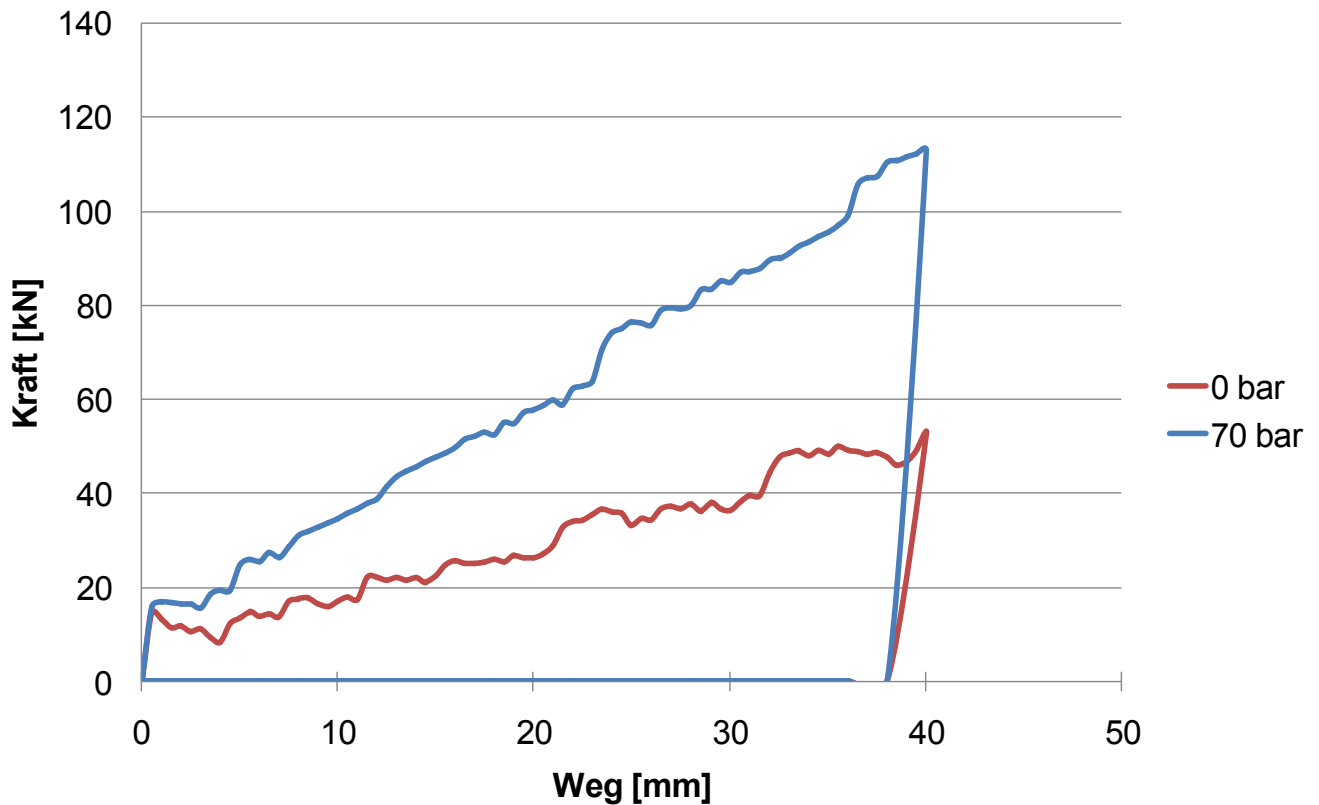


Abbildung 96: Kraft-Weg-Verläufe des Einbeulens bei 0 und 70 bar.

5. Vergleich und Diskussion

Nach der Auswertung der Simulation und der Versuche können Korrelationen gefunden werden. Das Simulationsmodell hat bewiesen, dass es eine gute Näherung der Realität darstellt. Die Abbildung 97 zeigt, dass die Simulation zwar leicht abweicht, dies ist aber auf die Diskretisierung und die unterschiedlichen Bettungen der Rohre zurückzuführen ist.

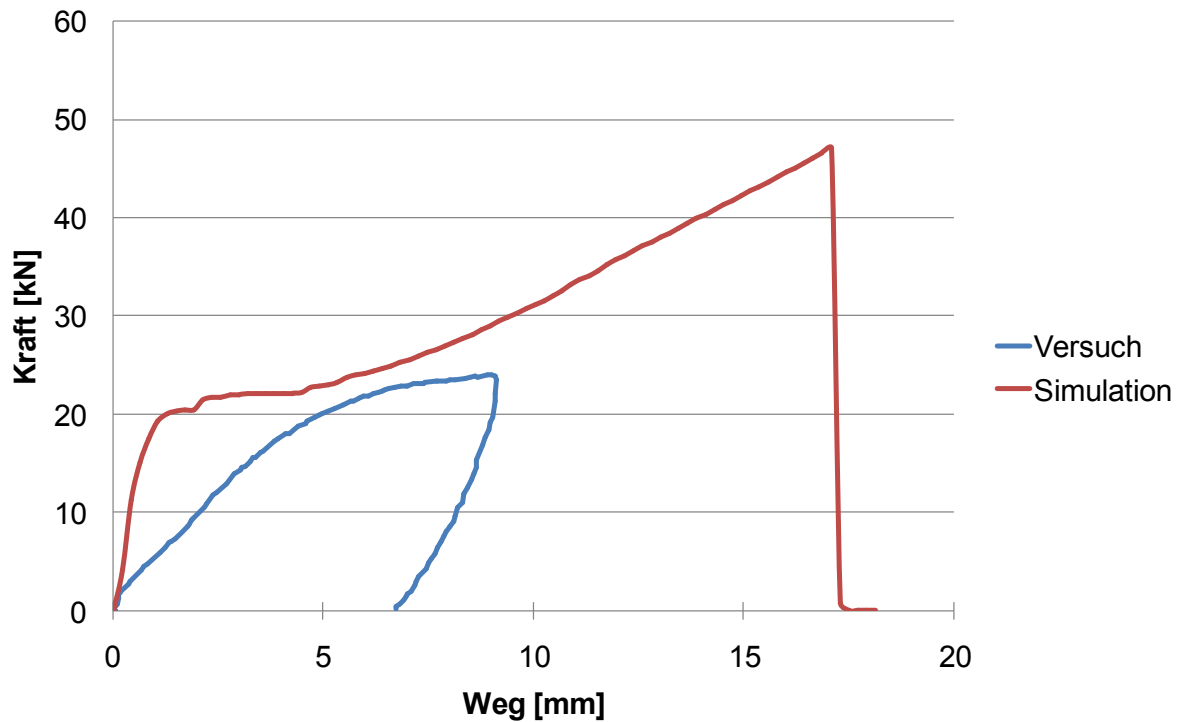


Abbildung 97: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe zwischen Versuch und Simulation.

Sowohl Simulation als auch die Versuche sagen aus, dass der Eindringwinkel des Eindringkörpers keinen Einfluss auf die nötige Kraft, sowie auf die Spannungen im Rohr haben. Wie in der Abbildung 98 zu sehen ist, sind die Kraft-Weg-Verläufe sehr ähnlich.

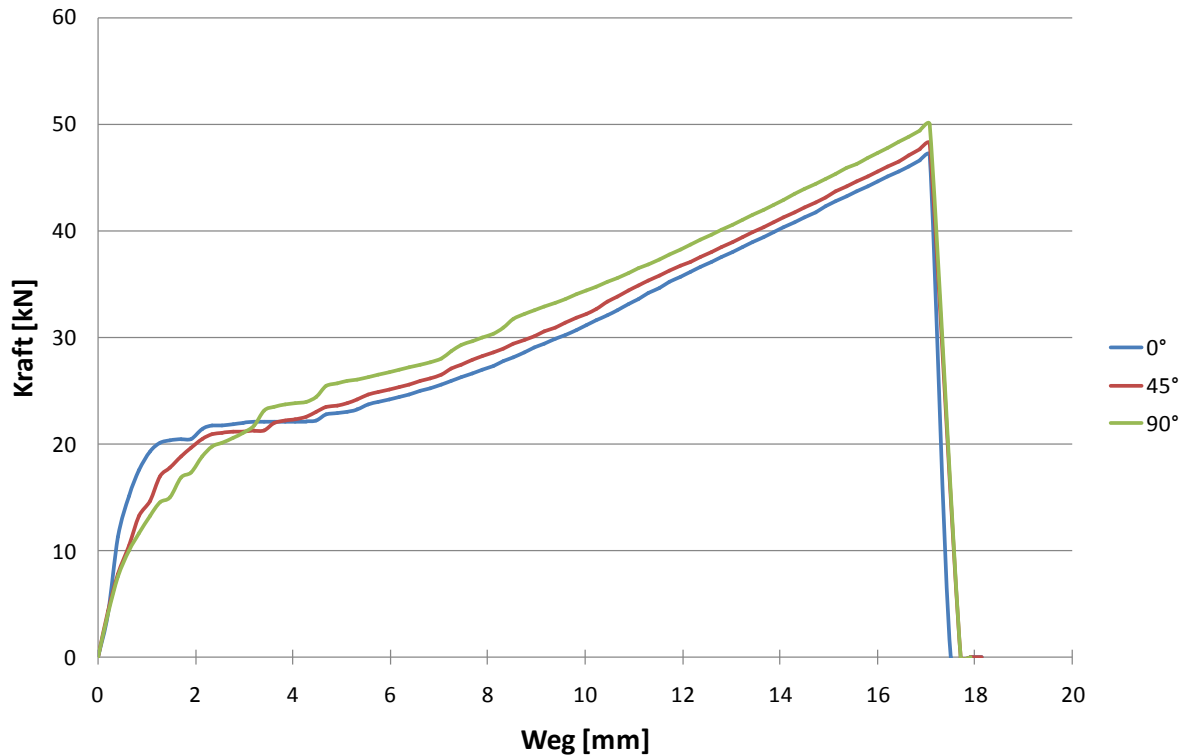


Abbildung 98: Kraft-Weg-Verläufe bei 0°, 45° und 90°.

Die Versuche ergaben, wie in der Literatur beschrieben, dass tiefe Beulen in Rohren nur möglich sind, wenn das Rohr seitlich gestützt wird. Ansonsten weicht das Rohr seitlich aus und es verformt sich oval. Es zeigte sich, dass die nötige Einbeulkraft höher ist, je stärker das Rohr seitlich gestützt wird. Dies ist aus den Versuchen G1 und G2 ersichtlich.

Weiters haben die Simulationen und die Versuche gezeigt, dass mit steigender Festigkeit des Rohrwerkstoffes die nötige Einbeulkraft zunimmt.

Die Simulation hat die inneren Spannungsverläufe im Rohr sichtbar gemacht. Dabei konnte beobachtet werden, dass die maximalen Vergleichsspannungen im Beulentale zu finden sind. Im entlasteten Zustand sind die Maxima in den Beulenflanken. Aus der Simulation, mit zunehmendem Durchmesser des Rohres war ersichtlich, dass die nötige Einbeulkraft bei gleicher Einbeultiefe abnimmt. Mit der Simulation konnte auch gezeigt werden, dass die Beulen-kennzahl und der daraus folgende Spannungsüberhöhungsfaktor eine gute Beschreibung des Spannungszustandes im Rohr darstellen.

Wird ein mit Innendruck beaufschlagtes Rohr eingebeult, ist eine höhere Kraft notwendig, als bei einem Rohr mit atmosphärischen Innendruck. Dabei schmiegt sich die Wand des Rohres regelrecht an den Eindringkörper an und die Flanken der Beule werden steiler. Durch die verminderte Länge der Beule sind diese kritischer wie weich ausgeformten Beulen.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden Klassifikationen für Pipelines und Beulen gesucht. Um das System Pipeline besser zu verstehen, wurde dessen Aufbau von der Rohrherstellung bis zum Verlegen der Leitung und deren Reparatur beschrieben. Weiters wurden Methoden zum Auffinden der Beulen und zum Reparieren dieser gefunden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Beulenkennzahl die beste Klassifikation ist, um zu beurteilen inwieweit das gebeulte Rohr betriebstauglich ist.

Die Versuche ergaben, wie der Einfluss der Schweißnaht vom Rohrwerkstoff und dem Schweißgut abhängt. Die Schweißnaht kann eine versteifende, als auch eine entfestigende Wirkung haben. Um dies genauer zu erforschen, müssten größere Messreihen mit unterschiedlichsten Materialien durchgeführt werden. Weiters haben die Versuche gezeigt, dass die nötige Kraft zum Einbeulen eines Rohres vom Werkstoff, dem Rohrdurchmesser, der Wandstärke und der seitlichen Stützung abhängt.

Bei Versuchen mit Innendruck-Beaufschlagung wurde ersichtlich, dass unterkritische Beulen in Rohren, mit dem Werkstoff P 235 GH und X5CrNi18-10 die statische Festigkeit, bei einer einmalig kurzen Innendruckbelastung, nicht beeinflussen. Der Quetschversuch mit einem Rohr aus P 235 GH hat ergeben, dass eine kritische Beule keinen Einfluss auf die statische Festigkeit des Rohres hat. Ob dies auch für die Lebensdauer eines dynamisch beanspruchten Rohres gilt, muss noch in weiteren Testreihen geklärt werden.

Die Simulation gibt einen guten Einblick in den Spannungszustand im Inneren des Rohres. Die Untersuchungen mit der Finite Elemente Methode (FEM) hat bestätigt, dass die über die Beulenkennzahl ergebene Spannungsüberhöhung eine gute Näherung für den Spannungszustand des gebeulerten Rohres ist.

Abschließend ist zu sagen, dass die Simulationen und Versuche eine vereinfachte Näherung der Realität darstellen.

Ein Ziel für die Zukunft wäre, ein System zu entwickeln, bei der die Beule vor Ort mit einem 3D-Scanner vermessen wird und ein Programm automatisch die Beulenkennzahl und die mit ihr verbundene Spannungsüberhöhung errechnet.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Lässer, "Skriptum Vorlesung Pipeline Engineering", Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre, 2009.
- [2] N.N. "PIG", http://www.nord-stream.com/media/picture_library/rgb_small/en/2011/11/pig_3255_20111107.jpg, Nord Stream AG 2013 (abgerufen am 30. Oktober 2013).
- [3] N.N. "CALIPER", <http://www.wftkopp.com/frameset.php?page=caliper&pageleft=service&lang=de>, Weatherford Kopp GmbH (abgerufen am 4.Juli.2013).
- [4] C.R. Alexander, "Review of Experimental and Analytical Investigations of Dented Pipelines," Pressure Vessel and Piping Conference, Boston, Massachusetts, August 1999.
- [5] M. Allouti, et al., "Study of influence of dent depth on the critical pressure of pipeline", Engineering Failure Analysis 21, Seite 40-51, 2012.
- [6] Bianca de C. Pinheiro, Ilson P. Pasqualino, "Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure", International Journal of Fatigue 31, Seite 962–973, 2009.
- [7] T.-D. Park, S. Kyriakides, "On the collapse of dented cylinders under external pressure", International Journal of Mechanical Sciences Vol. 38. No. 5, Seite 557-578, 1996.
- [8] A. Limam, L.-H.Lee, S.Kyriakides, "On the collapse of dented tubes under combined bending and internal pressure", International Journal of Mechanical Sciences 55, Seite 1-12, 2012.
- [9] K.A. Macdonald , A. Cosham, "Best practice for the assessment of defects in pipelines – gouges and dents", Engineering Failure Analysis 12, Seite 720–745, 2005.
- [10] Michael Steiner, "Deformations- und Versagensverhalten innendruckbeanspruchter Stahlrohre durch Stoßbelastung", Mitteilung aus dem Institut für Mechanik Nr. 137, Ruhr-Universität Bochum, 2006
- [11] N.N., "Leak detection dogs", gas international Volume 50 Issue, IGEM House, 6 July/August 2010.
- [12] J. Ruge, H. Wohlfahrt, "Technologie der Werkstoffe", Vieweg, 7 Auflage, 2007.
- [13] N.N., "Herstellung von Rohren", Phoenix-Rheinrohr AG Düsseldorf, 1963.
- [14] Klaus Hesselbarth, "Gashochdruckleitungen - Sicherheit und Qualität", Vulkan-Verlag GmbH, 2001.
- [15] ÖNORM EN 1594 Ausgabe: 2009-06-01
- [16] Rainer Konersmann, et al, "Zu den Risiken des Transports flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines", Forschungsbericht 285, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin, 2009.

- [17] Richtlinie G E100 Erdgasleitungen Allgemeine Anforderungen für Planung, Errichtung von Erdgasleitungen, Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, November 2011
- [18] Dieter Schmidt, et al., "Stahlrohrhandbuch", 11. Auflage Vulkan-Verlag 1990
- [19] Spyros A. Karamanos, Charis Eleftheriadis, "Collapse of pressurized elastoplastic tubular members under lateral loads", International Journal of Mechanical Sciences 46, Seite 35-56, 2004.
- [20] Spyros A. Karamanos, Kyros P. Andreadakis, "Denting of internally pressurized tubes under lateral loads", International Journal of Mechanical Sciences 48, Seite 1080–1094, 2006.
- [21] N.N., "Projekt Südschiene Erdgas-Hochdruckleitung Semmering-Bruck/Oberaich" Informationmateriel der Gasnetz Steiermark GmbH, 2010.
- [22] W. Brunst et al., "Widerstandsschweißen" Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1962.
- [23] N.N., "Baugrundverformung" , Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität München, 2008.
- [24] Prof. Dr.-Ing. Ulvi Arslan, "Bodenmechanik und Felsmechanik-Verformungen des Baugrundes" , Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [25] N.N., "bypass illustration", <http://www.linestop.com/>, International Flow Technologies, (abgerufen am 30. Oktober 2013).
- [26] N.N., "Produktionsdiagramm UOE", <http://www.europipe.com/102-0-UOE-Verfahren.html#>, EUROPIPE GmbH, (abgerufen am 30. Oktober 2013).
- [27] Dr.-Ing. habil. Max Kronenberg, "Grundzüge der Zerspanungslehre", Springer-Verlag Berlin / Gottingen / Heidelberg 1963
- [28] Rainer Konersmann, et. al., "Zu den Risiken des Transportes flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines" BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin, 2009.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Maschineller Aushub unter einem Hindernis. 1.) Hydraulikeinheit, 2.) auszuhebendes Material, 3.) Rohrgraben [15]. | 4 |
| Abbildung 2: Bodenkoeffizient C über dem Tiefen-Rohrdurchmesser-Verhältnisses. a) körniger Boden ohne Kohäsion, b) Sand und Kies, c) feuchte, kultivierbare Erde, d) normale Tonerde, e) gesättigte Tonerde [18]. | 5 |
| Abbildung 3: Die Bodenpressung im Rohrscheitel über der Bodentiefe [18]. | 6 |
| Abbildung 4: Zeitsetzungslinie der spezifischen Setzung über die Zeit [23]. | 7 |
| Abbildung 5: Das bezogene Zusammendrücken der unterschiedlichen Böden über der | 7 |
| Abbildung 6: Schrägwalzverfahren nach Mannesmann. 1 Lochteil, 2 Querwalzteil, 3 Glättungsteil [13]. | 9 |
| Abbildung 7: Das schrittweise Lochen nach Ehrhardt [13]. | 9 |
| Abbildung 8: Das Pilgerschrittwalzen von Rohren [13]. a) Luppe wird gefasst b) Ausstreckvorgang c) Luppe freigeben zum Vorschieben [13]. | 10 |
| Abbildung 9: Das Stoßbank-Verfahren nach Ehrhardt [13]. | 10 |
| Abbildung 10: Das schrittweise Strecken eines Rohres mit dem Reduzierwalzwerk [13]. | 11 |
| Abbildung 11: Herstellung von Wendelnahtrohren aus einem Blechband [13]. | 11 |
| Abbildung 12: Widerstandsschweißen und HF-Schweißen von Rohren [13]. | 12 |
| Abbildung 13: Fertigungsschritte des UOE-Verfahren [26]. | 13 |
| Abbildung 14: Molchfalle zur Entnahme oder Einlass des Molches [1]. | 15 |
| Abbildung 15: Ein intelligenter Molch[2]. | 15 |
| Abbildung 16: Die Bypassleitung einer beschädigten Pipeline[25]. | 17 |
| Abbildung 17: Eine punktförmige Beule des Typ A [14]. | 19 |
| Abbildung 18: Eine talförmige Beule des Typ B [14]. | 20 |
| Abbildung 19: Der Spannungserhöhungsfaktor über die berechnete Beulenkennzahl [14]. | 21 |
| Abbildung 20: Beispiel für die zulässige Schwellbeanspruchung [14]. | 22 |
| Abbildung 21: Leckformen einer Pipeline [28]. | 24 |
| Abbildung 22: Schematischer Versuchsaufbau von A.Liam [8]. | 26 |
| Abbildung 23: Die Stempelgeometrie von T.-D Park [7]. | 26 |
| Abbildung 24: Der Baggerzahn von M. Steiner 92[10]. | 27 |
| Abbildung 25: Der Versuchsaufbau von M. Steiner[10]. | 28 |
| Abbildung 26: Vermessung einer Beule mit einer Unebenheit-Messapparatur [7]. | 29 |
| Abbildung 27: Schrittweises Zusammendrücken des Rohres bis zur Implosion [7]. | 30 |
| Abbildung 28: Der Druckkessel von T.-D. Parker für den Implosionsversuch [7]. | 31 |
| Abbildung 29: Druck-Zeitkurven der unterschiedlichen Versuche [7]. | 32 |
| Abbildung 30: Implosionsdruck als Funktion der durch die Beule bedingten Ovalität Δ_{Od} [7]. | 32 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 31: Die eingebeulten Druckkesseln von M. Allouti [5]. | 33 |
| Abbildung 32: Biegeprüfmaschine für gebeulte Rohre [8]. | 34 |
| Abbildung 33: Das benötigte Moment bezogen auf die Biegung eines gebeulten und eines intakten Rohres[8]. | 35 |
| Abbildung 34: Ein Halb-Schalenmodell eines Rohres [6]. | 41 |
| Abbildung 35: Der Versuchsaufbau für 323,9x7,1 mm Rohre. | 43 |
| Abbildung 36: Der für die Versuche verwendete Eindringkörper. | 44 |
| Abbildung 37: Maße des Eindringkörpers, alle nicht bemaßten Rundungen sind 4 mm. | 44 |
| Abbildung 38: Kraft-Weg-Verlauf des 4,8% Versuches. | 45 |
| Abbildung 39: Kraft-Weg-Verlauf des 10% Versuches. | 45 |
| Abbildung 40 Kraft-Weg-Verlauf des 20% Versuches. | 46 |
| Abbildung 41: Gebeultes Rohr mit entfernten Mantelmaterial. | 47 |
| Abbildung 42: Die Kokille für 88.9 mm Rohre zur Simulation der Einbettung. | 48 |
| Abbildung 43: Eingebautes 88,9 mm Rohr. | 48 |
| Abbildung 44: Rohr des Versuches V4 auf zwei Messprismen. | 49 |
| Abbildung 45: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V1 und V2. | 50 |
| Abbildung 46: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V3 und V4. | 51 |
| Abbildung 47: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe der Versuche V1-V4. | 52 |
| Abbildung 48: Eingebeultes Rohr mit deutlich zu sehenden Riffen. | 53 |
| Abbildung 49: Minimale Einkerbung im Beulental. | 53 |
| Abbildung 50: Die schematische Darstellung des Berstbehälters. | 54 |
| Abbildung 51: Versuchsaufbau für den Druckversuch. | 54 |
| Abbildung 52: Gegenüberstellung des Druckversuches B1 und des Einbeulversuches V2. | 55 |
| Abbildung 53: Kraft-Weg-Verlauf des Druckversuches B1. | 55 |
| Abbildung 54: Druck-Zeit-Verlauf des Druckversuches B1. | 56 |
| Abbildung 55: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B1. | 57 |
| Abbildung 56: Kraft-Weg-Verlauf des Druckversuches B2. | 58 |
| Abbildung 57: Druck-Zeit-Verlauf des Versuches B2. | 58 |
| Abbildung 58: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B2. | 59 |
| Abbildung 59: Der Druck-Zeit-Verlauf des zweiten Versuches B 1/2. | 60 |
| Abbildung 60: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches B1/2. | 60 |
| Abbildung 61: Versuchsaufbau des Quetschversuches | 61 |
| Abbildung 62: Kraft-Weg-Verlauf des Quetschversuches Q1/1. | 62 |
| Abbildung 63: Das gefaltete Rohr des Quetschversuches. | 62 |
| Abbildung 64: Druck-Zeitverlauf des Quetschversuches Q1/1. | 63 |
| Abbildung 65: Der zweite Kraft-Weg-Verlauf des Quetschversuches Q1/2. | 64 |
| Abbildung 66: Der zweite Druck-Zeitverlauf des Quetschversuches Q1/2. | 64 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 67: Form und Messwerte der ausgebeulten Beule des Versuches Q1. | 65 |
| Abbildung 68: Eingebautes 323,9x7,1 mm Rohr, dass seitlich mit Hölzern gestützt ist. | 66 |
| Abbildung 69: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 4,8% der Versuche G1 und G2. | 67 |
| Abbildung 70: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 10% der Versuche G1 und G2. | 68 |
| Abbildung 71: Kraft-Weg-Verläufe bei einer Eindringtiefe von 20% der Versuche G1 und G2. | 68 |
| Abbildung 72: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G3 und G4. | 69 |
| Abbildung 73: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G3 und G5. | 70 |
| Abbildung 74: Kraft-Weg-Verläufe der Versuche G4, G6 und G7..... | 71 |
| Abbildung 75: Versuchsaufbau der FEM-Simulation. | 72 |
| Abbildung 76: Beispiel für die Vernetzung des Rohres..... | 73 |
| Abbildung 77: Vergleich des Kraft-Weg-Verläufe zwischen Versuch und Simulation..... | 74 |
| Abbildung 78: Innenansicht der FEM-Simulation mit der Eindringkörperstellung 0°, 45° und 90°. | 75 |
| Abbildung 79: Schnitt durch die 90° Simulation..... | 76 |
| Abbildung 80: Kraft-Weg-Verläufe bei 0°,45° und 90°. | 77 |
| Abbildung 81: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar. | 78 |
| Abbildung 82: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar. | 78 |
| Abbildung 83: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar. | 79 |
| Abbildung 84: Spannungen im 88,6 mm Rohr bei einem Innendruck von 100 bar. | 80 |
| Abbildung 85: Modellaufbau der exzentrischen Simulation. | 81 |
| Abbildung 86: Innenansicht des exzentrisch eingebeulten Rohres..... | 81 |
| Abbildung 87: Y- Kraft-Weg-Verlauf der exzentrischen Simulation..... | 82 |
| Abbildung 88: Spannungen im eingebeulten 323,9 mm Rohr..... | 83 |
| Abbildung 89: Eigenspannungen im eingebeulten 323,9 mm Rohr. | 83 |
| Abbildung 90: Modelle zur Simulation des Einfluss des Rohrdurchmessers..... | 84 |
| Abbildung 91: Kraft-Weg-Verläufe der Simulationen bis zu einer Eindringtiefe von 20 mm. . | 85 |
| Abbildung 92: Die Spannung der Beule bei 0 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm..... | 86 |
| Abbildung 93: Die Spannung der Beule bei 0 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm..... | 86 |
| Abbildung 94: Die Spannung der Beule bei 70 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm..... | 87 |
| Abbildung 95: Die Spannung der Beule bei 70 bar Innendruck und einer Beulentiefe von 40 mm..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 96: Kraft-Weg-Verläufe des Einbeulens bei 0 und 70 bar..... | 88 |
| Abbildung 97: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe zwischen Versuch und Simulation..... | 89 |
| Abbildung 98: Kraft-Weg-Verläufe bei 0°,45° und 90°..... | 90 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Vorgeschriebene Mindestwandstärken nach der Gaskreuzungsvorschrift [18]. | 6 |
| Tabelle 2: Parameter der Versuche [3-9] | 28 |
| Tabelle 3: Ergebnisse der Berstversuche von M. Allouti et al. [5] | 34 |
| Tabelle 4: Versuchsparameter der Versuche V1-V4 | 49 |
| Tabelle 5: Gemessene Versuchsergebnisse der Versuche V1-V4 | 50 |
| Tabelle 6: Abmessungen der Beule | 52 |
| Tabelle 7: Die Messwerte der ausgebeulten Beule. | 56 |
| Tabelle 8: Die Messwerte der ausgebeulten Beule. | 57 |
| Tabelle 9: Die Messwerte der ausgebeulten Beule. | 59 |
| Tabelle 10: Übersicht über die Versuchsparameter. | 66 |
| Tabelle 11: Die Versuchsparameter der Versuche G4,G6 und G7..... | 71 |
| Tabelle 12: Ergebnisse der Simulation..... | 76 |
| Tabelle 13: Parameter der FEM-Simulation des Größenvergleiches..... | 84 |