

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Überwachung und Qualitätssicherung von Rohrvortrieben

gefördert durch das



**Ministerium für
Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz**
des Landes Nordrhein-Westfalen

bearbeitet von

RWTH Aachen
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

Aachen im September 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Vorgehensweise	3
3	Untersuchungen an Fugenzwischenlagen	5
3.1	Untersuchte Materialien und Probekörper	5
3.2	Rohrvortriebsgerechte Versuchsmethodik	5
3.2.1	Kurzzeit-Druckbeanspruchung.....	6
3.2.2	Wechselnde Druckbeanspruchung	7
3.3	Modellansatz für einaxialen Spannungs-Dehnungs-Zustand.....	8
3.3.1	Modellierung des Materialverhaltens im unkonditionierten Zustand	9
3.3.2	Modellierung des Materialverhaltens im vorkonditionierten Zustand	10
3.3.3	Numerische Ergebnisse	14
4	Untersuchungen in situ	16
4.1	Kanalbaumaßnahme Köln - Niehl - Industriegebiet	16
4.1.1	Vortriebsstrecke: R5 Süd - VBW Süd	17
4.1.2	Vortriebsstrecke: R 11 Nord - VBW Nord.....	18
4.2	Vortriebsbegleitende Messungen	19
4.2.1	Geodätische Vermessung.....	19
4.2.2	Messtechnik zur Verwinkelungsmessung	21
4.3	Theoretische Grundlagen	22
4.3.1	Berechnung der Verwinkelungen aus Vermessungsdaten	23
4.3.2	Vermessungstechnische und Bautechnologische Einflüsse	26
4.3.3	Vortriebsbegleitende Kurvenanpassung	27
4.4	Auswertung der vortriebsbegleitenden Messungen	31
4.4.1	Software.....	31
4.4.2	Rohrverwinkelungen im Vortriebsverlauf	31
4.4.3	Vortriebsstrecke: R5 Süd - VBW Süd	32
4.4.4	Vortriebsstrecke: R 11 Nord - VBW Nord.....	33

4.5	Resümee	35
5	In situ nahe Rohrvortriebe am ibb.....	36
5.1	Versuchsaufbau.....	36
5.2	Vorbereitungen der vortriebsbegleitenden Messungen	37
5.2.1	Versuchsrohre	37
5.2.2	Messrohre, Messtechnik.....	37
5.2.3	Vortriebsvermessung	40
5.2.4	Foliendrucksensoren	41
5.3	Durchführung der Messungen	42
5.3.1	Versuchsreihe 1: „gute“ Vortriebssteuerung	42
5.3.2	Versuchsreihe 2: „schlechte“ Vortriebssteuerung	42
5.4	Auswertung der Messungen	45
5.4.1	Versuchsreihe 1: „gute“ Vortriebssteuerung	45
5.4.2	Versuchsreihe 2: „schlechte“ Vortriebssteuerung	47
5.5	Rohrfugenspannungen im Vortriebsverlauf.....	49
5.5.1	Berechnung der Spannungen und Verformungen in der Rohrfuge.....	49
5.5.2	Ergebnisse der Fugenspannungsberechnungen	53
5.5.3	Kontrolle der Fugenspannungsberechnungen mit TEKSCAN	55
5.5.4	Beurteilung des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre	57
5.5.5	Überwachungssoftware	59
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	61
7	Literaturverzeichnis.....	62

1 Veranlassung und Zielsetzung

Durch ihre technischen und wirtschaftlichen Vorteile gewinnt die Rohrvortriebstechnik als Alternative zur offenen Bauweise immer mehr an Bedeutung. Diese Technologie hat vor allem in den letzten 25 Jahren eine rasante Entwicklung erfahren und einen hohen technischen Stand erreicht, verfahrensbedingt haftet ihr aber auch heute noch ein spezifisches Schadensrisiko an. Trotz normenkonformer Bemessung der Vortriebsrohre und kontinuierlicher Aufzeichnung und Kontrolle der Vorpresskräfte an Haupt- und Zwischenpressstationen können im Bauzustand Schäden in Form von Rissen und Abplatzungen an den Rohren beobachtet werden. Solche Schäden belegen die Tatsache, dass theoretische Annahmen und Vereinfachungen, die den aktuellen Berechnungsverfahren zugrunde liegen, in der Realität nicht immer zutreffen.

Planmäßige und unplanmäßige Steuerbewegungen des Vortriebsschildes beim Vortrieb verursachen Rohrverwinkelungen in den Kontaktfugen. Große Verwinkelungen bei hohen Druckbeanspruchungen infolge der im Vortriebsverlauf ansteigenden Vortriebskraft bewirken Spannungskonzentrationen im Rohrspiegelbereich und sind oft die Ursache für die Abplatzungen und Risse an den Vortriebsrohren.

Die Spannungsspitzen, die erwartungsgemäß am äußeren Rand des Rohrquerschnittes auftreten, verursachen Schädigungen der Rohre an der dem Boden zugewandten Seite. Diese Schäden bleiben oft unerkannt und können erst später im Betriebszustand Undichtigkeiten der Rohrverbindungen auslösen. Außerdem können Abplatzungen der Betonüberdeckung zur Korrosion der Stahlanlagen im aggressiven chemischen Bodenmilieu führen, die eine Gefährdung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des gesamten Kanals darstellt. Rohrschäden haben folglich hohe Sanierungskosten und eine Verringerung der Nutzungsdauer des Kanals zur Folge.

Zur Vermeidung von Rohrschäden im Bauzustand werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, alternativ zum Arbeitsblatt ATV A 161, neue Berechnungsansätze erarbeitet, die die tatsächlich auftretenden Rohrverwinkelungen und die Materialeigenschaften der Fugenzwischenlage berücksichtigen. Zur Überwachung und Qualitätssicherung der Bauausführung werden neue Ansätze in die numerischen Berechnungsalgorithmen implementiert, die softwaretechnisch umgesetzt und adaptiv in die Vortriebsanlagen integriert werden können. Die Vortriebsparameter, die ohnehin vortriebsbegleitend dokumentiert werden, dienen

dabei als Datengrundlage für die Ermittlung der Beanspruchungszustände der Vortriebsrohre im Bauzustand.

Ein Ziel des Forschungsvorhabens ist es zunächst, eine Methode zu entwickeln, mit der es möglich ist, aus den beim Rohrvortrieb erfassten Lagedaten des Vortriebsschildes und der Vorpresskraft die Rohrverwinkelung sowie die Spannungen im Kontaktbereich der Rohrstirnflächen zu bestimmen.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen ist es, ein Software-Modul zu entwickeln, das durch die Kombination der Vortriebsdaten den „Ausnutzungsgrad“ der Tragfähigkeit der Vortriebsrohre vortriebsbegleitend ermittelt und z. B. den Pressmeister frühzeitig vor einer möglichen Überlastung der Rohre warnt. So können Schäden an Vortriebsrohren und folglich hohe Sanierungskosten vermieden werden.

2 Vorgehensweise

Bereits im Vorfeld dieses Forschungsvorhabens wurden im ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb Laboruntersuchungen an Fugenzwischenlagenmaterialien durchgeführt. Wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass Fugenzwischenlagen aus Vollholz und Holzwerkstoffen ein nichtlineares Materialverhalten aufweisen.

Für die numerische Berechnungen der Fugenspannungen auf der Grundlage der Fugenverformungen ist die genaue Kenntnis der mechanischen Materialeigenschaften der Fugenzwischenlagen erforderlich. Folgerichtig werden im ersten Schritt der Forschungsarbeit umfangreiche Materialprüfungen durchgeführt. Um bei der Ermittlung der Materialparameter für die Fugenzwischenlage allen vortriebsspezifischen Randbedingungen gerecht zu werden, wird eine spezielle Versuchsmethodik angewendet.

Im Anschluss werden Messungen bei Rohrvortrieben in situ und in situ nahen Vortriebsversuchen am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb durchgeführt. Diese Messungen werden in zweierlei Hinsicht ausgewertet. Zum einen werden die Lageabweichungen der Vortriebsmaschine von der Soll-Achse und die Pressenkräfte der Hauptpressstation erfasst und dokumentiert. Zum anderen werden die relativen Fugenwege an ausgesuchten Rohrpaaren gemessen. Die axialen Verformungen in einer Rohrfuge werden über Fugenwegaufnehmer ermittelt.

Die Umrechnung der Messdaten liefert zunächst die Verwinkelung der Rohre zu einander, so kann die Raumkurve über den Vorpressweg der Vortriebsrohre erfasst werden. Dadurch kann die mögliche Korrelation der Maschinentrajektorie und der Rohrverwinkelungen in den Kontaktfugen überprüft werden. Gleichzeitig können die Verformungen der Fugenzwischenlage kontinuierlich berechnet werden.

Unter Einbeziehung des Materialgesetzes und der Belastungshistorie für die Fugenzwischenlage können Spannungen im Kontaktbereich der Rohrstirnflächen numerisch ermittelt werden. Die Integration der Kontaktspannungen über die Druckübertragungsflächen ergibt den Betrag und die Lage der resultierenden Vorpresskraft. Ein systematischer Vergleich der gemessenen und errechneten resultierenden Vortriebskraft in der Rohrfuge ermöglicht eine iterative Bestimmung des axialen Dehnungs- und Spannungszustandes im Kontaktbereich und des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre, Bild 2.1.

Zur Validierung des Materialmodells wird die zeitliche Entwicklung des Spannungszustandes unmittelbar auf der Druckübertragungsfläche fortlaufend

gemessen. Hierzu werden spezielle Druckmessfolien in den Rohrfugen platziert und mit vorgepresst. Die Druckverteilungen an den Rohrfugen können vortriebsbegleitend, kontinuierlich dokumentiert werden. Neben der Kontrolle der Berechnungsergebnisse erlaubt diese Messmethode zusätzlich die zeitabhängigen Einflüsse auf die Fugenspannungsverteilung unter für Rohrvortrieb spezifischen Randbedingungen zu untersuchen.

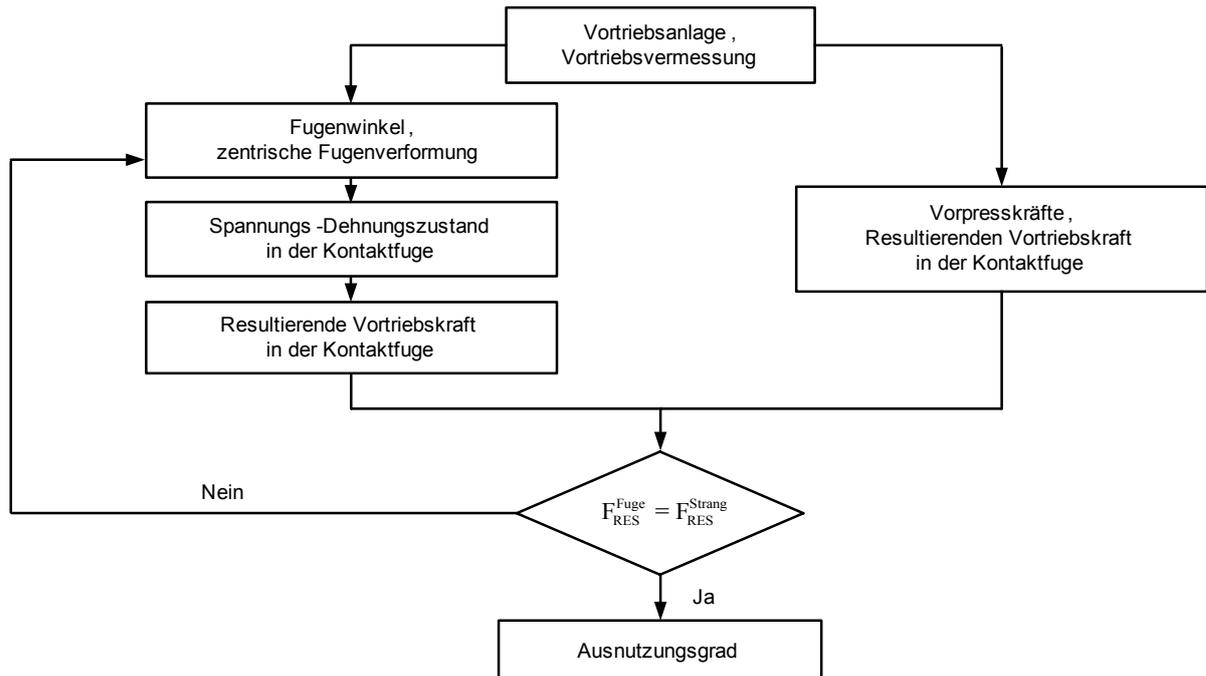


Bild 2.1: Vorgehensweise zur Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre

Zur Untersuchung von Auswirkungen verschiedener verfahrensspezifischer Randbedingungen auf die Korrelation zwischen den Lagedaten des Vortriebsschildes und den aufgefahrenen Rohrverwinkelungen und weiterhin auf die Belastung der Vortriebsrohre werden verschiedene Vortriebsparameter variiert. Das neu entwickelte Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Rohrbeanspruchungen, wird in einem Software-Modul implementiert. Dieses Software-Modul soll den „Ausnutzungsgrad“ der Tragfähigkeit der Rohre vortriebsbegleitend ermitteln und anzeigen.

3 Untersuchungen an Fugenzwischenlagen

Die Materialprüfungen werden in einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Probekörper werden zwischen die Pressbacken der Prüfmaschine mit einer vordefinierten Anpresskraft eingespannt und anschließend einer bestimmten Prüfroutine unterzogen. Verschiedene Belastungsprogramme lassen sich hardware- und softwaretechnisch realisieren. Die aufgebrachten Kräfte und Probenverformungen werden automatisch und kontinuierlich digital aufgezeichnet.

3.1 Untersuchte Materialien und Probekörper

Die standardmäßig eingesetzten Fugenzwischenlagen aus einem Holzwerkstoff haben bei Steinzeugrohren eine Materialstärke von 10,0 mm, 16,0 mm und 19,0 mm. Die darüber hinaus untersuchten Holzwerkstoffproben, die ebenfalls als Druckübertragungsmittel eingesetzt werden, haben Materialstärken von 22,0 mm.

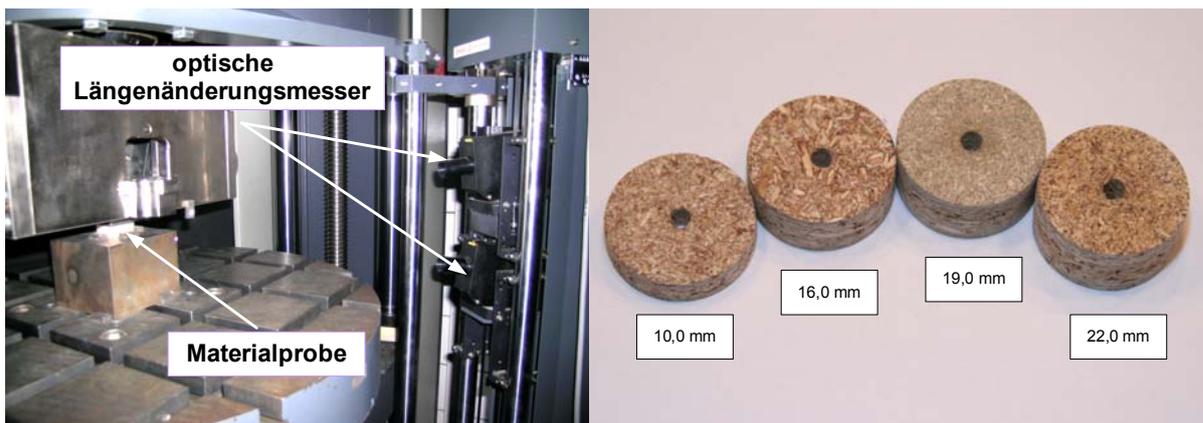


Bild 3.1: Materialprüfungen; Versuchsaufbau (links), Probekörper; Holzwerkstoff: 10,0 mm, 16,0 mm, 19,0 mm und 22,0 mm (rechts)

Für die Durchführung der Druckprüfungen an Holzwerkstoffproben wird eine einheitliche Geometrie der Probekörper gewählt. Dazu werden aus den Fugenzwischenlagenringen gedrungene Zylinderproben mit einem Durchmesser von 40,0 mm hergestellt. Die Geometrie und Abmessungen der Probekörper werden so ausgelegt, dass mit der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung eine Flächenpressung von bis zu 50 N/mm^2 aufgebracht werden kann.

3.2 Rohrvortriebsgerechte Versuchsmethodik

Die funktionalen Zusammenhänge zwischen Spannungen und Verformungen bei Vollholz und Holzwerkstoffen bei einer für den Rohrvortrieb spezifischen, wechselnden Druckbeanspruchung sind äußerst komplex. Die Untersuchung des

Materialverhaltens, Herleitung eines Materialmodells und folglich die Bestimmung der Modellparameter für die Fugenzwischenlagen, die üblicherweise aus Vollholz oder Holzwerkstoffen hergestellt werden, erfordern daher eine spezielle Versuchsmethodik.

Zunächst werden die Holzwerkstoffproben einer Kurzzeit-Druckprüfung unterzogen. Dabei wird die Last-Verformungs-Beziehung unter einaxialer Kurzzeit-Druckbeanspruchung untersucht. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Fugenzwischenlage unter wechselnder Druckbelastung werden Holzwerkstoffproben in einem zyklischen Druckversuch geprüft. Die empirischen Spannungsfunktionen, mit denen es möglich ist, das Kurzzeit-Druckverhalten und das reale Werkstoffverhalten im zyklischen Druckversuch zu beschreiben, werden im Folgenden getrennt für beide Lastfälle aufgestellt und mit Parametern ausgestattet.

3.2.1 Kurzzeit-Druckbeanspruchung

Im Bild 3.2 (links) ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für eine druckbelastete Materialprobe dargestellt. Die Untersuchungen an Holzwerkstoffproben zeigen, dass die Holzwerkstoffe bei geringer Druckbeanspruchung senkrecht zur Plattenebene ein elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten besitzen. Bei zunehmender Druckbeanspruchung verlässt die Spannungs-Dehnungs-Linie den linearen Bereich, dabei treten irreversible Verformungen zunehmend stärker hervor.

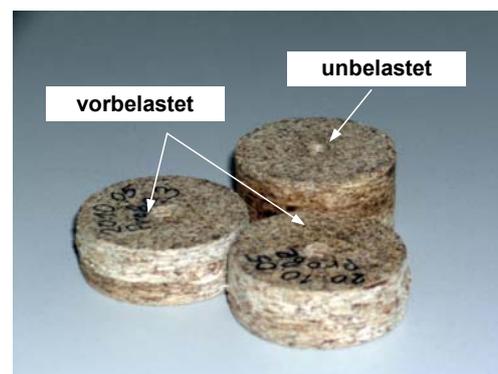
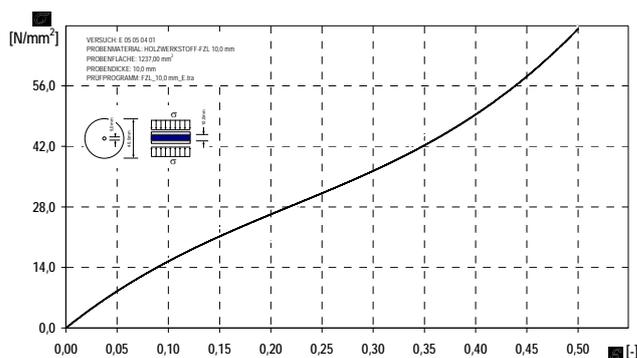


Bild 3.2: Kurzzeit-Druckversuch; Holzwerkstoff Pressspan V100: Spannungs-Dehnungs-Linien im Versuchsverlauf (links), Vergleich der Prüfkörper vor und nach der Belastung (rechts)

Bei ausreichender Probendicke wird bis zum Erreichen der maximalen Last eine hohe Verformbarkeit senkrecht zu Plattenebene beobachtet. Die Spannungs-Stauchungs-Beziehung ist hochgradig nichtlinear.

Eine weitere Laststeigerung bis zum Erreichen der Grenzlast führt zur Versteifung der mechanischen Struktur. Die Materialprobe zeigt kaum noch eine elastische Rückverformung. Auffallend ist dabei, dass die Holzwerkstoffe auch im Bereich der großen Stauchungen nur eine geringe Querdehnung aufweisen, Bild 3.2 (links). Diese für den Einsatz als Fugenzwischenlage positive Eigenschaft gestattet weiterhin rechnerisch und versuchstechnisch die Querdehnung zu vernachlässigen.

3.2.2 Wechselnde Druckbeanspruchung

Die experimentellen Untersuchungen an Fugenzwischenlagen aus Holz und Holzwerkstoffen zeigen, dass ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter wechselnder Druckbeanspruchung senkrecht zur Plattenebene maßgeblich von der Höhe der Druckbelastungen abhängig ist [4],[9].

Zur Untersuchung des Materialverhaltens unter vortriebsspezifischen, ständig wechselnden Lastzuständen werden Materialproben einer zyklischen Druckprüfung unterzogen. Die Prüfkörper werden dabei weggeregelt bis zu einer Stauchungsstufe von 5 % be- und entlastet. Dieser Belastungsvorgang wird anschließend für die Stauchungsgrenzen von 10 %, 15 %, 20 %, 25 % und 30 % der Materialausgangsstärke wiederholt, Bild 3.3 (links). Das rechte Diagramm im Bild 3.3 zeigt den axialen Spannungs-Dehnungs-Verlauf am Beispiel einer Holzwerkstoffprobe über die gesamte Prüfdauer.

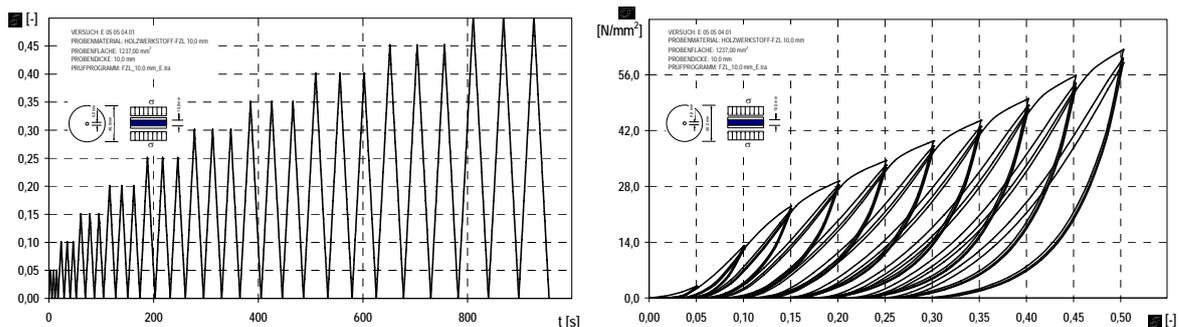


Bild 3.3: zyklische Belastung; Holzwerkstoff Pressspan V100:
Prüfvorschrift einer Standarddruckprüfung (links),
Spannungs-Dehnungs-Linien im Versuchsverlauf (rechts)

Die Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Linien bei zyklischer Belastung macht deutlich, dass sich die Materialproben in Abhängigkeit der Lastspielzahl und der Grenzstauchung einer Stauchungsstufe elastisch und irreversibel verformen. Die Zunahme der irreversiblen Verformungsanteile kann allerdings nur beim Übergang

von einer zur nächst höheren Stauchungsstufe beobachtet werden. Innerhalb einer Stauchungsstufe verhält sich die Probe annähernd elastisch.

Im Diagramm, Bild 3.4 (links) sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der axialen Verformung bei wiederholter Druckbelastung abgebildet. Das rechte Diagramm im Bild 3.4 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Linien bei wiederholter Entlastung der Holzwerkstoffprobe.

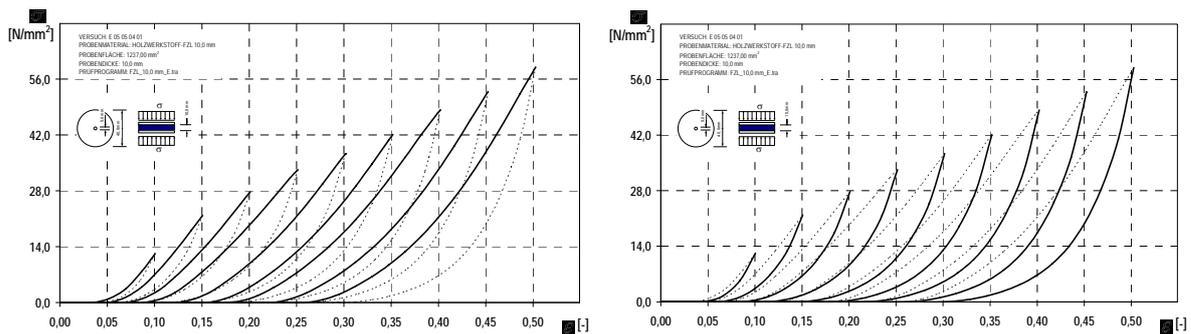


Bild 3.4: zyklische Belastung; Holzwerkstoff Pressspan V100:
Spannungs-Dehnungs-Linien, Belastung (links),
Spannungs-Dehnungs-Linien, Entlastung (rechts)

Eine Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungs-Trajektorien auf den Be- und Entlastungspfaden macht deutlich, dass die Spannungen auf dem Belastungspfad im Vergleich zu den Spannungen auf dem Entlastungspfad bei gleicher Verformung der Materialprobe deutlich höher sind.

Eine Erklärung dieses Phänomens liegt in dem visko-elastischen Materialverhalten der Holzwerkstoffproben. Auf die Entlastungsvorgänge reagieren Holzwerkstoffe verzögert elastisch. Demzufolge ist eine Unterscheidung der Materialparameter des Materialmodells je nach dem ob eine Fugenzwischenlage be- oder entlastet wird, zwingend erforderlich.

3.3 Modellansatz für einaxialen Spannungs-Dehnungs-Zustand

Die Betrachtung der Ergebnisse der Materialprüfungen deutet auf unterschiedliche nichtlineare Zusammenhänge hin. Weitergehende Untersuchungen zeigen außerdem, dass die Holzwerkstoffe elastisch-plastisches und viskoses Materialverhalten aufweisen. Für verschiedene Anwendungen wurden bereits geeignete Materialmodelle vorgeschlagen. Je nach Anwendungsfall liefern diese Modelle auch gute Berechnungsergebnisse [4],[9].

Für den Bemessungsfall in [4] wird ein Werkstoffgesetz aufgestellt, das die nichtlineare Spannungsverteilung in der Rohrkontaktfuge belastungsabhängig mit einem Steifemodul abbildet. Der Steifemodul muss allerdings in Abhängigkeit von der Vorbelastung abgeschätzt werden. In [9] wird eine Methode vorgestellt, die die Spannungsverteilung in der Rohrfuge als eine elementweise Approximation über den Rohrquerschnitt liefert. Die Fugenzwischenlage wird in einzelne Elemente diskretisiert. Jedem Element wird nach der Steifigkeitsmethode ein Werkstoffgesetz zugewiesen. Die Ermittlung der Steifigkeit für die einzelnen Elemente erfolgt in Abhängigkeit der Stauchung, wobei die Steifigkeit für den Fall der Erstbelastung und für den Fall der Wiederbelastung aus der Belastungsgeschichte separat berechnet wird. Die Ermittlung von stauchungsabhängigen Steifigkeitsmodulen ist sehr rechenintensiv. Zudem ist die Berücksichtigung von visko-elastischen Eigenschaften bei den Belastungs- und Entlastungsvorgängen nicht möglich.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein empirisches Werkstoffmodell für die Holzwerkstoffe entwickelt, das die Kraft-Verformungs-Beziehungen eines Holzwerkstoffes unter den Vortriebsrandbedingungen realitätsnah abbildet. Zur Modellierung eines nichtlinearen, elastisch-plastischen und visko-elastischen Materialverhaltens werden zur vortriebsbegleitenden Erfassung der Spannungszustände in den Rohrfugen Spannungsfunktionen aufgestellt. Je nach Lastfall werden Spannungsfunktionen mit Materialparametern ausgestattet. Die Materialparameter werden mit Hilfe der Regressionsanalyse aus den Ergebnissen der Druckversuche ermittelt.

Auf den Ergebnissen der Druckprüfungen basierend wird angenommen, dass die mechanischen Eigenschaften eines Holzwerkstoffes für drei voneinander unabhängige Belastungsfälle definiert werden können. Die Spannungsfunktionen werden separat für den Belastungspfad im unkonditionierten Zustand sowie für die Belastungs- und Entlastungspfade im vorkonditionierten Zustand formuliert.

3.3.1 Modellierung des Materialverhaltens im unkonditionierten Zustand

Ähnlich dem Verhalten von metallischen Werkstoffen verformen sich Holzwerkstoffe oberhalb einer bestimmten Grenzstauchung inelastisch (plastisch oder viskos). Materialproben zeigen dabei einen nichtlinearen, von der Belastungshistorie abhängigen Spannungs-Dehnungsverlauf. Da für die Spannungsberechnung in den Rohrfugen eine eindeutige Spannungs-Dehnungszuordnung erforderlich ist, wird hier eine Spannungsfunktion aufgestellt, die die Spannungen in der Fugenzwischenlage in Abhängigkeit der Stauchung wiedergibt.

Für die Spannungsfunktion zur Beschreibung des Materialverhaltens von Holzwerkstoffen unter einer Druckbeanspruchung im unkonditionierten Zustand bietet sich der Ansatz von Polynomen an, Gleichung (3.1). Die Materialparameter ω_k werden mit einer Regressionsanalyse aus den Spannungs-Dehnungslinien aus dem Kurzzeit-Druckversuch abgeleitet.

$$\sigma(\varepsilon) = \sum_k \omega_k \cdot \varepsilon^k \quad (3.1)$$

Wird die Fugenzwischenlage senkrecht zur Plattenoberfläche zum ersten Mal belastet (unkonditionierter Zustand), verformt sie sich sowohl elastisch als auch inelastisch. Der Werkstoff wird vorkonditioniert. Der Anteil der irreversiblen Verformung, siehe Bild 3.5, ist von der Vorstauchung (Vorkonditionierung) in einem bestimmten Belastungszyklus abhängig.

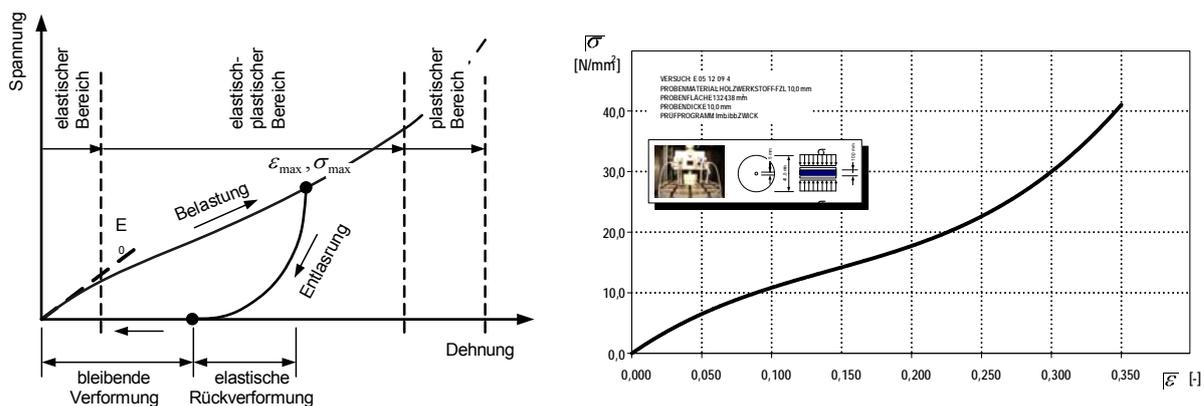


Bild 3.5: Materialverhalten im unkonditionierten Zustand:
Spannungs-Dehnungsbeziehung, Werkstoffmodell (links),
Spannungs-Dehnungsdiagramm, Kurzzeit-Druckversuch (rechts)

Ein solches von der Belastungshistorie abhängiges Verhalten kann mit einer Spannungsfunktion nach Gleichung (3.1) nicht beschrieben werden. Zum Beschreiben des Materialverhaltens im vorkonditionierten Zustand werden andere spezielle Spannungsfunktionen benötigt.

3.3.2 Modellierung des Materialverhaltens im vorkonditionierten Zustand

Im Rohrvortrieb werden die Fugenzwischenlagen technologiespezifisch im breiten Stauchungsspektrum wiederholt be- und entlastet. Zur Beschreibung des Materialverhaltens unter wechselnder Druckbeanspruchung werden Spannungs-Dehnungs-Linien aus dem zyklischen Druckversuch betrachtet. Die Untersuchungen der axialen Spannungs-Dehnungsbeziehung unter Wechsel-Druckbeanspruchung der für die Fugenzwischenlagen typischen Holzwerkstoffe zeigt, dass die

Materialproben sich in Abhängigkeit der Intensität der Druckbelastungen irreversibel verformen, wobei innerhalb einer Belastungsschleife praktisch keine inelastischen Verformungen festgestellt werden [4],[9].

Wie bereits erwähnt, ist die Spannungs-Dehnungsbeziehung bei Holzwerkstoffen von der Belastungshistorie abhängig. Im Bild 3.6 (rechts) ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines zyklischen Druckversuches dargestellt. Zunächst wird der Entlastungspfad betrachtet. Ein Entlasten der Materialprobe führt zu deutlichen bleibenden Stauchungen. Die unterproportionale Abnahme der Druckspannungen bei der Entlastung der Probe deutet auf eine starke Nichtlinearität des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens auch in vorkonditionierten Zustand hin.

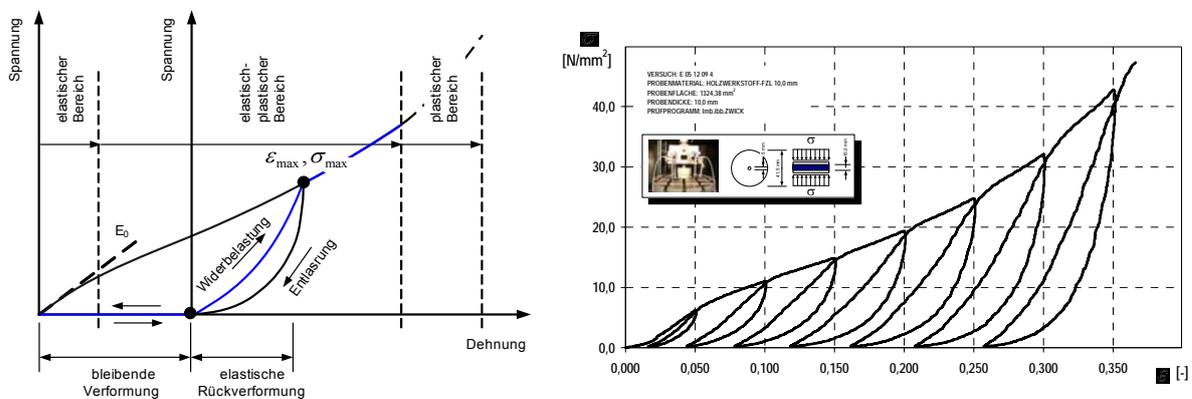


Bild 3.6: Materialverhalten im vorkonditionierten Zustand::
Spannungs-Dehnungsbeziehung, Werkstoffmodell (links),
Spannungs-Dehnungsdiagramm, Wechsel-Druck-Beanspruchung (rechts)

Wird der Werkstoff nach einem Entlastungsvorgang erneut gestaucht, so steigt die Spannung rapide an. Die Steifigkeit, mit der der Werkstoff auf die Verformungen reagiert, beträgt ein Vielfaches des Ursprungssteifigkeitsmoduls im unkonditionierten Zustand. Das Material des Holzwerkstoffes wird durch eine Vorkonditionierung deutlich steifer. Zudem unterscheiden sich die Spannungs-Dehnungs-Trajektorien auf den Be- und Entlastungspfaden.

Eine Möglichkeit den Versteifungseffekt bei der Berechnung der Druckspannungen in der Fugenzwischenlage zu berücksichtigen besteht darin, zunächst mit einer Spannungsfunktion im unkonditionierten Zustand die maximale Spannung σ_{max} in Abhängigkeit der maximal auftretenden Stauchung ϵ_{max} zu ermitteln. Im Folgenden wird der Vorkonditionierungsgrad bestimmt und eine Spannungsfunktion aufgestellt. Die Funktionsparameter werden dabei in Abhängigkeit der Vorkonditionierung ermittelt.

Das Spannungs-Dehnungsverhalten im vorkonditionierten Zustand unter Wechsel-Druck-Beanspruchung wird mit einer stauchungsabhängigen Spannungsfunktion nach Gleichung (3.2) beschrieben. Die Steifemodule E_q werden nach BUCHHARDT ermittelt [4]. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die Steifemodule diesmal stauchungsabhängig ermittelt werden.

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \eta_b(\varepsilon_{\max}) \cdot E_q(\varepsilon_{\max}) \cdot \Delta\varepsilon^2, & \text{Belastungspfad (Z)} \\ \eta_e(\varepsilon_{\max}) \cdot E_q(\varepsilon_{\max}) \cdot \Delta\varepsilon^2, & \text{Entlastungspfad (I)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Die von der Lastgeschichte abhängige Versteifung des Werkstoffes wird über eine η -Funktion berücksichtigt. Bei der Aufstellung der Versteifungsfunktion wird nach Be- und Entlastung unterschieden, Gleichung (3.3). Die Fallunterscheidung für die Lastfälle Be- und Entlastung ermöglicht es, die Unterschiede im Materialverhalten auf dem Belastungs- und Entlastungspfad zu berücksichtigen. Die Hystereseschleifen können dadurch abgebildet werden.

$$\begin{cases} \eta_b = 1 + \frac{1}{r_b(\varepsilon_{\max})} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_{\max} - E_q(\varepsilon_{\max}) \cdot \Delta\varepsilon^2}{m_b(\varepsilon_{\max})}\right), & \text{Belastungspfad (Z)} \\ \eta_e = 1 - \frac{1}{r_e(\varepsilon_{\max})} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_{\max} - E_q(\varepsilon_{\max}) \cdot \Delta\varepsilon^2}{m_e(\varepsilon_{\max})}\right), & \text{Entlastungspfad (I)} \end{cases} \quad (3.3)$$

Alle Materialparameter werden in Abhängigkeit von der bis dahin aufgefahrenen maximalen Stauchung (Vorkonditionierung) ausgedrückt. Diese Vorgehensweise macht eine Berücksichtigung der Belastungsgeschichte im Rohrvortrieb möglich.

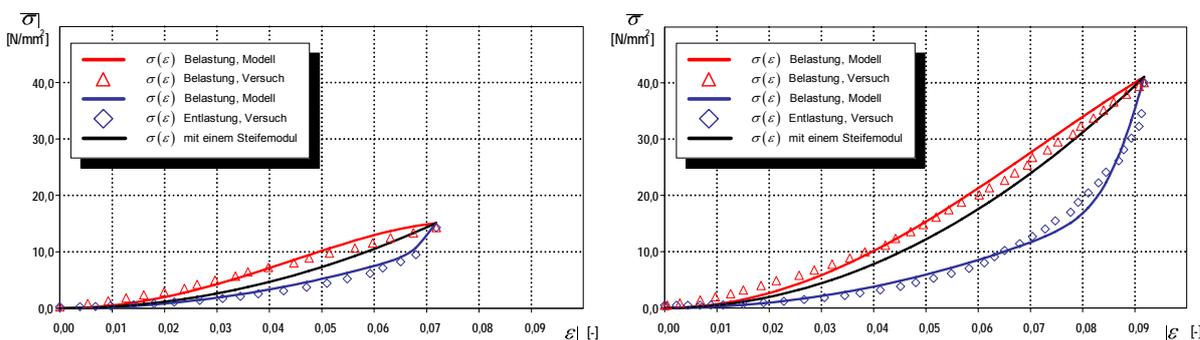


Bild 3.7: Spannungs-Dehnungsbeziehung im vorkonditionierten Zustand:
 Holzwerkstoff-Prüfkörper, vorkonditioniert auf 15 % (links),
 Holzwerkstoff-Prüfkörper, vorkonditioniert auf 35 % (rechts)

Für die Aufstellung der Spannungsfunktionen werden die Belastungs- und Entlastungspfade aus den Belastungsschleifen (Vorkonditionierungsstufen)

betrachtet. Die Versuchsdaten einer Vorkonditionierungsstufe werden einer Regressionsroutine unterzogen. Die Parameter der Spannungsfunktionen nach Gleichung (3.2) und (3.3) werden dadurch an die Versuchsdaten angepasst.

Exemplarisch ist im Bild 3.7 (links) eine Approximation der Spannungs-Dehnungs-Linie für eine Holzwerkstoffprobe für die Vorkonditionierungsstufe von 15 % dargestellt. Zum Vergleich ist im Bild 3.7 (rechts) die Spannungs-Dehnungs-Linie für die Vorkonditionierungsstufe von 35 % abgebildet. Eine direkte Gegenüberstellung von Experimentdaten und Modellrechnungen zeigt, dass es durch die Wahl geeigneter Materialparameter gelungen ist, eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment zu erreichen. Bei der Bestimmung der Spannungsfunktionen zu den übrigen Vorkonditionierungsstufen wird analog vorgegangen.

Mit der hier aufgezeigten Methode lassen sich die Spannungsfunktionen für das visko-elastische Materialverhalten der Holzwerkstoffe für die einzelnen Vorkonditionierungsstufen aus den Versuchsdaten separat aufstellen.

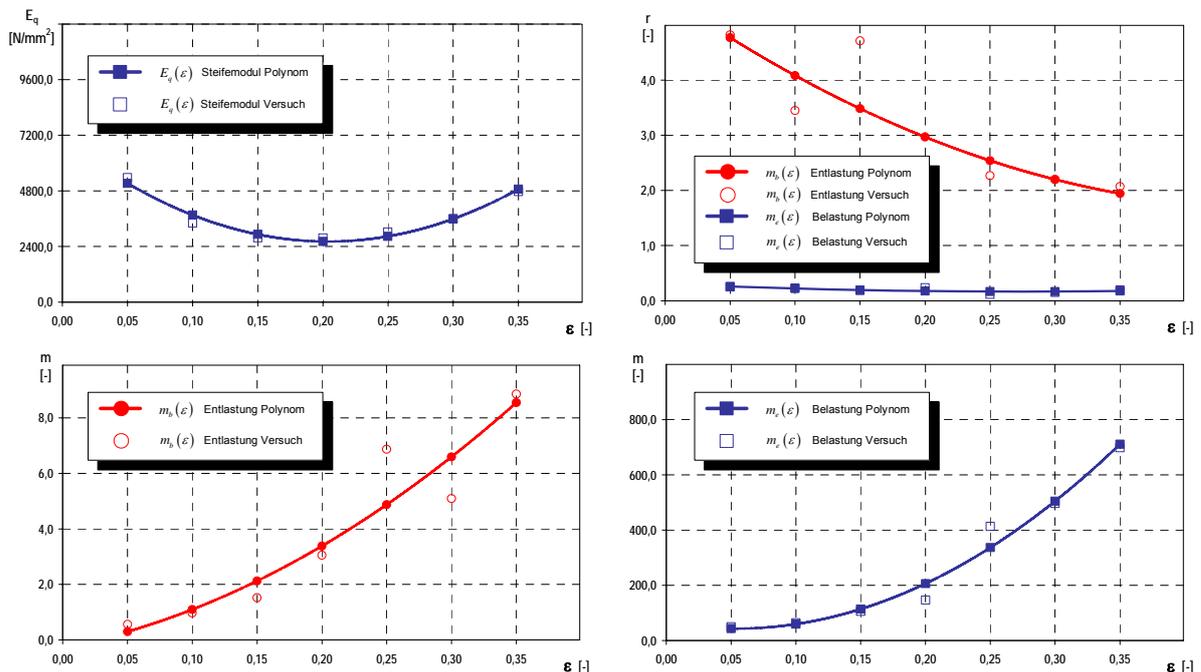


Bild 3.8: Spannungs-Dehnungsbeziehung im vorkonditionierten Zustand; Materialparameter

Um eine anwendungsorientierte Berechnungsmethode zur Bestimmung des Spannungszustandes im gesamten Stauchungsspektrum zu formulieren, werden die Funktionsparameter E_q , r und m über die jeweiligen Vorkonditionierungsstufen

aufgetragen. Im Bild 3.8 sind die Verläufe der Parameter für die Spannungsfunktionen in einem breiten Stauchungsbereich dargestellt. Die funktionalen Zusammenhänge sind hierbei deutlich erkennbar. Die Ergebnisse zeigen, dass die Parameter der Spannungsfunktionen über den Stauchungsbereich polynomisch dargestellt werden können. Die funktionalen Abhängigkeiten der Materialparameter für Holzwerkstoffe lassen sich generell mit Polynomen zweiten Grades abbilden.

3.3.3 Numerische Ergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Holzwerkstoffen durchgeführt. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden allgemeine empirische Ansätze formuliert, um die komplexen mechanisch-physikalischen Prozesse eines visko-elasto-plastischen Werkstoffes im gesamten, breiten Stauchungsbereich realitätsnah zu beschreiben. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden die Experimentdaten statistisch ausgewertet, um die Modellparameter in Abhängigkeit von der Materialstauchung zu bestimmen.

Zur Überprüfung des neuen Werkstoffmodells wird ein zyklischer Druckversuch an zwei Holzwerkstoffproben mit einer Materialstärke von 10,0 mm und 22,0 mm simuliert. Im Bild 3.9 sind die Versuchsdaten und die Ergebnisse der Simulationsrechnung gegenübergestellt.

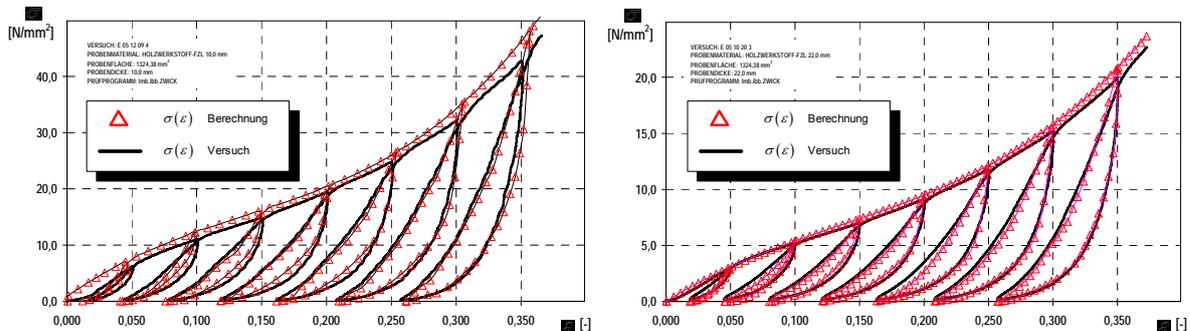


Bild 3.9: Simulation einer Wechsel-Druck-Beanspruchung:
 Versuchsdaten und Simulationsberechnung, Materialprobe 10,0 mm (links),
 Versuchsdaten und Simulationsberechnung, Materialprobe 22,0 mm (rechts)

Die gute Übereinstimmung der Versuchs- und Berechnungsergebnisse bestätigen das neu entwickelte Materialmodell. Das Ergebnis zeigt eine gute Abbildungsqualität der Spannungsapproximation im gesamten Stauchungsbereich. Durch Annahmen und Vereinfachungen ist es nicht ganz gelungen, die Materialparameter exakt abzubilden. Die Abweichungen zwischen Modellrechnungen und Experimentdaten sind im Bereich der kleinen Stauchungen noch relativ groß. Im Bereich der großen

Stauchungen allerdings sind die Spannungs-Dehnungs-Linien aus Modell und Experiment nahezu identisch.

Durch eine geeignete Wahl von Spannungsfunktionen und Versteifungsfunktionen, die das Versteifen des Holzwerkstoffes unter einer Druckbeanspruchung auf dem Be- und Entlastungspfad im vorkonditionierten Zustand berücksichtigen, gelingt es, das Druckverhalten des Holzwerkstoffes abzubilden. Hierzu werden die Werkstoffkennwerte so ermittelt, dass die Spannungs-Dehnungs-Beziehung bestmöglich wiedergegeben werden kann.

4 Untersuchungen in situ

4.1 Kanalbaumaßnahme Köln - Niehl - Industriegebiet

Im Rahmen einer Kanalbaumaßnahme im Zuge des Neubaus der Niederschlagswasserkanäle im Köln - Niehler Industriegebiet wurde ein Kanalnetz mit einer Gesamtlänge von ca. 800,0 m in geschlossener Bauweise erstellt. Im ersten Abschnitt der Baumaßnahme wurden 5 Haltungen mit einer Nennweite DN 1000 im Rohrvortrieb aufgefahren. Vorgetrieben wurden 3,0 m lange Stahlbetonrohre mit einem Außendurchmesser von 1490 mm. Zum Ausgleich von Rohrspiegelunebenheiten und zur Vergrößerung der lastübertragenden Fläche bei Rohrverwinkelungen wurden Holzwerkstoffringe mit einer Materialstärke von 22,0 mm verwendet.



Bild 4.1: Pressgrube mit Spundwandverbau, Maschinenrohr AVN 1200, Herrenknecht AG (links), Stahlbetonvortriebsrohre mit Fugenzwischenlagen und Verrollungssicherungshülsen (rechts)

Die von einem Ingenieurbüro aufgestellte Rohrstatik ergab eine zulässige Vorpresskraft für Rohre DN/DA 1000/1490 von 6924 kN (692,4 to) für eine geradlinig geplante Gradienten. Für eine horizontal gekrümmte Gradienten mit einem Radius von 300,0 m betrug die rechnerisch ermittelte Vorpresskraft 3743 kN (374,3 to). Für die Nachweise der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Vortriebsrohre in diesem Bauabschnitt wurde die maßgebende Erdüberdeckung zu 10,47 m angenommen.

Im zweiten Bauabschnitt wurden 3 Haltungen mit einer Nennweite DN 1200 mit dem Rohrvortriebsverfahren aufgefahren. Vorgepresst wurden hier Stahlbetonrohre mit einem Außendurchmesser 1720 mm und einer Länge von 3,0 m. Als Druckübertragungsmittel kamen ebenfalls Holzwerkstoffringe mit einer Materialstärke von 22,0 mm zum Einsatz. Für den Lastfall Vorpressen wurde rechnerisch für die

Druckbeanspruchungen in Längsrichtung eine zulässige Vorpressekraft von 9950 kN (995,0 to) ermittelt. Anders als im ersten Bauabschnitt wurden hier die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Rohre bei einer Erdüberdeckungshöhe über dem Rohrscheitel von 8,50 m nachgewiesen.

Tabelle 4.1: Rohrvortrieb, Kanalbaumaßnahme Köln - Niehl - Industriegebiet

Nr.	Vortriebsabschnitt		Rohre		Gradiente			
	Startschacht	Zielschacht	DN/DA	Länge	Kurvenbeginn	Kurvenende	Radius	Länge
1	R2 Süd	VBW Süd	1000 / 1490	3,00 m	--	--	∞	118,30 m
2	R5 Süd	VBW Süd	1000 / 1490	3,00 m	57,29 m	97,51 m	300,0 m	97,51 m
3	R5 Süd	R7 Süd	1000 / 1490	3,00 m	--	--	∞	86,06 m
4	R9 Süd	R7 Süd	1000 / 1490	3,00 m	--	--	∞	105,81 m
5	R9 Süd	ABW Süd	1000 / 1490	3,00 m	--	--	∞	99,36 m
6	R11 Nord	VBW Nord	1200 / 1720	3,00 m	50,99 m	115,11 m	535,43 m	115,11 m
7	R11 Nord	ABW Nord	1200 / 1720	3,00 m	--	--	∞	145,89 m
8	ABW Süd	VBW Nord	1200 / 1720	3,00 m	--	--	∞	43,60 m

Planungsdaten zu den im Rahmen der Baumaßnahme erstellten Vortriebsstrecken sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt. Für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben wurden Daten aus diesen Rohrvortrieben zur Verfügung gestellt.

4.1.1 Vortriebsstrecke: R5 Süd - VBW Süd

Die Vortriebsstrecke hatte eine Länge von 97,51 m und führte von Startschacht **R5 Süd** bis Zielschacht **VBW Süd**, siehe Bild 4.2. Der Vortrieb mit einer Rohrennweite DN 1000 verlief von der Pressgrube aus bis zum Zwischenschacht **R4 Süd** (Station 57,29 m) planmäßig gerade.

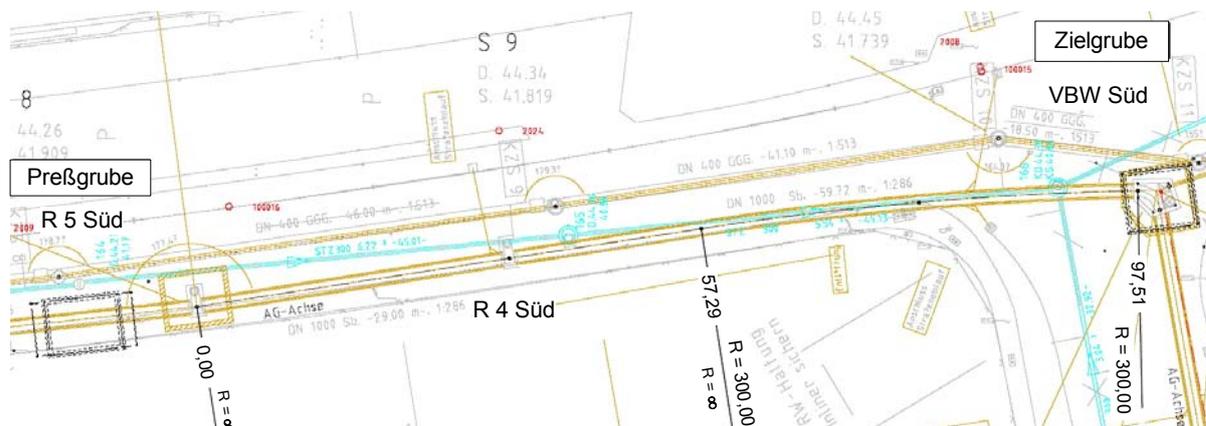


Bild 4.2: Vortriebsstrecke R5 Süd - VBW Süd, Trassenverlauf:
Länge 97,51 m, Soll-Steigung 0,350 %, Krümmungsradius der Kurve 300,0 m

An der Station 57,29 m beginnend bis zur Station 97,51 m wurde eine Rechtskurve mit einem Krümmungsradius von 300,0 m in der horizontalen Ebene aufgeföhren. In der vertikalen Ebene wurde eine Soll-Steigung von 0,350 % mit geringen Abweichungen durchgehend eingehalten.

Abweichend von der Vermessungsskizze, siehe Bild 4.2, wurde die Stationierung von der Innenkante des Pressgrubenverbaus gemessen. Im Vermessungsplan entspricht die Station 0,00 m der Pressgrubenmitte. Daraus ergab sich im Pressprotokoll eine Stationsabweichung von 3,18 m gegenüber dem Vermessungsplan.

4.1.2 Vortriebsstrecke: R 11 Nord - VBW Nord

Die Vortriebsstrecke hatte eine Länge von 115,11 m und führte, wie im Bild 4.3 dargestellt, vom Startschacht **R11 Nord** bis zum Zielschacht **VBW Nord**. Die Haltung DN 1200 verlief von der Pressgrube mit einer Soll-Steigung von 0,406 % bis zum Zwischenschacht **R10 Nord** (Station 50,99 m) mit nur geringen Abweichungen von der Laser-Soll-Achse weitestgehend gerade. Bei Station 50,99 m ging die Vortriebstrasse in eine Rechtskurve über. Am Zwischenschacht **R10 Nord** beginnend bis zur Zielgrube **VBW Nord** (Station 115,11 m) wurde eine Kurve mit einem Krümmungsradius von 535,43 m in der horizontalen Ebene aufgeföhren.

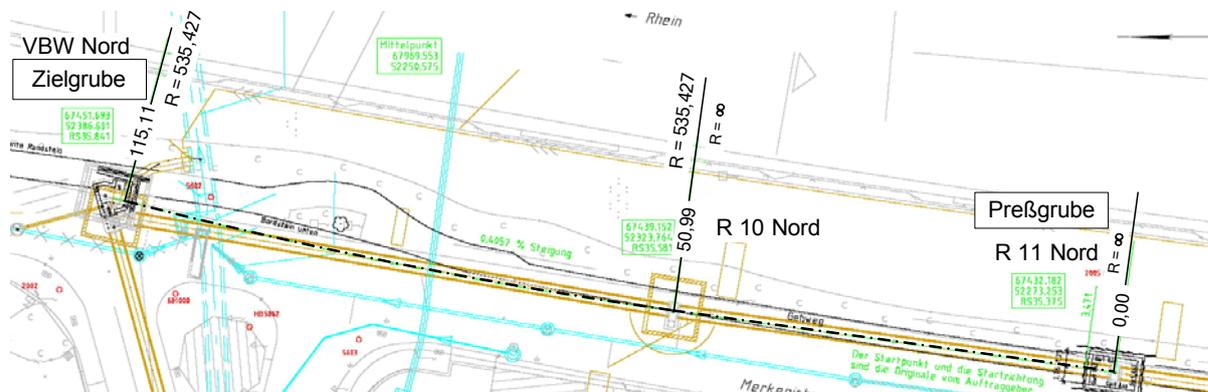


Bild 4.3: Vortriebsstrecke R11 Nord - VBW Nord, Trassenverlauf:
Länge 115,11 m, Soll-Steigung 0,406 %, Krümmungsradius der Kurve 535,4 m

In der vertikalen Ebene wurde eine Steigung von 0,406 % mit geringen Abweichungen vom Soll eingehalten. Die Aufzeichnung der Stationierung erfolgte von der Innenkante des Grubenverbaus, dadurch ergab sich im Pressprotokoll eine Stationsverschiebung von 3,23 m gegenüber dem Vermessungsplan, siehe Bild 4.3.

4.2 Vortriebsbegleitende Messungen

4.2.1 Geodätische Vermessung

Voraussetzung für die planmäßige Ausführung einer Vortriebsstrecke ist die Kenntnis über die momentane Position des Vortriebsschildes im dreidimensionalen Raum. Für das Einleiten von Steuerbewegungen sind außerdem Daten über die Neigungs-, Gier- und Verrollungswinkel des Maschinenrohres erforderlich, siehe Bild 4.4 (links). Die Informationen über die Raumlage der Vortriebsmaschine werden bezogen auf die Stationierung des Vortriebs prozessorgesteuert aufbereitet und protokolliert. Die elektronische Lagedatenerfassung mit Hilfe von Steuerrechnern ist heute Stand der Technik bei den ferngesteuerten Rohrvortrieben [10],[11].

Bei geradlinig geplanten Rohrvortrieben von bis zu 300 m Länge kann eine rechnergestützte Vermessung der Vortriebsmaschine mit Hilfe von Richtlasern vorgenommen werden, Bild 4.4 (Mitte).



Bild 4.4: Geodätische Vermessung beim Rohrvortrieb:
 Freiheitsgrade der Bewegung eines Maschinenrohres (links),
 Richtlaser und aktive Zieltafel, ELS-Vermessungssystem (Quelle: Herrenknecht AG) (Mitte),
 Lasertheodolit, SLS-RV Vermessungssystem (Quelle: VMT GmbH) (rechts)

Ein Laserstrahl, der einer Soll-Achse entspricht, trifft dabei auf eine mit einem dichten Raster von Fotodioden bestückte Zieltafel (aktive Zieltafel, ELS¹). Die Position des Laserpunktes auf der Zieltafel wird digital erfasst und über Datenleitungen zum Steuerrechner übergeben. Die Positionsdaten als Abweichungen der Zieltafel von der Laser-Soll-Achse werden auf dem Bildschirm des Steuerrechners digital und graphisch dargestellt. So ist ein Vergleich zwischen der Ist- und der Soll-Lage

¹ Elektronisches Lasersystem; Vermessung beim Rohrvortrieb

möglich. Bei diesem Vermessungsverfahren ist die Erfassung und Auswertung der Verrollungswinkel zur Kompensierung der Verrollung mittels Inklinometer erforderlich.

Bei Vortrieben, bei denen die konventionelle Vermessung mit dem Richtlaser aus dem Startschacht heraus nicht mehr möglich ist, weil entweder die Entfernung zwischen dem Laser und der Zieltafel zu groß wird oder durch Krümmungen die Sichtverbindung zur Zieltafel unterbrochen wird, findet die Vermessung beispielsweise mit Servo-Totalstationen statt. Bei der Servo-Totalstation handelt es sich um einen Lasertheodolit, der üblicherweise zur automatischen Winkel und Streckenmessung eingesetzt wird, Bild 4.4 (rechts). Die Vermessung erfolgt dabei nach dem Polygonzugverfahren, das auch im SLS-RV² Vermessungssystem implementiert ist.

Wird die Sichtverbindung zur aktiven Zieltafel unterbrochen, muss der Lasertheodolit im beweglichen Rohrstrang installiert werden. Diese mitfahrende Totalstation orientiert sich automatisch zeit- oder weggesteuert am Anschlussprisma im Startschacht. Rechnergesteuert wird dann die Position des Referenzrohres, in dem sich der Lasertheodolit befindet, bestimmt. Im Anschluss dreht sich das Fernrohr des Lasertheodolits in Richtung der Zieltafel. Das ELS-Vermessungssystem ermittelt dann die relative Position der Maschine. Die Lagekoordinaten des Referenzrohres und die Daten des ELS werden nach dem Polygonzugverfahren überlagert. So ist die kontinuierliche Lagevermessung des Vortriebsschildes möglich.

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit werden weitere Referenzmessungen mit Hilfe von so genannten Stützprismen durchgeführt. Die eventuellen Abweichungen zwischen den gemessenen Koordinaten des Referenzrohres und der berechneten Positionsdaten der Vortriebsmaschine an den jeweiligen Stationen können so erfasst und kompensiert werden. Die Verrollungen des Referenzrohres, der Stützprismen und der Zieltafel werden wie beim ELS-Vermessungssystem mittels Inklinometern erfasst.

Die Messung der von der Vortriebsmaschine zurückgelegten Vortriebsstrecke (die Längenvermessung) wird im Rohrvortrieb mit dem elektronischen Messrad (Wegaufnehmer) vorgenommen. Das Messrad wird dafür direkt an der Einfahrtöffnung über dem Scheitel des Vortriebsrohres fest montiert. Der

² Steuerleitsystem Rohrvortrieb; Industrievermessung, Tunnelbau - VMT GmbH

Inkrementalgeber des Messrades erzeugt elektrische Impulse, die von einem Controller gezählt und ausgewertet werden.

4.2.2 Messtechnik zur Verwinklungsmessung

Zur Messung und Kontrolle der an den Rohrkontaktstellen auftretenden Verwinklungen werden neben den beim Vortrieb üblicherweise aufgezeichneten Vermessungsdaten auch die relativen Fugenwege an ausgesuchten Rohrfugen, im Weiteren Messfugen genannt, gemessen. Die Messfugen wurden zu diesem Zweck mit einer Wegsensoren ausgestattet.

Das Messkonzept sah die Anordnung von zwei Messfugen im Verlauf des Rohrstrangs vor. Die erste Messfuge befand sich zwischen dem zweiten und dritten Vortriebsrohr direkt hinter der Vortriebsmaschine. Die zweite Messfuge war zwischen dem fünften und sechsten Vortriebsrohr angeordnet. Die Anordnung der Messfugen im Rohrstrang ist im Bild 4.5 dargestellt.

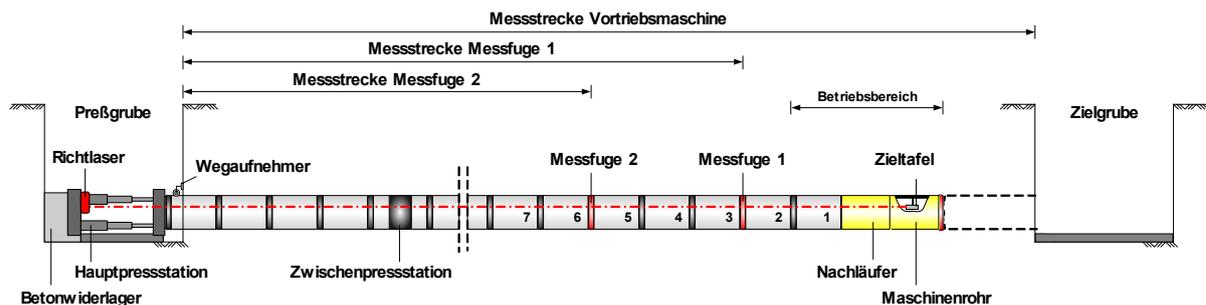


Bild 4.5: Anordnung der Messtechnik im Rohrstrang

Zur Messung der Fugenwege wurden an jeder Messfuge vier Wegsensoren über den Umfang des Rohrquerschnitts verteilt angeordnet. Die Wegsensoren waren jeweils bei 45° , 135° , 225° und 315° positioniert. An den Messfugen zur Ermittlung der Rohrverwinklung wurden mit drei Wegsensoren die relativen Fugenwege der Rohrstirnflächen zueinander kontinuierlich und zeitgesteuert gemessen.

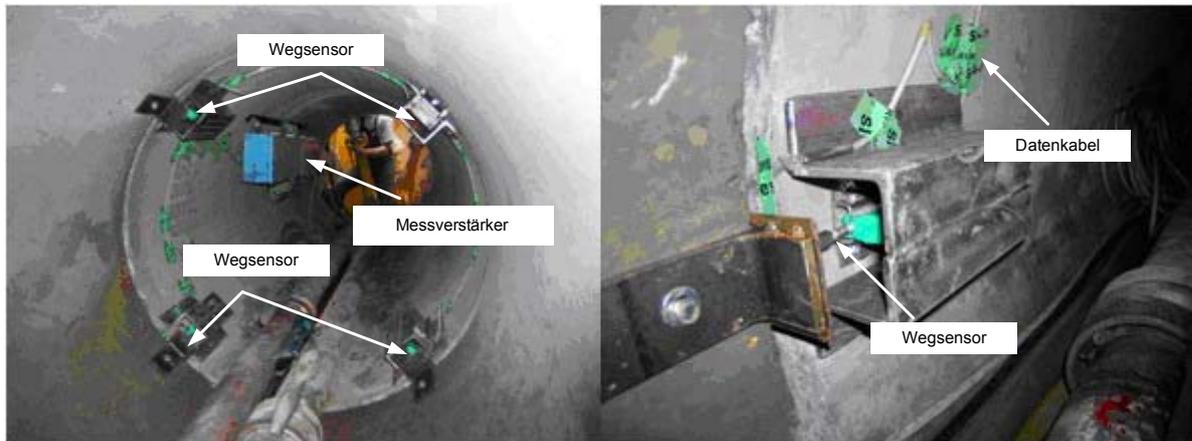


Bild 4.6: Messtechnik in einer Messfuge:
Fugenwegsensoren und Messverstärker in einer Messfuge (links),
Wegsensor mit einem Abstandsgeber und Schutzvorrichtung (rechts)

Über drei Fugenwege wurden im dreidimensionalen Raum Rohrspiegelebenen aufgespannt und Verwinkelungen in den horizontalen und vertikalen Ebenen sowie die resultierende räumliche Verwinkelung ermittelt. Der redundante vierte Wegsensor wurde zur Erhöhung der Messsicherheit und -genauigkeit eingesetzt und zur Soll-Ist-Vergleichsrechnung fortdauernd herangezogen.

Die Direkte Verwinkelungsmessung sollte zunächst einmal Aufschluss über die Größenordnung der auftretenden Rohrverwinkelungen während des Vortriebs geben. Außerdem sollte eine mögliche Kongruenz der berechneten und gemessenen Verwinkelungen untersucht werden. Folgerichtig sollte über einen direkten Vergleich der aus Vermessungsdaten bestimmten und der direkt gemessenen Verwinkelungen das am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb entwickelte Berechnungsverfahren verifiziert und möglicherweise modifiziert werden.

4.3 Theoretische Grundlagen

Aus funktionellen Gründen sind bei Rohrvortrieben stets vorgegebene geometrische Toleranzen einzuhalten. Eventuell erforderliche Richtungskorrekturen werden durch Einleitung von Steuerungen der Vortriebsmaschine ausgeführt. Außerdem sind Steuerungen der Vortriebsmaschine beim Durchfahren von planmäßigen Bogentrassen unumgänglich.

Beim steuerbaren Rohrvortrieb folgt der gesamte Rohrstrang wie eine Gelenkkette durch den vom Abbauwerkzeug der Tunnelvortriebsmaschine erzeugten Hohlraum. Verfahrensbedingt wird der von der Vortriebsmaschine zurückgelegte Weg zur Trasse und Gradienten der zu erstellenden Haltung. Die endgültige Lage und

Verlegungsqualität der nachfolgenden Rohrtour wird zwangsläufig durch die Steuerungsqualität der Vortriebsanlage und der Vortriebsmannschaft bestimmt.

Die zulässigen Grenzen für vertikale und horizontale Abweichungen des Vortriebsschildes von der Soll-Achse sind aus betriebstechnischen Gesichtspunkten festgelegt. Besonders hohe Anforderungen an die Verlegungsqualität werden bei der Erstellung von Abwasserkanälen als Freigefälleleitungen gestellt. Es sind die maximal zulässigen Abweichungen nach ATV A 125 einzuhalten [1]³.

Bei größeren Abweichungen und vor allem bei häufigen Steuerbewegungen der Tunnelvortriebsmaschine kann es dazu kommen, dass enge Kurven aufgefahren werden, die die Belastbarkeit der Vortriebsrohre in Längsrichtung beeinträchtigen. Abrupte Richtungswechsel und Steuerkorrekturen verursachen große Verwinkelungen der Vortriebsrohre in den Kontaktfugen und führen zur Bildung von Lastspitzen im Rohrspiegelbereich, die die Vortriebsrohre nachhaltig beschädigen können.

Im Folgenden wird ein Berechnungsansatz vorgestellt, mit dem die Rohrverwinkelungen in den Kontaktfugen computergestützt und vortriebsbegleitend berechnet werden können.

4.3.1 Berechnung der Verwinkelungen aus Vermessungsdaten

Zunächst wird angenommen, dass die Vortriebsrohre dem von der Tunnelvortriebsmaschine erzeugten Hohlraum exakt folgen, wobei der Gradienten- und Trassenverlauf hinter dem Maschinenrohr über die gesamte Vortriebsdauer unverändert bleibt. Dies erlaubt die Aussage, dass sich die räumliche Lage der Rohre an den jeweiligen Stationen durch das Nachschieben des Rohrstranges nicht ändert. Weiter wird angenommen, dass sowohl der Trassen- als auch der Gradientenverlauf des Rohrstranges eine stetige und zumindest einmal stetig differenzierbare Funktion darstellen.

³ Vgl. ATV Arbeitsblatt A 125, S. 18, Tabelle 11

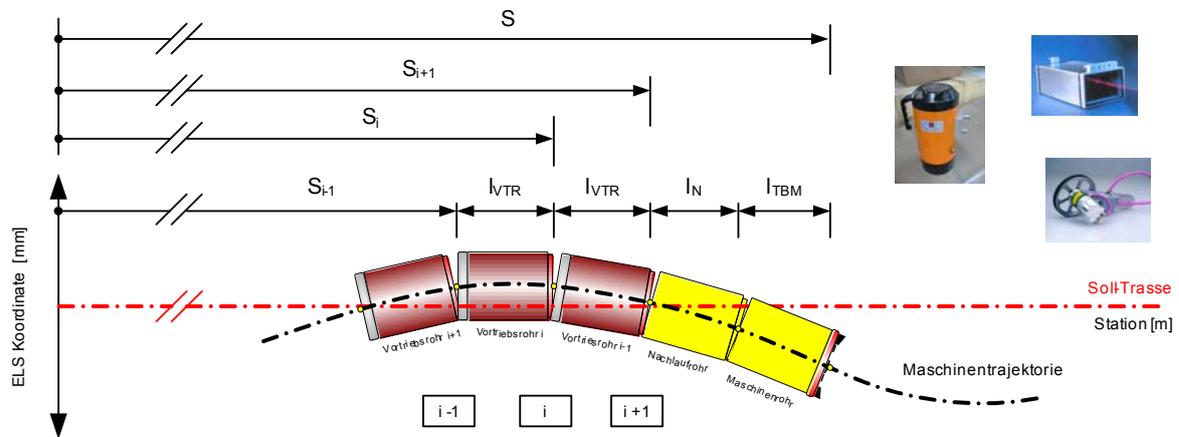


Bild 4.7: Maschinentrajektorie, Ablage der Maschine von der Soll-Achse

Im Bild 4.7 ist schematisch die Maschinentrajektorie und der Verlauf des Rohrstranges hinter dem Vortriebsschild dargestellt. Die Positionen der Kontaktfugen können aus der bekannten Stationierung des Wegaufnehmers zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden.

$$S_i = S - l_{TBM} - l_N - n \cdot l_{VTR} \quad (4.1)$$

Vernachlässigt man die Längenänderung infolge Schiefstellungen bei kleinen Winkeln, kann die Station der Kontaktfuge, an der die Verwinkelung der Rohre bestimmt werden soll, nach Gleichung (4.1) berechnet werden.

Die Stationierungen der Kontaktfugen am Spitzenende des voreilenden Rohres S_{i+1} und am Muffenende des nachlaufenden Rohres S_{i+1} können durch Addieren und Subtrahieren der Rohrlänge im Bezug auf S_i ermittelt werden.

$$S_{i+1} = S_i - l_{VTR} \quad (4.2)$$

$$S_{i-1} = S_i + l_{VTR} \quad (4.3)$$

Die Fahrt, die eine Vortriebsmaschine zurücklegt, wird als räumlich gekrümmte Trajektorie durch ihre Ablagen zur Soll-Linie in horizontalen und vertikalen Ebenen an jeweiligen Stationen des Vortriebes beschrieben. Abweichungen $[S, f_h]$ und $[S, f_v]$ liegen in Form von Datenreihen vor und können jederzeit abgerufen werden. Diese Daten bilden die Grundlage zur Bestimmung der Verwinkelungen der Rohre an den Kontaktfugen.

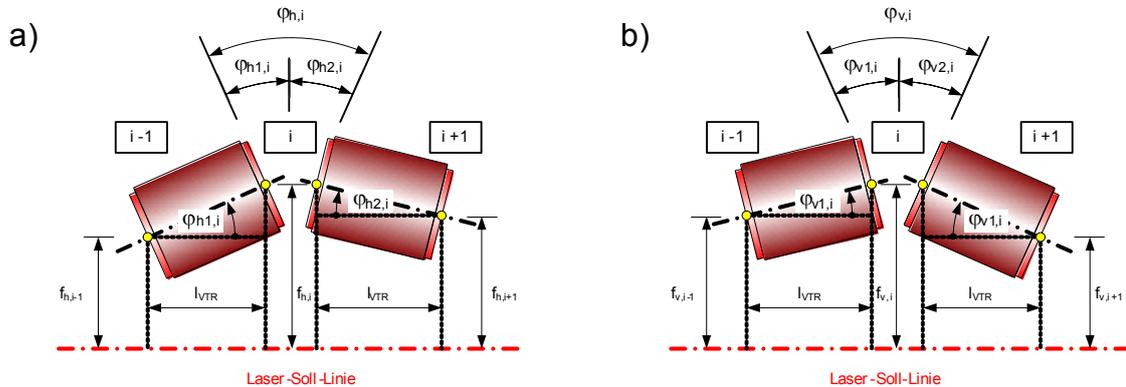


Bild 4.8: Abweichungen und Rohrverwinklung in der horizontalen Ebene, a),
Abweichungen und Rohrverwinklung in der vertikalen Ebene, b)

Im Bild 4.8 ist ein verwinkeltes Rohrpaar aus dem Rohrstrang hinter der Vortriebsmaschine abgebildet. Die Abweichungen der Vortriebsmaschine von der Soll-Achse bzw. die Verwinklungen in der Rohrfuge sind zur Verdeutlichung der Problematik übertrieben groß dargestellt.

$$\varphi_{h,i}(S_i) = \varphi_{h1,i}(S_i) + \varphi_{h2,i}(S_i) = \frac{2 \cdot f_{h,i}(S_i) - (f_{h,i+1}(S_{i+1}) + f_{h,i-1}(S_{i-1}))}{l_{VTR}} \quad (4.4)$$

$$\varphi_{v,i}(S_i) = \varphi_{v1,i}(S_i) + \varphi_{v2,i}(S_i) = \frac{2 \cdot f_{v,i}(S_i) - (f_{v,i+1}(S_{i+1}) + f_{v,i-1}(S_{i-1}))}{l_{VTR}} \quad (4.5)$$

Die Verwinklung in der horizontalen und vertikalen Betrachtung berechnen sich für kleine Winkel aus der Dreiecksbeziehung, (4.4) und (4.5).

Das Maximum der Abweichung des Vortriebsschildes von der Soll-Linie muss nicht zwangsläufig in der vertikalen oder horizontalen Ebene auftreten. Die absolute maximale Abweichung und folglich auch die absolute maximale Verwinklung an der Rohrkontaktfuge können für kleine Winkel nach Gleichung (4.6) im Raum bestimmt werden.

$$\varphi_{max,i}(S_i) = \sqrt{\varphi_{h,i}^2(S_i) + \varphi_{v,i}^2(S_i)} \quad (4.6)$$

Die zuvor getroffenen Annahmen und Vereinfachungen, die die Ermittlung der Verwinklungen aus Vermessungsdaten des Vortriebsschildes ermöglichen, treffen nur selten zu. Verschiedene vermessungstechnische und bautechnologische Einflüsse haben große Auswirkungen auf die Genauigkeit der Vortriebsvermessung. Die Unsicherheiten bei der stationsbezogenen Bestimmung der räumlichen Lage der

Vortriebsmaschine haben auch Auswirkungen auf die Rechengenauigkeit bei der vortriebsbegleitenden Bestimmung der Rohrverwinkelungen.

4.3.2 Vermessungstechnische und Bautechnologische Einflüsse

Die eigentliche Problematik bei der Ermittlung der räumlichen Lage der Vortriebsmaschine liegt in der Reaktionszeit der Rechenanlage am Steuerstand. Verfahrensbedingt erfolgt die Vermessung des Vortriebsschildes diskontinuierlich in Zeit- oder Streckenabständen. Die dabei erzielbare Messgenauigkeit hängt maßgeblich von der Bauart des Lasers, der Zieltafel und von der Entfernung Laser-Zieltafel ab. Die auf diese Weise ermittelte Maschinentrajektorie stellt im Regelfall keine stetige Funktion dar.

Der Laserstrahl wird beim Rohrvortrieb durch die Luft geführt, wobei das Lichtbündel verschiedene Luftschichten passieren muss. Lokale Veränderungen der mikroklimatischen Bedingungen im Startschacht, im Rohrstrang und im Maschinenrohr führen zur Ablenkung des Lichtstrahls von der Geraden (Refraktion⁴). Hohe Luftfeuchtigkeit, Luftbewegungen und direkte Sonneneinstrahlung im Startschacht können diesen unvermeidbaren Effekt ungünstig verstärken. Luftturbulenzen verursachen außerdem noch das Flimmern des Lichtfleckens auf der Zieltafel. Bedingt durch die ständig wachsende Entfernung wird der Durchmesser des Laserstrahls immer größer, was ebenfalls die Genauigkeit der Messung nachhaltig beeinträchtigt. Demzufolge sind die Daten, die das Vermessungssystem liefert, mit Fehlern behaftet.

Das Maschinenrohr hat im Allgemeinen sechs Bewegungsfreiheitsgrade, vgl. Kapitel 4.2.1. Der Bewegungsfreiraum ist zwar durch den vom Abbauwerkzeug erzeugten Überschneidungsbereich begrenzt, dennoch können schnelle Veränderungen der seitlichen Ablage des Vortriebsschildes in kurzen Zeitintervallen mehrere Zentimeter ausmachen. Diskontinuierlicher Vorschub, Verdrehungen und Verschiebungen beim Bodenabtrag, ständig wechselnde Lagerungsverhältnisse und Steuervorgänge haben Auswirkungen auf die vom Vermessungssystem erfassten Positionsdaten. Die Positionsdaten, die als Grundlage zur Berechnung der räumlichen Lage der Vortriebsrohre und der Rohrverwinkelungen dienen, verändern sich ohne Änderung der eigentlichen Vortriebstrajektorie.

⁴ Refraktion oder Brechung bezeichnet die Richtungsänderung des Lichtstrahls aufgrund einer lokalen Änderung der Lichtausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium, die durch den Brechungsindex beschrieben wird

Die bautechnologischen und vermessungstechnischen Gegebenheiten führen dazu, dass die Rohrverwinkelungen, die allein auf der Basis von Vermessungsdaten der Vortriebsanlage berechnet werden, erhebliche Fehler aufweisen können. Aufgrund grober Zeitauflösung ist die quantitative Erfassung der Fehlerquellen und somit die rechnerische Auswertung der plötzlichen Schildebewegungen nicht möglich. Daher werden im Folgenden Berechnungsansätze vorgestellt, die die Einflüsse der Vermessung und Bautechnologie kompensieren.

4.3.3 Vortriebsbegleitende Kurvenanpassung

Die beim Rohrvortrieb aufgefahrte Maschinentrajektorie wird baubegleitend protokolliert. Sie liegt in Form von Datensätzen (Wertepaare $[\mathbf{S}, \mathbf{f}_h]$ und $[\mathbf{S}, \mathbf{f}_v]$) im Bezug auf die Stationierung der Vortriebsstrecke vor. Die Grundaufgabe der vortriebsbegleitenden Kurvenanpassung im hier betrachteten Anwendungsfall besteht darin, durch eine Reihe von Datenpunkten des Vermessungssystems $[\mathbf{S}, \mathbf{f}_h]$ und $[\mathbf{S}, \mathbf{f}_v]$ eine geeignete Kurve im Form einer stetigen und stetig differenzierbaren Funktion zu legen. Diese Aufgabe kann beispielsweise mit dem mathematischen Verfahren der Approximation gelöst werden.

Die Approximation der Maschinendaten erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt, Approximation im Mittel, wird eine mathematische Funktion als Trend der Maschinenfahrt über die Datenpunkte der Maschinenablagen in horizontalen und vertikalen Ebenen gelegt. Im zweiten Schritt wird die Trendkurve zur genaueren Ermittlung der Lagedaten der Maschine mit speziellen Approximationsfunktionen stückweise überlagert. Im Ergebnis bekommt man für die Trasse und Gradienten jeweils eine stetige und mindestens einmal stetig differenzierbare Funktion, die als Datenbasis für die Ermittlung von Rohrverwinkelungen genutzt werden kann. Dem Verfahren der Approximation liegt die Methode der kleinsten Quadrate zu Grunde.

$$F = \sum_i [f_i - f(S_i)]^2 \quad (4.7)$$

Dabei wird eine Funktion $\mathbf{f}(\mathbf{S})$ gesucht, deren Funktionswerte von den gegebenen Werten aus der Vermessung in dem Sinne möglichst wenig abweichen, dass der quadratische Ausdruck in Gleichung (4.7) minimal wird, und zwar in Abhängigkeit von den Parametern, die die Funktion $\mathbf{f}(\mathbf{S})$ enthält.

$$f_{h,t}(S) = \sum_k^N h_k \cdot S^k, \quad f_{v,t}(S) = \sum_k^N v_k \cdot S^k \quad (4.8)$$

Für die Ermittlung der Trendkurve für die Maschinentrajektorie – Trassen- und Gradientenverlauf – nach der Methode der kleinsten Quadrate bietet sich im betrachteten Anwendungsfall der Ansatz von Polynomen an, Gleichungen (4.8).

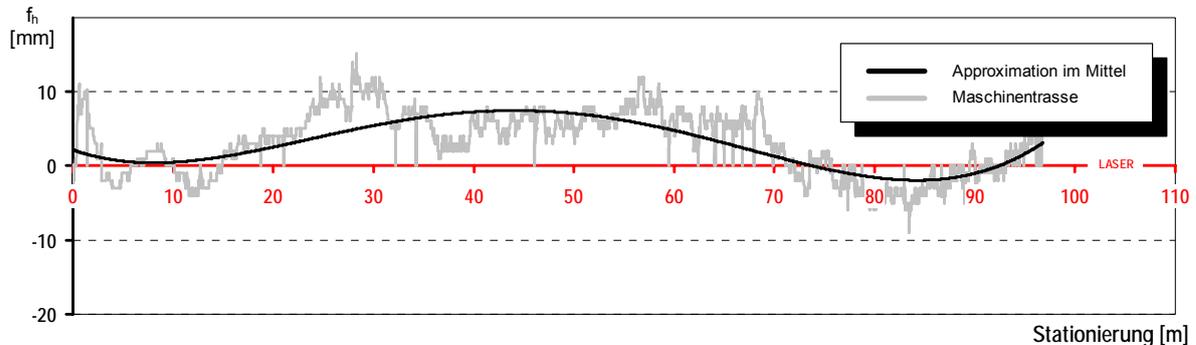


Bild 4.9: Trendlinie für die Trasse der Vortriebsmaschine

Die Parameter der Ansatzfunktionen $f_{h,t}(\mathbf{S})$ und $f_{v,t}(\mathbf{S})$ sind in (4.8) mit \mathbf{h}_k und \mathbf{v}_k gekennzeichnet. Die notwendigen Bedingungen für ein relatives Extremum von (4.7) zur Bestimmung der Funktionsparameter enthalten die Gleichungen in (4.9).

$$\frac{\partial F}{\partial h_k} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial v_k} = 0, \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (4.9)$$

Durch den Einsatz der Gleichungen (4.8) in die Differentialbeziehungen (4.9) erhält man zur Bestimmung der Koeffizienten der Ansatzpolynome ein lineares Gleichungssystem. Das Ergebnis der Approximation im Mittel für die Ablagen der Vortriebsmaschine nach diesem Verfahren am Beispiel einer geradlinig geplanten Trasse ist im Bild 4.9 dargestellt.

Für die genaue Ermittlung von Verwinkelungen der Vortriebsrohre im Vortriebsverlauf ist die Abschätzung der Trendkurve oft nicht ausreichend. Aufgrund der häufigen Steuerungen erfährt die Maschinentrajektorie ständige Krümmungswechsel, die mit einer Trendfunktion in Form von Polynomen nicht mehr im gesamten Vortriebsverlauf abgebildet werden können. Daher wird an dieser Stelle eine Methode vorgestellt, die mit Hilfe von speziellen Approximationsfunktionen eine stückweise Approximation der Trassen- bzw. Gradientenverläufe erlaubt.

Die Vortriebsmaschine durchfährt infolge von Korrektursteuerungen einen oszillierenden Trassenverlauf, Bild 4.10. Das gilt auch für die Maschinenfahrt in der Vertikalen (Gradientenverlauf). Die amplitudenartigen Bewegungen, die vom Vortriebschild ausgeführt werden, unterliegen bestimmten Gesetzmäßigkeiten.

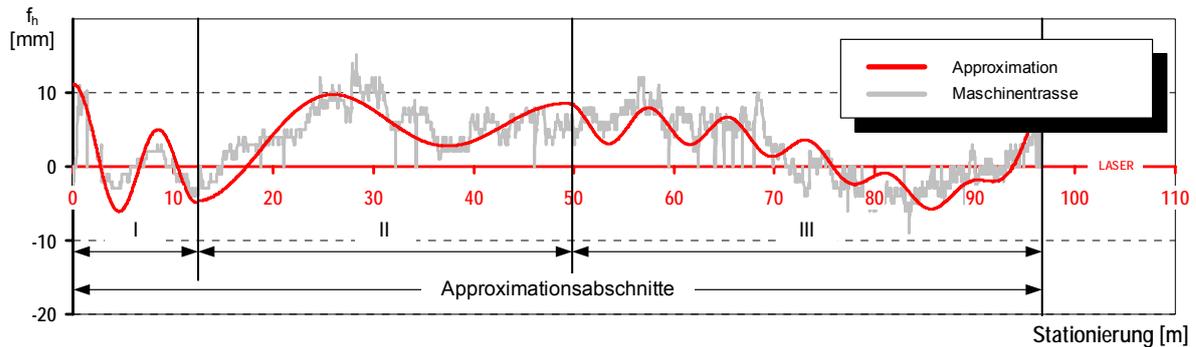


Bild 4.10: Abschnittsweise Approximation für die Trasse der Vortriebsmaschine

Die Abweichungen der Vortriebsmaschine liegen oberhalb und unterhalb der Trendkurve und wiederholen sich in bestimmten Abständen. Die Betrachtung der im Bild 4.10 dargestellten Maschinentrasse lässt darauf schließen, dass die Streckenabstände, in denen die Maschinentrajektorie ihre Extrema erreicht, dem Vielfachen von der Länge des Maschinenrohres entsprechen. Wie lang eine Steuerungsperiode ist, hängt maßgeblich davon ab, wie oft der Maschinenführer Steuerkorrekturen vornehmen muss. Eine Steuerungsperiode kann allerdings nicht kürzer als die Länge des Maschinenrohres werden.

Die Häufigkeit der Korrektursteuerungen hängt von der Steuerbarkeit der Vortriebsmaschine ab. Die Steuerbarkeit ist ihrerseits von der Bauart der Vortriebsmaschine und von den anstehenden Bodenverhältnissen abhängig [11]. Die Amplitude der oszillierenden Bewegungen kann im Vorfeld nicht abgeschätzt werden. Der Betrag der Amplitude kann im Gesamtverlauf der Vortriebsstrecke aber auch in Teilabschnitten sehr unterschiedlich ausfallen. Im Allgemeinen charakterisiert der Betrag der Amplitude die Qualität der Steuerung. Kleine Amplituden stehen für gute Steuerung. Große Amplituden kennzeichnen eine mäßige bzw. schlechte Steuerung.

$$f_{h,a} = \sum \left(k_h \cdot \frac{1}{A} \cdot (S - S_{h0,i}^*)^2 - b_{h,i} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{B} \cdot (S - S_{h0,i}^{**}) \right), \quad k_h = 0 \text{ oder } 1 \quad (4.10)$$

$$f_{v,a} = \sum \left(k_v \cdot \frac{1}{A} \cdot (S - S_{v0,i}^*)^2 - b_{v,i} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{B} \cdot (S - S_{v0,i}^{**}) \right), \quad k_v = 0 \text{ oder } 1 \quad (4.11)$$

Die amplitudenartigen Kurvenverläufe lassen sich qualitativ am besten mit trigonometrischen Funktionen abbilden. Deshalb wird nachfolgend ein

trigonometrischer Ansatz nach den Gleichungen (4.10) und (4.11), jeweils für den Trassen- und Gradientenverlauf vorgeschlagen.

Der Approximationsansatz besteht im Allgemeinen aus zwei Termen (A und B in den Gleichungen (4.10) und (4.11)), die die Form der Approximationsfunktion maßgeblich beeinflussen. Durch eine Sinusfunktion wird der amplitudenartige Verlauf der Maschinentrajektorie infolge Steuerbewegungen abschnittsweise abgebildet. Die Steuerungsperiode kann hierbei mit dem Faktor $n_{h,i}$ für die Trasse und mit dem Faktor $n_{v,i}$ für die Gradiente bestimmt werden. Anfang bzw. Ende des Approximationsabschnittes werden mit $\mathbf{S}_{ho,i}^{**}$ und $\mathbf{S}_{vo,i}^{**}$ definiert.

In jedem Abschnitt wird die Amplitude der Trajektorie mit einer quadratischen Parabel gesteuert. Da beim Erkennen der Abweichung von der Soll-Linie anfangs eine starke Korrektursteuerung eingeleitet wird, sind die Amplituden am Anfang des Abschnittes im Regelfall größer. Wird die Auswirkung der Korrektur spürbar, so versucht man, den Kurs der Maschine beizubehalten. Die Amplitude klingt etappenweise ab, solange bis die nächste starke Korrektursteuerung notwendig wird. Die Stationen $\mathbf{S}_{ho,i}^{*}$ und $\mathbf{S}_{vo,i}^{*}$ kennzeichnen die Extrema der Amplitude im jeweiligen Approximationsabschnitt.

$$f_h = f_{h,t} + f_{h,a} \quad (4.12)$$

$$f_v = f_{v,t} + f_{v,a} \quad (4.13)$$

Die Bestimmung der Koeffizienten für die trigonometrischen Approximationsfunktionen erfolgt analog zur Approximation im Mittel nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Approximation erfolgt hierbei abschnittsweise, so dass an den Abschnittsgrenzen die Stetigkeit und die Differenzierbarkeit der resultierenden Approximationskurve gewährleistet werden muss.

Durch Addition der ermittelten Approximationsfunktionen – Approximation im Mittel und trigonometrische Approximation – bekommt man eine „glatte“ Maschinentrajektorie, die als Datenbasis für die Verwinkelungsberechnung verwendet wird, Gleichungen (4.12) und (4.13).

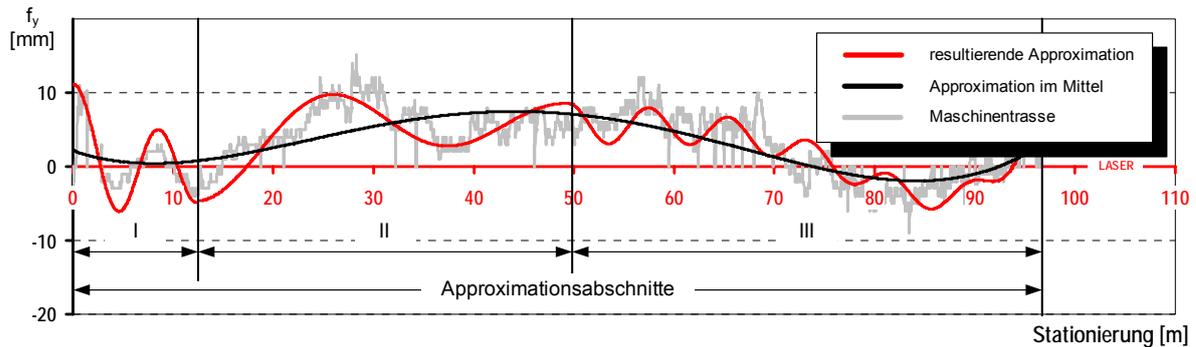


Bild 4.11: Abschnittsweise Approximation für die Trasse der Vortriebsmaschine

Das Ergebnis der Approximation für die Ablagen der Vortriebsmaschine nach dem hier vorgestellten Verfahren am Beispiel einer geradlinig geplanten Vortriebstrasse ist im Bild 4.11 dargestellt.

4.4 Auswertung der vortriebsbegleitenden Messungen

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse resultieren aus den Messungen bei Rohrvortrieben DN 1000 und DN 1200 im Rahmen der Kanalbaumaßnahme zum Neubau und zur Sanierung von Niederschlagswasserkanalisation in Köln - Niehl - Industriegebiet.

4.4.1 Software

Die aufgezeichneten Messdaten wurden mit einer speziell entwickelten Messsoftware auf der Basis von LabView[®] der Firma National Instruments aufbereitet und digital und graphisch dargestellt. Alle von der Steuertechnik der Vortriebsanlage gelieferten Daten, wie die Stationierung, Drücke im Hydraulikkreislauf der Hauptpresstation und Zwischenpresstation, Lage der Maschine im Bezug zur Soll-Achse etc. wurden erfasst und visualisiert. Hinzu stellte die Messsoftware parallel zum Vortrieb die Rohrverwinkelungen an den Messfugen dar.

4.4.2 Rohrverwinkelungen im Vortriebsverlauf

Während der vortriebsbegleitenden Messungen wurden für die Abbildung der Maschinentrajektorie die horizontalen und vertikalen Ablagen der Tunnelvortriebsmaschine von der Soll-Achse aufgenommen. Das Vermessungssystem lieferte die entsprechenden Datensätze weggesteuert in definierten Abständen. Diese Datensätze wurden vortriebsbegleitend aufbereitet. Die Datenauswertung geschah automatisch, die Korrekturen der Soll-Achse mussten gegebenenfalls nach jeder Laserkontrolle übernommen werden.

Weiter wurden an zwei Messfugen im Rohrstrang relative Fugenwege gemessen und dokumentiert. Die Berechnung und Darstellung der Rohrverwinkelungen an den Messfugen geschah in kleinen Zeitabständen, wobei die stationsbezogene Aufzeichnung der Rohrverwinkelungen korrespondierend zum Vermessungssystem weggesteuert erfolgte. Die Messungen sollten zunächst Aufschluss über die Größe der Rohrverwinkelungen während des Vortriebs liefern. Weiter sollte eine mögliche Korrelation zwischen den aus Vermessungsdaten berechneten und an Messfugen gemessenen Rohrverwinkelungen untersucht werden.

4.4.3 Vortriebsstrecke: R5 Süd - VBW Süd

Zur Abbildung der Fahrt der Vortriebsmaschine werden die horizontalen Abweichungen der Vortriebsmaschine bzw. der aktiven Laserzieltafel von der geplanten Trasse auf der Vortriebsstrecke R5 Süd - VBW Süd betrachtet. Bild 4.12 zeigt die horizontalen Ablagen der Vortriebsmaschine von der Soll-Trasse, y-Achse. Die x-Achse stellt die Laser-Soll-Trasse dar.

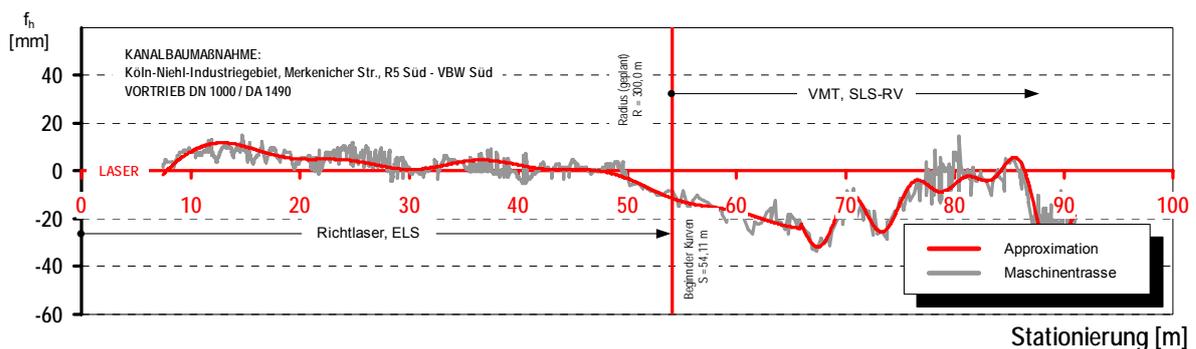


Bild 4.12: Vortriebsstrecke R5 Süd - VBW Süd, Abweichung der Vortriebsmaschine von der Soll-Trasse

Auf den ersten 50,0 m folgt die Vortriebsmaschine mit geringen Abweichungen der geradlinig geplanten Laser-Soll-Trasse. Die kleinen Abweichungen im Vortriebsverlauf deuten auf eine gute Steuerung des Vortriebsschildes hin. Dichtgelagerte Bodenschichten (Sand-Kies-Gemische) begünstigen die Steuerbarkeit des Vortriebsschildes. Die Maschinensteuerung spricht sehr gut an, so dass nur wenige Steuerkorrekturen in größeren Abständen notwendig sind. Die Steuerperioden werden im Bereich der Geraden auf 6,0 m bis 9,0 m geschätzt.

Die Verläufe der Verwinkelungen in der horizontalen Ebene sind im Bild 4.13 dargestellt. Kleine Verwinkelungen in den Rohrfugen im Bereich der Geraden bestätigen die gute Steuerbarkeit der Vortriebsmaschine. Sowohl die gemessenen

als auch die aus Vermessungsdaten berechneten Fugenöffnungswinkel liegen unter $0,1^\circ$.

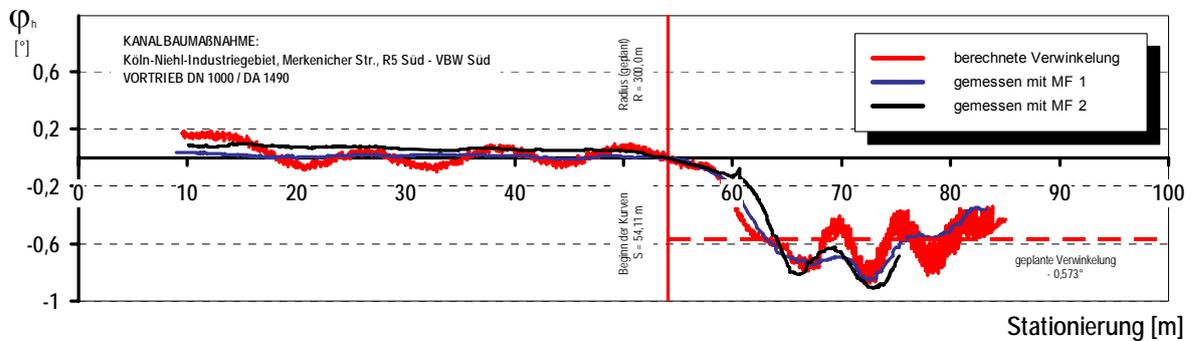


Bild 4.13: Vortriebsstrecke R5 Süd - VBW Süd:
Vergleich der berechneten und gemessenen Verwinklungen in der Horizontalen

Der planmäßige Kurvenbeginn liegt in diesem Vortriebsabschnitt bei 54,11 m. Die Betrachtung der Verwinklungen im Bild 4.13 zeigt deutlich, dass der tatsächlich aufgefahrne Kreisbogen erst mehrere Meter später beginnt. Der Versuch, die geplante Trasse wieder zu erreichen, führt dazu, dass gerade im Bogenanfang eine enge Kurve aufgefahren wird. Die fehlerhafte Steuerung hat im Ergebnis deutlich größere Verwinklungen zur Folge. Die maximale Verwinklung liegt hier bei $0,84^\circ$. Häufige Steuerkorrekturen – die Steuerungsperiode wird mit 3,0 m abgeschätzt – rufen größere Bewegungsamplituden hervor, die im weiteren Verlauf auf Grund der guten Steuerbarkeit wieder schnell abklingen.

Der direkte Vergleich der gemessenen und berechneten Rohrverwinklungen zeigt den eindeutigen qualitativen und quantitativen Zusammenhang zwischen Maschinentrajektorie und Rohrverwinklungen. Die aus Vermessungsdaten ermittelten und die an den Messfugen gemessenen Verwinklungen verlaufen annähernd deckungsgleich. Geringe Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Verwinklungen liegen im Toleranzbereich der Messgenauigkeit der beiden verwendeten Messverfahren (Vortriebsvermessung, Fugenwegmessung).

4.4.4 Vortriebsstrecke: R 11 Nord - VBW Nord

Im Bild 4.14 ist die Fahrt der Vortriebsmaschine in der horizontalen Betrachtung auf der Vortriebsstrecke R 11 Nord - VBW Nord dargestellt. Die Abweichungen von der Soll-Trasse betragen auch hier nur wenige Millimeter. Die aufgezeichneten Vermessungsdaten dokumentieren einen gleichmäßigen Trassenverlauf.

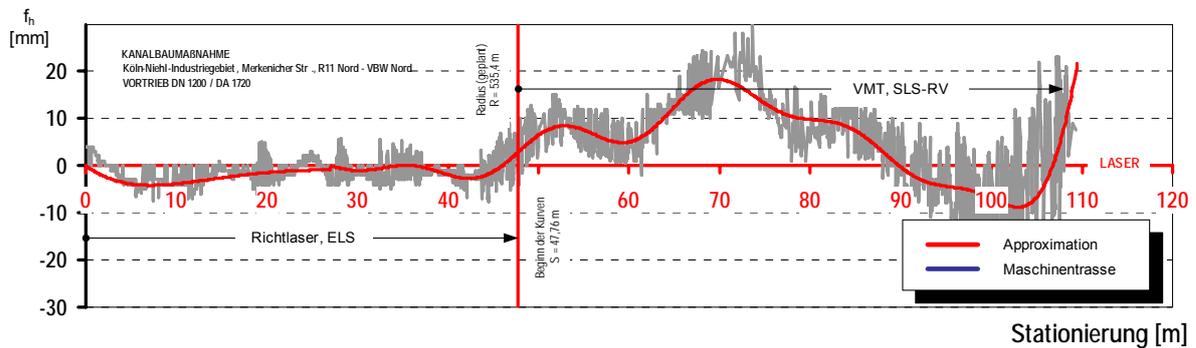


Bild 4.14: Vortriebsstrecke R11 Nord - VBW Nord:
Abweichung der Vortriebsmaschine von der Soll-Trasse in der horizontalen Ebenen

Infolge guter Steuerbarkeit der Vortriebsmaschine wird eine sinusförmige Trasse mit geringen Steuerungsamplituden aufgefahren. Langgestreckte Bögen deuten auf wenige Korrektursteuerungen hin. Die Steuerungsperioden werden auf dieser Vortriebsstrecke auf 9,0 m bis 12,0 m geschätzt.

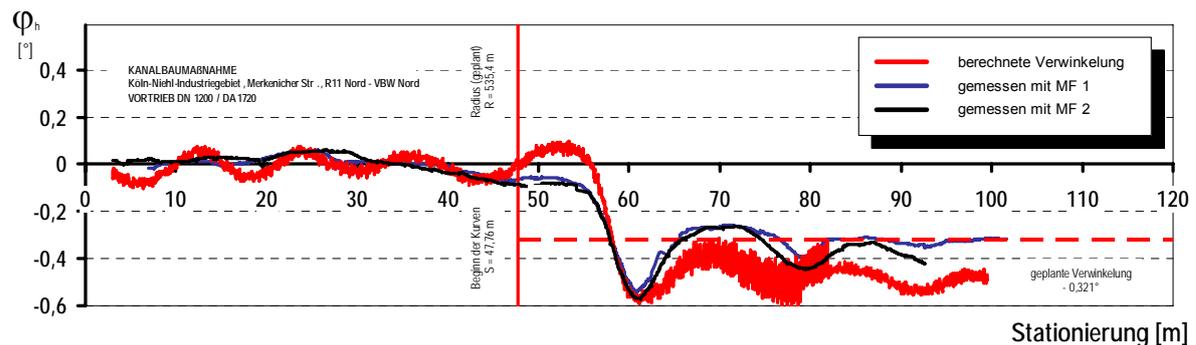


Bild 4.15: Vortriebsstrecke R11 Nord - VBW Nord:
Vergleich der berechneten und gemessenen Verwinklungen in der Horizontalen

Auch die Entwicklung der Rohrverwinklungen im Trassenverlauf belegt eine gute Steuerungsqualität auf dem geradlinig geplanten Vortriebsabschnitt, siehe Bild 4.15. Die mit beiden Messfugen gemessenen Verwinklungen liegen im Rahmen der Messgenauigkeit des Messsystems.

Der Beginn der geplanten Kurve in diesem Vortriebsabschnitt sollte bei der Stationierung 47,76 m liegen. Die Zunahme der Rohrverwinklungen bei der Station 56,20 m im Bild 4.15 zeigt, dass die tatsächlich aufgefahrene Kurve ähnlich wie auf der Strecke R5 Süd - VBW Süd erst später beginnt. Auch hier wird versucht, die planmäßige Trasse einzuhalten. Große Abweichungen vom Soll mit der Notwendigkeit von starken Steuerkorrekturen sind die Folge. Der kleine Kurvenradius

infolge Fehlsteuerung führt zum Anstieg der Verwinkelung am Bogenanfang gegenüber der planmäßigen Verwinkelung um fast 50 %. Die maximale Verwinkelung liegt hier bei ca. 0,6°.

Im Bild 4.15 sind die horizontalen Verwinkelungen der beiden Messfugen und die aus Vermessungsdaten berechneten Verwinkelungen gegenübergestellt. Auch in diesem Vortriebsabschnitt ist eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Werte festzustellen. Die Extremwerte der Rohrfugenverwinkelungen werden an denselben Stationierungen dokumentiert. Die Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Rohrfugenverwinkelungen resultieren hauptsächlich aus der Messungenauigkeit der verwendeten Messverfahren. Vermessungstechnische und bautechnologische Störungen haben direkten Einfluss auf die Qualität der vortriebsbegleitenden Kurvenanpassung und auf die Genauigkeit der Verwinkelungsberechnung.

4.5 Resümee

Die zur Herleitung des Berechnungsansatzes erforderlichen Annahmen sind durch Ergebnisse der vortriebsbegleitenden Messungen in situ im Rahmen einer Kanalbaumassnahme unter den vorliegenden Vortriebsrandbedingungen qualitativ und quantitativ bestätigt worden. Die Eignung des in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsansatzes zur vortriebsbegleitenden Ermittlung der Rohrverwinkelungen aus Vermessungsdaten der Vortriebsanlage wurde durch die Ergebnisse der Berechnungen und der Referenzmessungen der Rohrverwinkelungen an den ausgesuchten Rohrfugen überprüft.

Die Rohrverwinkelungen können mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit an den jeweiligen Stationen aus Vermessungsdaten der Vortriebsanlage ermittelt werden. Auf die Notwendigkeit von weiteren Untersuchungen, die zu Kompensierung der eventuellen Messunsicherheiten infolge der bautechnologischen und vermessungstechnischen Störungen beitragen können, wird an dieser Stelle hingewiesen.

5 In situ nahe Rohrvortriebe am ibb

Die in situ nahen Rohrvortriebe zur Untersuchung der Rohrbelastungszustände im Bauzustand wurden in der Versuchshalle am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH - Aachen durchgeführt.

5.1 Versuchsaufbau

Das ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH - Aachen verfügt über versuchstechnische Einrichtungen für in situ nahe experimentelle Untersuchungen mit Böden. Dabei handelt es sich um eine Versuchsbahn von ca. 28,0 m Länge und 3,70 m Breite. Ihre Tiefe beträgt abschnittsweise 2,5 m und 2,0 m. Diese mit Boden befüllbare Bahn wurde für die Vortriebsversuche als Versuchsstrecke eingerichtet, siehe Bild 5.1.

Am Anfang der Versuchsbahn befindet sich ein Schacht von 5,40 m Länge, der als Pressgrube für den Rohrvortrieb genutzt wurde. Zur Bergung der Versuchrohre wurde am Ende der Versuchsstrecke ein Ziehschacht erstellt.



Bild 5.1: Vortriebsstrecke, Versuchsaufbau

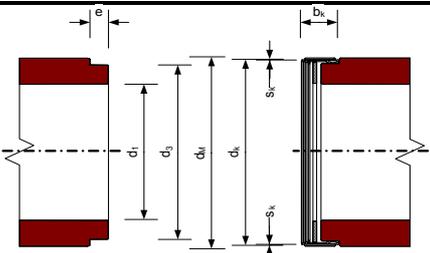
Die Versuchsbahn wurde auf der gesamten Vortriebslänge bis Geländeoberkante mit Boden lagenweise verfüllt und verdichtet, so dass bei den in situ nahen Vortriebsversuchen die Voraussetzung für einen ungestörten Vortrieb – erforderliche Mindestüberdeckung vom zweifachen Rohrdurchmesser – erfüllt werden konnte.

5.2 Vorbereitungen der vortriebsbegleitenden Messungen

5.2.1 Versuchsrohre

Als Versuchsrohre wurden Vortriebsrohre DN 400 mit einer V4A Edelstahlkupplung nach DIN EN 295 aus dem Standardprogramm der Steinzeug Abwassersysteme GmbH verwendet. Die Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die im Vortriebsversuch eingesetzten Rohre.

Tabelle 5.1: Vortriebsrohr DN 400 mit V4A Edelstahlkupplung Typ 1

Steinzeug Vortriebsrohr DN 400	Rohrmaße				zul. Vortriebskraft
	d_s	d_M	l_1	e	F [kN]
	517 +0/-1	556 +0/-12	990 +1/-1	50 +3/-0	2200,0
	Kupplung				
	d_k	s_k	b_k	D_2	
	538 +1/-1	2 -0,2/+0,2	111 -2/+2	10 -1/+1	

Zum Ausgleich von Rohrspiegelunebenheiten und zur Vergrößerung der lastübertragenden Fläche bei Rohrverwinkelungen sind die Steinzeugvortriebsrohre mit einem Holzwerkstoffring der Qualität V 100 mit einer Materialstärke von 10,0 mm standardmäßig ausgestattet. Bei zentrischer Pressung beträgt die zulässige Vorpresskraft laut Hersteller 2200,0 kN.

5.2.2 Messrohre, Messtechnik

Zur Kontrolle der an den Rohrkontaktflächen auftretenden Verwinkelungen und dazu korrespondierenden Kontaktspannungen wurden an zwei Rohrfugen die relativen Fugenwege und Spannungsverteilungen gemessen.

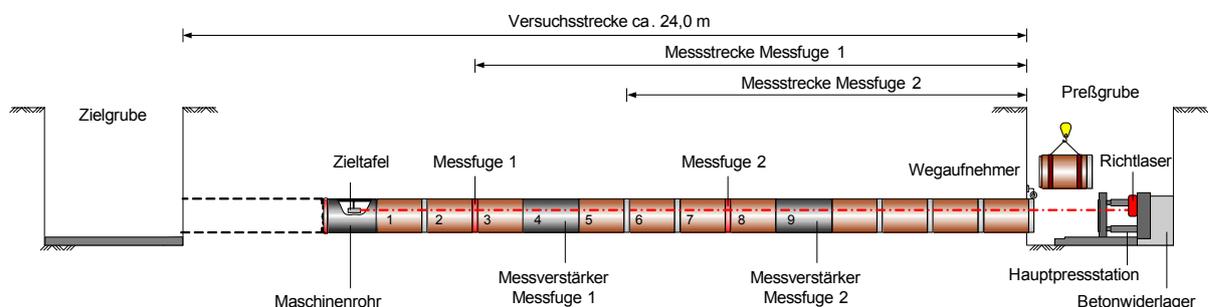


Bild 5.2: Vortriebsversuch; Anordnung der Messtechnik im Rohrstrang

Zu diesem Zweck wurden die Probekörper mit Messtechnik ausgestattet. Die Anordnung der Messtechnik im Vortriebsversuch ist im Bild 5.2 dargestellt. Im Verlauf

des Rohrstrangs wurden zwei Messfugen im Abstand von vier Metern platziert. Die erste Messfuge befand sich zwischen dem zweiten und dritten Steinzeugrohr direkt hinter dem Maschinenrohr. Die zweite Messfuge war zwischen dem siebten und achten Vortriebsrohr eingebaut.

Zur Kontrolle der Rohrverwinkelungen wurden an zwei Messfugen vier Wegaufnehmer über den Umfang des Rohrquerschnitts verteilt angeordnet. Die Wegaufnehmer waren jeweils bei 0° , 90° , 180° und 270° positioniert. In der Messfuge 1 wurden potentiometrische Wegaufnehmer verwendet. Die Linearpotentiometer mit einem Messbereich von $0,0 \dots 50,0$ mm sind durch ihre hohe Messauflösung und Messgenauigkeit gekennzeichnet, Bild 5.3 (links). Für die Vortriebsversuche mit Steinzeugvortriebsrohren mit Nennweiten DN 400 sind sie aufgrund ihrer Abmessungen weniger geeignet.

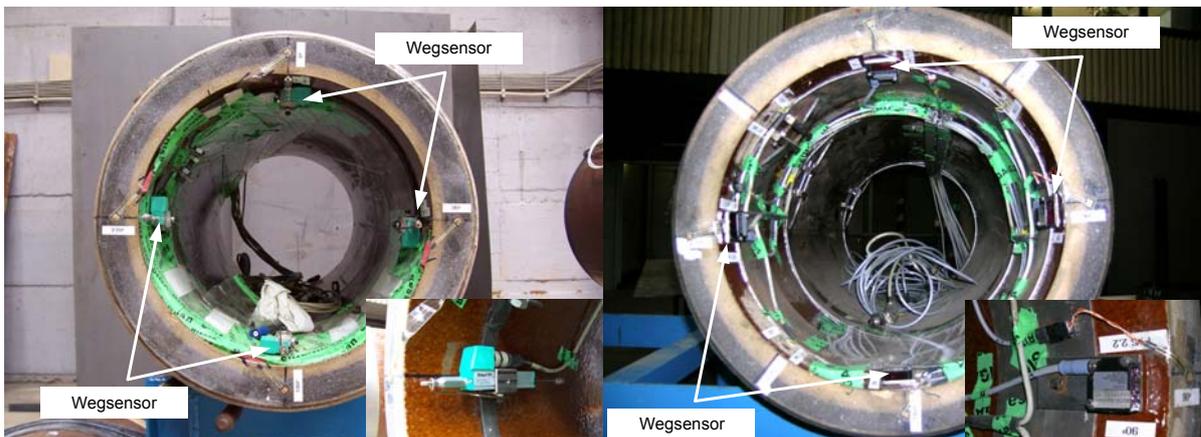


Bild 5.3: Installation der Messsensorik in den Messfugen:
Potentiometrische Wegaufnehmer, Messfuge 1 (links),
Laserwegaufnehmer, Messfuge 2 (rechts)

Im Hinblick auf die beengten Raumverhältnisse und Montageschwierigkeiten im Vortriebsrohr beim Vortrieb im nichtbegehbaren Querschnittsbereich wurden die Möglichkeiten einer berührungslosen Wegmessung überprüft. Daraufhin wurden in der Messfuge 2 erstmals Laserwegaufnehmer eingesetzt, die eine leichte und präzise Montage im kleinen Rohrquerschnitt ermöglichen, Bild 5.3 (rechts). Die Laserwegsensoren mit einem Messbereich von $16,0 \dots 120,0$ mm bieten neben ihrer hohen Messgenauigkeit eine besonders hohe Widerstandsfähigkeit gegen jede Art von mechanischen und physikalischen Einwirkungen. Ein weiterer Vorteil der Lasermesstechnik liegt darin, dass die Lasersensoren absolute Entfernungen liefern. Daher ist die Tarierung der Messwerte bei einer sorgfältigen Sensormontage überflüssig.

Zur Berechnung der Rohrverwinklung wurden die Messwerte der Wegaufnehmern softwaretechnisch ausgewertet. Über eine Ebenengleichung wurden die Rohrverwinklungen in den horizontalen und vertikalen Ebenen sowie die resultierende räumliche Verwinklung vortriebsbegleitend ermittelt.

Zur Erfassung der Signale der Messensorik an den Messfugen wurden Messverstärker zwischengeschaltet. Da die elektrischen Widerstände der Datenleitungen, die die Messgenauigkeit beeinträchtigen können, nicht vernachlässigbar sind, müssen die Messverstärker möglichst nahe an der Messfuge installiert werden. Das Steinzeugvortriebsrohr DN 400 bietet jedoch nicht genügend Raum zur Einbringung und Befestigung zusätzlicher Messeinrichtungen. Um die Elektronik dennoch im Rohrstrang unterbringen zu können, wurden Stahlnachlaufrohre mit entsprechenden Vorrichtungen zur Installation der Messverstärker hinter die Messfuge nachgeschaltet, siehe Bild 5.4.

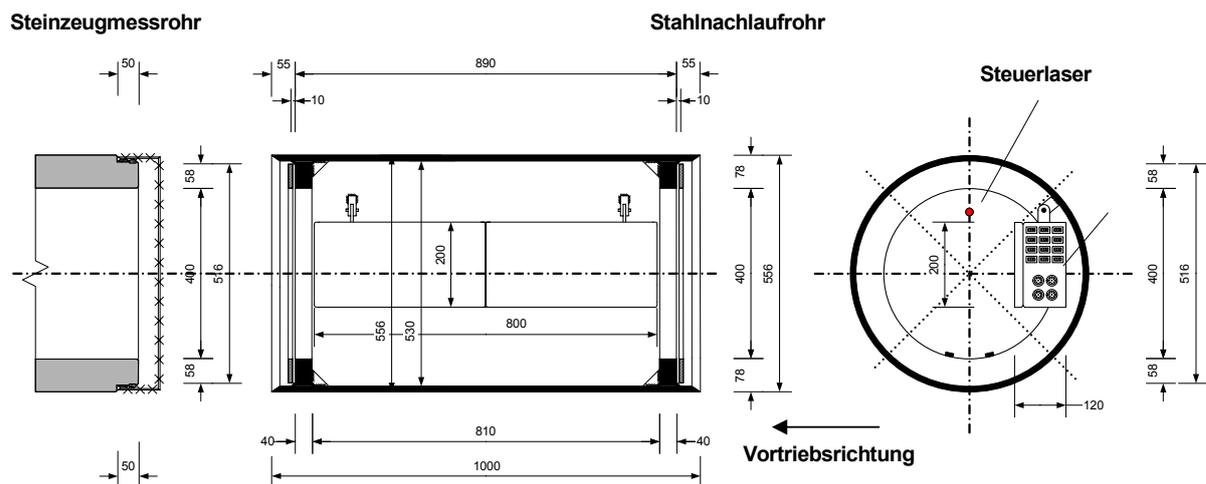


Bild 5.4: Installation der Messverstärker im Rohrstrang

Zur Übertragung der Vortriebskräfte muss die Rohrfugenkonstruktion im Übergangsbereich zwischen dem Steinzeug- und dem Stahlnachlaufrohr angepasst werden. Im Kontaktbereich der Rohrfugen wurden zur Aufnahme der Vortriebskraft vom Messrohr zum Stahlnachlaufrohr und weiterhin vom Stahlnachlaufrohr zum Steinzeugvortriebsrohr Stahlringe angeschweißt. Die Stahlringe dienen gleichzeitig als Auflagerkonstruktion für die Fugenzwischenlagen.

Damit der Rohrstrang den Steuerbewegungen der Vortriebsmaschine folgen kann, wurden die Rohrverbindungen zwischen Steinzeugvortriebsrohr und Stahlnachlaufrohr abwinkelbar ausgeführt. Zur Ausbildung der Rohrverbindungen wurden die werksmäßig installierten Manschettenkupplungen der Steinzeugrohre

entfernt. Eine ausreichende Querkraftstabilität der Rohrverbindungen wurde dabei durch die steife Wandung der Stahlrohre gewährleistet. Die Dichtigkeit der Rohrverbindungen wird wie bei der Standardausführung durch die Dichtungsringe (Lippendichtung) der Steinzeugvortriebsrohre sichergestellt.

5.2.3 Vortriebsvermessung

Bei den in situ nahen Rohrvortriebsversuchen wurde eine rechnergestützte Vermessung der Vortriebsmaschine mit einem Richtlaser und einer aktiven Zieltafel vorgenommen. Im Bild 5.5 ist der Aufbau der Vermessungstechnik im Vortriebsversuch am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb dargestellt.

Die Position des Laserpunktes auf der Zieltafel wurde vortriebsbegleitend digital mittels einer speziell entwickelten Software erfasst und dokumentiert. Die Erfassung und Auswertung der Verrollungswinkel zur Kompensierung der Verrollung erfolgte automatisch. Die Abweichungen der Vortriebsmaschine von der Laser-Soll-Achse wurden auf dem Bildschirm des Steuerrechners digital und graphisch dargestellt.



Bild 5.5: Vermessung im Vortriebsversuch am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb: Laserkontrolle (links), Richtlaser (Mitte), aktive Zieltafel und Messrad (rechts)

Die Aufzeichnung der vom Vermessungssystem gelieferten Datensätze geschah automatisch und weggesteuert in definierten Streckenabständen. Die Messung der von der Vortriebsmaschine zurückgelegten Vortriebsstrecke erfolgte im Vortriebsversuch mit einem digitalen Messrad. Die vom digitalen Inkrementalgeber des Messrades erzeugten elektrischen Impulse wurden softwaretechnisch ausgewertet und in die Vortriebsstrecke umgerechnet.

Die Vermessungsdaten wurden über eine serielle Schnittstelle am Steuerrechner zur Berechnung von Rohrverwinkelungen zum Versuchsstand übermittelt. Die Datenauswertung geschah automatisch, die Korrekturen der Soll-Achse mussten gegebenenfalls nach jeder Laserkontrolle übernommen werden.

Die Ermittlung der Rohrverwinkelungen aus Vermessungsdaten erfordert eine hohe Vermessungsgenauigkeit im Vortrieb. Daher wurden bei den Vortriebsversuchen besondere Maßnahmen zur Sicherstellung der Bewegungsfreiheit des Lasers ergriffen. Dazu wurde die Aufhängung des Richtlasers von den Tragkonstruktionen in der Pressgrube entkoppelt. Somit konnten die Bewegungen des Richtstrahls infolge hoher Pressenkräfte am Widerlager weitgehend vermieden werden. Die geforderte Genauigkeit der Vermessung der Vortriebsmaschine wurde außerdem durch die regelmäßigen Laserkontrollen sichergestellt. Die Laserkontrollen wurden während des Vortriebsversuchs nach jedem Rohrwechsel vorgenommen.

5.2.4 Foliendruckensoren

Die von den Vortriebspressen aufgebrauchten Längskräfte wurden über hydraulische Drucksensoren gemessen. Die Messwerte wurden zeitgleich softwaretechnisch erfasst und protokolliert. Neben der Messung der resultierenden Vorpresskraft wurden die Informationen über die Spannungsverteilung in der Messfuge 2 mittels Druckmessfolien erfasst.

Hierzu wurden Halbkreisdruckmessfolien, die am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb entwickelt und bereits erfolgreich eingesetzt wurden, direkt in der Rohrfuge platziert [4]. Sie ermöglichen die Erfassung der Fugenspannung nahezu über den gesamten Rohrspiegel der Rohrenweiten bis DN 400, Bild 5.6.

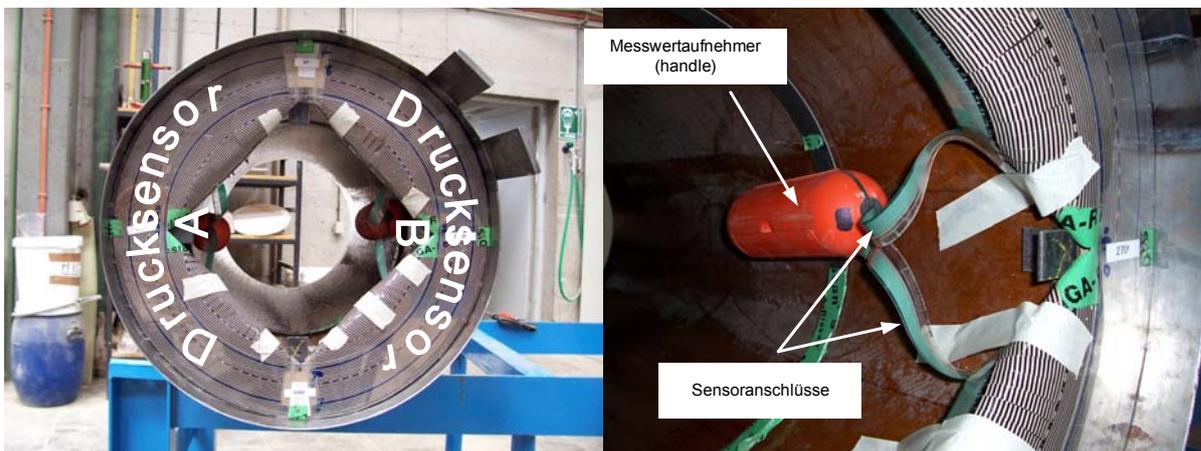


Bild 5.6: Installation der Foliendruckmesstechnik in der Messfuge 2

Es sollten die Wechselwirkungen zwischen den Verformungen der Fugenzwischenlage infolge einer Rohrverwinkelung und der Spannungsverteilung in der Rohrfuge erforscht werden. Außerdem sollten Messungen der Spannungsverteilung in der Rohrfuge zur Überprüfung der Rechenergebnisse mit dem Materialmodell für die Fugenzwischenlage dienen.

5.3 Durchführung der Messungen

Da im Rahmen der Untersuchungen in situ nicht alle vortriebsspezifischen Belastungskonstellationen untersucht werden konnten, wurden am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb in situ nahe Vortriebsversuche durchgeführt. Hierbei wurden Geometrie- und Kräfte- und Randbedingungen gezielt nachgestellt, um ihre Einflüsse auf die Belastungszustände der Vortriebsrohre im Bauzustand zu ergründen. Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich in zwei Hauptversuchsreihen zusammenfassen, die nachfolgend kurz erläutert werden.

Zur Bestimmung der Rohrverwinkelungen und daraus resultierenden Rohrbelastungen zur Beurteilung des Ausnutzungsgrades der Rohre wurden in der ersten Versuchsreihe Vortriebe durchgeführt, die durch eine „gute“ Steuerung des Vortriebs gekennzeichnet waren. In der Versuchsreihe 2 wurde eine „schlechte“ Vortriebssteuerung nachgestellt. Die Abweichungen der Vortriebsmaschine vom Soll und folglich die Steuerung der Vortriebsmaschine wurden ausschließlich in der horizontalen Ebene geplant. Die Gradienten in beiden Versuchsreihen war nahezu geradlinig.

5.3.1 Versuchsreihe 1: „gute“ Vortriebssteuerung

Die Abweichungen des Vortriebsschildes vom Soll sollten hier den zulässigen Wert von 25,0 mm nach ATV - A 125 für Vortriebsrohre DN 400 nicht überschreiten. Geplant war eine Simulation der Abweichung des Vortriebsschildes bei Station 4,0 m. Bei einer guten Steuerung war eine Steuerungsperiode von 8,0 m vorgesehen, so dass die Vortriebstrasse die Abweichung vom Soll von ca. 25,0 mm bei der Station 16,0 m erreichen sollte, Bild 5.7. Bei einem Krümmungsradius von 640,0 m sollte sich eine maximale Rohrverwinkelung von $0,09^\circ$ einstellen.

5.3.2 Versuchsreihe 2: „schlechte“ Vortriebssteuerung

In dieser Versuchsreihe sollte eine schlechte Vortriebsteuerung nachgestellt werden, Bild 5.8. Wie in der ersten Versuchsreihe sollte die Abweichung vom Soll in der horizontalen Betrachtung 25,0 mm nicht überschreiten. Der Versuchsablauf wurde so konzipiert, dass die fehlerhafte Steuerung des Vortriebs – abrupte Steuerbewegungen der Steuerpressen – starke Krümmungen im Trassenverlauf verursachen sollten. Dabei sollte ein Krümmungsradius in der Horizontalen von 160,0 m aufgeföhren werden. Außerdem sollte ein Steuerungsfehler dazu beisteuern, dass die Vortriebsmaschine die Soll-Achse bei Station 11,0 m durchquert und erneut ein Extrema der seitlichen Abweichung erreicht. Die rechnerischen Rohrverwinkelungen sollten hierbei $0,36^\circ$ betragen. Die übrigen Parameter, wie

Überschnitt und Bodenlagerung, wurden weitgehend bei beiden Versuchskonzeptionen konstant gehalten.

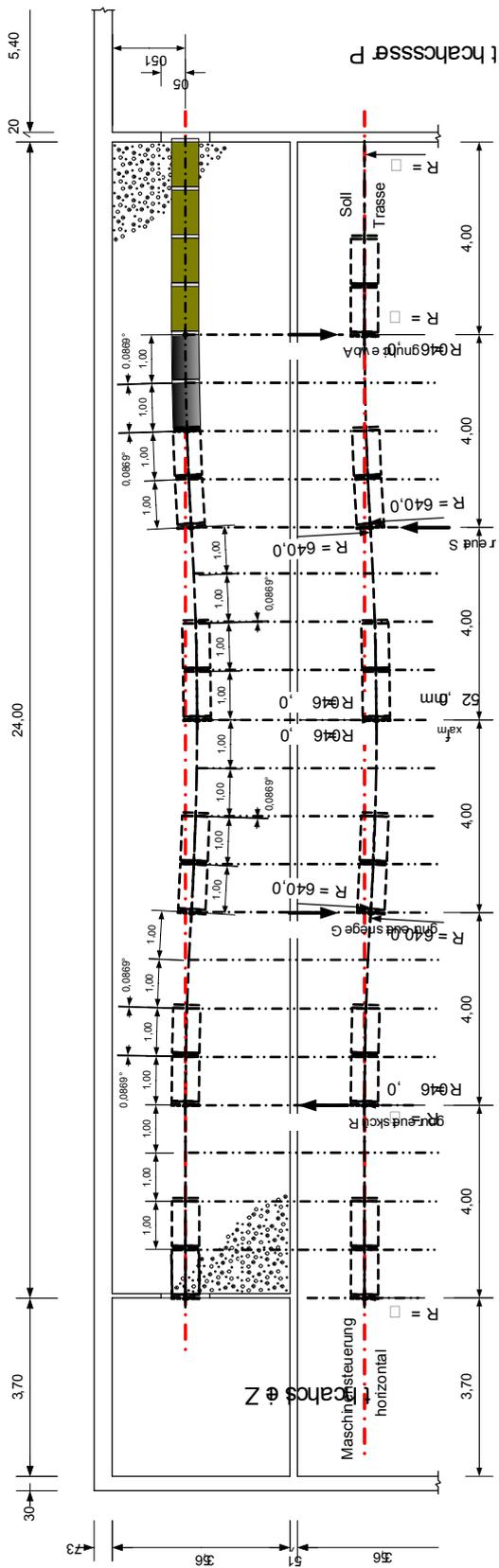


Bild 5.7: Versuchsreihe 1, gute Steuerung, geplante Maschinenstrasse

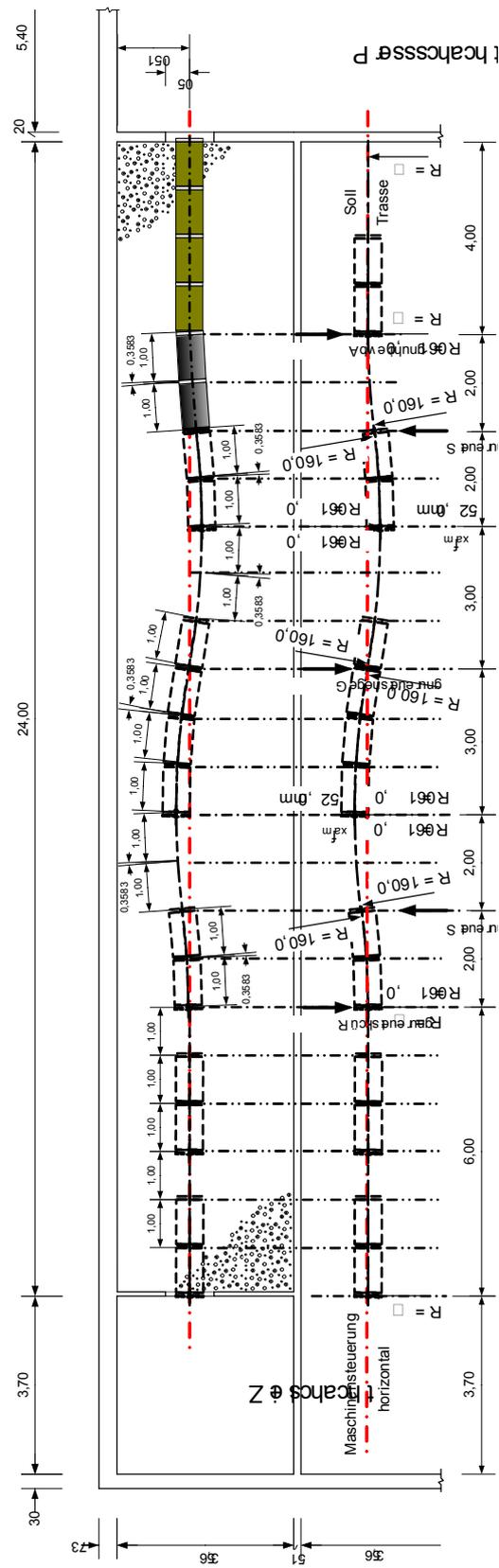


Bild 5.8: Versuchsreihe 2, schlechte Steuerung, geplante Maschinenstrasse

5.4 Auswertung der Messungen

Durch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Vermessungsdaten – Messung der Abweichungen vom Soll in der horizontalen und vertikalen Betrachtung – lassen sich die Trassen- und Gradientenverläufe des Vortriebsschildes rekonstruieren. Nachfolgend werden die aus dem umfangreichen Datenmaterial ausgewählten Ergebnisse der Versuchsmessungen vorgestellt.

5.4.1 Versuchsreihe 1: „gute“ Vortriebssteuerung

Zur Abbildung der Maschinenfahrt in der horizontalen Ebene wird die horizontale Abweichung des Vortriebsschildes von der Laser-Soll-Trasse betrachtet. Im Bild 5.9 ist die Vermessung der Vortriebsmaschine in der Horizontalen dargestellt. Der Vortrieb begann in der Pressgrube mit einer absoluten Abweichung von der Soll-Achse des Richtlasers von - 6,0 mm.

Wie geplant wurde bei Station von 4,0 m eine Abweichung der Vortriebsmaschine von der Soll-Trasse simuliert. Der Steuerzylinder auf der rechten Seite wurde ausgefahren, so dass die Vortriebsmaschine von der Soll-Achse nach links abwichte.

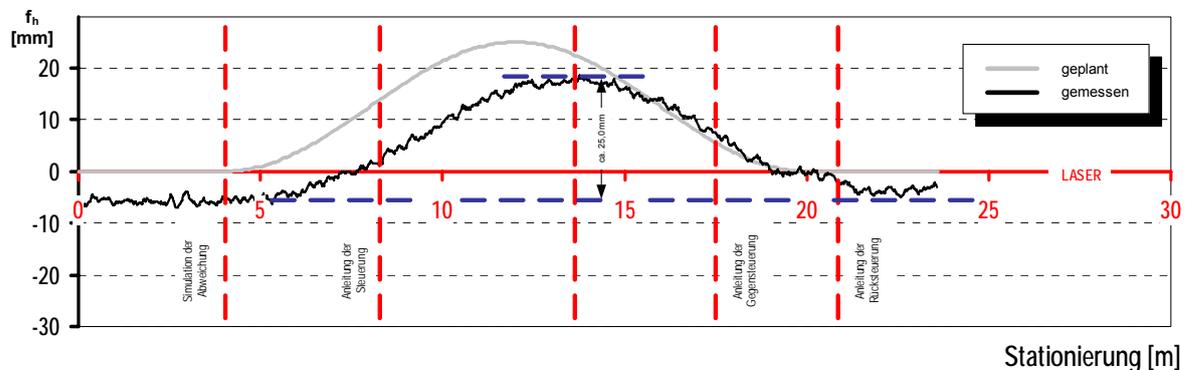


Bild 5.9: Versuchsreihe 1; Versuch 1.3:
Vortriebsvermessung; Abweichung der Vortriebsmaschine von der Lasertrasse

Da die Vortriebsmaschine auf die eingeleitete Steuerung verzögert reagiert, wurde die seitliche Abweichung erst nach einem halben Meter spürbar. Der Kurvenbeginn liegt im Versuch bei ca. 4,5 m.

Nach dem Erkennen der Abweichung – die seitliche Ablage in der Horizontalen lag bei etwa 9,0 mm – wurde eine erforderliche Steuerung eingeleitet. Daraufhin erreichte die Vortriebsmaschine im Scheitelpunkt der Kurve bei Station 14,0 m ein Maximum der horizontalen Abweichung von ca. 19,0 mm. Danach wird eine

entsprechende Gegensteuerung eingeleitet. Das Vortriebsschild erreichte in Folge die Ursprungsgerade bei Station 22,0 m. Wie geplant blieben die relativen Abweichungen der Vortriebsmaschine im Versuch unter 25,0 mm.

Die Lage der Rohrtour im Vortriebsverlauf und die Rohrverwinkelungen werden durch die Qualität der Maschinensteuerung beeinflusst. Anhand von den im Bild 5.10 dargestellten Rohrverwinkelungen – gemessen an der Messfuge 1 und Messfuge 2 – ist der qualitative und quantitative Zusammenhang zwischen Maschinenfahrt und Rohrverwinkelung erkennbar. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Vortriebsrohre der von der Vortriebsmaschine aufgefahrenen Trasse folgen. Die Rohrverwinkelungen an beiden Messfugen verlaufen kongruent zueinander. Leichte Unterschiede lassen sich durch die unvermeidbaren Abweichungen bei der Tarierung der Wegsensorik an den Messfugen erklären.

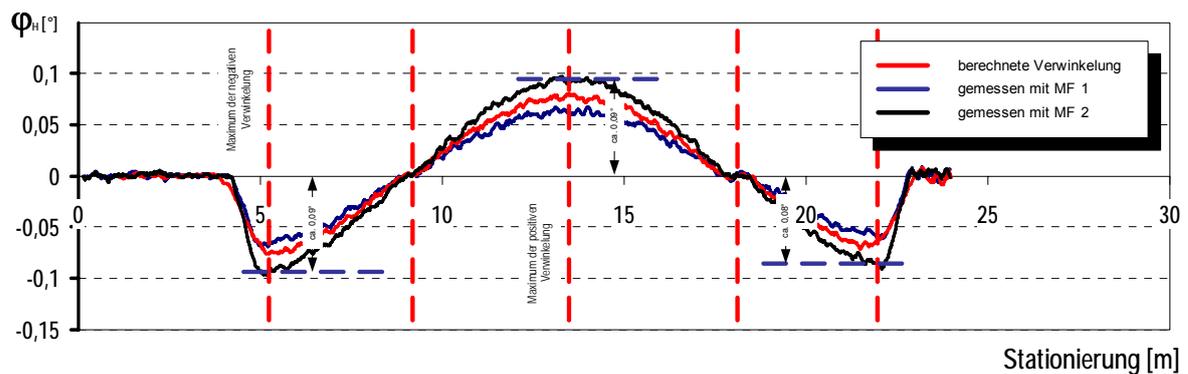


Bild 5.10: Versuchsreihe 1; Versuch 1.3:
Rohrverwinkelungen: berechnet und gemessen mit Messfuge 1 und Messfuge 2

Die Extremwerte der Verwinkelungen werden erwartungsgemäß an den Stationierungen dokumentiert, an denen die Maschinentrasse ihre Krümmungmaxima erfährt. Die Krümmungmaxima in der Maschinentrajektorie werden ihrerseits durch die erforderlichen Korrektursteuerungen verursacht. In der horizontalen Betrachtung werden Verwinkelungen an den Rohrfugen von ca. $0,09^\circ$ gemessen. Bei einer Rohrlänge von 990 mm entspricht dies einem aufgefahrenen Kurvenradius von 570,0 m.

Des Weiteren werden im Bild 5.10 die aus den Vermessungsdaten berechneten und an den Messfugen gemessenen Verwinkelungen der Vortriebsrohre gegenübergestellt. Der qualitative und quantitative Vergleich der Verwinkelungen in der Horizontalen zeigt eine gute Korrelation zwischen Maschinentrajektorie und Abwinkelung der Vortriebsrohre in den Kontaktfugen. Die geringfügigen Unterschiede

liegen im Toleranzbereich des Messverfahrens. Trotz einer sorgfältigen Vermessung üben vermessungstechnische Störungen einen starken Einfluss auf die Messgenauigkeit.

5.4.2 Versuchsreihe 2: „schlechte“ Vortriebssteuerung

Im Bild 5.11 ist die Vermessung der Vortriebsmaschine im Versuchsverlauf in der horizontalen Ebene dargestellt. Die Vortriebsmaschine hatte bereits zu Beginn der Messung eine absolute Abweichung von der Soll-Achse von - 8,0 mm. Bis Station 3,0 m verlief die Vortriebstrasse nahezu gerade.

Im Unterschied zu den Vortriebsversuchen der ersten Versuchsreihe wurde in der Versuchsreihe 2 eine schlechte Maschinensteuerung nachgestellt. So wurde bei Station 3,0 m eine ruckartige Abweichung vom Soll in der Horizontalen simuliert. Solche Trassenabweichungen sind beispielsweise beim Auftreffen auf Hindernisse oder beim Passieren von Schichtenwechsel im Boden in der Vortriebspraxis nicht selten.

Um das schnelle Abweichen des Vortriebsschildes von der Solltrasse abzufangen, wurde eine massive Steuerung bei Station 4,5 m eingeleitet, so dass bereits bei Station 7,0 m eine maximale Abweichung von ca. 17,0 mm aufgefahren wurde. Wie im Bild 5.11 zu sehen ist, hatten die abrupten Steuervorgänge entsprechend starke Krümmungsänderungen im Verlauf der Maschinentrasse zur Folge.

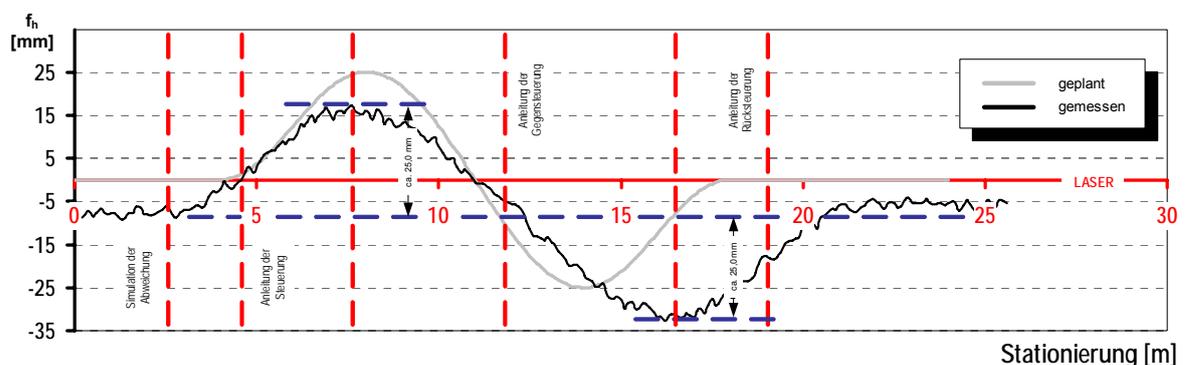


Bild 5.11: Versuchsreihe 2; Versuch 2.2: Vortriebsvermessung; Abweichung der Vortriebsmaschine von der Lasertrasse

Kurz bevor die Vortriebsmaschine die Ursprungsgerade erreichte, wurde eine Gegensteuerung eingeleitet. Damit wurde gezielt eine charakteristische Fehlsteuerung simuliert. Mit einem großen Gierwinkel passierte der Vortriebsschild die Soll-Achse, so dass eine weitere starke Richtungskorrektur erforderlich war. Die verspätete Rücksteuerung hatte eine große Abweichung auf der gegenüberliegenden

Seite von der Soll-Linie zur Folge. Die relativen zulässigen Abweichungen nach ATV - A 125 wurden im Versuch nicht überschritten.

Im folgenden Bild 5.12 sind die aufgefahrene Verwinkelungen der Messfuge 1 und der Messfuge 2 sowie die aus den Vermessungsdaten der Vortriebsmaschine berechneten Verwinkelungen gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Vortriebsrohre der von der Vortriebsmaschine aufgefahrene Trasse folgen. Verwinkelungsmessungen an Messfuge 1 und Messfuge 2 liefern annähernd deckungsgleiche Verwinkelungen.

Die Steuerbewegungen am Schneideschuh der Vortriebsmaschine verursachen Krümmungsänderungen in der Maschinentrasse. Die größten Verwinkelungen wurden an den Vortriebsstationen gemessen, an denen die maximalen Abweichungen vom Soll und die maximalen Krümmungen der Maschinentrasse aufgefahrene wurden. In der horizontalen Ebene wurden maximale Rohrverwinkelungen von ca. $0,3^\circ$ gemessen. Das entspricht bei einer Rohrlänge von 990 mm einem aufgefahrenen Kurvenradius von ca. 190,0 m. Die Steuerkorrekturen haben auch die Krümmungswechsel in der Maschinentrasse zur Folge. Dort erfahren die Vortriebsrohre keine Verwinkelungen.

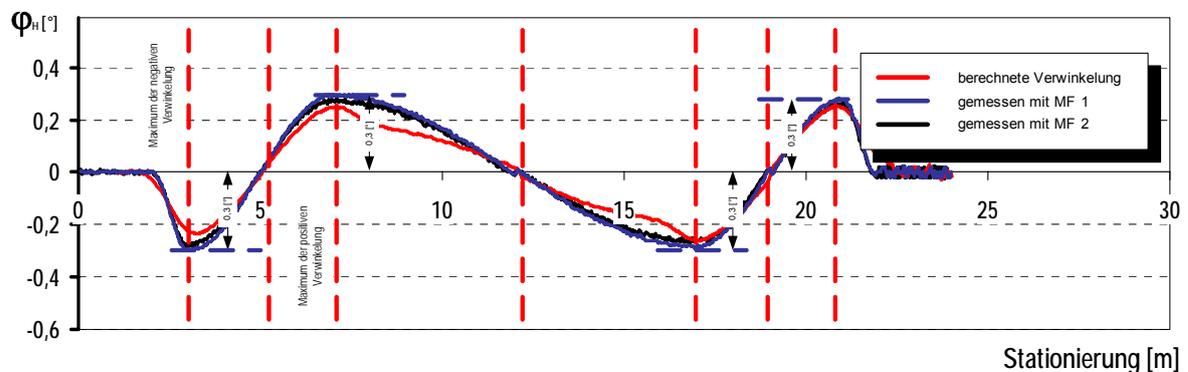


Bild 5.12: Versuchsreihe 2; Versuch 2.2:
Rohrverwinkelungen: berechnet und gemessen mit Messfuge 1 und Messfuge 2

Der Vergleich der gemessenen und aus den Vermessungsdaten berechneten Rohrverwinkelungen bestätigt auch hier den qualitativen und quantitativen Zusammenhang von Vortriebsmaschinenfahrt und Rohrverwinkelungen. Bei der Berechnung wurden die Scheitelpunkte der Rohrverwinkelungen ausreichend genau erfasst. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den gemessenen und anhand der Vermessung berechneten Fugenwinkeln resultieren zum Teil aus geringen Messungenauigkeiten bei der Vortriebsvermessung. Auch die Abweichungen bei der

Tarierung der Wegaufnehmer zu Beginn der Fugenspaltmessung im Pressschacht üben einen erheblichen Einfluss auf die Messgenauigkeit aus.

5.5 Rohrfugenspannungen im Vortriebsverlauf

Bei der Herleitung des Berechnungsansatzes zur Bestimmung der Verformungs- und Belastungszustände in der Rohrkontaktfuge wurden folgende Annahmen im Hinblick auf Geometrie, Belastung und Materialverhalten getroffen:

- die Ebenheit und Rechtwinkligkeit der Rohrstirnflächen wird vorausgesetzt,
- die Plattendicke der Fugenzwischenlage ist konstant,
- die Kontaktspannungen wirken senkrecht zur Plattenebene,
- ein ebener Spannungs- und Dehnungszustand wird vorausgesetzt,
- die Rohrverformungen werden vernachlässigt,
- der Werkstoff der Fugenzwischenlagen ist homogen und orthotrop,
- es gilt das Materialgesetz nach Kapitel 3.3.

Im Folgenden wird das Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Verformungs- und Belastungszustände der Vortriebsrohre für den Lastfall Vorpressen kurz vorgestellt.

5.5.1 Berechnung der Spannungen und Verformungen in der Rohrfuge

Zur Berechnung der Verformungen und Spannungen in der Rohrfuge werden die Fugenzwischenlagen in Teilflächen unterteilt. Durch eine Diskretisierung des Ringes der Fugenzwischenlage in kleine endliche Elemente und Formulierung von Übergangsbedingungen erhält man eine Lösung in Form einer elementweisen Approximation. Zunächst wird der Kreisring der Fugenzwischenlage in gleiche Kreissegmente unterteilt, Bild 5.13. Anschließend erfolgt die Unterteilung der Kreissegmente in radialer Richtung, wobei die Breite der Elemente in Radialrichtung konstant bleibt.

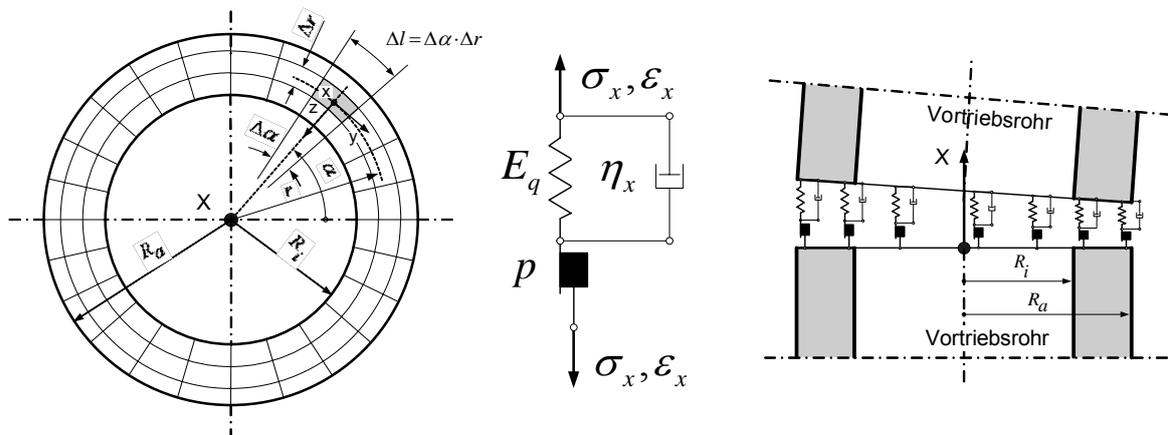


Bild 5.13: Diskretisierung der Fugenzwischenlage in Federelemente

In Richtung der Rohrsachse ist die Anordnung eines Elementes ausreichend. Das einzelne Element wird durch seine Schwereachse charakterisiert.

Ein Element kann durch eine nichtlineare Feder ersetzt werden, wobei die dehnungsabhängige Steifigkeit der Federelemente durch eine dehnungsabhängige Spannungsfunktion definiert wird. Die Fugenzwischenlage kann somit durch Parallelschaltung einer endlichen Zahl von Federelementen über den Rohrspiegel verteilt abgebildet werden. Die Federelemente verformen sich unabhängig voneinander. Es wird eine nichtlineare Bettung für die verwinkelten Rohre im Bereich der Rohrfuge simuliert. Das Fließverhalten des Werkstoffs wird symbolisch durch ein Reibungselement dargestellt. Das verzögert elastische Verhalten der Fugenzwischenlage wird durch ein Dämpferelement abgebildet.

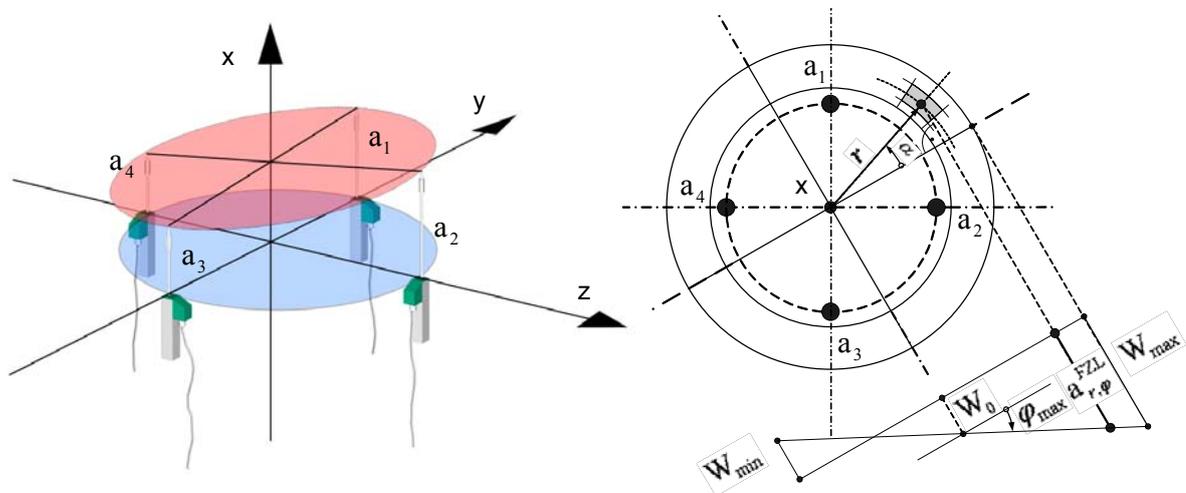


Bild 5.14: Berechnung der Verformungen der Fugenzwischenlage

Zur Berechnung der Verformungen der Fugenzwischenlage werden die Rohrspiegel als Kreisscheiben diskretisiert. Da der Kreismittelpunkt durch eine querkraftstabile Ausbildung der Rohrmuffen unverschieblich gelagert ist, haben die Rohrspiegelebenen drei Freiheitsgrade. Die Freiheitsgrade sind durch eine Verschiebung in Richtung der Rohrachse und Verdrehungen um die horizontale und vertikale Achse gegeben. Die Verwinkelungen der Rohre in den Kontaktfugen können beispielsweise aus den Vermessungsdaten oder anhand der gemessenen relativen Fugenwege berechnet werden, Bild 5.14. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Fugenwinkel wurde bereits im Kapitel 4.3.1 ausführlich beschrieben.

$$\varphi_{\max} = \sqrt{\varphi_H^2 + \varphi_V^2} \quad (5.1)$$

Zur Berechnung der Elementverformungen wird noch der maximale räumliche Fugenwinkel benötigt. Für kleine Fugenwinkel kann die räumliche Verwinkelung nach Gleichung (5.1) berechnet werden. Ist die räumliche Verwinkelung φ_{\max} und die absolute Verschiebung \mathbf{W}_0 der Rohrspiegel zueinander bekannt, so lässt sich die Lage der Rohrstirnflächen eindeutig bestimmen. Da die Rohrspiegel im Modell absolut eben sind, können die Abstände zwischen den Rohrstirnflächen an jeder Stelle gemäß Bild 5.14 berechnet werden.

$$a_{r,\varphi}^{\text{FZL}} = W_0 + r \cdot \varphi_{\max} \cdot \cos \alpha \quad (5.2)$$

Die aktuelle Plattendicke der Fugenzwischenlage kann für ein Element nach Gleichung (5.2) bestimmt werden. Mit der bekannten Ausgangsdicke der Fugenzwischenlage können ebenfalls die aktuellen Verformungen der Plattenelemente ermittelt werden, (5.3).

$$\varepsilon_{r,\varphi}^{FZL} = \frac{a_{r,\varphi}^{FZL}}{a_0} \quad (5.3)$$

Da das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Fugenzwischenlage mit einer dehnungsabhängigen Spannungsfunktionen nach Kapitel 3.3 definiert ist, können die zu den anliegenden Verformungen korrespondierenden Spannungen direkt berechnet werden, (5.4).

$$\sigma_x = \sigma(\varepsilon_{r,\varphi}^{FZL}, E_q, \eta_x) \quad (5.4)$$

Da die Translation des Kreismittelpunktes aus den geometrischen Beziehungen nicht ermittelt werden kann, muss zunächst die Verbindung zwischen den äußeren und inneren Kraftgrößen in der Rohrfuge aufgestellt werden. Hierzu wird das Kräftegleichgewicht am gesamten Rohrstrang und in der Rohrkontaktfuge an der Fugenzwischenlage betrachtet.

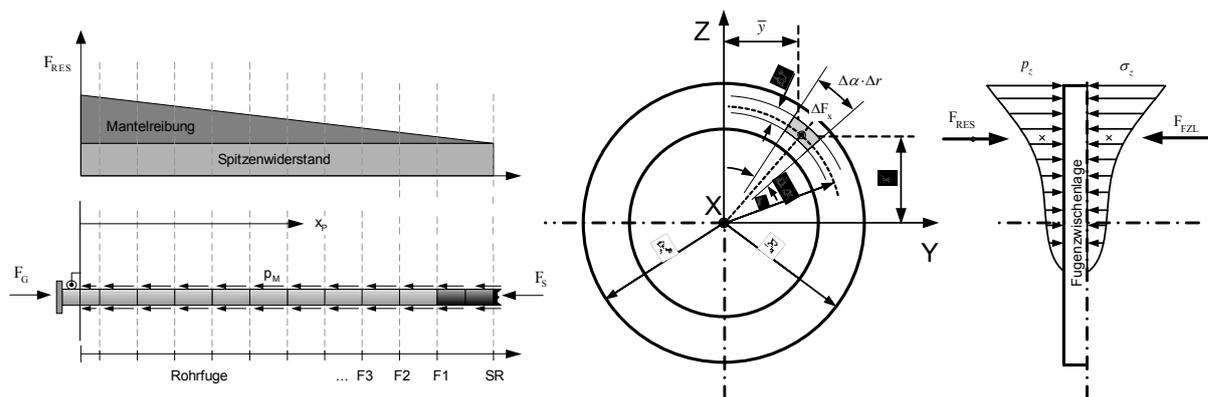


Bild 5.15: Kräftegleichgewicht am gesamten Rohrstrang (links), Kräftegleichgewicht in der Rohrkontaktfuge (rechts)

Die inneren Kraftgrößen resultieren aus den Verformungen der Fugenzwischenlage und wirken zwischen den Rohrkontaktflächen. Die äußeren Kräfte werden von den Vortriebspresen aufgebaut und wirken unter Abzug der Mantelreibung direkt auf die Vortriebsrohre. Die äußeren Kraftgrößen, wie die Kraft an der Hauptpressstation oder die Kraft an der Ortsbrust sowie die Kräfte an den Zwischenpressstationen, werden üblicherweise von der Vortriebsanlage bereitgestellt. So kann die Gleichgewichtsbeziehung in der Rohrkontaktfuge nach Gleichung (5.5) formuliert werden.

$$F_{RES}(x) = \left[(F_G - F_S) \cdot \frac{x_M - x_P}{x_M} \right] + F_S \quad (5.5)$$

$$F_{RES} = \sum_n \Delta F_x = \sum_n \sigma_x \cdot \Delta A \quad (5.6)$$

Die Integration der Spannungen über die Druckübertragungsfläche der Rohrfuge ergibt die Lage und den Betrag der resultierenden Vortriebskraft, Gleichung (5.6).

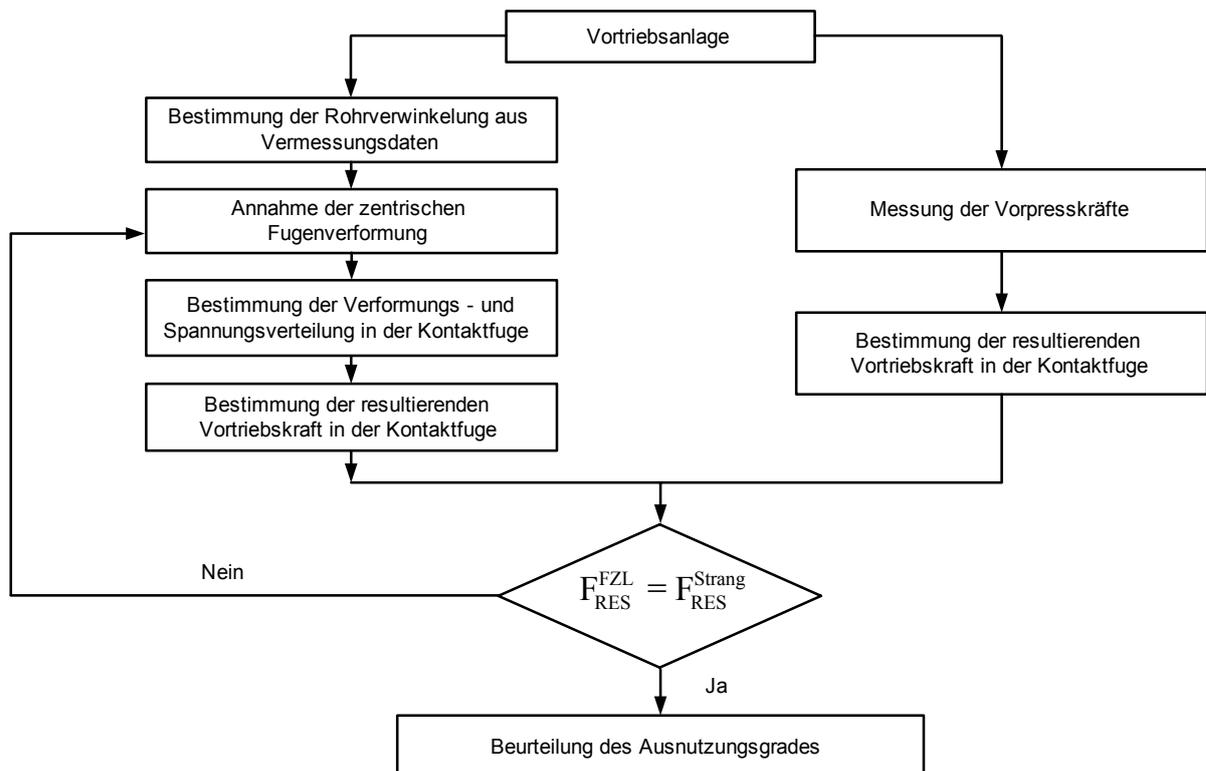


Bild 5.16: Iterative Bestimmung der Spannungs- und Verformungszustände

Eine kontinuierliche Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Vortriebskraft ermöglicht eine iterative Bestimmung der Spannungs- und Verformungsverteilung in jeder Rohrfuge des Vortriebsstranges, siehe Bild 5.16. Durch einen direkten Vergleich der ermittelten Maximalbeanspruchung und der zulässigen Druckspannung des Rohrwerkstoffes kann der Ausnutzungsgrad der Vortriebsrohre und des gesamten Rohrstranges beurteilt und angezeigt werden.

5.5.2 Ergebnisse der Fugenspannungsberechnungen

In Vortriebsversuchen werden die Verformungen der Fugenzwischenlage in Abhängigkeit der absoluten räumlichen Verwinkelungen kontinuierlich berechnet. Mit Hilfe der eigens entwickelten Software werden die Spannungsverteilungen in der Rohrfuge bestimmt und graphisch dargestellt.

Im Bild 5.17 sind die Verteilungen der berechneten Fugenspannungen an zwei Stationen im Vortriebsversuch 1.3 dargestellt. Im Bild 5.17 (links) ist eine

gleichmäßige und vollflächige Belastung des Rohres zu erkennen. Das Maß der Fugenklaffung ist gleich 1,0. Die dazu korrespondierende räumliche Rohrverwinkelung bei Station 14,1 m betrug $0,09^\circ$. Da in diesem Vortriebsabschnitt die maximale Verwinkelung in der horizontalen Ebene dokumentiert wurde, wurden erwartungsgemäß die Extremwerte der Kontaktspannungen in den Kämpfern berechnet. Hier wurden Spannungsmaxima von ca. $22,0 \text{ N/mm}^2$ errechnet.

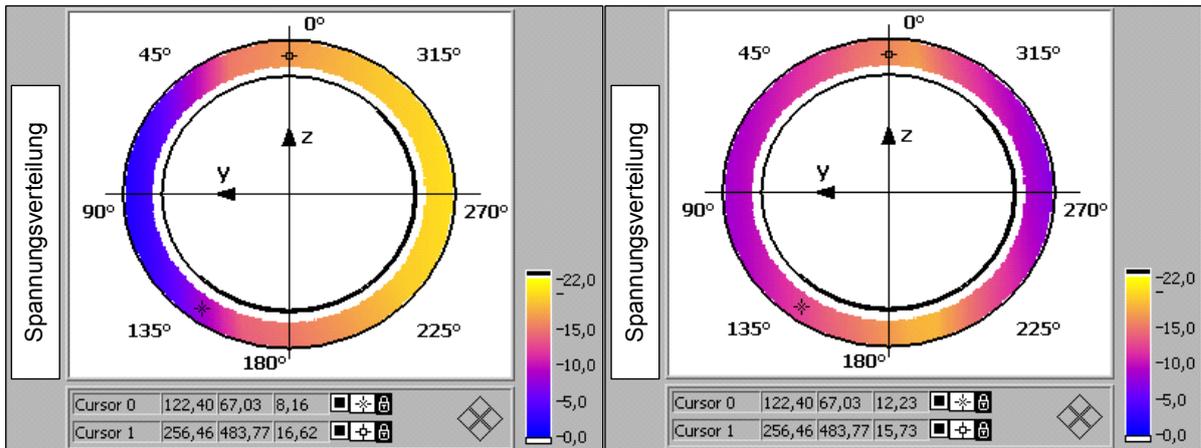


Bild 5.17: Versuchsreihe 1; Versuch 1.3:
Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 14,1 m (links),
Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 22,9 m (rechts)

Im Bild 5.17 (rechts) ist die Spannungsverteilung für die Vortriebsstation 22,9 m dargestellt. Die Rohrfuge befand sich bereits auf einer Geraden, so dass hier keine nennenswerte Rohrverwinkelung berechnet wurde. Da die Querschnittsbereiche in den Kämpfern durch die Rohrverwinkelungen bereits eine Vorverformung erfahren hatten, wurden die Längskräfte über weniger verformte Querschnittsflächen weitergeleitet. Wie im Bild 5.17 (rechts) zu erkennen ist, traten die maximalen Druckspannungen im Scheitel und in der Sohle des Rohrquerschnittes auf.

Im Bild 5.18 sind die Verteilungen der berechneten Fugenspannungen an zwei Stationen des Vortriebsversuchs 2.2 abgebildet. Im Bild 5.18 (links) ist die Spannungsverteilung für die Vortriebsstation 7,3 m dargestellt. Die dazu korrespondierende maximale Rohrverwinkelung betrug $0,3^\circ$. Die Rohrverwinkelungen in der zweiten Versuchsserie sind im Vergleich zu den Versuchen in der ersten Versuchsreihe wesentlich höher.

Anhand der Spannungsverteilung ist deutlich zu erkennen, dass die Kontaktfuge aufklafft. Ungefähr 30 % der Querschnittsfläche bei Station 7,3 m waren von der Lastübertragung ausgeschlossen. Das Maß der Fugenklaffung betrug 0,71. Die

maximale Spannung für diese Station lag am Querschnittsrand im rechten Kämpfer und betrug ca. $30,0 \text{ N/mm}^2$.

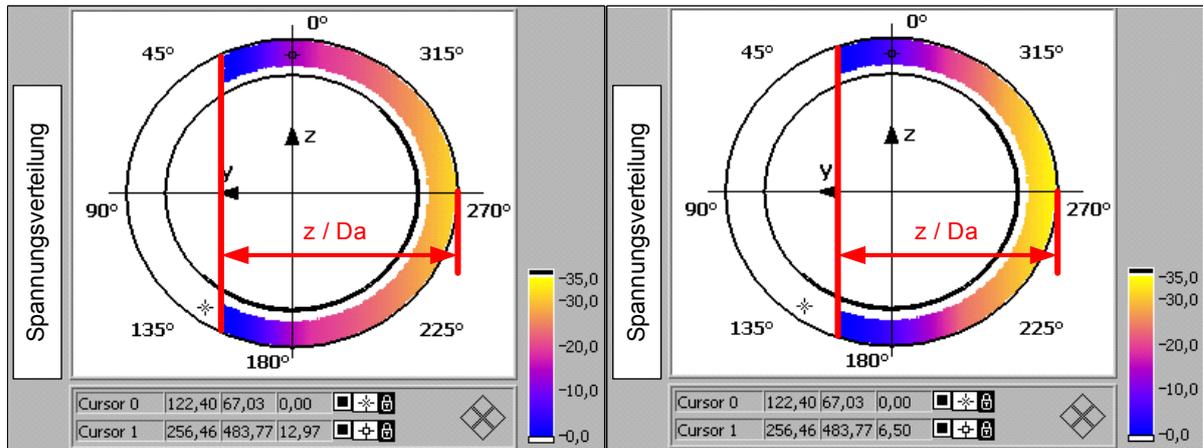


Bild 5.18: Versuchsreihe 2; Versuch 2.2:
Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 7,3 m (links),
Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 20,7 m (rechts)

Zum Vergleich ist im Bild 5.18 (rechts) die Spannungsverteilung bei Station 20,7 abgebildet. Bei etwa gleicher Rohrverwinklung von $0,3^\circ$ und gleicher resultierender Vorpresskraft ergab sich hier ein Maß der Fugenklaffung von ca. 0,6. Die Querschnittsbereiche im linken Kämpfer wurden bereits durch eine maximale negative Verwinklung vorverformt und haben dadurch starke irreversible Stauchungen erfahren. Das Gleichgewicht in der Rohrfuge stellt sich bei einer Verformungskonstellation ein, bei der die Fugenzwischenlage im rechten Kämpfer größere Verformungen erfährt. Daher wurden für diese Station auch höhere Druckspannungen berechnet. Die Spannungmaxima im rechten Kämpfer betragen hier ca. $35,0 \text{ N/mm}^2$.

Außerdem übt die Vorverformung im rechten Kämpfer einen starken Einfluss auf die Spannungsverteilung im Rohrquerschnitt aus. Die vorkonditionierten Bereiche der Fugenzwischenlage haben eine wesentlich höhere Steifigkeit, so dass bei gleicher Stauchung bereichsweise höhere Spannungen auftreten. Die gleiche Vorpresskraft wird dadurch über kleinere Querschnittsbereiche weitergeleitet.

5.5.3 Kontrolle der Fugenspannungsberechnungen mit TEKSCAN

Das Ziel der Kontrollmessung mit der Foliendruckmesstechnik war der qualitative und quantitative Vergleich der Spannungsverteilung in der Rohrkontaktfuge. Die Betrachtung der Spannungsmessung in der Rohrfuge zwischen den belasteten und verwinkelten Rohren zeigt, dass die Spannungsverteilung von der Höhe der

Vorpresskraft, dem Grad der Rohrverwinklung und von der Belastungshistorie der Fugenzwischenlage abhängig ist.

Im Bild 5.19 wird die berechnete Spannungsverteilung in der Rohrkontaktfuge bei Station 7,3 m im Versuch 2.2 der mit dem Foliendruckmesssystem gemessenen Spannungsverteilung gegenübergestellt. Bei einer resultierenden Vorpresskraft in der Rohrfuge von ca. 38,0 to und einer Rohrverwinklung von $0,3^\circ$ wurden Extremwerte der Fugenspannungen von ca. $38,0 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Das Maß der Fugenklaffung betrug laut Messung 0,6.

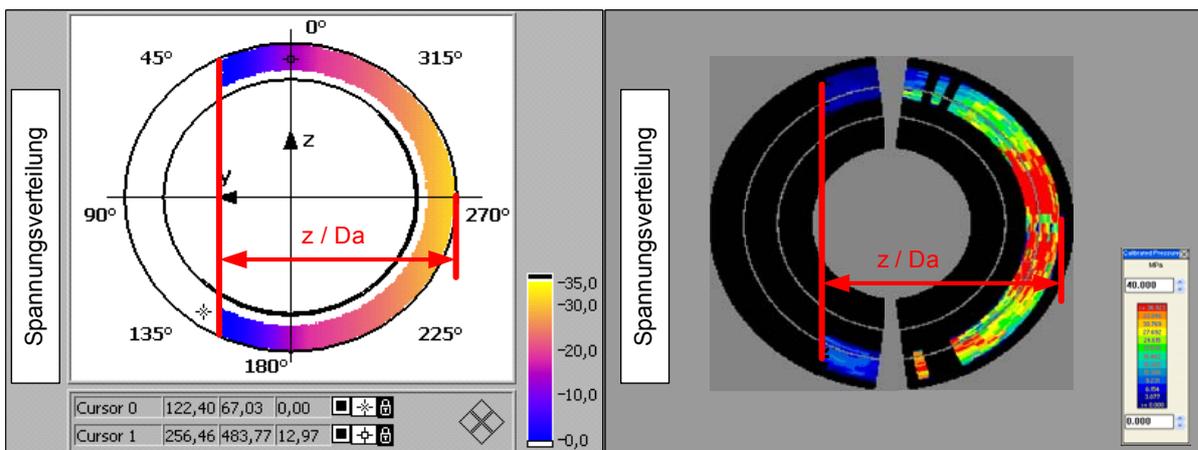


Bild 5.19: Versuchsreihe 2; Versuch 2.2:
 berechnete Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 7,3 m (links),
 gemessene Spannungsverteilung am Rohrspiegel, Station 7,3 m (rechts)

Die im Versuch gemessenen Fugenspannungen lagen etwas oberhalb der theoretisch berechneten Spannungen. Dagegen war das Maß der Fugenklaffung sowohl bei den berechneten als auch bei den gemessenen Spannungsverteilungen fast identisch. Die geringfügigen Abweichungen der gemessenen und berechneten Fugenspannungen ergeben sich zum Teil aus der Messgenauigkeit.

Die Foliensensoren werden vor Beginn der Messung kalibriert. Weicht der Betrag der zu messenden Belastung vom Kalibrationspunkt stark ab, wird die quantitativ ermittelte Spannungsgröße nur sehr ungenau bestimmt [4]. Eine höhere Messgenauigkeit war bei den Vortriebsversuchen mit dem vertretbaren Aufwand nicht möglich. Die quantitative Beurteilung des Materialmodells mit der Foliendruckmesstechnik ist daher problematisch. Die qualitative Analyse ist hingegen gut möglich. Im Bild 5.19 ist eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen deutlich. Die geringen Abweichungen resultieren aus geometrischen Imperfektionen. Die vorausgesetzte Ebenheit der Rohrspiegel und der Fugenzwischenlage ist in der Realität nicht gegeben.

5.5.4 Beurteilung des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre

Zur baubegleitenden Überwachung einer schadensfreien Vortriebsausführung ist die Beurteilung der Tragfähigkeit der Vortriebsrohre erforderlich. Hierzu werden vortriebsbegleitend die von der Rohrverwinkelung und der zu übertragenden Vorpresskraft abhängigen maximalen Fugenspannungen berechnet.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit in Richtung der Rohrachse kann die einwirkende Druckkontaktspannung in der Rohrfuge vom Rohrwerkstoff gerade noch aufgenommen werden. Diese Belastungs- bzw. Verformungskonstellation tritt ein, wenn die Kontaktspannung am Rand des Rohrquerschnitts gleich der Druckfestigkeit des Rohrwerkstoffs ist.

$$\frac{\beta_{LD}/\gamma}{\sigma_{\max}} \leq 1 \quad (5.7)$$

Das Kriterium für die schadensfreie Kraftübertragung der Vorpresskraft in Richtung der Rohrachse ergibt sich somit aus der in Gleichung (5.7) aufgeführten Bedingung. Demnach ist die am Rand des Rohrquerschnittes wirkende maximale Längsdruckspannung auf die rechnerische Längsdruckfestigkeit des Rohrwerkstoffes zu begrenzen. Als rechnerische Druckfestigkeit wird die um einen Sicherheitsbeiwert reduzierte Druckfestigkeit des Werkstoffes eingesetzt.

Die Sicherheitsbeiwerte für verschiedene Rohrwerkstoffe können dabei dem ATV - Arbeitsblatt A 161 entnommen werden. Danach wird für Steinzeugvortriebsrohre in Richtung der Rohrachse ein Sicherheitsbeiwert von 2,0 angesetzt. Dem Berechnungsansatz für die Vortriebsüberwachung im Rahmen der Vortriebsversuche wird eine Längsdruckfestigkeit des Steinzeugrohres von 100 N/mm² zugrunde gelegt. Über eine Extremwertaufgabe wird die maximale Druckspannung im Querschnitt ermittelt und der zulässigen Druckspannung gegenübergestellt.

In Bild 5.20 ist die Entwicklung der maximalen Druckspannung in einer Rohrfuge im Versuch 1.3 dargestellt. Bei einer zentrischen Pressung auf den ersten 4,0 m lagen die Druckspannungen bei etwa 11,0 N/mm². Die Extremwerte der Fugenspannungen traten im weiteren Vortriebsverlauf an den Stationen auf, an denen auch die größten Rohrverwinkelungen aufgetreten waren. Bei guter Vortriebssteuerung waren die Verwinkelungen erwartungsgemäß klein, so dass die maximale, berechnete Spannung von ca. 21,0 N/mm² deutlich unter der Längsdruckfestigkeit des Steinzeugrohres lag. Dies bestätigt die Tatsache, dass bei einer guten Steuerung die Rohrbelastungen gering bleiben.

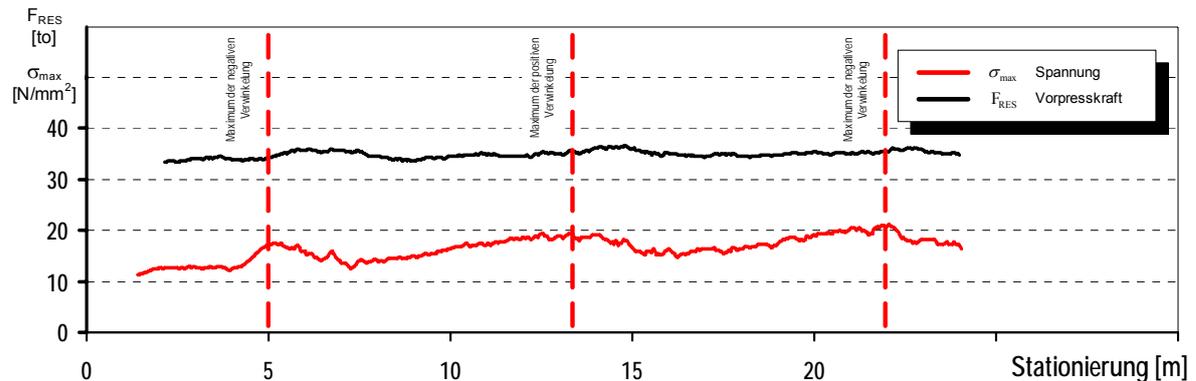


Bild 5.20: Versuchsreihe 1; Versuch 1.3: resultierende Vorpresskraft, maximale Druck-Kontakt-Spannungen

In Bild 5.21 ist der Verlauf der maximalen Druckspannung in einer Rohrfuge im Versuch 2.2 abgebildet. Ähnlich wie in den Versuchen der ersten Versuchsreihe traten die Extremwerte der Fugenspannungen dort auf, wo ebenfalls die Extremwerte der Rohrverwinklung dokumentiert wurden. Bei schlechter Vortriebssteuerung wurden enge Kurvenradien aufgeföhren, so dass im Vergleich zu einer guten Steuerung wesentlich größere Fugenwinkel ermittelt wurden.

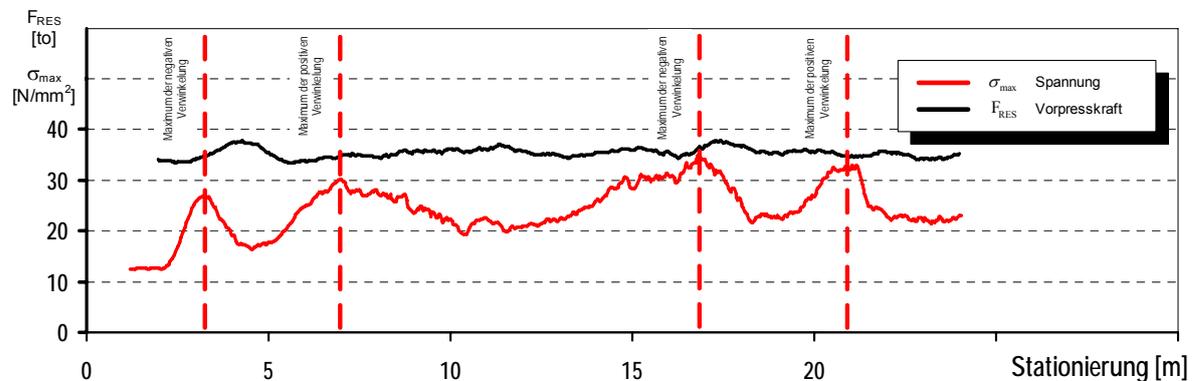


Bild 5.21: Versuchsreihe 2; Versuch 2.2: resultierende Vorpresskraft, maximale Druck-Kontakt-Spannungen

Die Betrachtung der Spannungsspitze im Versuchsverlauf macht deutlich, dass größere Rohrverwinklungen betragsmäßig höhere Spannungskonzentrationen verursachen. Die abrupten Steuerbewegungen im Vortrieb haben höhere Rohrbelastungen und somit auch die Erhöhung des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre zur Folge. Bei einer Rohrverwinklung von ca. $0,3^\circ$ und einer resultierenden Vorpresskraft in der Rohrfuge von ca. 38,0 to wurden Druckspannungen von bis zu $35,0 \text{ N/mm}^2$ berechnet. Diese Rohrbelastung entspricht in etwa einem Ausnutzungsgrad des Steinzeugvortriebsrohres von 70,0 %. Im Vergleich dazu wurde bei der gleichen Vorpresskraft und einer guten

Vortriebssteuerung ein Ausnutzungsgrad von ca. 0,4 ermittelt. De facto entspricht dies einer Reduzierung der Rohrbeanspruchung von über 80,0 %.

Hohe irreversible Verformungen der Fugenzwischenlage bewirken außerdem größere Fugenspannungen im weiteren Verlauf des Vortriebes, die wiederum zum Einstieg der Druckspannungen im Scheitel oder in der Sohle des Rohrquerschnittes bei Verwinkelungen in der Vertikalen führen können. Eine detaillierte Betrachtung der irreversiblen Verformungen der Fugenzwischenlage kann künftig zur Prognose der Rohrbelastungen im weiteren Verlauf der Vortriebstrecke dienen.

5.5.5 Überwachungssoftware

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden umfangreiche baubegleitende Messungen und in situ nahen Untersuchungen am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurden Berechnungsansätze zur Bestimmung der Rohrverwinkelungen und der daraus resultierenden Rohrbelastungen ausgearbeitet.

In einem weiteren Arbeitsschritt des Forschungsvorhabens wurden diese Berechnungsverfahren in numerischen Berechnungsalgorithmen umgesetzt, die in Form eines Software-Moduls adaptiv in die Rechen- und Vermessungssysteme der Vortriebsanlagen integriert werden können. Im Bild 5.22 ist die Softwareoberfläche zur Erfassung und Verarbeitung der Vortriebsdaten dargestellt. Diese am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH - Aachen entwickelte Software kann zur Überwachung und Qualitätssicherung der Bauausführung auf Vortriebsbaustellen eingesetzt werden.

Die Überwachungssoftware ist in der Lage, im ersten Arbeitsgang der Datenauswertung aus den vortriebsbegleitend dokumentierten Vermessungsdaten die tatsächlich auftretenden Rohrverwinkelungen zu bestimmen. Im zweiten Arbeitsgang können die Verformungs- und Spannungszustände in einer beliebigen Rohrfuge in dem Vortriebsstrang berechnet und ausgewertet werden. Damit ist es möglich zu einem beliebigen Zeitpunkt des Vortriebes die höchstbelastete Rohrfuge im gesamten Rohrstrang zu identifizieren. Im dritten Arbeitsgang werden die ermittelten Extrema der Druckkontaktspannung in der Rohrfuge den zulässigen Druckspannungen des Rohrwerkstoffes gegenübergestellt. Auf Grund der kontinuierlichen Datenerfassung kann der aktuelle Ausnutzungsgrad der Vortriebsrohre in Abhängigkeit der Belastungshistorie ermittelt werden.

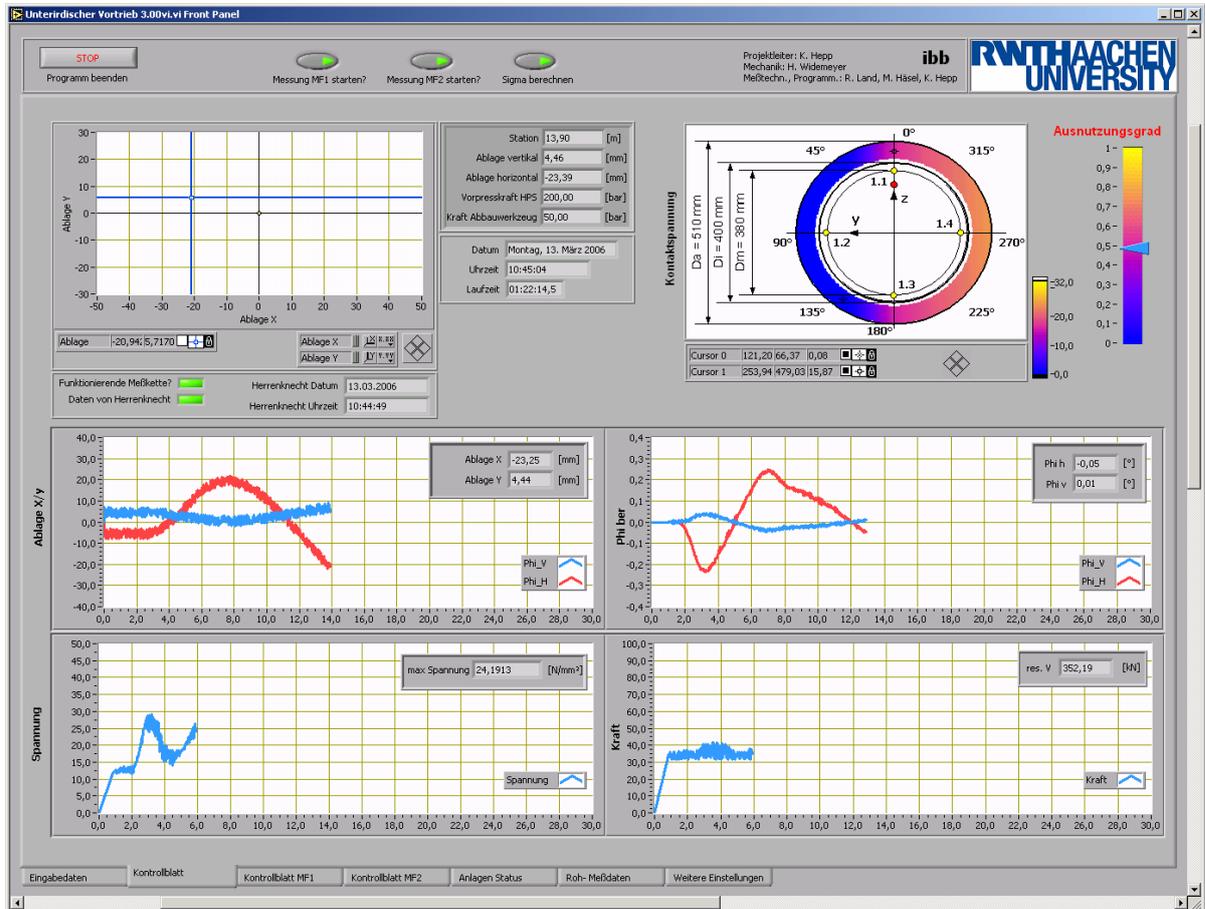


Bild 5.22: Überwachungssoftware, Softwareoberfläche

Der Ausnutzungsgrad liefert Informationen über die aktuelle Resttragfähigkeit der Vortriebsrohre. Die Resttragfähigkeit für den Rohrstrang wird permanent ermittelt und am Steuerstand der Vortriebsanlage angezeigt. Dadurch kann die Einhaltung der zulässigen Belastungen vortriebsbegleitend kontrolliert werden. Außerdem können die möglichen Überlastungen der Vortriebsrohre durch zu hohe Pressenkräfte z. B. durch eine Notabschaltung der Vortriebspressen an der Hauptpressstation oder an den Zwischenpressstationen vermieden werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des ersten Teils dieses Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Materialuntersuchungen an Fugenzwischenlagen durchgeführt. Anschließend wurden im zweiten Teil des Forschungsprojektes aufgezeichnete Messwerte von in situ durchgeführten Rohrvortrieben ausgewertet. Im dritten Teil wurden in situ nahe Untersuchungen am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH - Aachen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen tragen dazu bei, künftig die Bauausführung bei Rohrvortrieben qualitativ sicherer zu gestalten.

Die Ergebnisse der Materialuntersuchungen haben gezeigt, dass die Holzwerkstoffe für Fugenzwischenlagen ein nichtlineares elasto-plastisches und viskoses Materialverhalten aufweisen. Diese mechanischen Eigenschaften haben beim Vortrieb einen entscheidenden Einfluss auf die Verformungs- und Spannungsverteilung in der Rohrfuge. Ein am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb entwickeltes Materialmodell ermöglicht es, die mechanischen und rheologischen Eigenschaften der Holzwerkstoffe bei der Berechnung von Rohrbeanspruchungen im Bauzustand zu berücksichtigen. Die kurzzeitigen Belastungsvorgänge können mit diesem Materialmodell mit einer guten Genauigkeit ermittelt werden. Das Langzeitverhalten der Fugenzwischenlagematerialien wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht. Da die Vortriebsarbeiten über längere Zeiträume durchgeführt werden, üben die Relaxations- und Kriechvorgänge ebenfalls einen Einfluss auf die Rohrbelastungen aus. Zur Erfassung dieser rheologischen Phänomene müssen daher weitere Langzeituntersuchungen durchgeführt werden.

Für die vortriebsbegleitende Erfassung der Verformungen in den Rohrfugen ist eine kontinuierliche Ermittlung der Rohrverwinkelungen erforderlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb entwickelte Messtechnik weiter entwickelt und verbessert. Die Messeinrichtungen und die Softwarekomponenten wurden für die Erfassung und Verarbeitung von Vermessungsdaten erweitert.

Die Ergebnisse der Messungen und die dazu korrespondierenden Berechnungen zeigen, dass die aufgefahrene Vortriebstrajektorie Rückschlüsse auf die Rohrverwinkelungen zulässt. Die grundlegenden Annahmen zur Berechnung der Rohrverwinkelungen wurden durch Ergebnisse von Referenzmessungen bestätigt. Die Rohrverwinkelungen können mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit an den jeweiligen Stationen aus Vermessungsdaten der Vortriebsanlage ermittelt

werden. Weitere Untersuchungen, die zu einer Kompensierung der Messunsicherheiten infolge baubetrieblicher und vermessungstechnischer Einflüsse beitragen können, müssen künftig vorgenommen werden.

Zur Vermeidung von Rohrschäden im Bauzustand wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Berechnungsverfahren entwickelt, das die Rohrverwinkelungen und die Materialeigenschaften der Fugenzwischenlage berücksichtigt. Zur Qualitätssicherung der Bauausführung wurde das neue Verfahren in eine Überwachungssoftware implementiert. Die Vortriebsparameter dienen dabei als Datengrundlage für die Ermittlung der Beanspruchungszustände der Vortriebsrohre im Bauzustand. Die Überwachungssoftware ermöglicht es, aus den beim Vortrieb standardmäßig erfassten Vermessungsdaten des Vortriebsschildes und der Vorpresskraft die Verformungs- und Spannungszustände in den Rohrfugen zu bestimmen.

Das neue Berechnungsverfahren ermittelt vortriebsbegleitend den Ausnutzungsgrad der Tragfähigkeit der Vortriebsrohre. Der Ausnutzungsgrad für die Vortriebsrohre wird am Steuerstand der Vortriebsanlage angezeigt, um den Maschinenführer frühzeitig vor einer möglichen Überlastung des Rohrstranges zu warnen. So können Schäden an Vortriebsrohren und folglich hohe Sanierungskosten vermieden werden.

Ein weiterer Bestandteil der Überwachungssoftware ist die streckenbezogene Dokumentation der Vermessungsdaten, der maßgebenden Verwinkelungen und Rohrbelastungen. Mit der lückenlosen Dokumentation dieser Werte sind die Beurteilung einer schadensfreien Bauausführung und die Kontrolle der vertraglich zugesicherten Bauleistung für alle Baubeteiligten möglich.

Die Ermittlung der Verformungs- und Spannungszustände in den Rohrfugen aus Vermessungsdaten erfolgt iterativ. Diese Vorgehensweise zur Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Vortriebsrohre ist sehr rechenintensiv und erfordert daher eine hohe Rechenleistung. Das Berechnungsverfahren ist daher für lange Vortriebstrecken mit einer großen Anzahl von Rohrfugen noch nicht geeignet. Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Rechenvorgänge und möglichen Reduzierung des Rechenaufwandes sollen daher Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ATV Arbeitsblatt 125: Rohrvortrieb., Abwassertechnische Vereinigung e.V. GFA,

St. Augustin, September 1996

- [2] ATV Arbeitsblatt 161: Rohrvortrieb., Abwassertechnische Vereinigung e.V. GFA, St. Augustin, Januar 1990
- [3] Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A., Taschenbuch der Mathematik., 24. Auflage, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1989
- [4] Buchhardt, A.: Statische Berechnung von Microtunneling-Vortriebsrohren mit abwinkelbaren Rohrverbindungen für den Bauzustand., In: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement, ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, Shaker Verlag, Aachen 2003
- [5] Buchhardt, A.: Untersuchung zur Spannungsverteilung zwischen Vorpressrohren. Teil 1., In: bi Umweltbau, Heft 2/2002, S. 6-13
- [6] Buchhardt, A.: Untersuchung zur Spannungsverteilung zwischen Vorpressrohren. Teil 2., In: bi Umweltbau, Heft 3/2002, S. 4-15
- [7] Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton., Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e. V., Bonn, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1978
- [8] Osebold, R., Beyert, J., Peters, M., Abschlußbericht zum BMBF - Forschungsvorhaben 02 WK 9996 / 0: Sicherung und Verbesserung der Rohrvortriebstechnik als umweltschonendes Verlegeverfahren bei Sanierung und Neubau von Kanalisationen., ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH-Aachen, 2004
- [9] Peters, M., Verfahren zur vortriebsbegleitender Erfassung der Rohrfugenbelastungen aus Steuerdaten der Vortriebsmaschine., In: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement, ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, Shaker Verlag, Aachen 2005
- [10] Schad, H., Bräutigam, T., Bramm, S.: Rohrvortrieb: Durchpressen begehrbarer Leitungen., Ernst & Sohn, Berlin 2003
- [11] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau., Ernst & Sohn, Berlin 2003
- [12] Uffmann H.-P., Deisenroth W.: Spannungsverteilung in der Rohrfuge beim Rohrvortrieb; Praxis bestätigt neue Erkenntnisse. In: Sonderdruck aus bi-umweltbau, Heft 1/ 2000

- [13] Witte, B., Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen., Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart 1991