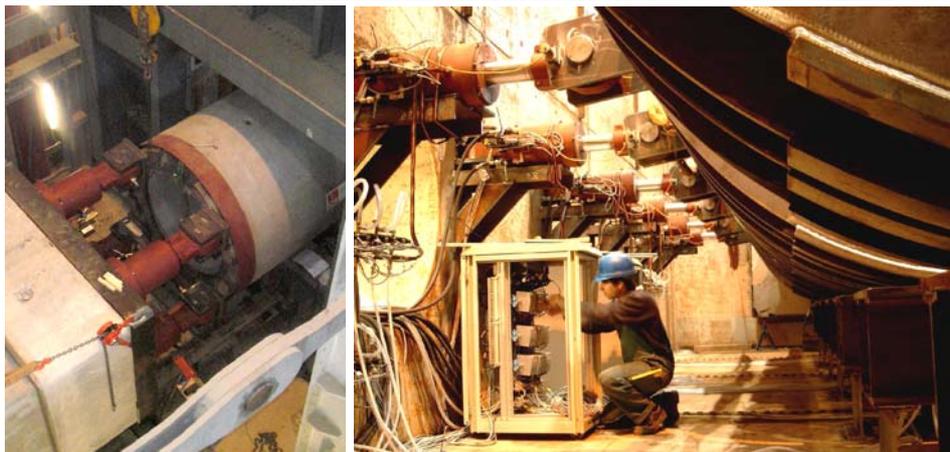


- Der IKT-Vortriebssimulator - Entwicklung, Bau, Versuche und Ergebnisse



Kurzbericht

- Juli 2007 -

Kurzbericht zu den Forschungsprojekten:

Qualitätssicherung von Vortriebsrohren aus Stahlbeton

AZ: IV-9-041 105 0170 und AZ: IV-9-041 105 0190

Auftraggeber:



Ministerium für
Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes NRW



Emschergenossenschaft und Lippeverband
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen

Auftragnehmer:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Bearbeitung:

Wissenschaftliche Leitung: Dr. Ing. B. Bosseler

Projektleitung und –bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Liebscher
Dipl.-Ing. A. Redmann
Dipl.-Ing. A. Downar

Simulations- und Messtechnik: Dipl.-Ing. (FH) F. Bersuck
Dipl.-Ing. M. Tadic

Danksagung:

Wir danken insbesondere Herrn Dipl.-Ing. H. Sommerhage, Emschergenossenschaft, Essen, für die fachliche Begleitung des gesamten Vorhabens sowie die Ausrichtung des Projektes auf die Anforderungen der Praxis. Die Erfahrungen aus Baumaßnahmen der Emschergenossenschaft trugen maßgeblich zum Projekterfolg bei.

Weiterhin danken wir Herrn Dr.-Ing. K. Haubrachs, Erdbaulaboratorium Essen, für die Unterstützung bei der Auswahl der Simulationseckdaten und die Interpretation der Modellversuche aus Sicht des Baugrundgutachters.

Herrn Dr.-Ing. I. Spohr und Herrn Dr.-Ing. S. Heimer, Zerna Ingenieure, Bochum, danken wir für die Unterstützung bei der Auswahl der Versuchsrandbedingungen auf Basis von Finite-Element-Berechnungen und die inhaltliche Diskussion der Ergebnisse aus Modell- und Großversuchen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Falter und Herrn Dipl.-Ing. F. Holthoff, Fachhochschule Münster, danken wir für die Begleitung der Großversuche durch numerische Berechnungen und die weitergehenden numerischen Analysen zum Systemverhalten bei Einsatz unterschiedlicher Druckübertragungsmittel.

Auch gilt unser Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Achmus und Herrn Dipl.-Ing. M. Klameth, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover, für die Bewertung der Bettungsbedingungen im Großversuch und die vergleichenden FEM-Analysen zur Übertragung der Simulationsergebnisse auf unterschiedliche Bodenarten und zur Ermittlung der entsprechenden Reibungswiderstände.

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	Seite
1 VERANLASSUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	3
2 SIMULATIONSECKDATEN	4
3 MODELLVERSUCHE	6
4 GROßVERSUCHE: KONZEPT UND PLANUNG.....	6
5 VERSUCHSTECHNISCHE UMSETZUNG.....	12
6 VORTRIEBSSIMULATION - PRAXISBEISPIEL	13
7 TRASSEN- UND BETTUNGSVARIATIONEN	19
8 DRUCKÜBERTRAGUNGSMITTEL IM VERGLEICH	19
9 REIBUNGSWIDERSTAND BEI GEKRÜMMTEN TRASSEN	22
10 DICHTHEIT VON ROHRVERBINDUNGEN	23
11 EMPFEHLUNGEN	24
12 AUSBLICK.....	28
13 LITERATUR	31

Verwendete Formelzeichen

c	Kohäsion
d_a	Außendurchmesser Rohr
d'	Sekante der Kontaktfläche Rohr-Boden
E_S	Steifemodul
F_u	Auslängungskräfte
f_e	horizontale Endausmitte des statischen Systems
f_k	horizontale Ausmitte der Kalotte
f_m	Bogenstich
f_p	rechnerische Ausmitte der Kraftpaare der Vorpresszylinder
h	Überdeckungshöhe
L	Vortriebslänge
L_{Rohr}	Rohrlänge
M_s	spezifische Mantelreibung
P_B	rechnerischer Brustwiderstand
P_M	rechnerische Mantelreibung je Rohr
R	Kurvenradius
u_0	Auslenkung ohne Überschnitt
$u_{\ddot{U}}$	Auslenkung mit Überschnitt
\ddot{U}	Überschnitt
V	Vorpresskraft
W	Reibungswiderstand
γ	Wichte
γ'	Wichte unter Auftrieb
φ'	Winkel der inneren Reibung
φ_E	Anstellwinkel des statischen Systems
φ_K	Anstellwinkel Widerlager
φ_P	Anstellwinkel Pressstation
φ_S	Winkel zwischen den Rohren
μ	Reibungsbeiwert
$\sigma_{a,v}$	vertikale Auflastspannung
σ_K	Kissendruck

1 Veranlassung und Problemstellung

Rohrvortrieb hat sich als wirtschaftlich sinnvolle und umweltschonende Alternative zur Neuverlegung in offener Bauweise bewährt. Allerdings unterliegen die Rohre insbesondere bei nicht geradliniger Trasse und schwierigen Baugrundbedingungen während des Bauvorganges besonderen Belastungen. Bisherige Prüfkonzepte beschränken sich hier nur auf die Prüfung einzelner Rohre und Verbindungen und vernachlässigen die Bettung und Krümmung des Rohrstranges. Auch die Eigenschaften der Werkstoffe für die Druckübertragungsmittel sind unter Vortriebsbelastungen nur schwer oder gar nicht zu ermitteln.

In einer Studie der Universität Hannover wurden zahlreiche Bauschadensfälle bei Rohrvortriebsmaßnahmen statistisch ausgewertet [1]. Es zeigte sich, dass Schäden an den Vortriebsrohren und den Rohrverbindungen im Vergleich zu Schwierigkeiten mit Presseinrichtung, Vortriebsschild usw. am häufigsten auftreten. Hier sind insbesondere Rissbildungen oder Abplatzungen (vgl. Bild 1) zu nennen. Besonders kritisch sind Schäden an der Rohraußenseite, da diese beim Rohrvortrieb in der Regel nicht erkannt werden können.



a) Rissbildung

b) Abplatzung innen

c) Abplatzung außen

Bild 1 Schadensrisiken beim Rohrvortrieb

Allein in Nordrhein-Westfalen sind Investitionen von ca. 500 Millionen Euro jährlich für den Neubau von Kanalisationsnetzen geplant [2]. Einen wesentlichen Anteil hieran hat der Umbau des Emscher-Systems mit ca. 150 Millionen Euro/Jahr. Weite Kanalstrecken des Emscher-Systems werden im Rohrvortrieb mit Großrohren bis DN 2800 gebaut. Die Qualität der Vortriebsrohre und Verbindungstechnik gewinnt damit an Bedeutung. Das Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen und die Emschergenossenschaft nahmen dies zum Anlass, das nachfolgend dargestellte Forschungsvorhaben zu fördern.

Ziel dieses Vorhabens ist es, auf der Basis von Vortriebssimulationen im Maßstab 1:1 praxisnahe Empfehlungen zur Planung und Steuerung von Rohrvortrieben sowie zur Auswahl und Bemessung geeigneter Rohre und Verbindungsmittel zu entwickeln. Hierzu sind die bisherigen Erkenntnisse zum Verhalten von Rohren unter Vortriebslasten zu hinterfragen, ggf. entsprechende Belastungsmodelle zu entwickeln und die relevanten Einflussfaktoren zu identifizieren. Im Rahmen der Planungs- und Baustellenbegleitung kann das an Großversuchen kalibrierte Modell auch zur qualitätssichernden Vortriebssimulation eingesetzt werden.

2 Simulationseckdaten

Den Schwerpunkt des Forschungsvorhabens bildete die Untersuchung von Vortriebsrohren aus Stahlbeton im begehbaren Nennweitenbereich. Im Vergleich zu den in [3] beschriebenen Laborversuchen sollten nicht nur einzelne kleinformative Rohre oder Rohrsysteme aus maximal zwei Rohren mit nur einer Verbindung den typischen Belastungen des Rohrvortriebs ausgesetzt werden, sondern Rohrstränge unter Einbeziehung mehrerer Verbindungen das Belastungsszenario eines kompletten Rohrvortriebs durchlaufen. Die Vorgehensweise sah zunächst die Planung, Konzeption und Umsetzung einer Versuchseinrichtung im Modellmaßstab vor. An dieser sollten sämtliche mess-, steuer- und regeltechnischen Fragestellungen erprobt und optimiert werden. Auch sollte sie die Quantifizierung der Belastungen in Längs- und Querrichtung ermöglichen. Auf Basis dieser Versuchserfahrungen wurde der Simulator im Maßstab 1:1 konstruiert und gebaut.

Daher wurden zunächst von den Projektbeteiligten relevante Randbedingungen von Vortrieben mit Stahlbetonrohren recherchiert und in mehreren Projektbesprechungen diskutiert. Der Maßstab für die Modellversuche wurde auf 1:4 festgelegt. Schließlich wurden auf dieser Basis die wesentlichen Randbedingungen herausgefiltert und Eckdaten für die Modell- und Großversuche unter Berücksichtigung der versuchstechnischen Möglichkeiten und des geltenden Normen- und Regelwerkes nach Tabelle 1 festgelegt.

Tabelle 1 Eckdaten für die Modell- und Großversuche

Kriterium	Großversuche	Modellversuche
Rohrnennweite:	DN 1600	DN 400
Rohrlänge:	3,2 m	0,8 m
Wanddicke:	25 cm	6,25 cm
Dicke Druckübertragungsmittel	25 mm	6 mm
Exzentrizität Lastangriff	Kernquerschnitt	Kernquerschnitt
Vortriebskraft:	max. 8 MN	max. 0,5 MN
Dicke Stahlführungsring:	12 mm	3 mm
Beton Güte / Größtkorn:	B 55 / 32 mm	B 55 / 8 mm

Für die Wahl des Druckübertragungsmittels im Modellversuch wurde ein auf die geringe Dicke abgestimmtes Versuchsprogramm entwickelt. Die Prüfergebnisse für ein Sperrholz mit 6 mm Dicke sind exemplarisch im Bild 2 dargestellt. Ziel war es, im Modell- und Großversuch ein vergleichbares Verhalten der Druckübertragungsmittel zu erreichen. Die 6 mm dicke Sperrholz-Platte verhielt sich im Modellversuch ähnlich wie eine 25 mm dicke OSB-Platte (oriented strand board) im Großversuch (s. Langfassung).

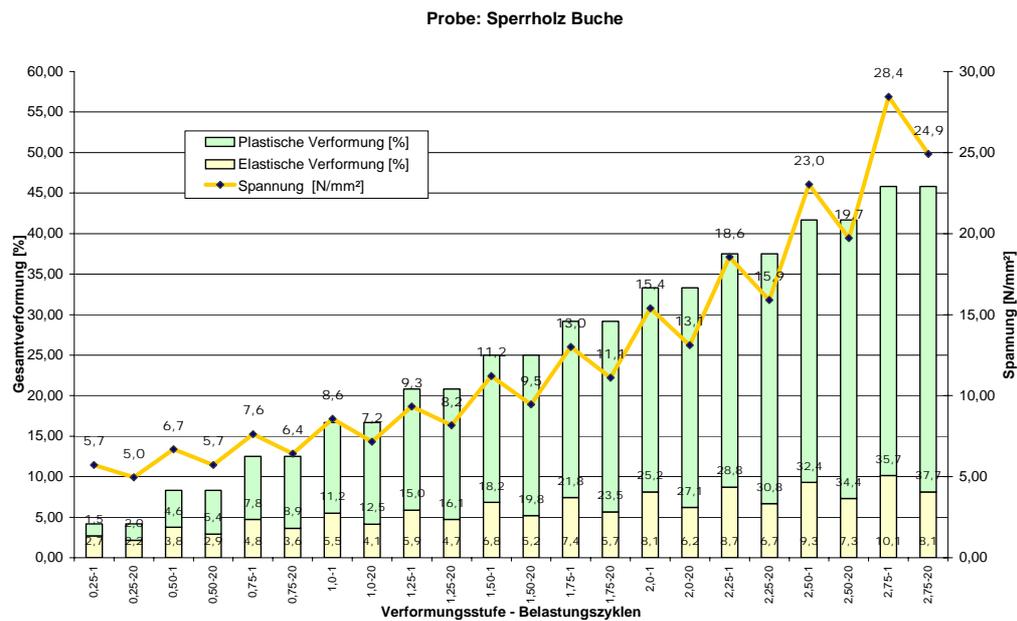
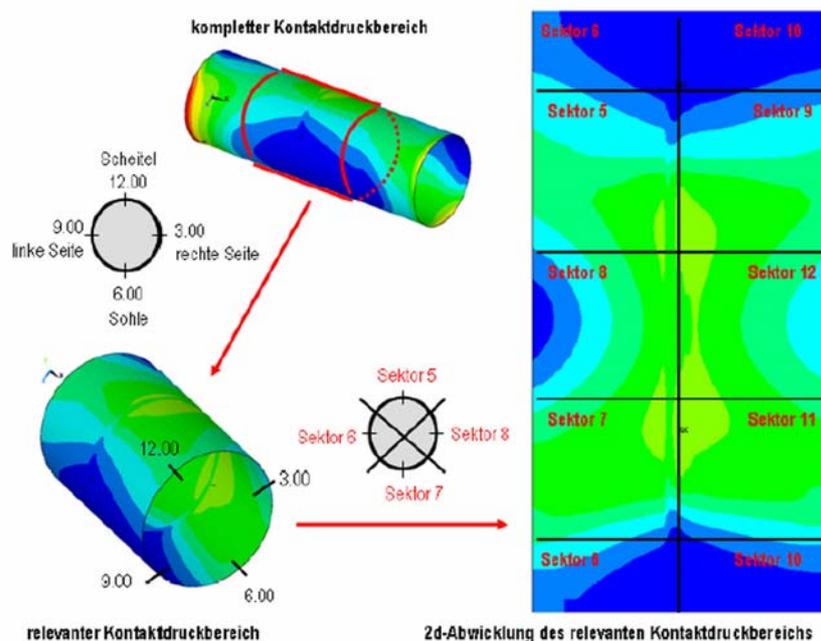


Bild 2 Ergebnisse der Druckübertragungsmitteluntersuchung – Sperrholz Buche (6 mm)

Zur Dimensionierung der Prüfbelastungen wurden die im Rohrvortrieb auftretenden Belastungen anhand von Finite-Element-Berechnungen abgeschätzt (vgl. [4]). Die Bodeneigenschaften wurden auf Basis einer entsprechenden Baugrundbetrachtung [5] für übliche Einsatzfälle im Emscher-System modelliert. Im Ergebnis konnten die an der Rohrmantelfläche wirkenden Kontaktspannungen in ihrer Größenordnung und -verteilung abgeschätzt und entsprechende Dimensionierungsvorschläge für die Versuchseinrichtung abgeleitet werden (vgl. Bild 3).



Dunkelblau = 0 N/mm² Hellgrün = 0,2 N/mm²

Bild 3 Qualitative Ergebnisse der FEM-Untersuchungen, aus [4]

3 Modellversuche

Vor der Planung und dem Bau der Versuchskonstruktion im Maßstab 1:1 wurde zunächst untersucht, ob das erarbeitete Versuchskonzept und die geplante Versuchskonstruktion grundsätzlich geeignet sind, den Vortrieb von Stahlbetonrohren realitätsnah und zuverlässig zu simulieren. Hierzu wurde eine der 1:1-Konstruktion entsprechende Modellvariante im Maßstab 1:4 geplant, bemessen und anschließend im IKT aufgebaut (Bild 4).



Bild 4 Gesamtansicht des Vortriebssimulators, Modell DN 400

Im Rahmen der Modellversuche im Maßstab 1:4 (DN 400) konnte die Mess-, Steuer- und Regeltechnik schrittweise so erprobt und verfeinert werden, dass das Versuchskonzept und die mess- bzw. steuer- und regeltechnischen Erkenntnisse und Entwicklungen auf die Großversuche übertragen werden konnten. Das Ziel der Modellversuche, nämlich die Entwicklung und Anpassung der Versuchstechnik, wurde damit erreicht.

Darüber hinaus offenbarten die Modellversuche auch erste Einblicke in das tatsächliche Verhalten eines gebetteten Rohrstranges aus Rohren und Verbindungsmitteln unter Vortrieblasten. Hieraus wurde nun ein Simulationsansatz für die Großversuche im Maßstab 1:1 abgeleitet.

4 Großversuche: Konzept und Planung

Die Idee zur Entwicklung des IKT-Vortriebssimulators entstand vor dem Hintergrund bestehender Unsicherheiten in der Beurteilung von Schäden und Schadensrisiken beim Rohrvortrieb sowie der derzeitigen, breitgefächerten Fachdiskussion über geeignete Bemessungsansätze. Durch gezielte Untersuchungen der Rohrstrangreaktionen unter Vortrieblasten sollten Erkenntnisse zu den Leistungen von Rohren und Rohrverbindungstechnik, zu möglichen kritischen Vortriebssituationen sowie der

Aussagekraft statischer Modellvorstellungen gewonnen werden. Bild 5 stellt die unterschiedlichen Denkansätze einander gegenüber.

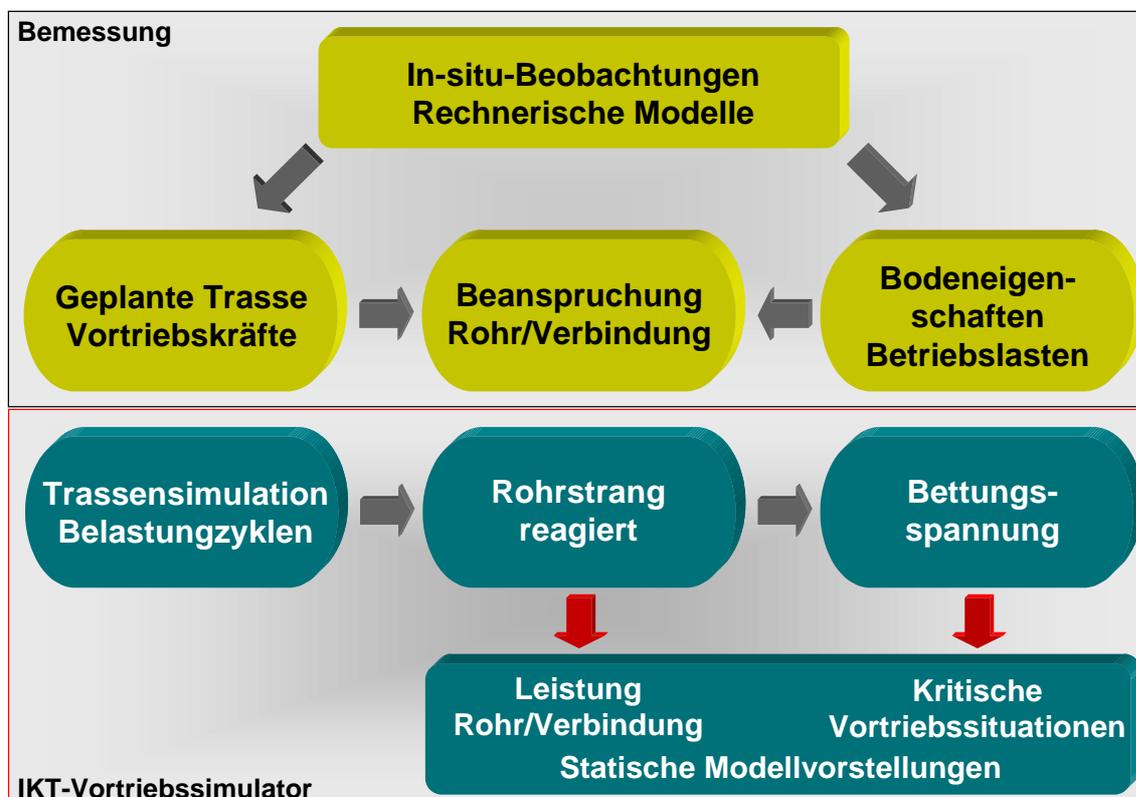


Bild 5 Vergleich der Aufgabenstellungen:
Bemessung und IKT-Vortriebssimulator

Bemessung: Die Bemessung von Rohren und Rohrverbindungen für den Rohrvortrieb fußt im Wesentlichen auf In-situ-Erfahrungen und rechentechnischen Modellen. So entwickeln sich aus den Erfahrungen mit früheren Rohrvortrieben fortlaufend Planungsgrundsätze, Techniken zur Bauausführung und Qualitätssicherungsstrategien. Ingenieurtechnische Modellvorstellungen, meist analytisch, empirisch oder mittels numerischer Berechnungsmethoden untermauert, stellen wiederum Zusammenhänge zwischen Baustellenbedingungen und -belastungen und den Beanspruchungen der Bauteile her. Zur vollständigen Beschreibung einzelner Baumaßnahmen greifen diese Erklärungsansätze auf entsprechende Annahmen zu den örtlichen Randbedingungen zurück. Dies betrifft die Wahl der geplanten Trasse, Vortriebskräfte und zu erwartenden Betriebslasten sowie die anzusetzenden Bodeneigenschaften, z.B. auf Basis eines Baugrundgutachtens. Im Ergebnis lassen sich die Beanspruchungen der einzelnen Rohre und Rohrverbindungen rechnerisch ermitteln und als Eingangswerte für die Bauteilbemessung nutzen. Ob die Bemessungsmodelle und -annahmen mit der tatsächlichen Situation der einzelnen Baumaßnahme übereinstimmen, bleibt im Falle eines schadensfreien Vortriebs letztlich offen. Lediglich im Schadensfall werden Widersprüche offenkundig und geben Anlass, die bisherigen In-situ-Beobachtungen um weitere Erfahrungen zu ergänzen und ggf. auch einzelne Modellvorstellungen zu hinterfragen.

IKT-Vortriebssimulator: Das Konzept des IKT-Vortriebssimulators ergänzt die Bemessungsvorstellung eines „passiven“ Rohres – d.h. das unter äußeren Lasten stehende Rohr wird für die Reaktionen auf von außen induzierte Beanspruchungen bemessen – um einen weiteren, „aktiven“ Betrachtungsansatz. Aus In-situ-Beobachtungen von Vortriebsmaßnahmen (z.B. [6]) ist bekannt, dass der gesamte Rohrstrang in zyklischen Belastungsschritten der vom Schild aufgefahrenen Vortriebstrasse folgt. Ein „Abschleifen“ des Bodens bei Kurvenfahrten wurde nicht festgestellt, so dass die Vortriebstrasse einschließlich planmäßiger Kurvenfahrten und Steuerkorrekturen als maßgebend für alle passierenden Rohre angesehen werden kann. Bei vorgegebener Trassengeometrie erfährt der Rohrstrang je Belastungszyklus (Vorschub eines Rohres) die zum Vortrieb notwendige Längsbelastung. Je nach Rohr- bzw. Rohrverbindungseigenschaften und Trassensituation reagiert der Rohrstrang im Belastungszyklus mit Verschiebungen senkrecht zur Trasse. Werden diese Verschiebungen vollständig unterbunden, entstehen entsprechende Bettungsreaktionen. An diesem „aktiven“ Verhalten des Rohrstranges unter axialer Belastung setzt das Konzept des IKT-Vortriebssimulators an: Ein Rohrstrang aus fünf Rohren wird bei simulierter Trassengeometrie einer axialen Belastung ausgesetzt und die in dieser Lage notwendigen Bettungsreaktionen ermittelt. Diese Bettungsreaktionen können als erster Hinweis für die in-situ maximal möglichen Bodenreaktionen bei vorgegebenen Rohr- und Verbindungseigenschaften angesehen werden. Die 1:1-Simulation mit tatsächlichen Rohren, Druckübertragungsmitteln und Dichtelementen berücksichtigt dabei auch die rechnerisch kaum zu erfassenden – aber vielfach maßgeblichen – geometrischen Imperfektionen (z.B. Betonoberfläche) und nichtlinearen elasto-visko-plastischen Werkstoffeigenschaften (z.B. Hölzer, Kunststoffe) auch unter großen Verformungen und längeren Verformungsgeschichten.

Zur Umsetzung dieses Simulationsansatzes wurde auf Basis der Erkenntnisse aus den Modellversuchen eine Einrichtung im Maßstab 1:1, der IKT-Vortriebssimulator, entwickelt und in den Großversuchsstand des IKT integriert. Dieser Großversuchsstand diente während des Projektes als Widerlagerkonstruktion zur Lastaufnahme sowie als Schutzraum für unvorhersehbare Lastreaktionen in der Einfahrphase. Bild 6 und Bild 7 stellen eine Funktionsskizze des Vortriebssimulators DN 1600 in Querschnitt und Draufsicht dar.

Eingeleitet werden die Vortriebskräfte über vier Hydraulikzylinder, welche mit Bolzen horizontal drehbar an einem Druckverteilungsring angeschlagen waren. Das Widerlager besteht aus einer Stahlkonstruktion mit zwei übereinander angeordneten Kugelkalotten, welche einen Eintrag der Reaktionskräfte in Rohrlängsrichtung bewirkten. Ein Eintrag von Biegemomenten ist im Bereich der Kalotten planmäßig ausgeschlossen. Dies ist bei der Auswahl der statischen Systeme für die unterschiedlichen Vortriebssituationen zu berücksichtigen.

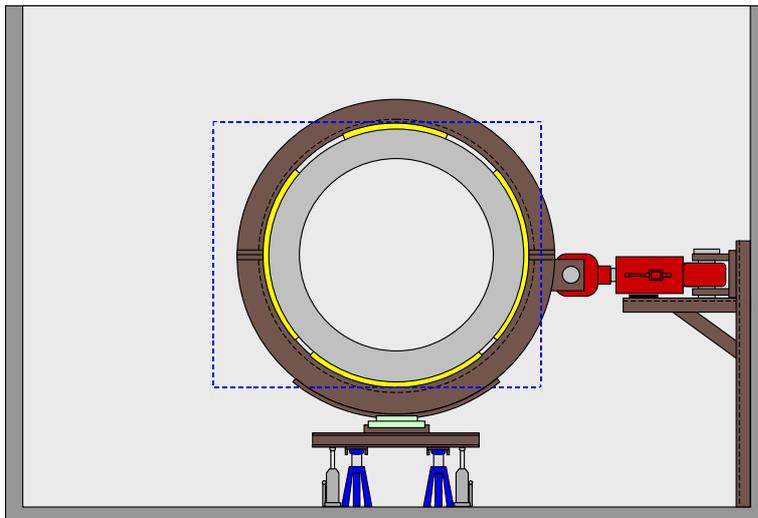


Bild 6 Großversuche – Querschnitt, Funktionsskizze

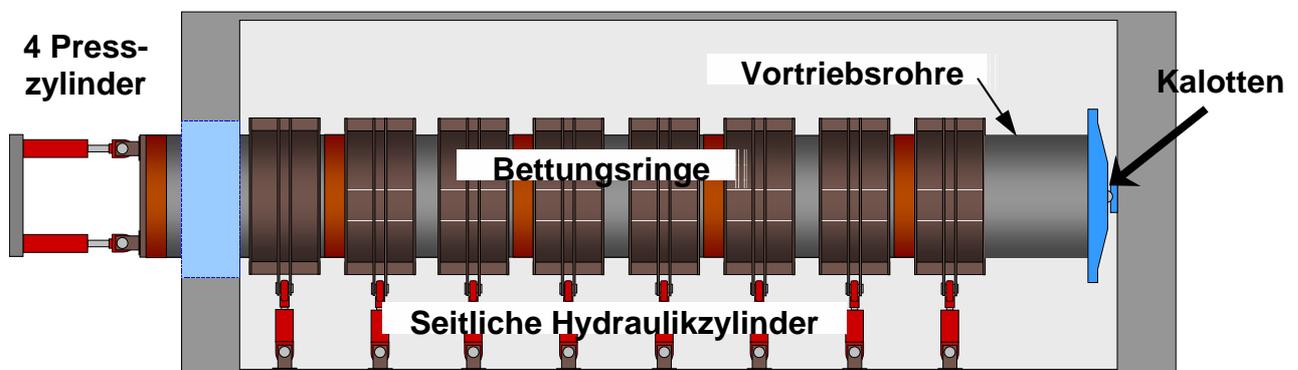


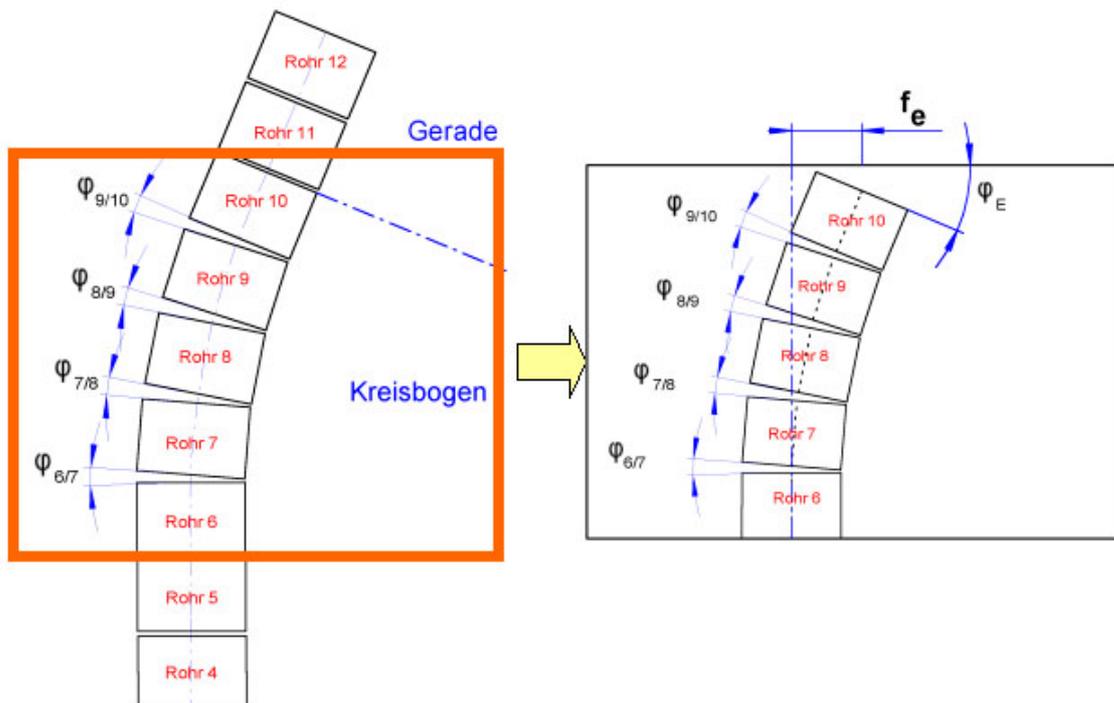
Bild 7 Aufbau der Großversuche – Draufsicht, Funktionsskizze

Durch die acht Hydraulikzylinder zur Einstellung der erforderlichen Horizontalverformung ist die maximale horizontale Verschiebung auf 200 mm beschränkt.

Folgende Vortriebssituationen wurden in den Großversuchen näher untersucht:

1. „Geradliniger Vortrieb“
2. „Planmäßige Kurvenfahrt“
3. „Einleiten einer Gegensteuerung“
4. „Fortsetzen einer Gegensteuerung“
5. „Einleiten einer Steuerbewegung“

Beispielhaft wird hier die Umsetzung der „Planmäßigen Kurvenfahrt“ erläutert. Einer der maßgebenden Parameter für diese Vortriebssituation ist der aufzufahrende Kurvenradius in Verbindung mit den sich einstellenden Abwinkelungen (Bild 8).



a) Übersicht (überhöhte Darstellung)

b) Detailsystem (überhöhte Darstellung)

Bild 8 „Planmäßige Kurvenfahrt“

Im Großversuchsstand wurde die Vortriebskraft axial in das erste Rohr über die Hydraulikzylinder eingeleitet (Bild 9). Das Widerlager mit der Kalotte wurde um das aus dem geplanten Kurvenradius resultierende Maß (f_k) horizontal verschoben. Dazwischen wurde der entsprechende Kurvenradius über Abwinkelungen eingestellt.

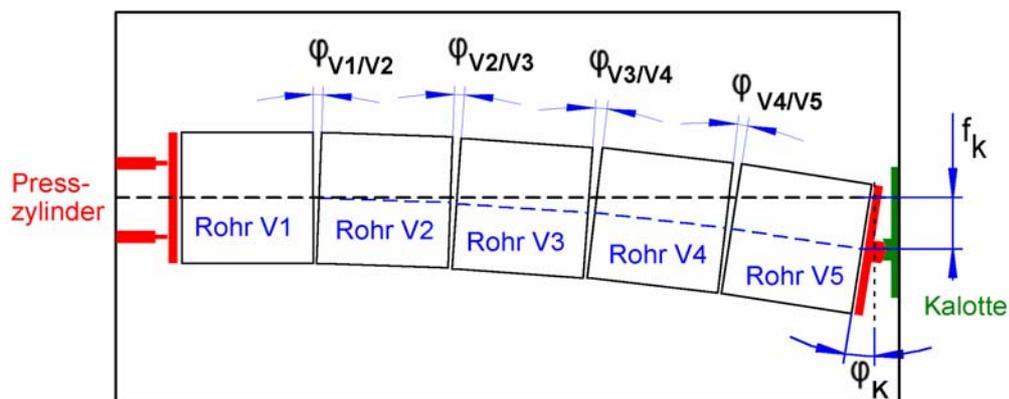


Bild 9 „Kurvenfahrt“ – Untersuchtes System (überhöhte Darstellung)

Da am Ende des Rohres V5 der Übergang in die Gerade erfolgte, wird dort von einem Momentennullpunkt ausgegangen. Mit diesem Versuchsaufbau konnte somit eine Kurvenfahrt für genau fünf Rohre nachgebildet werden. Dies erscheint insofern ausreichend, als dass die Bettungsreaktion, abgeleitet als Abtriebskraft bezogen auf die Bogenlänge, weitgehend unabhängig von der Kurvenlänge ist.

Mit Blick auf die Interpretation der gemessenen Bettungsreaktionen als aktivierbare Bodenspannungen wurden am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau (IGBE) der Universität Hannover ergänzende FE-Berechnungen durchge-

führt [7]. Ziel dieser Untersuchungen war die Quantifizierung der Interaktion eines Vortriebsrohres mit dem umgebenden Erdreich für verschiedene Böden und Überlagerungshöhen. Zu diesem Zweck wurden der Ausgangszustand theoretisch analysiert, Modellvorstellungen verglichen und ein FE-Modell entwickelt. Anhand der Ergebnisse soll es zukünftig möglich sein, die im IKT-Vortriebssimulator gewonnenen Erkenntnisse auf das Durchfahren verschiedener Böden in unterschiedlichen Tiefen zu übertragen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Langfassung dargestellt. Dort wird ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, mit dem sich umfassende Kraft-Verschiebungs-Beziehungen für die Querverschiebung eines Vortriebsrohres unter Vortriebsbelastungen herleiten lassen. Dabei können unterschiedliche Bodenarten, Lagerungsdichten, Überdeckungshöhen und Überschnitte berücksichtigt werden. Der Berechnungsalgorithmus ist im Bild 10 zusammengefasst und greift auf ein umfangreiches Tabellen- und Diagramm-Werk in [7] zurück.

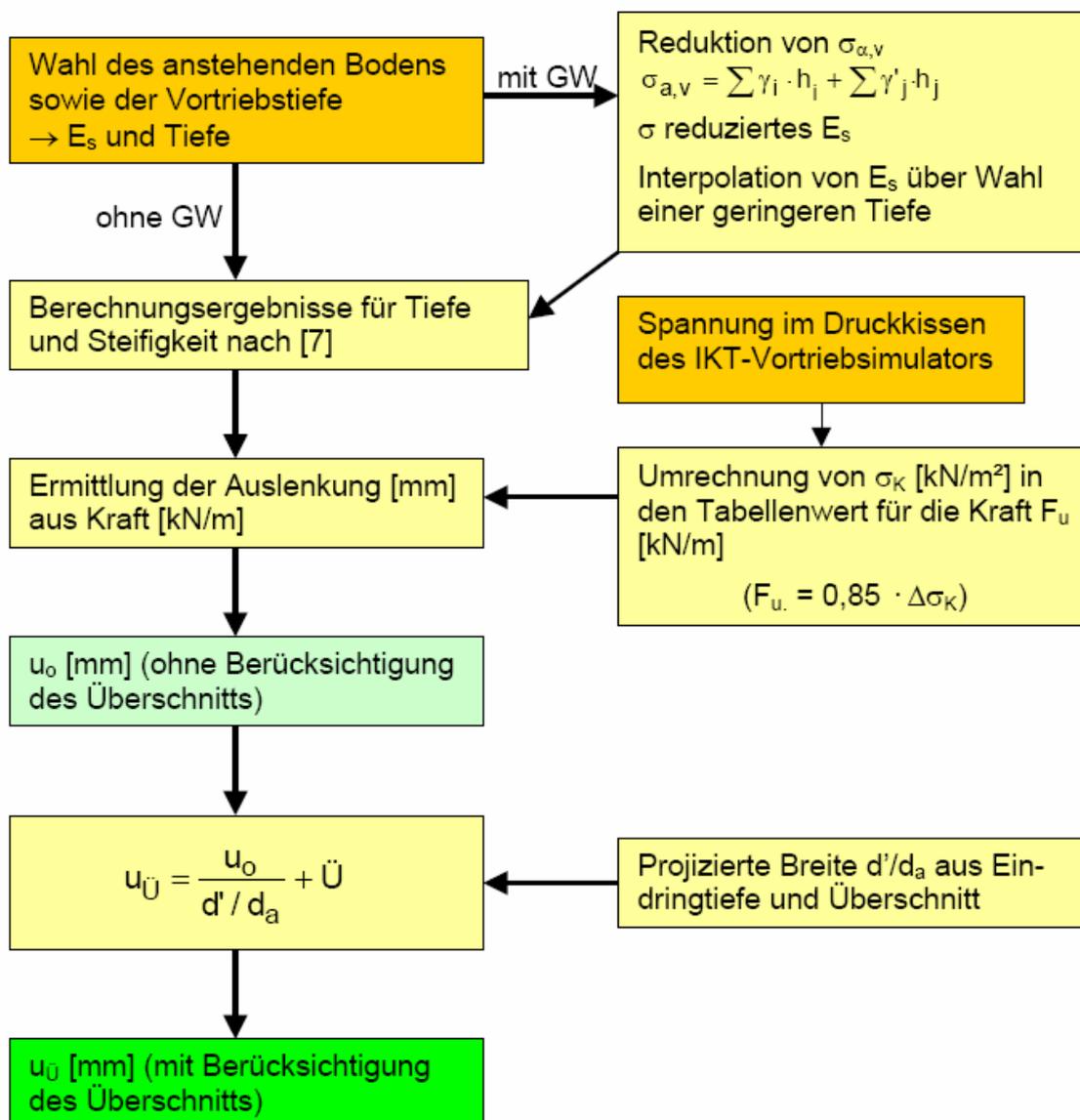


Bild 10 Berechnungsalgorithmus Rohr-Boden-Interaktion

5 Versuchstechnische Umsetzung

Der IKT-Vortriebssimulator setzte sich aus den Komponenten Vorpresstation, Widerlagerkonstruktion, Rohraufleger, seitliche Steuereinheit, Rohrbettung und fünf Vortriebsrohren zusammen. Zusätzlich waren eine Vielzahl messtechnischer Elemente Teil des Vortriebssimulators. Hier handelte es sich um induktive Wegaufnehmer bzw. Seilwegaufnehmer, Druckmesssensoren, Druckmessfolien und Dehnungsmessstreifen. Ein Teil der Messtechnik diente der Steuerung des Vortriebssimulators während des Versuchs, ein anderer Teil der Sensoren lieferte die Messwerte zur Auswertung der Versuche. Die verbauten Sensoren konnten teilweise auch gleichzeitig beide Funktionen übernehmen. Der Vortriebssimulator wurde in den Großversuchsstand des IKT integriert (Bild 11). Der Großversuchsstand fungiert dabei als Widerlager für die einzelnen Komponenten des Vortriebssimulators und als „Sicherheitszelle“ für unerwartete Lastreaktionen.



Bild 11 IKT-Vortriebssimulator: DN 1600, $d_a = 2100$ mm, $L_{\text{Rohr}} = 16$ m

Zur Funktionsprüfung des IKT-Vortriebssimulators wurden die unterschiedlichen Vortriebsituationen einzeln eingestellt und die entsprechenden Belastungen aufgebracht. Die Last- und Verformungsreaktionen des Simulators wurden beobachtet, gegebenenfalls wurde die Gesamtkonstruktion ergänzt bzw. verstärkt. Alle Versuche wurden mit demselben Druckübertragungsmittel - einer 25 mm dicken OSB-Platte - durchgeführt. Die Messtechnik lieferte zuverlässig die geforderten Messdaten und die Hydraulikanlage erfüllte die erwarteten Anforderungen bezüglich Geschwindigkeit und Regelgenauigkeit. Eine Auswertestrategie und anschauliche Darstellungsformen zur Analyse der umfangreichen Datenmengen wurden entwickelt.

Die Vortriebsituationen *Gerade*, *Kurvenfahrt*, *Einleiten Gegensteuerung* und *Fortsetzen Gegensteuerung* konnten problemlos umgesetzt werden. Auf das *Einleiten*

einer Steuerbewegung musste verzichtet werden, da eine Wegregelung der Hauptpresszylinder aufgrund von unkontrollierbaren Zwängungen offensichtlich nicht möglich war.

6 Vortriebssimulation - Praxisbeispiel

Zur vollständigen Vortriebssimulation wurde in Abstimmung mit der Emschergenossenschaft und weiteren Beteiligten anhand von Baustelleninformationen ein Praxisfall zusammengestellt, welcher alle signifikanten Vortriebssituationen wenigstens einmal enthält (Bild 12).

Das erste Element der Beispieltrasse stellt der **Gerade Vortrieb** dar. Der Rohrstrang wird hier 13 mal belastet. Dies entspricht einer Vortriebslänge von 41,6 m. Die aus Brustwiderstand und Mantelreibung berechnete Vorpresskraft beträgt max. 6000 kN. Nach dem 13. Lastzyklus wird eine Auslenkung des Rohrstranges eingestellt, um eine ungewollte **Abweichung von der Solltrasse** zu simulieren. Nach drei Lastspielen und einer simulierten Gesamtvortriebslänge von 51,2 m erfolgt anschließend die **Einkleitung der Gegensteuerung**. Die Gegensteuerung erstreckt sich über vier Lastzyklen. Anschließend folgen zwei Lastzyklen des Trassenelementes **Rückführung auf die Solltrasse**. Bis hierher wurde ein Vortrieb mit einer Länge von 70,4 m simuliert. Als nächstes Trassenelement wird die **Gerade 2** aufgefahren. Nach den sechs Lastzyklen in dieser Geraden folgt über fünf Lastzyklen eine planmäßige **Kurve**. Diesem Trassenelement folgt die **Gerade 3**. Die Gesamtvortriebslänge beträgt 124,8 m. Die Druckübertragungsmittel wurden 39 mal beansprucht.

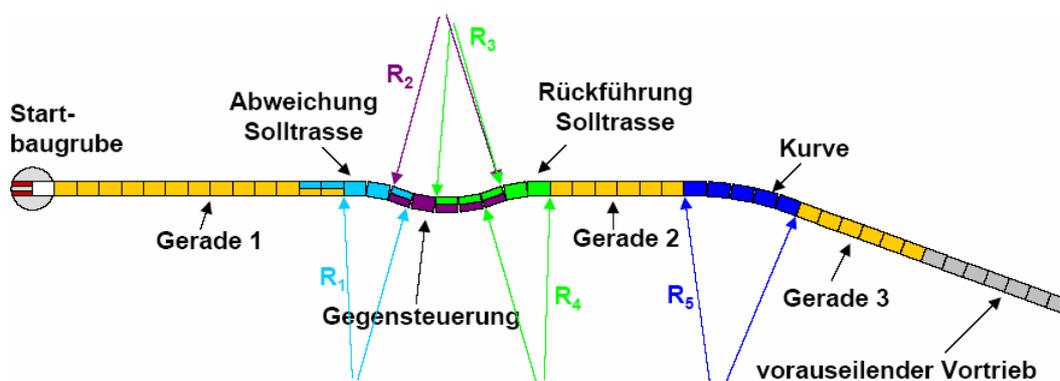


Bild 12 Vortriebssimulation – Praxisbeispiel

Beispielhaft sind für den Vortriebszustand der *Gegensteuerung* im Bild 13 die geometrischen Randbedingungen, die Messwerte der Kissendrucke und der Dehnungsmessstreifen in den Rohrkämpfern sowie die Kräfte in den seitlichen Hydraulikzylindern am Ende des ersten Belastungszyklus unter Last grafisch dargestellt. In dieser Situation wurde ein erster, kompletter Krümmungswechsel ausgeführt. Die Messwerte zeigen deutlich das **Anlegen des Rohres an der Innenseite der Kurve** und das gleichzeitige **Abstützen an der Außenseite** in den Randbereichen. Der Krümmungswechsel kann auch deutlich anhand der gemessenen Dehnungen nachvollzogen werden, die an der Kurveninnenseite erheblich zunehmen.

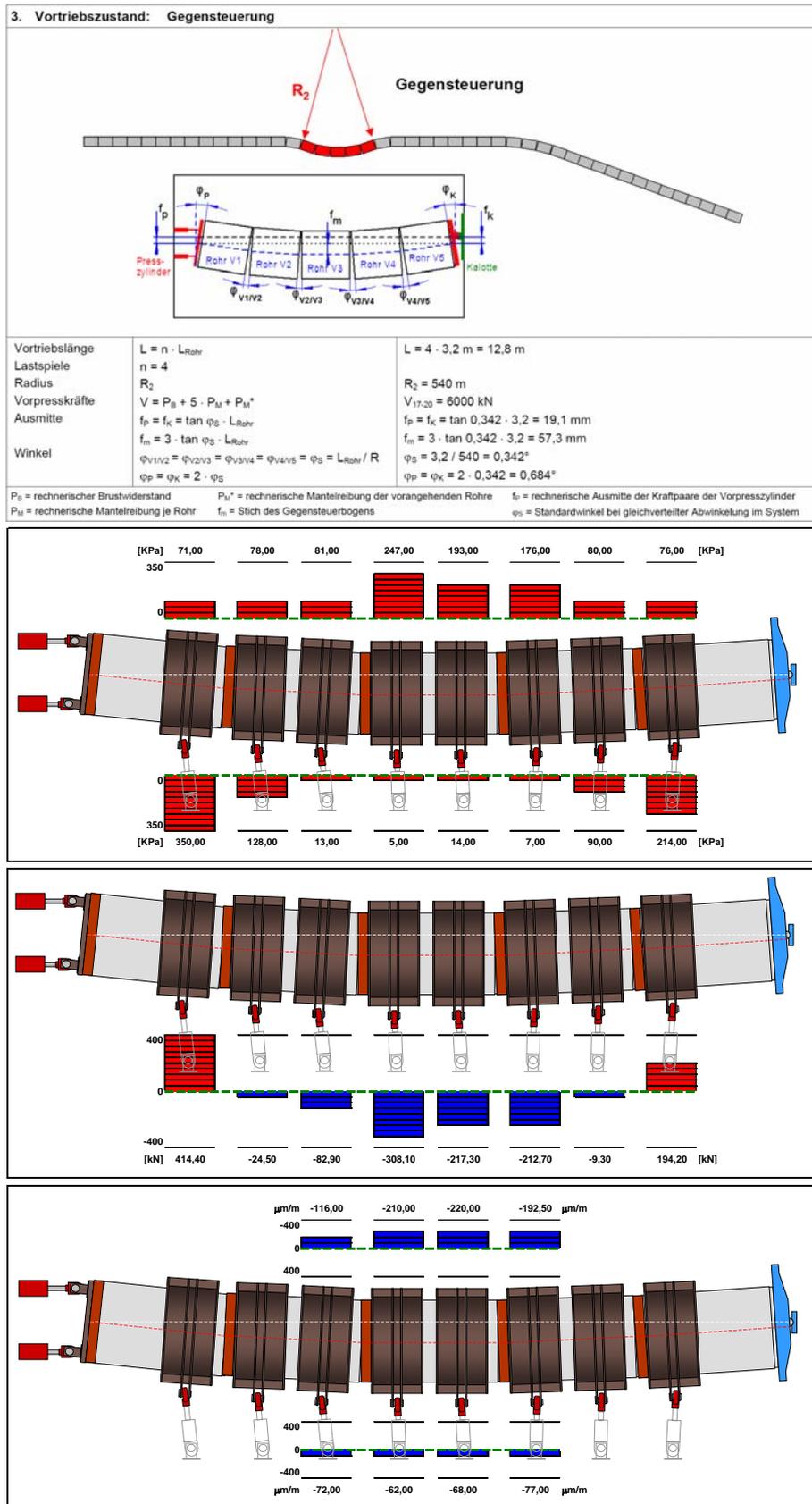


Bild 13 Gegensteuerung: (überhöhte Darstellung)
 a) Randbedingungen b) Kissendruck c) Zylinderkräfte
 d) Dehnungen, axial im Kämpfer innen

Um die im IKT-Vortriebssimulator gewonnenen Erkenntnisse auf Plausibilität zu prüfen, wurden von der Fachhochschule Münster zunächst lineare Berechnungen mit der Finite-Element Methode durchgeführt [8]. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchungen war es, durch Kalibrierung an tatsächlichen Messergebnisse eine spätere Parametervariation mit vergleichendem Bezug zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Berechnungen wurden die experimentell ermittelten Daten mit den Ergebnissen des dreidimensionalen FE-Rechenmodells verglichen. Das FE-Modell ist aus fünf Rohreinheiten einschließlich Bettungskissen und Stahlwiderlagern aufgebaut (Bild 14).

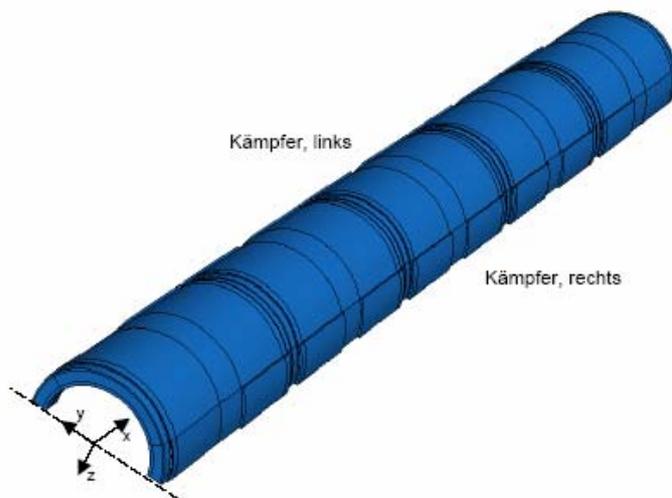


Bild 14 Isometrische Ansicht des spiegelsymmetrischen FE-Modells

In der Langfassung werden der untersuchte Praxisfall ausführlich beschrieben, Messergebnisse ausgewertet und umfangreiche Berechnungen zur Verifikation der Versuche mit der Finite-Element-Methode dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In den **gekrümmten Trassenbereichen**, d.h. der Steuerbewegung und der Kurve, legen sich die Rohre im Kurvenstich an die Innenseite des Kurvenverlaufs an und erzeugten dort nennenswerte Bettungsreaktionen, während sich am Kurvenanfang und -ende entgegengesetzte Abstützeffekte zeigen. Mit Blick auf die resultierenden Bodenverformungen ist ein Geradeziehen der mittleren Rohre zu erwarten, welches im Beispielfall bis zur Verdopplung der entsprechenden Rohrabwinkelung in den Randbereichen führen kann. Insbesondere am Wendepunkt im Vortriebszustand „Rückführung Solltrasse“ wurden auch messbare Querkraftbeanspruchungen festgestellt.
- Bei **plastischem Verhalten des Druckübertragungsmittels** weichen die Reaktionen in den Geraden vor und nach einer Kurvenfahrt oder Steuerbewegung erkennbar voneinander ab. Wiederbelastungen können auch zu einem Ausgleich der unterschiedlichen Effekte führen.

- Auch in der ersten Geraden wurden ungleichmäßige Bettungsreaktionen gemessen, die in ihrer Größenordnung durch die **Imperfektionen an den Rohrsiegeln** begründet sein können.
- Die **FEM-Modellierung** stellt ein geeignetes Mittel zur weitergehenden Analyse dar. Dies betrifft insbesondere die Berechnung und Visualisierung der im Simulator nicht messbaren Spannungsbilder sowie der Einsatz in ergänzenden Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen (vgl. Abschnitt 8).

Die im ersten Punkt beschriebene Erkenntnis aus Versuchen und Berechnungen bezieht sich auf die in der Fachwelt sehr kontrovers diskutierte Vortriebssituation einer Kurvenfahrt bzw. Steuerbewegung. Hierauf soll nachfolgend noch detaillierter eingegangen werden.

Nach Scherle [9] war bisher folgende Auffassung weit verbreitet: „Die Rohre brauchen beim Vortrieb in der vom Schild vorgeschrittenen Röhre ihre Führung. ... die logische Folge ist hier, dass beim **Vortrieb in Kurven** die Gefahr des Ausknickens am geringsten ist, da die **gesamte Rohrstrecke durch die Vorpresskraft an die Außenwand des Ausbruchraumes gedrückt wird.**“ Bild 15 zeigt eine entsprechende Darstellung von Buchhardt aus [3].

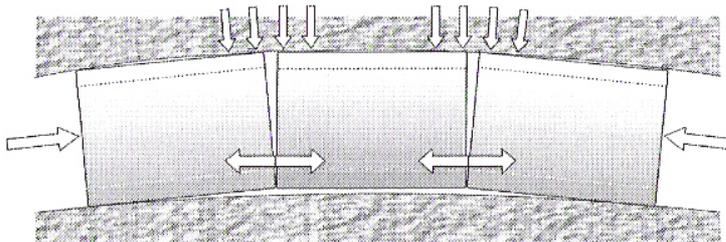


Bild 15 Modellvorstellung der Kurvenfahrt, aus [3]

Demgegenüber lassen jedoch die im Versuch gemessene Bettungsdruckverteilung (vgl. Bild 13) und die hieraus abgeleiteten qualitativen Kontaktspannungsverteilungen (Bild 16) deutlich erkennen, dass die gesamte Rohr-Kurve zwar in den Kurvenanfangs- und -endpunkten an der Kurvenaußenseite gehalten wird. Die im Kurvenverlauf liegenden Rohre erfahren jedoch eine haltende Bettungsreaktion an der Kurveninnenseite.

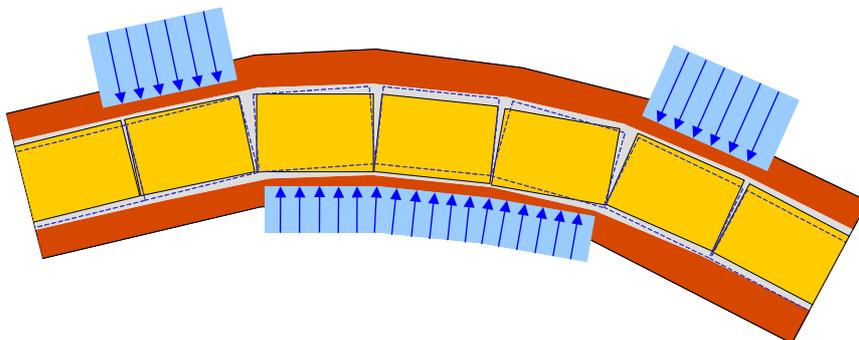


Bild 16 Versuchsergebnisse: Qualitative Kontaktspannungsverteilung

Bild 17 zeigt die hieraus abgeleitete Rohrkinematik, d.h. die zu erwartenden Bewegungen bei verformbarer Bettung. Die mittleren Rohre neigen zu einer geradlinigen Ausrichtung, so dass sie sich relativ zum Anfangs- bzw. Endrohr verdrehen.

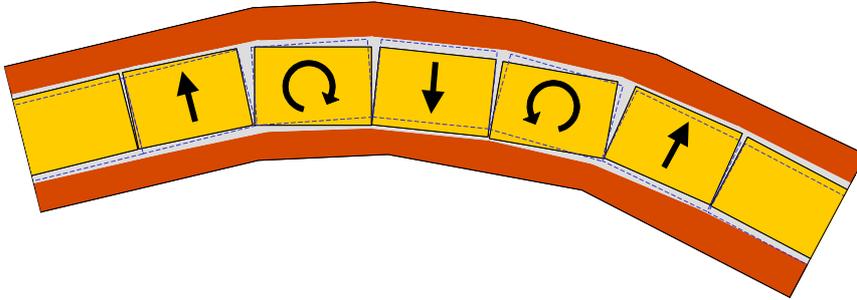


Bild 17 Aus Bild 16 abgeleitete Rohrkinematik

In der Folge ist mit einer unregelmäßigen äußeren Bettung einzelner Rohre (Bild 18) und entsprechenden Querkraftbeanspruchungen in den Rohrverbindungen zu rechnen.

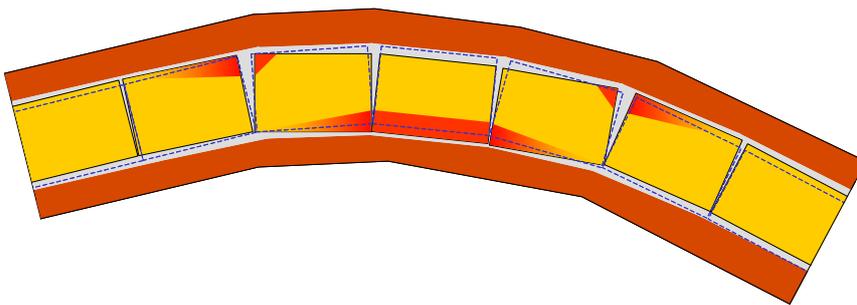


Bild 18 Mögliche Kontaktdruckverteilung Rohr-Boden

Diese Ergebnisse gewinnen insbesondere dadurch an Bedeutung, dass eine Gruppierung von Rohren zu kurzen geraden Abschnitten (Stabeffekt) einer Kurvenfahrt auch von Fachleuten aus der Vortriebspraxis bestätigt wird. Entsprechende Messungen beschränken sich bisher allerdings nur auf Einzelfälle und die beobachteten Phänomene wurden meist als Sonderfall klassifiziert. *Milligan* und *Norris* [10] beobachteten in Feldversuchen ebenfalls das Anlegen des Rohrstranges an die Kurveninnenseite, jedoch schrieben sie dieses Phänomen kurzen, wechselnden Krümmungsbereichen zu (Bild 19).

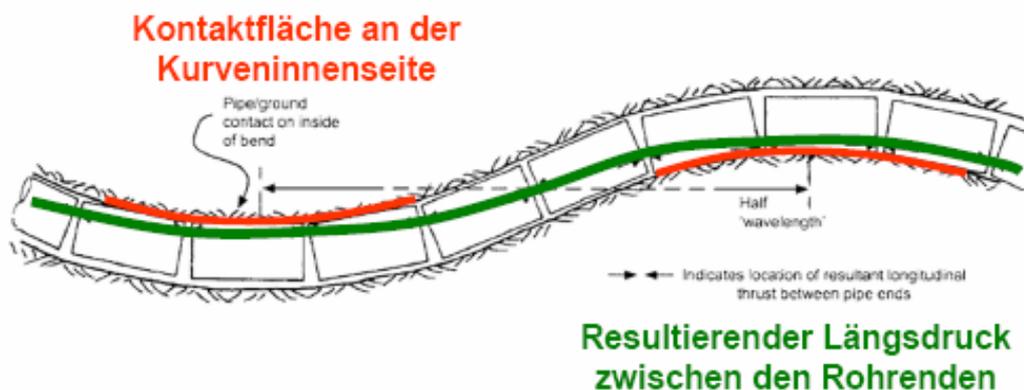


Bild 19 Rohr-Boden-Modell nach Milligan/Norris, aus [10], modifiziert

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Vortriebssimulationen veranstaltete das IKT am 14. Februar 2007 ein internationales Symposium zum Thema. Im Rahmen dieses Symposiums wurden das Konzept und erste Ergebnisse des IKT-Projektes vorgestellt und diskutiert. Ebenso berichteten die Teilnehmer von ihren eigenen Forschungsergebnissen, Baumaßnahmen und Projekten (s. [11]).

Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die aktuellen Ergebnisse eines von der TU Delft/Niederlande vorgestellten Projektes zur Berechnung der beim Rohrvortrieb entstehenden Reibungskräfte [12], welches im Dezember 2006 abgeschlossen wurde. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Erfahrungen aus der Simulation zeigt, dass die unterschiedlichen Theorieansätze zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. In [12] wurden aus Messungen an Vortriebsmaßnahmen Rückschlüsse auf kinematische Zustände im Rohrstrang gezogen. So konnte festgestellt werden, dass Kurvenfahrten oder Steuerbewegungen zu erhöhten Reibungs- und somit Vortriebskräften führen. Die in diesen Vortriebszuständen größeren Bettungsreaktionen beeinflussen somit den Reibungswiderstand und erhöhen letztendlich die Vorpresskraft. Das von Verburg [12] hierfür entwickelte kinematische Modell (Bild 20) bestätigt grundsätzlich die Beobachtungen aus den 1:1-Versuchen im IKT-Vortriebs-simulator.

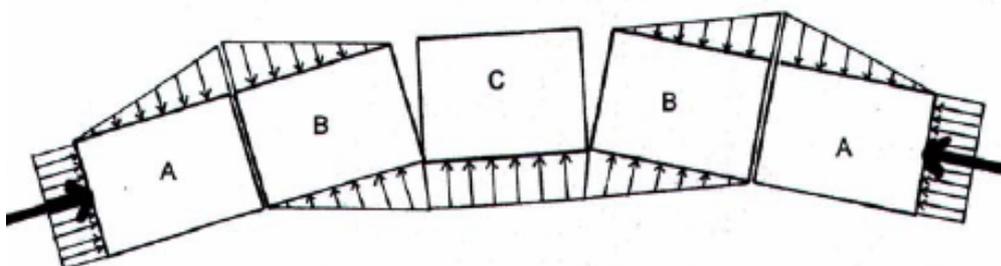


Bild 20 Kinematisches Modell einer Kurvenfahrt nach Verburg [12]

Die anschließende Diskussion mit den Teilnehmern des Symposiums zeigte, dass die vorgenannten Phänomene auch von Fachleuten aus der Vortriebspraxis bestätigt werden konnten. Eine quantitative Überprüfung oder gar Umsetzung in ein berechenbares Modell fehlten bisher allerdings vollständig. Hier leistet das vorliegende Simulationskonzept somit einen entscheidenden Beitrag und weist auch völlig neue

Perspektiven für die vortriebsvorbereitende und -begleitende Berechnung der Rohrbelastungen auf.

7 Trassen- und Bettungsvariationen

Über den im Abschnitt 6 dargestellten Praxisfall hinaus wurden ergänzende Versuche durchgeführt und weitere Analyse-Optionen untersucht. Dies betrifft Trassenvariationen im Sinne einer **S-Kurve** sowie die Möglichkeiten zur Interpretation der Bettungsspannungen für **unterschiedliche Bodenarten**.

Zum Umfahren von Hindernissen werden derzeit beim Rohrvortrieb auch gegenseitig gekrümmte Trassen geplant und umgesetzt. Bei der Variation **S-Kurve** wird ein Krümmungswechsel simuliert, wie er beispielsweise bei dem Übergang von entgegengesetzten Kurvenradien entsteht. Die Belastung hängt hierbei von der Länge des Vor- bzw. Nachbogens ab. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass beim Durchfahren von S-Kurven die mögliche Querkraftbelastung der Rohrverbindungen auch konstruktiv berücksichtigt werden sollte.

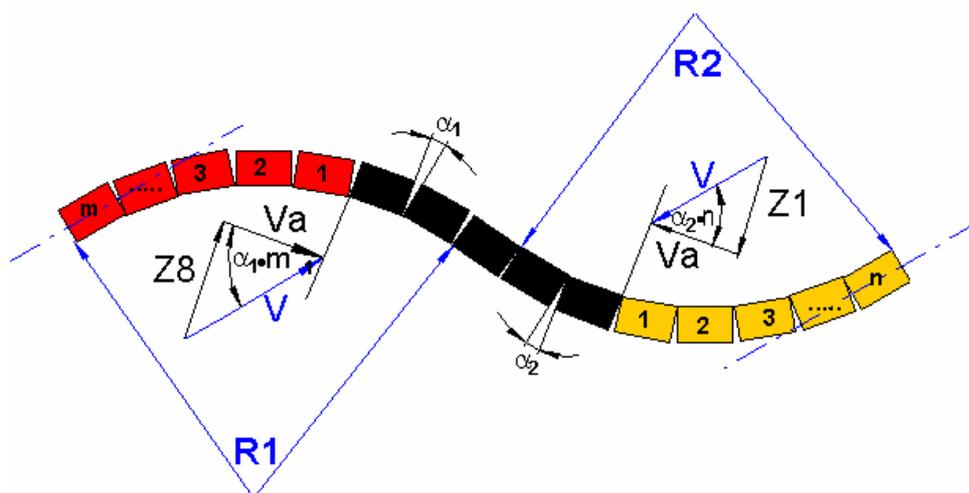


Bild 21 S-Kurven-Beispiel mit drei Phasen

Bei einer **weitergehenden Analyse der Rohr-Boden-Interaktion** wurde darüber hinaus exemplarisch geklärt, wie sich die im Versuch oder durch FEM-Berechnungen ermittelten Bettungsspannungen auf unterschiedliche Böden übertragen lassen.

8 Druckübertragungsmittel im Vergleich

Die in der Rohrverbindung eingesetzten Druckübertragungsmittel (DÜM) beeinflussen in hohem Maße die Beanspruchung der Rohre und Verbindungen während des Vortriebs. Auf Grundlage des entwickelten Prüfprogramms wurde die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Materialien (Vollringe) zur Druckübertragung miteinander verglichen. Im Zentrum der Betrachtung standen die praxisnahen Großversuche an un-

geschädigten Vollringen der ausgewählten DÜM, die um klassische Werkstoffuntersuchungen an einzelnen DÜM-Probestücken ergänzt wurden. Im Rahmen der Großversuche wurden folgende Materialien untersucht:

- Holzspanwerkstoffe: **OSB**
- Holz: **Fichte**
- Holzspanwerkstoff: **Spanplatte**
- Kunststoff: **Polyurethan**

Für diesen Vergleich im Großversuch wurde der Vortrieb entlang der im Praxisbeispiel dargestellten Trasse simuliert. Die Versuche wurden mit einer maximalen Vorpresskraft von 6 MN gefahren. Die Anzahl der Lastspiele entsprach der simulierten Vortriebslänge. Im einzelnen wurden folgende Trassenelemente simuliert:

- Gerade 1
- Abweichung Solltrasse
- Gegensteuerung
- Rückführung Solltrasse
- Gerade 2
- Kurve
- Gerade 3

Zur Darstellung der Spannungsverteilung in der Rohrfuge wurde in zwei Messfugen ein Tekscan-Foliensensor-Messsystem verwendet. Die Foliensensoren bestehen aus zwei flexiblen Polyesterfolien auf deren, mit einer halbleitenden Tinte benetzten Innenseite, Leiterbahnen aufgedruckt sind. Auf einer der beiden Innenseiten des Sensors sind „Spalten“, auf der anderen Seite „Reihen“ gedruckt. Durch Aufeinanderlegen der Folien entsteht eine Matrix. Jeder Kreuzungspunkt der Matrix besitzt einen variablen Widerstand. Im unbelasteten Zustand ist der Widerstand am höchsten. Mit zunehmender Kraft wird der Widerstand geringer. Die Widerstandsänderung wird gemessen und auf einen Mess-PC übertragen.

Das Bild 22 zeigt für das Druckübertragungsmittel PU exemplarisch die Messwerte der zwei im Rohrkämpfer angeordneten Foliensensoren. Dargestellt ist wiederum die Spannungsverteilung zum Ende des jeweils letzten Lastzyklusses der Trassenelemente Gerade 1, 2 und 3 des Praxisbeispiels. Es wirkte jeweils eine Vorpresskraft von 6 MN. Die nach Durchfahren des Trassenelementes Gerade 1 gemessenen maximalen Werte lagen etwa 20 % unterhalb der entsprechenden Werte der Spanplatte (Bild 23). Die weiteren Spannungsverteilungen lassen kaum Änderungen des Spannungsniveaus bei Durchfahren der Beispieltrasse erkennen. Das Material verhält sich offensichtlich im Gegensatz zur Spanplatte in hohem Maße elastisch.

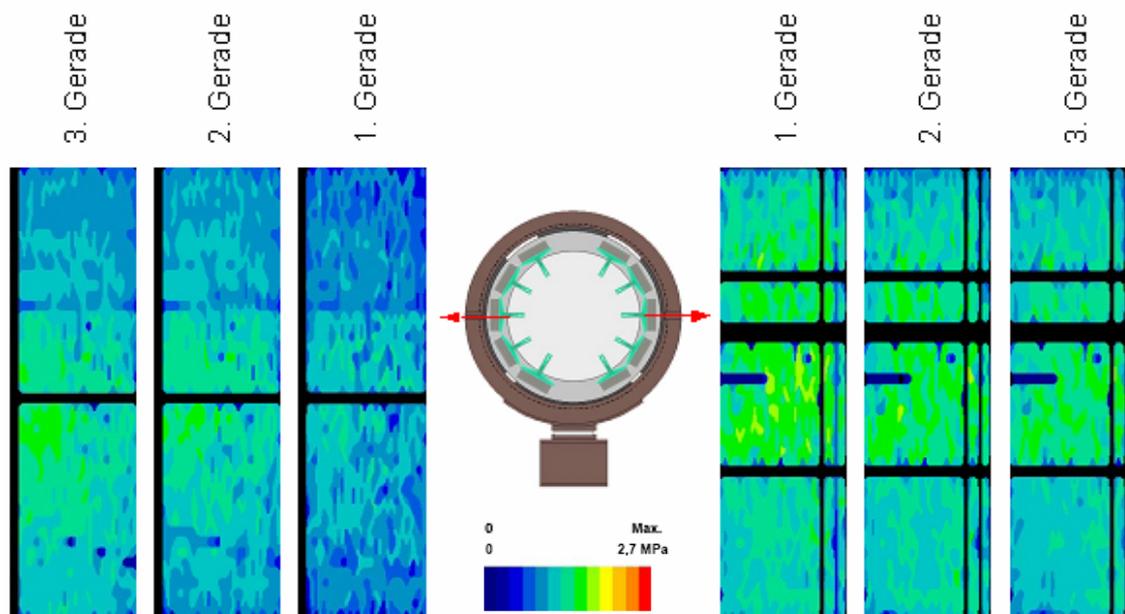


Bild 22 Auswertung der Foliensensoren unmittelbar in den Rohrkämpfern, PU, Messfuge 2

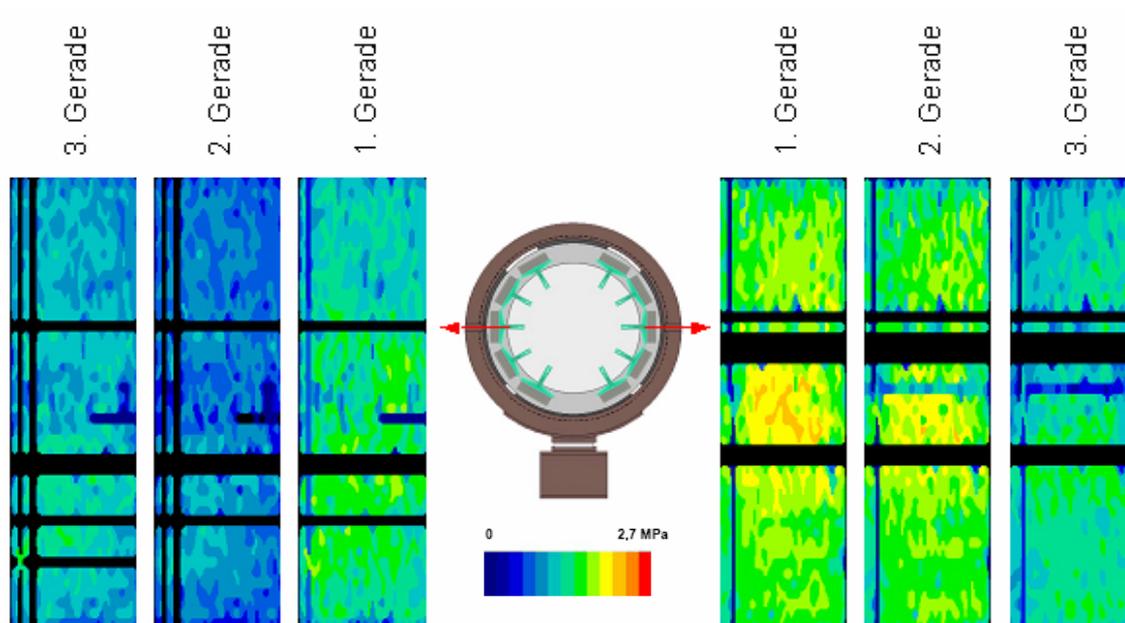


Bild 23 Auswertung der Foliensensoren unmittelbar in den Rohrkämpfern, Spanplatte, Messfuge 2

Um die Belastungsgeschichte der Druckübertragungsrings im 1:1-Versuch auch mit dem FEM-Modell nach Abschnitt 6 zu verfolgen, können die sieben Vortriebszustände in einem einzigen Rechenlauf nachgerechnet werden. Dabei werden die plastischen Verformungen der Druckübertragungsrings im jeweils nächsten Schritt mit berücksichtigt. Innerhalb des Rechenlaufs ergeben sich damit zur Berücksichtigung der Zyklen „Verschiebung, Belastung und Entlastung“ insgesamt 20 Schritte. Die am IKT-Vortriebssimulator durchgeführten bis zu 13 Zyklen je Vortriebszustand werden in der

Berechnung zu jeweils einem Zyklus zusammengefasst. Die kompletten Ergebnisse sind [13] zu entnehmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die plastische Verformung der Druckübertragungsmittel zu ungleichmäßigen Spannungsverteilungen in den Rohrverbindungen führen. Bei Werkstoffen mit ausgeprägt plastischem Verformungsverhalten (OSB, Spanplatte, Holz) ist dieser Effekt größer. Die Spannungen bei den Vortriebszuständen Gerade 1, 2 und 3 wachsen z.B. bei Spanplatte von 6,9 N/mm² (gleichmäßige Verteilung) auf 10,7 N/mm² und damit um 55 % an. Der Werkstoff PU weist demgegenüber in den denselben Vortriebszuständen relativ gleichmäßige Spannungsverteilungen auf.

In Abschnitt 5.4 des gültigen Arbeitsblattes ATV-A 161 [14] ist die Berücksichtigung von Zwängungskräften im Bauzustand („Mindestbemessung“) durch einen pauschalen Ansatz bei den Schnittgrößen vorgesehen. Ein Vergleich dieser Spannung mit den Spannungen aus der 3D-FEM-Analyse ergab, dass für das gewählte Beispiel die Ergebnisse der „Mindestbemessung“ etwa 33 % unter denen des numerischen Modells liegen.

9 Reibungswiderstand bei gekrümmten Trassen

Beim Vortrieb der Rohre durch den Boden entsteht neben dem Brust- bzw. Schneidenwiderstand ein Reibungswiderstand am Rohrmantel, der von den Vortriebspresen überwunden werden muss. Dieser ist im Wesentlichen bedingt durch drei Komponenten:

- gleichmäßige Reibung zwischen Rohr, Stützsuspension und Boden bei geradem Vortrieb,
- zusätzliche Reibung zwischen Rohr, Stützsuspension und Boden bei Kurvenfahrt durch zusätzliche Druckübertragung in die Wandung,
- zusätzliche Reibung zwischen Rohr, Stützsuspension und Boden durch Schrägstellung, Verkippen und Verkanten, z.B. als Folge von Abweichungen der Rohrspiegel von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse.

In [7] werden entsprechende Berechnungsansätze entwickelt. Anhand der Ansätze nach *Scherle* [15] bzw. *Weber* [16] wurde für die Verlegesituation der Vortriebsrohre im IKT-Vortriebssimulator mit $d_a = 2,1$ m, 10 m Überdeckungshöhe und $\mu = 0,2$ eine Reibung von ca. 130 kN/m berechnet. Zusätzlicher Einfluss entwickelt sich aus dem Durchfahren von Kurven. Hierbei zeigen die Ergebnisse des IKT-Vortriebssimulators eine Erhöhung der Reibung von bis zu 22 % (bei 540 m Radius) gegenüber der Geradeausfahrt. Aus der Beeinflussung durch Imperfektionen bei der Geradeausfahrt kann sich die Reibung nach den Ergebnissen des IKT-Vortriebssimulators maximal um weitere ca. 3 – 7 % erhöhen (siehe Bild 24).

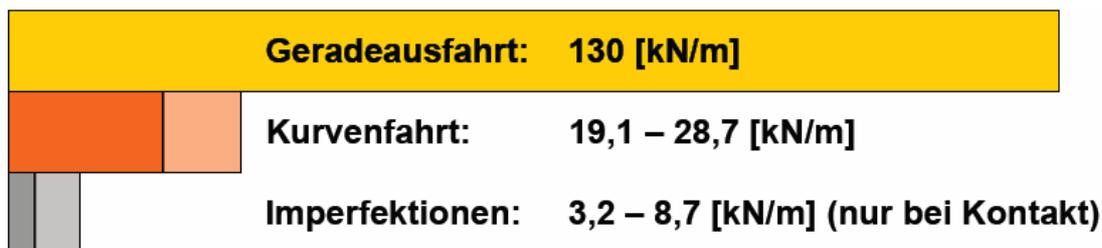


Bild 24 Qualitative Verteilung der einzelnen Anteile an der Reibung im Praxisbeispiel der Vortriebssimulation ($d_a = 2,1 \text{ m}$)

Im Bild 25 ist die allgemeine Vorgehensweise für die Berechnung der resultierenden Mantelreibung aus Versuchs- bzw. FEM-Ergebnissen in einem Ablaufdiagramm dargestellt.

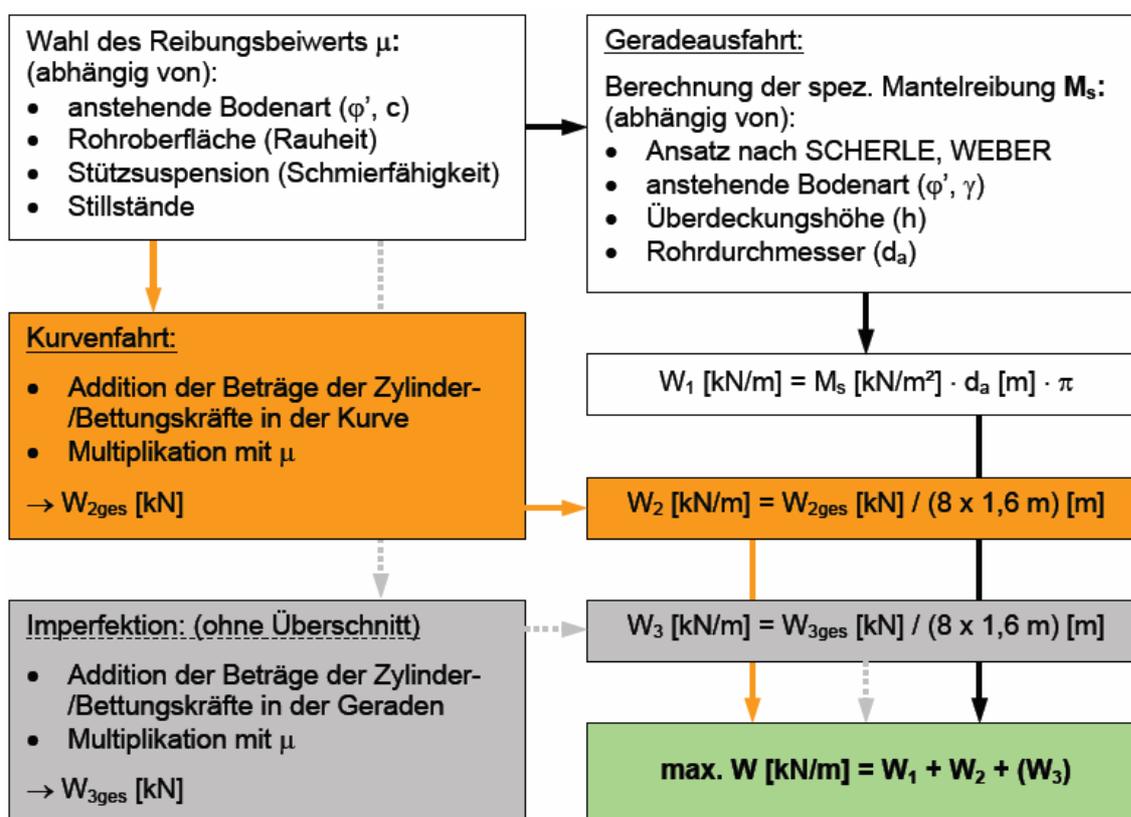


Bild 25 Ablaufdiagramm

10 Dichtigkeit von Rohrverbindungen

Die Dichtungen in Vortriebsrohren sind besonderen Randbedingungen ausgesetzt und bilden unter Umständen eine Schwachstelle im Gesamtsystem. Neben den üblichen Langzeitbeanspruchungen aus chemischen, biologischen und physikalischen Angriffen sind die Dichtungen während des Rohrvortriebs auch anderen kurzzeitigen Belastungen ausgesetzt. Unter Umständen können diese Belastungen um ein Vielfaches höher als die Langzeitbelastungen sein und ggf. bereits beim Einbauvorgang das Dichtmaterial dauerhaft schädigen. Vielfach ist somit unklar, ob die Dichtungen in Vortriebsrohren zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme die Qualität neuwertiger Dichtun-

gen aufweisen und den Anforderungen der DIN EN 1916 [17] entsprechen. Ein wesentliches Kriterium bei der Beurteilung der Eignung und Qualität von Dichtungen ist die Sicherstellung und Aufrechterhaltung eines ausreichenden Anpressdrucks der Dichtung auf das Rohr während der gesamten Lebensdauer. Daher lag ein Schwerpunkt der Untersuchungen in der Ermittlung auftretender Verformungen an Dichtungen während und nach Abschluss des Rohrvortriebs. Zu diesem Zweck werden insbesondere Ergebnisse aus Versuchen im IKT-Vortriebssimulator herangezogen.

Um Aussagen treffen zu können, welche Auswirkungen vortriebsbedingte Querbelastrungen auf eine Rohrverbindung und deren Dichtmittel haben können, wurden im **Simulator Scherversuche** durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die Quantifizierung der Relativverschiebungen quer zur Rohrachse im Bereich der Druckübertragungsmittel. Hierzu wurden zunächst die in den Rohrverbindungen auftretenden Querkräfte anhand der Ergebnisse in Abschnitt 6 ausgewertet. Aus den Differenzkräften benachbarter Hydraulikzylinder folgten Querkräfte in einer Größenordnung von etwa 300 kN. Dies liegt deutlich über dem Wert, der sich aus den Normen und Regelwerken für die Scherlastprüfung ableiten lässt. So werden im Entwurf des DWA-Arbeitsblattes A 125 [18] nur Scherlasten von 32 kN für die hier verwendete Nennweite DN 1600 vorgeschlagen.

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass das Druckübertragungsmittel auch in Querrichtung erhebliche Kräfte verformungsarm überträgt und somit die eintretenden Scherwege maßgeblich begrenzt. Grundsätzlich sollte aber ein konstruktiver Querkraftanschlag ausgebildet werden, um Einflüsse aus Querkraftverschiebungen für die Dichtmittel auszuschließen. Für welche Belastungen dieser zu dimensionieren ist, könnte durch entsprechende Parameterstudien geklärt werden.

In **weiterführenden Materialprüfungen** wurde das Werkstoffverhalten typischer Dichtmittel unter großen Verformungen untersucht. Hierzu wurden Profile unterschiedlicher Dichtungshersteller für ergänzende Prüfungen ausgewählt. An diesen Proben wurden Untersuchungen zur Druckrelaxation, zum Druckverformungsrest und zur Dichtbreitenermittlung durchgeführt [19].

Als Ergebnis liegen Spannungs-Verformungslinien der einzelnen Dichtmittel mit den zugehörigen Dichtbreiten für den gesamten Kompressionsbereich der Dichtung vor. Diese Hinweise können zur Ermittlung der möglichen Verformungsbereiche einzelner Dichtmittel genutzt werden und damit als Grundlage für die konstruktive Ausbildung der Querkraftübertragung dienen.

11 Empfehlungen

Aus den Modell- und Großversuchen folgt u.a., dass die wesentlichen Vortriebsparameter wie Größe und Exzentrizität der Vortriebskraft, Rohrabwinkelungen und -beanspruchungen, seitliche Bettungsreaktionen sowie die Spannungshöhe und -verteilung in den Druckübertragungsmitteln miteinander gekoppelt sind. Auch wenn eine Verallgemeinerung der beobachteten Zusammenhänge nur schwer möglich scheint, ist bereits deutlich zu erkennen, dass die Rohrstrangkinematik und Bettungs-

reaktionen in üblichen Vortriebssituationen wie Gerade, Kurvenfahrt und Steuerbewegung von den aktuell gültigen Berechnungs- und Dimensionierungsannahmen z.B. im ATV-A 161 [14] abweichen können. Die resultierenden Bewegungen und Abwinkelungen einzelner Rohre und Rohrgruppen führen in bestimmten Fällen zu hohen Beanspruchungen der Rohre und Rohrverbindungen. Die physikalischen Eigenschaften der Druckübertragungsmittel sind dabei von hoher Bedeutung. Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende grundsätzliche Empfehlungen zusammenfassen:

- **Bei der Trassenplanung und Dimensionierung von Rohrverbindungen für Kurvenfahrten sollte nicht von einer Ideal-Kinematik des Rohrstranges, d.h. von ideal-gleichverteilten Abwinkelungen zwischen den Rohren, ausgegangen werden.** In der Simulation wurden Rohrgruppierungen beobachtet, die zu einer deutlichen Erhöhung der Abwinkelungen im Vergleich zur Idealverteilung führen. Entsprechend bietet es sich an, die Abwinkelungen beim Vortrieb verstärkt zu überwachen und so aus der Baupraxis weitere Erfahrungen zum typischen Abwinkelungsverhalten zu gewinnen.
- **Bei Kurvenfahrten ist stets das unterschiedliche plastische Verhalten der Druckübertragungsmittel (Holz, OSB, Spanplatte, PU) zu berücksichtigen.** Kurvenfahrten, aber auch Steuerbewegungen bei weitgehend geradlinigem Vortrieb können zu lokalen plastischen Verformungen dieser Druckübertragungsmittel mit entsprechenden Spannungsumlagerungen, Bettungsreaktionen und Zwängungskräften führen. Druckübertragungsmittel aus Kunststoff – mit Auflagerblechen aus Stahl zur Verringerung von Querkzugspannungen – können die Druckübertragung verbessern. Im Druckversuch zeigten Proben für Druckringe aus PU ein überwiegend elastisches Verhalten ohne nennenswerte Spannungsumlagerungen nach Steuerkurven oder planmäßiger Kurvenfahrt. Nur bei PU-Druckübertragungsmitteln lag die Exzentrizität der Kraftresultierenden bei Kurvenfahrt im Großversuch noch im Kernquerschnitt, so dass hier keine klaffende Fuge auftrat.
- **In allen von der Gerade abweichenden Vortriebszuständen treten erhebliche Querkraftbelastungen auf. Daher ist in der Regel die Querkraftbelastung der Rohrverbindung statisch und konstruktiv zu berücksichtigen, insbesondere wenn S-Kurven zu durchfahren sind.** Dabei ist die maximale Kompressionsfähigkeit und (Scher-)Verformbarkeit der Dichtungen und Druckübertragungsmittel zu beachten, ggf. ist eine Scherwegbegrenzung in der Rohrverbindung vorzusehen.
- **Steuerkorrekturen sollten mit möglichst großen Radien bzw. ohne abrupte Radienwechsel ausgeführt werden.** In der Praxis wird als Maß für die Steuerungsgenauigkeit meist eine zulässige Abweichung von der Solllinie vereinbart, wodurch jedoch enge Steuerkurven mit möglichst rascher Rückführung zur Solllinie provoziert werden. Eine Abhilfe ist dadurch denkbar, dass in Ausschreibungen neben der zulässigen Abweichung von der Solllinie auch einzuhaltende minimale Steuerradien gefordert werden. Diese vorgeschriebe-

nen Mindestradien sind entsprechend in der Rohrbemessung zu berücksichtigen.

- **Werden erhöhte Bettungskräfte (z.B. bei Kurvenfahrten) erwartet, so ist die rechnerische Mantelreibung trassenspezifisch zu erhöhen.** In Abhängigkeit der gewählten Trasse sind ggf. auch erhöhte Vortriebskräfte anzusetzen. Für den im Rahmen des Vorhabens untersuchten Praxisfall (Kapitel 6) zeigte sich bei der Kurvenfahrt eine Erhöhung der Mantelreibung im Kurvenbereich um ca. 20 %. Störungen im Ausbruchquerschnitt bei Geradeausfahrt mit ähnlichem Einfluss auf die Mantelreibung ist durch hohlraumstützende Schmierung des Rohrstranges entgegenzuwirken.
- **Auch bei geradlinigen Vortrieben sollte streng auf die Einhaltung der vorgegebenen Maßtoleranzen (Rechtwinkligkeit der Rohrspiegel, Außendurchmesser) der gelieferten Rohre geachtet werden.** Während bei Kurvenfahrten die Rohrstrang-Kinematik von entscheidendem Einfluss für die Belastung der Rohrverbindungen ist, gewinnen beim geradlinigen Vortrieb die herstellungsbedingten Imperfektionen (z.B. Spiegelmaße) im Vergleich zum gewählten Überschnitt an Bedeutung. In der beispielhaften Versuchsauswertung für gerade Vortriebszustände ohne Überschnitt zeigte sich – abhängig vom Druckübertragungsmittel – eine maximale Erhöhung der Wandreibrkräfte von 3 bis 7 % (s. Bild 24).
- **Zur Ermittlung von Zwängungsspannungen im Rohr ist die Auswertung der Spannungsverteilungen aus der FEM-Analyse geeignet.** So wurden z.B. für die Vortriebssituation „Rückführung zur Solltrasse“ Zwängungsspannungen ermittelt, die die Werte der Mindestbemessung nach ATV-A 161 [14] um ca. 50% überschreiten (vgl. Kapitel 8 der Langfassung).

Sind im **konkreten Anwendungsfall** einer oder mehrere der o.a. Punkte von besonderer Bedeutung, sollte die gewählte Vortriebsmaßnahme von der Planung bis zur Ausführung und Abnahme durch eine **numerische Vortriebssimulation** begleitet werden, die an den Ergebnissen des IKT-Simulators **kalibriert** ist. Diese stützt sich zur Zeit auf vier Teilmodelle:

1. **Trassenmodell:** Die Trasse wird in einzelne Trassenelemente (Gerade, Steuerkurve, Plankurve etc.) unterteilt und definierten Rand- und Schnittstellenbedingungen ausgesetzt. Diese Trassenelemente aus Rohrstrang-Abschnitten mit jeweils fünf Rohren bilden statisch modellierbare Subsysteme für die weitere FE-Simulation.
2. **Rohrstrang-Modell:** Die jeweiligen Vortriebssituationen des Modells 1 werden als Rohrstrang-Abschnitte mit jeweils fünf Rohren mit elastisch/plastischem Verhalten der Druckübertragungsmittel durch 3D-FE-Modelle abgebildet. Diese Modelle sind durch die 1:1-Versuche im IKT-Vortriebssimulator kalibriert. Das FE-Modell liefert die numerischen und grafischen Spannungsverteilungen für die Einzelrohre. Die für die Einzelrohre anzunehmenden Belastungen können als Gleichgewichtsgruppen hergeleitet werden (vgl. DWA-A 161 [20]).

3. **Interaktionsmodell Rohr-Boden:** Das Interaktionsverhalten zwischen Rohr und Boden sowie die Bodeneigenschaften werden in einem FE-Modell nachgebildet, so dass eine verschiebungsabhängige Ermittlung der Bettungsreaktionskräfte, des seitlichen Auflagerwinkels bei Kurvenfahrten und der Gleichgewichtszustände möglich wird. Für Standardfälle wurden auf dieser Basis entsprechende Diagramme entwickelt, welche die funktionellen Beziehungen vereinfacht abbilden.
4. **Werkstoffmodelle und Prüfverfahren:** Das nichtlineare Verhalten von Druckübertragungsmitteln wird auf der Grundlage von Laborversuchen an Probestücken beschrieben. Die Ergebnisse gehen in das Modell 2 (Rohrstrang-Modell) ein.

Die o.a. vier Teilmodelle sollen künftig durch ein geeignetes Datenmodell verknüpft werden, in das auch Informationen zur Kalibrierungsempfindlichkeit und Sensitivität des Gesamtmodells (Modelle 1 bis 4) einfließen. Gegebenenfalls kann dieses Datenmodell auch die Schnittstellenbeziehungen zur Lösung einer übergeordneten Optimierungsaufgabe liefern.

Das Gesamtmodell wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens durch die 1:1-Versuche im Großversuchstand des IKT kalibriert und ist für hinreichend ähnliche Vortriebsbedingungen (Stahlbetonrohre kleinerer und größerer Nennweite, gerader sowie einfach und mehrfach gekrümmter Linienzug) geeignet.

Als Ergebnis einer **kalibrierten Vortriebssimulation** stehen folgende **Erkenntnisse für die jeweilige Baumaßnahme** zur Verfügung:

- **Trassenbewertung:** Die in der Planung gewählte Trasse wird „testweise“ im numerischen Modell durchfahren. Aus den o.a. Bettungsreaktionen, Rohrschnittgrößen und Spannungsbildern für Rohre sowie Druckübertragungsmittel lassen sich kritische Trassenabschnitte erkennen. Ggf. können anschließend alternative Trassen sowie veränderte Trassierungselemente oder Positionen von Zwischenpressstationen mit Blick auf einen „schonenderen“ Vortrieb vorgeschlagen und ebenfalls überprüft werden.
- **Druckübertragungsmittel:** Insbesondere wenn mehrfache Kurvendurchfahrten geplant und/oder zahlreiche unplanmäßige Steuerbewegungen zu erwarten sind, wächst bei einigen Druckübertragungsmitteln der Einfluss der Belastungsgeschichte auf die Spannungsverteilung. Diese Einflüsse werden erkannt, so dass in Grenzfällen Alternativen vorgeschlagen und überprüft werden können.
- **Vortriebsrohre:** Vortriebsrohre werden standardmäßig mit Blick auf übliche Bau- und Betriebslasten bemessen. Die im Forschungsprojekt ermittelten Spannungsbilder gestatten darüber hinaus eine Bemessung unter Berücksichtigung der lokalen Bettungsreaktionen bei Kurvenfahrten und Steuerbewegungen. Die Lastmodelle orientieren sich dabei an den in der Statik erdgebetteter Rohre üblichen Bemessungsvorstellungen (Rohrauflager, Auflagerwinkel, ggf.

Linienlasten) für Stahlbetonrohre. Sonderfälle wie örtlich erhöhte Bodensteifigkeiten können ebenfalls berücksichtigt werden.

- **Steuerempfehlungen:** Ist z.B. aufgrund wechselnder Bodenverhältnisse mit häufigeren Steuerkorrekturen zu rechnen, lassen sich deren Auswirkungen auf die Rohrbelastung bereits im Vorfeld ermitteln. Hieraus können zulässige Toleranzen in der Linienführung und Mindestradien für die Rücksteuerung zur Solllinie abgeleitet werden.

Eine kalibrierte Vortriebssimulation gestattet somit die weitgehende Beschreibung, Analyse, Bewertung und Qualitätssicherung von Vortriebsprojekten. Der hierfür notwendige zusätzliche numerische Aufwand erscheint mit Blick auf die bisherigen Schadensfälle und Unsicherheiten beim Rohrvortrieb sowie die besonderen Probleme für eine eventuell erforderliche Schadensbehebung grundsätzlich gerechtfertigt. Ist mit hohen Schadensrisiken zu rechnen, sind Planungsvarianten zu vergleichen oder ergeben sich durch Regelwerke nicht abgedeckte Dimensionierungssituationen, so ist eine numerische Simulation des Vortriebs stets zu empfehlen.

12 Ausblick

Die Simulationen im Großversuchsstand und die Berechnungsmodelle leisten eine zutreffende qualitative und quantitative Beschreibung typischer Vortriebssituationen. Vor diesem Hintergrund sollten künftig die folgenden Aufgabenfelder weiterverfolgt werden:

- **Schnittstellen-Algorithmen:** Die bereits im Rahmen des Vorhabens entwickelten und beispielhaft eingesetzten Berechnungsmodelle weisen zahlreiche Schnittstellen auf, die zur Reduzierung des Gesamtaufwandes noch auszugestalten sind. Ansätze für ein entsprechendes Datenmodell und geeignete Schnittstellen-Algorithmen liegen vor.
- **Parameterstudien:** Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden einzelne Parameter der Trassen-, Geometrie- und Bettungsbedingungen gezielt variiert, um die wesentlichen Einflüsse beim Rohrvortrieb zu erkennen und zu quantifizieren. Darüber hinaus sollte der durch die Simulationsbedingungen abgesteckte Lösungsraum durch gezielte Variationsstrategien erweitert werden.
- **Praxisfälle:** Auch wenn im virtuellen Simulationsmodell zahlreiche Einflussfaktoren durch Parameterstudien untersucht werden können, so lassen sich doch vielfältige Einflüsse nur im Abgleich mit Erfahrungen aus ausgeführten Baumaßnahmen erkennen und beschreiben. Hierzu gehören Steuerkurven und Steuerfehler, Lieferqualitäten und Lagerbedingungen von Rohren und Verbindungsmitteln, besonderer Zeitdruck im Bauablauf, der Einfluss der Vortriebsmaschine auf die nachlaufenden Rohre, nichtlineare Bodeneigenschaften, Einflüsse aus Überschnitt und Schmierung, geometrische Imperfektionen z.B. im Rohrspiegel oder auch die Auswirkungen von Instabilitäten des Rohr-

strangs („Geradeziehen“). Daten aus der Überwachung von Vortrieben, z.B. Messwerte der Fugenklaffungen, gekoppelt mit Protokollen der Vortriebskraft sind einzubeziehen. Ziel ist es, mit Hilfe dieser Daten die vorherrschenden Vortriebs- und Trassenbedingungen zu identifizieren und das virtuelle Simulationsmodell zusätzlich anhand der relevanten Praxisanforderungen zu kalibrieren und ggf. zu erweitern.

- **Optimierungsstrategien für die Praxis:** Ausgehend von den Ergebnissen der Parameterstudien und der Untersuchungen an Praxisfällen werden die wesentlichen Einflussfaktoren für den Vortriebserfolg identifiziert. Von den jeweiligen wirtschaftlichen Zwängen und Freiheitsgraden ist es abhängig, welche Faktoren für weitere Optimierungen auszuwählen sind. Ziel ist es, mit vertretbarem Aufwand ein hohes Maß der vorhandenen Optimierungspotenziale zu erschließen.
- **Bemessungs- und Berechnungsverfahren:** Die Versuchsergebnisse zeigten, dass mit nennenswerten Querkräften und Zwängungskräften insbesondere bei Steuerbewegungen und in Kurvenfahrten zu rechnen ist. Das Geradeziehen des Rohrstrangs (Stabeffekt) kann darüber hinaus zu einer Erhöhung der Fugenklaffungen führen. Diese Zusammenhänge sind bei der Bemessung der Rohre und Druckübertragungsmittel, z.B. nach dem Entwurf des DWA-A 161 [20] zu berücksichtigen. Entsprechende vereinfachte Berechnungsverfahren sind zu entwickeln. Einer Mindestbemessung, ähnlich der im derzeit noch gültigen Arbeitsblatt ATV-A 161 [14] geforderten, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.
- **Hinweise für Konstruktion und Fertigung:** Die zu erwartenden Querkräfte und der Einfluss von Maßtoleranzen stellen besondere Anforderungen an die Konstruktion und Fertigung der Rohre und Rohrverbindungen. Zur Aufnahme der Querkräfte sind entsprechende Konstruktionsvorschläge zu entwickeln und z.B. eine Schubbewehrung zu berücksichtigen. Dabei ist eine ausreichende Abwinkelbarkeit der Rohre und Auslegung der Stahlführungsringe auf die zu erwartenden Belastungen vorzusehen. Die Qualitätssicherung bei der Rohrvermessung und -abnahme ist entsprechend zu verbessern.
- **Bauüberwachung:** Die rechnerische bzw. numerische Abschätzung der Rohrstrangkinematik ist durch Fugmessungen im Rahmen der vortriebsbegleitenden Bauüberwachung zu überprüfen. Konzepte zur Auswahl geeigneter Messfugen und Messtechnik sind zu entwickeln.

Als Fazit zum Forschungsvorhaben bleibt festzuhalten, dass mit den Ergebnissen des IKT-Vortriebssimulators und mit den zugehörigen numerischen Modellen eine kalibrierte numerische Simulation von Rohrvortrieben entwickelt wurde.

Durch eine weitere Verzahnung der Ergebnisse mit Praxisfällen wird eine zusätzliche Absicherung der Vorgehensweise ermöglicht. Das Simulationsmodell bietet damit die Chance, künftige Baumaßnahmen beginnend in der Planungsphase durch eine fundierte Qualitätssicherung mit vertretbarem Aufwand zu begleiten. Empirische Aus-

wertungen der Planungs- und Bauverfahren können schließlich zu vereinfachten Planungsregeln und Bemessungsansätzen führen.

Künftige 1:1-Simulationen im Modell- oder Großversuch erlauben darüber hinaus die Erweiterung des Gesamtmodells auch auf andere Rohrwerkstoffe, -geometrien und Verbindungsmittel.

13 Literatur

- [1] Vogel, J.; Rizkallah, V.; Hasan, M.: Begehbare und nichtbegehbare Rohrvortriebe – Verfahren, Bauschadensfälle und Empfehlungen zur Schadensminimierung. Mitteilungen des IGBE der Universität Hannover. 1993 - Heft 38.
- [2] Bosseler, B.; Birkner, T.; Sokoll, O.; Brüggemann, T.: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW; Endbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; Gelsenkirchen, Dezember 2003.
- [3] Buchhardt, A.: Statische Berechnung von Microtunneling-Vortriebsrohren mit abwinkelbaren Rohrverbindungen für den Bauzustand, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement, ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, 2003.
- [4] Zerna, Köpper & Partner – Ingenieurgesellschaft für Bautechnik: Numerische Untersuchungen zu Rohrvortrieben. Bochum, September 2004.
- [5] ELE Erdbaulaboratorium Essen - Ingenieurgesellschaft für Geotechnik mbH: Bodenkennwerte für Finite-Element-Berechnungen. Essen, April 2004.
- [6] Beyert, J.; Bohle, U.; Osebold, R.; Sommerhage, H.: Online Überwachungen von Rohrvortrieben. bi UmweltBau 1/2006.
- [7] Achmus, M.; Klameth, M.: Bodenmechanische Modellierung zur Größe der Bodenreaktionsspannungen an Vortriebsrohren. Hannover 5/2007.
- [8] Falter, B.; Holthoff, F.: Numerische Modellierung des IKT-Vortriebssimulators (lineare Druckübertragungsmittel, OSB). Münster 5/2007.
- [9] Scherle, M.; Rößler, U.: Fernseminar Rohrvortrieb, www.maxscherle.com. 3/2003.
- [10] Milligan, G. W. E.; Norris, P.: Pipe-Soil Interaction During Pipe Jacking, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 137 S. 27-44, Jan. 1999.
- [11] IKT – eNewsletter Februar 2007: IKT – Symposium on Pipe-Jacking-Simulation. www.ikt.de
- [12] Verburg, N.: An analysis of friction by microtunnelling. Final report TU Delft, 12/2006.

- [13] Falter, B.; Holthoff, F.: Numerische Modellierung des IKT-Vortriebssimulators – Variation der Druckübertragungsmittel (OSB, Spanplatte, PU, Holz) -. Münster 6/2007.
- [14] Arbeitsblatt A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), St. Augustin, Januar 1990.
- [15] Scherle, M.: Rohrvortrieb 2, Statik – Planung – Ausführung, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1977.
- [16] Weber, W.: Experimentelle Untersuchungen in rolligem Boden zur Dimensionierung von Pressbohranlagen. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1981.
- [17] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton. April 2003.
- [18] Arbeitsblatt A 125: Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Entwurf 02/2007.
- [19] Schnepf, J.: Prüfungen an Dichtprofilen für Betonrohre. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Mechanik und Baukonstruktionen. Aachen 6/2007, Unveröffentlicht.
- [20] Arbeitsblatt A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren, 2. Aufl., Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Entwurf 02/2007.