Institut für Unterirdische Infrastruktur

Endbericht zum Forschungsvorhaben

Unterirdischer Vortrieb von Stahlbetonrohren mit Rechteckquerschnitt – Teil II

WISSENSCHAFTLICHE LEITUNG
Dr.-Ing. B. Bosseler

PROJEKTLEITUNG UND BEARBEITUNG
Dipl.-Ing. M. Liebscher

Auftragnehmer:

Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Auftraggeber:

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

Gelsenkirchen, März 2002

Inhaltsverzeichnis Seite

1 VERANLASSUNG UND PROBLEMSTELLUNG ... 3

2 STAND DER TECHNIK ... 4

3 ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE ... 8

4 PLANUNG UND DURCHFÜHRUNG DES ROHRVORTRIEBS ... 12

4.1 ALLGEMEINES ... 12
4.2 ANPASSUNG UND PRODUKTION DES ROHRPROTOTYPEN ... 14
4.2.1 Steckdichtung ... 14
4.2.2 Schutz gegen Eindringen von Bodenmaterial ... 15
4.2.3 Druckübertragungsmittel ... 17
4.2.4 Produktion der Prototypen ... 18
4.3 VORTRIEBSEINRICHTUNG ... 20
4.4 BODENSTRUKTUR UND -EINBAU ... 23
4.5 STATISCHE UND DYNAMISCHE BELASTUNGEN ... 26
4.6 MESSTECHNIK ... 27
4.6.1 Vortriebsrohr ... 27
4.6.2 Versuchsboden ... 28
4.6.3 Ergänzende Messtechnik ... 29
4.6.4 Rohrvermessung ... 29
4.7 ABLAUF DES ROHRVORTRIEBS ... 32
4.8 ROHRVORTRIEB ... 35
4.9 FREILEGEN DES ROHRSTRANGES ... 38

5 ERGEBNISSE ... 39

5.1 ALLGEMEINES ... 39
5.2 ROHRPRODUKTION ... 39
5.3 VERROLLUNG UND ABWINKELUNG IN DER ROHRVERBINDUNG ... 40
5.4 STEUERBARKEIT DES ROHRSTRANGES ... 44
5.5 AUSWIRKUNG ÄUßERER BELASTUNGEN ... 45
5.6 ROHR-BODEN-INTERAKTION ... 48
5.7 KRAFTÜBERTRAGUNG IM ROHRVERBINDUNGSBEREICH ... 50
5.7.1 Allgemeines ... 50
5.7.2 Berechnungsverfahren ... 50
5.7.3 Vergleichende Ermittlung der zulässigen Vortriebskraft ... 58
5.7.4 Kontaktdruckspannungen während der Versuchsdurchführung ... 62
5.7.5 Spannungsmessungen in der Rohrfuge ... 63
5.8 EINDRINGEN VON BODENMATERIAL IN DIE ROHRVERBINDUNG ... 65
5.9 DICHTHEIT DER ROHRVERBINDUNG ... 69

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 75

Literatur ... 79

©2002 All rights reserved by GEK mbH

1 Veranlassung und Problemstellung

Der gesteuerte Vortrieb von Stahlbetonrohren zur Erneuerung und Neuverlegung von Leitungen hat in den letzten Jahren durch internationale Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ein hohes technisches Niveau erreicht und stellt heute eine praxiserprobte Alternative zur offenen Bauweise dar. Dies gilt jedoch nur für den Einsatz von Kreisquerschnitten. Der Vortrieb von Rohren mit Rechteckquerschnitt blieb aufgrund gravierender Schadensfälle bislang auf wenige Baumaßnahmen beschränkt (z.B. [1], [2]). Dennoch kann der Einsatz von Rechteckquerschnitten erhebliche technische und wirtschaftliche Vorteile aufweisen, so z.B. bei folgenden Einsatzfällen:

- *Unterquerung von Bahndämmen, Straßen, Flüssen usw. bei geringen Überdekkungshöhen [3]*
- *Stauraumkanäle zur Regenentlastung von Mischwasserkanälen*
- *Doppelrohrquerschnitte [4]*
- *Leitungsgänge zur zugänglichen Verlegung von Ver- und Entsorgungsleitungen [5]*
- *Vortriebsrohre mit von der Kreisform abweichendem Innenquerschnitt*
- *Aufweitung von Gewässerquerungen unter Bundesfernstraßen und Eisenbahnen, z.B. mit dem Ziel der ökologischen Verbesserung durch vermehrten Lichteintrag*

Um die o.g. Einsatzfälle zu erschließen, beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) das IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur mit der Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Stahlbetonrohres mit Rechteckquerschnitt für den unterirdischen Rohrvortrieb im begehbaren Nennweitenbereich. Die Einsatzmöglichkeiten für derartige Rohre sollten erhöht und Schäden bei entsprechenden Baumaßnahmen vermieden werden.

Das Gesamtprogramm gliedert sich in 3 Phasen:

Phase I: Entwicklung und Erprobung eines Rohrprototyps (1998-1999)

Phase II: Verfahrenstechnische Optimierung und Anpassung des Prototypen auf Basis von Vortriebsversuchen im Maßstab 1:1 (2000-2002)

Phase III: Rohrvortrieb unter In-situ-Bedingungen (Pilotprojekt, 2002-2003)

Die Phase I wurde im Jahre 1999 erfolgreich abgeschlossen und es konnte ein völlig neuartiger Rohrprototyp für den ersten Vortriebseinsatz zur Verfügung gestellt werden [6].

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Um aus einem ersten Einsatz möglichst viele Erkenntnisse zu gewinnen und die Unwägbarkeiten einer Pilotbaustelle auszuschließen, wurden für die Phase II im Januar 2000 vom MUNLV Vortriebsversuche im Großversuchsstand des IKT beauftragt.

Diese bieten folgende Vorteile:

- Der Bodenaufbau kann vollständig nach den Vorgaben der Netzbetreiber gestaltet werden. Auch ist der gezielte Einbau von Hindernissen problemlos möglich.
- Nach Abschluss des Vortriebs kann ein definierter Grundwasserspiegel aufgebracht werden, d.h. der Vortrieb wird zunächst ohne anstehendes Grundwasser ausgeführt und anschließend eine praxisnahe Funktions- und Dichtheitsprüfung der Rohrverbindung ermöglicht.
- Die Überdeckungshöhe kann während des Vortriebs durch entsprechende Lasteinleitungselemente variiert werden. Auch können dynamische Verkehrslasten gezielt aufgebracht werden.
- Der Versuchsstand ist von allen Seiten aus zu erreichen. Dies bietet den Vorteil, Messgeräte an allen notwendigen Positionen anbringen zu können.
- Der Versuchsstand befindet sich in einer Halle, sodass keinerlei wetterbedingte Einflüsse bestehen.

Gegenstand des hier vorliegenden Berichtes sind die Ergebnisse der Phase II.
Nachfolgend werden jedoch zunächst die wesentlichen Ergebnisse der Phase I als Stand der Technik zusammenfassend dargestellt.

2 Stand der Technik

In Phase I, welche 1999 abgeschlossen wurde, stand die Entwicklung, Konstruktion und Erprobung eines Rohrprototypen im Vordergrund [6]. Schwerpunkte waren hier die Optimierung der

- inneren Querschnittsform,
- Rohrverbindungskonstruktion,
- Druckübertragungsmittel,
- Dichtmittel.

Es zeigte sich, dass gegenüber Vortriebsrohren mit Kreisquerschnitt erhebliche konstruktive Veränderungen der Rohrverbindung notwendig sind. So erfüllen sowohl Falzverbindungen als auch Stahlführungsringe nicht die statischen Anforderungen. Alternativ wurde eine neue Rohrverbindung mit folgenden Konstruktionselementen entwickelt :

- Ebene Rohrstirnflächen
- Verzicht auf einen Stahlführungsring

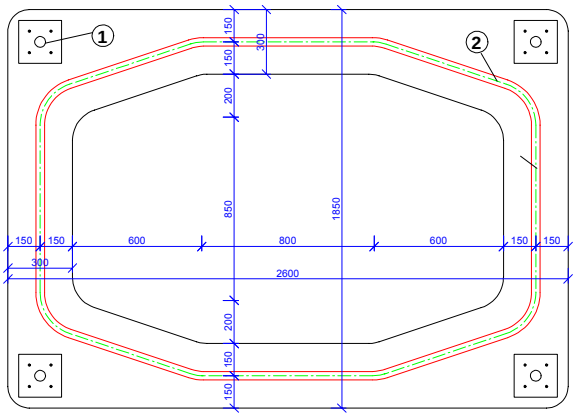
©2002 All rights reserved by GEK mbH

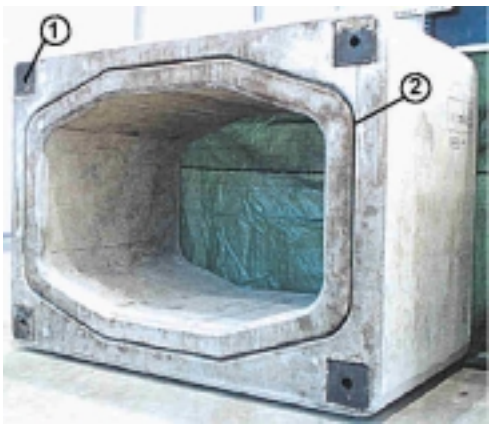
- Übertragung der Querkräfte durch Stahlbolzen
- Anordnung einer Dichtung in Rohrwandungsmitte
- Zweigeteilter Druckübertragungsring
- Druckübertragungsmittel als „Sandwich-Konstruktion“.

Die Bemessung der Rohrwandung und der Konstruktionselemente wurde auf Basis der nachfolgenden Belastungsannahmen durchgeführt (vgl. ATV-A 161 [7]):

- Vortriebslänge: 100 m (Ohne Zwischenpressstation)
- Vortriebskraft: 14 MN
- Minimale Überdeckungshöhe: 1,5 m
- Maximale Überdeckungshöhe: 6,0 m
- Verkehrslasten: UIC 71
- Maximaler Grundwasserstand: 10 m über Rohrscheitel
- Exzentrizität der Vortriebskraft: Kernquerschnitt

Bei bereichsweise fehlender Bettung einzelner Rohre nehmen die Querkraftbolzen die Vertikalkräfte aus Boden-, Verkehrslast und Rohreigengewicht komplett auf. Die Verteilung der Querkräfte in den Gesamtquerschnitt wird durch Vouten unterstützt.
Unter Zugrundelegung der o.a. Randbedingungen und Belastungen wurden die in Bild 1a) dargestellten Querschnittsabmessungen gewählt und entsprechende Rohrprototypen mit unterschiedlichen Dichtungsvarianten produziert. Anschließend wurde anhand von Spannungsuntersuchungen und Dichtheitsprüfungen im Maßstab 1:1 die Funktionsfähigkeit der Rohrverbindungen überprüft und der in Bild 1b) dargestellte Rohrkörper ausgewählt.





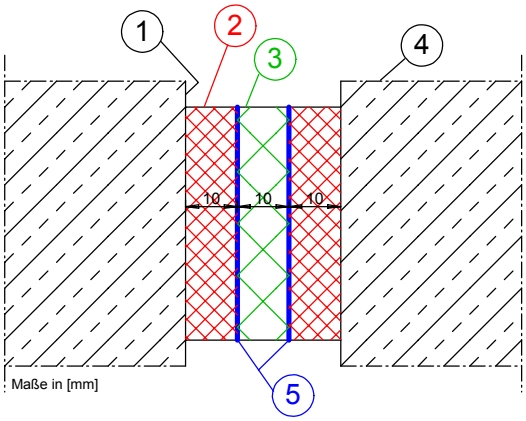
① Hülsen zur Aufnahme der Stahlbolzen
② Umlaufende Nut zur Aufnahme der Dichtung

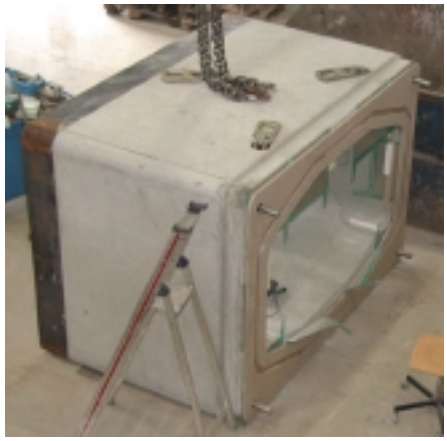
a) Querschnittsabmessungen ***b) Rohrkörper***

Bild 1 Rohrprototyp

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Laboruntersuchungen zur Auswahl und Prüfung der Druckübertragungsmittel zeigten, dass im vorliegenden Anwendungsfall die üblichen Werkstoffe Spanplatte und Massivholz nur eingeschränkt einsetzbar sind. Insbesondere die großen plastischen Verformungsanteile verhindern eine dauerhaft gleichmäßige Lasteinleitung, da Belastungszyklen infolge von Steuerbewegungen oder Kurvenfahrten gerade in den Randbereichen des Rechteckquerschnitts zu unkontrollierbaren Spannungsspitzen führen können. Demgegenüber konnten mit einer neuentwickelten „Sandwich-Konstruktion“ (s. Bild 2), bestehend aus außenliegender Spanplatte, Stahlblechen und Polyurethan-Kern, die elastischen Verformungsanteile vergrößert und die bekannten Vorteile eines Holzwerkstoffes (geringe Querdehnung, Ausgleich von Unebenheiten) weiterhin genutzt werden.





① Rohrstirnfläche ② Spanplatte (10 mm)
③ Kunststoffkern (10 mm) ④ Stahlbetonvortriebsrohr
⑤ Stahlbleche (0,2 mm)

a) Prinzipskizze ***b) Ansicht Druckübertragungsmittel***

Bild 2 Aufbau der „Sandwich-Konstruktion“

Für die Rohrverbindung wurden zunächst drei neuartige Dichtungssysteme entwickelt, produziert und umfangreichen Dichtheitsprüfungen auf Basis der DIN 4035 [8] (0,5 bar Innendruck) bzw. der FBS-Qualitätsrichtlinie [9] (1,0 bar Innendruck) unterzogen (s. Bild 3). Ergänzende Vergleichsmessungen mit Luftüber- und Luftunterdruck bestätigten die Ergebnisse. Zwei Steckdichtungen und eine integrierte Dichtung wurden überprüft. Alle untersuchten Varianten schienen prinzipiell für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet. Die Wahl fiel schließlich auf die im Bild 4 dargestellte Verbindungskonstruktion mit Steckdichtung, da diese – gegenüber einer integrierten Dichtung - erhebliche Vorteile in der Produktion und im Handling aufwies.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

a) Strangprüfung ***b) Muffenaußendruckprüfung*** ***c) Muffeninnendruckprüfung***

Bild 3 Dichtheitsprüfungen

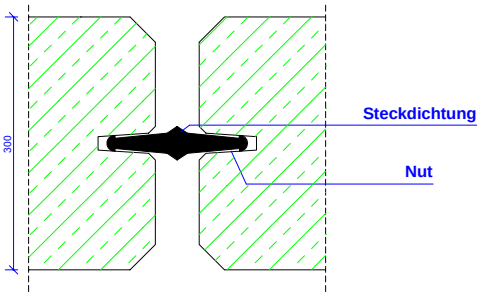
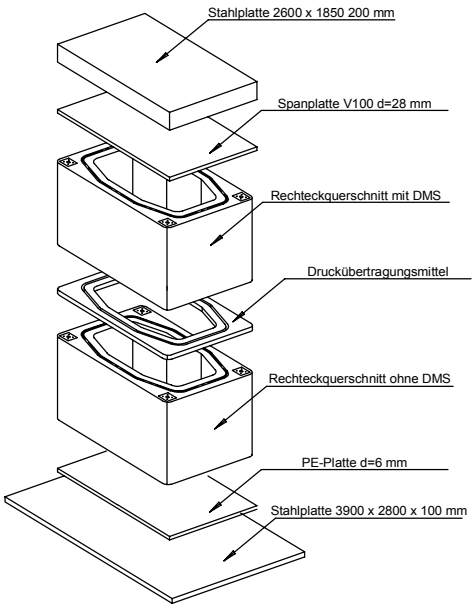


Bild 4 Prinzipskizze des ausgewählten Dichtungssystems

In Druckversuchen axial und quer zur Rohrachse wurde das Rohrkonzept auf die Erfüllung der statischen Anforderungen aus Rohrvortrieb geprüft. Dabei wurden bei bis zu 140% der Bemessungskraft (1,4 x 14 MN) sowohl die Kraftübertragung im Rohrspiegel, Scherweg, Scherkraft als auch die Beweglichkeit in der Rohrverbindung erfasst. Im Bild 5 ist der Aufbau der axial-exzentrischen Druckversuche dargestellt.



a) Prinzipskizze des Versuchsaufbaus ***b) Rohrprüfung***

Bild 5 Axial-exzentrische Druckversuche

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Der beschrittene Weg der Entwicklung einer vollständig neuartigen Rohrkonstruktion im Rohrverbindungsbereich wurde bestätigt. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die für den vorliegenden Anwendungsfall erarbeiteten Neuentwicklungen, wie beispielsweise die Sandwich-Konstruktion des Druckübertragungsmittels, die Teilung des Druckübertragungsringes und die Dichtungskonstruktion wichtige Impulse für die Weiterentwicklung von Rohrverbindungen für Vortriebsrohre mit Kreisquerschnitt geben werden.

3 Zielstellung und Vorgehensweise

Die Zielstellung des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erprobung und gegebenenfalls Optimierung des im Teil I entwickelten Prototyps eines Stahlbetonrohres mit Rechteckquerschnitt mit Hilfe eines Vortriebes im Maßstab 1:1 im Großversuchsstand des IKT. Im Ergebnis sollte der Prototyp zu einer in der Praxis einsetzbaren, serienreifen Rohrkonstruktion weiterentwickelt werden.
Auf diesem Wege wurde der Rohrprototyp in Interaktion mit dem Baugrund und sich hieraus ergebenden Beanspruchungen geprüft. Zudem konnte der Einfluss von bauverfahrenstechnischen Aspekten unter In-situ-Bedingungen untersucht werden.

Besondere Schwerpunkte bildeten:

- Modifikation der im Teil I des Forschungsvorhabens entwickelten Dichtungen bezüglich produktions- und vortriebsspezifischer Anforderungen.
- Optimierung der im Teil I des Forschungsvorhabens entwickelten Druckübertragungsmittel im Hinblick auf ihre Handhabbarkeit bei der Bauausführung
- Entwicklung und Erprobung von Schutzmechanismen zur Verhinderung des Eindringens von Bodenmaterial in den Kraftübertragungsbereich.
- Erprobung und Optimierung des im Teil I des Forschungsvorhabens entwickelten Rohrprototyps mit den o.g. Modifizierungen der Dichtung und des Druckübertragungsmittels unter In-situ-Bedingungen im Großversuchsstand des IKT im Maßstab 1:1 unter besonderer Berücksichtigung folgender Einflussparameter:

  ⇒ Verrollungen des Rohrstranges beim Vortrieb
  Es wurde überprüft, inwiefern die Übertragung von Torsionsmomenten durch das Bolzensystem geeignet ist, Verrollungen zu verhindern und die Funktionsfähigkeit des Dichtungssystems auch unter diesem Lastfall zu gewährleisten.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

⇒ Planmäßige und unplanmäßige Abwinkelungen in der Rohrverbindung
Steuerbewegungen im Verlauf des Vortriebs verursachen Abwinkelungen in der Rohrverbindung in horizontaler und vertikaler Richtung. Untersucht wurde ihr Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Rohrverbindung.

⇒ Eindringen von Bodenmaterial in den Rohrverbindungsbereich
Der in Teil 1 des Forschungsvorhabens entwickelte Prototyp verfügte nicht über einen Stahlführungsring gemäß ATV A-125 [10]. Die Rohrverbindung war demzufolge nicht gegen eindringendes Bodenmaterial geschützt. Im Rahmen des Rohrvortriebes wurden ergänzende "Schutzmaßnahmen" geprüft und anschließend optimiert.

⇒ Außenwasserdruck
Die Funktionsfähigkeit des Dichtungssystems bei Außenwasserdrücken infolge von Grundwasser und einer zur Schmierung des Rohrstranges eingepressten Bentonitsuspension wurde überprüft.

⇒ Bodenverformungen
Die Auswirkungen von Bodenverformungen auf die Dichtheit der Rohrverbindung wurden untersucht.

⇒ Statische und dynamische Belastungen auf der Geländeoberfläche
Durch das Aufbringen statischer Auflasten und dynamischer Verkehrslasten konnten die Auswirkungen dieser Belastungen auf die Funktionsfähigkeit des Rohrverbindungsbereiches während und nach dem Vortrieb ermittelt werden.

Um die o.a. Ziele effektiv und praxisnah zu erreichen, wurde das folgende Projektkonsortium aus Baufirmen, Dichtmittelherstellern, Fachvereinigungen, Netzbetreibern und Rohrherstellern gebildet:

<u>Forschungsinstitut:</u>
IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen

<u>Baufirmen:</u>
Maagh Leitungsbau GmbH, Bonn
Sax & Klee GmbH, Mannheim

<u>Netzbetreiber:</u>
Stadtentwässerungsbetriebe der Stadt Köln, AÖR
Emschergenossenschaft, Essen
Gelsenkanal, Gelsenkirchen
Ruhrverband, Essen

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Dichtmittelhersteller:
Hermann Mücher GmbH, Schwelm

Fachvereinigungen:
Fachvereinigung für Beton- und Stahlbetonrohre (FBS), Bonn

Rohrhersteller:
Kleihues & Sohn AG, Neuenkirchen
Westrohr Betonwerke GmbH & Co., Heek

Die Aufgabe dieses Konsortiums war die fachliche Begleitung des Vorhabens sowohl bei der Rohrmodifikation, als auch bei der Festlegung der Versuchsrandbedingungen. Dazu wurden in regelmäßigen Projektbesprechungen mögliche Alternativen diskutiert und Ausführungsvarianten beschlossen.

Versuchsplanung und Festlegung der Versuchsrandbedingungen
Um einen Rohrvortrieb unter In-situ-Bedingungen sicherzustellen wurden speziell für die Festlegung der Versuchsrandbedingungen die Netzbetreiber eingebunden. Die Mitarbeit umfasste die Auswertung von geplanten, im Bau befindlichen oder bereits durchgeführten Baumaßnahmen in Bezug auf Querschnittsform, Querschnittsgröße, Bauweise, Geologie, Hydrologie, Gradiente und verfahrensspezifische Besonderheiten. Außerdem wurden die Randbedingungen konkreter Einsatzfälle bei der Detailplanung von Versuchsablauf und Rohrkonstruktion berücksichtigt.
Insbesondere wurden solche Projekte analysiert, bei welchen der unterirdische Vortrieb von Rohren mit Rechteckquerschnitt eine mögliche Alternative gewesen wäre bzw. in aktuellen Planungen mit betrachtet werden soll.
Ziel war die Festlegung der vortriebsspezifischen Randbedingungen hinsichtlich:

- Bodenart und Bodenaufbau
- Maximaler Vortriebskraft
- Überdeckungshöhe
- Bodenabbau an der Ortsbrust
- Kurvenradius und Steuerbewegungen
- Schmierung des Rohrstranges

Modifizierung der Rohrprototypen und Produktion der Versuchsrohre
In Zusammenarbeit mit den Dichtmittelherstellern, der Fachvereinigung und den Rohrherstellern wurden die konstruktiven Modifikationen der Rohre, der Rohrverbindungen und der Dichtmittel diskutiert und festgelegt.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Dabei wurden insbesondere die verfahrensbedingten Vorgaben aus dem Herstellungsprozess berücksichtigt und zwischen den Dichtmittel- und Rohrherstellern abgestimmt.

Rohrvortrieb im Großversuchsstand im Maßstab 1:1

Im Großversuchsstand des IKT wurden 10 Rohrprototypen auf einer Länge von 15 m im Maßstab 1:1 unter definierten, einstellbaren Randbedingungen vorgetrieben. Dabei wurde auch das Auffahren eines möglichst engen Kurvenradiusses angestrebt, da z. B. beim Bau von Dükern zur Unterquerung von Verkehrs- und Wasserwegen neben unplanmäßigen Steuerbewegungen auch Kurvenfahrten - ggf. sogar in zwei Ebenen – gefordert sind. Die sich hieraus ergebenden ungünstigen Lastkombinationen für die Rohre und deren Verbindungen sowie ggf. erhöhten Beanspruchungen in der Dichtung sollten so berücksichtigt werden. Grundsätzlich werden Abwasserkanäle und -leitungen allerdings mit gerader Trasse und Gradiente verlegt, um den betrieblichen Erfordernissen, z.B. in Anlehnung an DIN 19550 [11] gerecht zu werden.

Betriebszustand

Nach Beendigung des Rohrvortriebes wurde die Funktionsfähigkeit des fertiggestellten Rohrstranges unter betriebsähnlichen Beanspruchungen geprüft. Hierzu wurden unterschiedliche Belastungsszenarien im Versuchsstand nachgebildet:

- Variation unterschiedlicher Spannungsniveaus durch statische Belastungen auf der Geländeoberfläche mittels elastomerer Druckkissen, die zwischen der Bodenoberfläche und dem als Widerlager dienenden Versuchsstanddeckel montiert wurden.
- Simulation dynamischer Verkehrslasten aus Eisenbahnverkehr über einen servohydraulischen Prüfzylinder, der mittels einer entsprechenden Spezialkonstruktion im Versuchsstand angebracht wurde.
- Simulation eines steigenden Grundwasserspiegels bis 1 bar, gemessen an der Rohrstrangoberkante, mit der Folge einer Wasseraußendruckbelastung auf Rohrverbindung und Rohrkörper.
- Dichtheitsprüfung der Rohrverbindungen bzw. des Rohrstranges von innen.

Rohr- und Bodenausbau

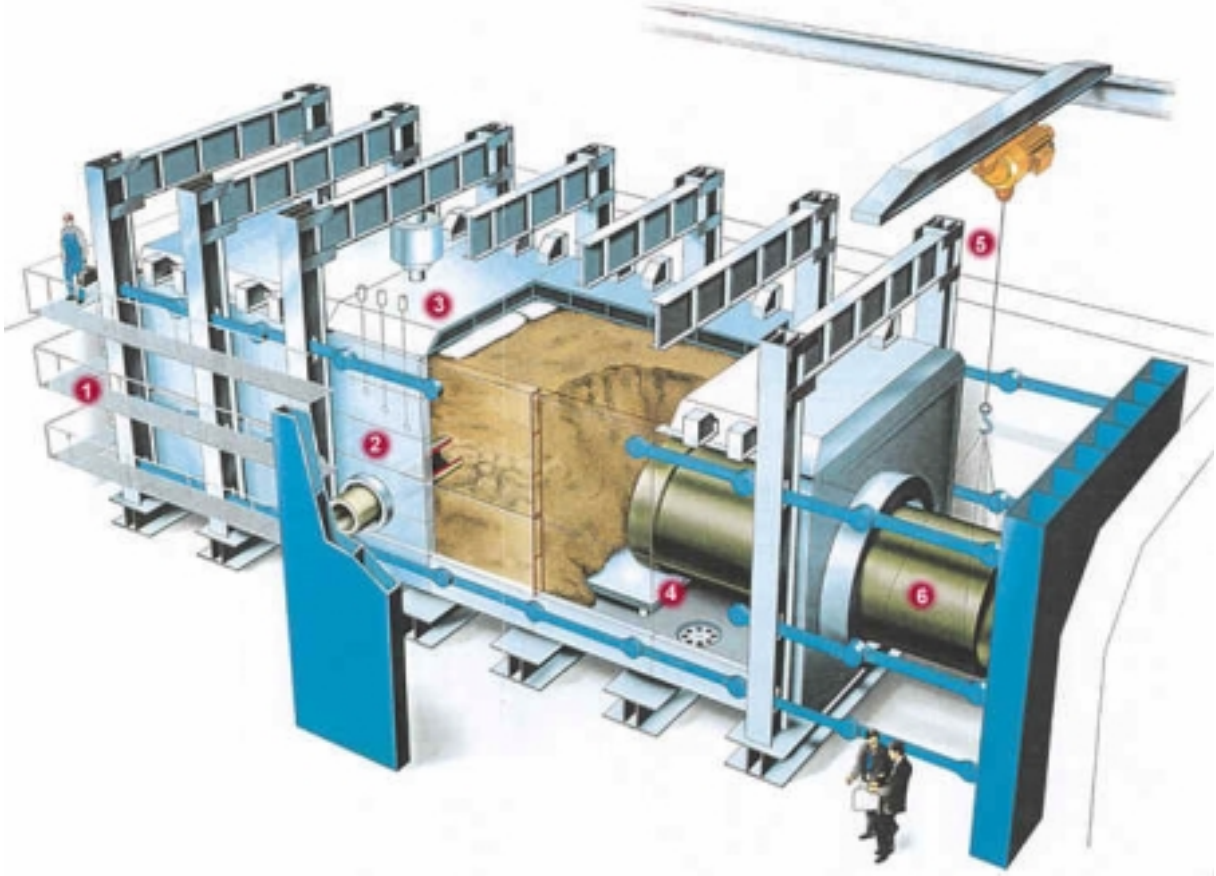
Schließlich wurden die vorgetriebenen Rohre freigelegt, um gegebenenfalls aufgetretene Beschädigungen an der Rohraußenseite festzustellen und zu bewerten.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4 Planung und Durchführung des Rohrvortriebs

4.1 Allgemeines

Der Vortriebsversuch wurde im Großversuchsstand des IKT (s. Bild 6) durchgeführt.



1) Umlaufende Stege 2) Quereinfahröffnung 3) Deckelelemente
4) Absenkbare Bodenelemente 5) Hallenkran 6) Startbaugrube

Bild 6 Vortriebsversuchsstand im IKT für Versuche im Maßstab 1:1

Bei der Konzeption des Versuchsstandes wurde insbesondere auf die Erfüllung folgender Anforderungen Wert gelegt:

- Einbau von Leitungen bis DN 3500
- Simulation von Setzungen, beispielsweise verursacht durch Bergsenkungen
- Aufbringen eines hydrostatischen Außenwasserdruckes von 1,0 bar
- Simulation großer Überdeckungshöhen
- Variabilität in den lichten Abmessungen zur Anpassung an unterschiedliche Anforderungen unter dem Aspekt des wirtschaftlichen Betriebes.

Basis des Großversuchsstandes bildet eine wasserdichte Stahlbetonwanne. In dieser Wanne wird der eigentliche Großversuchsstand montiert, dessen Wände und

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Deckel aus einer Vielzahl flächiger und miteinander wasserdicht verbundener Stahlelemente bestehen. Zur Aufnahme des Erddruckes infolge Bodeneigengewicht und Auflasten sowie des Wasserdruckes dienen 6 m hohe Stahlrahmen, gegen die sich die Stahlelemente horizontal abstützen. Der lichte Prüfraum besitzt die Abmessungen: Länge = bis zu 18 m, Breite = 6 m, Tiefe = 6 m.
Diese Konstruktion bietet folgende Vorteile:

- Umlaufende Begehbarkeit zur Installation von Messinstrumenten.
- Einbaumöglichkeit von Sichtöffnungen für die direkte Inaugenscheinnahme wichtiger Versuchsdetails.
- Durch unterschiedliche Anordnungen der Stahlelemente lassen sich die Abmessungen des Versuchsstandes variieren, so dass für jeden Versuch die geometrischen Randbedingungen optimal eingestellt werden können.
- Durch die Anordnung von Zugängen von der Längs- und der Stirnseite ist eine Nutzung des Versuchsstandes in beiden Achsrichtungen möglich.

Um äußere Wasserdrücke von bis zu 1,6 bar simulieren zu können, ist der gesamte Versuchsstand wasserdicht ausgeführt, so z.B. durch spezielle Dichtungen zwischen den Stahlelementen und dem druckwasserdichten Deckel. Letzterer ist durch die umlaufenden Stahlrahmen gegen Abheben gesichert. Gleichzeitig dient der Deckel zur Aufnahme von mit Druckkissen erzeugten statischen oder dynamischen Vertikallasten. Des weiteren können vertikale Punkt- oder Flächenlasten auf der Bodenoberkante durch die Anordnung von servohydraulischen Druckzylindern im Versuchsstand aufgebracht werden. Alle genannten Einzelelemente des Versuchsstandes werden mit dem Hallenkran bewegt und montiert. Im Versuchsstand können über spezielle Ein- und Ausfahröffnungen und integrierte Widerlagerplatten Rohrvortriebe bis zu einer Vortriebskraft von 6000 kN in Versuchsstandlängsrichtung und 1000 kN in Querrichtung in allen Nennweiten bis DN 3500 durchgeführt werden.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wurde eine spezielle Stirnwand mit einer rechteckigen Einfahröffnung geplant, konstruiert und gefertigt. Die Vortriebsstrecke wurde auf eine Länge von 15 m festgelegt, so dass die Startbaugrube ausreichend Platz für die Hauptpressenstation und den Einbau der Vortriebsrohre aufwies. Mit der unter Abschnitt 4.2 festgelegten Rohrlänge von 1,5 m konnten somit insgesamt 10 Rohre vorgetrieben werden. Die Benennung der Rohre erfolgte fortlaufend. Als Rohr Nummer 1 wurde das Startrohr mit integrierter Stahlschneide festgelegt (Bild 7).

©2002 All rights reserved by GEK mbH

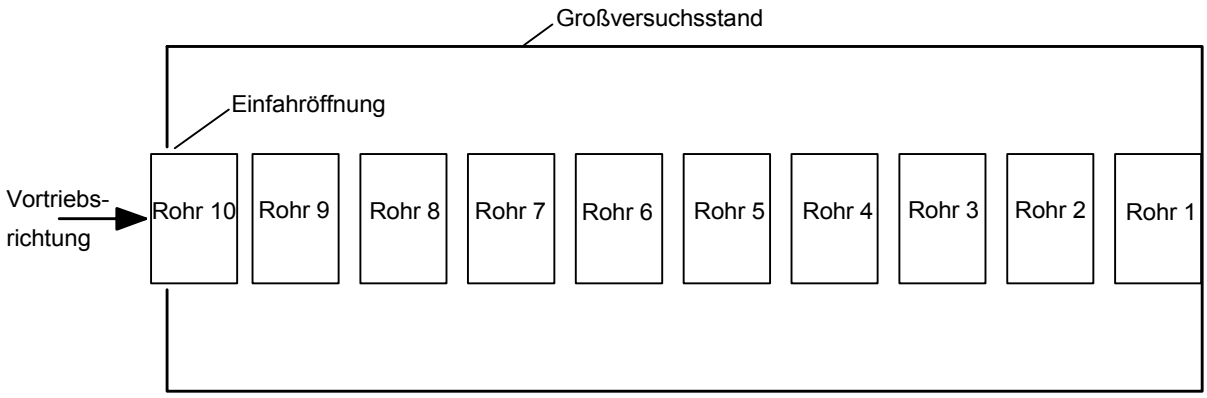


Bild 7 Nummerierung der Rohre im Großversuchsstand nach Abschluss des Vortriebs (Draufsicht)

4.2 Anpassung und Produktion des Rohrprototypen

Der im Teil 1 des Projektes entwickelte Rohrprototyp wurde in seinen äußeren und inneren Abmessungen für die weiteren Versuche übernommen. Die Bewehrung wurde anhand einer neu durchgeführten statischen Berechnung an die Gegebenheiten des Großversuchs (s. Abschnitt 4.4) angepasst, wobei die Wanddicke beibehalten wurde. Die Rohrlänge betrug 1,5 m. Die Querschnittsabmessungen wurden entsprechend Bild 1a) gewählt.
In Zusammenarbeit mit den Dichtmittel- und Rohrherstellern sowie der Fachvereinigung Beton- und Stahlbetonrohre wurde insbesondere die Ausführung der Dichtung und das Druckübertragungsmittel auf die Versuche abgestimmt. Darüber hinaus wurde ein Schutz gegen das Eindringen von Boden von außen entwickelt.

4.2.1 Steckdichtung

Aufgrund der bereits erzielten, positiven Ergebnisse bezüglich der Dichtheit der Rohrverbindung, wurde die Dichtkonstruktion nur geringfügig verändert. Die vorgenommenen Modifikationen dienten insbesondere der Erhöhung der Sicherheitsreserven bei Zerrungen und Abwinkelungen in der Rohrverbindung. Im einzelnen wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

- Dichtung
  Das Dichtprofil wurde verlängert, um größere axiale Verschiebungen zu ermöglichen. Zudem wurden die Flanken der Dichtung verstärkt, so dass sich die Dichtwirkung durch zusätzliche Kontaktflächen zwischen Dichtung und Rohr erhöhte (s. Bild 8). Die verwendete Dichtung ist im Bild 9 dargestellt.
- Dichtungsnut
  Abgestimmt auf die Veränderungen an der Dichtung wurde die Nut im Rohr vertieft, sowie die Flankensteilheit verringert (Bild 10).

©2002 All rights reserved by GEK mbH

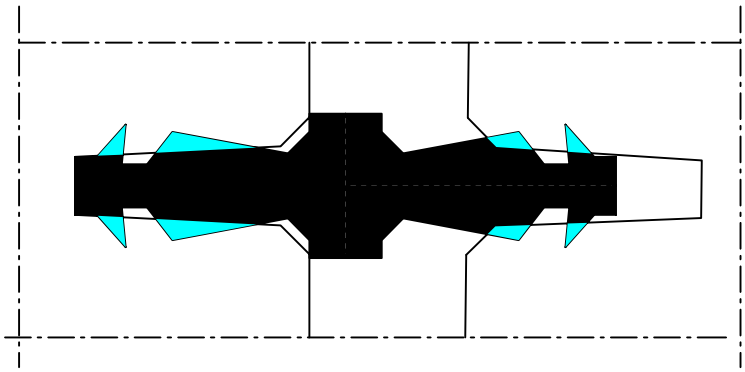


Bild 8 Rohrverbindung im gezerrten um 0,66° abgewinkelten Zustand – Komprimierte Bereiche blau dargestellt

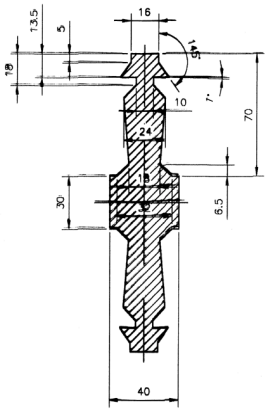


Bild 9 Abmessungen der eingesetzten Dichtung

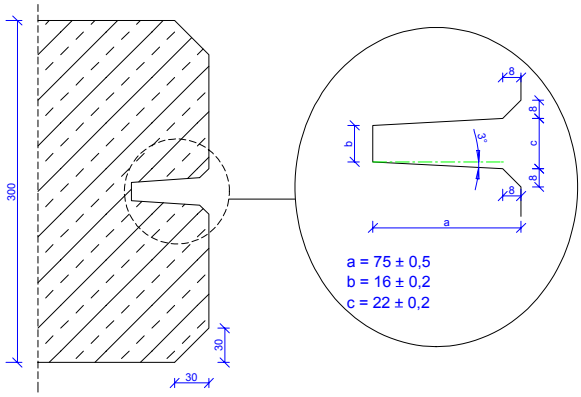


Bild 10 Abmessungen der Dichtungsnut

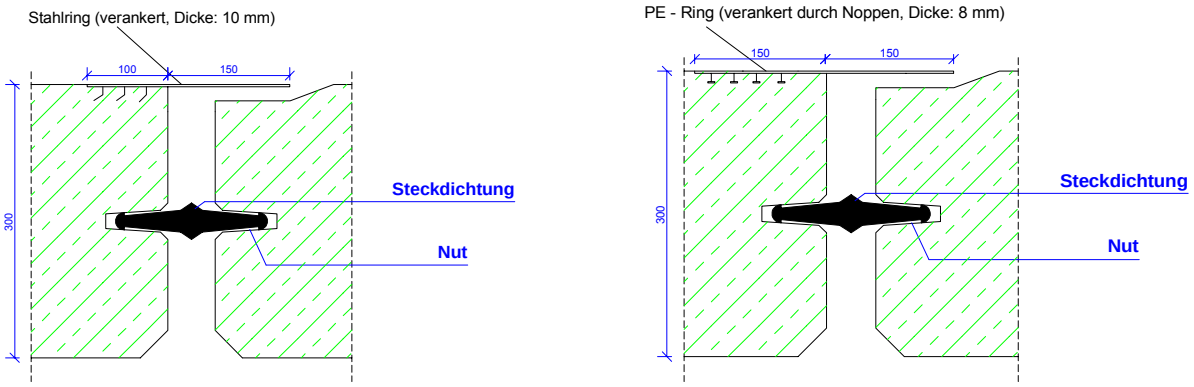
4.2.2 Schutz gegen Eindringen von Bodenmaterial

Der Schutz gegen Eindringen von Bodenmaterial in die Rohrverbindung war im ersten Teil des Forschungsvorhabens nicht erforderlich, da dort ausschließlich Bauteiluntersuchungen ohne Interaktion mit dem anstehenden Baugrund durchgeführt wurden. Für die nun anstehenden Vortriebsversuche wurden unterschiedliche Schutzvorrichtungen unter Berücksichtigung der möglichen Herstellungsverfahren entwickelt. Zur Ausführung kamen die folgenden Varianten, welche sich durch das verwendete Material unterscheiden:

- Stahlring
  Hier wurde ein Stahlring mit einer Dicke von 10 mm verwendet. Er stellt die vergleichsweise „biegsteife“ bzw. „starre“ Variante dar (s. Bild 11a).
- PE-Ring
  Bei dieser Variante wurde ein flexibler PE-Ring mit einer Dicke von 8 mm eingesetzt. Bei den Versuchen sollte geprüft werden, inwiefern sich dieser Ring an das

©2002 All rights reserved by GEK mbH

nachfolgende Rohr anlegt und somit den verbleibenden Ringspalt verringert oder sogar schließt (s. Bild 11b).



a) Stahlring *b) PE-Ring*

Bild 11 Ausführung der Ringe zum Schutz gegen Eindringen von Bodenmaterial

Der verbleibende Ringspalt wurde so dimensioniert, dass ausreichend Raum für Abwinkelungen und Maßtoleranzen zur Verfügung stand. Auf einen Verschluss des verbleibenden Ringspalts mit einem Elastomer wurde bei beiden Varianten zunächst verzichtet.

Die Schutzfunktion des Druckübertragungsmittels kann insbesondere dann beeinträchtigt werden, wenn unerwartet große Abwinkelungen auftreten und die Kraftübertragung nicht mehr vollflächig erfolgt. Nach A 161 [7] ist eine klaffende Fuge im Vortrieb allerdings nicht zugelassen. Es wurde daher bei einigen Rohrverbindungen komplett auf einen Schutz gegen eindringendes Bodenmaterial verzichtet, um zu prüfen, ob bereits allein durch das Druckübertragungsmittel ein ausreichender Verschluss gewährleistet ist (s. Bild 12).

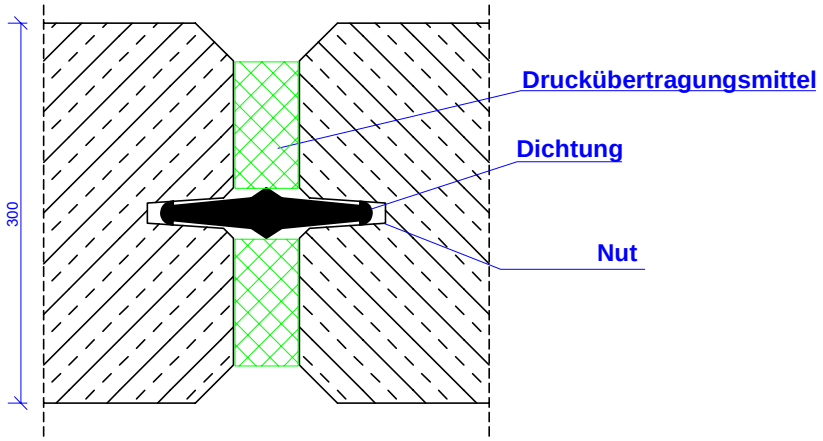


Bild 12 Rohrverbindung ohne Schutz gegen Eindringen von Bodenmaterial

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4.2.3 Druckübertragungsmittel

Im ersten Teilprojekt wurden umfangreiche Untersuchungen zur Verbesserung des üblicherweise eingesetzten Druckübertragungsmittels durchgeführt. Bei diesen stellte sich heraus, das Holz oder Spanplatte aufgrund ihrer geringen elastischen Verformungsanteile nur bedingt für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet sind. Daher wurde neben Druckübertragungsmitteln aus Spanplatte und PU auch eine Sandwich-Konstruktion bestehend aus Spanplatte, Stahl und Polyurethan geprüft. Ergänzend wurden dann im hier beschriebenen Teilprojekt II die elastischen und plastischen Verformungsanteile der drei Varianten bei Mehrfachbelastung, d.h. bei einer maximalen Spannung von 30 N/mm^2 nach 20-facher Belastung, ermittelt. Die Dicke des Druckübertragungsmittels wurde gemäß ATV Arbeitsblatt 125 gewählt [10]. Im einzelnen zeigte sich das folgende Verhalten:

1. Spanplatte (s. Bild 13 c)
   Es handelte sich um eine Spanplatte V 100 mit einer Dicke von 28 mm. Es wurden folgende Verformungsanteile ermittelt:
   Plastischer Anteil: 7,7 %
   Elastischer Anteil: 2,3 %
2. Polyurethan (s. Bild 13 b)
   Hier wurde ein Polyurethan eingesetzt, welches eine Dicke von 30 mm besitzt. Zur Aufnahme der Querdehnungen wurde an den Rohrstirnflächen ein 0,2 mm dickes Stahlblech angeordnet. Es wurden folgende Verformungsanteile ermittelt:
   Plastischer Anteil: 1,7 %
   Elastischer Anteil: 8,4 %
3. Sandwich-Konstruktion (s. Bild 13 a)
   Die verwendete Sandwich-Konstruktion bestand aus außenliegenden Spanplatten (d = 10 mm) und einem Polyurethan-Kern (d = 10 mm). Dazwischen befand sich ein Stahlblech mit einer Dicke von 0,2 mm. Es wurden folgende Verformungsanteile ermittelt:
   Plastischer Anteil: 4,9 %
   Elastischer Anteil: 5,2 %

Es zeigte sich somit, dass mit den drei untersuchten Varianten die Anteile der plastischen und elastischen Verformungen an der Gesamtverformung individuell auf die Anforderungen der jeweiligen Baumaßnahme eingestellt werden können. So sind bei längeren Vortrieben große elastische Verformungen zu vermeiden, um starke Rückverformungen bei Entlastung der Hauptpressen und damit eine unkontrollierbare „Verlängerung“ des Rohrstrangs auszuschließen, während bei kurzen wechselnd

©2002 All rights reserved by GEK mbH

gekrümmten Trassen plastische Verformungen zu reduzieren und Abwinkelungen allein durch elastische Verformungen anzustreben sind.

a) Sandwich *b) Polyurethan* *c) Spanplatte*

Bild 13 Eingesetzte Druckübertragungsmittel

Bild 14 zeigt die Anordnung des Druckübertragungsmittels im Querschnitt.

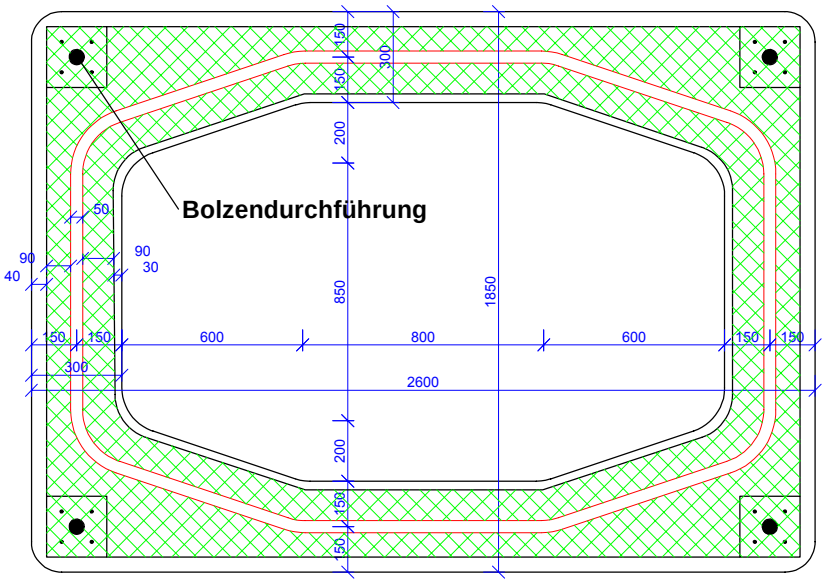


Bild 14 Anordnung des Druckübertragungsmittels im Querschnitt

Es ist deutlich zu erkennen, dass fast der komplette Querschnitt für die Druckübertragung zur Verfügung steht. Hierin besteht ein wesentlicher Vorteil der neuen Rohrverbindungskonstruktion gegenüber Verbindungen mit Falz oder Stahlführungsring, bei denen ein großer Teil des Querschnitts allein für die konstruktive Ausbildung benötigt wird und nicht zur Druckübertragung zur Verfügung steht.

4.2.4 Produktion der Prototypen

Nach Anpassung der Prototypen wurden diese produziert. Aufgrund der äußeren Rohrform kam nur eine Herstellung in einer stehenden Schalung in Frage. Die Ver-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

dichtung des eingebrachten Betons wurde mit Innenrüttlern gewährleistet. Die nachfolgenden Bilder dokumentieren den Produktionsprozess.

Bild 15 Ansicht der Schalung

Bild 17 Verdichten des Betons

Bild 16 Einbringen des Betons

Bild 18 Blick in die Schalung

Bild 19 Fertiggestelltes Rohr Nr. 2 (Nachläufer mit Stahlträgern als Widerlager)

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4.3 Vortriebseinrichtung

Eine wichtige Fragestellung für die Durchführung des Projektes war die Wahl einer geeigneten Vortriebseinrichtung bestehend aus Schneidschuh, Hauptpresse und Druckstück. Bei längeren Vortrieben, oder auch beim Einsatz im Grundwasser kommen Vortriebseinrichtungen mit geneigtem Steuerschild, Nachlaufschild und bei anstehendem Grundwasser Druckluftschleusen zum Einsatz. Für den Bodenabbau werden meist Teilschnittmaschinen eingesetzt und die Steuerung erfolgt über Steuerpressen zwischen Steuerschild und Nachlaufschild. Bild 20 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer derartigen Einrichtung.

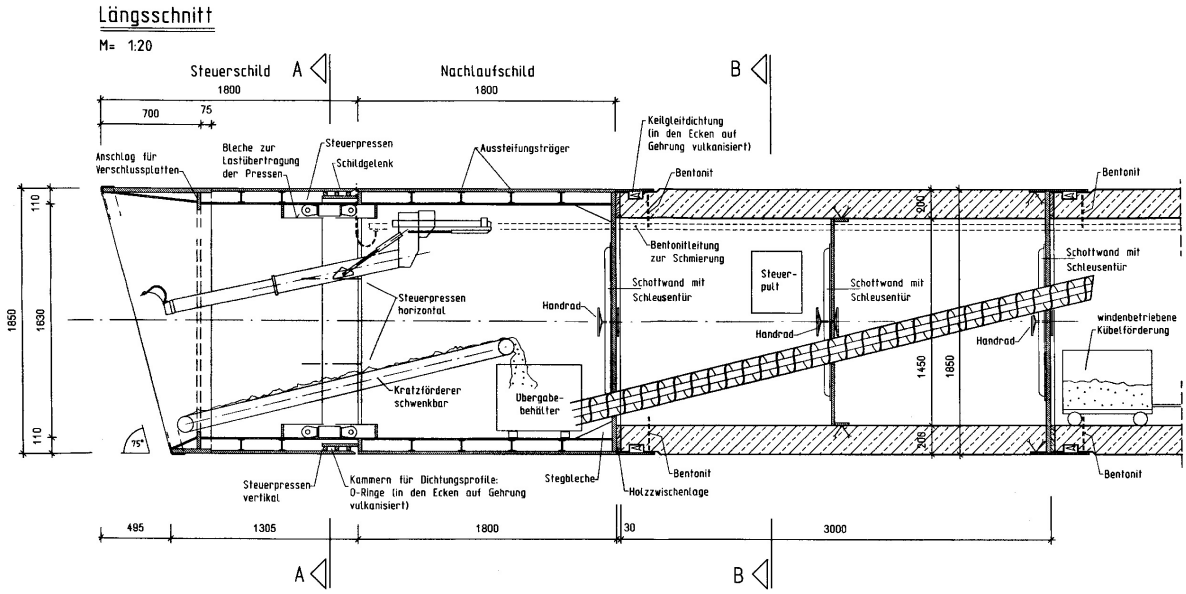


Bild 20 Längsschnitt durch eine Vortriebseinrichtung [12]

Eine derart aufwendige Maschine wurde bei den hier durchgeführten Versuchen aus folgenden Gründen nicht eingesetzt :

- Durch die große Länge der Maschine bleibt nicht viel Raum für den nachfolgenden Rohrstrang.
- Ein Druckluftvortrieb ist nicht erforderlich, da der Grundwasserstand erst nach Beendigung des Vortriebs erhöht wird.
- Den Kosten für eine solche Maschine steht im Projekt kein endsprechender Nutzen gegenüber.
- Der Platz an der Ortsbrust reicht für Teilschnittmaschinen nicht aus.

Der Abbau des Bodens an der Ortsbrust erfolgte von Hand. Die bereits für Vortriebe mit Rechteckquerschnitten in Japan eingesetzten automatischen Verfahren [13] kamen nicht zum Einsatz, da sie sich noch in der Entwicklungsphase befinden und in

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Deutschland derzeit nicht verfügbar sind. Auch ist deren Einsatz bei einer derart kurzen Strecke nicht lohnenswert, da sie hauptsächlich einem schnelleren Bodenabbau dienen.
Aus diesen Gründen wurde die im Bild 21 dargestellte Lösung gewählt. Zur Steuerung wurde eine speziell konstruierte Stahlschneide verwendet, welche an das erste Vortriebsrohr anbetoniert wurde. Hierdurch wurde eine sehr geringe Baulänge ermöglicht und es konnte anstelle eines Stahlnachläufers ein normales Rohr verwendet werden.

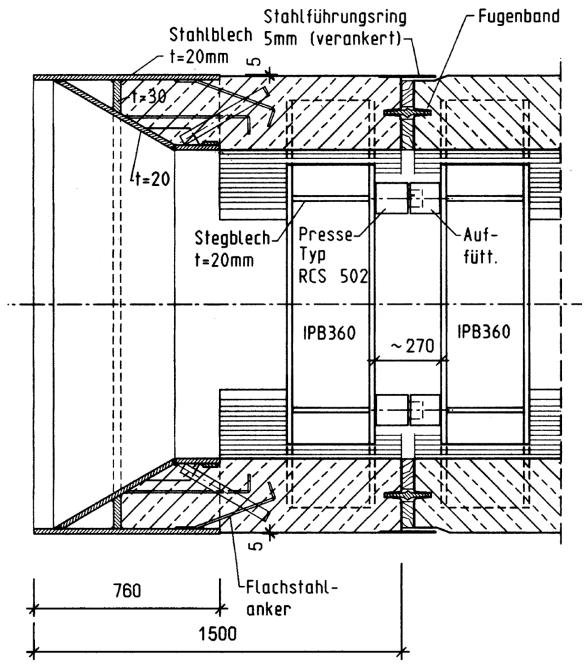
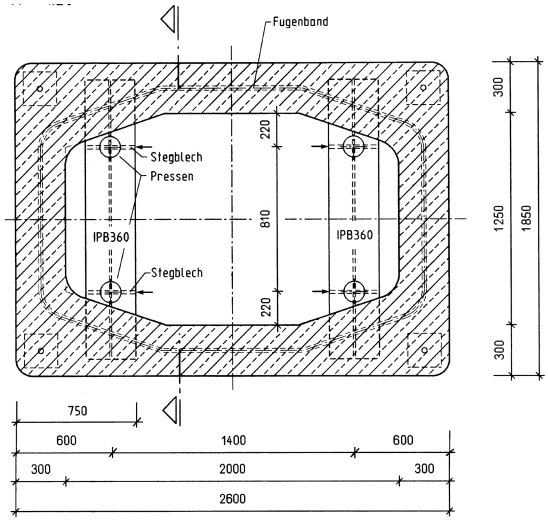


Bild 21 Schnitt Stahlschneide [12]

Die Stahlschneide wurde parallel zur Rohrachse ausgerichtet, d.h. sie hatte keine Neigung. Dies war erforderlich, um nach Beendigung des Vortriebs die Schneide an der Rückwand abdichten zu können. Es wurde eine horizontale Bühne angebracht, um das Eindringen von Bodenmaterial zu begrenzen.
Der Überschnitt betrug in der Sohle 5 mm und in Kämpfer und Scheitel 10 mm. Er wurde im Schneidenbereich auf einer Länge von 760 mm konstant gehalten, um Umläufigkeiten, z.B. bei der Schmierung des Rohrstrangs mit Bentonit, zu verhindern.
Als Widerlager für die Steuerpressen wurden Stahlträger senkrecht an den Rohrenden einbetoniert. Über diese konnten problemlos Steuerkräfte von bis zu 800 kN übertragen werden (s. Bild 22).

©2002 All rights reserved by GEK mbH



a) Skizze *b) Ansicht im Rohr*

Bild 22 Stahlträger als Widerlager für die Steuerpressen

Es wurden vier Steuerpressen eingesetzt, wobei jede dieser Pressen eine Kraft von 200 kN aufbringen konnte.

In der Startbaugrube wurden vier Hauptpressen mit einer installierten Leistung von insgesamt 10 MN eingesetzt. Der Hub dieser Pressen betrug maximal 2,5 m. Der Druckring stammte von einem Vortrieb mit Kreisquerschnitt und wurde auf die Erfordernisse eines Rechteckvortriebs angepasst. Die Bodenabförderung wurde mit einem schienengeführten Förderkübel realisiert, welcher in der Startbaugrube an den Hallenkran übergeben wurde. (Bild 23 und Bild 24)

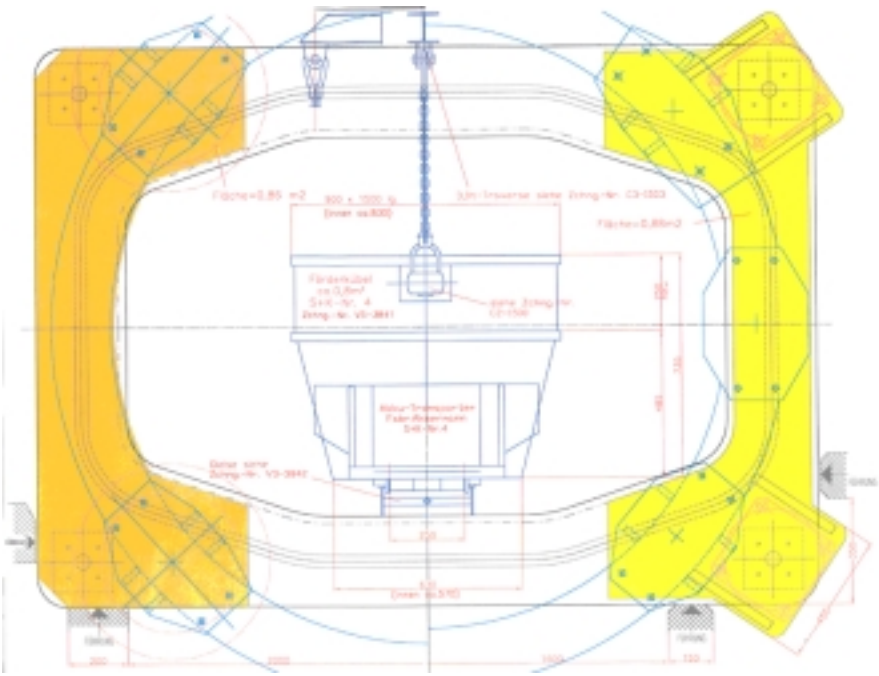


Bild 23 Hauptpressen und Bodenabförderung

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 24 Blick in die Startbaugrube mit Hauptpressen, Duckring und Startrohr mit Stahlschneide

4.4 Bodenstruktur und -einbau

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Festlegung des Bodenaufbaus für die Großversuche im IKT entgegengebracht. Hier brachten vor allem die Netzbetreiber aus dem Projektkonsortium ihre Erfahrungen aus geplanten, im Bau befindlichen und abgeschlossenen Bauvorhaben ein. Durch umfangreiche Recherchen auch anhand von Bodengutachten, die den Netzbetreibern zur Verfügung standen, konnten die folgenden Grundmuster herausgearbeitet werden:

- Die für den vorliegenden Anwendungsfall in Frage kommenden Rohrvortriebe durchfahren einen fließgefährdeten Boden (z.B. schluffiger Sand) und wechseln im Laufe der Trasse in einen Kies-Sand mit einer Körnung von 0 bis 63 mm und einem Überkorn mit ca. 100 mm Durchmesser in Form von schräg einfallenden Schichten. Dieser Kies-Sand befindet sich zumeist im oberen Bereich des Rohrquerschnitts.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

- Häufig sind unter dem Rohr bis hinauf zum Kämpfer feste Bodenschichten anzutreffen, welche teilweise eine Festigkeit von bis zu 5 N/mm^2 aufweisen.
- Nicht selten werden während eines Vortriebs Findlinge mit Durchmessern von bis zu 1 m geborgen.

In Anlehnung an diese typischen Bodenverhältnisse wurde ein Bodenprofil für den Großversuchsstand erarbeitet (s. Bild 25). Unter der Rohrsohle wurde eine 1 m dicke Deckschicht eingebracht, um Randeinflüsse aus dem vergleichsweise starren Versuchsstand auf den Rohrvortrieb zu minimieren. Darüber wurde eine sowohl axial als auch quer geneigte verfestigte Bodenschicht eingebaut. Diese bestand aus einem Boden-Zement-Gemisch. Auf der Basis von Vorversuchen wurde das Mischungsverhältnis derart eingestellt, dass zum Zeitpunkt des Vortriebs in etwa eine Festigkeit von 5 N/mm^2 zu erwarten war.
Auf diese verfestigte Schicht wurde ein fließfähiges Bodenmaterial eingebaut. Es handelte sich dabei um einen schluffigen Sand, welcher zum Erhalt seiner Fließeigenschaften feucht eingebaut werden musste. Zudem wurden zur Bewässerung dieser Schicht perforierte Schläuche in den Boden eingebaut, um ein Austrocknen zu verhindern.
Anschließend wurde ein Kies-Sand 0-63 mit einem Überkorn von 63 mm und schließlich ein Kies-Sand 0-8 als Deckschicht eingebracht.

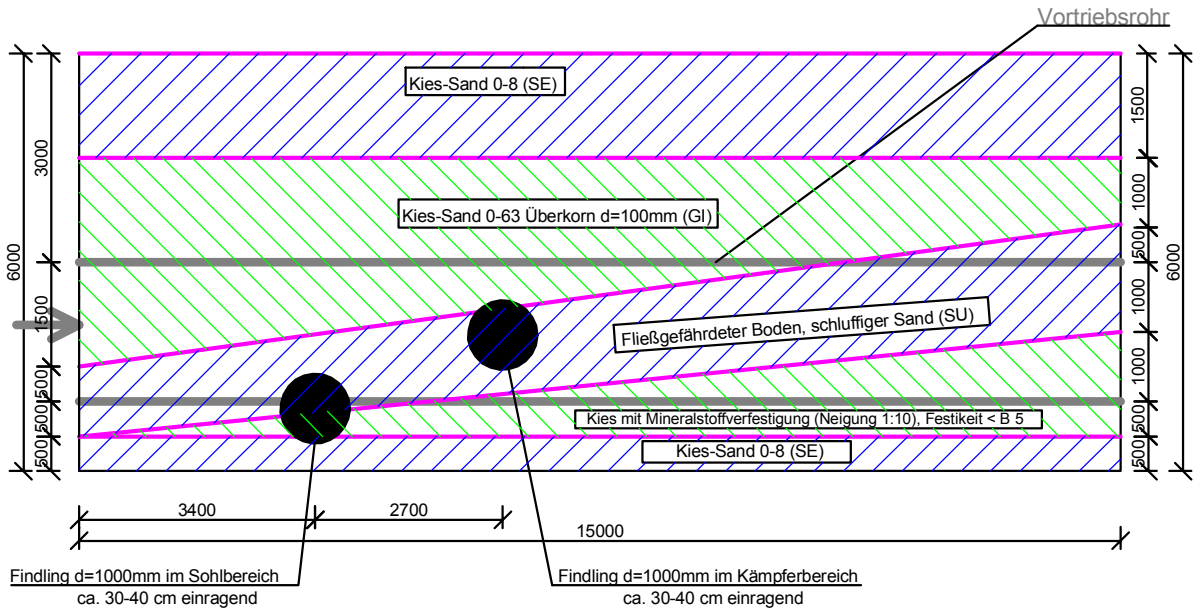


Bild 25 Bodenaufbau für den Rohrvortrieb im IKT

Dem Einbau wurde die ZTVE [14], sowie die Ergebnisse aus den Vorversuchen im IKT mit dem ausgewählten Versuchsboden zugrundegelegt. Der Verdichtungsgrad wurde zwischen 98 und 103 % der Proctordichte eingestellt. Dies geschah in Anleh-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

nung an die in situ vorliegenden Lagerungsdichten der für die Versuche ausgewählten Böden.

Der Boden wurde mit Hilfe eines Hydraulikgreifers eingebaut und mit einer Vibrationsplatte verdichtet. Die nachfolgenden Bilder dokumentieren diesen Vorgang.

a) Fixierungspunkte für die Messtechnik

b) Durchführung der Messkabel

Bild 26 Einbau der Messtechnik

a) Überblick Bodeneinbau

b) Verdichtung des Bodens

Bild 27 Bodeneinbau

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 28 Einbau der Sandsteinfindlinge

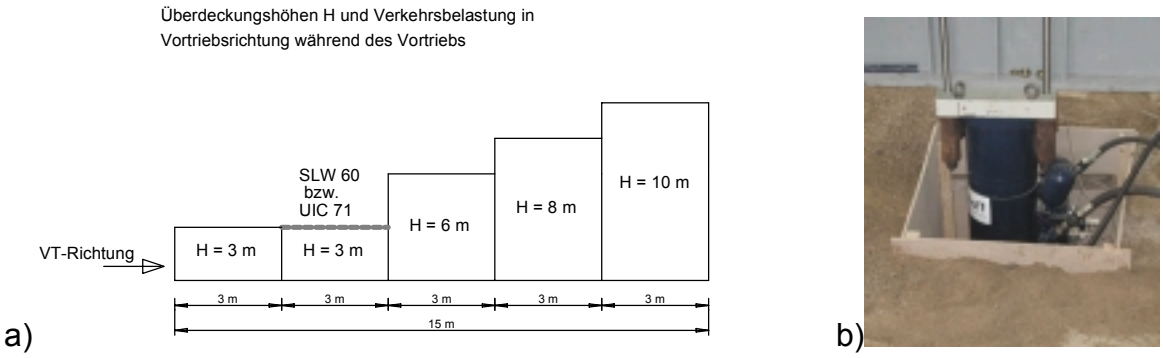
4.5 Statische und dynamische Belastungen

Die für die Versuche gewählte Überdeckungshöhe von H = 3 m entspricht dem in situ auftretenden Mittelwert bei entsprechenden Nennweiten aller Querschnittsformen [3]. Durch Aufbringen zusätzlicher Lasten in Teilbereichen an der Bodenoberkante konnte an diesen Stellen ein erhöhtes Primärspannungsniveau simuliert werden.

Die Überdeckungshöhen im Laufe des Vortriebs wurden nach Angaben der beteiligten Netzbetreiber gemäß Bild 29 festgelegt und über hydraulische Druckkissen simuliert, welche zwischen Bodenoberkante und Versuchsstanddeckel gelegt und mit einem entsprechenden Druck beaufschlagt wurden.

Um auch das Unterqueren von Verkehrswegen nachzubilden, wurden dynamische Verkehrslasten (UIC 71) über einen Druckzylinder (1000 kN) an der Bodenoberfläche simuliert (Bild 29). Der Druckzylinder wurde mit einer Spezialkonstruktion an den Rahmenriegeln des Großversuchsstandes fixiert. Die Kraft im Zylinder wurde auf die im Falle einer Überfahrt durch einen UIC 71 entstehenden Belastungen abgestimmt. So wurde die Belastungsfrequenz in Anlehnung an die zu erwartenden Durchschnittsgeschwindigkeiten und Achsabstände im Bereich von 5 Hz angesetzt.

©2002 All rights reserved by GEK mbH



a) Simulierte Tiefenlagen und Verkehrsbelastungen im Laufe des Vortriebs
b) Druckzylinder für dynamische Lasten

Bild 29 Statische und dynamische Belastungen

Ergänzend zu den vertikalen Belastungen wurde der Rohrstrang während und nach Abschluss des Vortriebs einer erhöhten axialen Belastung unterworfen. Bei Erreichen des Versuchsstandsendes bietet die für derartige Belastungen ausgelegte hintere Stirnwand des Versuchsstandes die Möglichkeit einer Erhöhung der Vortriebskraft über die zur Überwindung von Brust-, Schneidenwiderstand und Mantelreibung erforderliche axiale Vortriebskraft hinaus. Der gekrümmte, unter axialer Druckbeanspruchung stehende Rohrstrang wurde in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Rohr-Boden-Interaktion und hier insbesondere der Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Rohrverbindung und die Spannungsverteilung neben der gekrümmten Rohrachse untersucht.

4.6 Messtechnik

Es wurde eine umfassende Messwerterfassung zur Quantifizierung der maßgebenden Einflussfaktoren eingesetzt. Diese wird nachfolgend beschrieben.

4.6.1 Vortriebsrohr

Im Vortriebsrohr wurden zahlreiche Messwertaufnehmer für unterschiedliche Messaufgaben installiert (Bild 30). Im einzelnen sind dies:

I. 2 Seilwegaufnehmer zur Bestimmung des Vortriebsfortschritts
II. Je Rohrverbindung 4 Wegaufnehmer zur Messung der Fugenspaltweiten
III. Je Rohrverbindung 3 Wegaufnehmer zur Messung der Verrollung
IV. 1 Drucksensor zur Erfassung des Injektionsdruckes der Bentonit-Schmierung in Rohr 6
V. 2 Druckgeber zur Messung des Reaktionsdruckes auf die Bentonit-Schmierung an der Außenseite des Rohrs 6
VI. Foliendrucksensoren zur Bestimmung der Verteilung der Vortriebskraft zwischen Rohr 4 und Rohr 5
VII. Zieltafel für den Laser

©2002 All rights reserved by GEK mbH

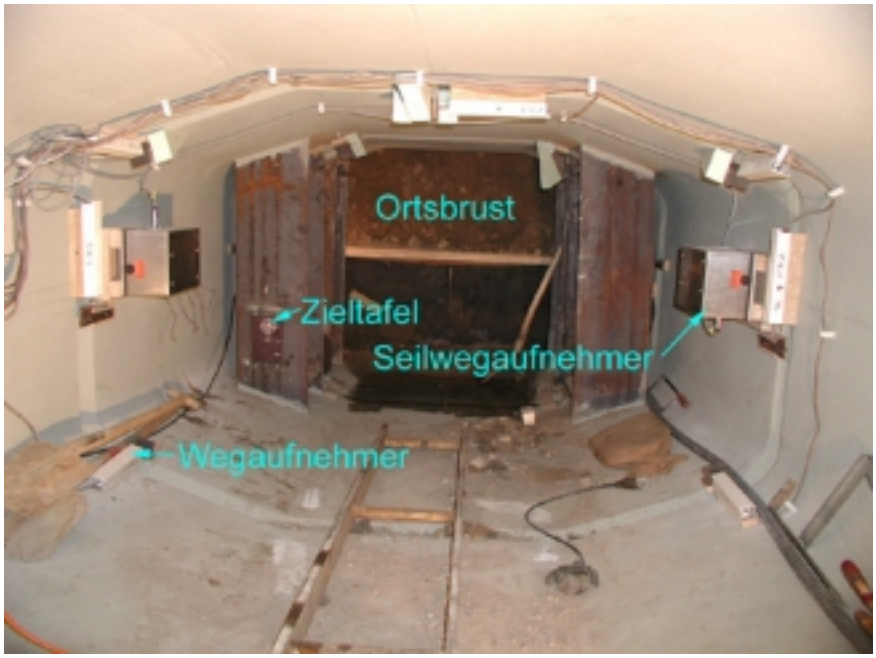


Bild 30 Blick in den Rohrstrang mit installierter Messtechnik

4.6.2 Versuchsboden

Es wurden Messquerschnitte bei den Vortriebslängen 1,5 m, 4,5 m, 7,5 m, 10,5 m und 13,5 m angeordnet. In jedem Messquerschnitt kamen folgende Sensoren zum Einsatz:

I. 5-fach Inklinometer zur Erfassung der horizontalen Bodenverschiebungen (Gesamtlänge: 4,0 m).

II. 5-fach Extensiometer zur Erfassung der vertikalen Bodenverschiebungen in Höhen von 1,5m, 2,5m, 3,5m, 4,5m und 5,5m.

III. 6 Erddruckgeber zur Messung der vertikalen und horizontalen Bodenspannungen (1 Erddruckgeber über dem Rohr, 1 Erddruckgeber unter dem Rohr, je 2 Erddruckgeber horizontal/vertikal neben dem Kämpfer rechts bzw. links).

Bild 31 zeigt die Anordnung der Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber im Messquerschnitt.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

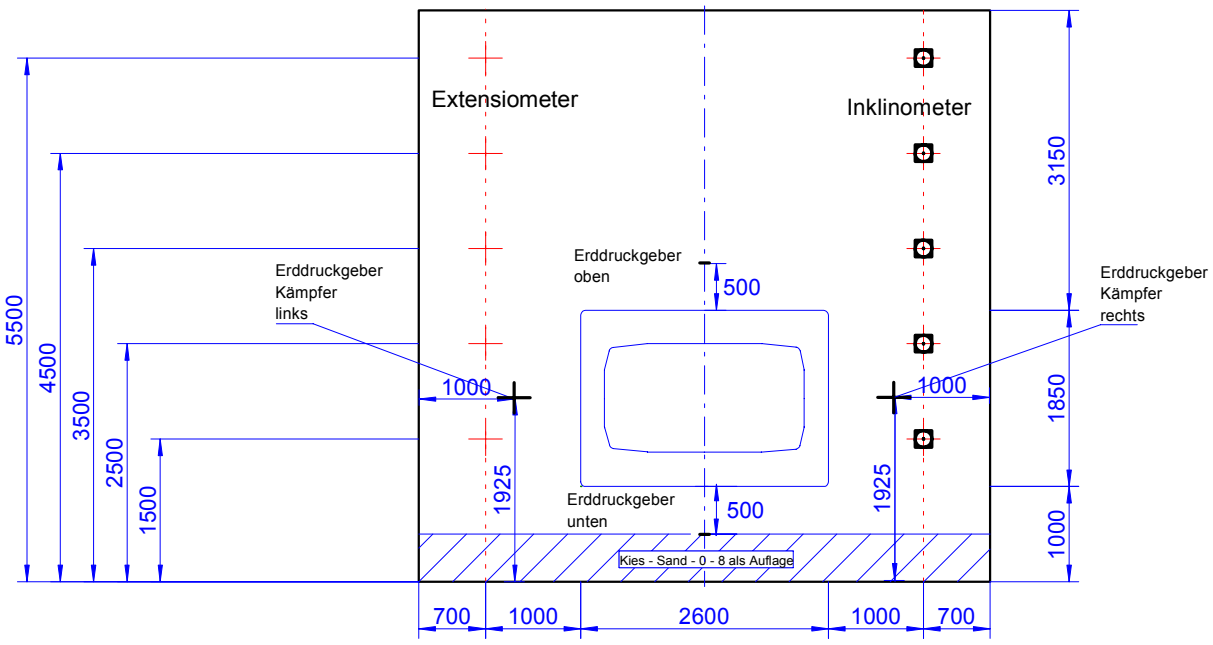


Bild 31 Messtechnik im Versuchsboden

4.6.3 Ergänzende Messtechnik

Außerdem wurden ergänzend folgende Messwerte aufgenommen :

I. Kraft und Weg der 4 Steuerzylinder

II. Kraft und Weg der 4 Hauptzylinder

III. Kraft und Weg des Belastungszylinders zur Erfassung der simulierten, dynamischen Verkehrslast

IV. Druck in den hydraulischen Druckkissen zur Erfassung der simulierten Tiefenlage (3 Drucksensoren)

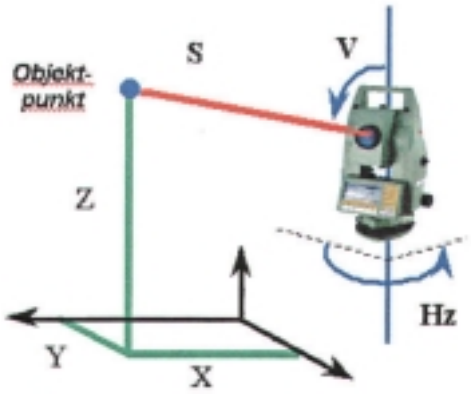
V. Messung des Wasserüberdrucks (1 Drucksensor)

4.6.4 Rohrvermessung

Mit Hilfe des 3D-Messsystems TOTAL [15] wurde die Rohrstranglage in einem Zwischenzustand, nach Vortriebsende und nach Bodenausbau aufgenommen. Die Vermessung wurde nach dem geodätischen Verfahren der Polaraufnahme bei freier Stationierung durchgeführt. Als Instrumentarium diente ein Tachymeter TCRM 1102 der Firma Leica. Tachymeter sind Vermessungsinstrumente, mit denen gleichzeitig Horizontalrichtungen (Hz), Vertikalwinkel (V) und elektrooptische Strecken (S) gemessen werden können. Mit Hilfe dieser 3 polaren Messelemente werden dann die Raumkoordinaten X, Y und Z eines angemessenen Punktes berechnet (s. Bild 32).

©2002 All rights reserved by GEK mbH

a) Stationierung in der Startbaugrube



b) Leica-TCRM, Polarelemente, 3D-Koordinaten

Bild 32 Tachymetervermessung

Das hier eingesetzte Gerät bietet die Möglichkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung. Die Steuerung des Vermessungsgerätes sowie die vermessungstechnischen Berechnungen erfolgten mit der in der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Software TOTAL (**T**achymetrische, **O**bjektorientierte, **T**eil**A**utomatisierte **L**aservermessung) [16].

Bei der freien Stationierung wird durch Messung zu koordinierten Festpunkten die Position und Orientierung eines Vermessungsgerätes innerhalb eines Koordinatensystems bestimmt [17].

Zur Vorbereitung der Messung wurde im Bereich der Startbaugrube ein Festpunktfeld angelegt, vermessen und so orientiert, dass eine der Koordinatenachsen in Richtung des Vortriebs zeigt. Höhenmäßig wurde das Koordinatensystem so gewählt, dass der vordere Scheitelpunkt des ersten Vortriebsrohres bei der ersten Messung die Höhe Null hatte (s. Bild 33).

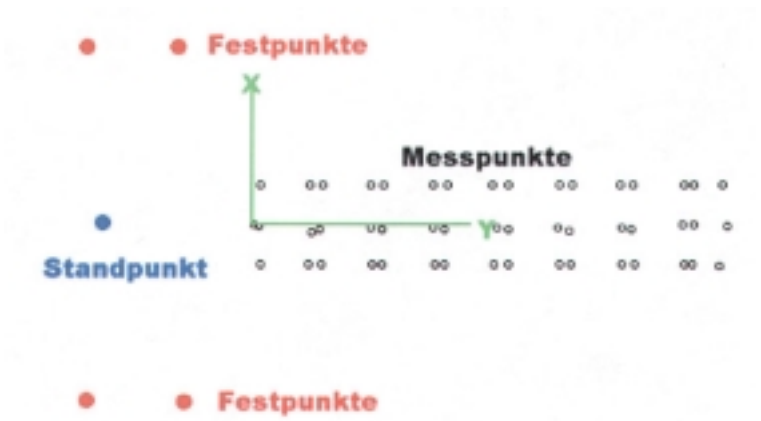
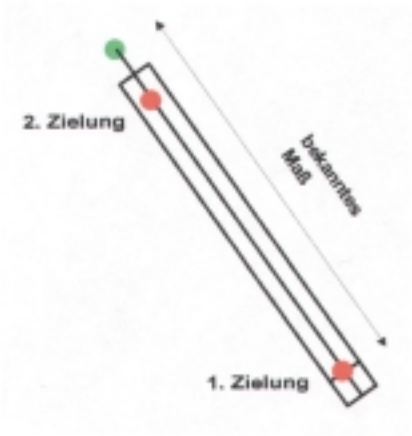


Bild 33 Grundriss der Aufnahmesituation mit Koordinatensystem

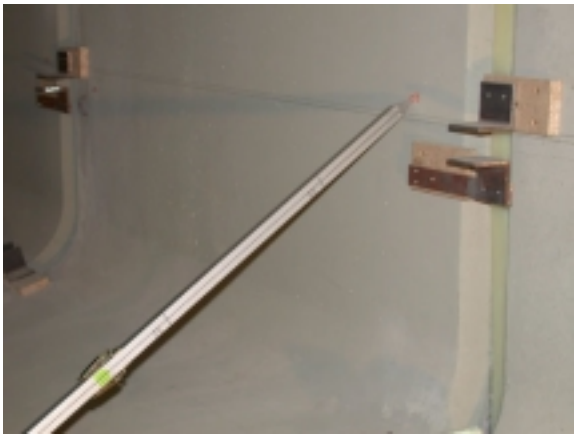
Aufgrund des sehr flach auftreffenden Messstrahls auf die Rohrinnenfläche und wegen Sichtbehinderungen durch weitere Versuchsaufbauten war es nicht möglich, die

©2002 All rights reserved by GEK mbH

markierten Punkte direkt anzumessen. Daher erfolgte die Vermessung mit Hilfe eines Extrapolationsstabes. Dessen Funktionsweise beruht darauf, dass durch die Messung zu zwei bekannten Punkten eines Stabes ein dritter Punkt, der vom Vermessungsgerät aus nicht direkt anzielbar ist, berechnet werden kann (s. Bild 34).
Bei allen Messungen wurden die Zielpunkte doppelt angemessen. Die Genauigkeit der Messungen lag bei etwa ± 0,5 mm.



a) Prinzipskizze



b) Einsatz im Rohr

Bild 34 Extrapolationsstab

Begleitend zum Rohrvortrieb wurden nach jedem vorgetriebenen Rohr Nivellement- und einfache Tachymetermessungen durchgeführt (s. Bild 35). Diese Messungen wiesen eine geringere Genauigkeit auf und wurden daher nur zur Orientierung herangezogen. Als Bezugspunkte für diese Messungen wurden 4 Bohrungen im Scheitel jedes Rohres angebracht. Die dienten einerseits zur Orientierung bei den Nivelliermessungen und andererseits als Befestigungspunkte für die bei den einfachen Tachymetermessungen erforderlichen Reflektoren.

Bild 35 Eingesetztes Tachymeter und Nivelliergerät

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4.7 Ablauf des Rohrvortriebs

Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits erwähnt, wurden im Verlauf des Vortriebs unterschiedliche Druckübertragungsmittel und Schutzsysteme gegen eindringendes Bodenmaterial eingesetzt (s. Tabelle 1).
Tabelle 2 gibt einen Überblick über den chronologischen Ablauf des Vortriebs.

Tabelle 1 Druckübertragungsmittel und Schutz gegen eindringenden Boden

Rohrverbindung	**Messtechnik**	**Druckübertragungsmittel**	**Schutz gegen eindringenden Boden**
1-2	W	Übergang Schneide ⇒ Rohr	PE-Ring
2-3	WA	Spanplatte V100, d=28mm	Ohne Schutz
3-4	WA	Sandwich, d=30mm (PU = 10mm)	Stahlring
4-5	WA	Sandwich, d=30mm (PU = 10mm)	Stahlring
5-6	WA	Sandwich, d=30mm (PU = 10mm)	Stahlring
6-7	WA	Polyurethan, d=30mm	Stahlring
7-8	W	Polyurethan, d=30mm	PE-Ring
8-9	W	Polyurethan, d=30mm	PE-Ring
9-10	W	Spanplatte V100, d=28mm	Ohne Schutz

W = Messung mit Winkeln und Schieblehre
WA = Messung mit Wegaufnehmern

Tabelle 2 Chronologischer Ablauf des Vortriebsversuchs

Nr.	Versuchsphase	Beschreibung	Messprogramm
1	Versuchsvorbereitung: Bauzustand	➢ Installation des 1. Rohres ➢ Aufbringen und Halten der statischen Auflasten ➢ Starten der Messwerterfassung	Messfrequenz: 1/min ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
2	Vortrieb der Rohre 1-3 (L=4,5m)	➢ Gerader Vortrieb der Rohre ➢ Nach jedem Rohr Bestimmung der Position des Rohrstranges	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
3	Dynamische Belastung (T=30min)	➢ Simulation der Belastung eines UIC 71 an der Geländeoberkante	Messfrequenz: 60/min (Maximalwert) ➢ Belastungszylinder ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4	Einleiten Raumkurve	➢ Ausfahren der Steuerzylinder zum Einleiten einer Raumkurve ➢ Messung der Reaktionskräfte der Hauptzylinder	Messfrequenz: 60/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
5	Simulation einer längeren Vortriebsstrecke	➢ Der Rohrstrang wird 5 mal mit maximal möglicher Last vorgepresst (Kurzzeit)	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Foliendruckaufnehmer
6	Vortrieb der Rohre 4-6 (L=9,0m)	➢ Unterstützung der Kurvenfahrt durch entsprechendes Steuern der Hauptzylinder ➢ Nach jedem Rohr Bestimmung der Position des Rohrstranges	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
7	Dynamische Belastung (T=30min)	➢ Simulation der Belastung eines UIC 71 an der Geländeoberkante	Messfrequenz: 60/min (Maximalwert) ➢ Belastungszylinder ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
8	Maßnahmen zur Richtungskorrektur	➢ Einleiten der Korrektur der Raumkurve (Rückkehr in Solllage) durch Ausfahren der Steuerzylinder	Messfrequenz: 60/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V ➢ Foliendruckaufnehmer
9	Vortrieb der Rohre 7-8 (L=12,0m)	➢ Unterstützung der Korrektur durch entsprechendes Steuern der Hauptzylinder und durch andere Korrekturmaßnahmen ➢ Nach jedem Rohr Bestimmung der Position des Rohrstranges	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Foliendruckaufnehmer
10	Dynamische Belastung (T=30min)	➢ Simulation der Belastung eines UIC 71 an der Geländeoberkante	Messfrequenz: 60/min (Maximalwert) ➢ Belastungszylinder ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V

©2002 All rights reserved by GEK mbH

11	Vortrieb der Rohre 9-10 (L=15,0m)	➢ Unterstützung der Korrektur durch entsprechendes Steuern der Hauptzylinder und durch andere Korrekturmaßnahmen ➢ Bentonitschmierung durch die Injektionsöffnungen in Rohr 6 ➢ Nach jedem Rohr Bestimmung der Position des Rohrstranges	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Reaktionsdruck und Drucksensor Bentonitschmierung ➢ Foliendruckaufnehmer
12	Dynamische Belastung (T=60min)	➢ Simulation der Belastung eines UIC 71 an der Geländeoberkante	Messfrequenz: 60/min (Maximalwert) ➢ Belastungszylinder ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V
13	Simulation einer längeren Vortriebsstrecke	➢ Der Rohrstrang wird 10 mal mit maximal möglicher Last gegen die Rückwand des Großversuchsstandes gepresst	Messfrequenz: 1/min ➢ Steuer- und Hauptzylinder ➢ Kissendruck ➢ Seilwegaufnehmer ➢ Wegaufnehmer in Rohrverbindung ➢ Foliendruckaufnehmer
14	Versuchsvorbereitung: Betriebszustand	➢ Abdichten des Schildes gegen die Rückwand des Großversuchsstandes ➢ Abdichtung der Einfahröffnung (wenn erforderlich ➢ Demontage der Einleitungskonstruktion für dynamische Lasten ➢ Montage der Versuchsstanddeckel	
15	Grundwasserstand	➢ Fluten des Großversuchsstandes ➢ Aufbringen des Überdruckes von 0,8 bar ➢ Halten des Druckes für 60 min ➢ Ablassen des Wassers	Messfrequenz: 1/min ➢ Kissendruck ➢ Wasserüberdruck ➢ Inklinometer, Extensiometer und Erddruckgeber MQ I bis MQ V ➢ Optische Dichtheitsprüfung
16	Muffenprüfungen	➢ Demontage der Messwerterfassung im Rohrverbindungsbereich ➢ Durchführen von Muffen-Innendruckprüfungen mit Wasser, Luft und Vakuum	
17	Versuchsausbau	➢ Ausbau des Versuchs unter besonderer Inaugenscheinnahme der Rohrverbindungsbereiche	

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4.8 Rohrvortrieb

Bild 24 zeigt einen Blick in die Startbaugrube mit Vortriebseinrichtung, erstem Rohr mit Schneidschuh und seitlicher Führung der Vortriebsrohre im Anfahrzustand.
Für das Anfahren war die Einfahröffnung mit Spundbohlen verschlossen worden. Diese mussten während des Anfahrvorganges gezogen werden (Bild 36).

a) Ziehen der Dielen

b) Eindringender Boden

Bild 36 Ziehen der Dielen

Probleme durch nachrutschendes Bodenmaterial konnten aufgrund des Versuchsaufbaus durch ein Nachverfüllen von oben bewältigt werden.
Anschließend erfolgte der Vortrieb nach den Vorgaben aus Abschnitt 4.7.
Bild 37 zeigt die Vortriebsarbeiten mit dem für den Bodenabtransport eingesetzten Förderkübel und die zentrale Steuereinheit für die Hauptpressen.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

a) Vortrieb mit Förderkübel zum Bodenabtransport

b) Steuereinheit der Hauptpressen

Bild 37 Vortrieb und Steuereinheit der Hauptpressen

Bild 38 gibt einen Eindruck von den Verhältnissen an der Ortsbrust nach Einbau von 6 Rohren. Zu erkennen ist die Querbühne, welche ein Nachrutschen der anstehenden Bodenmassen vermindert (Bild 38 b).

a) Arbeiten im Rohrstrang

b) Querbühne mit Aussteifung

Bild 38 Blick auf die Ortsbrust

Bild 39 zeigt die Platzverhältnisse im Rohrstrang mit verlegten Kabelsträngen für die Messtechnik.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 39 Kabelstränge für die Messwerterfassung

Bild 40 Folienmessung beim Überpressen nach Beendigung des Vortriebs

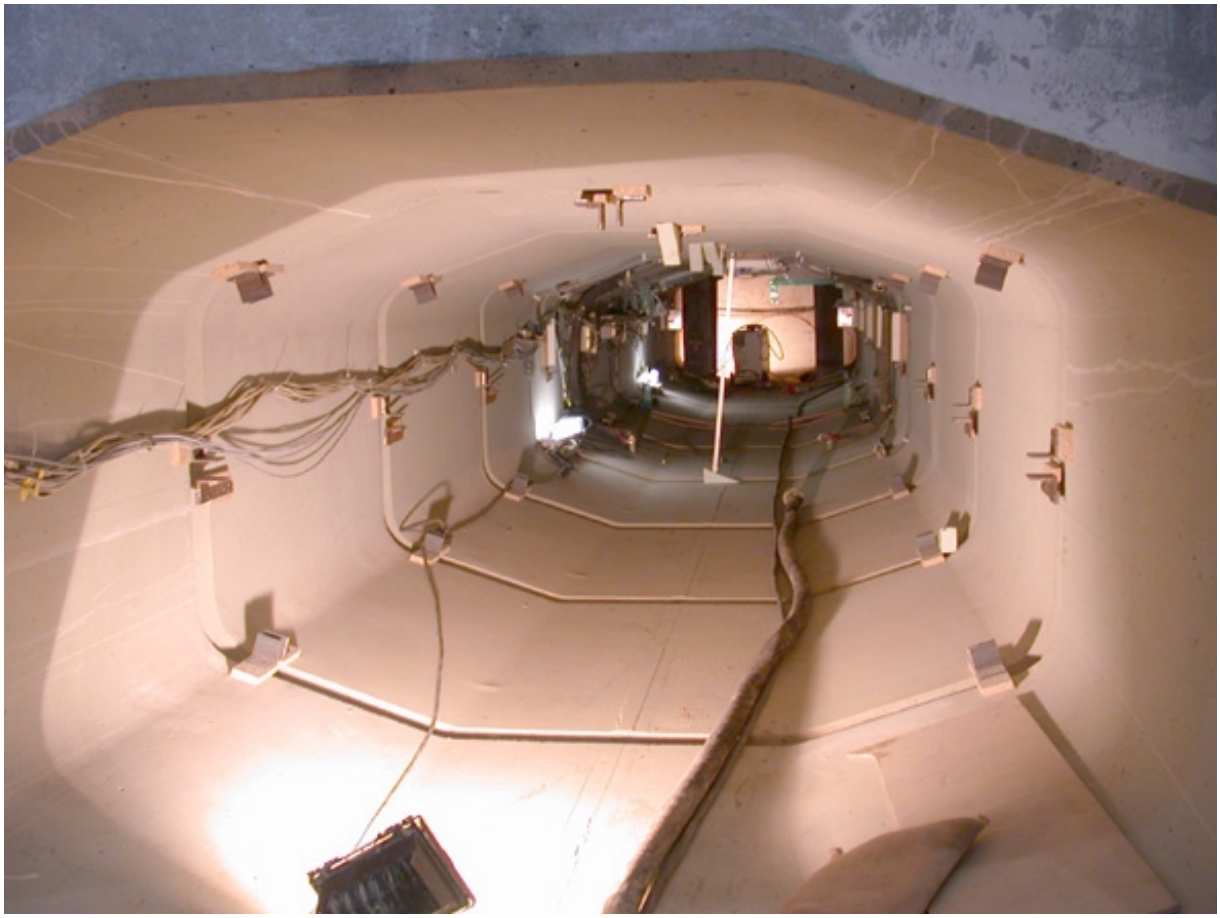


Bild 41 Blick in den Rohrstrang nach Abschluss des Rohrvortriebs

©2002 All rights reserved by GEK mbH

4.9 Freilegen des Rohrstranges

Nach Abschluss des Vortriebs und Beendigung der Prüfungen des Betriebszustandes wurde der Rohrstrang zur optischen Begutachtung insbesondere der Rohrverbindungen freigelegt (s. Bild 42).

a) Draufsicht Rohrstrang

b) Neben dem Rohrstrang

Bild 42 Freigelegter Rohrstrang

©2002 All rights reserved by GEK mbH

5 Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Der beschrittene Weg der Entwicklung einer vollständig neuartigen Rohrkonstruktion für den gesteuerten Vortrieb von Rechteckquerschnitten hat sich als erfolgreich erwiesen. Im hiermit abgeschlossenen Teil II des Forschungsvorhabens wurde der entwickelte Rohrprototyp in einem Großversuch im Maßstab 1:1 unter Praxisbedingungen eingesetzt. Dabei wurden die Interaktion des Rohrprototypen mit dem Baugrund sowie die sich hieraus ergebenden Beanspruchungen, wie beispielsweise Verrollungen (Verdrehungen um die Rohrlängsachse) und das Eindringen von Bodenmaterial in den Rohrverbindungsbereich, der Realität entsprechend nachgebildet. Mithilfe umfangreicher Messtechnik (z.B. Extensiometer, Inklinometer, Wegaufnehmer, Drucksensoren) wurden die vielfältigen Beanspruchungen im Großversuch kontinuierlich verfolgt und dokumentiert. Im folgenden werden die sowohl während der Vorbereitung als auch Durchführung der Versuche abgeleiteten Erkenntnisse und Verbesserungspotentiale dargestellt.

5.2 Rohrproduktion

Aufgrund der Querschnittsform und der komplexen Bewehrungsführung wurden die Rohre in stehender Schalung hergestellt. Die Verdichtung des eingebrachten Betons wurde mit Rüttelflaschen realisiert und das Rohr erhärtete in der Schalung. Zukünftig sollte allerdings aufgrund des hohen Bewehrungsgrades auf eine Verdichtung mit Außenrüttlern zurückgegriffen werden.

Da sich der nachträgliche Einbau der Steckdichtungen als umständlich und fehleranfällig erwies, sollte die Dichtung bereits im Werk eingebaut werden. Dazu könnte die Dichtung zunächst auf einen speziell zugeschnittenen Halterahmen aufgezogen, anschließend die fertig produzierten Rohre hierauf aufgesetzt und die Dichtungen schließlich durch das Eigengewicht der Rohre vollständig einpresst werden.

Die an der Rohrinnenseite angebrachte Fasung von 30 mm Kantenlänge kann auch zur Berücksichtigung der produktionstechnischen Randbedingungen auf 15 mm reduziert werden, um die Fließeigenschaften des transportierten Mediums zu berücksichtigen.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

5.3 Verrollung und Abwinkelung in der Rohrverbindung

Im folgenden werden die Messergebnisse bezüglich der Verrollungen und Abwinkelungen in der Rohrverbindung dargestellt und analysiert.

Verrollung:

Bei Verrollungen handelt es sich um Rotationen um die Vortriebsachse. Diese sind bei Kreisquerschnitten in der Regel unbedenklich, da hierdurch die Funktionsfähigkeit des Rohrstrangs nicht beeinträchtigt wird. Bei Querschnitten mit einer festgelegten Orientierung, z.B. bei integrierter Trockenwetterrinne oder Rechteckquerschnitten, ist demgegenüber der verrollungsarme Vortrieb als Voraussetzung für die spätere Funktionsfähigkeit der Leitung anzusehen. Im Vortriebsversuch wurden daher in jeweils einer Rohrverbindung drei Wegaufnehmer in Umfangsrichtung montiert und so das Maß der tatsächlich auftretenden relativen Rotation erfasst (vgl. Bild 43).

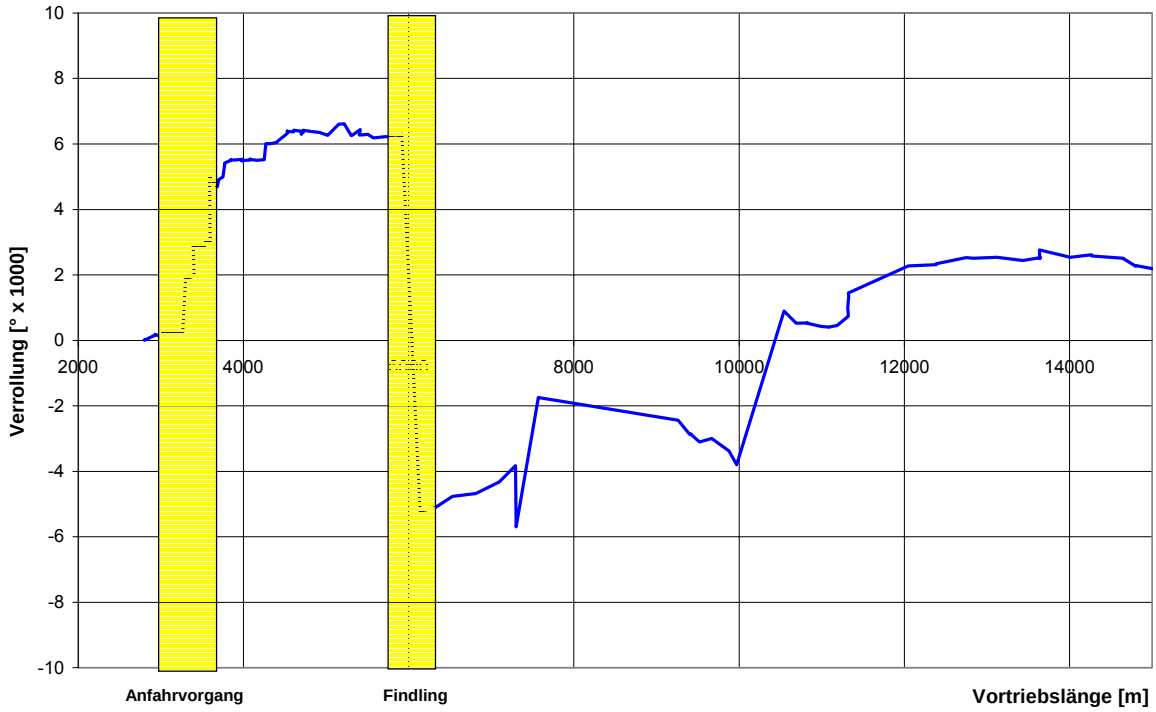


Bild 43 Verrollungen an der Rohrverbindung 2-3

Grundsätzlich bewegen sich die beobachteten Verrollungen oszillierend um den Nullpunkt. Deutlich ist zu erkennen, dass die maximale Verrollung mit 0,006 ° in der Rohrverbindung 2-3 kurz nach dem Anfahrvorgang auftrat und das Passieren des ersten Findlings einen deutlichen Einfluss auf das Verrollungsverhalten der Rohre hatte. Offensichtlich provozierte die punktuelle Steifigkeitserhöhung des Bodens im Bereich dieses Festkörpers ein entsprechendes Drehmoment. Ein Ausgleich konnte durch verstärkten Bodenabbau im Bereich des Findlings erzielt werden, so dass die

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Verrollung im weiteren Verlauf wieder kompensiert werden konnte. Die nachfolgenden Rohrschüsse zeigten anschließend bei Vorbeifahrt an der entsprechenden Abbaustelle ein geringere Verrollungsanfälligkeit, die schließlich in der Verbindung 6-7 nahezu vollständig abgeklungen war (vgl. Bild 44). In der Praxis setzt ein solches Vorgehen allerdings auch die kontinuierliche Beobachtung des Verrollungsverhaltens durch entsprechende Messtechnik voraus.

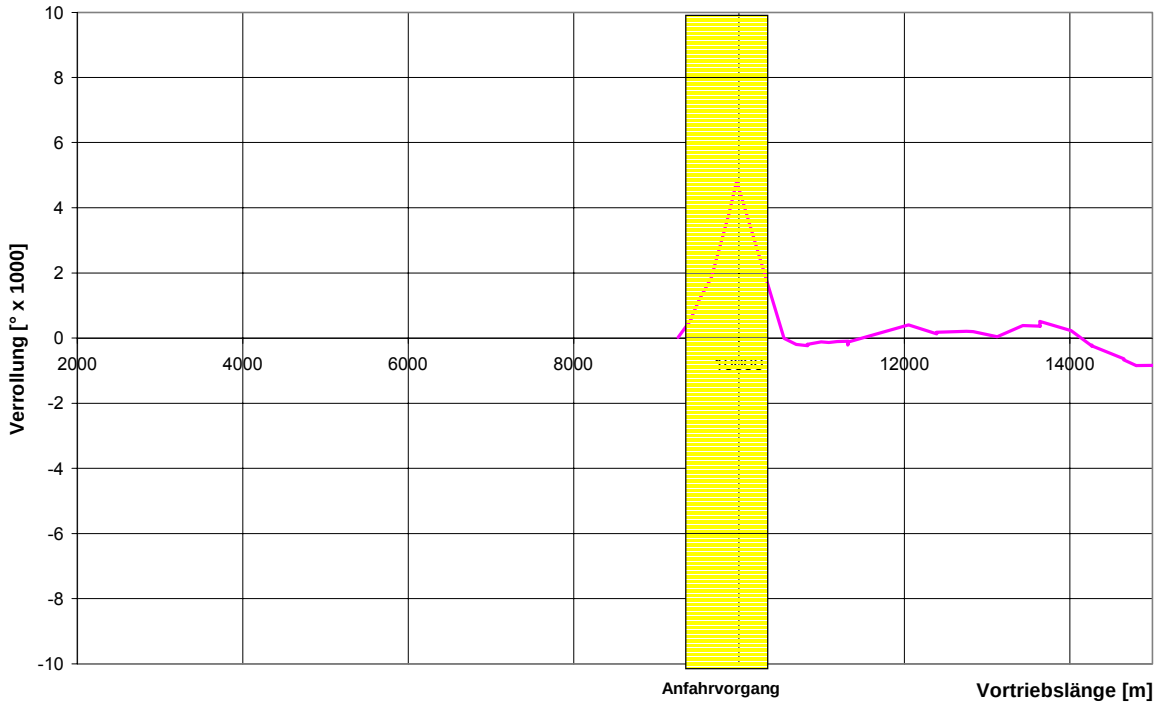


Bild 44 Verrollungen an der Rohrverbindung 6-7

<u>Abwinkelung:</u>

Zur Messung der Abwinkelung in den Rohrverbindungen wurden an insgesamt 5 Rohrverbindungen je 4 Wegaufnehmer in Vortriebsrichtung installiert. Die Messwerte wurden kontinuierlich während des gesamten Vortriebs erfasst. Exemplarisch zeigt Bild 45 die auf die äußeren Ecken der Rohre bezogenen Messdaten der Wegaufnehmer für die Rohrverbindung 4-5. Deutlich ist die Zunahme der Verschiebungen nach dem Einleiten von Steuerbewegungen an der Ortsbrust zu erkennen. Die Maximale Kompression des Druckübertragungsmittels betrug bei dieser Rohrverbindung 10 mm.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

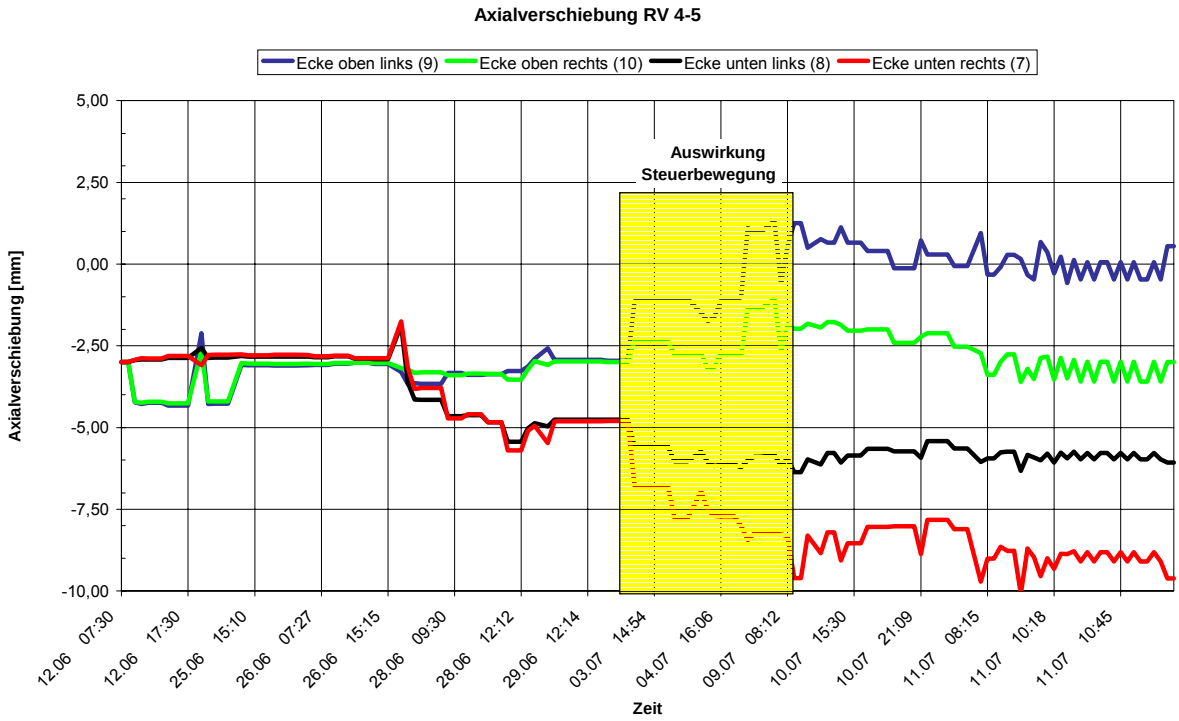


Bild 45 Axialverschiebungen der Rohrverbindung 4-5 im Verlauf des Vortriebs

Aus allen erfassten Messdaten wurden die maximal auftretenden Abwinkelungen in vertikaler und horizontaler Richtung bezogen auf den Anfahrzustand berechnet (vgl. Tabelle 3). Die nach ATV A 125 [10] im vorliegenden Anwendungsfall anzusetzende Abwinkelung liegt zwischen 0,286° (5 mm/m) und maximal 0,86° (max. 50% Kompression des Druckübertragungsmittels).

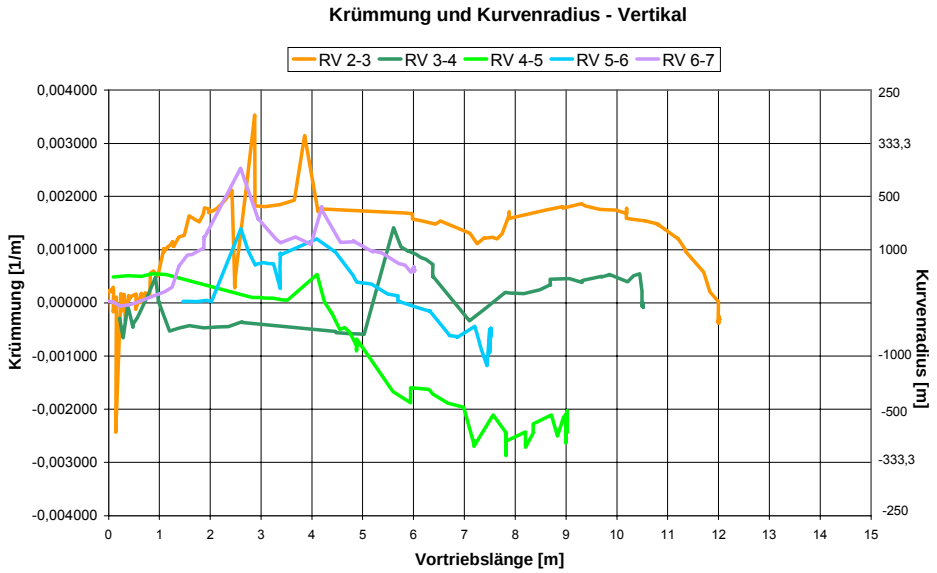
Tabelle 3 Vertikale und horizontale Abwinkelungen

	RV 2-3	RV 3-4	RV 4-5	RV 5-6	RV 6-7
Horizontale Abwinkelung [°]	0,16	0,12	0,23	0,07	0,06
Vertikale Abwinkelung [°]	0,25	0,14	0,1	0,12	0,22

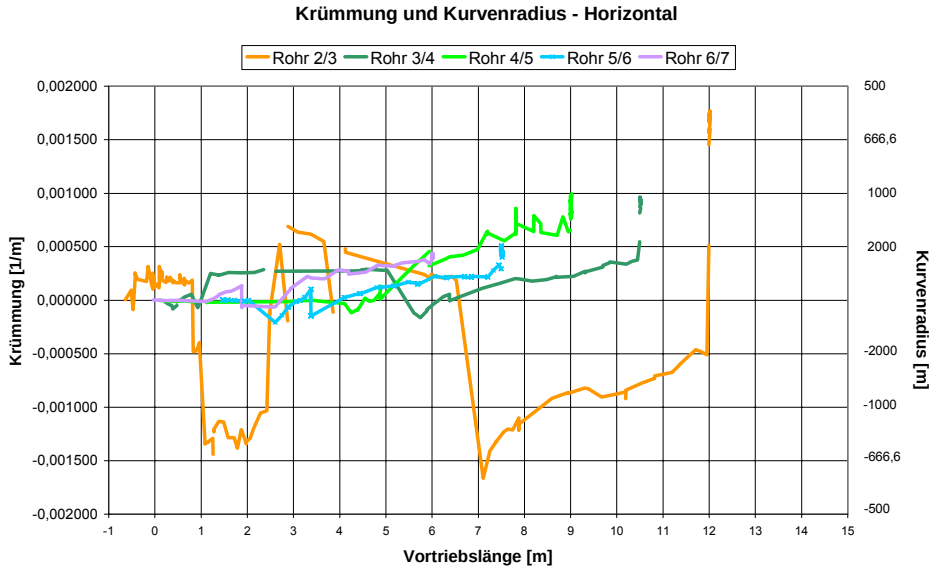
Schließlich wurden auf Basis der kontinuierlich erfassten Messdaten die zugehörigen Krümmungen bzw. Krümmungsradien berechnet. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Bild 46 dargestellt und verdeutlichen die Bandbreite der aufgefahrenen Krümmungsradien. So wurden in einzelnen Rohrverbindungen Radien von stellenweise unter 400 m in vertikaler Richtung aufgefahren. In horizontaler Richtung betrug der Minimalradius immerhin noch knapp 600 m. Nach Angaben der Projektbeteiligten handelt es sich dabei durchaus um Dimensionen eines realen Vortriebs. Die Abwinkelbarkeit in den Rohrverbindungen konnte somit als ausreichend bezeichnet werden, so dass zunächst keine Maßnahmen zur weiteren Verbesserungen der Abwinkelbarkeit er-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

forderlich scheinen. Zur weiteren Verringerung der Radien bietet sich nach den Erfahrungen aus dem Vortriebsversuch z.B. die Verwendung von vorauseilend eingetriebenen Führungsblechen an der Ortsbrust zur Stabilisierung der Steuerbewegungen an. Für den Einsatz bei einer Pilotmaßnahme ist auch die Verwendung eines Haubenschildes mit einem Nachläufer aus Stahl zu empfehlen. Hierdurch würde auch das Platzangebot an der Ortsbrust vergrößert und die Gefahr eines Bodeneinbruches verringert. Zudem können die Steuerpressen näher an der Rohraußenseite angebracht werden, um so die erforderlichen Steuerkräfte zu reduzieren.



a) Vertikalrichtung (Höhe)



b) Horizontalrichtung (Seite)

Bild 46 Berechnete Krümmungen und Kurvenradien

©2002 All rights reserved by GEK mbH

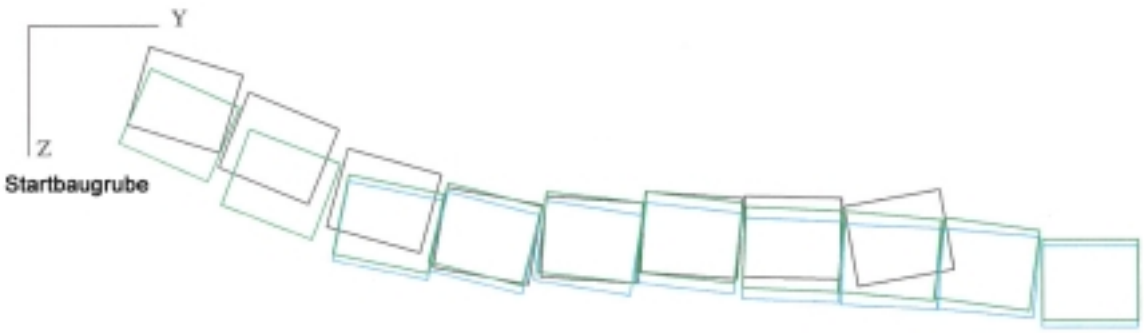
5.4 Steuerbarkeit des Rohrstranges

Während des Vortriebs wurden gezielt Steuerbewegungen zwischen den ersten beiden Vortriebsrohren eingeleitet, um Aussagen zur Steuerbarkeit rechteckiger Querschnitte gewinnen zu können. Der Vortrieb startete bereits mit einer geringfügigen Schrägstellung der ersten Rohre. Nach dem Vortrieb von zunächst 3 und dann insgesamt 7 Rohren wurden Steuerbewegungen eingeleitet, um den Rohrstrang in die Solllage zurückzuführen. Im ersten Fall wurde die Vertikalrichtung und im zweiten Fall die Horizontalrichtung korrigiert.

Auf eine Unterstützung der Steuerung durch Einsatz der Hauptpressen (halbseitiges Pressen) wurde verzichtet, da im Praxiseinsatz mit zunehmendem Abstand der Hauptpressstation von der Ortbrust die Wirkung einer derartigen Maßnahme erheblich nachlässt.

Mit dem Messsystem TOTAL wurde die Lage des Rohrstrangs aufgenommen, dokumentiert und die entsprechenden Lageänderungen abgeleitet (s. Bild 47).

Darstellung der Höhenänderungen im Aufriss (Seitenansicht)



Höhenänderungen in mm

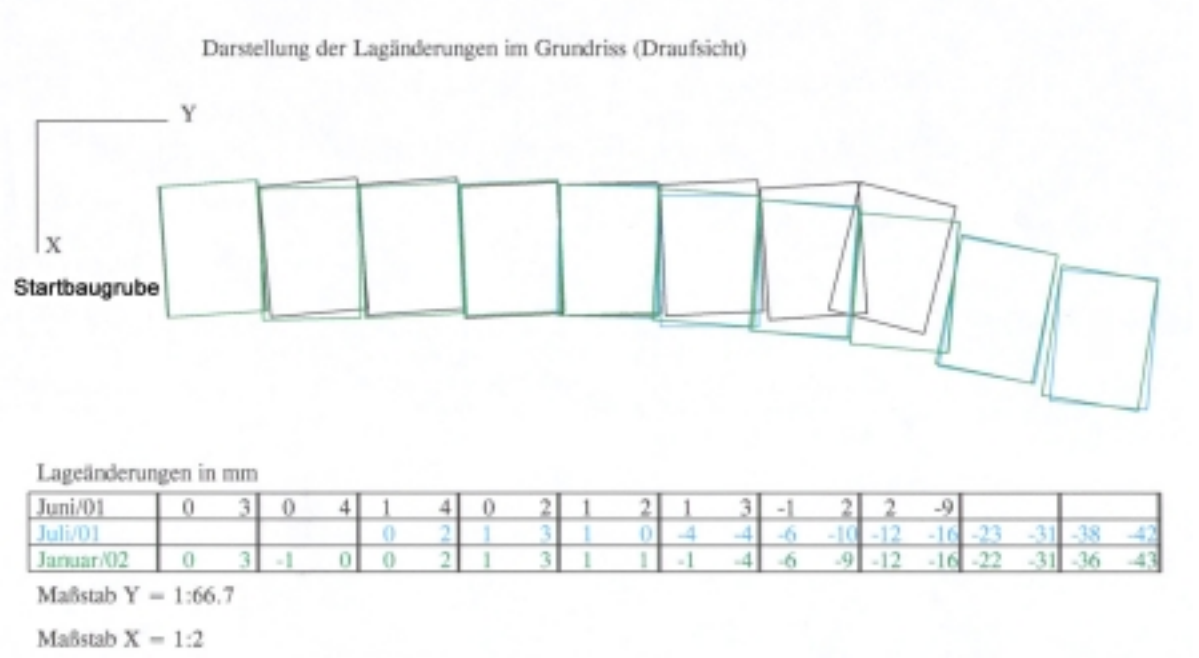
Juni/01	0	-13	-21	-38	-47	-59	-65	-73	-69	-72	-67	-70	-69	-70	-74	-66				
Juli/01					-62	-71	-67	-78	-71	-78	-72	-77	-79	-81	-82	-84	-84	-88	-92	-92
Januar/02	-10	-28	-38	-54	-59	-68	-63	-74	-67	-72	-67	-72	-74	-76	-76	-80	-79	-85	-89	-89

Maßstab Y = 1:66.7

Maßstab Z = 1:2

a) Lage des Rohrstrangs, Ansicht

©2002 All rights reserved by GEK mbH



b) Lage des Rohrstrangs, Draufsicht

Bild 47 Vermessung des Rohrstrangs mit TOTAL [18]

Die Aufnahme des Rohrstrangs wurde vortriebsbegleitend durch Tachymetervermessungen ergänzt. Sowohl diese Messungen als auch die Aufnahmen mit dem System TOTAL bestätigten die Messwerte der Wegaufnehmer in den Rohrverbindungen und damit die Berechnung der aufgefahrenen Radien (vgl. Abschnitt 5.3).

5.5 Auswirkung äußerer Belastungen

In den Versuchen wurden unterschiedliche äußere Belastungen und Hindernisse aufgebracht, um deren Auswirkung auf den Rohrstrang und den umgebenden Boden während und nach dem Vortrieb zu erfassen. Im einzelnen waren dies:

- *Dynamische Belastungen* an der Geländeoberkante zur Simulation der Überfahrt eines UIC 71 während des Vortriebs
- *Hindernisse (Findlinge)* in der Leitungstrasse
- *Unterschiedliche Überdeckungshöhen* von bis zu 10 m während des Vortriebs
- *Ansteigender Außenwasserdruck (Grundwasser)* bis auf ein Niveau von 13 m über dem Rohrscheitel nach Abschluss des Vortriebs

<u>Dynamische Belastungen:</u>

Im Zuge der dynamischen Belastungen an der Geländeoberfläche wurde insbesondere das Verhalten des Vortriebsschildes (Abtauchgefahr) sowie die Bodenbewegungen an der ungestützten Ortsbrust beobachtet. Die Lasten wurden jeweils bei Ankunft des Vortriebsschildes unter dem Lastzylinder, bei Unterfahrung des Lastzylinders und nach Passierung des Lastzylinders aufgebracht.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

In allen drei Zuständen konnten keine messbaren Bodenverschiebungen beobachtet werden. Weder die Extensiometer, noch die Inklinometer wiesen signifikante Messergebnisse auf. Lediglich die Erddruckgeber spiegelten in ihrem Verlauf die aufgebrachte Belastung wieder. Exemplarisch ist dies im Bild 48 für den Erddruckgeber dargestellt, der zwischen Lastplatte und Rohrscheitel angeordnet war. Deutlich ist eine wiederholte Spannungserhöhung um ca. 50 % zu erkennen, auch wenn sich hierdurch keine aus vortriebstechnischer Sicht nennenswerten Spannungsumlagerungen ableiten.

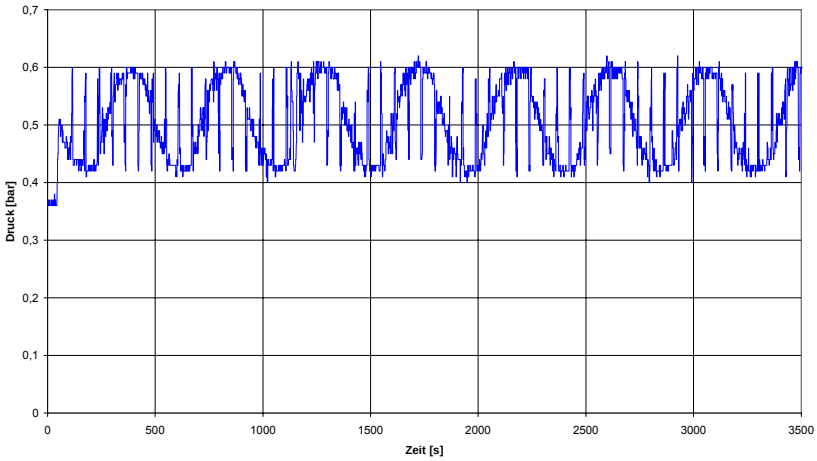


Bild 48 Erddruckgeber im Messquerschnitt 2 (Unter dynamischer Last)

Die Standsicherheit der Ortsbrust war zu jedem Zeitpunkt gegeben. Es wurde kein Boden in den Rohrstrang eingetragen und ebenso kein „Abtauchen“ des Schildes infolge der aufgebrachten Last festgestellt.

Hindernisse (Findlinge):

In der Vortriebstrasse wurden jeweils ein Sandsteinfindling im Kämpfer- und im Sohlbereich eingebaut (vgl. Bild 28), so dass ein teilweiser Abbau dieser Hindernisse erforderlich wurde. Die möglichen Auswirkungen auf den Vortriebsverlauf durch ein „Schleifen“ des Findlings an der Rohraußenseite sollten erkannt und beschrieben werden. Die Findlinge konnten mithilfe eines Presslufthammers problemlos abgebaut werden. Sie wurden bewusst nicht komplett geborgen, um “Schleiferscheinungen“ zu provozieren. Die Freilegung des Rohrstranges nach Beendigung des Vortriebs zeigte, dass weder die Rohre noch der Stahl- und der PE-Ring Beschädigungen aufwiesen, die auf einen Kontakt mit den Findlingen zurückzuführen sind (Bild 49).

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 49 Seitenansicht des Rohrstrangs auf der Seite des eingebauten Findlings

Unterschiedliche Überdeckungshöhen:

Die Überdeckung betrug am Vortriebsbeginn zunächst 3 m und erhöhte sich nach ca. 6 m Vortriebslänge stufenweise. Bereits vor Vortriebsbeginn wurden mithilfe der hydraulischen Druckkissen Überdeckungshöhen von 6, 8 und 10 m simuliert (vgl. Bild 29). Der Druck in den Kissen wurde täglich kontrolliert und gegebenenfalls nachgeregelt. Der in den Kissen herrschende Druck wurde über Drucksensoren aufgezeichnet und seine Wirkung durch die Messwerte der Erddruckgeber bestätigt. Durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Druckstufen wurde von fließenden Übergänge zwischen den Überdeckungshöhen ausgegangen (Bild 50).

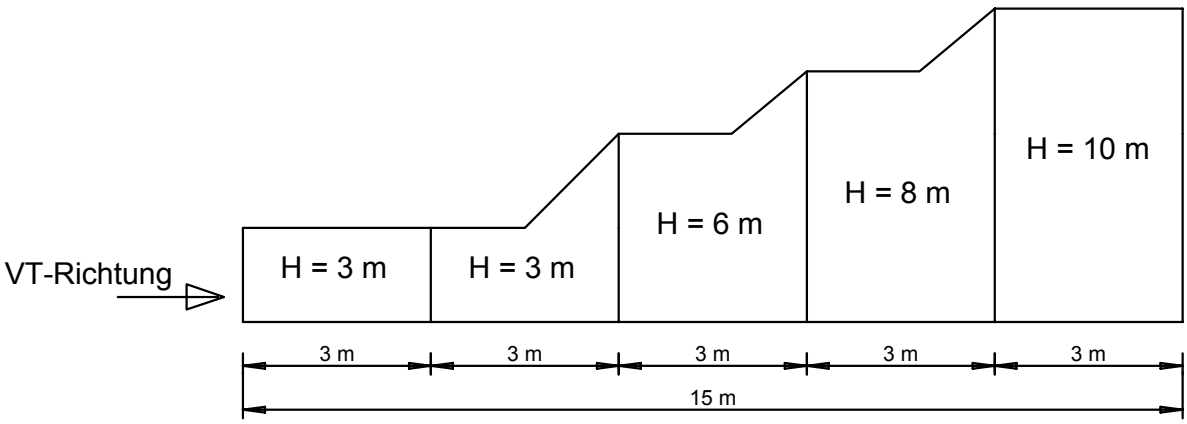


Bild 50 Tatsächliche und simulierte Überdeckungshöhen im Verlauf des Vortriebs

Der Wechsel der Überdeckungshöhe wirkte sich nachweislich auf die erforderlichen Vortriebskräfte aus. Zwar ist bei einem händischen Abbau des Bodens der Reakti-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

onsdruck des Erdreichs (Brustwiderstand) nur von untergeordneter Größe, jedoch erhöht sich die Mantelreibung.

Ansteigender Grundwasserstand:
Nach Abschluss des Vortriebs wurde der Versuchsstand geflutet und anschließend über 60 Minuten ein Überdruck von 1,3 bar über Rohrscheitel aufgebracht. In den Rohrverbindungen wurden keine wesentlichen Abwinkelungen oder Verrollungen bzw. Verschiebungen des Rohrstrangs insgesamt beobachtet (zur Dichtheit der Rohrverbindungen vgl. Abschnitt 5.9).

Zusammenfassend kann der Einfluss aus Grundwasser, Überdeckungshöhe, Hindernissen und dynamischer Belastung auf die Rohrverschiebungen und –verformungen im Versuch als sehr gering bezeichnet werden. Nach Entlastung der Druckkissen und anschließenden Bodenausbau konnte eine Hebung der Rohre von ca. 5 mm beobachtet werden (vgl. Bild 47).

5.6 Rohr-Boden-Interaktion

Während der Vortriebsarbeiten wurden an zahlreichen Stellen im Großversuchsstand Bodenspannungen und Verschiebungen aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 4.6.2).
Die Ergebnisse der Extensiometer- und Inklinometermessungen zeigten lediglich geringe vertikale und horizontale Bodenverschiebungen während der Vortriebsarbeiten von stets unter 1 cm.

Tabelle 4 Vertikale und horizontale Bodenverschiebungen

	Höhe über Rohrsohle [m]	MQ 1 [mm]	MQ 2 [mm]	MQ 3 [mm]	MQ 4 [mm]	MQ 5 [mm]
Vertikale Bodenverschiebungen	0,5	-	6	7	4	5
	1,5	-	4	5	3	6
	2,5	4	4	4	-	2
	3,5	3	3	2	-	3
	4,5	2	2	2	2	1
Horizontale Bodenverschiebungen	0,5	2	2	4	6	6
	1,5	1	4	5	5	6
	2,5	1	4	8	4	3
	3,5	0,5	2	4	4	4
	4,5	0	1	3	3	1

Striche in der Tabelle bedeuten einen Ausfall des Gebers

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Zu erkennen ist eine deutliche Abnahme der Verformungen zur Geländeoberkante hin. Allerdings mussten die Sensoren 1 m neben dem Rohr angeordnet werden, da eine Positionierung direkt über dem Rohr aufgrund der Widerlagerführung der Abdichtelemente für die Grundwassersimulation nicht möglich war. Setzungen an der Geländeoberkante direkt über dem Rohr sind daher ggf. durch zusätzliche Messungen im Rahmen eines Pilotprojektes zu erfassen.
Von besonderem Interesse war zudem die Rohr-Boden-Interaktion bei Kurvenfahrten, und hier insbesondere die horizontale Bodenspannung während des Vortriebs. Die größten horizontalen Bodenspannung waren nach Abschluss des Vortriebs beim Überpressen des gekrümmten Rohrstrangs mit über 6000 kN gegen die Rückwand des Großversuchsstandes zu erwarten. Wie aus Bild 47 ersichtlich trat in dieser Phase an Rohr Nr. 5 (Messquerschnitt 3) die größte Abweichung von der geraden Verbindung zwischen Rohr 1 und Rohr 10 auf. Daher ist davon auszugehen, dass dort auf der linken Seite in Vortriebsrichtung eine wesentliche Erhöhung der horizontalen Bodenspannung aufgetreten ist. Bild 51 zeigt die während des Überpressens aufgenommenen Spannungsänderungen auf der linken Seite des Rohrstrangs in den Messquerschnitten 3 und 4.

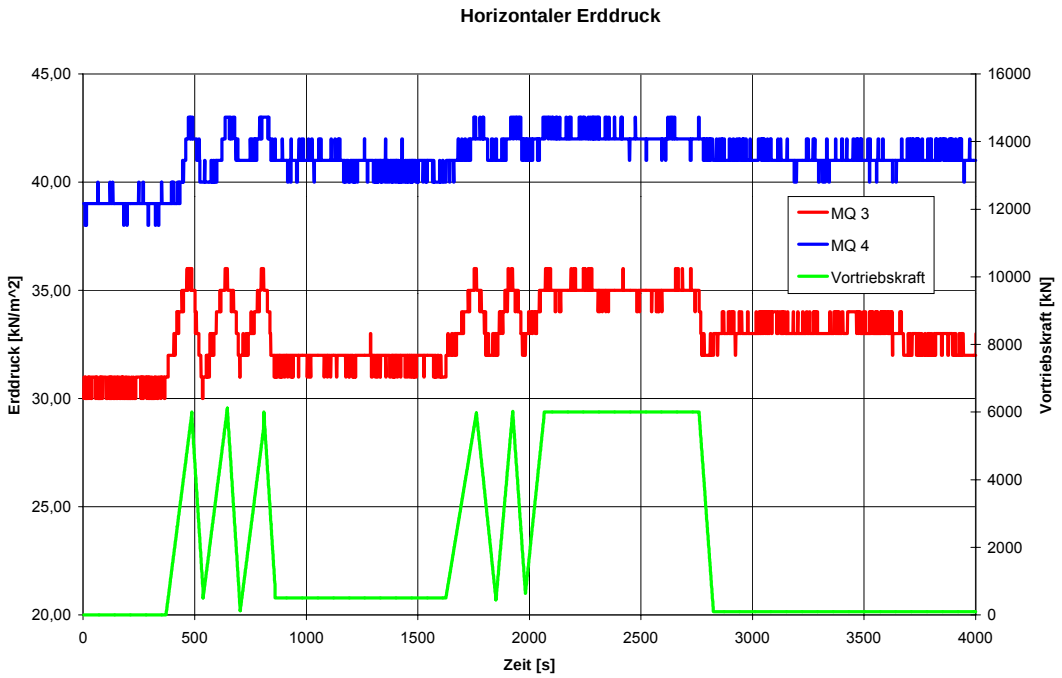


Bild 51 Änderungen der horizontalen Bodenspannungen während des Überpressens

Deutlich war das unterschiedliche Primärspannungsniveau durch die zur Simulation größerer Überdeckungshöhen eingeleiteten Auflasten zu erkennen. Messquerschnitt 3 (MQ 3) lag unter einer simulierten Überdeckungshöhe von 6 m, während MQ 4 die Tiefenlage von 8 m repräsentiert.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Es waren Spannungsänderungen während des Überpressens von etwa 4 bis 6 kN/m^2 festzustellen. Am Ort der stärksten geometrischen Abweichung von der Ideallinie, dem Messquerschnitt 3 (Rohr Nr. 5 und 6 vgl. Bild 47), wurde die stärkste Spannungserhöhung beobachtet.
Näherungsweise wurde in Anlehnung an [19] der Rohrstrang als vorgedrückter Gelenkbogen idealisiert und die auftretenden Spannungen auf Plausibilität überprüft. Dabei wurden jedoch Reibungsverluste zwischen Rohr und Boden (vgl. [20]) vernachlässigt, da während des Überpressens keine nennenswerten Vortriebswege auftraten. Unter Berücksichtigung der Rohrgeometrie und der aufgetretenen Abweichungen von der geraden Vortriebsrichtung ergaben sich so rechnerisch Spannungserhöhungen im Boden direkt neben dem Rohr von 8 kN/m^2 im Messquerschnitt 3 und 6 kN/m^2 im Messquerschnitt 4. Die in der Überschlagsrechnung ermittelten Spannungen lagen somit erwartungsgemäß über den gemessenen Spannungen, da die Erddruckgeber in einem Abstand von 1 m zum Rohr eingebaut waren und von einer Lastausbreitung im Boden auszugehen ist. Unter der Annahme eines mittleren Spannungsabfalls um den Faktor 1,4 ergibt sich dann im vorliegenden Anwendungsfall (wechselnde Bodenschichten) ein rechnerischer Lastausbreitungswinkel von ca. 22 °. Grundsätzlich konnten hier die mit [19] gegebenen Berechnungsansätze als ausreichend genau für die erste Abschätzung der Bodenspannungen bestätigt werden.

5.7 Kraftübertragung im Rohrverbindungsbereich

5.7.1 Allgemeines

Basierend auf den während des Rohrvortriebs im Großversuchstand gemessenen Verschiebungen, Abwinkelungen und Vortriebskräften wurden die Kontaktspannungen in den Rohrverbindungen rechnerisch abgeschätzt (vgl. [21]). Dabei sollten die nichtlinearen Spannungs-Verzerrungsbeziehungen der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Druckübertragungsmittel berücksichtigt und deren Einsatz bewertet werden. Dies betraf insbesondere die resultierende Spannungsverteilung in der Fuge und die sich hieraus ergebende maximale Vortriebskraft. Bei mehrachsiger Abwinkelung sollte diese mit der zulässigen Vortriebskraft beim Vortrieb mit Kreisquerschnitten verglichen werden. Zur Verifizierung der Spannungsberechnungen wurden zwischen den Rohren 4 und 5 Messungen mit Foliensensoren durchgeführt.

5.7.2 Berechnungsverfahren

Das ATV-Arbeitsblatt 161 [7] gilt ausschließlich für Vortriebsrohre mit kreisförmigem Querschnitt. Zur Berechnung der Vortriebsrohre mit Rechteckquerschnitt wird daher auf ein angepasstes Berechnungsverfahren zurückgegriffen, das die Annahmen so-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

wie die Berechnungs- und Sicherheitsphilosophie dieses Regelwerks sinngemäß umsetzt [21]. Außerdem wird das nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten der unterschiedlichen Druckübertragungsmittel durch eine geeignete funktionale Beziehung erfasst. Durch Integration des aus der krümmungsabhängigen Verzerrung ermittelten Druckspannungsverlaufs über die Querschnittsfläche soll unter Beachtung des gegebenenfalls klaffenden Fugenbereichs die jeweils zulässige Vortriebskraft ermittelt werden.

Wegen der fehlenden Rotationssymmetrie ist beim Rechteckquerschnitt der Verzerrungs- und damit auch der Spannungsverlauf über den Querschnitt nicht nur von der Querschnittsform, der Vortriebskraft und von der Abwinkelung, sondern zusätzlich auch von der Richtung der Abwinkelung abhängig. Bei gleicher Abwinkelung um die vertikale oder um die horizontale Achse ergeben sich unterschiedliche Verzerrungen, Spannungen und somit auch unterschiedliche zulässige Vortriebskräfte. Die maximal auftretende Spannung entsteht in diesen Fällen entlang einer der Querschnittskanten. Liegt die Drehachse in einem Bereich zwischen den beiden Symmetrieachsen, konzentriert sich die maximale Spannung in einer Ecke des Querschnitts, wodurch die zulässige Vortriebskraft deutlich absinkt.
Um dieses Phänomen zu berücksichtigen, wurde für den vorgegebenen Querschnitt die Geometrie mit einer Funktion in Abhängigkeit von der „Durchmesserkoordinate“ z erfasst, wobei die Formulierung bezüglich des Winkels α variabel gestaltet ist. Bild 52 zeigt die von einer Ecke des Querschnitts unter dem Winkel α ausgehende z-Koordinate.

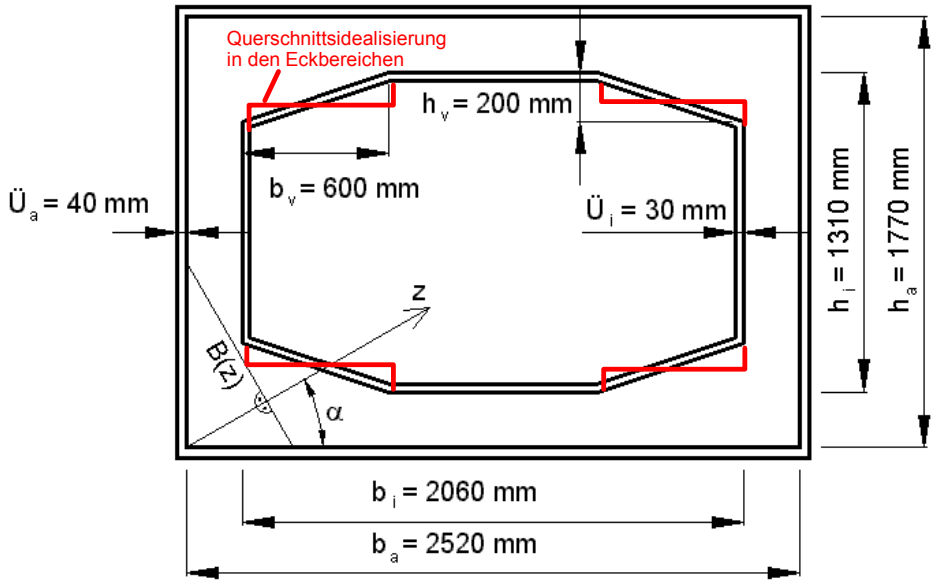


Bild 52 Querschnitt mit dem um den Winkel α gedrehten Koordinatensystem

©2002 All rights reserved by GEK mbH

In Abhängigkeit von α kann nach [21] für jedes z innerhalb des Querschnitts die vorhandene Breite B(z) der Querschnittswandung bestimmt werden, die sich senkrecht zur z-Achse ergibt. Die dreieckförmigen Vouten wurden dabei vereinfachend über flächengleiche Rechtecke erfasst. Bezüglich der gegebenen Geometrie ist im Bild 53 die Querschnittsfunktion B(z) in Abhängigkeit von der Richtung der Abwinkelung zur Horizontalen für die Winkel α=0, α=π/8, α=π/4, α=3π/8, α=π/2 dargestellt. Außerdem zeigt das Bild 53 (fett dargestellt) die entsprechende Funktion für den Winkel α, der bei einer Abwinkelung von 0,286° über die Diagonale entsteht (gewählter Winkel = 35°). Die Abwinkelung von 0,286° entspricht bei der vorliegenden Rohrlänge von 1.5 m einem Mindestradius von 300 m. Diese Trassengeometrie, d.h. Abwinkelung von 0,286° und α = 35°, liegt den weiteren beispielhaften Darstellungen zugrunde.

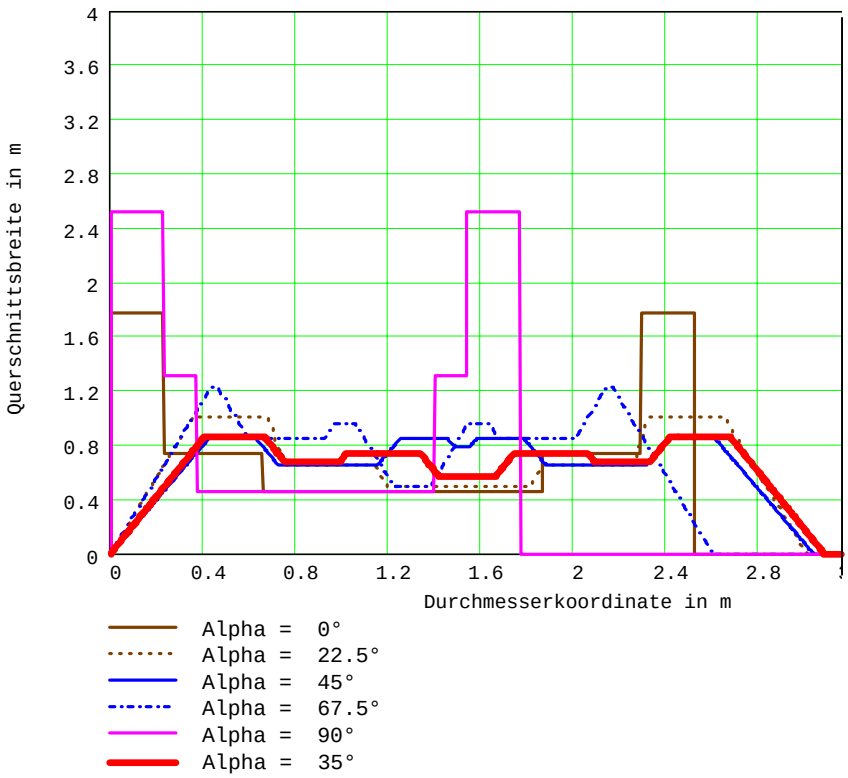


Bild 53 Querschnittsfunktion in Abhängigkeit von der Richtung der Abwinkelung [21]

Innerhalb des Großversuchs wurden drei unterschiedliche Druckübertragungsmittel eingesetzt, deren Spannungs-Verzerrungsverhalten über spezielle Versuche vorab untersucht wurde (vgl. Abschnitt 4.7, Tabelle 1). Unter Berücksichtigung von Mehrfachbelastungen wurde der elastische und der plastische (bleibende) Stauchungsanteil getrennt in mehreren Verformungsstufen ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.3). Daraus konnten die in Bild 54, Bild 55 und Bild 56 dargestellten idealisierten Spannungs-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Stauchungsdiagramme für PU, Spanplatte und die Sandwichkonstruktion abgeleitet werden.

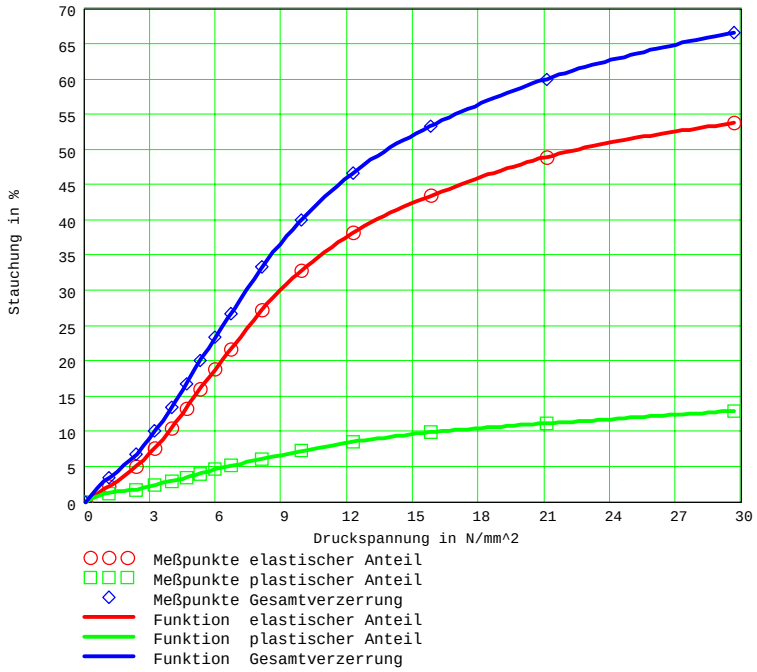


Bild 54 Rechenwerte für das Spannungs-Stauchungsverhalten des Druckübertragungsmittels aus PU aus zyklischer Belastung [21]

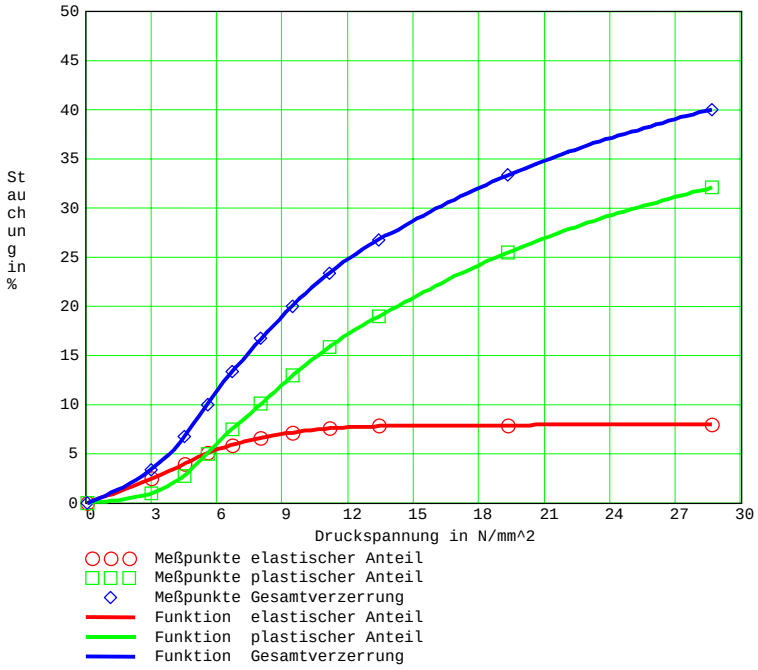


Bild 55 Rechenwerte für das Spannungs-Stauchungsverhalten des Druckübertragungsmittels aus Spanplatte aus zyklischer Belastung [21]

©2002 All rights reserved by GEK mbH

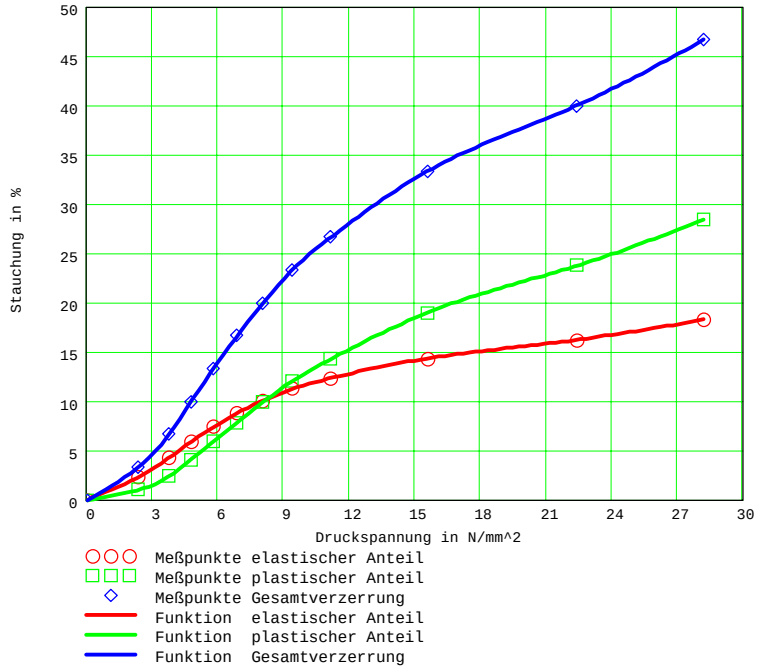


Bild 56 Rechenwerte für das Spannungs-Stauchungsverhalten des Druckübertragungsmittels aus einer Sandwichkonstruktion aus zyklischer Belastung [21]

Einen zusätzlichen, nicht zu vernachlässigenden Verformungsanteil liefert das Stahlbetonrohr, das sich unter der exzentrischen Belastung an den Rohrspiegeln verkrümmt. Hierbei kann ein elastisches Verhalten vorausgesetzt werden, so dass sich z.B. für den Sandwichquerschnitt eine zusätzliche, elastische, auf die Dicke des Druckübertragungsmittels umgerechnete Verzerrung entsprechend Bild 57 ergibt.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

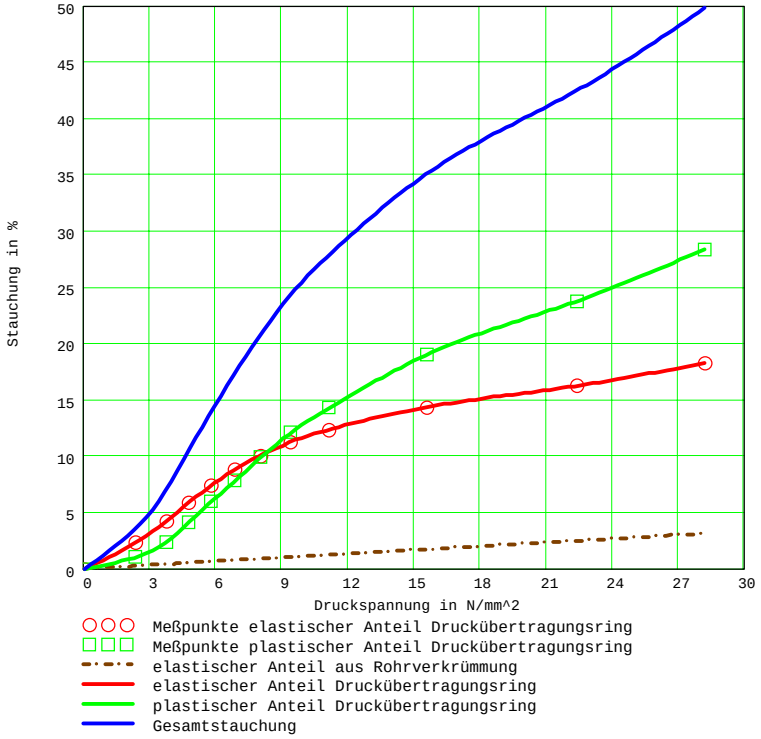


Bild 57 Spannungs-Stauchungsverhalten des Drucküberragungsmittels aus einer Sandwichkonstruktion unter Berücksichtigung der Rohrverkrümmung [21]

Bei den weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die maximal auftretenden Verzerrungen und damit auch die maximalen Spannungen in der Ecke des Querschnitts auftreten, in der z=0 ist. Damit ergeben sich in der Kurvenfahrt für die Sandwichkonstruktion unter der Annahme einer Ausnutzung der maximal zulässigen Betondruckspannung von

$$\sigma_{zul} = \beta_{LD} / \gamma = 30\ N/mm^2 / 1.6 = 18.75\ N/mm^2 \text{ (Beton B55)}$$

je nach Vorbelastung unterschiedliche Verzerrungsverläufe des Drucküberragungsmittels über den Querschnitt (Bild 58).

Unter der Voraussetzung, dass das Drucküberragungsmittel nicht vorbelastet war, ergibt sich ein Klaffen der Fuge ab einer z-Koordinate von ca. 2,35 m. Je nach Vorbelastung vergrößert sich die klaffende Fuge infolge der bleibenden Stauchung. Bei einer Vorbelastung in Höhe von 100% der zulässigen Vortriebskraft bei Kraftangriff am Kernrand und Ausführung nur der zugehörigen, nach ATV-A161 [7] zulässigen Steuerbewegungen entspricht die kraftübertragende Fläche lediglich dem Querschnittsbereich mit $z \leq 1{,}6$ m.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

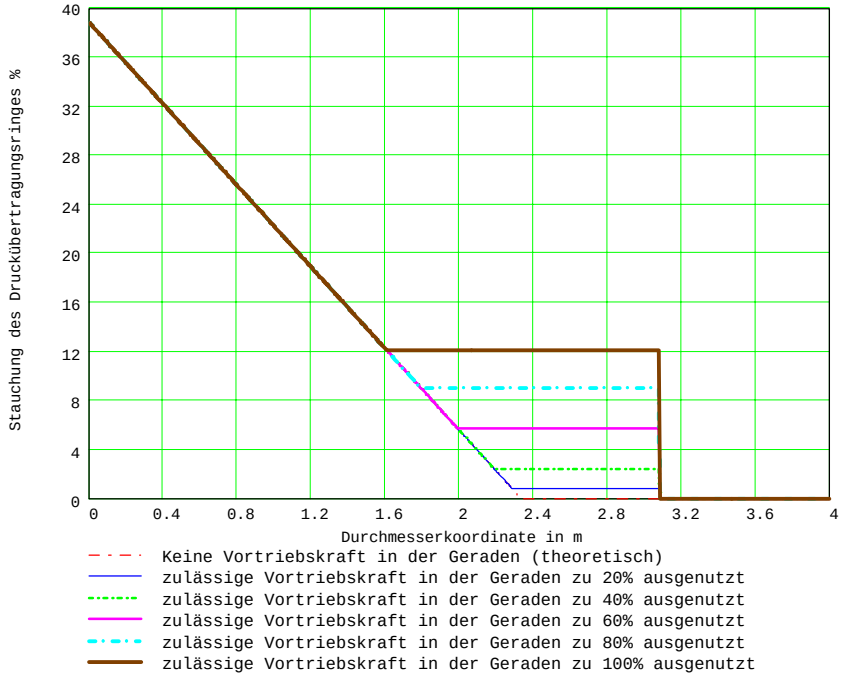


Bild 58 Verlauf der Verzerrung des Sandwichquerschnitts für unterschiedliche Vorbelastungen aus Vortrieb in der Geraden [21]

Unter Verwendung des Spannungs-Stauchungsdiagramms nach Bild 57 kann jeder Verzerrungsordinate eine Spannung zugeordnet werden, so dass sich der im Bild 59 dargestellte Spannungsverlauf über den Querschnitt ergibt.

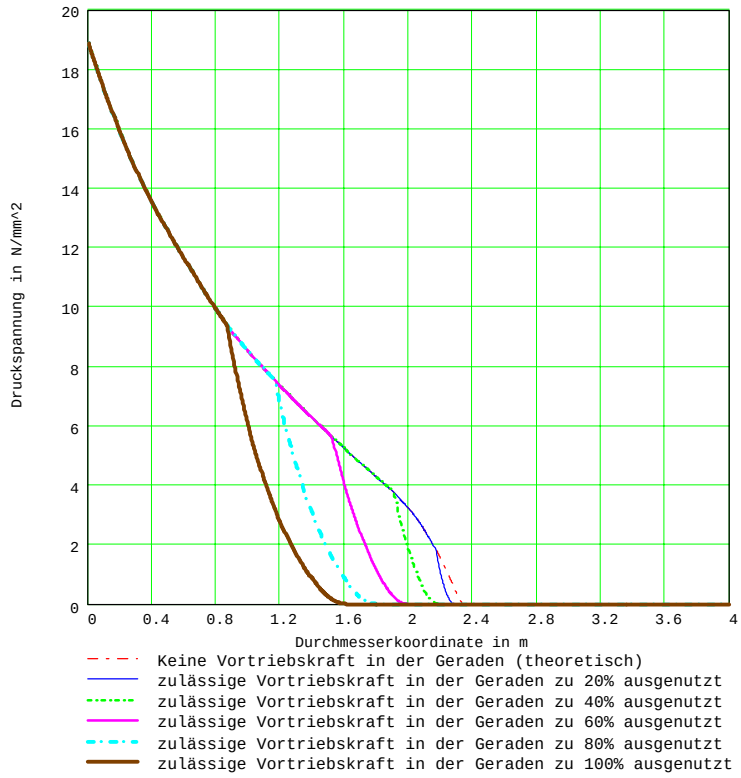


Bild 59 Verlauf der Kontaktdruckspannung in der Fuge [21]

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Multipliziert man die im Bild 59 ablesbare Kontaktdruckspannung $\sigma_D(z)$ an jedem Punkt auf der z-Achse mit der im Bild 53 dargestellten Querschnittsbreite B(z), ergibt sich die Kontaktdruckkraft pro Längeneinheit bezüglich der z-Achse. Der Verlauf über die Koordinate z ist im Bild 60 dargestellt.

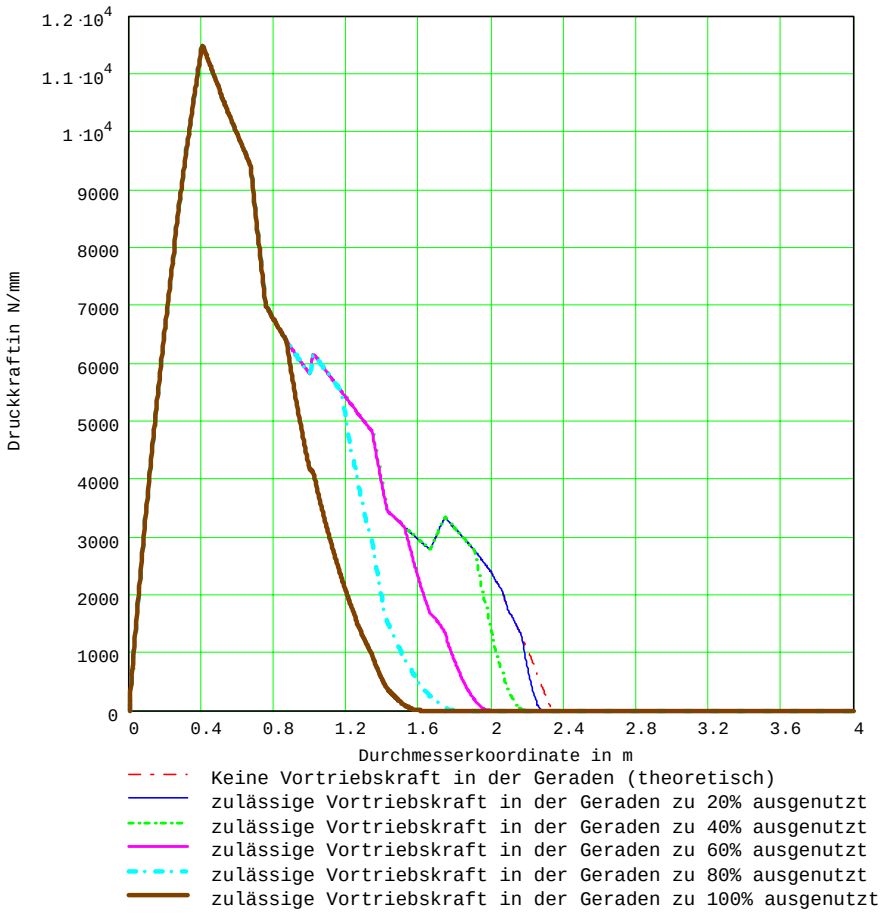


Bild 60 Verlauf der Kontaktdruckkraft pro Längeneinheit [$\sigma_D(z)$ B(z)] [21]

Die Integration dieser Funktion über den gesamten, von der z-Achse geschnittenen Bereich des Querschnitts ergibt die zulässige Vortriebskraft V_{zul}.

$$V_{zul} := \int_0^{maxZ} \sigma_D(z) \cdot B(z)\, dz$$

Die zulässige Vortriebskraft ist für das ausgewählte Beispiel (Abwinkelung 0,286 °, α = 35°) im Bild 61 in Abhängigkeit von der Vorbelastung, d.h. der Ausnutzung der zulässigen Vortriebskraft auf der Geraden, dargestellt. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Diagonalen kennzeichnet die bei unveränderter Vortriebskraft in Gerade und Kurve zulässige Vortriebskraft.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

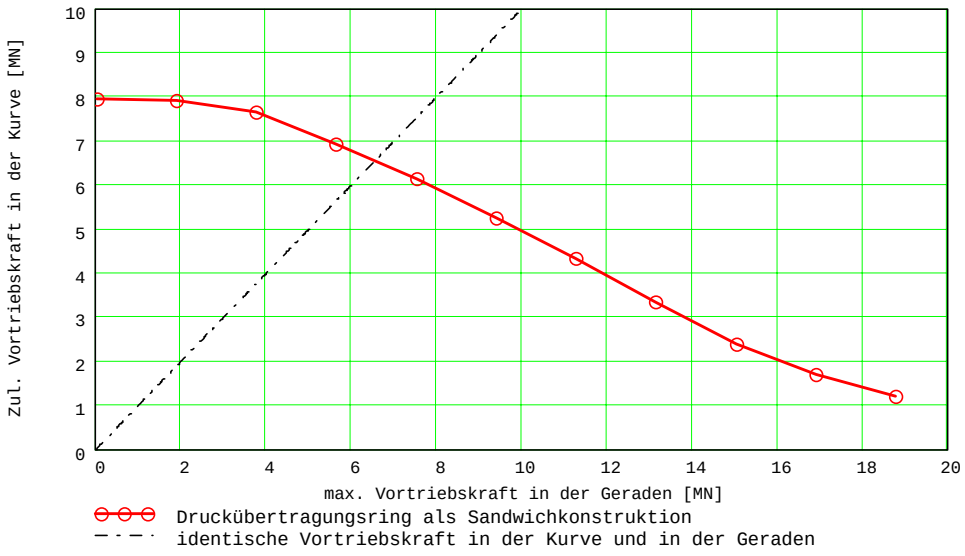


Bild 61 Zulässige Vortriebskraft in Abhängigkeit von der Vorbelastung [21]

5.7.3 Vergleichende Ermittlung der zulässigen Vortriebskraft

Unter Verwendung des im vorangegangen Abschnitt dargestellten Berechnungsverfahrens wurde für den gegebenen Rechteckquerschnitt die zulässige Vortriebskraft unter Variation des Druckübertragungsmittels und der Abwinkelung ermittelt. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Rohre aus einem Beton B55 mit einer Rechenfestigkeit von 18.75 MN/m^2 gefertigt sind. Im einzelnen wurden die folgenden Randbedingungen gewählt :

- Druckübertragungsmittel:
  - 1: PU
  - 2: Spanplatte
  - 3: Sandwichkonstruktion

- Abwinkelung:
  - a: 0,286° um die vertikale Achse
  - b: 0,286° um die horizontale Achse
  - c: 0,286° um die senkrecht auf der Diagonalen stehende Achse

Die nachfolgenden Bilder zeigen die zulässige Vortriebskraft für die Abwinkelung um die vertikale Achse (Bild 62), um die horizontale Achse (Bild 63) und um die Senkrechte zur Diagonalen (Bild 64) unter der Variation der Druckübertragungsmittel. Darüber hinaus sind die zulässigen Vortriebskräfte bei Kurvenfahrt für ein aus hy-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

draulischer Sicht vergleichbares Rohr mit Kreisquerschnitt dargestellt. Durch die Rotationssymmetrie sind diese von der Richtung der Abwinkelung unabhängig.

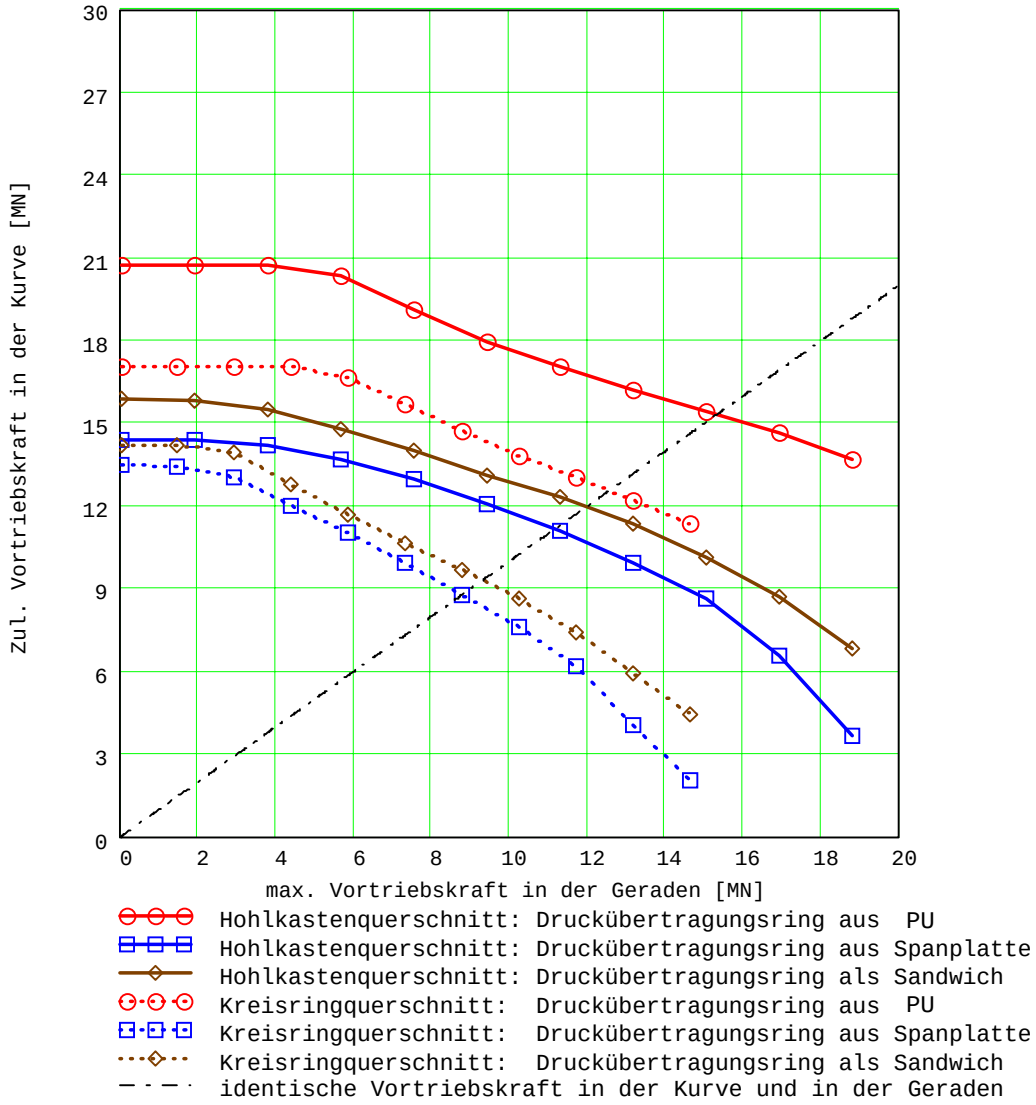


Bild 62 Zulässige Vortriebskraft bei einer Abwinkelung von 0,286° um die vertikale Achse [21]

©2002 All rights reserved by GEK mbH

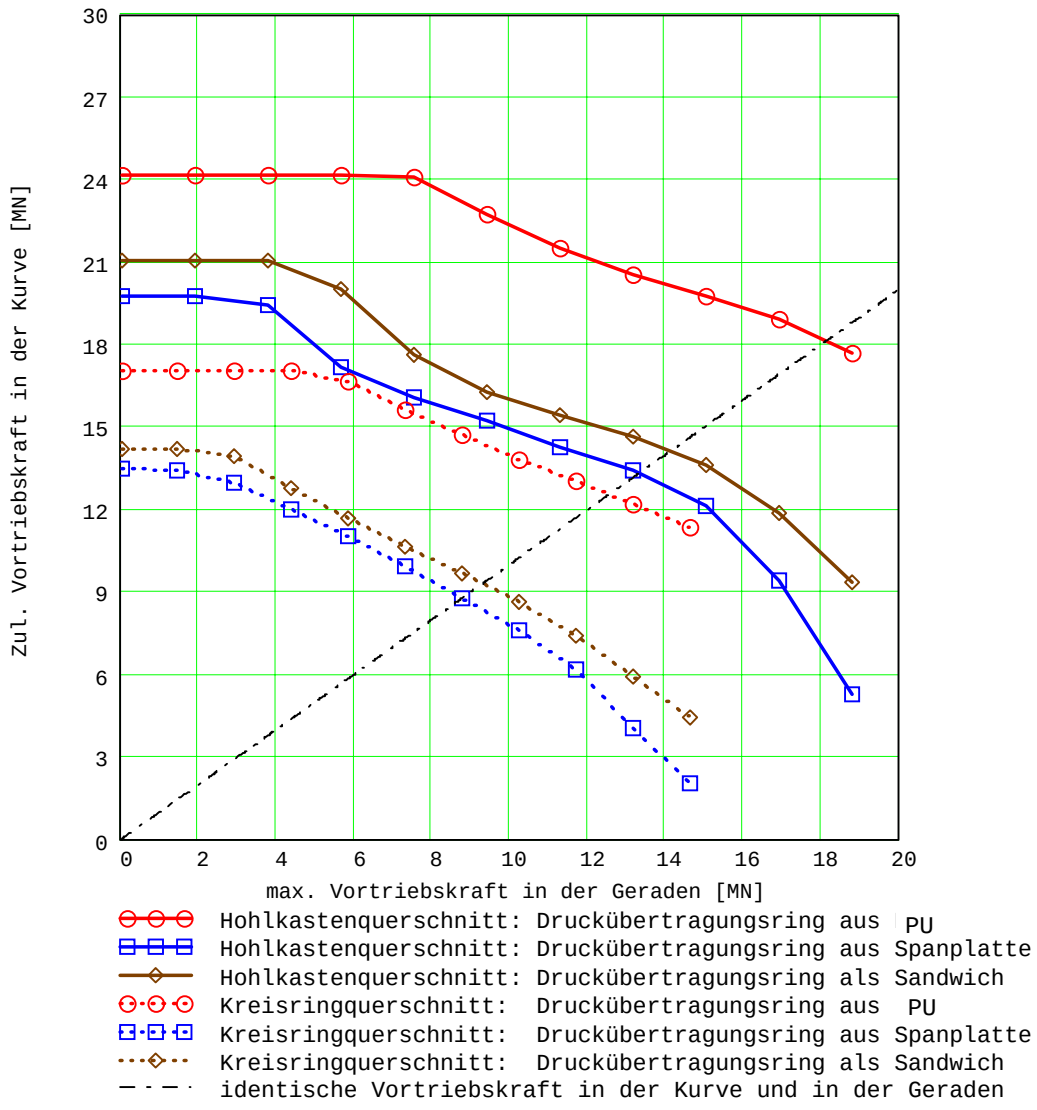


Bild 63 Zulässige Vortriebskraft bei einer Abwinkelung von 0,286° um die horizontale Achse [21]

©2002 All rights reserved by GEK mbH

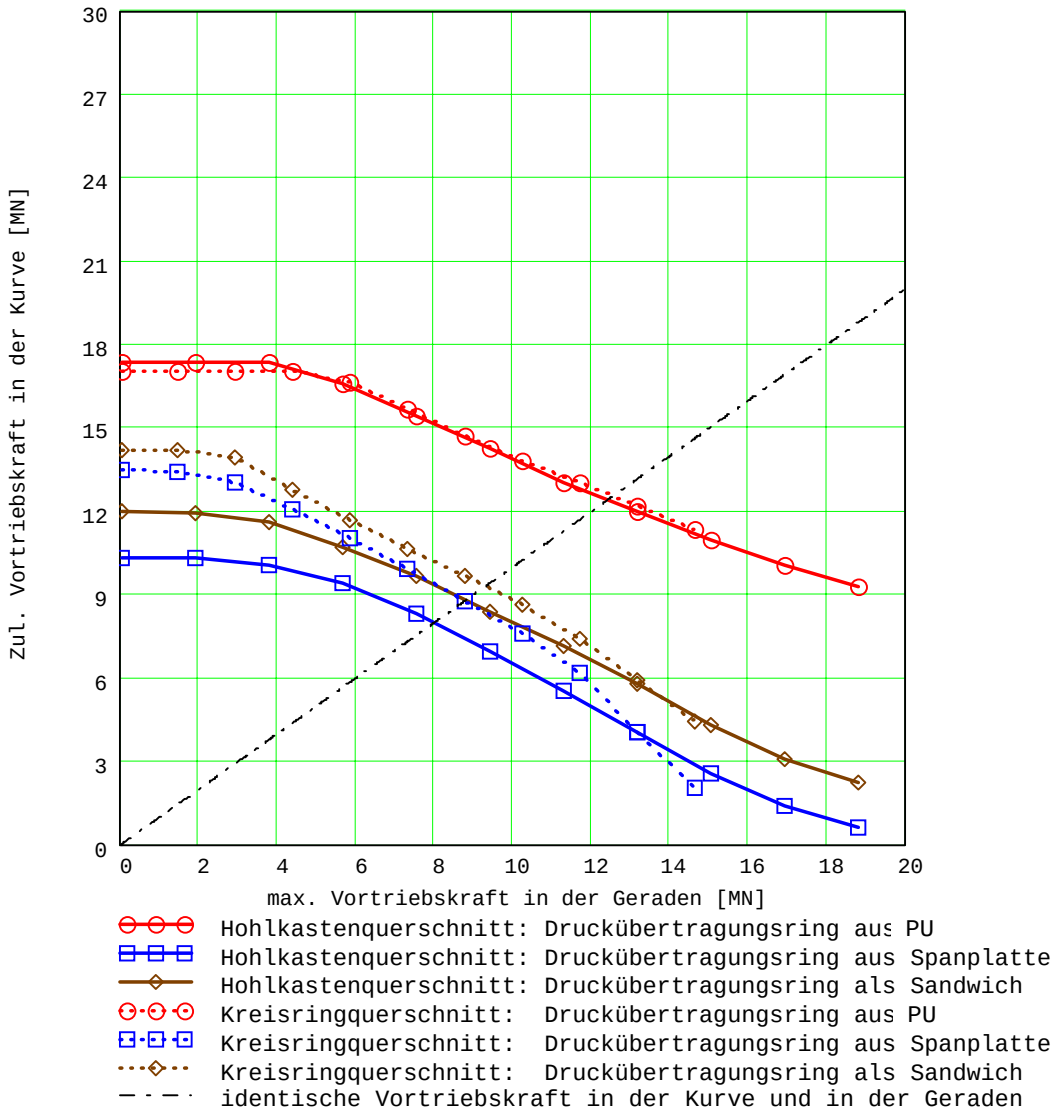


Bild 64 Zulässige Vortriebskraft bei einer Abwinkelung von 0,286° um die Senkrechte zur Diagonalen [21]

Ein Vergleich der dargestellten Ergebnisse für die unterschiedlichen Druckübertragungsmittel bestätigt den günstigen Einfluss eines hohen elastischen Verformungsanteils auf die zulässige Vortriebskraft bei Kurvenfahrten (vgl. PU zu Sandwichkonstruktion bzw. Spanplatte). So liegt die zulässige Vortriebskraft für das Druckübertragungsmittel aus PU in allen Fällen mindestens 3 MN über dem Grenzwert der beiden anderen Konstruktionen. Die Spanplatte unterschreitet die zulässige Vortriebskraft der Sandwichkonstruktion um weitere ca. 1 MN.

Der Vergleich des Rechteckquerschnitts mit dem Kreisringquerschnitt ist hinsichtlich der Richtung der Abwinkelung zu differenzieren, d.h. hinsichtlich der Form der während des Vortriebs aufgefahrenen Raumkurve zu betrachten. Bei Abwinkelungen um

©2002 All rights reserved by GEK mbH

eine der beiden Symmetrieachsen des Querschnitts erzielt der Rechteckquerschnitt grundsätzlich höhere zulässige Werte für die Vortriebskraft, wobei die maximale Spannung nicht in einem Punkt, sondern entlang einer der Außenkanten auftritt. Bei einer schräg liegenden Abwinkelung ist demgegenüber insbesondere bei hohen plastischen Verformungsanteilen (Spanplatte) eine im Vergleich zum Kreisquerschnitt geringere zulässige Vortriebskraft des Rechteckquerschnittes zu erwarten.

5.7.4 Kontaktdruckspannungen während der Versuchsdurchführung

Die Fugenspaltweite von anfänglich 28 mm bzw. 30 mm (Spanplatte bzw. PU/Sandwich) verändert sich während des Vortriebs in Abhängigkeit der Beanspruchungsgeschichte und Abwinkelung. Um aus den gemessenen Verzerrungen die entsprechenden Kontaktdruckspannungen ableiten zu können, wurden zunächst die maximal bzw. minimal während der Versuchsdurchführung auftretenden Fugenspaltweiten in den 4 Messpunkten zusammengestellt und die sich hieraus ergebenden Abwinkelungen in Betrag und Richtung bestimmt. Zu keinem Zeitpunkt wurde die zulässige Vortriebskraft erreicht. Die maximalen Kontaktdruckspannungen in den Rohrverbindungen wurden daher für die folgenden Vortriebszustände berechnet:

- entlasteter Endzustand,
- Grundlast von 3,5 MN vor dem Überpressen,
- maximale Vortriebskraft von 6,0 MN beim Überpressen.

Aus der Beobachtung des Vortriebsverlaufes ließ sich ableiten, dass die Vortriebskraft vor dem Überpressen, d.h. während des eigentlichen Vortriebs, den Kernbereich nicht verlassen hat, d.h. es trat keine klaffende Fuge auf. Der vollständige Verzerrungsverlauf in den einzelnen Fugen konnte daher jeweils aus den Stauchungen an 3 von 4 Eckpunkten bestimmt werden. Die tatsächlich aufgetretenen maximale Kontaktdruckspannung wurden anschließend ermittelt. Zum Vergleich wurde die Berechnung an allen Fugen für sämtliche drei Druckübertragungsmittel, d.h. auch für die an dieser Stelle nicht verwendeten Varianten, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die fett gedruckten Spannungswerte entsprechen den Berechnungsergebnissen für die tatsächlich verwendete Art des Druckübertragungsmittels.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Tabelle 5 Kontaktdruckspannungen während des Überpressens [21]

Fuge	DÜM	Stauchung in mm an den Eckpunkten			Kurvenradius in m			Maximale Spannung in N/mm^2		
		(1)	(2)	(3)	α=0°	α=90°	ges.	PU	SP	SW
2/3	SP	-3.89	-3.07	+2.79	3238	566	557	6.2	**7.9**	7.5
3/4	SW	-3.83	-3.63	-0.35	13275	1086	1083	4.8	6.1	**5.6**
4/5	SW	-6.52	-0.05	-2.76	410	1005	380	7.1	9.6	**8.7**
5/6	SW	-3.45	-2.16	-1.76	2058	2237	1515	4.5	5.5	**5.2**
6/7	PU	-2.86	-1.23	-1.27	1629	2377	1344	**4.6**	5.7	5.3

DÜM = Drucküberragungsmittel PU = Polyurethan SP = Spanplatte SW = Sandwichkonstruktion

5.7.5 Spannungsmessungen in der Rohrfuge

Zur Verifizierung der unter Abschnitt 5.7.4 dargestellten Berechnungsergebnisse wurden Spannungsmessungen zwischen den Rohren 4 und 5 mit speziell auf die zu erwartenden Druckverhältnisse abgestimmten Sensoren durchgeführt [22]. Jeder Sensor ist ca. 0,1 mm dick und besteht aus dünnen, flexiblen Folien mit einem Raster aus leitfähigen bzw. halbleitenden Tinten. Die Schnittpunkte der leitfähigen Zeilen und Spalten bilden die Abtastpositionen, an denen sich je nach aufgebrachter Kraft der elektrische Widerstand ändert und die korrespondierende Spannung aufgenommen wird. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden Messfolien in der Größe 40 x 60 cm eingesetzt. Das Raster hatte einen Zeilen- bzw. Spaltenabstand von 1 cm, so dass pro Folie 2400 Abtastpositionen zur Verfügung standen. Die Folien wurden gemäß Bild 65 in der Rohrverbindung angeordnet.

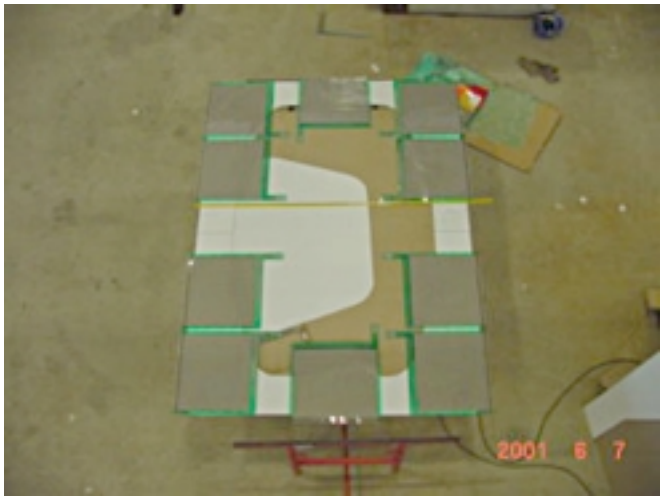


Bild 65 Anordnung der Druckfolien am Drucküberragungsmittel

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Als Druckübertragungsmittel kam in der betreffenden Rohrverbindung die im Abschnitt 4.2.3 näher beschriebene Sandwichkonstruktion zum Einsatz. Durch den Einbau der Folien zwischen den einzelnen Schichten der äußeren Spanplatte waren diese vor Beschädigungen besser geschützt als bei direktem Kontakt mit dem Rohrspiegel. Die Messwerterfassung im Rohr während des Vortriebs wurde mit einem portablen Messrechner realisiert (s. Bild 66).

Bild 66 Spannungsmessungen während des Überpressens

Gemäß Tabelle 3 liegt die horizontale Abwinkelung in der betrachteten Fuge (4-5) im Endzustand bei 0,23°. Bild 67 zeigt die Resultate der Spannungsmessungen während des Überpressens.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

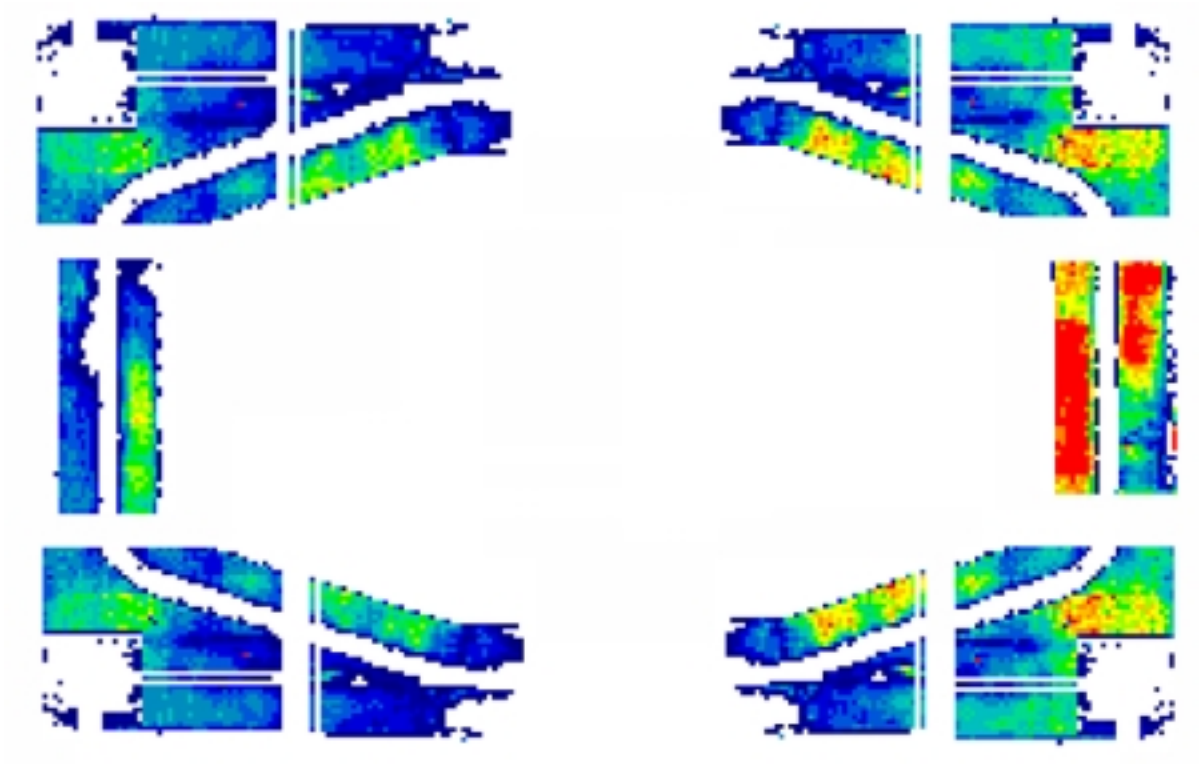


Bild 67 Druckspannungen in der Fuge 4-5 bei einer Vortriebskraft von 6000 kN (Blau = niedrige Spannung, Rot = hohe Spannung)

Die Kraftübertragung im gesamten Querschnitt wies erkennbare Schwankungen auf, welche sich möglicherweise auf Unebenheiten der Rohrspiegel zurückführen lassen. Offensichtlich konnte dieser Effekt allein durch den Schutz der äußeren Spanplattenschicht nicht vollständig ausgeschlossen werden.
Deutlich ist die höhere Spannung in der rechten Querschnittshälfte, welche eine größere Kompression des Druckübertragungsmittels aufwies, zu erkennen. Die gemessenen Spannungen betrugen in kleinen Teilbereichen bis zu 14 N/mm^2. Als Mittelwert über die Fläche jeweils einer Druckmessfolie ergab sich ein Spannungsmaximum im rechten Querschnittsbereich von ca. 9,3 N/mm^2. Die in Abschnitt 5.7.4 rechnerisch ermittelten Spannungen in Höhe von 8,7 N/mm^2 (vgl. Tabelle 5) konnten somit durch die Folienmessungen grundsätzlich bestätigt werden.

5.8 Eindringen von Bodenmaterial in die Rohrverbindung

Ein Eindringen von Bodenmaterial beeinflusst wesentlich die Kraftübertragung und die Abwinkelbarkeit und somit die Funktionsfähigkeit der Rohrverbindung. Es wurden 3 unterschiedliche Schutzvarianten gegen das Eindringen von Bodenmaterial untersucht (ohne zusätzlichen Schutz, Stahlring und PE-Ring). Eine klaffende Fuge trat während des Vortriebs nicht auf, so dass grundsätzlich in allen Fällen ein Eindringen des Bodenmaterials im Bereich des Druckübertragungsmittels ausgeschlossen war.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Ohne zusätzlichen Schutz:

Die Variante ohne zusätzlichen Schutz wurde an zwei Rohrverbindungen zwischen den Rohren 2-3 und 9-10 getestet. Die Messungen der Fugenspaltweiten belegen, dass während des gesamten Vortriebs keine klaffende Fuge auftrat. Bei einer derartig idealen Belastung ist den Versuchsergebnissen zufolge kein Schutz gegen das Eindringen von Bodenmaterial erforderlich. Bild 68 zeigt deutlich, dass kein Boden zwischen Druckübertragungsmittel und Rohrstirnfläche eingedrungen ist. Problemlos ist diese Ausführung jedoch nur dann einsetzbar, wenn während des gesamten Vortriebs nennenswerte Druckspannungen auftreten und eine klaffende Fuge ausgeschlossen werden kann.

Bild 68 Freigelegte Rohrverbindung ohne Schutz zwischen den Rohren 2 und 3

Stahlring:

Die Ausführung mit einem Stahlring als Schutzmaßnahme wurde bei insgesamt 5 Rohrverbindungen gewählt: 3-4, 4-5, 5-6,-6-7 und 7-8. Bei vier Rohrverbindungen wurden lediglich unbedeutende Bodenmengen innerhalb des Stahlrings gefunden, welche aufgrund der Verformbarkeit der Ringe als unkritisch angesehen werden können (s. Bild 69). Der Kraftübertragungsbereich blieb ungestört, da kein Boden bis zum Druckübertragungsmittel gelang.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 69 Freigelegte Rohrverbindung mit Stahlring zwischen den Rohren 4 und 5

Nur bei einer Rohrverbindung war ein wesentlicher Bodeneintrag festzustellen (s. Bild 70). Der Stahlring wies an dieser Stelle einen größeren Ringspalt auf und ragte über die äußere Kontur des folgenden Rohres hinaus. Die Maßhaltigkeit der eingebauten Stahlringe ist somit besonders zu beachten und bei der Produktion zu gewährleisten. Die Anforderungen an den Ringspalt sind ggf. auf die zu erwartende Bodenkörnung anzupassen.

a) Freigeschnittene Rohrverbindung

b) Blick auf die Rohrverbindung

Bild 70 Freigelegte Rohrverbindung mit Stahlring zwischen den Rohren 6 und 7

<u>PE-Ring:</u>

Der PE-Ring wurde an den Rohrverbindungen zwischen den Rohren 1-2 und 8-9 eingesetzt. Es konnte durchweg nur ein geringer Eintrag von Bodenmaterial festgestellt werden. Durch die Flexibilität des Materials in Verbindung mit dem anstehen-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

den Erdruck legte sich der Ring an das nachfolgende Rohr an (s. Bild 71). Hierdurch wurde der entstehende Ringspalt auf ein Minimum reduziert.

a) Freigeschnittene Rohrverbindung b) Anliegender PE-Rings

Bild 71 Freigelegte Rohrverbindung mit PE-Ring zwischen den Rohren 1 und 2

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ausführung ohne jeden äußeren Schutz nur dann empfehlenswert ist, wenn ein ständig überdrückter Querschnitt vorliegt. Ansonsten kann Boden zwischen Druckübertragungsmittel und Rohrstirnfläche eindringen. Besondere Vorteile bieten der PE- und der Stahlring. So passt sich der PE-Ring aufgrund seiner Flexibilität der Rohrverbindung auch unter Abwinkelung an, so dass er insbesondere in nicht standfesten Böden einen zuverlässigen Schutz bietet. Demgegenüber widersteht der Stahlring in standfesten Böden auch scharfkantigen Steinen oder Hindernissen in der Rohrtrasse, die nicht in das umgebende Erdreich verdrängt werden können. Ein weiterer Vorteil des Stahlrings liegt in seiner Formstabilität, die das Zusammenfügen der Rohre unterstützt und darüber hinaus die Steckdichtung bei Transport und Montage der Rohre schützt.

Als ergänzender Schutz kann im Endbereich der Ringe auch ein weiches Moosgummi als Verschluss angebracht werden (s. Bild 72).

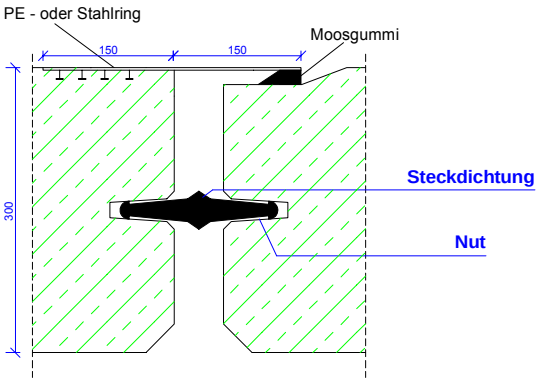


Bild 72 Verschluss des Ringspalts durch Moosgummi

©2002 All rights reserved by GEK mbH

5.9 Dichtheit der Rohrverbindung

Der Dichtheit der Rohrverbindungen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes intensiv untersucht. Für ein Vortriebsrohr sind folgende drei Beanspruchungszustände von besonderer Bedeutung:

1. Die Dichtheit von Außen gegen einen gegebenenfalls anstehenden Druck einer Suspension zur Schmierung des Rohrstrangs.
2. Die Dichtheit von Außen gegen einen Wasserdruck aus Grundwasser.
3. Die Dichtheit von Innen für den Betriebszustand unter Berücksichtigung eventuell auftretender Rückstauereignisse.

Der Nachweis der Dichtheit wurde bei den Beanspruchungen 1 und 2 ausschließlich in Form einer optischen Kontrolle des begehbaren Rohrstrangs durchgeführt. Bei Beanspruchung 3 kamen Muffen- und Strangprüfungen zum Einsatz. Die in den Rohrverbindungen aufgetretenen Abwinkelungen und Verschiebungen sind in Abschnitt 5.3 dargestellt.

<u>Suspensionsdruck:</u>

Eine Suspension zur Schmierung des Rohrstrangs kommt immer dann zum Einsatz, wenn bei längeren Vortrieben die Mantelreibung zur Reduktion der erforderlichen Vortriebskraft verringert werden muss [6]. Zur Simulation dieses Zustands wurden in das Rohr Nr. 5 insgesamt 8 Suspensionsdurchlässe in Rohrmitte über den Umfang verteilt angeordnet (Bild 73).

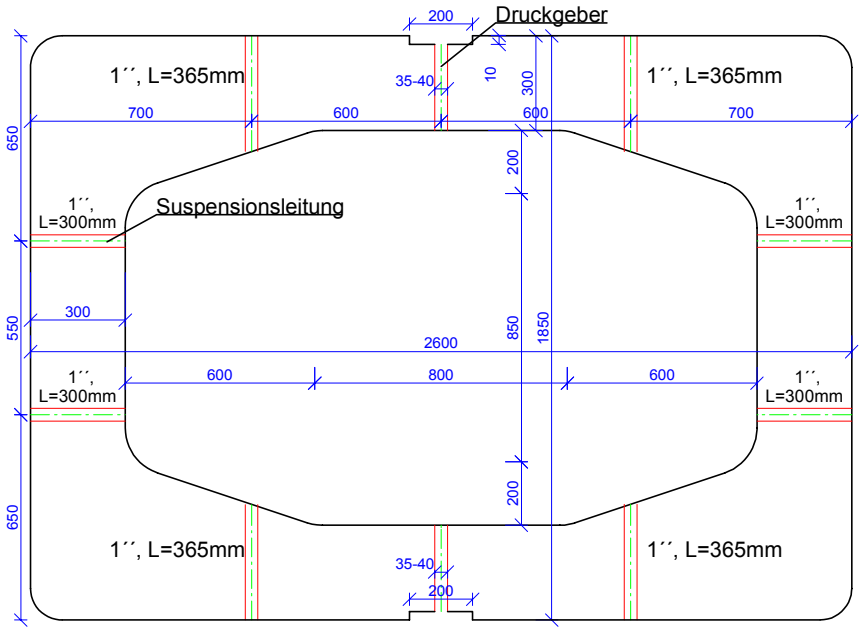


Bild 73 Anordnung der Suspensionsdurchlässe und Druckgeber

Zur Kontrolle des Suspensionsdruckes an der Rohraußenseite wurde oben und unten je ein Druckgeber eingesetzt. Hierdurch sollte festgestellt werden, welcher Anteil

©2002 All rights reserved by GEK mbH

des an den Stutzen aufgebrachten Druckes an der Rohraußenseite entsteht. Bild 74 zeigt das Schlauchsystem zur Verteilung der Suspension auf die acht Verfüllstutzen.

Bild 74 Schlauchsystem zur Verteilung der Suspension

Nach Abschluss des Vortriebs wurde die Suspension in die Ringleitung injiziert. Der Suspensionsdruck wurde direkt vor der installierten Ringleitung gemessen. Da bei einem Druck von ca. 1,6 bar am Verfüllstutzen unkontrolliert Suspension bis zur Bodenoberkante austrat, wurde der Druck nicht weiter erhöht. Es ist zu vermuten, dass die Suspension sich zunächst entlang des Rohrstrangs ausbreitete und dann über der Einfahröffnung zwischen Boden und Versuchsstandwand bis zur Bodenoberkante gelangte.
Bild 75 zeigt den Druckverlauf des am Verfüllstutzen montierten Druckgebers im Vergleich zum Außendruck, gemessen mit dem Geber an der Rohraußenseite.

Deutlich war zunächst der Anstieg des Druckes am Verfüllstutzen festzustellen. Nach einer kurzen Zeitverzögerung (Hohlraumverfüllung) stieg auch der Druck an der Rohraußenseite an, um dann – vermutlich durch Aufbrechen neuer Fließkanäle - wieder kurzfristig abzufallen. Der Druckverlust bewegte sich im Normalfall im Bereich zwischen ca. 0,2 und 0,4 bar.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

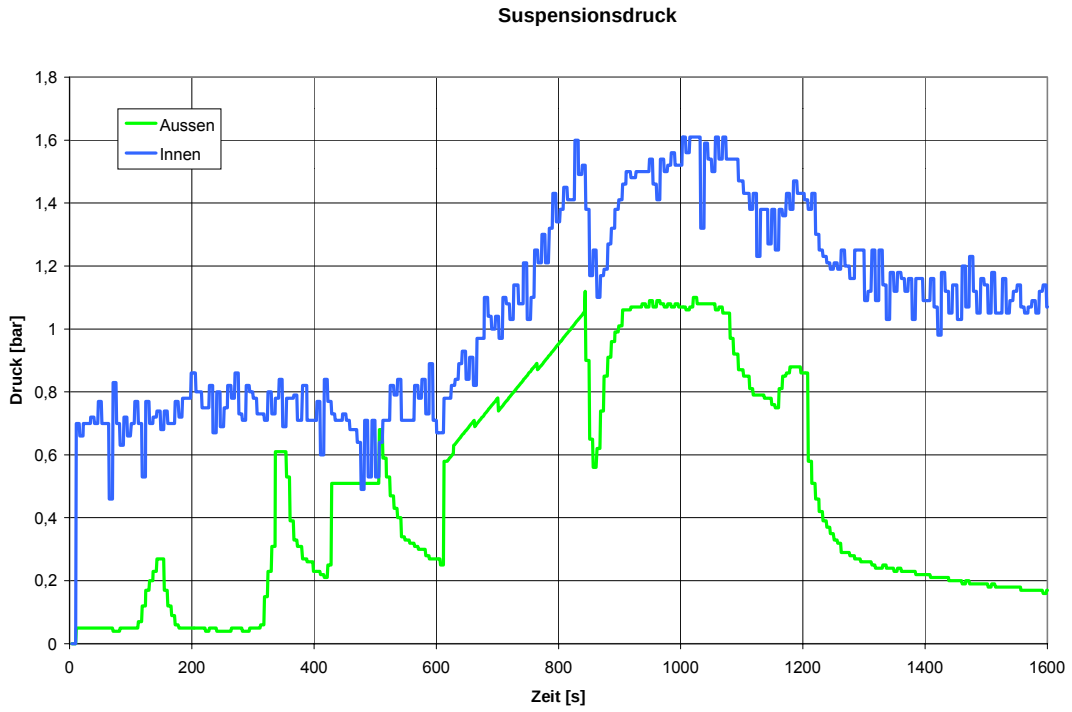


Bild 75 Suspensionsdruck am Verfüllstutzen (Innen) und an der Rohraußenseite (Außen)

Die Sichtprüfung während der Schmierung des Rohrstrangs ergab keinerlei Undichtigkeiten an den Rohrverbindungen. Sollte in der Praxis ein planmäßiger Schmiermitteldruck über die hier überprüften 1,6 bar gewählt werden, sind zusätzliche Dichtheitsprüfungen durchzuführen (vgl. [10]). Alternativ könnten in diesen Fällen auch die Ergebnisse von Innendruckprüfungen als Nachweis herangezogen werden, da bei den installierten Steckdichtungen die Beanspruchung der Dichtung unter Innendruck grundsätzlich mit der Beanspruchung unter Außendruck vergleichbar ist.

Grundwasser:

Nach Abschluss der Vortriebsarbeiten wurde der Rohrstrang einem Außenwasserdruck von 1,3 bar, d.h. 13 m Wassersäule über dem Rohrscheitel, ausgesetzt. Um Umläufigkeiten an den Rohrstrangenden zu vermeiden, wurde die Stahlschneide wasserdicht mit der Rückwand des Großversuchsstandes verschweißt und die Einfahröffnung abgedichtet. Anschließend wurde der Versuchsstand durch die Einlassöffnungen im Boden bis zur vollständigen Sättigung des Erdreichs mit Wasser gefüllt. Nach Montage der Deckelelemente wurde der Wasserdruck bis auf 1,3 bar gesteigert und dieser Druck für eine Stunde konstant gehalten. Die Erddruckgeber und Druckgeber zur Messung des Wasserüberdrucks im Großversuchsstand bestätigten die Druckerhöhung. An den im Versuchsstand eingebauten Inklinometern und Ex-

©2002 All rights reserved by GEK mbH

tensiometern konnten keine signifikanten Bodenverschiebungen festgestellt werden. Ebenso zeigten die Wegaufnehmer keine Verschiebungen in den Rohrverbindungen. Während der gesamten Dauer der Prüfung bei 1,3 bar konnten bei optischer Kontrolle keine Undichtigkeiten an den mit Steckdichtung ausgebildeten Rohrverbindungen festgestellt werden.

Dichtheitsprüfungen von Innen:

Es wurden sowohl Muffen-, als auch Strangprüfungen durchgeführt. Bei den Muffenprüfungen konnten zwei Rohrverbindungen nicht geprüft werden. Zwischen den Rohren 4-5 waren anstelle der Dichtung zur Spannungsmessung Druckfolien eingebaut worden und zwischen den Rohren 1-2 reichte aufgrund der Einbauten für die Steuerpressen der verbliebene Raum nicht mehr zur Platzierung der Prüfeinrichtung aus. Alle übrigen Rohrverbindungen wurden einer Dichtheitsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1610 [23] mit Wasser und mit Luft als Prüfmedium unter den Randbedingungen nach Tabelle 6 unterzogen.

Tabelle 6 Randbedingungen der Prüfungen nach DIN EN 1610 [23]

Randbedingung	Wasserdruckprüfung	Luftüberdruckprüfung
Prüfverfahren	W	LD
Prüfoberfläche:	6 m^2	-
Prüfzeit:	30 Minuten	5 Minuten
Prüfdruck:	500 mbar	200 mbar
Zulässiger Druckabfall:	-	15 mbar
Zulässige Wasserzugabe:	0,15 l/m^2 (= 0,9 l)	-

Bild 76 zeigt einen Blick in den Rohrstrang während der Durchführung einer Dichtheitsprüfung. Die verwendete Prüfeinrichtung wurde speziell für die hier zur Anwendung kommende Querschnittsform angefertigt.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 76 Blick in den Rohrstrang mit installierter Muffenprüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung schloss nicht bei allen Rohrverbindungen dicht mit der Rohrwand ab. An der Innenseite der Vortriebsrohre fanden sich sehr kleine für Stahlbeton durchaus übliche Risse mit Rissweiten weit unterhalb der nach DIN 4035 [8] zulässigen Rissbreite von 0,2 mm. Diese Risse konnten z.T. durch das Dichtgummi der Prüfeinrichtung nicht abgedichtet werden, so dass es zu Umläufigkeiten kam (s. Bild 77).

Bild 77 Wasseraustritt während der Dichtheitsprüfung

Die Risse wurden daraufhin an den betroffenen Rohrverbindungen allein für die Dichtheitsprüfung durch Spachtelmasse geschlossen. Grundsätzlich stellten diese

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Risse allerdings keine Beschädigung des Rohres dar. Die Ergebnisse der Prüfungen sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7 Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an den Rohrverbindungen

Verbindung zwischen Rohr	2-3	3-4	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Wasserzugabe [l]	0,2	0,5	-	0,4	0,3	-	0,5
Druckabfall [mbar]	14	12	-	11	10	-	9

Zwei Rohrverbindungen waren trotz intensiver Nachbehandlung nicht prüffähig. Daher wurde beschlossen, nach dem Freilegen den gesamten Rohrstrang einer Dichtheitsprüfung zu unterziehen. Dies bot den Vorteil der Zugänglichkeit aller Rohrverbindungen zur optischen Kontrolle. Außerdem bestand die Möglichkeit den Druck während der Prüfung auf 1,0 bar zu erhöhen und somit über die Norm hinausgehende Anforderungen zu testen. Für die Prüfung wurde nach dem Ausbau des Bodens die offene Seite mit einer Stahlplatte, welche Öffnungen für die Befüllung und Entlüftung besaß, verschlossen und der gewünschte Wasserdruck aufgebracht und für 30 Minuten konstant gehalten (s. Bild 78).

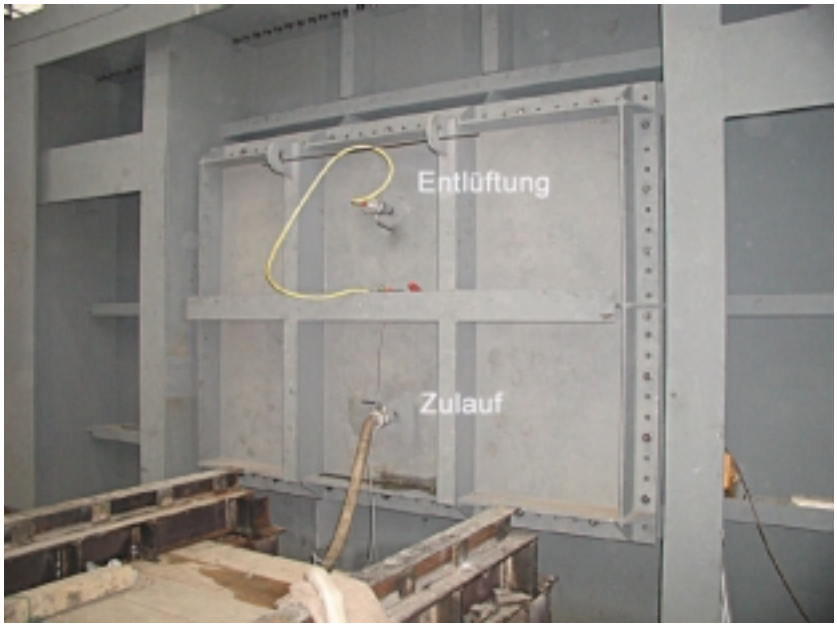


Bild 78 Verschlussplatte für die Strangprüfung

Die optische Kontrolle der Rohrverbindungen ergab keinen Wasseraustritt während der Prüfzeit. Einzig an den senkrechten Stahlträgern im ersten und zweiten Rohr zeigte sich eine geringfügige Undichtigkeit (s. Bild 79).

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Bild 79 An den Aussparungen während der Strangprüfung austretendes Wasser

Da die Stahlträger nachträglich einbetoniert wurden, deutet dies auf einen mangelhaften Verbund zwischen dem Alt- und dem Neubeton hin. Um die Dichtheit zu verbessern, sollte bei zukünftigen Produktionen nur eine Aussparung und keine durchgehende Öffnung für den Einbau derartiger Elemente zur Anwendung kommen. Die verbleibende Dicke des Rohrbetons sollte in Anlehnung an die Mindestwanddicke von Betonrohren [9] mindestens 60 mm betragen, um die Dichtwirkung zu gewährleisten.
Die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass derzeit keine Verbesserungen an der hier eingesetzten Dichtung erforderlich sind. Im Pilotprojekt sollte dieser Aspekt der Dichtheit der Rohrverbindung jedoch ergänzend betrachtet werden, um die hier unter Laborbedingungen erzielten Ergebnisse zu verifizieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der gesteuerte Vortrieb von Rohren mit Rechteckquerschnitt blieb bisher aufgrund gravierender Schadensfälle auf wenige Baumaßnahmen beschränkt, obwohl deren Einsatz erhebliche technische und wirtschaftliche Vorteile bieten kann.
Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen war die Erprobung eines neuartigen Konzeptes für den Vortrieb von Stahlbetonrohren mit Rechteckquerschnitt. Hierbei wurde der im Forschungsprojekt Teil 1 entwickelte Rohrprototyp im Teil 2 weiteren praxisnahen Belastungsszenarien in Form von Vortriebsversuchen im Maßstab 1:1 im Großversuchsstand des IKT unterzogen.
Zunächst wurden in enger Zusammenarbeit mit Baufirmen, Dichtmittelherstellern, Fachvereinigungen, Netzbetreibern und Rohrherstellern wesentliche Optimierungen

©2002 All rights reserved by GEK mbH

des ersten Rohrprototypen erarbeitet und umgesetzt. Diese Optimierungen betrafen insbesondere die Ausführung der Dichtung und deren Führungsnut im Rohr. Beispielsweise wurde die Dichtung und die dazugehörige Nut verlängert, um die Sicherheitsreserven bezüglich der Dichtheit zu erhöhen. Außerdem wurden unterschiedliche Schutzmechanismen gegen das Eindringen von Bodenmaterial in die Rohrverbindung konzipiert und in den Rohrprototyp integriert.
Nach der Produktion der Rohre wurden gemeinsam mit den Projektbeteiligten die Randbedingungen für den Vortriebsversuch bezüglich Bodenarten, Überdeckungshöhe, Verkehrsbelastung und Grundwasserstand sowie ein geeignetes Bauverfahren ausgewählt. Es wurde ein steuerbarer Schild eingesetzt und der Boden an der Ortsbrust von Hand abgebaut.
Der gesamte Vortrieb wurde mit Hilfe umfangreicher Messtechnik begleitet. Diese bestand beispielsweise aus Extensiometern und Inklinometern zur Aufnahme von Bodenverschiebungen, Erddruckgebern zur Messung der horizontalen und vertikalen Bodenspannungen und zahlreichen Wegaufnehmern zur Aufnahme der relativen Bewegungen der Rohre zueinander.
Sowohl während als auch nach Abschluss des Vortriebs wurden zusätzliche Belastungen auf den Rohrstrang aufgebracht, so z.B. statische und dynamische Belastungen an der Geländeoberkante, zeitweises Überpressen des Rohrstrangs und Bentonitschmierung. Nach Vortriebsende wurde der gesamte Rohrstrang gegen die hintere Stirnwand des Versuchsstandes gepresst, um auch größere für längere Vortriebsstrecken typische Pressenkräfte aufzubringen. Anschließend wurde jede Rohrverbindung einzeln einer Dichtheitsprüfung unterzogen. Nach Bodenausbau wurde darüber hinaus eine abschließende Strangprüfung mit vollständiger Wasserfüllung durchgeführt.
Der freigelegte Rohrstrang wurde einer optischen Kontrolle hinsichtlich möglicher äußerer Beschädigungen unterzogen.

Die wesentlichen Ergebnisse aus Teil 2 des Forschungsprogramms „Rechteckquerschnitt“ können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- *Steuerbarkeit des Rohrstrangs*
  Der Rohrstrang ließ sich im angestrebten Maße steuern. So konnten Lagekorrekturen durchgeführt werden, welche auch bei längeren Distanzen eine zielgerechte Herstellung eines Rohrstrangs erwarten lassen. Zur Reduktion der Steuerkräfte sollten die Steuerpressen möglichst nahe an der Außenseite der Rohre liegen.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

- *Kraftübertragung im Rohrverbindungsbereich*
  Es ist zu empfehlen, dass die Anteile der plastischen und elastischen Verformungen der Druckübertragungsmittel individuell auf die Anforderungen der jeweiligen Baumaßnahme eingestellt werden. So sind bei längeren Vortrieben große elastische Verformungen zu vermeiden, um starke Rückverformungen bei Entlastung der Hauptpressen und damit eine unkontrollierbare „Verlängerung“ des Rohrstrangs auszuschließen, während bei kurzen wechselnd gekrümmten Trassen plastische Verformungen zu reduzieren und Abwinkelungen allein durch elastische Verformungen anzustreben sind. Sowohl die Labor- als auch die Vortriebsversuche bestätigten den günstigen Einfluss eines hohen elastischen Verformungsanteils auf die zulässige Vortriebskraft bei Kurvenfahrten (vgl. PU im Vergleich zu Sandwichkonstruktion bzw. Spanplatte).

- *Verrollung*
  Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche konnten nur beim Überfahren eines eingebauten Findlings signifikanten Verrollungen festgestellt werden. Diese ließen sich jedoch durch einen entsprechenden Bodenabbau an der Ortsbrust kompensieren.

- *Eindringen von Boden in die Rohrverbindung*
  Es wurden 2 unterschiedliche Schutzmaßnahmen gegen das Eindringen von Bodenmaterial untersucht (PE-Ring, Stahlring). Die ebenfalls betrachtete Ausführung ohne jeden äußeren Schutz ist nur dann empfehlenswert, wenn ein ständig überdrückter Querschnitt vorliegt. Der PE-Ring passt sich der Rohrverbindung aufgrund seiner Flexibilität auch unter Abwinkelung an, so dass er insbesondere in nicht standfesten Böden einen zuverlässigen Schutz bietet. Demgegenüber widersteht der Stahlring in standfesten Böden auch scharfkantigen Steinen oder Hindernissen in der Rohrtrasse, die nicht in das umgebende Erdreich verdrängt werden können. Ein weiterer Vorteil des Stahlrings liegt in seiner Formstabilität, die das Zusammenfügen der Rohre unterstützt und darüber hinaus die Steckdichtung bei Transport und Montage der Rohre schützt.

- *Dichtheit der Rohrverbindung*
  In allen geprüften Betriebszuständen konnte eine Dichtheit der Rohrverbindung eindeutig nachgewiesen werden. Außenwasserdruck, Innenwasserdruck und der Druck resultierend aus einer Schmierung mit Bentonit konnten problemlos aufgenommen werden. Auch entstanden durch Abwinkelungen der Rohre keine Undichtigkeiten. Probleme bei der Durchführung der Muffenprüfung waren auf feine,

©2002 All rights reserved by GEK mbH

bei Stahlbetonbauteilen durchaus übliche Risse zurückzuführen. Diese sind vor der Prüfung zunächst durch Spachtelmasse zu verschließen.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse des Forschungsvorhabens durchweg als positiv zu bezeichnen. Das entwickelte Rohr einschließlich Rohrverbindung erfüllt grundsätzlich alle Anforderungen wie sie auch in der Praxis gestellt werden. Dazu gehören insbesondere die zuverlässige Dichtheit und Handhabbarkeit des Systems. Verbesserungspotenziale wurden identifiziert und entsprechende Umsetzungsvorschläge herausgearbeitet. Ein Praxiseinsatz im Rahmen eines Pilotvorhabens bietet sich an und wird gegenwärtig vorbereitet.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

Literatur

[1] Barsch, Erhard: Durchpressen größerer Stahlbetonquerschnitte durch einen Damm. Bauplanung, Bautechnik 19 (1965) 11.

[2] Drigert; Zuhrt: Zur Bestimmung der Einleitungskräfte bei örtlicher Lasteintragung. Bauplanung, Bautechnik 41 (1987) 6.

[3] Stein, D.; Möllers, K.; Bielecki, R.: Leitungstunnelbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1988.

[4] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 1998.

[5] Stein, D.; Conradin, F.; Drewniok, P.; Körkemeyer, K.; Laistner, H.: Begehbare Leitungsgänge – Herstellung und Finanzierung. Tagungsband NO-DIG, Hamburg 1991

[6] Stein, D.; Falk, C.; Liebscher, M.: Endbericht zu den Untersuchungen über den unterirdischen Vortrieb von Stahlbetonrohren mit Rechteckquerschnitt, Teil I. IKT, 01/1999.

[7] ATV-Arbeitsblatt 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren. St. Augustin, Januar 1990.

[8] DIN 4035: Stahlbetonrohre und zugehörige Formstücke. August 1995.

[9] Fachvereinigung für Beton- und Stahlbetonrohre: Qualitätsrichtlinie. Bonn, 1994.

[10] ATV-Arbeitsblatt 125: Rohrvortrieb. Sankt Augustin, September 1996.

[11] DIN 19550:

[12] Magnus, W.: Gesteuerter Vortrieb von Rechteckprofilen – Technischer Erläuterungsbericht. GSTT - Beratungsservice GmbH, Hamburg 2000. Unveröffentlicht.

[13] Information der Fa. DEPLEX, Japan.

[14] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE - StB 94. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen. 1997.

[15] M. Scherer: Hohlraumvermessung und Positionsbestimmung in begehbaren Leitungstunneln. 6. Internationaler Kongress Leitungsbau 2000, Hamburg.

[16] Juretzko, M.; Scherer, M.: Ein System zur hochgenauen polaren Fassadenvermessung. Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, München 2000, 400-405, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2000.

©2002 All rights reserved by GEK mbH

[17] Witte, B.; Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 4. Auflage, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2000.

[18] Juretzko, M.: Bericht über die Messungen beim Rohrvortriebsversuch im Institut für Unterirdische Infrastruktur. 2/2002, Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum. Unveröffentlicht.

[19] Scherle, M.: Rohrvortrieb, Band 2. Statik, Planung, Ausführung. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1977.

[20] N.N.: Micro Tunneling Jacking Force. Unveröffentlichte Information der Working Group No. 3 (Microtunneling) der ISTT, 1995.

[21] Beckmann, D.: Ermittlung der axialen Kontaktspannung beim Vortrieb von Rechteckquerschnitten. Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH 3/2002, unveröffentlicht.

[22] Tekscan: Pressure Measurement System. User´s Manual. 11/1999.

[23] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. Oktober 1997.

©2002 All rights reserved by GEK mbH