Abschlussbericht

Thema: „Entwicklung und Praxiserprobung eines Überwachungssystems zur Vermeidung von Schäden an Vortriebsrohren“
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Ausführende Stellen:
RWTH Aachen
ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

Emschergenossenschaft
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen

Auftraggeber:
Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf

Aachen im Mai 2006

Dr.-Ing. Rainard Osebold
Universitätsprofessor

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 4
2. Stand der Technik 5
2.1. Belastungen auf Vortriebsrohre 5
2.2. Statische Bemessung von Vortriebsrohren 6
2.3. Untersuchung der Belastung von Vortriebsrohren im Bauzustand 8
2.4. Bemessung von Vortriebsrohren nach dem Entwurf DWA A 161 18
3. Online-Überwachungssystem zur Qualitätssicherung von Rohrvortrieben 19
3.1. Online-Überwachung der Rohrbelastung 19
3.2. Baustelleneinsatz des Online-Überwachungssystems 23
3.2.1. Erster Vortriebabschnitt 24
3.2.2. Zweiter Vortriebsabschnitt 28
3.2.3. Dritter Vortriebsabschnitt 30
3.3. Online-Berechnung der zulässigen Vorpresskraft 31
3.4. Dokumentation der Vorpresskräfte 33
4. Zusammenfassung 37
5. Literaturverzeichnis 39
Anhang 40
Anhang A1 Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11 40
Anhang A2: Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6 47
Anhang A3: Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3 53

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Schäden an Vortriebsrohren 5
Bild 2: Kräftegleichgewicht beim Rohrvortrieb 6
Bild 3: Bestimmung der zulässigen Vorpresskraft nach ATV-A 161 8
Bild 4: horiz. Ablage der Vortriebsmaschine und gemessene Rohrverwinkelung 9
Bild 5: ansteigender Felshorizont als Ursache für Abweichungen von der Sollachse 11
Bild 6: Prinzip der Koppelnavigation 12
Bild 7: seitliche und vertikale Ablage einer Vortriebsmaschine über die Vortriebslänge 13
Bild 8: Abweichungen der Rohrspiegelfläche von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse 14
Bild 9: zulässige Abweichungen von der Rechtwinkligkeit nach ATV A 125 15
Bild 10: Versuchsstand zur Untersuchung des Belastungszustands von Vortriebsrohren 16
Bild 11: Messtechnik zur Erfassung der Druckspannungsverteilung und Messergebnisse 17
Bild 12: Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm für eine OSB- und eine Vollholz-Probe 18
Bild 13: Rohrverwinkelung φ_A zur Berücksichtigung von Versteuerungen 19
Bild 14: Rechengang zur Fugenspannungsbestimmung 21
Bild 15: Messtechnik zur Fugenspaltvermessung 21
Bild 16: Messtechnik zur Fugenspaltvermessung 22
Bild 17: Seilzugwegaufnehmer zur Fugenspaltvermessung 23
Bild 18: Vortriebsmaßnahme „Vorthbach“ der Emschergenossenschaft 24
Bild 19: Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11 25
Bild 20: horizontale und vertikale Abwinkelung Abschnitt VTB16 – VTB11 26
Bild 21: Fugenklaffungmaß z/d_a der Messfuge 1, Abschnitt VTB16 – VTB11 27
Bild 22: Fugenklaffungmaß z/d_a der Messfuge 3, Abschnitt VTB16 – VTB11 28
Bild 23: Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6 29
Bild 24: horizontale Abwinkelung Abschnitt VTB9 – VTB6 29
Bild 25: Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3 30
Bild 26: horizontale Abwinkelung Abschnitt VTB6 – VTB3 31
Bild 27: Screenshot des Online-Überwachungssystems, Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11 32
Bild 28: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11 33
Bild 29: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6 34
Bild 30: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3 35
Bild 31: zul. und tats. Kraft, simuliert mit Vollholz-Druckübertragungring, 3.Vortriebsabschnitt 36

1. Einleitung

Die Verlegung von Kanälen in geschlossener Bauweise gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Gründe hierfür sind in erster Linie, dass innerstädtisch die bei offener Bauweise notwendigen großen Baugruben kaum zu realisieren sind und die größeren Verlegetiefen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die Verlegung im Rohrvortriebsverfahren sprechen. Aber nicht nur innerstädtisch, sondern auch außerhalb der Kernbebauung findet bei Kanalbaumaßnahmen mit größeren Rohrquerschnitten der Rohrvortrieb eine immer breitere Anwendung. So werden von der Emschergenossenschaft zum Umbau des Emschersystems im nächsten Jahrzehnt rd. 300 km Abwasserkanäle neu erstellt, wovon ca. 200 km als Rohrvortrieb geplant sind [1]. In nächster Zukunft ist der Abwasserkanal Emscher zwischen Dortmund und Dinslaken herzustellen. Auf der 58 km langen Strecke werden die Rohrdurchmesser zwischen DN 1400 und DN 3400 aufweisen und aufgrund der großen Tiefenlage von bis zu 35 m weitestgehend unterirdisch vorgetrieben.

Als Lebensdauer werden für die neuen Kanäle oftmals bis zu 100 Jahre angesetzt. Um diese hohe Erwartung sicherzustellen, werden erhebliche Anstrengungen zur Qualitätssicherung, insbesondere bei der Planung (z.B. Kanalbelüftung, Reinigungssystem), bei der Rohrherstellung (Qualitätssicherungsprogramm) sowie für den Kanalbetrieb und die Wartung (Sensorik für Überwachung) unternommen.

Wie sich in der Vergangenheit gezeigt hat, sollte jedoch auch ein besonderes Augenmerk auf den Einbau der Rohre gelegt werden, denn auch bei sorgfältiger Planung und normenkonformer Dimensionierung der Rohre ist es bei Rohrvortrieben immer wieder zu Schäden gekommen. Neben aus dem Rohrinneren erkennbaren Schäden sind besonders die Rohraußenseiten im Bereich der Rohrverbindungen gefährdet (Bild 1). Diese Schäden sind vom Inneren der Rohre aus durch optische Inspektion nicht zu erkennen.

Bild 1: Schäden an Vortriebsrohren

Durch Korrektursteuerungen, insbesondere aber auch bei planmäßigen Kurvenfahrten, kommt es zu Verwinkelungen der Rohre in den Rohrverbindungen. Diese haben hohe Spannungskonzentrationen an den Rohraußenseiten zur Folge, die durch die Bewehrungsanordnung zu flächigen Abplatzungen führen können.

Geringere Schäden an der Rohraußenseite sind vom Rohrinneren durch optisch Inspektion nur schwer zu erkennen. Auch bei einer Dichtheitsprüfung ausgewählter Rohrfugen, die standardmäßig im Rahmen einer Abnahme der erstellten Leitung durchgeführt wird, werden Schäden an der Rohraußenseite oftmals nicht registriert, da der zwischen den Rohren angeordnete Druckübertragungsring einen vorübergehenden Dichtungserfolg gewährleistet. Die Konsequenzen solcher Schäden führen bei geringfügigen Abplatzungen im Bereich des Dichtungsringes zu einem Verlust der Dichtwirkung, bei großen schalenförmigen Abplatzungen durch Bewehrungskorrosion zu einem Verlust der statischen Tragfähigkeit. Die Nutzungsdauern sind in diesen Fällen erheblich reduziert, die Kosten einer Sanierung aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit sehr hoch und der längerfristige Erfolg dieser Sanierungen ist fraglich.

Ziel dieses Vorhabens war es daher, ein praxisgerechtes Überwachungssystem, bestehend aus einer Sensorik, sowie eines Erfassungs- und Analyseprogramms, zu entwickeln und zu erproben, mit dem bei Großrohrvortrieben während des Vortriebs Schäden durch Überbeanspruchungen sicher vermieden werden. Durch das System soll sichergestellt werden, dass die bei der statischen Bemessung der Rohre zugrunde gelegten Annahmen eingehalten werden. Weiterhin sollen die mit dem Überwachungssystem an ausgewählten Rohrvortrieben gewonnenen Daten als Grundlage für eine Verbesserung der Statik, Konstruktion und Verbindungstechnik bei großen Vortriebsrohren dienen.

2. Stand der Technik

2.1. Belastungen auf Vortriebsrohre

Vortriebsrohre unterliegen im Bau- und Betriebszustand verschiedenen Einwirkungen, die im Bauzustand sowohl in Richtung der Rohrachse als auch quer dazu wirken. Im Betriebszustand wirken keine Belastungen mehr in Richtung der Rohrachse. Die zum Vortrieb der Rohre erforderliche Vorpresskraft stellt im Regelfall die wesentliche Einwirkung auf Vortriebsrohre dar, die aus diesem Grund für die quer zur Rohrachse wirkenden Belastungen zumeist statisch überdimensioniert sind.

Zum Vortrieb der Rohre muss der Vortriebswiderstand von den Pressen in der Pressgrube überwunden werden. Dieser Widerstand setzt sich zum einen aus dem Spitzenwiderstand am Schneidwerkzeug und zum anderen aus der Mantelreibung zwischen den Rohren und dem umgebenden Boden zusammen (Bild 2). Während sich der Spitzenwiderstand in der Regel nur bei Wechseln in der Geologie (Übergang Lockergestein - Festgestein) oder beim Überfahren von Hindernissen ändert, nimmt die Resultierende der Mantelreibung und damit die aufzubringende Vortriebskraft mit ansteigender Vortriebslänge zu.

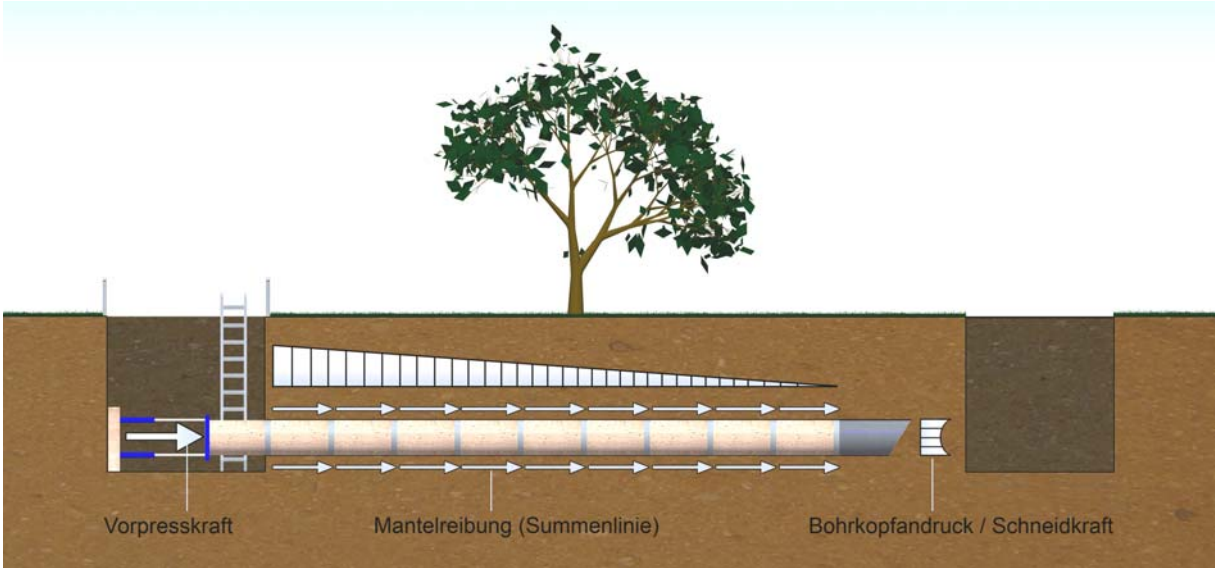


Bild 2: Kräftegleichgewicht beim Rohrvortrieb

Die Vortriebskraft wird von den Presszylindern auf das jeweils zuletzt eingebaute Rohr aufgebracht und von Rohr zu Rohr bis zur Vortriebsmaschine übertragen. Die Rohrfugen müssen dabei so ausgebildet sein, dass die Vortriebskraft schadlos zwischen den Rohren übertragen werden kann.

2.2. Statische Bemessung von Vortriebsrohren

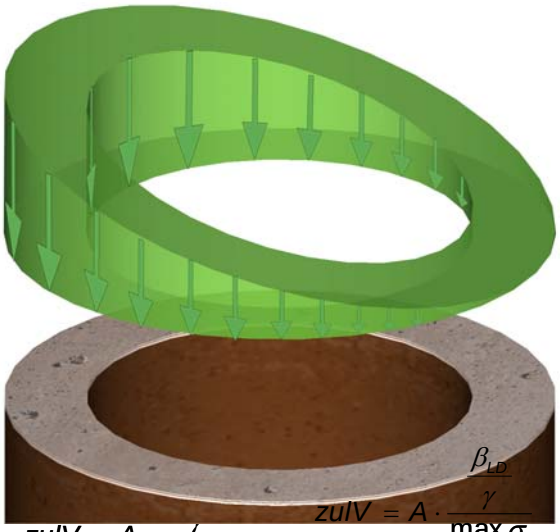
Die statische Berechnung von Rohrvortrieben wird durch mehrere Regelwerke bestimmt. Das ATV Arbeitsblatt 125 [2] regelt technische Details von Rohrvortrieben und liefert beispielsweise Grenzwerte für die zulässige Abweichung der Rohrspiegelflächen von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse sowie für die zulässige Abweichung der Vortriebsmaschine von der Sollachse.

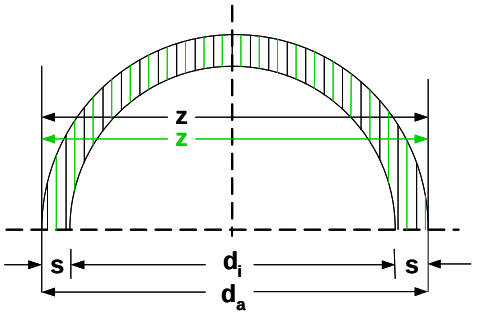
Für die Dimensionierung bzw. Bauteilbemessung der Vortriebsrohre existieren für die unterschiedlichen Rohrwerkstoffe normative Regelwerke, wie beispielsweise DIN 1045-1 [3] für Beton- und Stahlbetonrohre oder die Werksnorm DIN EN 295 [4] für Rohre aus Steinzeug.

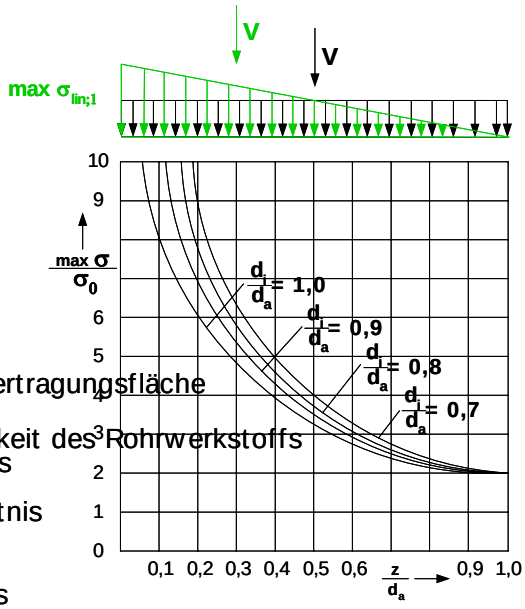
Die Lastannahmen für Vortriebsrohre für den Bau- und Betriebszustand sind im ATV Arbeitsblatt 161 [5] verankert. Mit dem in Kapitel 8 dieses Arbeitsblattes aufgeführten statischen Berechnungsverfahren ist die zulässige Vorpresskraft zu bestimmen. Hierbei müssen im Vorfeld einer Baumaßnahme naturgemäß Annahmen zur Belastung der Rohre getroffen werden, wobei die maßgebende Annahme die Rohrverwinkelung und die daraus resultierende Spannungsverteilung in der Rohrfuge betrifft. In dem Berechungsverfahren wird davon ausgegangen, dass bei planmäßig geradlinigen Vortrieben der zwischen den Stirnflächen eingelegte Druckübertragungsring die auftretenden Rohrverwinkelungen ausgleicht, sodass die beiden Rohrstirnflächen vollständig in Kontakt bleiben und keine Klaffung zwischen den Rohren auftritt. Hieraus resultiert die in Bild 3 grün dargestellte, dreieckförmige Spannungsverteilung in der Rohrfuge, bei der die äußerste, der höchsten Druckspannung gegenüberliegende Faser gerade unbelastet ist (Fugenklaffungsmaß $z/d_a=1$). Dieser dreieckförmigen Verteilung liegt zudem die Annahme eines über den gesamten Vortriebsverlauf unveränderten linearen E-Moduls des Druckübertragungsringes zugrunde.

Die maximale Druckspannung an der äußersten Faser des Rohrspiegels wird zur Bestimmung der zulässigen Vorpresskraft mit der um den Sicherheitsbeiwert γ abgeminderten Druckfestigkeit des Rohrwerkstoffes verglichen. Hierbei wird beispielsweise für Stahlbeton 60% der tatsächlichen Mindest-Druckfestigkeit angesetzt. In Verbindung mit dem Sicherheitsbeiwert ergibt sich für Stahlbetonrohre hierdurch ein Sicherheitsniveau von etwa 2,7.

Die zulässige Vorpresskraft ergibt sich aus der Integration der dreieckförmigen Spannungsverteilung über die Druckkraft übertragende Fläche nach der in Bild 3 dargestellten Formel.







$$zulV = A \cdot \frac{\frac{\beta_{LD}}{\gamma}}{\frac{\max\sigma}{\sigma}}$$

$$zulV = A \cdot \frac{\frac{\beta_{LD}}{\gamma}}{\frac{\max\sigma}{\sigma}}$$

mit: $A = \frac{(d_a^2 - d_i^2)\cdot\pi}{4}$

A: kleinste Druckübertragungsfläche

β_{LD}: Längsdruckfestigkeit des Rohrwerkstoffs

$\frac{\max\sigma}{\sigma}$: Spannungsverhältnis

mit: $A = \frac{(d_a^2 - d_i^2)\cdot\pi}{4}$

A: kleinste Druckübertragungsfläche

β_{LD}: Längsdruckfestigkeit des Rohrwerkstoffs

$\frac{\max\sigma}{\sigma}$: Spannungsverhältnis

Bild 3: Bestimmung der zulässigen Vorpresskraft nach ATV-A 161

Die Vorpresskraft für Vortriebe mit gekrümmter Linienführung ist nach dem Arbeitsblatt 161 unter Berücksichtigung einer Fugenklaffung zu berechnen, allerdings werden keine Angaben zur Rohrverwinkelung oder zum Fugenklaffungsmaß z/d_a gemacht.

2.3. Untersuchung der Belastung von Vortriebsrohren im Bauzustand

Die maßgebende Einflussgröße auf die Belastung von Vortriebsrohren im Bauzustand ist neben der Vortriebskraft die gegenseitige Verwinkelung der Vortriebsrohre. Bisher wird eine Ermittlung bzw. Messung der Rohrverwinkelung in Rohrvortrieben nicht gefordert und ist auch nicht Stand der Technik, obwohl deren Kenntnis aus den oben aufgeführten Gründen äußerst wichtig ist.

Allenfalls sporadisch, in kritischen Situationen und nachträglich bei eingetretenen Schadensfällen werden von Hand Fugenmaße gemessen und hieraus Verwin-

kelungen abgeleitet. Letzteres ist jedoch schon daher ungenau, weil durch Fertigungstolleranzen Rohrspiegel weder exakt planparallel noch genau achsrechtwinkelig sind.

Aus diesem Grund wurde am ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb ein Forschungsvorhaben durchgeführt, in dem bei drei Vortriebsabschnitten einer Baumaßnahme der Stadtentwässerungsbetriebe Köln die tatsächliche Verwinkelung von Vortriebsrohren vortriebsbegleitend gemessen wurde [6].

Mit einer Messtechnik wurden unter anderem die Ablage der Vortriebsmaschine von der Sollachse und die Spaltmaße an zwei Messfugen ermittelt und protokolliert. Aus den Fugenspaltmaßen wurde mit einer nachgeschalteten Software die Fugenverwinkelung berechnet. Die Ergebnisse sind exemplarisch für die ersten 20 Meter des dritten Vortriebsabschnitts in Bild 4 dargestellt.

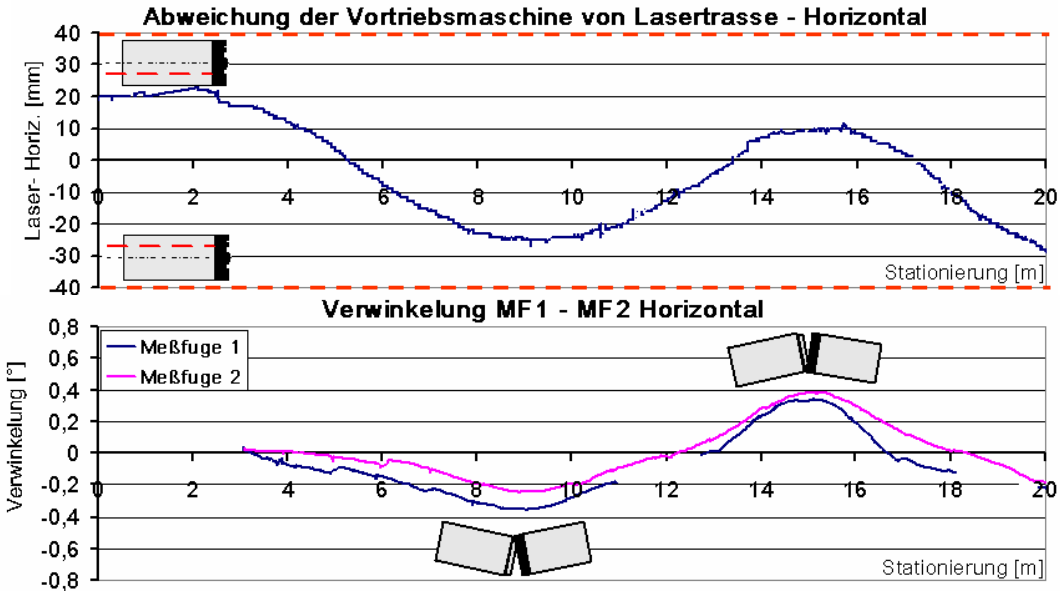


Bild 4: horiz. Ablage der Vortriebsmaschine und gemessene Rohrverwinkelung

Im oberen Bildabschnitt ist die seitliche Ablage der Vortriebsmaschine von der Sollachse abgebildet. Obwohl die Vortriebsmaschine in diesem Abschnitt durch Steuerbewegungen innerhalb des nach ATV A 125 zulässigen Grenzwerts von 25mm gehalten wurde, stellten sich in den Messfugen Verwinkelungen von maximal 0,4° ein. Dies ist ein häufig zu beobachtender Effekt beim Einfahren der Vortriebsmaschine in den Boden, da die zumeist mit einem Gelenk ausgestattete Vortriebsmaschine kurz hinter dem Startschacht noch keine Führung durch den umgebenden Boden besitzt und somit ein Steuern der Vortriebsmaschine auf den ersten Metern nahezu unmöglich ist. Hierdurch verursacht lassen sich Lagetoleranzen, die beim Einfahren unvermeidbar sind, zunächst nicht korrigieren. Bei dem zuvor erwähnten dritten Vortriebsabschnitt stellte sich beim Einfahren der Maschine eine seitliche Lageabweichung von 20mm ein. Die Abweichung stieg bis

zur Station 2m noch moderat an, bevor die Maschine zur Sollachse zurückgesteuert werden konnte. Jedoch wurde die Gegensteuerung, um die Maschine auf der Sollachse zu stabilisieren, nicht rechtzeitig eingeleitet, sodass ab der Station 5m eine Abweichung zur gegenüberliegenden Seite eintrat, die wiederum korrigiert werden musste. Diese Pendelbewegung um die Sollachse ist insbesondere nach dem Einfahren von Vortriebsmaschinen in den Boden oftmals zu beobachten. Im Laufe des Vortriebs kann die Maschinenfahrt dann in der Regel stabilisiert werden.

Hohe Verwinkelungen, die zumeist kurz hinter dem Startschacht auftreten, führen aber insbesondere an dieser Stelle zu hohen Belastungen der Vortriebsrohre. Die Verwinkelungen reduzieren sich aufgrund von Einschleifeffekten zumeist nicht signifikant, sodass sämtliche Rohre, die diese Stelle passieren, hohe Verwinkelungen erfahren. Im Laufe des Vortriebs steigt die zum Vortreiben erforderliche Pressenkraft durch die Zunahme der Mantelreibungskraft kontinuierlich an, sodass insbesondere die letzten Rohre, die beim Vortrieb eingebaut werden, hohe Längskräfte an der Stelle der höchsten Verwinkelung erfahren. So treten Schäden, die durch die am Anfang des Vortriebs entstandenen Verwinkelungen verursacht werden, oftmals erst am Ende des Vortriebs auf.

Neben den zuvor beschriebenen Versteuerungen führen weitere Einflüsse zu einem Abweichen der Vortriebsmaschine von der Sollachse. Insbesondere bei einem Wechsel der Geologie in der Vortriebstrasse, wie ein in Bild 5 dargestellter, flach ansteigender Felshorizont, kann die Vortriebsmaschine kaum auf der Sollachse gehalten werden. Oftmals steigt die Maschine zunächst auf dem Felshorizont an, bis der Maschinenführer die Vortriebsmaschine in einem ausreichend großen Winkel zu dem Fels anstellen kann, um in diesen einzudringen. Die hierdurch verursachte Abweichung führt zu einer gegenseitigen Verwinkelung aller nachfolgenden Vortriebsrohre.

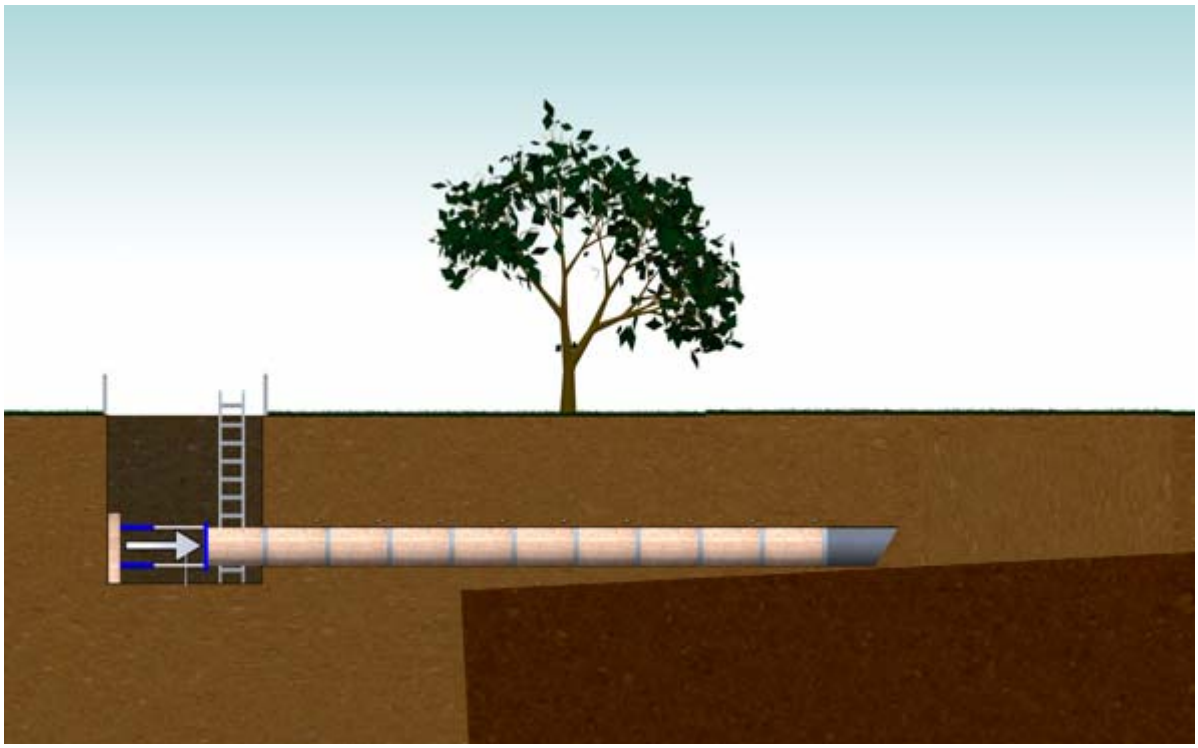


Bild 5: ansteigender Felshorizont als Ursache für Abweichungen von der Sollachse

Einen weiteren Einfluss auf Abweichungen der Vortriebsmaschine und dadurch bedingte Verwinkelungen haben die Steuer- und Navigationssysteme der Vortriebsmaschine, die in absolut und relativ messende Systeme unterschieden werden. Ein absolut messendes System zur Bestimmung der Höhe der Vortriebsmaschine ist beispielsweise die elektronische Schlauchwasserwaage, die über das Prinzip der kommunizierenden Röhren die absolute Höhendifferenz zwischen einem Sensor in der Vortriebsmaschine und einem Referenzsensor im Startschacht bestimmt. Die beiden Sensoren sind mit einem fluidgefüllten Schlauch miteinander verbunden, der mit dem Vortriebsfortschritt verlängert wird. Hierdurch kann die Höhe der Vortriebsmaschine unabhängig von der Vortriebslänge sehr präzise bestimmt werden. Die seitliche Ablage der Vortriebsmaschine kann bei geradlinigen Vortrieben mit einem Lasersystem vermessen werden. Hierbei trifft ein parallel zur Sollachse ausgerichteter Laserstrahl aus einem im Startschacht eingerichteten Lasergerät auf eine in der Vortriebsmaschine angeordnete Zieltafel. In der Zieltafel erfassen Lichtsensoren den genauen Auftreffpunkt des Lasers, wodurch die exakte Lage der Maschine zum Laser bestimmt werden kann. Dieses System ist jedoch zum einen auf geradlinige Vortriebe mit Sichtverbindung zwischen dem Startschacht und der Zieltafel begrenzt, zum anderen verfälschen Temperaturschwankungen und die hierdurch verursachte Refraktion auf langen Vortriebsabschnitten das Messergebnis. Aus diesem Grund werden bei langen Vortrieben und bei Vortrieben mit gekrümmter Linienführung relativ messende Navigationssysteme, die auf dem Prinzip der Koppelnavigation beruhen, eingesetzt.

Bei diesen Systemen wird die aktuelle Position der Maschine aus der jeweils letzten erfassten Position sowie dem Richtungswinkel und dem Vortriebsfortschritt bestimmt (Bild 6).

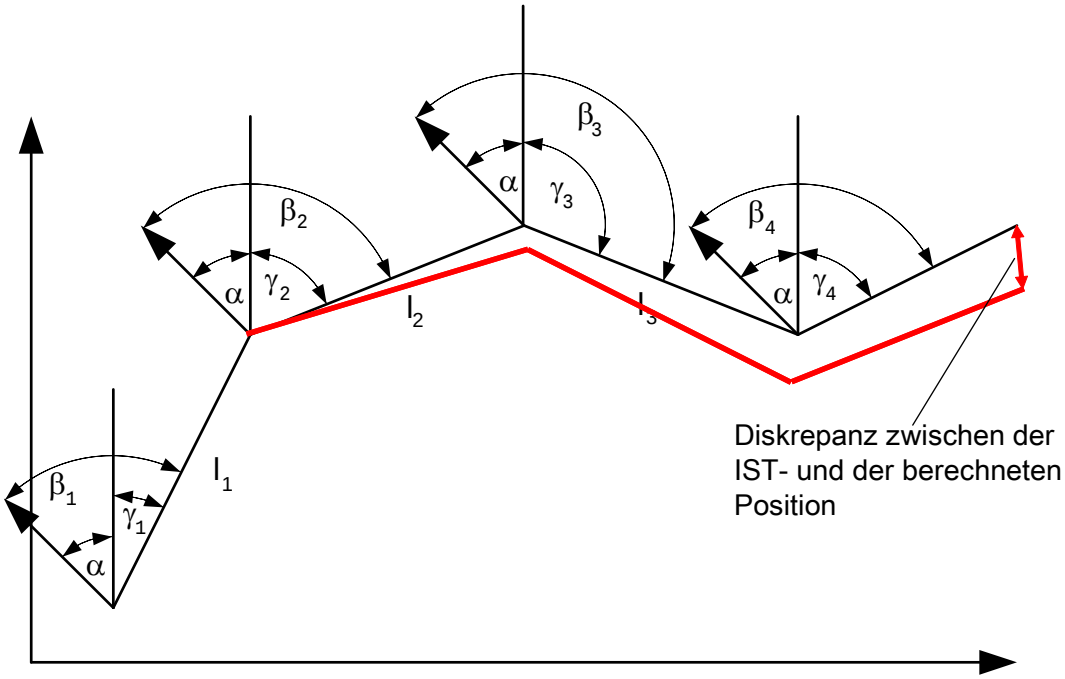


Bild 6: Prinzip der Koppelnavigation

Bei Systemen mit einem Theodolith, der im Rohrstrang installiert ist, wird der Richtungswinkel über den Vor- und Rückblick mit dem Theodolith gemessen. Bei kreiselkompassgestützten Systemen wird der Richtungswinkel zur geometrischen Nordrichtung bestimmt. Beide Systeme messen die Position der Vortriebsmaschine demnach nicht absolut zu einem Bezugspunkt, sondern relativ in Abhängigkeit der vorherigen Messergebnisse. Hierdurch unterliegen diese Systeme auch der Fehlerfortpflanzung. Wird beispielsweise eine Messung mit dem erschütterungsempfindlichen Kreiselkompass fehlerhaft ausgeführt, wirkt sich der hierdurch entstandene Fehler in der Positionsbestimmung auch auf alle weiteren Positionsbestimmungen aus und summiert sich über die weiteren Schritte (Bild 6). Aus diesem Grund wird für relativ messende Systeme eine geodätische Kontrollvermessung in Abständen von höchstens 40m empfohlen. Hierbei wird die Lage der Vortriebsmaschine von geodätischen Festpunkten im Startschacht aus bestimmt und das Ergebnis der Messung als Korrekturwert in das Navigationssystem eingegeben. In Bild 7 ist die seitliche Ablage einer Vortriebmaschine über die Vortriebslänge dargestellt. Ebenfalls sind die Ergebnisse der geodätischen Kontrollvermessungen (KV) und die hierdurch verursachten Korrekturen, die im Maximum 80mm betragen, dargestellt. Bei jeder Kontrollvermessung lag die Vortriebsmaschine weiter von der Sollachse weg, als das Navigationssystem

anzeigte, sodass der horizontale Abstand stets nach oben korrigiert wurde. Aus diesem Grund versuchte der Maschinenführer stets, die eingestellten Abweichungen der Maschine durch Korrektursteuerungen wieder zu reduzieren. Diese Korrektursteuerbewegungen führen jedoch unweigerlich zu gegenseitigen Verwinkelungen der nachfolgenden Rohre. Die vertikale Lage der Maschine, die mit einer elektronischen Schlauchwasserwaage erfasst wurde, weist geringere Schwankungen um die Sollachse auf, sodass hier geringere Verwinkelungen um die horizontale Achse zu erwarten waren.

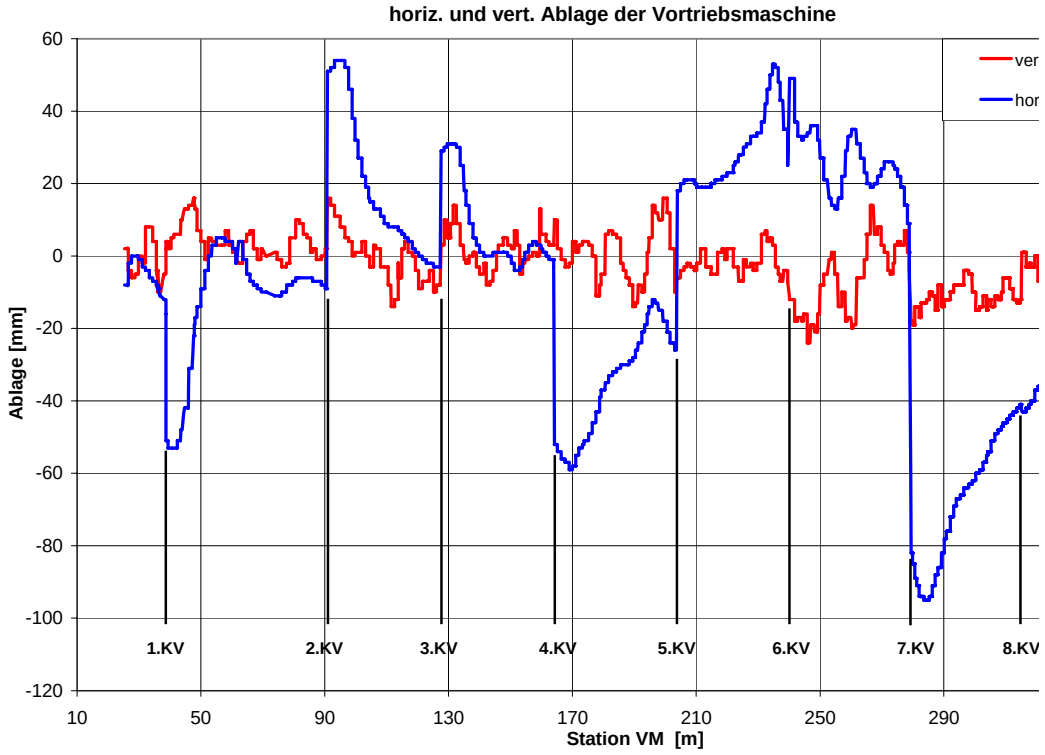


Bild 7: seitliche und vertikale Ablage einer Vortriebsmaschine über die Vortriebslänge

Neben den zuvor genannten Einflüssen, die Korrektursteuerungen der Vortriebsmaschine erfordern und somit indirekt zu einer Verwinkelung der Vortriebsrohre führen, hat die Geometrie der Vortriebsrohre direkten Einfluss auf die Verwinkelung. Bei Vortrieben mit engen Kurvenradien werden beispielsweise Schrägspiegelrohre eingesetzt, deren Spiegelflächen an den Spitzenden zumeist mit der halben Verwinkelung, die sich aus der planmäßigen Kurvenfahrt ergibt, angeschrägt sind. Hierdurch stellt sich bei der Kurvenfahrt in der Rohrfuge nur die halbe Verwinkelung ein, die Vortriebsrohre mit rechtwinklig zur Rohrachse ausgebildeten Spiegeln erfahren würden. In einer zumeist der Kurve vorgeschalteten Geraden ohne planmäßige Verwinkelungen weisen diese Rohre jedoch ebenfalls die halbe planmäßige Kurvenverwinkelung in der Gegenrichtung auf.

Eine unplanmäßige Schrägstellung der Rohrspiegel kann sich jedoch auch durch Toleranzen bei der Rohrfertigung ergeben. Insbesondere bei GFK- und Steinzeugrohren, deren Spiegel geschnitten sind, führen Abweichungen des Schnittes von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse direkt zu einer Schrägstellung der Rohrspiegel. Auch bei Stahlbetonrohren, deren eine Spiegelfläche durch die Schalung zumeist sehr maßhaltig ist, kann die Spiegelfläche am Spitzende, die nach dem Betonieren zumeist händisch geglättet wird, Imperfektionen aufweisen (Bild 8).

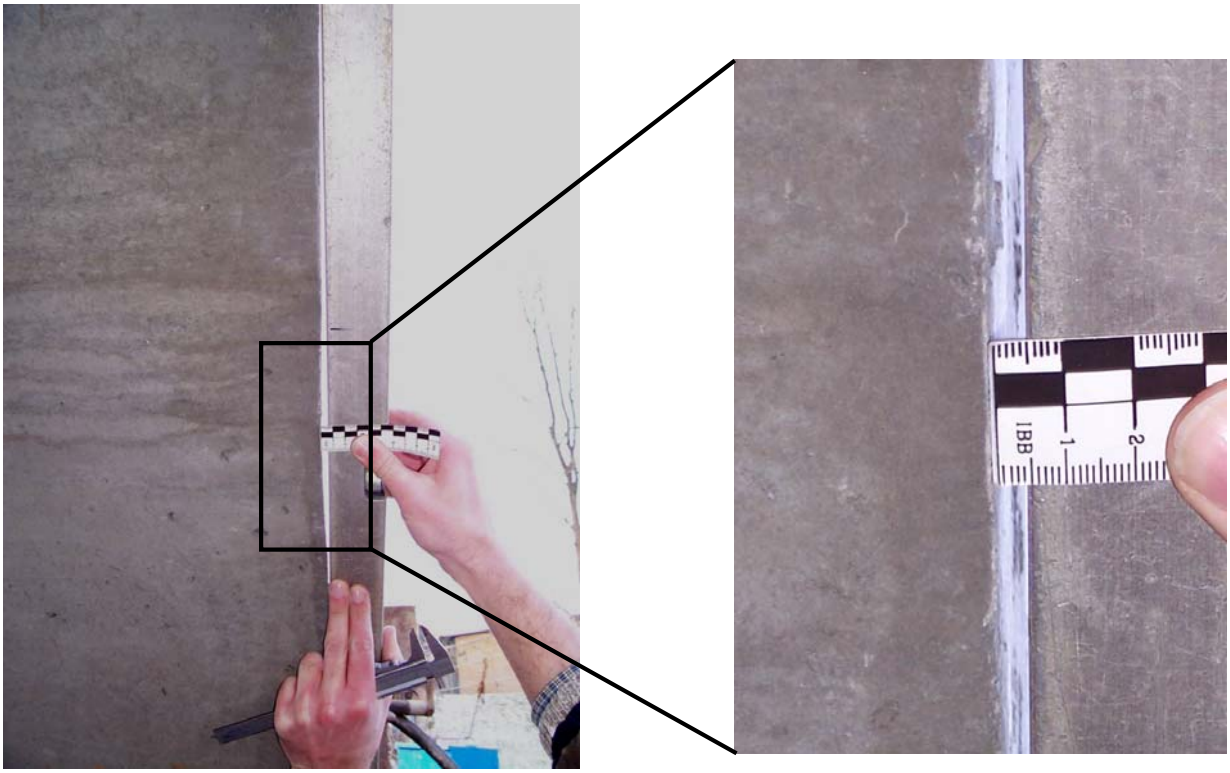
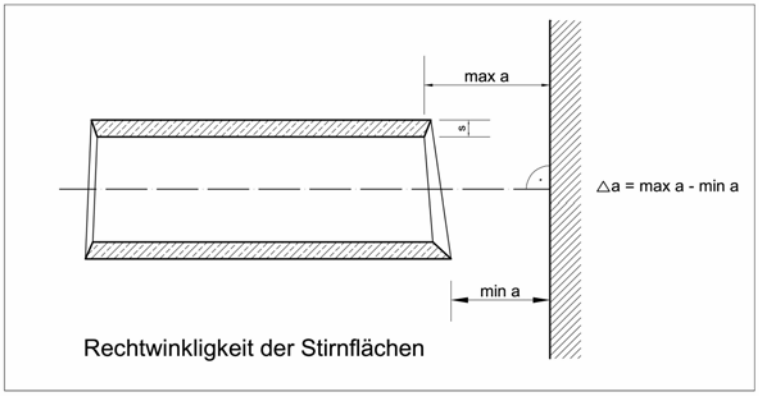


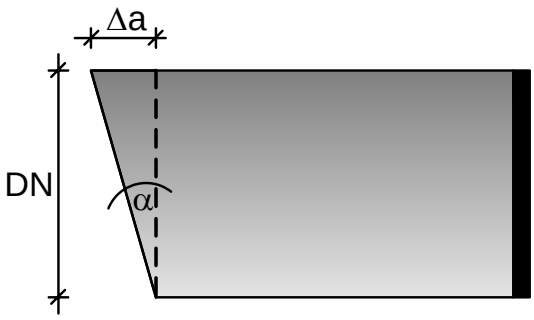
Bild 8: Abweichungen der Rohrspiegelfläche von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse

Die zulässigen Abweichungen der Rohrspiegelflächen von der Rechtwinkligkeit sind im ATV Arbeitsblatt 125 [2] geregelt. Das Maß der Abweichung ist nach dem Innendurchmesser der Rohre gestaffelt und beträgt für Rohre mit einem Innendurchmesser DN200 vier Millimeter. Für eine Abweichung des Rohrspiegels um diese 4mm ergibt sich nach Bild 9 eine beträchtliche zulässige Schrägstellung von 1,15°. Für den Durchmesser DN1100, der dem Durchmesser der im Rahmen des zuvor beschriebenen Forschungsprojekts in Köln eingesetzten Rohre entspricht, ergibt sich im Extremfall aus der zulässigen Schrägstellung der Spiegel einer Verwinkelung von 0,42°, die annähernd dem Maximum der Verwinkelung aus Versteuerung entspricht. Für den Fall, dass die Richtung der Schrägstellung und die der Versteuerung aufeinander fallen, summiert sich die resultierende Verwinkelung in der Rohrfuge demnach zu etwa 0,8°.

nach ATV A 125:



DN	Beton Stahlbeton
≤ DN200	4
> DN200 ≤ DN300	4
> DN300 ≤ DN1000	6
> DN1000 ≤ DN2800	8
> DN2800	10



$$DN200: \quad \alpha = \arctan\left(\frac{4}{200}\right) = 1{,}15°$$

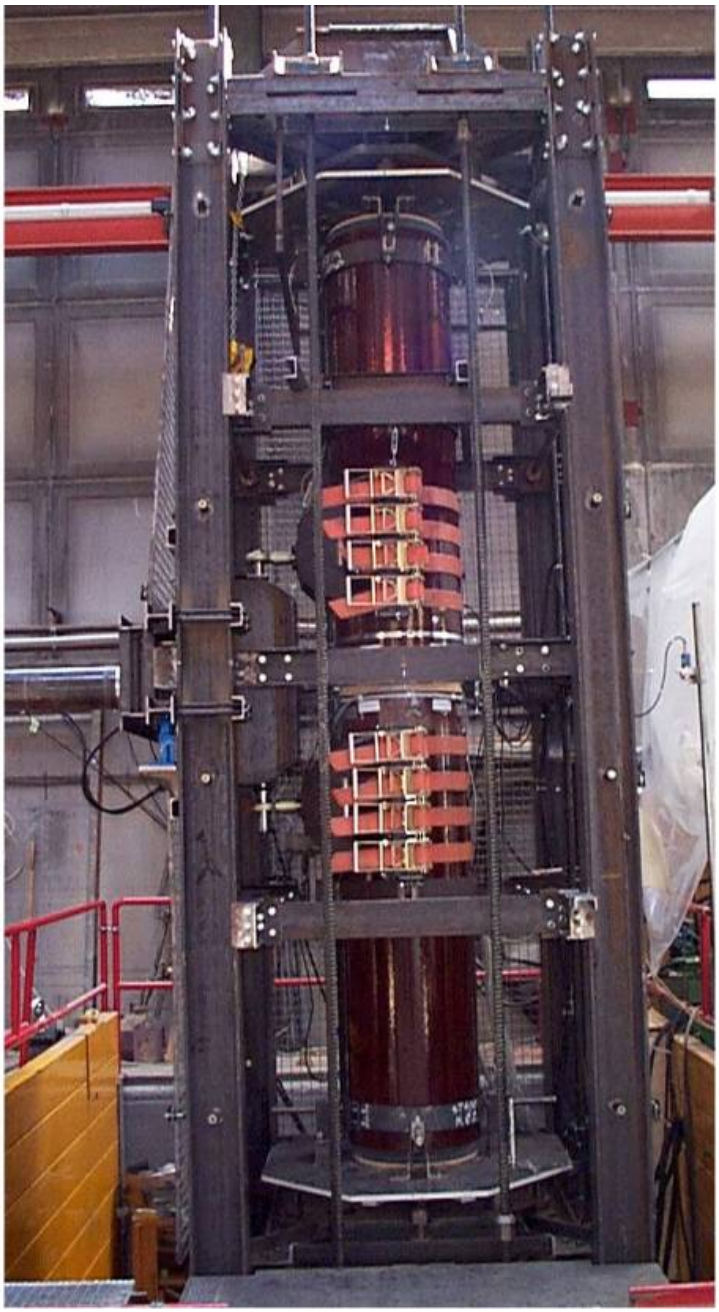
$$DN1100: \quad \alpha = \arctan\left(\frac{8}{1100}\right) = 0{,}42°$$

$$DN3000: \quad \alpha = \arctan\left(\frac{10}{3000}\right) = 0{,}19°$$

Bild 9: zulässige Abweichungen von der Rechtwinkligkeit nach ATV A 125

Die gegenseitige Verwinkelung der Rohre und die Vorpresskraft sind die maßgebenden Parameter für die Belastung der Vortriebsrohre während des Vortriebs. Die Höhe der Belastung auf die Vortriebsrohre während des Vortriebs konnte bislang jedoch nur rechnerisch abgeschätzt werden, da die Spannungsverteilungen in den Fugen bis dahin nicht analytisch erfasst werden konnte. Hierzu fehlte eine baustellentaugliche Messtechnik, mit der die Druckspannungsverteilung in der Rohrfuge gemessen werden konnte, ohne dass die eingesetzte Messtechnik selbst einen zu hohen, verfälschenden Einfluss auf das Messergebnis hatte. Um die Auswirkungen solcher Verwinkelungen auf die Belastung von Vortriebsrohren zunächst unter Laborbedingungen messtechnisch erfassen zu können, wurde ein weiteres Forschungsprojekt am ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb durchgeführt [7].

Hierzu wurde ein Versuchsstand entwickelt, in dem zwei übereinander eingebaute Vortriebsrohre mit einer Längskraft beaufschlagt werden können (Bild 10). Zudem kann das Rohrpaar mit einer Schellenkonstruktion, die durch einen Hydraulikzylinder bewegt wird, definiert ausgelenkt werden. In den Versuchen wurde die in den zuvor beschriebenen Baustellenmessungen ermittelte maximale Verwinkelung der Rohre von 0,4° eingestellt.



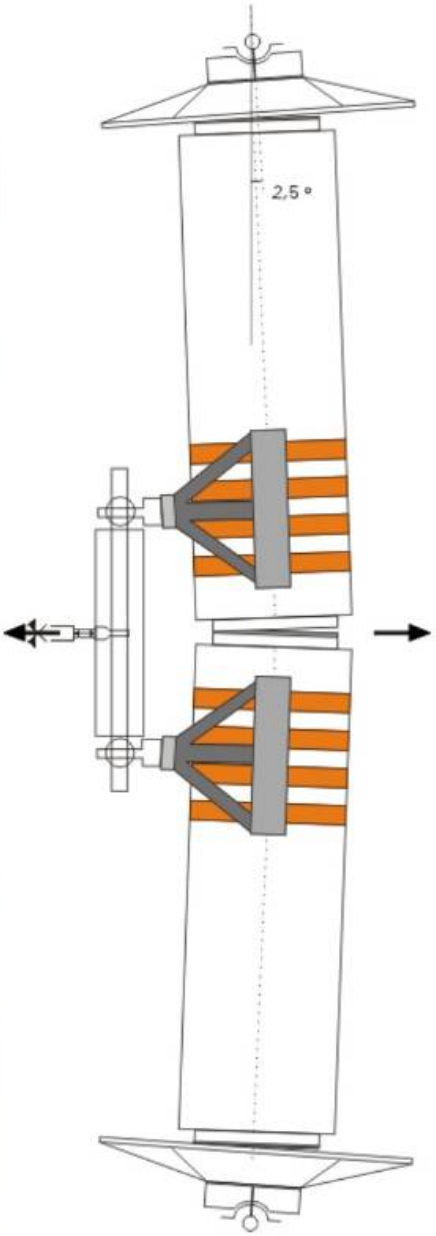


Bild 10: Versuchsstand zur Untersuchung des Belastungszustands von Vortriebsrohren

Die Kontaktspannung in der Rohrfuge, die in ATV A 161 bislang mit einer dreiecksförmigen Verteilung abgeschätzt wird, konnte während der Versuche mit einer speziellen Druckmessfolie gemessen werden. Diese neuartige Druckmessfolie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts speziell für den Einsatz zwischen Vortriebsrohren weiterentwickelt, sodass erstmals eine Messtechnik zur Verfügung stand, die für ausreichend hohe Druckspannungen geeignet war. Zudem wurde das Messergebnis aufgrund der geringen Dicke der Folie von unter 0,5mm nicht durch den Sensor selbst maßgeblich beeinflusst. Das Ergebnis einer solchen Spannungsmessung zeigt Bild 11. Es stellte sich heraus, dass die Spannungsverteilung nach mehrfacher Auslenkung nicht mehr linear war, sondern

zum Rand hin überproportional anstieg und dass schon bei den in situ gemessenen Verwinkelungen unter der vom Hersteller für die eingesetzten Rohre angegebenen zulässigen Längskraft hohe Lastspitzen auftraten. Zudem stellten sich entgegen den Annahmen von ATV A 161 Fugenklaffungen bis über die Mitte der Rohrspiegel mit Werten für z/d_a von 0,4 ein. Die hohen Spannungsspitzen führten letztlich bei den Versuchen mit der zulässigen Vorpresskraft zu den charakteristischen Abplatzungen an den Rohrspiegeln.

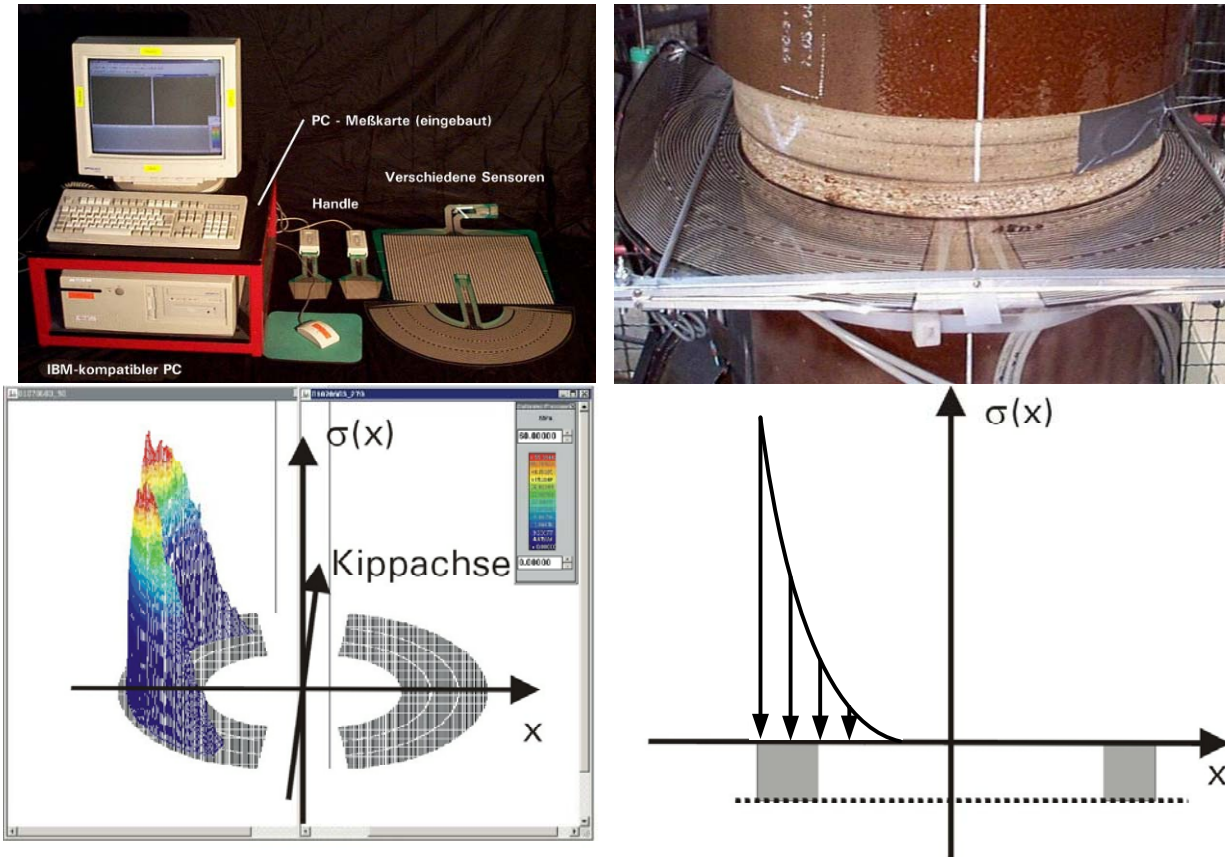


Bild 11: Messtechnik zur Erfassung der Druckspannungsverteilung und Messergebnisse

Als Ursache für die aus einem annährend linearen Verformungszustand zwischen den Rohren resultierende nichtlineare Spannungsverteilung konnte das Materialverhalten des Druckübertragungsrings festgestellt werden. Das Druckspannungs-Stauchungsverhalten der üblicherweise eingesetzten Werkstoffe Vollholz, Span- und OSB-Platte wurde in einem standardisierten Prüfverfahren ermittelt. Hierzu wurden kreisrunde Probekörper in einer Prüfmaschine einer zyklischen Belastung mit einer schrittweise bis zur Grenzspannung gesteigerten Kraft unterzogen und die axiale Verformung gemessen. Die Druckspannung wurde in Diagrammen über der Stauchung aufgetragen. Bild 12 zeigt die Belastungsäste des vierten Lastzyklus für die Werkstoffe OSB (links) und Vollholz (rechts).

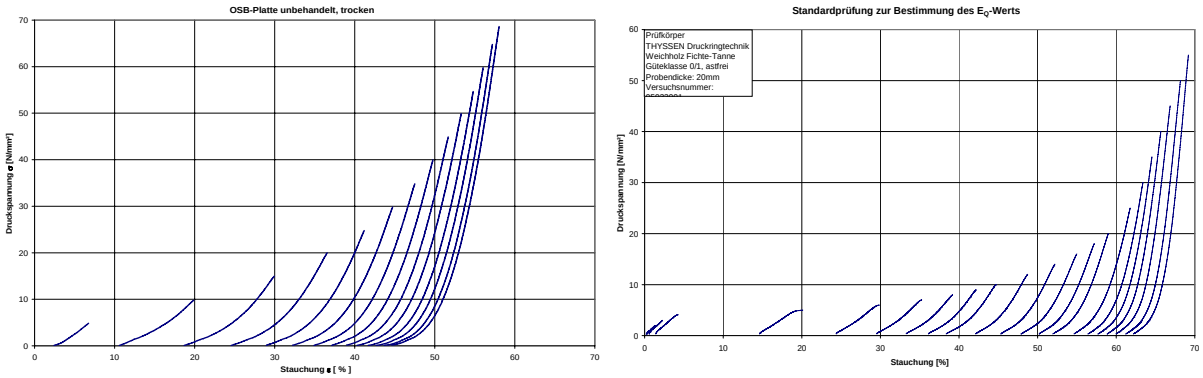


Bild 12: Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm für eine OSB- und eine Vollholz-Probe

Die Probekörper aus Vollholz wiesen bei gleicher Druckspannung eine höhere plastische Verformung auf als die OSB-Proben, wohingegen OSB- und Spanplatten ein vergleichbares Materialverhalten zeigten. Die hohe plastische Verformung von Vollholz führt zu einer höheren Steifigkeit des verformten Restmaterials, wodurch in der Rohrfuge eine kleinere Druckübertragungsfläche und damit einhergehend eine höhere Druckspannung und letztlich eine schlechtere Eignung für die Verwendung als Druckübertragungsring resultiert.

2.4. Bemessung von Vortriebsrohren nach dem Entwurf DWA A 161

Die zuvor beschriebenen Mängel an dem ATV Arbeitsblatt 161 veranlassten die Gremien der DWA, das Arbeitsblatt zu überarbeiten. Die wesentlichen Kritikpunkte an dem Arbeitsblatt waren:

- Fehlerhafte Annahmen bzgl. der Spannungsverteilung und der Fugenklaffung.
- Länge und Verformung der Vortriebsrohre bleibt unberücksichtigt.
- Materialverhalten des Druckübertragungsringes bleibt unberücksichtigt.
- Rohrimperfektionen bleiben unberücksichtigt.
- Keine Angaben zur Berechnung der Vorpresskraft bei Kurvenvortrieben.

Die überarbeitete Version des Arbeitsblattes 161 soll noch 2006 im Gelbdruckverfahren erscheinen. Bei der Berechnung der Vorpresskraft wurden die wesentlichen Vorgaben der DWA erfüllt:

- Die Fugenverwinkelung bei Kurvenvortrieben wird berechnet.
- Rohrimperfektionen (Abweichungen der Spiegelflächen von der Rechtwinkligkeit zur Rohrachse) werden berechnet.

- Die Rohrgeometrie findet Eingang.
- Das zuvor ermittelte nichtlineare Druckspannungs-Stauchungsverhalten des Druckübertragungsrings wird berücksichtigt.
- Das Fugenklaffungsmaß z/d_a wird berechnet, nicht mehr abgeschätzt.
- Die Rohrverformung wird berücksichtigt.
- Die Bemessung der Rohre wurde an das europäische Sicherheitskonzept angepasst.

Die Fugenverwinkelungen aus Versteuerungen der Vortriebsmaschine sind eine weitere, wesentliche Eingangsgröße für die Berechnung der zulässigen Vorpresskraft. Sie können im Vorfeld einer Vortriebsmaßnahme nach wie vor nur abgeschätzt werden. Im neuen Entwurf werden jedoch zur Berücksichtigung dieser Verwinkelung Angaben gemacht. So ist die Fugenverwinkelung aus Versteuerung in Abhängigkeit des planmäßigen Krümmungsradius der Rohrtour nach der Darstellung in Bild 13 zu bestimmen.

$$\varphi_A = (1 - \frac{100}{R_{plan}}) \cdot \varphi_{A,0} \geq 0$$

mit $\varphi_{A,0}$ nach nebenstehendem Diagramm

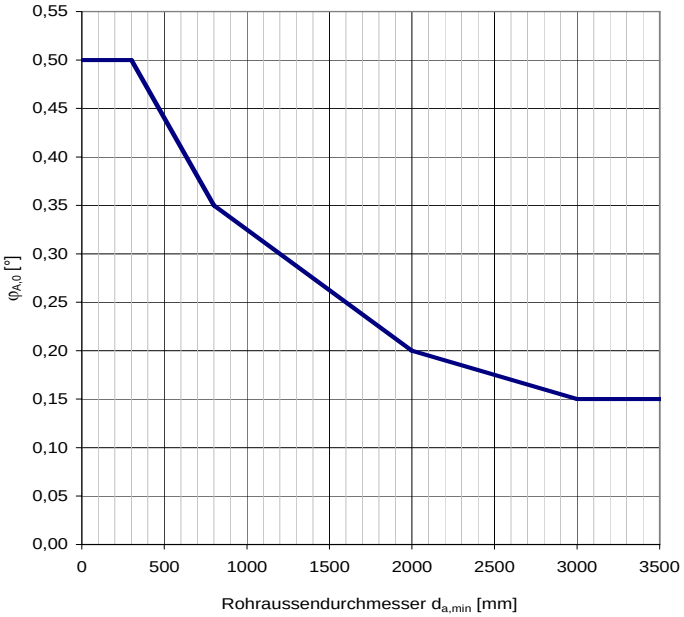


Bild 13: Rohrverwinkelung φ_A zur Berücksichtigung von Versteuerungen

3. Online-Überwachungssystem zur Qualitätssicherung von Rohrvortrieben

3.1. Online-Überwachung der Rohrbelastung

Auch mit dem neuen Berechnungsverfahren nach DWA A 161 kann die tatsächliche Belastung auf Vortriebsrohre während des Vortriebs nur abgeschätzt werden. Die

Foliendruckmesstechnik, mit der im Großversuchsstand am ibb die tatsächliche Spannungsverteilung in der Rohrfuge gemessen werden konnte, ist für einen Baustelleneinsatz nicht geeignet. Zum einen lassen sich die unter Laborbedingungen eingesetzten Sensoren nicht in den für Großrohrvortriebe erforderlichen Größen herstellen, zum anderen sind die Sensoren und die erforderlichen Messverstärker zu teuer, um damit wirtschaftlich Fugen eines Rohrvortriebs ausstatten zu können.

Daher wurde die Idee entwickelt, den Druckübertragungsring als „Sensor“ heranzuziehen und die Verformung des Druckübertragungsrings als Messgröße zur Ermittlung der Spannung im Rohrspiegel zu nutzen. Voraussetzung für diesen Weg ist allerdings die genaue Kenntnis über das Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten des Druckübertragungsringmaterials unter allen beim Rohrvortrieb auftretenden Belastungen. Dieses Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten wird im Vorfeld einer Rohrvortriebs-Maßnahme aus der zuvor beschriebenen Standardprüfung ermittelt.

Zur Bestimmung der Druckspannungsverteilung zwischen den Vortriebsrohren wird der Druckübertragungsring zunächst in entsprechend kleine Elemente diskretisiert. Diesen Elementen wird eine Verformung zugeordnet, sodass ihnen mit dem entwickelten Materialmodell die Druckspannung zugewiesen werden kann, die sich aufgrund der aktuellen Verformung und der Verformungshistorie über den Vortriebsverlauf in dem jeweiligen Element einstellt. Geschieht dies über eine Parallelberechnung für alle Elemente, ergibt sich hieraus die Spannungsverteilung im gesamten Druckübertragungsring.

Die fehlende Eingangsgröße für die Berechnung der Fugenspannung ist die jeweilige Stauchung der einzelnen Elemente des Druckübertragungsrings. Diese Werte können durch eine Vermessung des Fugenspalts zwischen zwei Vortriebsrohren ermittelt werden. Hierzu werden an ausgewählten Fugen mit mindestens drei über den Umfang verteilten Wegsensoren die Fugenspaltmaße gemessen.

Ebenenberechnung **Diskretisierung** **Spannungsverteilung**

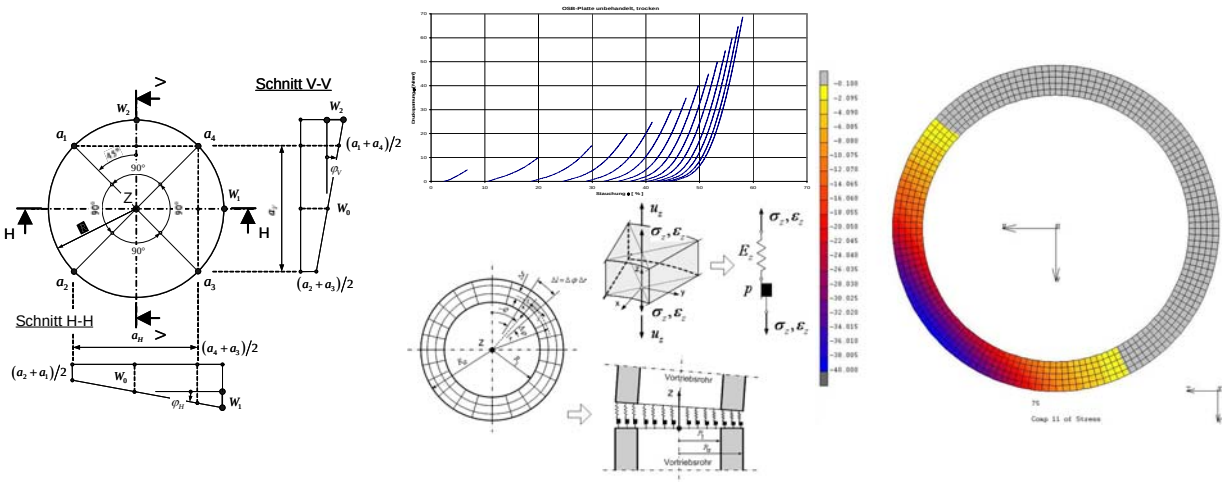


Bild 14: Rechengang zur Fugenspannungsbestimmung

Zur Fugenspaltvermessung werden zwei Typen von Wegmesssensoren eingesetzt. Bei beengten Platzverhältnissen wird der Abstand zwischen den Rohren mit linearpotentiometrischen Wegaufnehmern gemessen, die in den Viertelspunkten eines Rohres mit speziellen Halterungen befestigt und zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen mit metallischen Halbschalen abgedeckt werden. Auf der dem jeweiligen Wegaufnehmer gegenüberliegenden Seite des benachbarten Rohres wird eine glatte Widerlagerplatte an einem Winkel befestigt, auf der die Spitze des Wegaufnehmers ruht. Diese Konstruktion erlaubt nur eine geringe Relativverschiebung der benachbarten Rohre in Umfangsrichtung, die durch ein Verrollen des Rohrstranges verursacht werden kann. Größere Verrollungen der Rohre ziehen ein Abrutschen der Sensorspitze von der Widerlagerplatte nach sich, sodass ein Verrollen der Rohre an den Messfugen durch massive, ineinander verzahnte Platten behindert werden muss (Bild 15 rechts).

Bild 15: Messtechnik zur Fugenspaltvermessung

Mit der so installierten Messtechnik kann der Fugenspalt und damit die Dicke des Druckübertragungsringes jedoch nicht absolut vermessen werden, da der Abstand des Wegaufnehmers zur Fuge durch Toleranzen bei der Montage geringfügig variieren kann. Aus diesem Grund wird zur Tarierung des Messwerts zusätzlich ein Folien-Drucksensor unterhalb des Wegsensors auf dem Rohrspiegel angeordnet. Mit diesem Folien-Drucksensor kann beim Zusammenschieben der Rohre exakt der Zeitpunkt bestimmt werden, an dem der Holzring und der Rohrspiegel in Kontakt treten. Zu diesem Zeitpunkt wird der vom Wegsensor gemessene Wert auf Null gesetzt, sodass die weiteren, von dem Sensor gemessenen Wege exakt der Verformung des Druckübertragungsringes an der Stelle entsprechen.

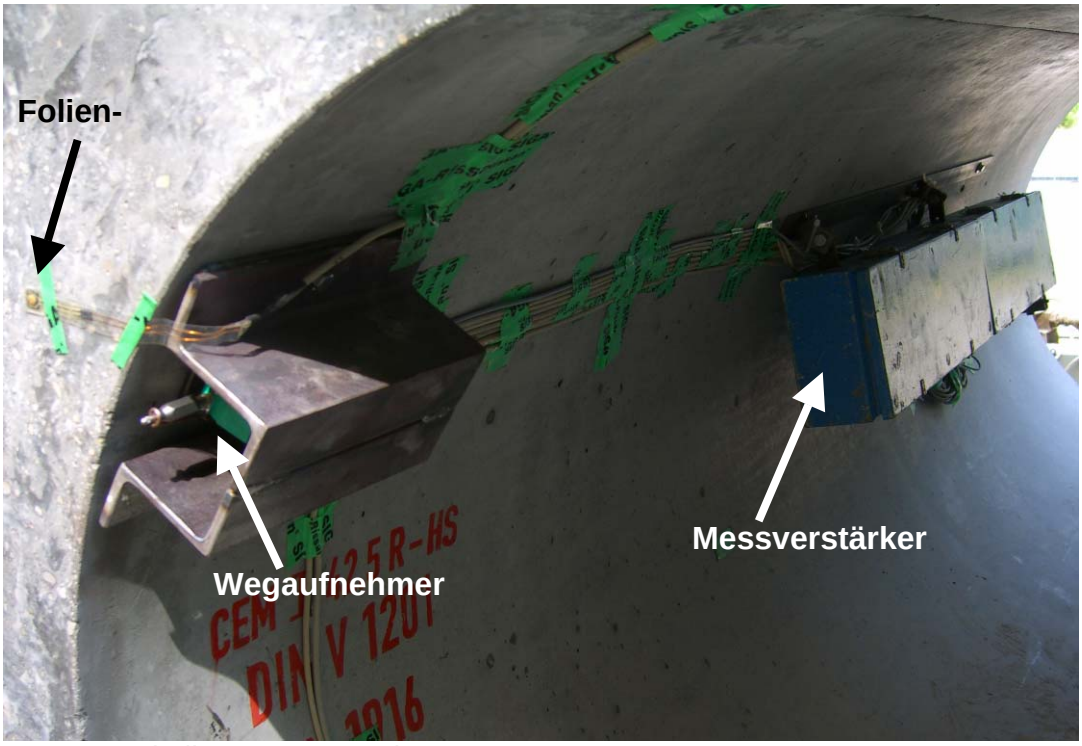


Bild 16: Messtechnik zur Fugenspaltvermessung

Zur Vermeidung des zusätzlichen Verrollungsschutzes werden bei Vortrieben mit weniger beengten Platzverhältnissen in Rohrstrang Seilzug-Wegaufnehmer anstelle der kleineren linearpotentiometrischen Wegaufnehmer montiert (Bild 17). Die Wegaufnehmer werden an drei über den Umfang verteilten Stellen angeordnet und der Seilzug des Wegaufnehmers an einer Schraube auf der gegenüberliegenden Seite der Fuge eingehängt. Somit kann der Weg zwischen den Fugen auch bei einer Verrollung der Rohre gemessen werden. Jedoch verfälscht ein Verrollen der Rohre den gemessenen Abstand, da dieser nicht mehr exakt in Rohrachsrichtung aufgenommen werden kann. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird im Rohrscheitel ein in Umfangsrichtung orientierter Wegaufnehmer angeordnet, der die gegenseitige Verrollung der Rohre aufnimmt. Der Messfehler kann hierdurch über Winkelbeziehungen herausgerechnet werden.

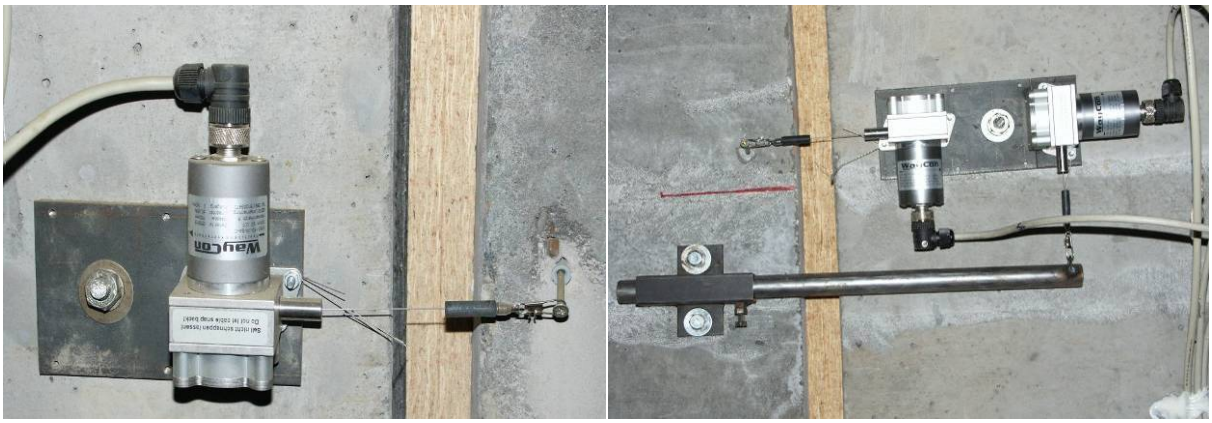


Bild 17: Seilzugwegaufnehmer zur Fugenspaltvermessung

Die mit den Wegaufnehmern erfassten Messwerte werden während des Rohrvortriebs über ein Bus-System zur Datenübertragung kontinuierlich an einen Rechner außerhalb weitergeleitet, der aus den Messwerten durch eine Ebenenberechnung die aktuelle Rohrverwinklung bestimmt. In einem weiteren Rechengang wird aus der Fugenverwinkelung die Spannung in dieser Messfuge errechnet. Hierbei wird die Verformungsgeschichte der Fugenzwischenlage berücksichtigt, d.h., aus den Vorbelastungen wird die maximale plastische Verformung und der aktuelle E-Modul jedem Fugenzwischenlagen-Element zugewiesen.

Dieser Berechnungsvorgang wird für jede Rohrfuge der bislang eingebauten Rohre durchgeführt, so dass die Spannungsverteilung in allen Fugen auf Grundlage der aktuellen Belastung und der Belastungshistorie ermittelt wird. Die Spannungsverteilung in den Fugen, die nicht mit einer Messtechnik vermessen werden, muss über eine Vergleichsrechnung bestimmt werden. Hierzu wird bei der Spannungsberechnung die Verwinkelung zugrunde gelegt, welche die letzte Messfuge an der entsprechenden Stelle aufgenommen hat. Unter Einbeziehung der Mantelreibungskraft, die zwischen der Presseinrichtung und der betrachteten Messfuge kompensiert wird, wird die Längskraft bestimmt, die in der Messfuge von Rohr zu Rohr übertragen wird. Über einen Iterationsprozess wird nun die Spannungsverteilung bestimmt, die aufsummiert mit dieser Längskraft korrespondiert.

Die berechnete Spannungsverteilung und insbesondere die maximale Druckspannung werden mit der Druckfestigkeit des Rohrwerkstoffs verglichen. Durch Aufsummierung der Spannungen über die Druckkraft übertragende Fläche in der Rohrfuge kann nun die dort wirkende und die für die jeweilige Fuge aufnehmbare Vorpresskraft berechnet werden. Durch einen Vergleich aller Rohrfugen wird die Fuge mit den niedrigsten Reserven bestimmt und hieraus für jede Presseinrichtung (Hauptpresse und evtl. eingebaute Dehner) die jeweils zulässige Vorpresskraft berechnet, bei der in der maßgebenden Fuge gerade keine Überbelastung eintritt.

3.2. Baustelleneinsatz des Online-Überwachungssystems

Das Überwachungssystem wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts erstmals einem Baustelleneinsatz unterzogen. Hierzu stellte die Emschergenossenschaft - Projektbeteiligte in diesem Forschungsprojekt – die Vortriebsmaßnahme „Vorthbach“

zur Verfügung. Die Baumaßnahme umfasste die Herstellung eines Abwasserkanals DN2500 auf einer Länge von 1,3 Kilometern. Der Rohrvortrieb gliederte sich in mehrere Bauabschnitte, von denen drei Abschnitte mit einer Länge zwischen 180m und 370m mit dem Online-Überwachungssystem begleitet wurden. Einen Überblick über die Baumaßnahme zeigt Bild 18.

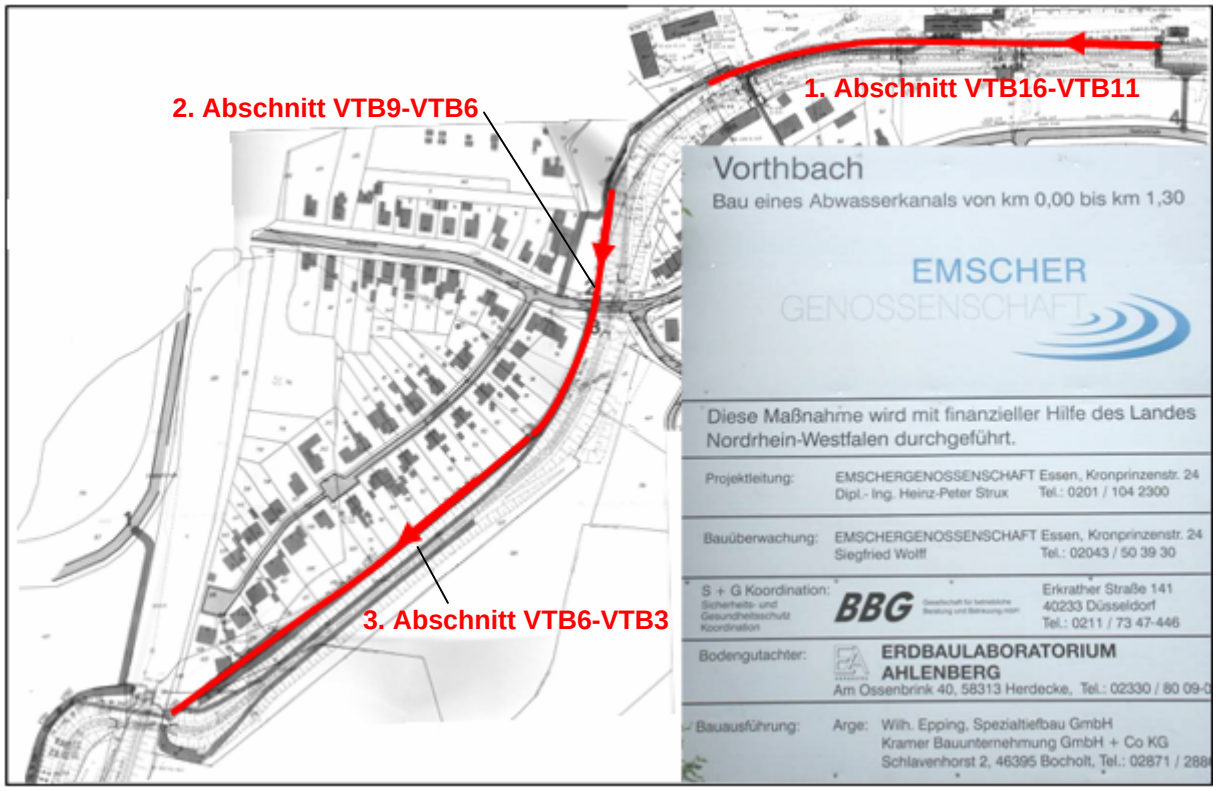


Bild 18: Vortriebsmaßnahme „Vorthbach“ der Emschergenossenschaft

3.2.1. Erster Vortriebabschnitt

Der erste begleitete Vortriebsabschnitt lag zwischen dem Startschacht VTB16 und dem Zielschacht VTB11. Die Trasse bestand aus einer etwa 240m langen Geraden, an die ein 130m langer Kreisbogen mit einem Radius von 300m anschloss (Bild 19). Die Vortriebsrohre DN2500, die im Bereich des Kreisbogens zu liegen kamen, hatten eine Baulänge von 1,5m, die Rohre im Bereich der Geraden eine Baulänge von 3,0m. In den Vortriebsstrang wurden drei Zwischenpressstationen eingebaut. Der Rohrvortrieb wurde mit vier Messfugen ausgestattet, wobei jeweils zwei Messfugen in den Bereich der 1,5m langen und in den Bereich der 3m langen Rohre angeordnet wurden. Das Steuersystem der Vortriebsmaschine wurde so ausgestattet, dass die dort erfassten Messwerte der Stationierung und der Pressenkräfte aller Presseinrichtungen an das Online-Überwachungssystem über eine serielle Schnittstelle übertragen wurden.

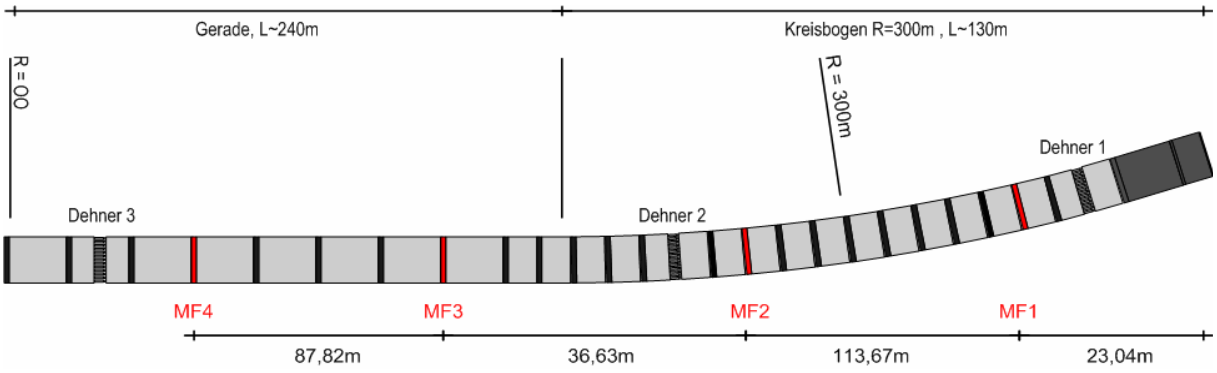


Bild 19: Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11

Bild 20 zeigt die in den vier Messfugen gemessenen horizontalen und die vertikalen Abwinkelungen. Zudem ist im Diagramm der horizontalen Abwinkelungen das planmäßige Krümmungsprofil der Rohrtour eingetragen. Die horizontalen Abwinkelungen der Messfugen 1 und 2 sind im Bereich der Geraden mit Maximalwerten von 0,06° sehr gering. Hierzu tragen im Wesentlichen die kurzen Vortriebsrohre der Messfugen bei. Die horizontale Abwinkelung der Messfugen 3 und 4 ist aufgrund der drei Meter langen Rohre erwartungsgemäß mit Maximalwerten von 0,12° etwa doppelt so groß. Bei der vertikalen Abwinkelung ist gleiches zu beobachten. Jedoch lagen die absoluten vertikalen Verwinkelungen um die horizontale Achse mit Werten von maximal 0,08° deutlich niedriger.

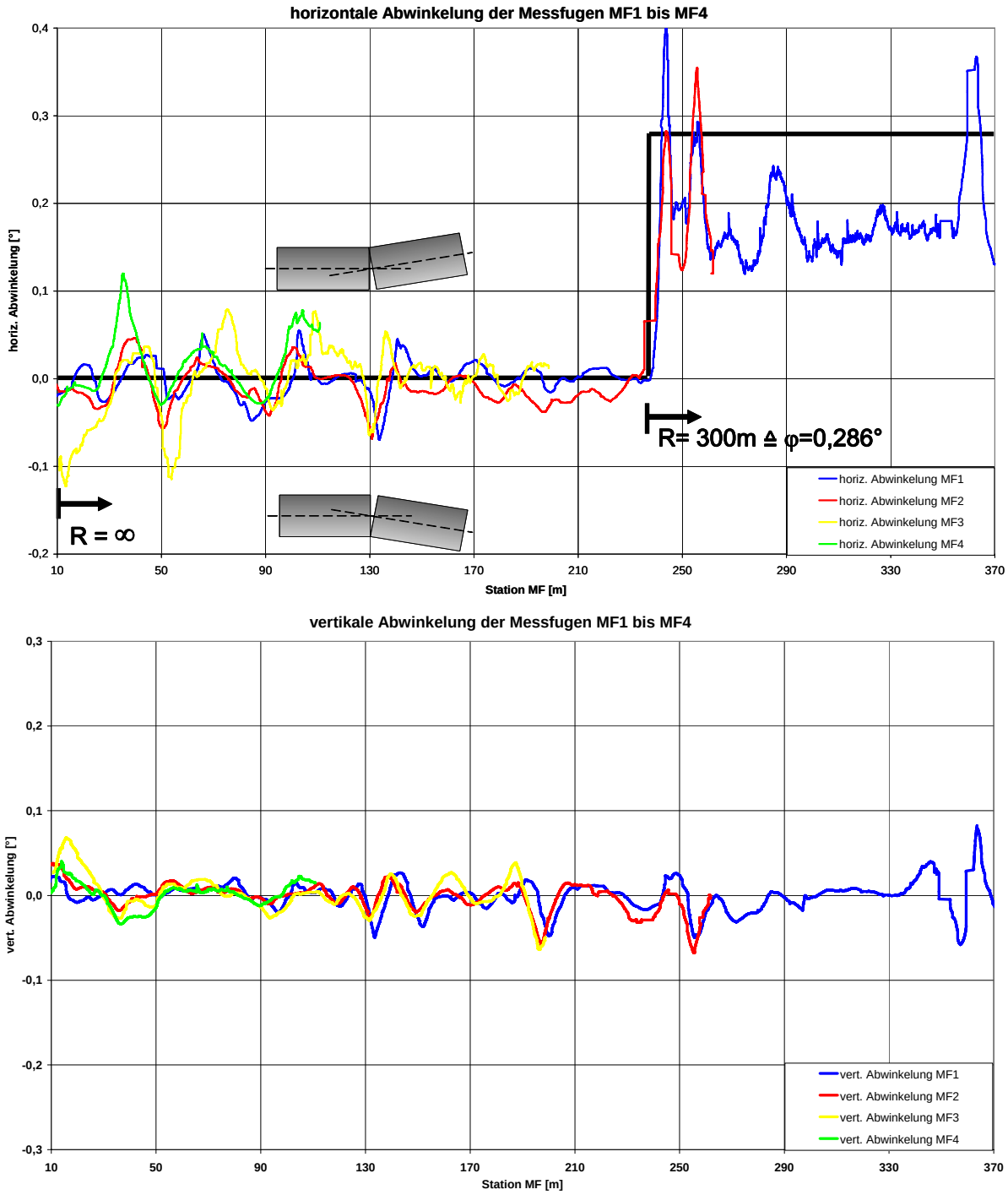


Bild 20: horizontale und vertikale Abwinkelung Abschnitt VTB16 – VTB11

Bei der Stationierung von etwa 240m steigen die horizontalen Abwinkelungen der Messfugen 1 und 2 beim Kurveneintritt erwartungsgemäß. Die planmäßige Abwinkelung von 0,286° wird in Messfuge 1 beim Kurveneintritt mit einem Maximalwert von 0,4° überschritten. Jedoch liegt die durchschnittliche Verwinkelung von Messfuge 1 innerhalb des Kurvenbereichs unterhalb der planmäßigen Abwinkelung. Ursache hierfür ist die Anordnung der Messfuge in unmittelbarer Nähe des ersten Dehners. Der Hydraulikkreislauf des Dehners war mit einer Abschaltautomatik ausgebildet, mit der ein vollständiges Zusammenfahren der

Hydraulikzylinder verhindert wurde. Hierdurch konnte gewährleistet werden, dass die im Dehner übertragene Vorpresskraft stets über den Hydraulikdruck in den Zylindern zu messen war. Da auch alle Hydraulikzylinder untereinander verbunden waren (Parallelschaltung) stellte der Dehner bei dieser „schwimmenden Lagerung“ quasi ein Gelenk im Rohrstrang dar und nahm somit einen Anteil der Verwinkelungen der benachbarten Rohrfugen auf.

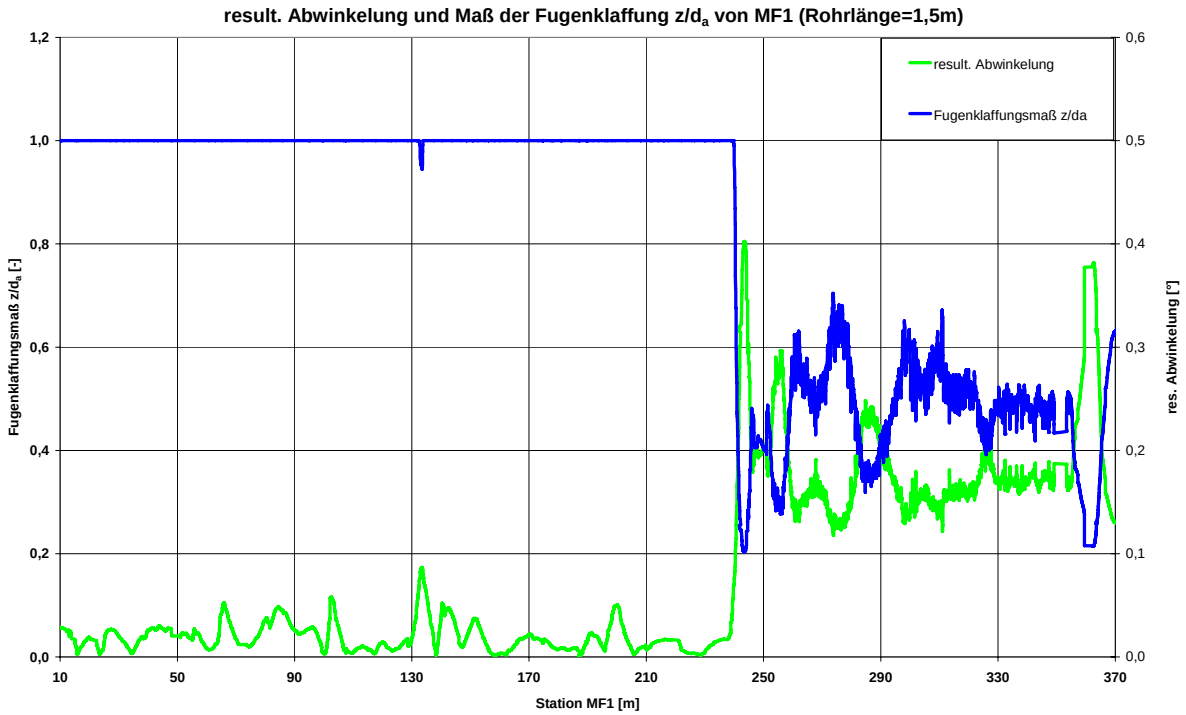


Bild 21: Fugenklaffungmaß z/d_a der Messfuge 1, Abschnitt VTB16 – VTB11

Bild 21 zeigt das für Messfuge 1 berechnete Fugenklaffungsmaß z/d_a. Im Bereich der Geraden tritt bis auf eine Ausnahme keine Fugenklaffung auf. Im Bereich des Kreisbogens sinkt das Fugenklaffungsmaß auf einen Minimalwert von 0,2 und im Durchschnitt auf einen Wert von etwa 0,5. Diese Rechenwerte konnten bei einer Inspektion der Rohrfugen während des Vortriebs bestätigt werden.

Dass es im Bereich der Geraden zu keinen Fugenklaffungen kam, lag jedoch maßgeblich an den kurzen Vortriebsrohren. Rohre mit einer Länge von 1,5m werden in geradlinigen Vortrieben schon aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur eingesetzt, wenn an die Gerade ein Kreisbogen anschließt. Üblicherweise werden bei geradlinigen Großrohrvortrieben Rohrlängen von 3 bis 4 Metern verwendet.

So bestätigt das in Bild 10 dargestellte Fugenklaffungsmaß der dritten Messfuge, die zwischen zwei drei Meter langen Rohren angeordnet war, die Erkenntnisse aus dem zuvor erwähnten, im Großversuchsstand des ibb – Instituts für Baumaschinen und Baubetrieb durchgeführten Forschungsvorhaben [6]. Die Werte für das

Fugenklaffungsmaß betrugen bei planmäßig gerader Trassenführung und eher geringen Verwinkelungen im Minimum z/d_a=0,5.

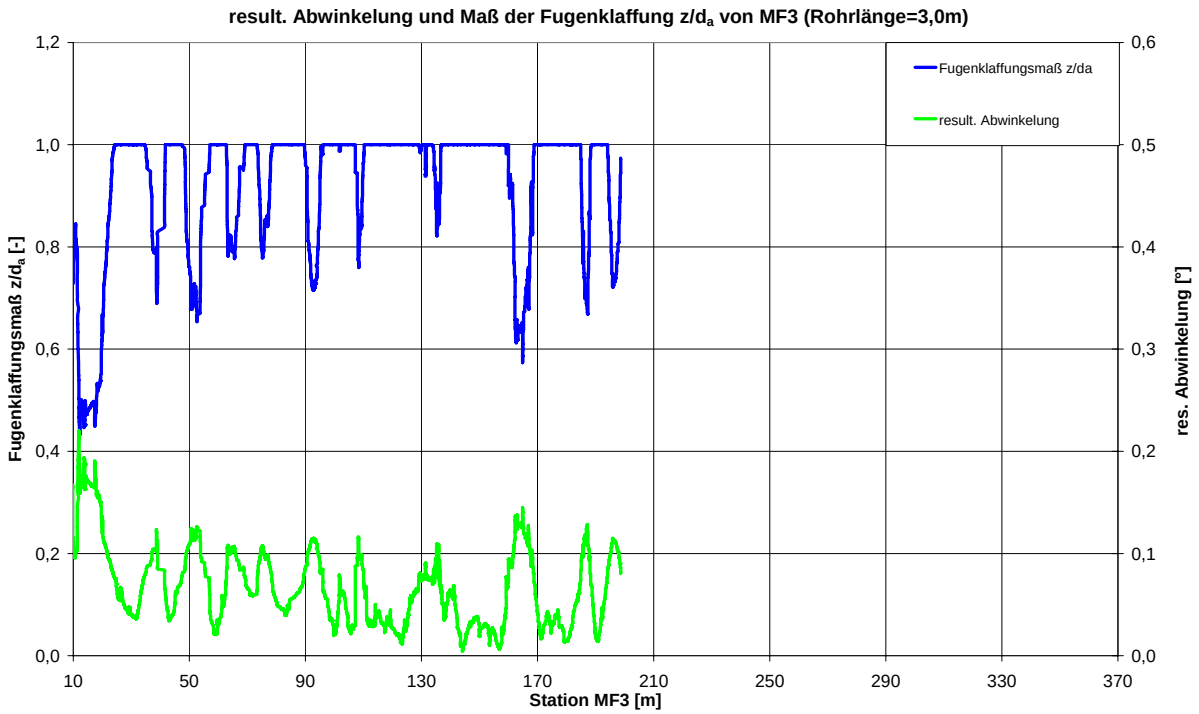


Bild 22: Fugenklaffungmaß z/d_a der Messfuge 3, Abschnitt VTB16 – VTB11

Nach dem erfolgreichen Einsatz des Online-Überwachungssystems auf dem ersten Vortriebsabschnitt entschieden die Verantwortlichen der Emschergenossenschaft aufgrund der hohen Komplexität des zweiten Vortriebsabschnitts, auch hier das Überwachungssystem einzusetzen.

3.2.2. Zweiter Vortriebsabschnitt

Der zweite Vortriebsabschnitt (Bild 23) war mit etwa 170m zwar kürzer als der erste, allerdings sah die Trasse einen Kreisbogen mit einem geringeren Radius von 235m vor. Die Rohrlängen betrugen wie im ersten Vortriebsabschnitt in dem Bereich des Kreisbogens 1,5m und im Bereich der Geraden 3m. In dem Rohrstrang wurden wiederum vier Messfugen angeordnet, jedoch diesmal drei Messfugen unmittelbar hinter der Vortriebsmaschine außerhalb des Einflussbereichs des Dehners und eine Messfuge direkt vor dem Dehner, um den Einfluss des Dehners auf die Verwinkelungsmessung in Vergleich zu den anderen Messfugen zu ermitteln.

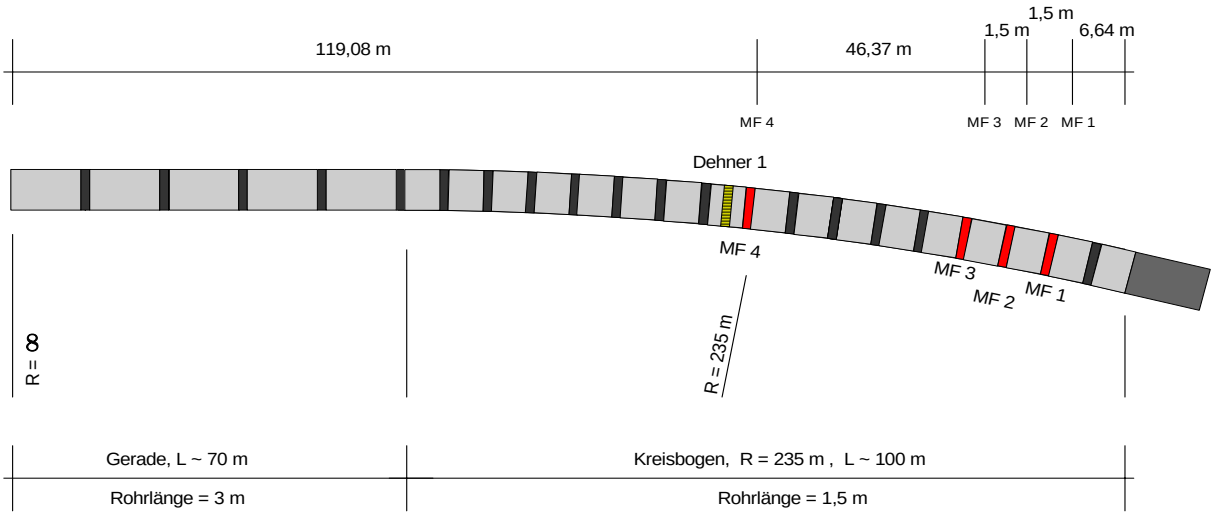


Bild 23: Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6

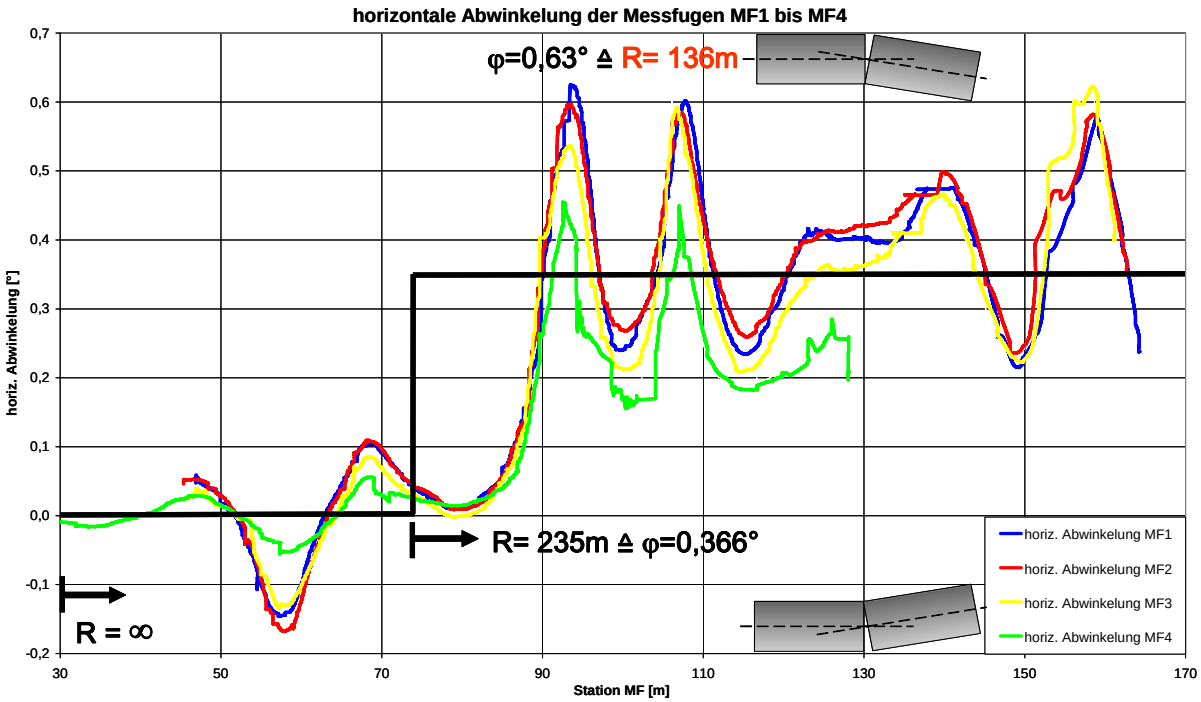


Bild 24: horizontale Abwinkelung Abschnitt VTB9 – VTB6

Bild 24 zeigt die horizontale Abwinkelung der Messfugen und das planmäßige Krümmungsprofil. Der planmäßige Radius von 235m entsprach einer Abwinkelung von 0,366°. Auffällig war, dass die gemessene Verwinkelung beim Kurveneintritt erst mit einer Verzögerung von über zehn Metern anstieg. Um die zu geringe Verwinkelung zu korrigieren und die Vortriebsmaschine wieder auf die Sollachse zu steuern, musste die planmäßige Verwinkelung überschritten werden. Aus dieser Tatsache rührte eine maximale Verwinkelung in Messfuge 1 von 0,63° an der Station 93m. In der weiteren Kurvenfahrt pendelten die Messwerte der ersten drei Messfugen um den Sollwert. Die Unterschiede innerhalb der Verwinkelungen der ersten drei Messfugen lagen im Maximum unterhalb von 0,1°. Dies bekräftigt die

Annahme, dass die Vortriebsrohre an gleicher Station auch vergleichbare Verwinkelungen aufweisen. Die vierte Messfuge zeigte im Vergleich der ersten drei Messfugen deutlich geringere Verwinkelung mit Abweichungen von bis zu 0,17°. Die Ursache hierfür liag wiederum am dem bereits im ersten Vortriebsabschnitt beobachteten Einfluss des Dehners, der die Verwinkelungen der benachbarten Rohrfugen reduzierte.

3.2.3. Dritter Vortriebsabschnitt

Der dritte Vortriebsabschnitt wurde im Vergleich zu den ersten beiden Abschnitten vollständig mit drei Meter langen Rohren ausgeführt. Da bei den ersten Abschnitten die Messungen zwischen 1,5m langen Rohren im Mittelpunkt standen, wurde auch der dritte Vortriebsabschnitt für eine Online-Überwachung ausgewählt. Die Besonderheit dieses Vortriebsabschnitts lag in dem Kreisbogen mit etwa 43m Länge und einem Radius von 800m, der zwischen zwei geradlinigen Bereichen von 122m und 157m angeordnet war (Bild 25).

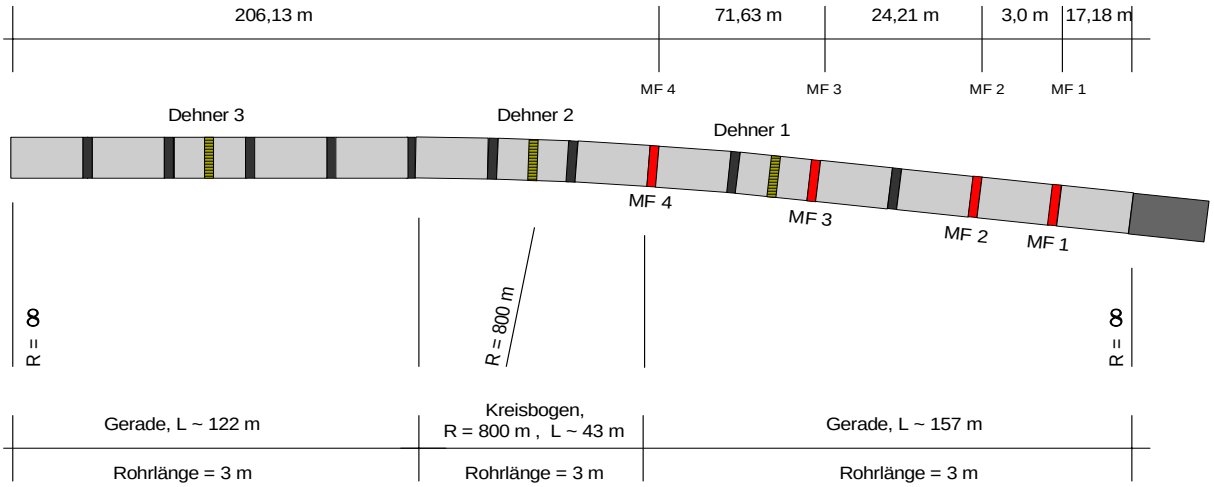


Bild 25: Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3

In den Rohrstrang wurden zwei Messfugen hinter der Vortriebsmaschine und eine weitere vor dem ersten Dehner eingebaut. Die vierte Messfuge wurde zwischen dem ersten und dem zweiten Dehner außerhalb des zuvor beschriebenen Einflussbereichs der Dehner angeordnet, um die Rohrverwinkelung in einem Abstand von etwa 100m von den ersten beiden Messfugen unter gleichen Randbedingungen zu erfassen. Bild 26 zeigt die horizontale Abwinkelung der Messfugen und das planmäßige Krümmungsprofil. Im Bereich der Geraden lagen die Rohrverwinkelungen mit Maximalwerten von 0,2° in der gleichen Größenordnung wie bei den drei Meter langen Rohren des ersten Vortriebsabschnitts. Im Bereich des Kreisbogens zeigte sich der „Übersteuerungseffekt“ wie beim zweiten Vortriebabschnitt. Der Kurveneintrittspunkt wurde um etwa 10m verzögert

angefahren, sodass im weiteren Kurvenverlauf eine Überschreitung der planmäßigen Verwinklung erforderlich war.

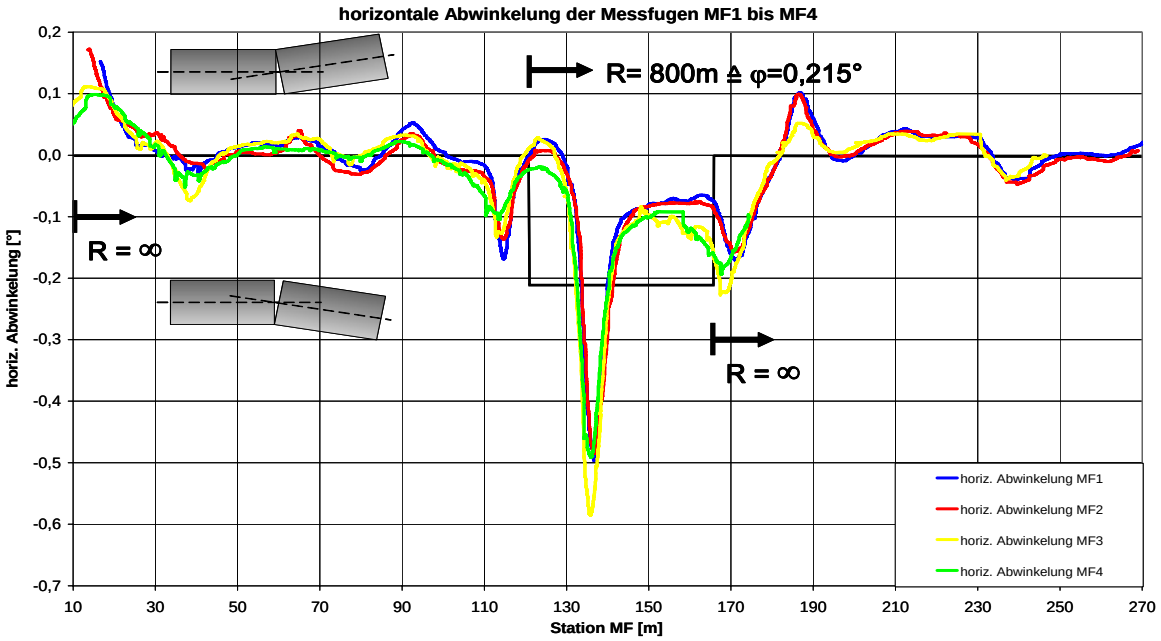


Bild 26: horizontale Abwinkelung Abschnitt VTB6 – VTB3

Die Messwerte der dritten Messfuge, die in der Nähe des Dehners angeordnet war, widersprechen den auf den ersten Abschnitten gemachten Erfahrungen. In diesem Fall liegen die Messwerte in der Größenordnung der ersten beiden Messfugen, somit ist ein Einfluss des Dehners auf die Messwerte nicht zu erkennen. Grund hierfür ist das Fehlen der auf den ersten beiden Vortriebsabschnitten installierten Abschaltautomatik des Hydraulikkreislaufs, sodass sich keine „schwimmende Lagerung“ im Dehner einstellen konnte. Ohne dieses Gelenk im Rohrstrang zeigen die Messfugen in der Nähe eines Dehners, der nicht aktiv eingesetzt wurde, keine maßgebliche Abweichung zu den Werten der anderen Messfugen.

Der Verlauf der in der vierten Messfuge aufgenommenen Verwinkelungen zeigte ebenfalls mit den drei übrigen Verwinkelungsverläufen vergleichbare Werte. Somit konnte der in der Fachwelt kontrovers diskutierte Einschleifeffekt, bei dem im Vortriebsverlauf die Verwinkelungen an gleicher Stelle geringer werden sollen, zumindest in den hier vorliegenden Bodenverhältnissen nicht nachgewiesen werden.

3.3. Online-Berechnung der zulässigen Vorpresskraft

Für die Bauüberwachung und insbesondere für den Pressenmeister ist die Information über die Pressenkräfte, die von den Rohren schadlos aufgenommen werden können, von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde die Software um eine Bildschirmansicht erweitert, die der Bauüberwachung und dem Pressenmeister

einen schnellen Überblick über den Ausnutzungsgrad der Vortriebsrohre und über die zulässigen Pressenkräfte für alle Presseinrichtungen gibt.

Die Berechnung der zulässigen Vorpresskraft basiert auf dem zuvor beschriebenen Verfahren der Spannungsermittlung in den Fugen aller eingebauten Rohre. Für jede Rohrfuge wird so die schadlos aufnehmbare Längskraft unter Berücksichtigung eines geringen Sicherheitsniveaus von γ=1,1 bestimmt. Die geringste Kraft aus der Berechnung aller Fugen superponiert mit der aktuellen Mantelreibungskraft zwischen der höchstbelasteten Fuge und der entsprechenden Presseinrichtung, wird für jede Presseinrichtung neben der aktuellen Pressenkraft als zulässige Vorpresskraft in der Bildschirmanzeige dargestellt.

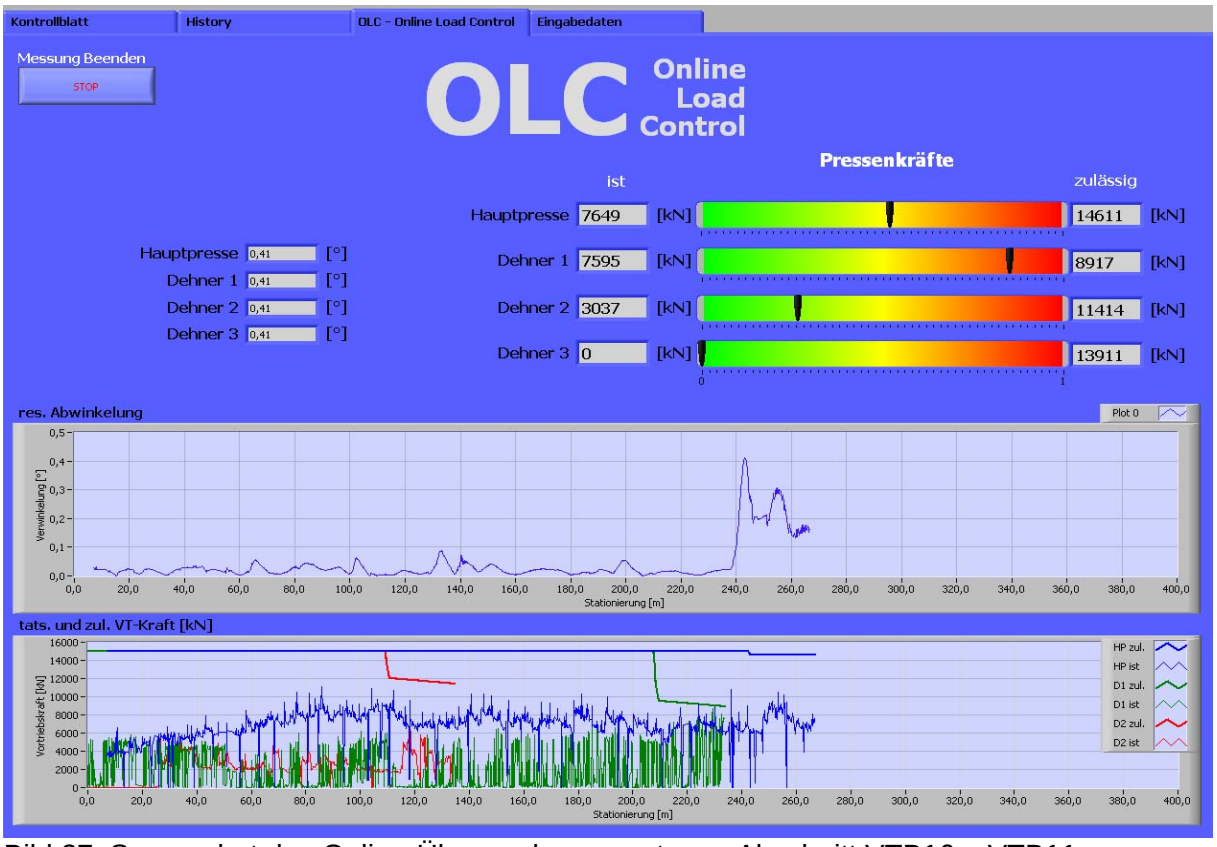


Bild 27: Screenshot des Online-Überwachungssystems, Abschnitt VTB16 – VTB11

Der Ausnutzungsgrad der Presseinrichtungen wird durch einen Zeigerstand in einem grün-gelb-roten Farbfeld angezeigt (Bild 27). Der Pressenmeister kann somit auf einen Blick erkennen, wie hoch die Rohrbelastung ist und welche Reserven noch vorhanden sind. Wird die zulässige Vortriebskraft erreicht, sind beispielsweise die Dehner zu aktivieren oder es ist die Schmierung des Rohrstrangs zu verbessern.

3.4. Dokumentation der Vorpresskräfte

Rohrverwinkelungen, die errechneten zul. Vortriebskräfte und die tatsächlichen Presskräfte werden über den gesamten Vortriebsverlauf abgespeichert. Damit hat der Auftraggeber eine vollständige Dokumentation über die Qualität der Vortriebsarbeiten und kann im Zweifelsfall erkennen, ob und in welchem Maße Vortriebsrohre eventuell zu hoch belastet wurden.

Bild 28 zeigt für den ersten Vortriebsanschnitt die tatsächlichen und die berechneten zulässigen Pressenkräfte für die Hauptpressstation und Dehner 1 und 2. Die zulässige Pressenkraft der Hauptpressstation reduziert sich von 15000 kN auf etwa 14600 kN beim Kurveneintritt aufgrund der Verwinkelung. Diese verhältnismäßig geringe Reduzierung ist auf die Entfernung der Hauptpressstation von der Stelle der höchsten Verwinkelung zurückzuführen. Die in der maximal verwinkelten Rohrfuge zulässige Längskraft von 8700 kN wurde für die Hauptpresse um die Mantelreibungskraft von ungefähr 5900 kN erhöht. Die Mantelreibung wurde aus der Zunahme der Pressenkraft in der Hauptpressstation bis zum Zeitpunkt der Aktivierung des ersten Dehners bestimmt.

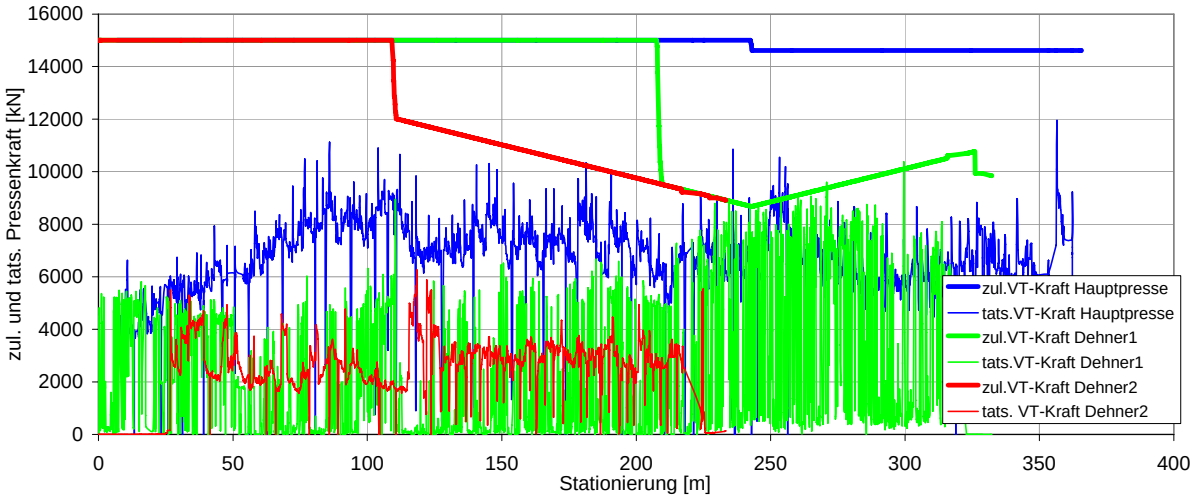


Bild 28: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11

Die zulässige Vorpresskraft für die Dehnerstationen reduzierte sich beim Kurveneintritt deutlicher. So sank die zulässige Kraft für Dehner 1 auf etwa 9500 kN und für Dehner 2 auf 12000 kN. Im weiteren Vortriebsverlauf nahmen die zulässigen Kräfte der Dehner in dem Maße ab, wie sich die Dehner der Stelle mit der höchsten Verwinkelung näherten (Mantelreibungs-Effekt). Ab dem Zeitpunkt, als der Dehner 1 die Stelle der höchsten Verwinkelung passiert hatte, stieg die zulässige Pressenkraft mit zunehmendem Abstand aus demselben Grund.

Die zulässige Vorpresskraft wurde im ersten Vortriebsabschnitt von allen Presseinrichtungen nicht überschritten, die Ausnutzung des Dehners 1 lag jedoch im Bereich der höchsten Verwinkelungen oftmals am Grenzwert.

Bild 29 zeigt die tatsächlichen und die berechneten zulässigen Pressenkräfte für die Hauptpressstation und Dehner 1 auf dem zweiten Vortriebsabschnitt VTB9 nach VTB6. Die zulässige Vorpresskraft der Hauptpressstation sank beim Kurveneintritt auf einen Wert von 10200 kN. Die tatsächliche Kraft in der Hauptpressstation stieg mit zunehmenden Vortriebsfortschritt an, und überschritt die zulässige Kraft an einer Stelle um etwa 500 kN. Diese Überschreitung führte jedoch nicht zu einer Überbelastung der Vortriebsrohre, da in der Berechnung der zulässigen Vortriebskraft ein Sicherheitsbeiwert von 1,1 berücksichtigt wird. Um diesen Faktor korrigiert betrug die zulässige Vorpresskraft 11200 kN. Diese wurde von der Hauptpresse nicht überschritten. Der Pressenmeister hätte diese Gefahrensituation erkennen und durch einen häufigeren Einsatz des Dehners begegnen können, wenn zu diesem Zeitpunkt schon die Online-Darstellung – wie in Bild 27 dargestellt – zur Verfügung gestanden hätte. Dies war allerdings erst im letzten, dritten Abschnitt der Fall.

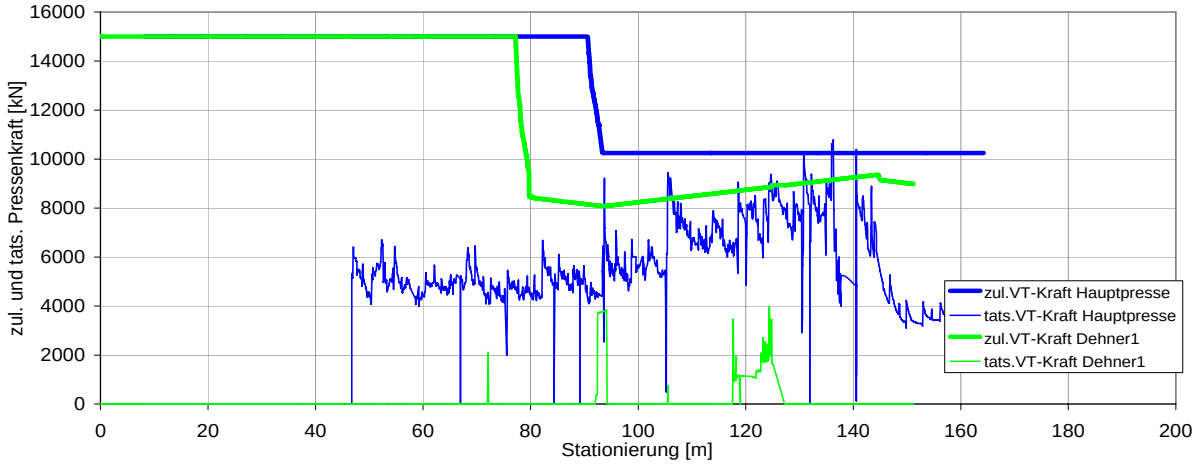


Bild 29: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6

Im dritten Vortriebsabschnitt lag ebenfalls die von der Hauptpressstation aufgebrachte Vortriebskraft nach dem Kurveneintritt nahe an der zulässigen Vorpresskraft (Bild 30), überschreitet sie aber nur unwesentlich an einer Stelle. Unter Einbeziehung der Informationen aus der Online-Überwachung konnte auf die Aktivierung des Dehners weitestgehend verzichtet werden, was sich vorteilhaft auf die Vortriebsleistung auswirkte.

Somit konnte der Vortrieb unter Wahrung der online ermittelten zulässigen Vorpresskraft kontrolliert und sicher ausgeführt werden.

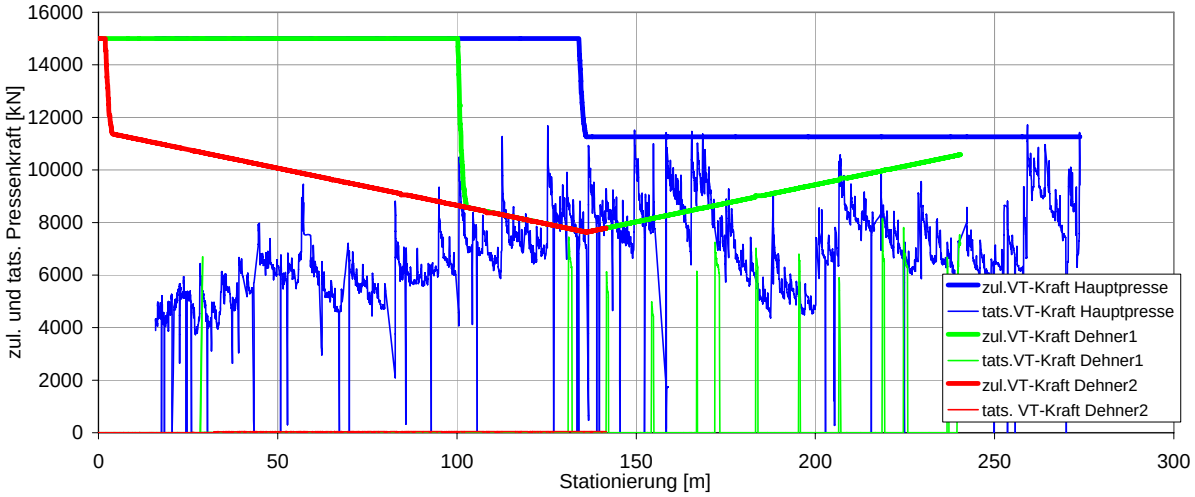


Bild 30: zul. und tats. VT-Kraft, Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3

In Bild 31 ist die zulässige und die tatsächliche Vorpresskraft ebenfalls für den dritten Vortriebsabschnitt VTB6-VTB3 dargestellt. Allerdings wurde zur Ermittlung der zulässigen Vorpresskraft anstelle eines OSB-Druckübertragungsrings ein Vollholz-Druckübertragungsring mit gleichen Abmessungen in der Rohrfuge simuliert. Das Druckspannungs-Stauchungsverhalten von Vollholz ist durch eine höhere plastische Verformung und eine daraus resultierende höhere Steifigkeit des vorverformten Restmaterials charakterisiert. Diese höhere Steifigkeit führt zu einer größeren Fugenklaffung und zu höheren Druckspannungen, sodass im Umkehrschluss die zulässige Vorpresskraft unter Verwendung eines Vollholzrings im Unterschied zu einem OSB-Ring unter sonst gleichen Randbedingungen sinkt. So beträgt die zulässige Vorpresskraft an der Stelle der höchsten Verwinkelung mit dem OSB-Ring etwa 7700 kN, wohingegen unter Verwendung eines Vollholzringes an gleicher Stelle nur 6000 kN schadlos übertragen werden können.

Dies führt im Verlauf des simulierten dritten Vortriebsabschnitts zu einer Überschreitung der zulässigen Pressenkräfte an der Hauptpressstation und an Dehner 1. Das Maximum der Überschreitung an den Hauptpressstation beträgt etwa 2000 kN. Eine derartige Überschreitung hätte auch unter Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwertes von 1,1 zu einer Überbeanspruchung der Vortriebsrohre geführt.

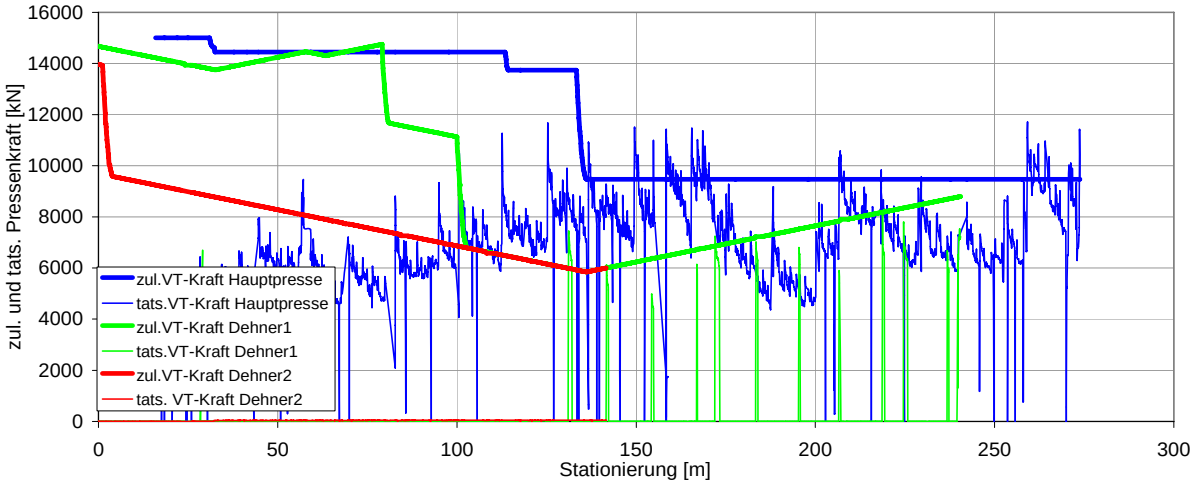


Bild 31: zul. und tats. Kraft, simuliert mit Vollholz-Druckübertragungring, 3.Abschnitt

4. Zusammenfassung

Bei der statischen Berechnung eines Rohrvortriebs im Vorfeld einer Vortriebsmaßnahme kann die wesentliche Eingangsgröße auf die Belastung der Rohre, nämlich die Rohrverwinkelung, nur abgeschätzt werden. Bereits eine geringe Rohrverwinkelung führt jedoch zu einer starken Reduzierung der lastübertragenden Fläche zwischen zwei Rohren und somit zu einer Erhöhung der Druckspannung in der Rohrfuge. Das derzeit noch gültigen Arbeitsblatt 161 sieht daher bei der Berechnung der Vorpresskraft hohe Sicherheitsbeiwerte vor, erfasst aber die spezifischen Gegebenheiten beim Rohrvortrieb sehr pauschal.

In dem neuen überarbeiteten Arbeitsblatt 161, das dieses Jahr im Gelbdruck erscheinen soll, wird das Materialverhalten des Druckübertragungsrings und die Spannungsverteilung in der Fuge wesentlich genauer abgeschätzt. Zudem gehen nun die Rohrgeometrie und die Rohrtrasse in die Berechnung mit ein, sodass auch Kurvenvortriebe statisch berechnet werden können. Die Rohrverwinkelung –dies liegt in der Natur der Sache- kann aber dennoch nur abgeschätzt werden, allerdings werden hierzu Angaben gemacht. So ist für einen Rohrvortrieb DN2500, wie beim begleiteten Rohrvortrieb „Vorthbach“, die Verwinkelung aus Versteuerung in der Geraden mit 0,175° und bei einem Kurvenradius von 235m mit 0,1° anzusetzen.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Baustellenmessungen zeigen, dass die Verwinkelungen in der Geraden regelmäßig an diesen Grenzwert heranreichen, sodass bei der Annahme der Rohrverwinkelung keine „worst-case-Werte“, sondern übliche Werte angesetzt werden. Die in der Kurve anzusetzende Verwinkelung aus Versteuerung wurde in allen Vortrieben jedoch deutlich bis um das 2,5-fache überschritten, sodass diese Werte nach den gemachten Erfahrungen eher zu gering angesetzt werden. Zudem wird in der neuen A 161 auch ein deutlich niedrigeres Sicherheitsniveau in der Berechnung gewählt. Daher liegen in der nach der neuen A 161 berechneten Vorpresskraft keine so hohen Reserven mehr, um größere Überschreitungen zu kompensieren.

Diese Problematik wurde erkannt und mit dem Hinweis in A 125 [2] aufgenommen, dass zukünftig die Rohrverwinkelung bei Rohrvortrieben zu überwachen ist.

Das hier dargestellte, gemeinsam mit der Emschergenossenschaft durchgeführte Forschungsvorhaben setzt an dieser Stelle an.

Es wurde ein Überwachungssystem, bestehend aus einer Sensorik und einem Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem nicht nur die Verwinkelung der Rohre erfasst, sondern online die aktuell zulässige Vortriebskraft ermittelt und deren Einhaltung überwacht werden kann. Hierzu wird die Verwinkelung ausgewählter

Rohrfugen gemessen und in einem komplexen Rechenalgorithmus die zulässige Vorpresskraft berechnet. Der Berechnungsvorgang wird in einem Takt von wenigen Sekunden wiederholt, so dass jederzeit online die auf Grundlage der aktuellen Belastungssituation berechnete zulässige Vortriebskraft für jede Presseinrichtung auf einem Monitor sowohl der Bauüberwachung als auch dem Pressmeister angezeigt wird. Wird die online ermittelte, zulässige Vortriebskraft erreicht, sind beispielsweise die Dehner zu aktivieren oder es ist die Schmierung des Rohrstrangs zu verbessern.

Die Rohrverwinkelungen, die errechneten zulässigen Vortriebskräfte und die tatsächlichen Presskräfte werden über den gesamten Vortriebsverlauf abgespeichert. Damit hat der Auftraggeber eine vollständige Dokumentation über die Qualität der Vortriebsarbeiten und kann im Zweifelsfall erkennen, ob und in welchem Maße Vortriebsrohre eventuell zu hoch belastet wurden.

Neben der Online-Überwachung der Pressarbeiten, die den schadlosen Einbau der Rohre sicherstellt, können die nun gesammelten, weitergehenden Informationen genutzt werden, Kosten einzusparen.

So kann die Aktivierung, aber auch der Einbau von Dehnern situativ geplant werden und es können bei der Planung von Rohrvortrieben größere Schachtabstände sowie engere Kurvenradien geplant werden, weil sie sicherer beherrschbar sind.

In der Summe werden die Kosten für den Einsatz eines Online-Überwachungssystems in mehrfacher Hinsicht an anderen Stellen eingespart: Schäden und ihre kostspielige Sanierung werden vermieden, die Nutzungsdauer der Kanäle wird sichergestellt, Rohrvortriebe können wirtschaftlicher geplant und ausgeführt werden.

Das hier dargestellte Forschungsprojekt stellt einen großen Schritt zur Verbesserung des Rohrvortriebs dar und bietet die Möglichkeit, die entwickelte Überwachungstechnik direkt für die Praxis zu nutzen.

5. Literaturverzeichnis

[1] Hennerkes, J., Althoff, H.: Planerische und technische Voraussetzungen beim Bau des Abwasserkanals Emscher: 36. Essener Tagung fürs Abwasser- und Abfallwirtschaft, ISBN 3-932590-99-x

[2] ATV Arbeitsblatt 125: Rohrvortrieb, GFA, St. Augustin, September 1996

[3] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 2001

[4] DIN EN 295: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserkanäle und –leitungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2000

[5] ATV Arbeitsblatt 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren, Abwassertechnische Vereinigung e.V. GFA, St. Augustin, Januar 1990

[6] Sicherung und Verbesserung der Rohrvortriebstechnik als umweltschonendes Verlegeverfahren bei Sanierung und Neubau von Kanälen. Bundesminister für Bildung und Forschung; Fachverband Steinzeugindustrie e.V.; Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V.; Abwassertechnische Vereinigung e.V., Güteschutz Kanalbau e.V., Förderkennzeichen 02WK 9996/0, Laufzeit 2000-2002

[7] Anwendung eines neuen elektrischen Foliendruckmesssystems im Bauwesen am Beispiel der Sattelpressungen bei Zylinderschalen und der Presskraftverteilung beim Rohrvortrieb. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Förderkennzeichen GU 312/2-1, Laufzeit 1999-2001

Anhang

Nachfolgend dargestellt sind für jeden der drei begleiteten Vortriebsabschnitte die Diagramme :

- Übersicht über die Trassierung und die Messtechnik
- Ablage der Vortriebsmaschine von der Sollachse
- Horizontale Verwinkelung der Messfugen
- Vertikale Verwinkelung der Messfugen
- Fugenklaffungsmaß z/d_a, Messfugen 1-4
- Maximale Druckspannung, Messfugen 1-4
- Tatsächliche und berechnete zulässige Pressenkräfte

Anhang A 1: Vortriebsabschnitt VTB16 – VTB11

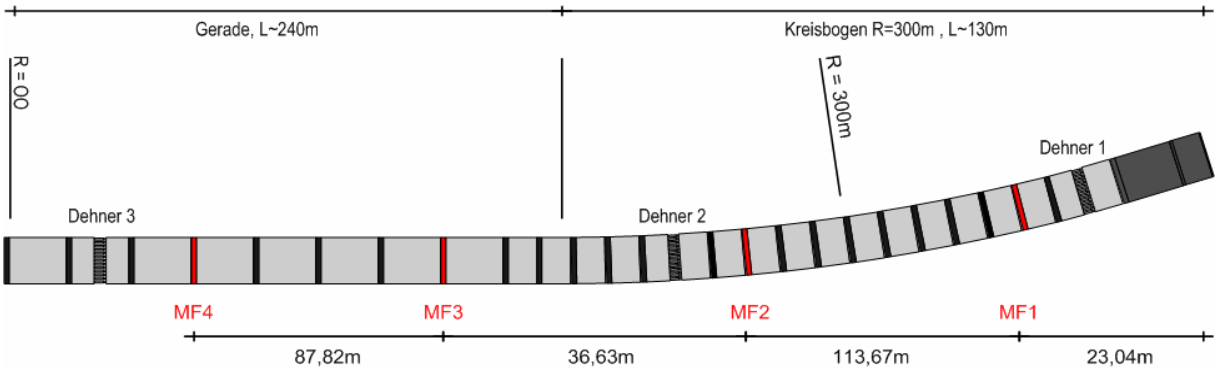


Bild A1.1: Übersicht Vortriebsabschnitt VTB16 - VTB11

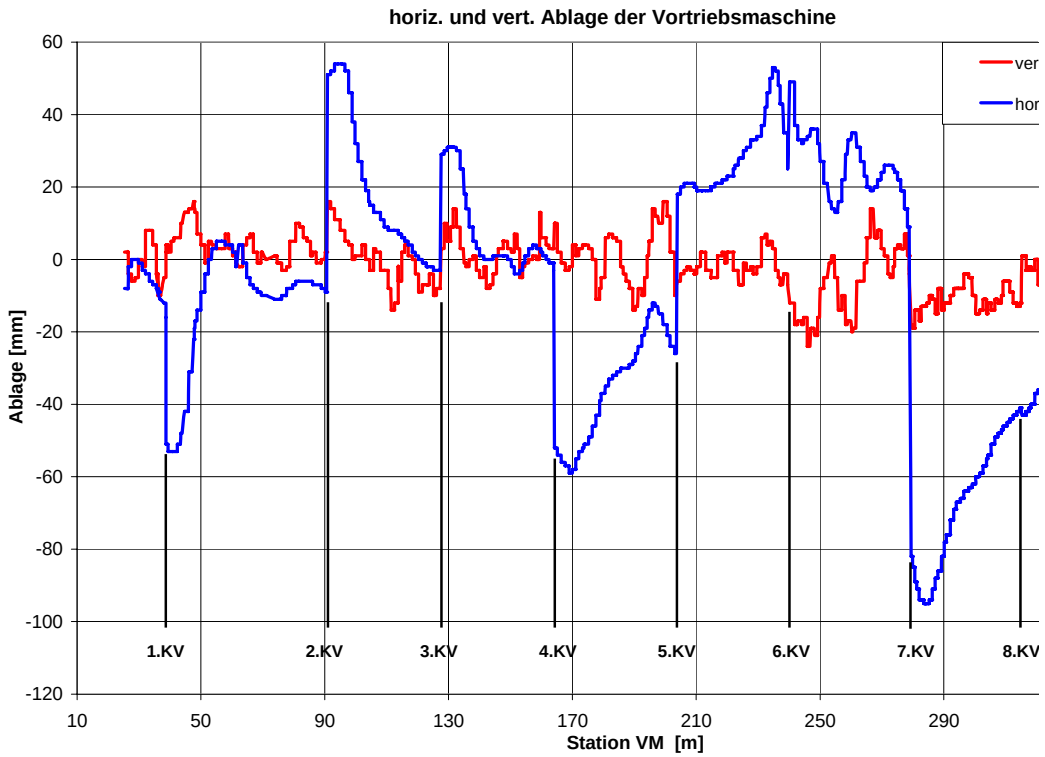


Bild A1.2: horizontale und vertikale Ablage der Vortriebsmaschine

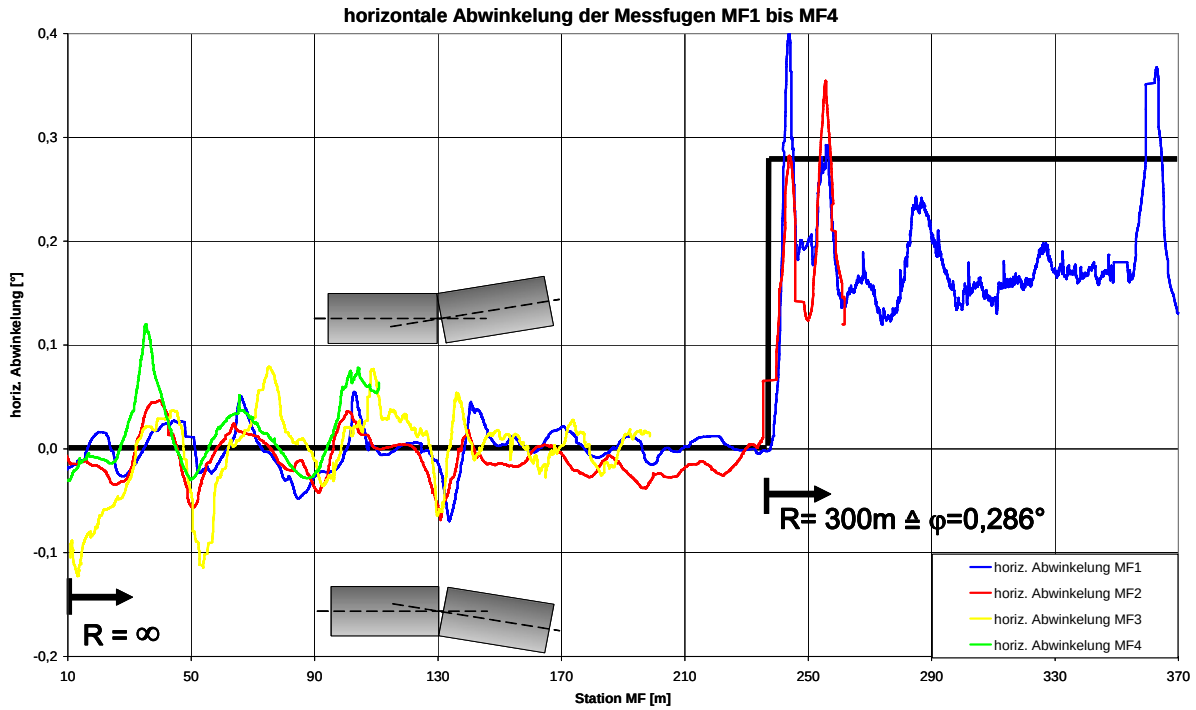


Bild A1.3: horizontale Verwinkelungen

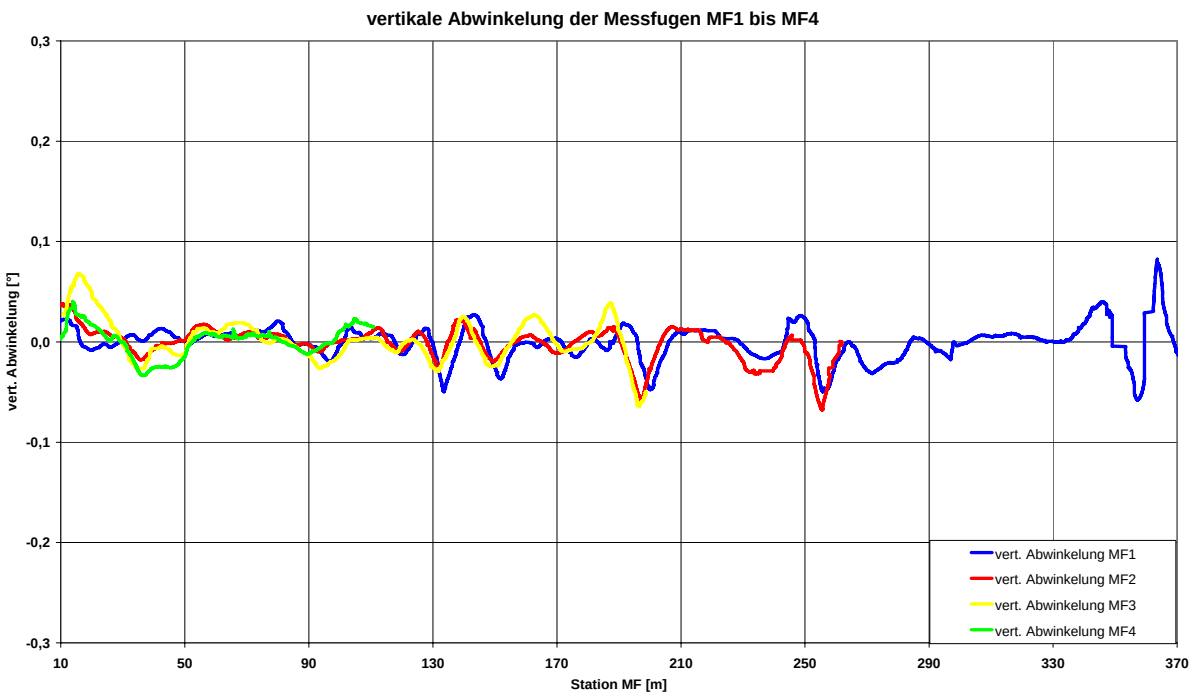


Bild A1.3: vertikale Verwinkelungen

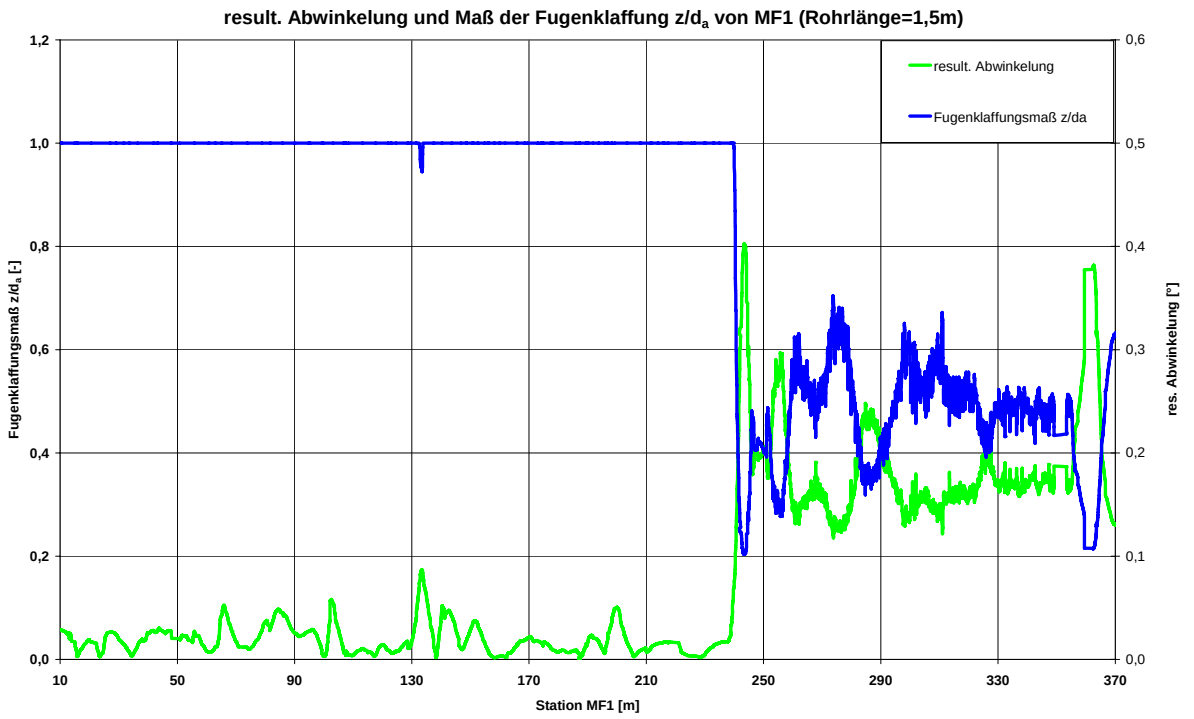


Bild A1.4: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF1

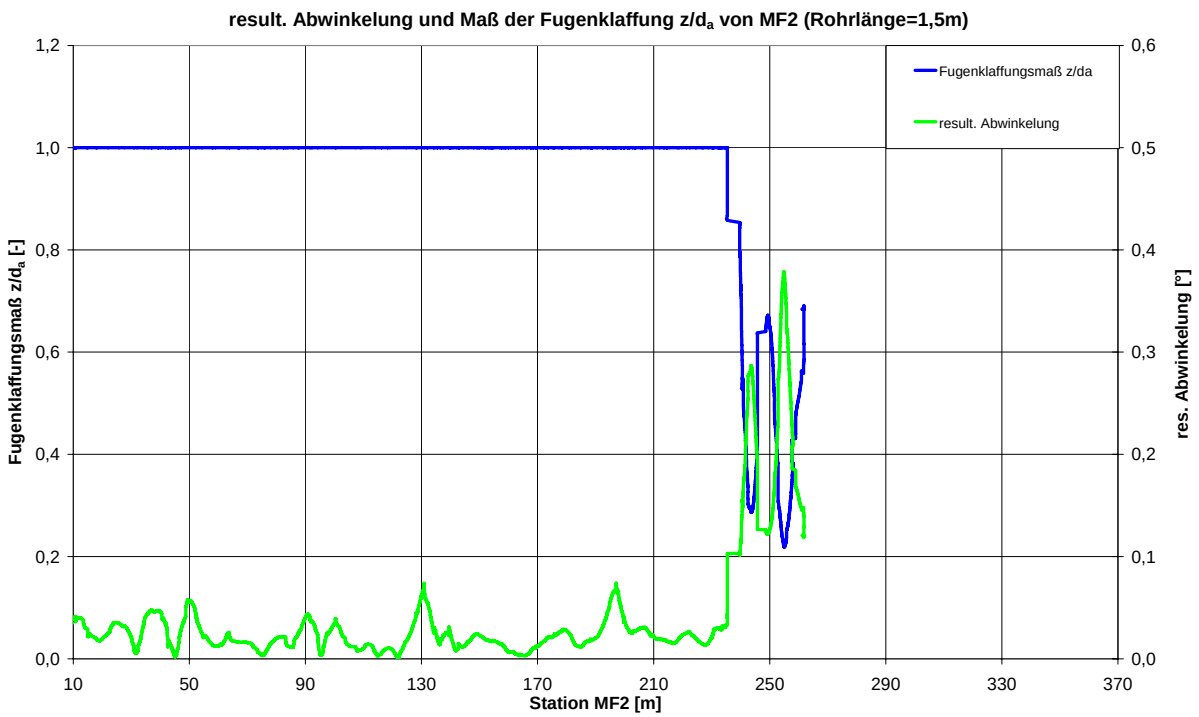


Bild A1.5: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF2

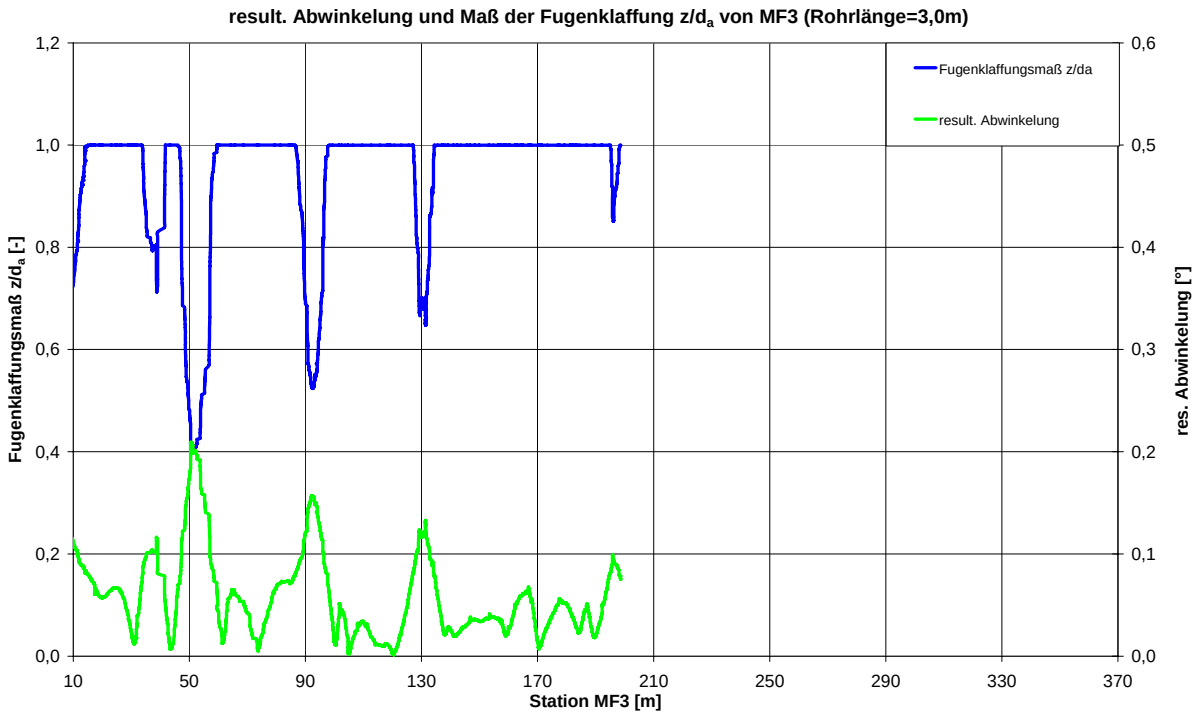


Bild A1.6: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF3

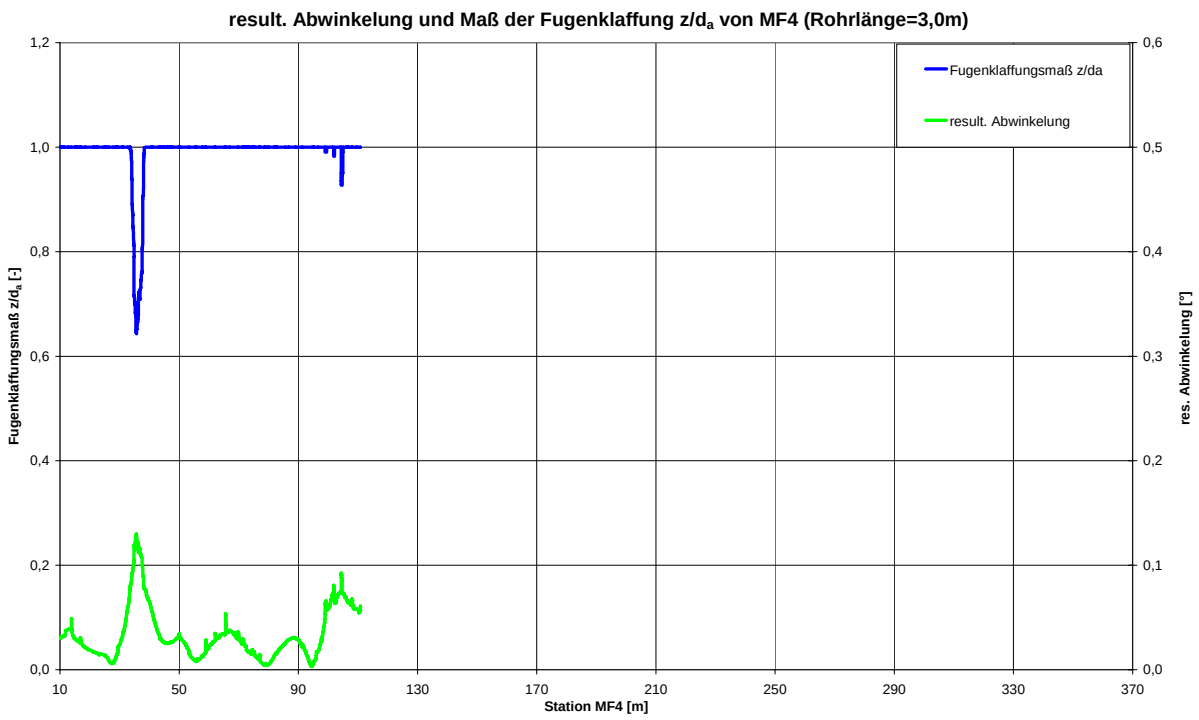


Bild A1.7: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF4

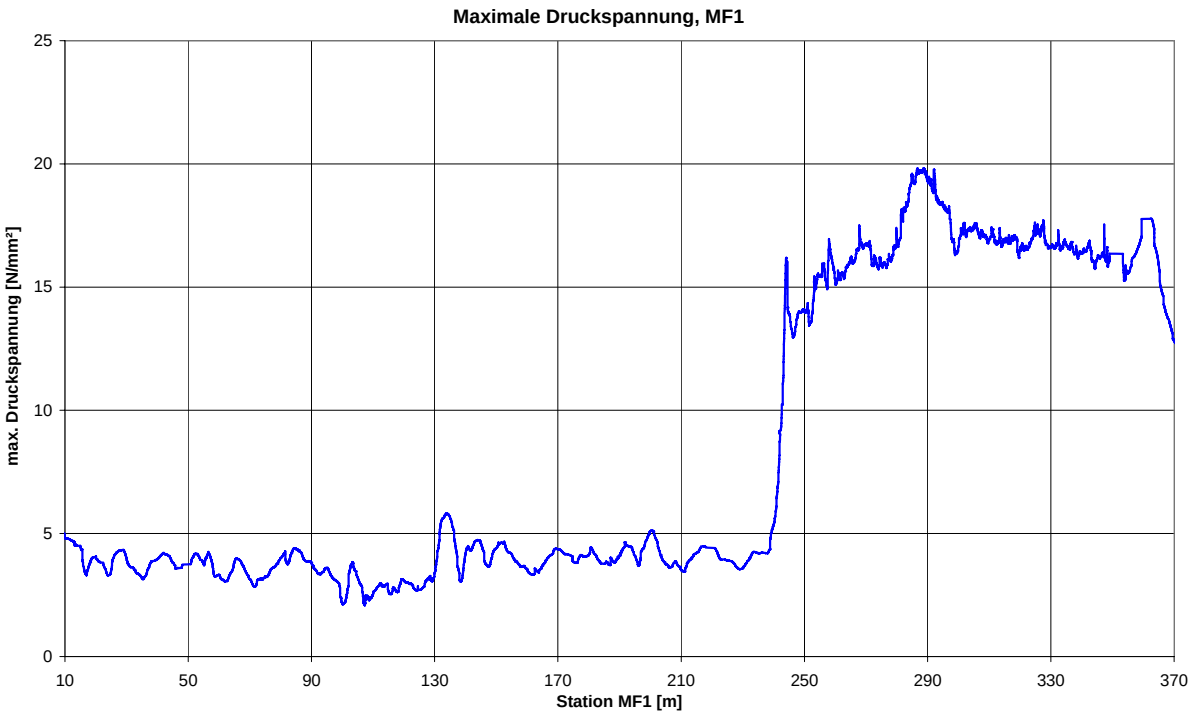


Bild A1.8: Maximale Druckspannung MF1

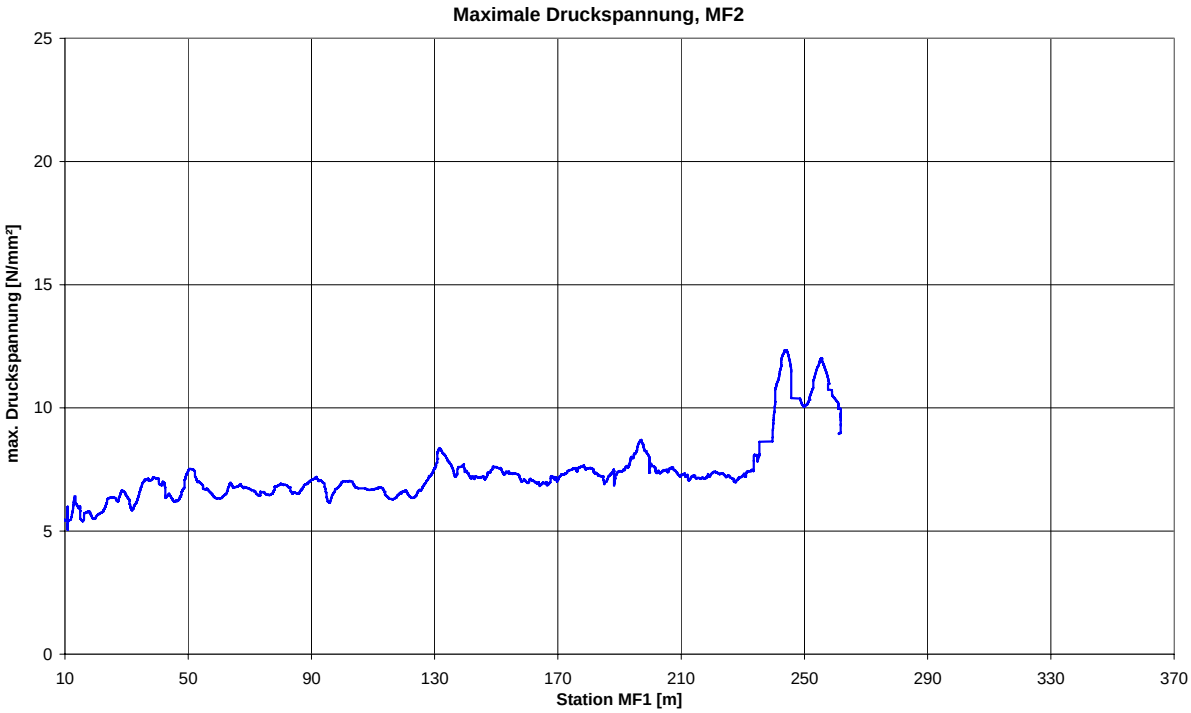


Bild A1.9: Maximale Druckspannung MF2

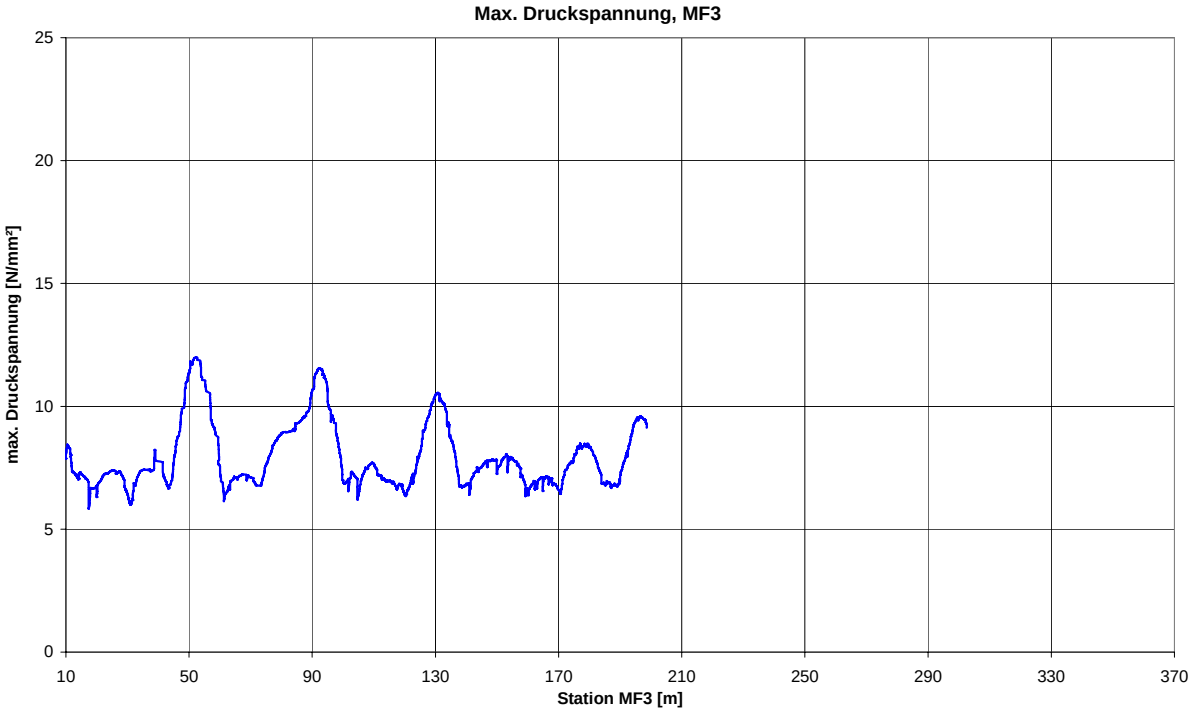


Bild A1.10: Maximale Druckspannung MF3

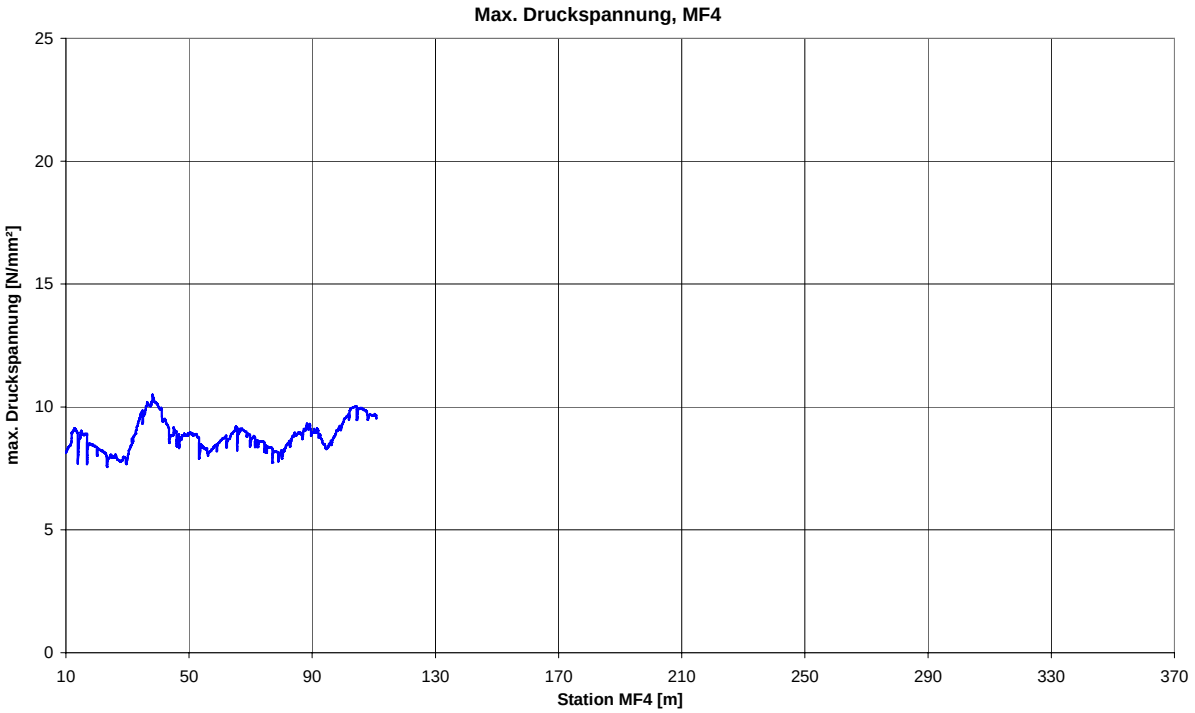


Bild A1.11: Maximale Druckspannung MF4

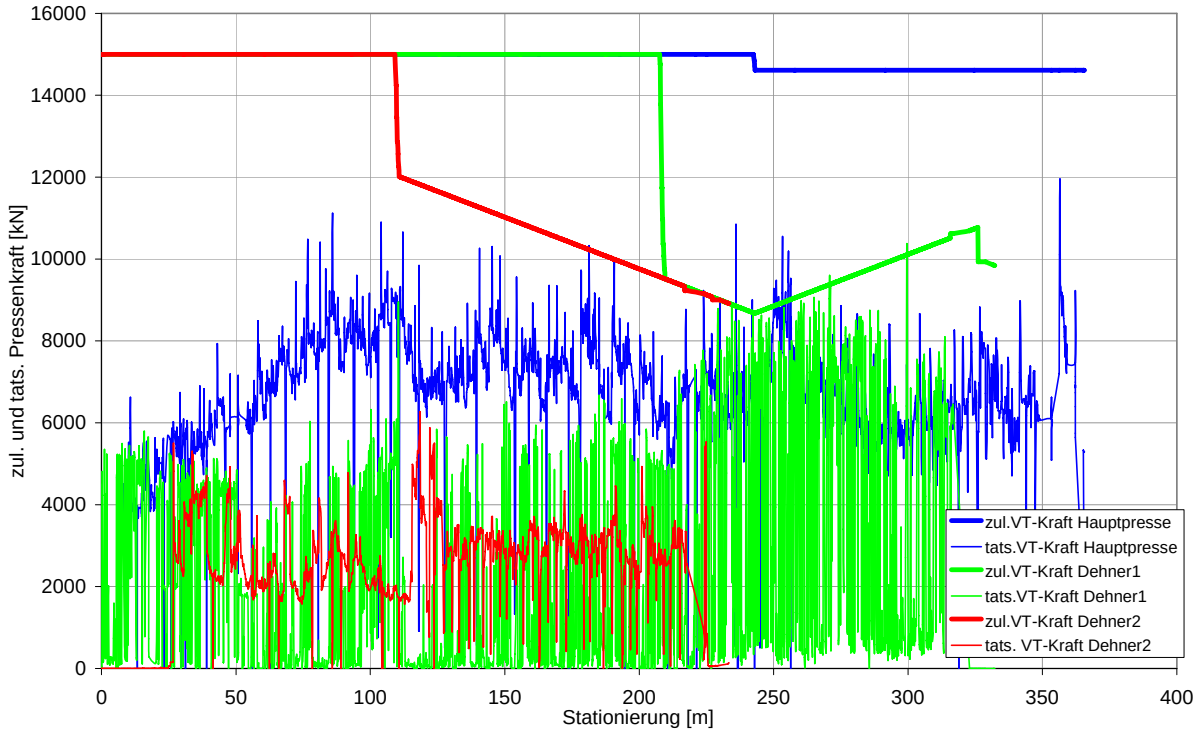


Bild A1.12: Tatsächliche und berechnete zulässige Pressenkräfte

Anhang A 2: Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6

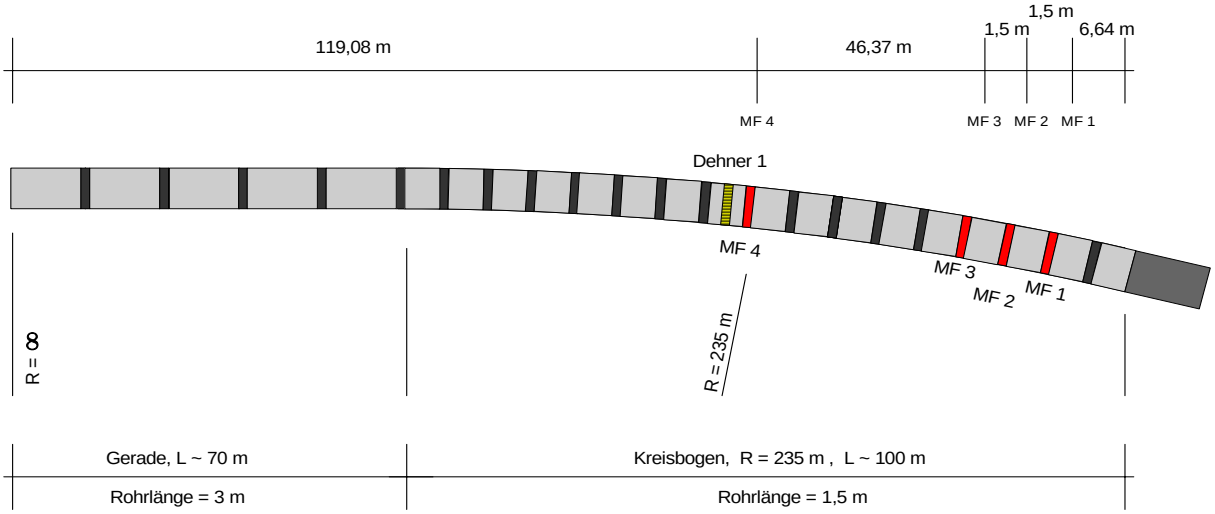


Bild A2.1: Übersicht Vortriebsabschnitt VTB9 – VTB6

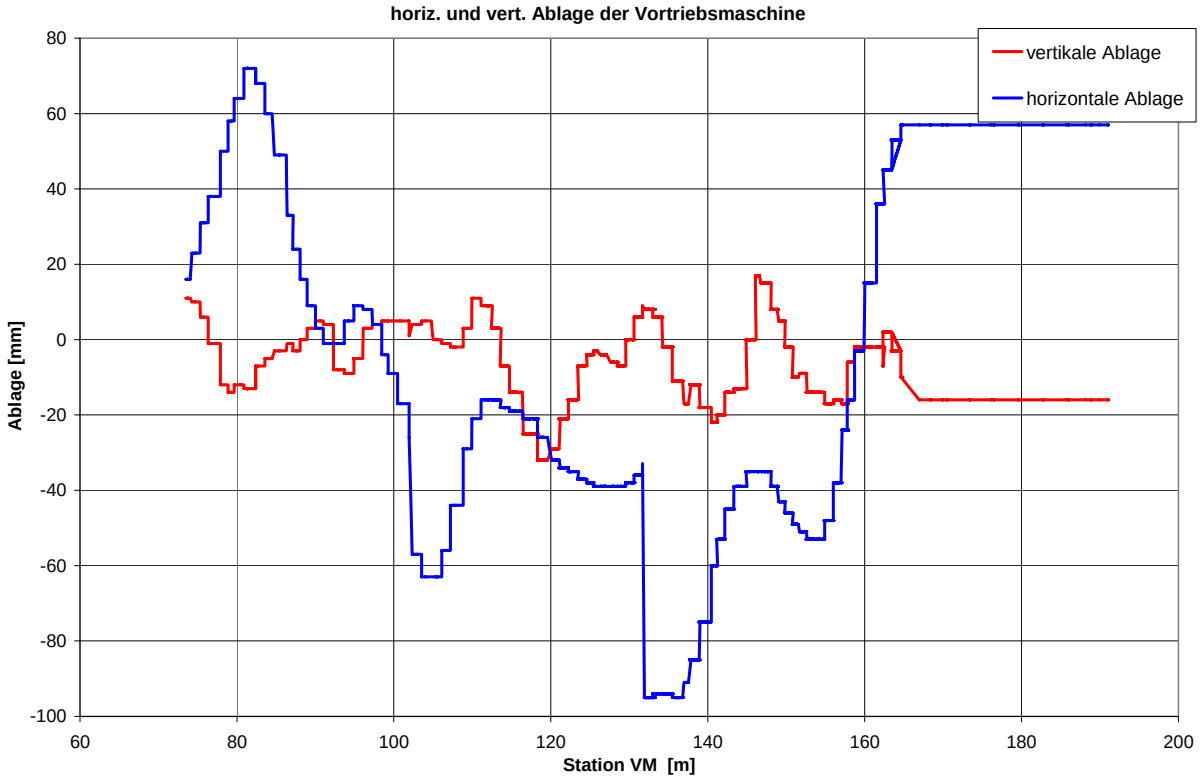


Bild A2.2: horizontale und vertikale Ablage der Vortriebsmaschine

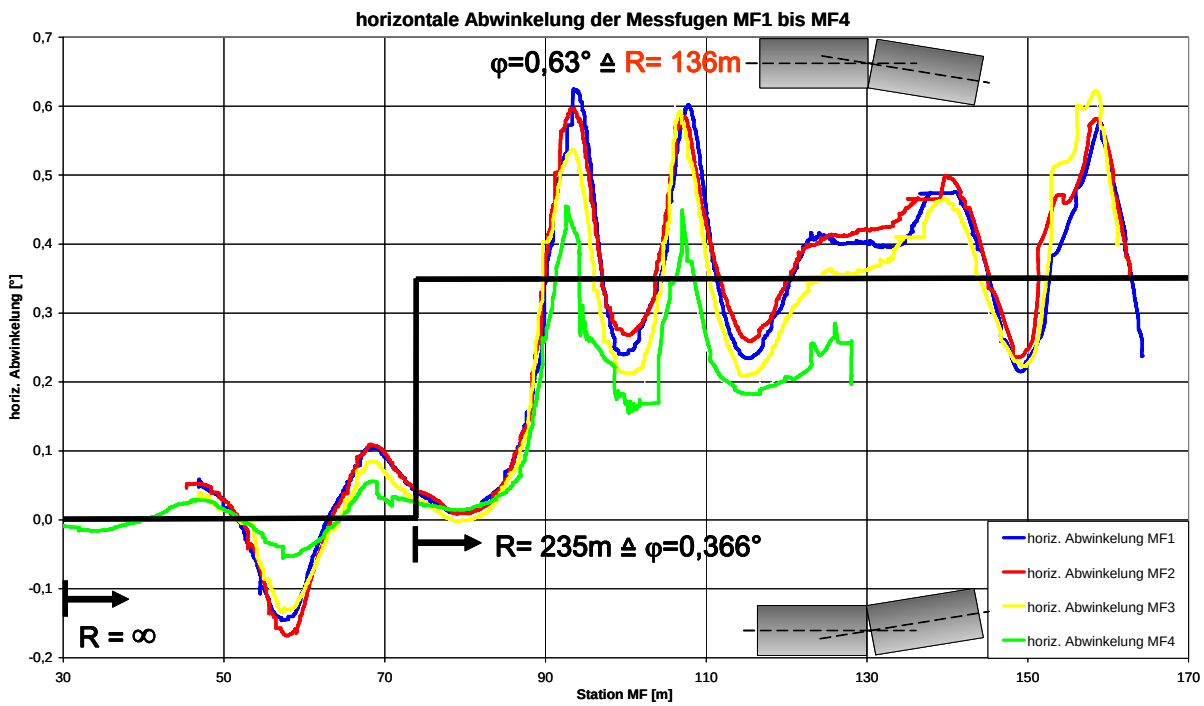


Bild A2.3: horizontale Verwinkelungen

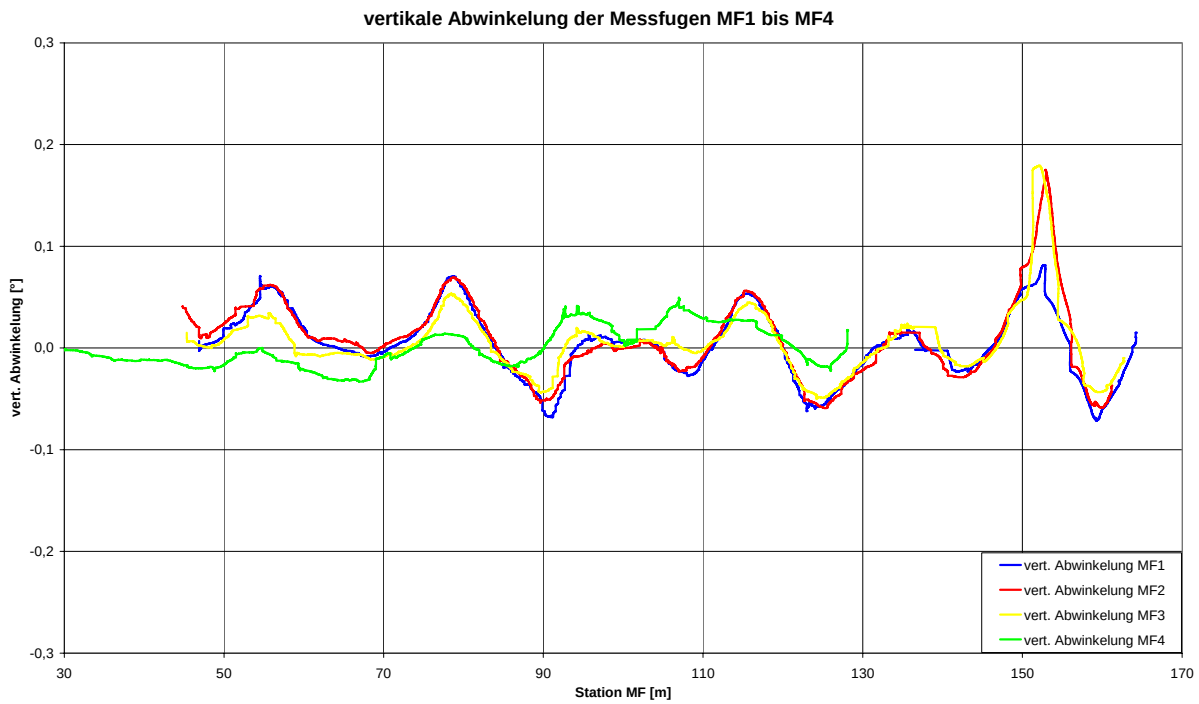


Bild A2.3: vertikale Verwinkelungen

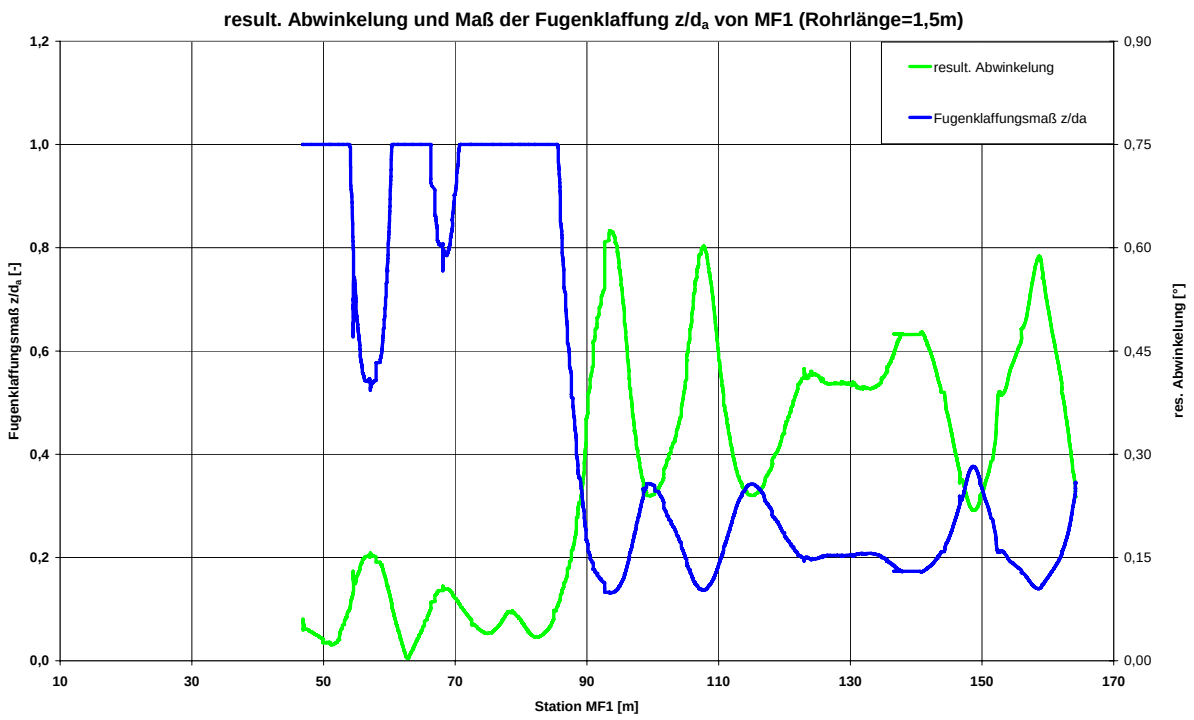


Bild A2.4: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF1

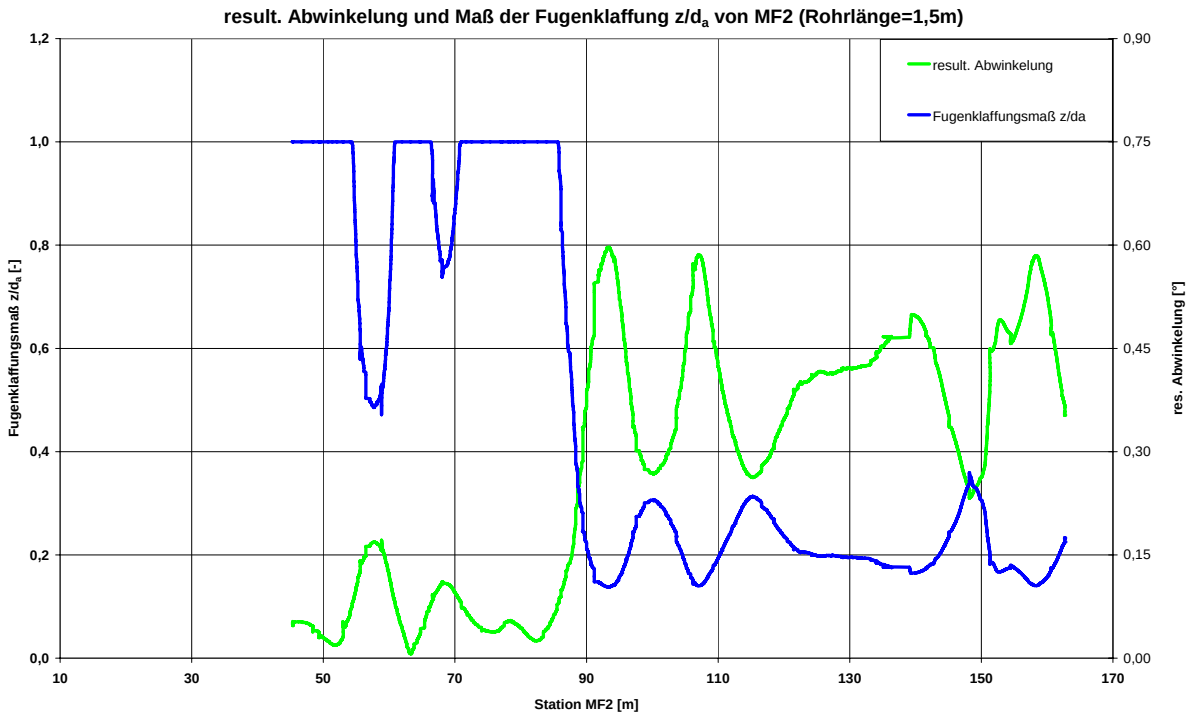


Bild A2.5: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF2

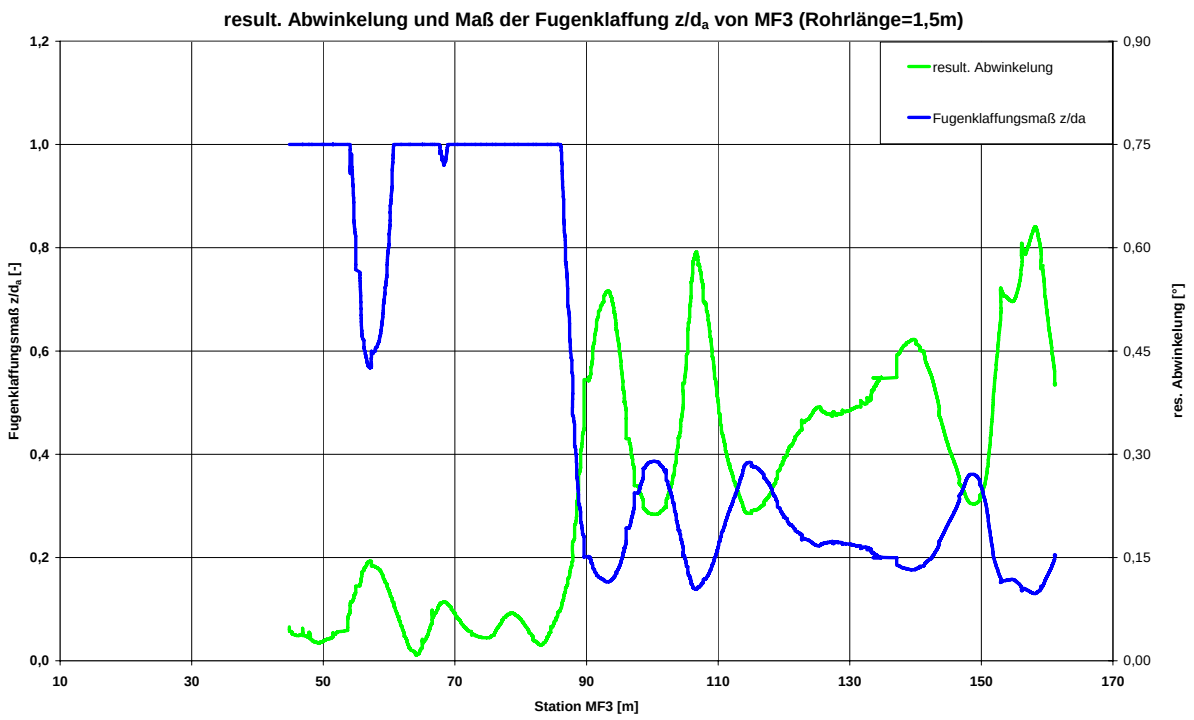


Bild A2.6: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF3

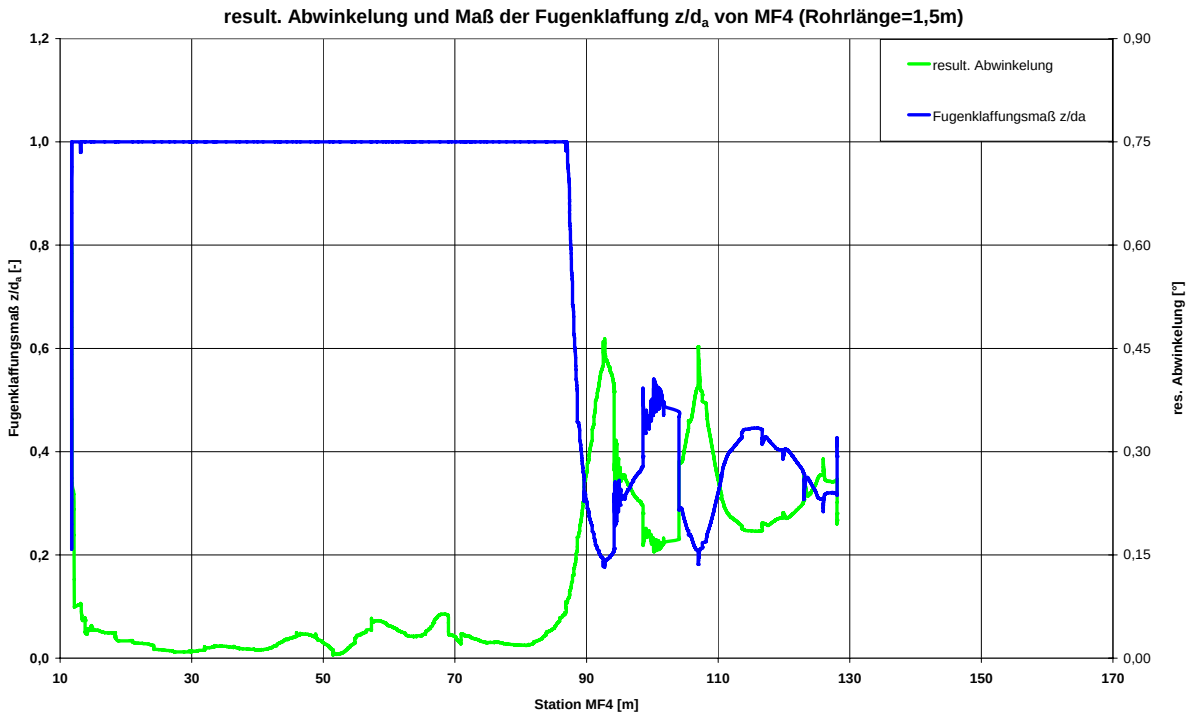


Bild A2.7: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF4

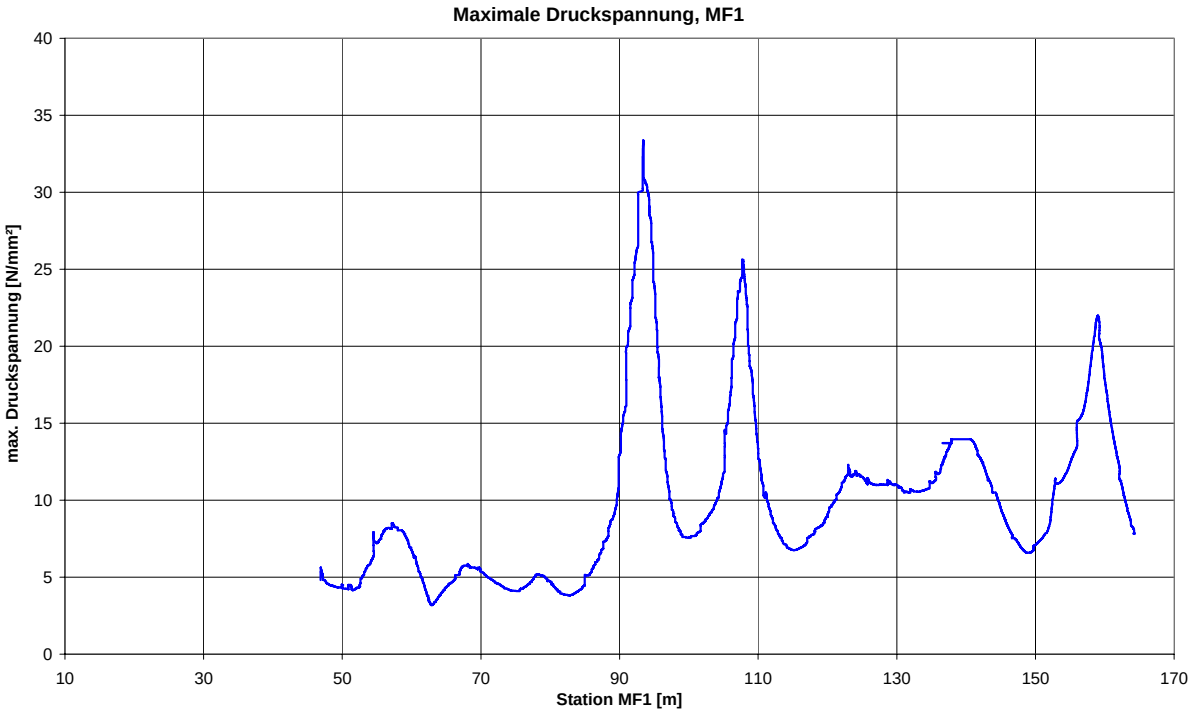


Bild A2.8: Maximale Druckspannung MF1

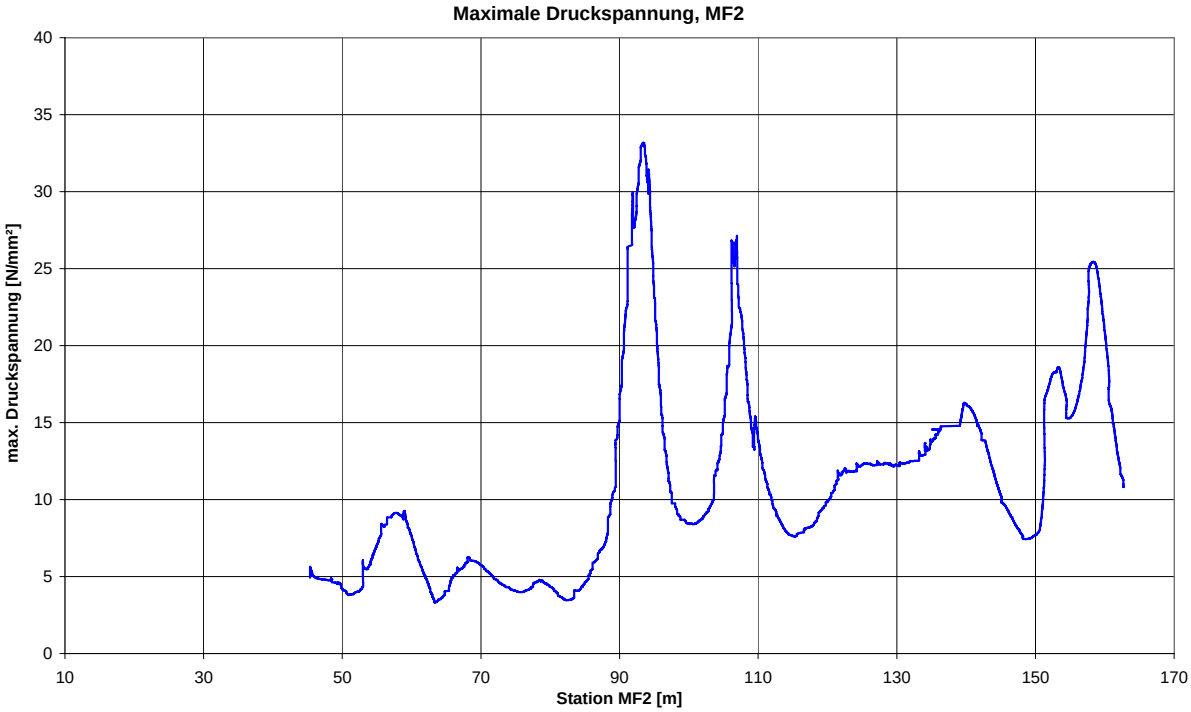


Bild A2.9: Maximale Druckspannung MF2

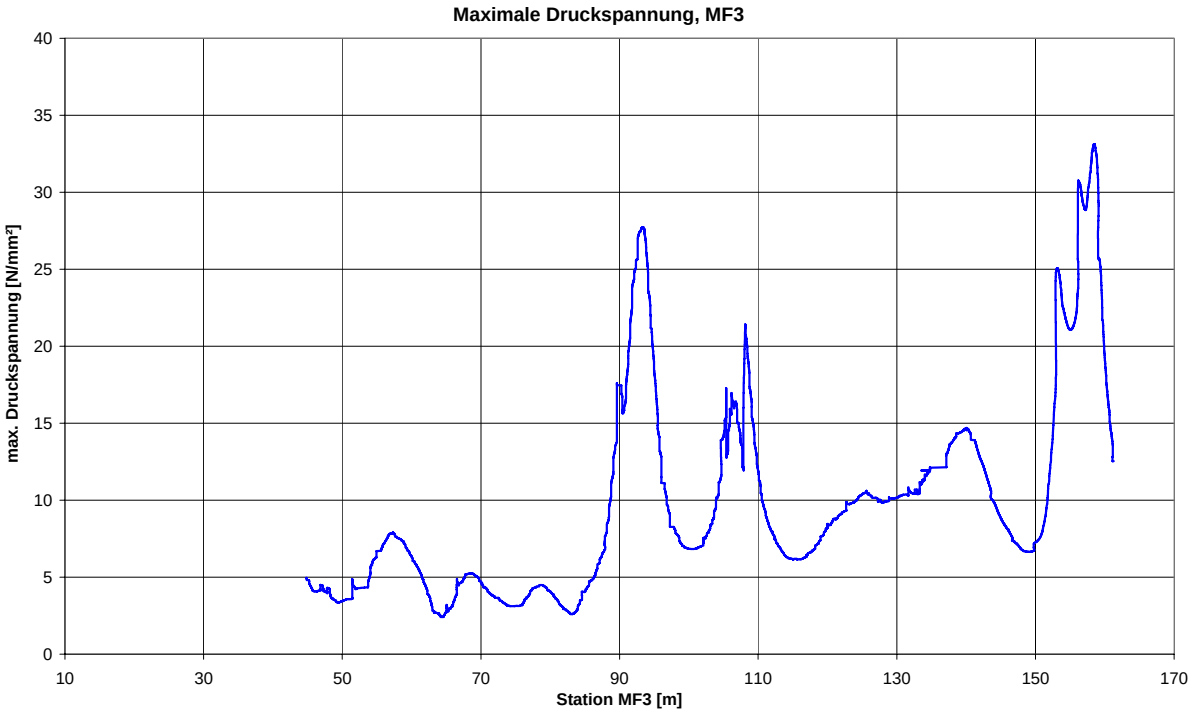


Bild A2.10: Maximale Druckspannung MF3

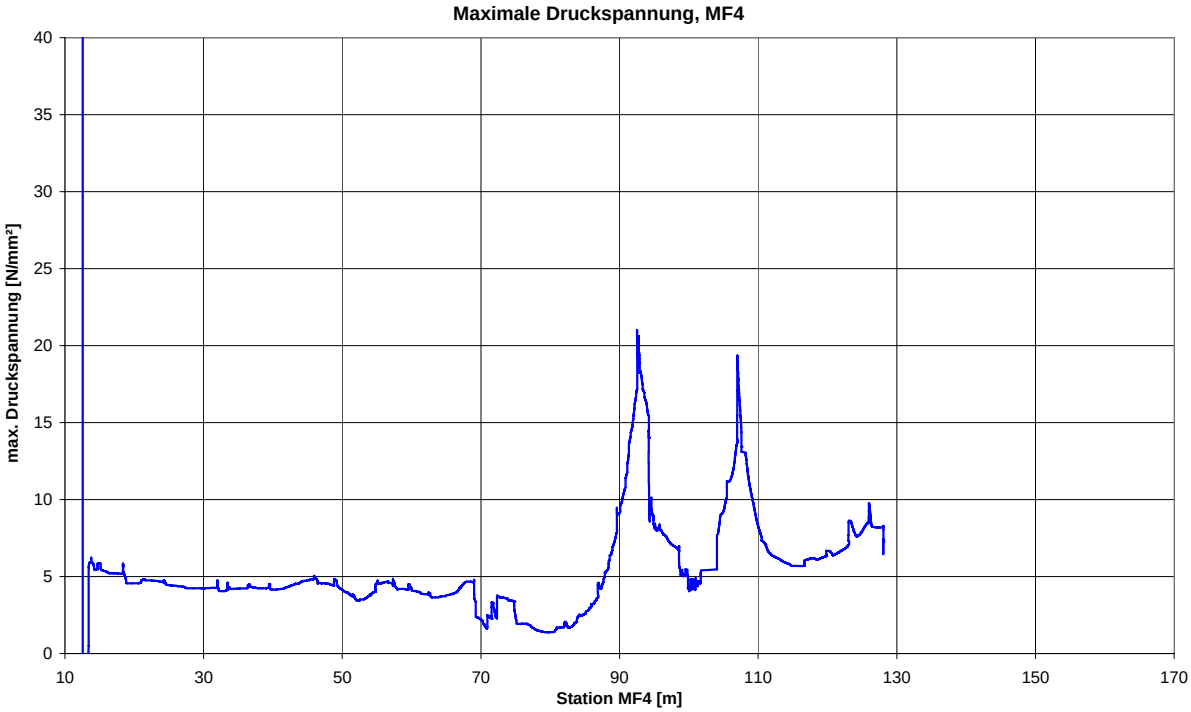


Bild A2.11: Maximale Druckspannung MF4

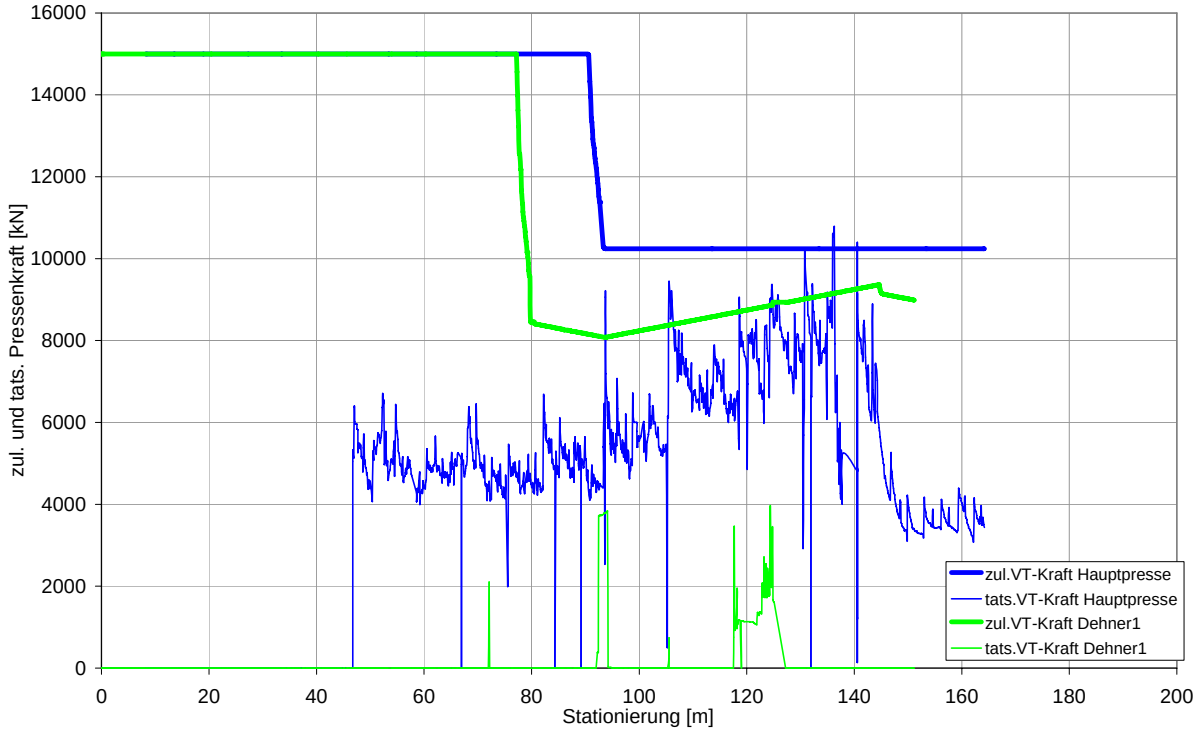


Bild A2.12: Tatsächliche und berechnete zulässige Pressenkräfte

Anhang A 3: Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3

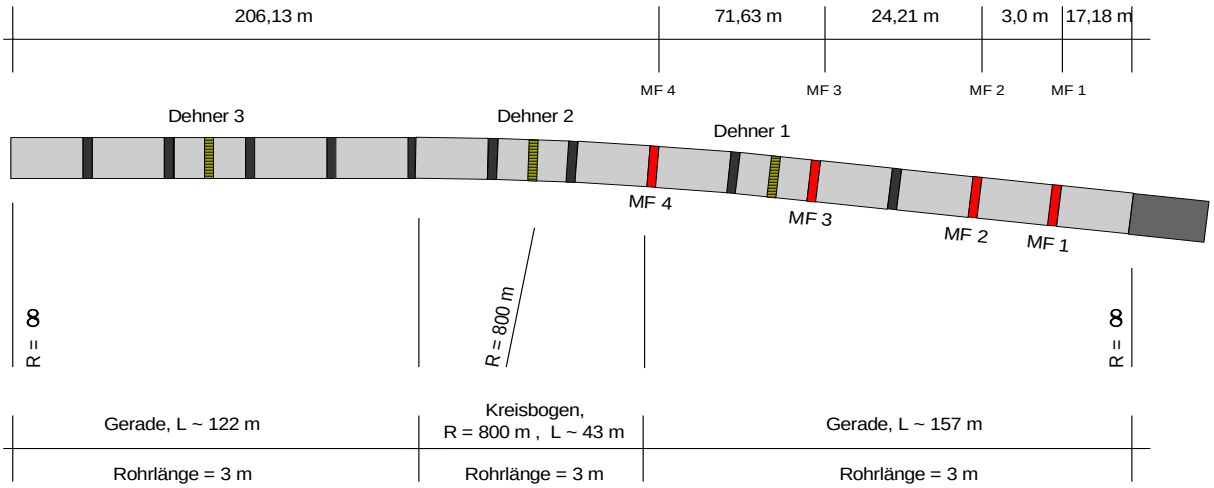


Bild A3.1: Übersicht Vortriebsabschnitt VTB6 – VTB3

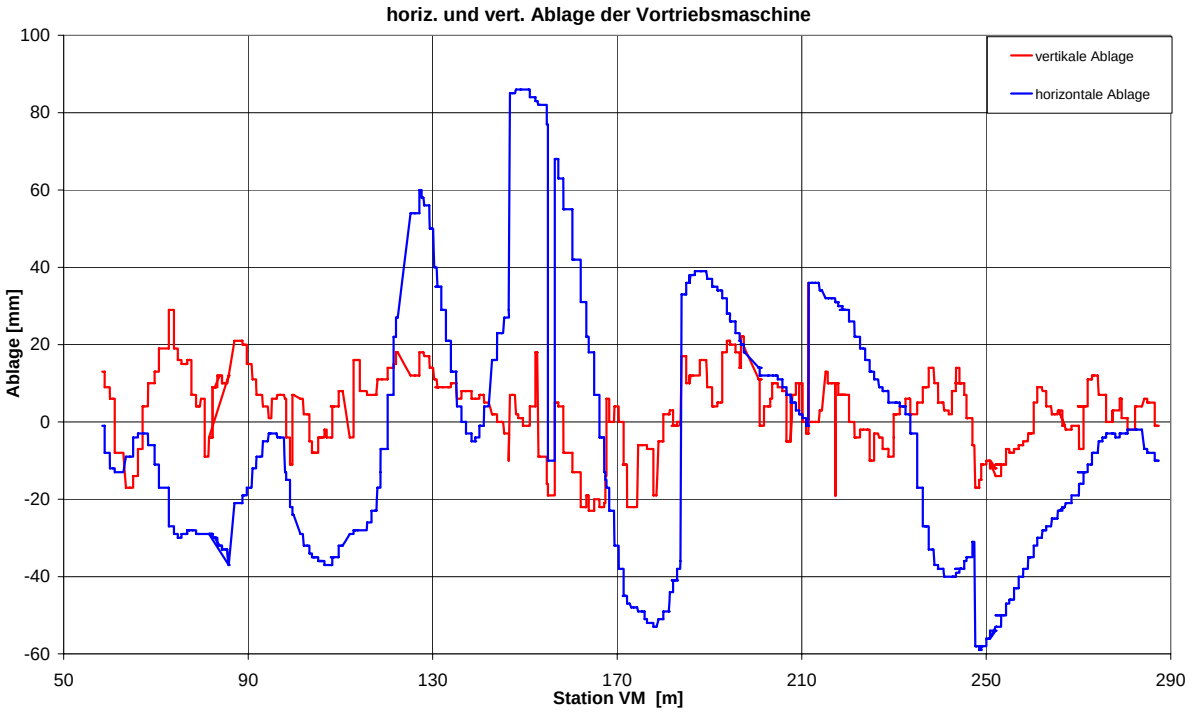


Bild A3.2: horizontale und vertikale Ablage der Vortriebsmaschine

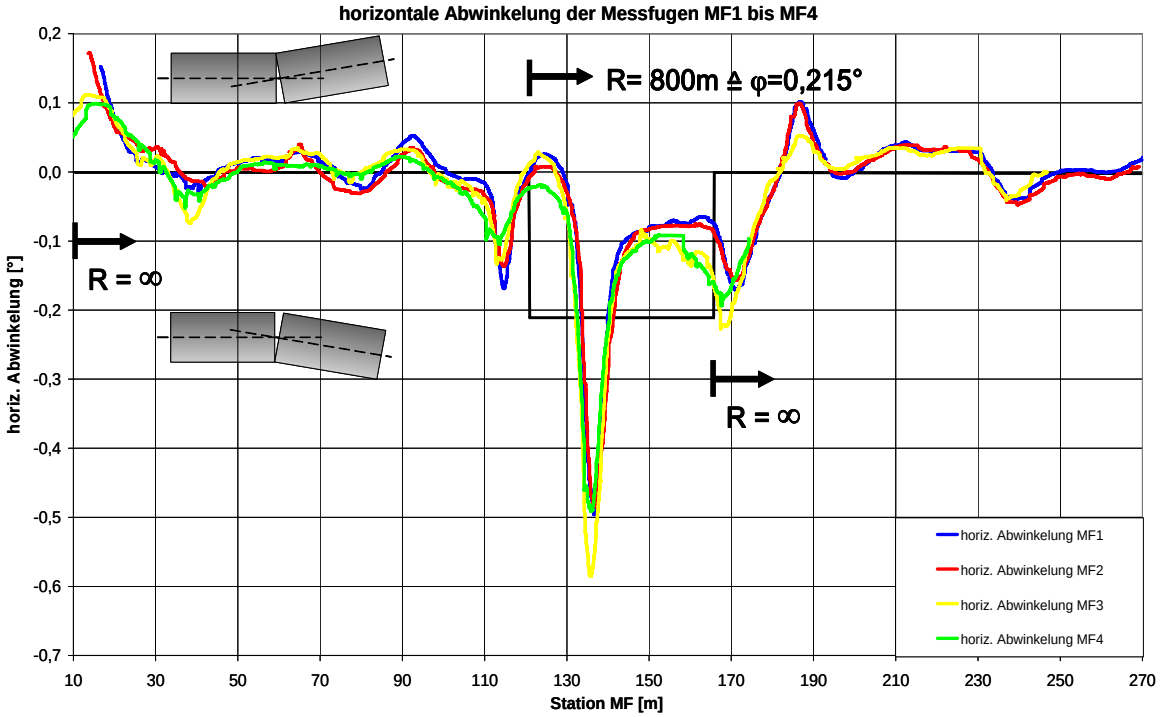


Bild A3.3: horizontale Verwinkelungen

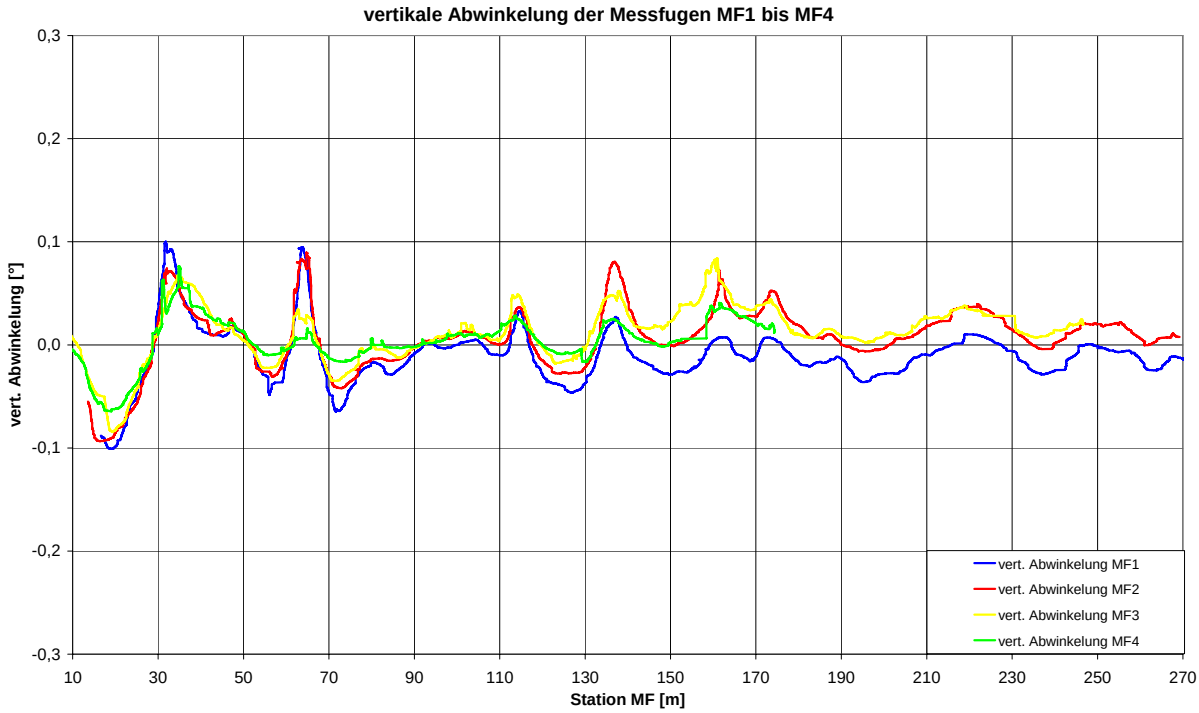


Bild A3.3: vertikale Verwinkelungen

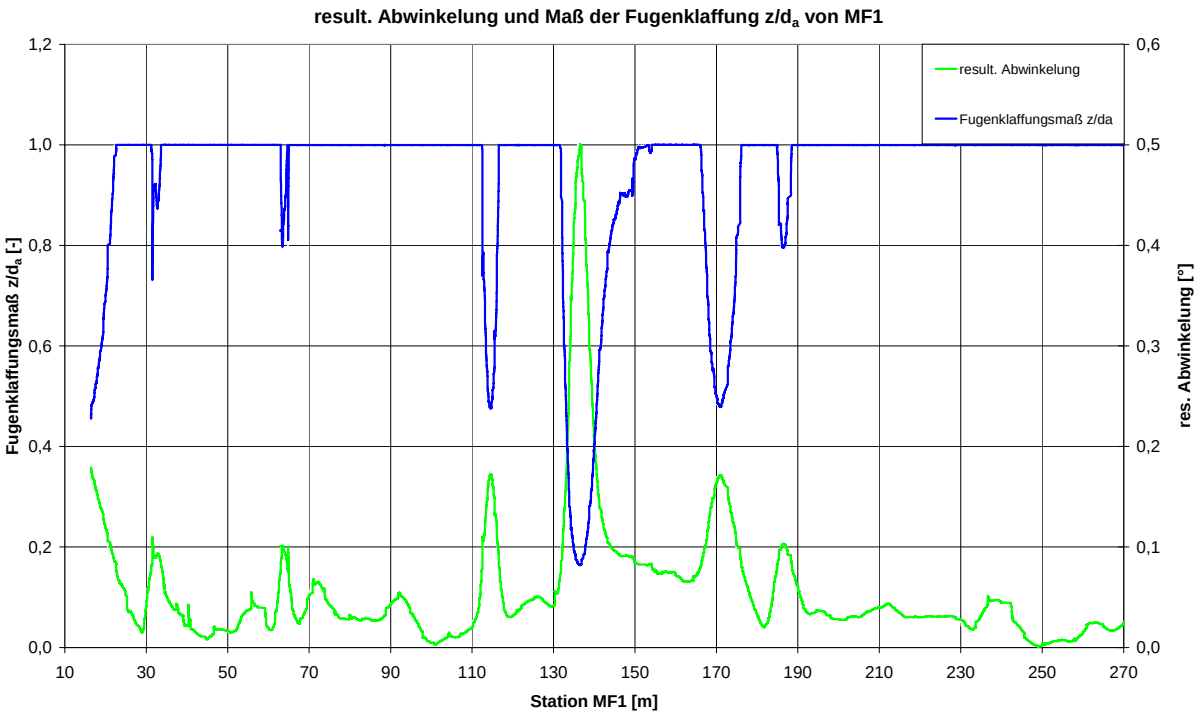


Bild A3.4: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF1

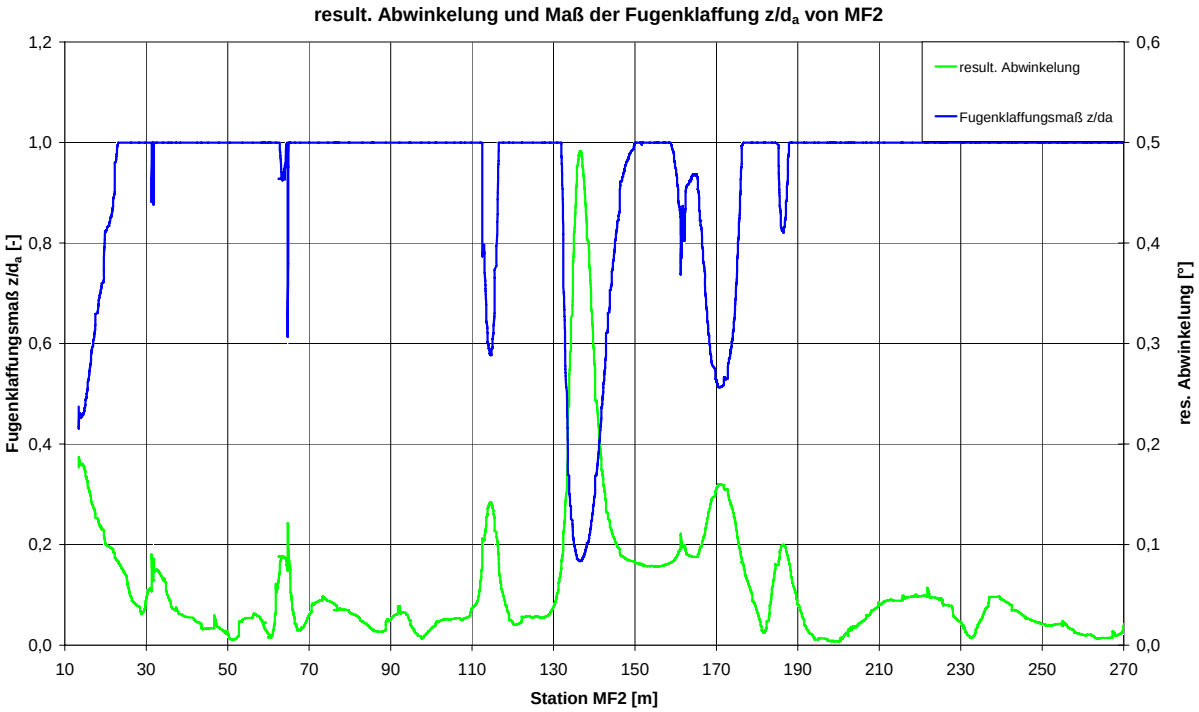


Bild A3.5: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF2

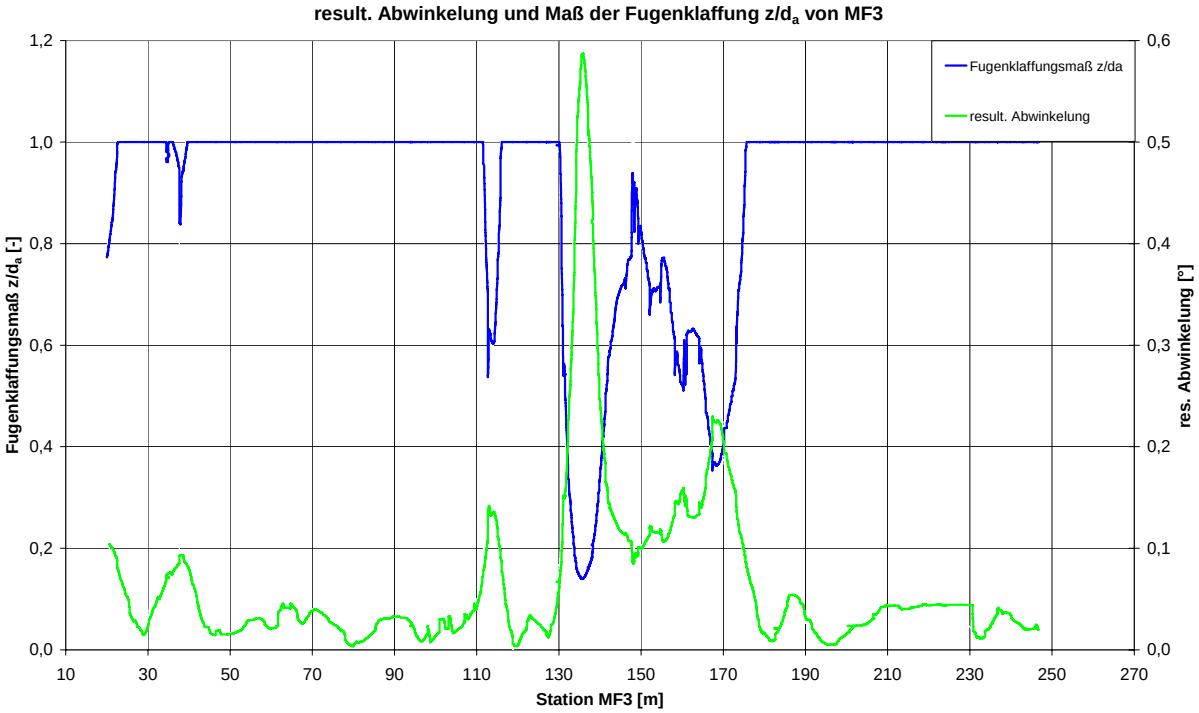


Bild A3.6: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF3

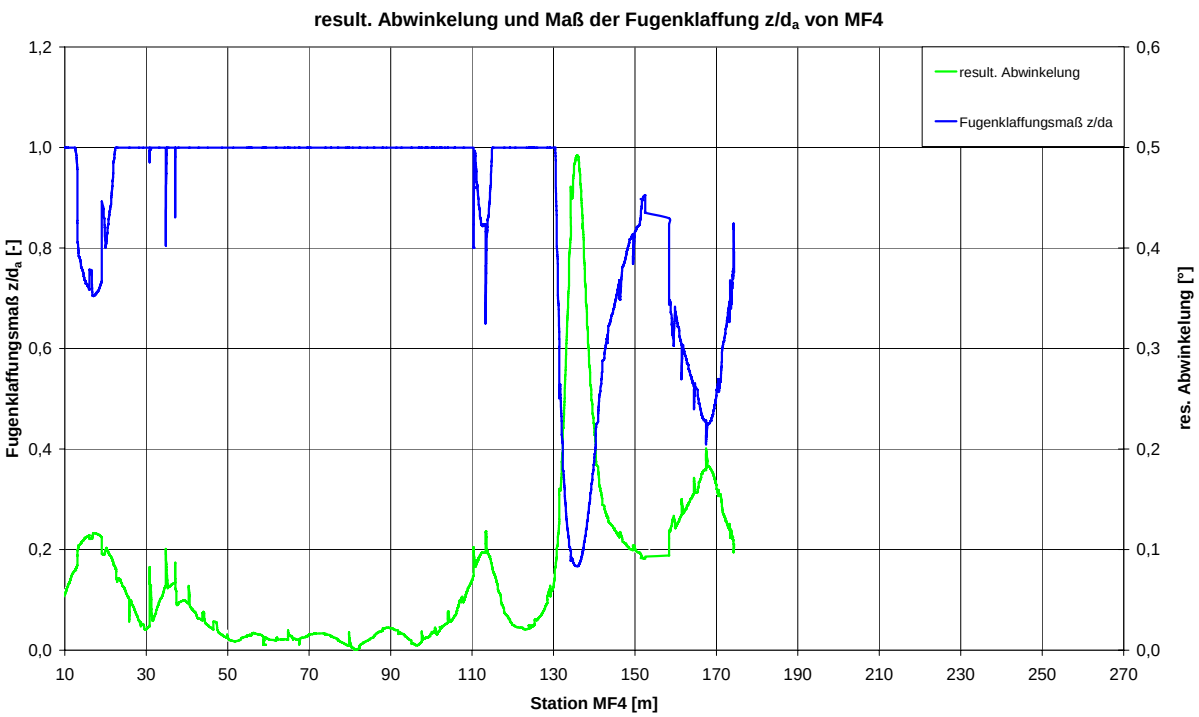


Bild A3.7: Fugenklaffungsmaß z/d_a MF4

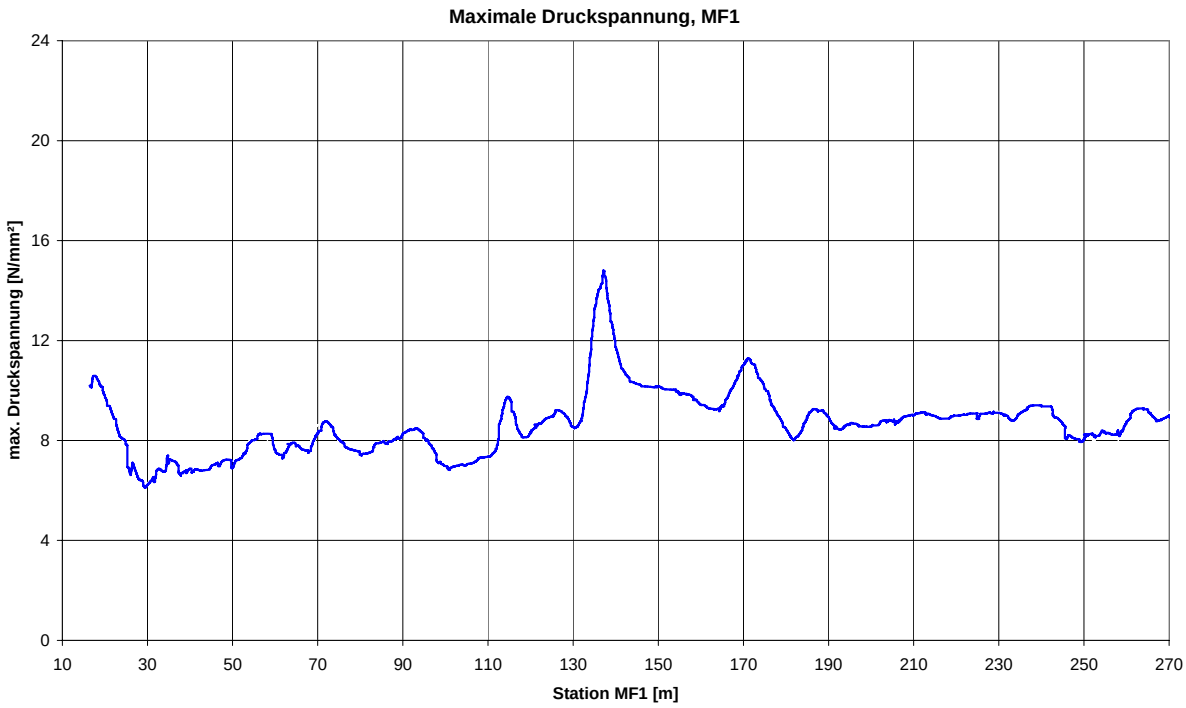


Bild A3.8: Maximale Druckspannung MF1

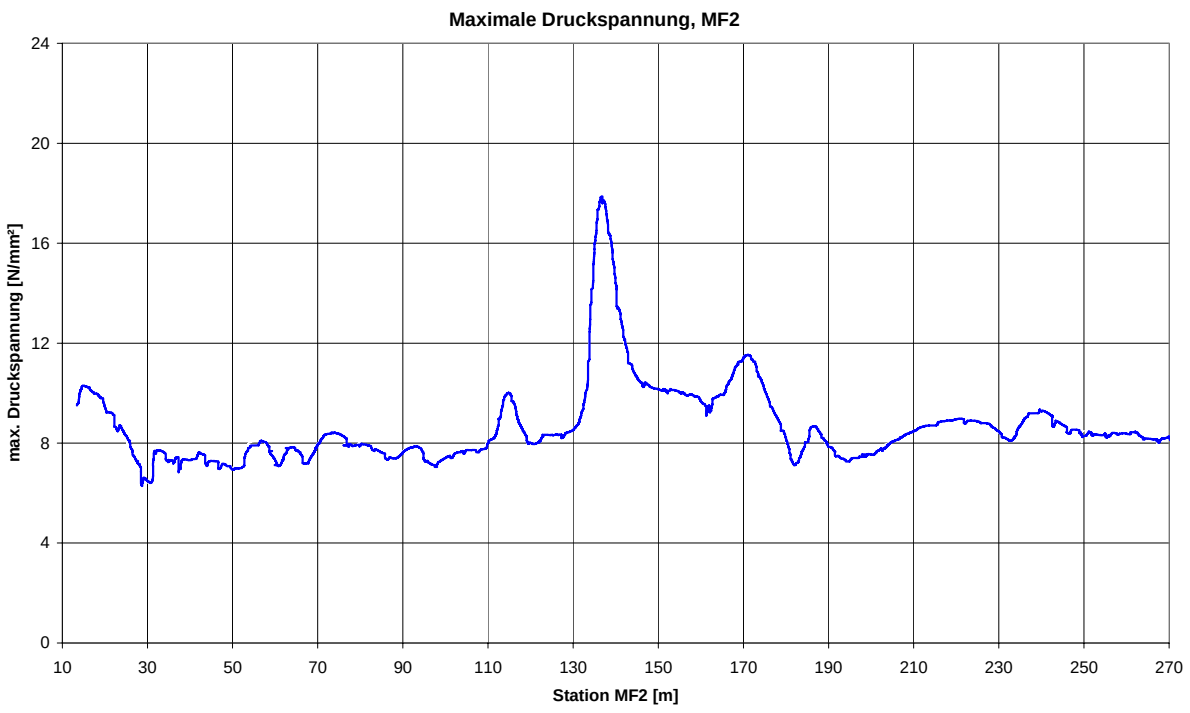


Bild A3.9: Maximale Druckspannung MF2

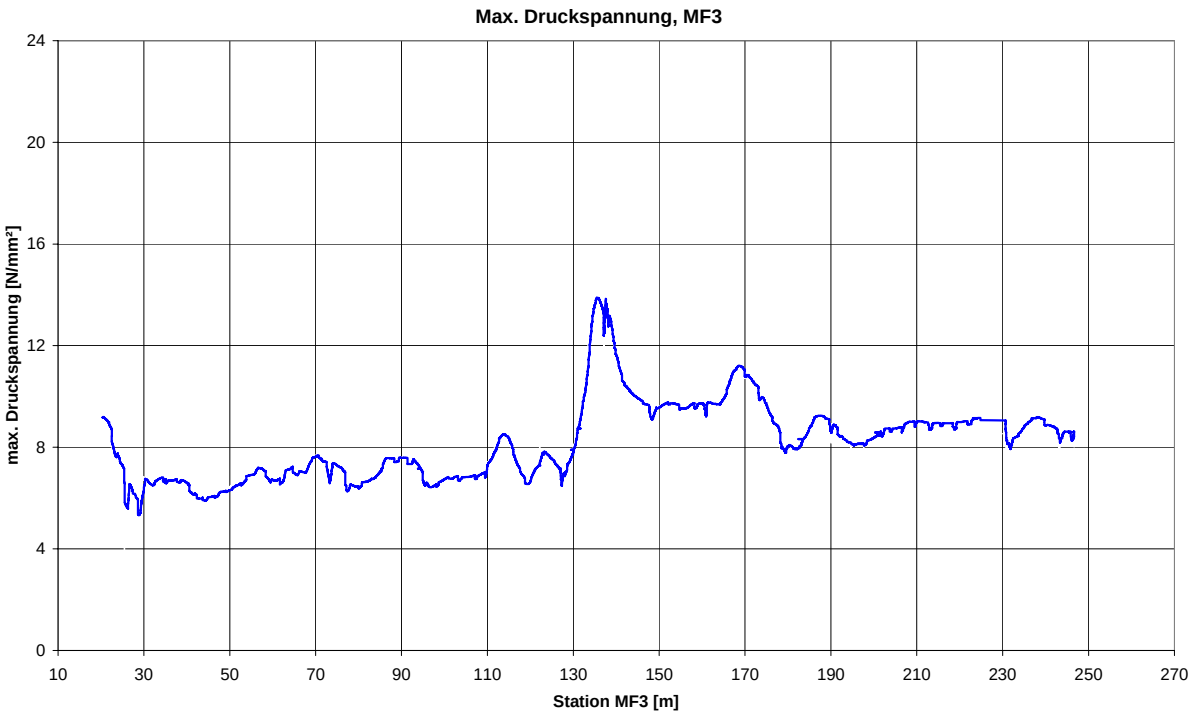


Bild A3.10: Maximale Druckspannung MF3

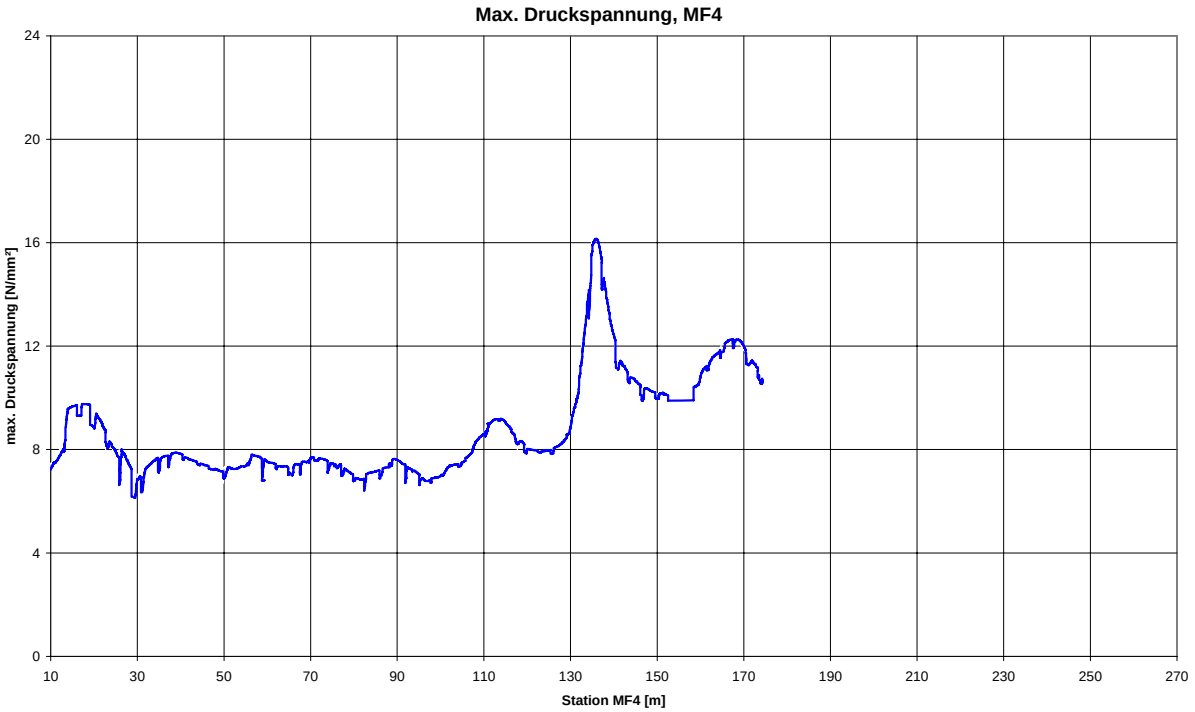


Bild A3.11: Maximale Druckspannung MF4

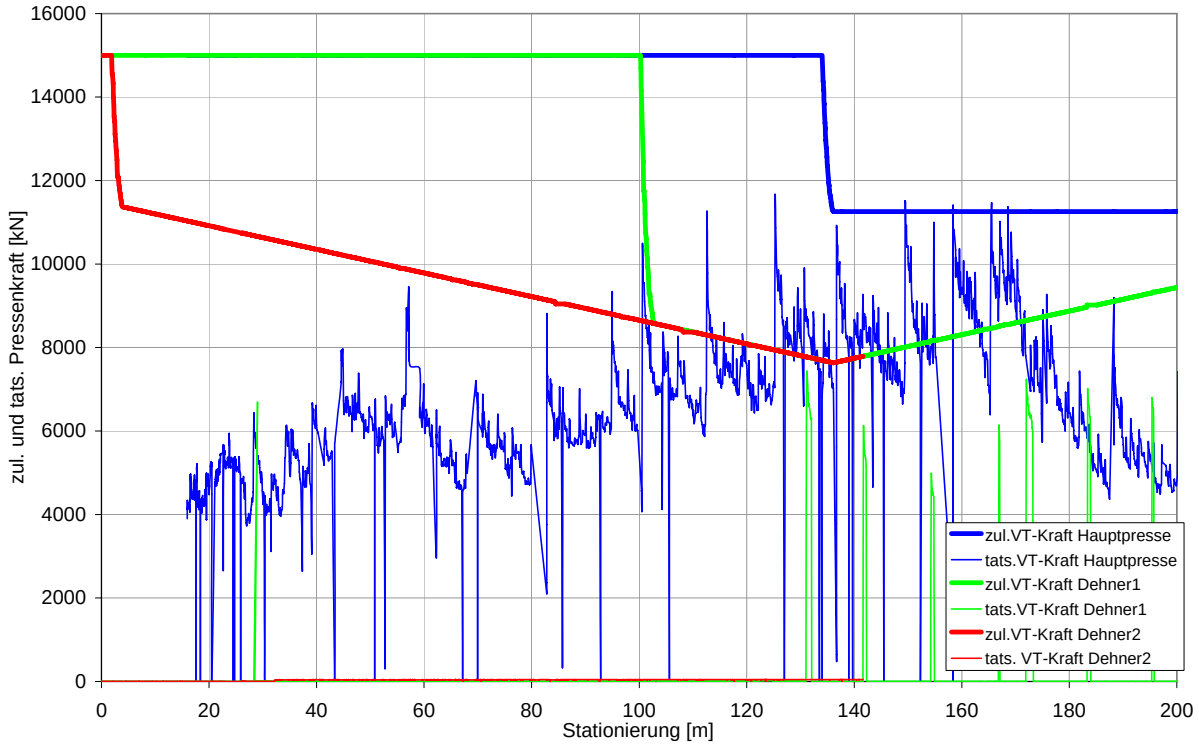


Bild A3.12: Tatsächliche und berechnete zulässige Pressenkräfte