

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20378 N

Thema

Grabenlose Erneuerung von Fernwärmeleitungsnetzen

Berichtszeitraum

01.02.2019 – 31.07.2021

Forschungsvereinigung

Fernwärme

Forschungseinrichtung(en)

FE 1: Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e. V.; Hemmingen

FE 2: Technische Universität Clausthal, Institut für Bergbau, Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau; Clausthal-Zellerfeld

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU.....	6
2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	6
2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen.....	8
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz.....	10
3.1 Stand der Forschung und Entwicklung.....	10
3.1.1 Fernwärmerohre.....	10
3.1.1.1 Arbeitsschritt 1: Schneiden der Wärmedämmung und Überbohren des Mediumrohres.....	11
3.1.1.2 Arbeitsschritt 2: Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR.....	11
3.1.2 Grabenlose Verlegung von Leitungen.....	11
3.1.2.1 Horizontalspülbohrverfahren.....	12
3.1.2.2 Überwaschverfahren.....	12
3.1.2.3 Microtunneling.....	12
3.1.2.4 Pressungen.....	13
3.1.2.5 Pipe Splitting.....	13
3.1.2.6 Kernbohrverfahren.....	14
3.1.2.7 Zusammenfassung Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Leitungen.....	14
3.1.2.7.1 Technologischer Ansatz Arbeitsschritt 1: „Schneiden der Wärmedämmung und Überbohren des Mediumrohres“.....	14
3.1.2.7.2 Technologischer Ansatz Arbeitsschritt 2: „Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR ohne Beschädigung der Bettung“.....	15
3.1.2.8 Zusammenfassung vorbereitender Arbeiten zum technischen Ansatz.....	15
3.2 Arbeitshypothese.....	16
3.3 Ziele und technischer Ansatz des Projektes.....	16
4. Lösungsweg.....	17

4.1 Vorversuche.....	17
4.1.1 Arbeitsschritt 1.....	17
4.1.1.1 Drehzahl des Bohrkopfs.....	17
4.1.1.2 Vorschubgeschwindigkeit.....	18
4.1.1.3 Spülmengende der Druckluft zum Austrag des Bohrkleins.....	18
4.1.1.4 Anzahl der Schneiden.....	19
4.1.1.5 Zusammenfassung Arbeitsschritt 1.....	20
4.1.2 Arbeitsschritt 2.....	20
4.2 Konzeption des Prototyps der Bohranlage.....	22
4.2.1 Bohreinheit.....	23
4.2.2 Steuereinheit.....	27
4.2.3 Bohrgestänge und Bohrkopf.....	28
4.2.4 Halterung für KMR-Abschnitte.....	31
4.2.5 Bohrkleintransport- und austrag.....	31
5. Versuchsdurchführung.....	35
5.1 Versuche unter Laborbedingungen.....	35
5.1.1 Versuchsreihe 1 mit Variation der Drehzahl des Bohrkopfes.....	35
5.1.2 Erste Optimierung des Bohrkopfes.....	39
5.1.3 Versuchsreihe 2 mit Variation von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit.....	40
5.1.4 Zweite Optimierung des Bohrkopfes.....	43
5.1.5 Versuchsreihe 3 mit Variation von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit.....	44
5.1.6 Zusammenfassende Bewertung des Bohrvorganges.....	47
5.1.7 Einziehvorgang.....	49
5.2 Versuche unter praxisnahen Bedingungen.....	50
5.2.1 Versuch 1.....	50
5.2.1.1 Verlegung des KMR.....	50
5.2.1.2 Ausbohren der Wärmedämmung.....	51
5.2.1.3 Einziehen des neuen KMR.....	59

5.2.1.4 Freilegung und Ausbau nach Abbruch des Einziehvorgangs.....	65
5.2.1.5 Ergebnisse.....	69
5.2.2 Versuch 2.....	71
5.2.2.1 Verlegung des KMR.....	71
5.2.2.2 Ausbohren der Wärmedämmung.....	72
5.2.2.3 Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR.....	79
5.2.2.4 Freilegung und Ausbau nach Abbruch des Schlitzens und Aufweitens.....	85
5.2.2.5 Ergebnisse.....	88
5.2.3 Weitere Vorgehensweise.....	89
6. Fazit.....	90
6.1 Arbeitsschritt 1.....	90
6.2 Arbeitsschritt 2.....	91
7. Nutzen der Ergebnisse für KMU und Ausblick.....	91
8. Literaturverzeichnis.....	93

1. Einleitung

Ungefähr 50 % der eingesetzten Primärenergie in Deutschland und auch in Europa werden für die Bereitstellung von Wärme benötigt. Es ist deshalb wichtig sich im Rahmen aktueller Veränderungen in der Energieversorgung den Herausforderungen des Einsatzes von "Erneuerbaren Energien" (EE), der Nutzung von vorhandenen Energiepotenzialen und der erforderlichen Flexibilität nicht nur im Strombereich sondern auch im Wärmesektor zu stellen. Die Transformation von Wärmenetzen, welche für die Versorgungsaufgabe mit konventionell erzeugter Wärme und Wärme aus EE notwendig sind, wird bisher hauptsächlich aus Sicht der Erzeugungsstruktur des Kraftwerkparkes von Versorgungsunternehmen untersucht [1]. Die technische Realisierung einer Instandhaltung und des Umbaus von Wärmenetzen mit Blick auf die Notwendigkeit der Transformation dieser Netze wird demgegenüber bisher nicht untersucht. Der Fokus des Forschungsprojektes liegt daher auf der grabenlosen Erneuerung von Fernwärmeleitungsnetzen zwecks Erneuerung bestehender Wärmenetze ohne Beeinflussung der Oberfläche und Transformation ihrer gewünschten Eigenschaften im Sinne der Wärmewende.

In diesem Kontext sollen ein Verfahren sowie einsetzbare apparative Vorrichtungen (Prototypen) zur grabenlosen Erneuerung von Fernwärmeleitungsnetzen entwickelt werden. Diese sollen aufbauend auf eigenen Vorarbeiten entwickelt werden. In diesem Kontext ist für die Durchführung des Projektes eine interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Bereichen "Fernwärmetechnik" (Forschungsstelle 1: Fernwärme-Forschungsinstitut; FFI), grabenlose Verlegung von Leitungen, grabenlose Erneuerung von Leitungen und "Bohrtechnik" (Forschungsstelle 2: Institut für Bergbau; IBB) vorgesehen. Ergänzt werden die Expertisen der Forschungsstellen durch den Projektbegleitenden Ausschuss (PA).

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die wissenschaftlich-technische Problemstellung ergibt sich erstens aus der Notwendigkeit, ein Verfahren und eine Vorrichtung für die grabenlose Erneuerung von Fernwärmerohren zu entwickeln. Basis dieser Entwicklung sollen bewährte grabenlose Verlegungs- und Erneuerungsverfahren des Rohrbaus anderer Sparten sein. Fernwärmerohre unterscheiden sich dabei im Aufbau grundsätzlich von anderen Versorgungsleitungen wie Gas-, Wasser- und Abwasserrohren. Fernwärmerohre bestehen aus einem oder zwei Mediumrohren, die im Betrieb vom Heizmedium, i. d. R. Wasser, durchströmt werden. Das oder die Mediumrohre sind mit einer Wärmedämmung umgeben, die mit einer äußeren Ummantelung umgeben ist. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden nur Fernwärmerohre mit einem Mediumrohr aus Stahl, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum und einer Ummantelung als Polyethylen hoher Dichte, die in der Norm EN 253 [2] beschrieben sind, betrachtet.

Zweitens ist in während der grabenlosen Erneuerung die Belastung der Fernwärmerohre im Betrieb auf die Tragfähigkeitsgrenzen des Fernwärmerohres abzustimmen, so dass diese weder während der Erneuerung noch im Betrieb überschritten werden.

Zusammenfassend erscheint daher der Ansatz einer Verfahrens- und Prototypentwicklung für die "Gabenlose Erneuerung von Fernwärmeleitungsnetzen" auf Basis von Vorversuchen und des Standes der Forschung und Entwicklung in den Fachbereichen grabenlose Rohrverlegung, grabenlose Rohrerneuerung und Bohrtechnik zielführend. Dabei werden bei der Neuentwicklung bereits bewährte Teile aktueller Technologien und Verfahren kombiniert und im Prototypen integriert.

In diesem Zusammenhang sei auf die Notwendigkeit der Transformation der Wärmenetze im Rahmen der Energiewende und Wärmewende hingewiesen: Betreiber von Fernwärmenetzen stehen vermehrt unter dem Druck, "Erneuerbare Wärme" in bestehende Wärmenetze einzuspeisen (Wärmewende) [1], [3]. Andererseits sinken netzseitige Wärmebedarfe in Folge energetischer Ertüchtigungen (verbesserte Gebäudedämmung), so dass eine Absenkung der Netztemperatur möglich und im Sinne der Wärmewende notwendig wird. Diese neuen Anforderungen machen eine hydraulische und thermodynamische Anpassung der bestehenden Netzdimensionierung notwendig, die z. B. durch eine Anpassung der Mediumrohrdurchmesser und der Dicke der Wärmedämmung (Dämmstärke) umgesetzt werden könnte. Ein wirtschaftliches Verfahren zur grabenlosen Erneuerung von Bestandsnetzen könnte diesen Herausforderungen begegnen und darüber hinaus den großflächigen Eingriff in die oberflächennahe

bestehende Infrastruktur vermeiden. So wird die Flexibilität der Wärmenetze erhöht und den Herausforderungen der Wärmewende begegnet.

Hinsichtlich ökonomischer Gesichtspunkte ist darüber hinaus zu konstatieren, dass die konventionelle Erneuerung von Fernwärmeleitungen derzeit generell mit hohen Kosten verbunden ist. Diese liegen bei konventioneller Verlegung in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und lokaler Gegebenheiten (Beschaffenheit des Untergrundes, etc.) um 200...400 €/lfdm Trasse [4]. Hinzu kommen Kosten für die Wiederherstellung der Geländeoberfläche von rund 150...300 €/lfdm Trasse. Im Sinne der Wärmewende sind daher auch Kosteneinsparungen notwendig.

Hier setzt der Ansatz einer grabenlosen Erneuerung von Fernwärmeleitungen an. Eine Kostenabschätzung für die erforderlichen Arbeiten im Zuge einer grabenlosen Erneuerung von Fernwärmerohren, wobei die Verfügbarkeit eines Verfahrens vorausgesetzt wird, wird auf rund 400 €/lfdm Trasse kalkuliert. Der wirtschaftliche Vorteil des grabenlosen Verfahrens liegt demnach darin, dass eine Erneuerung der Oberflächen nicht erforderlich ist. Die Ersparnis liegt so bei geschätzten 150...300 €/lfdm Trasse, wobei dies aufgrund starker regionaler Schwankungen der Kosten für Trassenbau und Wiederherstellung der Geländeoberfläche im Einzelfall zu überprüfen bleibt.

Neben technologiebezogenen Kosteneinsparungen sind im Vergleich zur offenen Bauweise weitere, nicht direkt quantifizierbare Kostenvorteile zu nennen, z. B. durch verminderte Verkehrsbehinderungen oder Unterbrechung anderer Versorgungsleitungen. Zudem sind auch soziale Aspekte zu berücksichtigen, wie verminderte Beeinträchtigungen der Anwohner solcher offenen Baumaßnahmen durch Lärm oder Zugangsbeschränkungen zum eigenen Grundstück. Weiterhin sei auf die wirtschaftliche Bedeutung einer präziseren Planung von Rehabilitations- und Instandhaltungsmaßnahmen hingewiesen. Dies ist Betreibern von Fernwärmenetzen ein ausdrückliches und hochaktuelles Anliegen und wird daher auch durch die Erarbeitung von entsprechenden Empfehlungen in der Fernwärmebranche adressiert [5]. Zusammenfassend steigern die wirtschaftlichen Vorteile einer grabenlosen Erneuerung von Wärmenetzen die Wettbewerbsfähigkeit von kleinen und mittelständischen Unternehmen aber auch der Fernwärme als Technologie.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen

Die wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse lässt sich aus der Sicht vier verschiedener Interessensgruppen darstellen. Diese sind vornehmlich kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die Fernwärmenetze betreiben (Betreiber, in Deutschland ca. > 500), KMU des grabenlosen und konventionellen Leitungsbaus (Leitungsbauer, in Deutschland ca. > 200), KMU die Fernwärmerohre herstellen (Hersteller ca. > 20) und KMU die Fernwärmenetze planen (Planer ca. > 1 0). Betreiber von urbanen Fernwärmenetzen stehen heute vor dem Problem, dass bestehende Fernwärmenetze bei deren Planung auf eine Gebrauchsdauer von 30 Jahren ausgelegt werden. Diese rechnerische Gebrauchsdauer ist in vielen Städten bereits überschritten. Zudem gibt es derzeit kein Erneuerungsverfahren für Fernwärmerohre, womit deren Erneuerung hinsichtlich des Bauaufwands mit deren Neubau vergleichbar ist und mit einem Eingriff in die befestigten Oberflächen urbaner Räume einhergeht. Aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten und kommunalen Widerstände sind Betreiber bei der Instandhaltung von Fernwärmenetzen derzeit sehr zurückhaltend. Resultierend werden Fernwärmenetze vermehrt über die rechnerische Gebrauchsdauer von 30 Jahren hinaus betrieben. Abhilfe kann ein wirtschaftliches grabenloses Erneuerungsverfahren für den Fernwärmerohrbau schaffen, da dieses die Möglichkeit bietet Investitionszyklen genau zu planen und wirtschaftliche Vorteile der Planungssicherheit zu nutzen. Diese Planungssicherheit hilft auch zuliefernden Herstellern im Sinne einer optimierten Produktion.

Zudem sind auch gezielte Erneuerungen von Nahwärmenetzen möglich. Diese werden in den letzten Jahren z. T. unsachgemäß errichtet. Resultierend daraus häufen sich in diesen Netztypen vermehrt Totalschäden, in deren Folge diese Netze u. U. aufgegeben werden müssen. Ein Verfahren zur grabenlosen Erneuerung könnte hier den volkswirtschaftlichen Schaden begrenzen.

Im Rohrbau eröffnet sich durch das neu entwickelte Verfahren zur grabenlosen Erneuerung ein neues Tätigkeitsfeld innerhalb urbaner, innerstädtischer Fernwärmenetzbereiche, die nun wirtschaftlich zu erneuern wären. Weiterhin können in diesen Fernwärmenetzbereichen lokal begrenzte Schadensfälle insbesondere an Stellen, die von der Oberfläche her schwer zugänglichen sind, z. B. Straßenkreuzungen grabenlos bearbeitet werden. Darüber hinaus könnten Rohrbauer auf Basis eines grabenlosen Verfahrens zu Erneuerung von Fernwärmeleitungen auch im ländlichen Raum z. B. innerhalb unsachgemäß errichteter Nahwärmenetze tätig werden oder bei der

Transformation von Bestandsnetzen auf andere Mediumrohrdurchmesser und andere Dämmstärken unterstützen.

Die wirtschaftlichen Interessen der Planer und Ingenieurbüros sind im Bereich der neuen Planungsaufgaben für grabenlose Erneuerung von Fernwärmeleitungen zu sehen. Die Inklusion geotechnischer und rohrstatischer Planungen grabenlos erneuerter Fernwärmetrassen sind hier als neue Tätigkeitsfelder zu nennen und steigern deren Wettbewerbsfähigkeit. Zudem sind Existenzgründungen im Rahmen einer Spezialisierung auf das Gebiet sind denkbar.

Bei Herstellern von Fernwärmeleitungen ergeben sich i. A. durch vermehrte Erneuerungstätigkeiten im Bereich der Fernwärme Umsatzsteigerungen. Darüber hinaus ist im Zuge einer Transformation von Bestandsnetzen (Anpassung Mediumrohrdurchmesser und Dämmstärken) eine Diversifizierung des Produktportfolios denkbar.

Durch die Kombination verschiedener Elemente bewährter grabenloser Verlegungs- und Erneuerungsverfahren entstehen neue Tätigkeitsfelder für Maschinenhersteller und Zulieferer. Es ist davon auszugehen, dass dieses Projekt für diesen Industriezweig über eine Umsatzsteigerung hinaus zu einem Innovationsimpuls führen wird.

Im Kontext der Wärmewende kann das Forschungsprojekt einen entscheidenden Beitrag zu den energiepolitischen Zielen der Bundesregierung, der Ressourceneffizienz und der Lebensqualität in Städten liefern. So wird der Aus- und Umbau sowie die Umnutzung von Wärmenetzen und Erschließung von erneuerbaren Wärmepotenzialen und Abwärmepotenzialen möglich. Dies unterstützt das Vorhaben der Bundesregierung den Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung von heute ca. 15 % auf 25 % im Jahre 2020 zu erhöhen. Das Projekt liefert somit einen wichtigen Impuls für die Einsparung von Ressourcen und deren effiziente Verwendung im Wärmesektor.

Abschließend sei an dieser Stelle auf die im Vergleich zur konventionellen Verlegung geringeren CO₂- und Lärmemissionen grabenloser Verfahren zur Leitungsverlegung hingewiesen [6], [7]. Zudem werden Fußgänger und Straßenverkehr durch den Wegfall der Oberflächenbeeinflussung bei grabenlosen Baumaßnahmen weniger gestört. Dies erhöht die Akzeptanz von Erneuerungs- und Transformationsbaumaßnahmen bei der Bevölkerung deutlich.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Der wissenschaftliche und technische Ansatz des Forschungsprojektes resultiert aus der Zielsetzung eine grabenlose Erneuerung von Fernwärmerohren zu ermöglichen, sodass eine kostengünstige und umweltschonende Erneuerung gewährleistet ist und zugleich das neue Fernwärmerohr nachhaltig und störungsfrei eingesetzt werden kann. Der klare und belastbare verfahrenstechnische Ansatz erfordert dabei eine vorangehende, intensive Auseinandersetzung mit dem Fernwärmerohr, insbesondere mit dessen mechanischer Bearbeitbarkeit und der Beurteilung vorhandener Technologien zur grabenlosen Verlegung und Erneuerung von Rohren, hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit bzw. teilweise Nutzbarkeit im Sinne des angestrebten Verfahrens zur grabenlosen Erneuerung. So ist eine Arbeitshypothese für das Forschungsprojekt abzuleiten.

3.1.1 Fernwärmerohre

Fernwärmerohre bestehen aus einem oder zwei Mediumrohren aus Metall (Stahl, gewellter rostfreier Stahl, Kupfer), Kunststoff (vernetztes Polyethylen, Polybuten) oder Mehrschichtverbund, wobei starre und flexible Fernwärmerohre verfügbar sind. Das oder die Mediumrohre sind mit einer Wärmedämmung (Polyurethanschaum, Polyisocyanuratschaum, Polyolefinschaum, Mineralfaserwolle) umgeben, die mit einer äußeren Ummantelung (Polyethylen, Stahl) umgeben ist. Der Einsatz der verschiedenen Fernwärmerohrtypen erfolgt in Abhängigkeit von der maximalen Mediumtemperatur, dem maximalen Durchfluss, den zu erwartenden statischen Belastungen und der Verlegesituation. Stand der Technik und am häufigsten eingesetztes System zur Wärmeverteilung ist dabei das Kunststoffmantelverbundrohr (KMR), welches seit Ende der 1960er Jahre im Einsatz ist. KMR bestehen aus einem Mediumrohr aus Stahl, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum und einer Ummantelung aus Polyethylen hoher Dichte. KMR sind in der Norm EN 253 beschrieben [2]. Der Einsatz von KMR erfolgt gemäß einschlägiger Richtlinien innerhalb von Gräben bei einer Überdeckung von 0,8... 1,2 m. Dabei ist im Kontext der Wärmeversorgungsaufgabe auf die Materialeigenschaften der KMR einerseits sowie auf die Voraussetzungen zur sachgerechter Verlegung der KMR innerhalb einer definierten Bettungszone andererseits zu achten. Daraus ergeben sich nachstehende Anforderungen für deren grabenlose Erneuerung:

- Weitestgehende Konservierung der Bettungsbedingungen, d. h. keine nennenswerte Verdichtung des Bettungsmaterials, keine Bereiche ohne Auflage des KMR, keine Ansammlung von Sickerwasser und keine Auswaschungen rund um das KMR z. B. in Folge von Spülvorgängen bei der grabenlosen Verlegung

- Grenzen mechanischer Druck-, Zug- und Torsionsbeanspruchungen sind im Kontext rohrstatischer Grenzen einzuhalten.

Zusammenfassend sind also jegliche mechanische Beanspruchungen im Rahmen der grabenlosen Erneuerung, die zu einer Veränderung der Bettung führen, nicht zulässig. Somit scheiden z. B. ein Fräsen oder Zerstückeln des zu ersetzenden KMR aus.

Wesentliche Voraussetzung einer grabenlosen Erneuerung ist somit die Schonung der Bettung während der gesamten Baumaßnahme. Vor diesem Hintergrund ist das Ziehen des gesamten alten KMR bei gleichzeitigem oder nachträglichem Einzug des neuen KMR nicht möglich, da so die Bettung wahrscheinlich zu stark beeinträchtigt werden wird. Nachfolgender technologischer Ansatz ergibt sich für eine grabenlose Erneuerung.

3.1.1.1 Arbeitsschritt 1: Schneiden der Wärmedämmung und Überbohren des Mediumrohres

Die Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum wird ohne Beschädigung des Mediumrohres aus Stahl und der Ummantelung aus Polyethylen hoher Dichte freigeschnitten und ausgetragen; das Mediumrohr dient als Führung für eine Schneidvorrichtung und wird nach dem Schneiden aus der Ummantelung ausgezogen.

3.1.1.2 Arbeitsschritt 2: Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR

Die Ummantelung wird kontinuierlich geschlitzt und aufgeweitet, während zugleich das neue KMR in den bereits geschlitzten und aufgeweiteten Teil Ummantelung eingezogen wird. Das neue KMR wird von der geschlitzten und aufgeweiteten, alten Ummantelung umfasst. Durch diese Vorgehensweise wird die Bettung weitestgehend konserviert und o. g. Anforderungen an die Bettung des KMR werden eingehalten.

3.1.2 Grabenlose Verlegung von Leitungen

In Kenntnis vorangehend definierter Anforderungen werden nachfolgende bestehende Verfahren für eine Grabenlose Verlegung von Leitungen analysiert und im Kontext der Entwicklung eines Verfahrens und eines Prototypen für eine grabenlose Erneuerung von Fernwärmeleitungen bewertet.

3.1.2.1 Horizontalspülbohrverfahren

Die Horizontalspülbohrverfahren ist ein spezielles Verfahren zur Verlegung von Rohrleitungen unter natürlichen oder künstlichen Hindernissen. Der Bohrvorgang des Horizontalspülbohrverfahrens besteht in der Regel aus drei Arbeitsgängen, der

Pilotbohrung, den Aufweitgängen und dem Einziehvorgang. Das Bohrprofil führt im Allgemeinen von einem Eintrittspunkt „bananenförmig“ unter dem Hindernis hindurch zu einem Austrittspunkt auf der anderen Seite des zu unterbohrenden Hindernisses. Auf beiden Seiten finden sich typische Maschinen- und Gerätekombinationen. Wesentliche geometrische Aspekte einer Horizontalspülbohrung sind Bohrungslänge und der Bohrungsdurchmesser. Heutige Leistungsgrenzen ermöglichen Bohrlochlängen von max. 2500 m und Bohrungsdurchmesser von max. 1800 mm. Bei verschiedenen Ausführungen der Bohranlagen variieren die Zugkräfte von weniger als 180 kN bis mehr als 2500 kN. Das Drehmoment variiert je nach Maschinenausführung von 10 kNm bis über 100 kNm. Kleinere Anlagen wiegen weniger als 10 t, während größere Anlagen mehr als 60 t wiegen können. Bei Ausführung einer Horizontalspülbohrung sind zudem Ein- und Austrittswinkel, Krümmungsradien und Überdeckung wichtige Parameter [8].

3.1.2.2 Überwaschverfahren

Bei Überwaschverfahren und Überlagerungsbohren wird parallel zum Bohrprozess bzw. zyklisch dem Bohrfortschritt folgend eine Schutzverrohrung nachgeführt. Das Verfahren wird bei Horizontalbohrungen angewendet, wenn die Bohrung als sog. Sackbohrung ausgeführt wird und eine Aufweitungsgarnitur bzw. Verrohrung daher nicht in Gegenrichtung des Bohrprozesses eingezogen werden kann. Das Überwaschverfahren findet u. a. im Rahmen von langen Horizontalbohrprojekten Anwendung, um die unterhöhlte Überdeckung bereits während des Bohrvorgangs aktiv zu stabilisieren. Das Überwaschgestänge entspricht einer Rohrtour (casing), die drehend über den Pilotbohrstrang geschoben wird. Die Überwaschkronen werden bis zur Position des Pilotbohrkopfes geführt, so dass sich ein Sackbohrloch mit kontrollierter Spülungszirkulation und optimiertem Materialaustrag ergibt. Durch die Überwaschung wird das Bohrloch auf den geforderten Durchmesser ausgeweitet, die Überdeckung stabilisiert und der Pilotbohrstrang von Erddrücken entlastet. Nach Erreichen des Pilotbohrkopfes kann der nächste Abschnitt des Pilotbohrloches erbohrt werden [9].

3.1.2.3 Microtunneling

Beim Microtunneling (MT) oder Pipe Jacking (deutsch: Rohrvortrieb) handelt es sich um ein gesteuertes Verlegeverfahren für Schutz- oder Produktrohre. Die Verlegung findet in der Regel von einem Start- zu einem Zielschacht statt. Der Boden wird beim Microtunneling entnommen und nicht verdrängt. Die Energiezuführung zur Micromaschine (Schneidrad etc.) erfolgt elektrisch und / oder hydraulisch und die erforderliche Vorschubkraft wird von Hydraulikzylindern bereitgestellt. Microtunnelvortriebe werden

meistens eingesetzt, um Schutz- oder Produktrohre unter größeren Hindernissen (Flüsse, Landebahnen, Längsverlegung unter Straßen etc.) zu verlegen. Die Vortriebslänge des Microtunneling beträgt ≥ 500 m wobei Rohrdurchmesser von 500...2.000 mm (und mehr) verlegt werden können. Die Rohrüberdeckung muss mindestens das 1,5-fache des Rohrdurchmessers betragen. Die Leistungsgrenzen des Microtunneling sind: Vortriebsgeschwindigkeit $5...40 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, Vortriebskräfte bis 10000 kN, Mantelreibung $5...25 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, Drehmomente $> 150 \text{ kNm}$ und eine Genauigkeit im Zentimeterbereich [8].

3.1.2.4 Pressungen

Bei Pressungen handelt es sich in der Regel um den ungesteuerten Vortrieb eines Rohres von einer Start- zu einer Zielbaugrube. Der Boden wird bei diesem Verfahren in der Regel entnommen. Die Energiezuführung erfolgt statisch über hydraulisch erzeugte Vorschubkraft (Zylinder). Pressungen werden meistens eingesetzt, um Schutzrohre unter kleineren Hindernissen wie z. B. Straßen zu verlegen, in die dann zu einem späteren Zeitpunkt die eigentliche Produktrohr installiert wird. Die Vortriebslänge beträgt weniger als 100 m. Das Verfahren ist auf Rohrdurchmesser von 500...2.000 mm anwendbar. Bei kleineren Rohren muss die Rohrüberdeckung min. das 10-fache des Schutzrohrdurchmessers betragen, bei größeren Rohren ist das 1,5-fache ausreichend. Für Pressverfahren können folgende technische Leistungsgrenzen angenommen werden: Vortriebsgeschwindigkeit $1...10 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, Spitzenwiderstand $50...150 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, Mantelreibung $5...25 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ und eine Genauigkeit von 1...2 % der Verlegelänge [8].

3.1.2.5 Pipe Splitting

Das Verfahren des Pipe Splittings nutzt die Technologie des Pipe Burstings ohne dass eine Verdrängung, Aufweitung und Zerstörung der alten Leitung stattfindet. Zur Erneuerung der alten Leitung wird diese In-Situ mit Hilfe einer Vorrichtung geschlitzt, bevor die neue Leitung eingezogen wird. In der Regel ist der sog. „Cutter“ der konisch ausgeführt ist über einem Zwischenstück dem sog. „Expansions Shell“ gelenkig mit der neuen Leitung verbunden. Der „Cutter“ wird durch ein Seil, das durch die zu erneuernde Leitung verlegt wird durch Zugbeanspruchung eingezogen. Der „Cutter“ schneidet kontinuierlich die alte Leitung. Der „Expansions Shell“ hält die geschlitzte, alte Leitung durch Spreizung auseinander während die neue Leitung eingezogen wird. Je nach Art und Qualität der Leitung werden verschiedene „Cutter“ eingesetzt. Dabei können Längen bis zu 150 m und Leitungsdurchmesser bis zu 300 mm problemlos erreicht werden.

3.1.2.6 Kernbohrverfahren

Kernbohrverfahren sind seit geraumer Zeit Stand der Technik für Probennahmen. Mittels Kernbohrwerkzeugen in Kombination mit dem Drehbohrverfahren werden Kerne mit diversen Durchmessern aus Tiefen bis zu einigen tausend Metern entnommen. Bei den meisten Anlagen handelt es sich um Rotary-Bohranlagen.

Die in der Regel mobilen Maschinen bestehen aus Kraftdrehkopf, Abfangvorrichtung, Mast, Winde, Hydraulikpumpen, Spülpumpen. Diese Anlagen ermöglichen die Entnahme von größeren Kerndurchmessern (85 mm P, 102 mm S) aus Tiefen über 2000 m. Die Bergung von Bohrkernen erfolgt je nach Tiefe durch Seilkernverfahren, Einfachkernrohre und Doppelkernrohre. Für flache Bohrungen kommen meistens Einfachkernrohre zur Anwendung. Neben den standardisierten Kernrohren werden Kernrohre für schwierige Geologische Verhältnisse, tiefe Bohrungen und abgelenkte Bohrungen entwickelt.

3.1.2.7 Zusammenfassung Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Leitungen

Die Gegenüberstellung des aus den Rahmenbedingungen der Erneuerung von Fernwärmerohren abgeleiteten technologischen Ansatzes der vorgesehenen Forschung und der Technologien und Eigenschaften der Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung und Rohrmessung ergibt Folgendes:

3.1.2.7.1 Technologischer Ansatz Arbeitsschritt 1: „Schneiden der Wärmedämmung und Überbohren des Mediumrohres“

Diese Anforderungen an den Prototypen können aus dem Überwaschverfahren und dem Kernbohrverfahren abgeleitet werden. Beide Verfahren integrieren das Überbohren und ermöglichen über höhere Drehzahlen. Erfahrungen aus der Kernbohrtechnik, insbesondere der Aufbau der Bohrkerns sind für die vorgesehene Entwicklung nützlich. Darüber hinaus können beide Verfahren über längere Strecken bohren und mit Druckluft als Spülungsmedium zum Austrag des Bohrkerns versorgt werden. Die Ausführung von Kernbohranlagen für den horizontalen Einsatz ist bereits Stand der Technik. Im untertägigen Hohlraum (Bergbau und Tunnelbau) werden solche Geräte eingesetzt.

3.1.2.7.2 Technologischer Ansatz Arbeitsschritt 2: „Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR ohne Beschädigung der Bettung“

Dieser Ansatz kann durch den Einsatz eines Verfahrens ähnlich dem Pipe Splitting realisiert werden. Die Ummantelung kann relativ sicher geschlitzt und aufgeweitet werden, während zugleich das neue KMR eingezogen wird.

3.1.2.8 Zusammenfassung vorbereitender Arbeiten zum technischen Ansatz

Die Auswertung der Voruntersuchungen sowie des Standes der Technik ergibt, dass der technologische Ansatz des Forschungsprojektes für eine grabenlose Erneuerung von KMR sinnvoll ist. Die vorhandenen Verfahren und Vorrichtungen zur grabenlosen Verlegung und Erneuerung anderer Rohre (einschließlich des Kernbohrverfahrens) verfügen über bereits hochentwickelte Elemente, die als Grundlage für die Zusammenstellung einer geeigneten Maschine dienen können.

Andererseits ist insgesamt festzuhalten, dass keines der Verfahren direkt zur Lösung der anstehenden Aufgabe herangezogen werden kann. Vielmehr müssen durch systematische Untersuchung und gezielte Verfahrenskombination ein neues Verfahren und eine neue Vorrichtung (Prototyp) für die grabenlose Erneuerung von KMR entwickelt werden. In diesem Kontext zeigt die obige Auswertung, dass es zielführend ist, Teilaspekte der allgemeinen Bohrtechnik z. B. Kernbohrungen, unter besonderer Berücksichtigung der Art der Spülung in die Forschung einzubeziehen.

Die Festlegung der detaillierten technologischen Eigenschaften, die Dimensionsanalyse und schließlich die Konzeption eines solchen Prototyps sind aus dem vorgesehenen Forschungsvorhaben abzuleiten.

3.2 Arbeitshypothese

Durch gezielte Untersuchung technischer Grundlagen wird die Entwicklung eines neuen Verfahrens und einer neuen Vorrichtung (Prototyp) zur grabenlosen Erneuerung von KMR möglich. Zum Nachweis der Hypothese werden systematische Laboruntersuchungen durchgeführt, um eine ausreichende technische und wissenschaftlich abgesicherte Datengrundlage für eine Optimierung des vorangehend beschriebenen technologischen Verfahrensansatzes zur grabenlosen Erneuerung zu erhalten.

Hierin inbegriffen sind die Erlangung von Erkenntnissen über wesentliche Maschinenparameter wie etwa Drehzahl, Drehmoment, Vorschubgeschwindigkeit, Menge der Spülung, Art des Schneidkopfes sowie die Höhe der Zug-, Druck und Torsionskräfte.

3.3 Ziele und technischer Ansatz des Projektes

Ziel des Gesamtprojektes ist durch systematische Vorgehensweise ein praxistaugliches Verfahren und eine Vorrichtung für die Erneuerung von KMR zu entwickeln. Hierzu soll durch die Kombination der Verfahren sowohl der grabenlosen Verlegung und Erneuerung von Rohren als auch der Kernbohrtechnik ein neues Verfahren für die grabenlose Erneuerung von KMR samt Prototyp entwickelt werden.

Aus diesen Zielen werden folgende Schritte entwickelt:

1. Schaffung von Datengrundlagen zur Konzeption eines Prototyps mittels Versuchen unter Laborbedingungen (im IBB):
Gezielte Untersuchung der technischen Grundlagen zur Entwicklung eines neuen Verfahrens und einer neuen Vorrichtung (Prototyp) zur grabenlosen Erneuerung von Fernwärmeleitungen.
2. Bau des Prototyps & Inbetriebnahme:
Dimensionierung und Bau des Prototyps mit anschließender Inbetriebnahme und Optimierung auf Basis von Versuchen unter Laborbedingungen.
3. Versuche unter praxisnahen Bedingungen im Technikum (im FFI):
Durchführung von Versuchen unter praxisnahen Bedingungen im Technikum im Maßstab 1:1 mit unter realitätsnahen Bettungsbedingungen verlegten KMR mit dem entwickelten Prototypen.

4. Lösungsweg

4.1 Vorversuche

Zur Schaffung einer Datengrundlage werden in Vorversuchen und in weiterführenden Versuchen erste Kennzahlen sowohl des Arbeitsschrittes 1 „Schneiden der Wärmedämmung und Überbohren des Mediumrohres“ als auch des Arbeitsschrittes 2 „Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR ohne Schädigung der Bettung“ ermittelt.

4.1.1 Arbeitsschritt 1

Bei den Laboruntersuchungen für den Arbeitsschritt 1 werden KMR-Stücke eingespannt und der Schneidvorgang der Wärmedämmung untersucht.

Für die Versuche wird ein Bohrkopf konzipiert, bei der die Anzahl der Schneiden variiert werden kann. Bei den Versuchen werden sowohl die Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl des Bohrkopfs, Anzahl der Schneiden als auch die Spülmenge der Druckluft zum Austrag des Bohrkleins untersucht. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargelegt.

4.1.1.1 Drehzahl des Bohrkopfs

Die Drehzahl des Bohrkopfs wird in vier Stufen mit $185 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$, $330 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$, $475 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $575 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ variiert. Dabei ist zu erkennen, dass die Größe der Partikel der geschnittenen Wärmedämmung abhängig von der Drehzahl des Bohrkopfs variiert. Die Partikelgröße reicht von $\leq 0,71 \text{ mm}$ bis $\approx 10 \text{ mm}$, wobei ca. 50...80 % der Partikel in Abhängigkeit von der Drehzahl eine Größe von $\leq 3 \text{ mm}$ aufweisen. Mit zunehmender Drehzahl erhöht sich der Anteil kleinerer Partikel im Bohrklein.

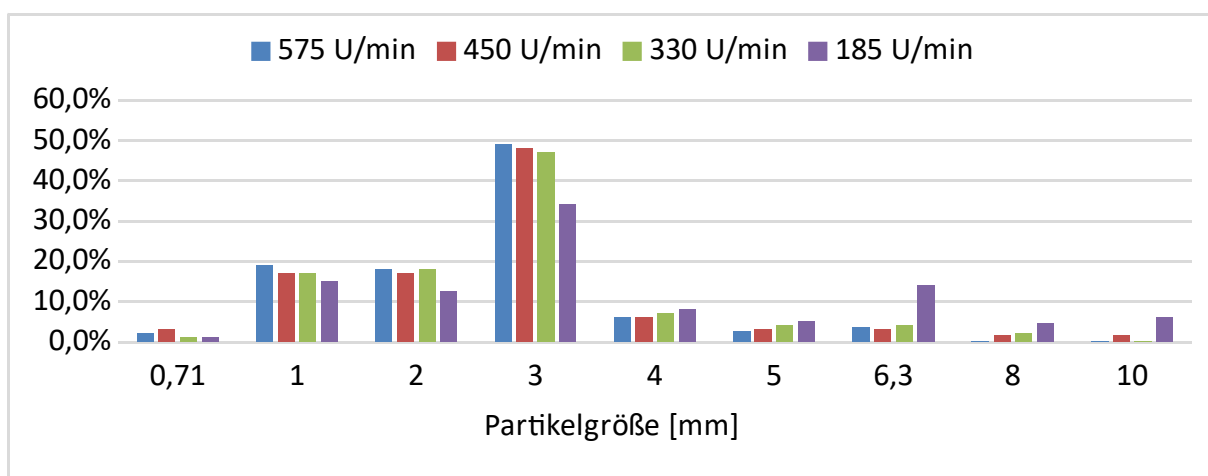


Bild 1 Einfluss der Drehzahl auf die Partikelgrößenverteilung

4.1.1.2 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit des Bohrkopfs wird in vier Stufen mit $165 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $330 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, und $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ variiert. Dabei ist zu erkennen, dass die Unterschiede des Anteils jeder Partikelgröße zwischen langsamster und schnellster Vorschubgeschwindigkeit maximal 6 % betragen, wobei der Anteil größerer Partikel mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zunimmt. Unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit treten keine Probleme beim Schneiden auf. Daher kann für den Prototyp eine hohe Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden, ohne dass diese eine negative Auswirkung auf die Schneidergebnisse hat.

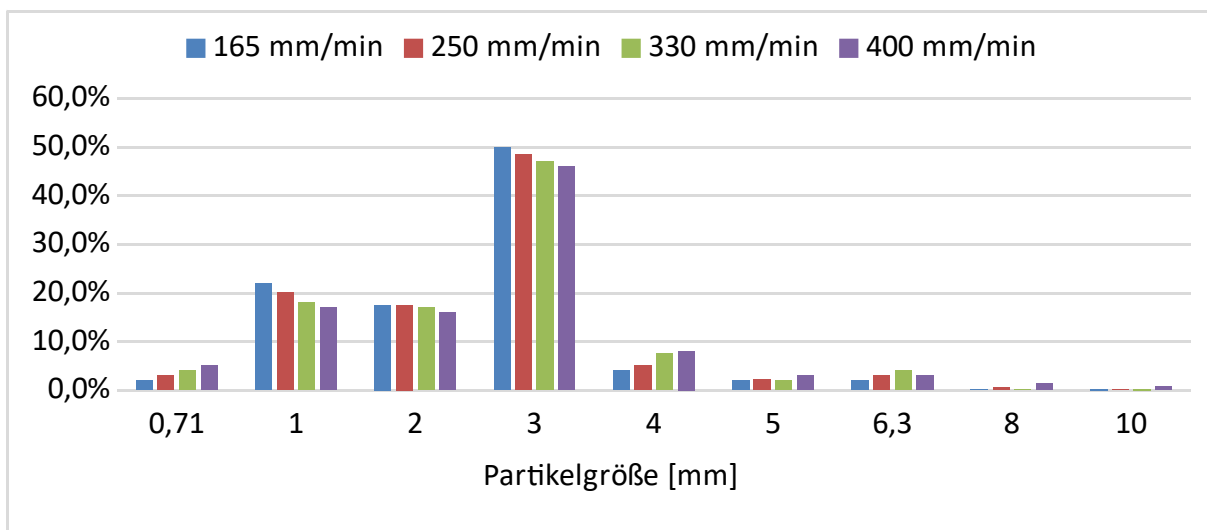


Bild 2 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Partikelgrößenverteilung

4.1.1.3 Spülmengende der Druckluft zum Austrag des Bohrkleins

Während der Versuchsdurchführung wird Druckluft genutzt um das Bohrklein aus dem Rohr zu transportieren (spülen). Dabei wird der Volumenstrom der Druckluft variiert.

Zunächst wird ein Mindestvolumenstrom für die Druckluft ermittelt, der benötigt wird, um das Bohrklein in Bewegung zu versetzen und um zu verhindern, dass das Rohr während des Bohrvorgangs zugesetzt wird. Ausgehend von dieser Grundeinstellung wird der Luftvolumenstrom schrittweise erhöht.

Erwartungsgemäß wird mit jeder Erhöhung des Luftvolumenstroms ein verbesserter Materialaustrag des Bohrkleins insgesamt erreicht. Allerdings erfolgt bereits bei einer geringfügigen Erhöhung des Volumenstroms eine Klassierung des Bohrkleins, die zu einer starken Beschleunigung des Feinanteils und damit zu einer erheblichen Staubentstehung am Rohrausgang führt. Aufgrund der damit einhergehenden Problematik für Mensch und Umwelt wird entschieden, bei der Konzeption einer Bohranlage eine Substitution der

Druckluftspülung durch einen alternativen, mechanischen Bohrkleintransport zu untersuchen.

4.1.1.4 Anzahl der Schneiden

Die Anzahl der Schneiden wird bei den Versuchen variiert. Dabei werden ein Bohrkopf mit einer einzelnen Schneide und ein Bohrkopf mit drei Schneiden getestet. Die drei Schneiden werden dabei so angeordnet, dass sie versetzt zueinander schneiden.

Somit wird gewährleistet, dass sowohl die Ummantelung als auch das Mediumrohr optimal freigeschnitten wird /Bild 3/. Bei einer einzelnen Schneide ist dies hingegen nicht gegeben /Bild 4/. Zudem ist die Belastung auf die einzelne Schneide höher, da diese zur gleichen Zeit mehr Material schneiden muss. Durch die höhere Belastung tritt an der einzelnen Schneide eine deutlich höheren Temperatur auf als an den drei Schneiden.



Bild 3 Schneidergebnis mit drei Schneiden



Bild 4 Schneidergebnis mit einer einzelnen Schneide

Mit der höheren Anzahl der Schneiden wird der Anteil der größeren Partikel im Bohrklein reduziert, da diese vor dem Abtransport eine sekundäre Zerkleinerung erfahren.

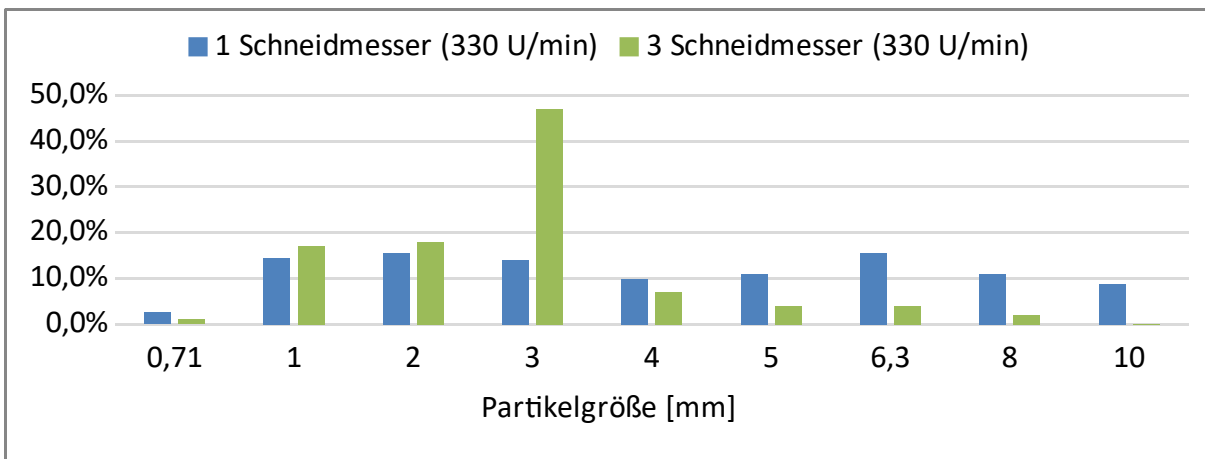


Bild 5 Partikelgrößenverteilung bei unterschiedlicher Schneidenanzahl

Für den Bau des Prototyps wird ein Bohrkopf mit drei Schneiden gewählt, da diese ein besseres Schneidergebnis liefert und zu einer geringeren Wärmeentwicklung an den Schneiden führt. Mit drei Schneiden und einer optimalen Schneidenanordnung werden sowohl die Ummantelung als auch das Mediumrohr nahezu vollständig von der Wärmeisolierung freigeschnitten. Zudem ist bei drei Schneiden die Belastung der einzelnen Schneiden deutlich geringer, so dass für eine spätere Anwendung das Verschleißrisiko und das Risiko des Brechens einer Schneide minimiert wird.

4.1.1.5 Zusammenfassung Arbeitsschritt 1

Ziel der Voruntersuchungen ist die Ermittlung der Basisparameter, die im Zusammenhang mit dem Arbeitsschritt 1 stehen. Als Maß der Beurteilung werden der Zustand der Ummantelung nach der Beseitigung der Wärmedämmung, die Partikelgrößenverteilung des Bohrkleins sowie die Temperaturentwicklung bei Beseitigung der Wärmedämmung gewählt.

4.1.2 Arbeitsschritt 2

Die Schlitzvorrichtung wird in der Ummantelung ähnlich wie beim Pipe Splitting axial verfahren und die Ummantelung geschlitzt /Bild 6/. Dabei werden die Art und Anzahl der Schlitzmesser und die Zuggeschwindigkeit variiert. Bei den Versuchen werden die benötigten Zugkräfte gemessen.



Bild 6 teilweise geschlitzte Ummantelung, Schlitzvorrichtung in der Ummantelung, Schlitzmesser sichtbar

Zunächst wird eine Schlitzvorrichtung konstruiert, an der die Schlitzmesser angebracht werden können. Bei der Schlitzvorrichtung handelt es sich um einen Stahlzylinder mit einem Außendurchmesser, der dem Innendurchmesser der Ummantelung entspricht. Dadurch wird die Schlitzvorrichtung in der Ummantelung geführt und gleichzeitig zentriert. Zunächst wird die Schlitzvorrichtung mit einem Schlitzmesser aus herkömmlichem Stahl bestückt und getestet. Dazu werden im Arbeitsschritt 1 freigeschnittene Ummantelungen verwendet und mit verschiedenen Geschwindigkeiten von $100 \dots 1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ geschlitzt. Nahezu unabhängig von der Zuggeschwindigkeit ist eine Zugkraft von $\approx 4,7 \text{ kN}$ notwendig,

um die Ummantelung vollständig zu schlitzten. Dabei kommt es zu leichten Verbiegungen des Schlitzmessers.

Im zweiten Schritt werden zwei Schlitzmesser verwendet. Die notwendige Zugkraft verdreifacht sich auf $\approx 15,1 \text{ kN}$. Auch hier kommt es mit der Zeit zu Verbiegungen der Schlitzmesser. Daher werden diese durch neue Schlitzmesser aus hochwertigerem Stahl ersetzt. Die benötigte Zugkraft wird hierdurch nicht beeinflusst.

Anschließend an die Schlitzversuche wird jeweils ein neues KMR in die geschlitzten Ummantelungen eingezogen, um zu beurteilen, welche Unterschiede das Schlitzten mit einem Schlitzmesser oder mit zwei Schlitzmessern im Hinblick auf das Einziehen des neuen KMR haben.

Dabei zeigt sich, dass die benötigte Aufweitung bei den mit zwei Schlitzmessern geschlitzten Ummantelungen radial gleichmäßiger verteilt wird als bei den mit einem Schlitzmesser geschlitzten Ummantelungen /Bild 7/.

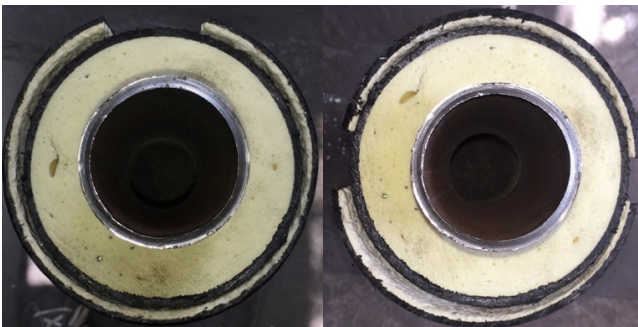


Bild 7 KMR eingezogen in mit einem Schlitzmesser geschlitzter Ummantelung (links), KMR eingezogen in mit zwei Schlitzmessern geschlitzter Ummantelung (rechts)

Zudem werden hierdurch die benötigten Einziehkräfte reduziert, da die Aufweitung der geschlitzten Ummantelung vereinfacht wird. Aus diesem Grund wird entschieden, die Variante mit zwei Schlitzmessern für den Prototyp zu verwenden, obwohl eine höhere Zugkraft benötigt wird, um die Ummantelung zu schlitzten.

4.2 Konzeption des Prototyps der Bohranlage

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen bilden die Grundlage für den Bau eines Prototyps der Bohranlage, deren Einsatz im Technikum /Bild 8/ unter praxisnahen Bedingungen vorgesehen ist.



Bild 8 Einsatzort für die Bohreinheit der Bohranlage im Technikum, in der Spundwand Stirnseite des auszubohrenden KMR

Für die vorgesehenen Einsatzszenarien ist eine modulare Bauweise sinnvoll, die sowohl die Versuchsdurchführung als auch den Transport vereinfacht. Die einzelnen Komponenten werden daher auf einzelnen Rahmen angebracht und können folgenden Modulen zugeordnet werden:

- Bohreinheit
- Steuereinheit
- Bohrgestänge mit Bohrkopf
- Halterung für KMR-Abschnitte

4.2.1 Bohreinheit

Durch den Einsatzort sind folgende Maße für die Bohreinheit der Bohranlage vorgegeben:

- Länge über alles ≤ 2250 mm
- Breite über alles ≤ 2050 mm
- Höhe über alles ≤ 2800 mm
- Höhe Welle des Bohrantriebes über Grund ≈ 445 mm
- Gesamtgewicht ≤ 3200 kg

Ein weiterer bei der Konzeption der Bohreinheit zu berücksichtigender Aspekt ist die Einleitung der Reaktionskräfte während des Bohr- sowie Einziehvorgangs. Die am Einsatzort vorhandene Stahlkonstruktion bietet ausreichend Stabilität als Widerlager sowohl für den Bohrvorgang als auch den Einziehvorgang.

Der Bohrvorgang ist insbesondere abhängig von der Drehzahl und der Vorschubgeschwindigkeit des Bohrkopfes bzw. Bohrgestänges. Die Bohranlage muss daher mit Vorschub und Bohrrotation zwei sich überlagernde Bewegungen zeitgleich, aber unabhängig voneinander einstellbar durchführen können. Grundsätzlich sind verschiedene Antriebstechnologien denkbar, wobei insbesondere hydraulische oder elektrische Antriebe auch in Kombination in Bezug auf die Aufgabenstellung sinnvoll sind.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der Technologien insbesondere in Bezug auf den apparativen Aufwand, das Gesamtgewicht und die Handhabung bei der Versuchsdurchführung wird ein rein elektrisches Antriebssystem eingesetzt, das über einen im gewerblichen Bereich üblichen Stromanschluss 400 V / 3~ / 50 Hz / 16 A versorgt wird.

- Die Bohrrotation wird durch einen Elektromotor erzeugt. Die Motordrehzahl wird elektronisch mittels Frequenzumrichter eingestellt.
- Für den Vorschub des Bohrgestänges und Bohrkopfes wird die Kombination aus Elektromotor, Gewindespindel und Spindelmutter gewählt. Die Vorschubgeschwindigkeit hängt somit von der Drehzahl des Elektromotors ab. Die Motordrehzahl wird elektronisch mittels Frequenzumrichter eingestellt.

Auf den Rahmen der Bohreinheit ist der Antriebsmotor der Vorschubeinrichtung montiert, der über eine Wellenkupplung die Gewindespindel mit 40 mm Durchmesser und 7 mm Steigung antreibt /Bild 9/.

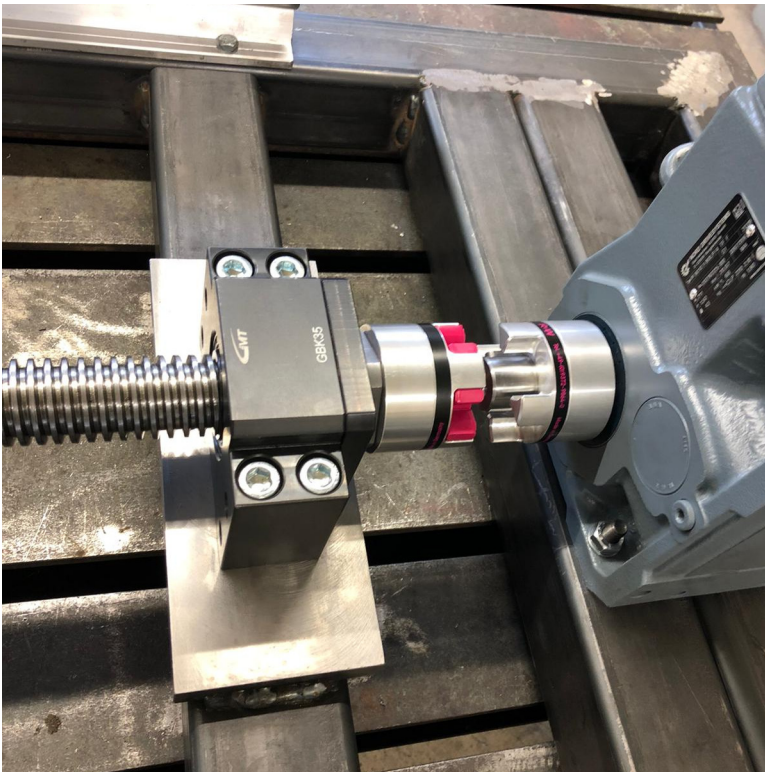


Bild 9 Vorschubeinrichtung mit Gewindespindel, Spindelmutter und Wellenkupplung

Auf der gegenüberliegenden Seite des Rahmens ist die Gewindespindel in einem Festlager gelagert /Bild 10/, um Axialkräfte aufnehmen zu können.

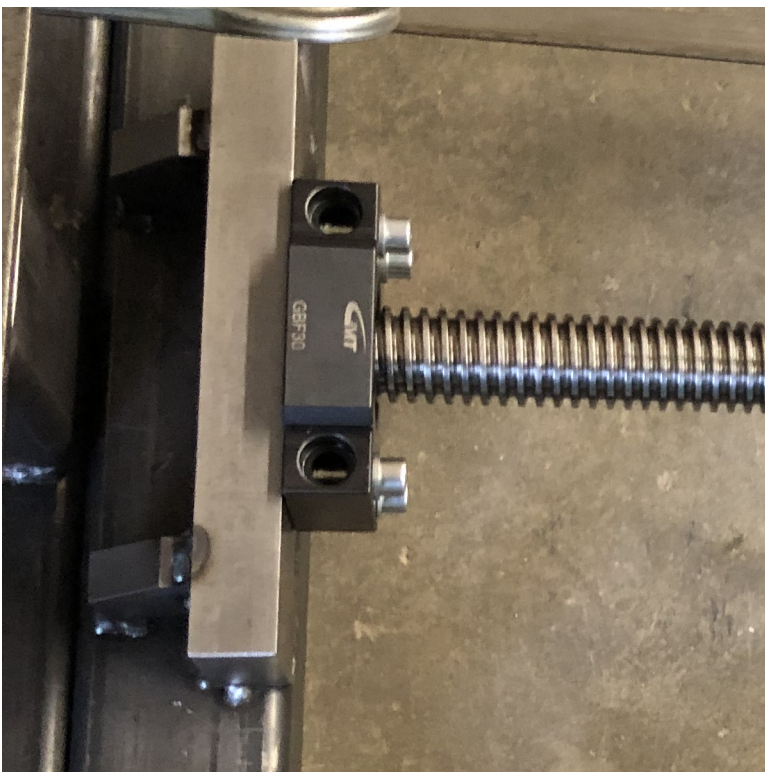


Bild 10 Festlager mit Gewindespindel

Der Antriebsmotor der Vorschubeinrichtung, nachfolgend „Vorschubmotor“ genannt, ist ein Kegelstirnradgetriebemotor, elektrisch eine Drehstrom-Asynchronmaschine mit 1,5 kW

Nennleistung. Der Motor hat eine Motornenndrehzahl von $1415 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Das Kegelstirnradgetriebe hat eine Übersetzung von 20,87. Daraus resultiert eine Abtriebsdrehzahl von $\approx 68 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Motordrehzahl wird elektronisch mittels Frequenzumrichter eingestellt. Aufgrund der variablen Drehzahl wird ein fremdbelüfteter Motor eingesetzt, um auch bei niedrigen Drehzahlen eine ausreichende Motorkühlung zu gewährleisten.

Der Bohrantrieb ist auf einem verfahrbaren Schlitten montiert, der durch zwei außen liegende Schienen geführt wird /Bild 11/.



Bild 11 Schlitten mit Gewindespindel und Führungsschienen

Mittig unter dem Schlitten ist eine Halterung für die Spindelmutter angebracht, die auf der Gewindespindel läuft /Bild 12/ und deren Rotation in Vorschub umsetzt.



Bild 12 Gewindespindel, in der Spindelmutter laufend

Der Fahrweg des Schlittens beträgt ≈ 1000 mm und wird automatisch durch zwei induktive Näherungsschalter begrenzt. Das Stromkabel für den Bohrantrieb wird durch eine Schleppkette zwangsgeführt, um einen sicheren Betrieb bei der Bewegung des Schlittens zu gewährleisten.

Der Motor des Bohrantriebs, nachfolgend „Bohrmotor“ genannt, ist ein Kegelstirnradgetriebemotor, elektrisch eine Drehstrom-Asynchronmaschine mit 2,2 kW Nennleistung. Der Motor hat eine Motornenndrehzahl von $1465 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Das Kegelstirnradgetriebe hat eine Übersetzung von 5,83. Daraus resultiert eine Abtriebsdrehzahl von $\approx 251 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Motordrehzahl wird elektronisch mittels Frequenzumrichter eingestellt. Die Rotation und das Drehmoment werden über eine Schalenkupplung auf die Gewindespindel bzw. die Halterung für das Bohrgestänge übertragen.

4.2.2 Steuereinheit

Die Steuereinheit /Bild 13/ für Vorschubgeschwindigkeit und die Drehzahl des Bohrmotors ist in sicherem Abstand von der Bohreinheit positionierbar. Die Steuereinheit enthält für beide Motoren Überstromschutzeinrichtungen, um Überlastungen der Motoren zu verhindern.



Bild 13 Steuereinheit der Bohranlage

4.2.3 Bohrgestänge und Bohrkopf

Das für die Untersuchungen ausgewählte KMR DN 50/125 gibt durch seine normativ zulässigen [2]/ geometrischen Abmessungen den Rahmen für das darauf abzustimmende Bohrgestänge und den Bohrkopf vor. Die verwendeten KMR DN 50/125 sind wie folgt aufgebaut (Maßangaben: soweit genormt normativ zulässige Wertebereiche):

Mediumrohr DN 50:

- Stahlrohr 60,3×3,2 mm längsnahtgeschweißt, Werkstoff P 235GH
- Außendurchmesser = 60,0...60,6 mm
- Wandstärke = 2,6...3,2 mm

Wärmedämmung:

- Polyurethan-Hartschaum
- Dichte $\geq 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Leckwarndrähte für das „Widerstands-Ortungs-Verfahren“ in der Wärmedämmung, ein Chrom-Nickel-Draht $\varnothing = 0,8 \text{ mm}$ mit roter, perforierter Isolation und ein Kupferdraht $\varnothing = 1,0 \text{ mm}$ mit grüner Isolation
- Abstandhalter aus Polyethylen zwischen Mediumrohr und Ummantelung

Ummantelung:

- Polyethylen hoher Dichte
- Nennaußendurchmesser = 125 mm
- Wandstärke $\geq 3,0 \text{ mm}$

Verbundrohr:

- Außendurchmesser = 125...132 mm
- Koaxialitätsabweichung $\leq 3,0 \text{ mm}$
- axiale Scherfestigkeit bei $(23 \pm 2) ^\circ\text{C} \geq 0,12 \text{ MPa}$

Die Bohraufgabe umfasst das Ausbohren der Wärmedämmung, so dass das Bohrgestänge das Mediumrohr in sich aufnehmen muss. Bei dem Bohrverfahren handelt es sich daher um eine horizontale Überwaschbohrung.

Gleichzeitig dient das Mediumrohr als Führung sowohl des Bohrgestänges als auch und insbesondere des Bohrkopfes. Zur Vermeidung von erhöhter Reibung bis hin zu

Blockaden muss das Bohrgestänge ausreichend Spiel um das Mediumrohr besitzen. Für ein Mediumrohr der Dimension DN 50 wird der Innendurchmesser des Bohrgestänges mit 63,0 mm festgelegt. Im Idealfall ist das Mediumrohr vollständig freigeschnitten, so dass durch die Materialpaarung Stahl auf Stahl eine nur geringe Reibung zu erwarten ist.

Der Außendurchmesser des Bohrgestänges und des Bohrkopfes wird durch die Nennweite und die Wandstärke der Ummantelung sowie die zulässige Koaxialitätsabweichung vorgegeben. Die Koaxialitätsabweichung ist ein Maß für die Abweichung der Mittellinie des Mediumrohres von der Mittellinie der Ummantelung. Da eine Koaxialitätsabweichung > 0 zulässig ist, kann nicht von einem zylindersymmetrischen Ringraum ausgegangen werden. Weiterhin muss um das Bohrgestänge ein Freiraum verbleiben, um die Abförderung des Bohrkleins zu ermöglichen. Aufgrund der in den Vorversuchen ermittelten Partikelgrößen des Bohrkleins wird ein mindestens 10 mm breiter Ringraum gefordert, so dass der Außendurchmesser des Bohrgestänges maximal 93 mm betragen sollte.

Als Bohrgestänge wird ein Flanschgestänge verwendet. Dieser Wahl liegen zwei Vorteile gegenüber Schraubgestängen für den vorgesehenen Einsatzzweck zugrunde. Durch die formschlüssige Verbindung kann eine Änderung der Drehrichtung nicht mit der Gefahr des LöSENS von Bohrstangenverbindern einhergehen. Dadurch wird es möglich, auftretende Probleme im Bohrprozess durch die Umkehr der Drehbewegung zu beheben. Ein Schraubgestänge erfordert für das sichere Verbinden und spätere Trennen der Bohrstangen hohe Drehmomente und die Möglichkeit der Fixierung eines Teils des Bohrgestänges. Dies erfordert zusätzliche maschinelle Komponenten, die im Technikum den verfügbaren Raum für die Bohreinheit zusätzlich reduzieren. Ein Flanschgestänge hingegen kann durch einfache Werkzeuge ein- und ausgebaut werden.

Ein Standardgestänge aus der Bohrindustrie erfüllt diese Vorgaben nicht, sodass eine eigene Konstruktion erforderlich ist. Eine Bohrstange besteht aus einem Stahlrohr mit 3,0 mm Wandstärke und einem innen liegenden Flansch aus rostfreiem Stahl. Das Stahlrohr besitzt einen Außendurchmesser von 84 mm und wird durch vier Innensechskantschrauben M6 mit dem Flansch verbunden. Der Flansch besitzt den geforderten Innendurchmesser von 63 mm /Bild 14/.



Bild 14 Bohrstangen

Auch wenn die Schraubenköpfe inklusive Sprengringen etwa 8 mm in den Ringraum hereinreichen, bleibt dort mit umlaufend fast 10 mm ausreichend Spiel zur Ummantelung. Weiterhin ist eine Beeinträchtigung des Bohrkleintransports wenig wahrscheinlich, da die Schraubenköpfe nur einen kleinen Teil des Ringraums einnehmen.

Aufgrund des maximalen Abstandes zwischen der Bohrspindel des Bohrgerätes und dem zu bohrenden KMR von 1000 mm werden die Bohrstangen mit einer Länge von 900 mm gefertigt. Für die Durchführung der Versuche mit 1500 mm langen Teilstücken eines KMR sind somit zwei Bohrstangen erforderlich. Die Versuche an einem kompletten rund 5600 mm langen KMR unter praxisnahen Bedingungen im Technikum erfordern sieben Bohrstangen.

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche wird zunächst ein einfacher Bohrkopf hergestellt, der mit drei Schneiden ausgestattet ist /Bild 15/.



Bild 15 einfacher Bohrkopf mit drei Schneiden

Die Befestigung des Bohrkopfes am Bohrgestänge erfolgt über die Flanschverbindung der ersten Bohrstange.

4.2.4 Halterung für KMR-Abschnitte

Zur Durchführung der Versuche unter Laborbedingungen wird eine Halterung für 1500 mm lange Teilstücke eines KMR konzipiert und gebaut. Der Rahmen besitzt drei Klemmvorrichtungen /Bild 16/.



Bild 16 Halterung für KMR-Abschnitte

Für die Versuchsdurchführung werden die beiden Rahmen der Bohreinheit und der Haltevorrichtung kraftschlüssig miteinander verbunden.

4.2.5 Bohrkleintransport- und austrag

Wie bereits oben angedeutet ist die Notwendigkeit eines aktiven Bohrkleintransports entlang des äußeren Ringraums zwischen Bohrgestänge und Ummantelung als sehr wahrscheinlich anzusehen. Dies gilt insbesondere mit der Zunahme der Länge des zu bohrenden KMR. Zur Beurteilung der Auswirkungen eines fehlenden bzw. mangelhaften Bohrkleinaustrags und damit zur Schaffung einer Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens für den Bohrkleintransport werden zunächst Versuche mit dem glatten Bohrgestänge ohne aktiven Bohrkleintransport im Ringraum durchgeführt. Ziel war auch die Untersuchung des Verhaltens der Wärmedämmung bei der zu erwartenden Temperaturzunahme durch erhöhte Reibung.

Während der Durchführung des Bohrversuches mit $100 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und langsamem Vorschub an einem $\approx 1500 \text{ mm}$ langen Teilstück des KMR sind Walkbewegungen der Ummantelung im Bereich des Bohrkopfes erkennbar. Die Temperatur der Ummantelung steigt an der Position des Bohrkopfes gegenüber der Raumtemperatur von $\approx 19^\circ \text{C}$ um weitere $\approx 20^\circ \text{C}$ an. Bei einem mit $\approx 39^\circ \text{C}$ gemessenen Höchstwert der Ummantelung liegt die Erwärmung noch deutlich unterhalb der für die Ummantelung zugelassenen Einsatztemperatur von 80°C . Allerdings werden beim Durchbruch des Bohrkopfes $\approx 75^\circ \text{C}$ an den Schneiden und 60°C am Körper des Bohrkopfes gemessen. Dennoch sind weder an der erbohrten Wärmedämmung noch an der Ummantelung temperaturbedingte Veränderungen zu erkennen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Ummantelung nicht

vollständig freigeschnitten wird, sondern durchgehend eine $\approx 2...3$ mm dicke Schicht der Wärmedämmung verbleibt.

Das Gesamtgewicht des KMR vor Versuchsbeginn beträgt 9,75 kg. Bei Versuche werden die Gewichte des Mediumrohres mit 2,0 kg und der Ummantelung mit 6,9 kg gemessen. Somit werden $\approx 0,85$ kg Wärmedämmung erbohrt. Es werden jedoch mit ≈ 40 g weniger als 5 % der insgesamt erbohrten Wärmedämmung ausgetragen. Dieser Austrag erfolgt jedoch nicht während des Bohrvorganges, sondern nahezu ausschließlich beim Rückzug des Bohrgestänges. Weiterhin ist ein Teil der erbohrten Wärmedämmung in den Ringraum zwischen Bohrgestänge und Mediumrohr gelangt, so dass deren Trennung beim Ausbau erschwert wird.

Insgesamt zeigt der Bohrversuch, dass auf einen aktiven Bohrkleintransport nicht verzichtet werden kann. Es kann angenommen werden, dass der Temperaturanstieg im Bohrkopf durch die vollständige Füllung des Ringraumes mit erbohrter Wärmedämmung begünstigt wird, weil zum einen die Reibung erhöht wird und zum anderen der Zutritt kühlender Luft für den Schneidvorgang verhindert wird. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die Temperatur bei längeren Bohrstrecken weiter erhöht und damit in den Grenzbereich der zulässigen Temperaturen insbesondere der Ummantelung gelangt. Weiterhin führt die mit der latenten Verstopfung einhergehende erhöhte Reibung im Ringraum sowohl zwischen Ummantelung und Bohrgestänge als auch zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge zu einem höheren Energiebedarf für Vorschub und Rotation, der mit der Bohrlänge stetig zunehmen wird.

Es wird daher beschlossen, ein geeignetes Verfahren für den Bohrkleintransport und -austrag in den Bohrvorgang zu integrieren. Die Aufgabenstellung wird insbesondere durch die Art des Bohrkleins und die Art des Bohrverfahrens definiert:

- Die Wärmedämmung weist im Vergleich zu Gesteinsbohrklein eine sehr geringe Dichte auf.
- Die Bohrversuche zeigen, dass das Bohrklein sehr kleinstückig ist.
- Es handelt sich um eine Horizontalbohrung, so dass weder Hubarbeit geleistet werden muss noch ein Inschwebehalten des Bohrkleins erforderlich ist.

Grundsätzlich sind Spülverfahren oder ein mechanischer Transport möglich.

Ein Spülverfahren benötigt für die Erzeugung eines zirkulierenden Spülungskreislaufes jeweils einen definierten Raum sowohl für die Zufuhr frischer Spülung als auch den Austrag der mit Bohrklein beladenen Spülung. Üblicherweise erfolgt die Zufuhr durch das Bohrgestänge und der Austrag im Ringraum der Bohrung. Dies ist im vorliegenden Fall

ebenfalls möglich, wobei der verfügbare Querschnitt im Bohrgestänge durch das innenliegende Mediumrohr auf einen engen Spalt reduziert ist. Der Ringraum zwischen Bohrgestänge und Ummantelung kann dem Bohrkleinaustrag dienen.

Bei Bohrungen im oberflächennahen, grundwasserführenden Bereich kommen als Spülmedium nur Wasser oder Druckluft in Frage. Die Notwendigkeit einer Wasserspülung ist aufgrund der oben genannten drei Kriterien nicht gegeben, insbesondere da die Dichte des Bohrkleins sehr gering ist. Eine Luftspülung wird sicher in der Lage sein, das Bohrklein auszutragen.

Für den Austrag von Gesteinsbohrklein durch Druckluft in vertikalen Bohrungen werden in der Regel Strömungsgeschwindigkeiten von $15 \dots 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ angesetzt. Aufgrund der geringen Dichte des Bohrkleins und der horizontalen Förderung kann im vorliegenden Anwendungsfall ein geringerer Wert von $5 \dots 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ angenommen werden. Bei einer Fläche des äußeren Ringraums von rund 5580 mm^2 ergibt sich ein erforderlicher Luftvolumenstrom von $1,7 \dots 3,3 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Da das Mediumrohr als Führung und Zentrierung des Bohrkopfes und des Bohrgestänges dient, ist der innere Ringraum im Bereich der Flanschverbindungen auf einen Spalt von $\approx 1,35 \text{ mm}$ reduziert, so dass sich die zu durchströmende Fläche auf 262 mm^2 verringert. In den Stahlrohren des Bohrgestänges beträgt der Strömungsquerschnitt 5153 mm^2 . An jedem Flansch verändert sich der Strömungsquerschnitt um den Faktor 9 und erzeugt dadurch einen zusätzlichen Strömungswiderstand. Resultierend ist ein erhöhte Kompressorleistung erforderlich, um die damit einhergehenden Druckverluste auszugleichen.

Insgesamt liegt der Quotient zwischen den wirksamen Strömungsquerschnitten des inneren und äußeren Ringraums bei ≈ 21 . Dieser unüblich hohe Wert führt zu einer weiteren Steigerung des Leistungsbedarfs des Kompressors, um geeignete Strömungsverhältnisse im äußeren Ringraum zu erzeugen. Resultierend wird ein leistungsstarker Kompressor mit hohen Betriebsdrücken erforderlich.

Die Druckluft muss in das rotierende Bohrgestänge eingeleitet werden und das Bohrgestänge muss druckdicht sein, um Verluste zu vermeiden. Die mit Bohrklein beladene Druckluft muss nach Austritt aus dem KMR aufgefangen und gereinigt werden, um eine Gesundheitsgefährdung durch Staubbelastung zu vermeiden. Neben den ungünstigen geometrischen Voraussetzungen und dem damit einhergehenden hohen spezifischen Energieaufwand erfordert eine Druckluftspülung einen erheblichen technischen Aufwand.

Ein mechanischer Bohrkleintransport kann kontinuierlich oder intermittierend erfolgen. Letzteres führt zu periodischen Unterbrechungen des Bohrprozesses und ist nur sinnvoll in Verbindung mit einem diskontinuierlichen Bohrprozess. Für die Kombination mit dem zum Einsatz kommenden kontinuierlichen Drehbohrverfahren ist ein kontinuierlicher Bohrkleintransport zielführend, der in der konventionellen Drehbohrtechnik in Lockergestein durch das Schneckenbohren erreicht wird. Die vorliegende Aufgabenstellung ist vergleichbar mit der Technologie des Kernbohrens mit Hohlbohrschnecken, da nur ein Kreisring erbohrt wird und das Bohrklein in einem Ringraum abgeführt werden muss.

Jede Bohrstange muss mit einer Förderschnecke versehen werden, deren Innendurchmesser dem Außendurchmesser der Bohrstangen von 84 mm entspricht. Die Ermittlung der Höhe der Förderschnecke erfolgt analog zu den oben beschriebenen Überlegungen für die Geometrie des Bohrgestänges. Das Bohrgestänge liegt jederzeit auf dem Mediumrohr auf, sodass der untere Teil des Ringraums um den Gesamtbetrag des Spiels zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge in Höhe von 2,7 mm verringert wird. Eine zusätzliche Verringerung des Ringraums kann bei einer maximal unteren, dezentralen Lage des Mediumrohres mit 3 mm auftreten. Bei einem Nenninnendurchmesser der Ummantelung von 119 mm ergibt sich eine Mindestweite des unteren Ringraums von $\approx 11,8$ mm.

Nach Diskussion und Bewertung der unterschiedlichen technischen Möglichkeiten wird ein mechanischer Bohrkleintransport mittels einer Förderschnecke gewählt.

Unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse im Ringraum des KMR und des Drehzahlbereichs beim Bohren wird eine Förderschnecke mit einer Steigung von 140 mm und 10 mm Wendelhöhe ausgewählt und an die Bohrstangen angeschweißt. Die Orientierung der Förderschnecken auf den einzelnen Bohrstangen wird derart angepasst, dass sich eine fortlaufende Förderschnecke ergibt, um den kontinuierlichen Transportprozess zu optimieren /Bild 17/.



Bild 17 Bohrgestänge mit Förderschnecke

5. Versuchsdurchführung

Die Versuche zur Entwicklung eines Verfahrens zur grabenlosen Erneuerung von Fernwärmeleitungen lassen sich in die nachstehenden Abschnitte unterteilen:

1. Versuche unter Laborbedingungen am IBB
2. Versuche unter praxisnahen Bedingungen am FFI

Nach dem Bau des Prototyps der Bohranlage werden zunächst Versuche unter Laborbedingungen mit dem Ziel der Funktionsprüfung und Optimierung des Prototyps durchgeführt. Anschließend erfolgen die Versuche unter praxisnahen Bedingungen.

5.1 Versuche unter Laborbedingungen

Ziel der Versuche unter Laborbedingungen ist die Ermittlung der optimalen Betriebsparameter für den Bohrprozess als Grundlage für die anschließenden Versuche unter praxisnahen Bedingungen.

5.1.1 Versuchsreihe 1 mit Variation der Drehzahl des Bohrkopfes

Der Bohrvorgang kann durch die „Drehzahl des Bohrkopfes“, nachfolgend „Drehzahl“ genannt, und die „Vorschubgeschwindigkeit des Bohrkopfes bzw. Bohrgestänges“, nachfolgend Vorschubgeschwindigkeit“ genannt, beeinflusst werden. Zur Ermittlung des Einflusses der Drehzahl auf die Partikelgrößenverteilung der erbohrten Wärmedämmung werden daher zunächst Versuche mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von $162,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ bei den beiden Drehzahlen von $100 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $200 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ durchgeführt.

Der Bohrvorgang erfolgt problemlos. Erkennbar ist aber ein plötzlicher Anstieg der Leistungsaufnahme des Bohrmotors bei Eingriff des Bohrkopfes in die Abstandhalter.

Bei KMR, die im diskontinuierlichen Herstellungsprozess gefertigt werden, befinden sich Abstandhalter in regelmäßigen Abständen zwischen Mediumrohr und Ummantelung um das Mediumrohr in der Ummantelung zu zentrieren, bevor der Ringraum mit Polyurethan-Hartschaum ausgeschäumt wird. Der Innenmesser der Abstandhalter orientiert sich am Außendurchmesser des Mediumrohres. Der Außendurchmesser der Abstandhalter orientiert sich am Innendurchmesser der Ummantelung. Die Abstandhalter sind $\approx 25 \text{ mm}$ breit, deren Material besitzt eine Wandstärke von $\approx 3,5 \text{ mm}$ /Bild 18/.



Bild 18 ausgebohrter Abstandhalter, Seitenansicht (links), Draufsicht (rechts)

Das aus dem KMR geförderte Bohrklein wird aufgefangen und visuell begutachtet. In der auszubohrenden Wärmedämmung befinden sich auch Abstandshalter und die beiden Leckwarndrähte. Nach der Versuchsdurchführung werden die größeren Partikel der Abstandhalter und Leckwarndrähte manuell aus dem Bohrklein entfernt und anschließend die verbliebenen Partikel der Wärmedämmung einer Partikelgrößenuntersuchung unterzogen.

Die Teile der Abstandhalter weisen überwiegend Größen < 50 mm auf und besitzen damit eine geeignete Partikelgröße für den Transport mittels der Förderschnecke /Bild 19/. Daneben entstehen aber auch größere Teile, die zu erhöhter Reibung oder einer Verklemmung führen können. Oben links im /Bild 19/ ist ein sehr großes Teil eines Abstandhalters zu sehen, das zudem gebogen ist und damit ein erhebliches Potential für eine Verklemmung aufweist.



Bild 19 Teile der Abstandhalter aus dem Bohrklein

Entgegen der Befürchtung, dass sich die Leckwarndrähte um den Bohrstrang wickeln, werden diese in kurze Abschnitte von $\approx 20\ldots 150$ mm Länge zerteilt /Bild 20/ und stellen keine Problemstellung beim Bohrprozess dar.

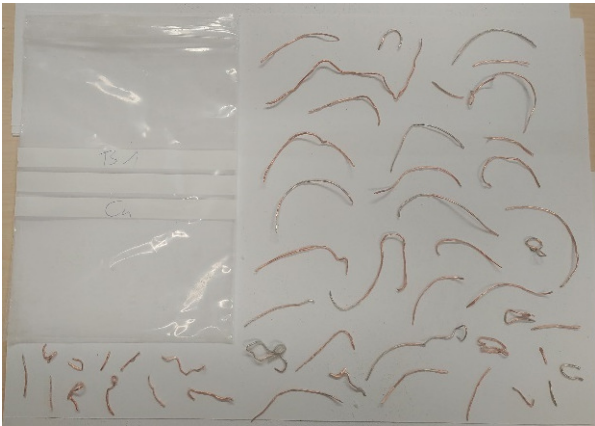


Bild 20 Teile der Leckwarndrähte aus dem Bohrklein

Die Partikelgrößenverteilung des Bohrkleins zeigt keine Abhängigkeit von der Drehzahl /Bild 21/. Drei Partikelklassen sind erkennbar /Bild 22/. Bei beiden Drehzahlen liegen $\approx 80\%$ der Partikel im Bereich ≤ 3 mm. An der Gesamtmenge besitzen die Partikel ≤ 8 mm einen Anteil von $> 93\%$. Der Anteil an Partikeln > 8 mm ist somit sehr gering.

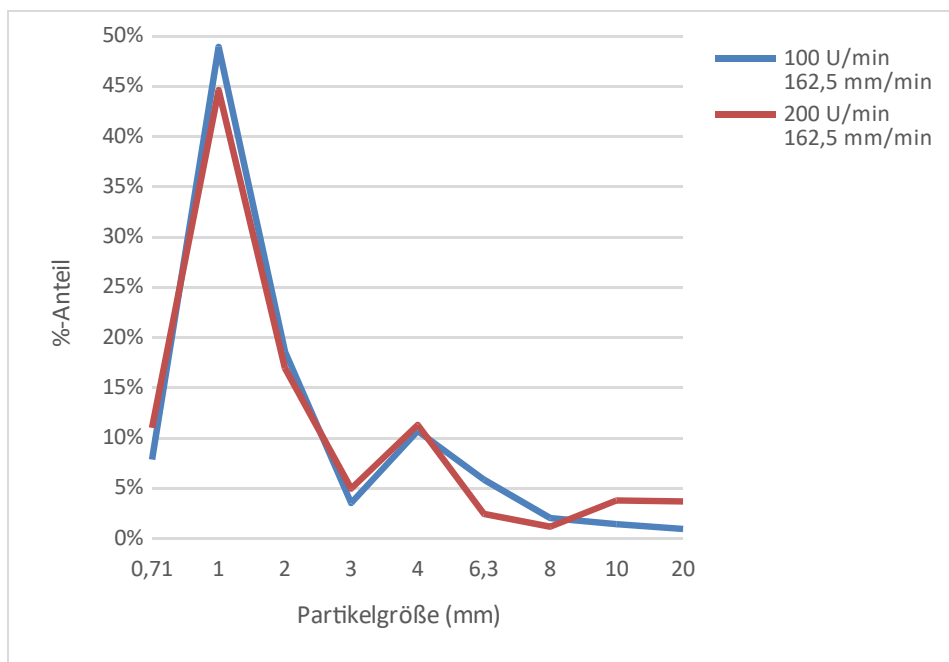


Bild 21 Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Drehzahl

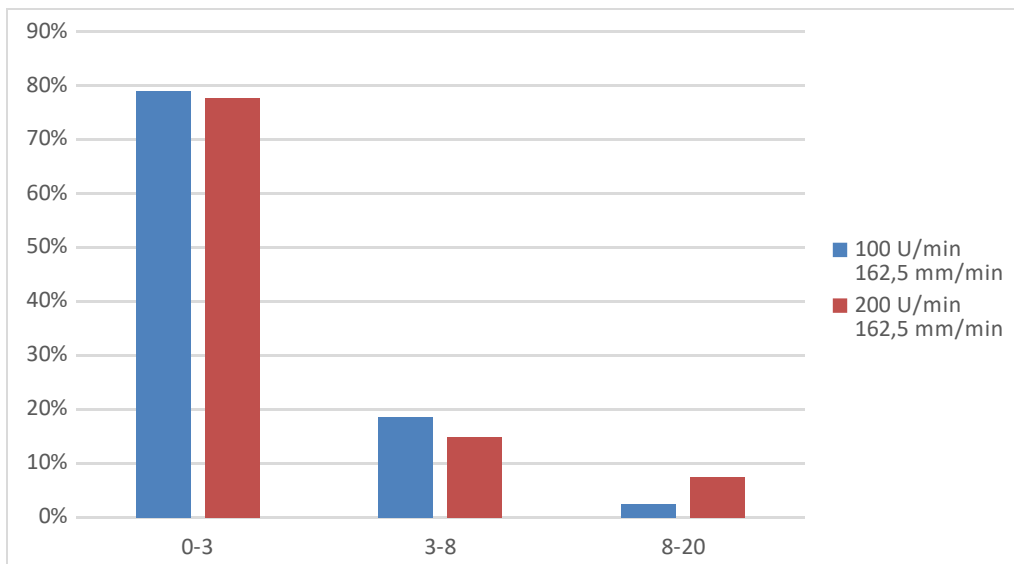


Bild 22 Partikelklassenverteilung in Abhängigkeit der Drehzahl

Grundsätzlich kann die erzielte Partikelgrößenverteilung in Bezug auf die Geometrie des Ringraumes und der darin befindlichen Förderschnecke als geeignet bezeichnet werden, da insbesondere der Anteil Partikel > 8 mm gering ist und daher ein Verstopfen unwahrscheinlich ist. In beiden Versuchen werden $\approx 69,3$ % der gelösten Wärmedämmung während des Bohrprozesses ausgetragen.

Für das Entfernen des Mediumrohres aus dem Bohrgestänge sind teils erhebliche Zugkräfte notwendig. Grund ist, dass während des Bohrvorgangs eine erhebliche Menge des Bohrkleins in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge gelangt und zu einer Verklemmung führt. Dies ist aufgrund erhöhter Reibkräfte auch ungünstig für den Bohrvorgang. Ziel muss sein, dass das Bohrklein möglichst vollständig in den Ringraum zwischen Bohrgestänge und Ummantelung gelangt und dort abgefördert wird. Resultierend ist eine erste Optimierung des Bohrkopfes erforderlich.

5.1.2 Erste Optimierung des Bohrkopfes

Ursache des unerwünschten Eintritts von Bohrklein in den Ringraum Mediumrohr und Bohrgestänge ist die offene Gestaltung des Bohrkopfes /Bild 23/, der keine Abdichtung im zentralen Teil erzielen kann.



Bild 23 Bohrkopf vor der ersten Optimierung

Die mit den innenliegenden Schneiden erbohrte Wärmedämmung füllt den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrkopf und kann diesen nicht mehr verlassen. Mit dem Bohrfortschritt gelangt das Bohrklein zwangsläufig in den anschließenden Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge. Ziel muss jedoch sein, das Bohrklein möglichst vollständig in den Ringraum zwischen Bohrkopf und Ummantelung zu leiten und dort durch die Förderschnecke anzuführen.

Zur Lösung dieses Problems wird der Bohrkopf mit einem inneren Ring versehen /Bild 24/, der ebenso wie die Flanschverbindungen des Bohrgestänges einen nur noch kleinen Spalt von umlaufend 1,35 mm zum überbohrten Mediumrohr besitzt. Weiterhin wird die Länge des Bohrkopfes auf 100 mm verkürzt, um den Abstand zwischen dem Bohrvorgang und der Förderschnecke zu verkürzen.



Bild 24 Bohrkopf nach der ersten Optimierung

5.1.3 Versuchsreihe 2 mit Variation von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit

In der zweiten Versuchsreihe werden mit dem optimierten Bohrkopf Versuche mit den Vorschubgeschwindigkeiten $162,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ und $325 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ und jeweils den beiden Drehzahlen $100 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $200 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ durchgeführt.

Grundsätzlich ist das Bohren der Wärmedämmung als sehr einfach zu bewerten. Zum einen erfolgt der Bohrfortschritt in der Wärmedämmung problemlos mit nur geringer Leistungsaufnahme des Bohrmotors und zum anderen wird das Bohrklein in einem gleichförmigen Massenstrom ausgetragen. Erkennbar ist aber auch wieder ein plötzlicher Anstieg der Leistungsaufnahme des Bohrmotors bei Eingriff des Bohrkopfes in die Abstandhalter.

Das aus dem KMR geförderte Bohrklein wird aufgefangen und visuell begutachtet. Nach der Versuchsdurchführung werden die gröberen Partikel der Abstandhalter und Leckwarndrähte manuell aus dem Bohrklein entfernt und anschließend die verbliebenen Partikel der Wärmedämmung einer Partikelgrößenuntersuchung unterzogen.

Sowohl die Leckwarndrähte als auch die Abstandhalter werden in allen Versuchen unabhängig von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl ausreichend zerkleinert. Sämtliche Teile der Abstandhalter besitzen Abmessungen, die den Abtransport im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Ummantelung erlauben /Bild 25/. Ebenso werden die Leckwarndrähte wieder in wenige Zentimeter lange Stücke zerteilt /Bild 26/.

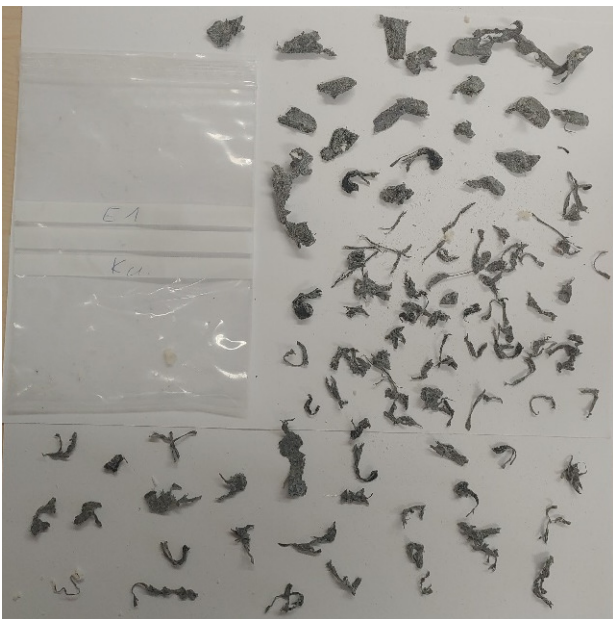


Bild 25 Teile der Abstandhalter aus dem Bohrklein



Bild 26 Teile der Leckwarndrähte aus dem Bohrklein

Die Anteile der Partikelgrößen im Bohrklein schwanken bei den einzelnen Versuchen. Grundsätzlich erkennbar ist, dass der Hauptanteil des Bohrkleins aus Partikeln ≤ 3 mm besteht und der Anteil der Partikel > 8 mm gering ist /Bild 27/ /Bild 28/.

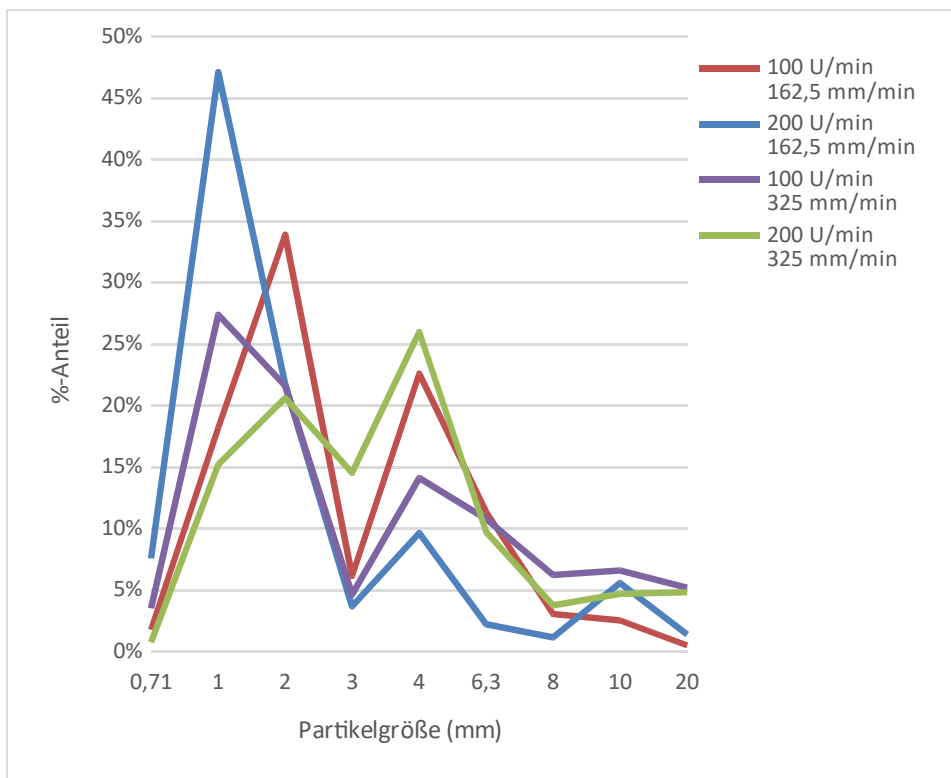


Bild 27 Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl

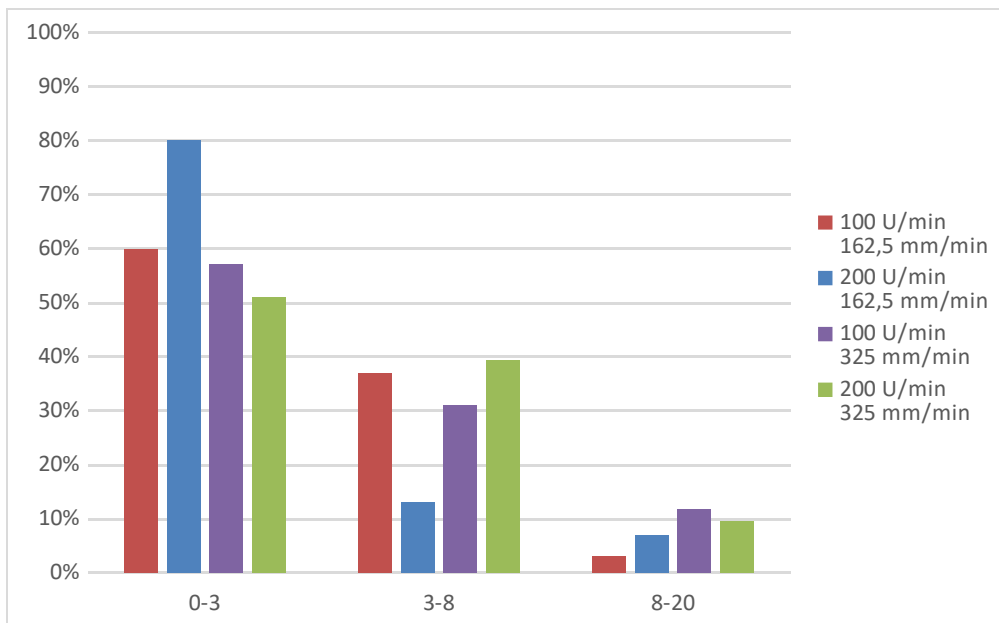


Bild 28 Partikelklassenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl

In den Versuchen werden $\approx 84\%$ der gelösten Wärmedämmung während des Bohrprozesses ausgetragen. Dies ist eine deutliche Verbesserung gegenüber dem nicht optimierten Bohrkopf mit $\approx 69\%$.

Eine wichtige Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass die durch die Reduzierung des Innendurchmessers des Bohrkopfes angestrebte Abdichtung des Ringraums zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge erreicht wird. Das Ziehen des Mediumrohres aus dem Bohrgestänge ist einfach möglich. Es wird jeweils nur eine geringe Menge sehr feiner Wärmedämmung in den Bohrstangen gefunden. Diese Menge muss nicht zwingend durch den Bohrkopf eingedrungen sein, sondern kann auch Abrieb von Resten der Wärmedämmung auf dem Mediumrohr sein.

Andererseits zeigen die Versuche, dass auch Teile der Abstandshalter in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge gelangt sind. Schleifspuren an den größeren Teilen der Abstandshalter deuten darauf hin, dass diese in dem engen Ringspalt an den Flanschen stark mechanisch belastet werden. Da dort dennoch keine Nachzerkleinerung stattfindet, löst sich dieses Problem nicht mit der Zeit von selbst, sondern wird mit dem Eindringen weiterer Teile der Abstandshalter vielmehr stetig größer. Es kann angenommen werden, dass dies auch zum Abbruch des Bohrvorgangs aufgrund einer Überlastung des Bohrmotors führen kann.

Für die Durchführung weiterer und insbesondere für die Versuche unter praxisnahen Bedingungen ist die weitere Optimierung des Bohrkopfes in Bezug auf die Zerkleinerung

der Teile der Abstandshalter und auf den vollständigen Abtransport des Bohrkleins unabdingbar.

5.1.4 Zweite Optimierung des Bohrkopfes

Durch die verbesserte Abdichtung des Ringraums zwischen Mediumrohr und Bohrkopf beim optimierten Bohrkopf wird das Eindringen von Bohrklein in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge bereits erheblich reduziert. Eine weitere Reduzierung des Ringspaltes ist jedoch aufgrund der Geometrie des KMR, insbesondere der zulässigen Koaxialitätsabweichung nicht möglich, da bei einer annähernd spaltfreien Überbohrung des Mediumrohres zwei Probleme auftreten können:

- Verklemmen des Bohrkopfes und -stranges zwischen Mediumrohr und Ummantelung
- Zerstörung der Ummantelung in Bereichen mit großer Koaxialitätsabweichung

Eine weitergehende Optimierung des Bohrkleintransports kann daher nur durch die verbesserte Abführung des Bohrkleins aus dem Schneidbereich und eine verbesserte Zuführung des Bohrkleins zur Förderschnecke erreicht werden. Hieraus leiten sich die ersten beiden konstruktiven Vorgaben für einen optimierten Bohrkopf ab:

- Optimierung der Schneidengeometrie in Bezug auf eine schnelle Abförderung des Bohrkleins aus dem Schneidbereich
- Möglichst geringer Abstand zwischen den Schneiden des Bohrkopfes und dem Bohrgestänge mit Förderschnecke

Die Optimierung umfasst weiterhin die Erhöhung des Zerkleinerungsgrades der Abstandshalter. Wie aus den Vorversuchen ersichtlich kann dies durch eine höhere Drehzahl und damit einem eher fräsenden Verhalten der Schneiden erreicht werden. Andererseits führen nach den bisherigen Versuchsergebnissen höhere Drehzahlen zu einer sehr starken Zerkleinerung der Wärmedämmung, die das unerwünschte Eindringen feiner Partikel des Bohrkleins in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge begünstigt. Dies ist mit Blick auf die oben genannte Zielsetzung zu vermeiden.

In Analogie zu anderen Bohrprozessen kann eine stärkere Zerkleinerung auch durch die Erhöhung der Anzahl der Schneiden erreicht werden, da dadurch die Spantiefe abnimmt und durch den häufigeren Eingriff der Schneiden auch eine stärkere Sekundärzerkleinerung bereits abgelöster Partikel erfolgt. Die dritte konstruktive Vorgabe für den optimierten Bohrkopf beinhaltet daher die Erhöhung der Anzahl Schneiden. Die

drei genannten konstruktiven Vorgaben erfordern die Konzeption und Fertigung eines neuen Bohrkopfes /Bild 29/.



Bild 29 neuer Bohrkopf gemäß konstruktiver Vorgaben

Die wesentlichen Kennzeichen des neuen Bohrkopfes sind:

- Fünf Schneiden mit großem Freiwinkel
- Großflächige Durchlässe zwischen Schneiden
- Minimierte Länge des Bohrkopfes
- Minimierter Durchmesser des Grundkörpers des Bohrkopfes

Der große Freiwinkel und die großflächigen Zwischenräume zwischen den fünf Schneiden zielen auf einen möglichst ungehinderten Abtransport des Bohrkleins aus dem Bohrbereich ab. Ergänzt wird dies durch den kurzen und schlanken Grundkörper des Bohrkopfes, der eine schnelle und ungehinderte Zuführung des Bohrkleins zu der Förderschnecke des Bohrgestänges erlaubt. Insgesamt ist zu erwarten, dass das Eindringen von Bohrklein in den Ringspalt auf ein Minimum reduziert werden kann und somit gravierende Behinderungen im Bohrprozess verhindert werden.

5.1.5 Versuchsreihe 3 mit Variation von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit

Mit dem neuen Bohrkopf werden die Versuche der Versuchsreihe 2 mit den gleichen Einstellungen wiederholt.

Das Erbohren der Wärmedämmung ist weiterhin als sehr einfach zu bewerten. Die visuelle Bewertung der Größen der Teile der Abstandhalter beim Austrag aus der Ummantelung zeigt, dass die Abstandhalter mit dem neuen Bohrkopf wesentlich besser zerkleinert werden.

Nach der Versuchsdurchführung werden die gröberen Partikel der Abstandhalter und Leckwarndrähte manuell aus dem Bohrklein entfernt und anschließend die verbliebenen Partikel der Wärmedämmung einer Partikelgrößenuntersuchung unterzogen.

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung /Bild 30/ der Wärmedämmung zeigt, dass sowohl die Änderung der Vorschubgeschwindigkeit als auch der Drehzahl des Bohrkopfes nahezu keinen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung haben.

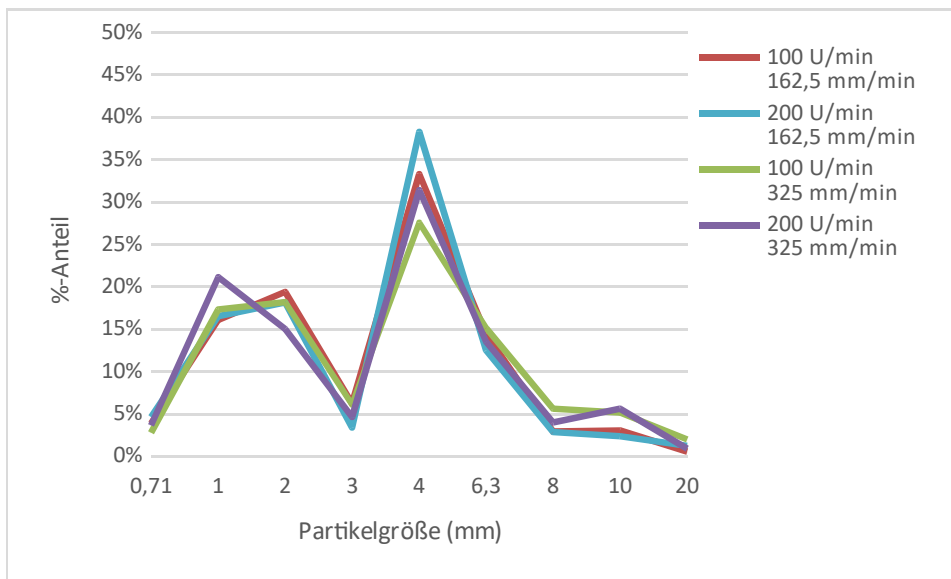


Bild 30 Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl

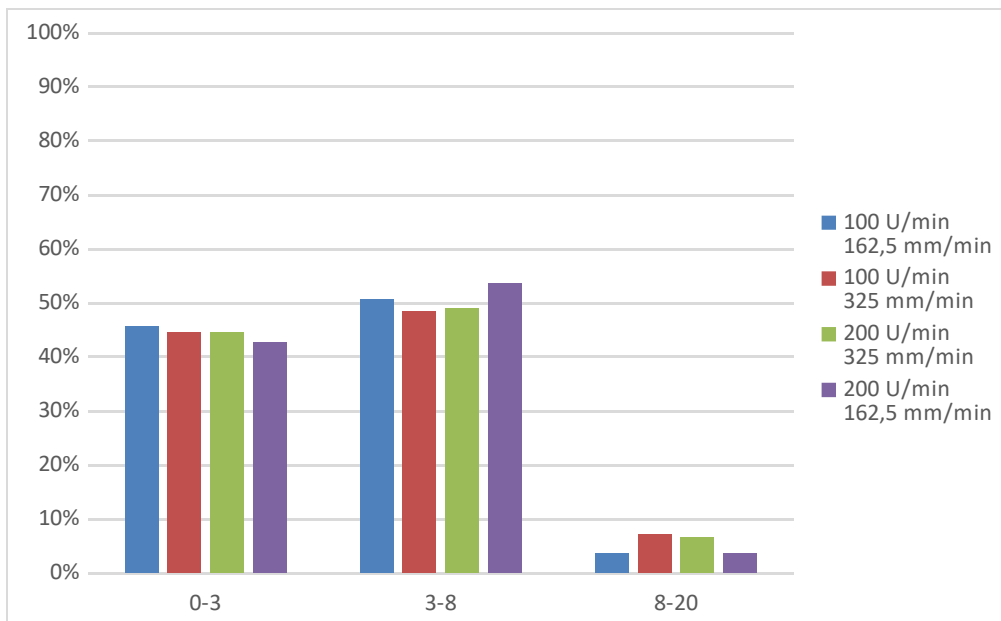


Bild 31 Partikelklassenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl

Die Partikelklassenverteilung /Bild 31/ weist jedoch einen im Vergleich zum alten Bohrkopf erhöhten Anteil der Partikel mit einer Größe von $> 3 \dots 8$ mm bei gleichzeitiger Abnahme des Anteils der Partikel mit einer Größe von ≤ 3 mm. Das Bohrklein wird durch den neuen Bohrkopf insgesamt etwas gröber. Dies begünstigt den Transportprozess durch die

Förderschnecke, so werden hier $\approx 95,5\%$ der gelösten Wärmedämmung während des Bohrprozesses ausgetragen.

Wie auch in den vorherigen Versuchsreihen wird während der Versuche beim Durchbohren der Abstandhalter oft der Nennstrom des Bohrmotors kurzzeitig überschritten. Zur Vermeidung von technischen Problemen bei den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen wird der Bohrmotor durch einen Stirnradgetriebemotor mit höherer Leistung, höherem Drehmoment und geringerer Drehzahl ersetzt /Tabelle 1/. Das höhere maximale Abtriebsmoment kann beim Anfahren und beim Zerkleinern der Abstandhalter von Vorteil sein.

Parameter	Einheit	Bohrmotor alt	Bohrmotor neu
Leistung	[kW]	2,2	3,0
Motornennndrehzahl	[U·min ⁻¹]	1.465	1.460
Übersetzung	[]	5,83	15,30
max. Abtriebsdrehzahl	[U·min ⁻¹]	≈ 251	≈ 95
max. Abtriebsmoment	[N·m]	189	380

Tabelle 1 Vergleich alter und neuer Bohrmotor

Zur Überprüfung der Ergebnisse werden Teile der Versuchsreihe mit dem neuen Bohrmotor wiederholt und mit Versuchen zu geringeren Drehzahlen ergänzt.

In allen Versuchen erfolgen das Bohren und der Abtransport der Wärmedämmung problemlos. Unterschiede zeigen sich beim Durchbohren der Abstandhalter. Bei einer Drehzahl von $95 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ werden die Abstandhalter durchbohrt ohne eine Überlastung des Drehmotors zu erzeugen. Bei den beiden langsameren Drehzahlen $50 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $75 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ kommt es jedoch auch bei dem leistungsstärkeren Motor zu einer kurzzeitigen Stromaufnahme oberhalb des Nennstromes beim Durchbohren der Abstandhalter. Es ist zu vermuten, dass der Bohrkopf aufgrund der geringeren Drehzahl durch den Abstandhalter kurz blockiert wird, bevor der Abstandhalter gebrochen werden kann.

Nach der Versuchsdurchführung werden die gröberen Partikel der Abstandhalter und Leckwarndrähte manuell aus dem Bohrklein entfernt und anschließend die verbliebenen Partikel der Wärmedämmung einer Partikelgrößenuntersuchung unterzogen.

Die Partikelgrößen- und Partikelklassenverteilung des Bohrkleins sind für alle Drehzahlen nahezu identisch /Bild 32/ /Bild 33/ und unterscheiden sich nicht von denen der vorherigen Versuchsreihe.

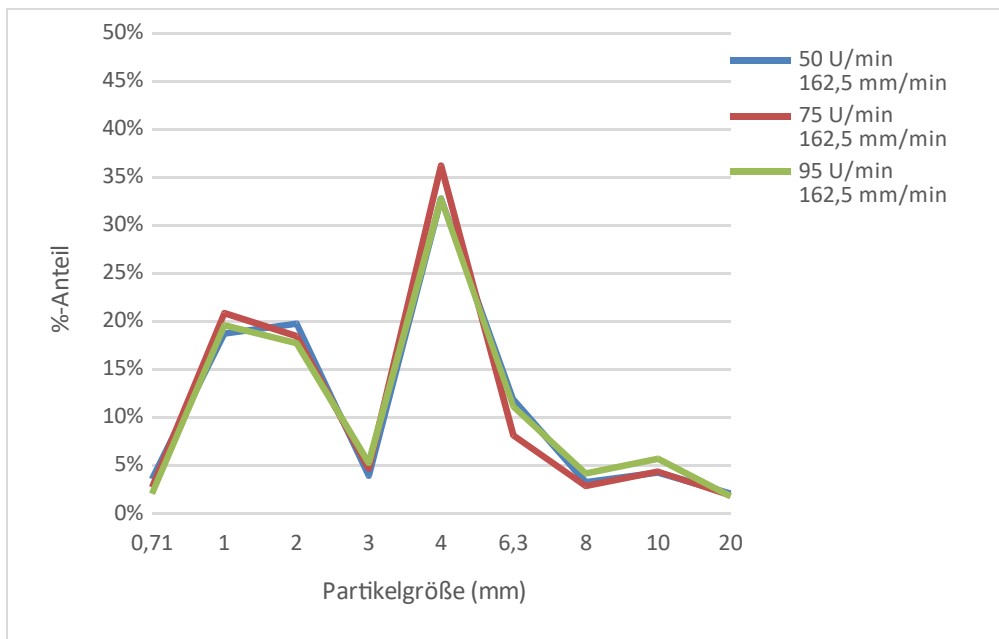


Bild 32 Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl mit dem neuen Bohrmotor

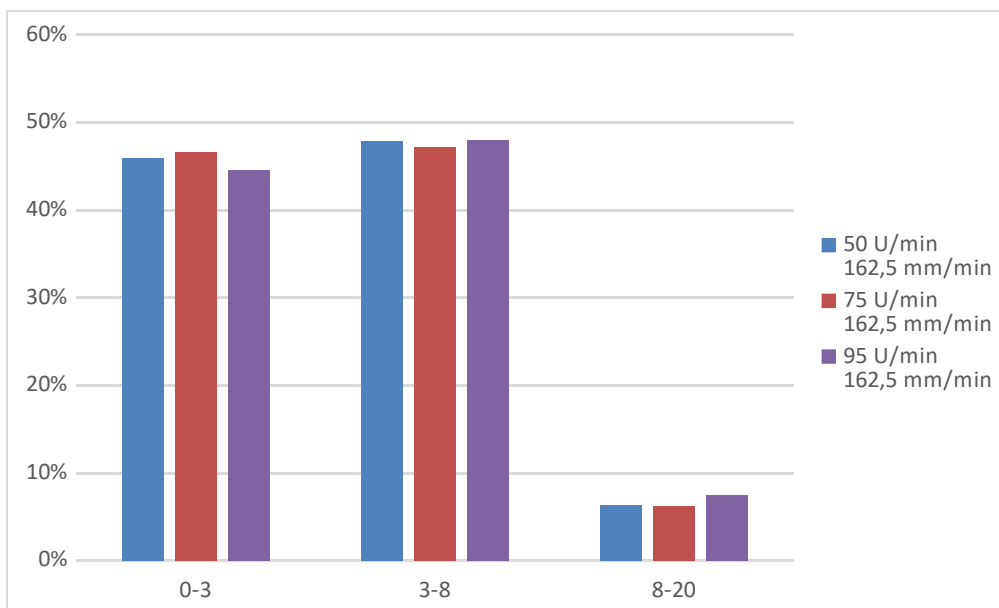


Bild 33 Partikelklassenverteilung in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl mit dem neuen Bohrmotor

5.1.6 Zusammenfassende Bewertung des Bohrvorganges

Das Schneiden der Wärmedämmung und der Abtransport des Bohrkleins durch die Förderschnecke sind grundsätzlich sehr einfach.

Die Leckwarndrähte werden in kurze Stücke zerteilt und erzeugen keine Probleme beim Bohren.

Probleme treten während des Bohrprozesses insbesondere an zwei Stellen auf.

- Zutritt von Bohrklein in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge
- Durchbohren der Abstandhalter

Zur Vermeidung bzw. Reduzierung des Zutritts von Bohrklein in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrgestänge wird der Bohrkopf schrittweise optimiert. Zum einen wird der Ringspalt zum Mediumrohr soweit verringert wie es die maximal zulässige Koaxialitätsabweichung zulässt. Zum anderen wird die Geometrie der Schneiden verbessert, um ein schnelles Entfernen des frisch geschnittenen Bohrkleins aus dem Bohrbereich in den Ringraum zwischen Bohrgestänge und Ummantelung zu erreichen.

Im Gegensatz zu der leicht bohrbaren Wärmedämmung bieten die Abstandhalter einen erheblich höheren Bohrwiderstand, der in einem sprunghaften Anstieg der Stromaufnahme des Bohrmotors erkennbar ist. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass zum einen der neue Bohrkopf eine Verbesserung bei der Zerkleinerung der Abstandhalter erreicht und zum anderen ein leistungstärkerer Bohrmotor eingesetzt wird. Aufgrund der kurzzeitigen Überlastung auch des stärkeren Bohrantriebes sind Drehzahlen unterhalb von $95 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ nicht sinnvoll.

Durch die optimierte Schneidengeometrie des neuen Bohrkopfes wird auch eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung dahingehend erreicht, dass der Anteil sehr feinen Bohrkleins verringert wird. Dies begünstigt den Abtransport des erbohrten Materials durch den Ringraum zwischen Bohrgestänge und Ummantelung. So werden mit dem neuen Bohrkopf $\approx 95,5 \%$ der gelösten Wärmedämmung abtransportiert. Dies stellt eine Verbesserung zum alten nicht optimierten Bohrkopf mit $\approx 69 \%$ und zum alten optimierten Bohrkopf mit $\approx 84 \%$ dar. Die Partikelgrößenverteilung zeigt keine Abhängigkeit von den verschiedenen Kombinationen von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit.

Bei allen Versuchen werden die Temperaturen an der Ummantelung im Bereich des Bohrkopfes gemessen. Die Maximalwerte liegen im Bereich von $\approx 40^\circ\text{C}$ und damit deutlich unterhalb der zulässigen Temperatur für die Ummantelung. Es ist allerdings erkennbar, dass sich die Temperatur beim Durchbohren der Abstandshalter immer kurzfristig erhöht. Dies ist auch an den Temperaturmessungen am Bohrkopf und dessen Schneiden nach dem vollständigen Durchbohren der Wärmedämmung des KMR ersichtlich. Die Position der Abstandshalter ist in jedem der verwendeten KMR-Abschnitte unterschiedlich und liegt zwischen $0,3 \dots 0,5 \text{ m}$ vor dem Ende des Bohrprozesses. Je näher der Abstandhalter am Ende des Rohrstückes liegt, desto höher ist die gemessene Temperatur am Bohrkopf, da weniger Zeit für ein anschließendes Abkühlen gegeben ist.

Gemessen. werden Minimalwerte von $\approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Maximalwerte von $\approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Kombination von hoher Drehzahl und niedriger Vorschubgeschwindigkeit grundsätzlich höhere Temperaturen verursacht.

Basierend auf diesen Ergebnissen werden für die Versuche unter praxisnahen Bedingungen eine Drehzahl von $95\text{ U}\cdot\text{min}^{-1}$ und eine Vorschubgeschwindigkeit von $162,5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ als Grundeinstellungen festgelegt.

5.1.7 Einziehvorgang

Nach dem Ausbohren der Wärmedämmung wird das Mediumrohr entfernt. Gemäß dem Ziel des Forschungsvorhabens soll die Ummantelung im Erdreich verbleiben und das neue KMR in diese eingezogen werden. Dem Einziehvorgang muss daher bei identischen Dimensionen des alten und neuen KMR ein Schlitzen und Aufweiten der im Erdreich verbleibenden Ummantelung des alten KMR vorausgehen. Es ist vorgesehen, dass das Schlitzen und Aufweiten unmittelbar vor dem Einziehen des neuen KMR in einem Zuge erfolgen soll.

Dafür wird ein Schlitz- und Aufweitkopf aus Edelstahl konstruiert /Bild 34/. Für eine Minimierung des Einflusses auf die Bettung und der für die Aufweitung erforderlichen Kräfte besitzt der Schlitz- und Aufweitkopf einen maximalen Außendurchmesser von 126 mm, der damit nur 1 mm größer als der Nennaußendurchmesser des einzuziehenden KMR der Dimension DN 50/125 ist.



Bild 34 Schlitz- und Aufweitkopf

Erkennbar sind die beiden Schneiden, die beim Einziehen auf 3 Uhr- und 9 Uhr-Position ausgerichtet sind und somit die Ummantelung in eine obere und unter Hälfte teilen. Durch diese Lage der Hälften soll die Bohrlochfirste gestützt und ein Einbruch von Sand weitgehend verhindert werden. Die Schneiden befinden sich auf dem konisch

ausgeführten Grundkörper, der die beiden Hälften der Ummantelung nach dem Schneiden radial verschiebt.

Frontseitig befindet sich zentriert eine Gewindebohrung für die Aufnahme einer Zugöse. Am hinteren Teil des Schlitz- und Aufweitkopfes befinden sich Abstufungen, die das zentrierte Anschweißen des Mediumrohres des neuen KMR ermöglichen.

5.2 Versuche unter praxisnahen Bedingungen

5.2.1 Versuch 1

5.2.1.1 Verlegung des KMR

Die Verlegung des KMR erfolgt im Technikum in einem Graben, dessen Stirnseiten mit Spundwänden abgeschlossen sind. Die Grabenlänge ist so gewählt, dass bei der Verlegung einer handelsüblichen 6 m KMR-Stange deren Enden der Ummantelung im Bereich der Spundwände liegen. Die Bettung und die Überdeckung des KMR mit einer Überdeckungshöhe von ≈ 800 mm erfolgen mit Sand. Der verwendete Sand weist eine Proctordichte von $1725 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ bei einem optimalen Wassergehalt von 12,8 % auf. Nachfolgend sind die Sieblinie /Bild 35/ und die bei der Bestimmung der Sieblinie erhaltenen Fraktionen /Bild 36/ dargestellt.

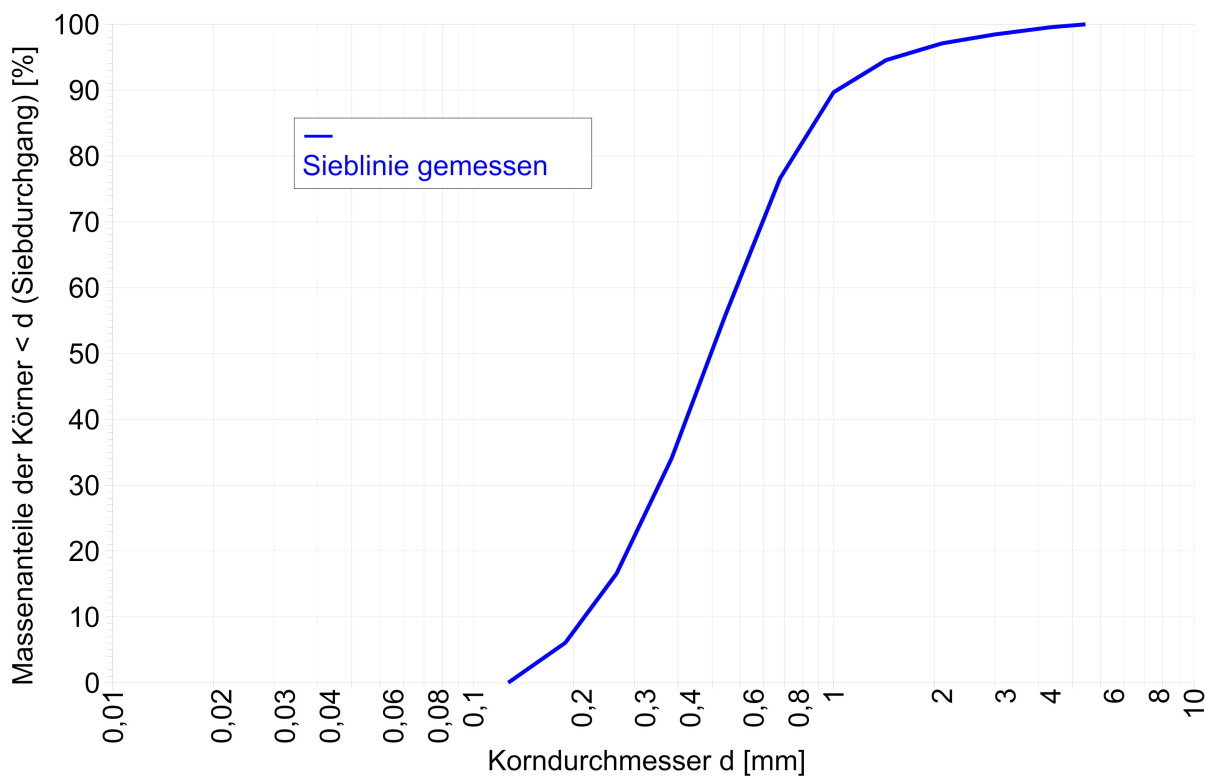


Bild 35 Sieblinie der verwendeten Sandes

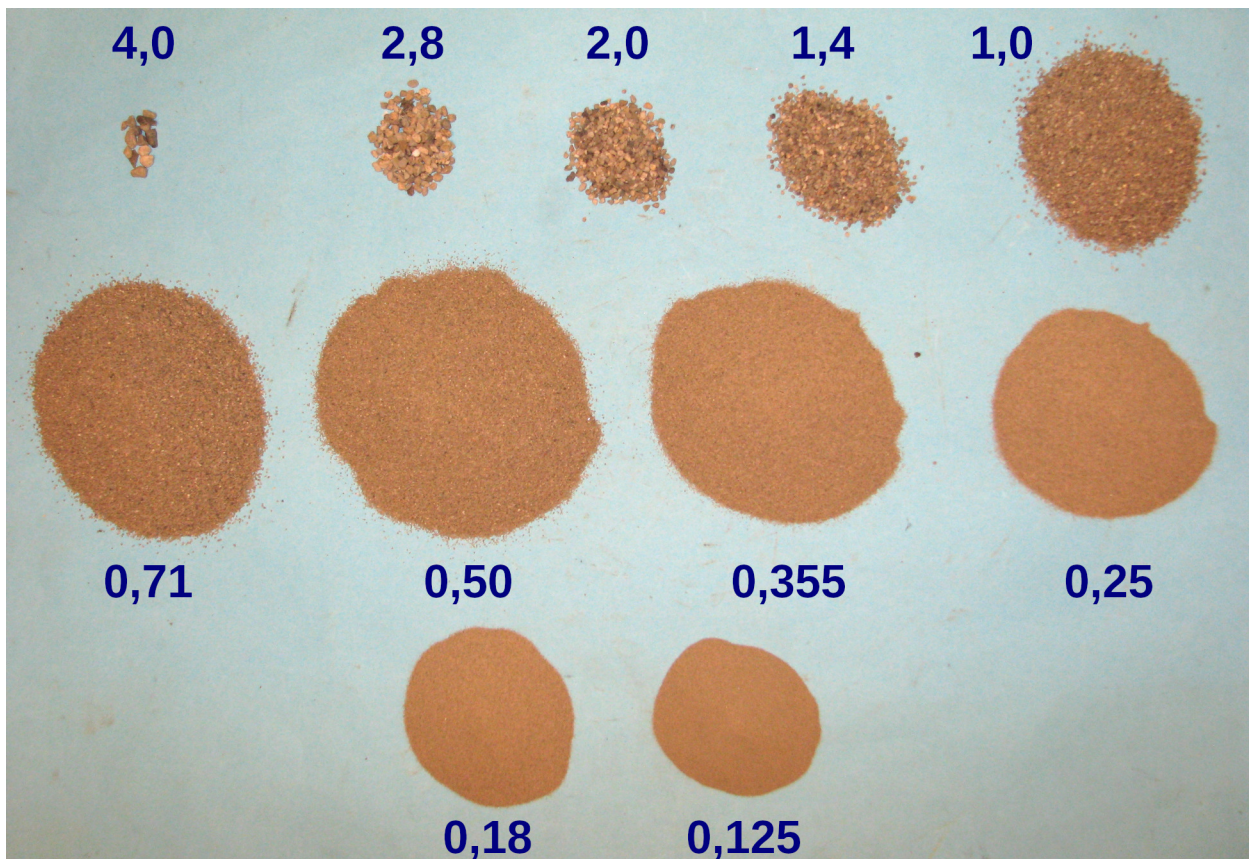


Bild 36 bei der Bestimmung der Sieblinie erhaltene Fraktionen mit Angabe der Maschenweite [mm] des Siebes, auf dem sich die jeweilige Fraktion gesammelt hat

Der Sand wird lagenweise in den Graben eingebracht, angefeuchtet und verdichtet. Die Erstverdichtung jeder Lage erfolgt mit einer kompakten elektromotorisch betriebenen Rüttelplatte, die Nachverdichtung mit einem Vibrationsstampfer. Die Höhen der einzelnen Lagen betragen jeweils ≈ 225 mm, die Verdichtungsgrade liegen zwischen 97,0...100,3 % bezogen auf die Proctordichte.

5.2.1.2 Ausbohren der Wärmedämmung

Das Ausbohren der Wärmedämmung erfolgt diskontinuierlich, da die Bohrstangen des Bohrgestänges mit Fortschreiten der Bohrung jeweils manuell nachgesetzt werden. Gestartet wird mit der Drehzahl $95 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und der Vorschubgeschwindigkeit $162,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Letztere wird nach ≈ 2000 mm Bohrweg auf $325 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ erhöht, um den Bohrvorgang zu beschleunigen.

Ein mögliches Ausrücken des Mediumrohres oder der Ummantelung in die Zielgrube wird mit Wegsensoren erfasst. Nachfolgend ist das Ausbohren der Wärmedämmung dokumentiert /Bild 37/.../Bild 49/.

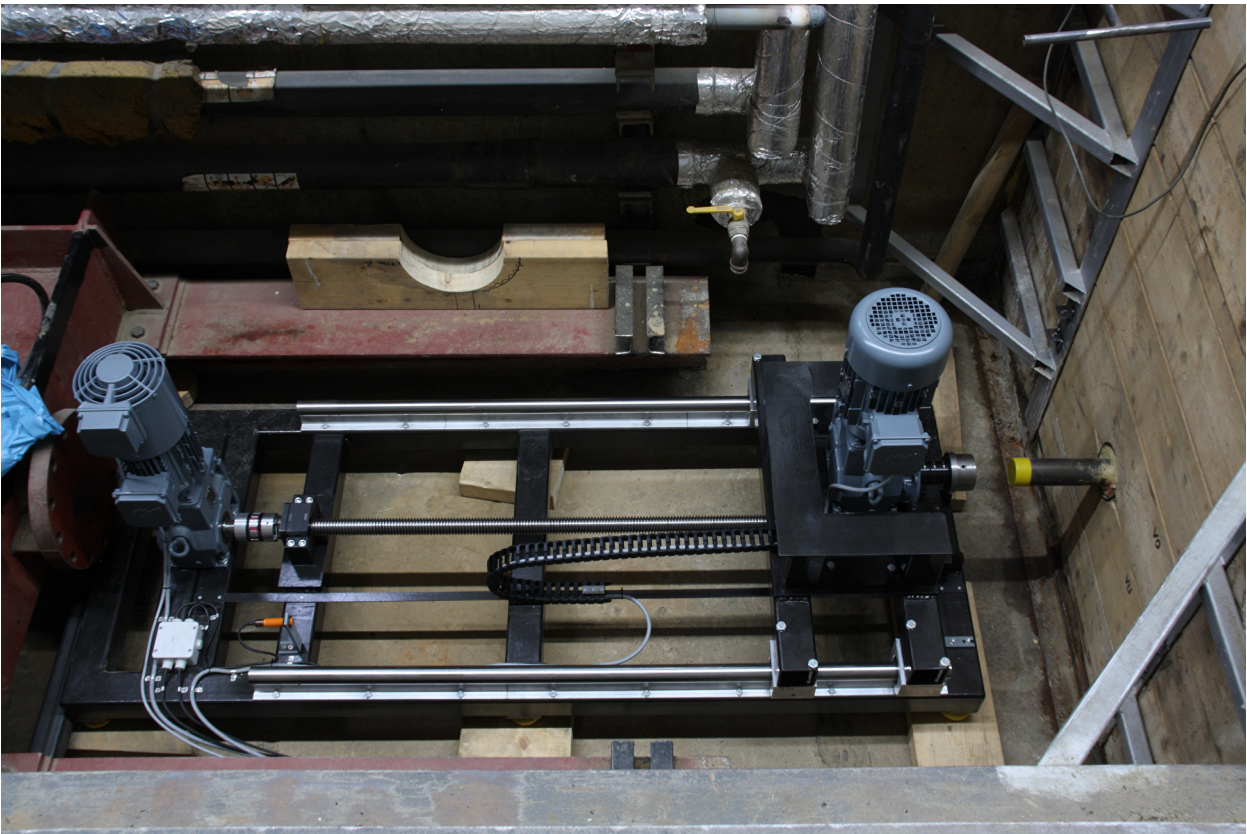


Bild 37 Bohreinheit in der Startgrube, vor Ansetzen des Bohrgestänges mit Bohrkopf

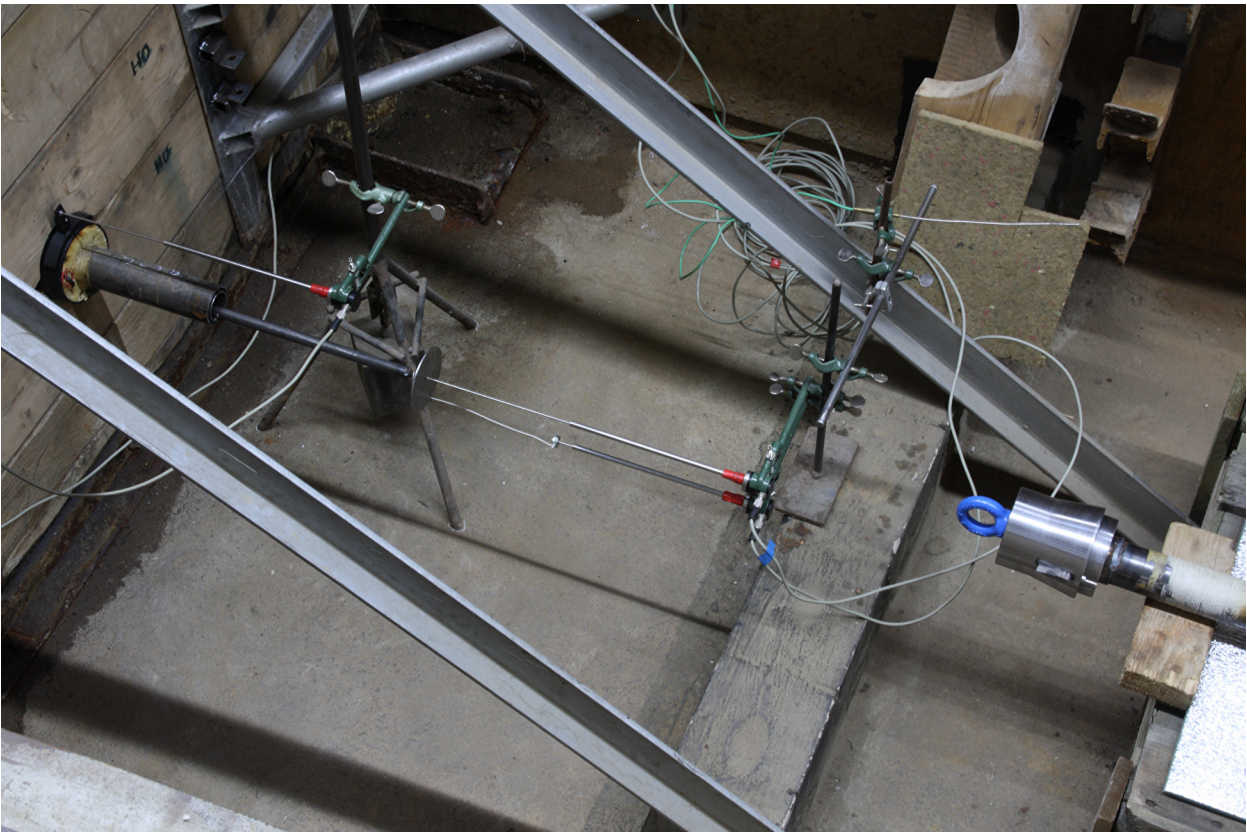


Bild 38 Zielgrube mit Wegsensoren am alten KMR und Schneid- und Aufweitkopf am neuen KMR

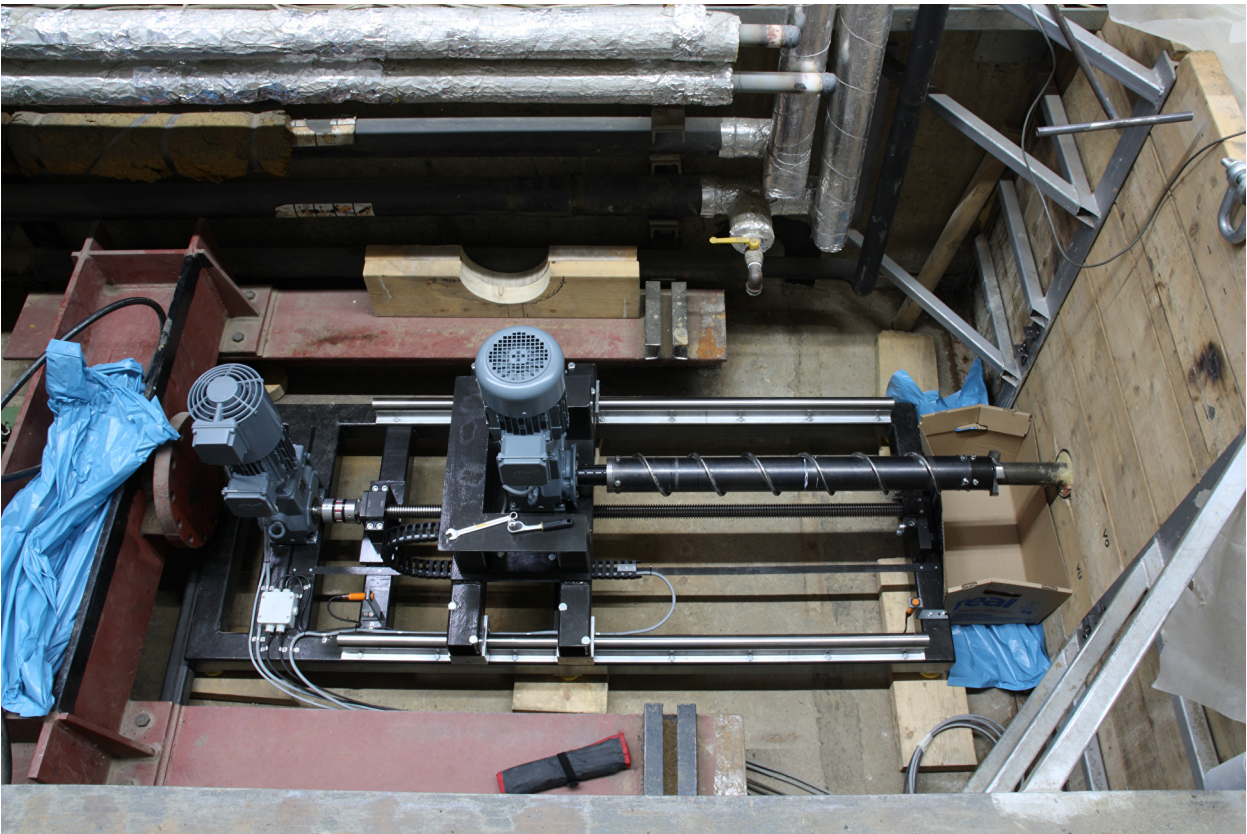


Bild 39 Bohreinheit in der Startgrube mit angesetzter Bohrstange mit Bohrkopf



Bild 40 Bohrkopf über dem freien Mediumrohrende des alten KMR



Bild 41 Beginn des Bohrvorgangs



Bild 42 Eintritt des Bohrkopfes in die Wärmedämmung



Bild 43 vollständiger Eintritt des Bohrkopfes in die Ummantelung



Bild 44 fortschreitender Bohrvorgang

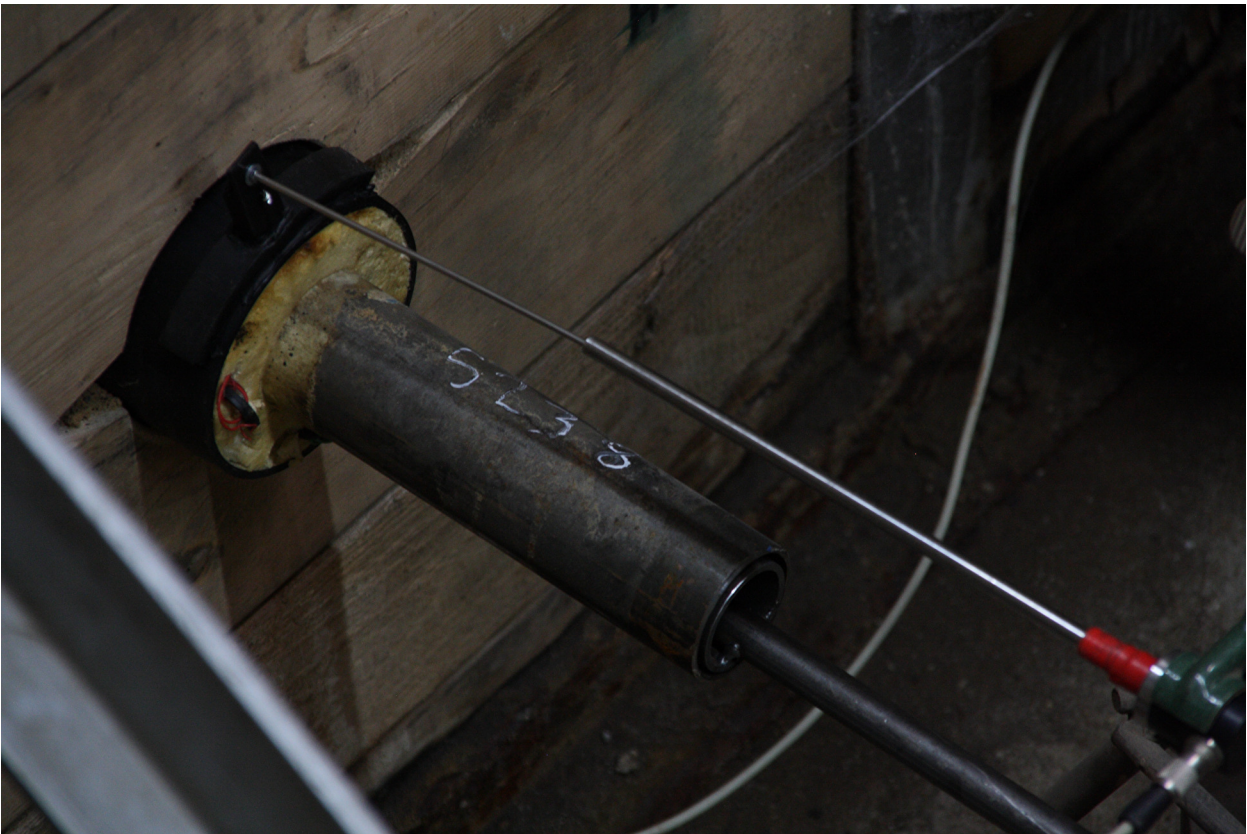


Bild 45 KMR-Ende in der Zielgrube, zu Beginn des Bohrvorgangs



Bild 46 Beginn des Ausrückens von Mediumrohr und Wärmedämmung zum Ende des Bohrvorgangs hin

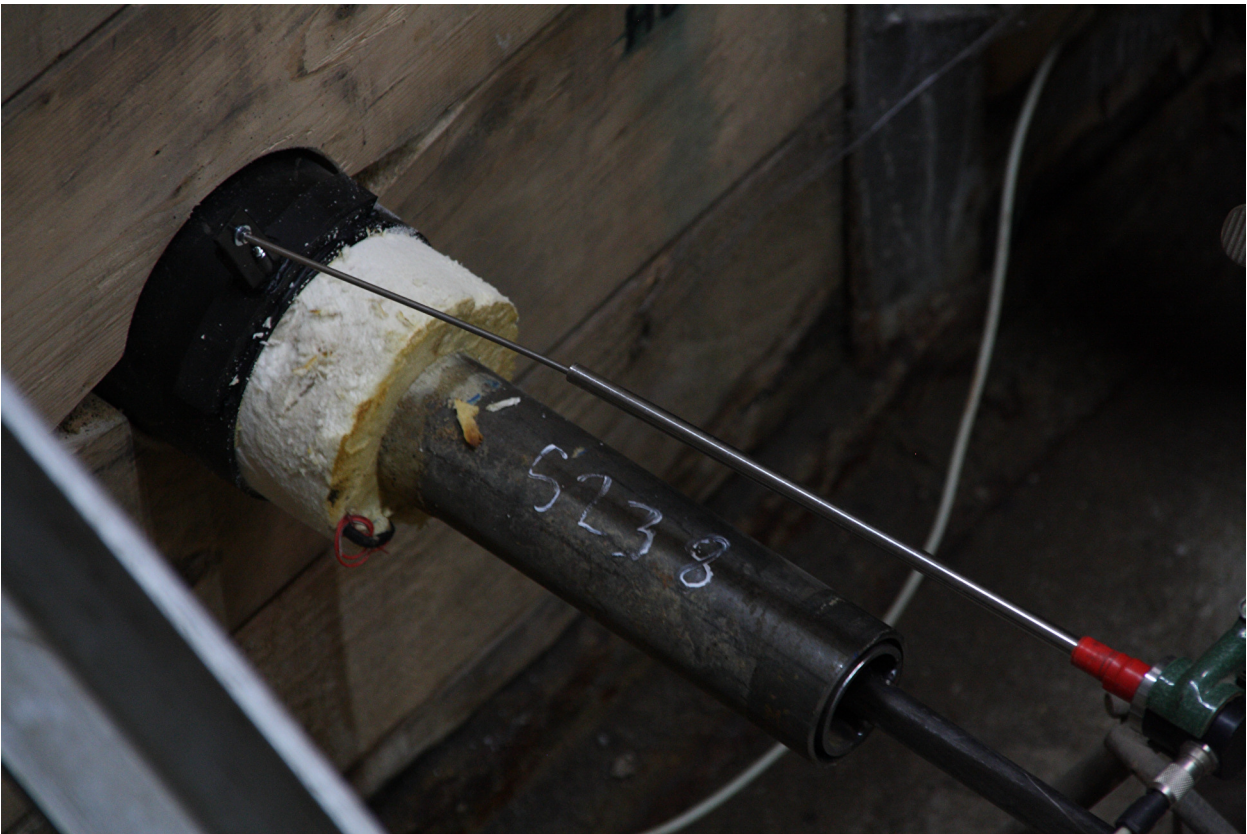


Bild 47 fortschreitendes Ausrücken von Mediumrohr und Wärmedämmung zum Ende des Bohrvorgangs hin

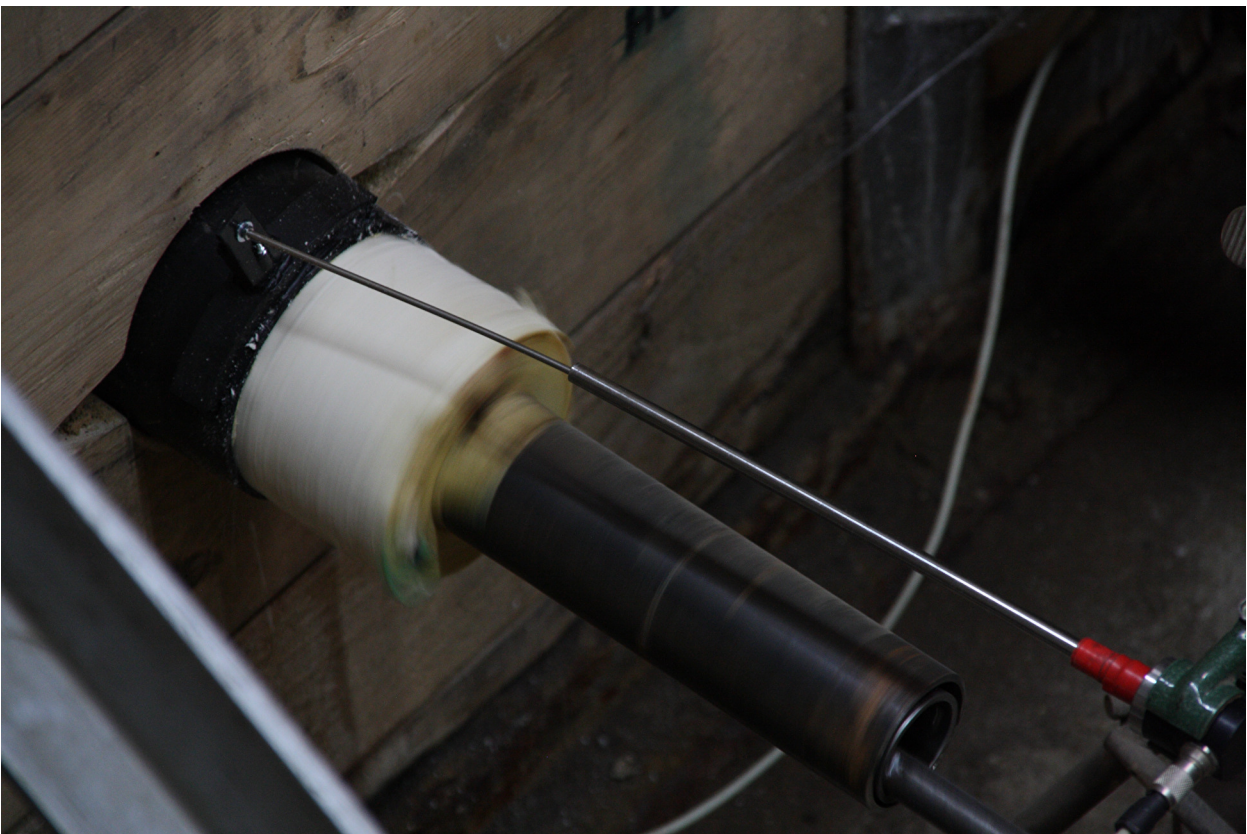


Bild 48 Rotation von Mediumrohr und Wärmedämmung zum Ende des Bohrvorgangs hin

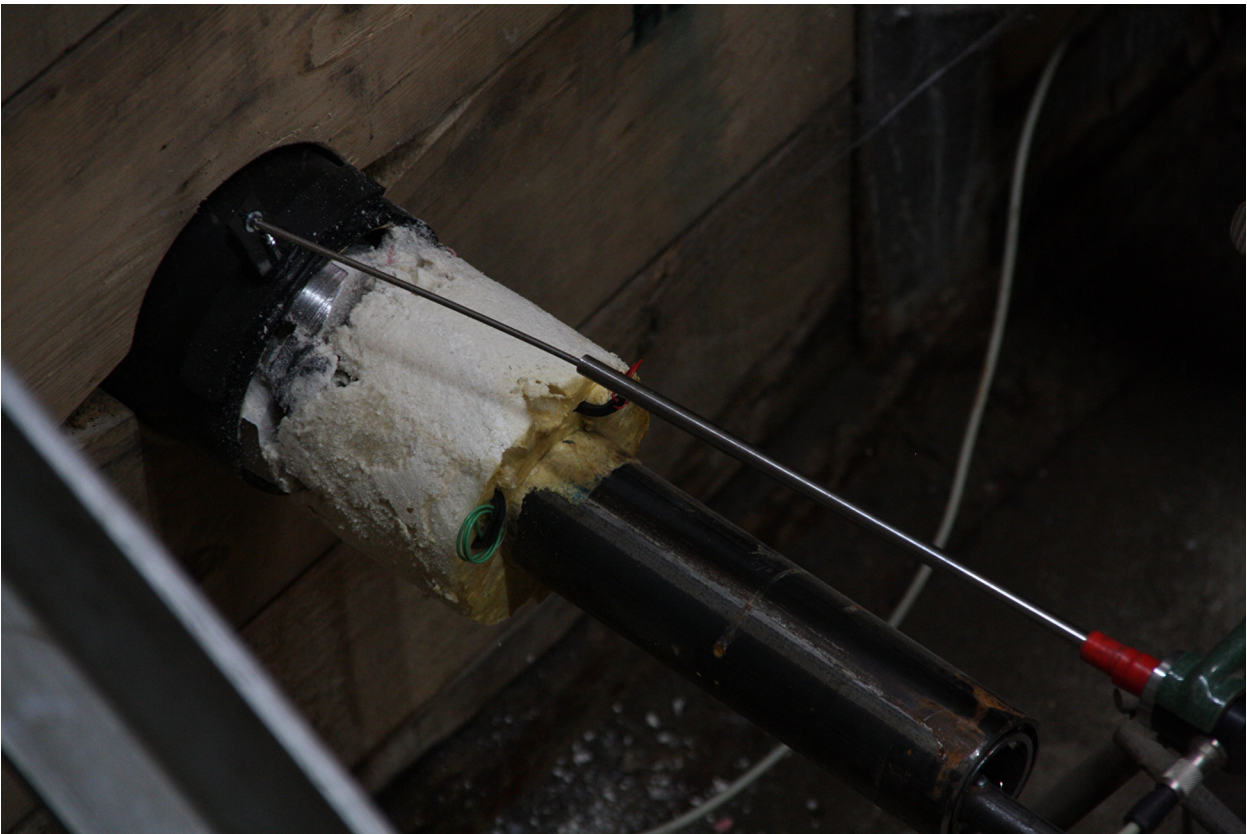


Bild 49 Bohrkopf in der Zielgrube nach Ende des Bohrvorgangs

Beim Bohrvorgang treten bei beiden Vorschubgeschwindigkeiten keine Probleme an der Bohranlage auf. Sowohl die Abstandhalter als auch die Leckwarndrähte werden nahezu über die gesamte Länge des KMR durch den Bohrkopf zerkleinert. Im Bohrklein werden jedoch auch Partikel der Ummantelung gefunden.

Zum Ende des Bohrvorgangs hin versagt der Verbund zwischen Wärmedämmung und Ummantelung. Zunächst erfolgt eine Translation von Mediumrohr und Wärmedämmung gegenüber der Ummantelung /Bild 46/ /Bild 47/. Nach einigen Zentimetern Translation beginnen Mediumrohr und Wärmedämmung zusätzlich in der Ummantelung zu rotieren /Bild 48/. Der Verbund zwischen Mediumrohr und Wärmedämmung bleibt bei Translation und Rotation erhalten. Der Bohrvorgang wird somit nicht vollständig zu Ende gebracht, da der letzte Abstandhalter zusammen mit einem ≈ 100 mm langem Abschnitt Wärmedämmung und dem damit kraftschlüssig verbundenen Mediumrohr aus der Ummantelung heraus gedrückt wird /Bild 49/.

Zur Entnahme des Mediumrohres muss zunächst der Bohrkopf vom Bohrgestänge getrennt werden, da sich das Mediumrohr sonst nicht aus dem Bohrgestänge ziehen lässt. Der Bohrkopf wird nach vollständiger Abkühlung manuell vom Mediumrohr abgezogen.

5.2.1.3 Einziehen des neuen KMR

Für das Einziehen des neuen KMR wird zunächst der Schlitz- und Aufweitkopf an dessen Mediumrohr geschweißt. Das neue KMR mit dem angeschweißten Schlitz- und Aufweitkopf wird in die Startposition gebracht /Bild 50/.

Für den Einziehvorgang wird die Vorschubeinrichtung der Bohranlage als Zugmaschine eingesetzt. Die Zugmaschine wird gegen die Spundwand mit Holzbalken abgestützt, um eine signifikante Bewegung der Zugmaschine in Richtung der Spundwand während des Zugvorganges zu verhindern.

Die Zugmaschine wird mittels Rundschnitten durch die im Erdreich verbliebene Ummantlung des alten ausgebohrten KMR mit dem am neuen KMR angeschweißten Schlitz- und Aufweitkopf verbunden. Zwischen Zugmaschine und erster Rundschnitte wird eine Kraftmessdose zur Überwachung der Einhaltung der maximal zulässigen Zugkraft eingesetzt /Bild 51/. Rundschnitten und Kraftmessdose sind für eine Maximalbelastung von 6000 kg ausgelegt, was einer Maximalkraft von $\approx 58,86 \text{ kN}$ entspricht.

Aufgrund der verfügbaren Platzverhältnisse in der Baugrube wird das Einziehen des neuen KMR diskontinuierlich in Schritten zu je $\approx 500 \text{ mm}$ Zugweg durchgeführt.

Nachfolgend ist das Einziehen des neuen KMR dokumentiert /Bild 50/.../Bild 57/.

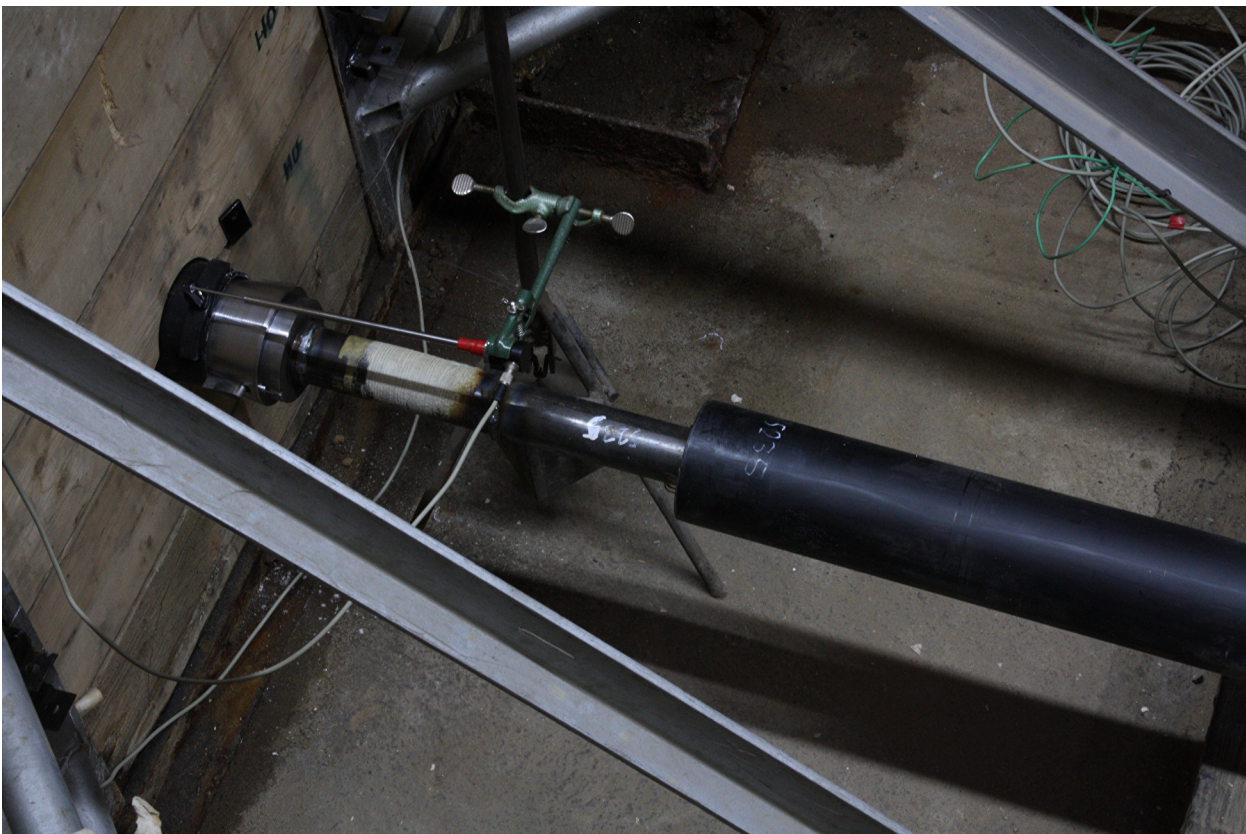


Bild 50 neues KMR mit angeschweißtem Schlitz- und Aufweitkopf in Startposition

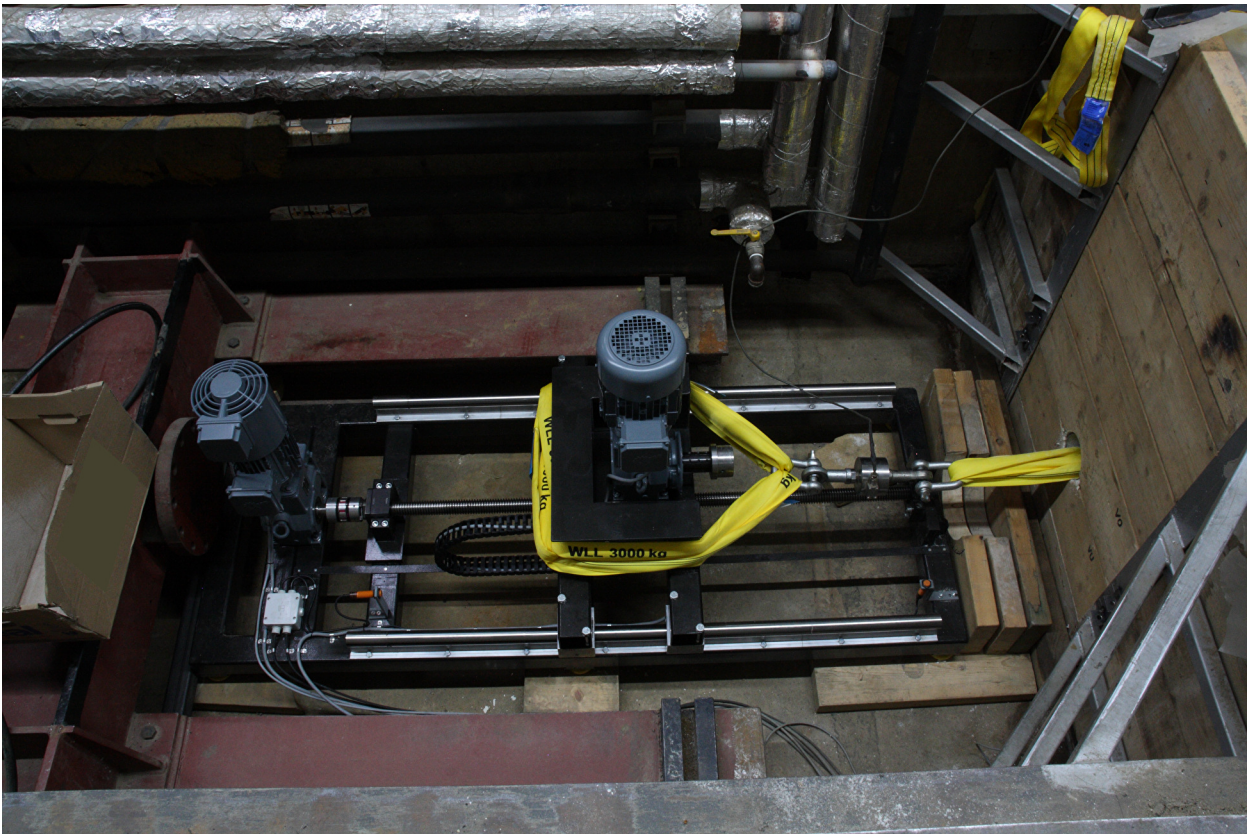


Bild 51 Zugmaschine in Startposition

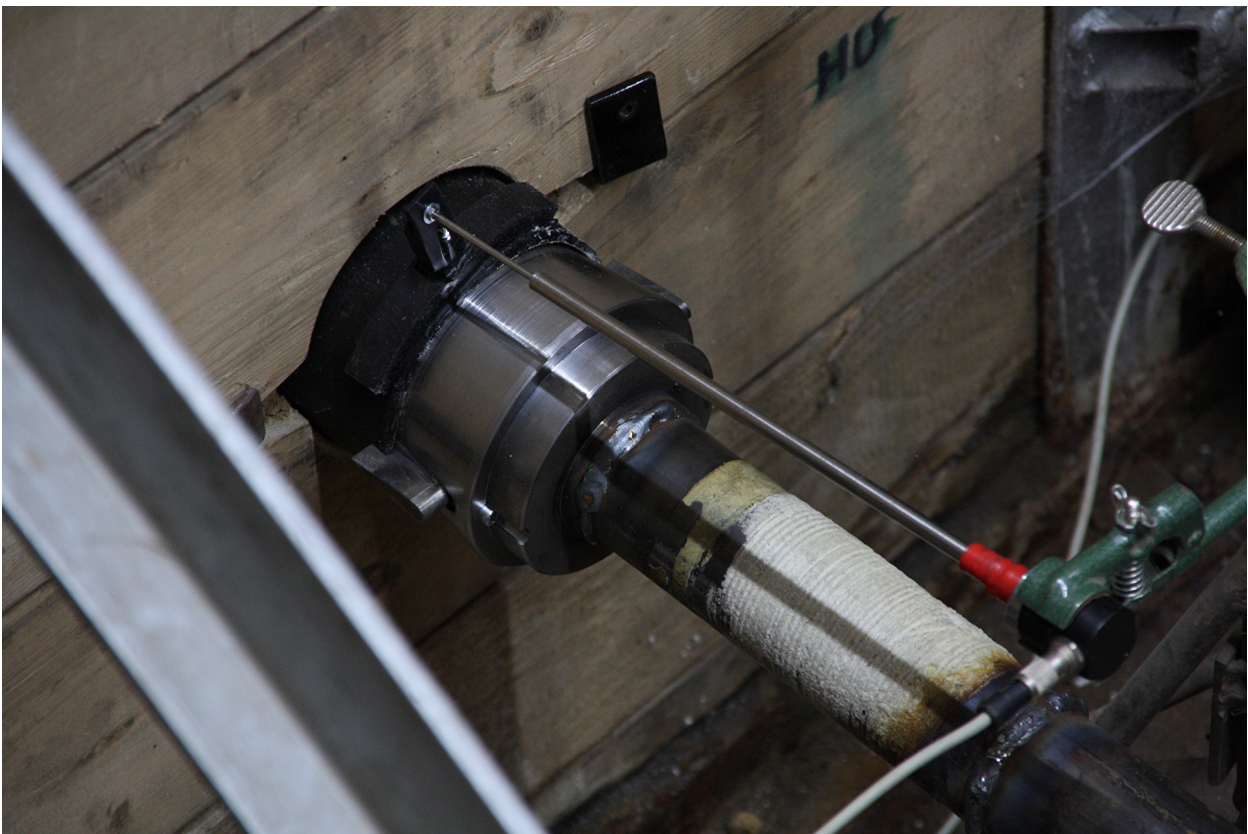


Bild 52 Beginn des Schlitzens der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR

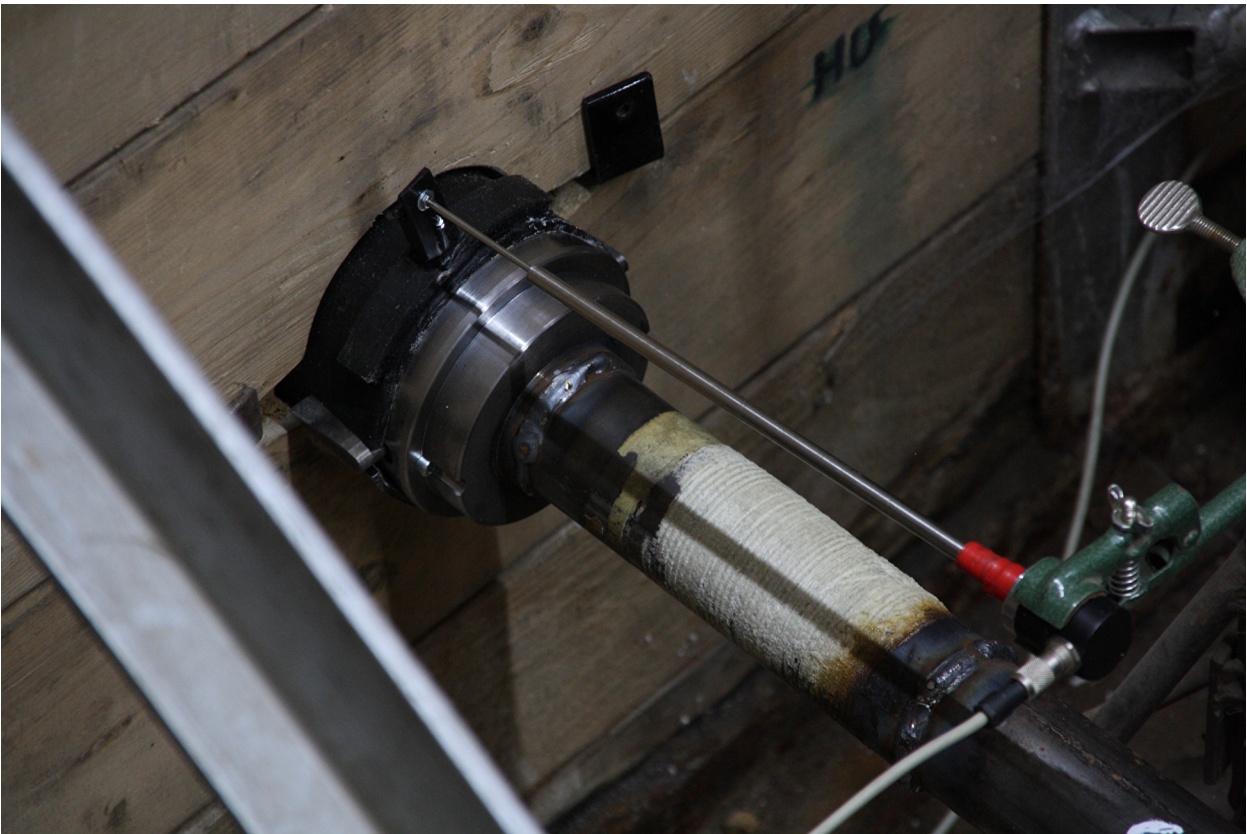


Bild 53 Beginn des Aufweitens der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR

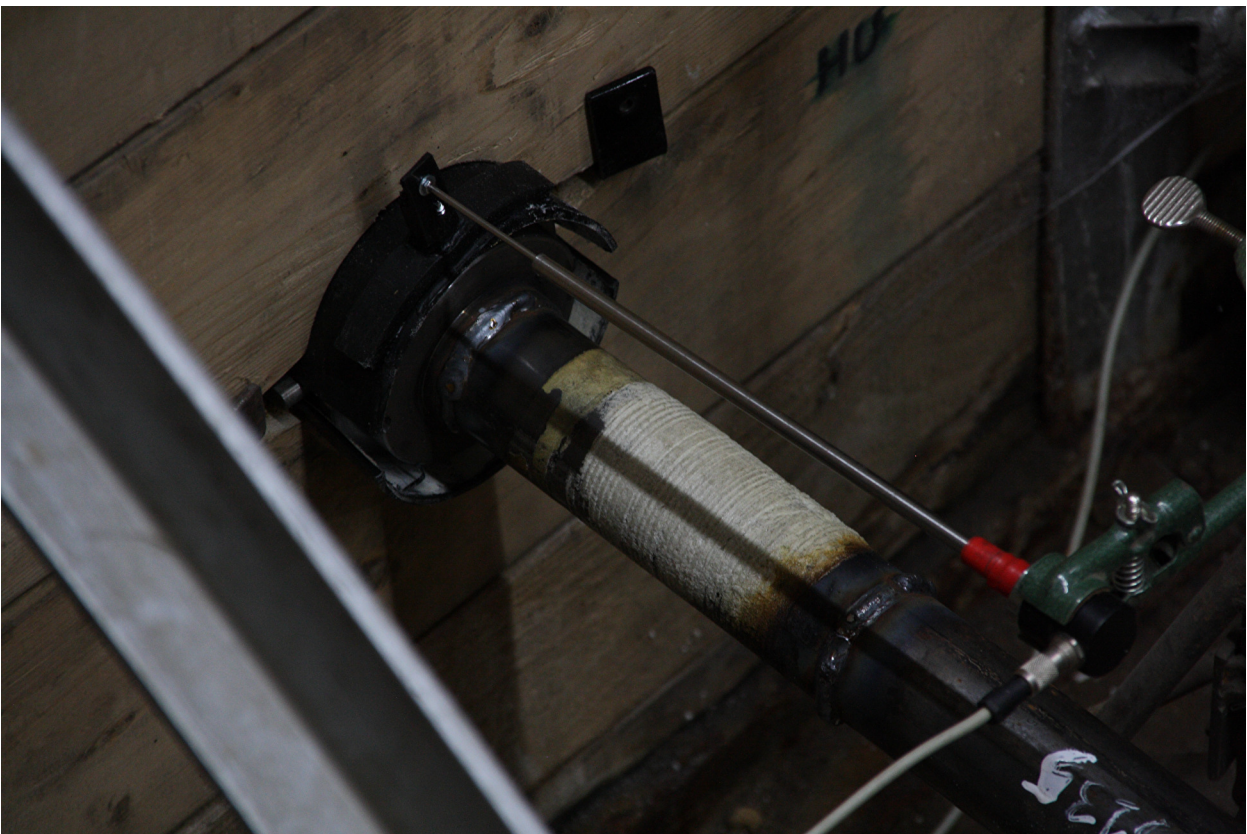


Bild 54 vollständiger Eintritt des Schlitz- und Aufweitkopfes in die Ummantelung des alten ausgebohrten KMR



Bild 55 Eintritt der Ummantelung des neuen KMR in die Ummantelung des alten ausgebohrten KMR



Bild 56 Auftrag von Kabelgleitmittel auf die Ummantelung des neuen KMR

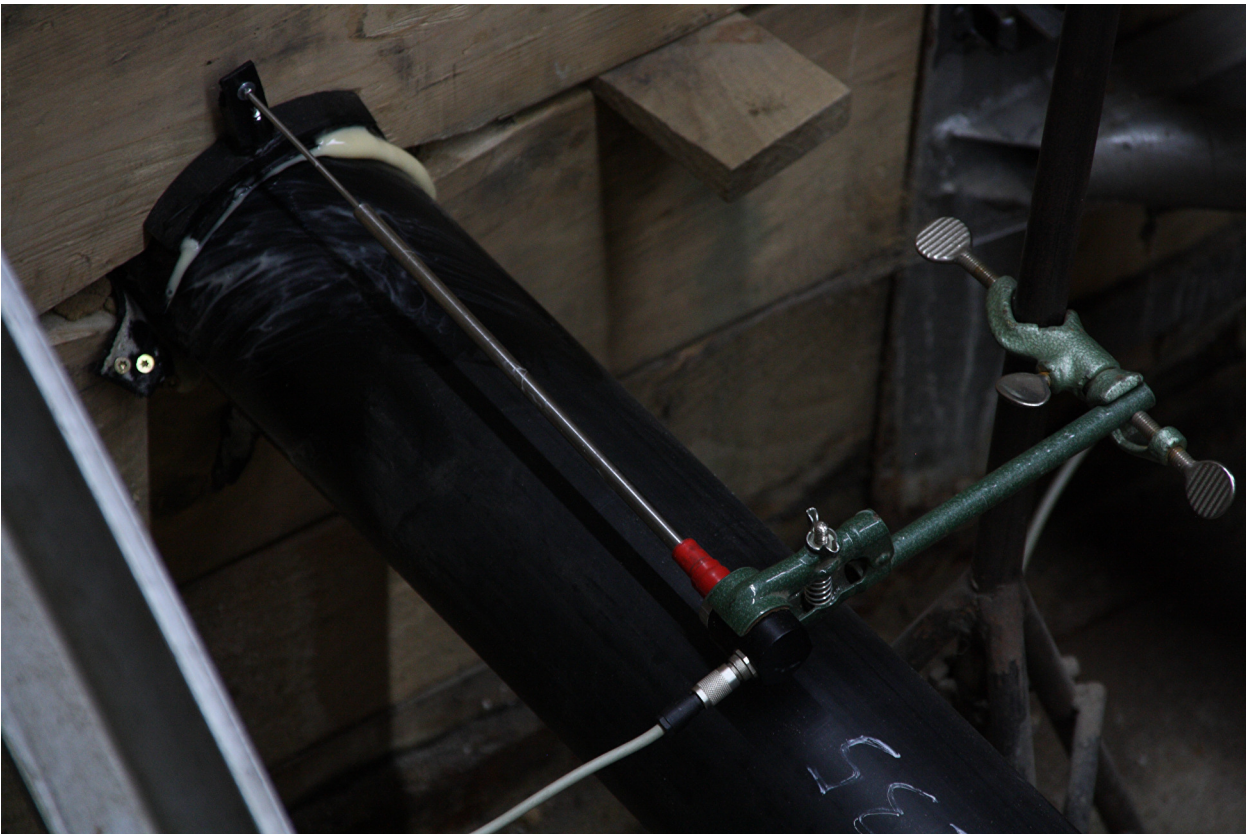


Bild 57 Abbruch des Einziehvorgangs wegen Erreichens der Belastungsgrenze der Zugmaschine

Bereits kurz nach dem Eintritt der Ummantelung des neuen KMR in die Ummantelung des alten ausgebohrten KMR steigt die Zugkraft näherungsweise linear so stark an, dass mit einer Überschreitung der für die Zugmaschine maximal zulässigen Zugkraft zu rechnen ist. Daher wird nach Erreichen eines Zugweges von ≈ 2000 mm Kabelgleitmittel auf die Ummantelung des neuen KMR aufgetragen /Bild 56/. Dies führt jedoch nur zu einer kurzfristigen und damit nicht dauerhaften Reduktion der Zugkraft /Bild 58/. Kurz vor Erreichen der für die Rundschnitten und die Kraftmessdose maximal zulässigen Zugkraft /Bild 58/ erfolgt der Abbruch des Einziehvorgangs /Bild 57/. Bis zum Abbruch werden die Aufschlitzung der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR auf einer Länge von ≈ 3400 mm und der Einzug des neuen KMR auf einer Länge von ≈ 3000 mm erreicht.

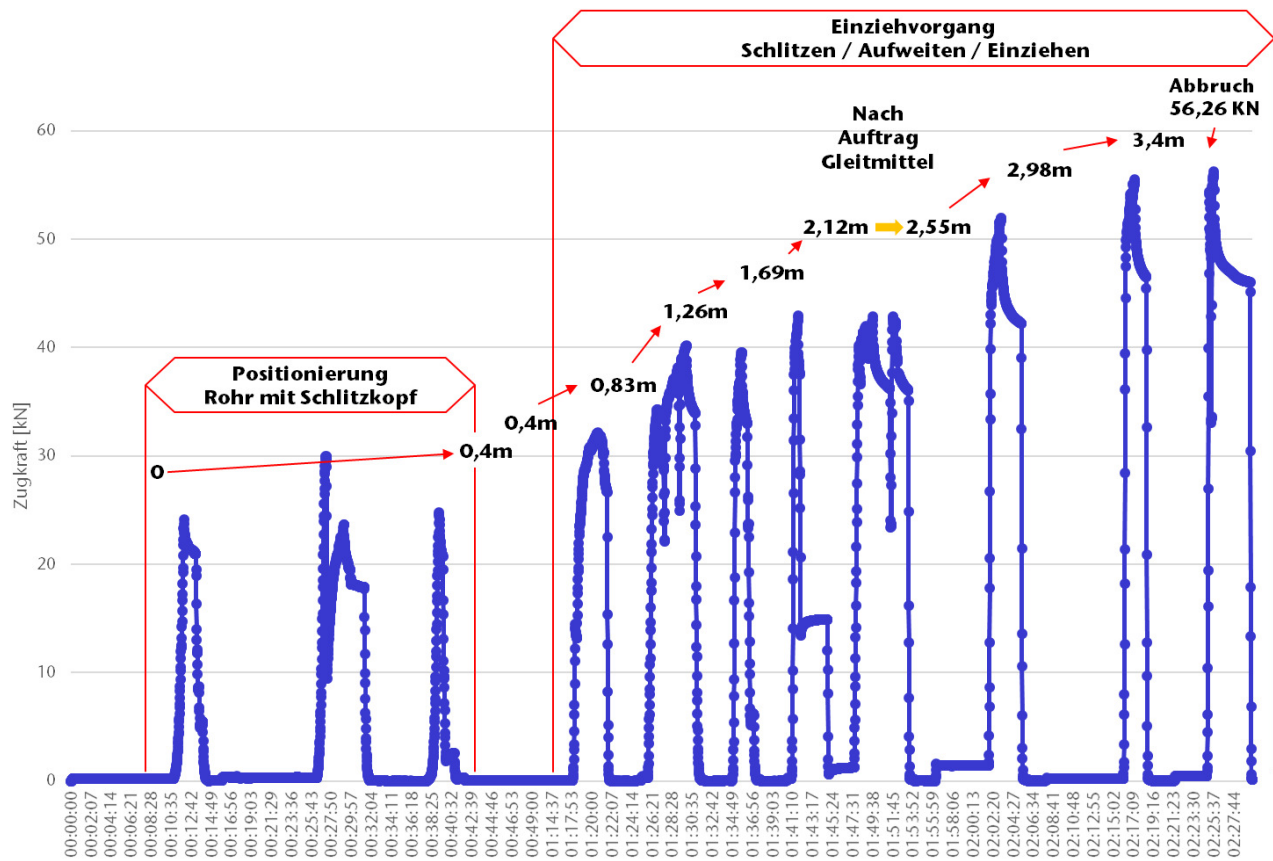


Bild 58 Verlauf der Zugkraft

5.2.1.4 Freilegung und Ausbau nach Abbruch des Einziehvorgangs

Nach Abbruch des Einziehvorgangs wird die Überdeckung abgetragen. Anschließend wird die Ummantelung des alten ausgebohrten KMR einschließlich der eingezogenen Teile aus dem Graben entnommen /Bild 59/.



Bild 59 freigelegte Ummantelung des alten ausgebohrten KMR einschließlich der eingezogenen Teile

Die Ummantelung weist äußerlich sichtbare Schäden auf /Bild 60/. Im Bereich dieser Schadstellen fehlt die Ummantelung teilweise vollständig /Bild 61/.



Bild 60 freigelegte beschädigte Ummantelung des alten ausgebohrten KMR

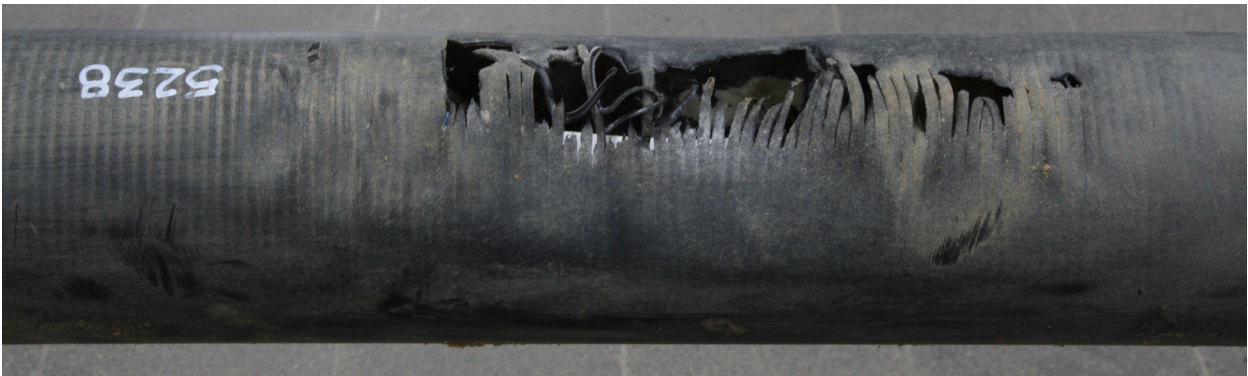


Bild 61 beschädigte Ummantelung des alten ausgebohrten KMR, nach Entnahme aus dem Graben

Hinter den Schlitzmessern tritt Sand in den ausgebohrten Raum ein. Vor der Stirnseite des neuen KMR befinden sich Reste der Wärmedämmung im ausgebohrten Raum /Bild 62/.



Bild 62 Blick durch einen der beiden Schlitz in den ausgebohrten Raum zwischen Schlitz- und Aufweitkopf und Stirnseite des neuen KMR

Nach dem Abtrennen des geschlitzten Teils der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR zeigt sich, dass vor allem an der oberen Halbschale in größeren Bereichen Reste der Wärmedämmung anhaften, während sich auf der unteren Halbschale Sand befindet /Bild 63/. Im Bereich des konischen Teils des Schlitz- und Aufweitskopfes befinden sich Reste der Wärmedämmung /Bild 64/.



Bild 63 untere Halbschale (links) und obere Halbschale (rechts) des geschlitzten Teils der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR



Bild 64 Schlitz- und Aufweitkopf, nach Entfernung einer Halbschale der ausgebohrten Ummantelung des alten KMR

5.2.1.5 Ergebnisse

Das Ausbohren des alten zu ersetzenden KMR verursacht bohrtechnisch keine Probleme. Die eingesetzte Bohranlage erfüllt die Bohraufgabe. Im Bohrklein finden sich auch Partikel der Ummantelung.

Die Ummantelung wird durch das Ausbohren beschädigt /Bild 60/. Im Bereich dieser Schadstellen wird die Ummantelung teilweise vollständig durchbohrt, fehlt also in diesen Bereichen /Bild 61/. Als Ursache dafür kommen die zulässige Koaxialitätsabweichung, das Spiel zwischen Bohrkopf bzw. Bohrgestänge und Mediumrohr sowie Bewegungen des bereits überbohrten Mediumrohres und der Ummantelung in Betracht. Da ein Ziel das nahezu vollständige Ausbohren des KMR ist, besitzt der Bohrkopf einen maximalen Außendurchmesser von 118 mm. Der normativ zulässige Außendurchmesser der Ummantelung beträgt 125...132 mm bei $\geq 3,0$ mm Wandstärke, woraus sich bei 3,0 mm Wandstärke ein minimaler Innendurchmesser von 119 mm ergibt. Die normativ zulässige Koaxialitätsabweichung liegt bei $\leq 3,0$ mm. Bereits ab einer Koaxialitätsabweichung $> 0,5$ mm wird Material der Ummantelung erbohrt. Bei einer Koaxialitätsabweichung von 3,0 mm verbleibt bei minimalem Innendurchmesser der Ummantelung eine Restwandstärke von 0,5 mm. Die teilweise Durchbohrung der Ummantelung ist daher nicht allein auf die Koaxialitätsabweichung zurückzuführen.

Hier besteht der Zielkonflikt zwischen der vollständigen Entfernung der Wärmedämmung mittels eines optimal großen Bohrkopfdurchmessers einerseits und dem Erhalt der Ummantelung als Schutzrohr bei gleichzeitiger Toleranz der Koaxialitätsabweichung des Mediumrohres andererseits.

Zur Entnahme des überbohrten Mediumrohres muss zunächst der Bohrkopf vom Bohrgestänge getrennt werden, da sich das Mediumrohr sonst nicht aus dem Bohrgestänge ziehen lässt. Der Bohrkopf lässt sich nach vollständiger Abkühlung manuell vom Mediumrohr lösen.

Beim Einziehen erfolgt im Bereich des Schlitz- und Aufweitkopfes die Reibung in weiten Bereichen nicht zwischen dessen Stahl und dem Polyethylen hoher Dichte der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR. Dazwischen geraten Reste der Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum, wodurch die Reibung erhöht wird.

Im Bereich des eingezogenen neuen KMR erfolgt die Reibung in weiten Bereichen nicht zwischen dem Polyethylen hoher Dichte der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR und dem Polyethylen hoher Dichte der Ummantelung des neuen KMR. Dazwischen geraten Reste der Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum sowie Sand aus der

umgebenden Bettung, wodurch die Reibung erhöht wird. Der Auftrag von Kabelgleitmittel auf die Ummantelung des neuen KMR verhindert nur kurzzeitig einen weiteren Anstieg der Zugkraft /Bild 58/. Der Abbruch des Versuchs nach Erreichen der Belastungsgrenze der Zugmaschine folgt der Überlegung, dass das Aufbringen noch höherer Zugkräfte nicht sinnvoll ist, da dann ein Kraftbereich erreicht werden würde, bei dem eine Schädigung des neuen KMR, insbesondere eine Zerstörung des kraftschlüssigen Verbundes zwischen Mediumrohr, Wärmedämmung und Ummantelung nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Eine derartige Schädigung kann dadurch auftreten, dass die Zugkraft am Mediumrohr angreift und die dieser entgegen gesetzte Reibungskraft an der Ummantelung angreift, wodurch das neue KMR auf axiale Scherung belastet wird.

Als weiterer Grund für das Ansteigen der Zugkraft kommt die Aufweitung der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR auf nur 126 mm, was nur 1 mm über dem Nennaußendurchmesser des neuen KMR liegt, in Betracht. Der bei der Verlegung von KMR übliche und daher auch in den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen erzeugte hohe Verdichtungsgrad der das KMR umgebenden Bettung führt dazu, dass die Bettung nicht mehr in der Lage ist, dem Schlitz- und Aufweitkopf durch weitere Verdichtung auszuweichen. Dadurch erfolgt die Aufweitung zumindest teilweise elastisch. Durch das Zurückfedern des aufgeweiteten Bereichs wird die Ummantelung des alten ausgebohrten KMR gegen die Ummantelung des neuen KMR gepresst. Dadurch erhöht sich die Reibungskraft, auch wenn wegen des Kriechens des Polyethylen hoher Dichte, aus dem die Ummantelungen bestehen, die Amontonsschen Gesetze nicht gelten.

Das in diesem Versuch erprobte Einziehverfahren ist nicht zur Lösung der Aufgabe geeignet.

5.2.2 Versuch 2

Ausgehend von den Ergebnissen des Versuchs 1 wird der Versuch 2 mit folgenden Änderungen gegenüber Versuch 1 durchgeführt:

- Das Bohren erfolgt durchgängig mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $325 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Das „Schlitzen und Aufweiten“ der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR sowie das „Einziehen“ des neuen KMR werden in zwei Arbeitsschritte aufgeteilt.
- Als Zugmaschine kommt ein Kettenzug zum Einsatz. Dieser ist für eine Maximalbelastung von 5000 kg ausgelegt, was einer Maximalkraft von $\approx 49,05 \text{ kN}$ entspricht.
- Ein neuer Schlitz- und Aufweitkopf mit einem maximalen Außendurchmesser von 132 mm wird eingesetzt. *Hinweis:* Der im Versuch 1 eingesetzte Schlitz- und Aufweitkopf hat einem maximalen Außendurchmesser von 126 mm.
- Der Zugweg wird mit einem Seilzug-Wegsensor aufgenommen.

Folgende Parameter werden vom Versuch 1 übernommen:

- Das auszubohrende KMR weist die Dimension DN 50/125 auf.
- Der Einbau des KMR erfolgt auf die gleiche Weise mit dem gleichen Bettungsmaterial (Sand). Systembedingt sind geringfügige Abweichungen bei jedem Einbau unvermeidlich.
- Die Bohranlage wird unverändert zum Bohren eingesetzt.
- Das Bohren erfolgt mit einer Drehzal von $95 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Das einzuziehende KMR weist die Dimension DN 50/125 auf.
- Rundschnellen und Kraftmessdose sind für eine Maximalbelastung von 6000 kg ausgelegt, was einer Maximalkraft von $\approx 58,86 \text{ kN}$ entspricht.
- Die Geometrie der Schlitzmesser am neuen Schlitz- und Aufweitkopf wird unverändert vom alten Schlitz- und Aufweitkopf übernommen.
- Der Einzug wird diskontinuierlich in Schritten zu je $\approx 500 \text{ mm}$ Zugweg durchgeführt.

5.2.2.1 Verlegung des KMR

Die Verlegung des KMR erfolgt auf die gleiche Weise wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben. Die Verdichtungsgrade der Bettung liegen zwischen 99,7...101,5 % bezogen auf die Proctordichte.

5.2.2.2 Ausbohren der Wärmedämmung

Das Ausbohren der Wärmedämmung erfolgt diskontinuierlich, da die Bohrstangen des Bohrgestänges mit Fortschreiten der Bohrung jeweils manuell nachgesetzt werden. Ausgebohrt wird mit der Drehzahl $95 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und der Vorschubgeschwindigkeit $325 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Ein mögliches Ausrücken des Mediumrohres in die Zielgrube wird mit einem Wegsensor erfasst. Nachfolgend ist das Ausbohren der Wärmedämmung dokumentiert /Bild 65/.../Bild 74/.

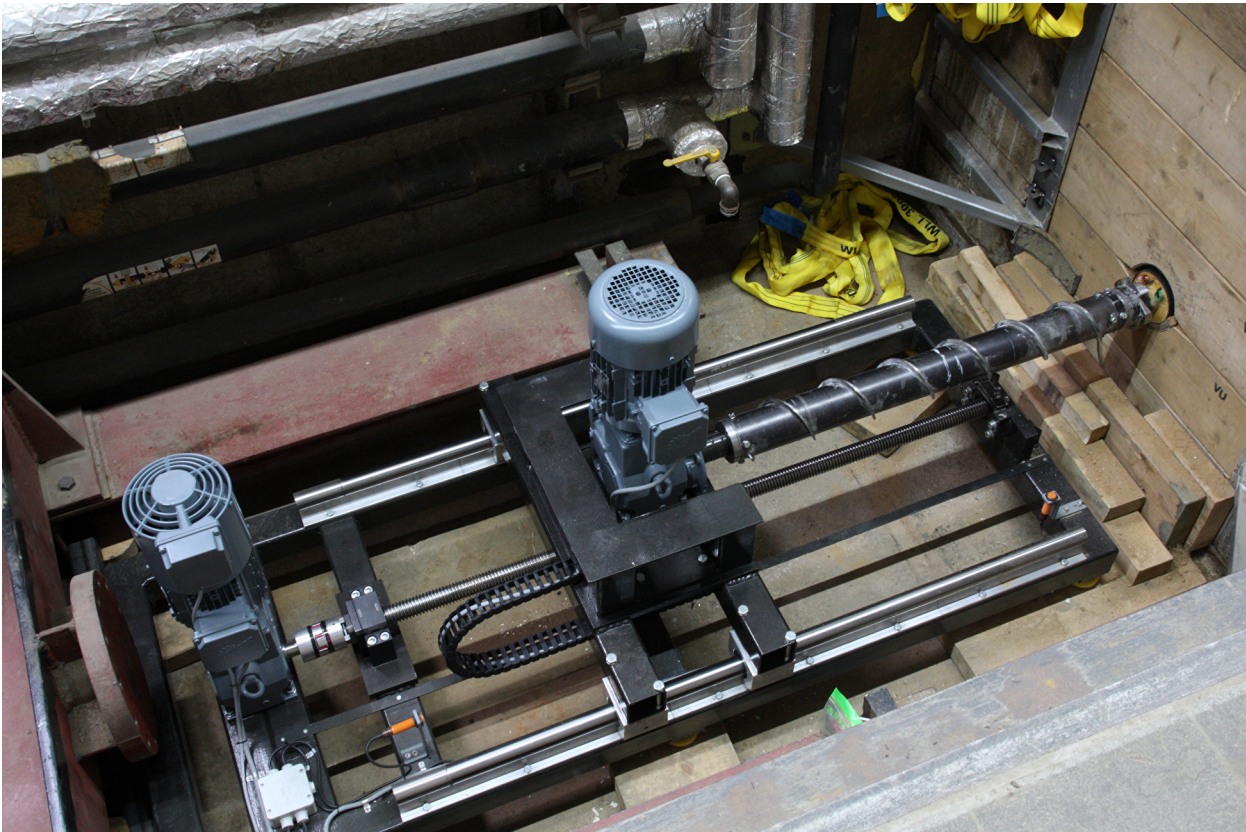


Bild 65 Bohreinheit in der Startgrube mit angesetzter Bohrstange mit Bohrkopf

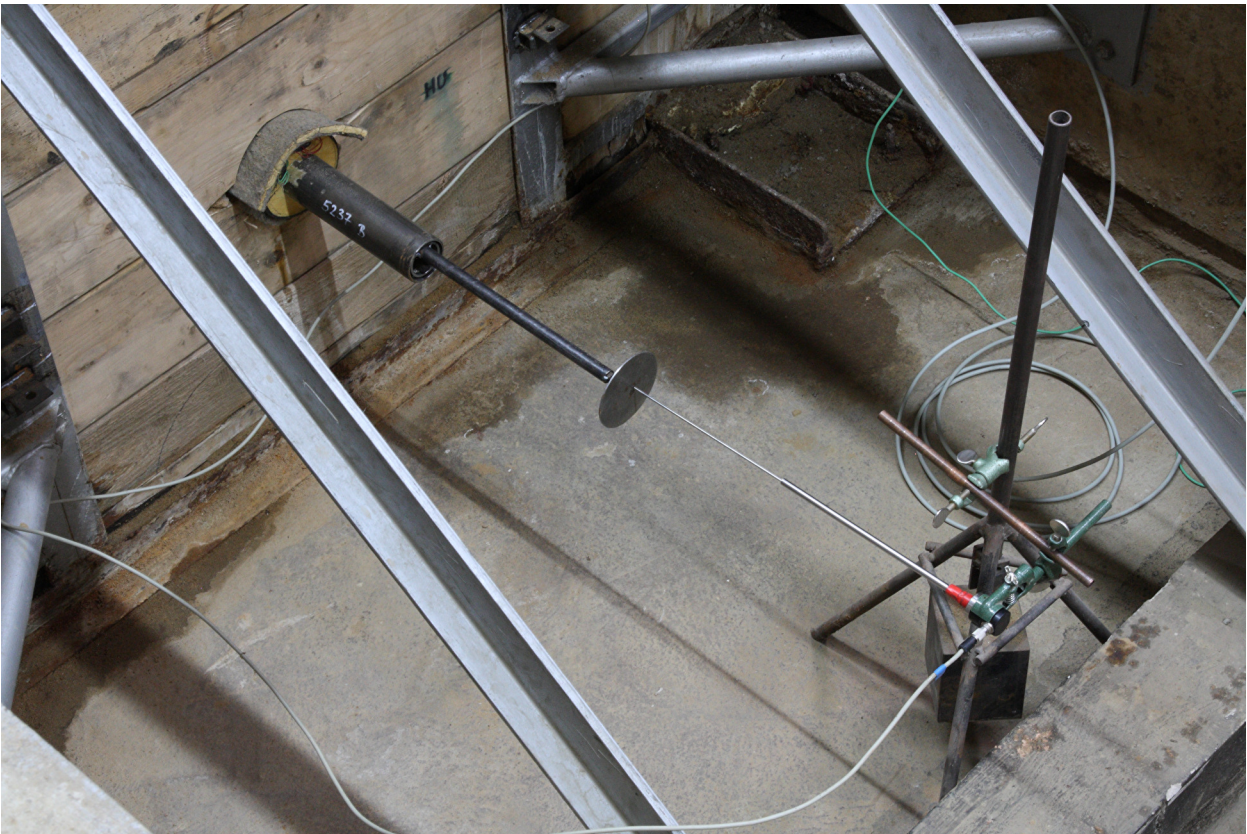


Bild 66 Zielgrube mit Wegsensor am alten KMR



Bild 67 Beginn des Bohrvorgangs



Bild 68 Eintritt des Bohrkopfes in die Wärmedämmung



Bild 69 vollständiger Eintritt des Bohrkopfes in die Ummantelung



Bild 70 KMR-Ende in der Zielgrube, zu Beginn des Bohrvorgangs



Bild 71 Beginn des Ausrückens von Mediumrohr und Wärmedämmung zum Ende des Bohrvorgangs hin



Bild 72 Rotation von Mediumrohr und Wärmedämmung zum Ende des Bohrvorgangs hin



Bild 73 Bohrkopf auf dem Mediumrohr, nach Ende des Bohrvorgangs und Trennung vom Bohrgestänge



Bild 74 Blick in die ausgebohrte Ummantelung des alten KMR

Beim Bohrvorgang werden sowohl die Abstandhalter als auch die Leckwarndrähte nahezu über die gesamte Länge des KMR durch den Bohrkopf zerkleinert. Im Bohrklein werden jedoch auch Partikel der Ummantelung gefunden.

Im Bereich zwischen $\approx 4600 \dots 5500$ mm Bohrweg tritt eine temporäre Bohr-Havarie auf, wodurch sich die Bohreinheit in Richtung Spundwand bewegt und die Ummantelung gleichzeitig Richtung Startgrube ausrückt. Kurz vor Auftreten der Bohr-Havarie wird Sand im Bohrklein festgestellt. Dies bedeutet einen vollständigen Abtrag der Ummantelung in einem Bereich /Bild 74/ und einen Eintritt des Bohrkopfes in die Bettung aus Sand. Die Leistungsaufnahme der Bohranlage steigt auf über 6 kW /Bild 75/. Das Problem wird durch mehrfaches Vor- und Zurückfahren des Bohrgestänges bei Rotation behoben. Beim Zurückfahren des Bohrgestänges findet sich daran anhaftendes Material der Ummantelung /Bild 76/.

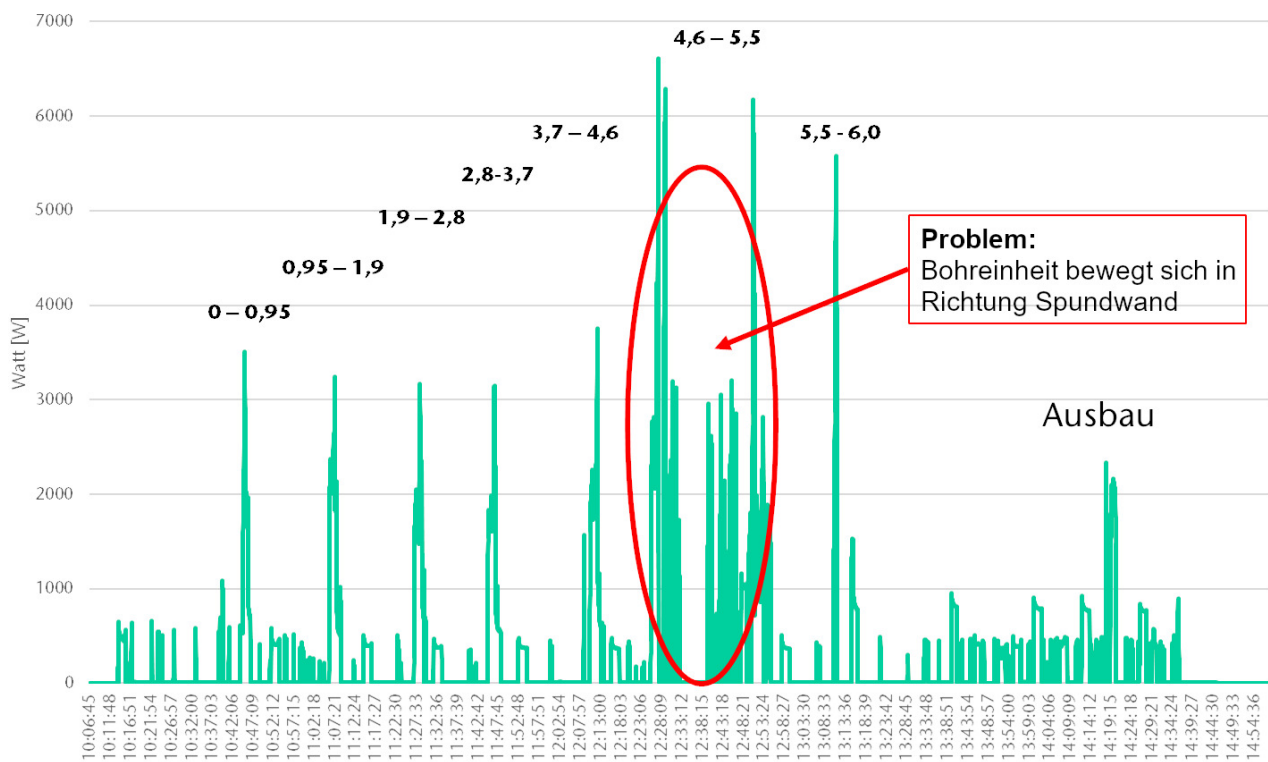


Bild 75 Leistungsaufnahme der Bohranlage



Bild 76 am Bohrgestänge anhaftendes Material der Ummantelung

Zum Ende des Bohrvorgangs hin versagt der Verbund zwischen Wärmedämmung und Ummantelung. Zunächst erfolgt eine Translation von Mediumrohr und Wärmedämmung gegenüber der Ummantelung /Bild 71/. Nach einigen Zentimetern Translation beginnen Mediumrohr und Wärmedämmung zusätzlich in der Ummantelung zu rotieren /Bild 72/. Der Verbund zwischen Mediumrohr und Wärmedämmung bleibt bei Translation und Rotation erhalten. Der Bohrvorgang wird somit nicht vollständig zu Ende gebracht, da der letzte Abstandhalter zusammen mit einem ≈ 100 mm langem Abschnitt Wärmedämmung und dem damit kraftschlüssig verbundenen Mediumrohr aus der Ummantelung heraus gedrückt wird.

Zur Entnahme des Mediumrohres muss zunächst der Bohrkopf vom Bohrgestänge getrennt werden, da sich das Mediumrohr sonst nicht aus dem Bohrgestänge ziehen lässt. Der Bohrkopf wird nach vollständiger Abkühlung manuell vom Mediumrohr abgezogen.

5.2.2.3 Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung des alten ausgebohrten KMR

Die Bohreinheit wird durch den Kettenzug ersetzt, der als Zugmaschine dient. Die Zugmaschine wird mittels Rundschnitten durch die im Erdreich verbliebene „Ummantelung des alten ausgebohrten KMR“, nachfolgend im Kapitel 5.2.2 samt Unterkapiteln „Ummantelung“ genannt, mit dem neuen Schlitz- und Aufweitkopf verbunden. Zwischen Zugmaschine und erster Rundschnitte wird eine Kraftmessdose zur Überwachung der Einhaltung der maximal zulässigen Zugkraft eingesetzt /Bild 51/. Der Schlitz- und Aufweitkopf wird an der Ummantelung positioniert. An dessen Rückseite wird das freie Seilende des Seilzug-Wegsensors angeschlagen.

Aufgrund der verfügbaren Platzverhältnisse in der Baugrube wird der Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung diskontinuierlich in Schritten zu je ≈ 500 mm Zugweg durchgeführt.

Nachfolgend ist das Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung dokumentiert /Bild 77/.../Bild 84/.

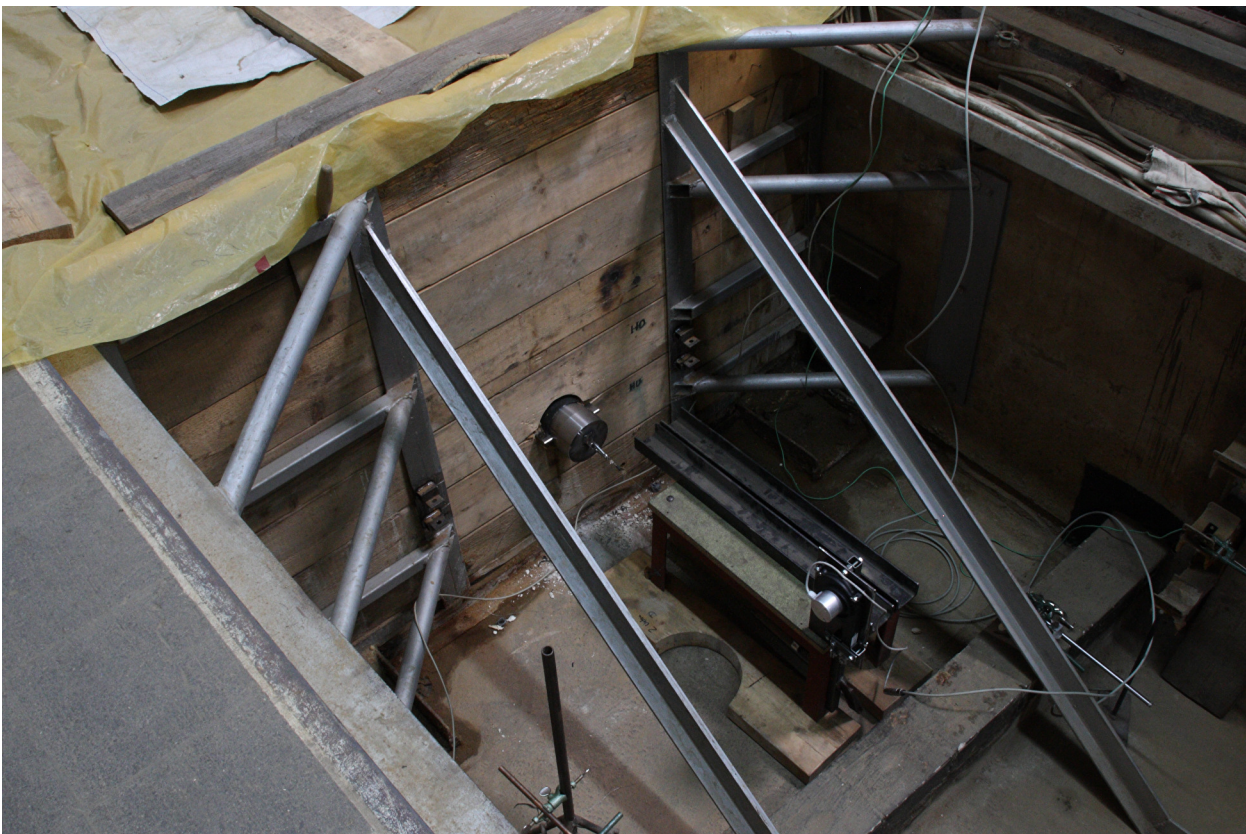


Bild 77 neuer Schlitz- und Aufweitkopf mit angeschlagenem Seilzug-Wegsensor in Startposition



Bild 78 Zugmaschine in Startposition



Bild 79 Beginn des Schlitzens der Ummantelung



Bild 80 Beginn des Aufweitens der Ummantelung



Bild 81 vollständiger Eintritt des Schlitz- und Aufweitkopfes in die Ummantelung



Bild 82 ausgerückte Ummantelung



Bild 83 in die Bettung eingerückte Ummantelung



Bild 84 angeschlagene L-Profile gegen weiteres Ausrücken der Ummantelung

Während des Schlitzens und Aufweitens beginnt die Ummantelung in Richtung Zugmaschine auszurücken /Bild 82/ und auf der gegenüber liegenden Seite in die Bettung einzurücken /Bild 83/. Der Zugvorgang wird unterbrochen. Ein Teil der bereits über die Spundwand überstehenden Ummantelung wird entfernt. Gegen ein weiteres Ausrücken werden am Stahlrahmen, der die Holzbohlen der Spundwand abstützt, zwei L-Profile angeschlagen /Bild 84/.

Zunächst steigt die Zugkraft von 0 kN bis auf 28,18 kN über einen Zugweg von 225 mm mit einer Steigung von $\approx 0,1252 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ an. Dieser Punkt fällt mit dem vollständigen Eintritt des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes in den Bereich der Ummantelung, der von der Bettung umgeben ist, zusammen. Danach ändert sich der Kraftverlauf, der Anstieg erfolgt von 28,18 kN bis auf 34,00 kN über einen Zugweg von $669 \text{ mm} - 225 \text{ mm} = 444 \text{ mm}$ mit einer um knapp eine Zehnerpotenz geringeren Steigung von $\approx 0,01311 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Mit weiter fortschreitender Bewegung des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes verläuft die Zugkraft sehr unstat. Im Bereich der Bohr-Havarie zwischen $\approx 900 \dots 1000 \text{ mm}$ insgesamt zurückgelegtem Zugweg erreicht die Zugkraft eine signifikante Spitze mit einem Maximalwert von 43,31 kN. Danach sinkt die Zugkraft zunächst ab. Mit Erreichen einer Zugkraft von 52,52 kN erfolgt der Abbruch des Schlitzens und Aufweitens, um eine Überlastung der Zugmaschine zu vermeiden und somit die Arbeitssicherheit in der Grube zu erhalten. Bis zum Abbruch legt der neue Schlitz- und Aufweitkopf insgesamt einen

Zugweg von 1482 mm vom Beginn des Schlitzens an zurück. Die Zugkraft als Funktion des Zugweges ist nachfolgend /Bild 85/ dargestellt.

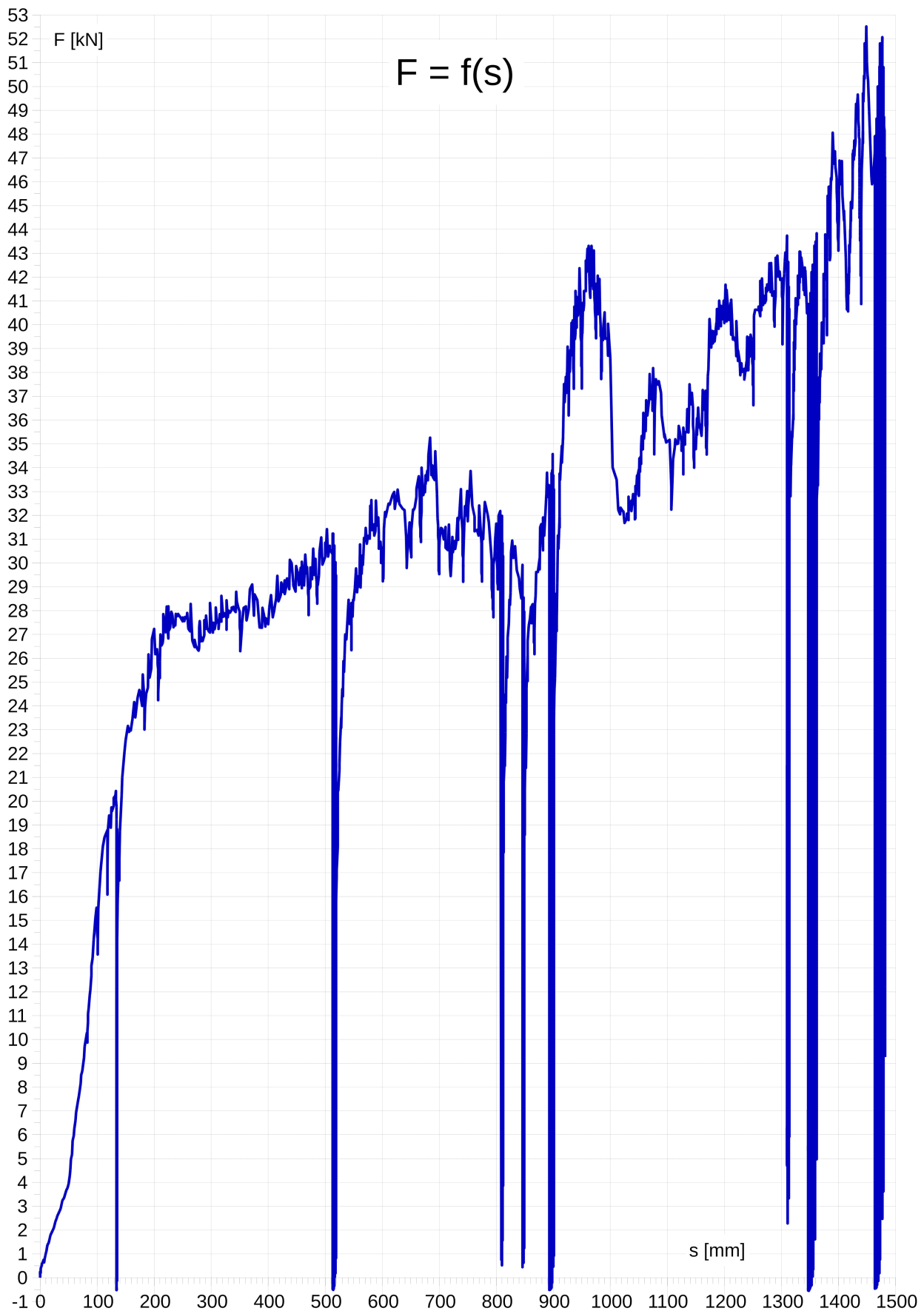


Bild 85 Zugkraft F [kN] als Funktion des Zugweges s [mm]

Da der neue Schlitz- und Aufweitkopf in der Ummantelung fest sitzt, entfällt das Einziehen des neuen KMR, da zur Entnahme des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes die Ummantelung freigelegt werden muss.

5.2.2.4 Freilegung und Ausbau nach Abbruch des Schlitzens und Aufweitens

Nach Abbruch des Schlitzens und Aufweitens wird die Überdeckung abgetragen. Die Ummantelung ist in einem Bereich direkt vor dem neuen Schlitz- und Aufweitkopf aufgefaltet /Bild 86/. Im Bereich des Zugweges sind die beiden Hälften der geschlitzten Ummantelung in die Bettung unterschiedlich weit eingerückt /Bild 87/. Das Seil des Seilzug-Wegensors wird vom neuen Schlitz- und Aufweitkopf nach Entfernung der umgebenden Sandes zerstörungsfrei getrennt. Anschließend werden die Ummantelung einschließlich des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes aus dem Graben entnommen.



Bild 86 freigelegte Ummantelung mit darin fest sitzendem neuen Schlitz- und Aufweitkopf und daran angeschlagenem Seil des Seilzug-Wegensors



Bild 87 Bereich des Zugweges, Sand im Bereich des Seils des Seilzug-Wegsensors entfernt



Bild 88 aufgefalteter Bereich der Ummantelung (links) vor dem neuen Schlitz- und Aufweitkopf (mittig) und in die Bettung eingerückte Bereiche der Ummantelung (rechts)



Bild 89 aufgefalteter Bereich der Ummantelung vor dem neuen Schlitz- und Aufweitkopf, im Graben oben gelegen



Bild 90 aufgefalteter, beim Ausbohren teilweise zerstörter Bereich der Ummantelung vor dem neuen Schlitz- und Aufweitkopf, im Graben unten gelegen



Bild 91 fest geklemmte Rundschlinge im aufgefalteten Bereich der Ummantelung

5.2.2.5 Ergebnisse

Das Ausbohren bestätigt hinsichtlich des Erbohrens der Wärmedämmung samt darin enthaltener Abstandhalter und Leckwarndrähte die Ergebnisse des Versuchs 1, die im Kapitel 5.2.1.5 beschrieben sind. Anders als beim Versuch 1 führt bei diesem Versuch 2 an einer Stelle der Eintritt des Bohrkopfes in die Ummantelung zu einer Bohr-Havarie, mit der eine Schädigung der Ummantelung einher geht /Bild 74/.

Zur Entnahme des überbohrten Mediumrohres muss zunächst der Bohrkopf vom Bohrgestänge getrennt werden, da sich der Bohrkopf sonst nicht vom Mediumrohr mit der anhaftenden Wärmedämmung lösen lässt.

Die Zugkraft erreicht einen Wert, der dazu führt, dass der kraftschlüssige Verbund zwischen der Ummantelung und der Bettung versagt, wodurch die Ummantelung in Richtung Zugmaschine ausrückt /Bild 82/. Durch das damit eingehende Einrücken der Ummantelung in die Bettung /Bild 83/ entfällt die Schutzfunktion der Ummantelung für das Einziehen des neuen KMR. Die Bettung wird in diesem Bereich nicht mehr durch die beiden Hälften der Ummantelung gestützt. Sand tritt in den Hohlraum ein, in den das neue KMR eingezogen werden soll.

Die Ummantelung verformt sich plastisch in axialer Richtung in Form einer Auffaltung /Bild 88/ ab dem Punkt, an dem der neue Schlitz- und Aufweitkopf den Bereich der Bohr-Havarie passiert /Bild 89/. In dem Bereich der Bohr-Havarie mit der teilweise durchbohrten Ummantelung fehlt diese nun großflächig, was zu einem entsprechend hohen Sandeintrag führt /Bild 90/. Die Auffaltung der Ummantelung füllt den erbohrten Hohlraum teilweise aus, wodurch ein weiteres Schlitz- und Aufweiten unmöglich ist. Die am neuen Schlitz- und Aufweitkopf angeschlagene Rundschnur ist in der Auffaltung der Ummantelung verklemmt /Bild 91/ und somit verloren, da eine Beschädigung der Rundschnur nicht ausgeschlossen werden kann.

Die hohe Zugkraft resultiert aus der Kombination der Geometrie des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes mit dem hohen Verdichtungsgrad der das KMR umgebenden Bettung. Im Vergleich zum alten Schlitz- und Aufweitkopf ist der maximale Außendurchmesser des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes um 6 mm vergrößert. Der bei der Verlegung von KMR übliche und daher auch in den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen erzeugte hohe Verdichtungsgrad der Bettung führt dazu, dass die Bettung nicht mehr in der Lage ist, dem Schlitz- und Aufweitkopf durch weitere Verdichtung auszuweichen.

Als Ursache für das Ausrücken der Ummantelung kommt nur die Geometrie des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes in Betracht. Durch den im Vergleich zum alten Schlitz- und

Aufweitkopf um 6 mm vergrößerten maximalen Außendurchmesser wird der Formschluss mit der aufzuweitenden Ummantelung verstärkt.

Die Geometrie des neuen Schlitz- und Aufweitkopfes kommt in Kombination mit der Bohr-Havarie auch für die Auffaltung des Ummantelung in Betracht.

Das in diesem Versuch erprobte Schlitzen und Aufweiten ist nicht zur Lösung der Aufgabe geeignet.

5.2.3 Weitere Vorgehensweise

Die Ergebnisse der beiden Versuche unter praxisnahen Bedingungen werden mit dem Projektbegleitenden Ausschuss erörtert. Ergebnis dieser Erörterung ist, dass eine Fortführung des Forschungsprojektes mit dem ursprünglich anvisierten technischen Ansatz nicht realisierbar und damit auch nicht sinnvoll ist.

6. Fazit

Die Ergebnisse können in die Arbeitsschritte „Schneiden der Wärmedämmungen und Überbohren des Mediumrohres“ (Arbeitsschritt 1) und „Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung und Einziehen des neuen KMR ohne Beschädigung der Bettung“ (Arbeitsschritt 2) unterteilt werden.

6.1 Arbeitsschritt 1

Das Ausbohren der Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum bereitet keine Probleme. Eine gute Bohrbarkeit ist bereits mit einem einfachen Design des Bohrkopfes gegeben. Der Abtransport der erbohrten Wärmedämmung wird durch eine Förderschnecke am Bohrstrang ermöglicht und bietet eine gute mechanische Abförderung.

Die in der Wärmedämmung befindlichen Leckwarndrähte, ein isolierter Chrom-Nickel-Draht und ein isolierter Kupferdraht werden durch den Bohrkopf zerstört und in kleinen Teilen ausgetragen. Ein Aufwickeln erfolgt weder um den Bohrkopf noch um das Bohrgestänge.

Die in der Wärmedämmung befindlichen Abstandhalter werden von Bohrkopf zerspant. Dabei fallen jedoch auch größere Teile an, die während des Austrags über die Förderschnecke nachzerkleinert werden, was zu einer Wärmeentwicklung innerhalb der ausgebohrten Ummantelung führt. Am Ende des Bohrvorganges wird der letzte Abstandhalter mit dem letzten Stück Wärmedämmung aus der Ummantelung heraus gedrückt. Dies ist jedoch unproblematisch.

Insgesamt ist das Freibohren des Mediumrohres einfach möglich. Die Bedingung hierfür ist, dass der Spalt zwischen dem Mediumrohr und dem Bohrkopf möglichst klein ist, da so ein Eindringen des Bohrkleins in den Ringraum zwischen Mediumrohr und Bohrkopf bzw. Bohrgestänge weitgehend verhindert wird und damit zusätzliche Reibung minimiert wird. Zur Entnahme des Mediumrohres muss zunächst der Bohrkopf vom Bohrgestänge getrennt werden, da sich das Mediumrohr sonst nicht aus dem Bohrgestänge ziehen lässt. Nach dem Trennen des Bohrkopfes vom Bohrgestänge erfolgt das Ziehen des Mediumrohres problemlos. Der Bohrkopf lässt sich nach vollständiger Abkühlung vom Mediumrohr problemlos zerstörungsfrei manuell abziehen.

Als problematischer erweist sich das Freibohren der Ummantelung aufgrund der zulässigen Koaxialitätsabweichung in KMR. Während des Bohrens folgt der Bohrkopf dem Mediumrohr mit der durch die Koaxialitätsabweichung verursachten Abweichung von der Rohrmittelachse des KMR. Somit ergibt sich ein Konflikt zwischen der vollständigen

Entfernung der Wärmedämmung und dem Erhalt einer gegenüber der Bettung durchgängig geschlossenen Ummantelung beim Bohren. Auf der einen Seite erhöht an der Ummantelung anhaftende Wärmedämmung die Reibung beim Einziehen des neuen KMR, wodurch die benötigte Einziehkraft zunimmt. Auf der anderen Seite führt eine teilweise bis zur Bettung durchbohrte Ummantelung zum Eintritt von Bettungsmaterial (Sand) in die ausgebohrte Ummantelung und somit erhöhter Reibung während des Einziehens des neuen KMR.

6.2 Arbeitsschritt 2

Bei diesem Arbeitsschritt erreicht die Zugkraft Werte, bei denen eine Schädigung des neuen KMR nicht mehr sicher ausgeschlossen werden kann und der kraftschlüssige Verbund zwischen der alten ausgebohrten Ummantelung und der Bettung versagt. Dadurch rückt die Ummantelung in Richtung Zugmaschine aus der Bettung aus, wodurch die Schutzwirkung der Ummantelung zunehmend verloren geht. Die Entkopplung des Vorgangs „Schlitzen und Aufweiten“ von dem Vorgang des Einziehens des neuen KMR bringt keine signifikante Reduktion der benötigten Zugkraft. Daraus folgt, dass ein Großteil des Kraftaufwandes auf das Schlitzen und Aufweiten zurückzuführen ist.

Die hohe Verdichtung der Bettung lässt nahezu keine Nachverdichtung zu. Somit führt das Aufweiten der Ummantelung zu einer Verdrängung der Bettung, wodurch diese geschädigt werden kann.

Aufgrund der genannten Probleme ist das Einziehen eines KMR mit dem Außendurchmesser des alten KMR bei gleichzeitigem Schlitzen und Aufweiten der Ummantelung mit dem technischen Ansatz für Arbeitsschritt 2 nicht sinnvoll durchführbar.

Eine mögliche Schädigung des neuen KMR, eine mögliche Schädigung der Bettung oder ein Ausrücken der alten ausgebohrten Ummantelung stellen Ausschlusskriterien für den Einsatz des Verfahrens dar. Somit lässt sich mit dem im Forschungsantrag formulierten technischen Ansatz insbesondere des Arbeitsschrittes 2 eine grabenlose Erneuerung von KMR nicht umsetzen.

7. Nutzen der Ergebnisse für KMU und Ausblick

Das Forschungsprojekt „Gabenlose Erneuerung von Fernwärmeleitungsnetzen“ zeigt, dass sich eine grabenlose Erneuerung von KMR mit dem ursprünglich anvisierten technischen Ansatz nicht umsetzen lässt. Daher können die Ergebnisse nicht direkt von den KMU für die grabenlose Erneuerung von KMR genutzt werden.

Da weiter ein Bedarf nach der Entwicklung eines Verfahrens zur Grabenlosen Erneuerung von KMR seitens der KMU besteht, bietet eine Abwandlung des technischen Ansatzes hin zum Einziehen eines neuen KMR mit kleinerem Außendurchmesser in eine ausgebohrten Ummantelung eine Perspektive. Dabei muss nur freigebohrt werden, Schlitzen und Aufweiten entfallen. Damit entfallen auch die Ausschlusskriterien mögliche Schädigung des neuen KMR, mögliche Schädigung der Bettung oder Ausrücken der alten ausgebohrten Ummantelung.

Sinkende Wärmebedarfe durch verbesserte Gebäudewärmedämmung erlauben mitunter eine Reduktion der Mediumrohrdimension, womit handelsübliche KMR eingezogen werden können. Ein KMR mit gleicher Mediumrohrdimension, aber geringerem Außendurchmesser als das alte zu ersetzende KMR ist, wenn das alte zu ersetzende KMR eines der Wärmedämmserie 1 ist, nur als Sonderkonstruktion realisierbar.

Der Ansatz, ein KMR mit kleinerem Außendurchmesser in eine ausgebohrten Ummantelung einzuziehen geht mit folgenden Fragestellungen einher:

- Wie erfolgt die statische Einbindung des neuen KMR in das Wärmenetz?
- Ist das Einziehen des neuen KMR in „zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen“ (ZFSV, ugs.: Flüssigboden) möglich? Besteht die Möglichkeit des Auffüllens der ausgebohrten Ummantelung mit ZFSV bei gleichzeitiger Zentrierung des neuen KMR in der ausgebohrten Ummantelung?
- Welche thermische Leistung kann durch ein neues KMR mit reduzierter Mediumrohrdimension übertragen werden?
- Bleiben bei Einzug eines KMR mit reduzierter Dicke der Wärmedämmung (Sonderkonstruktion) die radialen Wärmeverluste in einem technisch, ökonomisch und ökologisch vertretbaren Rahmen?
- Ist ein durch die Koaxialitätsabweichung bedingtes stellenweise Durchbohren der Ummantelung bis zur Bettung tolerabel oder muss das Bohrverfahren dahin gehend optimiert werden, dass die Ummantelung gegenüber der Bettung auf der gesamten Strecke vollständig geschlossen bleibt?

Die oben genannten Punkte sollten in einem anschließenden Forschungsprojekt geklärt werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Transformationsstrategien Fernwärme, TRAFO - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW, Abschlussbericht, AGFW Verlag Frankfurt, ISBN 3-89999-038-2, April 2014
- [2] EN 253, Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Verbund-Rohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen; Deutsche und Englische Fassung EN 253:2009+A2:2015
- [3] Groß, S., "Untersuchung der Speicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern", Jörg Vogt Verlag, Dissertation, ISBN 978-3-938860-60-1, Technische Universität Dresden, 2013
- [4] Esch, T., Taubenböck H., Geiß C., Schillings C., Nast M., Metz A., Heldens W., Keil M., "Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale", Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., in der Helmholtz-Gesellschaft, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Abteilung Landoberfläche (LA), 2011
- [5] AGFW Merkblatt FW 114 - Instandhaltungsstrategien und Rehabilitationsplanung, Mindestanforderungen - AGFW der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., AGFW Verlag, Dezember 2013
- [6] Hälterhoff J., „CO₂-Bilanz im Leitungsbau - vom CO₂-neutralen Kraftwerk zum klimafreundlichen Leitungsbau“, 6. Internationales Leitungsbausymposium, "Neue Herausforderungen im Leitungsbau", 2009
- [7] Jung Y.J., Sinha S.K., "Trenchless Technology: An Efficient And Environmentally Sound Approach for Underground Municipal Pipeline Infrastructure Systems", North American Society for Trenchless Technology, NoDig 2004, New Orleans, Louisiana, 2004
- [8] Tudeschki H., Hardebusch T., Kögler R., „Spezialbohrtechnik“, 1. Auflage, 2006
- [9] „Erläuterungsbericht der LH-15-1014-155-kV-AC-Leitung Riffgat-Emden/Borßum für die Landkabeltrasse“, Tennet Holding B.V., 2010
- [10] Weidlich I., Huther H. „Einflussgrößen bei der Auslegung grabenlos verlegter Kunststoffmantelrohre“, bbr - das Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie, Ausgabe 06/2013, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bann, 2013