

Eindrapport Aanlegmethoden warmte transportleidingen in beeld (TKI Aambeeld)



Eindrapport Aanlegmethoden warmte transportleidingen in beeld (TKI Aambeeld)

Eindrapport Aanlegmethoden warmte transportleidingen in beeld (TKI Aambeeld)

Opdrachtgever	TKI Urban Energy-
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleiding, aanlegmethoden, TKI, AAMBEELD

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	29-03-2024
Projectnummer	11207943-007
Document ID	11207943-007-GEO-0001
Pagina's	40
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	Henk Kruse

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Piet Meijers	Henk Kruse	Ahmed Elkadi

Samenvatting

Leidingen worden tegenwoordig niet altijd in een open sleuf aangelegd. Er zijn tegenwoordig veel aanlegmethoden beschikbaar. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Om de aanlegmethoden te kunnen vergelijken en een keuze methodiek te kunnen toepassen is het project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten en opstellen keuzemethode.

Per werkpakket zijn rapporten uitgebracht. Dit voorliggende rapport beschrijft de bereikte resultaten in de verschillende werkpakketten en is een samenvatting van de rapporten van de werkpakketten die in de bijlage zijn opgenomen.

De standaard methode voor de aanleg van leidingen is van oudsher een open sleuf. De grond wordt in lagen verwijderd tot de gewenste diepte en indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd. Deze open sleuf methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien waarmee nieuwere methoden kunnen worden vergeleken.

Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om aanlegmethoden die in beide situaties kunnen worden ingezet te beschouwen in het AAMBEELD onderzoek. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen van de mogelijke aanleg methoden zijn een aantal aanleg methoden geselecteerd die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen:

- Open Sleuf (referentie methode).
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe.
- EPP.
- Ploegen.

Bij de methoden Direct Pipe en EPP bleken aanvullende innovaties nodig te zijn om de standaard warmte transport leiding, bestaande uit een stalen binnenbuis met PUR isolatie materiaal en een omhullende PE buis, te kunnen installeren. Bij de EPP methode bleek de ontwikkeling van een ruimer noodzakelijk om de gewenste grote diameter te kunnen installeren. Bij de Direct Pipe methode bleek het nodig om de buitenbuis bestaande uit PE te verstevigen. De schalen van de klem van de Pipe Thruster oefenen een dusdanig grote belasting op de warmte transport leiding uit, dat het nodig is om een verstevigingslaag aan te brengen op de PE buitenbuis. Hiervoor is GRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) gebruikt.

Met behulp van deze innovaties is het mogelijk om de bovenstaande aanleg methoden toe te passen voor de installatie van warmte transportleidingen.

Om een goede berekening voor het ontwerp van een warmte transportleiding te kunnen maken is het tevens nodig gebleken om de wrijvingseigenschappen gerelateerd aan de te gebruiken boorvloeistof te onderzoeken. In het AAMBEELD onderzoek zijn daarom ook metingen uitgevoerd om de wrijving tussen een PE buitenbuis en de boorvloeistof vast te stellen. Bij de boorvloeistof is aandacht besteed aan de vloeibare toestand en de uitgeharde toestand na installatie van de warmte transport leiding.

Bij ontwerp berekeningen van de warmte transportleiding speelt de aanlegmethode een rol. Er moeten ten behoeve van het ontwerp berekeningen worden uitgevoerd voor een warmte transportleiding in de aanlegfase en in de bedrijfsfase. Het doel van de berekeningen voor de aanlegfase is het bepalen wat de maximale lengte is die met de aanlegmethode gehaald kan worden zonder dat de leiding schade ondervindt. In het AAMBEELD onderzoek zijn de lengten per aanlegmethode berekend voor verschillende ondergronden.

Het doel van de berekeningen voor de bedrijfsfase is te bepalen welke lengte tussen de expansielussen mogelijk is als functie van de aanlegmethode. Expansielussen worden bij de warmte transportleidingen in het ontwerp opgenomen om axiale verlenging van de leiding bij opwarming in de bedrijfsfase mogelijk te maken zonder dat er delen van de leiding bezwijken. In het AAMBEELD onderzoek zijn de lengten tussen de expansie lussen per aanlegmethode bepaald voor verschillende ondergronden.

De verschillende aanlegmethoden kunnen worden ingezet om de warmte transportleiding over een aanzienlijke lengte aan te leggen. Alleen bij de inzet van de Direct Pipe methode zijn er nog vraagtekens, omdat er versterking van de PE buitenbuis nodig is.

Alle onderzoeksresultaten van het AAMBEELD onderzoek zijn gebruikt bij de toepassing van een keuze methode om een aanlegmethode voor een warmte transport leiding te selecteren. keuze methode uitgewerkt. De keuze methode is gebaseerd op een ingekorte multi criteria analyse (MCA). Door op een systematische wijze de aanlegmethode te beschouwen aan de hand van criteria, die worden bepaald door meerdere parameters wordt een objectieve en reproduceerbare keuze voor een aanlegmethode mogelijk, voor een bepaald leidingtracé.

De ontwikkelde keuze methode met de bijhorende formules is als voorbeeld toegepast op een warmte transport leiding tracé in het landelijke gebied met een klei ondergrond en in het stedelijke gebied met een zand ondergrond. In het landelijke gebied kwam de methode ploegen naar voren als meest geschikte methode. In het stedelijke gebied kwam de EPP techniek met ruimer naar voren als beste keuze. Opgemerkt wordt dat de toepassing van de keuze methodiek een voorbeeld betreft, voor een concreet project kan de beoordeling anders zijn, waardoor een ander resultaat mogelijk is.

Met behulp van de ontwikkelde kennis en de ontwikkeling van de keuze methode voor aanlegtechnieken heeft het AAMBEELD onderzoek een bijdrage kunnen leveren aan duurzame warmtenetten binnen MMIP4 door het vergroten van inzicht over de diverse aanlegmethoden in de Nederlandse ondergrond en het daardoor verlagen van de risico's bij aanleg en tijdens gebruik.

KPI	Omschrijving
TRL bij afsluiting, Hoofdcategorie	De activiteiten in het TKI AAMBEELD vallen onder Industrieel en Experimenteel Onderzoek. De eindrapportage beschrijft een keuze systematiek voor aanlegmethoden van warmte transport leidingen op TRL 8 niveau.
TRL bij afsluiting, Detailcategorie	<ul style="list-style-type: none"> • Werkpakket 1 Vergelijking van aanlegmethoden, afgerond op TRL 6. • Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden, afgerond op TRL 7 • Werkpakket 3 Gebruik boorvloeistof voor warmtetransportleidingen, afgerond op TRL 6. • Werkpakket 4 Aanlegtesten voor warmte transportleidingen, afgerond op TRL 7. • Werkpakket 5 Ontwikkeling keuze systematiek voor aanlegmethode, afgerond op TRL 8.
Projectsucces	Het project is naar tevredenheid afgerond. De doelstellingen zijn behaald. De inhoud is gedurende het onderzoek enigszins gewijzigd, een deel van de vooraf voorziene testen zijn niet uitgevoerd, daarentegen zijn er meer modellen ontwikkeld omdat gedurende het onderzoek bleek dat hier behoefte aan was.
Vervolg	Er is reeds een vervolgonderzoek opgestart dat aansluit bij werkpakket 3. De ontwikkeling op het gebied van de boorvloeistof coating interactie wordt nader en meer diepgaand onderzocht. Markt ontwikkelingen met betrekking tot de aanlegmethoden die zijn getest in werkpakket 4 zijn momenteel gaande.
Aantal verwachte peer-reviewed publicaties	1 (verwacht in 2024)
Aantal gerealiseerde niet-peer-reviewed publicaties	2 (verwacht in 2024)
Aantal aangevraagde patenten	2 patenten, vanuit werkpakket 4.
Aantal prototypes	1 prototype ontwikkeld binnen werkpakket 4.
Aantal spin-offs/ spin-outs	Aanlegmethoden worden doorontwikkeld. Ondiep Sleufloos is een nieuwe trend.
Aantal nieuwe of verbeterde producten/ processen/ diensten geïntroduceerd	Door het uitvoeren van testen binnen werkpakket zijn de Direct Pipe methode en de EPP methode verder doorontwikkeld.
Impact	De risico's voor het inzetten van ondiepe sleufloze technieken voor warmte transportleidingen zijn beter in beeld gebracht de toepassingsmogelijkheden van deze sleufloze aanleg methoden zijn vergroot. De innovaties dragen bij aan een versnelling van de aanleg van warmtetransportleidingen en duurzame warmtenetten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Projectgegevens	9
1.2	Achtergrond	9
1.3	Doelstellingen AAMBEELD	10
1.4	Werkpakketten	10
1.5	Leeswijzer	10
2	Overzicht werkpakketten en rapporten	11
2.1	Werkpakket 1	11
2.2	Werkpakket 2	11
2.3	Werkpakket 3	11
2.4	Werkpakket 4	11
2.5	Werkpakket 5	12
3	WP1 Vergelijking van aanlegmethoden	13
3.1	Algemeen	13
3.2	Analyse methoden	13
3.3	Overzicht resultaten WP 1	14
4	WP 2 Berekeningen aanlegmethoden	16
4.1	Algemeen	16
4.2	Aanleg fase	16
4.3	Bedrijfsfase	17
5	WP 3 Testen van uithardende boorvloeistof	20
5.1	Algemeen	20
5.2	Uithardingsproeven op boorvloeistof	20
5.3	Overzicht resultaten uithardingsproeven	20
5.4	Schuifweerstand bij uitgeharde boorvloeistof	20
6	WP 4 Testen van aanlegmethoden	23
6.1	Algemeen	23
6.2	Druktesten op warmte transport leiding	23
6.2.1	Uitgevoerd onderzoek	23
6.2.2	Resultaten, klemkracht	24
6.2.3	Resultaten, axiale drukkracht	25

6.3	Geschiktheidstesten combinatie EPP met ruimer	26
6.3.1	Uitgevoerd onderzoek	26
6.3.2	Belangrijkste resultaten	28
7	WP5 Keuze voor een aanlegmethode	29
7.1	Algemeen	29
7.2	Gevolgde aanpak	29
7.3	Resultaten	30
8	Conclusie	31
A	Rapport WP1, Vergelijking aanlegmethoden	33
B	Rapporten WP2, Aanlegfase en bedrijfsfase berekeningen	34
B.1	Rapport Aanlegberekeningen	34
B.2	Rapport Sterkteberekeningen bedrijfsfase	35
C	Rapport WP3, Testen op Drill-Grout	36
D	Rapporten WP4, Testen aanlegmethoden	37
D.1	Rapport testen met Pipe Thruster	37
D.2	Rapport testen EPP met ruimer	38
E	Rapport WP5, Keuzemethodiek aanlegmethoden	39

1 Inleiding

1.1 Projectgegevens

Projecttitel: (AAMBEELD)	AAAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD
Projectnummer:	2121402
Penvoerder:	Stichting Deltares
Consortiumdeelnemers:	NV Nederlandse Gasunie Rotterdam Engineering Dennig Solution & Advice BV Denys Engineers & Contractors BV Kouwenberg Infra BV Herrenknecht Nederland BV Cebo Holland BV
Projectperiode:	15-03-2022 - 31-12-2023

Het project is uitgevoerd met PPS-programmatoeslag subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat voor TKI Urban Energy, Topsector Energie. www.tki-urbanenergy.nl.”

1.2 Achtergrond

Afgelopen jaren hebben ontwikkelingen plaatsgevonden op het gebied van aanlegmethoden voor leidingen. De standaard methode is van oudsher de aanleg in een open sleuf waarbij de grond eerst wordt verwijderd door ontgraving en na de installatie van de leiding wordt terug geplaatst. In de loop der tijd zijn er steeds meer aanlegmethoden beschikbaar gekomen. Vooral de zogenaamde sleufloze technieken, waarbij de leiding zonder graven van een sleuf wordt aangelegd, zijn in aantal toegenomen. Na de eerste ontwikkelingen in de vorige eeuw werden vooral de methode horizontaal gestuurd boren en de methode micro tunnelling toegepast. Meer recent zijn er veel meer technieken beschikbaar gekomen voor de sleufloze aanleg van leidingen.

Er zijn verschillende soorten leidingen die worden aangelegd met behulp van sleufloze technieken. Tegenwoordig worden ook veel warmte leidingen aangelegd. Deze leidingen, die warm water transporteren, bestaan meestal uit een binnenbuis met daarom heen isolatie materiaal en een buitenbuis. De meest toegepaste leidingen voor warmte transport zijn de zogenaamde VPS leidingen die bestaan uit een stalen binnenbuis met PUR isolatie materiaal en een PE buitenbuis.

De grote verscheidenheid in het aantal aanlegmethoden en het speciale buistype dat wordt gebruikt voor warmte transport leidingen maakt een keuze voor een aanlegmethode een lastige opgave. Om enig inzicht te verkrijgen welke methoden in welke omstandigheden kunnen worden ingezet voor de aanleg van VPS warmte transportleidingen is een vergelijkingsystematiek van aanlegmethoden ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen gewenst.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project AAMBEELD (AAAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) opgestart.

Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

1.3 Doelstellingen AAMBEELD

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor een geselecteerde installatiemethode verkleind.

Vanuit de huidige stand der techniek is het AAMBEELD onderzoek opgestart. In het onderzoek worden de volgende onderwerpen behandeld:

- Vergelijking voor en nadelen van aanlegmethoden en beoordeling geschiktheid aanlegmethoden.
- Ontwerp berekeningen van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen.
- Gebruik Boorvloeistof voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen.
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen.
- Systematische keuze voor een aanlegmethode.

1.4 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Vergelijking van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Gebruik boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten voor warmte transportleidingen.
- Werkpakket 5 Ontwikkeling keuze systematiek voor aanlegmethode.

De uitgevoerde werkzaamheden en conclusies en aanbevelingen van elk werkpakket zijn gerapporteerd in een werkpakket rapport. Dit voorliggende rapport geeft een samenvatting van de verschillende rapporten. De werkpakket rapporten zijn in de bijlagen opgenomen.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de per werkpakket uitgebrachte rapporten. De hoofdstukken 3 tot 7 geven vervolgens per werkpakket een korte omschrijving van het uitgevoerde onderzoek en de belangrijkste resultaten. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt naar de betreffende werkpakket rapporten in de bijlagen verwezen.

2 Overzicht werkpakketten en rapporten

2.1 Werkpakket 1

In werkpakket 1 is een rapport gemaakt over de vergelijking van aanleg methoden voor leidingen:

- Vergelijking aanleg methoden, Aambeeld WP1. Rapport 11207943-003-GEO-0001. Deltares.

In dit rapport zijn de volgende documenten opgenomen:

- Voordelen en Nadelen Sleufloze techniek (open- en gesloten-front). Kouwenberg Infra.
- Advantages and Disadvantages Trenchless techniques. Denys Engineers and Contractors.

2.2 Werkpakket 2

In werkpakket 2 zijn rapporten gemaakt over ontwerpberekeningen voor warmte transport leidingen met verschillende aanleg methoden. Er zijn berekeningen voor de aanleg en de gebruiksfase gemaakt:

- Deltares. Aanlegberekeningen leidingen, AAMBEELD, werkpakket WP2. Rapport 11207943-017, december 2023.
- Rotterdam Engineering. Aambeeld wp2 Cases, Cases te gebruiken voor aanleg en gebruiksfase. Rapport RE22079-N01, revisie 4, februari 2024.

2.3 Werkpakket 3

In werkpakket 3 lag de focus op de boorvloeistof die gebruikt wordt bij de verschillende aanleg methoden. Er is een rapport opgesteld waarin de testen die zijn uitgevoerd op een uithardende boorvloeistof zijn beschreven:

- Deltares. Testen op Drill-Grout, AAMBEELD werkpakket WP3. Rapportnummer 11207943-018-GEO-0001, versie 1.0, december 2023.

2.4 Werkpakket 4

In werkpakket 4 zijn de aanleg testen beschreven die zijn uitgevoerd voor twee in aanmerking komende technieken waarbij aanpassing van de techniek nodig was om deze op grotere schaal toe te passen, nl. een Pipe Thruster voor de DirectPipe methode en een Ruimer voor de EPP methode. De rapporten met de beschrijving van de testen en de gemeten waarden (de factual reports) zijn gemaakt door Herrenknecht en zijn Engelstalig.

Deze rapporten maken deel uit van de volgende twee interpretatie rapporten:

- Deltares. Thruster testen op 28" leiding, AAMBEELD werkpakket WP4. Rapport 11207943-019-GEO-0002, versie 1.0, december 2023
- Herrenknecht AG (2022). Test Report, Project: F-000620.2.1 Pipe Thruster Test. Description: Testing the load limits of 28" heating pipes by using a pipe thruster. Rev.1, 2023-08-18.
- Deltares. Testen op combinatie ruimer met EPP, AAMBEELD werkpakket WP4. Rapport 11207943-019-GEO-0001, versie 2.0, januari 2024.
- Herrenknecht AG (2023). Test Report, Project: F-000620.2.2 Reamer Test. Description: Testing the operational capability of a Ø 790 mm reamer prototype, 2023-11-07.

2.5 Werkpakket 5

In werkpakket 5 is de synthese van de voorgaande werkpakketten beschreven. De synthese heeft geresulteerd in een keuze methode voor de toepassing van een aanlegmethode voor de installatie van warmte transport leidingen:

- Deltares. Keuze van een aanlegmethode werkpakket WP5 11207943-020-GEO-0001, maart 2024.

3 WP1 Vergelijking van aanlegmethoden

3.1 Algemeen

Er bestaan verschillende aanlegmethoden voor leidingen. Van oudsher werden leidingen aangelegd in een open sleuf. Andere aanlegmethoden zijn zogenaamde sleufloze methoden waarbij een leiding zonder graven op de gewenste diepte wordt aangelegd. In werkpakket 1 worden de verschillende aanlegmethoden op hoofdlijnen met elkaar vergeleken. Als onderdeel van werkpakket 1 is door verschillende specialisten naar de mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen gekeken. De voor en nadelen van de methode in verschillende omstandigheden zijn beschouwd.

De volgende uitvoeringsmethoden zijn beschouwd:

- Open sleuf.
- Open boorgat:
 - HDD: Horizontal Directional Drilling.
- Directe installatie:
 - DP: Direct pipe.
- Gestuurde installatie:
 - EPP (E-Power Pipe).
 - Gestuurde avegaar.
 - HPP (Horizontal Pipe Pushing).
 - Guided ramming.
- Maaiveld gestuurde installatie:
 - Pipe Express.
 - Ploegen.

De standaard methode voor de aanleg van leidingen is aanleg in een open sleuf. De grond wordt in lagen verwijderd tot de gewenste diepte en indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd. Deze standaard methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien.

3.2 Analyse methoden

Door de voor- en nadelen van de methoden te beschouwen met een team van specialisten is per methode bekeken of de methode aan de criteria voldoet die van belang zijn bij de aanleg van warmte transport leidingen. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd met unieke randvoorwaarden is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen.

Bij de eerste beoordeling van de beschouwde aanlegmethoden is beschouwd of de methoden voldoende geschikt zijn voor de aanleg van grote diameter warmte transport leidingen bestaande uit een stalen binnenbuis met PUR isolatie materiaal en een PE omhullende buis. De voor- en nadelen van de methoden zijn door specialisten beschreven. Door Kouwenberg Infra zijn voor en nadelen van een aantal methoden behandeld en ook door Denys zijn een aantal andere methoden beschouwd. De voor en nadelen van de methoden zijn gebruikt voor een kwalitatieve afweging.

Daarbij is gekeken naar de volgende criteria:

- Grondwaterproblematiek.
- Grondproblematiek.
- Ervaring met de methode.
- Leidingbelasting bij de aanleg van de leiding.
- Complexiteit van de uitvoering.
- Functioneren leiding na aanleg.
- Benodigde ruimte.
- Kosten.

3.3 Overzichtresultaten WP 1

De belangrijkste resultaten van de kwalitatieve afweging zijn in Tabel 3-1 weergegeven. Hierbij is per methode het top nadeel en top voordeel benoemd en is een kwalitatieve score gegeven voor de mogelijkheid om deze aanlegmethoden te gebruiken voor de aanleg van warmte transportleidingen in landelijk of stedelijk gebied.

Tabel 3-1 Vergelijking verschillende methoden, op basis top voordeel en top nadeel.

Methoden	Top nadeel	Top voordeel	Score	Opmerking
Sleuf	Referentie	Referentie	Referentie	Referentie
HDD	Wrijving in boorgat na installatie leiding	Veel ervaring	Kansrijk	
Direct Pipe	Kracht op leiding bij installeren	Leiding direct in boorgat	Kansrijk, mits nader uitgezocht	De effecten van de klemmen op de leiding moeten worden uitgezocht
EPP	Geen ervaring	Gesteund boorgat	Kansrijk, mits nader uitgezocht	Het ruimen van het boorgat en direct installeren van de leiding moet worden uitgezocht
HPP	Kracht op leiding bij voortbewegen	Lage kosten	Niet kansrijk	
Gestuurde Avegaar	Nazakking bij grondwater	Lage kosten	Niet kansrijk	
Guide Ramming	Kracht op leiding bij aanleg	Lage kosten	Niet kansrijk	
Pipe express	Grondtransport en kracht op leiding bij voortbewegen	Positie nauwkeurigheid	Niet kansrijk	Kruisende leidingen een probleem, daarom niet geschikt voor stedelijk gebied
Ploegen	Mobilisatie trekkracht Lier	Snelheid van aanleg	Kansrijk	Kruisende leidingen een probleem, daarom niet geschikt voor stedelijk gebied

Op basis van de kwalitatieve vergelijking zijn de meest kansrijke methoden geselecteerd voor verder analyse in de overige werkpakketten van AAMBEEELD.

De aanleg in een open sleuf is de referentie methode. De aanleg methoden Direct Pipe en EPP zijn in principe kansrijk, maar nader experimenteel onderzoek is nodig om te beoordelen of deze methoden inderdaad in de toekomst voor aanleg van warmte transportleidingen kunnen worden gebruikt. Het nader onderzoek naar deze methoden is uitgevoerd in WP 4 van AAMBEEELD.

Deze geselecteerde aanlegmethoden zijn:

- Aanleg in sleuf (referentie).
- HDD.
- Direct Pipe (mits nader onderzocht).
- EPP (mits nader onderzocht).
- Ploegen.

4 WP 2 Berekeningen aanlegmethoden

4.1 Algemeen

Binnen WP2 zijn berekeningen uitgevoerd voor een warmte transportleiding in de aanlegfase en in de bedrijfsfase. Het doel van de berekeningen voor de aanlegfase is het bepalen wat de maximale lengte is die per aanlegmethode gehaald kan worden. Het doel van de berekeningen voor de bedrijfsfase is te bepalen welke lengte tussen de expansielussen mogelijk is als functie van de aanlegmethode. Expansielussen worden bij de warmte transportleidingen in het ontwerp opgenomen om axiale verlenging van de leiding bij opwarming mogelijk te maken zonder dat er delen van de leiding bezwijken.

Bij deze berekeningen worden de geselecteerde aanlegmethoden uit WP 1 beschouwd. Dat betekent dat bij de analyse de volgende aanlegmethoden zijn meegenomen:

- Aanleg in sleuf.
- Inploegen.
- HDD.
- Direct Pipe.
- EPP (met ruimer).

Er zijn met betrekking tot de ondergrond twee typerende situaties beschouwd, een stedelijk gebied waar de ondergrond uit zand bestaat en een landelijk gebied waar de grond uit 8 meter klei op zand bestaat.

Voor de leiding is uitgegaan van een ST-PUR-PE leiding met de volgende afmetingen

- Binnenbuis:
 - Materiaal: staal.
 - Buitendiameter: $D = 0,711$ m.
 - Wanddikte: $t = 8$ mm.
- Buitenbuis:
 - Materiaal: HDPE.
 - Buitendiameter: $D = 0,90$ m.
 - Wanddikte: $t = 8,7$ mm.

Er wordt in de berekeningen geen rekening gehouden met een extra laag (bijvoorbeeld GRP) op de buitenkant van de leiding.

4.2 Aanleg fase

De aanlegmethoden voor de aanleg van de warmte transportleiding zijn verschillend. Dit resulteert in een verschillende wrijving tussen de aan te leggen leiding en de omringende grond. Voor elke aanlegmethode is de wrijvingsweerstand bij aanleg onderzocht, zodat deze in de berekeningen kon worden meegenomen.

Bij de wrijvingsweerstand bij aanleg wordt rekening gehouden met gronddruk die afhankelijk is van de ruimte tussen de leiding en de boorgang en de boorvloeistof. Ook is het effectief gewicht van de leiding van belang voor de wrijving tijdens de aanleg.

De grootste grondwrijving is aanwezig bij de aanlegmethode inploegen. Bij deze methode is er praktisch geen ruimte tussen de leiding en de grond aanwezig. De laagste weerstand is aanwezig bij de methode HDD. Hierbij wordt aangenomen dat de druk in de boorgang voldoende hoog is om de boorgang stabiel te houden.

De wrijvingsweerstand wordt dan alleen bepaald door de wrijving tussen leiding en boorvloeistof en de wrijving tegen de boorgatwand door het effectief gewicht van de leiding. De wrijving bij Direct Pipe en de EPP met ruimer is hoger dan bij de HDD methode en lager dan bij het ploegen. De Direct Pipe methode heeft een grotere oversnijding dan de EPP met ruimer en daardoor minder wrijvingsweerstand.

Bij alle aanlegmethoden blijkt de benodigde intrekkracht, en bij de Direct Pipe methode de benodigde indrukkraft, bij benadering evenredig te zijn met de lengte.

In Tabel 4-1 is de maximaal haalbare lengte per aanlegmethode en aanlegdiepte gegeven. Deze is bepaald voor een toelaatbare staalspanning van 355 N/mm². Voor de aanleg middels Direct Pipe is de schuifspanning in de isolatielaag maatgevend. De maatgevende plaats is bij de klem van de Pipe Thruster. Hier is een optimalisatie mogelijk door de buitenbuis stijver te maken, bijvoorbeeld door deze te voorzien van een GRP laag van voldoende dikte (zie resultaat WP4). Door de hogere stijfheid met de GRP laag wordt de kracht dan over een grotere lengte van de buitenbuis naar de binnenbuis overgebracht, waardoor de piekwaarde van de schuifspanning afneemt. Het effect van de GRP laag is niet in de onderstaande tabel opgenomen.

Tabel 4-1 Overzicht maximale aanleglengte, op basis aanlegbelasting.

	Gronddekking [m]	Grondslag	Maximale lengte [m]	Opmerkingen
ploegen	1,5	Zand	< 500	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Zand	< 250	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	1,5	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
HDD	25		> 1000	
Direct Pipe	3,0	Zand	< 125	Isolatielaag maatgevend
	5,0	Zand	< 100	Isolatielaag maatgevend
	3,0	Klei	< 225	Isolatielaag maatgevend
	5,0	Klei	< 200	Isolatielaag maatgevend
EPP	3,0	Zand	< 900	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Zand	< 500	Boorvloeistof in annulus van belang
	3,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang

In de tabel is een kleiner dan teken gebruikt om de maximale lengte aan te geven. In enkele gevallen is de bovengrens niet nader onderzocht en is een groter dan teken gebruikt.

4.3 Bedrijfsfase

Voor de bedrijfsfase zijn dezelfde situaties beschouwd als voor de aanlegfase. Er is een situatie in landelijk gebied met een klei grond en een situatie in stedelijk gebied met een zand grond beschouwd. Voor elke aanlegmethode is een aanpak opgesteld voor de bepaling van de wrijvingsweerstand in de bedrijfsfase. De resultaten van WP3 leveren daarbij een deel van de benodigde parameters.

De berekeningen zijn gemaakt met het programma PLE4win. Daarbij zijn de partiële factoren volgens NEN-3650 meegenomen. De beschouwde belastingsituaties zijn:

- Drukloze situatie, BC3.
- Situatie met inwendige druk, BC4.

In dit onderzoek worden 3 aspecten getoetst:

- Maximale toelaatbare spanning in de stalen leiding. De rekgrens bij $T = 130^\circ$: $Re_{(\theta)} = 292 \text{ N/mm}^2$, materiaalfactor 1,1. ($\sigma_v < 500 \text{ N/mm}^2$).
- Maximale toelaatbare radiale vervorming (ovalisatie), grenswaarde 5% (NB in rapport wordt geen getal genoemd, maar wel gebruikt in grafieken).
- Maximaal indrukking van de expansiekussens (2/3 indrukking, bij 3-laags kussens wordt dat maximaal 80 mm).

De volgende aspecten zijn in deze studie niet meegenomen:

- PUR-spanning (compressie).
- Kritische Rek (Buckling).
- Stapsgewijs plastische deformatie (step-wise plastic deformation).

Uit de uitgevoerde berekeningen is de mogelijke aanleglengte (afstand tussen expansielussen) voor de verschillende varianten afgeleid. Tabel 4-2 toont de resultaten. Modelmatig zijn voor de bedrijfsfase berekeningen de aanlegmethoden in een sleuf en bij inploegen gelijk.

Tabel 4-2 Indicatie mogelijke aanleglengte, bedrijfsfase.

Aanlegmethode	Gronddekking [m]	Grondslag	Maximaal mogelijke lengte [m]		
			o.b.v. Spanning Binnenbuis	o.b.v. Radiale Vervorming	o.b.v. Indrukken Kussens
Sleuf & ploegen	1,5	Zand	380	380	170
	3,0	Zand	250	600	180
	1,5	Klei	340	340	160
	3,0	Klei	440	400	160
HDD	25	Zand	240	230	175
Direct Pipe	3,0	Zand	360	350	175
	5,0	Zand	0 ¹	350	175
	3,0	Klei	275	275	160
	5,0	Klei	325	350	160
EPP	3,0	Zand	450	425	175
	5,0	Zand	0 ¹	350	175
	3,0	Klei	310	300	160
	5,0	Klei	325	350	160

¹ Uit de berekeningen blijkt dat een gronddekking van 5 m in combinatie met axiale spanningen in de leiding vanwege verhinderde expansie leidt tot een overschrijding van de toelaatbare spanningen. Dit geldt voor de drukloze fase. Indien er gewelfwerking optreedt en de neutrale grondbelasting wordt gereduceerd zijn loopafstanden tot 500 m haalbaar

De belangrijkste conclusies zijn:

- De afstanden tussen de expansie lussen worden beperkt door de maximaal toelaatbare indrukking van de kussens.
- De radiale vervorming is niet maatgevend voor de maximaal haalbare loopafstand.
- Bij de toets op spanningen is de drukloze situatie met temperatuurbelasting maatgevend ten opzichte van de situatie met inwendige druk.
- De wrijving tussen grond en de leiding is over het algemeen de maatgevende parameter.
- Bij een hogere wrijving kan een grotere afstand tussen de expansie lussen behaald worden.

5 WP 3 Testen van uithardende boorvloeistof

5.1 Algemeen

Als onderdeel van het onderzoek naar aanlegmethoden voor warmte transportleidingen zijn testen uitgevoerd op een uithardende boorvloeistof die bij de verschillende aanlegtechnieken kan worden gebruikt. De testen zijn door CEBO Holland en Deltares uitgevoerd. De uithardende boorvloeistof wordt Drill-Grout genoemd. Onderzocht is hoe de Drill-grout samenstelling de eigenschappen van de boorvloeistof in uitgeharde vorm bepaald en hoe veel wrijving kan worden gemobiliseerd langs de warmte transportleiding.

Het betreft twee series uithardingsproeven (door CEBO en Deltares) en een serie afschuifproeven (door Deltares). In de volgende paragrafen worden de testen en belangrijkste resultaten kort beschreven.

5.2 Uithardingsproeven op boorvloeistof

Bij de testen bij CEBO is de het zandgehalte in Drill-Grout gevarieerd. De temperatuur, verhardingsduur en het percentage Drill-Grout zijn niet gevarieerd. Tevens is een test uitgevoerd met toevoeging van 10% OCMA bentoniet suspensie.

Bij de testen door Deltares is de concentratie Drill-Grout, de verhardingsduur en de temperatuur waaronder het monster kon uitharden gevarieerd. Daarnaast zijn testen uitgevoerd op Drill-Grout monsters van een HDD boring.

5.3 Overzicht resultaten uithardingsproeven

De uithardingsproeven uitgevoerd door CEBO laten zien dat verhoging van het zandgehalte de sterkte van het uitgeharde materiaal enigszins lijkt te verhogen. De toevoeging van OCMA (bentoniet suspensie) daarentegen verlaagd de sterkte. De meetresultaten zijn niet genoeg onderscheidend om conclusies te kunnen trekken.

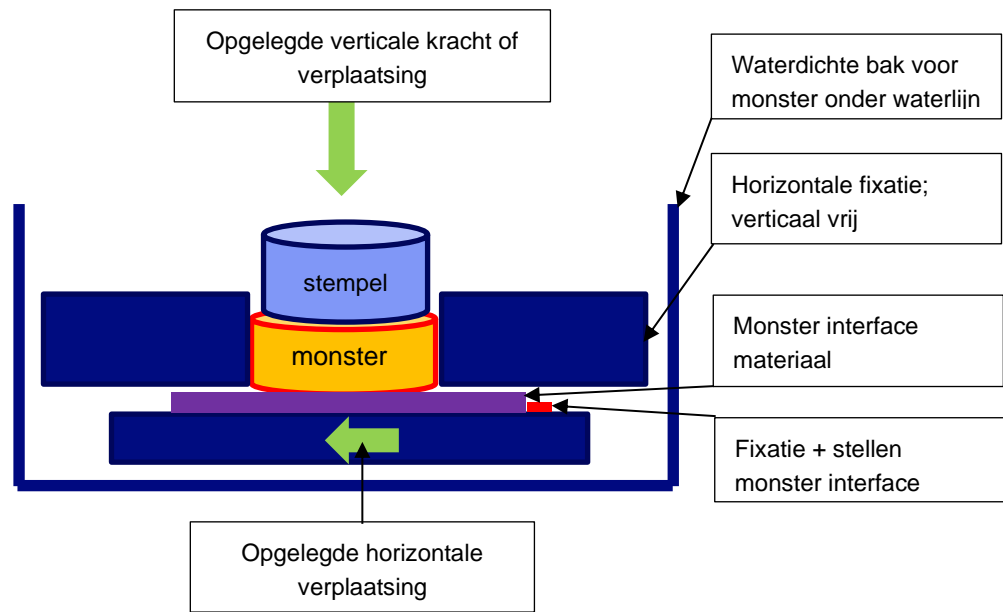
Bij de uithardingsproeven uitgevoerd door Deltares is vastgesteld dat de temperatuur is een belangrijke factor voor de ontwikkeling van de sterkte. Bij een temperatuur van 10 °C verloopt de verharding aanmerkelijk trager dan bij een temperatuur van 20 °C. Zo wordt er een factor 10 gevonden in de gemeten schuifsterkte in de eerste acht weken tussen incubatie bij 10 °C en 20 °C. Hierdoor wordt de eindsterkte van het Drill-Grout bij incubatie bij 10 °C na 100 dagen nog niet gehaald, terwijl deze bij verharden onder 20 °C al na 40 dagen wordt bereikt. Na lange tijd (5 à 8 maanden) wordt ook bij uitharding onder 10 °C de eindwaarde bereikt.

Voor de eindsterkte is de concentratie van Drill-Grout in het mengsel een relevante parameter. Bij toename van het percentage Drill-Grout neemt de sterkte toe. De gevonden eindsterkte (piekwaarde) varieerde tussen $S_u = 20$ kPa bij 140 g/l tot $S_u = 36$ kPa bij 220 g/l.

5.4 Schuifweerstand bij uitgeharde boorvloeistof

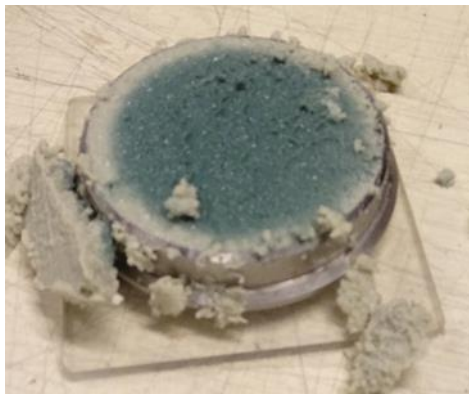
Door Deltares zijn de metingen uitgevoerd met een Direct Shear apparaat. Voor de meting van de wrijvingsweerstand langs de interface Drill-Grout en de leidingbuitenzijde is een DS apparaat omgebouwd, zodat het mogelijk is een stuk leiding te beproeven met de Drill-Grout. Het DS apparaat is dusdanig aangepast dat de proef onder water kan worden uitgevoerd.

Een schematische weergave staat in de onderstaande figuur. Daarin is het “monster” de uitgeharde Drill-Grout en het “monster interface” is de HDPE buitenmantel van de warmte transport leiding.



Figuur 5-1 Schematische weergave Direct Shear apparaat.

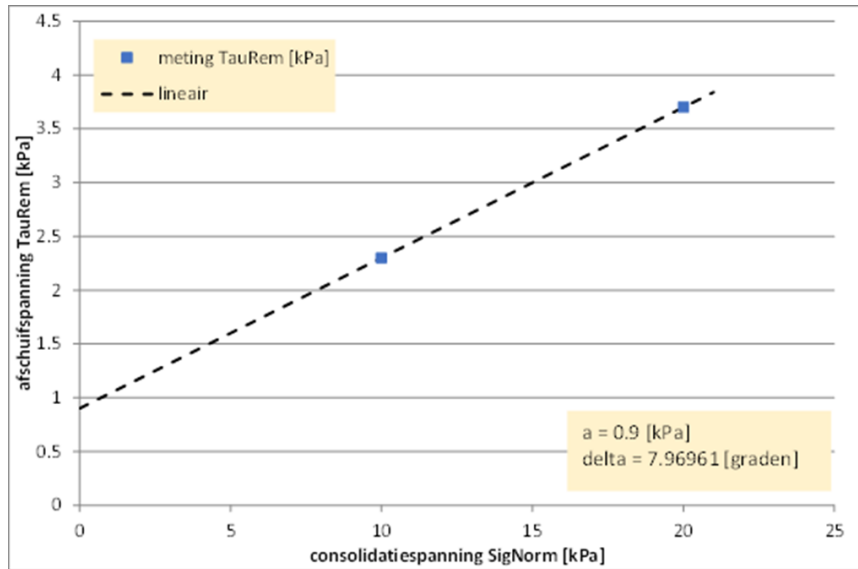
Voorafgaand aan de direct shear proeven zijn de nodige Drill-Grout monsters aangemaakt. De verhardingstijd was 11 maanden bij een temperatuur van 10 °C. De hoogte van het Drill-Grout monster is 20 mm en de diameter 70 mm. Voorafgaand aan de proef zijn de monsters op maat getrimd (Figuur 5-2).



Figuur 5-2 Preparatie Drill-Grout monster.

De proeven zijn uitgevoerd bij twee verticale spanningen (10 kPa en 20 kPa).

De schuifproeven tonen een piekwaarde bij een kleine horizontale verschuiving en daarna een afnemende sterkte bij toenemende vervorming. Voor de bepaling van de waarden voor ontwerpdoeleinden is de schuifsterkte bij 6 mm verplaatsing gebruikt bij de restwaarde van de afschuifweerstand. De resultaten voor afschuiven over HDPE zijn weergegeven in Figuur 5-3.



Figuur 5-3 Wrijving leiding-Drill-Grout en HDPE, resultaat voor test bij uitharden Drill-Grout op $C = 10$ °C en wachttijd van 11 maanden, verplaatsing 6 mm.

Uit de grafiek volgt dat de volgende parameters als best-estimate waarden gebruikt kunnen worden:

- Adhesie: 0,9 kPa ($f_2 = 0,9$ kPa).
- Wrijvingshoek: $\delta = 8^\circ$ ($f_3 = \tan\delta = 0,14$).

6 WP 4 Testen van aanlegmethoden

6.1 Algemeen

Bij Herrenknecht in Schwanau (D) zijn twee series testen uitgevoerd. De eerste serie is in 2022 uitgevoerd en betrof druktesten met de Pipe Thruster op een warmte transport leiding. Het doel van de testen was het bepalen van de maximaal mogelijke drukkracht van de Pipe Thruster waarbij de leiding niet bezwijkt.

De tweede serie testen betroffen de uitbreiding van de EPP methode met een ruimer voor diverse grondsoorten. Het doel van de testen was om de werking van de ruimer in de verschillende grondsoorten te beoordelen.

6.2 Druktesten op warmte transport leiding

6.2.1 Uitgevoerd onderzoek

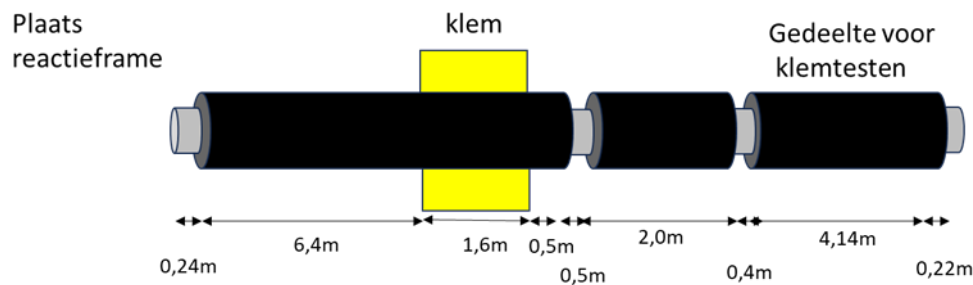
De methode Direct pipe maakt gebruik van een zogenaamde pipe thruster. Bij het onderzoek naar de effecten van de belasting door de Pipe Thruster op een warmte transport leiding is een Pipe Thruster, type HK500PT, van Herrenknecht gebruikt. Figuur 6-1 geeft een beeld van de testopstelling.



Figuur 6-1 Meetopstelling, links de klem van de thruster en rechts het reactieframe; op de voorgrond ligt de gebruikte buis zonder GRP laag, in de opstelling de gebruikte buis met GRP laag (foto: Deltares).

Er zijn warmte transport leidingen van het type ST-PUR-PE gebruikt. De diameter van de binnenbuis was 508 mm en van de buitenbuis 710 mm. Een van de buizen was door TDC-international voorzien van een GRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) laag.

Figuur 6-2 toont de opbouw van de leiding in lengterichting. Er zijn delen van de PUR isolatie en de PE buitenbuis verwijderd.



Figuur 6-2 Leiding met de verschillende delen voor de verschillende testen.

De Pipe Thruster die gebruikt wordt voor de Direct pipe methode moet de leiding eerst radiaal klemmen en vervolgens axiaal in het boorgat drukken. De radiale klemkracht levert een belasting op de warmte transport leiding in de omtreksrichting. Door de lage stijfheid van de PUR isolatie is er een risico aanwezig dat de buitenbuis van PE kan bezwijken. Een GRP verstevigingslaag wordt toegepast om de klemkracht te kunnen verhogen.

Bij het uitvoeren van zowel een klemkracht als de axiale drukkracht wordt een schuifkracht belasting op de warmte transport leiding uitgeoefend. De schuifkracht kan leiden tot slip van de klemmen over de warmte leiding of tot bezwijken van de leiding bij een te hoge drukkracht.

Om zowel de effecten van klemkrachten als van drukkrachten c.q. schuifkrachten te onderzoeken zijn er een series testen gedaan. In de eerste serie is gekeken bij welke radiale spanning de leiding bezwijkt. Hierbij is de leiding niet axiaal belast. De volgende testen zijn met alleen radiale belasting uitgeoefend om de maximale klemkracht te bepalen:

- Warmte leiding.
- Leidingomhulling alleen van GRP, dikte 5 mm.
- Leidingomhulling alleen van GRP, dikte 10 mm.
- Warmte leiding met extra laag van 12 mm GRP.

Voor de bepaling van het effect van de schuifkracht op de warmte leiding zijn testen test uitgevoerd om de maximale drukkracht te bepalen. De uitgevoerde testen betroffen:

- Warmte leiding.
- Warmte leiding met GRP, 5 mm.
- Warmte leiding met GRP, 12 mm.

6.2.2 Resultaten, klemkracht

De klemkracht, en de daarbij horende radiale spanning, waarbij het bezwijken optrad was:

- ST-PUR-PE buis: $F = 3,6 \text{ MN}$, $\sigma_{\text{rad}} = 1,0 \text{ MPa}$.
- ST-PUR-PE-GRP buis, dikte GRP 5 mm: $F = 3,0 \text{ MN}$, $\sigma_{\text{rad}} = 0,8 \text{ MPa}$.
- ST-PUR-PE-GRP buis, dikte GRP 12 mm: $F = 16,5 \text{ MN}$, $\sigma_{\text{rad}} = 4,5 \text{ MPa}$.
- Alleen GRP, dikte 8 mm: $F = 3,5 \text{ MN}$, $\sigma_{\text{rad}} = 1,0 \text{ MPa}$.
- Alleen GRP, dikte 10 mm: $F = 5,0 \text{ MN}$, $\sigma_{\text{rad}} = 1,4 \text{ MPa}$.

Toepassing van een dunne laag GRP van 5 mm leidde niet tot een hogere maar juist een iets lagere waarde voor de klemkracht waarbij bezwijken ontstaat. Bij een grotere dikte van de GRP laag wordt de bezwijkwaarde van de klemkracht wel aanzienlijk verhoogd.

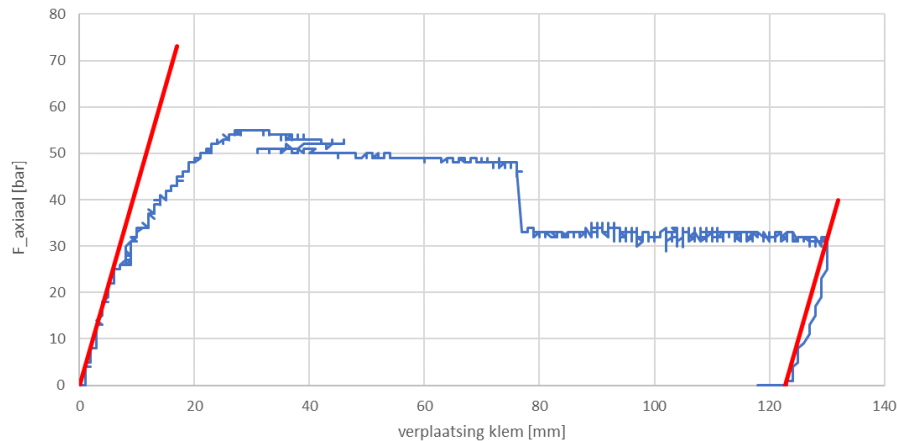
Bij de leiding zonder GRP laag trad bezwijken op in de PE leiding tussen de schalen van de klem van de Pipe Thruster (deze omhullen de buis niet over de gehele omtrek). De vorm bij bezwijken is een uitbuiging van de PE laag. De bezwijkvorm van de leiding voorzien van een GRP laag kan worden beschreven als delaminatie van de verschillende lagen van de GRP.

Evenals bij de leiding zonder GRP treedt bij de leiding met een GRP laag het bezwijken op tussen de schalen van de klem van de Pipe Thruster.

6.2.3 Resultaten, axiale drukkracht

Tijdens de testen is de axiale kracht opgevoerd bij verschillende waarden van de klemkracht. Bij een lage klemkracht blijkt dat de klem over de buis gaat verschuiven.

Voor de laatste test op de ST-PUR-PE leiding is het kracht-verplaatsingsdiagram weergegeven in Figuur 6-3.

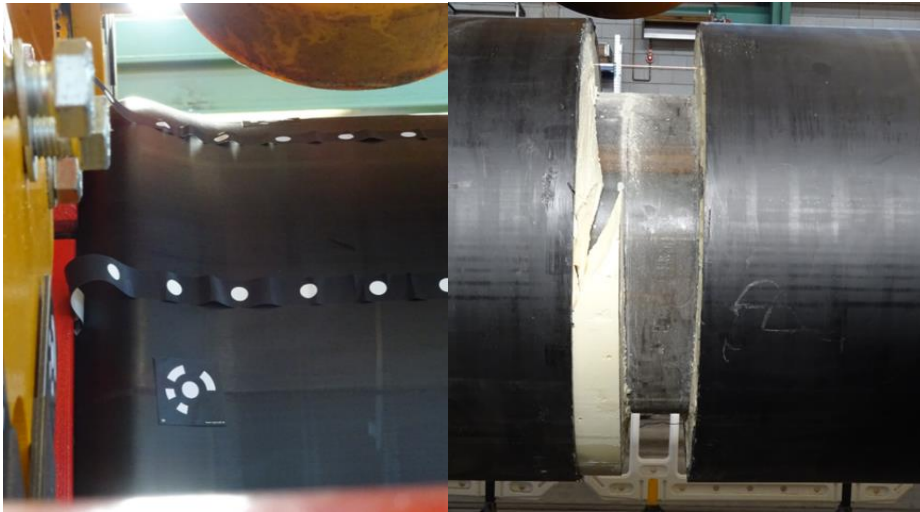


Figuur 6-3 Kracht-verplaatsing verloop axiale belasting, ST-PUR-PE buis, derde test, gecorrigeerd voor externe wrijving (NB voor de axiale kracht komt 1 bar overeen met 15,06 kN).

Uit dit verloop van het kracht-verplaatsingsdiagram is te zien dat tot een axiale belasting van ongeveer 30 bar (450 kN) er sprake is van een lineair verband. Dezelfde helling in het kracht-verplaatsingsverloop wordt ook gevonden tijdens de ontlastfase.

Boven een axiale belasting van 30 bar is het kracht-verplaatsingsverloop niet-lineair. Dit duidt op een begin van bezwijken. Bij een axiale belasting van 54 bar (820 kN) wordt een piekwaarde bereikt waarna de belasting terugvalt. In deze fase is er sprake van een doorgaande verplaatsing in de tijd. Bij een terugval tot 32 bar (480 kN) wordt een stabilisering van de terugval gevonden, maar wel bij een doorgaande verplaatsing.

Geconstateerd is dat de bezwijkvorm bestaat uit het plooiën van de PE buitenbuis net voor de klem en het verschuiven van de isolatielaag over de stalen binnenbuis.



Figuur 6-4 Geconstateerde bezwijkvormen bij drukken St-PUR-PE leiding.

Bij het uitvoeren van de axiale testen is eveneens geconstateerd dat een dunne laag van 5 mm GRP geen positieve invloed heeft op de maximaal te realiseren axiale drukkracht. Bij een standaard warmteleiding kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 450 kN. Tot aan de maximale drukkracht kon de buitenbuis de spanning via de PUR isolatie doorgeven aan de stalen binnenbuis. Boven deze waarde werden de vervormingen van de PE buitenbuis groter (plastisch) totdat er bezwijken optrad door het afschuiven van PUR over de stalen binnenbuis bij een kracht van 820 kN. In de proef opstelling was de afdracht lengte achter de klem van de Pipe Thruster gelimiteerd, zodat misschien een iets grotere waarde dan 450 kN kan worden bereikt bij een langere leiding.

Door de dikte van het GRP te vergroten tot 12 mm ontstaat er een stijvere buitenbuis. Hierdoor kan de drukkracht over een grotere lengte worden afgedragen naar de stalen binnenbuis. Dit blijkt uit een uitgevoerde test met de Pipe Thruster. Tijdens de test kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 777 kN alvorens er plastische deformatie op zou treden. Daadwerkelijk bezwijken door afschuiving van PUR langs de stalen binnenbuis werd gemeten bij een kracht van 1438 kN.

Om inzicht te krijgen in de krachtwerving tijdens het drukken van een buis zijn een aantal EEM berekeningen met PLAXIS uitgevoerd. Uit de resultaten volgt dat:

- De axiale kracht vanuit de klem wordt niet alleen door de leiding voor de klem, maar ook door het gedeelte van de leiding achter de klem, opgenomen.
- De stijfheid van de buitenbuis de lengte waarover de axiale kracht van de klem wordt ingeleid beïnvloed. Een hogere axiale stijfheid, bijvoorbeeld door het toepassen van een GRP laag, is gunstig. Dit beperkt ook de maximaal optredende schuifspanning in de isolatielaag.
- De grootste schuifspanning in de isolatielaag wordt net voor de klem van de Pipe Thruster gevonden.

6.3 Geschiktheidstesten combinatie EPP met ruimer

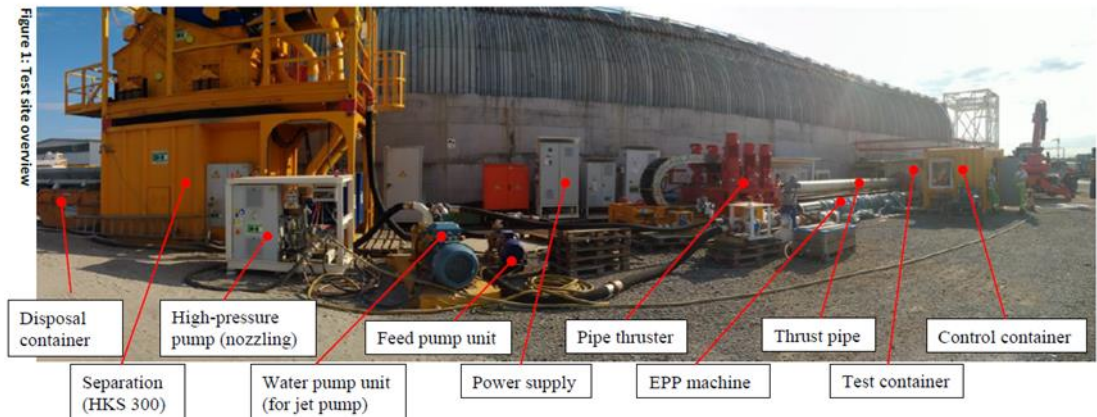
6.3.1 Uitgevoerd onderzoek

De toepassing van EPP met een ruimer tijdens het intrekken is een uitbreiding van de EPP methode om grotere diameter leidingen aan te kunnen leggen. De aanleg bestaat dan uit drie fasen. In de eerste fase wordt een standaard pilot met EPP uitgevoerd. Vervolgens wordt aan de boorbuizen de ruimer en de productieleiding gekoppeld.

Daarna wordt de ruimer met de te installeren leiding teruggetrokken. Bij het aanleggen van een leiding met deze methode zijn de bouwfases dus als volgt:

1. Maken van een pilot boring met de EPP machine.
2. Monteren van de ruimer en de te installeren leiding.
3. Terugtrekken van de ruimer en de te installeren leiding.

Door Herrenknecht is een testopstelling gebouwd. Deze bestond uit een modelcontainer met afmetingen (L*B*D) van 4,5 m * 3,3 m * 3,3 m. Tijdens de testen was de gronddekking op de bovenkant van de leiding 2,0 m. Tijdens de test is over een lengte van 4,5 m geruimd. De startpositie en eindpositie van de ruimer lagen ongeveer 0,2 m uit de kopwanden. De diameter van de ruimer was 0,79 m.



Figuur 6-5 Overzicht testopstelling (foto: Herrenknecht).



Figuur 6-6 Binnenzijde modelcontainer voor vullen met grond; aan achterzijde is de doorvoer door de wand en de ruimer zichtbaar.

Tijdens de test is de ruimer gemonteerd op het EPP boorbuizensysteem getest door de ruimer in een met grond gevulde container voort te bewegen.

De test is uitgevoerd bij verschillende grondsoorten:

- Los gepakt zand.
- Verdicht zand.
- Veen.
- Stijve klei.
- Grind met stenen.

In alle grondsoorten werd de ruimer over de volledige lengte van 4,5 teruggetrokken.

6.3.2 **Belangrijkste resultaten**

Bij de testen op de verschillende grondsoorten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij alle onderzochte grondsoorten (zeer los zand, vast zand, klei, veen, grind) kon de ruimer worden gebruikt. Uit de testen zijn een aantal aandachtspunten naar voren gekomen waarmee het systeem kan worden geoptimaliseerd.
- Bij los gepakt zand is er een kans op maaiveld zakking. Het wordt aanbevolen om de voortgangssnelheid en de hoeksnelheid van de ruimer hierop aan te passen. Een hogere voortgangssnelheid in combinatie met een lagere hoeksnelheid vermindert de kans om maaiveld zakking. Meting van de druk in de boorkop zou hierbij wenselijk zijn. Er kan dan worden aangetoond dat de gronddrukken dusdanig hoog blijven dat de zakking van het maaiveld gering is.
- Bij vast gepakt zand is de maaiveld zakking door de ruimer zeer gering. Bij de uitgevoerde testen en de gebruikte procesparameters, bleek de maaiveld zakking te verwaarlozen.
- Bij veen dient er aandacht te worden besteed aan de voortgangssnelheid. Bij de test is er sprake geweest van een hoge voortgangssnelheid om maaiveld zakking te verminderen, maar bij een te hoge voortgangssnelheid kan er te weinig veen worden weggeboord en wordt het maaiveld omhoog gedrukt.
- Bij stijve klei is het van belang een hogere hoeksnelheid van de ruimer te hanteren en een lage voortgangssnelheid, zodat verstopping van het afvoersysteem niet optreedt.
- Bij grind is er alleen naar de uitvoerbaarheid en mogelijke verstoppingen van de leidingen gekeken, er zijn geen geotechnisch relevante metingen uitgevoerd.

7 WP5 Keuze voor een aanlegmethode

7.1 Algemeen

De meest kansrijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen zijn vastgesteld:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe.
- EPP.
- Ploegen.

Voor deze methoden is een keuze methode uitgewerkt. De keuze methode is gebaseerd op een ingekorte multi criteria analyse. Door op een systematische wijze de aanlegmethode te beschouwen aan de hand van criteria, die worden bepaald door meerdere parameters wordt een objectieve en reproduceerbare keuze voor een aanlegmethode mogelijk, voor een bepaald leidingtracé.

Vervolgens is, ter illustratie, deze methodiek voor twee situaties is toegepast.

7.2 Gevolgde aanpak

Voor de keuze is een verkorte versie van een zogenaamde Multi Criteria Analyse (MCA) gebruikt.

Bij de toepassing van de keuze methode worden de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaling van de waarde van de criteria aan de hand van de individuele parameter waarden.
2. Bepaling van de weegfactoren die aangeven hoe belangrijk een criterium is ten opzichte van de andere criteria. Hierbij wordt het criterium kosten op een andere manier meegenomen.
3. Bepaling van de score per aanlegmethode en vergelijking van de best scorende methode met de andere aanlegmethoden.

De keuze van de parameter waarden en de weegfactoren zijn het resultaat van een kwalitatieve beoordeling, maar de berekening van de criteria waarden en de eind score per aanlegmethode volgen uit eenvoudige formules, die in het rapport van WP 5 zijn beschreven. Door de resultaten van de tussenstappen van de berekeningen vast te leggen wordt de keuze voor een methode reproduceerbaar.

De aanleg in open sleuf is hierbij als referentie gebruikt. Deze heeft voor alle criteria (zie paragraaf 3.2) het cijfer 5 gekregen. De overige methoden zijn verder per parameter beoordeeld op de vraag hoeveel beter of slechter ze ten opzichte van de open sleuf methode scoren. Dat is uitgedrukt in een cijfer tussen 1 (veel slechter) tot 10 (veel beter). Door een team van experts zijn de verschillende factoren bepaald. Daarbij zijn twee situaties beschouwd, aanleg in een stedelijk met een zandondergrond en aanleg in een landelijk gebied met een klei ondergrond.

Verder zijn de zogenaamde afbreuk parameters bepaald. Dat zijn parameters welke de inzet van een bepaalde methode onmogelijk maakt.

7.3 Resultaten

Voor de twee beschouwde situaties stedelijk gebied en landelijk gebied staan in Tabel 7-1 en Tabel 7-2 de resultaten van de analyse vermeld. Hierbij is voor het aspect 'kosten de wegingsfactor zodanig gekozen dat de kosten het eindoordeel voor 60% bepalen. Benadrukt wordt dat dit een voorbeeld betreft, voor een concreet project kan de beoordeling en kunnen de wegingsfactoren anders zijn, waardoor een ander resultaat mogelijk is.

Tabel 7-1 Resultaat MCA stedelijk gebied.

	Afbreuk parameter	Score
Open sleuf		6,5
HDD		7,7
Direct Pipe	Coating buitenbuis	7,6
EPP		8,2
Ploegen	Overige Infrastructuur	8,9

Uit de tabel komt duidelijk naar voren dat in dit geval de EPP methode het beste kan worden ingezet in stedelijk gebied. De warmte leiding kan onder de bestaande infrastructuur worden aangelegd en de aanleg kan nauwkeurig plaatsvinden. De overlast is beperkt. Doordat de warmte transport leiding direct achter de in WP 4 ontwikkelde ruimer kan worden geïnstalleerd is er niet veel invloed aan het oppervlak te verwachten.

Tabel 7-2 Resultaat MCA landelijk gebied.

	Afbreuk parameter	Score
Open sleuf		6,5
HDD		7,8
Direct Pipe	Coating buitenbuis	7,6
EPP		8,2
Ploegen		9,1

In landelijk gebied is vaak niet veel ondergrondse infrastructuur aanwezig. Bij toepassing van de conventionele aanleg met een open sleuf is veel grondverzet en bemaling noodzakelijk. Uit de bovenstaande tabel komt duidelijk naar voren dat de Ploegmethode het beste kan worden ingezet in het landelijk gebied. De warmte transportleiding kan snel en kosteneffectief worden aangelegd en de aanleg heeft nagenoeg geen effect op het grondwater. De overlast is zeer beperkt.

8 Conclusie

Er zijn verschillende mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen. De standaard methode voor de aanleg van leidingen is van oudsher een open sleuf. De grond wordt in lagen verwijderd tot de gewenste diepte en indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd. Deze open sleuf methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien waarmee nieuwere methoden kunnen worden vergeleken.

Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om aanlegmethoden die in beide situaties kunnen worden ingezet te beschouwen in het AAMBEELD onderzoek. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen van de mogelijke aanleg methoden zijn een aantal aanleg methoden geselecteerd die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen:

- Open Sleuf (referentie methode).
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe.
- EPP.
- Ploegen.

Bij de methoden Direct Pipe en EPP bleken aanvullende innovaties nodig te zijn om de standaard warmte transport leiding, bestaande uit een stalen binnenbuis met PUR isolatie materiaal en een omhullende PE buis, te kunnen installeren. Bij de EPP methode bleek de ontwikkeling van een ruimer noodzakelijk om de gewenste grote diameter te kunnen installeren. Bij de Direct Pipe methode bleek het nodig om de buitenbuis bestaande uit PE te verstevigen. De schalen van de klem van de Pipe Thruster oefenen een dusdanig grote belasting op de warmte transport leiding uit, dat het nodig is om een verstevigingslaag aan te brengen op de PE buitenbuis. Hiervoor is GRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) gebruikt.

Met behulp van deze innovaties is het mogelijk om de bovenstaande aanleg methoden toe te passen voor de installatie van warmte transportleidingen. Om een goede berekening voor het ontwerp van een warmte transportleiding te kunnen maken is het tevens nodig gebleken om de wrijvingseigenschappen gerelateerd aan de te gebruiken boorvloeistof te onderzoeken. In het AAMBEELD onderzoek zijn daarom ook metingen uitgevoerd om de wrijving tussen een PE buitenbuis en de boorvloeistof vast te stellen. Bij de boorvloeistof is aandacht besteed aan de vloeibare toestand en de uitgeharde toestand na installatie van de warmte transport leiding.

Bij ontwerp berekeningen van de warmte transportleiding speelt de aanlegmethode een rol. Er moeten ten behoeve van het ontwerp berekeningen worden uitgevoerd voor een warmte transportleiding in de aanlegfase en in de bedrijfsfase. Het doel van de berekeningen voor de aanlegfase is het bepalen wat de maximale lengte is die met de aanlegmethode gehaald kan worden zonder dat de leiding schade ondervindt. In het AAMBEELD onderzoek zijn de lengten per aanlegmethode berekend voor verschillende ondergronden.

Het doel van de berekeningen voor de bedrijfsfase is te bepalen welke lengte tussen de expansielussen mogelijk is als functie van de aanlegmethode. Expansie lussen worden bij de warmte transportleidingen in het ontwerp opgenomen om axiale verlenging van de leiding bij opwarming in de bedrijfsfase mogelijk te maken zonder dat er delen van de leiding bezwijken.

In het AAMBEELD onderzoek zijn de lengten tussen de expansie lussen per aanlegmethode bepaald voor verschillende ondergronden.

De verschillende aanlegmethoden kunnen worden ingezet om de warmte transportleiding over een aanzienlijke lengte aan te leggen. Alleen bij de inzet van de Direct Pipe methode zijn er nog vraagtekens, omdat er versterking van de PE buitenbuis nodig is.

Alle onderzoeksresultaten van het AAMBEELD onderzoek zijn gebruikt bij de toepassing van een keuze methode om een aanlegmethode voor een warmte transport leiding te selecteren. keuze methode uitgewerkt. De keuze methode is gebaseerd op een ingekorte multi criteria analyse (MCA). Door op een systematische wijze de aanlegmethode te beschouwen aan de hand van criteria, die worden bepaald door meerdere parameters wordt een objectieve en reproduceerbare keuze voor een aanlegmethode mogelijk, voor een bepaald leidingtracé.

De ontwikkelde keuze methode met de bijhorende formules is als voorbeeld toegepast op een warmte transport leiding tracé in het landelijke gebied met een klei ondergrond en in het stedelijke gebied met een zand ondergrond. In het landelijke gebied kwam de methode ploegen naar voren als meest geschikte methode. In het stedelijke gebied kwam de EPP techniek met ruimer naar voren als beste keuze. Opgemerkt wordt dat de toepassing van de keuze methodiek een voorbeeld betreft, voor een concreet project kan de beoordeling anders zijn, waardoor een ander resultaat mogelijk is.

Met behulp van de ontwikkelde kennis en de ontwikkeling van de keuze methode voor aanlegtechnieken heeft het AAMBEELD onderzoek een bijdrage kunnen leveren aan duurzame warmtenetten binnen MMIP4 door het vergroten van inzicht over de diverse aanlegmethoden in de Nederlandse ondergrond en het daardoor verlagen van de risico's bij aanleg en tijdens gebruik.

A Rapport WP1, Vergelijking aanlegmethoden

Vergelijking aanleg methoden

Aambeeld WP1



Vergelijking aanleg methoden
Aambeeld WP1

Vergelijking aanleg methoden

Aambeeld WP1

Opdrachtgever	Aambeeld TKI urban energy
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Aanlegmethoden, warmte leidingen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	01-03-2024
Projectnummer	11207943-003
Document ID	11207943-003-GEO-0001
Pagina's	22
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Henk Kruse	

Samenvatting

Er zijn verschillende mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen. De voor- en nadelen van de methoden in verschillende omstandigheden zijn beschouwd. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen volgen een aantal aanleg methoden die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen.

De standaard methode voor de aanleg van leidingen is van oudsher een open sleuf. De grond wordt in lagen verwijderd tot de gewenste diepte en indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd. Deze standaard methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien. De overige methoden die mogelijk zijn voor de aanleg zijn in verschillende categorieën onderverdeeld:

- Open boorgat.
- Directe installatie.
- Gestuurde installatie.
- Maaiveld gestuurde installatie.

Door de voor- en nadelen van de methoden te beschouwen met een team van specialisten is per methode bekeken of de methode aan de criteria voldoet die van belang zijn bij de aanleg van warmte transport leidingen. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Expert opinions van specialisten zijn gebruikt om een selectie te maken van kansrijke methoden. De volgende methoden komen na voren om nader uit te werken in het AAMBEELD onderzoek:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe (mits nader uitgezocht).
- EPP (mits nader uitgezocht).
- Ploegen.

In WP2 van het AAAMBEELD onderzoek worden voor deze technieken vergelijkende berekeningen voor de aanlegfase en de bedrijfsfase gemaakt. In WP 5 worden deze technieken verder onderling vergeleken, gebruikmakend van de resultaten van de overige werkpakketten.

De aanleg in een open sleuf is de referentie methode. De aanleg methoden Direct Pipe en EPP zijn in principe kansrijk, maar nader experimenteel onderzoek is nodig om te beoordelen of deze methoden inderdaad in de toekomst voor aanleg van warmte transportleidingen kunnen worden gebruikt. Het nader onderzoek naar deze methoden is uitgevoerd in WP 4 van AAMBEELD.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Algemeen	6
1.2	Werkpakketten	6
2	Aanlegsituaties	7
2.1	Cases	7
2.1.1	Case stedelijk	7
2.1.2	Case landelijk	8
2.2	Leiding gegevens	9
2.3	Ondergrond	11
3	Aanlegmethoden	13
3.1	Algemeen	13
3.2	Referentie methode	13
3.3	Open boorgat	13
3.4	Directie installatie	13
3.5	Gestuurde installatie	14
3.6	Maaiveld gestuurde installatie	14
4	Beoordeling aanleg methoden	15
4.1	Algemeen	15
4.2	Voor- en nadelen	15
4.3	Criteria	15
4.4	Resultaten beoordeling	16
5	Uitwerking aanleg methoden	18
5.1	Ontwerp uitgangspunten	18
5.2	Diepteligging	18
6	Conclusie	19
A	Voor- en nadelen aanlegmethoden	20
B	Onderwerpen van belang bij aanleg	21

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden voor leidingen zoals E-Powerpipe, Direct Pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van HDD) is er behoefte aan een vergelijkingsystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Daarnaast blijken er uitvoeringstechnisch verbeteringen mogelijk ten aanzien van de toepassing van boorvloeistoffen en de beoordeling van de voorgestelde installatiemethoden in relatie tot de eisen met betrekking tot warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project 'AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD (AAMBEELD)' opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Dit reduceert aanlegkosten en hinder voor de omgeving.

Hieruit komen een aantal subdoelstellingen uit naar voren bij de huidige stand van de techniek:

- Methodieontwikkeling vergelijking aanlegmethoden.
- Ontwerp van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen.
- Beoordeling geschiktheid bestaande en innovatieve installatiemethoden aan de hand van ervaringscijfers.
- Optimalisatie boorvloeistof(fen) voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen.
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen.
- Synthese ten behoeve van ontwikkeling praktijkrichtlijn(en).

1.2 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten tot Richtlijn.

Dit rapport beschrijft de resultaten van WP1. Als onderdeel van werkpakket 1 is door verschillende specialisten naar de mogelijke aanlegmethoden voor warmte leidingen gekeken. De voor- en nadelen van de methode in verschillende omstandigheden is beschouwd. Hieruit volgen een aantal methoden die kansrijk zijn voor de aanleg van warmte transportleidingen.

2 Aanlegsituaties

2.1 Cases

Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. De verschillende aanleg methode zullen dus zowel voor een stedelijke case als een landelijke case worden beschouwd. Voor een inzicht in de situatie worden in dit hoofdstuk enige kenmerkende waarden genoemd. Deze zullen in de andere werkpakketten van AAMBEELD ook worden gebruikt.

2.1.1 Case stedelijk

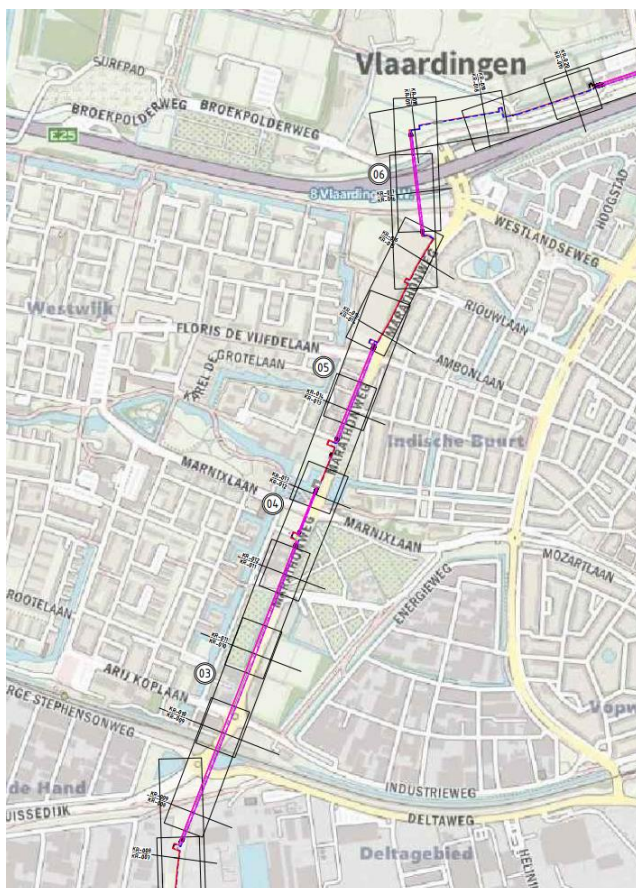
Voor de stedelijke case, wordt een deeltracé van WarmtelinQ voorgesteld. Het gaat hier specifiek voor een deeltracé dat ligt nabij de Marathonweg in Vlaardingen. In Bijlage 1 (Case – Stedelijk) zijn de ontwerptekeningen beschikbaar gesteld van dit deeltracé.

Het tracé is een veldstrekking tot de stad, waarbij het tracé voor onderzoek beperkt wordt tot Tabel 2.2. Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk zijn in Tabel 2.2 aangegeven.

Tabel 2.1 Keuze 2.2 Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk.

Beschrijving	Tekening referentie	Wijziging	Datum
Totaal Tekening	X-851-KT-001 v1	1	15-11-22
Routekaarten	X-851-KR-009 T/M 015 V1	1	15-11-22

In de onderstaande figuur is een overzicht gegeven van het tracé in het stedelijke gebied.



Figuur 2.1 Tracé stedelijke case – Marathonweg – Rotterdam – Vlaardingen.

2.1.2

Case landelijk

Voor de landelijke case, wordt wederom een deeltracé van WarmtelinQ voorgesteld. De ontwerptekeningen zijn opgesteld in de periode dat het project nog Leiding door Midden heette (dit tracé is uiteindelijk onderdeel geworden van WarmtelinQ). Het Tracé is het warmteleiding tracé tussen Vlaardingen en Delft. In Bijlage 2 (Case – Landelijk) Zijn de ontwerptekeningen beschikbaar gesteld van dit tracé

In de volgende tabellen zijn de gehanteerde tekeningen voor de landelijke case gegeven. In Figuur 2.2 is een overzicht van het tracé gegeven.

Tabel 2.3 Keuze 2.4 Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk.

Beschrijving	Tekening referentie	Wijziging	Datum
Totaal Tekening	RS17035-SV-TT06-c	1	3-7-19
Routekaarten	RS17035-SV-RK16 – RK30	c/g	3-7-19



Figuur 2.2 Tracé landelijke case– landelijk tracé, Vlaardingen – Delft.

2.2 Leiding gegevens

Om het aantal mogelijkheden qua materialen te beperken worden de materiaalgegevens die gebruikt zijn voor WarmtelinQ overgenomen. In zowel de stedelijke als landelijke case, betreft de leiding een stadsverwarmingsleiding, waarbij de diameter van de mediumvoerende leiding een DN700 betreft. Binnen WarmtelinQ is gekozen voor P355NH als standaardmateriaal i.p.v. P235GH. In Tabel 2.5 zijn de specificaties voor P355NH gegeven.

Tabel 2.5 Materiaalspecificaties – P333NH.

Gegevens			Eenheid
Kwaliteit staal	-	P355NH	-
Norm	-	NEN-EN 10217-3	-
Elasticiteitsmodulus	E	206500	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α	$1,24 \cdot 10^{-5}$	mm/mm/°C
Dwarscontractiecoëfficiënt	ν	0,30	-
Materiaalfactor	γ_m	1,1	-
Rekgrens bij $T \leq 50 \text{ °C}$	$R_{e(0)}$	355	N/mm ²
Rekgrens bij $\theta = 130 \text{ °C}$	$R_{e(\theta)}$	292	N/mm ²

In Tabel 2.6 zijn de specificaties van de veldstrekking weergegeven waarmee gerekend gaat worden in dit onderzoek, deze specificaties zijn afkomstig uit WarmtelinQ. Als fabricagetolerantie op de wanddikte is 8% genomen conform NEN-EN 10217-3 als conservatief uitgangspunt.

Tabel 2.6 Keuze 2.7 Materiaalspecificaties – DN700/900.

Gegevens		DN700	Eenheid
Uitwendige diameter staal	D _u	711,0	mm
Wanddikte staal linepipe	t _n	8,0	mm
Negatieve fabricagetol.	Tol	8	%
Volumieke massa staal		78,5	kN/m ³
Uitwendige diam. PE Mantel	D _{u-buit}	900	mm
Wanddikte PE	t _n	8,7	mm
E modulus PE		1000	MPa
Treksterkte PE		14	MPa
Volumieke massa PE		9,56	kN/m ³
Druksterkte PUR		0,15	MPa
Schuifsterkte PUR		0,08	MPa
Volumieke massa PUR		0,60	kN/m ³
E modulus PUR		1000	MPa
Dwarscontractie coefficient PUR		0,2	-

In Tabel 2.8 Keuze Tabel 2.9 zijn de specificaties van de bochten weergegeven waarmee wordt gerekend. De opgegeven wanddikte voor de bochten betreft de minimale wanddikte na buigen. Voor de wanddikteafname door buigen zijn percentages van 16,6% en 10% gehanteerd voor respectievelijk 3D en 5D bochten. Dit zijn conservatieve uitgangspunten. De te hanteren wanddikteafname door buigen zal in een later stadium definitief worden vastgesteld.

Tabel 2.8 Keuze Tabel 2.9 Materiaalspecificaties – DN700/900 – bochten.

Gegevens		DN700	Eenheid
Uitwendige diameter staal	D_u	711,0	mm
Uitwendige diam. PE Mantel	D_{u-buit}	900	mm
Wanddikte staal bocht	t_n	14,2	mm
Wanddikte na buigen (3D)	t_{3D}	11,84	mm
Wanddikte na buigen (5D)	t_{5D}	12,78	mm
Negatieve fabricagetol.	Tol	8	%
Bochtstraal (5D)	R_{5D}	3555	mm

De 5D bochten zullen in de beide cases worden beschouwd.

In Tabel 2.10 Keuze Tabel 2.8 staan de belangrijkste procescondities gegeven die gelden voor het warmtenetwerk van WarmtelinQ. Deze condities zijn voor beiden cases van toepassing

Tabel 2.10 Keuze Tabel 2.8 Procescondities.

Gegevens			Eenheid
Ontwerptemperatuur	T_o	130	°C
Maximale bedrijfstemperatuur	T_b	120	°C
Aanlegtemperatuur	T_a	10	°C
Ontwerpdruk	P_o	25	bar
Bedrijfsdruk	P_b	23	bar

2.3 Ondergrond

Voor de ondergrond wordt uitgegaan van 2 situaties (stedelijk gebied en landelijk gebied), die elk worden gekenmerkt door een eigen ondergrond grondsoorten. Voor de 2 te beschouwen situaties worden de volgende parameters gehanteerd:

- Stedelijk gebied.
 - Ondergrond van zand.
 - Grondwaterstand (GWS) is $mv - 0,25$ m.
- Landelijk gebied.
 - Ondergrond: 8 m klei op zand.
 - GWS = $mv - 0,75$ m.

In het vervolg van dit rapport worden de twee situaties aangeduid met hun kenmerkende grondsoort, dus als 'zand' en 'klei'.

Tabel 2.11 toont de voor deze studie gebruikte grondparameters.

Tabel 2.11 Keuze grondparameters.

Grondsoort	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	δ/ϕ [-]	δ [°]i	c' [kPa]	a/c	c_u [kPa]	E_{100} [MPa]
Zand, los tot matigt	17/20	30	0,67	20	0	0,5	0	30
klei, organisch slap tot matigt	14/14	15	0,50	7,5	0,5	0,5	17,5	0,75

3 Aanlegmethoden

3.1 Algemeen

Er bestaan verschillende aanlegmethoden voor leidingen. Van oudsher werden leidingen aangelegd in een open sleuf. Andere aanlegmethoden zijn zogenaamde sleufloze methoden waarbij een leiding zonder graven op de gewenste diepte wordt aangelegd. In dit hoofdstuk worden de verschillende aanlegmethoden op hoofdlijnen met elkaar vergeleken. Er wordt dan enerzijds een overzicht verkregen van de mogelijkheden van de verschillende technieken en anderzijds kan dan een selectie worden gemaakt van verder uit te werken methoden binnen het Aambeeld project.

Bij de technieken die hieronder zijn beschouwd wordt uitgegaan van een geprefabriceerde leiding. Technieken waarbij leiding elementen tijdens de aanleg aan elkaar worden gelast worden niet beschouwd in verband met de bewerkelijke lasprocedure bij geïsoleerde warmteleidingen.

3.2 Referentie methode

De standaard methode voor de aanleg van leidingen is van oudsher een open sleuf. Hierbij wordt de grond in lagen verwijderd tot de gewenste diepte. Indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer in lagen teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd.

Deze standaard methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien. Andere ontwikkelde methoden om de leiding aan te leggen kunnen met de referentie methode worden vergeleken.

Bij de aanleg in een open sleuf kunnen kleine en grote diameter leidingen worden aangelegd.

3.3 Open boorgat

Bij de methode horizontaal gestuurd boren wordt een open boorgat gecreëerd waarin een leiding wordt ingetrokken. Het boorgat met een gebogen vorm wordt met behulp van boorvloeistof aangelegd tussen een intrede en uittrede punt. In het met boorvloeistof gevulde open boorgat, dat op een grote diepte moet worden aangelegd in verband met boorvloeistofdrukken tijdens het maken van het boorgat, wordt de leiding ingetrokken.

De diameter van het boorgat is veel groter dan de diameter van de aan te leggen leiding. De leiding aanleg met de HDD techniek kan alleen diep worden uitgevoerd.

3.4 Directie installatie

Bij de directe installatie wordt de aan te leggen leiding al direct achter de boorkop geplaatst en bij de voortbeweging van de boorkop in het gemaakt boorgat aangelegd.

De Direct Pipe methode bestaat uit een Gesloten front boormachine die voor de aan te leggen leiding wordt geplaatst. De boormachine met de leiding worden vervolgens door een Pipe Thruster ter plaatse van het intrede punt door de grond geduwd. De klemmen van de Pipe Thruster omklemmen de leiding tijdens het voortbewegen.

De diameter van het boorgat is iets groter dan de diameter van de aan te leggen leiding. Directe installatie met de Direct Pipe techniek kan zowel diep als ondiep worden uitgevoerd.

3.5 Gestuurde installatie

Bij gestuurde installatie wordt eerst een verbinding gemaakt tussen het intrede en het uittrede punten en wordt vervolgens de leiding tussen deze punten aangelegd.

Tot deze categorie methoden horen:

- EPP (E-power pipe).
- Gestuurde avegaar.
- HPP (Horizontal pipe pushing).
- Guided Ramming.

De meest geavanceerde techniek is de EPP methode waarbij een boormachine met grote diameter boorbuizen een verbinding maakt tussen het intrede en uittrede punt. Door middel van terugtrekken en toepassing van een Ruimer kan de leiding worden aangelegd.

Er bestaan een aantal varianten met betrekking tot gestuurde installatie. Technieken als de gestuurde avegaar techniek met een open front boormachine of het gestuurd induwen van de leiding met een open front boormachine (Horizontal pipe pushing, HPP) zijn voorbeelden van varianten. Ook het pneumatisch gestuurd voortbewegen van de leiding (Guided Ramming) kan als variant worden beschouwd.

De diameter van het boorgat is nauwelijks groter dan de diameter van de aan te leggen leiding. Gestuurde installatie met de EPP techniek of een andere variant wordt veelal ondiep uitgevoerd.

3.6 Maaiveld gestuurde installatie

Bij een maaiveld gestuurde installatie wordt de leiding direct tussen intrede en uittrede punt aangelegd en wordt de aanleg gestuurd vanaf het maaiveld. Tot deze categorie methoden horen:

- Pipe Express.
- Ploegen.

Pipe Express methode is gebaseerd op het induwen van de leiding door een Pipe thruster en het vanaf maaiveld sturen van een open front boormachine die op de voorzijde van de leiding is bevestigd. Bij de ploegmethode wordt een ploeg die de grond voor de leiding verdringt, door de grond getrokken door een lier. De leiding is bevestigd achter de ploeg.

De diameter van het boorgat is bij de Pipe express nauwelijks groter dan de diameter van de aan te leggen leiding. Bij de Ploegmethode is er geen sprake van een boorgat. De maaiveld gestuurde installatie kan alleen ondiep worden uitgevoerd.

4 Beoordeling aanleg methoden

4.1 Algemeen

Bij de eerste beoordeling van de beschreven aanlegmethoden in hoofdstuk 3 wordt beschouwd of de methoden voldoende geschikt zijn voor de aanleg van grote diameter warmte transport leidingen bestaande uit een stalen binnenbuis met PUR isolatie materiaal en een PE omhullende buis.

Door de voor- en nadelen van de methoden te beschrijven kan per methode worden bekeken of de methode aan de criteria voldoet die van belang zijn bij de aanleg van warmte transport leidingen.

4.2 Voor- en nadelen

De voor- en nadelen van de verschillende methoden zijn in Bijlage A weergegeven. In Bijlage A1 is door Kouwenberg Infra een aantal methoden behandeld. In Bijlage A2 zijn aanvullend door Denys een aantal andere methoden beschouwd.

De voor -en nadelen zijn op algemene wijze beschouwd en beschreven. De beschrijvingen in de bijlagen zijn gebaseerd op ervaringen bij uitvoering van de methoden door de jaren heen.

4.3 Criteria

Voor een onderlinge vergelijking van de verschillende aanlegmethoden moeten de voor- en nadelen worden beoordeeld. Daarvoor moeten eerst de verschillende criteria waarop de methoden worden vergeleken worden vastgesteld. De gebruikelijke criteria voor een leiding aanleg project zijn vooral gerelateerd aan de leiding en de directe omgeving. Ook zijn de aanleg kosten natuurlijk een belangrijk criterium. Hieronder zijn de geselecteerde criteria weergegeven:

- Grondwater problematiek, Bij het aanleggen van de leiding moet rekening worden gehouden met grondwaterstroming. De grondwateromstandigheden moeten zodanig zijn dat aanleggen van de leiding niet wordt belemmerd. Ook moet de aanleg geen verslechtering opleveren van de grondwater condities.
- Grond problematiek, Bij aanleg van de leiding moet grond worden verplaatst of verwijderd. De verplaatsing of verwijdering moet met de apparatuur behorend bij de aanleg methode kunnen worden uitgevoerd.
- Ervaring met methode. Een methode voor leiding aanleg kan beter worden toegepast als er in eerdere projecten al ervaring mee is opgedaan. Leidingen zoals warmte transport leidingen met isolatie en een omhullende buis reageren anders bij een leiding aanleg methode dan leidingen van een ander materiaal. Ervaring met de aanleg van het type leiding bij inzet van een bepaalde methode is daarom ook van belang.
- Leiding belasting versus sterkte bij aanleg. Bij de aanleg worden er allerlei belastingen op de leiding uitgevoerd. De belastingen moeten toelaatbaar zijn. De leiding mag tijdens aanleg niet worden beschadigd.
- Complexiteit uitvoering. Afhankelijk van de omgeving kunnen er bij het uitvoeren van een bepaalde aanleg methode allerlei handelingen nodig zijn die bijdragen aan de complexiteit van een methode.
- Functioneren leiding na aanleg. Als de leiding is aangelegd met een bepaalde methode dient de leiding goed te functioneren voor de voorziene levensduur van de leiding.

- Benodigde ruimte. In sommige gevallen is er niet veel ruimte beschikbaar voor leiding aanleg. De benodigde ruimte is afhankelijk van de aanleg methode. Ook speelt de omgeving een rol.
- Kosten. De kosten zijn een natuurlijk ook een criterium bij de keuze van een aanlegmethode. Alhoewel deze kosten afhankelijk zijn van verschillende variabelen, kan een globale beschouwing nuttig zijn bij de afweging van aanlegmethoden.

4.4 Resultaten beoordeling

De verschillende voor- en nadelen van de aanlegmethoden zijn beschouwd met betrekking tot de verschillende criteria voor de leiding aanleg. De bevindingen voor de verschillende criteria per leiding aanlegmethode zijn uitgebreid besproken met een team van specialisten. De belangrijkste resultaten van de beschouwing zijn in Bijlage B in een tabel opgenomen.

Met behulp van de tabel uit Bijlage B is door het team van specialisten een globale beoordeling gemaakt van de verschillende aanlegmethode en de mogelijkheid om deze aanlegmethoden te gebruiken voor de aanleg van warmte transportleidingen in landelijk of stedelijk gebied.

De beoordeling is in Tabel 4.1 weergegeven.

Tabel 4.1 Vergelijking verschillende methoden, op basis top voordeel en top nadeel.

Methodie	Top nadeel	Top voordeel	Score	Opmerking
Sleuf	referentie	referentie	referentie	Referentie
HDD	Wrijving in boorgat na installatie leiding	Veel ervaring	Kansrijk	
Direct Pipe	Kracht op leiding bij installeren	Leiding direct in boorgat	Kansrijk, mits nader uitgezocht	De effecten van de klemmen op de leiding moeten worden uitgezocht
EPP	Geen ervaring	Gesteund boorgat	Kansrijk, mits nader uitgezocht	Het ruimen van het boorgat en direct installeren van de leiding moet worden uitgezocht
HPP	Kracht op leiding bij voortbewegen	Lage kosten	Niet kansrijk	
Gestuurde Avegaar	Nazakking bij grondwater	Lage kosten	Niet kansrijk	
Guide Ramming	Kracht op leiding bij aanleg	Lage kosten	Niet kansrijk	
Pipe express	Grondtransport en kracht op leiding bij voortbewegen	Positie nauwkeurigheid	Niet kansrijk	Ook kruisende leidingen een probleem, daarom niet geschikt voor stedelijk gebied
Ploegen	Mobilisatie trekkracht Lier	Snelheid van aanleg	Kansrijk	Ook kruisende leidingen een probleem, daarom niet geschikt voor stedelijk gebied

Uit deze tabel komen een aantal technieken naar voren als meest kansrijk, deze zullen in de andere werkpakketten van Aambeeld nader worden beschouwd:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe (mits nader uitgezocht).
- EPP (mits nader uitgezocht).
- Ploegen.

De Open sleuf aanleg is de referentie methode. De aanleg methoden Direct Pipe en EPP zullen nader moeten onderzocht. Het nader onderzoek naar deze methoden is uitgevoerd in WP 4.

5 Uitwerking aanleg methoden

5.1 Ontwerp uitgangspunten

De gekozen aanlegmethoden zullen nader worden uitgewerkt. In WP 2 worden aanlegberekeningen en gebruiksfase berekeningen gemaakt voor de geselecteerde methoden. Voor de aanleg worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Open sleuf.
 - Rechte leiding, tijdens uitvoering geen bijzondere belastingen.
- HDD.
 - Annulus straal boorgat is 0,125 m, in en uittrede hoek 10 graden en bochtstraal 1000 m.
- Direct pipe.
 - Annulus straal boorgat is 0,045 m bochtstraal 2000 m intrede hoek 3 graden.
- EPP.
 - Annulus straal boorgat is 0,012 m.
- Ploegen.
 - Rechte leiding met omringende grond.

5.2 Diepteligging

Voor elke beschouwde aanlegmethode zijn twee aanlegdiepten beschouwd. In Tabel 5.1 zijn deze weergegeven.

Tabel 5.1 Te beschouwen varianten diepteligging, aanlegberekeningen.

Aanlegmethode	Locatie	Gronddekking [m]	
Open sleuf	Niet relevant voor berekening aanlegbelasting		
inploegen	landelijk	1,5	3 ²⁾
	Stedelijk ¹⁾	1,5	3 ²⁾
Direct Pipe	landelijk	3	5
	stedelijk	3	5
EPP (met ruimer)	landelijk	3	5
	stedelijk	3	5
HDD	landelijk	25	
	stedelijk	25	

1) ploegen leiding in stedelijk gebied niet voor de hand liggend

2) maximaal mogelijke diepte is 2500 mm volgens technische specificaties (<https://www.foeck.com/en/laying-ploughs/spiderplough-fsp-280/>), verondersteld wordt dat dat onderkant leiding is.

Bij het inploegen is vanwege de vergelijking met andere methoden eveneens een diepte van 3 m gekozen, terwijl deze diepte met het huidige materieel niet mogelijk is.

6 Conclusie

Er zijn verschillende mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen. De voor- en nadelen van de methoden in verschillende omstandigheden zijn beschouwd. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen volgen een aantal aanleg methoden die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen

De standaard methode voor de aanleg van leidingen is van oudsher een open sleuf. De grond wordt in lagen verwijderd tot de gewenste diepte en indien nodig wordt er een bemaling toegepast in de grondlagen rondom de sleuf of op diepte onder de sleuf. Na aanleg van de leiding wordt de grond weer teruggeplaatst en wordt de bemaling verwijderd. Deze standaard methode voor leiding aanleg kan als referentie methode worden gezien. De overige methoden die mogelijk zijn voor de aanleg zijn in verschillende categorieën onderverdeeld:

- Open boorgat.
- Directe installatie.
- Gestuurde installatie.
- Maaiveld gestuurde installatie.

Door de voor- en nadelen van de methoden te beschouwen met een team van specialisten is per methode bekeken of de methode aan de criteria voldoet die van belang zijn bij de aanleg van warmte transport leidingen. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Expert opinions van specialisten zijn gebruikt om een selectie te maken van kansrijke methoden. De volgende methoden komen na voren om nader uit te werken in het AAMBEELD onderzoek:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe (mits nader uitgezocht).
- EPP (mits nader uitgezocht).
- Ploegen.

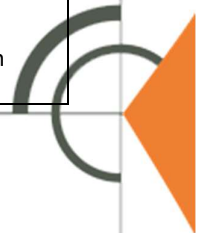
In WP2 van het AAAMBEELD onderzoek worden voor deze technieken vergelijkende berekeningen voor de aanlegfase en de bedrijfsfase gemaakt. In WP 5 worden deze technieken verder onderling vergeleken, gebruikmakend van de resultaten van de overige werkpakketten.

De aanleg in een open sleuf is de referentie methode. De aanleg methoden Direct Pipe en EPP zijn in principe kansrijk, maar nader experimenteel onderzoek is nodig om te beoordelen of deze methoden inderdaad in de toekomst voor aanleg van warmte transportleidingen kunnen worden gebruikt. Het nader onderzoek naar deze methoden is uitgevoerd in WP 4 van AAMBEELD.

A Voor- en nadelen aanlegmethoden

Voordelen en Nadelen Sleufloze techniek (open- en gesloten-front).

Techniek omschrijving	Type omschrijving verwijderen van Grond	Voordelen	Nadelen
Open front techniek	Handmatig / machinaal	<ul style="list-style-type: none"> • Boren in- of buiten stedelijk gebied zeer weinig overlast omgeving. • Eenvoudige methode. • Snelle uitvoering. • In kleine locatie toepasbaar. • Prijs technisch goedkope oplossing. • Voor diverse diameters toepasbaar. • Stenen of andere voorwerpen kunnen in de buis afgevoerd worden. • Indien de buis man toegankelijk is bestaat de mogelijkheid een obstakels te verwijderen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Onder grondwaterstand niet toepasbaar. • Beperkte lengte boring realiseerbaar, sterk afhankelijk van diameter buis. • Openfront methode risico op ongecontroleerd grond stroom (boorfront onstabiel). • Ongestuurd waardoor niet gewenste afwijkingen mogelijk zijn. • Risico onvoldoende stabiel boorfront. • Avegaar kan voor de buis uitboren, hierdoor ongecontroleerd grond verwijderen. • Alleen Boor-buizen gebruiken die special geschikt zijn voor open frontboring. • Beschadiging binnen de buis door avegaar.
	Avegaar(ongestuurd)	<ul style="list-style-type: none"> • Boren in- of buiten stedelijk gebied zeer weinig overlast omgeving. • Korte uitvoering tijd. • Vanuit kleine locaties mogelijk te kunnen boren. • Beginboor kan wel voor de buis uit boren. 	<ul style="list-style-type: none"> • Onder grondwaterstand niet toepasbaar. • Beperkte lengte boring realiseerbaar, sterk afhankelijk van diameter buis. • Openfront methode risico op ongecontroleerd grond stroom (boorfront onstabiel). • Ongestuurd waardoor niet gewenste afwijkingen mogelijk zijn. • Risico onvoldoende stabiel boorfront. • Avegaar kan voor de buis uitboren, hierdoor ongecontroleerd grond verwijderen. • Alleen Boor-buizen gebruiken die special geschikt zijn voor open frontboring.



			<ul style="list-style-type: none"> • Beschadiging binnen de buis door avegaar.
Gestuurd Avegaar techniek	Pilot / avegaar	<ul style="list-style-type: none"> • Boren in- of buiten stedelijk gebied zeer weinig overlast omgeving. • Korte uitvoering tijd. • Vanuit kleine locaties mogelijk te kunnen boren. • Precieze maatvoering mogelijk, pilot nauwkeurigheid 25 mm. • Indicatie grondgesteldheid bij boren piloot. • Bij obstakel is de mogelijkheid de piloot terug te trekken, echter bij de boring is dat niet mogelijk. • Beginboor kan niet voor de buis uit boren, i.v.m. begrenzing door snijkop overgang piloot naar buis. • Combinatie UXO onderzoek naar Niet gesprongen explosieve. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altijd een voldoende sterk achterwand nodig om de boring te realiseren door afzetting van de boorequipment. • Uitvoering tijd iets langer dan ongestuurde methode (meer handelingen). • Beperkt onder grondwater uitvoerbaar, dit is alleen toepasbaar bij gebruik van waterslot (limiet hoogte grondwaterstand maximaal 2 meter vanuit de as van de boring gerekend, afhankelijk van de grondsoort). • Bij geen waterslot toepassing, Boortracé droog, grondwaterstand moet lager zijn, ca. 0,5 meter onderkant buis. • Alleen rechte boorlijn mogelijk. • Lengte boring gelimiteerd door Meet systeem en koppel overbrenging avegaar max. 130 meter afhankelijk van de diameter en grondsoort. • Alleen Boor-buizen gebruiken die special geschikt zijn voor open frontboring.



Gesloten front	Micro tunnel type machine	<ul style="list-style-type: none"> • Toepasbaar is stedelijk en niet stedelijk gebied. • Boren in- of buiten stedelijk gebied, weinig overlast omgeving. • Onder grondwater boren geschikt echter limiet grondwater druk, afhankelijk ontwerp boormachine en boorbuizen. • Lengte van de boring afhankelijk van diameter buis en inzet pompen en tussenstations en toelaatbare perskracht. • Boorfront stabiliteit beter controleerbaar. • Risico beheersbaar door oncontroleerbare grond/water stomen door afsluiten boorfront. • Inzet in diverse grondsoorten, In acht nemen van de daarvoor geschikt machine en cutter. • Boringen in stralen X en Y mogelijk (afhankelijk van diameter- type (materiaal) buis. • Niet een 24 uur proces, afhankelijk van de situatie en optredende perskrachten. • Door alles elektrisch equipment uitstoot CO2 laag / nihil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Techniek duur t.o.v. traditioneel boormethode. • Meer Transporten dan traditioneel openfront methodes. • Waterdichte Perskuip nodig. • Doorvoering benodigd i.v.m. instandhouding oversnijding. • Achterwand constructie voldoende voor benodigde perskracht. • Proces vloeistof nodig voor uitvoering boring. • Werklocatie meer ruimte benodigd. • Veel elektrisch vermogen nodig voor installatie. • Risico storing gevoeliger dan Traditioneel boor techniek omdat meer equipment benodigd. • Gedegen grondonderzoek noodzakelijk i.v.m. ontwerp boorparameters. • Boorbuizen toepassen op bouwmaten beschikbare boormachines.
	<i>Slurry machine</i>	Inzetbaar Zachte tot harde grondsoorten zoals (zand, grind, klei, mix van voorgaande en Rots)	
	<i>Gronddruk balance</i>	Inzetbaar zachte grond soorten.	
	<i>Mix shield</i>	Machine inzetbaar Zachte tot harde grondsoorten zoals (zand, grind, klei, mix van voorgaande)	



E- power Pipe

Ontworpen boormethode van Micro/hdd techniek

- Boren in- of buiten stedelijk gebied zeer weinig overlast omgeving.
 - Boren beneden maaiveld, minder overlast omgeving en benodigde vergunningen.
 - Geen verlaging grondwaterstand nodig over te boren tracé.
 - Inzet in diverse grondsoorten, ook rots (beperkte hardheid)
 - Bewezen geringe aanlegdiepte mogelijk > 2 meter, afhankelijk van grondgesteldheid.
 - Aanleg boven watervoerende grondlaag, i.v.m. waterbezwaar vergunningen waterschappen.
 - Boor-front en Boorgat stabiel dan HDD techniek.
 - Oversnijding t.o.v. mantelbuis nihil t.o.v. HDD techniek.
 - Boorsnelheid hoog t.o.v. Schildboormethode maar langzamer dan HDD techniek.
 - Minder cuttings dan HDD techniek (kleiner boorgat)
 - Blow-outs gering/ nihil door regelbare druk boorfront (door onderzoek en berekening minimale en maximale toelaatbare frontdrukken) en locatie smeering.
 - Nauwkeurigheid boren door gebruik maken van Gyro plaats bepaling systeem.
 - Indien afwijking mogelijkheid tot terug trekken en corrigeren.
 - Boringen in bogen mogelijk(afhankelijk van toelaatbare boog boorbuizen en in te trekken buis / buizen.
 - Bij Pull-back gecontroleerd intrekken meting trekkracht, stabiliteit boorgat, lage intrekkrachten.
 - Equipment geheel electrisch aangedreven, CO2 laag / nihil.
 - Geen verontreiniging door toepassen proces.
- Nog dure oplossing, afweging voor en nadelen onderhoud kabels of leidingen in toekomst.
 - Groot werkterrein benodigd dit afhankelijk van lengte boring.
 - Perskuij nodig voor opspannen boorframe en doorvoeringen voor instandhouding boorgat/ buitensmering (bentoniet).
 - Gedegen grondonderzoek noodzakelijk i.v.m. ontwerp boorparameters.
 - Boor specialiteit en bekwaamheid personeel.
 - Boorspoeling nodig voor boorproces.
 - Grote hoeveelheid transporten benodigd, afhankelijk van de te boren lengte.
 - Keuze boormes (inwendig cutter of uitwendig).
 - Boorspoeling moet zo schoon mogelijk zijn i.v.m. viscositeit en slijtage nozzels.



		<ul style="list-style-type: none">• Back reaming mogelijk voor groter diameters dan nu 505 mm.• Diverse buizen toepasbaar, geschikt voor het intrekken in het geboorte gat.	
--	--	--	--



Techniques

	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Remarks
Technique Direct-Pipe	<ul style="list-style-type: none"> - Crossings up to 2.000m - Diameters from 24" to 56" 	<ul style="list-style-type: none"> - For various geologies - Low pressure at cutting-head-compared to HDD → less risk for blow-out → shallow overburden ⇒ easy access during exploitation : applicable for heating-network - Rather big overcut → low friction - Rather big overcut → very low risk of damage coating (product pipe) - Very little risk of collapse of borehole - No or rather undeeep start shaft - Continuous drilling operations (no need to (dis)connect slurry lines, drill rods during drilling operations) - Direct drilling of product pipe - Possibility to retract pipe in case of failure / blocking (but not easy) 	<ul style="list-style-type: none"> - Big investment - Safety issue : access to tunnel - Risk of failures in tunnel (a lot of connections,...) - Rather important starting-configuration required (anchoring thruster) compared to HDD - Dummy pipes (with window) needed between TBM and product pipe to perform (last) control measurement 	<ul style="list-style-type: none"> - New development : Direct-Pipe with the venturi-pump from the EPP-technique ⇒ go to smaller diameters (24" and maybe lower)
Technique Pipe-Express	<ul style="list-style-type: none"> - Pipes diameter 36" to 48" - From starting-shaft with pipe-thruster - Not yet a proven technique → development ongoing - Lengths of prefabricated pipeline : 100m → 1.000m (see further) 	<ul style="list-style-type: none"> - allows pipeline-installation in narrow spaces → less footprint / easier obtention of permits - avoids water-lowering - can be installed with low-cover → later inspection is easier and also mitigation measures when problems are easier to implement - less personnel needed on jobsite in comparison with standard open-trench - very fast drillings speeds (more than 100m/day) - no separation-plant required ⇒ no mud-problems 	<ul style="list-style-type: none"> - requires an important starting-shaft with anchoring + pipe-thruster - not yet proven in a lot of geologies → quid friction + maximal length for 1 drive - still some important development required (technical issues with chain, action to reduce the skin-friction,...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Probably city-heating-network will be developed "steel in steel" Can it be considered to drill a casing-pipe and insert an insulated-city-heating-pipe in it ?
Technique HDD	<ul style="list-style-type: none"> - For a very wide range of diameters (until 52") - No real starting-shaft required (only some sheet-piles to anchor drilling-rig) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lower cost - Lower investment - Applicable for a wide range of diameters - Fast installation - Well proven technique - Easy to retract in case of obstacles, ... 	<ul style="list-style-type: none"> - Risk of blow-out → installation at big depth - Risk of collapse of drilling-hole - Bigger failure risk (friction/ geology / ...) - More difficult to find insurances - Geology-risk is higher compared to microtunnel/DP - Risk of deviation because of stones,... - Risk of damage to coating pipe 	<ul style="list-style-type: none"> - ...

B Onderwerpen van belang bij aanleg

	Open sleuf	HDD	Direct Pipe	EPP	Gestuurde Avegaar	Horizontale Pipe P.	Guided ramming	Ploegen	Pipe express
diepteligging	Dekking 1,5m. Diepere ontgraving dan 1,5m is mogelijk (zie Handreiking Rijnland). Bij slootruitingen ligt aan van HD of elastisch. Recht door onder sloten is waarschijnlijk niet mogelijk. Opdriven van de leiding is een risico	Om voldoende tegendruk te bieden op de bochten is een diepe ligging van de expansielussen nodig. Toepassing damwanden nodig	De direct pipe kan relatief ondiep worden geboord. Er is wel een minimale diepteligging ivm maasveld verstoring. Om voldoende tegendruk te bieden op de bochten is een diepe ligging van de expansielussen nodig.	De EPP kan relatief ondiep worden geboord. Er is wel een minimale diepteligging maar die is kleiner dan Direct Pipe. Ondiepe ligging heeft misschien opdriven van de bochten tot gevolg. Geen mogelijkheid om maatregelen te treffen tegen opdriven in de vorm van ballasten van de leiding.	diverse aanlegdieptes met lengtes van 200-250 mogelijk zelfs onder grondwater. Diepte is mogelijk beperkt ivm goede werking waterstoot	De boorlijn is conform een HDD boorlijn, omdat er eerst een pilot wordt gedaan. Kan niet te ondiep ivm boorspoelruiken pilotboring en blow out risico in dit gebied	De aanleg kan ondiep worden uitgevoerd, naar verwachting op ca 3 m -mv	Ploegen kan op geringe diepte worden uitgevoerd op ca 2 tot 2,5 m. Bij passage van sloten kan dieper worden geplaatst. Maximale diepte is niet bekend	Op geringe diepte mogelijk, ca 2-3 m onder maasveld. Tot ca 3m dekking, dus slootruitingen waarschijnlijk mogelijk met voldoende dekking.
grond	Grond heeft lage sterkte en daardoor zijn taluds instabiel (damwanden nodig) en is draagkracht voor bouwwerker gering. Veenvoedschap leidt tot grond tekort aanvulling mogelijk met boomschors. De lage dichtheid vd grond vraagt om grote dekking ivm oprijfrisico leidingen	Wellicht stuur problemen in de slappe toplagen. Een steile hoek naar de zandslag is wenselijk. Toepassing van casing buizen om bovenste deel boogart te stabiliseren.	Vanaf maasveld heeft de voorkeur, maar boogart stabiliteit is een issue net als de guidance van de MT machine. Dekking van 3 m - MV zou mogelijk moeten zijn.	Boogart moet bij standaard afmetingen worden vergroot. Er moet dan grond worden afgevoerd. Ontwikkelingen bij Herreknicht zijn er nu op gericht middel back-reaming het materiaal via de boorbuisen af te voeren richting rig-side dus.	In principe geschikt voor alle grondlagen, weel aandacht nodig voor de front stabiliteit. Het waterstoot werkt mogelijk minder goed in slappe grond.	De grond dient te worden afgevoerd door de medium vorrende bus die wordt geïnstalleerd.	Is alleen in zeer slappe grond mogelijk. Bij zandtussen lagen loopt de trekkracht snel op.	In alle grondlagen mogelijk. In zandgrond is met name onder het grondwater de wijking hoger. Beperkte werktrook nodig, eerder grondoverschot dan tekort. SK's of HDPE platen nodig tbv spoorvorming	In alle grondlagen mogelijk, het 'lossen' van klei van de schoepen is een aandachtspunt
grondwater	Opbarsten sleufbodem door hoge stijghoogte dieper grondwater. Er is spanningsbemaling nodig en misschien retourbemaling, er is een risico op wellen. Zout grondwater geeft uitvoeringsproblemen en lange termijn verzilting	Stuk gunstiger dan open ontgraving. Gelden wel dezelfde aandachtspunten voor. Spanningsbemaling in kuipen nodig. Onderwaterbeton toepassen en eventueel verwijderen. Verder bestaat risico op kwelwegen door trekken damwanden. Mogelijk moet er vanaf een terp geboord worden ivm grote stijghoogte GW.	Vanuit een kuip moet rekening worden gehouden met de hogere stijghoogte en de benodigde bemaling. Er bestaat risico op kwelwegen door trekken damwanden	Kuipen met onderwaterbeton met misschien enige bemaling. Kuipen moeten goed waterdicht zijn bij doornvoer. Het waterdicht van de kamers moet goed werken onder het grondwater	Kuipen met onderwaterbeton met misschien enige bemaling. Kuipen moeten goed waterdicht zijn bij doornvoer. Het waterdicht van de kamers moet goed werken onder het grondwater	De aflichting van de boogart na het intrekken is een belangrijk punt. Het is de vraag of hier drillgout kan worden toegepast, dat lijkt niet waarschijnlijk.	Kan onder grondwater worden toegepast, voorwaarde is dat de grond kleef uitoelend op de binnenkant van de leiding zodat geen surge optreedt	Kan onder het grondwater worden uitgevoerd. Door de spleet van het zwaard is wel mogelijk die kan worden tegen gegaan door injectie van betoniet	Door de relatief brede schoepensleuf kwel mogelijk, hier toe zou een vloeistof in de sleuf moeten worden toegepast
constructies	Damwanden nodig om de sleuf te stabiliseren in veen grond. Er kunnen wellen ontstaan bij trekken van damwanden. Bij expansie lussen zeker kuipen nodig.	Er is een diepe ligging van de expansielussen nodig. Toepassing damwanden is dan nodig	Beperkte inzet damwanden door mogelijkheid om vanaf maasveld te werken	Redelijk grote bouwkuipen nodig. Onderwaterbeton waarschijnlijk nodig. Door verankerde damwanden kan de OVB dikte worden verkleind. Wellen kunnen ontstaan bij trekken van damwanden	Geen kuipen nodig, wel de HDD achtige werktroeken bij in en uitrede. Uitleggen leiding en afvoer van de cuttings is een uit te werken probleem	Boorkuipen noodzakelijk. Het is een boorteknik die de leiding horizontaal aanlegt. Hierdoor heb je een zeer lange kuip/sleuf nodig om de bus in te brengen.	Geen kuip nodig	Op de locatie waar de thruster staat is het nodig om een constructieve voorziening te maken. Guidance van de leiding is nodig bij dit dode bed	
leiding	Opdriven van de leiding in veengrond. Ballast nodig met doek of ankers of evt flugsand.	De drillgout eigenschappen bepalen expansie bochten. Onderzoek naar drill grot is wenselijk om op basis hiervan een afweging tussen leidingmaterialen te maken. Voordeel SIS is dat grotere lengten geboord kunnen worden. In verband met grondwaterproblematiek is dat gunstig. Echter isolatiewaarde SIS is lager dan van Staal-PUR-PE	Boren met SIS of VPS. Inkomende pipe thruster of pijp/coating is aandachtspunt. Eventueel extra mantelbus boren voor VPS bus ipv SIS materiaal toepassen	Techniek nog niet voor benodigde diameter beschikbaar. Techniek in principe toepasbaar voor staal PUR-PE leiding.	Om toepassing voor VPS zeker te kunnen vast stellen zal er eerst een pilot uitgevoerd moeten worden. Ruimer/voortrekbuis nodig die minimaal mantel afdekt.	Voor SIS leiding geschikt om grotere lengten aan te leggen. Bij VPS bus is de afvoer van de cuttings een issue en ook het opdriven van de leiding in het boogart.	Met de benodigde krachten tbv het installeren van de mediumvoerende bus zou men mogelijk naar uit een SIS leiding moeten kiezen	Bij aanleg van de leiding komen grote krachten op de leiding te staan. Onbekend of PE mantel hiertegen bestand is. De Leiding ligt in de grond, waardoor de leiding meer wijking ondervindt dan bij betoniet. Hierdoor grotere afstanden tussen expansielussen mogelijk.	Onduidelijk of dit voor VPS toepasbaar is ivm krachten op PUR en schade aan (ek)detectie. Pilot/test noodzakelijk. Dagmaat leidingen moet vergroot worden. SIS is zeker mogelijk.
toegankelijkheid	Er is een werktrook van voldoende breedte over de gehele lengte.	Zwaar materieel (rig, kranen ivm interkken streng) enkel aan te voeren via A4. Westrook en uitlegstrook beperkt tov open ontgraving	Zwaar materieel (rig, kranen ivm interkken streng) enkel aan te voeren via A4. Westrook en uitlegstrook beperkt tov open ontgraving	Zwaar materieel (rig, kranen ivm interkken streng) enkel aan te voeren via A4. Westrook en uitlegstrook beperkt tov open ontgraving	Met de korte lengtes die kunnen worden geboord toch nog veel bouwwegen nodig	Bij SIS leidingen zijn grotere lengtes haalbaar en daardoor minder bouwwegen nodig	Over redelijk grote lengte mogelijk en daardoor minder bouwwegen nodig.	Voor de spoor vorming in slappe grond is al met ski's geëxperimenteerd. Dit lijkt goed te werken, beter dan rupsbanden. De werktrook is smal	Er is een iets bredere werktrook noodzakelijk dan bij ploegen over de gehele lengte.
onderhoud	Op geringe dekking dus onderhoud is eenvoudig mogelijk. Cultureeltechnische schade aan percelen, bijkomende onderhoud en imagschade voor NGU	Grotendeels onbereikbaar. Risico op lekkages mantelbus, echter minder risico op graafschade. Voorgespannen leidingen extra risico in geval van calamiteit in de toekomst.	Aanlegdiepte is redelijk ondiep en dus enigszins toegankelijk	Leiding is beter bereikbaar dan bij een HDD of Direct Pipe, maar minder goed dan bij open sleuf.	Leiding goed bereikbaar vanaf maasveld	Grote diepte ligging leiding niet goed bereikbaar voor onderhoud	De aanlegdiepte is redelijk ondiep en dus enigszins toegankelijk	De leiding is makkelijk bereikbaar ivm ondiepe aanlegmethodiek	De leiding is makkelijk bereikbaar ivm ondiepe aanlegmethodiek
overige	Sleufbekisting toepassen is een optie maar heeft ook nadelen en aanleg in den natte is een mogelijkheid	Weinig ervaring met voorgespannen beringen in deze diameter. Veel lengte veldstrekkende nodig in deze grondslag om voldoende verankeringlengte op te bouwen.	Techniek nog niet toegepast voor warmteleiding, wel een mogelijkheid/kans	Nog geen beproefde methodiek. Maximaal haalbare lengte afhankelijk van wijking in boogart. Voorspannen is een optie maar vanuit beheersaspect ongunstig. Uitvoering alleen mogelijk door Herreknicht?	Stuurbaarheid is beperkt, in principe zijn er geen bochten mogelijk	De techniek is nog niet veel toegepast. Geen voorbeelden bekend	Volgens mij is deze booruitrusting niet meer beschikbaar tevens niet al te vaak toegepast	Techniek voor grotere diameters is in ontwikkeling en nog niet getest voor warmteleidingen	Geen ervaring met warmteleidingen. Verwachting max 400 meter op basis ervaring HDD VPS beringen. Groot voordeel t.o.v. open ontgraving, kunnen lengtes gehaald worden tot 1500 meter. Beperkende factor is de spanning in de warmteleiding. Hier moet duidelijkheid over komen, dit geldt ook voor andere technieken.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

B Rapporten WP2, Aanlegfase en bedrijfsfase berekeningen

B.1 Rapport Aanlegberekeningen

Aanlegberekeningen warmte transportleidingen

AAMBEELD, werkpakket WP2



Aanlegberekeningen warmte transportleidingen
AAMBEELD, werkpakket WP2

Auteur(s)
Piet Meijers

Aanlegberekeningen warmte transportleidingen

AAMBEELD, werkpakket WP2

Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleiding, aanleg, wrijvingsweerstand, E-power, HDD, inploegen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	05-03-2024
Projectnummer	11207943-017
Document ID	11207943-017-GEO-0002
Pagina's	53
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	

Samenvatting

De doelstelling van TKI project AAMBEELD (AAAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) is het onderling vergelijken van verschillende aanlegmethoden voor warmte leidingen. Als onderdeel van Werkpakket 2 worden berekeningen voor de aanlegfase en de bedrijfsfase uitgevoerd voor een aantal geselecteerde aanlegmethoden.

Dit rapport bevat een overzicht van de uitgevoerde berekeningen voor de aanlegfase. De berekeningen voor de bedrijfsfase worden in een separaat rapport beschreven.

Beschouwd zijn de geselecteerde aanlegtechnieken Ploegen, HDD, Direct Pipe en EPP met ruimer. Om een vergelijking te kunnen maken tussen de uitvoeringstechnieken, worden 2 verschillende situaties beschouwd: een warmte transportleiding project in landelijke omgeving en één in het stedelijk gebied. De transport leiding bestaat uit een stalen binnenbuis met een PE buitenbuis met een PUR isolatie laag en heeft een buitendiameter van 900 mm.-Bij de aanleg berekeningen voor de twee cases is gevarieerd met de grondslag (2 grondsoorten), diepteligging (2 diepten) en leidinglengte (3 lengten). Bepalend voor de belastingen op de leiding tijdens de aanlegfase is de wrijvingsweerstand tussen de leiding en de grond tijdens intrekken. Deze wordt weer bepaald door diepteligging, de mate van oversnijding tijdens het aanleggen en de aanwezigheid van een boorvloeistof tussen de leiding en de omringende grond. Met name bij de aanlegmethoden Direct Pipe en EPP met ruimer speelt de smeervloeistof c.q. boorvloeistof in de annulus tussen leiding en grond een belangrijke rol.

In het algemeen zijn met de beschouwde aanlegmethode grote aanleglengten voor een warmte transportleiding haalbaar. Alleen bij inploegen in zand en bij gebruik van de Direct Pipe methode zijn de aanleglengten beperkt. Bij de Direct Pipe methode komt dit omdat daar de benodigde aanlegkracht niet direct op de stalen binnenbuis wordt uitgeoefend, maar via de buitenbuis en de isolatielaag op de binnenbuis moet worden overgebracht. Daardoor wordt de schuifsterkte van de isolatielaag de beperkende factor. Lagere aanleglengten bij de Direct Pipe methode zijn mogelijk als de leiding wordt voorzien van een GRP (Glass fiber Reinforced Plastic) laag.

In Tabel S.1 wordt indicatief aangegeven welke lengten er aangelegd kunnen worden per aanlegmethode. In de berekeningen zijn geen ontwerp factoren meegenomen en zijn alleen berekeningen gemaakt voor de geselecteerde cases. De in de tabel vermelde lengten zijn daarom indicatief.

Tabel S.1 *Indicatieve aanleg lengten voor de verschillende aanlegmethoden.*

Indicatieve aanleg lengte aanlegmethode	Gronddekking [m]	Grondslag	Maximale lengte [m]	Opmerkingen
ploegen	1,5	Zand	< 500	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Zand	< 300	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	1,5	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
HDD	25		> 1000	
Direct Pipe	3,0	Zand	< 125	isolatielaag maatgevend
	5,0	Zand	< 100	isolatielaag maatgevend
	3,0	Klei	< 225	isolatielaag maatgevend
	5,0	Klei	< 200	isolatielaag maatgevend
EPP	3,0	Zand	< 900	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Zand	< 500	Boorvloeistof in annulus van belang
	3,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang

De berekende aanleg lengten worden in WP5 van AAMBEELD gebruikt bij het opstellen van de methodiek voor de keuze van de uitvoeringsmethode in verschillende omstandigheden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstellingen AAMBEELD	8
1.3	Werkpakketten	8
1.4	Werkpakket 2	8
2	Uitgangspunten voor berekening	9
2.1	Beschouwde aanlegmethoden	9
2.2	Parameters leiding	9
2.3	Partiele factoren	9
2.4	Ondergrond	10
2.5	Ontwerp uitgangspunten	10
2.6	Diepteligging	10
2.7	Wrijvingsweerstand	11
2.7.1	Algemeen	11
2.7.2	Bepaling effectieve radiale kracht	12
3	Aanleg middels inploegen	13
3.1	Kenmerken aanlegmethode	13
3.2	Modellering	13
3.2.1	Opzet model	13
3.2.2	Geometrie	14
3.2.3	Modellering wrijving	14
3.3	Resultaten berekening	14
3.4	Beschouwing resultaten	17
4	Aanleg middels HDD	18
4.1	Kenmerken aanlegmethode	18
4.2	Modellering	18
4.2.1	Opzet model	18
4.2.2	Geometrie	18
4.2.3	Modellering wrijving	19
4.3	Resultaten berekening	19
4.4	Beschouwing resultaten	22
5	Aanleg middels Direct Pipe	24
5.1	Kenmerken aanlegmethode	24

5.2	Modellering	24
5.2.1	Opzet model	24
5.2.2	Sterkte van de leiding bij drukken met Pipe thruster	25
5.2.3	Geometrie	26
5.2.4	Modellering weerstand boorkop	26
5.2.5	Modellering wrijving machine	26
5.2.6	Modellering wrijving langs de leiding	27
5.3	Resultaten berekening, leiding in zand	27
5.4	Resultaten berekening, leiding in klei	32
5.5	Beschouwing resultaten	34
6	Aanleg middels EPP met ruimer	36
6.1	Kenmerken aanlegmethode	36
6.2	Modellering	37
6.2.1	Opzet model	37
6.2.2	Geometrie	37
6.2.3	Modellering wrijving	38
6.3	Resultaten berekening, leiding in zand	38
6.4	Resultaten berekening, leiding in klei	40
6.5	Beschouwing resultaten	41
7	Conclusies en aanbevelingen	42
7.1	Aanbevelingen	46
A	Leidingparameters	47
A.1	Leidingafmetingen	47
A.2	Afgeleide parameters voor berekening	47
A.2.1	Axiale stijfheid binnenbuis en buitenbuis	47
A.2.2	Parameters isolatielaag, voor plane strain modellering	48
A.2.3	Eigen gewicht	49
B	Modellering intrekken in PLAXIS	50
B.1	Opzet model	50
B.2	Bepaling parameters	51
B.3	Voorbeelden uitvoer	51

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden zoals E-Power pipe, Direct pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van de bestaande HDD techniek) is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Daarnaast blijken er uitvoeringstechnisch verbeteringen mogelijk ten aanzien van de beoordeling van de voorgestelde installatiemethoden in relatie tot de eisen met betrekking tot warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project AAMBEELD (AanlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

1.2 Doelstellingen AAMBEELD

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Door gebruik te maken van een uithardende boorvloeistof die in de gebruiksfase van de transportleiding een hogere wrijvingsweerstand oplevert kunnen langere leidingen worden aangelegd met een kleiner aantal expansiebochten. Dit reduceert de aanlegkosten en hinder voor de omgeving.

1.3 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Gebruik boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten.

1.4 Werkpakket 2

In werkpakket 2 worden voor een aantal geselecteerde aanlegmethoden berekeningen uitgevoerd voor de aanlegfase en de bedrijfsfase.

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde berekeningen voor de aanlegfase. De berekeningen voor de bedrijfsfase worden in een apart rapport beschreven (RE22079-N01-0 bedrijfsfase berekeningen Aambeeld WP2).

2 Uitgangspunten voor berekening

2.1 Beschouwde aanlegmethoden

Voor de aanlegbelasting worden de volgende uitvoeringsmethoden beschouwd:

- HDD.
- Direct Pipe.
- EPP (met ruimer).
- Inploegen.

De uitgangspunten voor de berekeningen, zoals leidingafmetingen en grondprofielen, worden in de volgende paragrafen beschreven. De genoemde waarden zijn geldig voor de aanlegfase, dus voor de situatie van korte termijn belasting en omgevingstemperatuur.

2.2 Parameters leiding

Voor de aanlegfase zijn de korte termijn parameters van PUR en PE van belang.

Voor de leiding worden de volgende parameters gebruikt:

- Binnenbuis
 - Materiaal: staal.
 - Buitendiameter: $D = 0,711$ m.
 - Wanddikte: $t = 8$ mm.
 - Stijfheid: $E = 206500$ N/mm² (=2,065 E8 kN/m²).
 - Rekgrens (bij $T \leq 50^{\circ}\text{C}$) : 355 N/mm².
 - Volumiek gewicht 78,5 kN/m³.
 - Dwarscontractie: 0,3.
- Isolatie
 - Stijfheid: $E = 10$ MPa.
 - Dwarscontractie: $\nu = 0,2$.
 - Toelaatbare schuifspanning: 0,12 MPa.
 - Toelaatbare druksterkte: 0,15 MPa.
 - Volumiek gewicht: 0,6 kN/m³.
- Buitenbuis
 - Materiaal: HDPE
 - Buitendiameter: $D = 0,90$ m
 - Wanddikte: $t = 8,7$ mm
 - Stijfheid: $E = 1000$ MPa
 - Treksterkte: 14 MPa
 - Volumiek gewicht: 9,56 kN/m³

2.3 Partiele factoren

In dit rapport worden voor de aanlegberekening geen partiële factoren toegepast.

2.4 Ondergrond

Voor de ondergrond wordt uitgegaan van 2 situaties (stedelijk gebied en landelijk gebied), die elk worden gekenmerkt door een eigen ondergrond grondsoorten. Voor de 2 te beschouwen situaties worden de volgende parameters gehanteerd:

- Stedelijk gebied
 - Ondergrond van zand
 - Grondwaterstand (GWS) is $mv - 0,25$ m
- Landelijk gebied
 - Ondergrond: 8 m klei op zand
 - GWS = $mv - 0,75$ m

In het vervolg van dit rapport worden de twee situaties aangeduid met hun kenmerkende grondsoort, dus als 'zand' en 'klei'.

Tabel 2.1 toont de voor deze studie gebruikte grondparameters.

Tabel 2.1 Keuze grondparameters.

Grondsoort	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	δ/ϕ [-]	δ [°]	c' [kPa]	a/c	c_u [kPa]	E_{100} [MPa]
Zand, los tot matigt	17/20	30	0,67	20	0	0,5	0	30
klei, organisch slap tot matigt	14/14	15	0,50	7,5	0,5	0,5	17,5	0,75

2.5 Ontwerp uitgangspunten

Voor de aanleg worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Open sleuf
 - Rechte leiding, tijdens uitvoering geen bijzondere belastingen.
- HDD
 - annulus straal boorgat is 0,125 m, in en uittrede hoek 10 graden en bochtstraal 1000 m.
 - Axiale krachten bij intrekken.
 - Extra wrijvingsweerstand door buigen.
- Direct pipe
 - Annulus straal boorgat is 0,045 m bochtstraal 2000 m intrede hoek 3 graden
 - Axiale krachten gedurende doorpersen.
 - Extra wrijvingsweerstand door buigen.
- EPP
 - Annulus straal boorgat is 0,012 m.
 - Rechte leiding, geen buiging leiding bij intrekken.
- Ploegen
 - Rechte leiding, geen buiging leiding bij intrekken.

2.6 Diepteligging

Voor elke beschouwde aanlegmethode zijn twee aanlegdiepten beschouwd. In Tabel 2.2 zijn deze weergegeven.

Tabel 2.2 Te beschouwen varianten diepteligging, aanlegberekeningen.

Aanlegmethode	Locatie	Gronddekking boven leiding [m]	
Open sleuf	Niet relevant voor berekening aanlegbelasting		
inploegen	landelijk	1,5	3 ²⁾
	Stedelijk ¹⁾	Niet relevant	
Direct Pipe	landelijk	3	5
	stedelijk	3	5
EPP (met ruimer)	landelijk	3	5
	stedelijk	3	5
HDD	landelijk	25	
	stedelijk	25	

¹⁾ ploegen leiding in stedelijk gebied niet relevant

²⁾ maximaal mogelijke diepte is 2500 mm volgens technische specificaties (<https://www.foeck.com/en/laying-ploughs/spiderplough-fsp-280/>), verondersteld wordt dat dat onderkant leiding is.

Bij het inploegen is vanwege de vergelijking met andere methoden eveneens een gronddekking van 3 m gekozen, terwijl deze diepte met het huidige materieel niet mogelijk is.

2.7 Wrijvingsweerstand

2.7.1 Algemeen

De wrijving voor de aanleg fase is afhankelijk van de boorvloeistof, de eventuele overdruk in de boorvloeistof en de boogwerking van de grond. De voor de aanlegfase van toepassing zijnde wrijvingsweerstand kunnen daarom verschillen van die voor de gebruiksfase.

De wrijvingsweerstand bestaat uit twee delen:

- Wrijving smeer- of boorvloeistof met leiding, hierbij wordt niet gecorrigeerd voor het contactoppervlak tussen leiding en grond.
- Wrijving door contact leiding met grond.

Voor een leiding is de wrijvingsweerstand:

$$T_2 = \int_0^{eind} (\pi \cdot D \cdot f_2 + F_{rad}(x) \cdot f_3) \cdot dx$$

Met:

- D diameter leiding.
- $F_{rad}(x)$ effectieve radiale grondbelasting op de leiding.
- f_2 adhesie tussen leiding en smeer of boorvloeistof of omringende grond.
- f_3 wrijvingscoëfficiënt tussen grond en leiding.

De radiale belasting hangt af van de plaats. Hierin zijn effecten verwerkt als diepteligging, grondslag, boogwerking in de grond en effectief gewicht van de leiding.

De parameters f_2 en f_3 hangen af van de grondslag en de aanwezigheid van een schil van de boorvloeistof (bentoniet, drill-grout) rond de leiding. Als zo'n schil rond de leiding aanwezig is zijn er twee potentiële afschuifmechanismen:

- Afschuiven over de interface leiding-boorvloeistof.
- Afschuiven over de interface boorvloeistof-omringende grond.

De te hanteren waarden variëren per aanlegmethode. Voor de verdere uitwerking wordt verondersteld dat bij gebruik van een boorvloeistof het maatgevende afschuifvlak de interface leiding-boorvloeistof is.

2.7.2 Bepaling effectieve radiale kracht

De belasting op de bovenkant van de leiding volgt uit de gronddruk op de bovenkant. Voor situaties waarin de grond boven de leiding niet kan vervormen (zoals bij aanleg in een sleuf) of weer wordt aangedrukt (zoals bij aanleg middels inploegen) is dit de neutrale gronddruk. Als de grond wel verticaal kan vervormen ontstaat er boogwerking, die de gronddruk op de leiding vermindert. In situaties waarbij de leiding tijdens de aanleg lichter is dan water of de boorvloeistof, en dus wil opdrijven, is de ondergrens voor de druk tegen de bovenkant de kracht die nodig is om opdrijven te verhinderen.

De belasting tegen de onderkant van de leiding volgt uit het verticaal evenwicht van de leiding. Dit bestaat uit de kracht op de bovenkant en het effectief gewicht van de leiding.

De kracht tegen de zijkant van de leiding hangt af van de oversnijding tijdens de aanleg. Als de grond niet horizontaal kan vervormen is er een neutrale horizontale gronddruk. Als de grond wel horizontaal kan vervormen wordt het een actieve gronddruk. Bij grote diepten kan er een situatie ontstaan dat door de boogwerking rond het boorgat de grond niet genoeg kan vervormen om weer aan te liggen. In die situatie zal de horizontale gronddruk erg klein zijn.

3 Aanleg middels inploegen

3.1 Kenmerken aanlegmethode

Bij het inploegen wordt de in te trekken leiding verbonden met een ploeg. Figuur 3.1 toont de ploeg met aangekoppelde leiding en torpedo die zich aan de achterzijde van de ploeg bevindt.



Figuur 3.1 Ploeg met aangekoppelde leiding, de oranje-rode buis is de zogenaamde torpedo (foto: Deltares).

De methode is grondverdringend. De grondverdringing vindt plaats bij de ploeg zelf en vervolgens bij de zogenaamde torpedo.

De grootste ploeg van Foeck (FSP280) heeft volgens de specificaties (zie https://www.foeck.com/fileadmin/downloads/2Seiter_FSP280_E_Download.pdf) een maximale diepte van 2,5 m. Bij eerder uitgevoerde testen door Gasunie in Biddinghuizen is de grootste gemeten gronddekking 2,27 m. Dat was bij het intrekken van een 12" leiding. De onderkant van de leiding ligt dan ongeveer 2,6 m onder maaiveld. Deze testen waren onderdeel van het onderzoeksproject FLIP

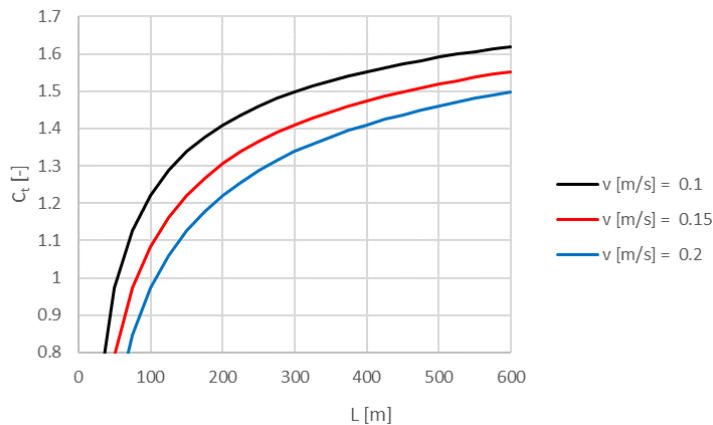
De berekeningen voor het inploegen worden gemaakt voor een gronddekking van 1,5 m. Voor de vergelijking met de andere methoden wordt ook een berekening gemaakt met een gronddekking van 3 m (die dus eigenlijk niet kan worden gerealiseerd met de huidige equipment).

3.2 Modelling

3.2.1 Opzet model

Als onderdeel van het TKI project FLIP (Fast Low cost Installation of Pipelines) is een model opgesteld om de wrijving bij het intrekken van een leiding te bepalen (Rapport 11209042-002-GEO-0001_v1.0, Model voor inploegen leidingen FLIP, Fast Low cost Installation of Pipelines). Die methode is gebaseerd op de resultaten van uitgevoerde testen in Biddinghuizen en Sliedrecht. Tijdens die testen is geconstateerd dat bij een stilstand tijdens

het inploegen de wrijvingsweerstand op de leiding toeneemt. In de rekenmethode is daarom een tijdsfactor C_t geïntroduceerd die dit effect in rekening brengt. Het is een factor waarmee de wrijving moet worden vermenigvuldigd om de toename daarvan in de tijd in rekening te brengen. De tijdsfactor is in Figuur 3.2 weergegeven.



Figuur 3.2 Tijdsfactor (bron: rapport 11209042-002-GEO-0001_v1.0, Model voor inploegen leidingen - FLIP, Fast Low cost Installation of Pipelines).

3.2.2 Geometrie

Bij het inploegen kan de leiding vanaf maaiveld worden ingetrokken. Enig buigen van de leiding is dan mogelijk, met de bijbehorende extra gronddrukken om deze buiging mogelijk te maken. In de hier gekozen modellering wordt dat effect verwaarloosd. Daarmee vereenvoudigd de geometrie tot een rechte leiding op een constante diepte.

De huidige ploegen kunnen leidingen tot een diepte van ca 2,5 m (onderkant leiding) aanleggen. Daarmee wordt de momenteel maximaal haalbare gronddekking 1,6 m voor een warmteleiding met buitendiameter van 0,9 m. Voor de berekeningen wordt daarom een gronddekking van 1,5 m gebruikt. Ter vergelijking met de methoden Direct Pipe en EPP met ruimer wordt ook de situatie van een gronddekking van 3 m berekend.

3.2.3 Modelling wrijving

Voor de modellering van de wrijving wordt naar de rapportage van het TKI project FLIP verwezen. De essentie van de modellering is dat eerst de gronddrukken op de leiding worden bepaald en vervolgens daaruit de wrijvingsweerstand (rapport 11209042-002-GEO-0001_v1.0, Model voor inploegen leidingen - FLIP).

3.3 Resultaten berekening

Voor de vier combinaties (2 grondsoorten, twee diepteliggingen) is eerst de wrijvingsweerstand per meter bepaald, met verwaarlozing van het tijdseffect. Tabel 3.1 geeft de resultaten.

Tabel 3.1 Inploegen, wrijvingsweerstand per meter leiding, exclusief tijdsfactor C_t .

Grondslag	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	δ/ϕ	c [kPa]	Diepte bovenkant leiding [m – mv]	τ [kPa]	F_{fric} [kN/m]
Zand	17/20	30	0,6667	0	1,5	3,04	8,59
Zand	17/20	30	0,6667	0	3,0	5,74	16,24
Klei	14/14	15	0,5	1	1,5	0,84	2,37
klei	14/14	15	0,5	1	3,0	1,36	3,84

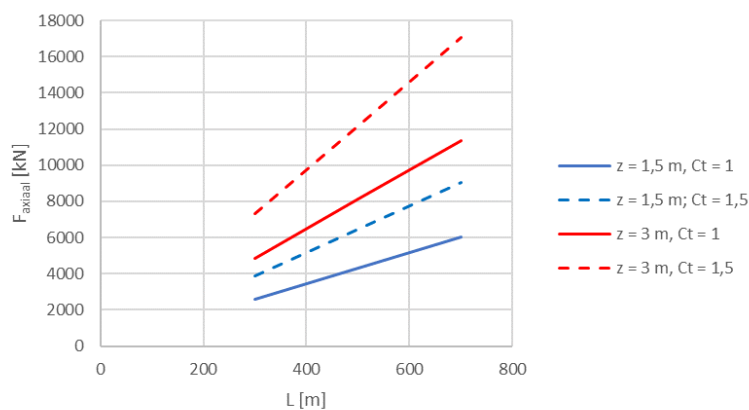
Met deze resultaten wordt vervolgens de intrekweerstand van de gehele leiding bepaald. In de modellering zit een factor C_t , die het tijdseffect in rekening brengt. Deze factor is bij de andere aanlegmethoden niet meegenomen. Daarom is tevens de variant waarbij $C_t = 1$ beschouwd. De resultaten van de berekening staan in Tabel 3.2 en Figuur 3.3.

Voor de maximale kracht in de buitenbuis is aan de hand van de verdeling van de stijfheden de maximale kracht in de binnenbuis berekend. De verhouding 0,66 % is gevonden bij de eerste berekeningen waarbij de volledige interactie tussen binnenbuis en buitenbuis is beschouwd. De verhouding komt ook overeen met de verhouding in de axiale stijfheid van binnenbuis en buitenbuis. De resultaten van de berekening staan in Tabel 3.2 en Figuur 3.3. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2.

Tabel 3.2 Inploegen, benodigde trekkracht op leiding bij voor inploegen in zand, exclusief weerstand ploeg.

Diepte bovenkant leiding [m – mv]	F_{fric} [kN/m]	L [m]	C_t [-]	F_{axiaal} [kN]	Spanning in staal [N/mm ²]	Spanning in PE [N/mm ²]	Schuifspanning in isolatie [N/mm ²]
1.5	8,59	300	1	2577	146	0,7	0,004
1.5	8,59	500	1	4296	243	1,2	0,004
1.5	8,59	700	1	6014	340	1,6	0,004
1.5	12,89	300	1,5	3866	219	1,1	0,006
1.5	12,89	500	1,5	6444	365	1,8	0,006
1.5	12,89	700	1,5	9021	511	2,5	0,006
3	16,24	300	1	4872	276	1,3	0,007
3	16,24	500	1	8121	460	2,2	0,007
3	16,24	700	1	11369	643	3,1	0,007
3	24,36	300	1,5	7309	414	2,0	0,011
3	24,36	500	1,5	12181	689	3,3	0,011
3	24,36	700	1,5	17053	965	4,6	0,011

In Figuur 3.3 en Figuur 3.5 is het verloop van de benodigde trekkracht als functie van de leiding gegeven. Dit geeft een lineair verband tussen leidinglengte en benodigde trekkracht.

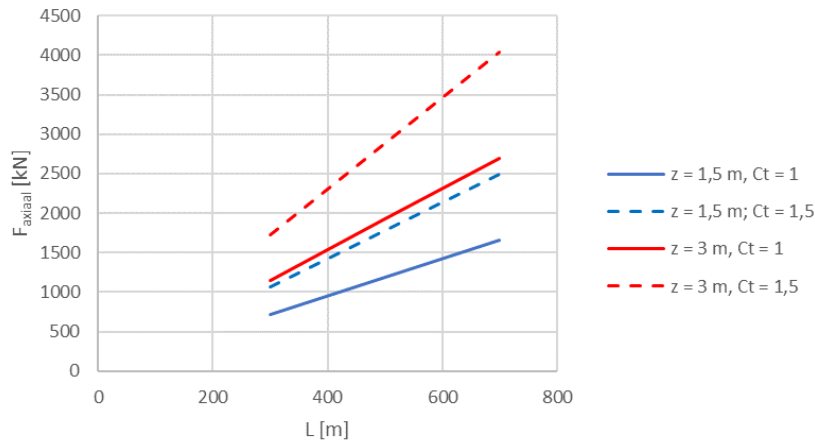


Figuur 3.3 Benodigde trekkracht op de leiding bij voor inploegen in zand, exclusief weerstand ploeg.

Voor het inploegen in klei staan de berekende intrekkrachten op de leiding en de spanningen in de leiding in Tabel 3.3 en Figuur 3.4. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2.

Tabel 3.3 Inploegen, benodigde trekkracht op leiding bij voor inploegen in klei, exclusief weerstand ploeg.

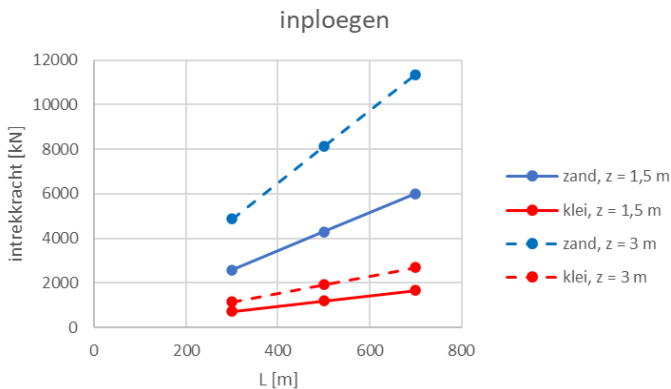
Diepte bovenkant leiding [m – mv]	F_{fric} [kN/m]	L [m]	C_t [-]	F_{axiaal} [kN]	Spanning in staal [N/mm ²]	Spanning in PE [N/mm ²]	Schuifspanning in isolatie [N/mm ²]
1.5	2,37	300	1	710	40	0,2	0,001
1.5	2,37	500	1	1184	67	0,3	0,001
1.5	2,37	700	1	1657	94	0,5	0,001
1.5	3,56	300	1,5	1065	60	0,3	0,002
1.5	3,56	500	1,5	1775	100	0,5	0,002
1.5	3,56	700	1,5	2486	141	0,7	0,002
3	3,84	300	1	1153	65	0,3	0,002
3	3,84	500	1	1922	109	0,5	0,002
3	3,84	700	1	2691	152	0,7	0,002
3	5,76	300	1,5	1730	98	0,5	0,003
3	5,76	500	1,5	2883	163	0,8	0,003
3	5,76	700	1,5	4036	228	1,1	0,003



Figuur 3.4 Benodigde trekkracht op leiding bij voor inploegen in klei, exclusief weerstand ploeg.

3.4 Beschouwing resultaten

In Figuur 3.5 wordt de benodigde trekkracht voor de verschillende situaties grafisch weergegeven.



Figuur 3.5 Benodigde trekkracht op leiding bij voor inploegen, $C_t = 1$, exclusief weerstand ploeg.

De benodigde trekkracht voor de aanleg in zand is beduidend hoger dan bij aanleg in klei. Ook is daar de invloed van de aanlegdiepte sterker dan bij aanleg in klei. De hoge waarden zijn het gevolg van de grote leidingdiameter.

De grootste spanningen treden op in het staal van de binnenbuis. De spanningen in de buitenbuis en de schuifspanning in de isolatielaag zijn veel lager dan de bezwijkwaarde, en daarmee niet maatgevend voor de maximaal mogelijke aanleglengte.

De maximale aan te leggen lengte in zand, bij een gronddekking van 1,5 m, is op basis van de staalspanningen ongeveer 400 m. In klei is bij een lengte van 700 m de staalspanning nog steeds toelaatbaar.

De vraag of de lier de benodigde trekkracht kan geven wordt hier niet beschouwd. Door het bijplaatsen van een extra lier en/of het vergroten van de afmetingen van de schotten kan een grotere trekkracht gemobiliseerd worden.

4 Aanleg middels HDD

4.1 Kenmerken aanlegmethode

Bij de aanleg middels HDD wordt eerst, in een aantal fasen, een boorgang gemaakt. Deze boorgang is gevuld met een boorvloeistof zoals bentoniet. Vervolgens wordt de productleiding ingetrokken met Drill-Grout. Voor dit rapport zijn alleen de krachten tijdens het intrekken van belang.

4.2 Modellingering

4.2.1 Opzet model

De modellering bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt het verloop van de weerstand langs de leiding bepaald. In de tweede stap worden daaruit de krachten in de leiding bepaald. Voor een warmteleiding kan de tweede stap nog niet direct met het programma D-geo pipeline worden bepaald. Daarom wordt daarvoor een berekening met PLAXIS gemaakt. Invoer voor deze berekening is het verloop van de wrijvingsweerstand langs de leiding.

4.2.2 Geometrie

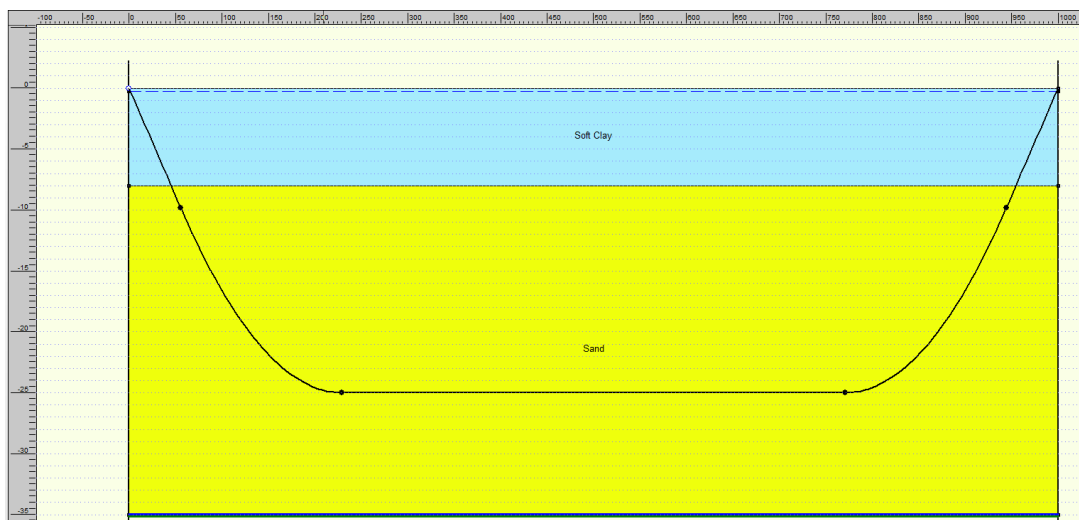
Voor alle situaties worden de volgende waarden gebruikt:

- Vloerpijp op mv – 25 m.
- Intredehoek: 10 graden.
- Uittredehoek: 10 graden.
- Bochtstraal: 1000 m.
- Annulus boorgat: 0,125 m (diameter boorgat dus $0,9 + 2 \cdot 0,125 = 1,15$ m).

Voor de berekening worden de volgende lengten van de boring gebruikt:

- 500 m/ 700m/ 1000 m.

De geometrie van de leiding voor een situatie (lengte boring) is weergegeven in Figuur 4.1



Figuur 4.1 Voorbeeld geometrie HDD, situatie 8 m klei op zand.

Uit Figuur 4.1 blijkt dat de bochten volledig in het zand liggen.

4.2.3 Modelleringswrijving

Voor de berekening van de wrijving wordt het programma D-Geo pipeline gebruikt. Dat betekent dat voor de modellering van de wrijving ook de daarin geïmplementeerde wrijving volgens NEN3650-1 wordt gebruikt.

In NEN 3650-1 wordt de berekeningsmethode voor het intrekken van een leiding gegeven. De wrijvingsweerstand bestaat uit de volgende onderdelen (cf. NEN 3650):

- T1 : wrijving leiding op rollenbaan.
- T2 : wrijving met boorvloeistof en met wand boorgat, recht gedeelte.
- T3a : wrijving met boorvloeistof en met wand boorgat, in bocht.
- T3b : wrijving uit reactiekracht om van rechtstand naar bocht te gaan.
- T3c : wrijving tgv radiale kracht voor krachterevenwicht tussen begin- en einde bocht.

Voor de gebruikte wrijvingsfactoren f_2 en f_3 zijn de waarden uit NEN-3650 genomen, dus $f_2 = 0,05$ kPa en $f_3 = 0.2$. De leiding wordt leeg ingetrokken.

Voor de berekening wordt de laatste fase van het intrekken als maatgevend beschouwd, dus als de leiding volledig is ingetrokken. Dat betekent dat de component T1 hier niet van belang is (dus $T1 = 0$).

Uitgegaan is van een lege leiding tijdens het intrekken.

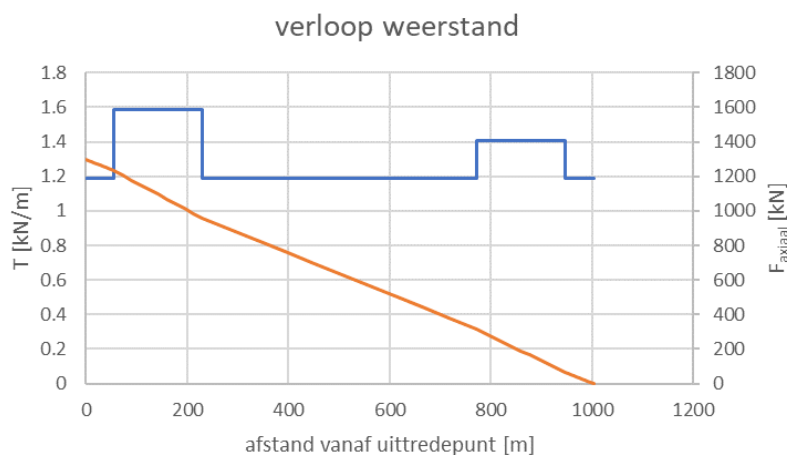
In de huidige uitvoer van D-Geo pipeline is het verloop van de axiale spanning niet op te vragen, ook niet indirect via het opvragen van de spanningen per verticaal.

De vloeistofdruk in het boorgat moet voldoende groot zijn om instorten van de boorgang te voorkomen. Dit betekent dat de druk tussen leiding en boorgang uitsluitend wordt bepaald door het effectief gewicht van de leiding. Bij opdrijven van de leiding is het een druk tegen de bovenzijde, als de leiding wil zinken is het een druk tegen de onderzijde. Bij de hier beschouwde leiding is er altijd sprake van opdrijven.

Bij de twee bochten werkt er daarnaast nog een extra kracht die nodig is om de leiding de bocht te laten volgen. Voor de formules wordt verwezen naar NEN-3650-1, art.E.1.2.4.2 en E.1.2.4.3.

4.3 Resultaten berekening

Met de voorgaande modellering is de weerstand langs de leiding bepaald. Bij het uitwerken van de wrijvingsweerstand blijkt er geen verschil te zijn tussen de situatie met een grondslag van homogeen zand en van een grondslag met 8 m klei op zand. Sommatie van de weerstand geeft de axiale kracht in de leiding. Figuur 4.2 toont het verloop van de weerstand langs het tracé van de HDD voor een boring met een lengte van 1000 m. Duidelijk te zien zijn de extra weerstandkrachten bij de bochten. De extra weerstand is bij de linkerbocht groter dan bij de rechterbocht door de grotere axiale kracht in de leiding aldaar.



Figuur 4.2 Verloop weerstand langs leiding en axiale kracht in leiding, lengte HDD is 1000 m.

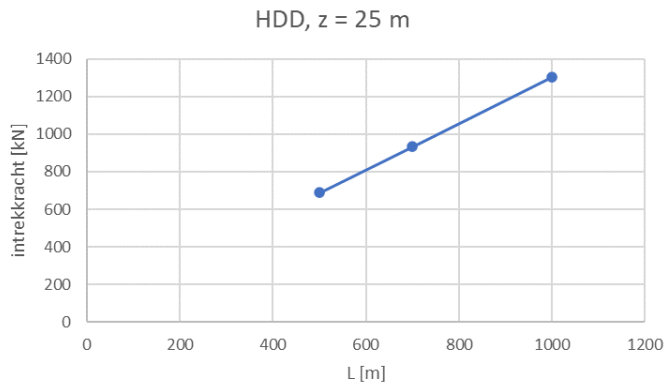
Met deze waarden is voor iedere variant een PLAXIS berekening gemaakt om de krachten in de leiding te bepalen. Voor de modellering wordt verwezen naar bijlage B. In de berekening is verondersteld dat bij het intrekken aan de binnenbuis wordt getrokken.

De belangrijkste resultaten van de berekening zijn in Tabel 4.1 verzameld. De berekende krachten zijn omgerekend naar spanningen door de juiste afmetingen van de leiding te gebruiken. Voor de isolatielaag is de schuifspanning op de interface isolatie-binnenbuis als maatgevend beschouwd. Daar is de omtrek het kleinste. De berekende spanningen kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2.

Tabel 4.1 Resultaten PLAXIS berekening.

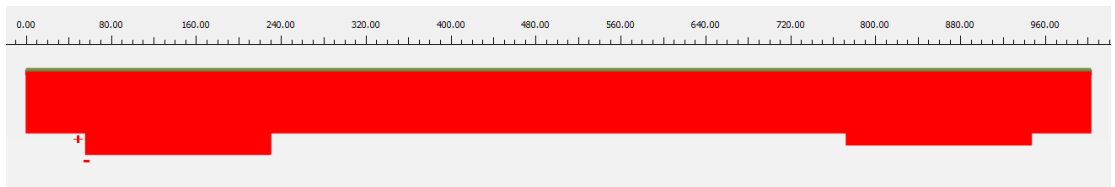
Lengte HDD [m]	500	700	1000
F_{\max} [kN]	688	934	1303
$F_{\max, \text{ binnenbuis}}$ [kN]	688	934	1303
$F_{\max, \text{ buitenbuis}}$ [kN]	4,53	6,17	8,62
$T_{\max, \text{ isolatie}}$ [kN]	10,27	14,08	19,25
$\sigma_{\text{axiaal, binnenbuis}}$ [kPa]	28242	38340	53487
$\sigma_{\text{axiaal, buitenbuis}}$ [kPa]	256	349	488
$\tau_{\max, \text{ isolatie}}$ [kPa]	5	6	9

In Figuur 4-3 is het verband tussen leidinglengte en benodigde trekkracht weergegeven. Ook hier wordt een praktisch lineair verband tussen beide parameters gevonden.

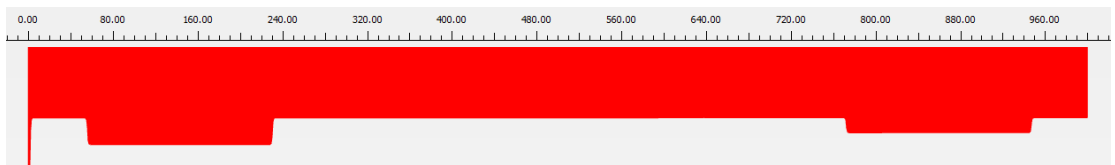


Figuur 4-3 Verband tussen leidinglengte en benodigde trekkracht.

De vermelde waarde voor de schuifkracht in de isolatielaag is de piekwaarde. Deze is over een korte lengte aanwezig nabij de intrekking. Verder volgt de schuifspanning in de isolatielaag ongeveer het verloop van de wrijvingsweerstand, zoals uit de vergelijking van Figuur 4.4 en Figuur 4.5 is te zien. In beide figuren staat op de horizontale as de afstand en op de verticale as de wrijvingsweerstand.



Figuur 4.4 Verloop grondwrijving langs leiding, lengte HDD (horizontaal) is 1000 m.

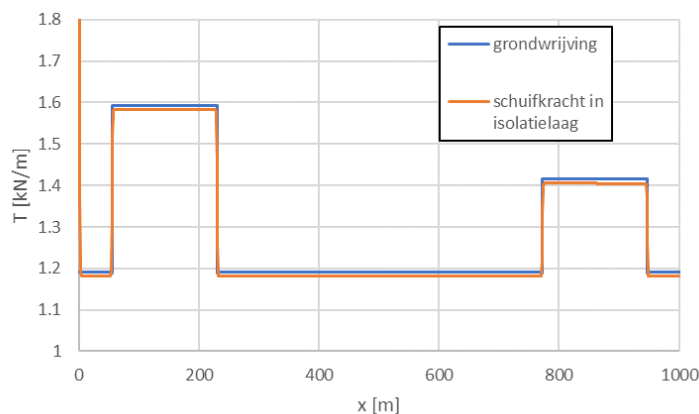


Figuur 4.5 Verloop afschuifkracht in de isolatielaag, lengte HDD (horizontaal) is 1000 m.



Figuur 4.6 Verloop afschuifkracht in de isolatielaag, detail bij intrekking, lengte HDD (horizontaal) is 1000 m.

In Figuur 4.7 wordt de schuifkracht op de buitenkant van de leiding (de grondweerstand) en in de isolatielaag met elkaar vergeleken. Hieruit blijkt dat de kracht in de isolatielaag iets lager is dan die op de buitenkant van de leiding. Dit verschil ontstaat omdat de buitenbuis ook een klein deel van de grondweerstand opneemt.



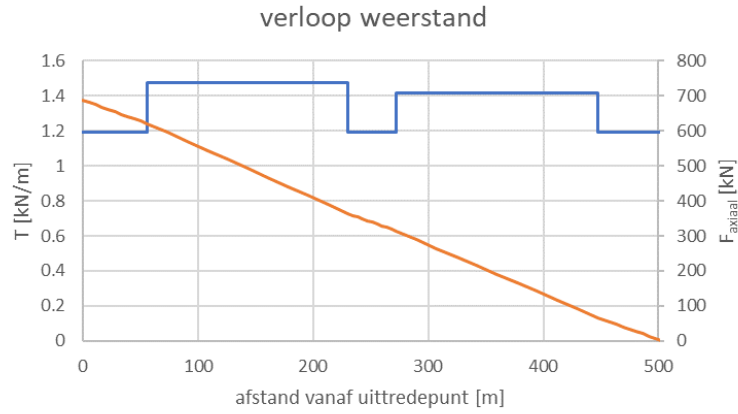
Figuur 4.7 Vergelijking schuifkracht op buitenkant leiding en in de isolatielaag, lengte HDD is 1000 m.

4.4 Beschouwing resultaten

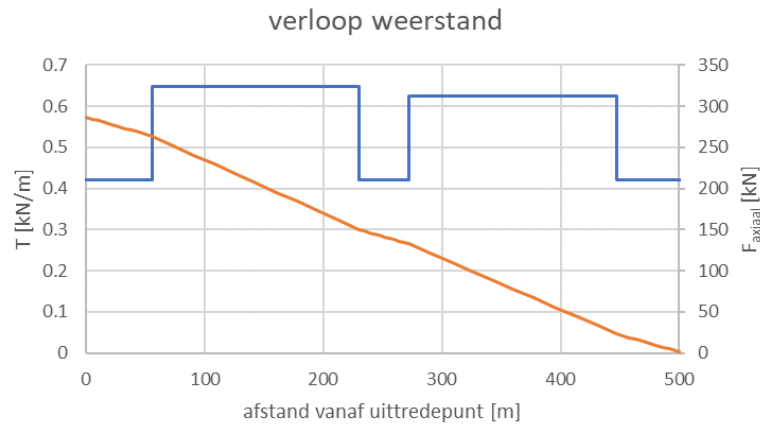
Bij het leeg intrekken van de leiding zijn de trekkrachten hoger dan bij het ballasten van de leiding. Toch zijn er lengten langer dan 1000 m mogelijk. De capaciteit van de rig (boormachine) is niet maatgevend bij deze aanlegmethode. Er is keuze uit rigs met een capaciteit tot ca 200 ton.

In de berekeningen is uitgegaan van een lege leiding. De wrijvingsweerstand wordt over dat gedeelte bepaald door het effectief gewicht van de leiding. Bij de huidige parameters drijft de leiding op en zal deze tegen de bovenkant van het boorgat schuren. Door de leiding met water te vullen neemt de opwaartse kracht af. Netto blijft er wel een opwaartse kracht over, maar deze is beduidend lager. Dit zal de wrijvingsweerstand verminderen.

Voor de situatie van een 500 m lange leiding is het verschil onderzocht. Figuur 4.8 en Figuur 4.9 tonen het verloop van de weerstand en de axiale kracht voor deze twee situaties.



Figuur 4.8 Verloop wrijving en axiale kracht, $L = 500$ m, lege leiding.



Figuur 4.9 Verloop wrijving en axiale kracht, $L = 500$ m, met water gevulde leiding.

De benodigde intrekkracht neemt dan af van 688 kN naar 287 kN.

5 Aanleg middels Direct Pipe

5.1 Kenmerken aanlegmethode

Bij de Direct Pipe methode wordt een leiding met daarvoor een kleine boormachine in de grond gedrukt. De leiding wordt hierbij dus direct geïnstalleerd. De diameter van de boormachine is groter dan de diameter van de productleiding, meestal 1 à 2 duim (inch). Door deze grotere diameter is er sprake van een boorgang die groter is dan de diameter van de productleiding. De annulus van de boorgang is wel aanzienlijk kleiner dan bij HDD.



Figuur 5.1 Aanleg leiding middels Direct Pipe (afbeelding: Herrenknecht).

De afmetingen van de boormachine zijn voor deze studie overgenomen uit de handleiding van D-Geo pipeline. Dat geeft de volgende waarden:

- Lengte: 13,6 m.
- Gewicht boormachine, inclusief alle apparatuur: 10 kN/m.
- Gewicht 'frame' in de leiding: 1,2 kN/m.
- Diameter: 0,99 m.
- Geen significante oversnijding boormachine.

Dit betekent dat de annulus bij de leiding 0,045 m is.

Langs de leiding is een boorvloeistof aanwezig. Voor de druk in de boorvloeistof wordt uitgegaan van de statische vloeistofdruk.

5.2 Modelling

5.2.1 Opzet model

Bij het bepalen van de krachten op de leiding zijn de volgende onderdelen te onderscheiden:

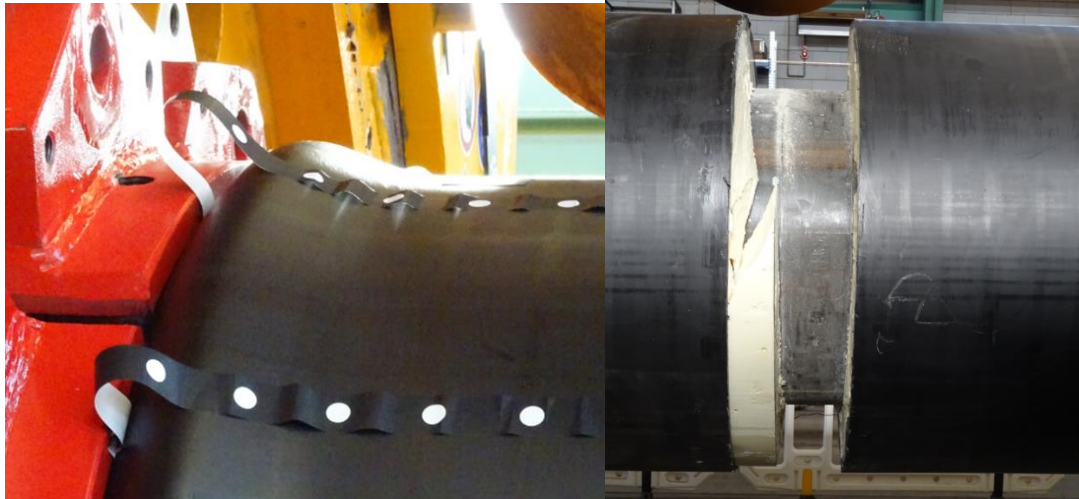
- Kracht die door de thruster wordt uitgeoefend.
- Wrijvingsweerstand over gedeelte in de grond.
- Weerstand bij de boormachine.

De axiale krachten op de leiding bij de aanleg bestaan uit:

- Kracht op boorfront.
- Wrijving langs de boormachine.
- Wrijving langs de leiding.
- Extra wrijving door de zijdelingse steun om uitknikken van de leiding (buckling) te voorkomen.
- Extra wrijving door de bochten bij intrede en uittrede.

De grootste krachten, en spanningen, zijn aanwezig bij de thruster. De door de thruster aan te brengen kracht wordt gelimiteerd door:

- Capaciteit thruster.
- Plooi van de PE buitenbuis bij de thruster.
- Afschuiven van de isolatielaag over de stalen binnenbuis.



Figuur 5.2 *Bezwijkmechanismen leiding bij thruster, resultaten testen WP4 (foto: Deltares).*

Voor de druk van de smeer- c.q. boorvloeistof in de annulus is verondersteld dat deze gelijk is aan de statische druk met een vloeistofspiegel gelijk aan het maaiveld. Dit betekent dat niet op voorhand wordt uitgegaan van een stabiel boorgat, in tegenstelling tot de aanname in D-Geo pipeline voor diep gelegen leidingen.

Vervolgens is met PLAXIS het verloop van de spanningen bepaald. Voor de opzet van de modellering wordt verwezen naar bijlage B. In aanvulling daarop is aan de zijde van de boorkop (rechts in de figuren) een horizontale puntlast aangebracht die de weerstand op de kop van de boormachine modelleert. Tevens is hier een gedeelte van de isolatielaag vervangen door een stijver materiaal om de hogere stijfheid van de boormachine te modelleren. De klemkracht is aangebracht als een voorgeschreven verplaatsing over de lengte van de klem, waarvoor hier 1,6 m is gebruikt.

5.2.2 Sterkte van de leiding bij drukken met Pipe thruster

Als onderdeel van WP4 zijn er druktesten met de Pipe thruster uitgevoerd. Een uitgebreide beschrijving van deze testen is in een apart rapport opgenomen (rapport 11207943-019-GEO-0002 Thruster testen). De testen zijn uitgevoerd op een leiding met een buitendiameter van 28" (0,71 m). De diameter van de stalen binnenleiding was 0,508 m.

Uit het gemeten kracht-verplaatsingsverloop tijdens de uitgevoerde testen is afgeleid dat voor een St-PUR-PE leiding de overgang tussen lineair-elastisch en niet-lineair elastisch bij een axiale kracht van 450 kN ligt. Dat moment wordt gezien als het moment waarop er een begin

van bezwijken is. Er kon niet worden vastgesteld of die grens het plooiën van de PE buitenbuis of het begin van bezwijken van de aanhechting tussen de binnenbuis en de PUR laag was. Bij een axiale kracht van 820 kN was er sprake van volledig bezwijken.

Bij gebruik van een GRP laag van 12 mm was de bezwijkbelasting 1400 kN. De grens voor elastisch gedrag bij de buis met GRP is bepaald op 777 kN. Gezien het bezwijkmechanisme wordt verwacht dat de bezwijkwaarde evenredig is met de omtrek van de leiding. Daarmee wordt voor de DN900/700 leiding verwacht dat de sterkte ongeveer een factor 1,3 hoger is.

Op basis van deze testresultaten zijn de grenswaarden voor een 900 mm leiding bepaald. Daarbij zijn de testresultaten verschaald met de verhouding van de diameter. Dit is een eerste benadering, de werkelijke sterkte zal mede afhangen van de gebruikte wanddikten. Het resultaat is in Tabel 2.1 weergegeven.

Tabel 5.1 Grenswaarden voor drukkracht bij een 900 mm leiding, op basis resultaten uitgevoerde testen.

	Leiding St-PUR-PE	Leiding St-PUR-PE-GRP
Grens elastisch gedrag	562	984
Bezwijkwaarde	1039	1820

5.2.3 Geometrie

Voor de geometrie van de leiding zijn de volgende waarden gehanteerd:

- Startdiepte: mv – 2 m.
- Intredehoek: 3 graden.
- Bochtstraal: 2000 m.
- Gronddekking: 3 m en 5 m.



Figuur 5.3 Voorbeeld geometrie leiding, lengte 500 m, diepte mv – 5 m.

5.2.4 Modelling weerstand boorkop

Op de kop van de boormachine werkt een weerstandskracht. In de handleiding voor D-Geo pipeline wordt voor een boormachine met een diameter van 1,2 m een weerstandskracht van 100 kN genoemd. Als verondersteld wordt dat deze kracht evenredig is met het oppervlak van de boorkop volgt hieruit een weerstand van 68 kN.

5.2.5 Modelling wrijving machine

Voor de boormachine worden de volgende parameters gebruikt:

- Lengte: 13,6 m.
- Gewicht: 10 kN/m.
- Diameter: 0,99 m.

Voor het bepalen van de grondwrijving wordt verondersteld dat de gronddruk tegen de machine gelijk is aan de neutrale gronddruk en dat er geen boorvloeistof op de interface machine-grond aanwezig is.

5.2.6 Modellerings wrijving langs de leiding

De wrijving langs de leiding bestaat uit de volgende onderdelen:

- Wrijving langs het rechte gedeelte van de leiding.
- Extra wrijving als gevolg van het buigen van de leiding bij de bochten.
- Extra wrijving als gevolg van het mogelijk uitknikken ('buckling') van de leiding.

De berekening van de wrijving volgt uit de adhesie en de korrelspanning op de leiding. Bepaald wordt de kracht op de bovenkant, de zijkant en de onderkant. De kracht op de bovenkant van de leiding volgt uit de korrelspanning op de bovenkant van de leiding. Hierin wordt rekening gehouden met de boogwerking in de grond. Als de leiding wil opdrijven zal minimaal de kracht die nodig is om opdrijven te voorkomen aanwezig zijn. De kracht op de onderkant van de leiding volgt uit de kracht op de bovenkant, vermeerderd met het effectief gewicht van de leiding. Bij de situatie van opdrijven is het effectief gewicht negatief en is de kracht op de onderkant dus lager dan die op de bovenkant. De kracht op de zijkant van de leiding volgt uit de horizontale korrelspanning. Hierbij is verondersteld dat er sprake is van een actieve gronddruk.

Voor het gewicht van de leiding wordt rekening gehouden met het gewicht van de installaties (aan- en afvoerleidingen etc.) in de productiebuis. Hiervoor wordt een standaard gewicht inclusief rek van 1,2 kN/m gebruikt, conform de gegeven waarde in de handleiding voor D-Geo pipeline.

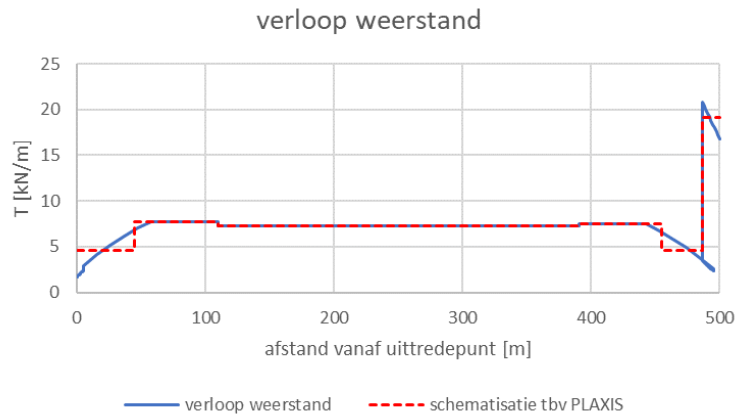
De extra weerstand in de bochten (termen T3a en T3b) wordt berekend met de formules uit de handleiding voor D-Geo pipeline.

Bij de Direct Pipe methode wordt de leiding tijdens de aanlegfase op druk belast. Hierdoor bestaat het risico op uitknikken van de leiding. Voor de extra wrijving door het voorkomen van uitknikken van de leiding wordt in NEN-3650 geen methodiek waarde gegeven. Daarom worden de formules uit de handleiding voor D-Geo pipeline hiervoor gebruikt. Deze bijdrage blijkt, door de hoge stijfheid van de gebruikte leiding, praktisch verwaarloosbaar te zijn.

5.3 Resultaten berekening, leiding in zand

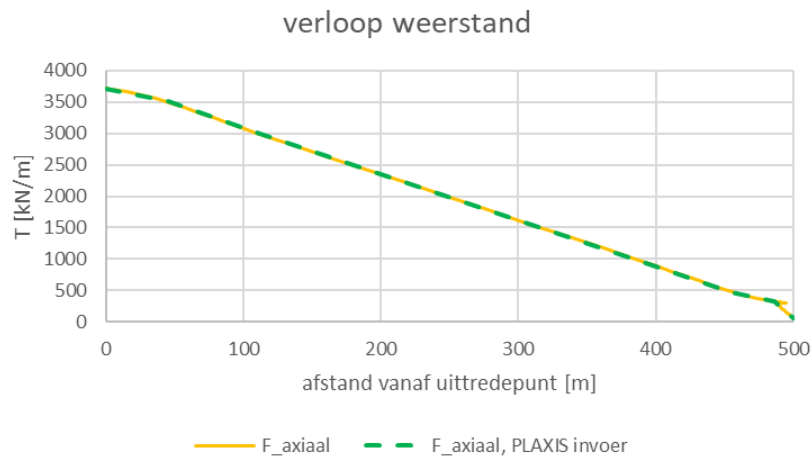
Door sommatie van de voorgaande termen is het verloop van de weerstand langs de leiding en de totale drukkracht te bepalen. Voor een situatie is dit verloop in Figuur 5.4 weergegeven.

In de gebruikte modellering met PLAXIS kunnen alleen constante waarden voor de wrijvingsweerstand worden gebruikt. Daarom is het verloop geschematiseerd met een aantal gedeeltes met constante wrijvingsweerstand. In Figuur 5.4 is het geschematiseerde verloop weergegeven met een gestippelde lijn.



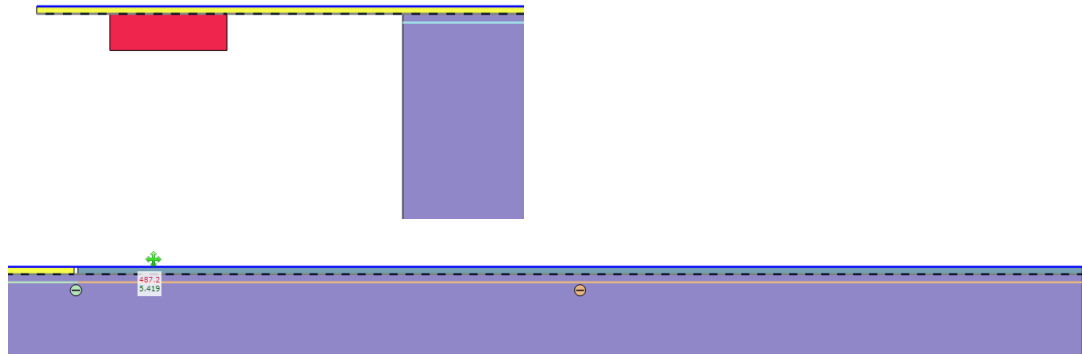
Figuur 5.4 Verloop wrijvingsweerstand tijdens installatie, lengte leiding 500 m, gronddekking 5 m, situatie dat druk in boorgang gelijk is aan statische druk.

Het verloop van de axiale kracht is weergegeven in Figuur 5.5.



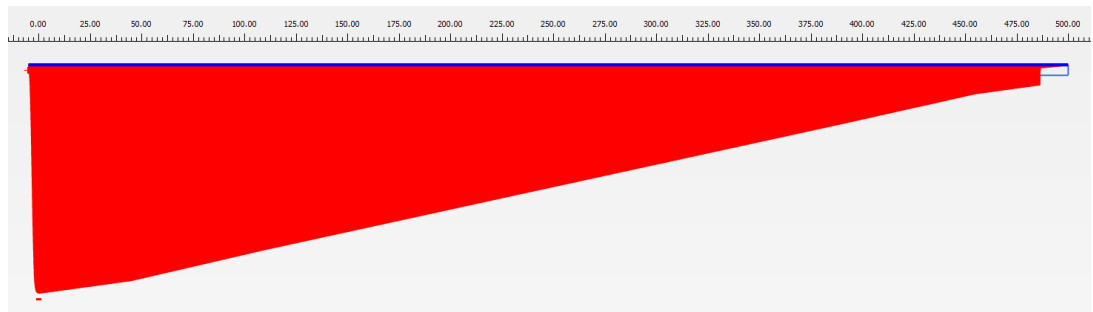
Figuur 5.5 Verloop axiale kracht in leiding tijdens installatie, lengte leiding 500 m, gronddekking 5 m, situatie dat druk in boorgang gelijk is aan statische druk.

Voor deze variant worden vervolgens de resultaten van de PLAXIS berekening getoond. In de berekening is de klem van de Thruster en de boormachine meegenomen. Figuur 5.6 toont hoe dit is gedaan.

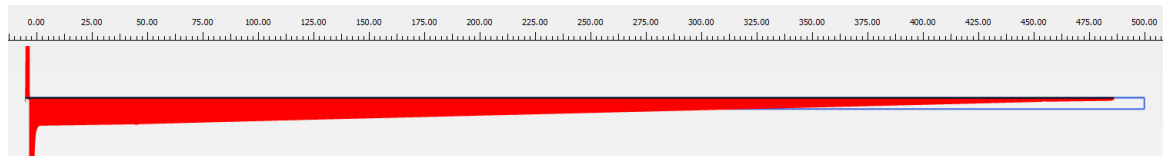


Figuur 5.6 Model in PLAXIS, details, boven het gedeelte met de klem en onder het gedeelte met de boormachine.

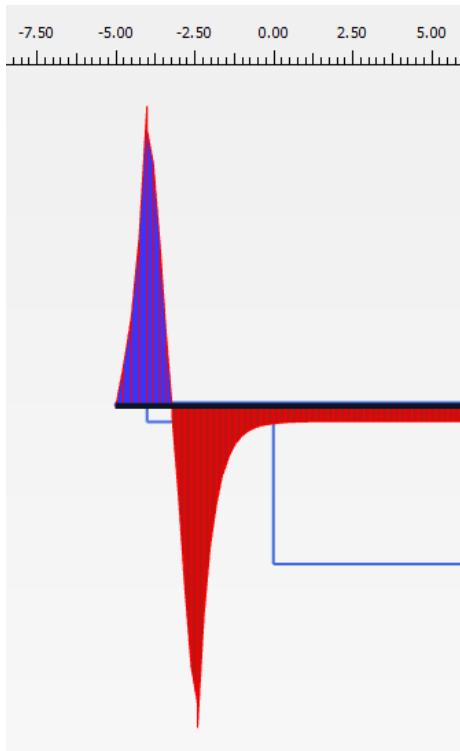
Figuur 5.7 tot Figuur 5.12 tonen grafisch de resultaten. In deze figuren staat op de horizontale as de afstand en op de verticale as de in het onderschrift genoemde parameter. Ten behoeve van de schaling is in het onderschrift ook de maximale waarde gegeven.



Figuur 5.7 Axiale kracht binnenhuis ($F_{\max} = 3685$ kN).



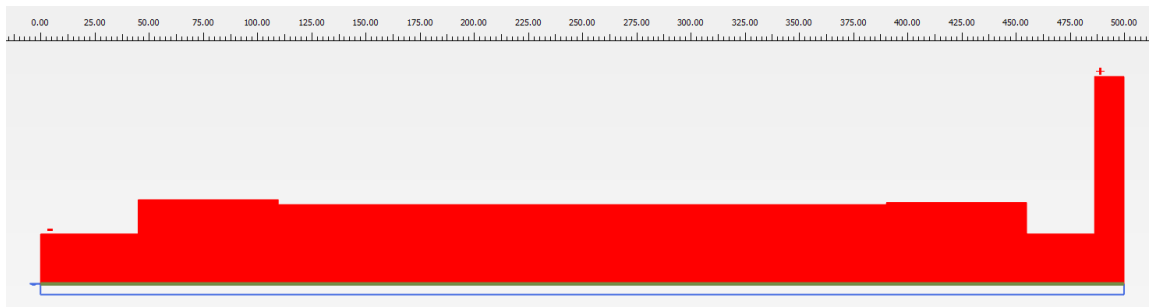
Figuur 5.8 Axiale kracht buitenbuis ($F_{\max} = 509$ kN).



Figuur 5.9 Axiale kracht buitenbuis, detail bij klem ($F_{max} = 509 \text{ kN}$).

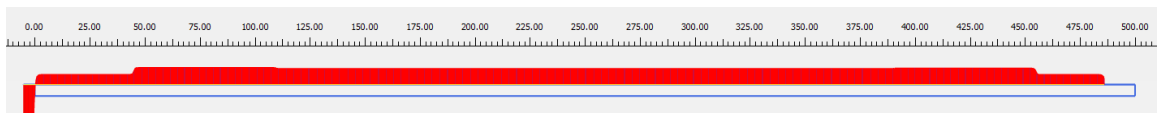
De grootste axiale kracht zit bij de klem. Net voor de klem is sprake van een hoge drukkracht en net achter de klem van een hoge axiale trekkracht.

De verhouding van de axiale kracht in binnen- en buitenbuis is 0,0066 (0,66%). Deze verhouding is ook bij de andere aanlegmethoden gevonden en komt overeen met de verhouding in de axiale stijfheid van de binnen- en buitenbuis. Bij de klem is de verhouding anders omdat hier de benodigde drukkracht op de buitenbuis wordt aangebracht.

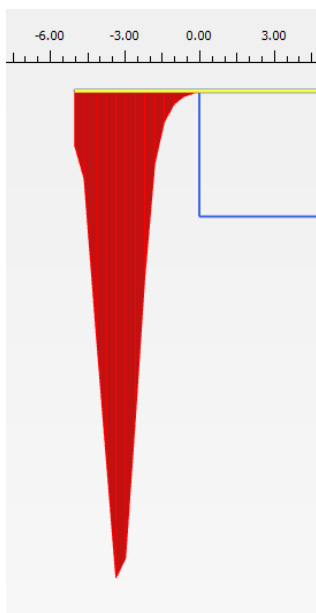


Figuur 5.10 Wrijving in de interface leiding-grond.

Aan de rechterzijde is duidelijk de plaats van de boormachine met de hogere wrijvingsweerstand aldaar te herkennen.



Figuur 5.11 schuifkracht in de isolatielaag (piekwaarde 1957 kN/m).



Figuur 5.12 schuifkracht in de isolatielaag, detail bij klem (piekwaarde 1957 kN/m).

De schuifspanning in de isolatielaag volgt voor het gedeelte in de grond de opgelegde grondweerstand. Aan de linkerkant, ter plaatse van de klem, worden hoge schuifspanningen gevonden. Dit is de zone waar de axiale kracht vanuit de klem naar de binnenbuis wordt overgebracht.

In Tabel 5.2 zijn de belangrijkste berekeningsresultaten verzameld. Voor de situatie van $L = 500$ m en diepteligging van 5 m zijn ze ontleend aan de PLAXIS berekening.

Tabel 5.2 Resultaten aanlegberekening Direct Pipe, leiding in zand.

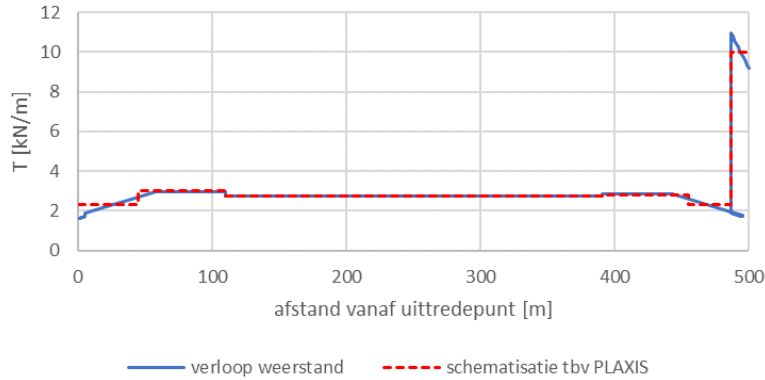
Lengte leiding [m]	300	500	700	300	500	700
Gronddekking [m]	3	3	3	5	5	5
Totale weerstand [kN]	1427	2233	3049	2232	3714	5229
Binnenbuis N_{max} [kN]	1415.9	2215.6	3025.2	2214.6	3685	5188.2
Buitenbuis, N_{max} [kN]	195.6	306.0	417.9	305.9	509	716.6
Isolatielaag T_{max} [kN]	751.9	1176.6	1606.6	1176.1	1957	2755.3
$\sigma_{binnenbuis}$ [kPa]	80135	125398	171221	125341	208565	293643
$\sigma_{buitenbuis}$ [kPa]	8028	12562	17153	12557	20894	29417
$\tau_{isolatie}$ [kPa]	337	527	719	527	876	1234

De maximale schuifspanning in de isolatielaag is hier beduidend groter dan bij de andere aanlegmethoden. Dit komt omdat bij de Direct Pipe methode de kracht op de buitenbuis wordt aangebracht en vervolgens via de isolatielaag naar de binnenbuis wordt overgedragen.

Bij de andere aanlegmethoden wordt direct aan de binnenbuis getrokken en hoeft de isolatielaag alleen de grondwrijving over te dragen.

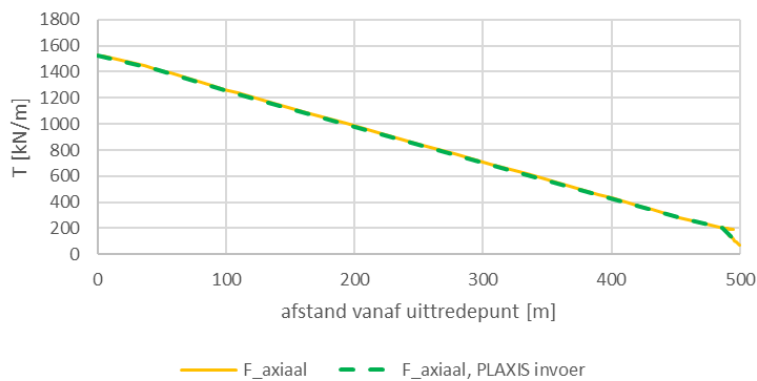
5.4 Resultaten berekening, leiding in klei

In de gebruikte modellering met PLAXIS kunnen alleen constante waarden voor de wrijvingsweerstand worden gebruikt. Daarom is het verloop geschematiseerd met een aantal gedeelten met constante wrijvingsweerstand. In de onderstaande figuur is het gekozen verloop weergegeven met een gestippelde lijn.



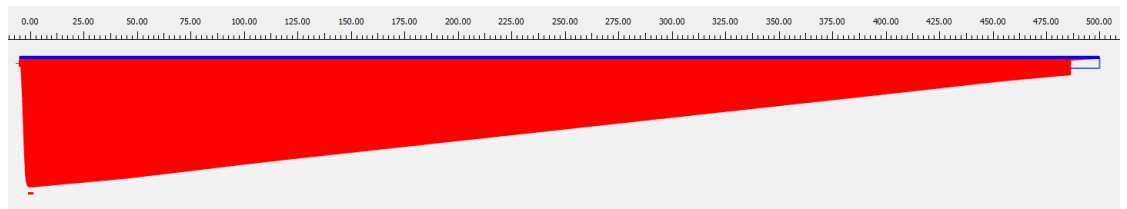
Figuur 5.13 Verloop wrijvingsweerstand tijdens installatie, lengte leiding 500 m, gronddekking 5 m, situatie dat druk in boorgang gelijk is aan statische druk dus $\gamma_{\text{bentoniet}} - \gamma_{\text{water}} \cdot z$ met z in [m - mv].

Het verloop van de axiale kracht is weergegeven in Figuur 5.5.

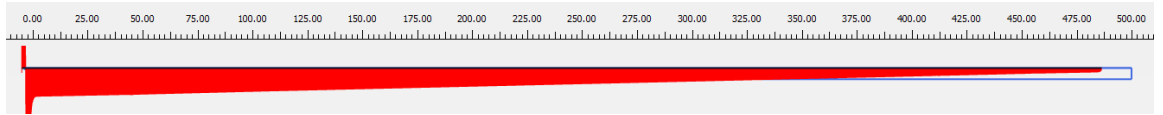


Figuur 5.14 Verloop axiale kracht in leiding tijdens installatie, lengte leiding 500 m, gronddekking 5 m, situatie dat druk in boorgang gelijk is aan statische druk dus $(\gamma_{\text{bentoniet}} - \gamma_{\text{water}}) \cdot z$ met z in [m - mv].

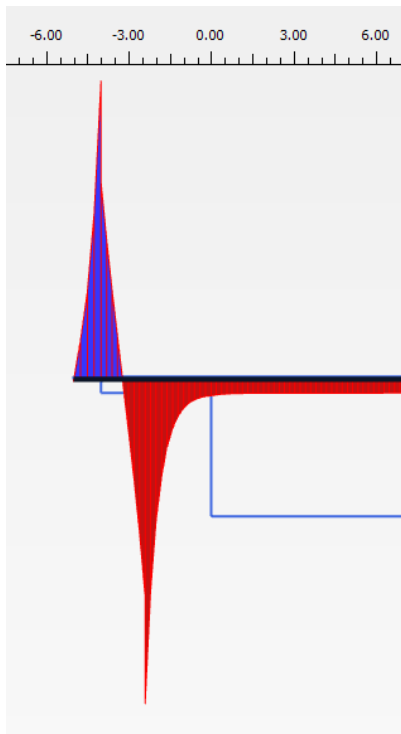
Voor deze in de bovenstaande figuur weergegeven variant worden vervolgens in de onderstaande figuren de resultaten van de PLAXIS berekening getoond.



Figuur 5.15 Axiale kracht binnenhuis ($F_{\text{max}} = 1514 \text{ kN}$).



Figuur 5.16 Axiale kracht buitenbuis, $F_{max} = 237$ kN.



Figuur 5.17 Axiale kracht buitenbuis, detail bij klem, $F_{max} = 237$ kN.

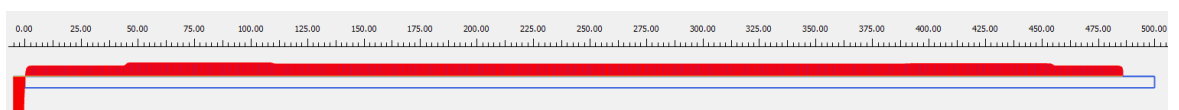
De grootste axiale kracht zit bij de klem. Net voor de klem is sprake van een hoge drukkracht en net achter de klem van een hoge axiale trekkracht.

De verhouding van de axiale kracht in binnen- en buitenbuis is 0,0066 (0,66%). Dit komt overeen met de verhouding in de axiale stijfheid van de binnen- en buitenbuis. Bij de klem is de verhouding anders door de lokale belasting.

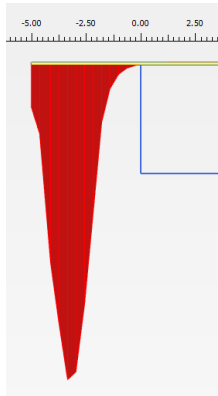


Figuur 5.18 Wrijving in de interface leiding-grond.

Aan de rechterzijde is duidelijk de plaats van de boormachine met de hogere wrijvingsweerstand aldaar te herkennen.



Figuur 5.19 Schuifkracht in de isolatielaag, (piekwaarde 726 kN/m).



Figuur 5.20 schuifkracht in de isolatielaag, detail bij klem (piekwaarde 726 kN/m).

Voor het verloop van de schuifspanning in de isolatielaag wordt eenzelfde verloop gevonden als bij de berekening voor het intrekken van een leiding in zand (paragraaf 5.3).

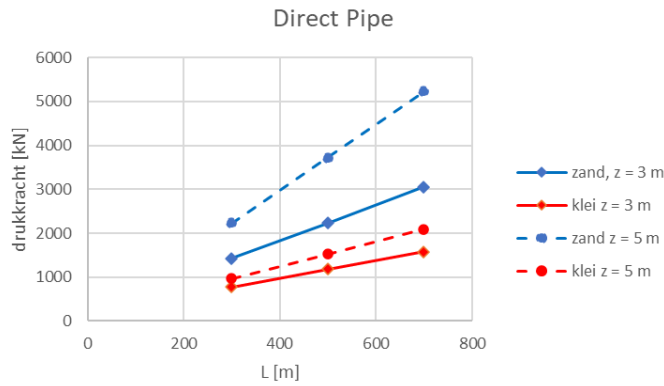
In Tabel 5.2 zijn de belangrijkste berekeningsresultaten verzameld. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2.

Tabel 5.3 Resultaten aanlegberekening Direct Pipe, leiding in klei.

Lengte leiding [m]	300	500	700	300	500	700
Gronddekking [m]	3	3	3	5	5	5
Totale weerstand [kN]	774	1175	1579	965	1525	2090
Binnenbuis N_max [kN]	768.4	1166.5	1567.6	958.0	1514	2074.9
Buitenbuis, N_max [kN]	120,3	182,6	245,4	150,0	237	324,8
Isolatielaag T_max [kN]	368,5	559,4	751,7	459,4	726	995,0
$\sigma_{\text{binnenbuis}}$ [kPa]	43491	66024	88724	54224	85690	117438
$\sigma_{\text{buitenbuis}}$ [kPa]	4938	7496	10073	6156	9729	13333
τ_{isolatie} [kPa]	165	250	337	206	325	445

5.5 Beschouwing resultaten

In Figuur 5.21 is het verband tussen leidinglengte en benodigde drukkracht gegeven. Dit is zowel voor de ondergrond van zand als van klei gedaan.



Figuur 5.21 Verband tussen leidinglengte en benodigde drukkracht.

In het rapport “Thruster testen op een 28 inch leiding, Aambeeld WP 4, 11207943-019-GEO-0002” is beschreven dat een maximale drukkracht, zonder schade aan de leiding te geven, van 450 kN mogelijk is op een leiding met een diameter van 711 mm. Bij de grotere leiding met een diameter van 900 mm in de huidige studie is mogelijk een kracht van 560 kN haalbaar. Dit is echter lager dan de benodigde kracht bij een kleigrond en een lengte van 300 m (Als enige plasticiteit in de leiding zou worden geaccepteerd is een hogere drukkracht mogelijk, ongeveer 1000 kN waarbij bezwijken optreedt).

Uit extrapolatie van de berekeningsresultaten volgt dat bij een lengte van ongeveer 75 m bij zand een drukkracht van 560 kN wordt bereikt, bij klei is dat bij een lengte van ongeveer 150 m.

De maximaal mogelijke drukkracht kan worden vergroot door de leiding te voorzien van een GRP (Glass fibre Reinforced Plastic) laag. Uit de uitgevoerde testen is afgeleid dat dan een kracht van 980 kN mogelijk is zonder schade (De bezwijkwaarde is dan 1800 kN).

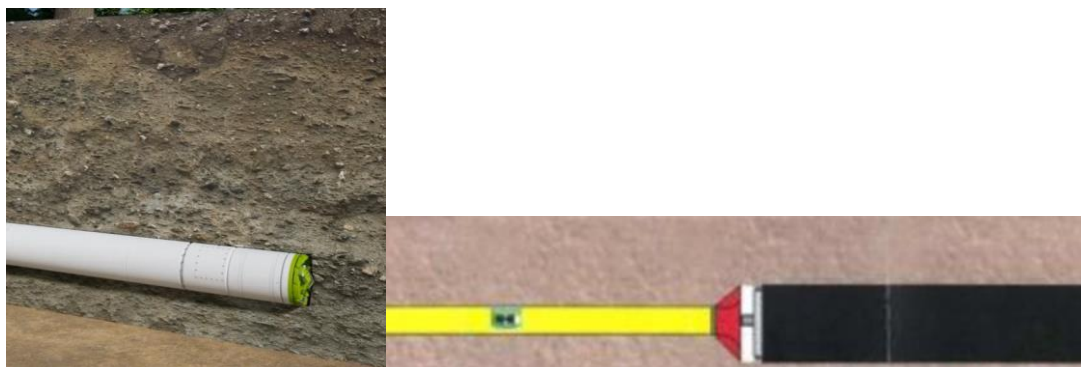
Om een lengte van 400 m in klei grond te kunnen aanleggen is het dus noodzakelijk om GRP toe te passen. In zand is de haalbare lengte bij toepassing van GRP 120 m zonder schade aan de leiding. Als enige plasticiteit wordt geaccepteerd, is de maximaal haalbare lengte 240 m in zandgrond.

Het dient te worden opgemerkt dat in de bovenstaande beschouwing geen ontwerp factoren zijn meegenomen. De genoemde lengten zijn daarom indicatief.

6 Aanleg middels EPP met ruimer

6.1 Kenmerken aanlegmethode

De EPP methode is vergelijkbaar met een 'gesloten front' techniek., De aanleg gaat in twee fasen. Bij de eerste fase worden boorbuizen met boormachine vanuit een startput naar een eindput geboord. Vervolgens wordt de boormachine verwijderd en wordt de leiding aan de boorstangen gekoppeld, waarna het geheel wordt teruggetrokken. De huidige diameter van het systeem is 506 mm. Voor grote diameter leidingen moet bij het terugtrekken voor de productbuis een ruimer worden geïnstalleerd die de boorgang tot de vereiste diameter ruimt. Deze methode is nog in ontwikkeling. Figuur 6.1 toont het principe van deze aanlegmethode.



Figuur 6.1 Aanleg leiding met EPP, links de eerste fase, rechts principeschets van het intrekken met ruimer, het huidige ontwerp van de ruimer wijkt af van de hier getoonde vorm (illustraties: Herrenknecht).

Als onderdeel van werkpakket WP4 van AAMBEELD zijn bij Herrenknecht testen met deze methode uitgevoerd. De diameter van de ruimer was daarbij 760 mm. Afhankelijk van de procesparameters en de voortgangsnelheid kan er zowel sprake zijn van teveel weghalen van de grond als van opdrukken van de grond bij de ruimer. De verwachting is dat, bij goed inregelen van de procesparameters, het mogelijk is om te boren met verwaarloosbare invloed op het maaiveld.

De methode is nog in ontwikkeling. Daardoor zijn nog niet alle details van de uitvoering bekend. Een ruimer voor de aanleg van een leiding met een diameter van 900 mm moet bijvoorbeeld nog worden ontworpen. Voor deze studie moeten daarom een aantal aannamen worden gedaan, zoals de dikte van de annulus, de overdruk van de boorvloeistof in de annulus tijdens het intrekken van de productbuis en de bevestiging van de productbuis aan de ruimer bij het intrekken.

Bij voldoende overdruk in de annulus zal het boorgat tijdens de intrekfase stabiel zijn. Voor de wrijvingsweerstand tijdens het intrekken is de situatie dan gelijk aan die bij de aanleg volgens de Direct Pipe methode. Bij onvoldoende overdruk is het boorgat niet stabiel en gaat de grond op de leiding rusten. In hoeverre daarbij sprake is van boogwerking hangt af van de afmetingen van de annulus. Voor deze studie zal worden uitgegaan van een kleine annulus.

Voor deze studie wordt verondersteld dat bij de koppeling van de productbuis met de ruimer via de binnenbuis gaat en dat er niet direct aan de buitenbuis wordt gekoppeld.

Of er langs de in te trekken leiding boorvloeistof aanwezig is, is bij de verdere ontwikkeling van de methode nog te bepalen. Voor deze studie wordt aangenomen dat er rond de leiding

drillgrout aanwezig is. Verder wordt aangenomen dat de druk in de drillgrout gelijk is aan de statische druk.

6.2 Modelling

6.2.1 Opzet model

Voor de berekening zijn er twee fasen mogelijk maatgevend, het boren van de EPP buis (zonder ruimer) en het vervolgens terugtrekken van het systeem.

De eerste gang bepaald de benodigde drukkracht die het rack and pinion jacking frame moet uitoefenen. De krachten in deze fase zijn de belasting op het front en de wrijving van de boorbuizen. In deze fase is de productleiding nog niet aanwezig. Daarom wordt in dit rapport deze fase niet verder berekend.

De tweede fase is het feitelijk intrekken van de leiding. De krachten in deze fase zijn de wrijving op de boorbuizen, de kracht op de ruimer en de wrijving langs de productleiding. De situatie dat de leiding volledig is ingetrokken is maatgevend voor de leiding.

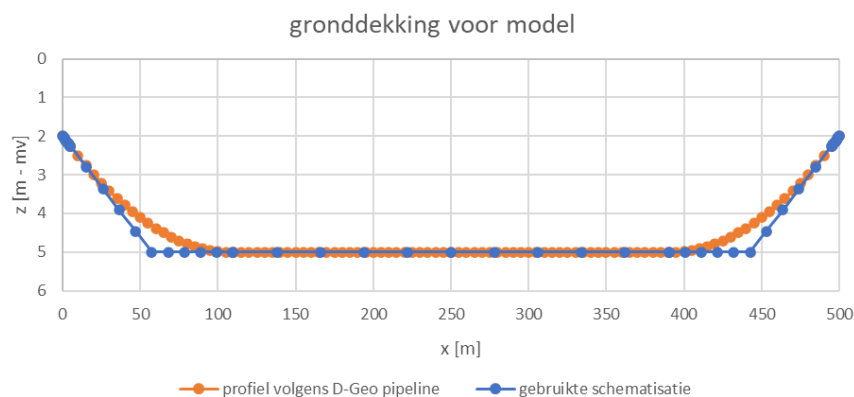
Voor deze studie wordt verondersteld dat de dikte van de annulus gering is. Dat betekent dat er wel enige boogwerking zal zijn. Of de dikte voldoende is om de boogwerking volledig tot ontwikkeling te laten komen is nog niet onderzocht. Voor deze situatie wordt verwacht dat de boogwerking boven de leiding wel enigszins aanwezig is, maar dat de mate van oversnijding te klein is om de boogwerking volledig te ontwikkelen. De gronddruk tegen de leiding zal dus ergens tussen de neutrale gronddruk en de volledig actieve gronddruk liggen. Voor de modellering wordt daarom uitgegaan van een situatie waarbij de gronddruk op de leiding het gemiddelde is van de situatie zonder boogwerking en de situatie met volledig ontwikkelde boogwerking. Verder wordt verondersteld dat, ook bij een kleine annulus, er nog steeds sprake is van Drill-grout tussen de leiding en de grond, maar dat er geen sprake is van overdruk in de Drill-grout.

6.2.2 Geometrie

Voor de geometrie van de leiding zijn de volgende waarden gehanteerd:

- Gronddekking: 3 m en 5 m.
- Startdiepte: $mv - 2$ m.
- Bochtstraal: 2000 m.
- Intredehoek:
 - 3 graad, voor situatie met 5 m gronddekking.
 - 1,5 graad, voor situatie met 3 m gronddekking.

Voor de berekening van de gronddekking is de geometrie vereenvoudigd.



Figuur 6.2 Geometrie voor berekening wrijvingsweerstand.

6.2.3 Modellingering wrijving

Voor de gronddruk op de leiding wordt dezelfde aanpak als voor de bedrijfsfase gevolgd. Achtergrond voor de modellering is dat er bij de ruimer wel enige oversnijding is, maar dat deze beperkt van grootte is. Dat betekent dat er wel enige vorm van boogwerking is, maar dat de boog waarschijnlijk niet volledig is ontwikkeld. Voor deze situatie is nog geen rekenmodel beschikbaar dat alle effecten kwantitatief correct meeneemt. In afwezigheid daarvan is de veronderstelling dat de gronddruk het gemiddelde is van de neutrale gronddruk en de gronddruk bij volledige boogwerking.

Er zijn dus voor de bepaling van de gronddruk twee berekeningen nodig zijn. De eerste berekening is het bepalen van de neutrale gronddruk, de tweede berekening de druk als er sprake is van volledige boogwerking. Voor de tweede berekening kan dezelfde aanpak als bij Direct Pipe worden gevolgd.

In de berekening wordt de extra weerstand in de bochten meegenomen.

Voor de wrijvingsweerstand worden de volgende waarden gebruikt:

- $f_2 = 0,05$ kPa.
- $f_3 = 0,2$.

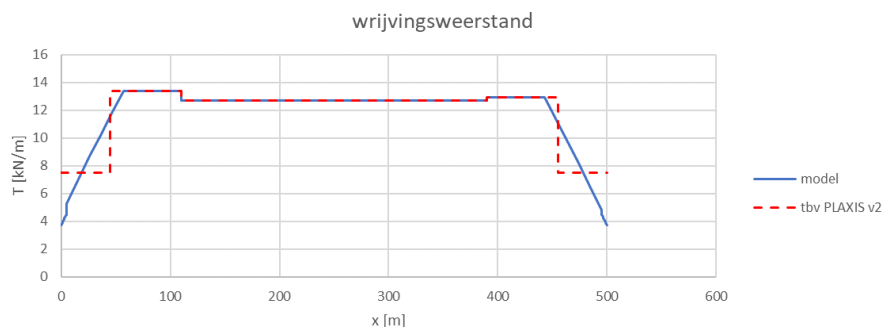
Uitgegaan is van een lege leiding tijdens het intrekken.

6.3 Resultaten berekening, leiding in zand

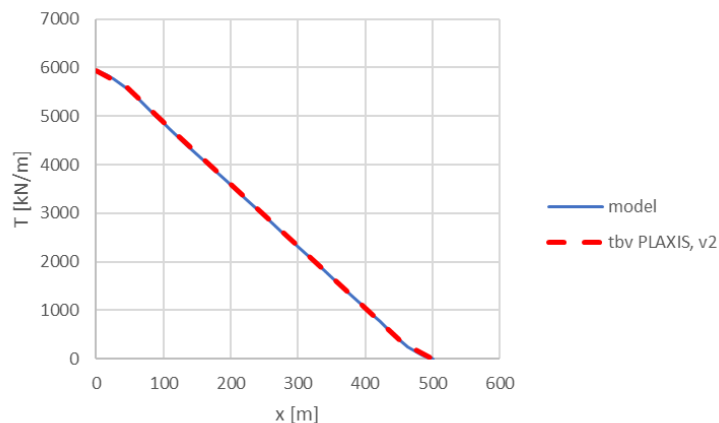
Met de formules voor wandwrijving en extra krachten in de bocht is het verloop van de wrijvingsweerstand langs de leiding berekend.

Voor de modellering in PLAXIS is het verloop van de wrijving geschematiseerd tot een aantal trajecten met constante wrijvingsweerstand. Vereiste daarbij was dat de gesommeerde wrijvingsweerstand in de schematisatie praktisch gelijk is aan de totale weerstand volgens de berekening.

Er zijn 6 berekeningen gemaakt (2 diepteliggingsen, 3 leidinglengten). Voor een situatie is de procedure in Figuur 6.3 weergegeven. Het verloop van de axiale kracht is in Figuur 6.4 weergegeven voor de situatie van een 500 m lange leiding in zand met 5 m gronddekking.

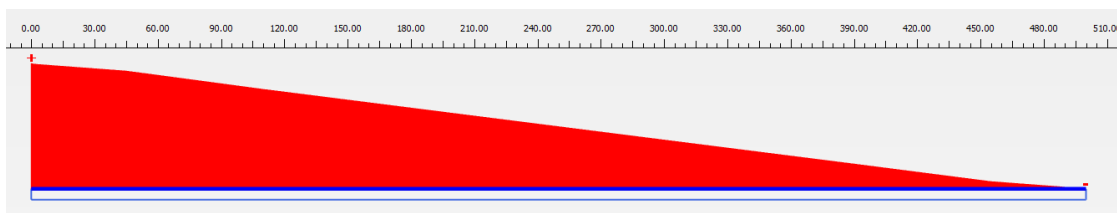


Figuur 6.3 Verloop wrijvingsweerstand langs leiding, volgens model en gekozen schematisatie voort PLAXIS berekening.

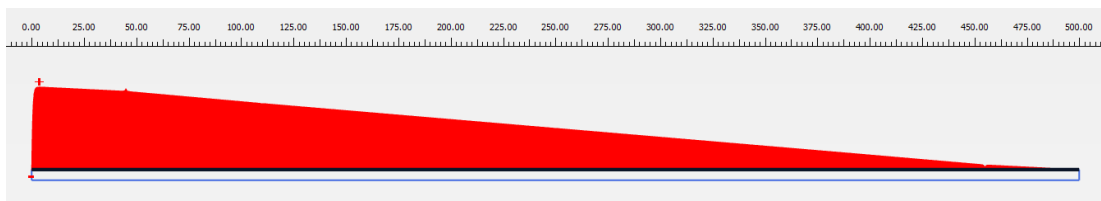


Figuur 6.4 Vergelijking verloop axiale kracht in leiding volgens model en volgens schematisatie voor de PLAXIS berekening, lengte leiding is 500 m.

Voor deze situatie zijn in Figuur 6.5 tot Figuur 6.7 de resultaten van de PLAXIS berekening gegeven. In deze figuren staat op de horizontale as de afstand en op de verticale as de in het onderschrift genoemde parameter. Ten behoeve van de schaling is in het onderschrift ook de maximale waarde gegeven.

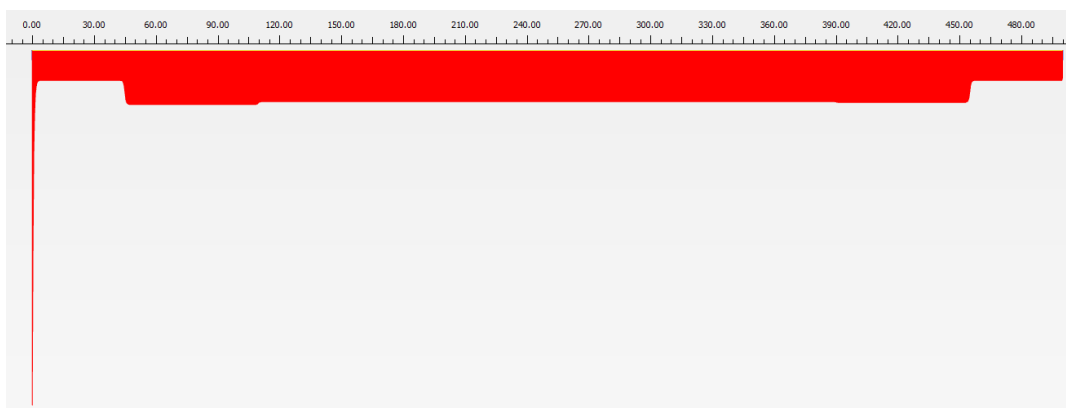


Figuur 6.5 Axiale kracht in binnenbuis (piekwaarde 5939 kN).



Figuur 6.6 Axiale kracht in buitenbuis (piekwaarde 39,22 kN).

De axiale kracht in de buitenbuis is 0,66% van de axiale kracht in de binnenbuis.



Figuur 6.7 Schuifkracht in isolatielaag (piekwaarde 86,23 kN).

De grootste waarde van de schuifkracht is aanwezig bij het punt waar aan de leiding wordt getrokken. Voor de rest van de leiding volgt de schuifkracht de grondweerstand. De waarde is iets lager (ongeveer 0,66%). Dit komt omdat de buitenbuis ook een klein deel van de schuifweerstand opneemt.

In Tabel 6.1 zijn de belangrijkste resultaten verzameld. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2. Uit de eerdere PLAXIS berekeningen is geconstateerd dat de verdeling van de kracht in binnenbuis en buitenbuis zich laat bepalen op basis van de verhouding in de axiale stijfheid. Voor de schuifkracht in de isolatielaag geldt dat deze, voor de hier gebruikte leidingparameters, praktisch de grondwrijving volgt. Dit is gebruikt om de verschillende waarden in te vullen.

Tabel 6.1 Resultaten aanlegberekening EPP, ligging in zand.

Lengte leiding [m]	300	500	700	300	500	700
Gronddekking [m]	3	3	3	5	5	5
Totale weerstand [kN]	1991	3378	4766	3377	5940	8503
Binnenbuis N_max [kN]	1991	3377	4765	3376	5939	8502
Buitenbuis, N_max [kN]	12,8	21,7	30,7	21,7	38,22	54,7
Isolatielaag T_max [kN]	28,9	49,0	69,2	49,0	86,23	123,4
$\sigma_{\text{binnenbuis}}$ [kPa]	112669	191158	269703	191101	336138	481176
$\sigma_{\text{buitenbuis}}$ [kPa]	526	892	1259	892	1569	2246
τ_{isolatie} [kPa]	13	22	31	22	39	55

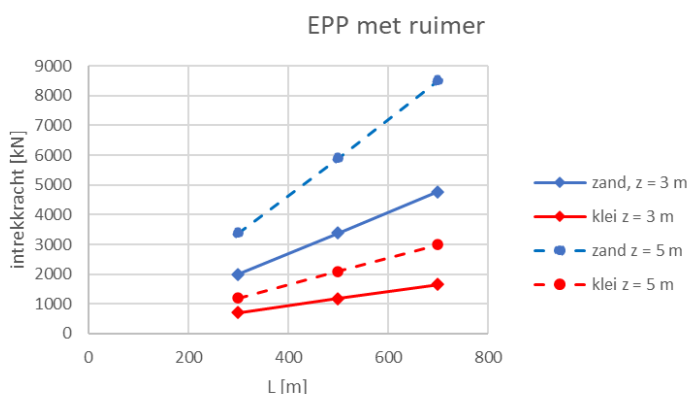
6.4 Resultaten berekening, leiding in klei

Evenals voor een leiding in zand zijn er 6 varianten (3 leidinglengten, 2 gronddekkingen) berekend. De gevolgde procedure is gelijk aan die voor zand. De berekende krachten in de leiding tijdens het intrekken in klei zijn in Tabel 6.2 verzameld. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de toelaatbare waarden volgens paragraaf 2.2.

Tabel 6.2 Resultaten aanlegberekening EPP, ligging in klei.

Lengte leiding [m]	300	500	700	300	500	700
Gronddekking [m]	3	3	3	5	5	5
Totale weerstand [kN]	705	1179	1652	1192	2093	2993
Binnenbuis Max [kN]	705	1179	1652	1192	2093	2992
Buitenbuis, N_max [kN]	4,5	7,6	10,6	7,7	13,5	19,3
Isolatielaag T_max [kN]	10,2	17,1	24,0	17,3	30,4	43,4
$\sigma_{\text{binnenbuis}}$ [kPa]	39895	66718	93485	67454	118441	169371
$\sigma_{\text{buitenbuis}}$ [kPa]	186	311	436	315	553	791
τ_{isolatie} [kPa]	5	8	11	8	14	19

In Figuur 6.8 is het verband tussen leidinglengte en benodigde trekkracht grafisch weergegeven. In deze figuur zijn ook de berekende waarden voor aanleg in zand weergegeven.



Figuur 6.8 Verband tussen leidinglengte en benodigde trekkracht, aanleg met EPP + ruimer.

6.5 Beschouwing resultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een lege leiding. Bij een ondergrond van zand is de weerstand ongeveer een factor 3 hoger dan bij een ondergrond van klei.

De spanningen in de buitenbuis en in de isolatielaag liggen ruim onder de grenswaarden. Ook de staalspanningen zijn lager dan de grenswaarde.

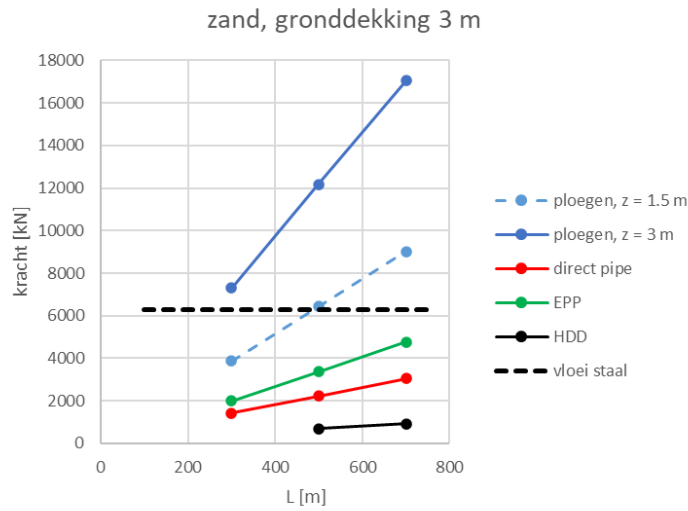
7 Conclusies en aanbevelingen

In Tabel 7.1 worden de berekende intrekkrachten en indrukkrachten (bij de direct pipe methode) op de warmte transport leiding (DN700/900) per aanlegmethode voor de situatie met een zand en een klei ondergrond conform de uitgangspunten van de beschouwde cases weergegeven.

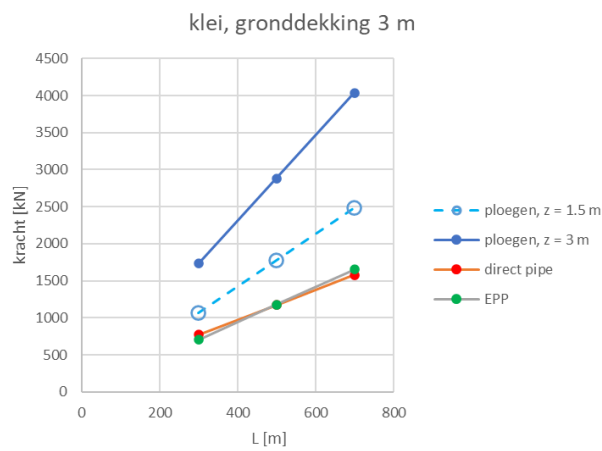
Tabel 7.1 Samenvatting intrekkrachten en indrukkrachten (in [kN]) voor verschillende aanlegmethoden.

Aanlegmethode	Gronddekking [m]	Grondsoort	Leidinglengte [m]			
			300	500	700	1000
Ploegen ($C_t = 1,5$)	1,5	Zand	3866	6444	9021	--
		Klei	1065	1775	2486	--
	3	Zand	7309	12181	17053	--
		Klei	1730	2883	4036	--
HDD	25	Zand	--	688	934	1303
Direct Pipe	3	Zand	1427	2233	3049	--
		Klei	774	1175	1579	--
	5	Zand	2232	3714	5229	--
		Klei	965	1525	2090	--
EPP	3	Zand	1991	3378	4766	--
		Klei	705	1179	1652	--
	5	Zand	3377	5940	8503	--
		Klei	1192	2093	2993	--

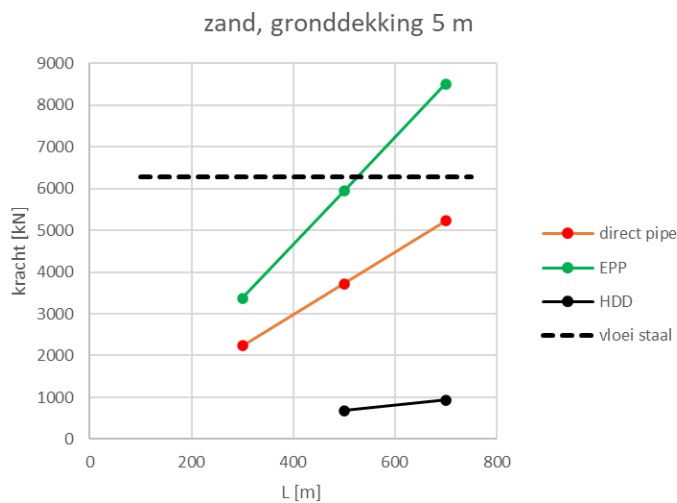
De resultaten kunnen ook grafisch worden weergegeven. Dit is in de volgende figuren gedaan. Voor de meeste aanlegmethoden bepaalt de staalspanning in de binnenbuis de maximaal mogelijke aanleg lengte. Bij een vloeispanning van 355 N/mm^2 is de grenswaarde voor de axiale kracht 6272 kN. Deze grens is in Figuur 7.1 en Figuur 7.3 weergegeven. In de andere twee figuren valt deze waarde boven de berekende kracht. Bij de Direct Pipe methode is de staalspanning in de binnenbuis niet maatgevend.



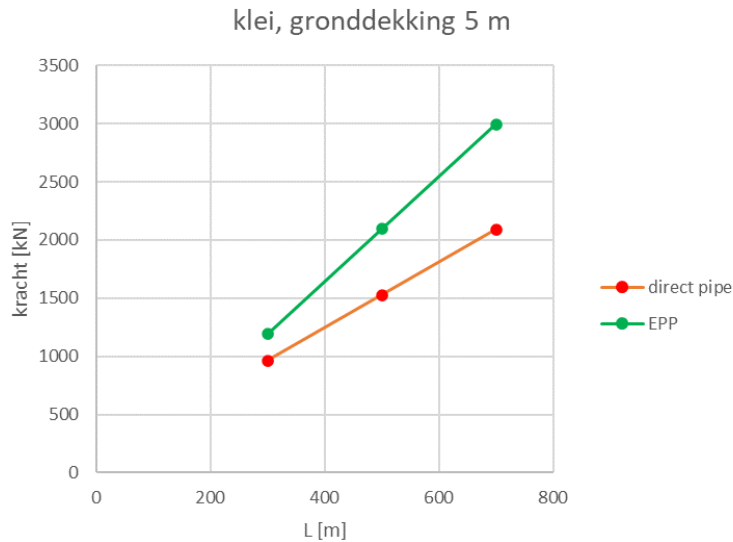
Figuur 7.1 Benodigde kracht voor aanleg leidingen, situatie zand en gronddekking van 3 m.



Figuur 7.2 Benodigde kracht voor aanleg leidingen, situatie klei en gronddekking van 3 m.



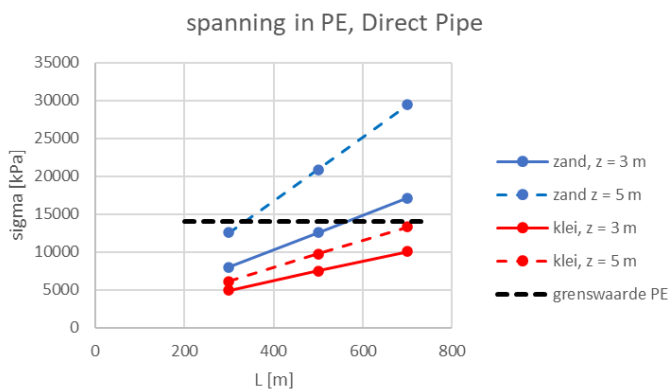
Figuur 7.3 Benodigde kracht voor aanleg leidingen, situatie zand en gronddekking van 5 m.



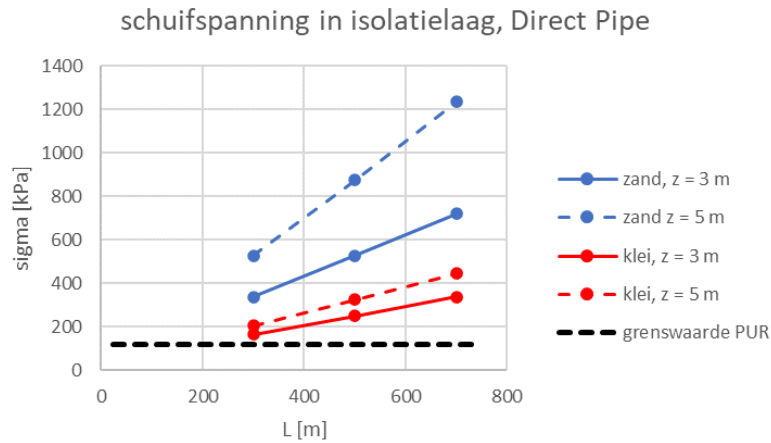
Figuur 7.4 Benodigde kracht voor aanleg leidingen, situatie klei en gronddekking van 5 m.

Voor de aanlegmethoden ploegen, HDD en EPP kan aan de hand van de bovenstaande grafieken de aanleg lengte worden bepaald (de staalspanning in de binnenbuis is maatgevend). Het dient te worden opgemerkt dat geen ontwerp factoren zijn toegepast en dat de lengten daarom als indicatief moeten worden beschouwd.

Voor de aanlegmethoden Ploegen en Direct Pipe is de staalspanning niet maatgevend. Bij de ploegmethode is de te mobiliseren kracht door de lier en de opneembare kracht van de equipment bij grotere aanleg lengten van belang. Bij de Direct Pipe methode is de sterkte van de PE buitenbuis en de schuifsterkte van PUR maatgevend. In Figuur 7.5 en Figuur 7.6 zijn de berekende spanningen in de buitenbuis en de isolatielaag weergegeven. In deze figuren is tevens de grenswaarde (zonder partiële factor) voor de spanningen weergegeven.



Figuur 7.5 Spanning in buitenbuis, aanlegmethode Direct Pipe.



Figuur 7.6 Schuifspanning in isolatielaag, aanlegmethode Direct Pipe.

Uit deze bovenstaande figuren volgt dat bij de Direct Pipe methode de schuifspanning in de isolatie laag de maatgevende factor is. Uit extrapolatie van de resultaten laat zich hiermee de maximale lengte die zonder schade kan worden geïnstalleerd met de Direct Pipe methode worden afgeleid. Voor aanleg in zand is dat ongeveer 100 m en voor aanleg in klei ongeveer 200 m. De uitgevoerde metingen bij een Direct Pipe Thruster die in WP 4 van het Aambeeld project zijn uitgevoerd en kort zijn beschreven in paragraaf 5.5 bevestigen deze aanleg lengten. Ook hier geldt dat de lengten indicatief zijn, omdat er geen ontwerp factoren zijn gebruikt.

Bij alle aanlegmethoden blijkt dat de benodigde kracht praktisch evenredig is met de lengte van de leiding. De bochteffecten zijn niet groot bij de beschouwde cases. In de zand ondergrond worden hogere weerstanden gevonden dan bij klei. De benodigde kracht voor installeren is afhankelijk van de aanlegmethode. Voor de gebruikte aanlegmethoden is de volgorde van hoge naar lage weerstand: ploegen, EPP met ruimer, Direct Pipe, HDD. Dit is te verklaren vanuit de optredende wrijving tegen de leiding die door gronddruk wordt bepaald.

De verdeling van de krachten in de binnenbuis en in de buitenbuis volgt de verhouding van de axiale stijfheden. De (stalen) binnenbuis is beduidend stijver dan de (PE) buitenbuis en neemt praktisch alle axiale belasting op. Bij een overdracht van de lokale belasting op de buitenbuis bij de Direct Pipe methode is de verhouding anders.

In de onderstaande tabel wordt indicatief aangegeven welke lengten er aangelegd kunnen worden per aanlegmethode. In de berekeningen zijn geen ontwerp factoren meegenomen en zijn alleen berekeningen gemaakt voor de geselecteerde cases. De in de tabel vermelde lengten zijn daarom indicatief.

Tabel 7.2 Indicatieve aanleg lengteAanlegmethode	Gronddekking [m]	Grondslag	Maximale lengte [m]	Opmerkingen
ploegen	1,5	Zand	< 500	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Zand	< 250	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	1,5	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
	3,0	Klei	> 700	Mobilisatie trekkracht kan limiterende factor zijn
HDD	25		> 1000	
Direct Pipe	3,0	Zand	< 125	isolatielaag maatgevend
	5,0	Zand	< 100	isolatielaag maatgevend
	3,0	Klei	< 225	isolatielaag maatgevend
	5,0	Klei	< 200	isolatielaag maatgevend
EPP	3,0	Zand	< 900	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Zand	< 500	Boorvloeistof in annulus van belang
	3,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang
	5,0	Klei	> 1000	Boorvloeistof in annulus van belang

7.1 Aanbevelingen

Bij de berekeningen is dat bij het intrekken er direct aan de binnenbuis wordt getrokken. Dat beperkt de krachten in de buitenbuis. Een uitzondering is de aanleg met de Direct Pipe methode. Daarbij moet de benodigde drukkracht via de buitenbuis en de isolatielaag op de binnenbuis worden overgebracht. Dit geeft ter plaatse van de klem plaatselijk hoge spanningen in de buitenbuis en de isolatielaag. Bij de berekeningen in dit rapport is niet onderzocht in hoeverre het verstevigen van de buitenbuis, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een GRP laag van voldoende dikte, de toelaatbare drukkracht vergroot. Met een sterkere en stijvere buitenbuis kan de met de Direct Pipe methode aan te leggen leiding lengte worden vergroot.

Bij de aanlegmethoden Direct Pipe en EPP wordt de wrijving bepaald door de gronddruk tegen de leiding in het boorgat. De smeervloeistof c.q. boorvloeistof in de annulus en de heersende druk is van belang voor de gronddruk op de leiding. Voor de gronddruk op de bovenkant van de leiding is uitgegaan van gehele of gedeeltelijke boogwerking boven de leiding. De afname van de verticale spanning is berekend met de formules van Terzaghi voor boogwerking. Voor het ontwikkelen van de boog rondom het boorgat moet de grond vervormen, zodat hier sprake zal zijn van een tijdseffect. Dat zal een vertraging geven in het ontstaan van de verticale gronddruk op de leiding. In hoeverre dat de wrijvingsweerstand beperkt is nog niet onderzocht. Nader onderzoek is vereist om te bepalen hoe relevant het tijdsaspect is en hoeveel reductie van de wrijvingsweerstand dit aspect met zich mee brengt.

A Leidingparameters

A.1 Leidingafmetingen

Voor de aanlegfase zijn de korte termijn parameters van PUR en PE van belang. Voor de leiding worden de volgende parameters gebruikt. Het betreft hier de waarden voor de aanlegfase, dus kortdurende belasting en omgevingstemperatuur.

- Binnenbuis
 - Materiaal: staal.
 - Buitendiameter: $D = 0,711$ m.
 - Wanddikte: $t = 8$ mm.
 - Stijfheid: $E = 206500$ N/mm² (=2,065 E8 kN/m²).
 - Rekgrens bij $T \leq 50^{\circ}\text{C}$: 355 N/mm².
 - Volumiek gewicht 78,5 kN/m³.
 - Dwarscontractie: 0,3.
- Isolatie
 - Stijfheid: $E = 10$ MPa.
 - Dwarscontractie: $\nu = 0,2$.
 - Toelaatbare schuifspanning: 0,12 MPa.
 - Toelaatbare druksterkte: 0,15 MPa.
 - Volumiek gewicht: 0,6 kN/m³.
- Buitenbuis
 - Materiaal: HDPE.
 - Buitendiameter: $D = 0,90$ m.
 - Wanddikte: $t = 8,7$ mm.
 - Stijfheid: $E = 1000$ MPa.
 - Treksterkte: 14 MPa.
 - Volumiek gewicht: 9,56 kN/m³.

A.2 Afgeleide parameters voor berekening

In de PLAXIS berekening worden de binnenbuis en de buitenbuis als een plaalement gemodelleerd. De isolatielaag wordt met volume-elementen gemodelleerd.

Voor de binnenbuis en de buitenbuis moet de axiale stijfheid (EA) correct worden gemodelleerd. Voor de isolatielaag moet de schuifstijfheid KS correct worden gemodelleerd.

A.2.1 Axiale stijfheid binnenbuis en buitenbuis

Voor een plaalement is de axiale stijfheid EA een invoerparameter. Hier kan dus worden volstaan met het berekenen van de waarde van EA voor de binnenbuis en de buitenbuis.

Tabel A.1 Berekening axiale stijfheid binnenbuis en buitenbuis.

Onderdeel	E [N/mm ²]	D _o [m]	t [m]	D _i [m]	A [m ²]	EA [kN]
Binnenbuis	206500	0,711	0,008	0,695	0,017668317	3,65E+06
Buitenbuis	10000	0,900	0,0087	0,8826	0,024360883	2,44E+04

A.2.2 Parameters isolatielaag, voor plane strain modellering

Voor de isolatielaag is de afschuifstijfheid de belangrijke parameter. Deze kan worden gedefinieerd als de verhouding tussen de schuifkracht in de isolatielaag en de verschilverplaatsing tussen binnenbuis en buitenbuis. In formulevorm:

$$KS_2 = \frac{T}{x_{binnen} - x_{buiten}}$$

Met:

- T de schuifkracht in de isolatielaag [kN].
- x_{binnen} verplaatsing binnenbuis [m].
- x_{buiten} verplaatsing buitenbuis [m].

Voor een leiding verloopt de schuifspanning over de dikte. De verschilverplaatsing wordt dan gevonden door het integreren van de schuifrek over de dikte. Dit geeft de volgende uitdrukking:

$$KS_2 = 2 \cdot \pi \cdot G / \ln(R_{buiten} / R_{binnen})$$

Voor de situatie van twee parallelle platen, zoals in de PLAXIS schematisatie, is de verschilverplaatsing tussen de twee platen:

$$u_2 - u_1 = \gamma \cdot d$$

Met:

- u_1 verplaatsing plaat 1 [m].
- u_2 verplaatsing plaat 2 [m].
- γ schuifrek [-].
- d dikte isolatielaag [m].

De schuifrek is

$$\gamma = \tau / G$$

Hiermee volgt voor de afschuifstijfheid van de isolatielaag bij een schematisatie als 2 parallelle platen:

$$KS_2 = G / d$$

Gelijkstellen van de twee uitdrukkingen voor KS_2 geeft voor de equivalente G-modulus in de PLAXIS berekening:

$$G_{equivalent} = d \cdot 2 \cdot \pi / \ln(R_{buiten} / R_{binnen})$$

Er zijn nu twee variabelen waarmee de gewenste afschuifstijfheid kan worden bereikt, de dikte en de G-modulus van de isolatielaag in de PLAXIS berekening. Het meest praktische is om eerst een waarde voor de dikte te kiezen (bijvoorbeeld 0,1 m), en vervolgens de stijfheid van de isolatielaag zodanig te kiezen dat de gewenste afschuifstijfheid wordt gevonden.

Voor de in deze studie gebruikte leidingafmetingen en $G = 4348 \text{ kN/m}^2$ wordt gevonden $KS_2 = 126356 \text{ kN/m}^3$. Bij een dikte $d = 0,1 \text{ m}$ in de PLAXIS modellering geeft dit $G_{equivalent} = 12636 \text{ kN/m}^2$.

A.2.3 Eigen gewicht

In Tabel A.2 wordt de berekening van het eigen gewicht van de leiding gegeven.

Tabel A.2 Berekening eigen gewicht leiding, droog.

Onderdeel	Doorsnede A [m ²]	Volumiek gewicht γ [kN/m ³]	Gewicht per meter leiding [kN/m]
Binnenbuis	0,02	78,50	1,39
Isolatielaag	0,02	9,56	0,23
Buitenbuis	0,21	0,60	0,13
TOTAAL			1,75

B Modelling intrekken in PLAXIS

B.1 Opzet model

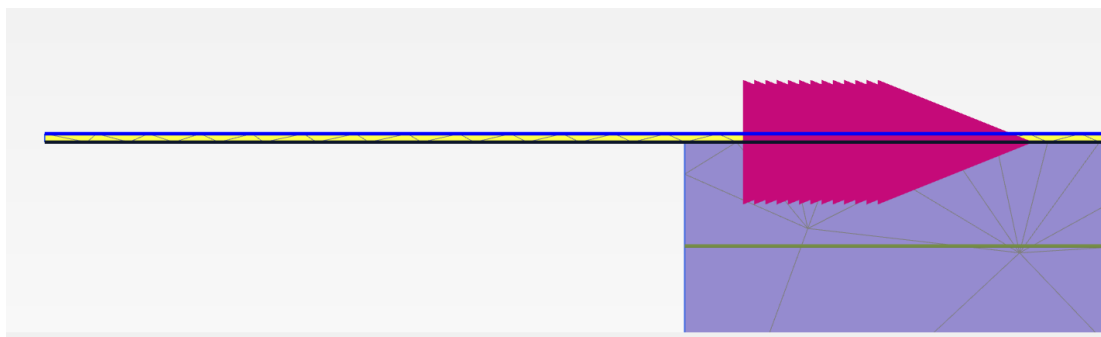
Voor het berekening van de spanningen en vervormingen van een rechte leiding is binnen Deltares een specifiek rekenmodel ontwikkeld. Deze is momenteel nog niet geschikt voor specifieke situaties waarbij de wrijving langs de leiding varieert, zoals voorkomt bij gebogen leidingen of leidingen waarbij meerdere grondlagen worden doorsneden (bijvoorbeeld HDD). Ook situaties waarbij er aan de kop een tegendruk werkt (bijvoorbeeld Direct Pipe of EPP) is deze methode niet geschikt. Voor deze situaties wordt een meer bewerkelijker berekening met PLAXIS gebruikt.

In de PLAXIS berekening wordt de leiding gesimuleerd als een 3-laags systeem, bestaande uit:

- Binnenbuis, gekarakteriseerd met de parameter EA1.
- Isolatielaag, gekarakteriseerd met de parameters dikte en G-modulus.
- Buitenbuis, gekarakteriseerd met de parameter EA3.

Tussen de buitenbuis en de ondergrond is een interface aanwezig. Door de juiste verdeling van de bezwijkschuifsterkte in de interface kan een over de lengte van de leiding variërende wrijvingsweerstand worden gemodelleerd. Figuur B.1 toont een voorbeeld van de gebruikte mesh. Van boven naar beneden zijn de volgende onderdelen aanwezig:

- Binnenbuis, gemodelleerd met plaalementen.
- Isolatielaag, gemodelleerd als volume elementen.
- Buitenbuis, gemodelleerd met plaat elementen.
- Interface, deze modelleert de axiale wrijvingsweerstand.
- Ondergrond.



Figuur B.1 Voorbeeld modellering, situatie met een thruster.

De feitelijke belasting bestaat in alle gevallen uit een voorgeschreven horizontale verplaatsing van de leiding, die voldoende groot is om de volledige wrijvingsweerstand te mobiliseren.

Door de juiste keuze van de randvoorwaarden kunnen verschillende aanlegmethoden worden gesimuleerd. Bij het gebruik van een thruster (Direct pipe) is dit een voorgeschreven verplaatsing van de buitenbuis over de lengte van de klem van de thruster. Bij de situatie dat aan de binnenbuis wordt getrokken (HDD, EPP of inploegen) is het een voorgeschreven verplaatsing van het einde van de binnenbuis.

B.2 Bepaling parameters

Voor de berekening moeten de parameters voor een ronde leiding omgerekend worden naar de waarden die horen bij een 3-lagen systeem.

Voor de binnenbuis en buitenbuis is de maatgevende parameter EA. Deze wordt bepaald uit het product van de doorsnede van de buis en de elasticiteitsmodulus. Om te voorkomen dat buigen het gedrag al te zeer beïnvloed wordt voor de buigstijfheid (EI) een hoge waarde gekozen of (alternatief) de EI van de buis zelf.

Voor de isolatielaag is de afschuifstijfheid de belangrijke parameter. Deze kan worden gedefinieerd als de verhouding tussen de schuifkracht in de isolatielaag en de verschilverplaatsing tussen binnenbuis en buitenbuis. In formulevorm:

$$KS_2 = \frac{T}{x_{binnen} - x_{buiten}}$$

Met:

- T de schuifkracht in de isolatielaag [kN].
- x_{binnen} verplaatsing binnenbuis [m].
- x_{buiten} verplaatsing buitenbuis [m].

In de voorgaande Bijlage A is de bepaling van de stijfheid van de isolatie laag meer in detail beschreven.

B.3 Voorbeelden uitvoer

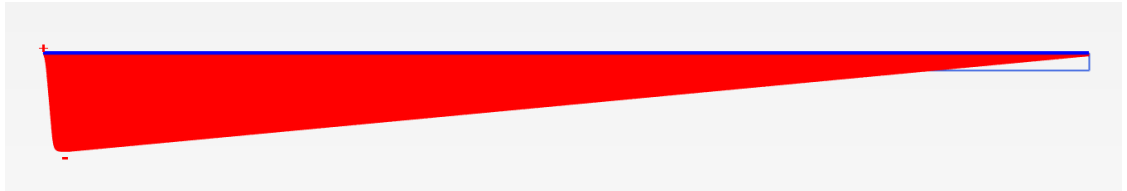
De belangrijkste resultaten van de PLAXIS berekening zijn:

- Axiale kracht in de binnenbuis.
- Axiale kracht in de buitenbuis.
- Schuifspanning in de isolatielaag, door vermenigvuldiging met de breedte (1 m in een 2D plane strain berekening) volgt hieruit direct de schuifkracht.

Uit deze krachten zijn vervolgens weer de gewenste axiale spanningen in de binnenbuis en buitenbuis en de schuifspanning in de isolatielaag te bepalen. Onderstaand worden voor de situatie van Direct Pipe de grafische resultaten gegeven. Bij de Direct Pipe methode wordt op de buitenbuis een zogenaamde thruster geplaatst die de buis wegdrukt.



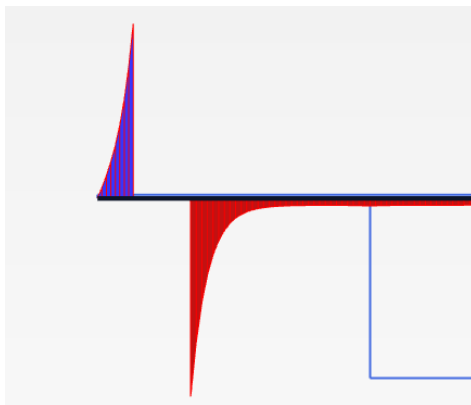
Figuur B.2 Gemobiliseerde wrijving in de interface, deze moet over de volle lengte gelijk zijn aan de voorgeschreven schuifsterkte om sprake te laten zijn van een situatie bij installeren van de leiding.



Figuur B.3 Axiale kracht in de binnenbuis. Te zien is dat de kracht lineair verloopt en aan de linkerzijde, de drukzijde, weer nul wordt.



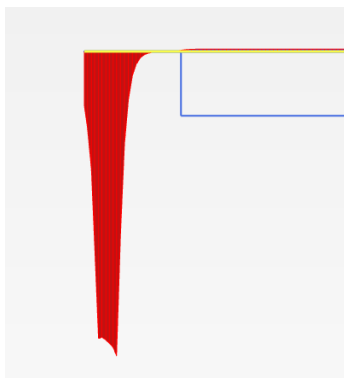
Figuur B.4 Axiale kracht in buitenbuis bij gebruik van een thruster.



Figuur B.5 Detail axiale kracht in buitenbuis bij gebruik van een thruster, duidelijk te zien zijn de hoge spanningen rond de thruster, met een drukkracht voor en een trekkracht achter de thruster; het gedeelte zonder axiale kracht is het gedeelte met de voorgeschreven verplaatsing.



Figuur B.6 Schuifspanning in isolatielaag.



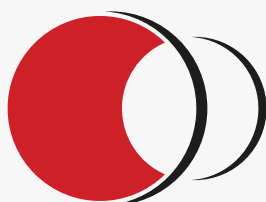
Figuur B.7 Schuifspanning in isolatielaag, detail bij thruster

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

B.2 Rapport Sterkteberekeningen bedrijfsfase



Rotterdam
ENGINEERING

Notitie

Aambeeld wp 2 Cases

Cases te gebruiken voor aanleg en gebruiksfase

Opdrachtgever: Deltares
Project: Deltares - Aambeeld
Kenmerk: RE22079-N01
Revisie: 4

Auteur(s): Arjan Smorenberg

Datum: 5 februari 2024

Auteur:

A. Smorenberg

Paraaf:

Controle:

M. den Burger

Paraaf

Rotterdam Engineering B.V.
Vasteland 78
3011 BN Rotterdam
Telefoon: 010-226 4935

E info@rotterdamengineering.nl
I www.rotterdamengineering.nl
IBAN: NL08 INGB 0006 9391 59
Handelsregister nr. 24391533
BTW-identificatie nr. NL819092691.B01

Inhoudsopgave

1. Inleiding	2
2. Uitgangspunten	3
2.1. Normen en standaarden	3
2.2. Tekeningen	3
2.3. Materiaalgegevens	5
3. Ontwerpgegevens	8
3.1. Procescondities	8
3.2. Grondmodel	8
4. Berekeningen	10
4.1. Belastingen tijdens aanleg	10
4.2. Belastingen bedrijfsfase als gevolg uitvoeringstechniek	12
5. Overige aannames	17
6. Berekeningsresultaten	18
6.1. Overzicht van uitgevoerde berekeningen	18
6.2. Beperking toepassingsgebied resultaten	19
6.3. Overzicht berekeningsresultaten	19
6.4. Algemene beschrijving resultaten	27
7. Conclusies	31
8. Aanbevelingen	34

Bijlagen

Bijlage 1 Case Stedelijk

Bijlage 2 Case Landelijk

Bijlage 3 Wrijvingsweerstand bedrijfsfase, Deltares

Bijlage 4 Berekende Von Mises spanningen ligging in zand

Bijlage 5 Berekende Von Mises spanningen ligging in klei

Bijlage 6 Berekende indrukking kussens ligging in zand

Bijlage 7 Berekende indrukking kussens ligging in klei

Bijlage 8 Berekende radiale vervormingen ligging in zand

Bijlage 9 Berekende radiale vervormingen ligging in klei

1. Inleiding

Vanuit het Aambeeld onderzoek, is de vraag gekomen om verschillende uitvoeringsmethoden met elkaar te vergelijken. Het bepalen van de maximaal haalbare afstand tussen 2 expansielussen per uitvoeringsmethode maakt onderdeel uit van het onderzoek. Het vergelijken van deze uitvoeringsmethoden zal gebeuren aan de hand van 2 praktijkcases.

De uitvoeringsmethoden waar we het specifiek over gaat zijn:

- Open sleuf
- HDD
- E Power pipe
- Gestuurde Avegaar
- Horizontal Pipe Pushing
- Gestuurd intrekken
- Inploegen
- Pipe express
- Gesloten front persing

Om een eerlijke vergelijking te kunnen maken tussen de uitvoeringstechnieken, worden vergelijkingen getrokken tussen 2 verschillende situaties: een warmteleiding project in landelijke omgeving en één in het stedelijk. Deze notitie beschrijft de randvoorwaarden en uitgangspunten waaraan deze cases worden voorgelegd. Ten eerste zullen de van toepassing zijnde normen genoemd worden, vervolgens de ontwerptekeningen en tot slot de procescondities en leiding eigenschappen.

Aangezien er meerdere uitvoeringstechnieken met elkaar vergeleken worden en er ook gekeken wordt naar verschillende aanlegdiepten loopt het aantal te beschouwen cases snel op. Het is echter ook duidelijk dat voor warmteleidingen de wrijving tussen de grond en de leiding de dominante parameter is. Om het aantal cases te verminderen is in overleg met Deltares besproken dat RE een aantal cases beschouwd over de gehele range van realistische wrijvingswaarden die horen bij de verschillende aanlegmethoden en aanlegdiepten. In een grafiek kan de maximaal haalbare loopafstand geplot worden als functie van de wrijvingswaarde. Deltares zal zich focussen op de wrijvingswaarde per specifieke uitvoeringsmethodiek en aanlegdiepte (zie Bijlage 3). Aan de hand van de door Deltares bepaalde wrijvingswaarde kan uit de grafieken worden afgelezen wat de maximaal haalbare loopafstand is.

In Hoofdstuk 2 worden de uitgangspunten beschreven die gehanteerd worden in de onderzoeken van RE en Deltares. Hoofdstuk 3 geeft de ontwerpgegevens en Hoofdstuk 4 de uitgevoerde berekeningen. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van aanvullende aannamen. In Hoofdstuk 6 worden de berekeningsresultaten gepresenteerd en in Hoofdstuk 7 worden de conclusies gegeven.

2. Uitgangspunten

2.1. Normen en standaarden

Voor ondergrondse transportleidingen is in Nederland de NEN3650-1 van toepassing. Stadsverwarmingsleidingen vallen conform de NEN3650-1 onder groep I indien de diameter groter is dan DN300, en temperatuur boven de 110 °C komt. Hierdoor moet het ontwerp getoetst worden aan de NEN3650 middels een uitgebreide sterkteberekening.

In Tabel 2.1 zijn de normen en standaarden aangegeven welke van toepassing zijn op de te beschouwen leidingsecties.

Tabel 2.1: Van toepassing zijnde normen en standaarden

Norm/standaard	Afkorting	Omschrijving
NEN3650-1:2020	NEN3650-1	Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: Algemene Eisen
NEN3650-2:2020	NEN3650-2	Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 2: Aanvullende eisen voor leidingen van staal
EN13941-1:2021-A1	EN13941	Stadsverwarmingsbuizen – Ontwerp en installatie van thermisch geïsoleerd enkele en dubbele buissystemen voor ondergrondse warm water leidingnetten – Deel 1: Ontwerp

2.2. Tekeningen

Het model van het tracé is gebaseerd op de tekeningen genoemd in Tabel 2.2. Deze tekeningen zijn opgenomen in de bijlage (zie Bijlage 1 en Bijlage 2).

2.2.1. Case stedelijk

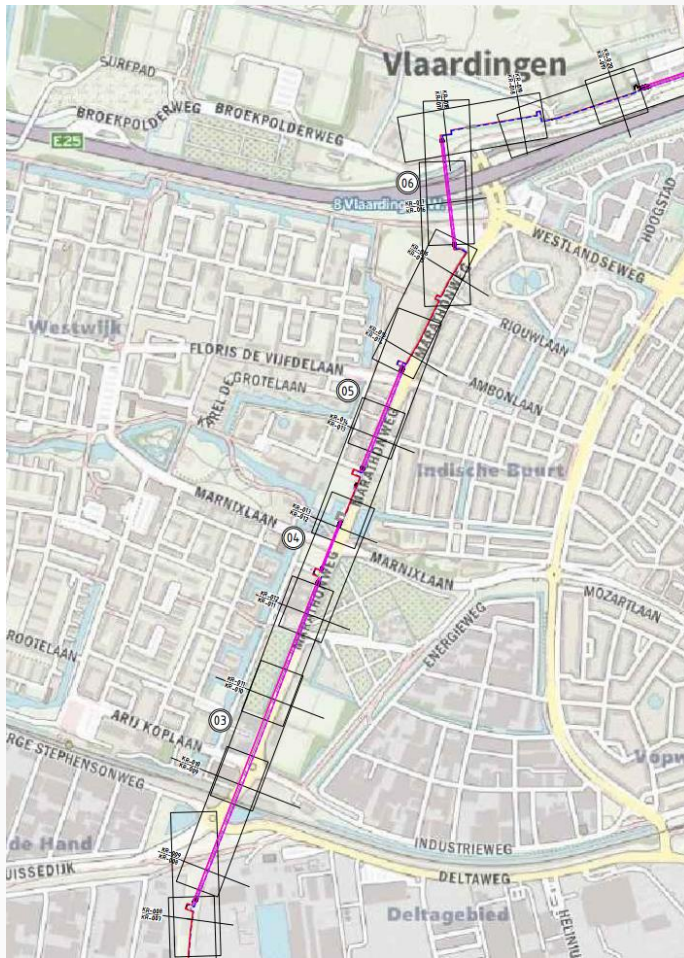
Voor de stedelijke case, wordt een deeltracé van WarmtelinQ voorgesteld. Het gaat hier specifiek voor een deeltracé dat ligt nabij de Marathonweg in Vlaardingen. In Bijlage 1 (Case – Stedelijk) zijn de ontwerptekeningen beschikbaar gesteld van dit deeltracé.

Het tracé is een veldstrekking tot de stad, waarbij het tracé voor onderzoek beperkt wordt tot Tabel 2.2: Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk zijn in Tabel 2.2 aangegeven.

Tabel 2.2: Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk

Beschrijving	Tekening referentie	Wijziging	Datum
Totaal Tekening	X-851-KT-001 v1	1	15-11-22
Routekaarten	X-851-KR-009 T/M 015 V1	1	15-11-22

In Figuur 1 is een overzicht gegeven van het tracé.



Figuur 1 – Marathonweg – Rotterdam - Vlaardingen

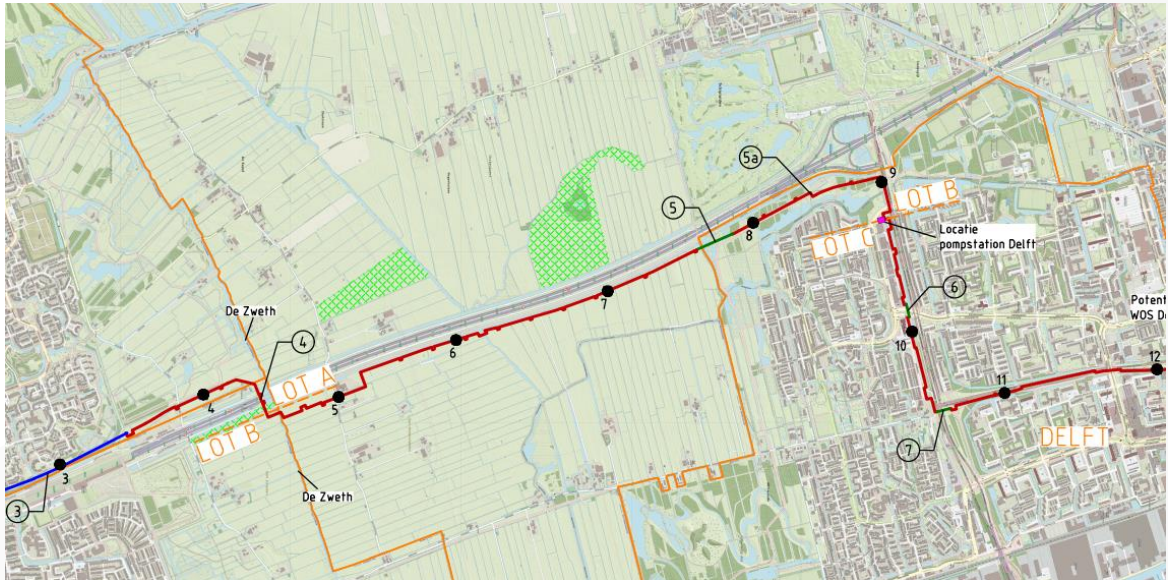
2.2.2. Case landelijk

Voor de landelijke case, wordt wederom een deeltracé van WarmtelinQ voorgesteld. De ontwerptekeningen zijn opgesteld in de periode dat het project nog Leiding door Midden heette (dit tracé is uiteindelijk onderdeel geworden van WarmtelinQ). Het Tracé is het warmteleiding tracé tussen Vlaardingen en Delft. In Bijlage 2 (Case – Landelijk) Zijn de ontwerptekeningen beschikbaar gesteld van dit tracé.

In Tabel 2.3 zijn de gehanteerde tekeningen voor de landelijke case gegeven. In Figuur 2 is een overzicht van het tracé gegeven.

Tabel 2.3: Gehanteerde tekeningen voor case stedelijk

Beschrijving	Tekening referentie	Wijziging	Datum
Totaal Tekening	RS17035-SV-TT06-c	1	3-7-19
Routekaarten	RS17035-SV-RK16 – RK30	c/g	3-7-19



Figuur 2 – landelijk tracé, Vlaardingen - Delft

2.3. Materiaalgegevens

Om het aantal mogelijkheden qua materialen te beperken worden de materiaalgegevens die gebruikt zijn voor WarmtelinQ overgenomen. In zowel de stedelijke als landelijke case, betreft de leiding een stadsverwarmingsleiding, waarbij de diameter van de mediumvoerende leiding een DN700 betreft. Binnen WarmtelinQ is gekozen voor P355NH als standaardmateriaal i.p.v. P235GH. In Tabel 2.4 zijn de specificaties voor P355NH gegeven.

Tabel 2.4: Materiaalspecificaties – P355NH

Gegevens			Eenheid
Kwaliteit staal	-	P355NH	-
Norm	-	NEN-EN 10217-3	-
Elasticiteitsmodulus	E	206500	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α	$1,24 \cdot 10^{-5}$	mm/mm/°C
Dwarscontractiecoëfficiënt	ν	0,30	-
Materiaalfactor	γ_m	1,1	-
Rekgrens bij $T \leq 50 \text{ °C}$	$Re_{(0)}$	355	N/mm ²
Rekgrens bij $\theta = 130 \text{ °C}$	$Re_{(\theta)}$	292	N/mm ²

St-PUR-PE Linepipe

In Tabel 2.5 zijn de specificaties van de veldstrekking weergegeven waarmee gerekend gaat worden in dit onderzoek, deze specificaties zijn afkomstig uit WarmtelinQ. Als fabricagetolerantie op de wanddikte is 8% genomen conform NEN-EN 10217-3 als conservatief uitgangspunt.

Tabel 2.5: Materiaalspecificaties – DN700/900 - linepipe

Gegevens		DN700	Eenheid
Uitwendige diameter staal	D_u	711,0	mm
Wanddikte staal linepipe	t_n	8,0	mm
Negatieve fabricagetol.	T_{ol}	8	%
Volumieke massa staal		7850	kg/m ³
Uitwendige diam. PE Mantel	D_{u-buit}	900	mm
Wanddikte PE	t_n	8,7	mm
E modulus PE		975	MPa
Korte duur treksterkte PE (1 uur)		14 ¹	MPa
Volumieke massa PE		950	kg/m ³
Druksterkte PUR		0,28 ²	MPa
Druksterkte HD-PUR		0,5	MPa
Schuifsterkte PUR@140°C		0,08	MPa
Schuifsterkte PUR@23°C		0,12	MPa
Volumieke massa PUR		60	kg/m ³
E modulus PUR@140°C		6,5	MPa
E modulus PUR@23°C		10	MPa
Dwarscontractie coëfficiënt PUR		0,2	-

St-PUR-PE Bochten

In Tabel 2.6 zijn de specificaties van de bochten weergegeven waarmee wordt gerekend. De opgegeven wanddikte voor de bochten betreft de minimale wanddikte na buigen. Voor de wanddikteafname door buigen zijn percentages van 16,6% en 10% gehanteerd voor respectievelijk 3D en 5D bochten. Dit zijn conservatieve uitgangspunten. De te hanteren wanddikteafname door buigen zal in een later stadium definitief worden vastgesteld.

¹ Opgaaf Deltares. Dit betreft de korte duur sterkte (1 uur) en is niet van toepassing voor de bedrijfsfase.

² De gegarandeerde lange duur drukspanning van het PUR conform de EN13941-1 bedraagt 0,15 N/mm². Hogere waarden mogen gebruikt worden indien de continue bedrijfstemperatuur onder de 120°C ligt en deze hogere waarden voldoende zijn getest en geverifieerd. In de berekening is een hogere lange duur PUR-drukspanning aangehouden en hiermee een uitgangspunt voor het toe te passen materiaal.

Tabel 2.6: Materiaalspecificaties – DN700/900 - bochten

Gegevens		DN700	Eenheid
Uitwendige diameter staal	D_u	711,0	mm
Uitwendige diam. PE Mantel	$D_{u\text{-buit}}$	900	mm
Wanddikte staal bocht	t_n	14,2	mm
Wanddikte na buigen (3D)	t_{3D}	11,84	mm
Wanddikte na buigen (5D)	t_{5D}	12,78	mm
Negatieve fabricagetol.	Tol	8	%
Bochtstraal (5D)	R_{5D}	3555	mm

De 5D bochten zullen in de navolgende cases worden beschouwd.

3. Ontwerpgegevens

3.1. Procescondities

In Tabel 3.1 staan de belangrijkste procescondities gegeven die gelden voor het warmtenetwerk van WarmtelinQ. Deze condities zijn voor beiden cases van toepassing

Tabel 3.1: Procescondities

Gegevens			Eenheid
Ontwerptemperatuur	T_o	130	°C
Maximale bedrijfstemperatuur	T_b	120	°C
Aanlegtemperatuur	T_a	10	°C
Ontwerpdruk	P_o	25	bar
Bedrijfsdruk	P_b	23	bar

3.2. Grondmodel

Op basis van de grondonderzoeken, die uitgevoerd zijn voor het project, kan een algemene grondgesteldheid worden overgenomen. In Tabel 3.2 staat het grondonderzoek aangegeven voor WarmtelinQ.

Tabel 3.2: Grondonderzoek

Beschrijving	Tekening referentie	Wijziging	Datum
Grondonderzoek	LdM-T-403-RP-007	2.0	30-7-2020

Met betrekking tot de dekking, kan bij een aanleg in een open sleuf worden rekening gehouden met een niveau van -1 m onder maaiveld van de bovenkant van de buitenzijde van de leiding. Bij de andere aanlegmethoden is een andere dekking van toepassing.

Er worden twee typen ondergrond beschouwd die ter plaatse van de case locaties voorkomen, namelijk een ondergrond van slappe klei en een ondergrond van matig vast gepakt zand.

Voor de bepaling van de parameters is het uitgangspunt om karakteristieke waarden te hebben. Voor zand is gebruik gemaakt van bestaande correlaties met de relatieve dichtheid. Voor klei is gebruik gemaakt van ervaringswaarden bij andere projecten. Tabel 3.3 geeft de gekozen grondparameters die zijn getoetst aan tabel 2.b van NEN9997:2017. Op deze parameters zijn voor de ontwerp berekeningen de factoren uit NEN 3650-1 Bijlage B van toepassing.

Tabel 3.3: Keuze grondparameters.

Grond-soort	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	δ [°]i	c' [kPa]	c_u [kPa]	Adhesie [kPa]	E₁₀₀ [MPa]
Zand, los tot matigt	17/20	30	20	0	0	0	30
klei, organisch slap tot matig	14/14	15	7,5	0,5	17,5	0,25	0,75

De grondwaterstand ter plaatse van de case locaties varieert enigszins. Er wordt uitgegaan van hoge grondwaterstand:

- Landelijke gebied mv -0,25 m
- Stedelijk gebied mv -0,75 m

4. Berekeningen

Om de uitvoeringstechnieken te kunnen vergelijken wordt er tussen twee aspecten onderscheidt gemaakt:

- Belastingen die optreden tijdens aanleg
- Belastingen die tijdens bedrijfsfase optreden als gevolg van de aanleg

4.1. Belastingen tijdens aanleg

De uitvoeringstechniek creëert gedurende uitvoering belastingen op de leiding. Afhankelijk van de uitvoeringsmethode kunnen er verschillen ontstaan in aanleg.

Tabel 4.1: Uitvoeringsmethode en aanleggebied

	Open sleuf	HDD	DP	EPP	Ploeg
Stedelijk (DN700)	x	x	x	x	
Landelijk (DN700)	x	x	x	x	x

- Open sleuf
 - o Tijdens uitvoering geen bijzondere belastingen
- HDD (annulus straal boorgat is 0,125 m, in en uittrede hoek 10 graden en bochtstraal 1000m)
 - o Axiale krachten bij intrekken
 - o Buigend moment bij buigen bochtstralen
 - o Eventueel alzijdige overdruk door grondwater bij diepe ligging
- Direct pipe (annulus straal boorgat is 0,045 m bochtstraal ca. 1000 m intrede hoek 3 graden)
 - o Axiale krachten gedurende persen
 - o Buigend moment bij buigen bochtstralen
 - o Eventueel alzijdige overdruk door grondwater bij diepe ligging
- EPP (annulus straal boorgat is 0,012 m)
 - o Axiale krachten bij intrekken
- Ploegen
 - o Axiale krachten bij intrekken
 - o Buigend moment gedurende ploegen

Daarnaast zal de uitvoering impact hebben wat de resulterende wrijving van de leiding wordt, wat een hoge impact zal hebben op de belastingen gedurende bedrijfsfase. Deze zal in de volgende paragraaf beschouwd worden.

Bij de berekeningen voor de aanlegmethode wordt gebruik gemaakt van de opzet in de volgende tabel (zie ook de door Deltares berekende wrijvingswaarden in Bijlage 3).

Tabel 4.2: Beschouwde aanlegdiepte afhankelijk van omgeving en aanlegmethode

		diepte ligging** [m -mv]	
Open sleuf*	landelijk	-1	-2
	stedelijk	-1	-2
DP	landelijk	-3	-5
	stedelijk	-3	-5
EPP	landelijk	-3	-5
	stedelijk	-3	-5
Ploegen	landelijk	-3	
HDD	stedelijk	-25	

*aanleg berekening niet relevant

** bovenzijde buis

De wrijving voor de aanleg fase is afhankelijk van de boorvloeistof en de werking van de grond. In de gebruiksfase is er een andere wrijving van toepassing.

De belastingen tijdens de aanlegfase worden bepaald door Deltares (zie Bijlage 3).

4.2. Belastingen bedrijfsfase als gevolg uitvoeringstechniek

4.2.1. Algemeen

Met behulp van de software PLE4win, zal de belasting van de leidingen bepaald worden voor leidingen gedurende de operationele fase. Voor de operationele fase zijn 2 belastingcases conform de NEN3650 maatgevend:

1. Drukloze situatie, i.e. BC3
2. Situatie met inwendige druk, i.e. BC4

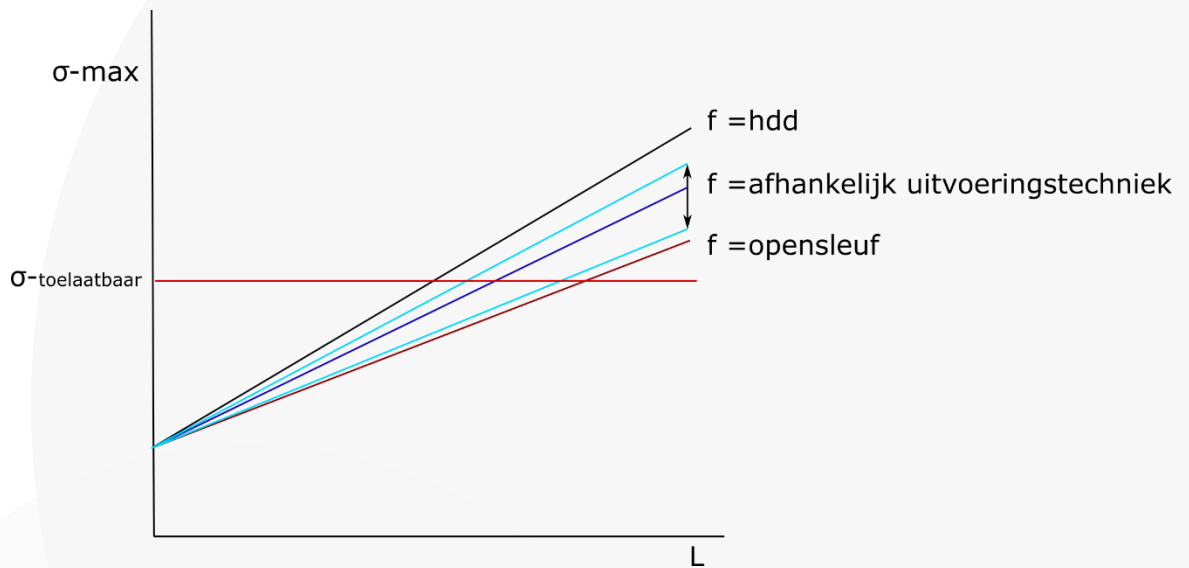
In beide gevallen is er ook gerekend met een temperatuurtraject. Voor de situatie met inwendige druk (de bedrijfsfase) is dit evident. Indien de inwendige druk wegvalt (uit bedrijfname, of pomp trip) dan zal de leiding nog langdurig warm blijven vanwege de isolatie. In dit geval is een drukloze situatie met een temperatuurbelasting reëel. In de NEN3650 wordt niet expliciet beschreven dat de temperatuurbelasting meegenomen dient te worden voor de drukloze situatie. Het is echter wel 'good engineering practice' om dit te doen voor warmteleidingen.

De berekeningen zullen alleen uitgevoerd worden wanneer er verschillen te verwachten zijn tussen uitvoeringsmethodieken en de bedrijfssituaties:

- Open sleuf
 - o Standaard wrijving
 - o Standaard dekking
- HDD
 - o Geen wrijving
 - o Hoge dekking
- Direct pipe
 - o Aangepaste wrijving a.g.v. uitvoeringstechniek
 - o Hoge dekking
- EPP
 - o Aangepaste wrijving a.g.v. uitvoeringstechniek
 - o Standaard dekking
- Ploegen
 - o Aangepaste wrijving a.g.v. uitvoeringstechniek
 - o Standaard dekking

Op basis van de uitgangspunten gesteld in dit document, is de resulterende wrijving een belangrijke parameter die de resultaten zullen beïnvloeden. Derhalve zal het onderzoek naar het verschil tussen uitvoeringstechnieken zich met name focussen op wrijving, waarbij op basis van PLE4win de maximale lengte tussen expansieslagen bepaald kan worden. Daarbij is de verwachting

dat een correlatie gevonden gaat worden. Een voorbeeld van een mogelijke uitkomst van de correlatie is in de onderstaande figuur aangegeven.



Figuur 3 – Verwachting resultaten onderzoek PLE4win, f = wrijvingswaarde, HDD ($f=0$), openseleuf (f =standaard)

In de grafiek wordt de berekende spanning in de stalen leiding weergegeven als functie van de loopafstand en bij verschillende wrijvingswaarden. In dit onderzoek worden 3 aspecten getoetst:

1. Maximale toelaatbare spanning in stalen leiding
2. Maximale toelaatbare radiale vervorming
3. Maximaal indrukking van de expansiekussens (2/3 indrukking, 3-laags = max 80 mm)

Deze worden beschouwd voor zowel de fase met inwendige druk en temperatuur als de fase zonder inwendige druk (maar wel met een temperatuurbelasting).

Op basis van deze uitgangspunten, zal dus de impact van verschillende wrijvingswaarden worden onderzocht. Wat vervolgens mogelijk maakt dat als deze waarden zijn bepaald voor de verschillende uitvoeringstechnieken, er snel kan bepaald worden hoe het tracé geoptimaliseerd kan worden op de hoeveelheid expansieslagen.

Belastingtoetsen die in deze beoordeling nog niet meegenomen worden zijn:

- PUR-spanning (compressie)
- Kritische Rek (Buckling)
- Stapsgewijs plastische deformatie (step-wise plastic deformation)

Binnen de randvoorwaarden en uitgangspunten van dit onderzoek zullen bovenstaande criteria over het algemeen ook niet maatgevend zijn. Ten aanzien van de kritische rek geven verschillende normen verschillende toetscriteria. De onderlinge afwijkingen zijn vooralsnog niet te verklaren waardoor deze toets vooralsnog achterwege wordt gelaten.

Er kan wel gesteld worden dat als het criterium wordt gebruikt dat de NEN3650-2 voorschrijft de leiding voldoet in alle beschouwde cases.

4.2.2. Wrijvingswaarden RE en Deltares

Deltares zal uitvoerig onderzoek doen naar realistische wrijvingswaarden voor de verschillende uitvoeringsmethoden, verschillende aanlegdiepten en grondsoorten. RE berekent de wrijvingswaarde op basis van de eisen vanuit de NEN3650 en beoogt daarmee een ondergrens en een bovengrens voor de wrijvingswaarde vast te stellen. Het uitgangspunt is dat de door Deltares opgestelde wrijvingswaarden hierbinnen vallen. Hiermee kan door RE figuren opgesteld worden die representatief zijn voor alle beschouwde aanlegmethodieken, grondsoorten en aanlegdiepten.

Om variaties in wrijving te kunnen beschouwen zijn er per aanlegdiepte berekeningen uitgevoerd voor 5 verschillende wrijvingswaarde. Hierbij varieert de wrijving in 5 stappen van 0 tot de maximale wrijving behorende bij de betreffende aanlegdiepte en grondsoort. Hierdoor wordt een zeer uitgebreide set aan resultaten gegenereerd waardoor het toepassingsgebied van het onderzoek wordt vergroot.

De methodiek en de door Deltares berekende wrijvingswaarden staan gegeven in Bijlage 3. Onderstaand tabel geeft een overzicht van de door Deltares bepaalde wrijvingswaarden.

Tabel 4.3: Overzicht van de door Deltares berekende wrijvingswaarden

Aanleg methode	Gronddekking [m – mv]	Klei			Zand		
		Wrijving mantelbuis klei [kPa]	Afstand [mm]	Wrijving staal [N/mm ²]	Wrijving mantelbuis zand [kPa]	Afstand [mm]	Wrijving staal [N/mm ²]
Sleuf	1	3,3	10	0,00418	11,6	4	0,01468
	1,5	3,9	10	0,00494	15,3	4	0,01937
	3	5,8	10	0,00734	26,1	4	0,03304
Ploegen	1	3,3	10	0,00418	11,6	4	0,01468
	1,5	3,9	10	0,00494	15,3	4	0,01937
	3	5,8	10	0,00734	26,1	4	0,03304
Direct Pipe	3	4,1	10	0,00519	6,5	6	0,00823
	5	4,7	10	0,00595	8	6	0,01013
EPP	3	5	10	0,00633	9,1	6	0,01152
	5	6,3	10	0,00797	12,1	6	0,01532
HDD	25	--	--		6,6	6	

In afwijking hierop heeft RE ervoor gekozen om de berekeningen uit te voeren voor meer verschillende gronddekkingen per aanlegmethode. Dit betreft: 1 m, 2 m, 3 m en 5 m. Hiermee wordt de praktische toepassing van de berekeningsresultaten vergroot. Samenvattend zijn de volgende berekeningen beschouwd:

1. Belastingen
 - a. Met inwendige druk en temperatuur, i.e. BC4
 - b. Zonder inwendige druk en met temperatuur, i.e. BC3
2. Grondsoort
 - a. Zand
 - b. Klei
3. Gronddekking
 - a. 1 m
 - b. 2 m
 - c. 3 m
 - d. 5 m
4. Wrijvingspercentage per gronddekking
 - a. 0% van de wrijving bij de betreffende dekking= wrijvingsloos
 - b. 25%
 - c. 50%
 - d. 75%
 - e. 100%

De in de berekeningen toegepaste absolute wrijvingswaarde per diepte staan gegeven in onderstaande tabellen:

Tabel 4.4: Overzicht van de gehanteerde wrijvingswaarden voor de ligging in zand

Zand	0%	25%	50%	75%	100%
Dekking	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	0	0,002486	0,004972	0,007458	0,009943
2	0	0,003955	0,007909	0,011864	0,015818
3	0	0,005423	0,010846	0,016269	0,021692
5	0	0,00836	0,01672	0,02508	0,03344

Tabel 4.5: Overzicht van de gehanteerde wrijvingswaarden voor de ligging in klei

Klei	0%	25%	50%	75%	100%
Dekking	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	0	0,001251	0,002501	0,003752	0,005003
2	0	0,001931	0,003862	0,005792	0,007723

3	0	0,002611	0,005222	0,007833	0,010444
5	0	0,003971	0,007943	0,011914	0,015885

4.2.3. Rapporteren

Op basis van de berekeningen kan worden vastgesteld wat de maximaal haalbare afstand tussen twee expansieslagen is, afhankelijk van de toegepaste wrijving. Door de wrijving te bepalen die hoort bij een bepaalde uitvoeringstechniek als de leiding in bedrijf is, kan deze gekoppeld worden aan de berekeningsresultaten en kan de haalbare loopafstand bepaald worden.

5. Overige aannames

1. Thermisch voorspannen van leidingen wordt niet bekeken.
2. Zettingen en uitvoeringzakkingen worden niet meegenomen.
3. Er wordt getoetst op 3 criteria:
 - Maximale toelaatbare spanning in stalen leiding
 - Maximale toelaatbare radiale vervorming
 - Maximaal indrukking van de expansiekussens (2/3 indrukking, 3-laags = max 80 mm)
4. Bij de expansielussen wordt niet gevarieerd met de beenlengte of met de bochtstralen. Er is 1 standaard configuratie met 5D bocht.
5. Bij de expansielussen wordt uitgegaan van het toepassen van Hoge Dichtheid (HD) PUR met een maximale druksterkte van 0,5 N/mm².
6. Er wordt uitgegaan van een symmetrisch ontwerp t.o.v. het verplaatsingsnulpunt.
 - Opmerking: asymmetrie kan een grote impact hebben op de berekende loopafstand.
7. Er wordt uitgegaan van een homogeen grondmodel over het gehele leidingontwerp.
 - Opmerking: Indien het grondmodel niet homogeen is kan dit een grote impact hebben op de berekende loopafstand.

6. Berekeningsresultaten

6.1. Overzicht van uitgevoerde berekeningen

Berekeningen zijn uitgevoerd voor de volgende situaties:

5. Belastingen
 - a. Met inwendige druk en temperatuur, i.e. BC4
 - b. Zonder inwendige druk en met temperatuur, i.e. BC3
6. Grondsoort
 - a. Zand
 - b. Klei
7. Gronddekking
 - a. 1 m
 - b. 2 m
 - c. 3 m
 - d. 5 m
8. Wrijvingspercentage per gronddekking
 - a. 0% van de wrijving bij de betreffende dekking= wrijvingsloos
 - b. 25%
 - c. 50%
 - d. 75%
 - e. 100%

De absolute wrijvingswaarde die zijn gehanteerd zijn opgenomen in Tabel 4.4 en Tabel 4.5.

In totaal betreft dit: $2 \times 2 \times 4 \times 5 = 80$ berekeningen

Er wordt getoetst op 3 criteria:

1. De maximaal toelaatbare von Mises spanning
2. De maximaal toelaatbare radiale vervorming
3. De maximaal toelaatbare kussenindrukking

De berekeningsresultaten zijn gegeven in Bijlage 4 t/m Bijlage 8. Op de horizontale as wordt telkens de loopafstand gegeven en op de verticale as één van de 3 bovenstaande criteria inclusief maximaal toelaatbare waarde.

Bijlage 4 geeft dus de maximale loopafstand als getoetst wordt op spanningen. Bijlage 6 geeft de maximale loopafstand als getoetst wordt op de maximaal toelaatbare kussenindrukking en Bijlage 8 geeft de maximale loopafstand als getoetst wordt op de maximaal toelaatbare radiale vervorming.

6.2. Beperking toepassingsgebied resultaten

Een volledige toets op toelaatbare PUR spanning is nog niet uitgevoerd. Aangezien er uit is gegaan van hoge dichtheid PUR bij de bochten, met een maximaal toelaatbare spanning van $0,5 \text{ N/mm}^2$, zal deze over het algemeen ook niet maatgevend zijn. In een eventuele volgende revisie zou deze toets wel opgenomen kunnen worden.

De toets op kritische rek (of plooi) is ook (nog) niet uitgevoerd. Deze kan maatgevend zijn als de leiding verankerd bij huidige ΔT en de criteria volgens de EN13941 worden aangehouden in plaats van de NEN3650. Er is voornamelijk onduidelijkheid welke van de 2 normen het juiste criterium geeft voor kritische rek.

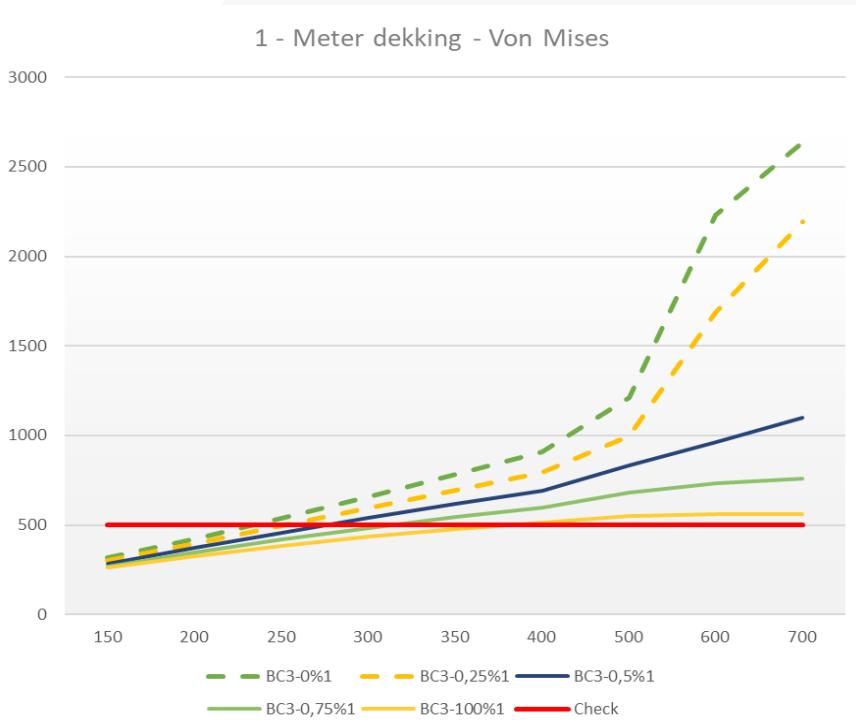
Bovendien moet opgemerkt worden dat de software PLE beperkingen kent als het gaat om het toepassen van expansiekussens. Tot 2/3 indrukking van de kussens zijn de berekeningsresultaten betrouwbaar. De reactiekracht op de leiding wordt dan met name bepaald door de stijfheid van de expansiekussens. Bij meer indrukking zullen de kussens snel stijver worden en zullen de grondveren maatgevend worden. In software kan helaas maar 1 stijfheid opgegeven worden, i.e. de samengestelde stijfheid van de expansiekussens en grond waarbij de stijfheid van de kussens maatgevend is. Dit betekent dat als de kussens meer dan 2/3 worden ingedrukt (in dit geval meer dan 80 mm op basis van 3 lagen kussens met een dikte van 40 mm) de spanningen eigenlijk hoger zullen zijn dan nu berekend vanwege de hogere grondreactiekrachten door de stijvere grondveren. In een volgende revisie zou dit apart beschouwd kunnen worden.

6.3. Overzicht berekeningsresultaten

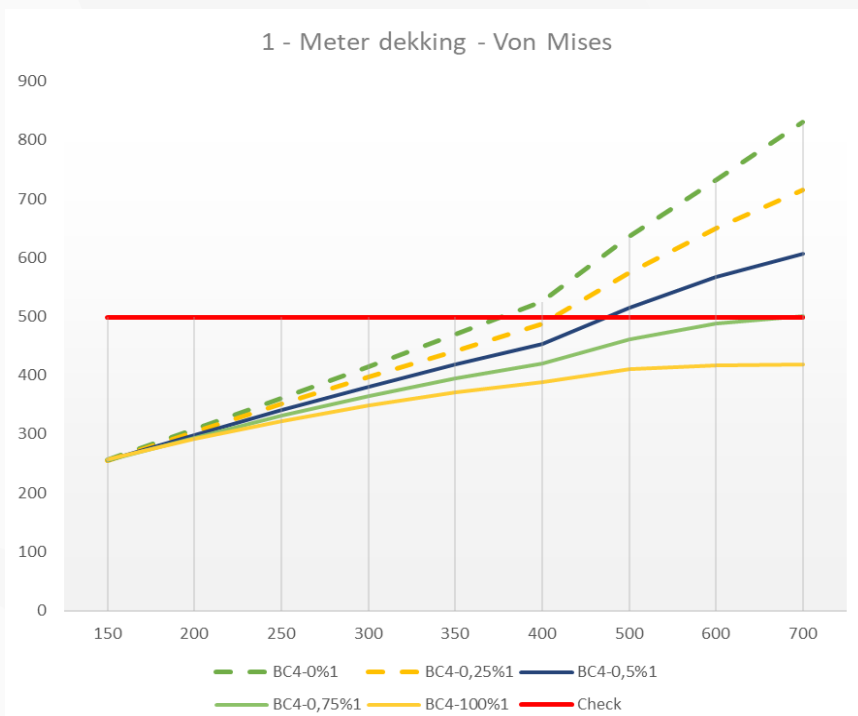
In Bijlage 4 en Bijlage 5 zijn de figuren gegeven met de maximaal berekende von Mises spanningen voor de ligging in respectievelijk zand en klei bij verschillende loopafstanden. Per grafiek worden de resultaten gegeven met verschillende wrijvingswaarden en wordt de maximaal toelaatbare waarde gegeven (= 'Check'). De resultaten zijn gegeven voor zowel de situatie met inwendige druk (BC4) als zonder inwendige druk (BC3). Bij beide belastingcases is de temperatuurbelasting meegenomen.

Figuur 4 en Figuur 5 hieronder geven de resultaten voor de ligging met 1 m dek in zand. Figuur 4 geeft de resultaten voor de drukloze situatie en Figuur 5 voor de situatie met inwendige druk. Op de horizontale as is de afstand tussen de expansielussen gegeven.

Er worden per grafiek 5 verschillende lijnen getoond, De 100% lijn is de lijn corresponderend met de wrijving die is berekend. De overige 4 lijnen geven de resultaten corresponderend met respectievelijk: 75%, 50%, 25% en 0% van de berekende wrijving.

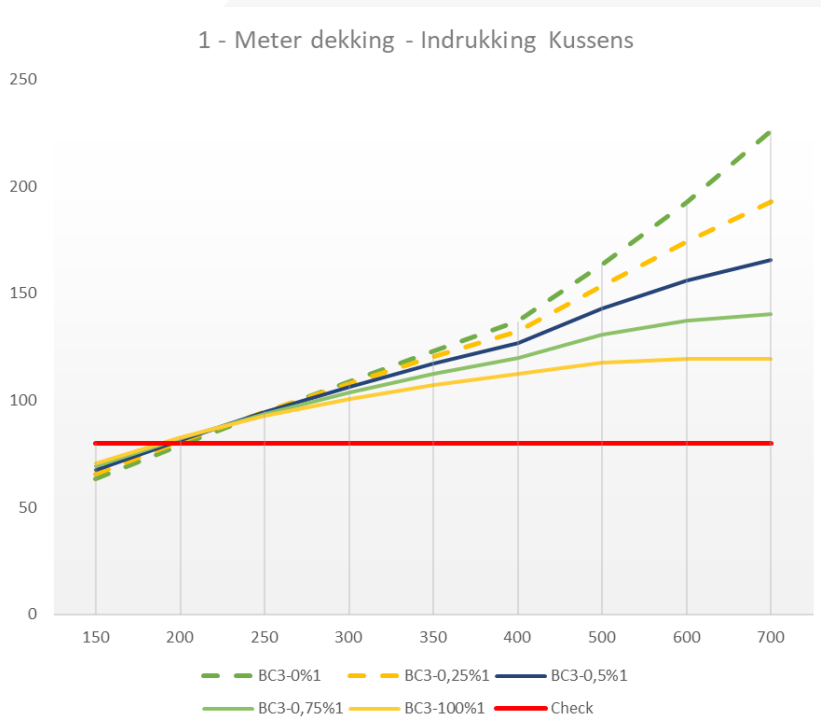


Figuur 4 – Berekende maximale von Mises spanning voor de drukloze situatie en ligging in zand met 1 m dek



Figuur 5 – Berekende maximale von Mises spanning voor de situatie met inwendige druk en ligging in zand met 1 m dek

De indrukking van de kussens voor ligging in zand en klei wordt op een vergelijkbare wijze gepresenteerd in Bijlage 6 en Bijlage 7. Figuur 6 geeft een voorbeeld van de resultaten in de drukloze situatie voor de ligging in zand en bij 1 m dekking.



Figuur 6 – Indrukking van de kussens bij 1 m dek, drukloos en ligging in zand

De horizontale rode lijn 'check' geeft de maximaal toelaatbare indrukking bij 3 lagen kussens. i.e. 80 mm.

De berekende radiale vervormingen voor ligging in zand en klei staan gegeven in Bijlage 8 en Bijlage 9. Dit zijn vergelijkbare figuren als voor de berekende von Mises spanning en de indrukking van de kussens. Uit de resultaten in Bijlage 8 en Bijlage 9 blijkt dat de toets op radiale vervormingen veel minder kritisch is dan de toets op spanningen en/of de indrukking van de kussens. Daarom zullen eerst de resultaten met betrekking tot de spanningen en indrukking van de kussens besproken worden. Hierbij zal ook eerst gekeken worden naar de ligging in zand.

6.3.1. Berekende von Mises spanning en indrukking kussens, ligging in zand

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de resultaten uit Bijlage 4.

Tabel 6.1: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in zand o.b.v. spanningen

	Maximale loopafstand op basis van von Mises spanning [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	380	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
2 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
3 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	250	Maximale loopafstand @ 50% wrijving = 470 m.
5 m dekking @100% wrijving	250	Lagere wrijvingswaarden leiden hier juist tot grotere loopafstanden.	0	Bovenbelasting maatgevend voor alle wrijvingswaarden

Voor de verschillende gronddekkingen en voor zowel de drukloze situatie als de situatie met inwendige druk is de maximale loopafstand gegeven bij de normale wrijving (= 100%).

Het eerste dat opvalt is dat de drukloze situatie maatgevend is. In deze belastingsituatie worden aanzienlijke kortere loopafstanden gehaald dan in de situatie met inwendige druk. De verklaring hiervoor is de grote ovalisering in de bochten door het drukloos zijn en de aanwezige temperatuurbelasting. Door de hoge grondreactiekrachten bij de bochten als gevolg van thermische expansie gaan de bochten meer ovaliseren, wat resulteert in hogere spanningen.

In beide belastingcases is duidelijk te zien dat bij lage of geen wrijving (en gronddekking tot 3 m) hogere spanningen worden bereikt en daardoor kortere lengten tussen expansielussen mogelijk zijn. Deze spanningen bevinden zich in de bochten en vallen te verklaren door de hogere thermische expansie als er geen of weinig wrijving is tussen leiding en grond. Hoge grondreactiekrachten en grote vervormingen zorgen hier voor de hoge spanningen. Uit de berekeningsresultaten in Bijlage 4 blijkt dat de von Mises spanning afwijkende trends vertoont bij 3 m en 5 m dek. Dit geldt zeker voor de drukloze (BC3) situatie. Waar bij kleinere gronddekkingen de spanningen in de bochten maatgevend zijn, wordt voor grotere gronddekkingen de bovenbelasting maatgevend (i.e. het grondgewicht boven de leiding). In de drukloze situatie ovaliseert de leiding dermate dat de spanningen hoger zijn dan de maximaal toelaatbare waarde en min of meer onafhankelijk worden van de afstand tussen de expansielussen. De locatie waar de maximale belasting wordt aangetroffen verplaatst zich van de bochten naar de sectie tussen de expansielussen, waar de combinatie van axiale kracht en gewicht van de grond boven de leiding maatgevend is.

Opmerking:

Voor de standaard wrijvingswaarde (de 100% case) behorende bij 1 m dek is in de drukloze situatie een loopafstand haalbaar van ca. 380 m, terwijl voor de situatie met inwendige druk dit op basis van de berekende von Mises spanning een 'onbeperkte' lengte zou opleveren. Hierbij moet opgemerkt worden dat in de berekeningen altijd is uitgegaan van 3 lagen expansiekussens bij de bochten en de stijfheid van de veren rondom de leiding is gebaseerd op de resulterende stijfheid van expansiekussens en de grond. Deze resulterende stijfheid is veel lager dan de oorspronkelijke stijfheid van de grond. Als de expansiekussens volledig zijn ingedrukt (max 2/3 van de dikte van de kussens = 80 mm) neemt de stijfheid snel toe naar uiteindelijk de oorspronkelijke grondstijfheid. In de software PLE kan echter maar 1 veerstijfheid worden opgegeven (in dit geval de resulterende stijfheid van grond + expansiekussens) waardoor de berekende von Mises spanning niet representatief is als de indrukking van de kussens groter is dan 80 mm.

Tabel 6.2 geeft voor de dezelfde situatie als hierboven beschreven, de maximaal haalbare loopafstanden op basis van de toelaatbare indrukking van de kussens.

Tabel 6.2: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in zand o.b.v. indrukking kussens

	Maximale loopafstand op basis van indrukking kussens [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	170	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.	190	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.
2 m dekking @100% wrijving	175	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.	190	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.
3 m dekking @100% wrijving	180	De leiding verankert waardoor de indrukking van de kussens vanaf een bepaalde loopafstand een maximum bereikt en niet meer toeneemt. Voor lagere wrijvingswaarden verankert de leiding niet en neemt de indrukking toe met toenemende loopafstand.	250	Bij een iets hogere wrijving zou de indrukking van de kussens onder de max toelaatbare indrukking liggen, ongeacht de loopafstand. Lagere wrijvingswaarden leiden tot grotere indrukking van de kussens.
5 m dekking @100% wrijving	∞	De leiding verankert snel en de indrukking van de kussens ligt onder de max toelaatbare indrukking, ongeacht de loopafstand. Voor lagere wrijvingswaarden verankert de leiding niet en neemt de indrukking toe met toenemende loopafstand.	∞	De leiding verankert snel en de indrukking van de kussens ligt altijd onder de max toelaatbare indrukking, ongeacht de loopafstand. Voor lagere wrijvingswaarden verankert de leiding niet en neemt de indrukking toe met toenemende loopafstand.

Uit Tabel 6.2 blijkt dat tot en met 3 m dekking de indrukking van de kussens maatgevend is ten opzichte van de berekende spanningen. Aanzienlijk kortere loopafstanden zijn haalbaar als gekeken wordt naar de indrukking van de kussens. Tot en met 3 m dekking is de maximale loopafstand beperkt tot ca. 180 m (met inwendige druk) of 250 m (drukloos). Bij 5 m dekking wordt de von Mises spanning weer maatgevend voor de maximaal haalbare loopafstand. Dit wordt echter niet zozeer veroorzaakt door de thermische expansie maar door de combinatie van de bovenbelasting (neutrale grondbelasting) en de axiale kracht door verhinderde expansie.

Aan de ene kant zijn expansiekussens dus wenselijk om de grondreactiekrachten te beperken en daarmee de berekende von Mises spanningen, maar aan de andere kant leggen expansiekussens enorme beperkingen op omdat ze maar tot 2/3 van de dikte ingedrukt mogen worden. Daarmee is de toelaatbare expansie beperkt tot 80 mm wat vaak maatgevend kan zijn voor de toelaatbare loopafstand.

6.3.2. Berekende radiale vervorming voor ligging in zand

Tabel 6.3 geeft het overzicht van de resultaten als er getoetst wordt op radiale vervormingen.

Tabel 6.3: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in zand o.b.v. radiale vervorming

	Maximale loopafstand op basis van radiale vervorming [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	380	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
2 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
3 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
5 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden

Alleen bij 1 m dek en de drukloze situatie is de loopafstand begrensd tot 380 m. Voor alle overige gevallen kan een oneindige loopafstand aangehouden worden en wordt de maximaal toelaatbare radiale vervorming niet overschreden.

6.3.3. Berekenende von Mises spanning en indrukking kussens, ligging in klei

Tabel 6.4 geeft een overzicht van de resultaten uit Bijlage 5.

Tabel 6.4: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in klei o.b.v. spanningen

	Maximale loopafstand op basis van von Mises spanning [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	340	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
2 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	340	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
3 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	440	Voor grotere loopafstanden ligt de berekende spanning net boven de toelaatbare waarde en heeft een max waarde bereikt. Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden. Bovenbelasting is maatgevend.
5 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	350	Voor grotere loopafstanden ligt de berekende spanning net boven de toelaatbare waarde en heeft een max waarde bereikt. Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden. Bovenbelasting is maatgevend.

Voor de verschillende gronddekkingen en voor zowel de drukloze situatie als de situatie met inwendige druk is de maximale loopafstand gegeven bij de normale wrijving (= 100%).

Ook bij de ligging in klei is de drukloze situatie maatgevend. Opvallend is dat voor de drukloze situatie en gronddekkingen van 1 m en 2 m de resultaten iets minder gunstig zijn dan voor de ligging in zand. Dit komt met name door de lagere wrijving bij de ligging in klei t.o.v. de ligging in zand, wat bij deze beperkte gronddekkingen een relatief grote invloed heeft.

Voor grotere gronddekkingen is de ligging in klei juist wel gunstiger ten opzichte van de ligging in zand, omdat de bovenbelasting een stuk lager is (klei heeft een lager soortelijk gewicht). Voor de drukloze situatie is een ligging op 5 m ongunstiger dan een ligging op 3 m dek. Dit wordt, net als bij de ligging in zand, veroorzaakt door de hogere bovenbelasting bij 5 m dek in combinatie met de hogere axiaalkracht door verankering van de leiding. De hoogste spanningen worden niet gevonden in de bochten maar in het midden tussen 2 expansielussen, in het deel waar de leiding verankerd.

Voor de situatie met inwendige druk is een oneindige loopafstand haalbaar als alleen gekeken wordt naar de von Mises spanning. Dit geldt voor alle beschouwde gronddekkingen.

Tabel 6.5 geeft voor de dezelfde situatie als hierboven beschreven, de maximaal haalbare loopafstanden op basis van de toelaatbare indrukking van de kussens.

Tabel 6.5: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in klei o.b.v. indrukking kussens

	Maximale loopafstand op basis van indrukking kussens [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	160	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximaal haalbare loopafstand.	175	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.
2 m dekking @100% wrijving	160	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximaal haalbare loopafstand.	180	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximale loopafstand.
3 m dekking @100% wrijving	160	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximaal haalbare loopafstand.	180	De wrijving heeft weinig invloed op de resultaten voor kortere loopafstanden. Een lagere wrijving lijkt een iets gunstiger effect te hebben op de haalbare loopafstand, uitgaande van 80 mm toelaatbare indrukking. Dit is lastig te verklaren en zou een 'rekenfout' kunnen zijn. Bij grotere loopafstanden zijn de resultaten meer zoals verwacht en resulteert een hogere wrijving in lagere verplaatsingen t.o.v. een lage wrijving.
5 m dekking @100% wrijving	160	De wrijvingswaarde heeft hier weinig invloed op de maximaal haalbare loopafstand.	180	De wrijving heeft weinig invloed op de resultaten voor kortere loopafstanden. Een lagere wrijving lijkt een iets gunstiger effect te hebben op de haalbare loopafstand, uitgaande van 80 mm toelaatbare indrukking. Dit is lastig te verklaren en zou een 'rekenfout' kunnen zijn. Bij grotere loopafstanden zijn de resultaten meer zoals verwacht en resulteert een hogere wrijving in lagere verplaatsingen t.o.v. een lage wrijving.

Uit Tabel 6.2 blijkt dat de indrukking van de kussens maatgevend is ten opzichte van de berekende von Mises spanning. Aanzienlijk kortere loopafstanden zijn haalbaar als gekeken wordt naar de indrukking van de kussens. Ook ten opzichte van de ligging in zand zijn de maximaal toelaatbare loopafstanden minder groot. Dit wordt veroorzaakt door de lagere wrijving bij de ligging in klei en daardoor grotere expansie bij de bochten.

De aanlegdiepte lijkt geen invloed te hebben op de maximaal haalbare loopafstand. Dit komt doordat voor elke beschouwde aanlegdiepte de wrijving dusdanig laag is dat de expansie bij de bochten te groot is en de kussens maximaal worden ingedrukt. Voor nog grotere diepten zal de wrijving uiteindelijk wel groot genoeg worden om de expansie bij de bochten te beperken. De keerzijde is dan wel dat de bovenbelasting maatgevend wordt zoals ook werd geconstateerd bij de ligging in zand.

Aan de ene kant zijn expansiekussens dus wenselijk om de grondreactiekrachten te beperken en daarmee de berekende von Mises spanningen, maar aan de andere kant leggen expansiekussens enorme beperkingen op omdat ze maar tot 2/3 van de dikte ingedrukt mogen worden. Daarmee is de toelaatbare expansie beperkt tot 80 mm wat vaak maatgevend kan zijn voor de toelaatbare loopafstand.

6.3.4. Berekende radiale vervorming voor ligging in klei

Tabel 6.3 geeft het overzicht van de resultaten als er getoetst wordt op radiale vervormingen.

Tabel 6.6: Maximaal haalbare loopafstand voor verschillende aanlegdiepten en bij ligging in klei o.b.v. radiale vervorming

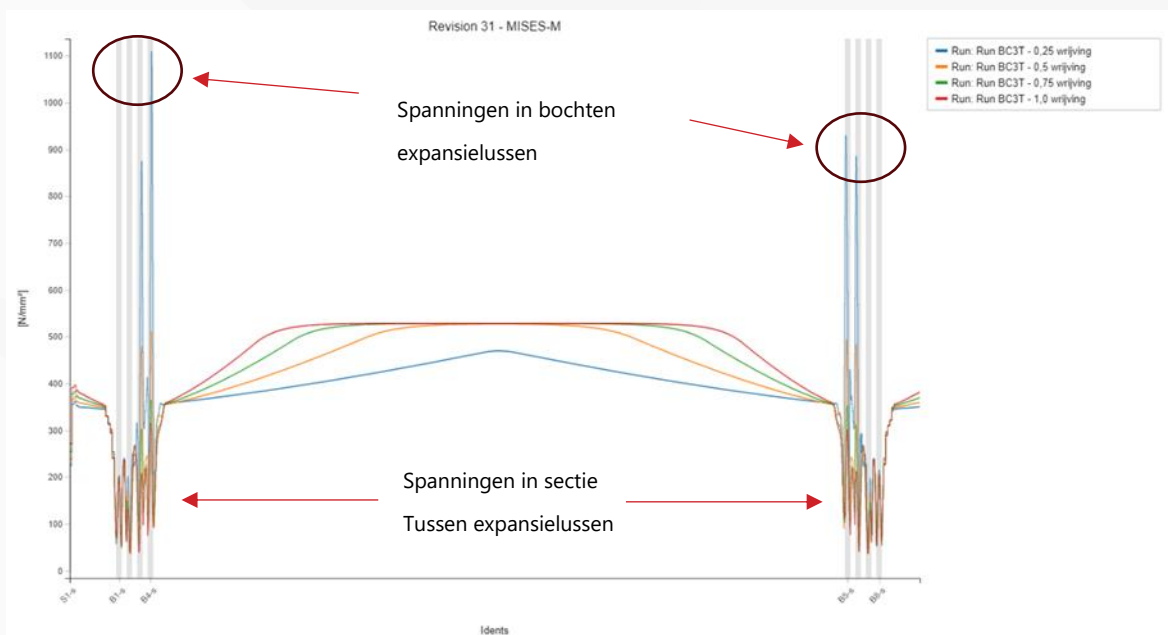
	Maximale loopafstand op basis van radiale vervorming [m]			
	Met inwendige druk	Opmerking	Drukloos	Opmerking
1 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	340	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
2 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	340	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
3 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	400	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden
5 m dekking @100% wrijving	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden	∞	Lagere wrijvingswaarden leiden tot kortere loopafstanden

De drukloze situatie is weer maatgevend t.o.v. de situatie met inwendige druk. Ten opzichte van de ligging in zand worden kleinere loopafstanden gehaald. Een grotere aanlegdiepte resulteert in meer wrijving, minder expansie bij de bochten en daardoor een lagere radiale vervorming.

Voor de situatie met inwendige druk zijn oneindige loopafstanden haalbaar en wordt de waarde voor de maximaal toelaatbare radiale vervorming nooit bereikt.

6.3.5. Invloed van wrijving en gronddekking op locatie van de hoogste spanningen

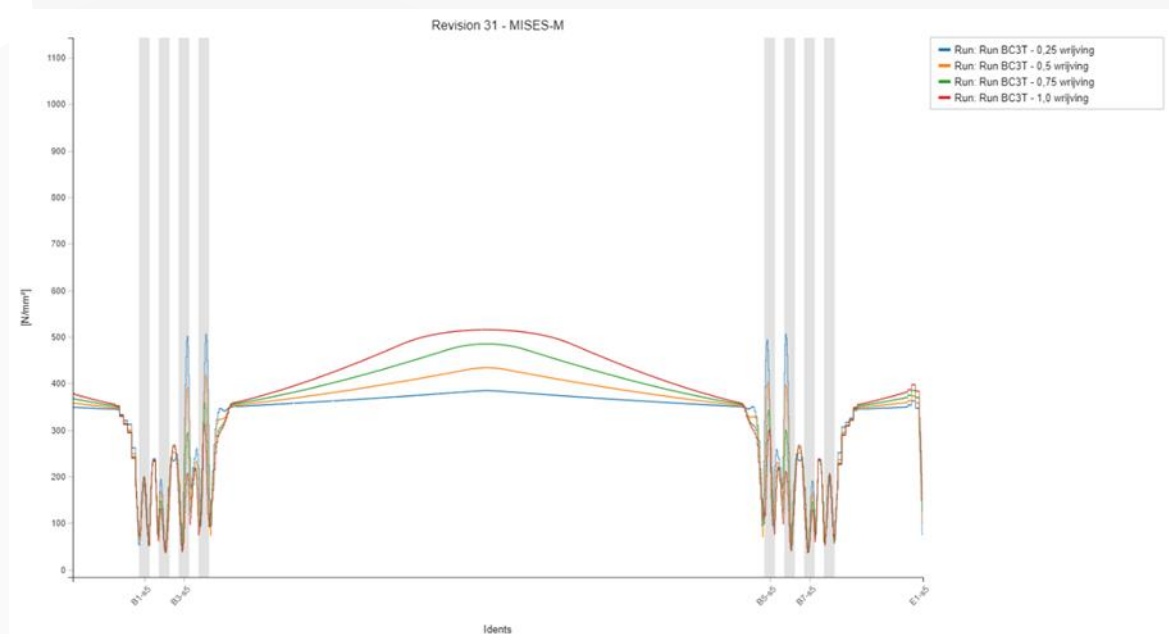
De invloed van de loopafstand op de berekende spanning en met name de locatie van de hoogste spanning wordt duidelijk uit Figuur 7 en Figuur 8. Figuur 7 geeft de berekende von Mises spanning bij een loopafstand van 700 m. Alleen in de situatie zonder wrijving (blauwe lijn) zien we dat de spanningen pieken ter plaatse van de bochten (grijze vlakken in de figuur). Dit komt door de grote thermische expansie bij de bochten.



Figuur 7 – Berekende von Mises spanning bij een loopafstand van 700 m en 1 m dek

Voor hogere wrijfingswaarden zien we de berekende spanningen afvlakken tussen de expansielussen en een maximum bereiken in het midden tussen de loops. Hier ligt de leiding verankerd, hetgeen te vergelijken is met een volledige inklemming van de leiding in dit deel. De leiding kan hier niet uitzetten omdat de opgebouwde grondwrijving dat tegenhoudt. Bij hogere wrijfingswaarden zal de leiding eerder verankeren maar de maximaal berekende spanning zal niet wijzigen omdat deze wordt bepaald door het temperatuurverschil dat constant blijft.

Bij een kleinere loopafstand is te zien dat de leiding minder snel verankerd tussen de loops. In Figuur 8 zijn de spanningen geplot voor een loopafstand van 300 m. In dit geval verankert de leiding alleen bij de 100% wrijving. Vanwege de kortere lengte is de berekende spanning in de wrijvingsloze situatie nog wel hoog maar wel vergelijkbaar met de maximale spanning in het midden van de leiding



Figuur 8 – Berekende von Mises spanning bij een loopafstand van 300 m en 1 m dek

6.4. Algemene beschrijving resultaten

Uit de resultaten blijkt, zoals verwacht, dat de wrijving tussen grond en de leiding maatgevend is voor de maximaal haalbare loopafstand. Hoe hoger de wrijving, hoe groter de maximaal haalbare loopafstand. De grafieken in Bijlage 4 t/m Bijlage 8 laten ook duidelijk zien dat als de wrijving tussen grond en leiding toeneemt, de leiding eerder verankert in het midden. Dit is te zien door het afvlakken of het plafond in de berekende von Mises spanning in het midden tussen 2 expansielussen. Dit betekent dat de leiding in dit deel volledig vastligt, te vergelijken met een inklemming op die locatie. Als de leiding verankert in het midden, dan heeft deze bij de bochten

ook de maximale expansie bereikt. Het groter maken van de afstand tussen de loops zal niet leiden tot hogere verplaatsingen bij de bochten en hogere spanningen aldaar. Het zorgt er alleen voor dat het verankerde deel in het middel evenredig groter wordt.

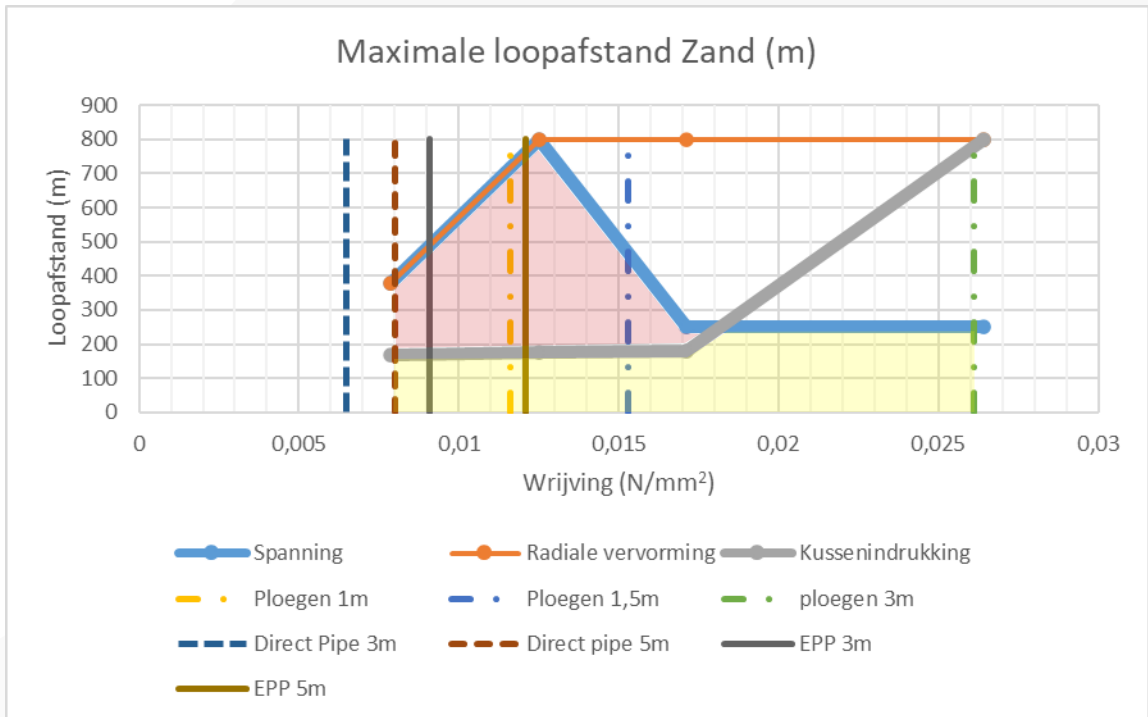
Bij grotere dekking wordt de wrijving tussen grond en leiding groter en zal (in theorie) de maximaal haalbare loopafstand ook groter worden. Hier zien we wel een verschil tussen aanlegmethoden en diepten waarbij wel of geen gereduceerde neutrale grondbelasting (bovenbelasting) toegepast mag worden. Bij de aanleg in open sleuf, waarbij geen gereduceerde neutrale grondbelasting wordt toegepast, is een verplaatsing te zien van de locatie waar de hoogste spanningen optreden. Voor kleinere gronddekking is de grondwrijving dusdanig laag dat expansie maatgevend is en daarmee de spanningen in de bochten. Voor grotere dekking (zeker bij 5 m dekking) is de wrijving dusdanig hoog dat de expansie bij de bochten niet meer maatgevend is maar de bovenbelasting op de leiding. De hoogste spanningen worden dan aangetroffen in het verankerde deel omdat hier een combinatie plaatsvindt van maximale axiale belasting door verhinderde expansie en een hoge bovenbelasting door grond.

Indien er gerekend mag worden met gewelfwerking zal de bovenbelasting snel afnemen. In dat geval zal de wrijving tussen grond en leiding weer maatgevend worden en de hoogste spanningen worden dan weer gevonden in de bochten.

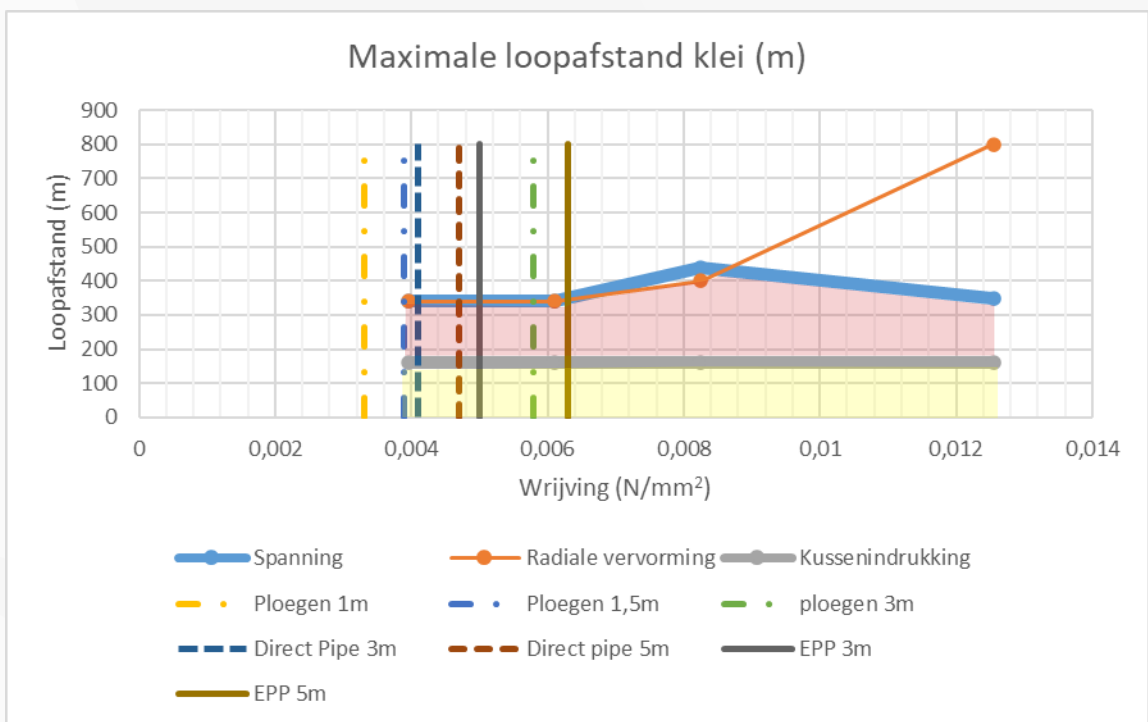
In de volgende twee grafieken zijn de resultaten gevisualiseerd in de grafieken. Daarbij zijn de wrijvingswaarden van verschillende uitvoeringstechnieken aangeven, die uit het TKI rapport, "11207943-017-GEO-0001 v0.2 - AAMBEELD WP2, wrijvingweerstand bedrijfsfase, versie 0.2" zijn weergegeven. In deze grafieken (Figuur 9 & Figuur 10), treft het specifiek de wrijvingswaarde die op de mantelbuis staat van de leiding (900mm) gelden (x-as). Tegenover de maximale loopafstand tussen twee expansieslagen (y-as).

Het licht-geel gearceerde vlak geeft de maximaal haalbare loopafstanden als kussenindrukking getoetst wordt aan de maximaal toelaatbare waarde. Deze is regelmatig de maatgevende factor. Alleen bij hogere wrijvingswaarde wordt de spanning maatgevend.

Het licht-rood gearceerde vlak geeft het potentieel aan ruimte als de kussenindrukking niet wordt getoetst of als er geen kussens worden toegepast. Het verdient aanbeveling om berekeningen uit te voeren zonder kussens om te controleren in hoeverre de loopafstanden hiermee kunnen worden verhoogd of niet.



Figuur 9 – Overzicht resultaten berekeningen en vergelijking uitvoeringstechniek - Zand



Figuur 10 - Overzicht resultaten berekeningen en vergelijking uitvoeringstechniek - Klei

De berekeningsresultaten zijn ook verwerkt in onderstaande tabel.

Tabel 6.7: Maximaal haalbare loopafstanden per aanlegmethode en bij verschillende aanlegdiepten

Indicatie mogelijke aanleglengte Aanleg- methode	Dekking [m]	Grond	Maximale lengte o.b.v. Spanning Binnenbuis [m]	Maximale lengte o.b.v. Radiale Vervorming [m]	Maximale lengte o.b.v. Indrukken Kussens [m]	Opmerkingen
ploegen	1,5	Zand	380 - ∞	380	170	Afstanden indicatief
	3,0	Zand	250	∞	180	Afstanden indicatief
	1,5	Klei	340	340	160	Afstanden indicatief
	3,0	Klei	440	400	160	Afstanden indicatief
HDD	25	Zand	240	230	175	Afstanden indicatief
Direct Pipe	3,0	Zand	360	350	175	Afstanden indicatief
	5,0	Zand	0 ³	350 - ∞	175	Afstanden indicatief
	3,0	Klei	275	275	160	Afstanden indicatief
	5,0	Klei	325	350 - ∞	160	Afstanden indicatief
EPP	3,0	Zand	450	425	175	Afstanden indicatief
	5,0	Zand	0 ³	350 - ∞	175	Afstanden indicatief
	3,0	Klei	310	300	160	Afstanden indicatief
	5,0	Klei	325	350 - ∞	160	Afstanden indicatief

³ Uit de berekeningen blijkt dat een gronddekking van 5 m in combinatie met axiale spanningen in de leiding vanwege verhinderde expansie leidt tot een overschrijding van de toelaatbare spanningen. Dit geldt voor de drukloze fase. Indien er gewelfwerking optreedt en de neutrale grondbelasting wordt gereduceerd zijn loopafstanden tot 500 m haalbaar.

7. Conclusies

Hieronder worden de conclusies puntsgewijs opgesomd:

Ligging in zand:

1. Maximale loopafstanden tussen de 170 m en 250 m zijn haalbaar.
2. De loopafstanden worden beperkt door de maximaal toelaatbare indrukking van de kussens.
3. De radiale vervorming is niet maatgevend voor de maximaal haalbare loopafstand.
4. Bij de toets op spanningen is de drukloze situatie met temperatuurbelasting is over het algemeen maatgevend ten opzichte van de situatie met inwendige druk.
5. De wrijving tussen grond en de leiding is over het algemeen de maatgevende parameter. Bij hogere wrijving kan een grotere loopafstand behaald worden.
6. Grotere gronddekking leidt tot hogere wrijving tussen de leiding en de grond.
7. Tot ca. 3 m gronddekking is de indrukking van de kussens maatgevend voor het bepalen van de maximale loopafstand. De hoogste spanningen worden met name gevonden in de expansiebochten.
8. Boven de 3 m gronddekking worden de berekende spanningen maatgevend. De hoogste spanningen worden niet meer gevonden in de expansiebochten maar in het verankerde deel in het midden tussen 2 expansielussen. Dit wordt veroorzaakt door de combinatie van hoge axiaalkrachten door verhinderde expansie en een hoge grondgewicht boven de leiding. In de drukloze situatie zijn de spanningen altijd te hoog door het hoge grondgewicht, ongeacht de loopafstand.
9. Bij grotere dekking (3 m en hoger) kan het zijn dat er gewelfwerking optreedt. Dit zou het gewicht boven de leiding kunnen reduceren waardoor dit niet meer maatgevend is.
10. Gezien de aanlegmethoden en de gebruikelijke aanlegdiepten zijn de volgende technieken met elkaar te vergelijken:
 - a. Open sleuf
 - b. PloegenDe resultaten bij 100% wrijving per diepte geven een goede indicatie van de haalbare loopafstanden.
11. De volgende aanlegmethoden zijn ook met elkaar te vergelijken :
 - a. Direct Pipe
 - b. HDD
 - c. EPP

De resultaten bij 0% wrijving dienen beschouwd te worden als de ligging als wrijvingsloos wordt verondersteld. Indien er wordt uitgegaan van drillgrout of vergelijkbaar, waarbij de wrijving niet verwaarloosbaar is, kan gekeken worden naar de resultaten bij bijvoorbeeld 25% of 50% wrijving.

Zeker bij Direct Pipe en HDD's op grotere diepte, kan gewelfwerking optreden waardoor de bovenbelasting op de leiding sterk wordt gereduceerd. Indien er gewelfwerking optreedt kan de gereduceerde bovenbelasting bepaald worden en gekeken worden of deze correspondeert met de niet gereduceerde bovenbelasting bij 1, 2, 3 of 5 m.

Voorbeeld: Indien de gereduceerde bovenbelasting bij een HDD op 20 m diepte overeenkomt met een niet gereduceerde bovenbelasting bij 2 m, dan dienen de resultaten bij 2 m dekking en 0% wrijving (of 25% wrijving) gehanteerd te worden om de loopafstand te bepalen.

Ligging in klei:

1. Maximale loopafstanden tussen de 160 m en 180 m zijn haalbaar.
2. De loopafstanden worden beperkt door de maximaal toelaatbare indrukking van de kussens.
3. Indien de indrukking van de kussens niet wordt beschouwd zijn loopafstand haalbaar tussen 340 m tot 380 m.
4. De radiale vervorming is niet maatgevend voor de maximaal haalbare loopafstand.
5. Bij de toets op spanningen is de drukloze situatie met temperatuurbelasting is over het algemeen maatgevend ten opzichte van de situatie met inwendige druk.
6. De wrijving tussen grond en de leiding is over het algemeen dusdanig laag dat zelfs een grotere gronddekking niet leidt tot een significant grotere loopafstand. Althans niet tot de beschouwde 5 m dekking.
7. De bovenbelasting speelt nog steeds een belangrijke rol bij een grotere gronddekking voor de bepaling van de maximale spanning, maar dit is een minder dominante rol dan bij zand. Dit komt door het lagere soortelijk gewicht van klei. Hierdoor is voor grotere gronddekkingen de ligging in klei gunstiger dan de ligging in zand en kunnen grotere loopafstanden gehaald worden.
8. Het meenemen van de temperatuurbelasting in de drukloze situatie heeft een grote impact op de resultaten, als de indrukking van de kussens buiten beschouwing wordt gelaten. Oneindige loopafstanden zijn haalbaar als alleen gekeken wordt naar de belastingcases met inwendige druk en een temperatuurbelasting.
9. Gezien de aanlegmethoden en de gebruikelijke aanlegdiepten zijn de volgende technieken met elkaar te vergelijken:
 - a. Open sleuf
 - b. PloegenDe resultaten bij 100% wrijving per diepte geven een goede indicatie van de haalbare loopafstanden.
10. De volgende aanlegmethoden zijn ook met elkaar te vergelijken :
 - a. Direct Pipe
 - b. HDD
 - c. EPP

De resultaten bij 0% wrijving dienen beschouwd te worden als de ligging als wrijvingsloos wordt verondersteld. Indien er wordt uitgegaan van drillgrout of vergelijkbaar, waarbij de wrijving niet verwaarloosbaar is, kan gekeken worden naar de resultaten bij bijvoorbeeld 25% of 50% wrijving.

8. Aanbevelingen

Hieronder worden de aanbevelingen puntsgewijs opgesomd:

1. De indrukking van de kussens is vaak maatgevend. Het verdient aanbeveling om berekeningen uit te voeren waarbij geen kussens worden toegepast bij de expansiebochten.
2. De toets op toelaatbare PUR spanning is niet uitgevoerd omdat er wordt uitgegaan van hoge dichtheid PUR. Het verdient aanbeveling voor enkele extreme situaties de toets uit te voeren en de aanname dat de PUR spanning niet maatgevend is te verifiëren.
3. De toets op kritische rek is nog niet uitgevoerd gezien de afwijkingen tussen de NEN3650 en de EN13941 wat betreft de maximaal toelaatbare waarde. Het verdient aanbeveling onderzoek te doen naar de toelaatbare kritische rek aangezien dit maatgevend kan zijn voor het wel of niet laten verankeren van de leiding. Dit kan een aanbeveling zijn voor de werkgroep van de NEN3650.

Bijlagen

Bijlage 1 Case Stedelijk

Bijlage 2 Case Landelijk

Bijlage 3 Wrijvingsweerstand bedrijfsfase, Deltares

Bijlage 4 Berekende Von Mises spanningen ligging in zand

Bijlage 5 Berekende Von Mises spanningen ligging in klei

Bijlage 6 Berekende indrukking kussens ligging in zand

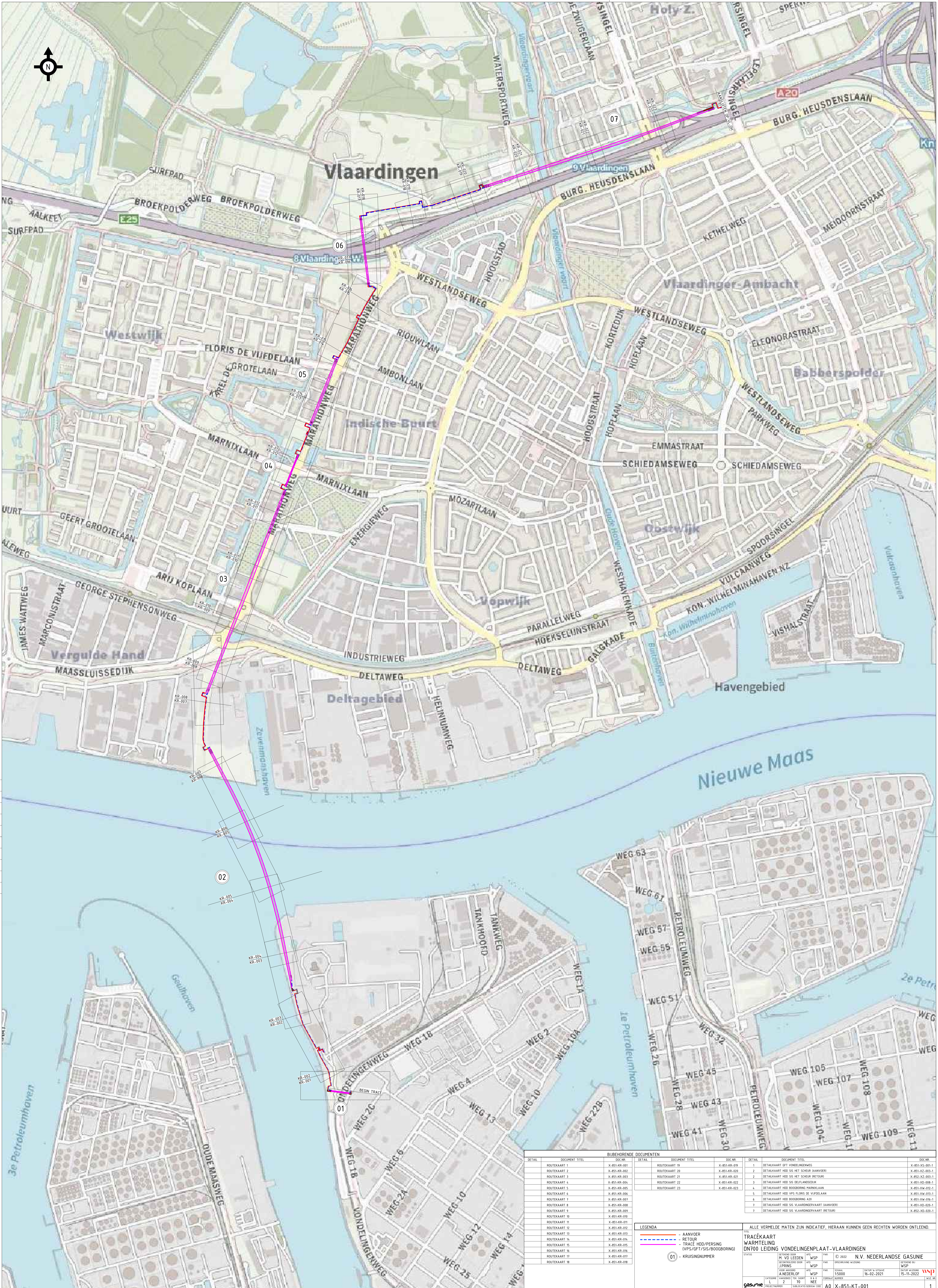
Bijlage 7 Berekende indrukking kussens ligging in klei

Bijlage 8 Berekende radiale vervormingen ligging in zand

Bijlage 9 Berekende radiale vervormingen ligging in klei

Bijlage 1

Case Stedelijk



BUBERHORENDE DOCUMENTEN			
DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.	DETAIL
ROUTEKAART 1	X-851-KR-001	ROUTEKAART 19	X-851-KR-019
ROUTEKAART 2	X-851-KR-002	ROUTEKAART 20	X-851-KR-020
ROUTEKAART 3	X-851-KR-003	ROUTEKAART 21	X-851-KR-021
ROUTEKAART 4	X-851-KR-004	ROUTEKAART 22	X-851-KR-022
ROUTEKAART 5	X-851-KR-005	ROUTEKAART 23	X-851-KR-023
ROUTEKAART 6	X-851-KR-006		
ROUTEKAART 7	X-851-KR-007		
ROUTEKAART 8	X-851-KR-008		
ROUTEKAART 9	X-851-KR-009		
ROUTEKAART 10	X-851-KR-010		
ROUTEKAART 11	X-851-KR-011		
ROUTEKAART 12	X-851-KR-012		
ROUTEKAART 13	X-851-KR-013		
ROUTEKAART 14	X-851-KR-014		
ROUTEKAART 15	X-851-KR-015		
ROUTEKAART 16	X-851-KR-016		
ROUTEKAART 17	X-851-KR-017		
ROUTEKAART 18	X-851-KR-018		

BUBERHORENDE DOCUMENTEN			
DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.	DETAIL
1	DETAALKAART OF VONDELINGENWEG	X-851-KR-001	
2	DETAALKAART HOD SIS MET SNIJER (AANVOER)	X-851-KR-002	
3	DETAALKAART HOD SIS MET SNIJER (RETOUR)	X-851-KR-003	
4	DETAALKAART HOD SIS OELFANDEKOR	X-851-KR-004	
5	DETAALKAART HOD BOODBORING MARNIXLAAN	X-851-KR-005	
6	DETAALKAART HOD VPS FLORES DE VIJFDELAAN	X-851-KR-006	
7	DETAALKAART HOD BOODBORING ARIJ KOPLAAN	X-851-KR-007	
8	DETAALKAART HOD SIS VLAANDINGENVAART (AANVOER)	X-851-KR-008	
9	DETAALKAART HOD SIS VLAANDINGENVAART (RETOUR)	X-851-KR-009	

LEGENDA	
	AANVOER
	RETOUR
	TRACE HOD/PPERSING (VPS/OF/S/S/BOODBORING)
	KRUISINGNUMMER

ALLE VERMELENDE MATEN ZIJN INDICATIEF. HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

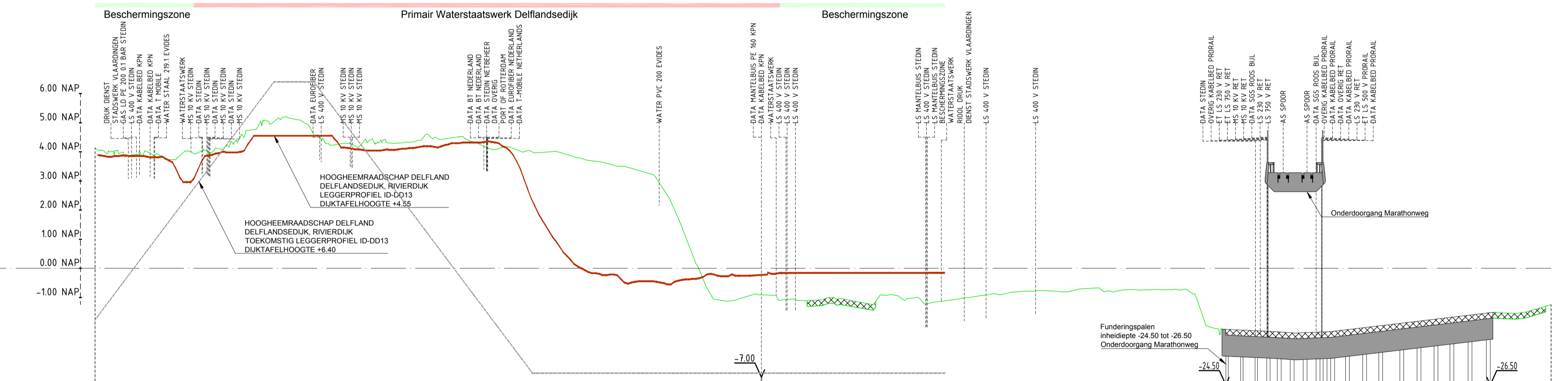
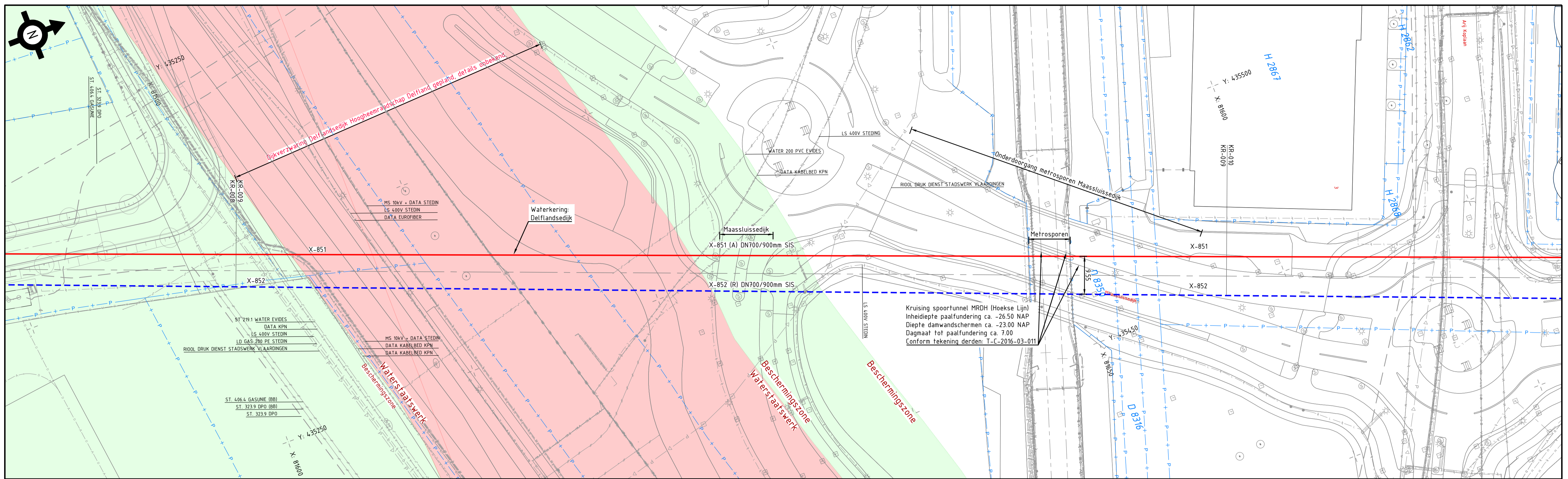
TRACEKAART WAARTELIJND ONTOFF LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STADION: H. VUURLEEDER
 STADION: J. P. J. VAN DER WEG
 STADION: A. NEDERLOF

© 2022 N.V. NEDERLANDSE GASUNIE
 WSP
 WSP
 WSP

SCALE: 1:5000
 DATE: 16-02-2021
 DATE: 15-11-2022

PROJECT: X-851-KT-001



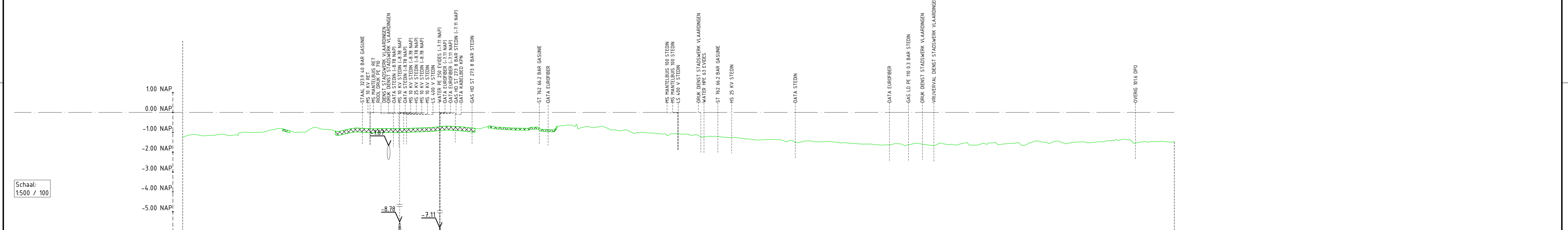
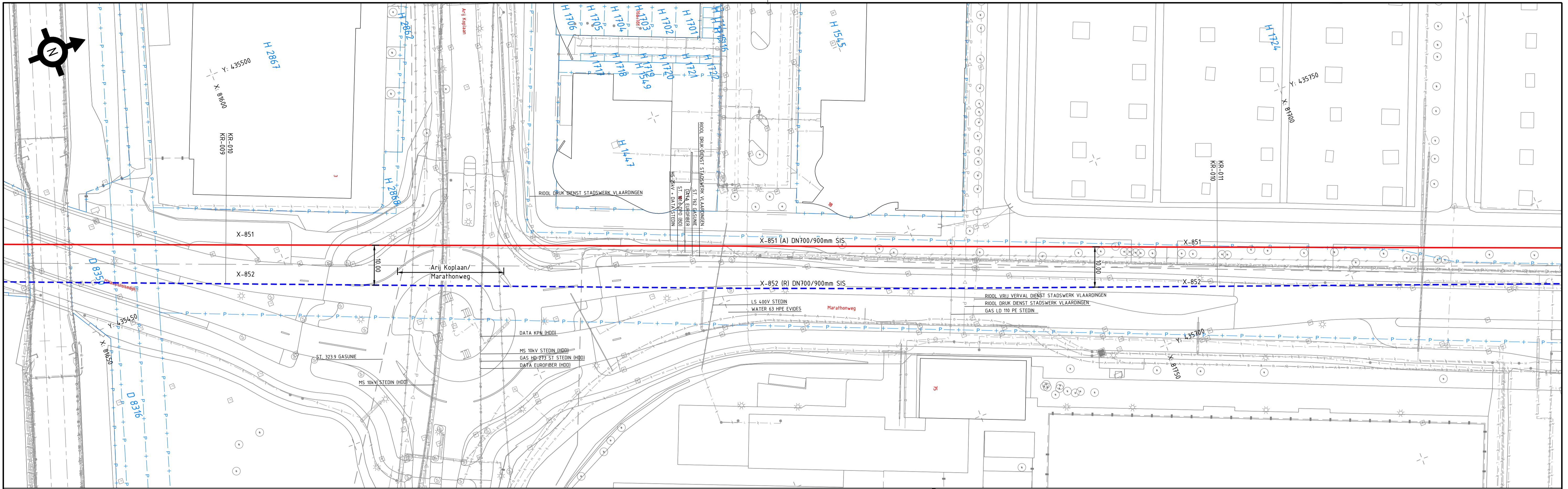
AFSTAND	00.00	16.48	25.00	50.00	75.00	100.00	116.97	122.27	125.00	134.05	145.32	150.00	175.00	194.14	200.00	204.00	208.11	225.00	245.00	
TERREINHOOGTE	4.14	3.95	4.53	4.72	4.01	1.71	-1.01	-1.11	-1.07	-1.13	-1.12	-1.01	0.80	-2.11	-2.71	3.21	3.21	-1.81	-1.30	
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.																				
MINIMUM DEKING 100m (tenzij anders vermeld)																				
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE																				
KENMERK	HORIZONTAL GESTUURDE BORING																			
DETAIL	A																			
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER																				
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEDING	711.2mm LEIDING (MEDIUM); WD 8.0mm, P355NH 914.4mm LEIDING (MANTEL); WD 16.0mm, P355NH BOORSTRENG UITW. PP COATING																			

LEGENDA	STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS	BIJBEHORENDE DOCUMENTEN	OPMERKINGEN / LEGENDA									
<ul style="list-style-type: none"> GEMEENTEGRENS KADASTERGRENS WATERKERING LEKDETECTIEKAST VACUUMKAST SIS - EN LEKDETECTIEKAST KB PAAL 		<table border="1"> <thead> <tr> <th>DETAIL</th> <th>DOCUMENT TITEL</th> <th>DOC.NR.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>TRACÉKAART</td> <td>X-851-KT-001</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>HDD SIS DELFLANDESDIJK</td> <td>X-851-KB-008-1</td> </tr> </tbody> </table>	DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC.NR.		TRACÉKAART	X-851-KT-001	A	HDD SIS DELFLANDESDIJK	X-851-KB-008-1	<ol style="list-style-type: none"> Bronnen PDKISSEPT 2021 - TOPOGRAFIE & PERCELLEN / KLIKISSEPT 2021 -> KABELS & BUIZEN COORDINATEN SYSTEEM: R.D. VOOR ONTWERPGEVEGENS ZIE OVERZICHTSTEKENING PELPMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS MATEN IN METERS BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN. BEPALD OVER HARTLIJN VAN HET TRACÉ VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND PROEFSLEUFGEVEGENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL EVENTUELE AANGEGEVEN PERS- EN ONTVANGSTRUPEN ZIJN INDICATIEF, WEERGEVEGEN BOVEN DE LEIDING (ca. 0.30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEGGEN xxx = PROEFSLEUF DN300: R=30 (=970mm), R=400 (=12920mm) DN600: R=30 (=930mm) DN100: R=30 (=233mm), R=50 (=355mm), R=400 (=2844mm) xx = LOCATIE VAN GEOTEXTEIL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEXTEIL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING) VOOR GEVEGENS BETREFFENDE BOMEN ZODS STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NIET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN JUISTE LIGGING VAN KABELS EN BUIZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN.
DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC.NR.										
	TRACÉKAART	X-851-KT-001										
A	HDD SIS DELFLANDESDIJK	X-851-KB-008-1										
LEGENDA K&L												
<ul style="list-style-type: none"> PETROCHEMIE BUISELEIDING GEVAARLIJKE INHOUD DATATRANSPORT GAS HOGE DRUK PERSROOD RIOD (VRIJVERVAL) LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET 	<ul style="list-style-type: none"> HOOGSPANNING MIDDENSPANNING LAAGSPANNING WARMTE WATERLEIDING DIJKER WEES (ONBEKEND) OVERIG 											

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

ROUTEKAART 9 WARMTELING DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEKERND DOOR J.P.RINS	AFD. WSP	© 2022 N.V. NEDERLANDSE GASUNIE	TEKENING BIJ WSP
	GECONTROLEERD DOOR M. V/D LEEDEN	AFD. WSP	SCHAAL 1:500	DATEUM VAN UITGAVE 16-02-2021
	VOOR AKKORDIE A.NEDERLOF	AFD. WSP	SCHAAL 1:500	DATEUM WIZJING 15-11-2022
CATEGORIE L	WAKENBET 71	JA	TERRAAL	BURNER
PROJECTNUMMER 1.005506.01	SUBLOCATIE/GEBOUD CODE	A1	X-851-KR-009	1



AFSTAND	0.00	25.00	35.97	38.45	50.00	73.78	77.00	84.4	100.00	125.00	150.00	163	175.00	200.00	225.00	250.00
TERREINHOOGTE	-1.25	-0.80	-0.93	-0.93	-0.81	-0.80	-0.70	-0.80	-0.9	-1.09	-1.37	-1.63	-1.95.00	-1.65	-1.50	-1.47
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.																
MINIMUM DEKKING 100m (tenzij anders vermeld)																
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE																
KENMERK	HORIZONTAAL GESTUURDE BORING															
DETAIL	A															
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER																
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEDING	711.2mm LEIDING (MEDIUM): WD 8.0mm, P355NH 914.4mm LEIDING (MANTEL): WD 16.0mm, P355NH BOORSTRENG UITV. PP COATING															

LEGENDA

- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- LEKDETECTIEKAST
- VACUUMKAST SIS - EN LEKDETECTIEKAST
- KB PAAL

STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS

LEGENDA K&L

- PETROCHEMIE	- HOOGSPANNING
- BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD	- MIDDENSPPANNING
- DATATRANSPORT	- LAAGSPANNING
- GAS HOGE DRUK	- WARMTE
- GAS LAGE DRUK	- WATERLEIDING
- PERSRIJOL	- DIJKER
- RIJOL (VRIJVERVAL)	- WEES (ONBEKEND)
- LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET	- OVERIG

BIJBEHOORENDE DOCUMENTEN

DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.
	TRACÉKAART	X-851-KT-001
A	HDD SIS DELFLANDESDIJK	X-851-XD-008-1

OPMERKINGEN / LEGENDA

- BRONNEN PDOKISEPT 2021 - TOPOGRAFIE & PERCELLEN / KLIKISEPT 2021 -> KABELS & BUIZEN
- COORDINATEN SYSTEEM : R.D.
- VOOR ONTWERPGEVEGENS ZIE OVERZICHTSTEKENING
- PELIMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
- MATEN IN METERS
- BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
- HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN.
- IS BEPALD OVER HARTLIJN VAN HET TRACÉ
- VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
- PROEFSLEUFGEVEGENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
- IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL
- EVENTUEEL AANGEVEGEN PERS- EN ONTVANGSTKUBEN ZIJN INDICATIEF WEEERGEVEGEN
- BOVEN DE LEIDING (ca. 0.30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEGGEN
- xxx = PROEFSLEUF
- DN300 - R=30 (+97mm), R=400 (+12920mm)
- DN600 - R=30 (+930mm)
- DN700 - R=30 (+2130mm), R=50 (+3555mm), R=400 (+28440mm)
- xxx = LOCATE VAN GEOTEXTIEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDIGE GEOTEXTIEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING)
- VOOR GEVEGENS BETREFFENDE BOMEN ZIALS STAMPDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NIE HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
- JUISTE LIGGING VAN KABELS EN BUIZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN.

OPMERKINGEN / LEGENDA

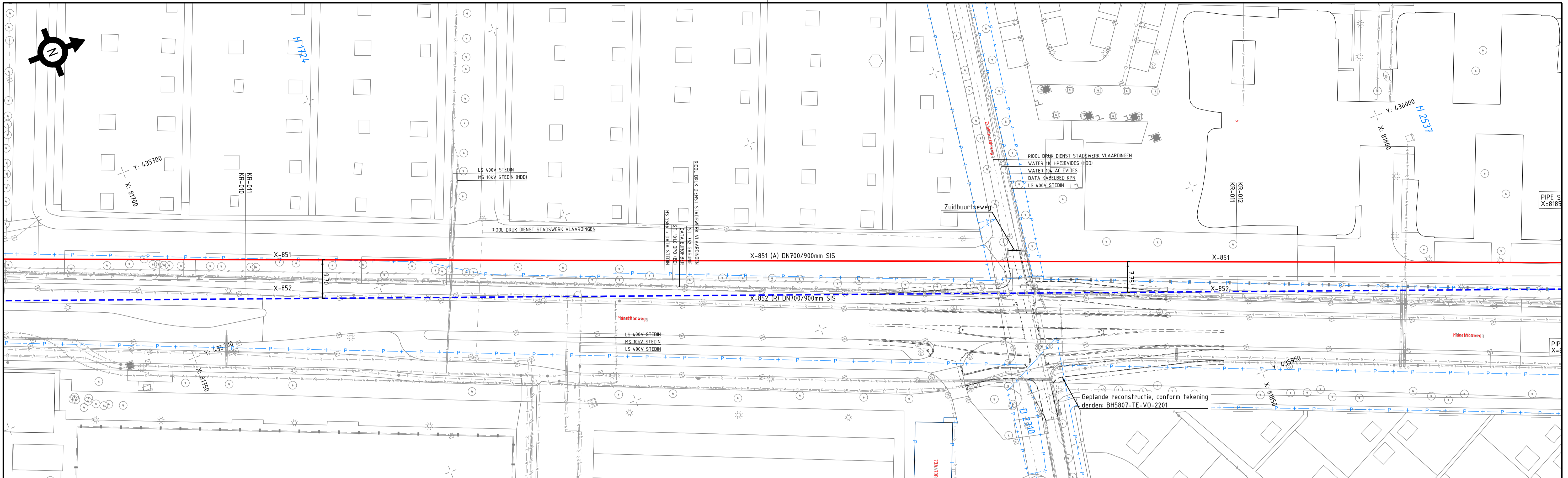
ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

TITEL
ROUTEKAART 10
WARMTELEIING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEFERD DOOR	AFD.	WSP	© 2022	N.V. NEDERLANDSE GASUNIE
	J.P.RINS	AFD.	WSP		GEVERD BIJ
	GECONTROLEERD DOOR	AFD.	WSP		WSP
	M.V/D LEELEN	AFD.	WSP		
	VOOR AKKOORD	AFD.	WSP		
	A.NEDERLOF	AFD.	WSP		
	WAKERBOED TIK-SOORT	R.F.O.	JA		
	L 2	71	JA		
	PROJEKTNUMMER	SUBLOCATIE/GEBOUD CODE	A1	X-851-KR-010	
	1005506.01				

LEGENDA

- AANVOER
- RETOUR



LEGENDA - GEMEENTEGRENS - KADASTEREGRENS - WATERKERING - LEKDETECTIEKAST - VACUUMKAST SIS - EN LEKDETECTIEKAST - KB PAAL	
STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS 	
LEGENDA K&L - PETROCHEMIE - BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD - DATATRANSPORT - GAS HOGE DRUK - GAS LAGE DRUK - PERSRIOD - RIJDOL (VRIJVERVAL) - LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET - HOOGSPANNING - MIDDENSPPANNING - LAAGSPANNING - WARMTE - WATERLEIDING - DIJKER - WEES (ONBEKEND) - OVERIG	

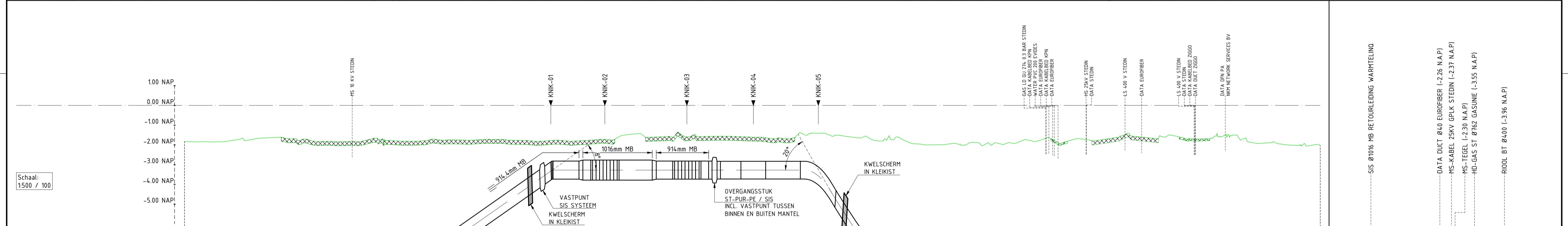
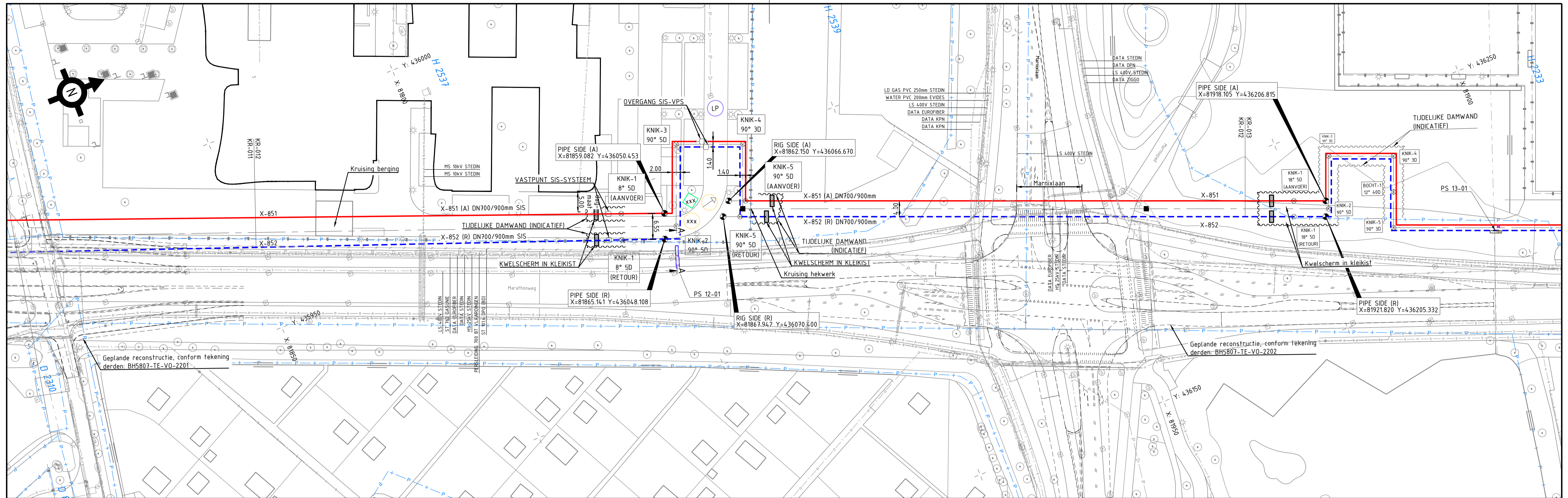
BIJBEHOORENDE DOCUMENTEN DETAIL DOCUMENT TITEL DOC.NR. TRACÉKAART X-851-KT-001 A HDD SIS DELFLANDELIJK X-851-XD-008-1	
---	--

OPMERKINGEN / LEGENDA 1. BRONNEN: PDK(SEPTEMBER 2021) - TOPOGRAFIE & PERCELEN / KLIK(SEPTEMBER 2021) - KABELS & BUZEN 2. COORDINATEN SYSTEEM: R.D. 3. VOOR ONTWERPGEVEGENS ZIE OVERZICHTSTEKENING 4. PEILMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS 5. MATEN IN METERS 6. \blacktriangle BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL 7. HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN. 8. VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND 9. PROEFSLEUFGEVEGENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT 10. IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL 11. EVENTUEEL AANGEGEVEN PERS- EN ONTVANGSTKUPEN ZIJN INDICATIEF. MEERGEVEGEN 12. \square = PROEFSLEUF 13. DN300: R=30 (L=971mm), R=400 (L=12920mm) DN600: R=30 (L=1930mm) DN700: R=30 (L=2133mm), R=50 (L=3555mm), R=400 (L=28440mm) 14. \square = LOCATIE VAN GEOTEXTEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEXTEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING) 15. VOOR GEVEGENS BETREFFENDE BOMEN, ZONDER STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NIET MER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN 16. JUISTE LIGGING VAN KABELS EN BUZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN	
---	--

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

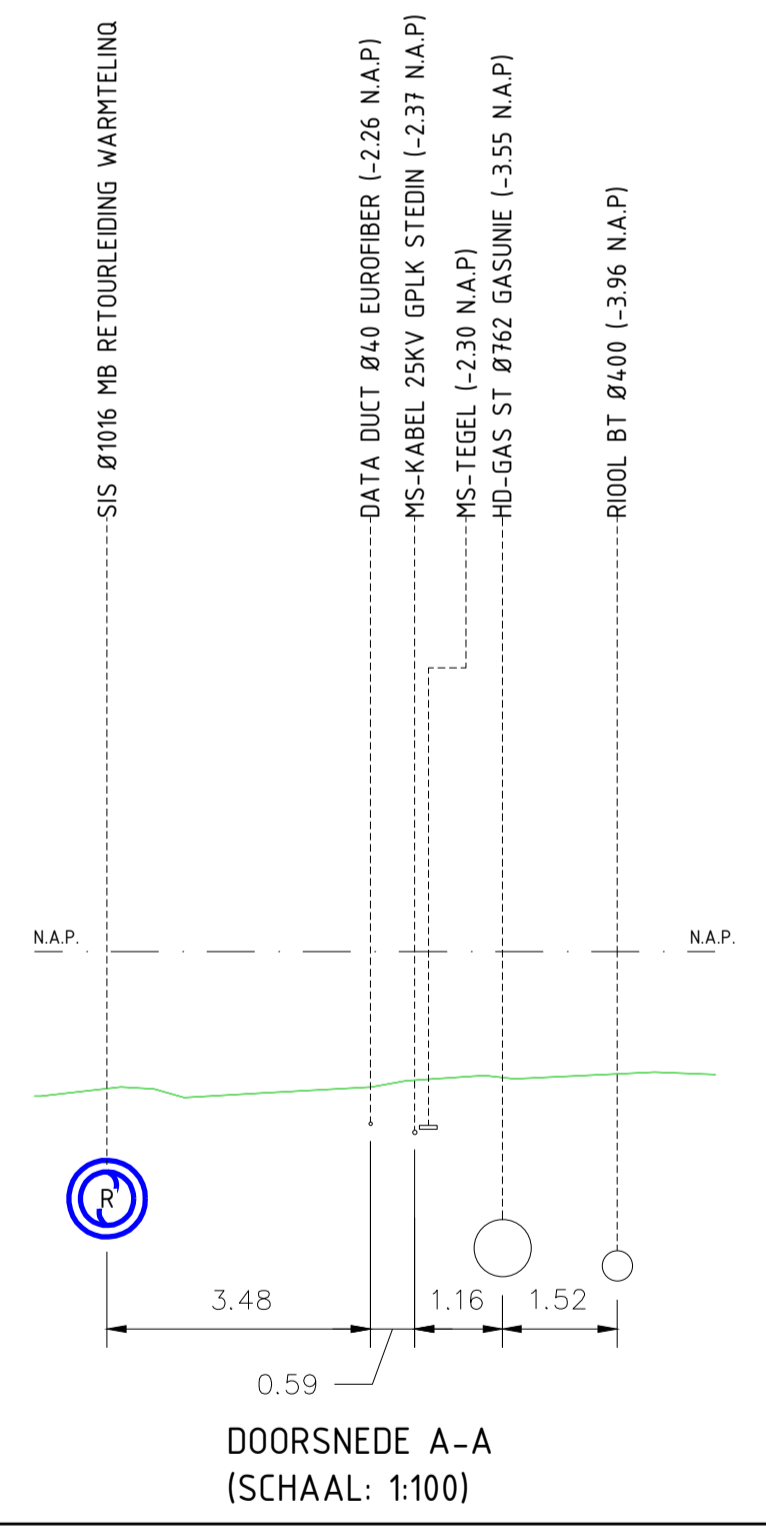
TITEL
ROUTEKAART 11
WARMTELING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEFERD DOOR	AFD.	WSP	© 2022	N.V. NEDERLANDSE GASUNIE
	J.PRINS	AFD.	WSP	OPMERKING WIJZIGING	GEFERD BIJ
	M. V/D LEEDEN	AFD.	WSP	OPMERKING WIJZIGING	WSP
VOOR AFGEKEURD	A.NEDERLOF	AFD.	WSP	SCHAAL	1:500
VERKEURDE TEEK-BOORT	71	JA	NOUMBER	DATUM IN UITGAVE	16-02-2021
				DATUM WIJZIGING	15-11-2022
CATEGORIE	L	2	71	JA	NOUMBER
PROJECTNUMMER	1005506.01	SUBCATEGORIE/GEBOUW CODE	A1	X-851-KR-011	1



Schaal: 1:500 / 100

AFSTAND	00.00	15.33	24.46	50.00	75.00	100.00	105.57	125.00	132.25	139.25	147.49	155.33	162.00	175.00	200.00	237.29	251.57	275.00	279.00
TERREINHOOGTE	-1.82	-1.75	-1.65	-1.77	-1.72	-1.82	-1.75	-1.57	-1.57	-1.55	-1.55	-1.45	-1.42	-1.79	-2.04	-1.98	-1.77	-1.61	-1.54
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P. MINIMUM DEKING 1.00m (tenzij anders vermeld)						-2.82	-2.77	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82						
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE																			
KENMERK	HORIZONTAAL GESTUURDE BORING													BOOG BORING					
DETAIL	A													B					
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER														EXTRA MOFAFDICHTING TOEPASSEN					
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEDING	711.2mm LEIDING (MEDIUM): WD 8.0mm, P355NH WD 12.5mm													DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm + HD-PUR					
	914.4mm LEIDING (MANTEL): WD 16.0mm, P355NH													BOORSTRENG UITW. PP COATING					
														1016mm (MANTEL) WD 20.0mm L485MB					



LEGENDA

- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- LP - LEKDETECTIEPAAL
- xxx - KB PAAL
- xxx - VACUUMKAST SIS
- xxx - GELIJKSRICHTENKAST
- xxx - MARKERINGSPAAL

STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS

LEGENDA K&L

---	PETROCHEMIE	---	HOOGSPANNING
---	BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD	---	MIDDENSPANNING
---	DATA TRANSPORT	---	LAAGSPANNING
---	GAS HOGE DRUK	---	WARMTE
---	GAS LAGE DRUK	---	WATERLEIDING
---	PERSRUIJ	---	DUIKER
---	RIOOL (VRIJVERVAL)	---	WEES (ONBEKEND)
---	LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET	---	OVERIG

BIJBEHOORENDE DOCUMENTEN

DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.
A	TRACÉKAART	X-851-KT-001
B	HDD SIS DELFLANDESDIJK	X-851-XD-008-1
C	HDD BOOGBORING MARINXLAAN	X-851-XW-012-1
	CONSTRUCTIEKENNING HDD SIS DELFLANDESDIJK	X-851-LP-008-1

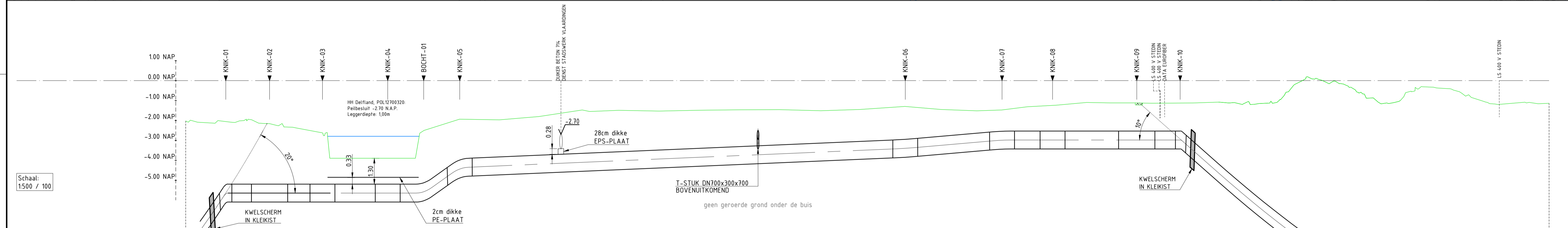
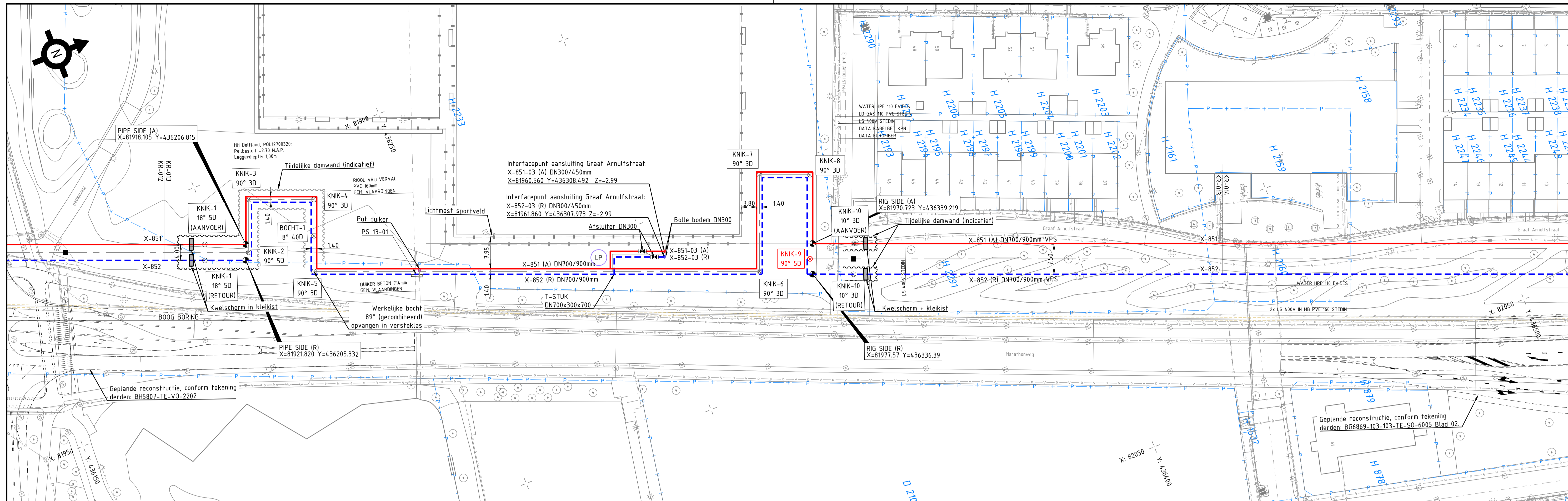
OPMERKINGEN / LEGENDA

- BRONNEN PDKIJSCEPT 2021 -- TOPOGRAFIE & PERCELLEN / KLIKISCEPT 2021 -- KABELS & BUZEN
- COORDINATEN SYSTEEM : R.D.
- VOOR ONTWERPGEVEENS ZIE OVERZICHTSTEKENING
- PELPMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
- MATEN IN METERS
- ▶▶▶ BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
- HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN.
- IS BEPALD OVER HARTELIN VAN HET TRACÉ
- VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMIDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
- PROEFSLEUFGEVEENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
- IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL
- EVENTUEEL AANGEVEN PERS- EN ONTVANGSTKUPEN ZIJN INDICATIEF WEEERGEVEENS
- BOVEN DE LEIDING (ca. 0.30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEGGEN
- xxx = PROEFSLEUF
- DN300 - R=30 (e=971mm), R=400 (e=12920mm)
- DN600 - R=30 (e=9830mm)
- DN100 - R=30 (e=293mm), R=50 (e=355mm), R=400 (e=28440mm)
- = LOCATIE VAN GEOTEXTIEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEXTIEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING)
- VOOR GEVEENS BETREFFENDE BOMEN ZONDER STANDAARDIEMER, TE KAPPEN EN WEL/NIET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
- JUSTE LIGGING VAN KABELS EN BUZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN.

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

ROUTEKAART 12
WARMTELEIDING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEKERND DOOR J.P.RINS	AFD. WSP	© 2022 N.V. NEDERLANDSE GASUNIE	GEKERND BIJ WSP
GECONTROLEERD DOOR M.V.D. LEEDEN	AFD. WSP	PAR. OPSCHRIJVING WIZJING	GEKERND BIJ WSP	
VOOR AANROOF A.NEDERLOF	AFD. WSP	NEE	SCHAAL 1:500	DATUM 16-02-2021
CATEGORIE L	2	71	NUMMER	
PROJEKTNUMMER 1005506.01	SUBCATEGORIE/GEBOUW CODE	A1	X-851-KR-012	1



AFSTAND	0.00 - 25.00	25.00 - 50.00	50.00 - 75.00	75.00 - 100.00	100.00 - 125.00	125.00 - 150.00	150.00 - 175.00	175.00 - 200.00	200.00 - 225.00	225.00 - 250.00	250.00 - 275.00	275.00 - 300.00	
TERREINHOOGTE	-2.02	-2.32	-2.73	-1.94	-1.37	-1.47	-1.91	-1.37	-1.50	-1.39	-1.02	-0.60	
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.	-5.19	-5.19	-5.19	-5.19	-5.19	-3.91	-3.65	-3.55	-3.21	-2.95	-2.60	-2.55	
MINIMUM DEKKING 100m (tenzij anders vermeld)													
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE													
KENMERK	BOOG BÖRING KWELSCHERM VERT. BOCHT	30° HOR. AANVER. 13-K-02	30° HOR. AANVER. 13-K-03	HOR. BOCHT 13-K-04	VERT. BOCHT 13-B-1	30° HOR. AANVER. 13-K-05	T-STUK DN700x300x700	30° HOR. AANVER. 13-K-06	30° HOR. AANVER. 13-K-07	HOR. BOCHT 13-K-08	HOR. BOCHT 13-K-09	VERT. BOCHT 13-K-10	
DETAIL	B	EXTRA MOFAFDICHTING TOEPASSEN						C	EXTRA MOFAFDICHTING TOEPASSEN				A
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER	18°/R=50 13-K-01	90°/R=50 13-K-02	90° 13-K-03	90° 13-K-04	12°/R=400 13-B-1	90° 13-K-05		90° 13-K-06	90° 13-K-07	90° 13-K-08	90°/R=50 13-K-09	90° 13-K-10	
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDikte/BEKLEDING	W.D. 8.0mm + HD-PUR	W.D. 10.0mm + HD PUR			DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm			W.D. 10.0mm + HD PUR		W.D. 14.2mm		DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm + HD-PUR	
	W.D. 12.5mm	W.D. 14.2mm		W.D. 14.2mm		W.D. 14.2mm		W.D. 14.2mm		W.D. 14.27mm L485MB			

LEGENDA

- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- LP - LEKDETECTIEPAAL
- MARKERINGSPAAL

LEGENDA K&L

- PETROCHEMIE
- BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD
- DATATRANSPORT
- GAS HOGE DRUK
- GAS LAGE DRUK
- PERSRIOD
- RIJOL (VRIJVERVAL)
- LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET
- HOOGSPANNING
- MIDDENSPANNING
- LAAGSPANNING
- WARMTE
- WATERLEIDING
- DIJKER
- WEES (ONBEKEND)
- OVERIG

STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS

LEGENDA K&L

BIJBEHOORENDE DOCUMENTEN

DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.
	TRACÉKAART	X-851-KT-001
B	HDD BOOGBORING MARINXLAAN	X-851-XW-012-1
A	HDD VPS FLORIS DE VIJFDALAAN	X-851-XW-013-1
C	AFTAKKINGEN	X-851-LP-002-1

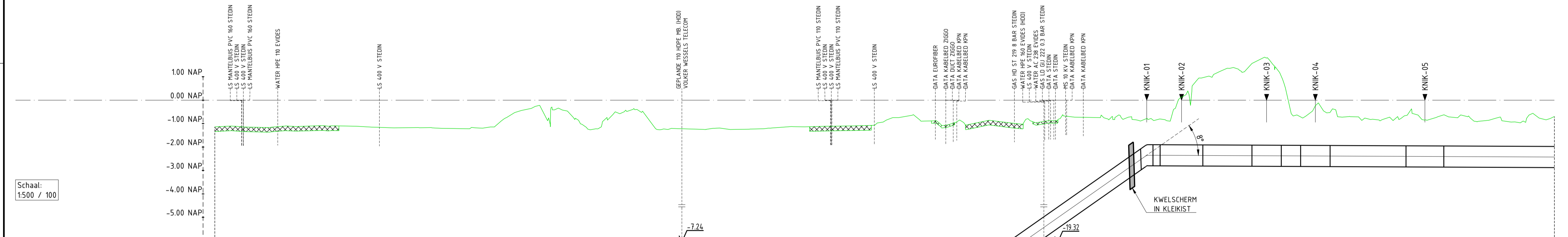
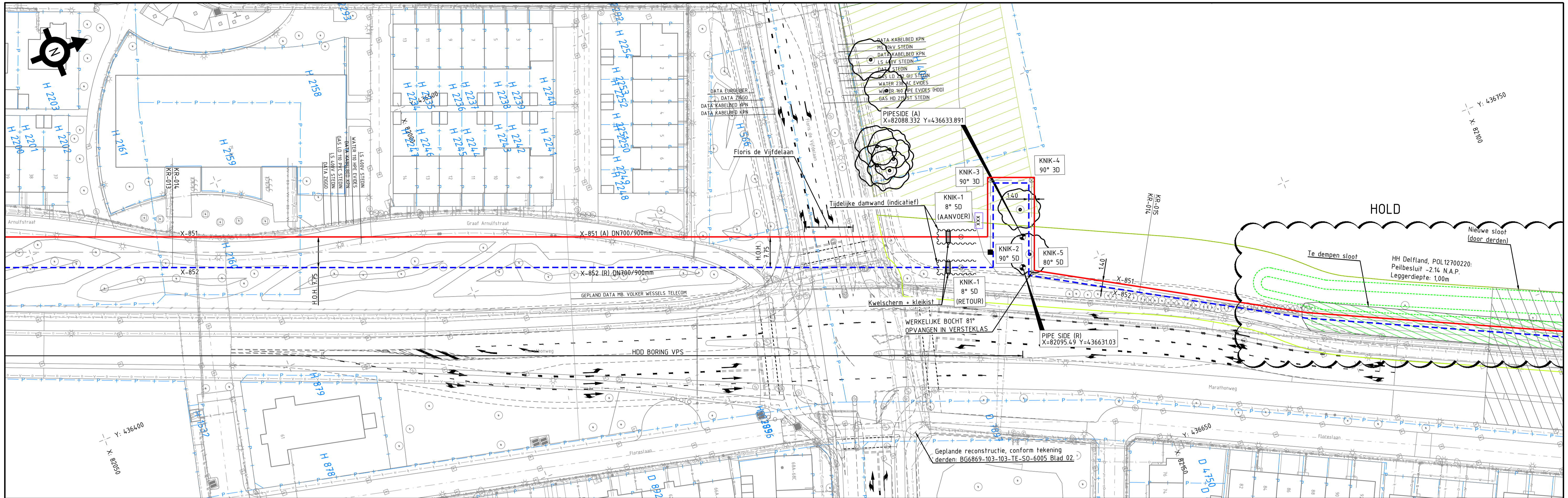
OPMERKINGEN / LEGENDA

- BRONNEN PDKISEPT 2021 -- TOPOGRAFIE & PERCELEN / KLIKISEPT 2021 -- KABELS & BUIZEN
- COORDINATEN SYSTEEM : R.D.
- VOOR ONTWERPGEVEENS ZIE OVERZICHTSTEKENING
- PELMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
- MATEN IN METERS
- BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
- HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN, IS SEPARELD OVER HARTLIJN VAN HET TRACÉ
- VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
- PROFIELEIDINGEN, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
- IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROFIELEIDINGEN
- EVENTUELE AANGEGEVEN PERS- EN ONTVANGSKRUPEN ZIJN INDICATIEF WEEERGEVEEN
- BOVEN DE LEIDING (ca. 0.30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEGGEN
- x x x = PROFIELEIDING
- DN300 R=30 (L=971mm), R=400 (L=12920mm)
- DN600 R=30 (L=1930mm)
- DN700 R=30 (L=2130mm), R=50 (L=3555mm), R=400 (L=28440mm)
- LOCATIE VAN GEOTEXTEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEXTEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING)
- VOOR GEGEVENS BETREFFENDE BOMEN ZIJS STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
- JUISTE LIGGING VAN KABELS EN BUIZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROFIELEIDINGEN

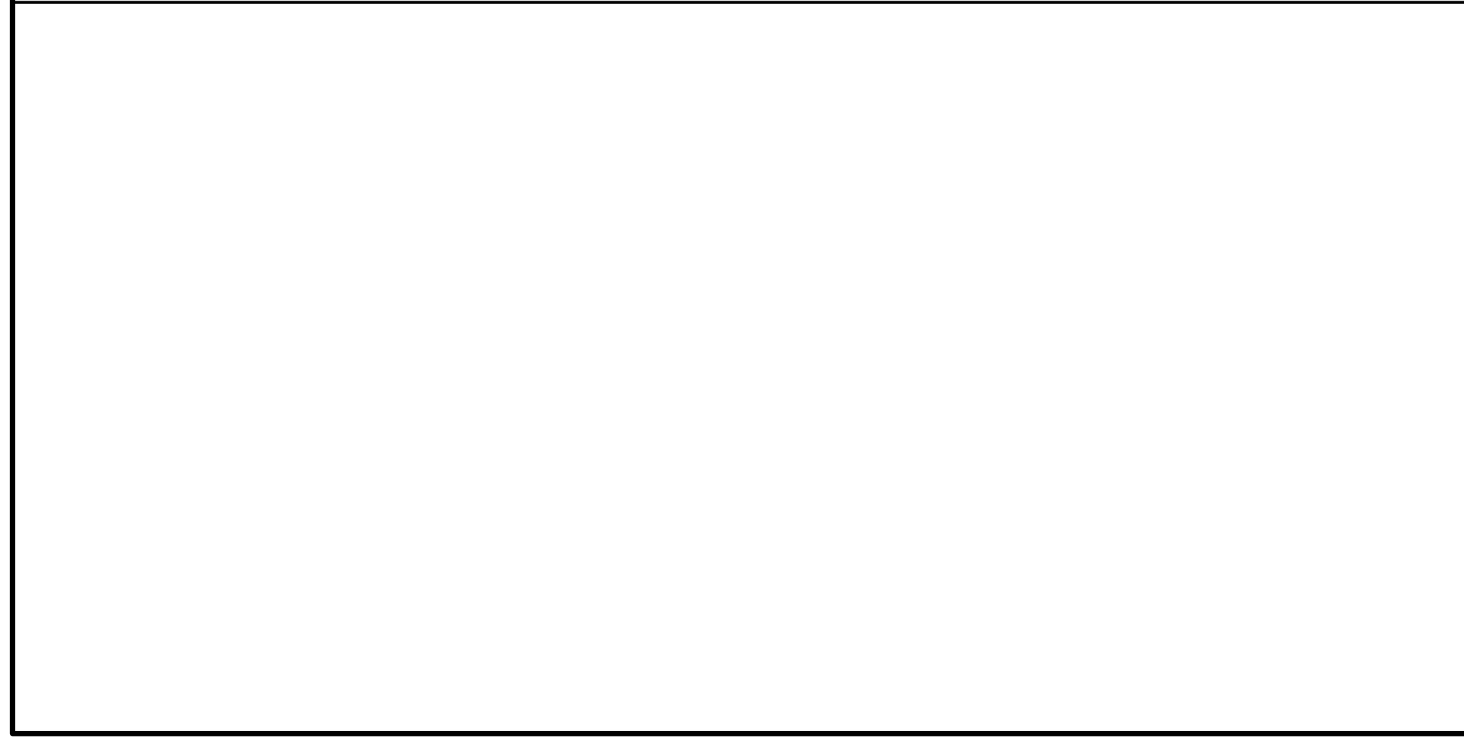
ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

TITEL
ROUTEKAART 13
WARTLEIING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEFABRICEERD DOOR	AFD.	WSP	PAR.	© 2022	N.V. NEDERLANDSE GASNIE
	J.P.RINS					
	GECONTROLEERD DOOR	AFD.	WSP	PAR.	SCHRIJFVOOR WILZIJING	
	M.V.D. LEEDEN					
	VOOR AKKORDE	AFD.	WSP	PAR.	SCHAAL	1:500
	A.NEDERLOF					
	VERWERKT TIK-BOORT	R.F.O.	JA	FORMAAT	NUMMER	
	L 2	71				
CATEGORIE	PROJECTNUMMER	SUBCATEGORIE/GEBOUW CODE	A1	X-851-KR-013 (21-12-2022)		
L 005506.01						



AFSTAND	0+00,00	0+10,00	0+20,00	0+30,00	0+40,00	0+50,00	0+60,00	0+70,00	0+80,00	0+90,00	0+100,00	0+110,00	0+120,00	0+130,00	0+140,00	0+150,00	0+160,00	0+170,00	0+180,00	0+190,00	0+200,00	
TERREINHOOGTE	-1,14	-1,07	-1,10	-1,21	-0,45	-1,22	-1,14	-1,13	-1,08	-0,80	-0,88	-0,95	-1,04	-1,01	-0,95	-0,85	-0,82	1,70	-0,84	-0,91	-0,70	
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.																		-1,90	-1,91	-1,92	-1,93	-1,98
MINIMUM DEKKING 100m (tenzij anders vermeld)																						
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE																						
KENMERK	HORIZONTAAL GESTUURDE BORING																					
DETAIL	A																					
BOCHTEN R=3,0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER	81°/R=50 90°/R=50 90°/R=50 90°/R=50 90°/R=50 90°/R=50																					
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEDING	DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm + HD-PUR																					



BIJBEHORENDE DOCUMENTEN	
DETAIL	DOCUMENT TITEL
	TRACÉKAART X-851-KT-001
A	HDD VPS FLORIS DE VIJFDELAAN X-851-XW-013-1

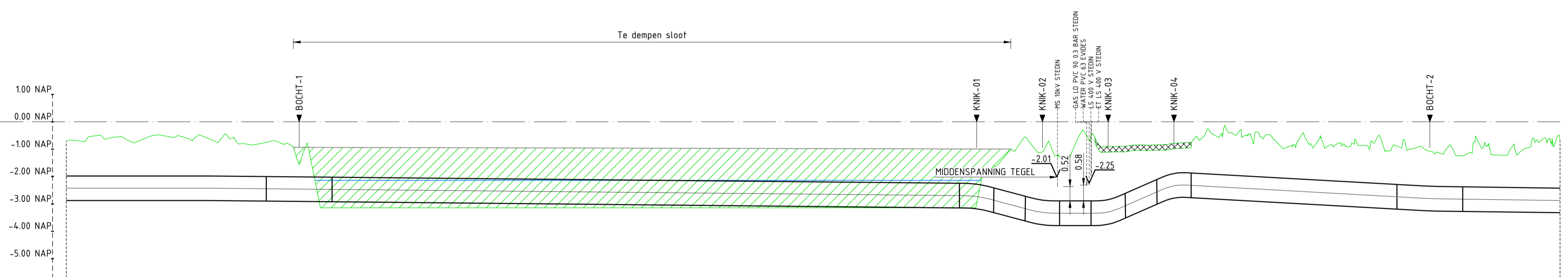
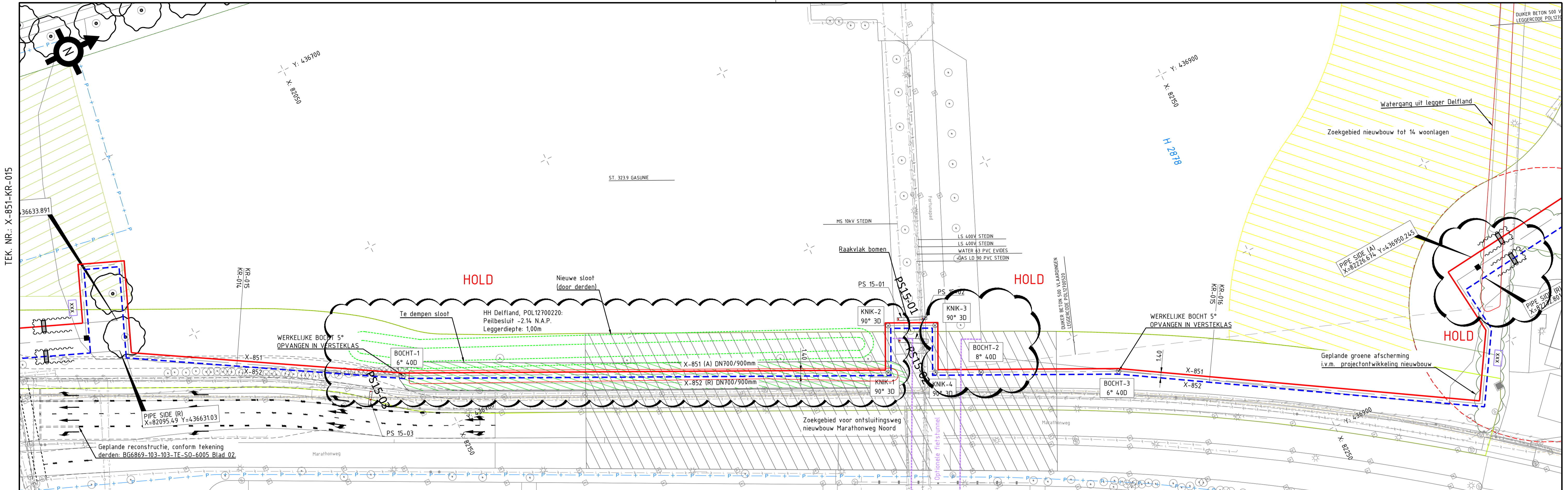
- OPMERKINGEN / LEGENDA
- BRONNEN: PDK(1992), TOPOGRAFIE & PERCELEN / KLIK(1992) -- KABELS & BUZZEN
 - COÖRDINATEN SYSTEEM: R-D
 - VOOR ONTWERPGEHEELS ZIE OVERZICHTSTEKENING
 - PELMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
 - MATEN IN METERS
 - BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
 - HOOGTE-/LENGTEPROFIELEN, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DEDEN
 - BEPAALD OVER HARTLIJN VAN HET TRACÉ
 - VAN KABELS EN LEIDINGEN DEDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
 - PROFIELENGEGEVENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
 - IN HOOGTE-/LENGTEPROFIELEN, BOVENAANZICHT EN IN PROFIELEDETAIL
 - EVENTUEEL AANWEGENDE PERS- EN ONTVANGSTROMEN ZIJN INDIKATIEF WEEERGEVEVEN
 - BOVEN DE LEIDING (ca. 0,30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEEGEN
 - x.x.x = PROFIELENGEGEVENS
 - DN300 - R=30 (l=971mm), R=400 (l=12920mm)
DN500 - R=50 (l=1939mm)
 - DN100 - R=30 (l=2133mm), R=50 (l=3555mm), R=400 (l=28440mm)
 - LOCATIE VAN GEOTEKSTIEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEKSTIEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING MITS VAN TOEPASSING
 - VOOR GEGEVENS BETREFFENDE BOMEN ZODALS STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NET MER TE PLANTELEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
 - JUISTE LIGGING VAN KABELS EN BUZZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALLEN D.M.V. PROFIELENGEGEVENS

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

ROUTEKAART 14
WARMTELING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

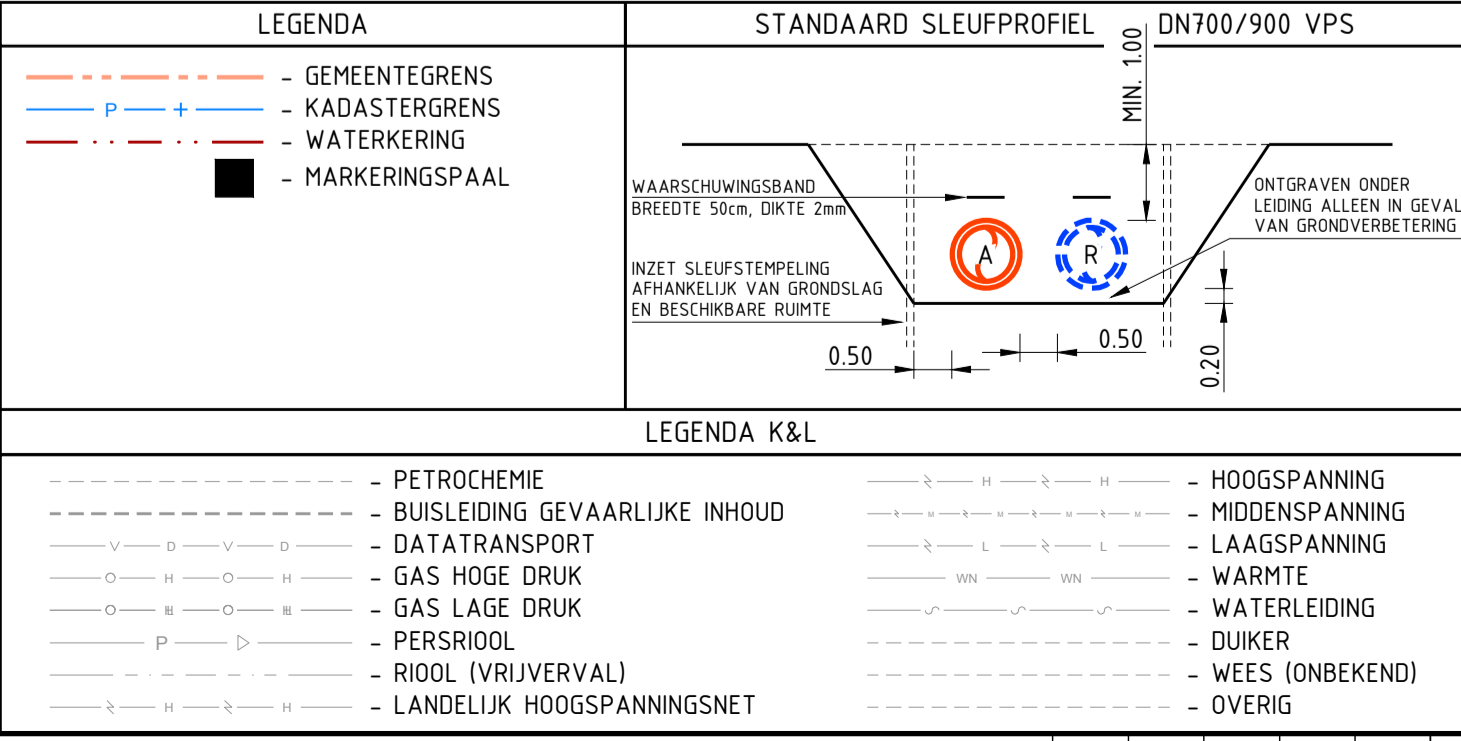
STATUS		GEFABRICIEERD DOOR		AFNEMER		© 2022 N.V. NEDERLANDSE GASUNIE	
J.P. PRINS		M. V/D LEEDEEN		WSP		WSP	
VOOR AANVAARDING		VOOR AANVAARDING		VOOR AANVAARDING		VOOR AANVAARDING	
L 2		L 2		L 2		L 2	
71		71		71		71	
JA		JA		JA		JA	
1000		1000		1000		1000	
16-02-2021		16-02-2021		16-02-2021		16-02-2021	
15-11-2022		15-11-2022		15-11-2022		15-11-2022	
1005506.01		1005506.01		1005506.01		1005506.01	

PROJECTNUMMER: 1005506.01 SUBLOCATIE/GEBOUW CODE: A1 X-851-KR-014



AFSTAND	00.00	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	225.00	250.00	275.00
TERREINHOOGTE	-0.70	-0.54	-2.12	-2.19	-2.17	-2.20	-2.16	-0.57	-0.58	-0.83	-0.74	-0.57
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.	-1.98	-2.01						-2.26	-2.28	-2.31	-1.84	-2.36
MINIMUM DEKING 1.00m (tenzij anders vermeld)												
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE												
KENMERK												
DETAIL												
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER												
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEIDING			DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm					W.D. 10.0mm + HD PUR				WD 8.0mm

AFSTAND	00.00	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	225.00	250.00	275.00
---------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------



DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC NR.
TRACÉKAART		X-851-KT-001

OPMERKINGEN / LEGENDA

- BRONNEN PDKIJSIPT 2021 -- TOPOGRAFIE & PERCELEN / KLIJSIPT 2021 -- KABELS & BUZEN
- COORDINATEN SYSTEEM : R.D.
- VOOR ONTWERPGEVEENS ZIE OVERZICHTSTEKENING
- PELMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
- MATEN IN METERS
- BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
- HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN,
- BEPALD OVER HARTLIJN VAN HET TRACÉ
- VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
- PROEFSLEUFGEVEENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
- IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL
- EVENTUEEL AANGEVEEN PERS- EN ONTVANGSTKUPEN ZIJN INDICATIEF WEEERGEVEEN
- BOVEN DE LEIDING (ca. 0.30m) IN SLEUF WAARSCHUWINGSBAND MEELEGGEN
- xxx = PROEFSLEUF
- DN300 - R=30 (L=971mm), R=400 (L=12920mm)
- DN600 - R=30 (L=1930mm)
- DN100 - R=30 (L=2130mm), R=50 (L=3555mm), R=400 (L=28440mm)
- LOCATIE VAN GEOTEXTEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOODSNIDE GEOTEXTEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING MITS VAN TOEPASSING
- VOOR GEVEENS BETREFFENDE BOMEN ZIJS STANDAAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
- JUSTE LIGGING VAN KABELS EN BUZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN.

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

TITEL
ROUTEKAART 15
WARMTELING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS

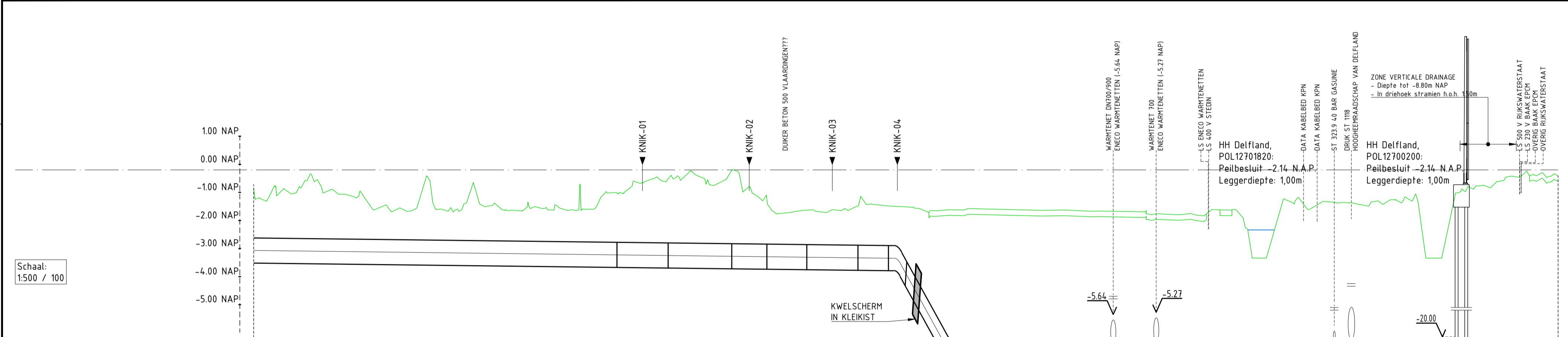
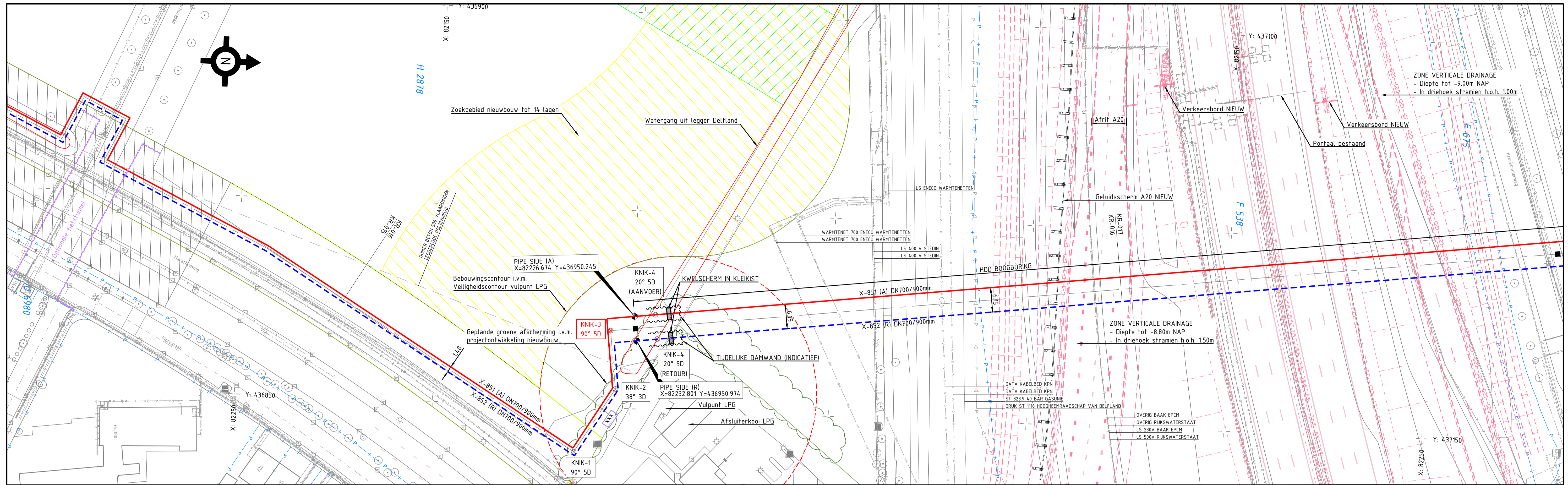
GEFABRICIEERD DOOR	J.P.RINS	AFD.	WSP	© 2022	N.V. NEDERLANDSE GASUNIE
GECONTROLEERD DOOR	M.V.D. LEEDEN	AFD.	WSP	OPMERKINGEN WIJZIGING	GEFABRICIEERD BIJ
VOOR AFKOPING	A.NEDERLOF	AFD.	WSP	SCHAAL	1:500
TOEGEKEND TITEL	L 2	71	NEE	DAATUM IN UITGAVE	16-02-2021
DAATUM WIJZIGING					15-11-2022

PROJECTNUMMER
1005506.01

SUBCLASSE/GEBOUW CODE
A1

PROJECTNAAM
X-851-KR-015

BLAD NR.
1



AFSTAND	00.00	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	225.00	250.00	275.00	300.00
TERREINHOOGTE	-0.68	-1.15	-1.31	-0.79	-1.14	-1.12	-1.13	-1.14	-1.11	-1.11	-0.25	-0.19	-0.21
BOVENK. LEIDING t.o.v. N.A.P.	-2.42			-2.59	-3.48	-3.48	-3.48						
MINIMUM DEKKING 100m (tenzij anders vermeld)													
AFSTAND t.b.v. CONSTRUCTIE													
KENMERK													
DETAIL													
BOCHTEN R=3.0 (tenzij anders vermeld) INCL. BOCHTNUMMER													
STANDAARD DICHTHEID PUR OP RECHTE BUIS (tenzij anders vermeld) LEIDING GEGEVENS INCL. WANDDIKTE/BEKLEDING	DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm	W.D. 12.5mm	W.D. 14.2mm	W.D. 14.27mm L485MB	W.D. 12.5mm					DN700/900 STAAL-PUR-PE P355NH WD 8.0mm + HD-PUR			

LEGENDA

- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- LAKDETECTIEKAST
- MARKERINGSPAAL

STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS

BIJBEHOORENDE DOCUMENTEN

DETAIL	DOCUMENT TITEL	DOC.NR.
	TRACÉKAART	X-851-KT-001
A	BOOGBORING RW A20	X-851-KW-016-1

OPMERKINGEN / LEGENDA

1. BRONNEN: PDK(ISOPT 2021) - TOPOGRAFIE & PERCELEN / KLEI(ISOPT 2021) - KABELS & BUZEN
2. COORDINATEN SYSTEEM: R.D.
3. VOOR ONTWERPGEVEGENS ZIE OVERZICHTSTEKENING
4. PEILMATEN t.o.v. N.A.P. IN METERS
5. MATEN IN METERS
6. \blacktriangle BEGIN- RESP. EINDE VERTIKALE ELASTISCHE STRAAL
7. HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, INCL. VERWERKT KABELS EN LEIDINGEN DERDEN.
8. VAN KABELS EN LEIDINGEN DERDEN ZONDER DIEPTEVERMELDING ZIJN GEEN DIEPTE BEKEND
9. PROEFSLEUFGEVEGENS, MITS VAN TOEPASSING, ZIJN VERWERKT
10. IN HOOGTE-/LENGTEPROFIEL, BOVENAANZICHT EN IN PROEFSLEUFDETAIL
11. VOOR GEVEGENS BETREFFENDE BOMEN ZOALS STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
12. $x.x.x$ = PROEFSLEUF
13. DN300 - R=30 (L=971mm), R=400 (L=12920mm)
14. DN600 - R=30 (L=1930mm)
15. DN700 - R=30 (L=2133mm), R=50 (L=3555mm), R=400 (L=28440mm)
16. \square = LOCATIE VAN GEOTEXTEL VOOR PRINCIPESCHETS BOVENAANZICHT EN DOORSNEDEN GEOTEXTEL ZIE DETAILS ELDERS OP TEKENING (MITS VAN TOEPASSING)
17. VOOR GEVEGENS BETREFFENDE BOMEN ZOALS STAMDIAMETER, TE KAPPEN EN WEL/NET HER TE PLANTEN ZIE WERKSTROOKTEKENINGEN
18. JUSTE LIGGING VAN KABELS EN BUZEN TIJDENS UITVOERING TE BEPALEN D.M.V. PROEFSLEUVEN

LEGENDA K&L

- PETROCHEMIE	- HOOGSPANNING
- BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD	- MIDDENSPPANNING
- DATATRANSPORT	- LAAGSPANNING
- GAS HOGE DRUK	- WARMTE
- GAS LAGE DRUK	- WATERLEIDING
- PERSIJDODI	- DUIKER
- RIJOL (VRIJVERVAL)	- WEES (ONBEKEND)
- LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET	- OVERIG

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

ROUTEKAART 16
WARMTELING
DN700 LEIDING VONDELINGENPLAAT-VLAARDINGEN

STATUS	GEFABRICEERD DOOR	AFG.	WSP	© 2022	N.V. NEDERLANDSE GASUNIE
	GECONTROLEERD DOOR	AFG.	WSP		GEFABRICEERD BIJ
	VOOR AANBOOD	AFG.	WSP		WSP
	VERKEERD TIK-BOORT	R.F.O.	JA	SCHAAL	1:500
	PROJEKTNUMMER	1005506.01		DATE VAN UITGAVE	16-02-2021
	SUBGRADATIE/GEBOUW CODE	A1		DATE VAN WIJZIGING	15-11-2022

PROJEKTNUMMER: 1005506.01 | SUBGRADATIE/GEBOUW CODE: A1 | TEK. NR.: X-851-KR-016 | 1

Bijlage 2

Case Landelijk



KRUISINGEN				LENGTES TRACÉ PER LOT				LEGENDA		OPMERKINGEN	
NR.	NAAM WEG/WATERGANG	TYPE TECHNIK	LENGTE	NR.	NAAM WEG/WATERGANG	TYPE TECHNIK	LENGTE				
1	LEPELAARSINGEL	GFT	ca.135 m	9	KERSTANJE	HDD SIS	ca.930 m	LOT A	4.717 m	- TRACÉ - LEIDING OVER NOORD (LOW) - HDD - GFT / OFT - GEMEENTEGRENS - NATUURNETWERK NEDERLAND (VOORMALIG EHS) - KILOMETRERING	- KILOMETRERING BETREFT DE LENGTE VAN DE LEIDING EN IS GENETEN OVER DE EXPANSIELOOPS
2	ZWANENSINGEL	GFT	ca.195 m	10	A4	HDD SIS	ca.960 m	LOT B	4.666 m		
3	HOLY NOORD	HDD SIS	ca.1018 m	10a	CHURCHILLLAAN EN GEN. SPOORLAAN	HDD SIS	ca.1000 m	LOT C	6.366 m		
4	ECO-AQUADUCT RIJKSWEG A4	OD	ca.100 m	11	PR. BEATRIXLAAN	OFT	ca.18,5 m	LOT D	3.957 m		
5	ZUIDKADE	GFT	ca.210 m	12	MIDDACHTENWEG	GFT	ca.14,5 m	LOT E	3.701 m		
5a	KENENBURGPAD	OFT	ca.28 m	13	ERASMUSWEG	HDD VPS	ca.270 m	TOTAAL	23.407 m		
6	BUITENHOFDREEF	GFT	ca.127 m	14	LAAKKANAAL	HDD SIS	ca.850 m				
7	KRUIHUISWEG (N4-70)	GFT	ca.60 m	15	DELFTSELAAN	GFT	ca.70 m				
8	BUITENWATERSLOOT	HDD SIS	ca.920 m	16	LOODSUNSKADE	GFT	ca.90 m				

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

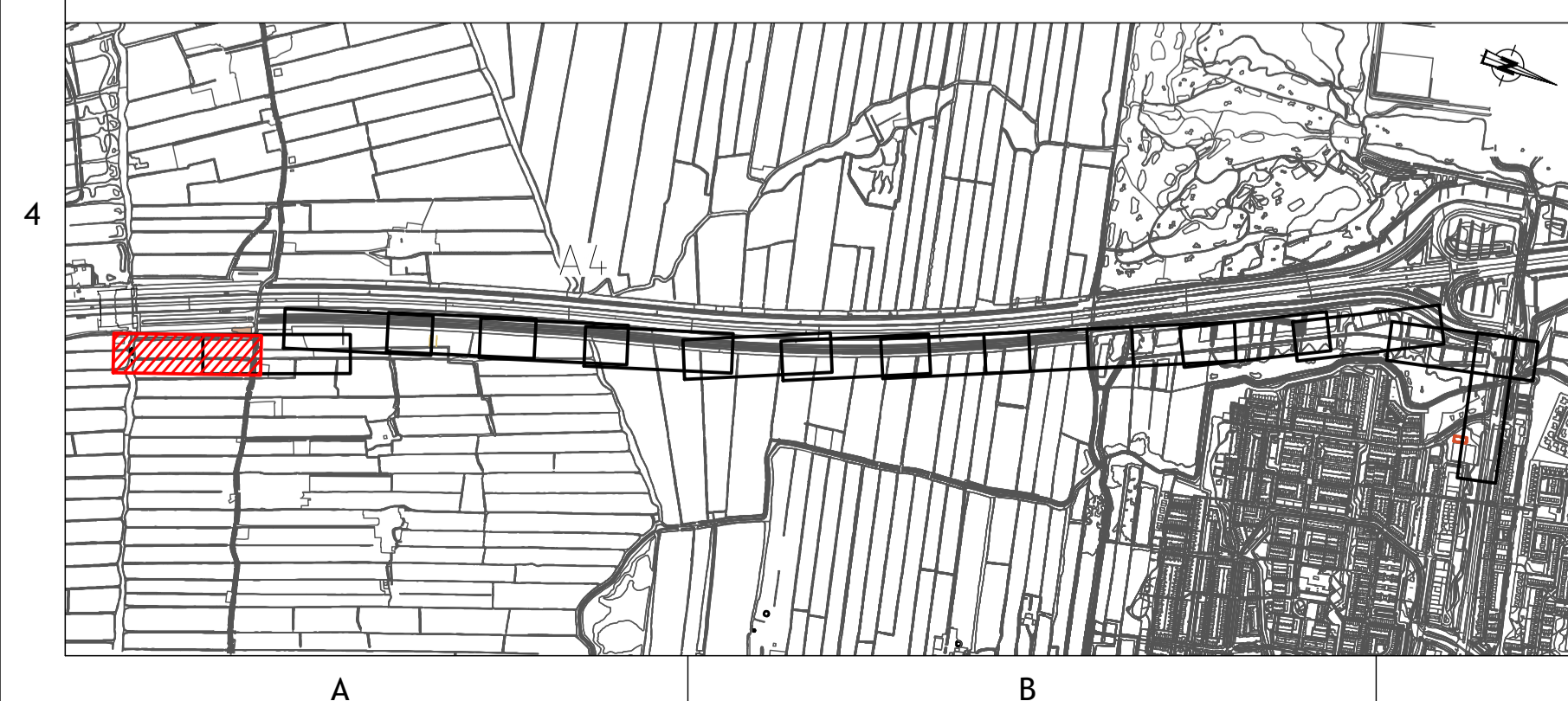
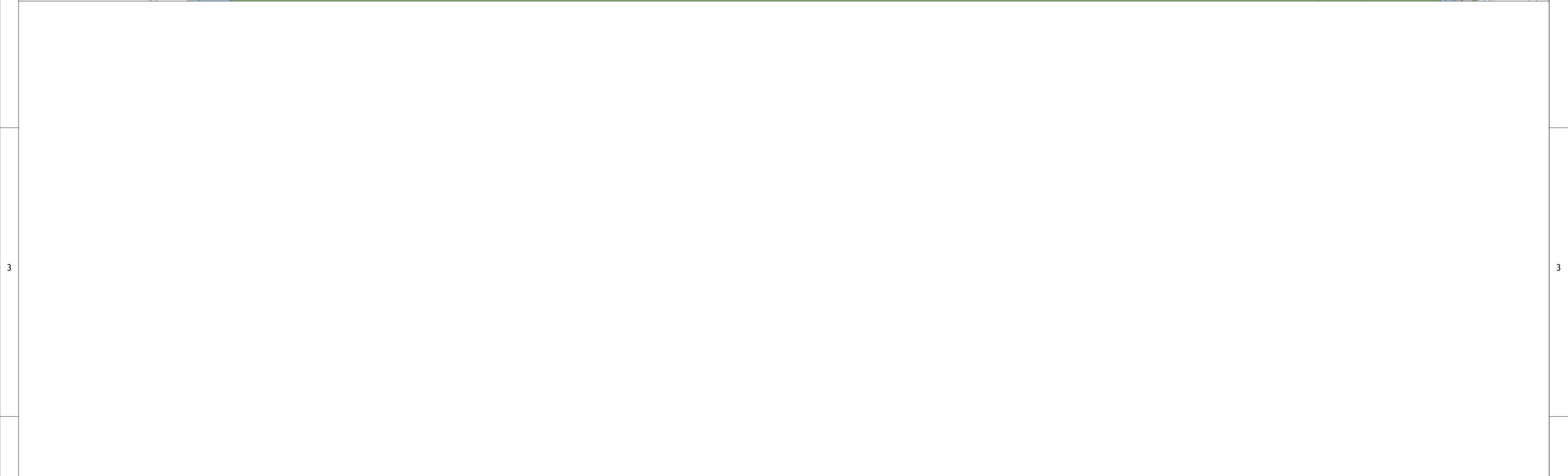
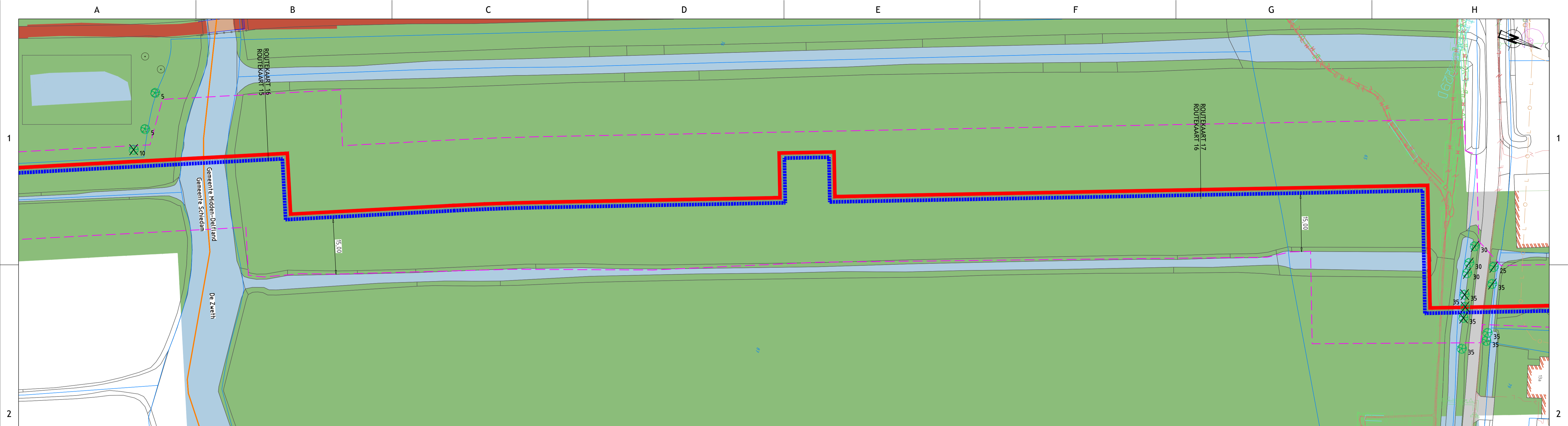
c	VO definitief	BB	MvL	03-07-2019
b	Tracé & lotindeling gewijzigd	BB	PK	01-03-2019
a	Overzichtskaart geüpdatet	SD	AVD	19-11-2018
0	Overzichtskaart gebaseerd op het VO tracé uit 2017	SD	AVD	31-07-2018

Versie: Omschrijving
Get. Gec. Datum

Leiding door het Midden
Totaaloverzicht
Lot A t/m E

Projectcode: RS17035 Tekeningnummer: RS17035-SV-TT06
Vier: VO Datum: Definitief Formaat: A0 Schaal: 1:15000 Rijk: 1 van 1 Rev.: C

Rotterdam ENGINEERING
Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl



LEGENDA

- KP XX - KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD

STANDAARD SLEUFPROFIEL DN700/900 VPS

LEGENDA K&L

- PETROCHEMIE
- BUISLEIDING GEVAARLIJKE INHOUD
- DATATransPORT
- GAS HOGE DRUK
- HOOGSPANNING
- LAAGSPANNING
- LANDELIJK HOOGSPANNINGSNET
- MIDDENSPPANNING
- OVERIG
- PERSRIOOL
- RIOOL (VRIJVERVAL)
- WARMTE
- WATERLEIDING
- WEES (ONBEKEND)

BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routekaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

AANVOER
RETOUR

OPMERKINGEN

- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
- BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
- INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

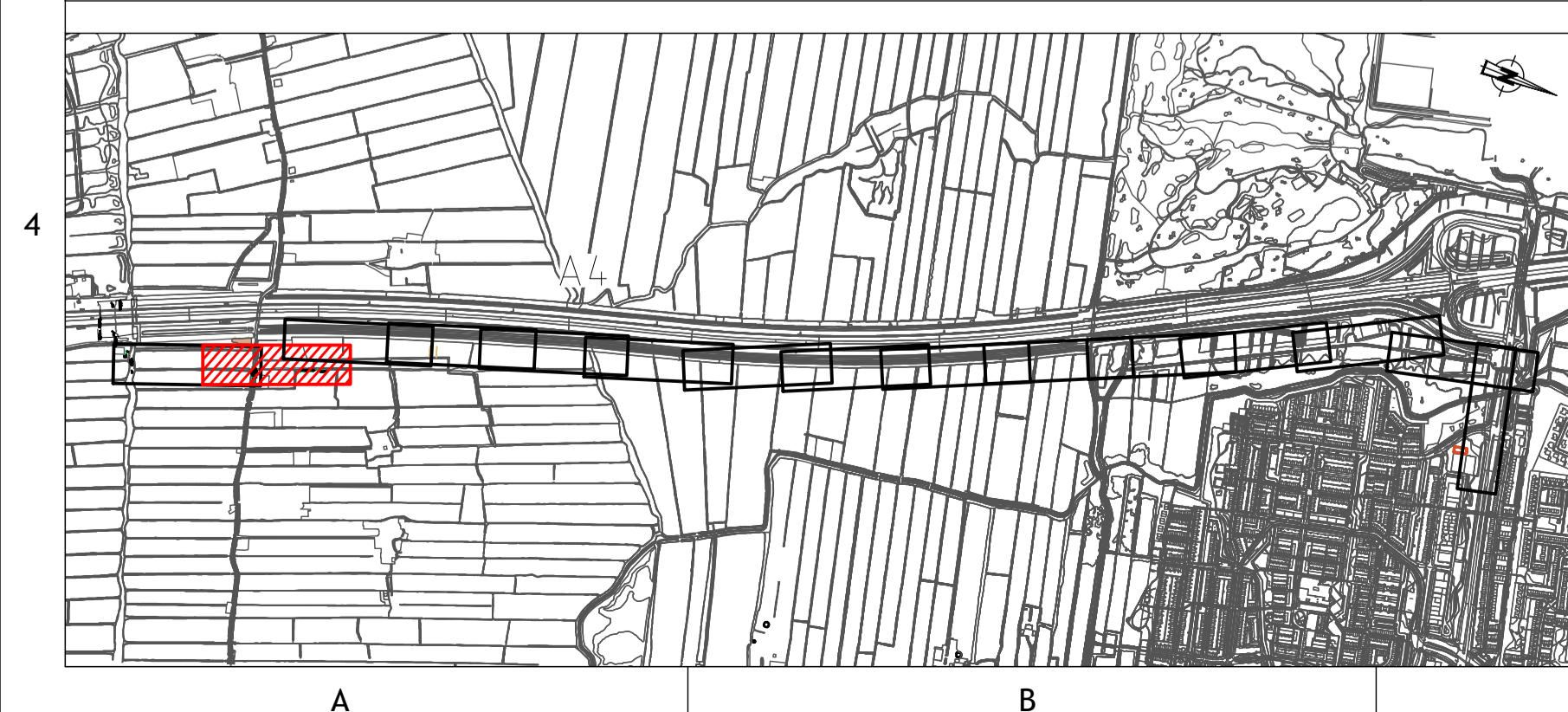
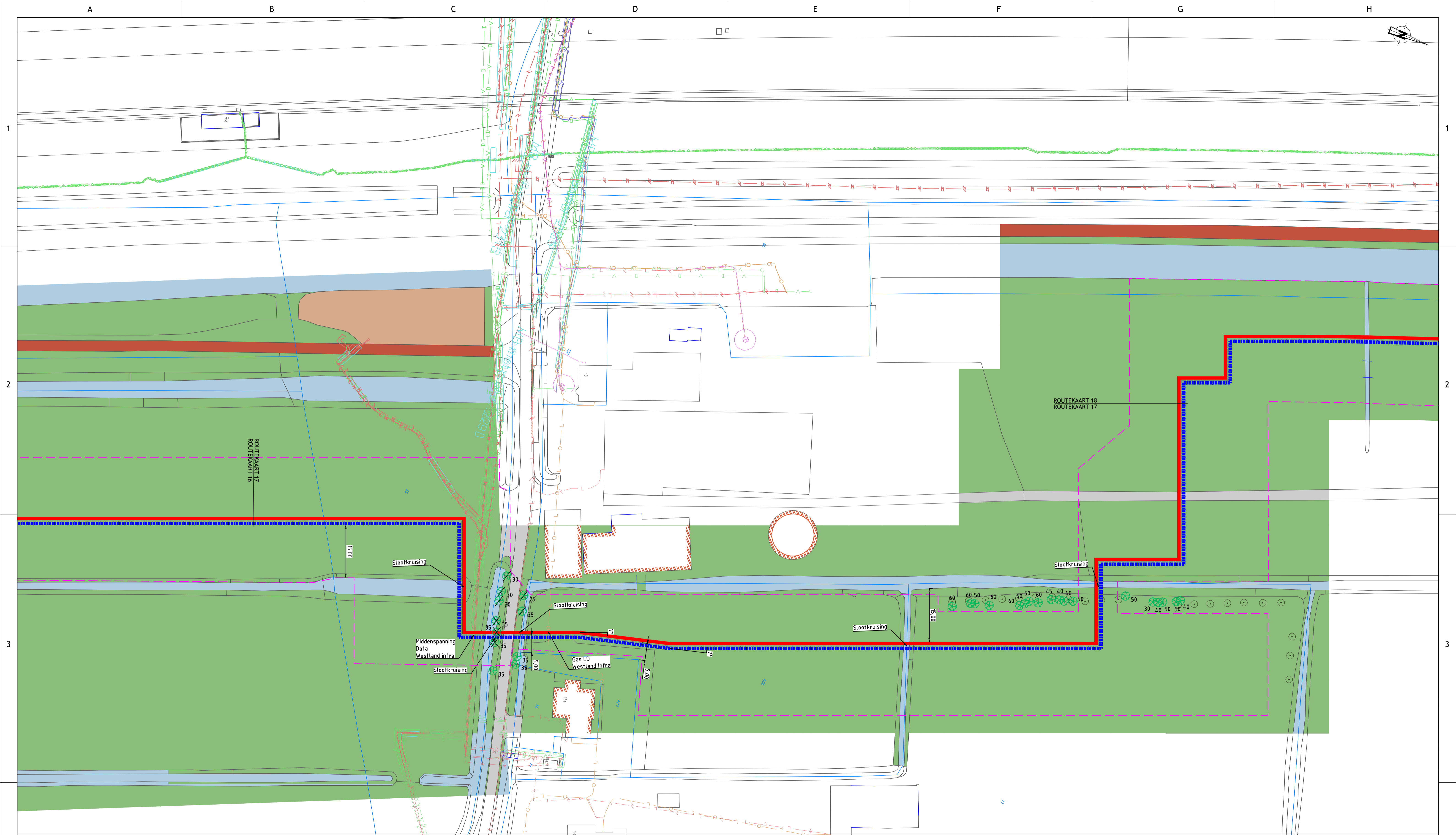
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
g	17-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
f	20-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

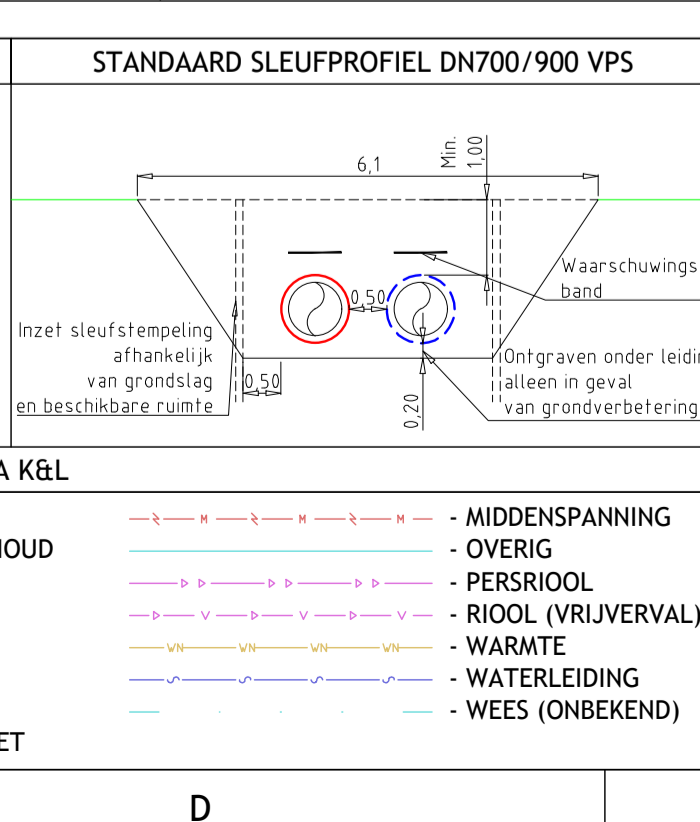
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 16
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-16
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 16 van 79
Wijz.: g



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERLEIDING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routekaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER
— RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

Wijz.	Datum	Omschrijving	BB	PK	MvL
g	17-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
f	20-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL

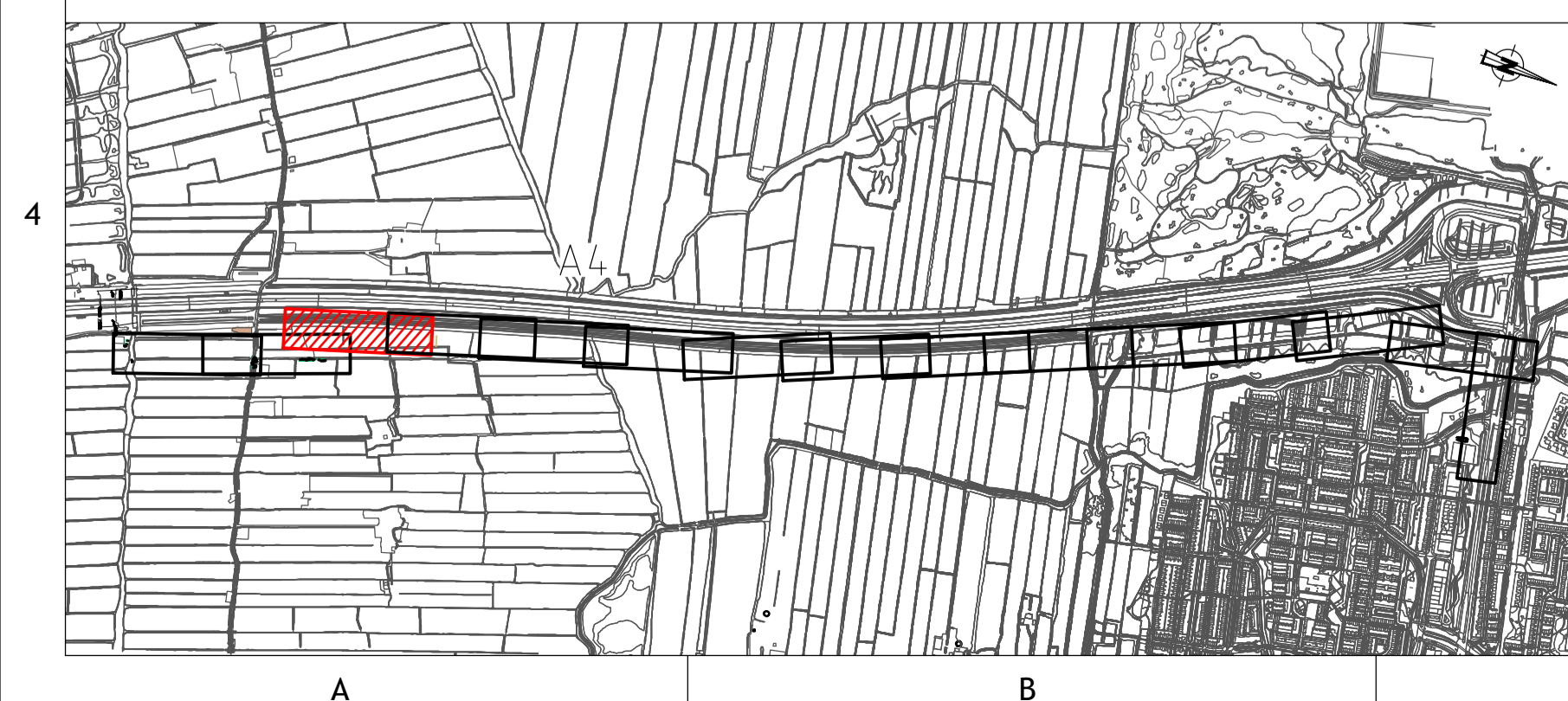
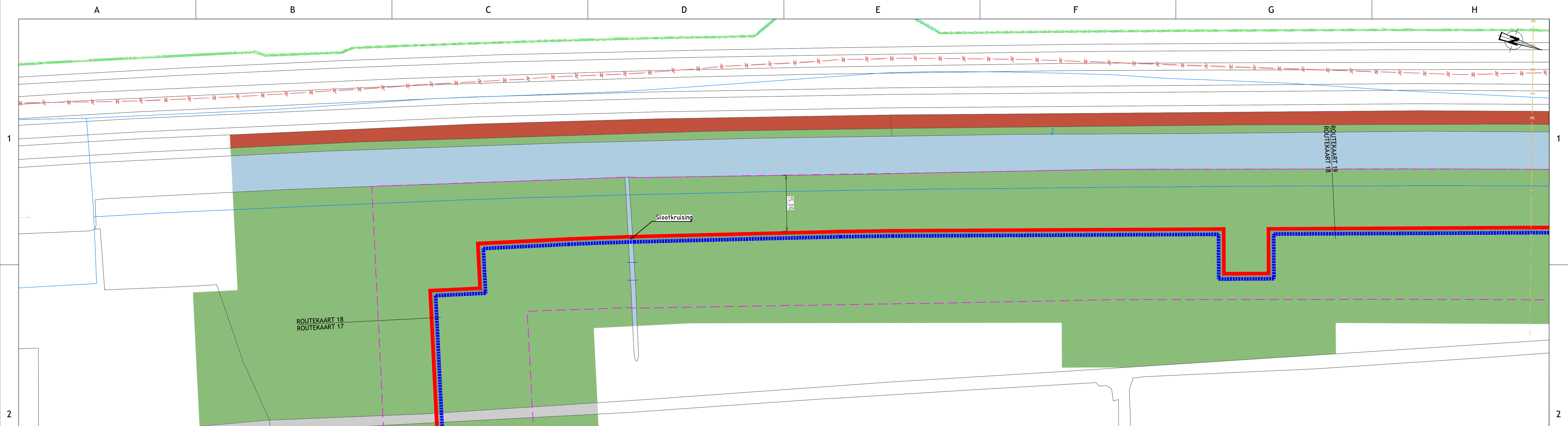
Goedgekeurd door opdrachtgever
Eneco

Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

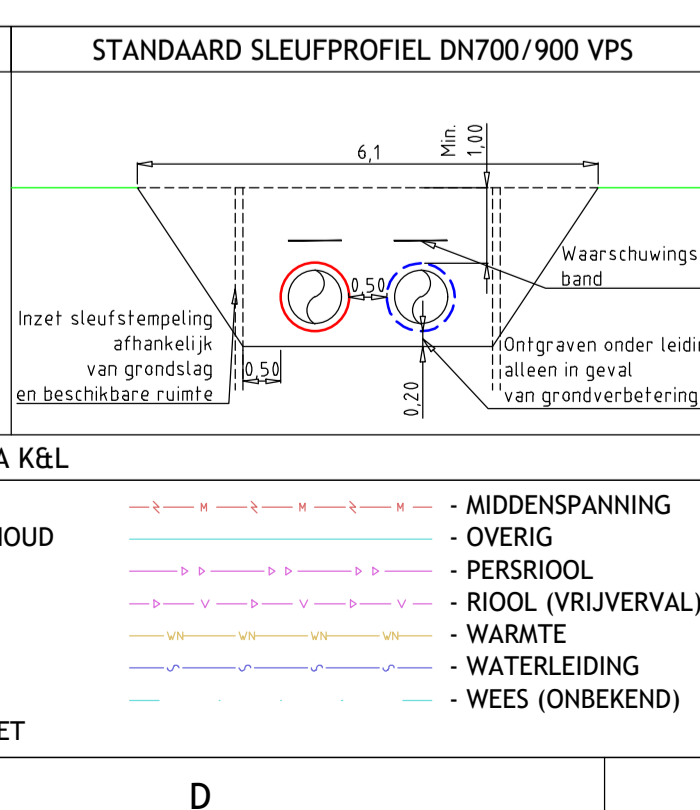
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 17
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-17
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 17 van 79
Wijz: g



LEGENDA

- KP XX — KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK — GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS — WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN — VERHARDING
- WATER — FIETSPAD
- BEBOUWING



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routekaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER —
— RETOUR —

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

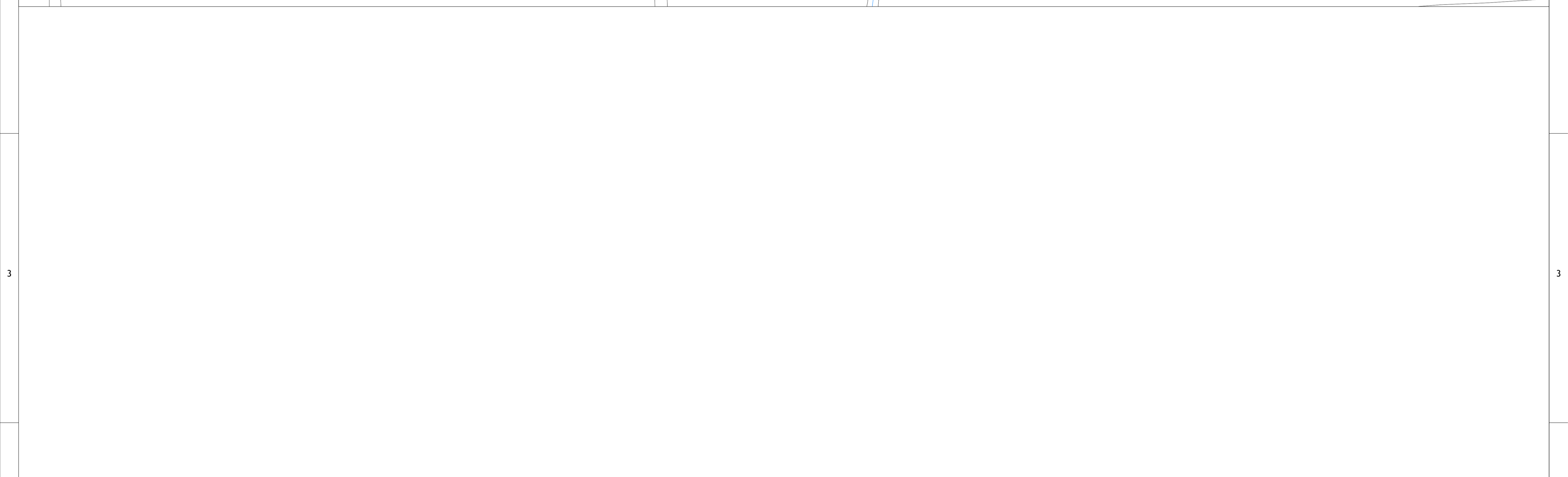
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7
Goedgekeurd door opdrachtgever

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

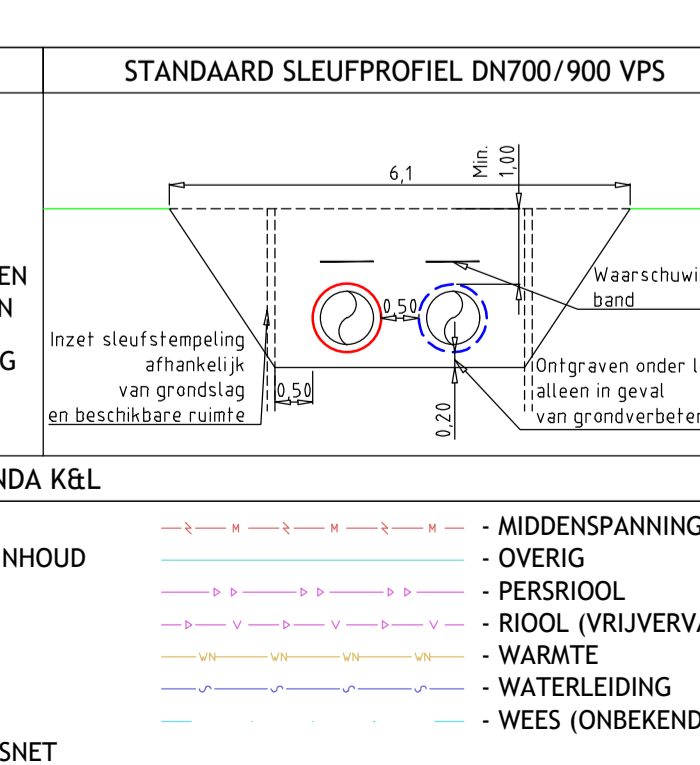
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 18
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-18
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 18 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

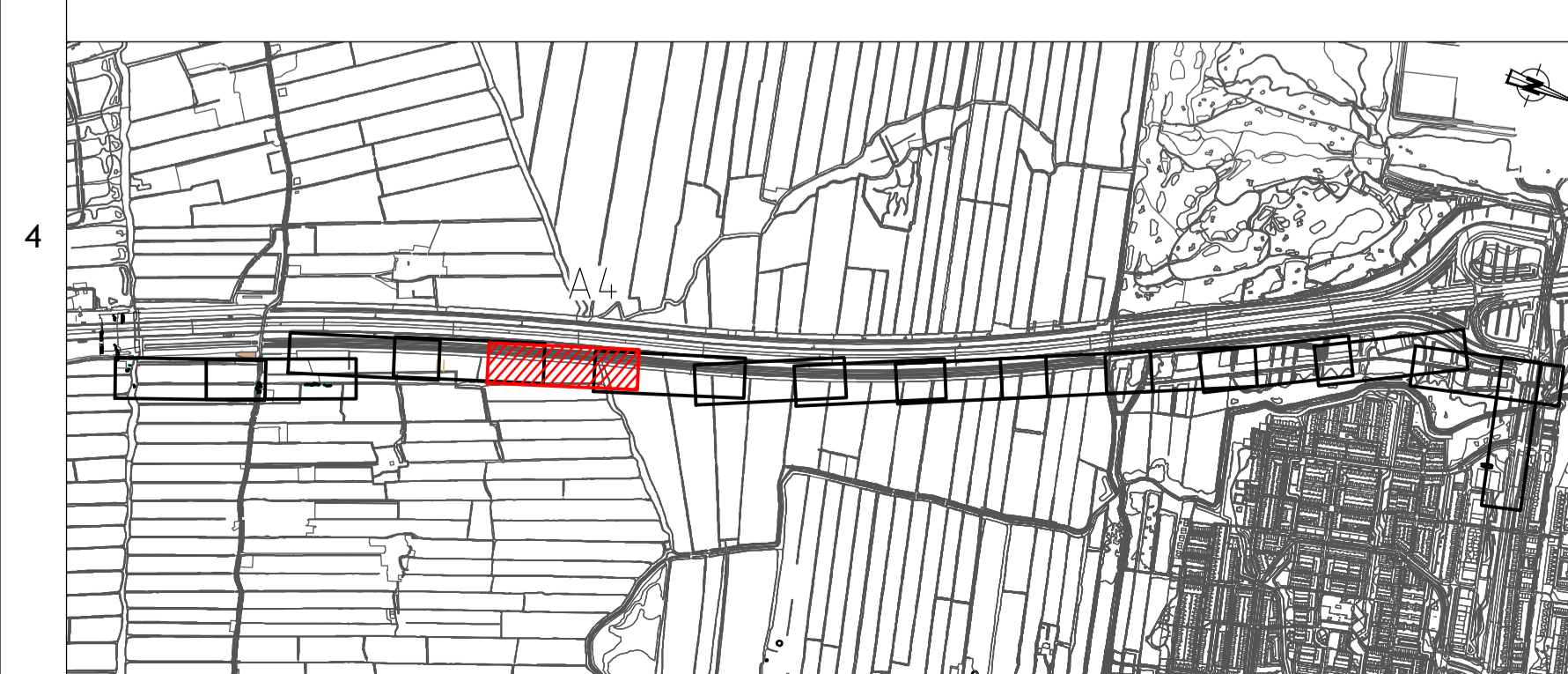
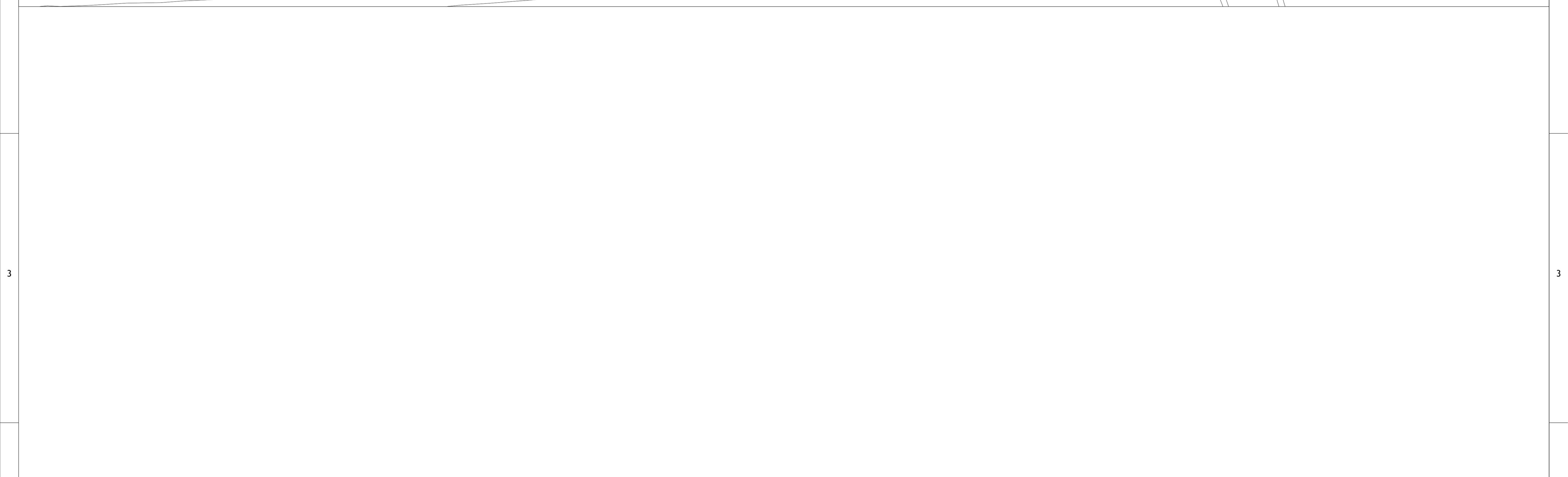
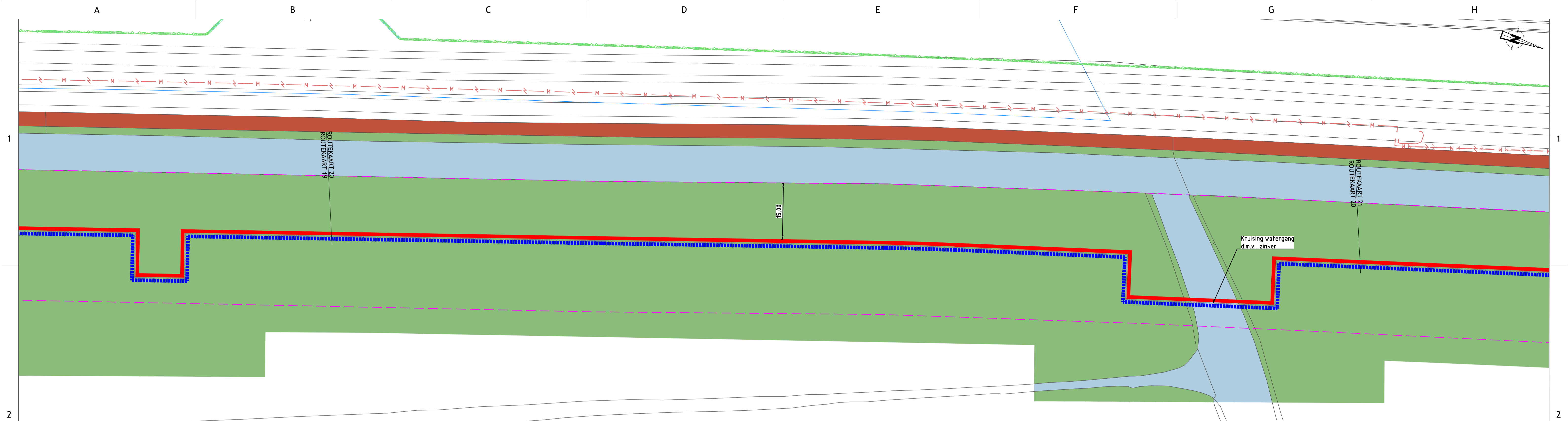
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

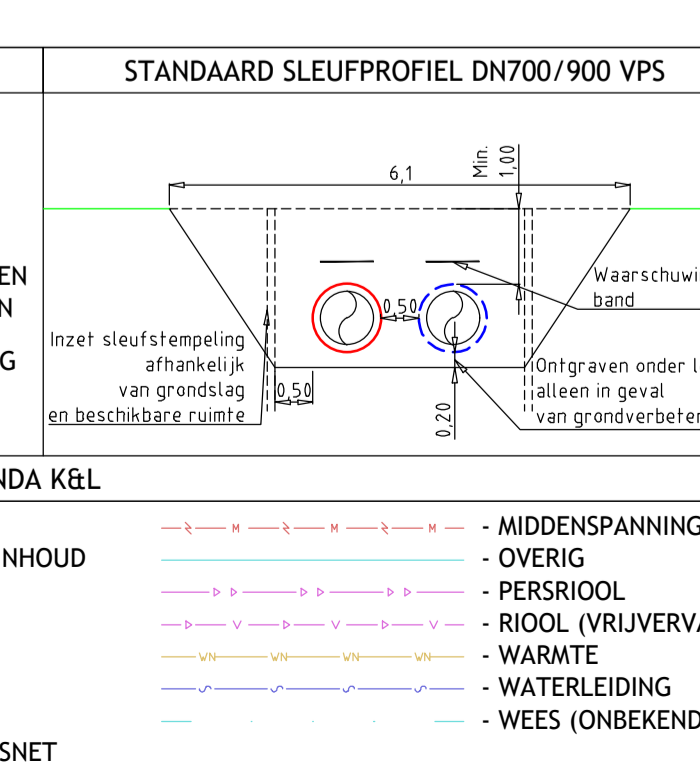
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 19
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Fase: Voorlopig ontwerp
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-19
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 19 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

AANVOER
RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

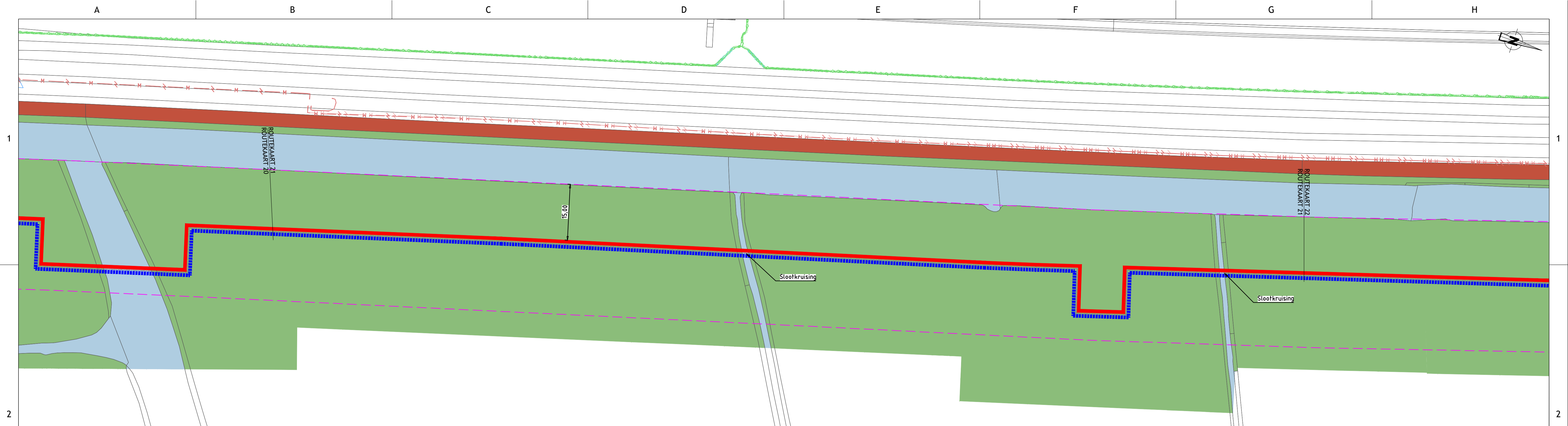
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

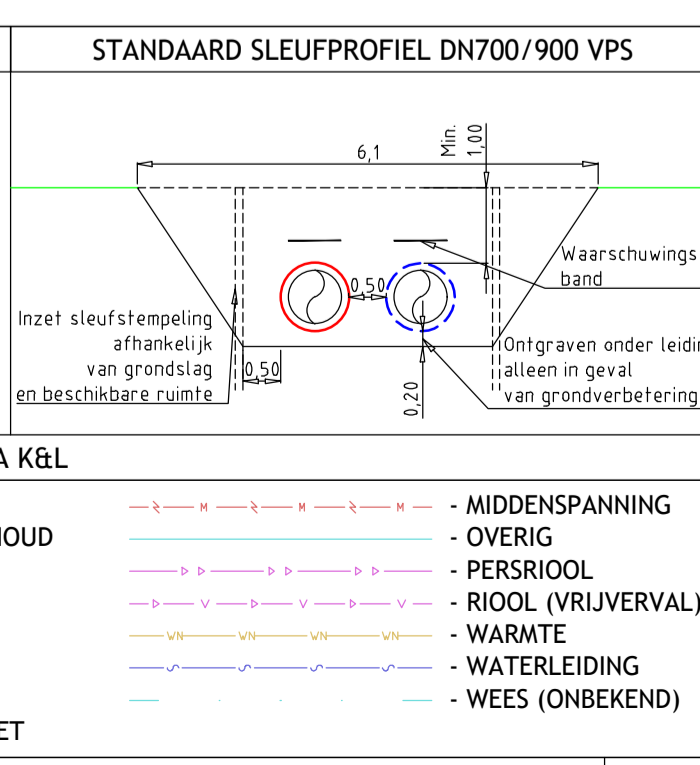
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 20
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-20
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 20 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KP XX — KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER
— RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

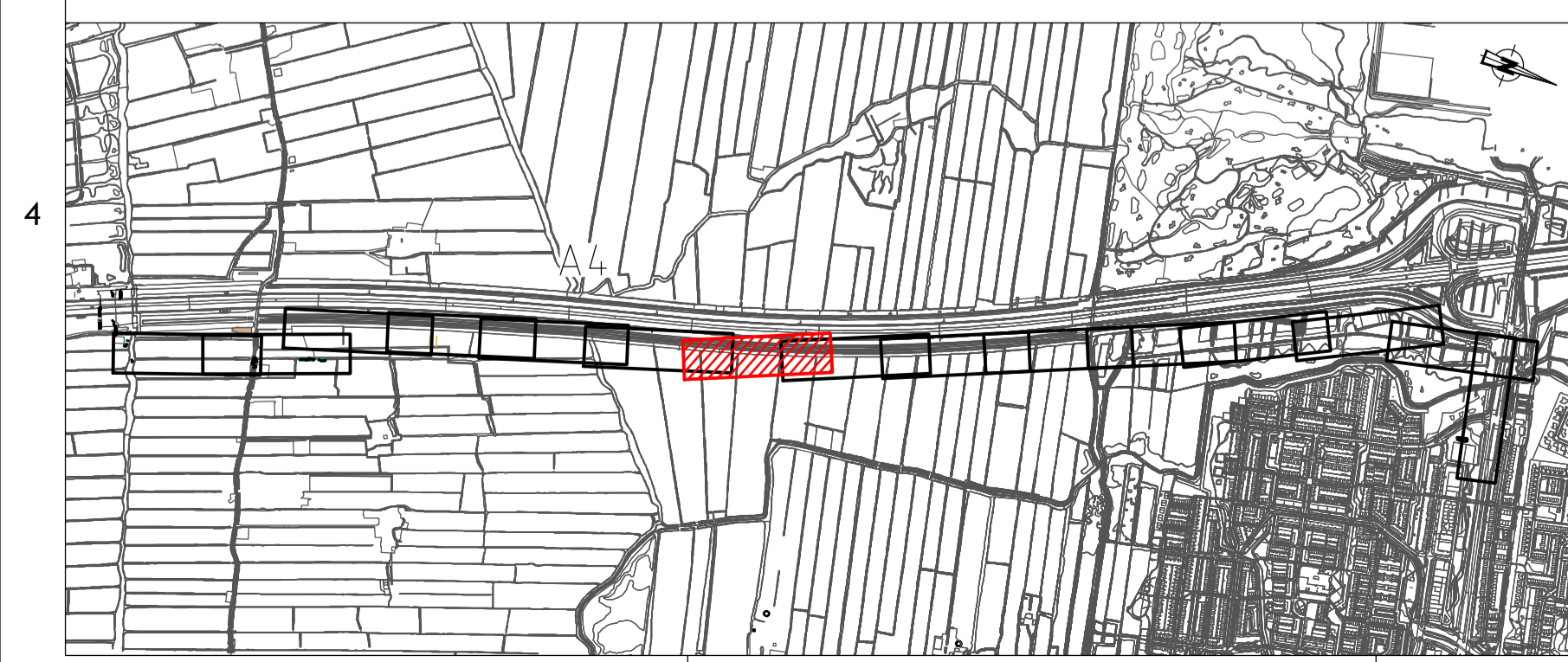
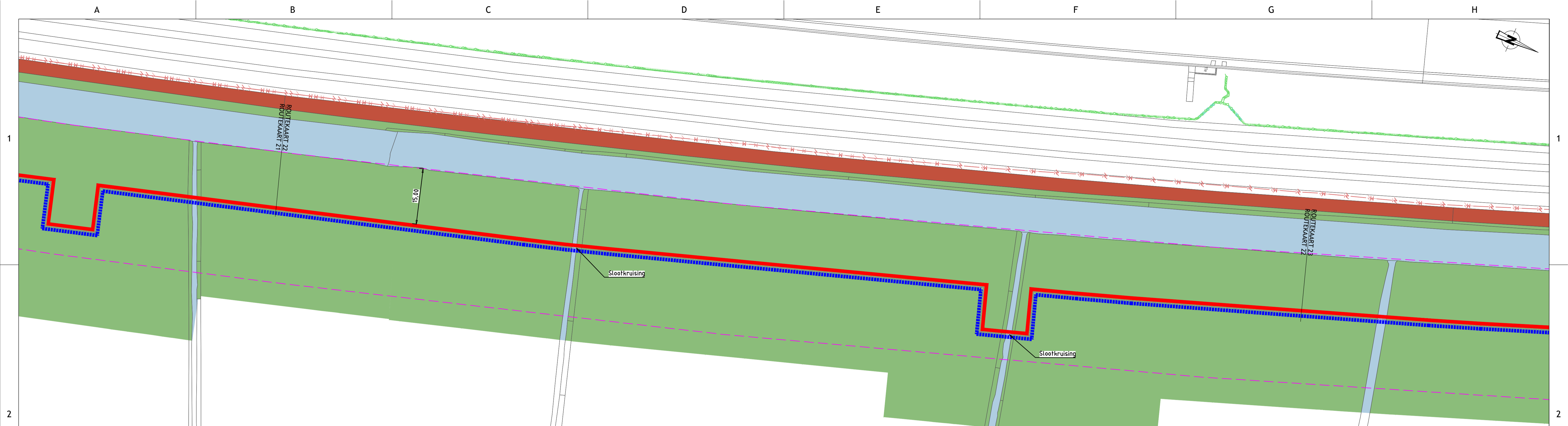
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Goedgekeurd door opdrachtgever: [Signature]
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

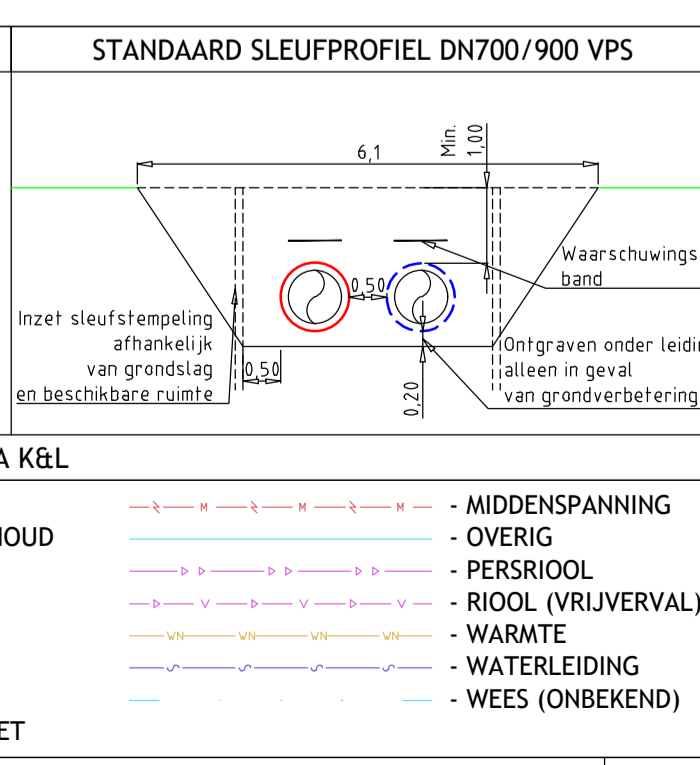
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 21
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-21
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 21 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KP XX — KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER —
— RETOUR —

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

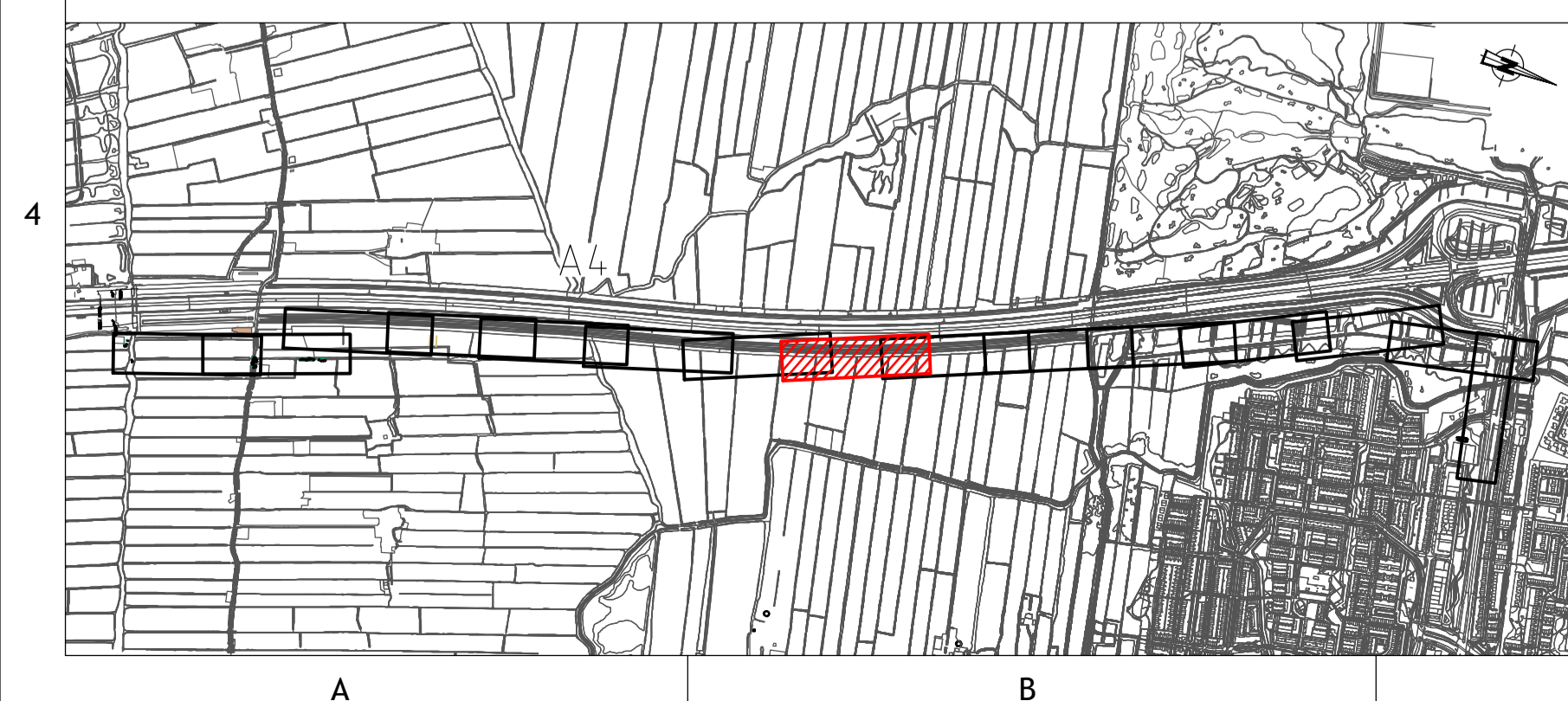
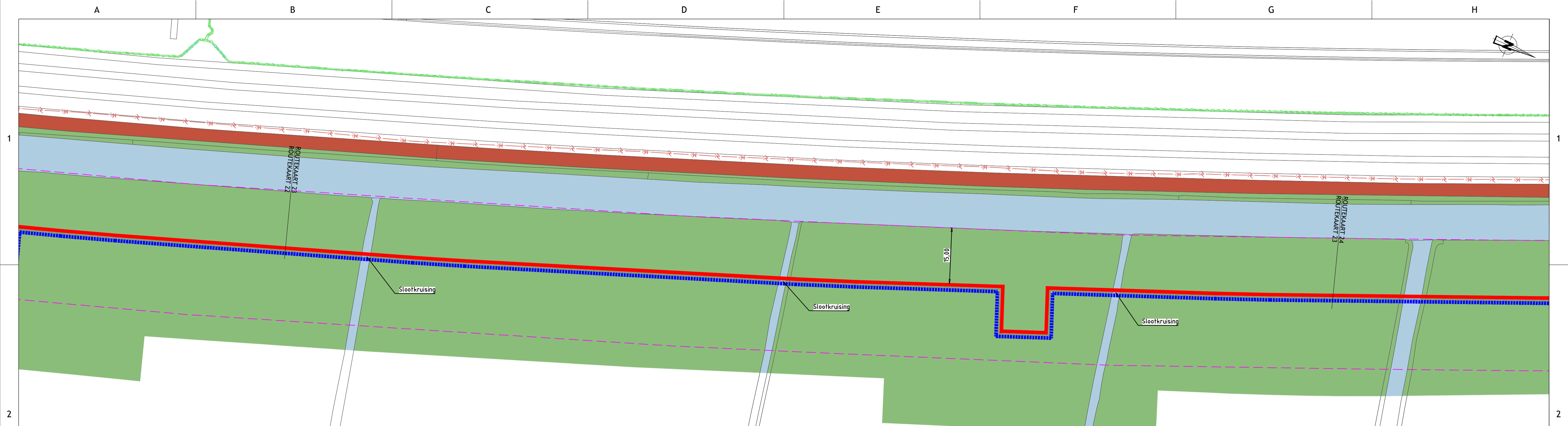
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

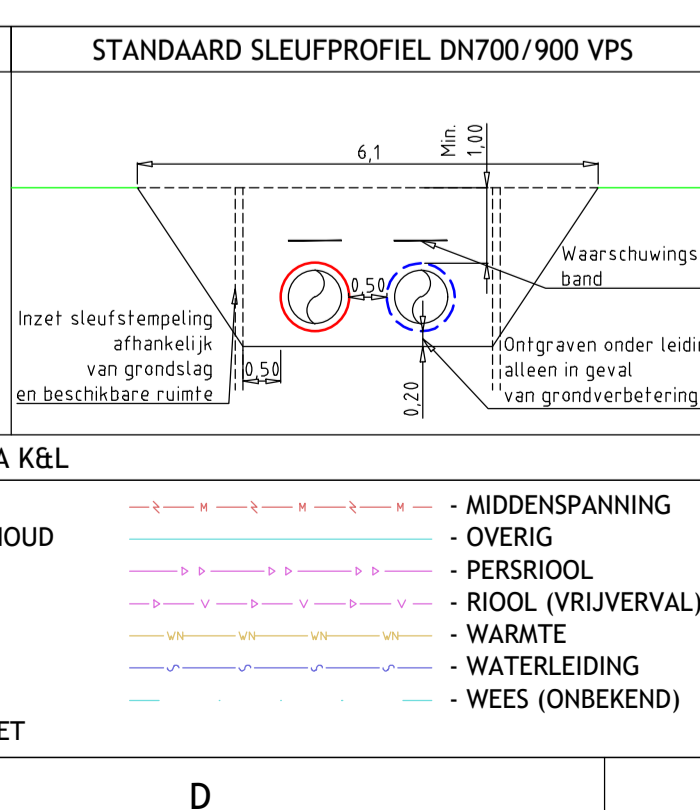
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 22
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-22
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 22 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

AANVOER
RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

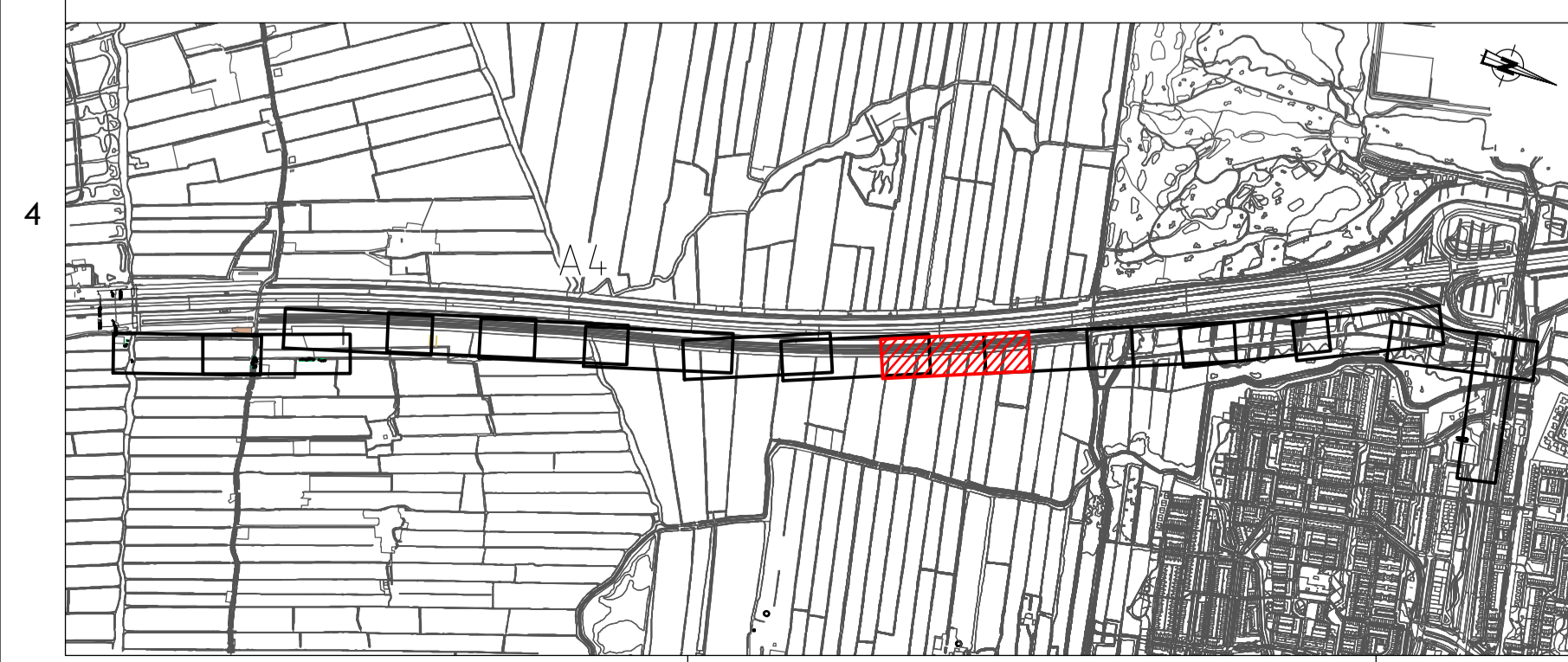
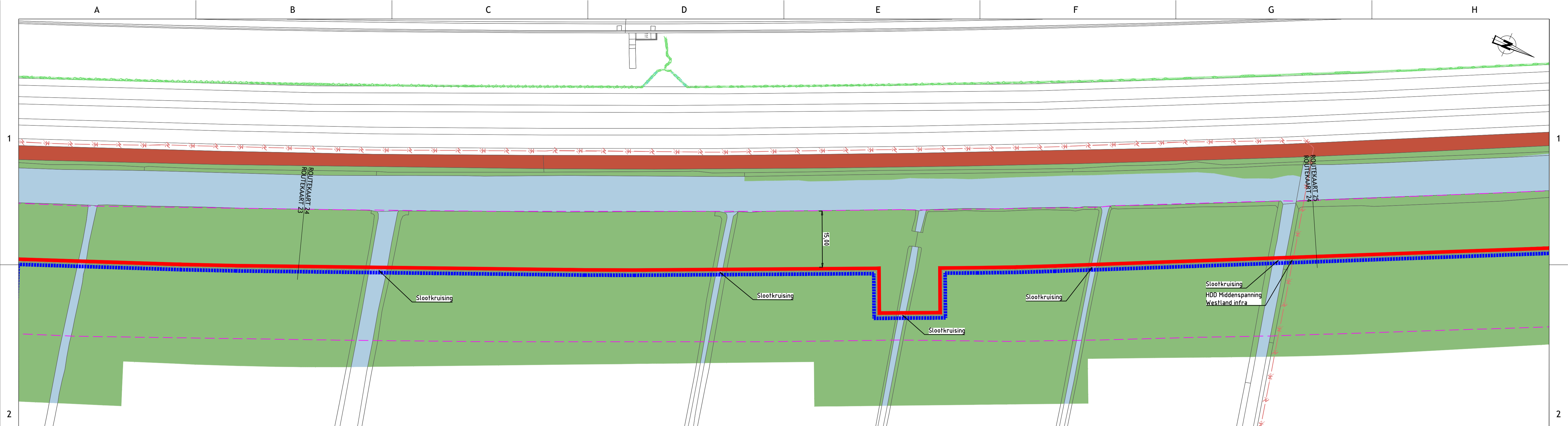
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7
Goedgekeurd door opdrachtgever

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

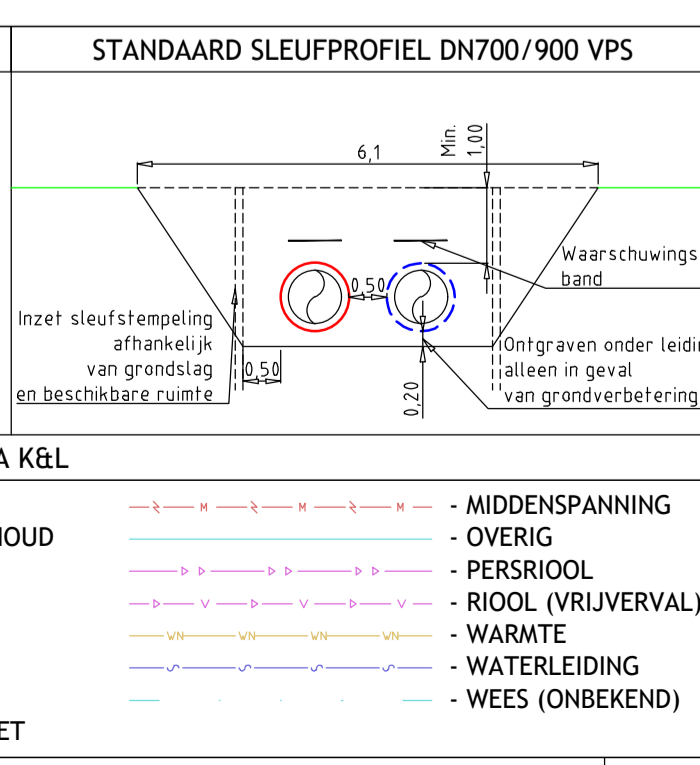
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 23
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-23
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 23 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KP XX — KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER

— RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

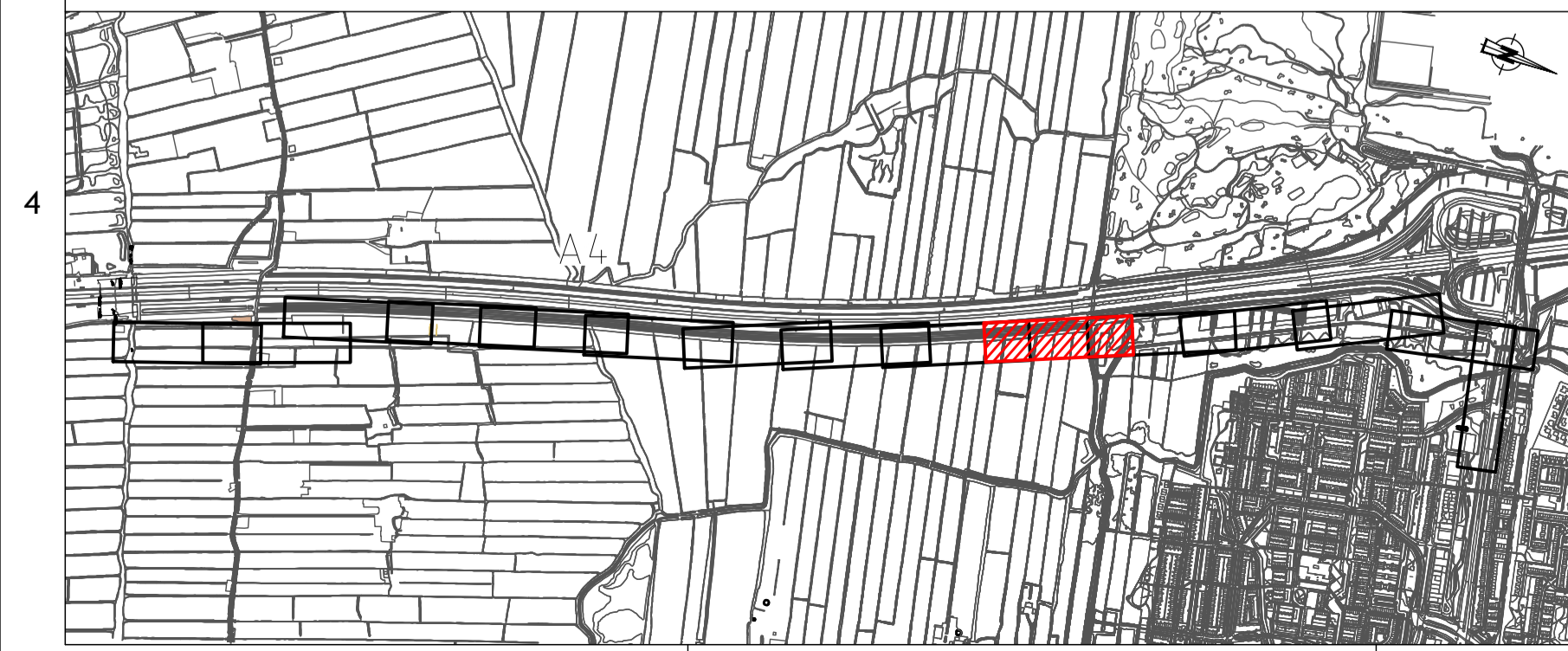
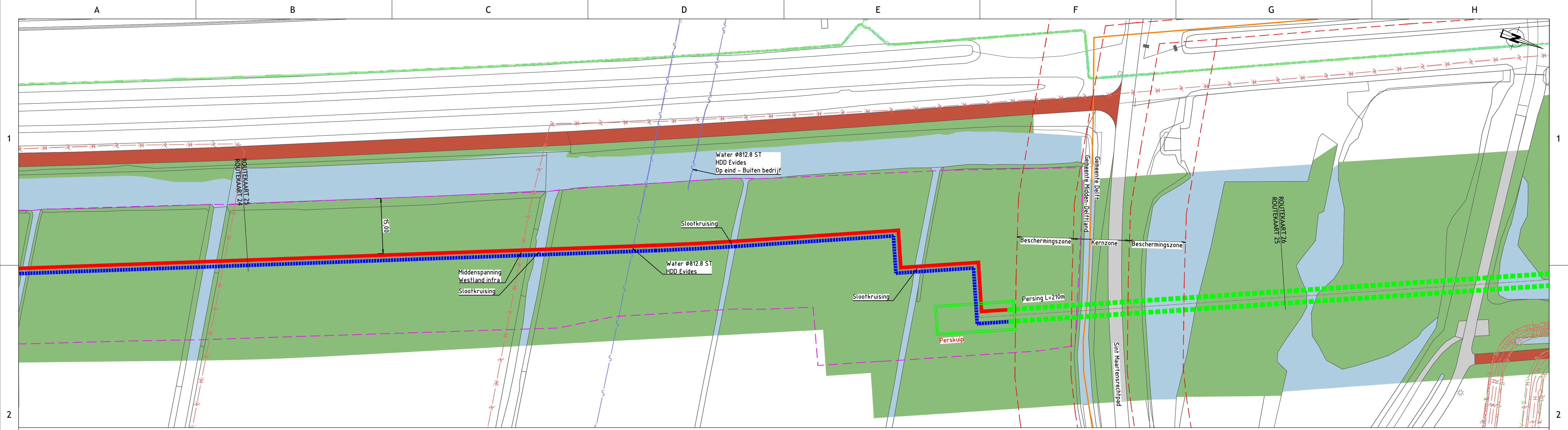
Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Opmerkingen opdrachtgever verwerkt	BB	PK	MvL
d	08-02-19	VO-2 Definitief	SD	PK	MvL
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	AvD

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

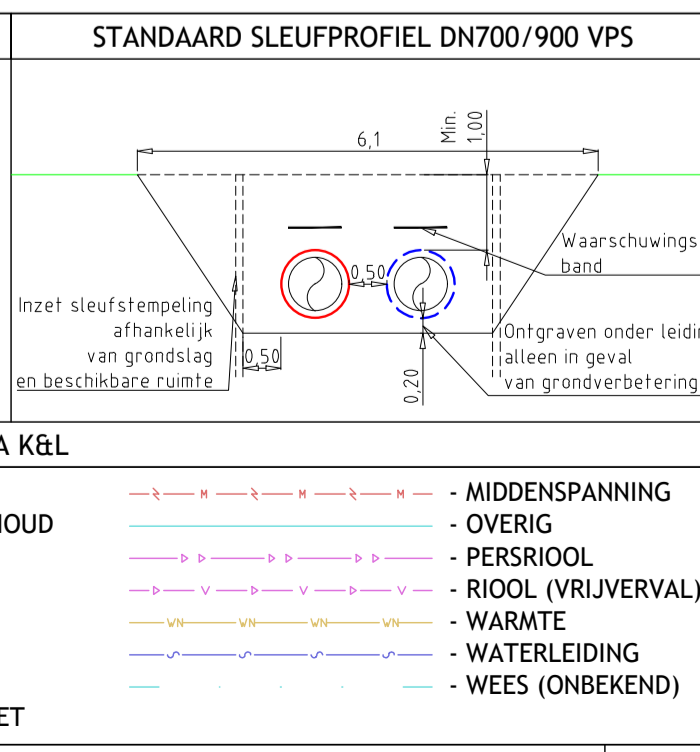
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland
Routekaart 24
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-24
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 24 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KP XX — KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK — WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS — GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS — KADASTERGRENS
- WATERKERING — WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN — PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN — PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN — GROEN
- VERHARDING — VERHARDING
- BEBOUWING — BEBOUWING
- WATER — WATER
- FIETSPAD — FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER — AANVOER

— RETOUR — RETOUR

OPMERKINGEN

- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
- BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
- 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
- 10 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
- 10 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Aanpassen opmerkingen	JB	PK	MvL
d	25-01-19	VO-2 Definitief	SD	PK	AvD
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	MvL

Wijz. Datum Omschrijving Ontwerp door Gec. Gezien

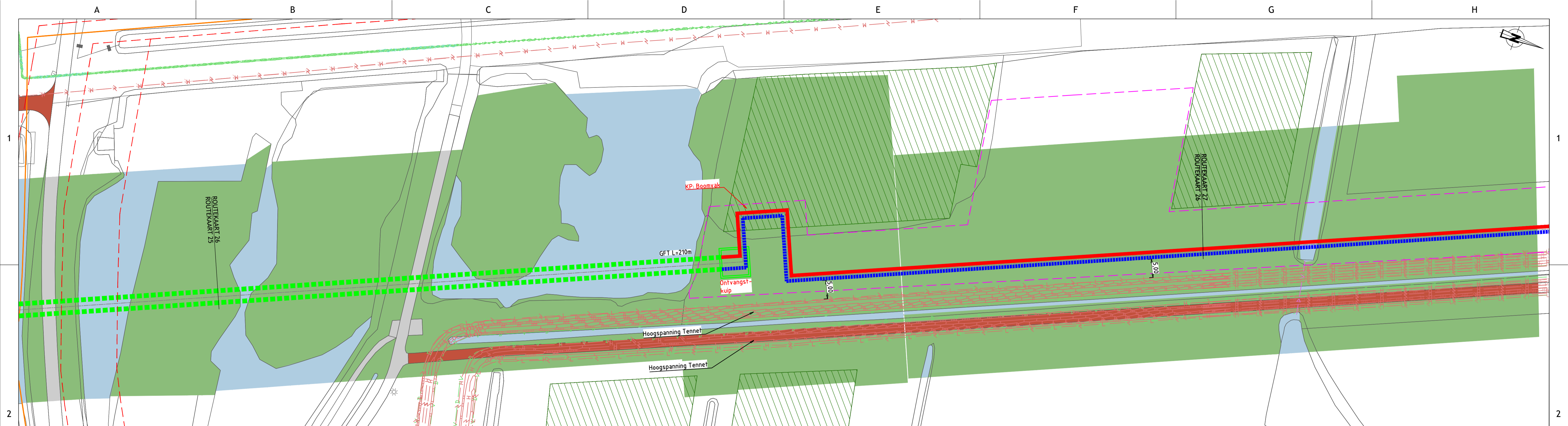
Eneco Opdrachtgever Goedgekeurd door opdrachtgever

Project Leiding door het Midden Projectnr. opdrachtgever WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

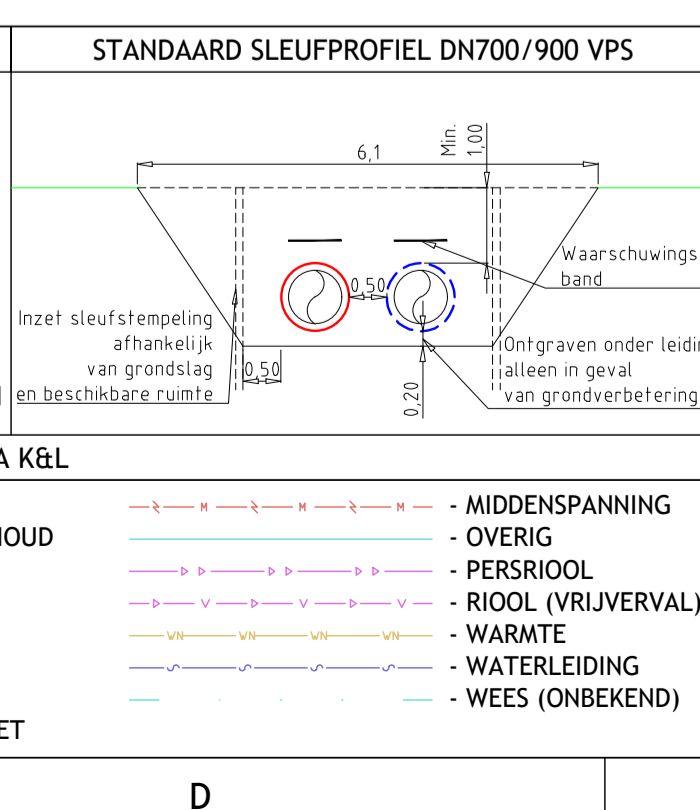
Leiding door het Midden
LOT B - Midden-Delfland, Delft
Routekaart 25
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035-SV-RK-25
Fase: Voortopig ontwerp Status: Definitief Form: A1 Schaal: 1:500 Blad: 25 van 79 Wijz: f



LEGENDA

- KP XX** - KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD
- BOOMVAKKEN



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

AANVOER
RETOUR

- OPMERKINGEN**
- BOMEN LANGS TRACÉ DIENEN NOG INGEMETEN TE WORDEN
 - BINNEN 3,5 METER VAN TRACÉ KUNNEN BOMEN NIET TERUG WORDEN GEPLAATST
 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN, NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

f	16-04-19	VO definitief	BB	PK	MvL
e	14-03-19	Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	MvL
d	25-01-19	VO-2 Definitief	SD	PK	AvD
c	06-09-18	Aanpassen tracé n.a.v. opmerkingen	SD	PK	MvL

Wijz. Datum Omschrijving Ontwerp door Gec. Gezien

Eneco
Opdrachtgever

Goedgekeurd door opdrachtgever

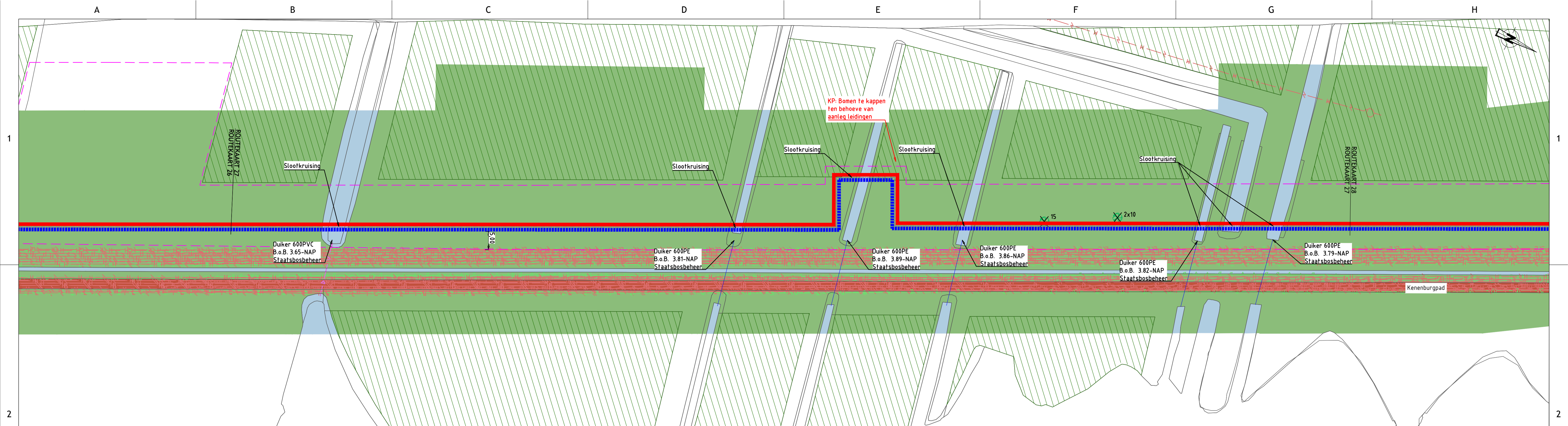
Project Leiding door het Midden

Projectnr. opdrachtgever WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

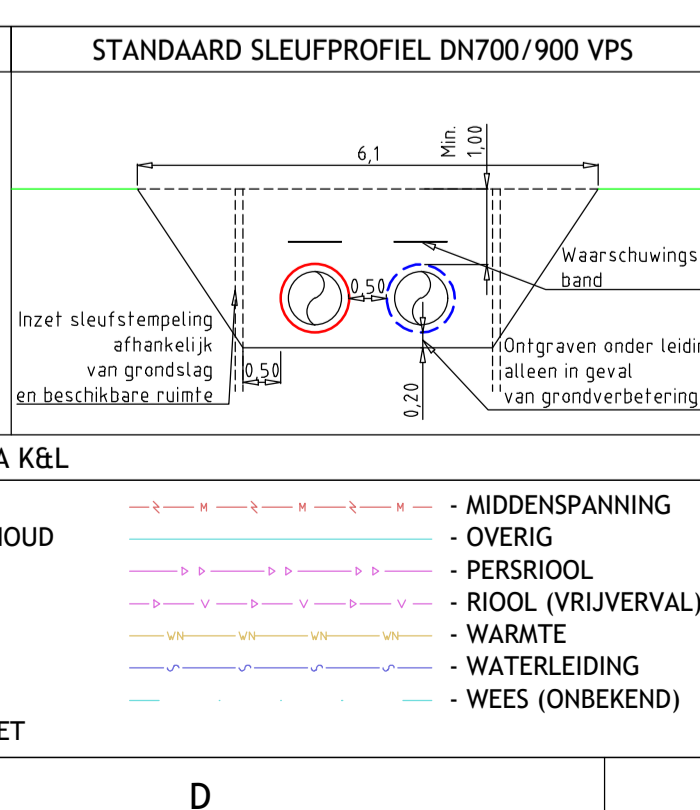
Leiding door het Midden
LOT B - Delft
Routekaart 26
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Fase: Voortlopig ontwerp
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-26
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 26 van 79
Wijz: f



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening trace totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER
— RETOUR

OPMERKINGEN

- INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NIET TERUG TE PLANTEN)
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

d	16-04-'19	VO definitief	BB	PK	MvL
c	18-01-'19	Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	MvL
b	30-11-'18	2e concept voorlopig ontwerp	JB	PK	MvL
a	19-07-'17	Aanpassen opmerkingen 1e Concept VO	SD	PK	MvL

Wijz. Datum Omschrijving Ontwerp door Gec. Gezien

Eneco
Oprachtgever

Project Leiding door het Midden

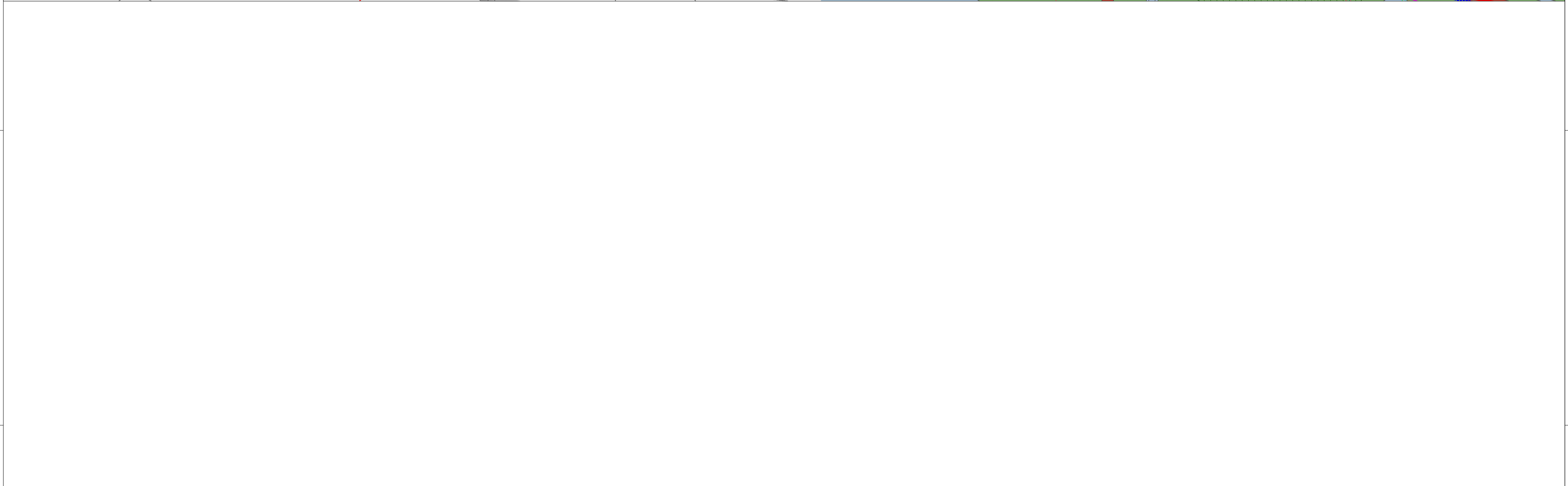
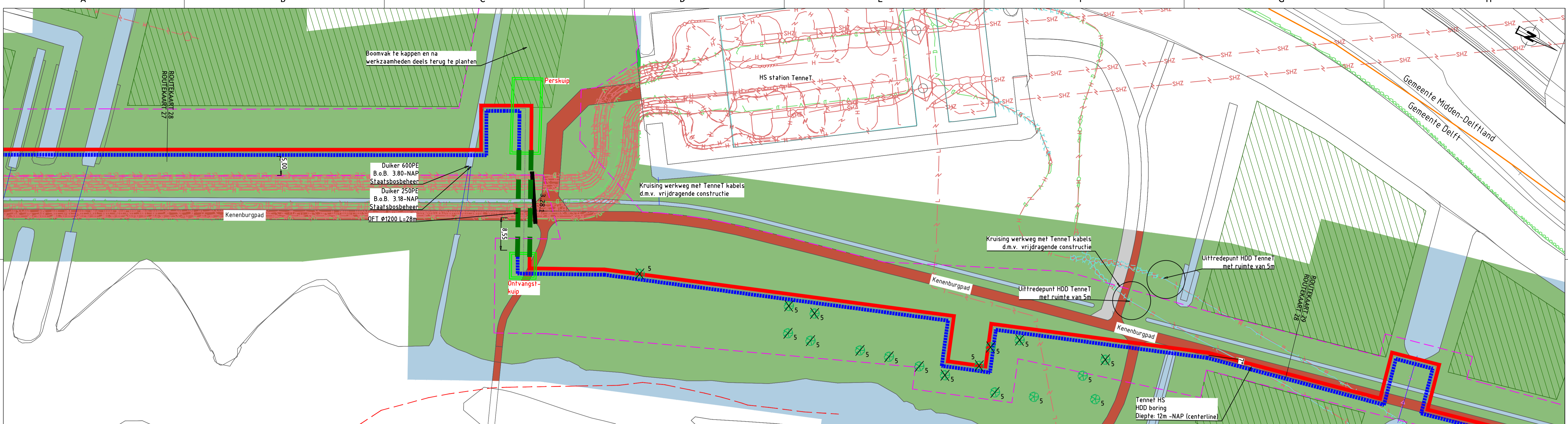
Goedgekeurd door opdrachtgever

Projectnr. opdrachtgever WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

Leiding door het Midden
LOT B - Delft
Routekaart 27
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

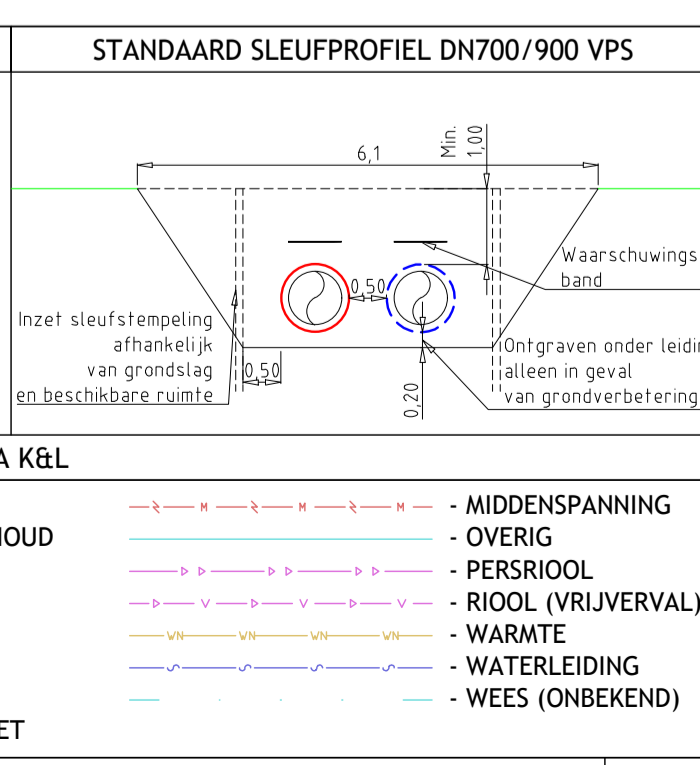
Projectcode: RS17035
Fase: Voorlopig ontwerp
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-27
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 27 van 78
Wijz: d



LEGENDA

— KP XX

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER

— RETOUR

OPMERKINGEN

- 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAMETER IN CM
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NIET TERUG TE PLANTEN)
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

e	d	c	b	Wijz. Datum	Omschrijving	BB	PK	MVL
17-04-19	25-01-19	18-01-19	30-11-18		VO definitief			
					Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	PK
					Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	MVL
					2e concept voorlopig ontwerp	JB	PK	MVL

Wijz. Datum Omschrijving Ontwerp door Gec. Gezien

Eneco

Project Leiding door het Midden

Projectnr. opdrachtgever WOP606-7

Goedgekeurd door opdrachtgever

Rotterdam ENGINEERING

RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

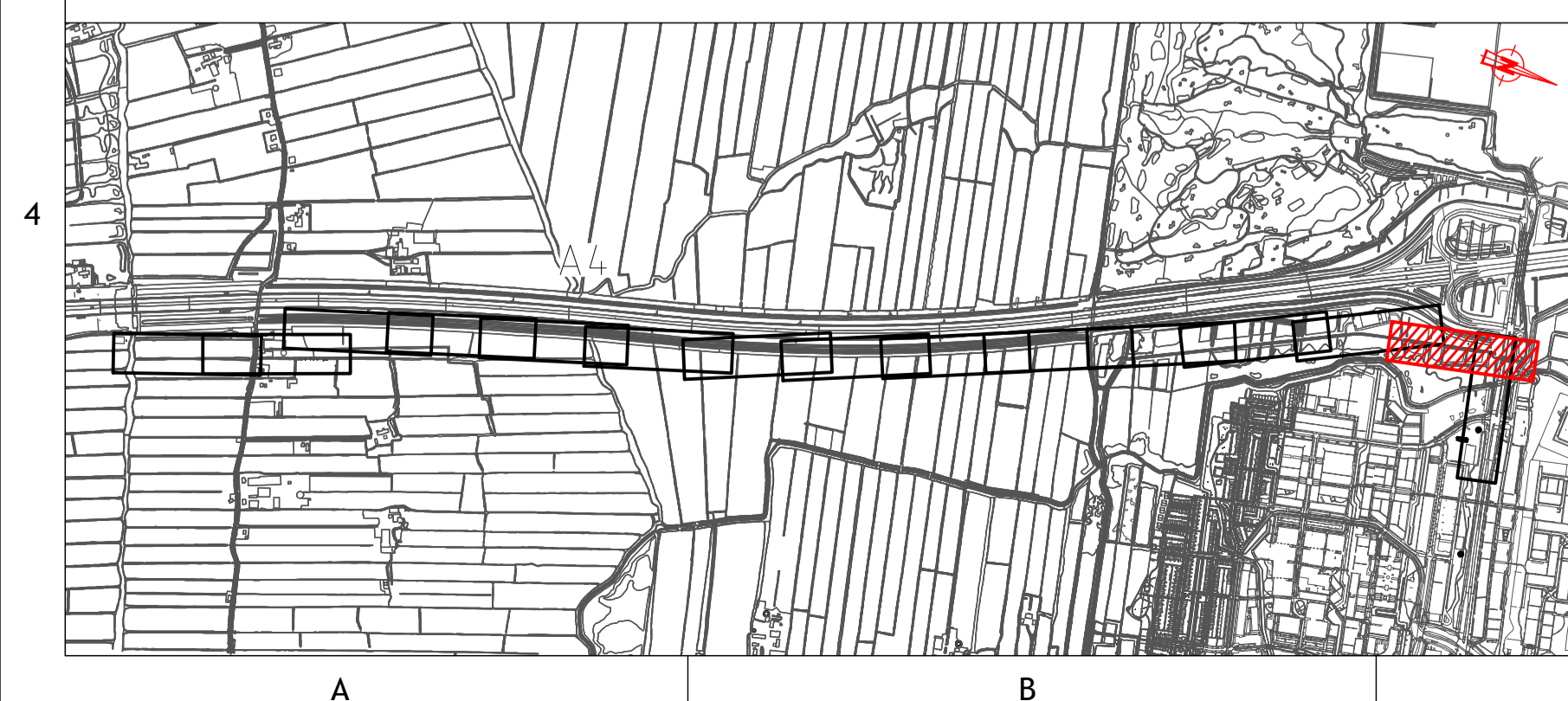
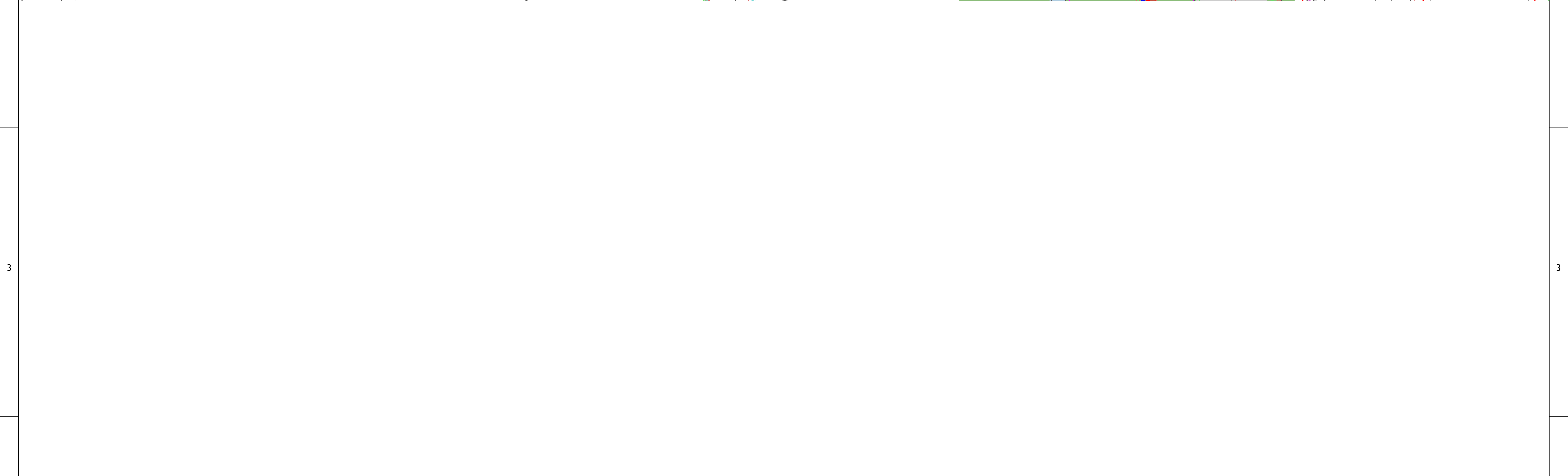
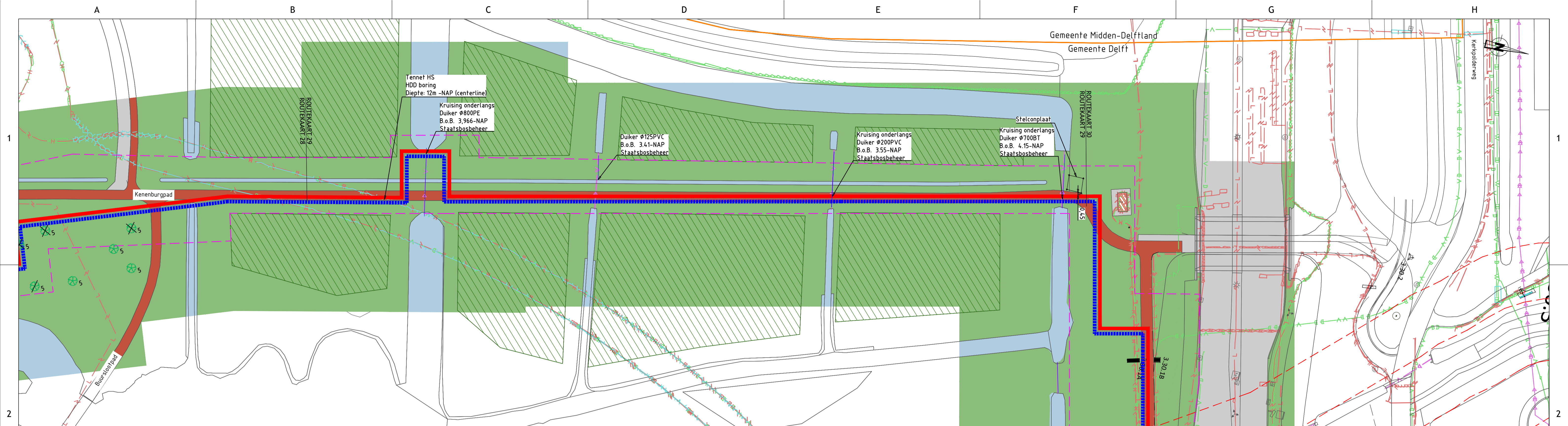
Leiding door het Midden

LOT B - Delft
Routekaart 28
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Fase: Voorlopig ontwerp

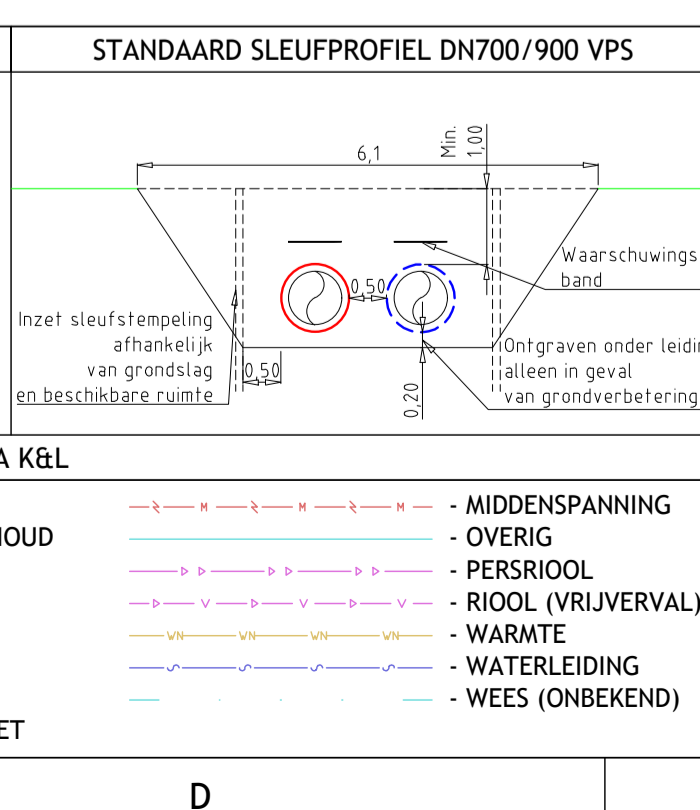
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-28
Status: Definitief

Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 28 van 78
Wijz: e



LEGENDA

- KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

- OPMERKINGEN**
- INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAETER IN CM
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NIET TERUG TE PLANTEN)
 - INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

d	16-04-'19	VO definitief	BB	PK	MVL
c	18-01-'19	Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	PK
b	30-11-'18	2e concept voorlopig ontwerp	JB	PK	MVL
a	19-07-'17	Aanpassen opmerkingen 1e Concept VO	SD	PK	MVL

Wijz. Datum Omschrijving Ontwerp door Gec. Gezien

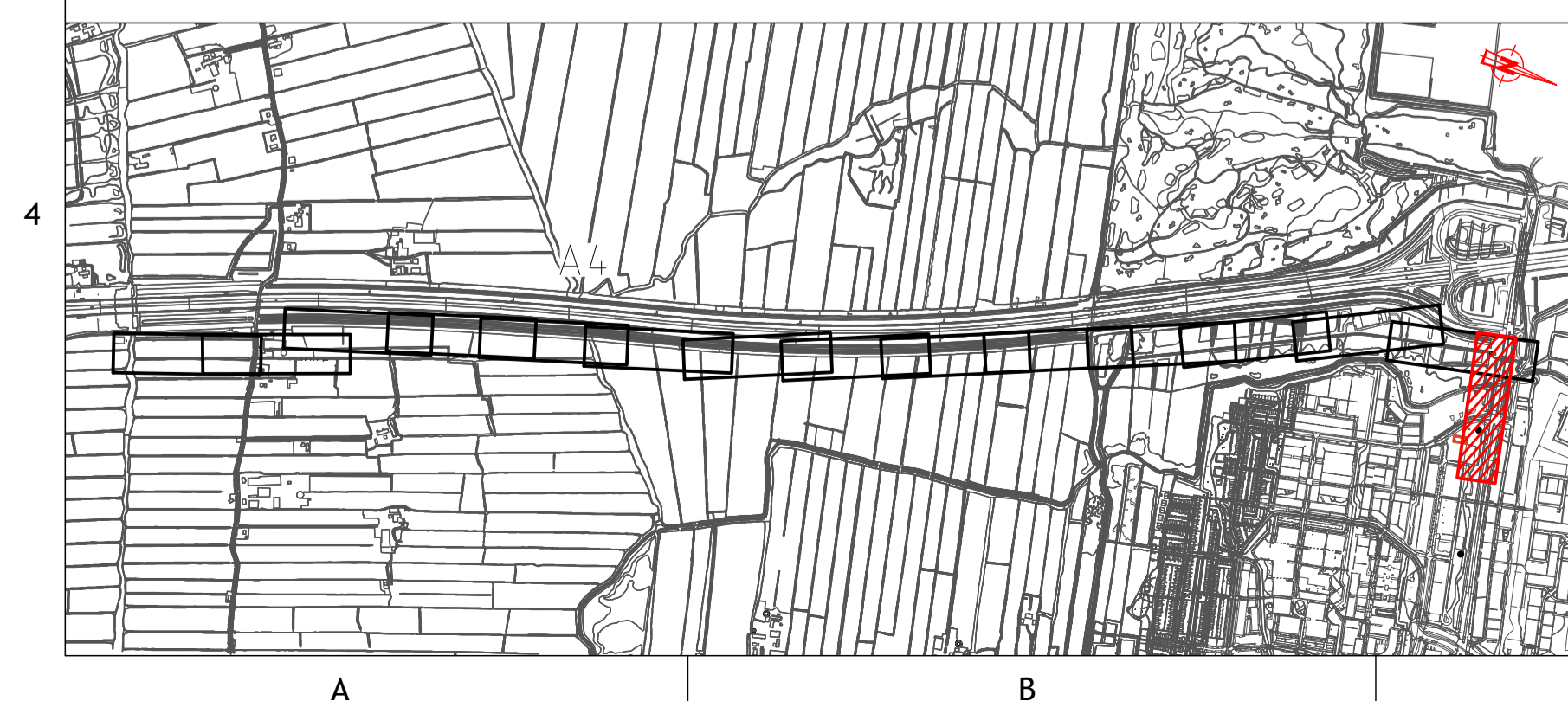
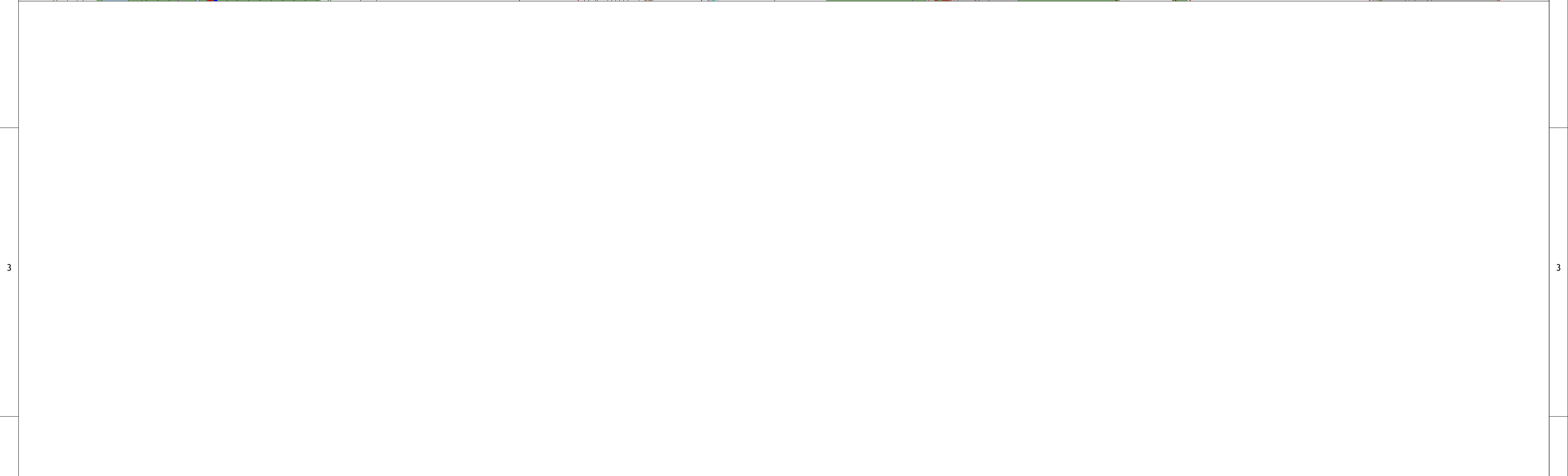
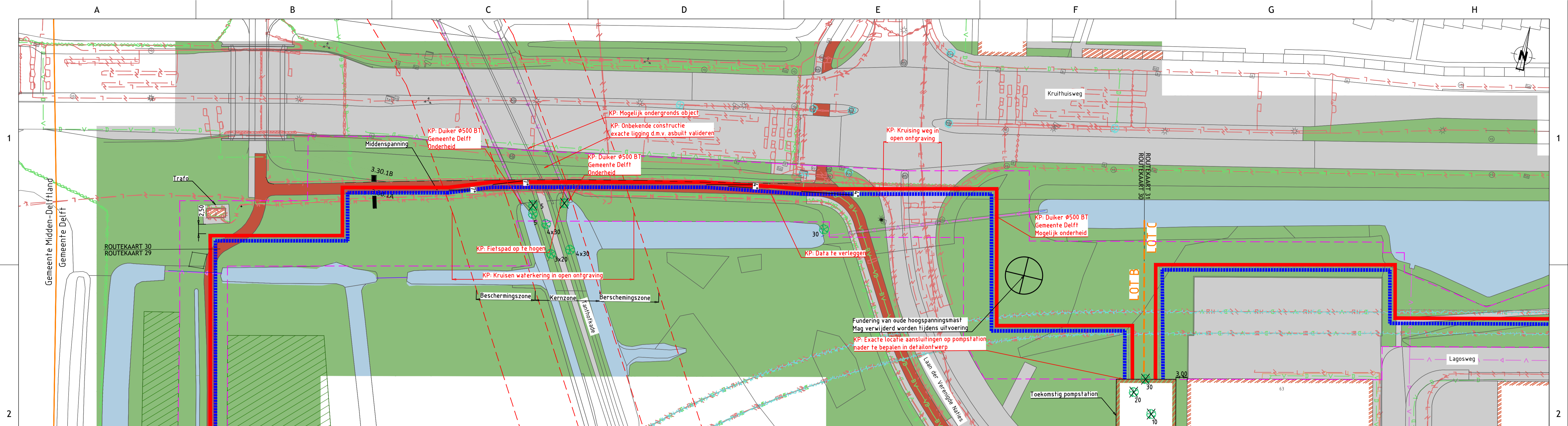
Opdrachtgever: Eneco
Goedgekeurd door opdrachtgever

Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

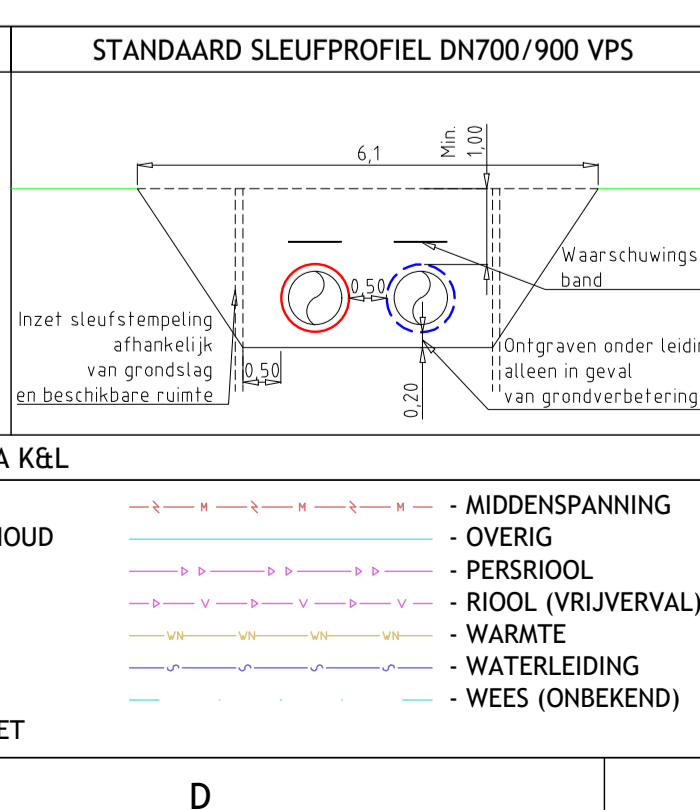
Leiding door het Midden
LOT B - Delft
Routekaart 29
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningnummer: RS17035-SV-RK-29
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 29 van 78
Wijz: d



LEGENDA

- KP XX - KNELPUNT (ZIE OVERZICHT)
- WERKSTROOK
- GEMEENTEGRENS
- KADASTERGRENS
- WATERKERING
- PROEFSLEUFLOCATIE REEDS GEGRAVEN
- PROEFSLEUFLOCATIE NOG TE GRAVEN
- GROEN
- VERHARDING
- BEBOUWING
- WATER
- FIETSPAD



BIJBEHORENDE TEKENINGEN

DETAIL	TEKENING TITEL	TEK.NR.
	Overzichtstekening tracé totaal	RS17035-SV-TT-06
	Overzichtstekening routeaartindeling	RS17035-SV-TT-11
	Overzichtstekening LOT B	RS17035-SV-TT-89

BOVEN DE LEIDINGEN (ca.0.30m) IN SLEUF
WAARSCHUWINGSBAND 2x 70CM BREED MEELEGGEN

— AANVOER
- - - RETOUR

OPMERKINGEN

- 10 - INGEMETEN BOMEN MET STAMDIAETER IN CM
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NIET TERUG TE PLANTEN)
- INGEMETEN BOMEN (TE KAPPEN EN NA AANLEG LEIDINGEN NIEUWE BOOM TERUG TE PLANTEN)

ALLE VERMELDE MATEN ZIJN INDICATIEF, HIERAAN KUNNEN GEEN RECHTEN WORDEN ONTLEEND.

Wijz.	Datum	Omschrijving	Ontwerp door	Gec.	Gezien
c	17-04-19	VO definitief	BB	PK	MVL
b	25-01-19	Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	MVL
a	18-01-19	Aanpassen opmerkingen 2e Concept VO	JB	PK	MVL
0	30-11-18	2e concept voorlopig ontwerp	JB	PK	MVL

Opdrachtgever: Eneco
Project: Leiding door het Midden
Projectnr. opdrachtgever: WOP606-7

Rotterdam ENGINEERING
RE Rotterdam Engineering BV
www.rotterdamengineering.nl
info@rotterdamengineering.nl
010 - 226 49 35

Leiding door het Midden
LOT B - Delft
Routekaart 30
Aanleg SV-leidingen DN700/900 VPS

Projectcode: RS17035
Tekeningsnummer: RS17035-SV-RK-30
Fase: Voorlopig ontwerp
Status: Definitief
Form: A1
Schaal: 1:500
Blad: 30 van 78
Wijz: c

Bijlage 3

Wrijvingsweerstand bedrijfsfase, Deltares

Memo

Aan

Marco den Burger (Rotterdam Engineering)

Datum

12 december 2023

Ons kenmerk

11207943-017-GEO-0001

Aantal pagina's

1 van 15

Contactpersoon

Piet Meijers

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7532

E-mail

Piet.Meijers@deltares.nl

Onderwerp

AAMBEELD WP2, wrijvingweerstand bedrijfsfase, versie 0.3

1 Inleiding

Als onderdeel van AAMBEELD WP 2 worden berekeningen voor de bedrijfsfase van warmteleidingen gemaakt. Een van de invoergrootheden voor die berekeningen is de wrijvingweerstand van de leiding. In deze notitie wordt voor de vijf geselecteerde aanlegmethoden die in AAMBEELD worden beschouwd de wrijvingweerstand bepaald.

De in deze memo gegeven waarden zijn bedoeld als invoer voor de sterkteberekeningen voor de bedrijfsfase.

2 Invoerparameters

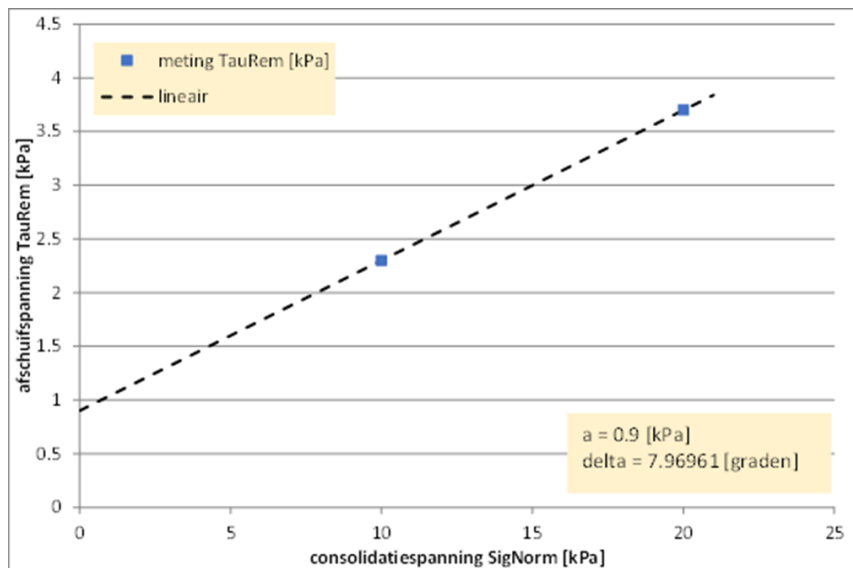
Voor de wrijvingweerstand kunnen twee situaties worden onderscheiden:

1. Voor aanlegmethoden waarbij geen boorvloeistof wordt gebruikt is het afschuiven over het grensvlak leiding-grond.
2. Voor aanlegmethoden waarbij wel boorvloeistof in de vorm van drillgrout wordt gebruikt zijn er twee mogelijke afschuifvlakken:
 - a) Afschuiven over grensvlak leiding-drillgrout
 - b) Afschuiven over grensvlak drillgrout-grond

De invoerparameters voor het afschuiven over de interface met de grond zijn in het startdocument gegeven. Voor de volledigheid worden ze hier herhaald.

Grondsoort	c [kPa]	ϕ [°]	Adhesie/cohesie [-]	δ/ϕ [-]
Zand	0	30	0,5	0,66667
Klei	1	15	0,5	0,5

Voor de interface leiding-drillgrout worden de resultaten van WP3 gebruikt. Figuur 2-1 toont het resultaat van een serie testen.



Figuur 2-1 Wrijving leiding-drillgrout-PE, resultaat voor test bij $C = 10$ °C en wachttijd van ca 300 dagen

Hieruit volgt dat de volgende parameters gebruikt kunnen worden

- Adhesie: 0,9 kPa ($f_2 = 0,9$ kPa)
- Wrijvingshoek: $\delta = 8^\circ$ ($f_3 = \tan\delta = 0,14$)

Het betreft hier best-estimate waarden.

Uit de parameters van de leiding laten zich de volgende gewichten per strekkende meter afleiden:

- Leiding, leeg: $G_{\text{leiding}} = 1,75$ kN/m
- Gewicht water in leiding: $G_{\text{water}} = 1,96$ kN/m
- Opwaartse kracht: $F_{\text{opw}} = 6,36$ kN/m (in water)

Hierbij is dus uitgegaan van een hydrostatisch verloop van de waterdruk in de ondergrond (anders gezegd: de stijghoogte in de ondergrond is geen functie van de diepte).

Het netto gewicht van de leiding is daarmee $G' = -2,65$ kN/m. Dit betekent dat de leiding ook in de bedrijfsfase wil opdrijven.

3 Rekenmethode

Voor het bepalen van de wrijving kunnen bij de leiding 4 zijden worden onderscheiden, de bovenzijde, de onderzijde en de twee zijkanten.

De gronddruk op de bovenzijde volgt uit het gewicht van de grond boven de leiding indien er geen boogwerking is. Indien er wel sprake is van boogwerking wordt de gronddruk bepaald door de druk bij boogwerking. De ondergrens wordt bepaald door de weerstand die nodig is om opdrijven van de leiding te voorkomen.

De kracht op de onderzijde volgt uit het verticaal evenwicht van de leiding, en is dus de som van de kracht op de bovenzijde plus het effectief gewicht van de leiding.

De kracht op de zijkant volgt uit de horizontale korrelspanning op de zijkant. Hiervoor wordt de situatie ter hoogte van de as van de leiding als maatgevend beschouwd. Afhankelijk van de aanlegmethode is deze korrelspanning neutraal, actief of tussen neutraal en actief. De ondergrens is nul.

Voor de kracht op de zijkant wordt verondersteld dat deze per zijde over een kwart cirkelsegment aanwezig is.

Voor de bepaling van de gronddruk op de leiding wordt de reductie volgens NEN-3650 toegepast. Voor de aanleg in een sleuf, en de aanleg middels Direct Pipe, EPP en HDD kunnen deze factoren worden ontleend aan NEN-3650. Voor de aanlegmethode middels ploegen is nog geen reductie factor vastgesteld. Voorgesteld wordt om voor deze studie een factor van 1,2 te hanteren. Dit geeft de volgende reductie factoren voor de korrelspanning:

- Aanleg in sleuf: 1,1
- Aanleg middels inploegen: 1,2
- Overige aanlegmethoden: 1,5.

Deze factoren zijn de berekeningen van de wrijvingsweerstand meegenomen. De partiële factor op de wrijvingsweerstand voor het bepalen van de rekenwaarde wordt in deze memo niet meegenomen.

De wrijvingsweerstand wordt berekend voor een leiding met een buitendiameter van 0,9 m.

4 Berekening wrijvingsweerstand

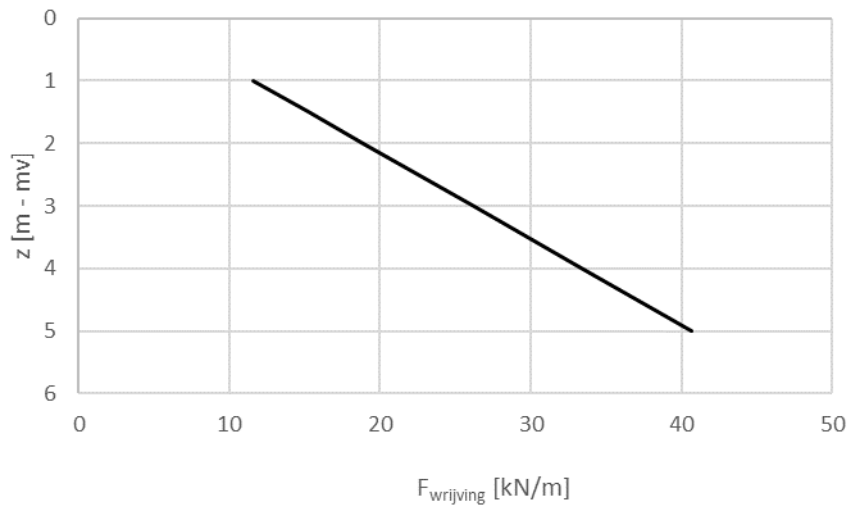
4.1 Aanleg in sleuf

Bij aanleg van de leiding in de sleuf is sprake van een grondaanvulling. Voor de berekening wordt uitgegaan van neutrale gronddrukken. Verkeersbelasting en zakking van de aanvulling boven de leiding (Marston effect) worden buiten beschouwing gelaten.

Er wordt geen boorvloeistof gebruikt, dus alleen de wrijving langs de interface leiding-grond hoeft te worden beschouwd. De resultaten voor zand voor verschillende waarden van de gronddekking (afstand tussen maaiveld en bovenkant leiding) staan in Tabel 4-1 en Figuur 4-1.

Tabel 4-1 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie aanleg in zand

Gronddekking [m]	$q_{n,r}$ [kPa]	$\sigma'_{h,as}$ [kPa]	T [kN/m]
1	14,74	8,98	11,62
1,5	19,29	11,25	15,25
2	23,83	13,52	18,87
3	32,92	18,07	26,12
4	42,01	22,61	33,37
5	51,11	27,16	40,62

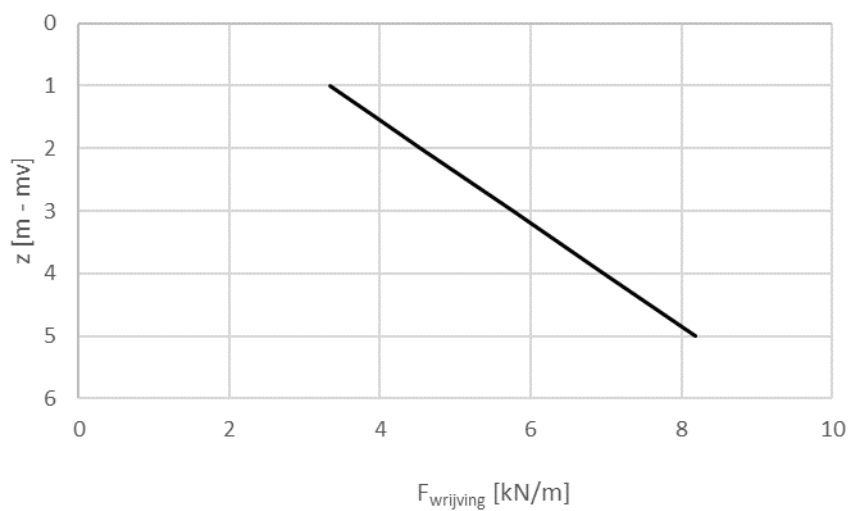


Figuur 4-1 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie aanleg in zand

Voor een leiding in klei staan de resultaten in Tabel 4-2 en Figuur 4-2.

Tabel 4-2 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie aanleg in klei

Gronddekking [m]	$q_{n,r}$ [kPa]	$\sigma'_{h,as}$ [kPa]	T [kN/m]
1	6,26	5,59	3,33
1,5	8,08	6,94	3,94
2	9,90	8,29	4,54
3	13,53	10,98	5,75
4	17,17	13,68	6,97
5	20,81	16,37	8,18



Figuur 4-2 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie aanleg in klei

4.2 Inploegen

De situatie bij inploegen is vergelijkbaar met die bij aanleg in een sleuf, Voor de wrijvingsweerstand kunnen daarom dezelfde waarden worden gebruikt.

4.3 Aanleg met HDD

4.3.1 Algemeen

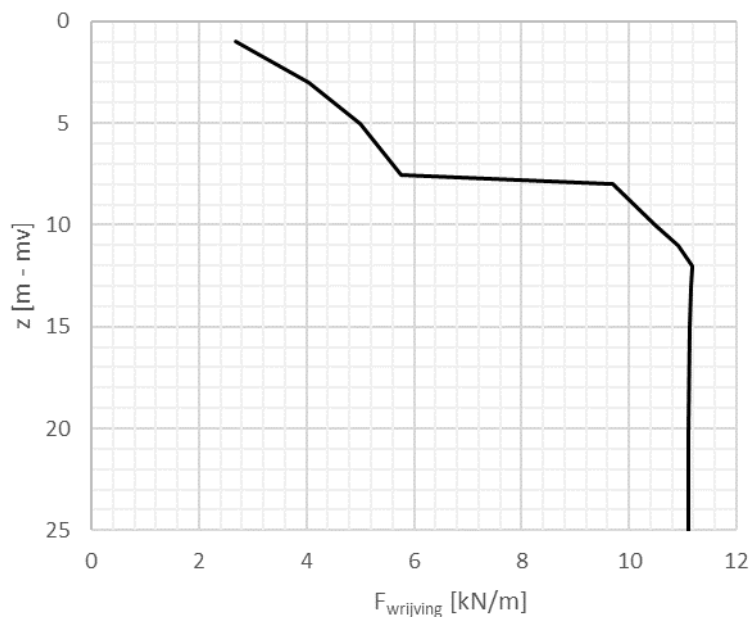
Bij de aanleg met een HDD varieert de gronddekking langs het tracé, en daarmee ook de wrijvingsweerstand, Verder zal voor de situatie van een toplaag van 8 m klei er sprake zijn van twee grondsoorten, Voor de boogwerking betekent dit dat er rekening moet worden gehouden met het 2-lagen systeem, Toepassen van de huidige rekenregel in NEN-3650-1 voor deze situatie betekent dat er op de laagscheiding een sprong in de gronddruk op de bovenkant van de leiding ontstaat, Dit zal een overschatting zijn van de werkelijke grondspanning, inclusief boogwerking, op die diepte.

Voor de horizontale korrelspanning op de leiding worden twee situaties beschouwd: de actieve horizontale spanning in de grond en de neutrale horizontale spanning in de drillgrout. De laatste wordt berekend uit de verticale spanning op de drillgrout ($q_{n,r}$) en de factor $1 - \sin(15^\circ) = 0,741$. Hierbij is uitgegaan van een hoek van inwendige wrijving van 15° in de drillgrout.

Ter plaatse van bochten zal er, door het aanliggen in de bocht, sprake zijn van een iets hogere wrijvingsweerstand. De bijdrage is beperkt en wordt daarom hier niet meegenomen.

4.3.2 Situatie klei op zand

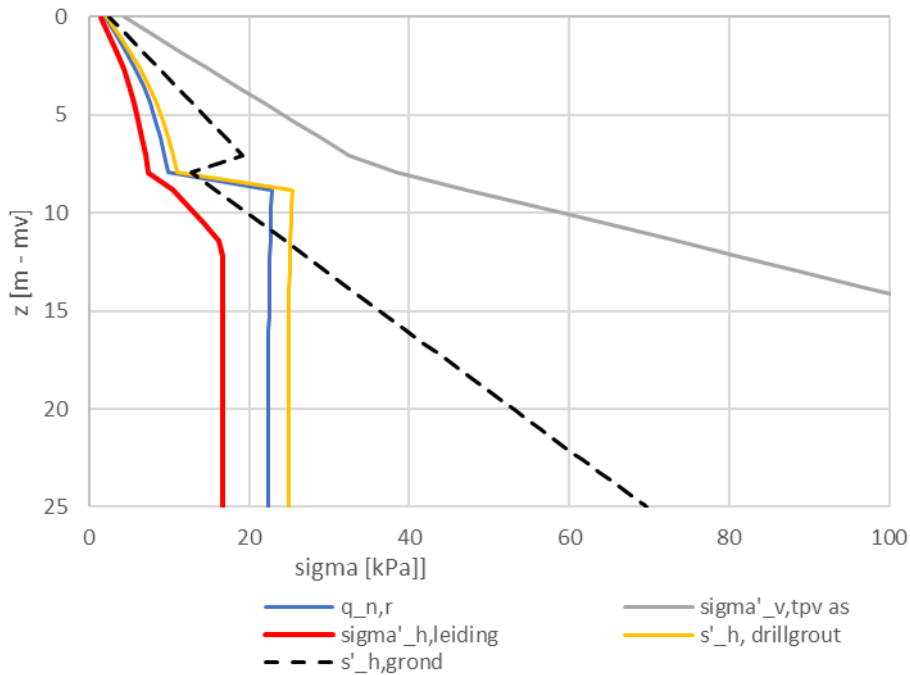
Figuur 4-3 toont het verloop van de wrijvingsweerstand met de diepte.



Figuur 4-3 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie 8 m klei op zand

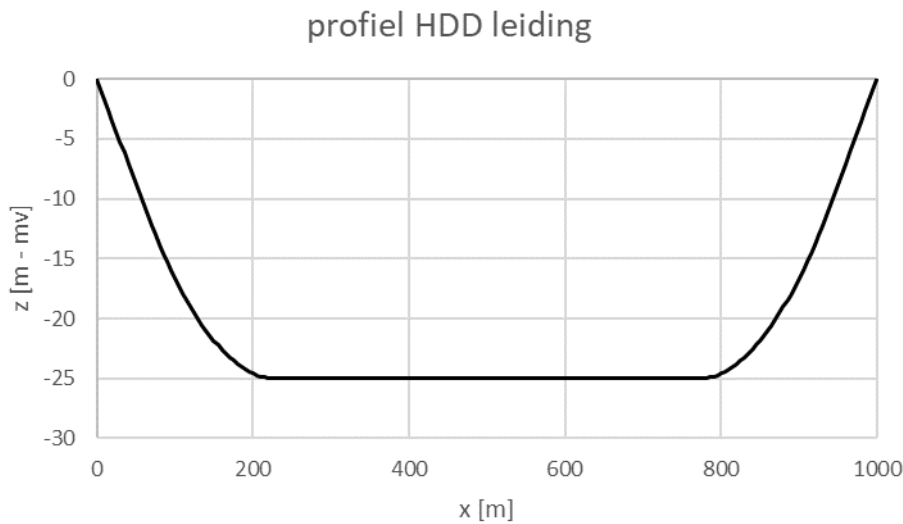
Onder de laagscheiding is de korrelspanning op de bovenkant praktisch onafhankelijk van de gronddekking, De korrelspanning tegen de zijkant neemt evenredig met de diepte toe, Hier

ontstaat over een laagdikte van ongeveer 4 m de situatie dat modelmatig de actieve horizontale korrelspanning in de grond lager is dan de neutrale korrelspanning in de drillgrout. Dit is te herkennen in Figuur 4-4 door het vergelijken van de amberkleurige en de zwart gestreepte lijnen. Hierdoor vertoont het verloop van de wrijvingsweerstand over de diepte niet allen een knip ter plaatse van de laagscheiding (mv – 8 m) maar ook een knip ter plaatse van mv – 12 m.

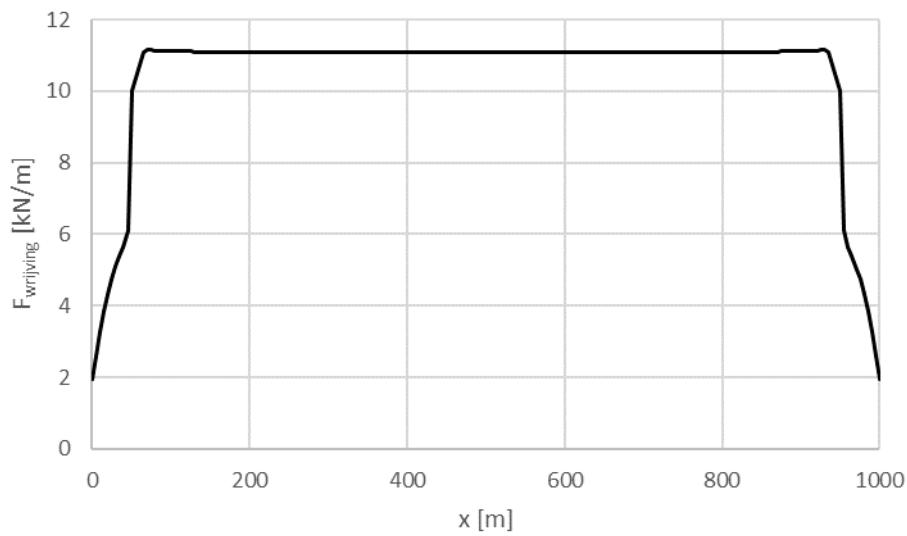


Figuur 4-4 Korrelspanning op bovenkant en zijkant leiding, als functie van de gronddekking, situatie klei op zand

Ter illustratie wordt voor een HDD met een lengte van 1000 m het verloop van de wrijvingsweerstand langs de leiding weergegeven in Figuur 4-6, De ligging van de leiding is weergegeven in Figuur 4-5,

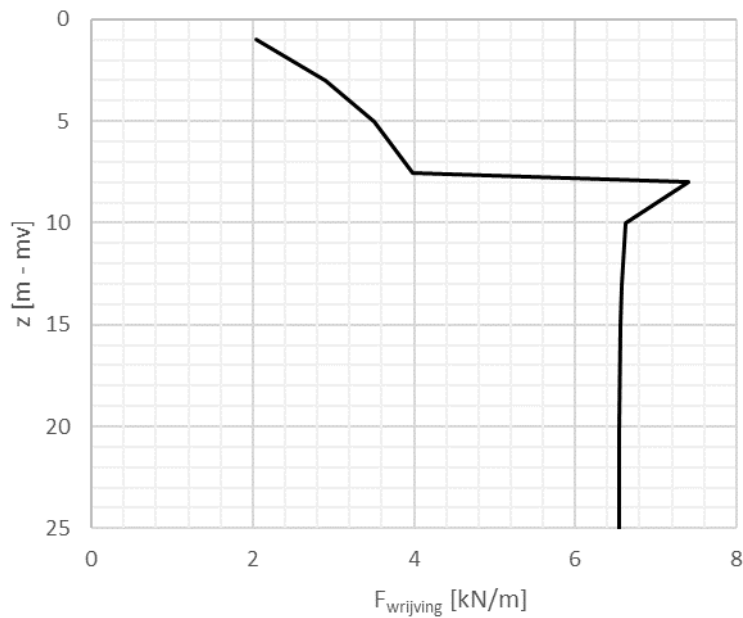


Figuur 4-5 Ligging bovenkant HDD



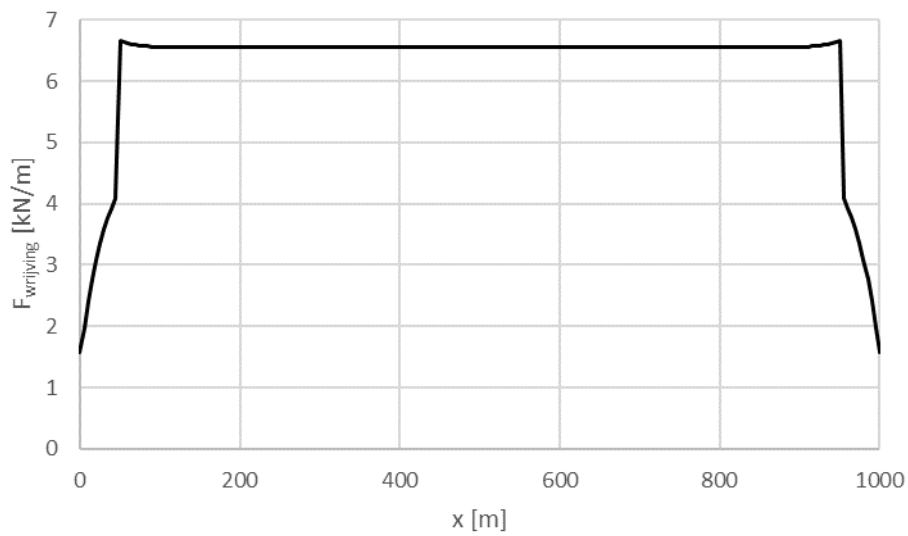
Figuur 4-6 Verloop wrijvingsweerstand langs leiding, situatie 8 m klei op zand, lengte HDD 1000 m, gronddekking maximaal 25 m

Een conservatieve aanname is dat bij een HDD de annulus zo groot is dat de zijkant van de boorgang niet aanligt. In dat geval is er dus geen bijdrage aan de wrijvingsweerstand door de zijdelingse gronddruk. De weerstand door adhesie blijft wel aanwezig, Figuur 4-7 toont voor die situatie de wrijvingsweerstand als functie van de gronddekking,



Figuur 4-7 Wrijvingsweerstand, situatie 8 m klei op zand, geen horizontale korreldruk

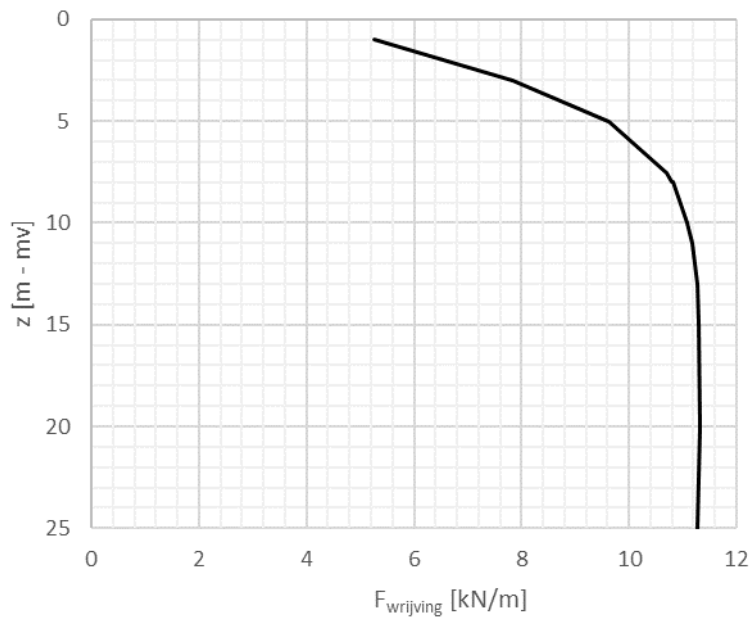
In het AAMBEELD project wordt de leiding doorgerekend zonder horizontale steundruk bij een HDD boorgat. In de sterkte berekening kan daarom de wrijving uit de onderstaande Figuur 4-8 worden gebruikt.



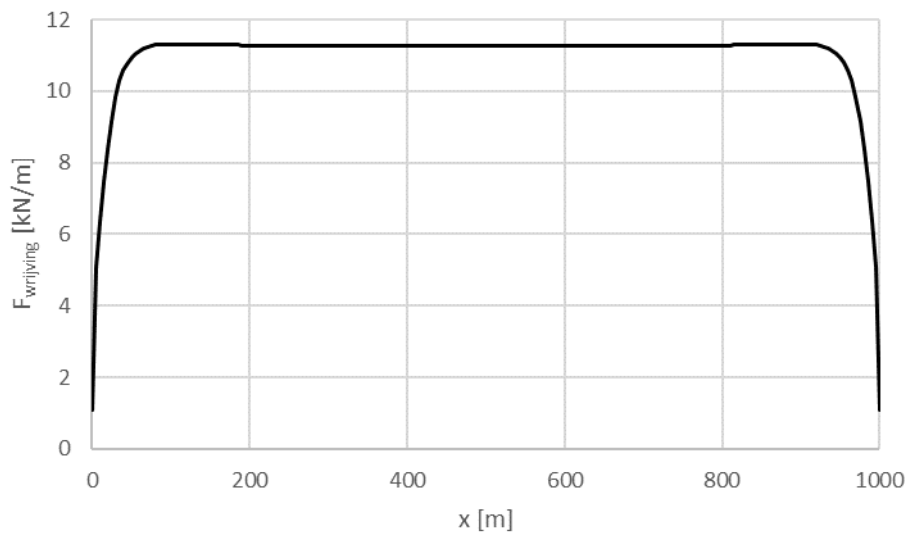
Figuur 4-8 Wrijvingsweerstand langs tracé HDD, situatie 8 m klei op zand, geen horizontale korreldruk, lengte HDD is 1000 m

4.3.3 Situatie homogeen zandpakket

Voor de situatie van een homogeen zandpakket worden de relevante resultaten in onderstaande figuren gegeven. In dit geval is er geen laagscheiding aanwezig.

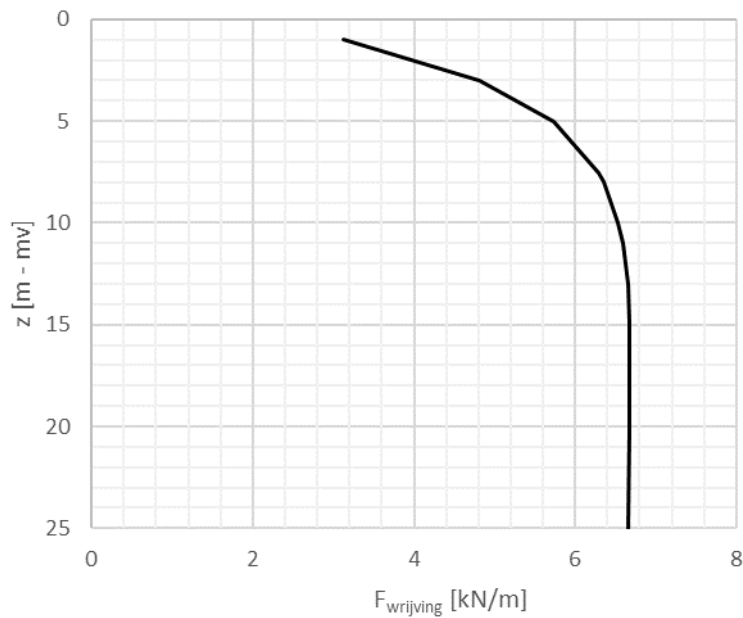


Figuur 4-9 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie homogeen zandpakket, met horizontale steundruk

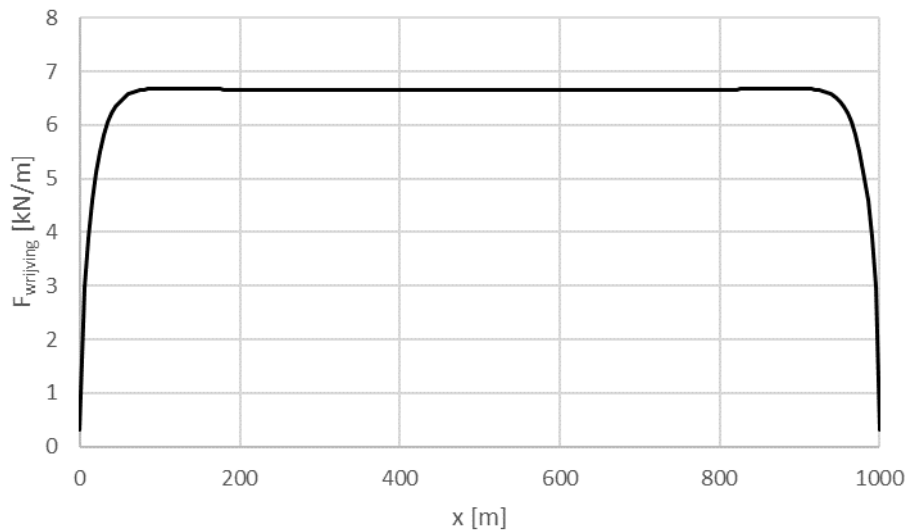


Figuur 4-10 Verloop wrijvingsweerstand langs leiding, situatie homogeen zandpakket, lengte HDD 1000 m, gronddekking maximaal 25 m met horizontale steundruk.

In het AAMBEELD project wordt de leiding doorgerekend zonder horizontale steundruk bij een HDD boorgat. In de sterkte berekening kan daarom de wrijving uit de onderstaande Figuur 4-11 en Figuur 4-12 worden gebruikt.



Figuur 4-11 Wrijvingsweerstand als functie van aanlegdiepte, situatie homogeen zandpakket, geen horizontale steundruk



Figuur 4-12 Verloop wrijvingsweerstand langs leiding, situatie homogeen zandpakket, lengte HDD 1000 m, gronddekking maximaal 25 m, geen horizontale steundruk.

4.4 Aanleg met Direct Pipe

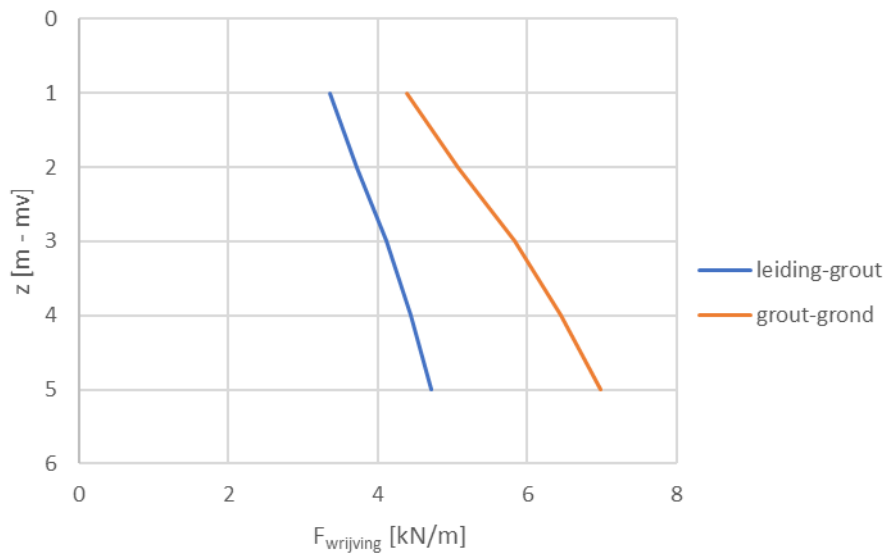
De ruimte tussen de leiding en de boorgang is 0,045 m, Voor de berekeningen wordt aangenomen dat deze waarde voldoende is om zowel aan de bovenzijde als aan de zijkant een actieve gronddruk te krijgen. Voor de horizontale gronddruk op de leiding wordt het minimum genomen van de druk in de drillgrout volgens $\sigma'_h = q_{n,r} \cdot \sin(15^\circ)$ en $K_{act} \cdot \sigma'_{v,as}$.

Er zijn twee mogelijke bezwijkvlakken: afschuiven over de interface leiding-grout en afschuiven over de interface grout-grond. Bij de laatste situatie geldt dat de adhesie gelijk is aan de cohesie en dat $\delta/\phi = 1$.

De volgende tabellen en grafieken geven het resultaat van de berekening.

Tabel 4-3 Wrijvingsweerstand, situatie klei

	F _{wrijving} [kN/m]		echo invoer		
	interface	leiding-gr	grout-grond	GWS	
		4.11366	5.830321		0.25
gronddekking	1	3.36	4.38	gamma_dry	14
	2	3.72	5.08	gamma_sat	14
	3	4.11	5.83	c	1
	4	4.44	6.45	phi	15
	5	4.71	6.97	delta/phi	1
∨				adh/coh	1
				f2	0.9
				f3	0.14
				factor op korrelspanningen	1.5

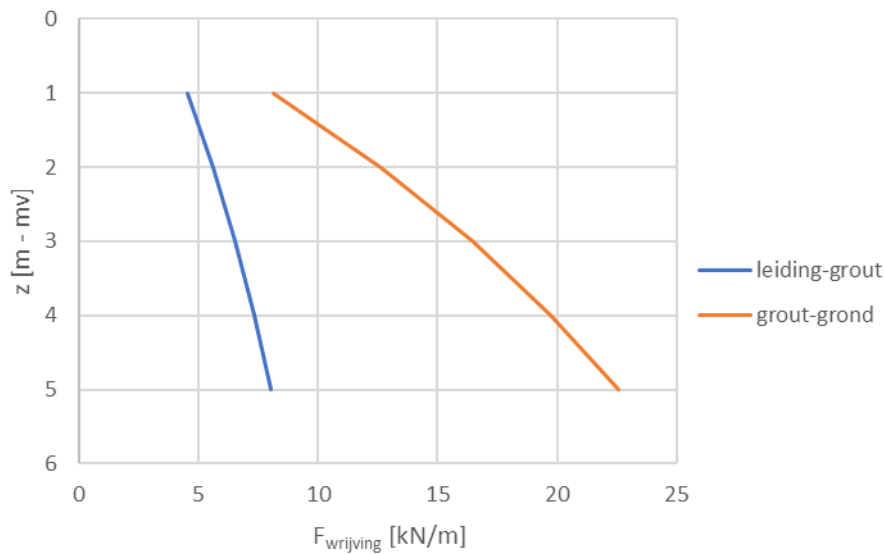


Figuur 4-13 Wrijvingsweerstand, situatie klei

Uit de bovenstaande Figuur 4-13 volgt dat de wrijving tussen de leiding en drillgrout maatgevend is. Deze wrijving zal daarom worden gebruikt bij de bedrijfsfase van het AAMBEELD project.

Tabel 4-4 Wrijvingsweerstand, situatie zand

	F_wrijving [kN/m]		echo invoer	
	interface	leiding-gr grout-grond	GWS	
		6.533012	16.44756	0.75
gronddekking	1	4.52	8.15	gamma_dry 17
	2	5.61	12.66	gamma_sat 20
	3	6.53	16.45	c 0
	4	7.32	19.71	phi 30
∨	5	8.02	22.58	delta/phi 1
				adh/coh 1
				f2 0.9
				f3 0.14
			factor op korrelspanningen	1.5



Figuur 4-14 Wrijvingsweerstand, situatie zand

In alle gevallen is de interface leiding-grout maatgevend. Ook bij zand wordt de wrijving tussen de leiding en drillgrout gebruikt voor de bedrijfsfase.

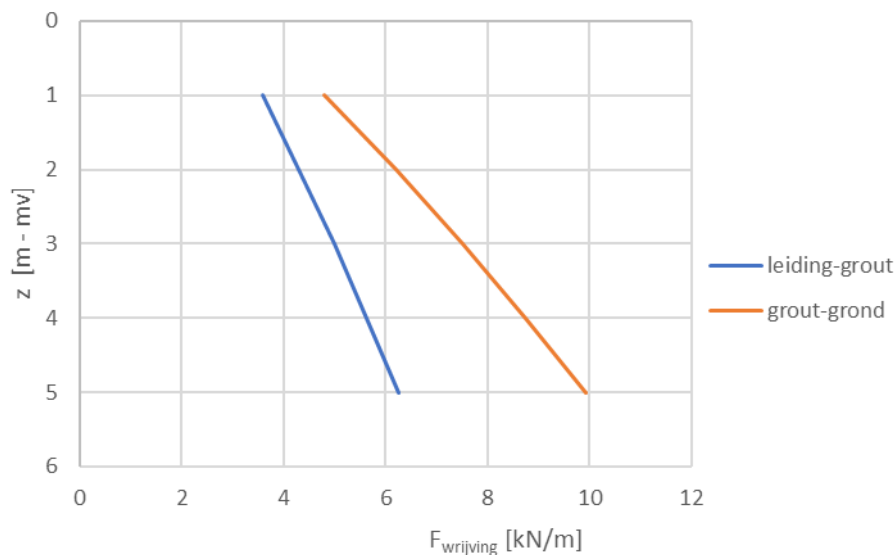
4.5 Aanleg met EPP met ruimer

De aanleg van een grote diameter leiding middels EPP in combinatie met een ruimer is nog niet in de praktijk toegepast. Bij de testen in het kader van AAMBEELD WP4 was de diameter van de ruimer 790 mm. Dat zou betekenen dat bij de aanleg van een 28" leiding de annulus ongeveer 40 mm is. In dat geval is de situatie dus vergelijkbaar met die bij Direct Pipe.

Een ruimer voor de aanleg van een leiding met een diameter van 900 mm moet nog worden ontworpen. Wat daarbij de annulus wordt is nog onbekend. Voor deze studie wordt verondersteld dat de dikte van de annulus gering is. Voor deze situatie wordt verwacht dat de boogwerking boven de leiding wel enigszins aanwezig is, maar dat de mate van oversnijding te klein is om de boogwerking volledig te ontwikkelen. De gronddruk tegen de leiding zal dus ergens tussen de neutrale gronddruk en de volledig actieve gronddruk liggen. Voor de bepaling van de wrijvingsweerstand wordt daarom het gemiddelde van deze situaties gebruikt. Verder wordt verondersteld dat, ook bij een kleine annulus, er nog steeds sprake is van drillgrout tussen de leiding en de grond.

Tabel 4-5 Wrijvingsweerstand, situatie klei

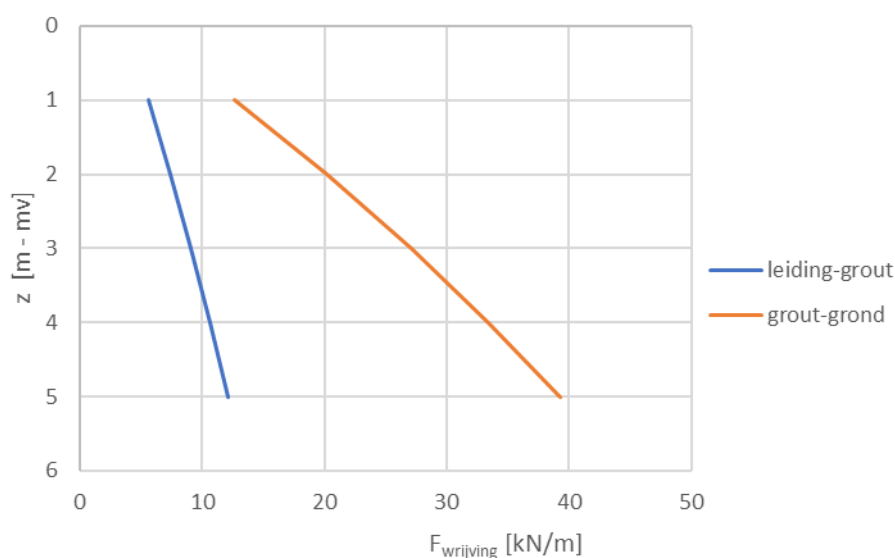
gronddekking [m]	interface	F_wrijving [kN/m]		echo invoer	
		leiding-gr	grout-grond	GWS	
		4.987703	7.50317102	GWS	0.25
				gamma_dry	14
				gamma_sat	14
				c	1
				phi	15
				delta/phi	1
				adh/coh	1
				f2	0.9
				f3	0.14
				factor verdeling actief-neutraal	0.5
				factor op korrelspanningen	1.5



Figuur 4-15 Wrijvingsweerstand, situatie klei

Tabel 4-6 Wrijvingsweerstand, situatie zand

gronddekking [m]	interface	F_wrijving [kN/m]		echo invoer	
		leiding-gr	grout-grond	GWS	
		9.114627	27.0939617	GWS	0.75
				gamma_dry	17
				gamma_sat	20
				c	0
				phi	30
				delta/phi	1
				adh/coh	1
				f2	0.9
				f3	0.14
				factor verdeling actief-neutraal	0.5
				factor op korrelspanningen	1.5



Figuur 4-16 Wrijvingsweerstand, situatie zand

5 Samenvatting

In deze notitie wordt voor de vijf geselecteerde aanlegmethoden die in AAMBEELD worden beschouwd de wrijvingsweerstand bepaald. De berekende waarden in deze memo zijn bedoeld als invoer voor de sterkteberekeningen voor de bedrijfsfase. In de onderstaande tabel zijn de berekende waarden weergegeven. Voor de aanleg middels HDD is alleen de waarde in zand gegeven. Bij deze aanlegmethode ligt praktisch het gehele tracé in het zand en heeft een 8 m dikke toplaag van klei praktisch geen invloed.

De afstand voor mobilisatie van de wrijving is over genomen uit NEN 3650.

Tabel 5-1 Wrijvingsweerstandens bedrijfsfase, resultaat inclusief reductie effectieve spanning op leiding, exclusief partiële factor op wrijvingsweerstand

Aanlegmethode	gronddekking [m - mv]	Wrijving klei [kPa]	Afstand [mm]	Wrijving zand [kPa]	Afstand [mm]
Sleuf	1,0	3,3	10	11,6	4
	1,5	3,9	10	15,3	4
	3	5,8	10	26,1	4
Ploegen	1,0	3,3	10	11,6	4
	1,5	3,9	10	15,3	4
	3	5,8	10	26,1	4
Direct Pipe	3	4,1	10	6,5	6
	5	4,7	10	8,0	6
EPP	3	5,0	10	9,1	6
	5	6,3	10	12,1	6
HDD	25	--	--	6,6	6

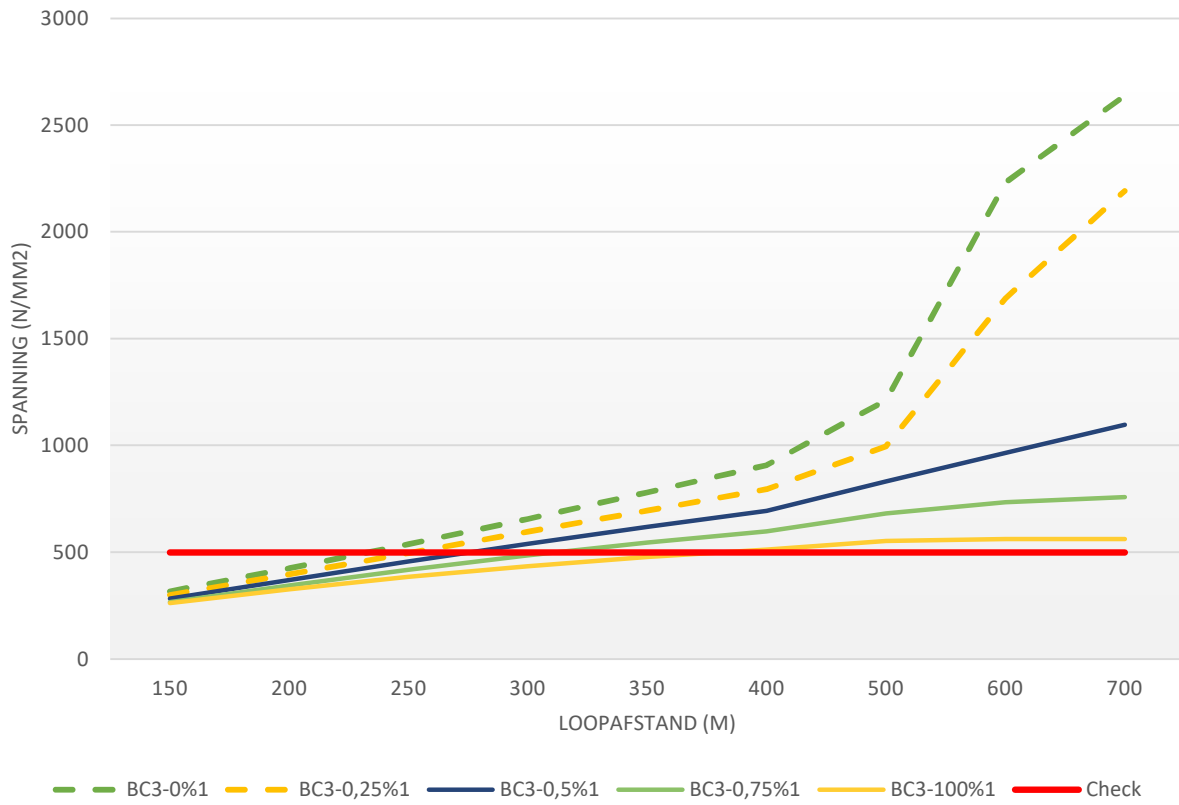
6 Symbolen

c	cohesie
f ₂	adhesie
f ₃	wrijvingscoëfficiënt ($f_3 = \tan\delta$)
F _{opw}	opwaartse kracht op leiding door waterdruk
F _{wrijving}	wrijvingweerstand grond-leiding, per strekkende meter
G'	netto gewicht leiding (gewicht leiding minus opwaartse kracht)
G _{leiding}	gewicht leiding per strekkende meter
G _{water}	gewicht water (per strekkende meter in leiding)
GWS	grondwaterstand
q _{n,r}	gereduceerde gronddruk op bovenkant leiding
T	wrijvingweerstand grond-leiding, per strekkende meter
x	horizontale coördinaat
z	verticale coördinaat, diepte onder maaiveld
δ	wandwrijvingshoek
$\sigma'_{h,as}$	effectieve horizontale spanning op niveau as leiding
ϕ	hoek van inwendige wrijving

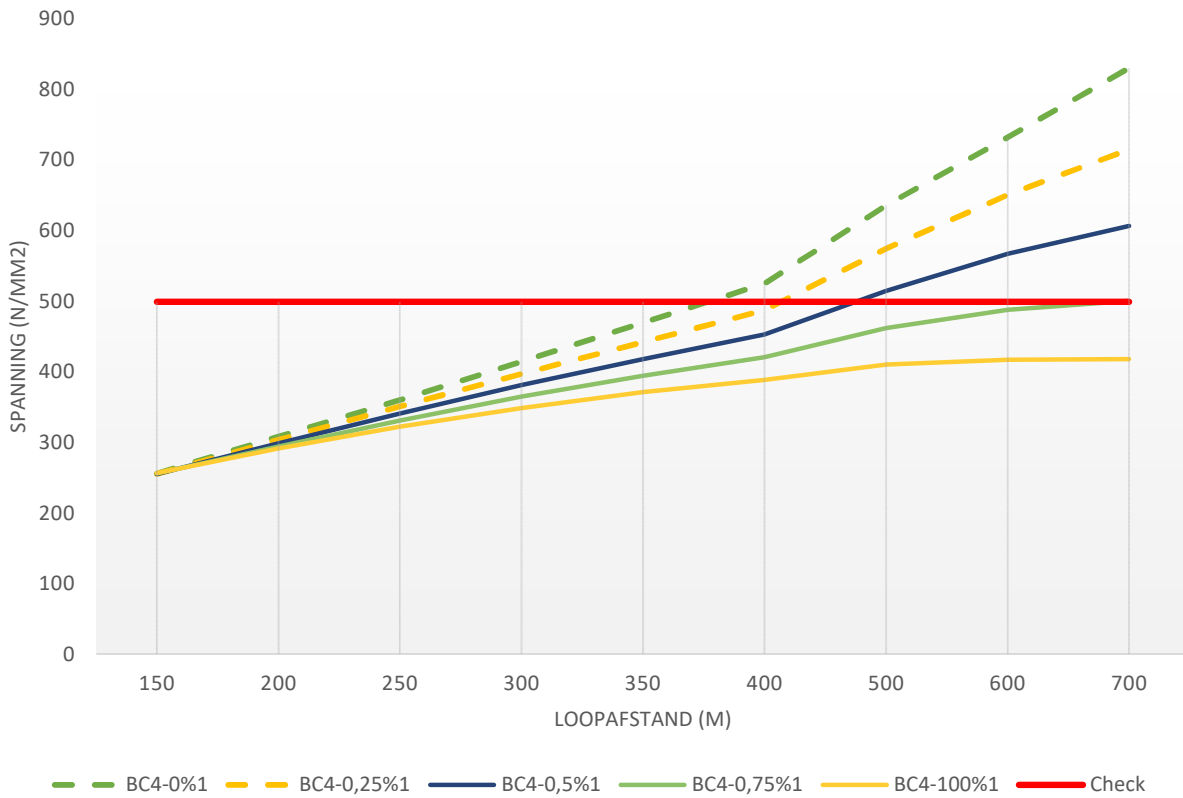
Bijlage 4

Berekende Von Mises spanningen ligging in zand

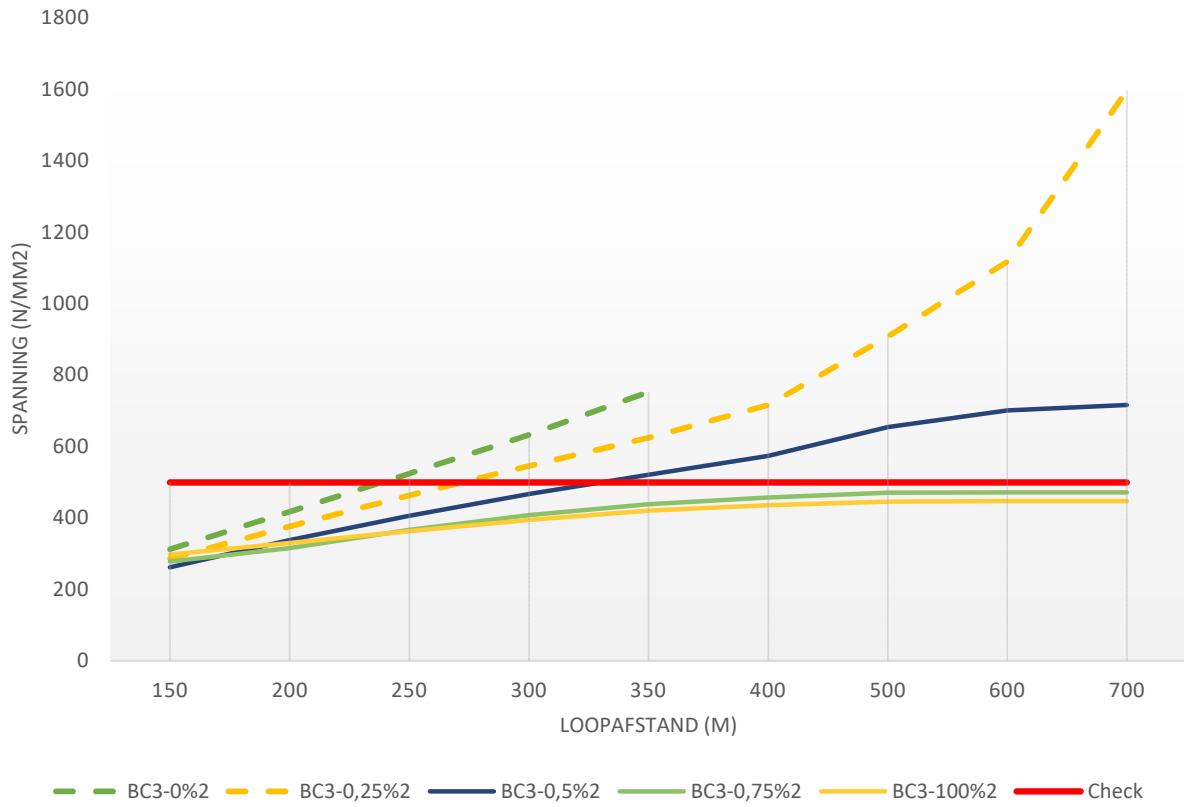
1 - Meter dekking - Von Mises



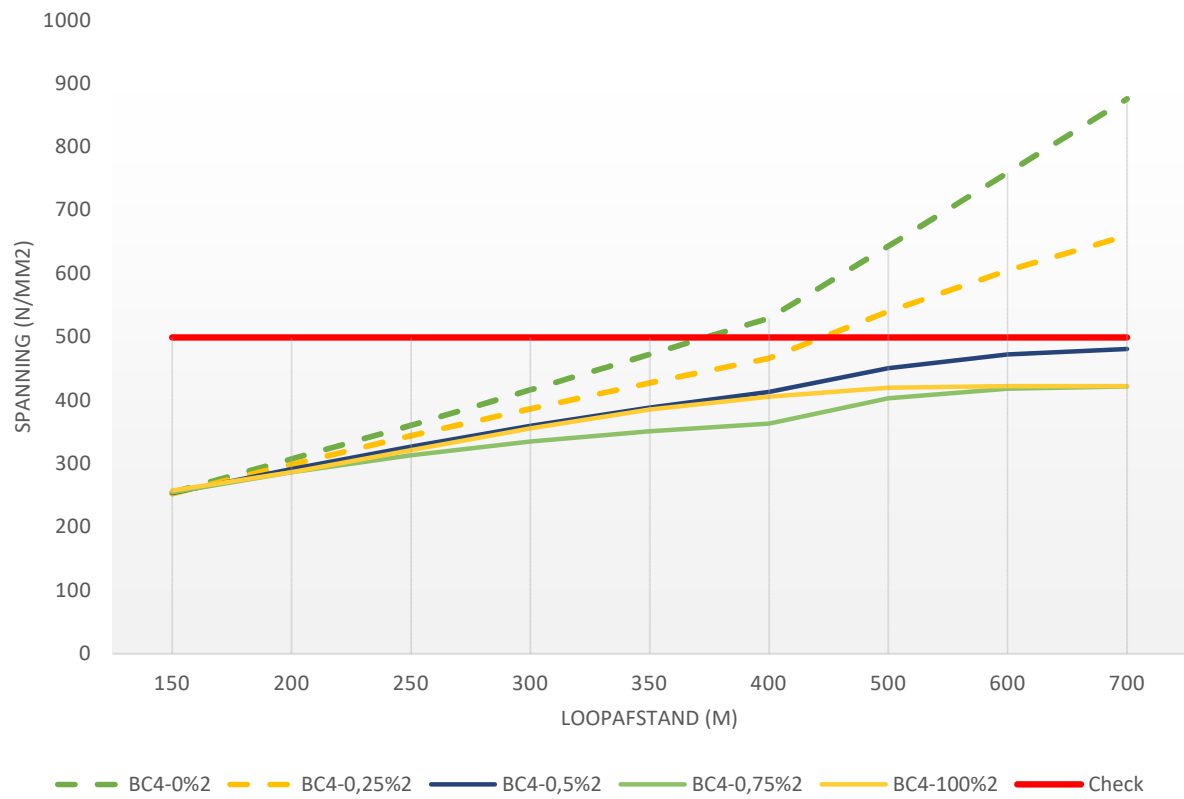
1 - Meter dekking - Von Mises



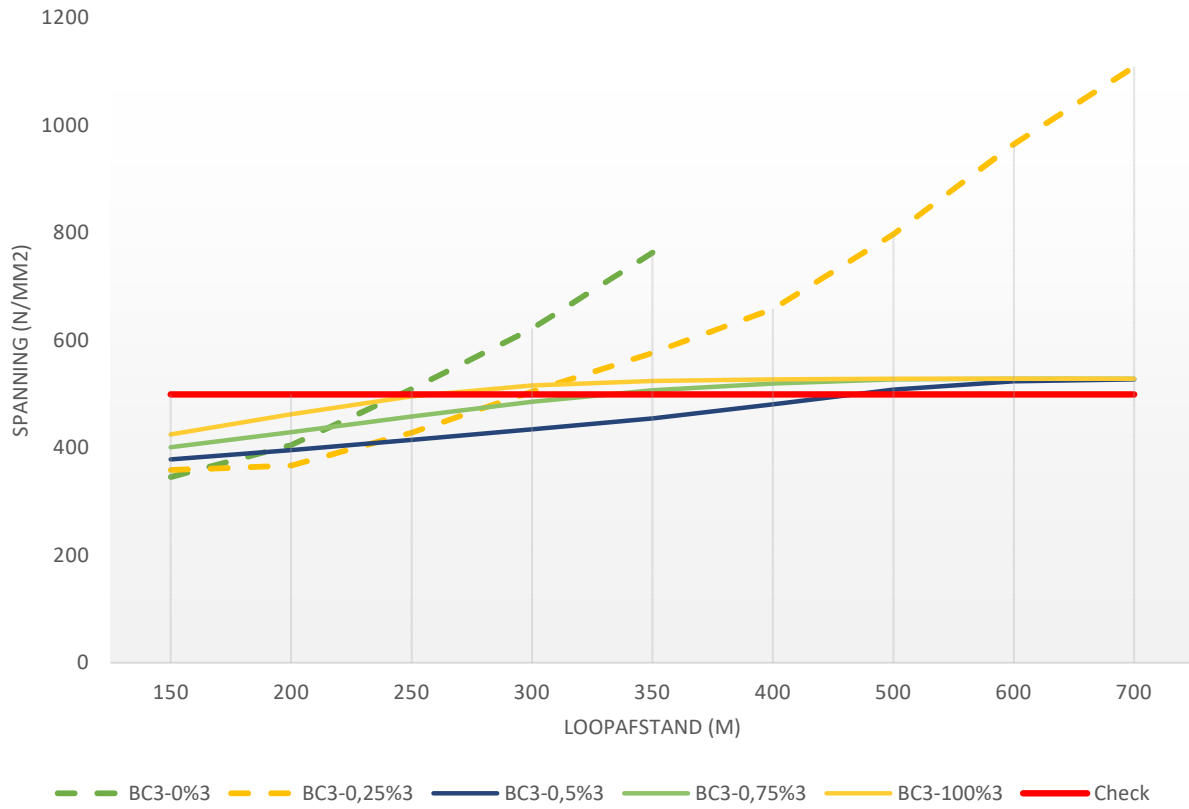
2 - Meter dekking - Von Mises



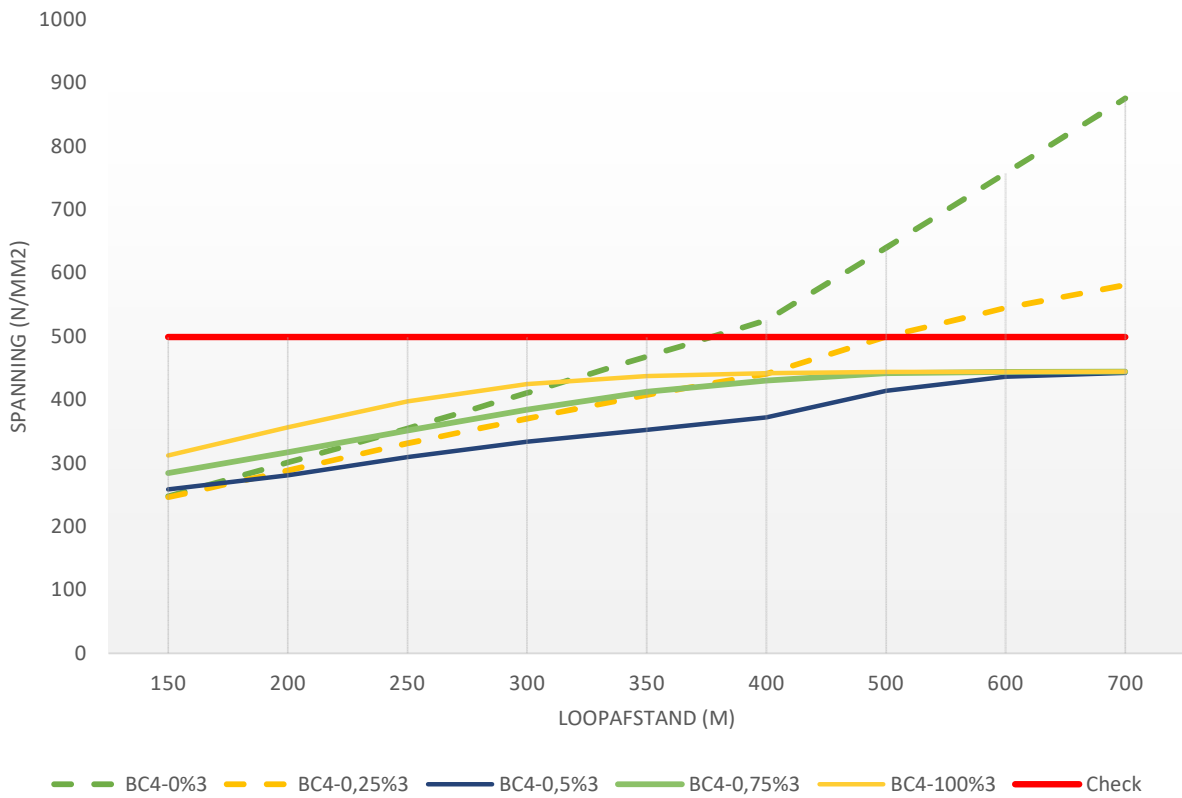
2 - Meter dekking - Von Mises



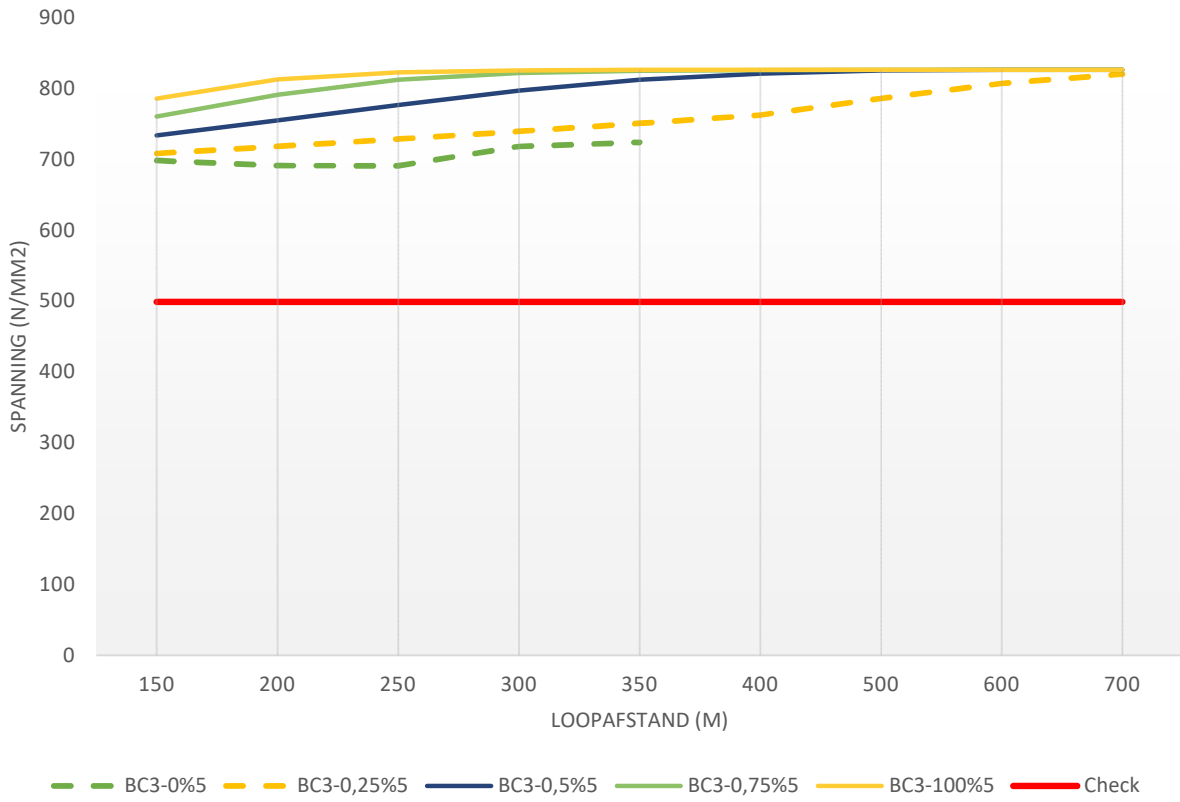
3 - Meter dekking - Von Mises



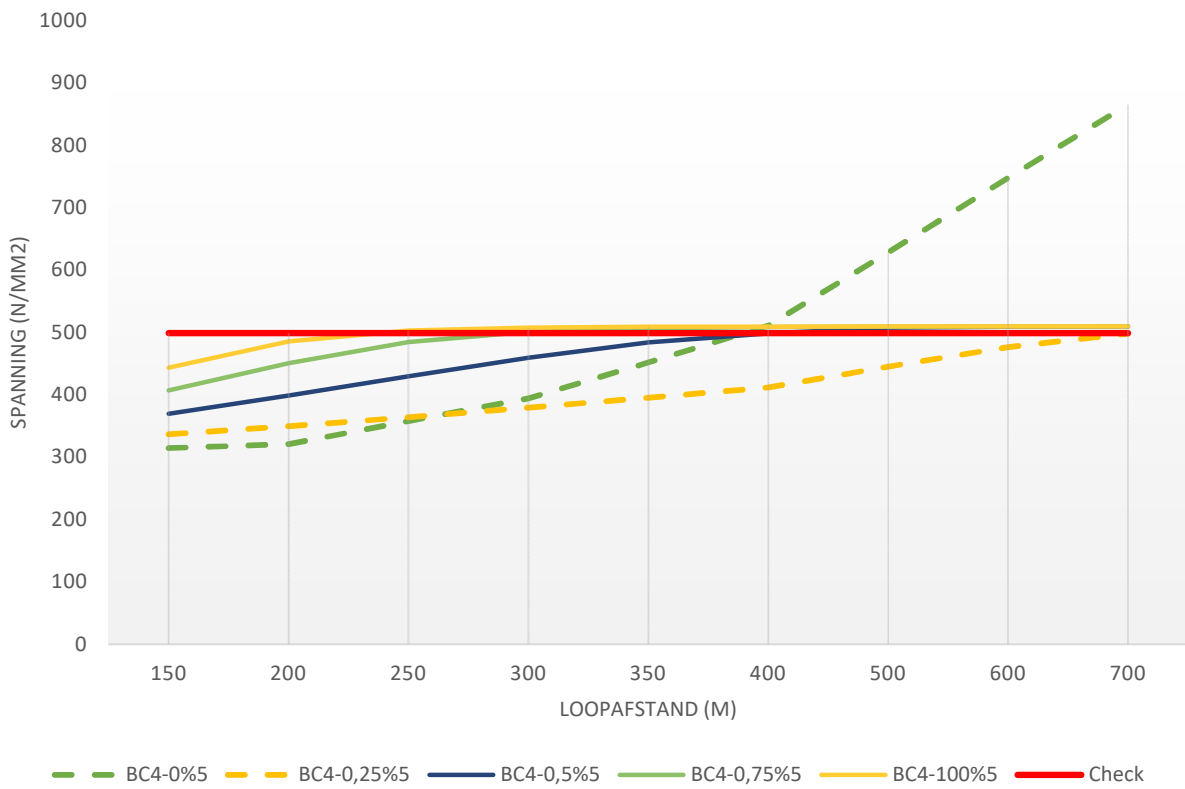
3 - Meter dekking - Von Mises



5 - Meter dekking - Von Mises



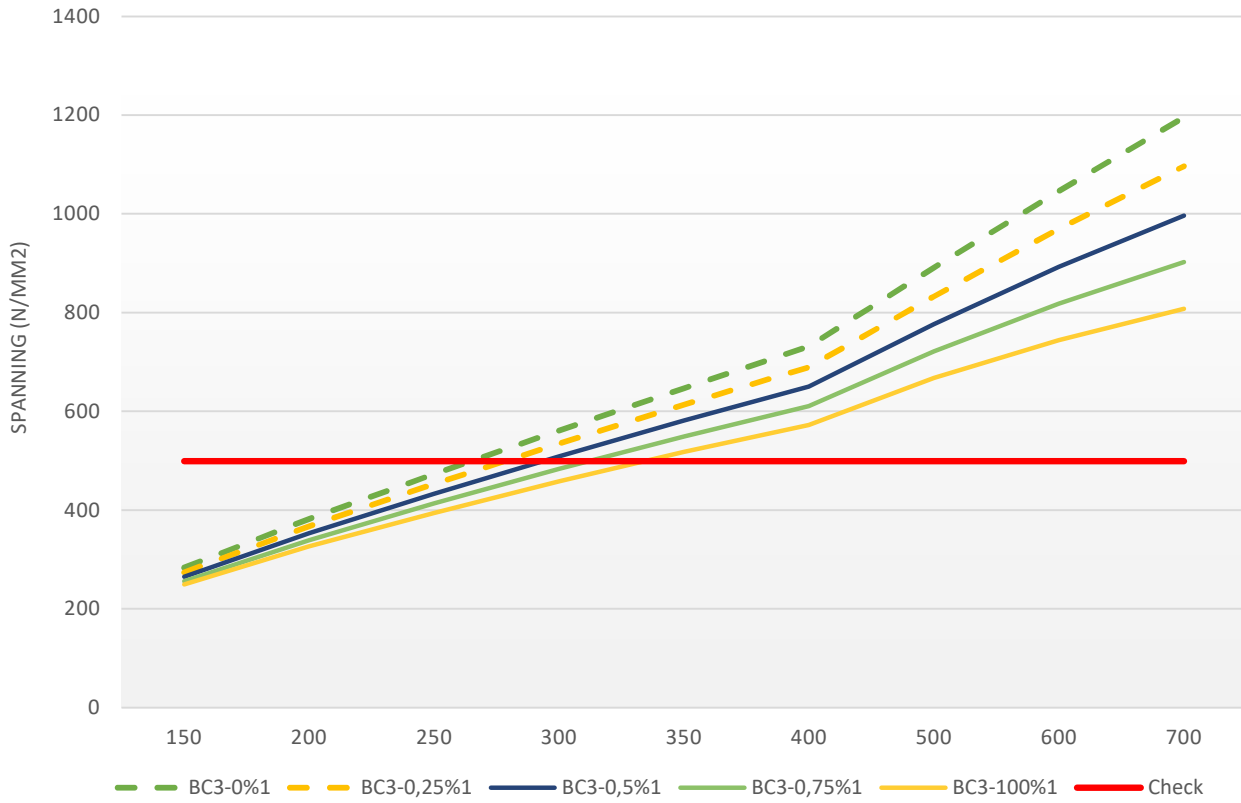
5 - Meter dekking - Von Mises



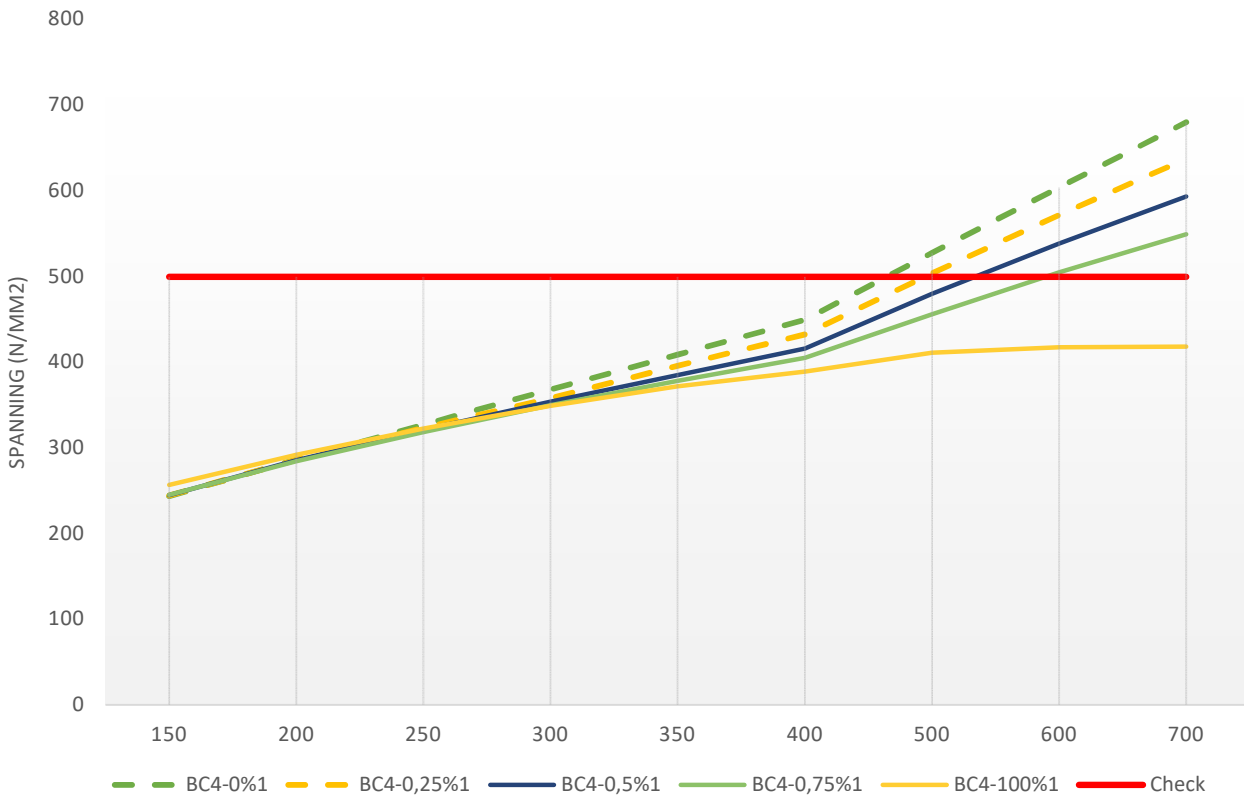
Bijlage 5

Berekende Von Mises spanningen ligging in klei

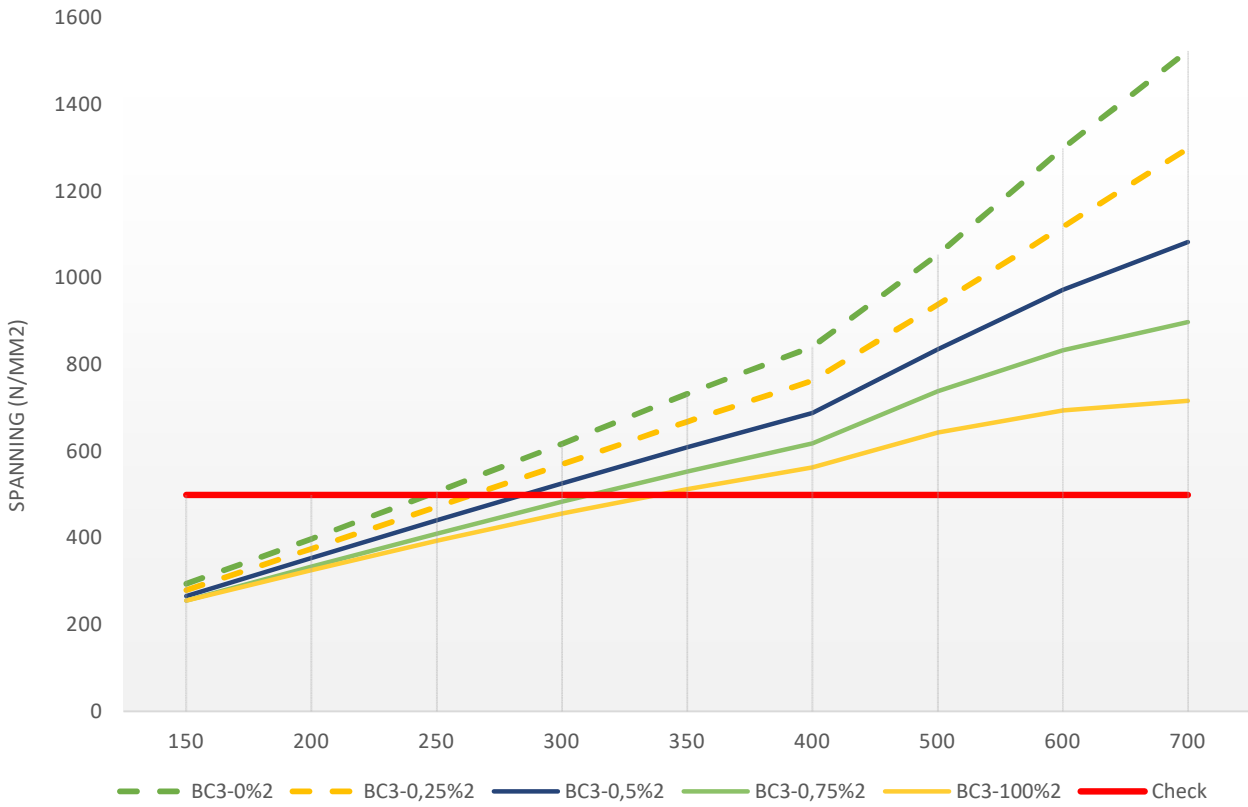
1 - Meter dekking - Von Mises



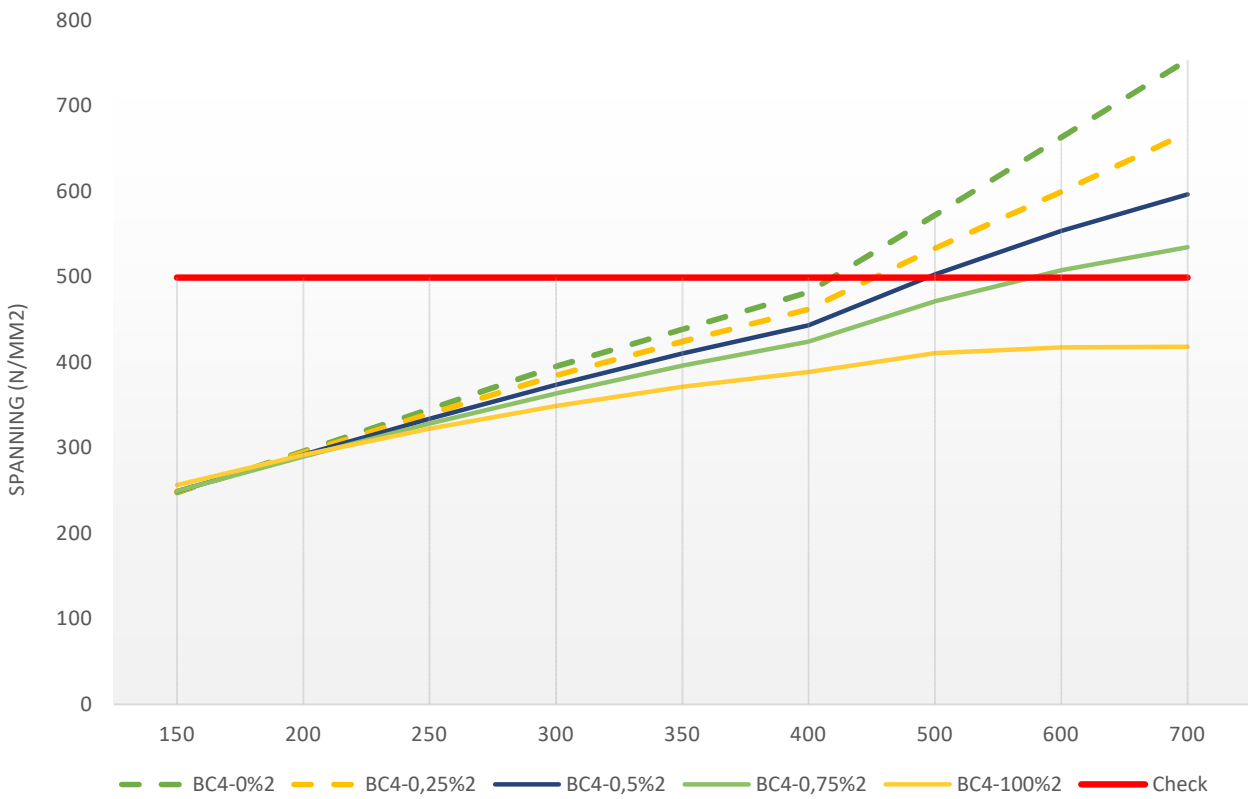
1 - Meter dekking - Von Mises



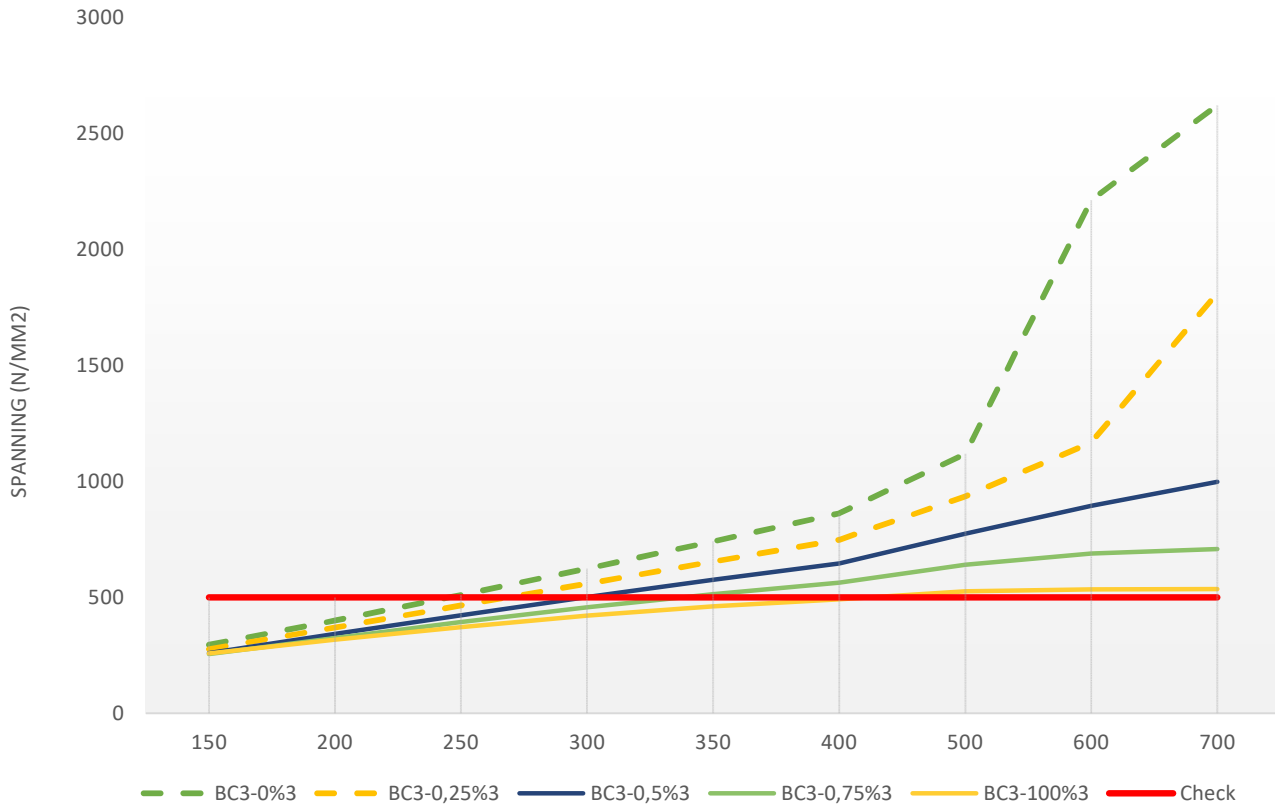
2 - Meter dekking - Von Mises



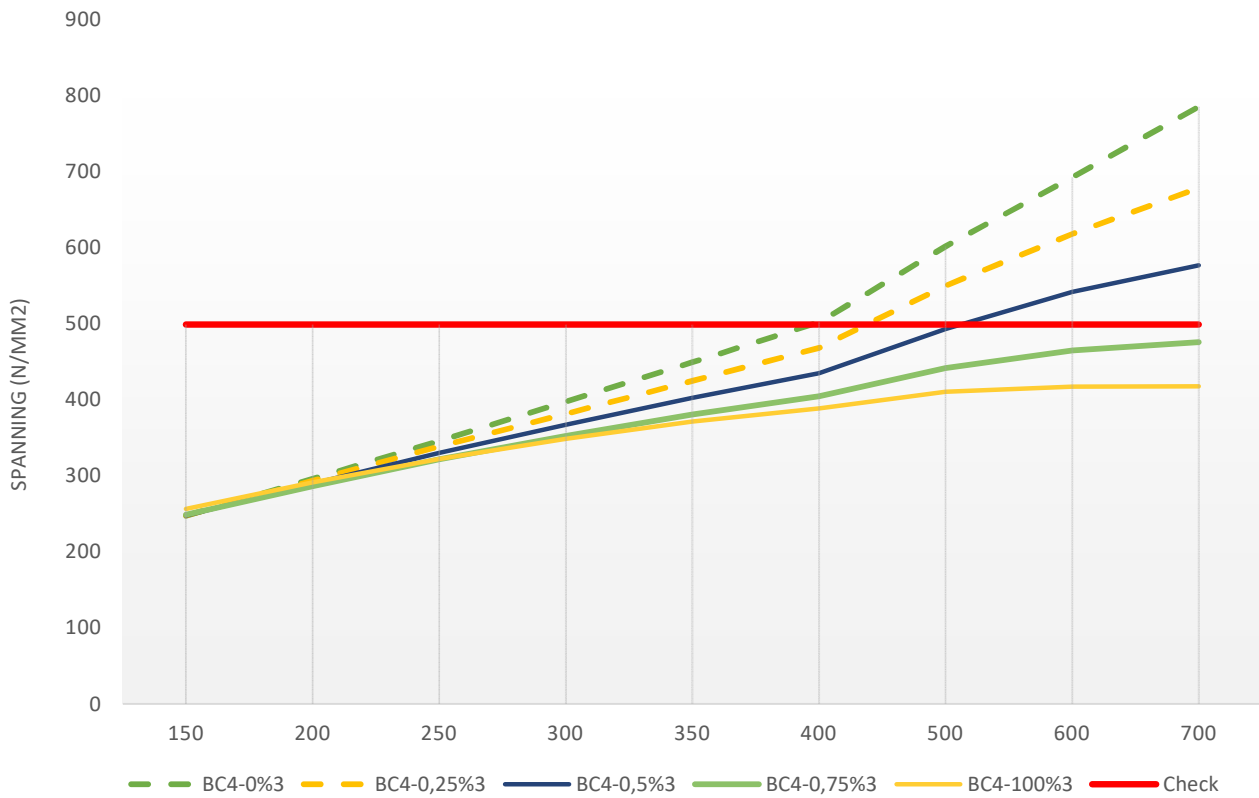
2 - Meter dekking - Von Mises



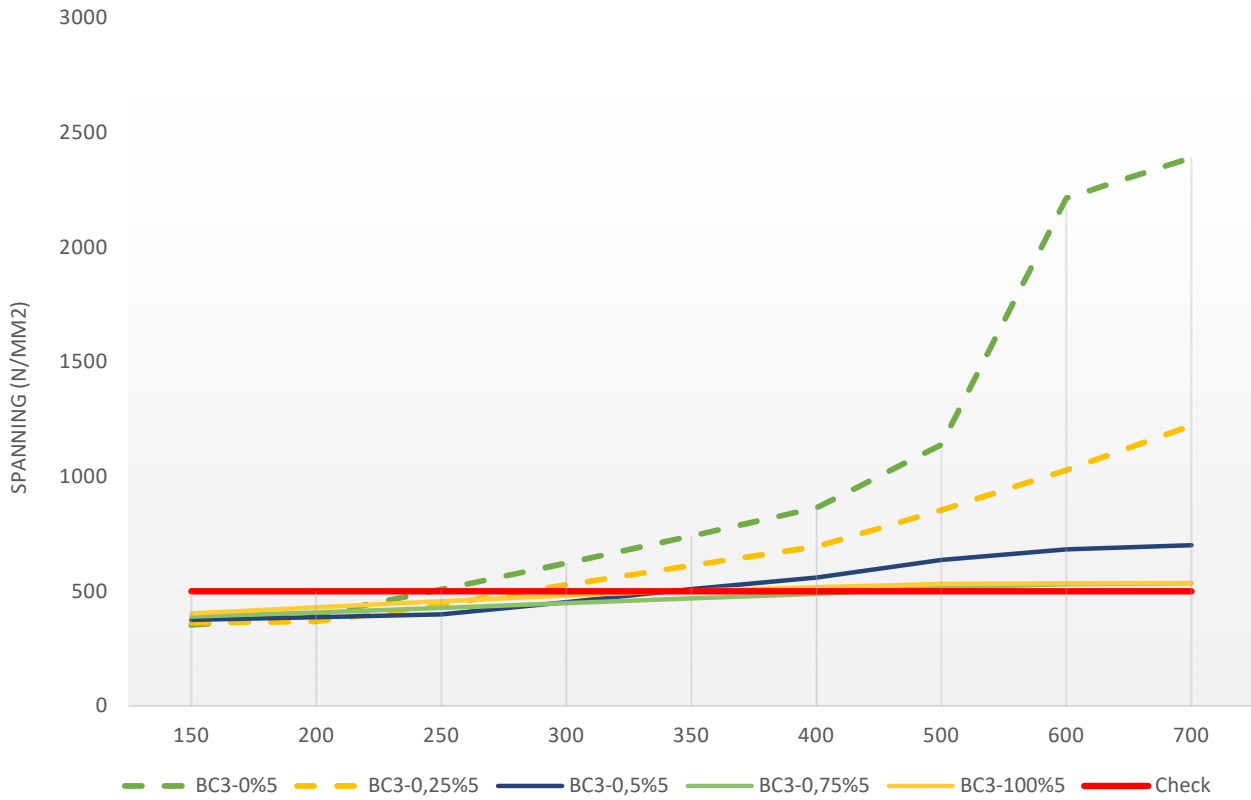
3 - Meter dekking - Von Mises



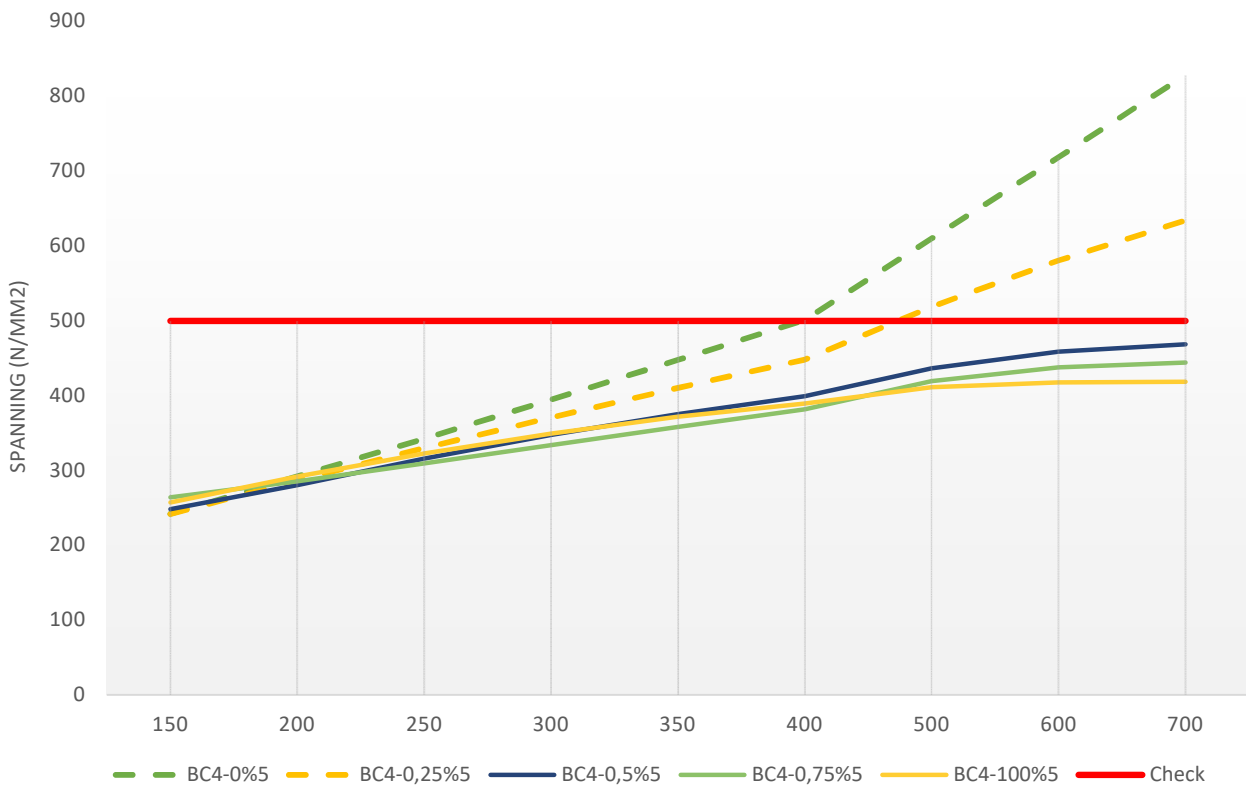
3 - Meter dekking - Von Mises



5 - Meter dekking - Von Mises



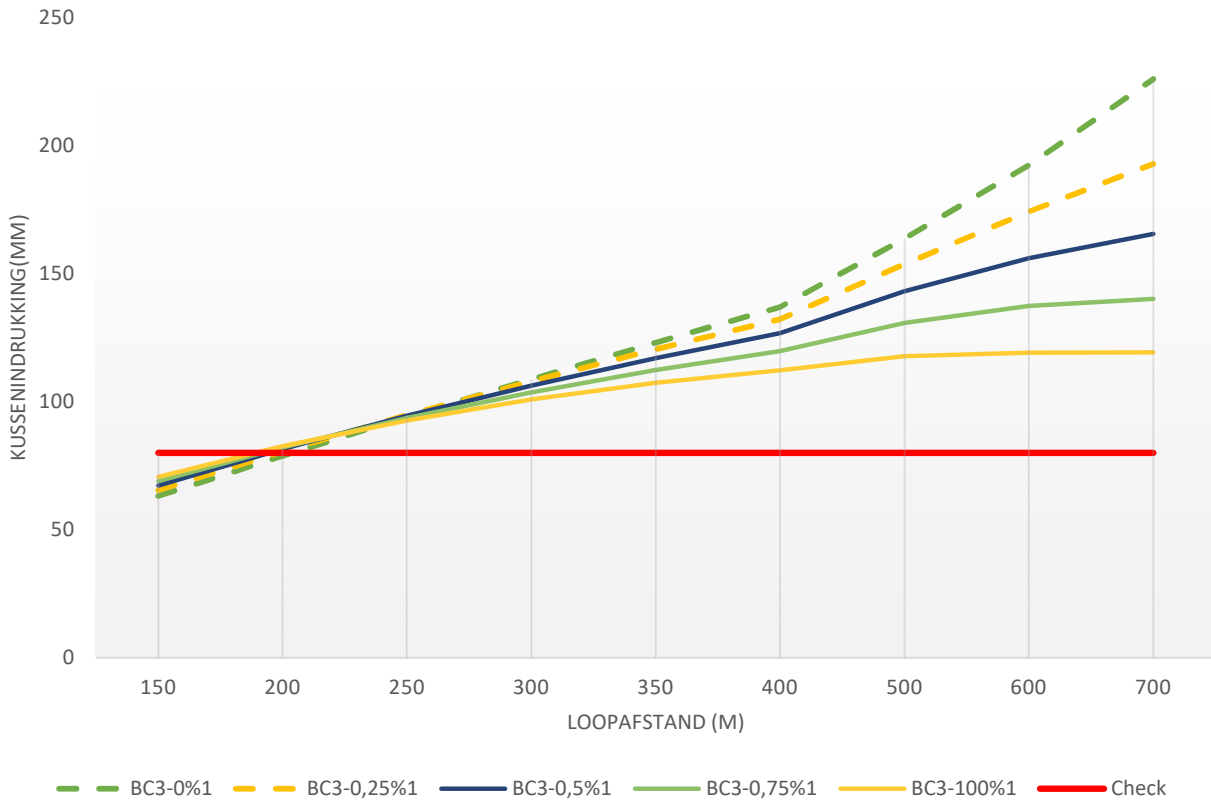
5 - Meter dekking - Von Mises



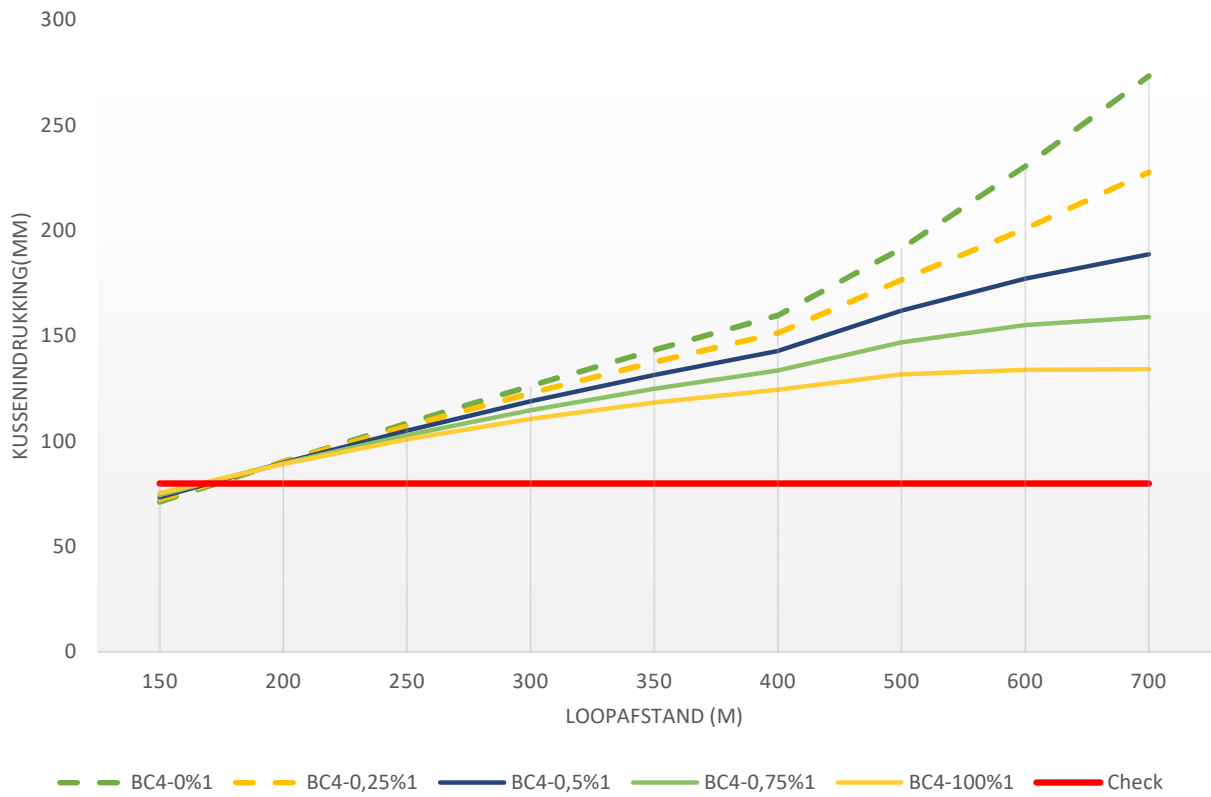
Bijlage 6

Berekende indrukking kussens ligging in zand

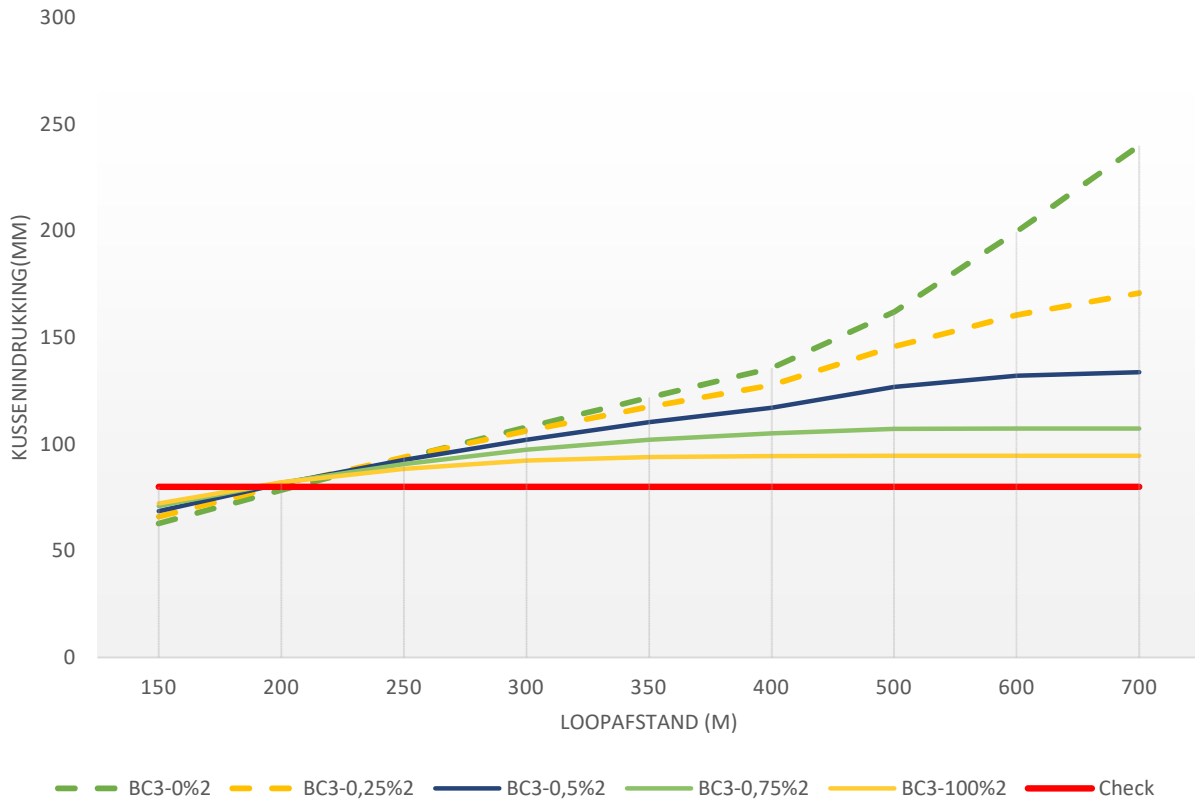
1 - Meter dekking - Indrukking Kussens



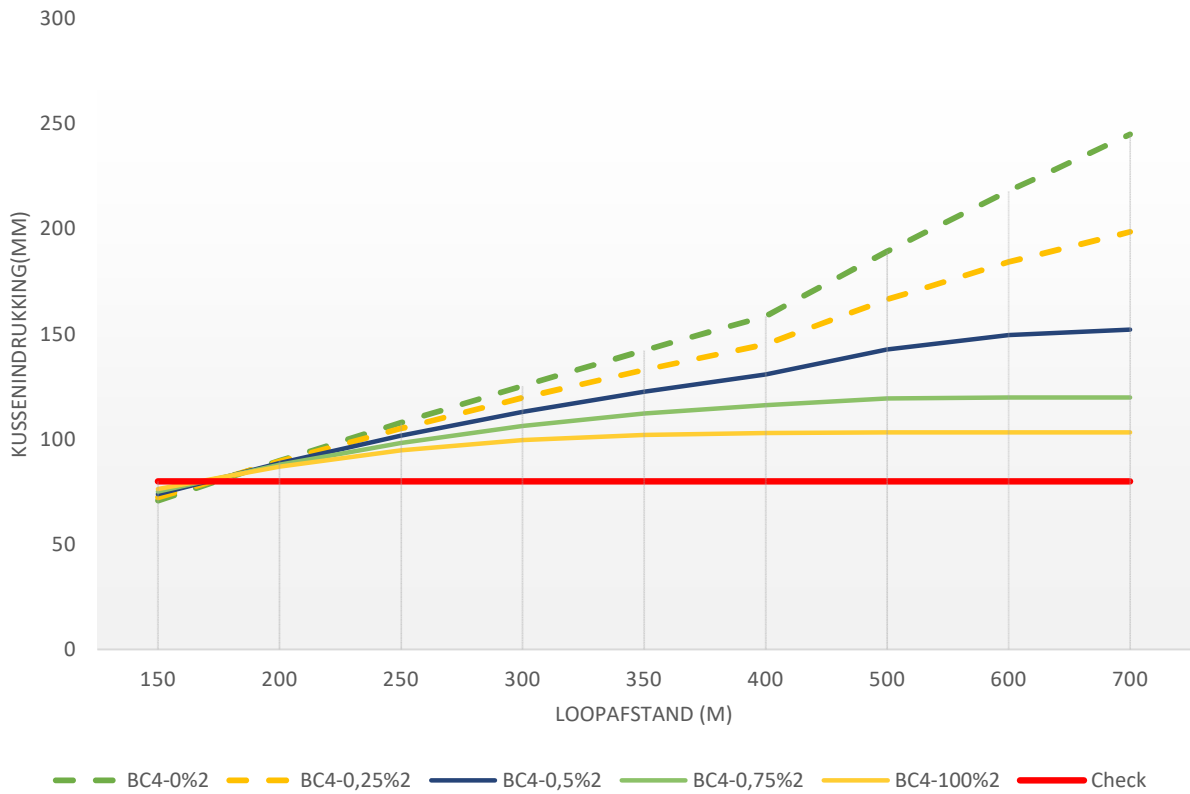
1 - Meter dekking - Indrukking Kussens



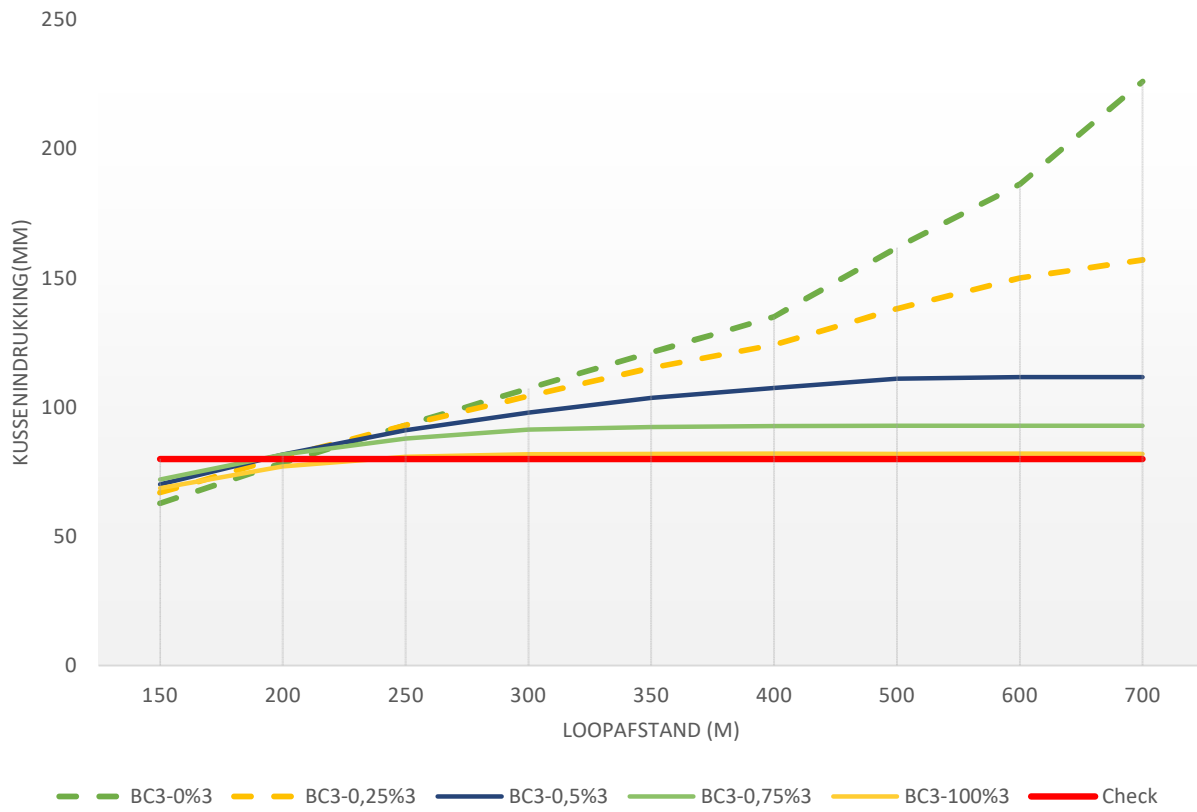
2 - Meter dekking - indrukking kussens



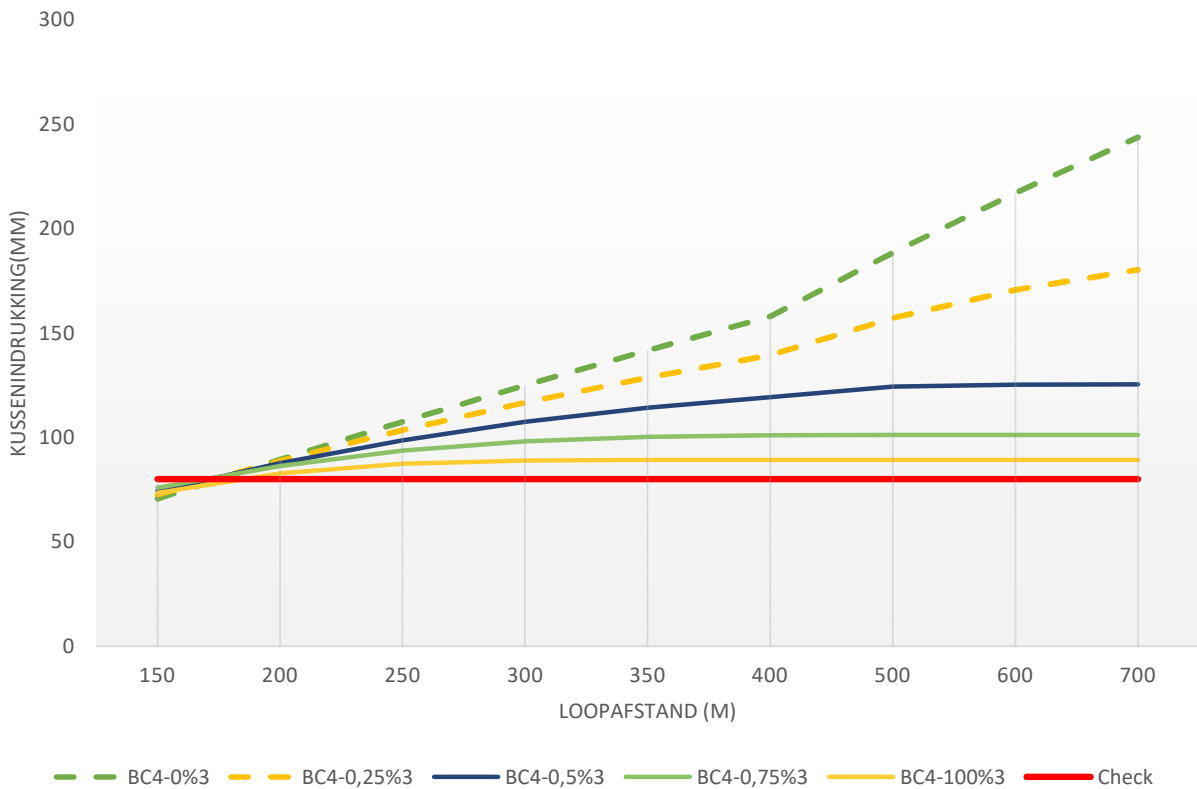
2 - Meter dekking - indrukking kussens



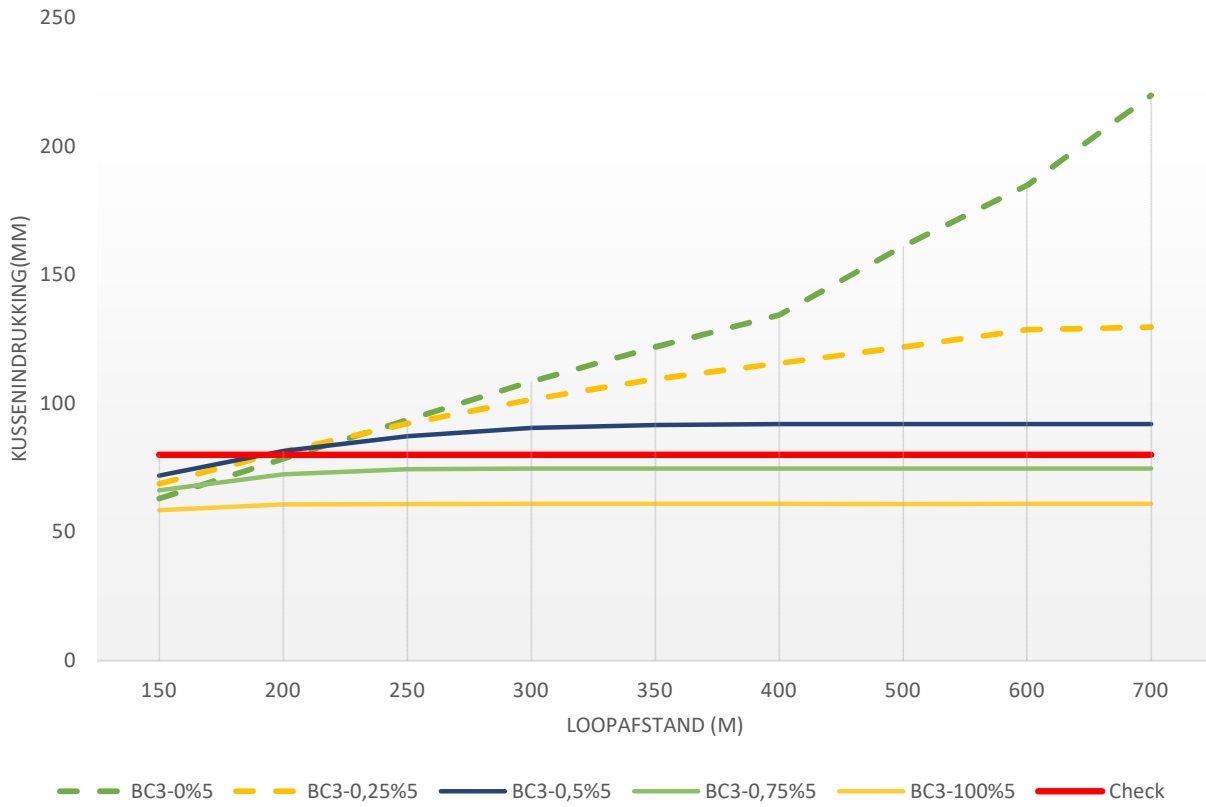
3 - Meter dekking - indrukking kussens



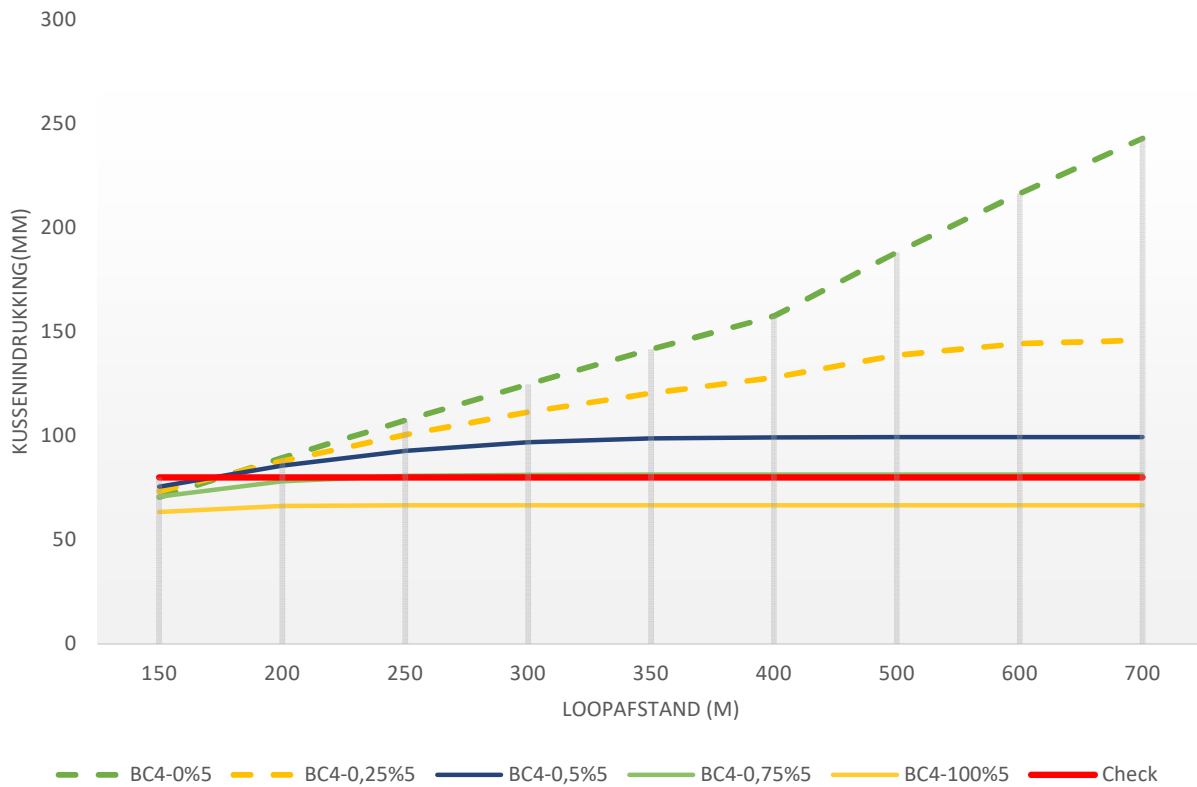
3 - Meter dekking - indrukking kussens



5 - Meter dekking - indrukking kussens



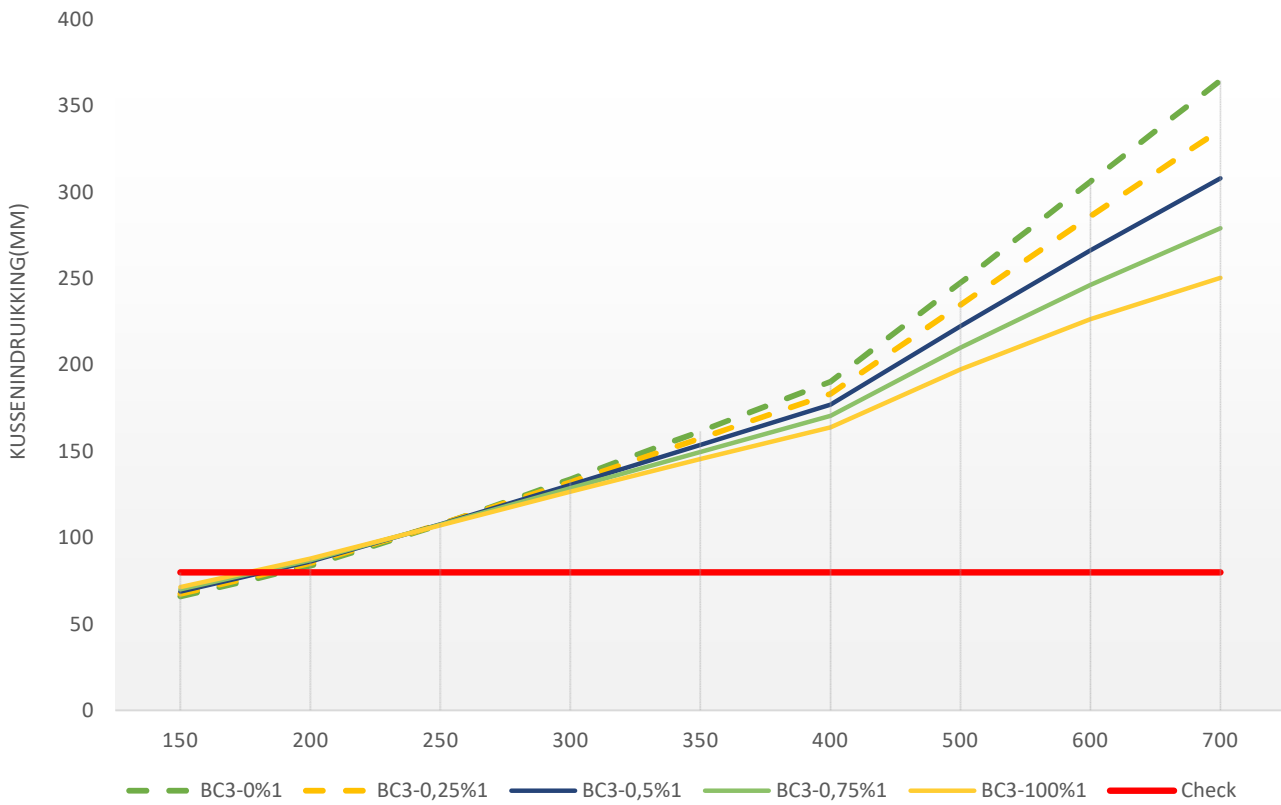
5 - Meter dekking - indrukking kussens



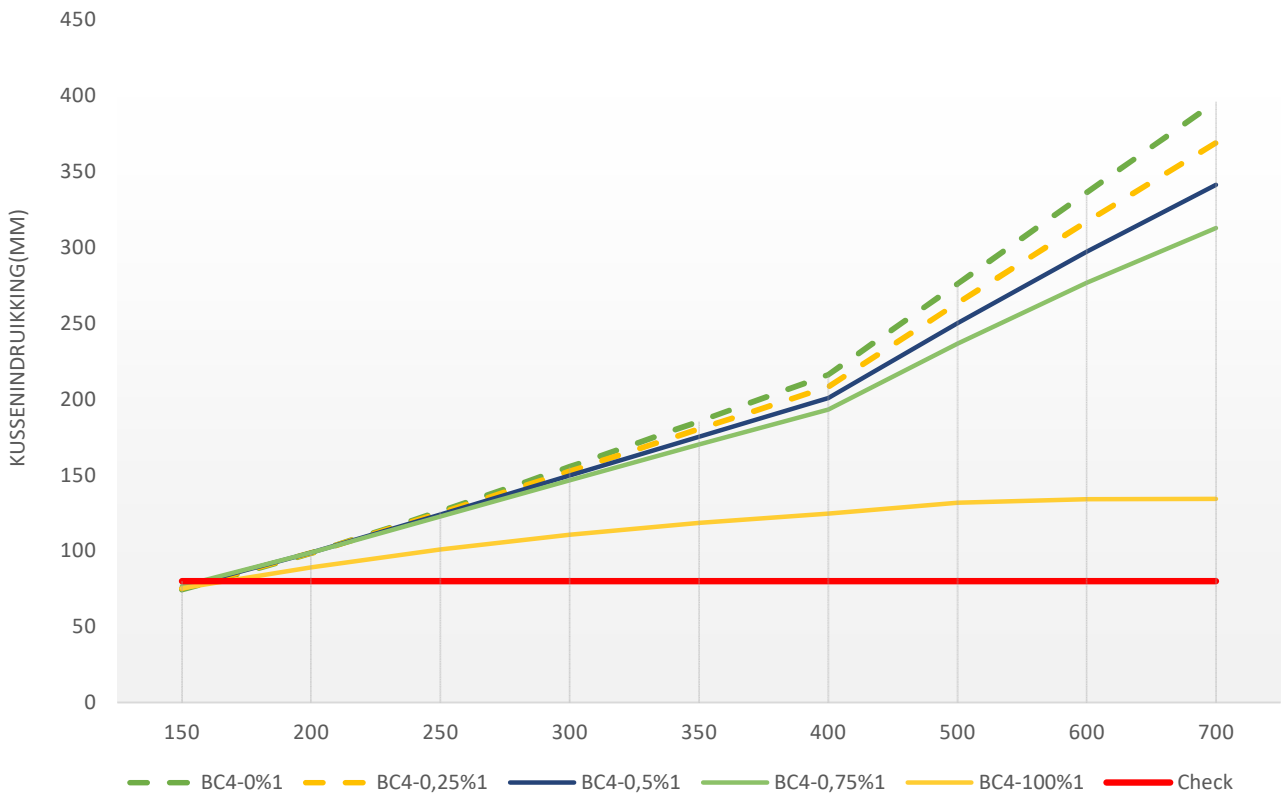
Bijlage 7

Berekende indrukking kussens ligging in klei

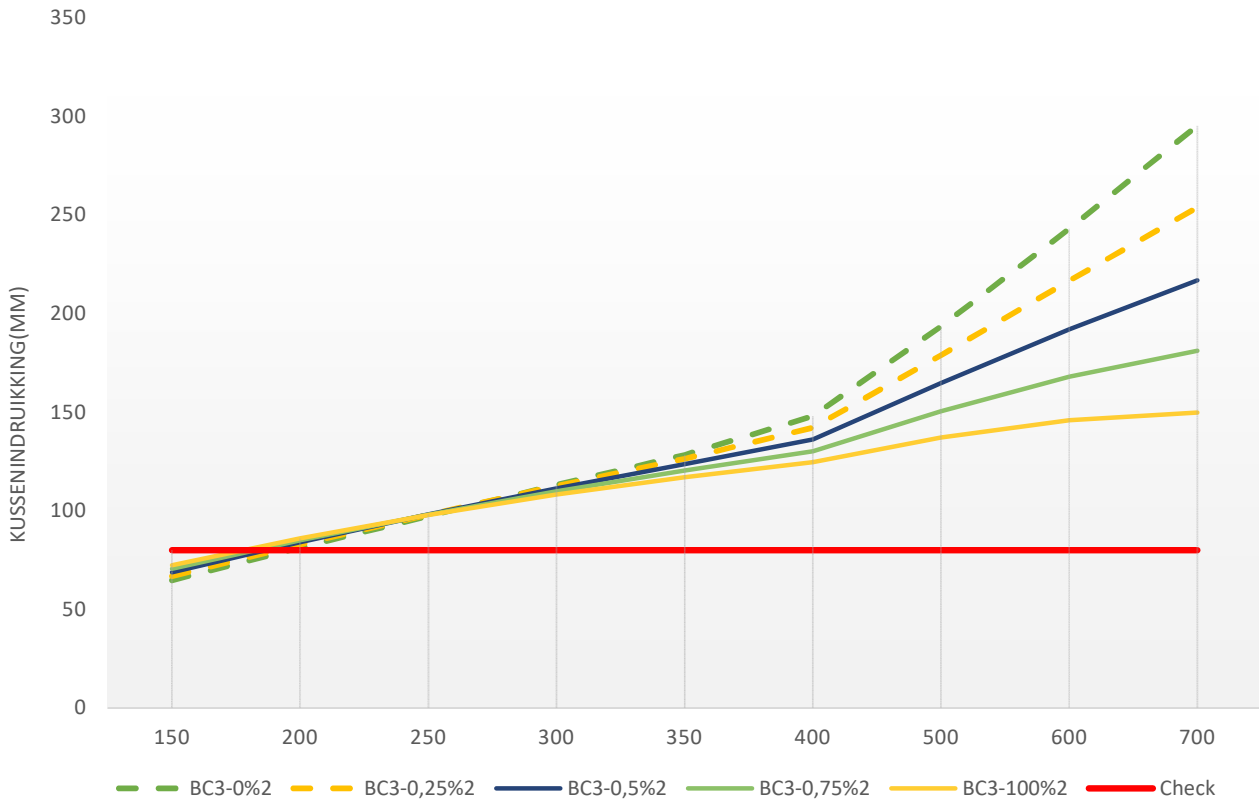
1 - Meter dekking - Indrukking Kussens



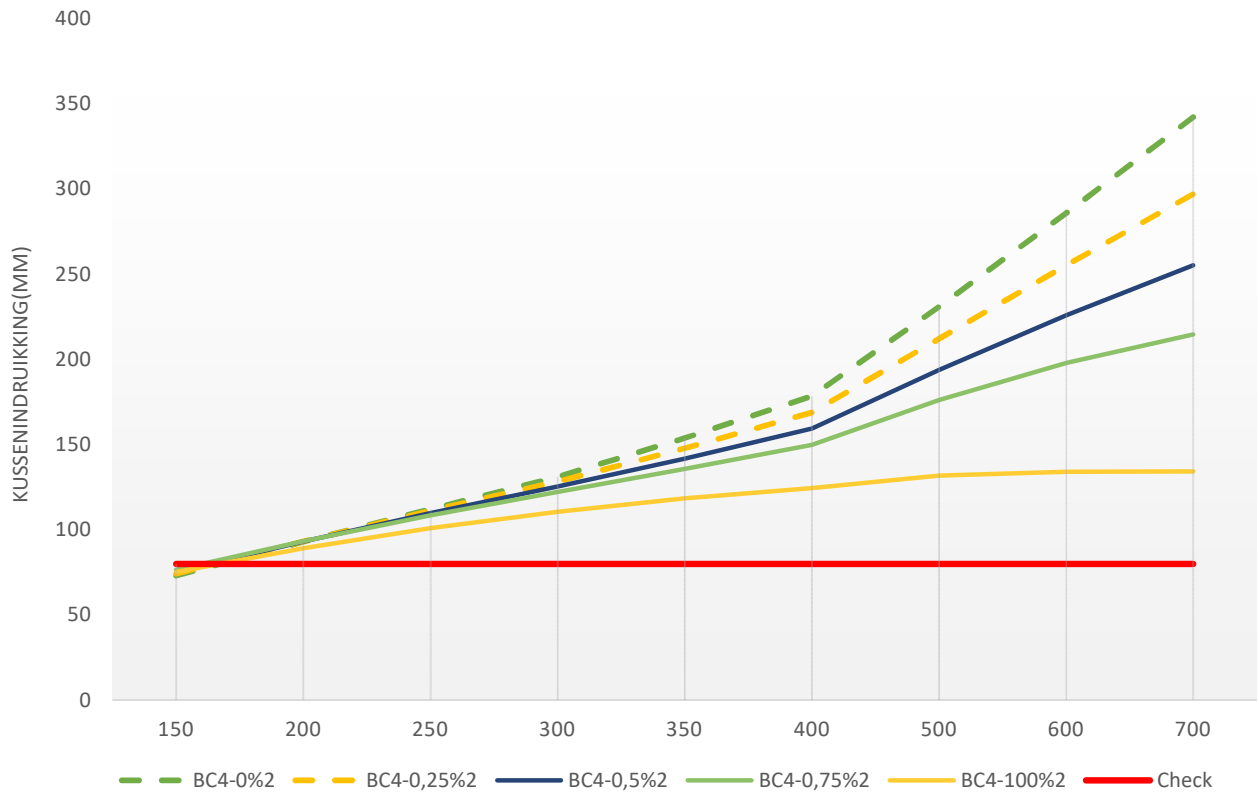
1 - Meter dekking - Indrukking Kussens



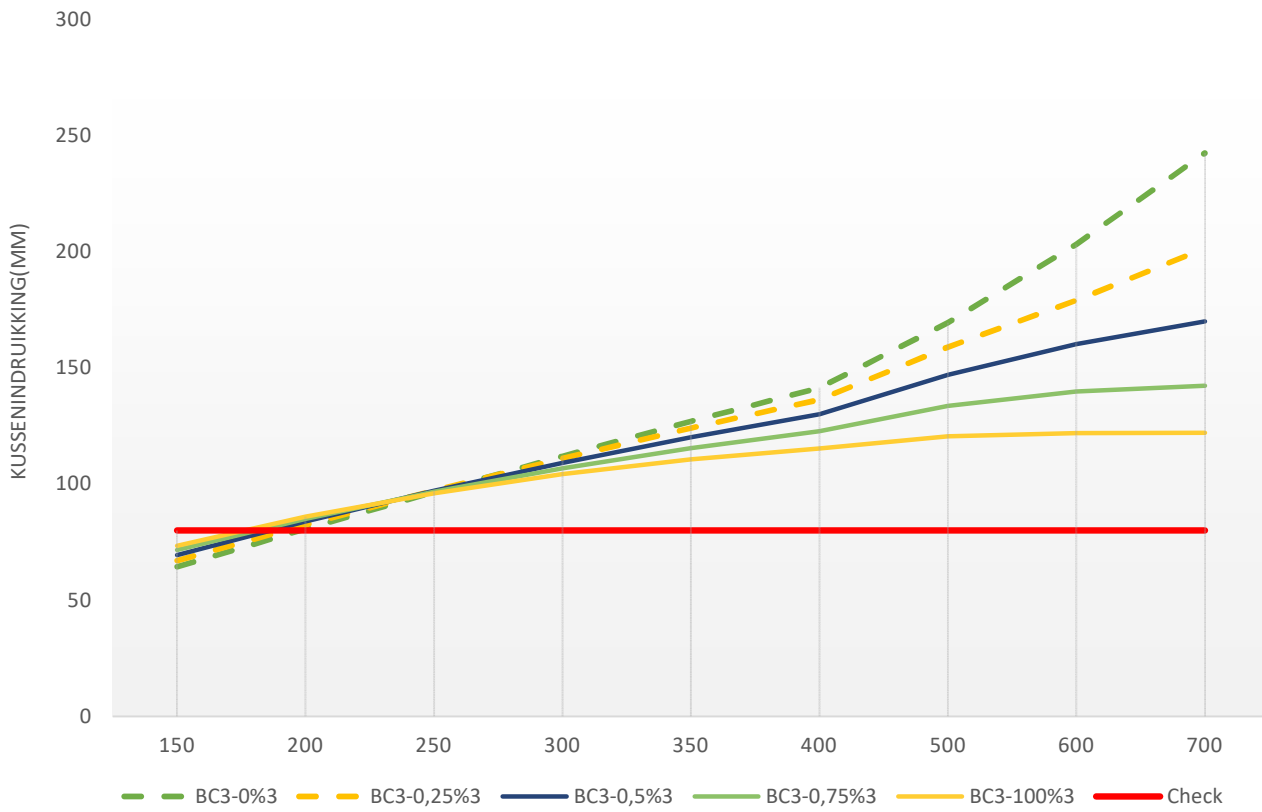
2 - Meter dekking - indrukking kussens



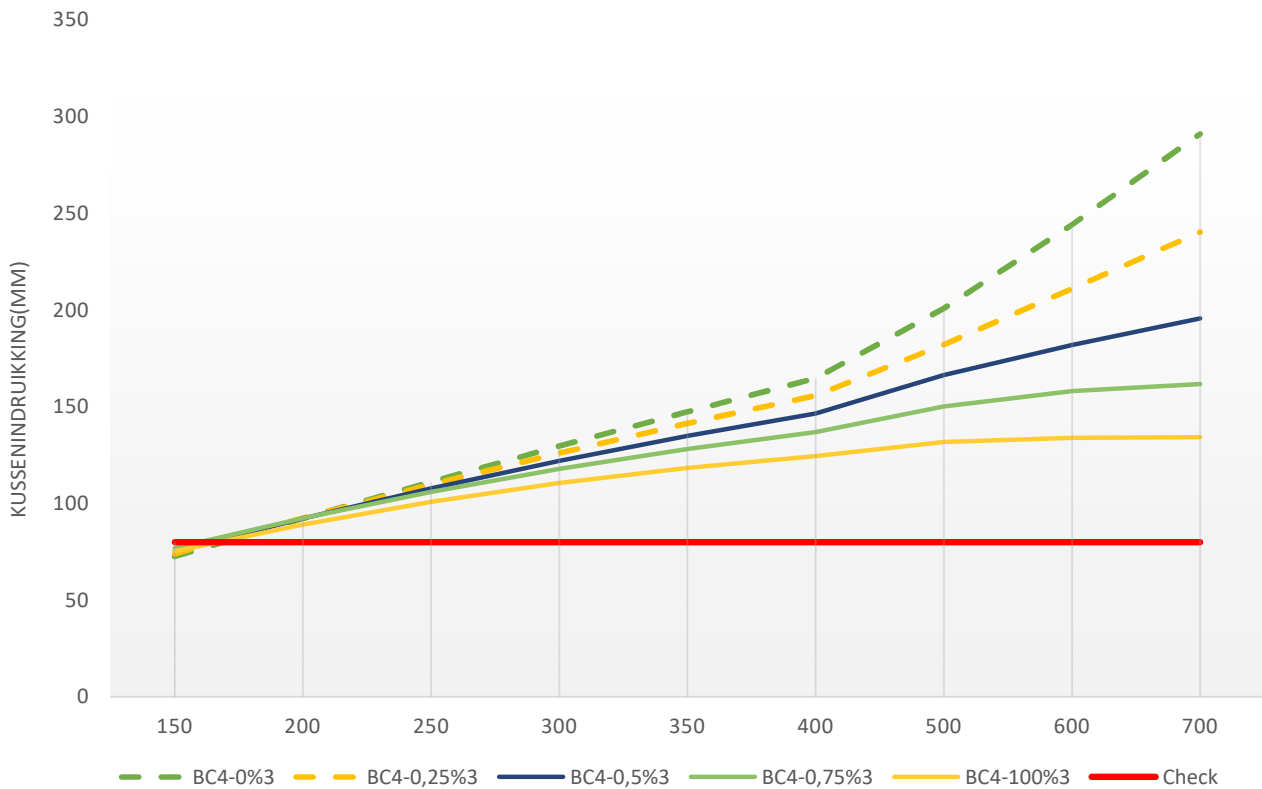
2 - Meter dekking - indrukking kussens



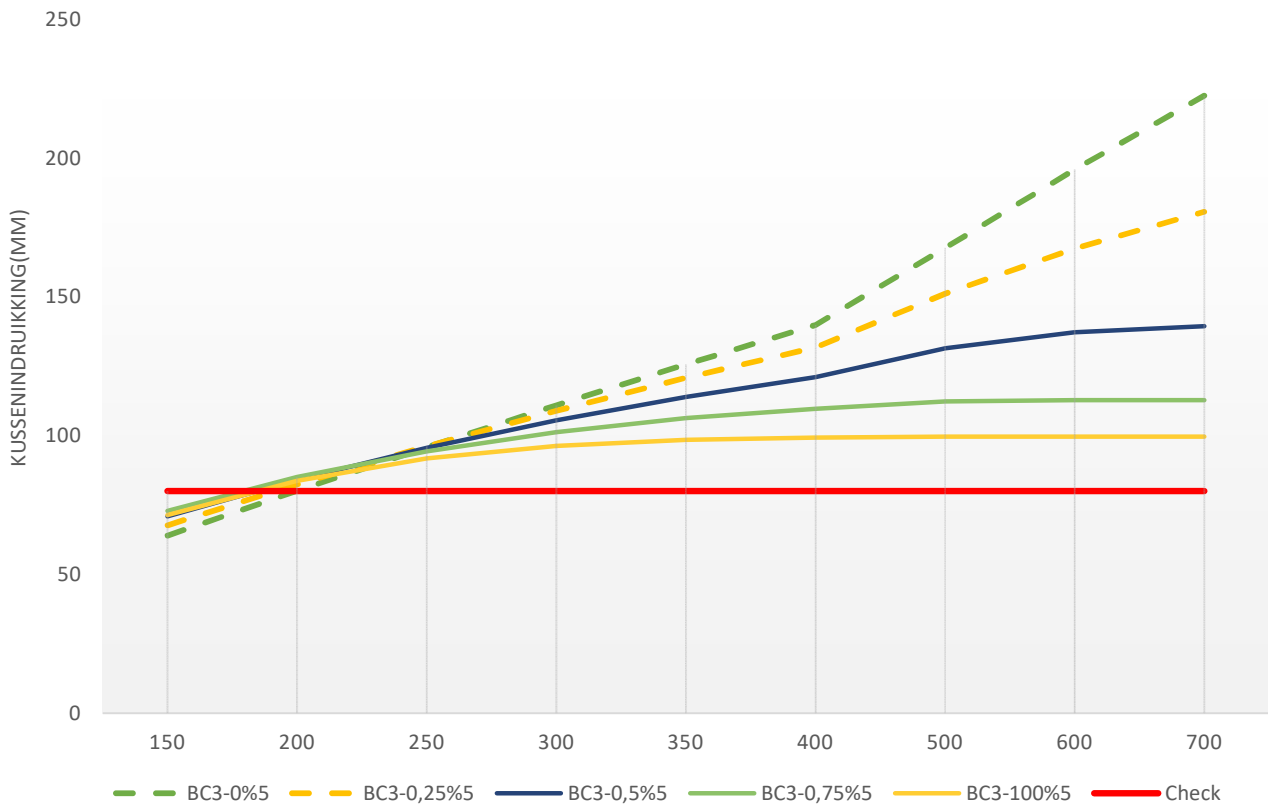
3 - Meter dekking - indrukking kussens



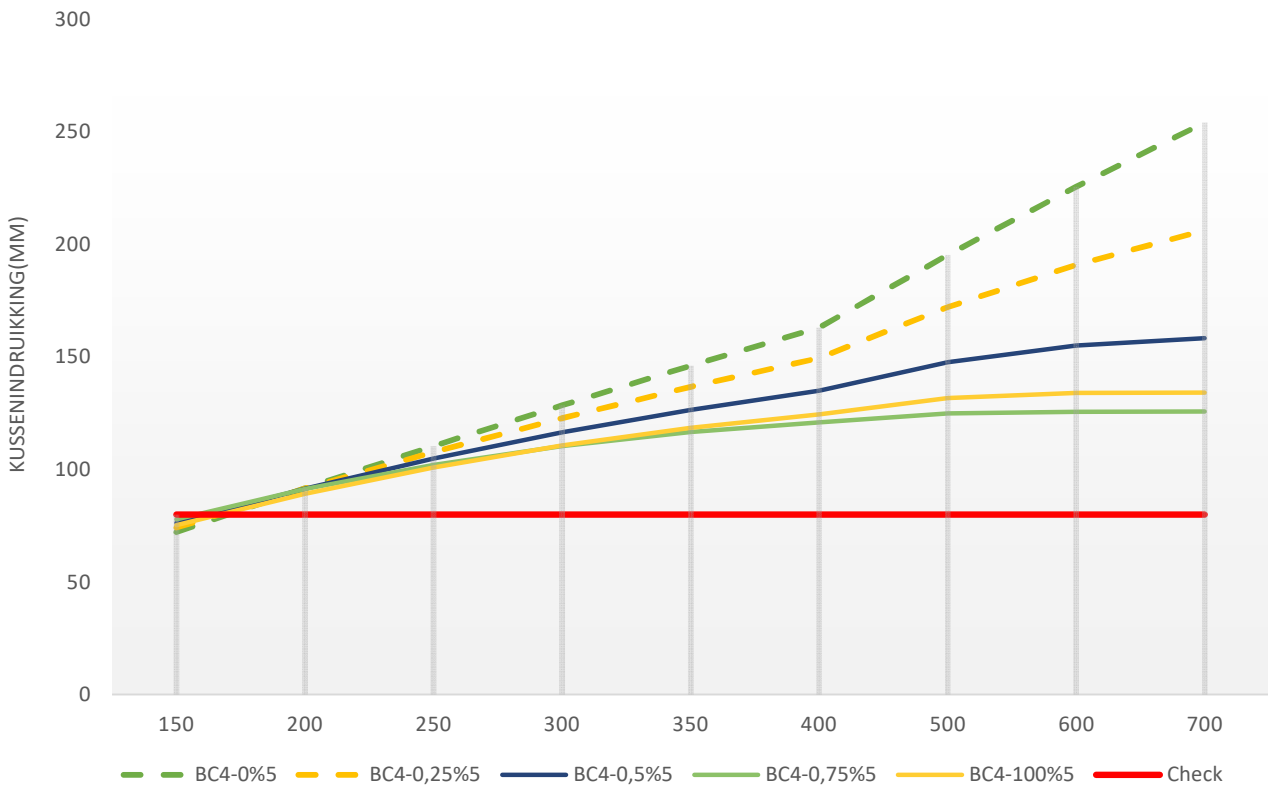
3 - Meter dekking - indrukking kussens



5 - Meter dekking - indrukking kussens



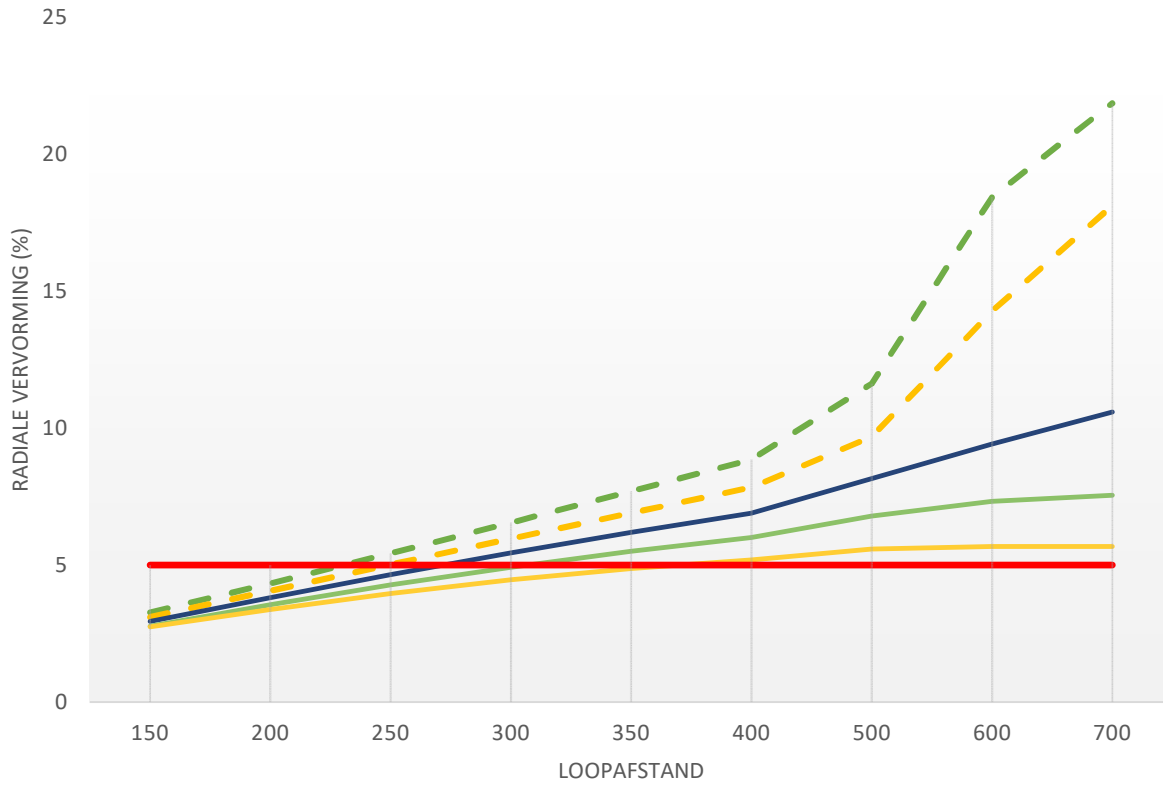
5 - Meter dekking - indrukking kussens



Bijlage 8

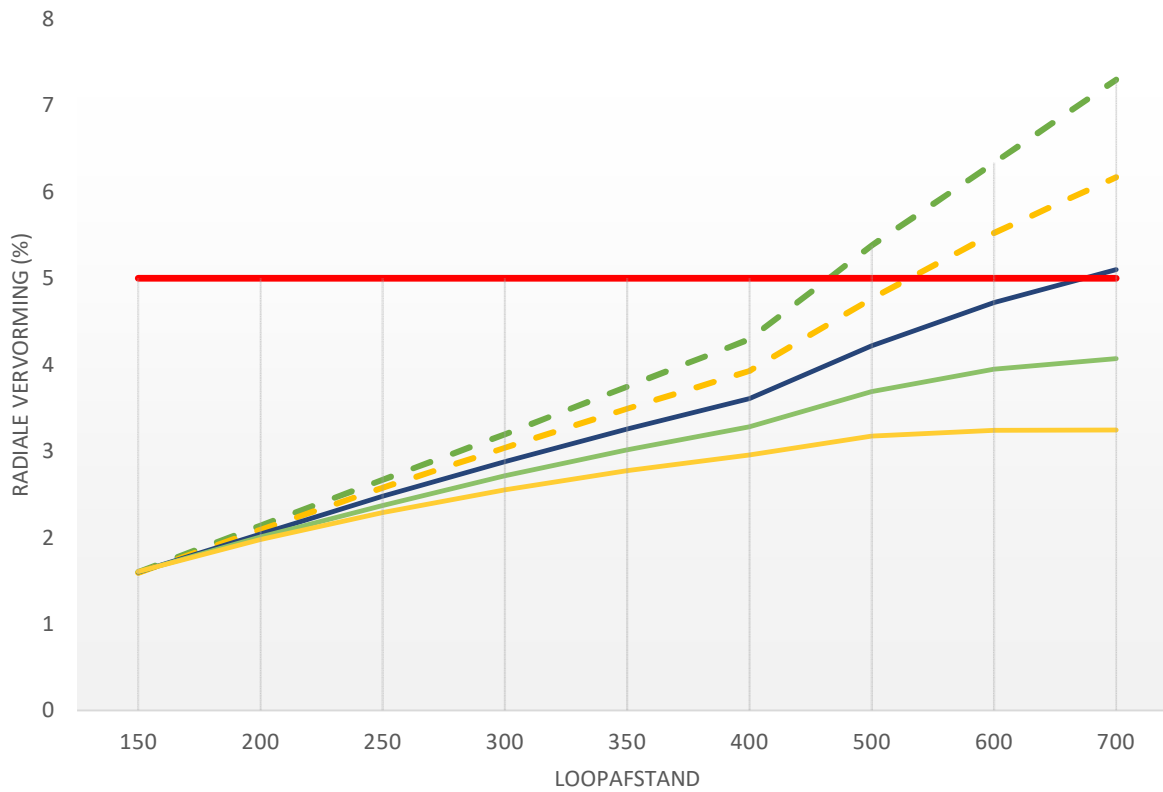
Berekende radiale vervormingen ligging in zand

1 - Meter dekking - Radiale Vervorming



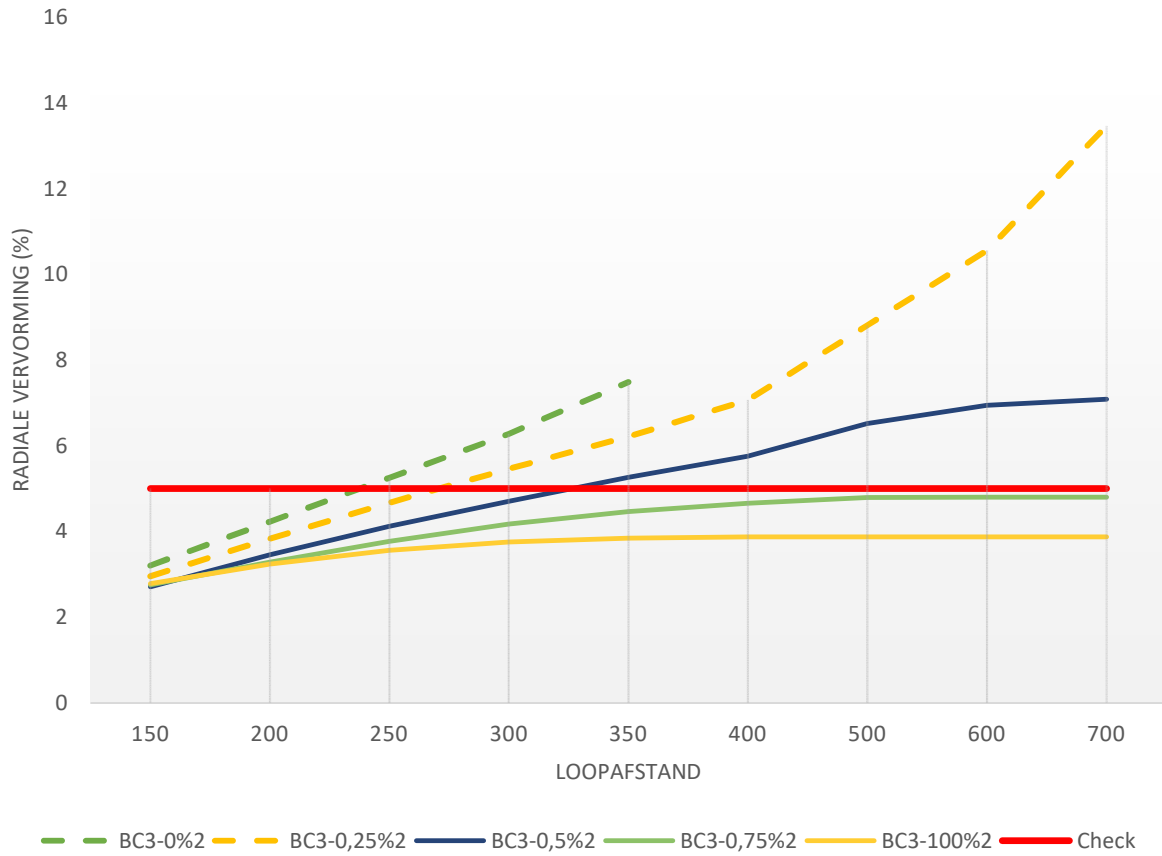
BC3-0%1 BC3-0,25%1 BC3-0,5%1 BC3-0,75%1 BC3-100%1 Check

1 - Meter dekking - Radiale vervorming

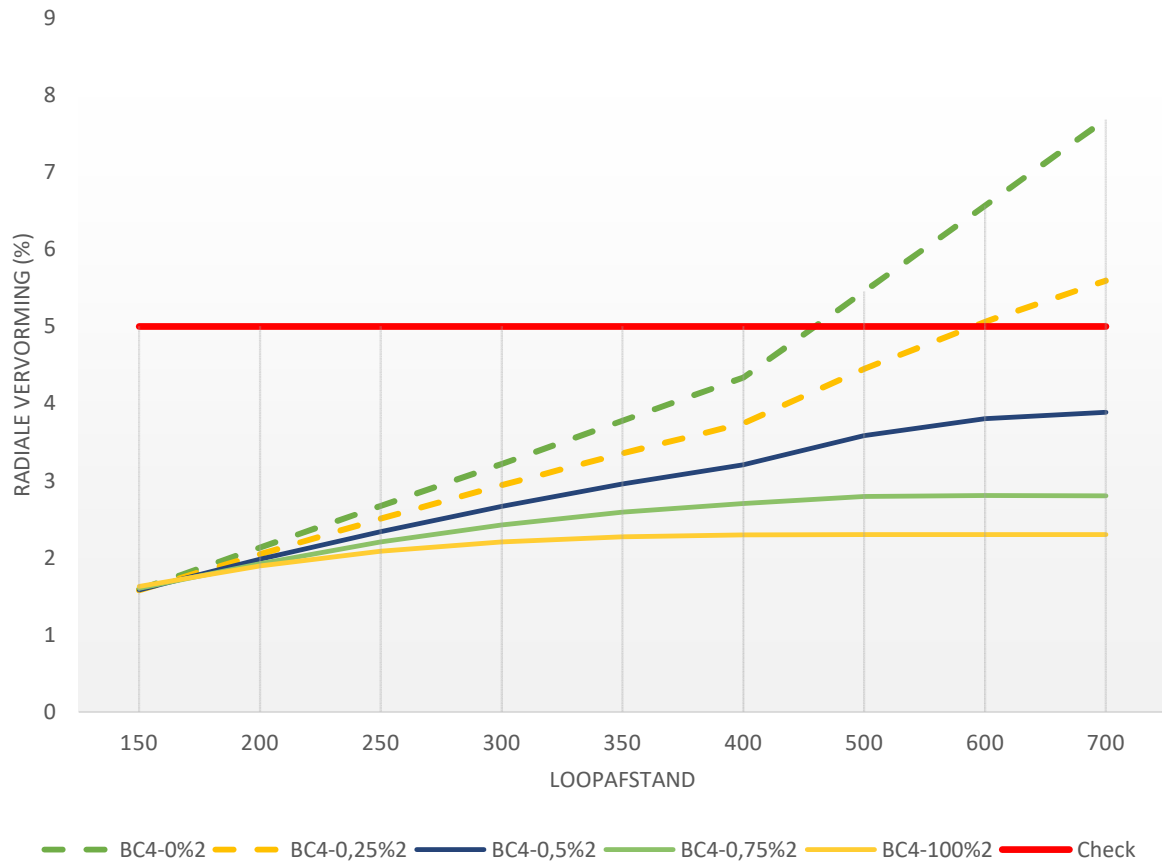


BC4-0%1 BC4-0,25%1 BC4-0,5%1 BC4-0,75%1 BC4-100%1 Check

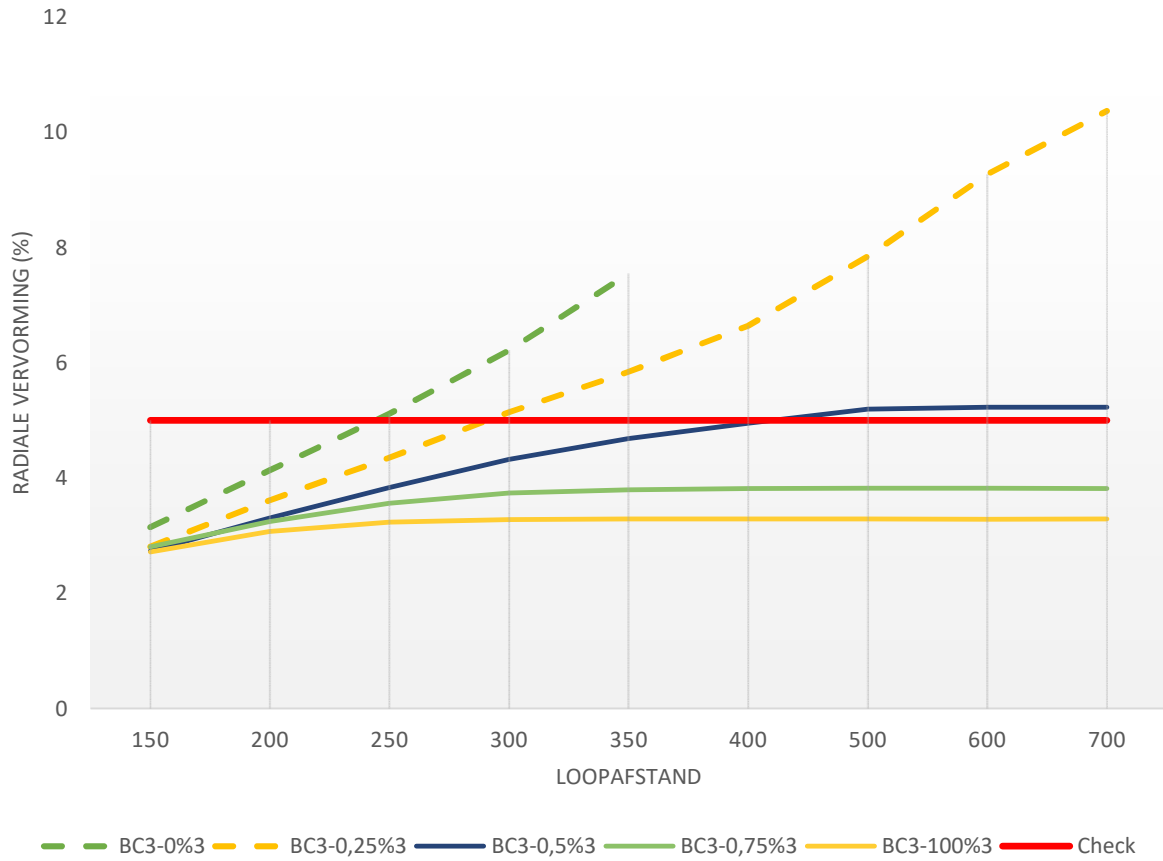
2 - Meter dekking - Radiale vervorming



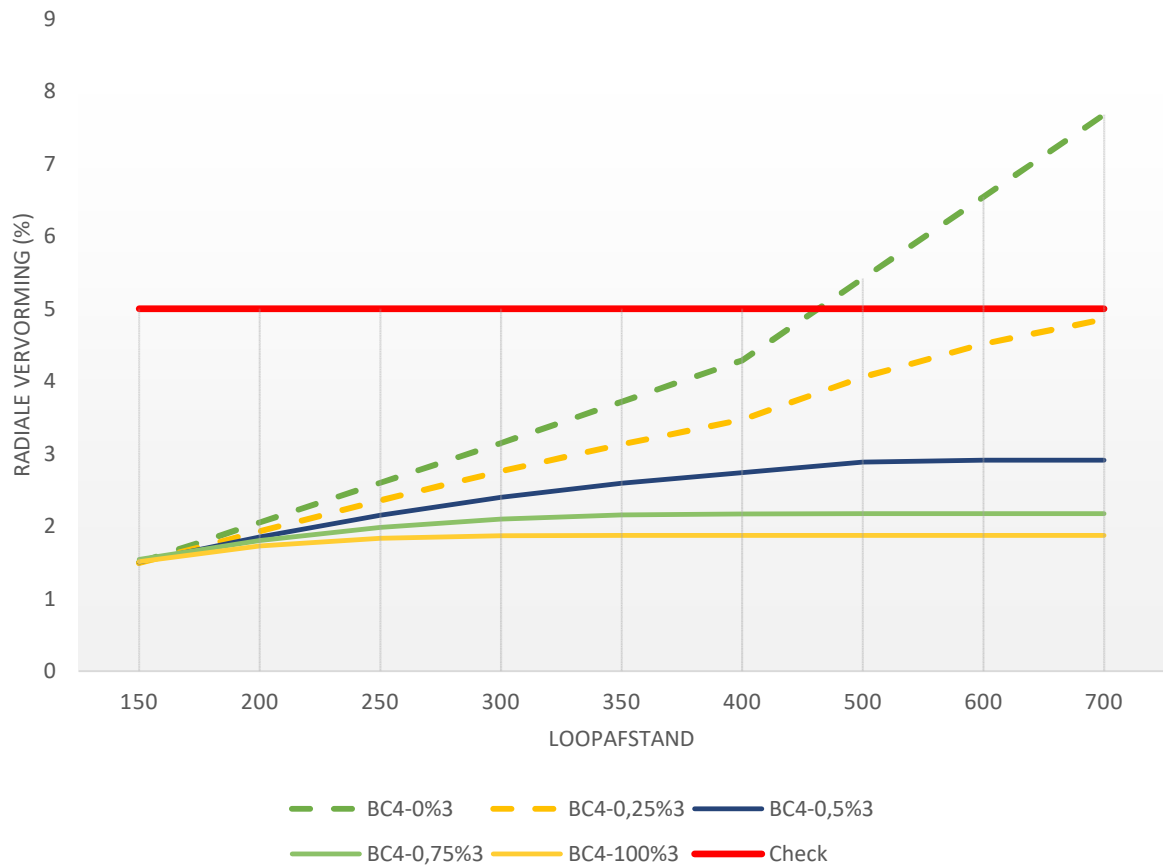
2 - Meter dekking - Radiale vervorming



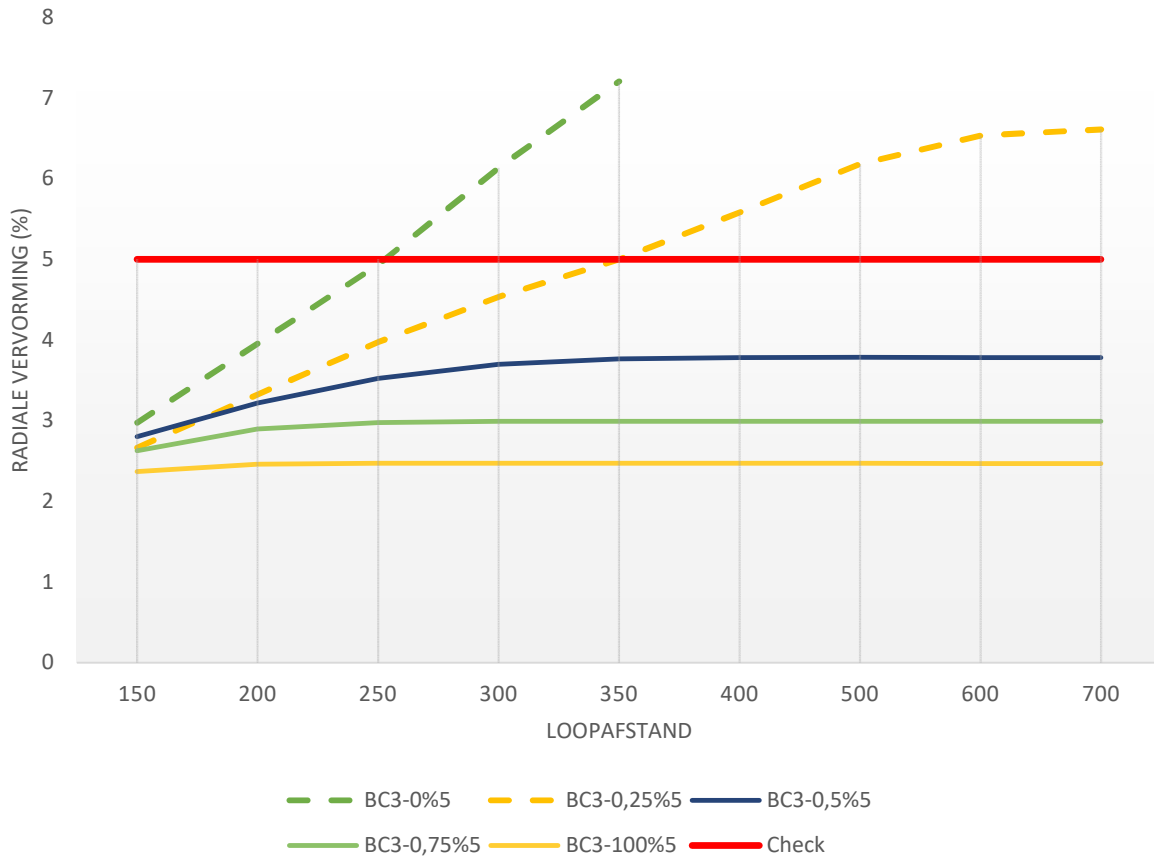
3 - Meter dekking - Radiale vervorming



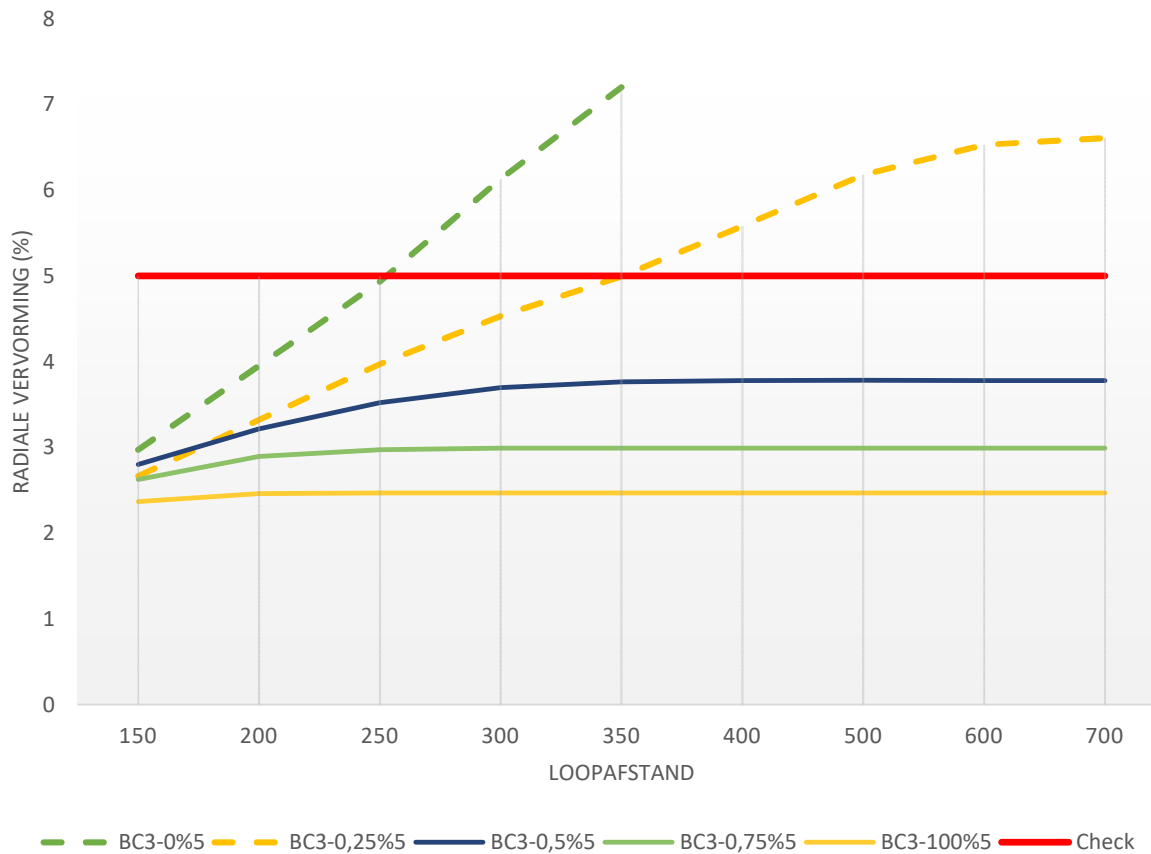
3 - Meter dekking - Radiale vervorming



5 - Meter dekking - Radiale vervorming



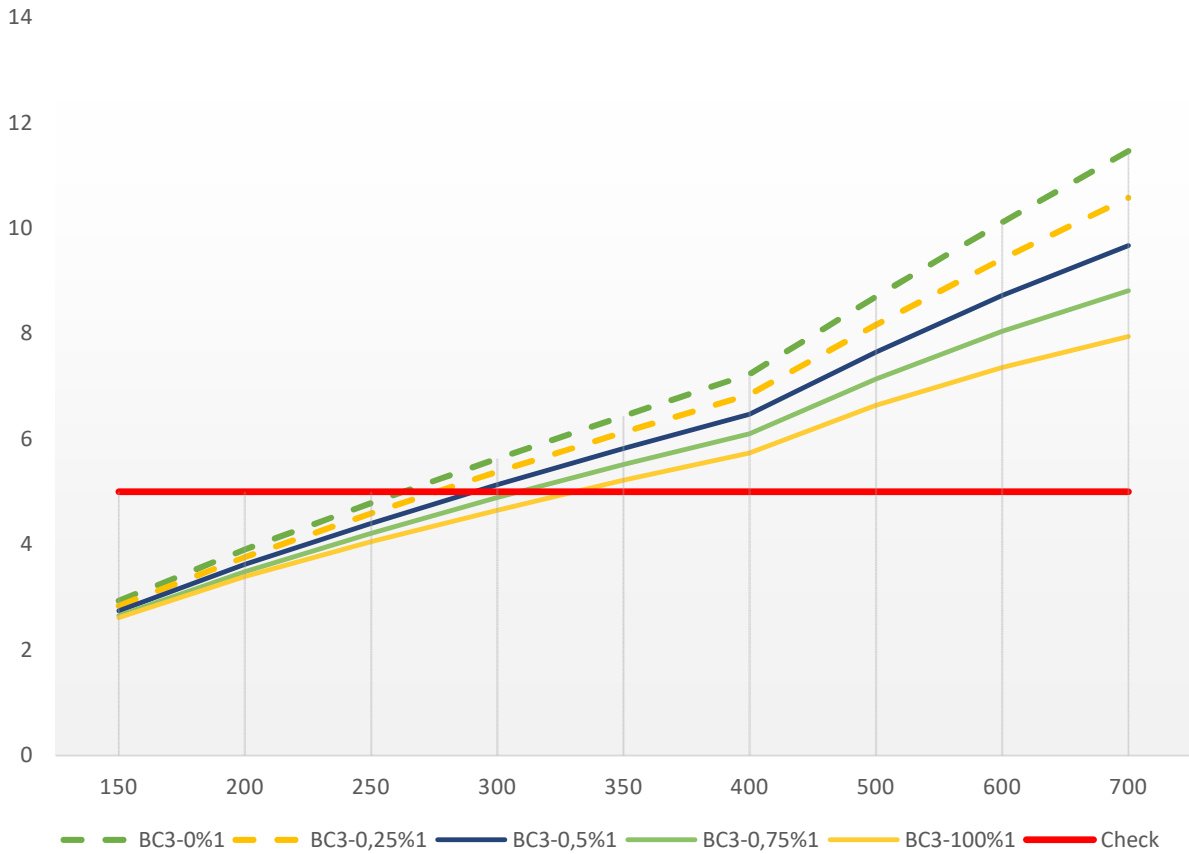
5 - Meter dekking - Radiale vervorming



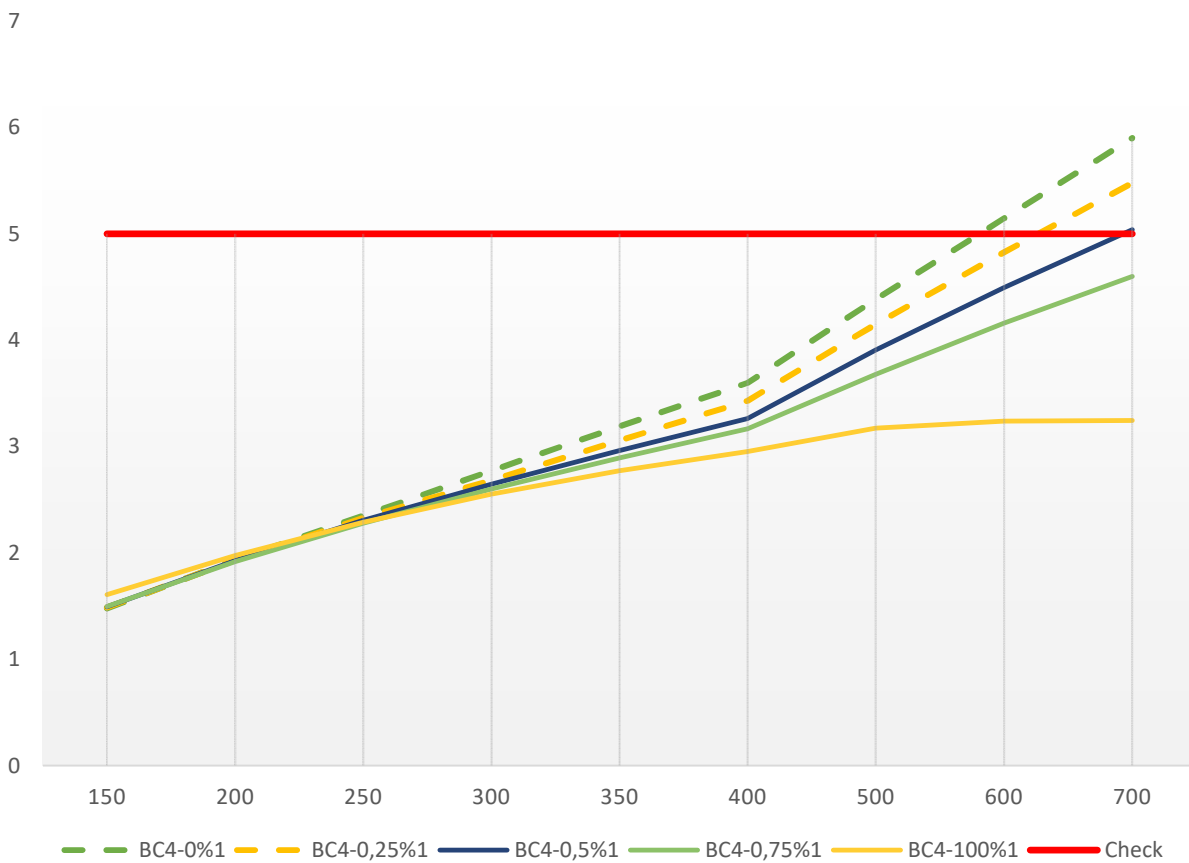
Bijlage 9

Berekende radiale vervormingen ligging in klei

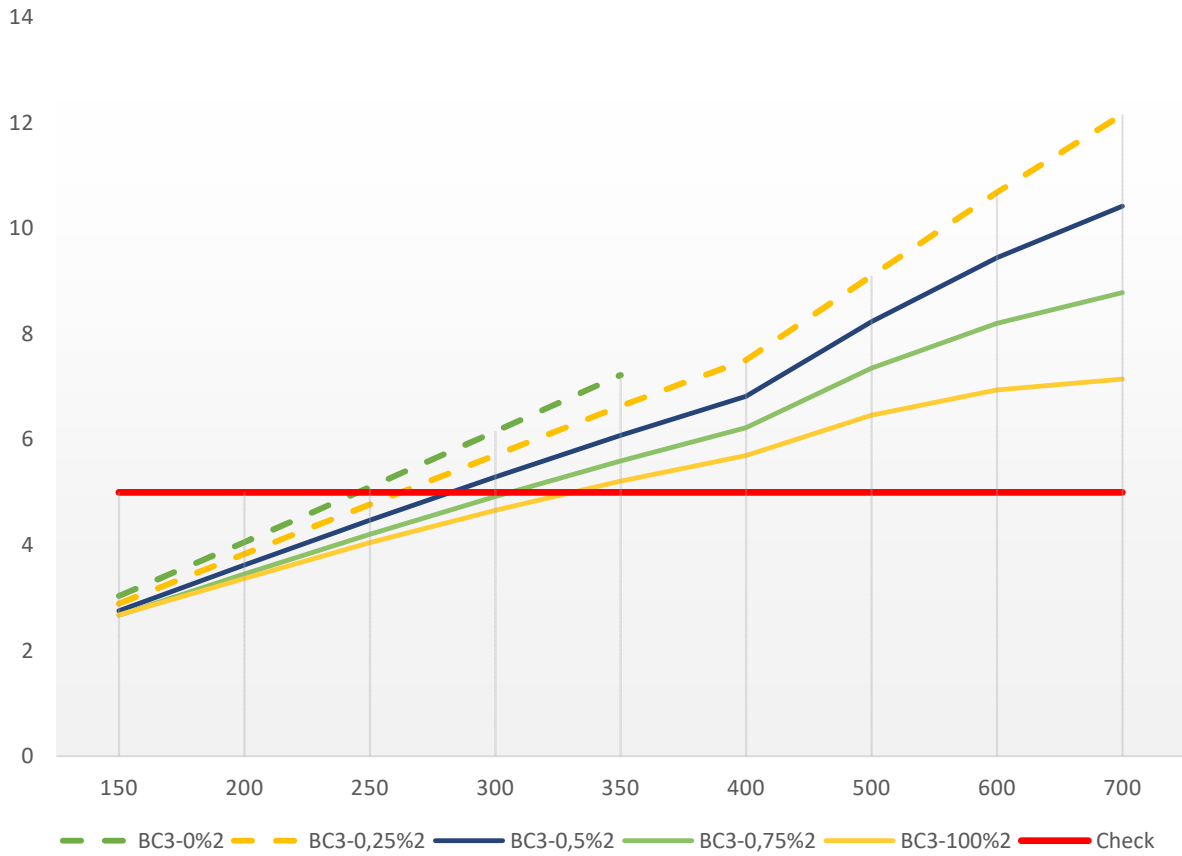
1 - Meter dekking - Radiale Vervorming



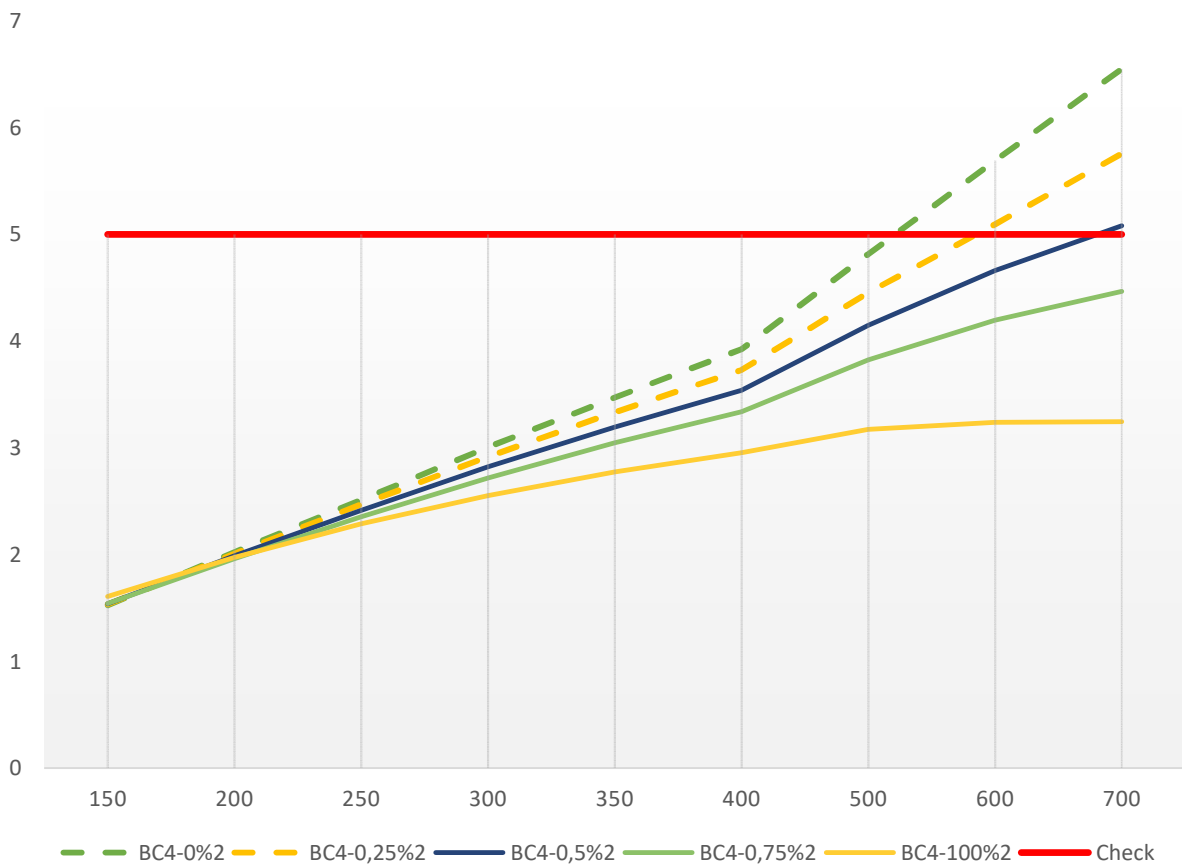
1 - Meter dekking - Radiale vervorming



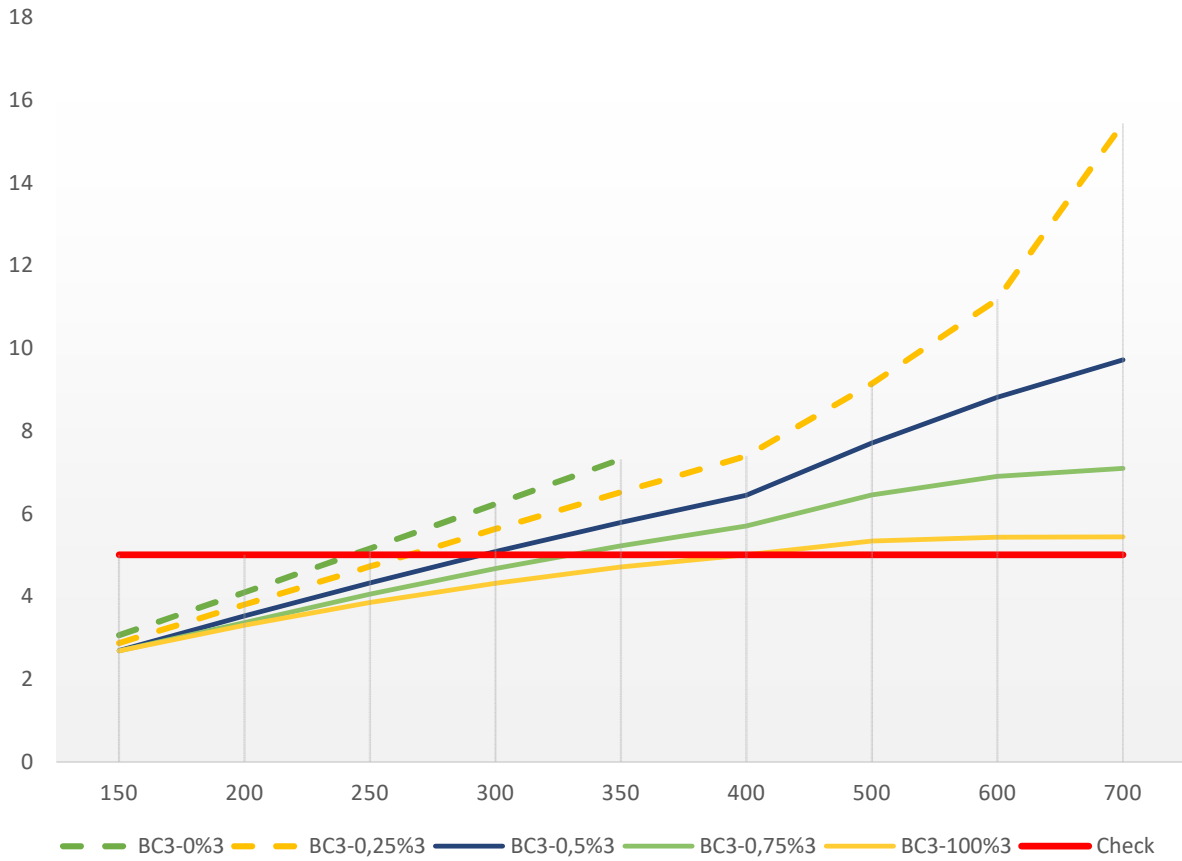
2 - Meter dekking - Radiale vervorming



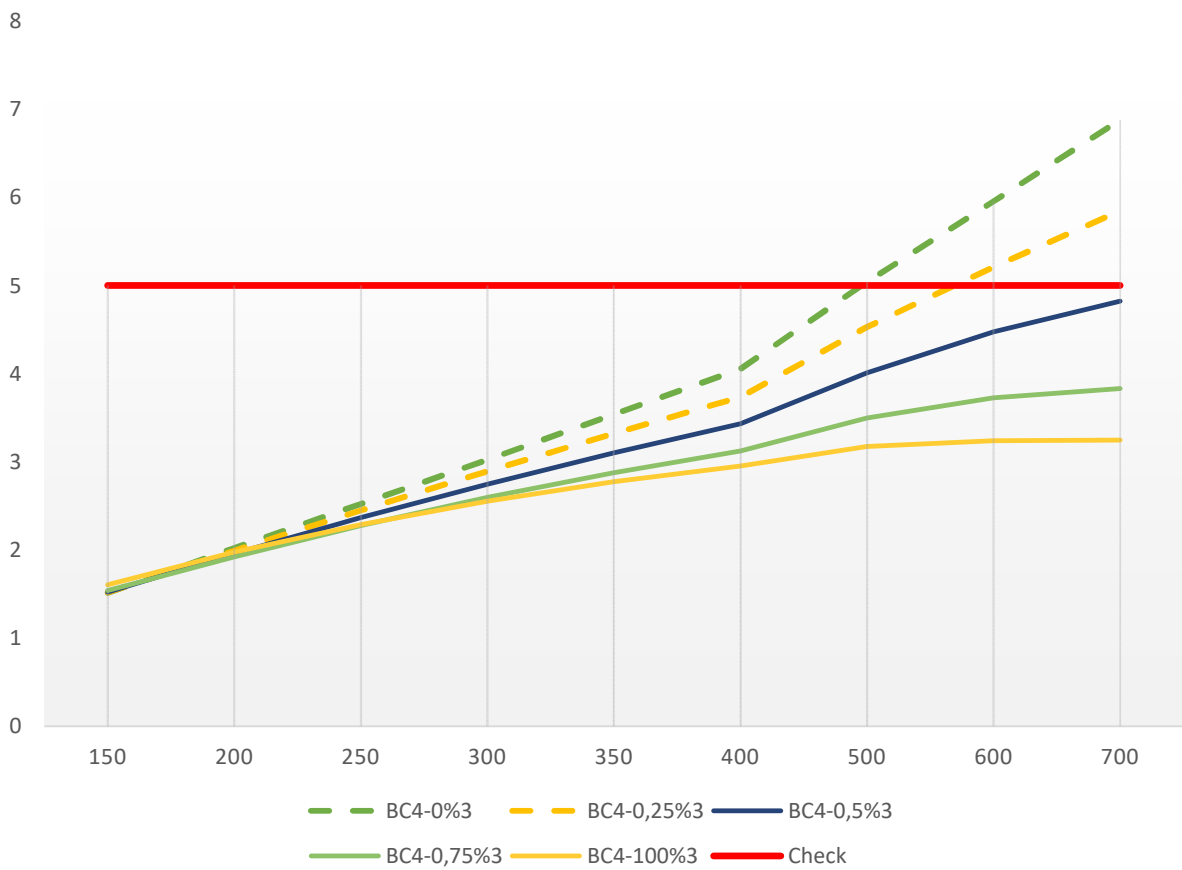
2 - Meter dekking - Radiale vervorming



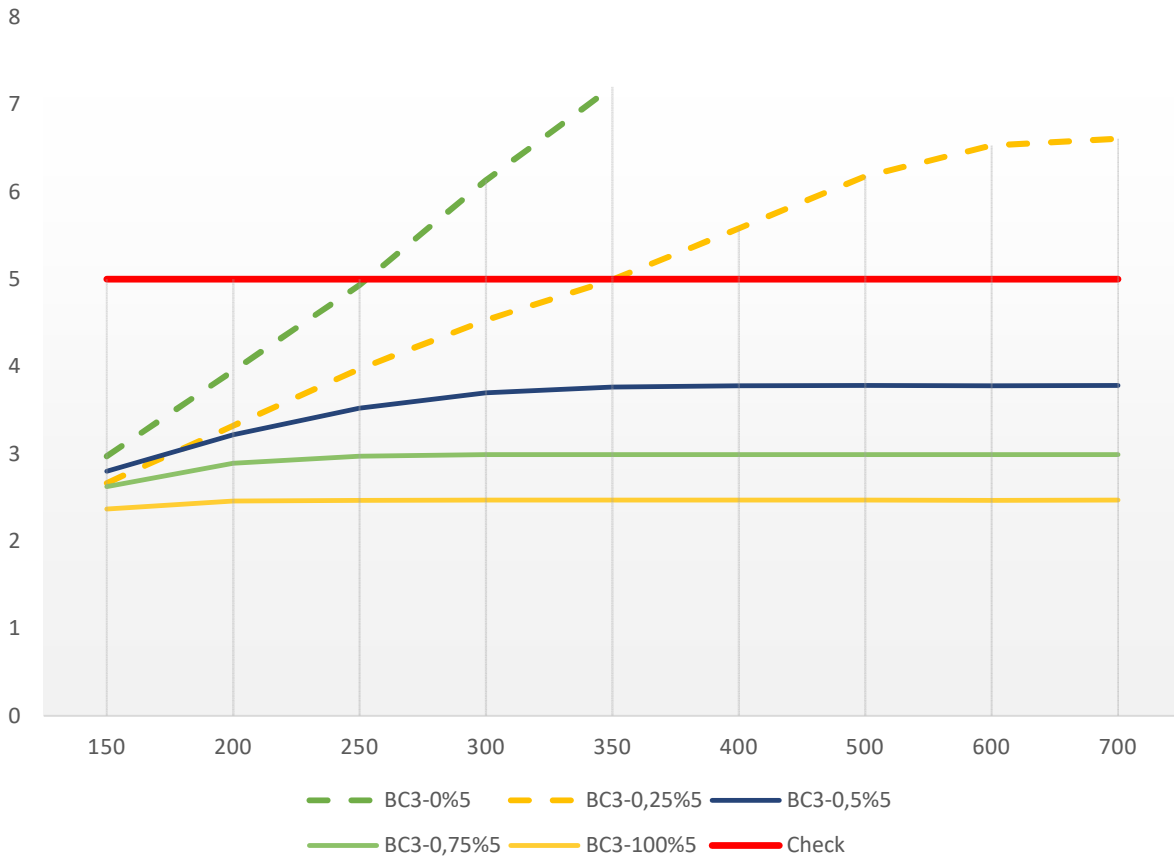
3 - Meter dekking - Radiale vervorming



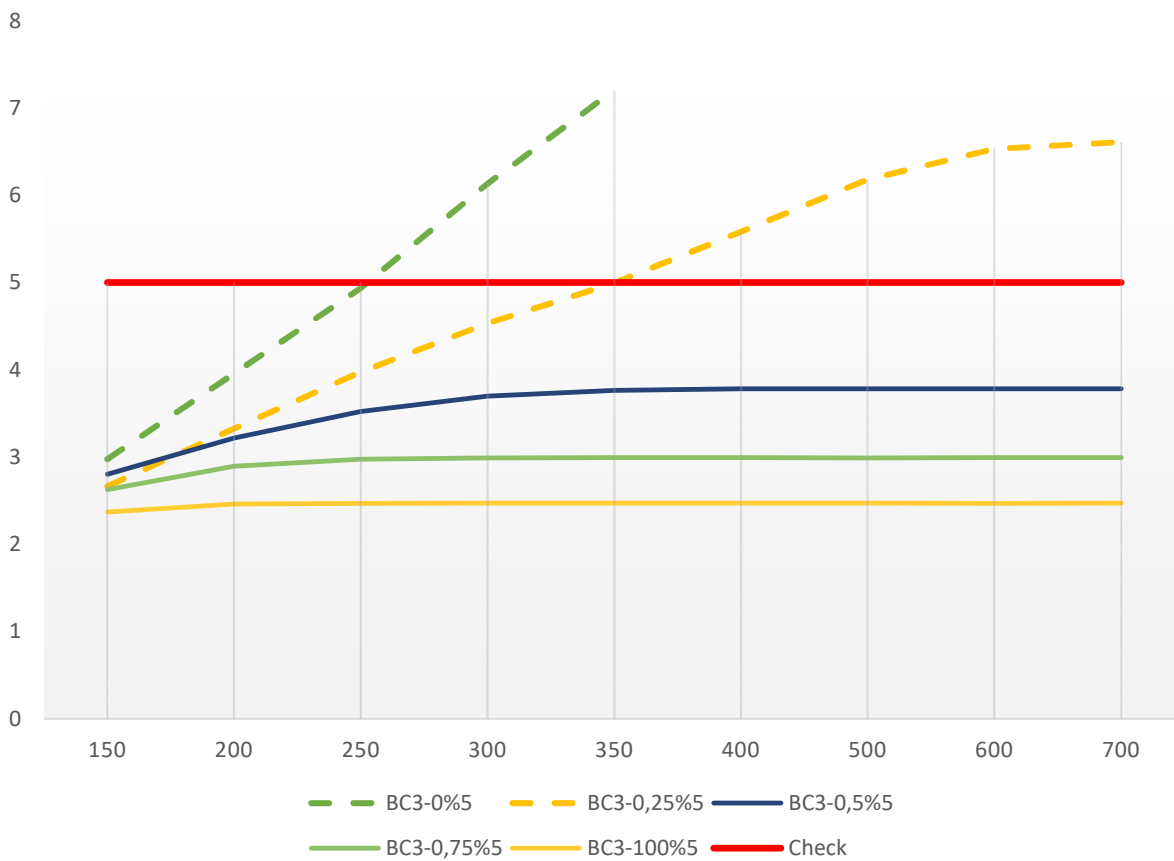
3 - Meter dekking - Radiale vervorming



5 - Meter dekking - Radiale vervorming



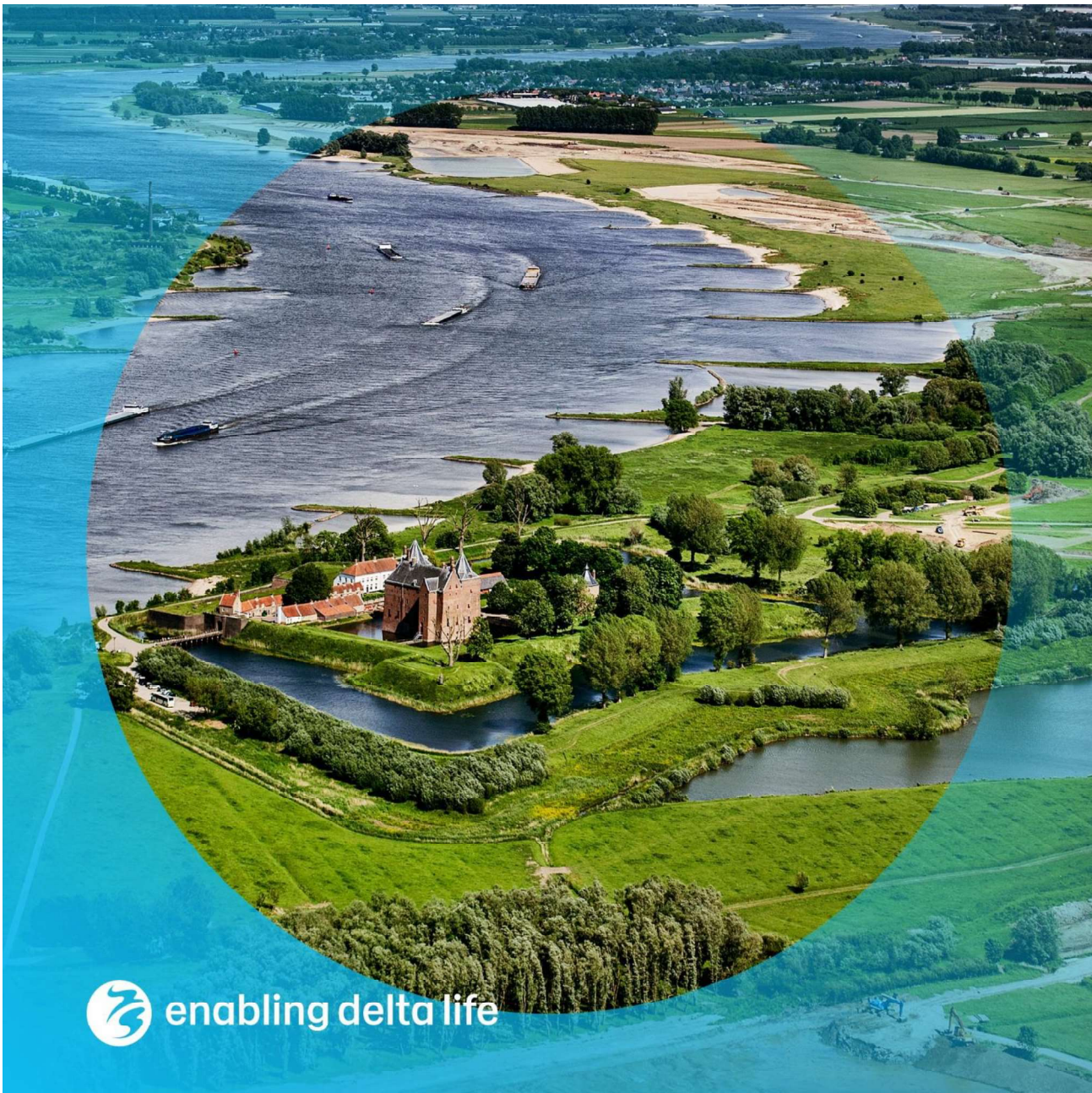
5 - Meter dekking - Radiale vervorming



C Rapport WP3, Testen op Drill-Grout

Testen op Drill-Grout

AAMBEELD werkpakket WP3



Testen op Drill-Grout
AAMBEELD werkpakket WP3

Auteur(s)
Marien Harkes

Testen op combinatie ruimer met EPP

AAMBEELD werkpakket WP4

Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleiding, aanlegmethoden Drill-Grout, ongedraineerde schuifsterkte, schuifweerstand




Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	18-12-2023
Projectnummer	11207943-018
Document ID	11207943-018-GEO-0001
Pagina's	23
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Marien Harkes	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Marien Harkes 	Henk Kruse 	Ahmed Elkadi 

Samenvatting

Als onderdeel van het AAMbeeld onderzoek naar aanlegmethoden voor warmteleidingen zijn door Cebo Holland en Deltares testen uitgevoerd op een uithardende boorvloeistof die bij de verschillende aanlegtechnieken kan worden gebruikt. De uithardende boorvloeistof wordt Drill-Grout genoemd.

Bij het onderzoek naar de uitharding van Drill-Grout is vastgesteld dat de temperatuur een belangrijke factor is. Zo wordt er een factor 10 gevonden in de gemeten schuifsterkte in de eerste acht weken tussen incubatie bij 10 °C en 20 °C. Hierdoor wordt de eindsterkte van het Drill-Grout bij incubatie bij 10 °C na 100 dagen nog niet gehaald.

De schuifweerstand van Drill-Grout over een HDPE buitenzijde van een warmte transport leiding kan worden berekend met een wandwrijvingshoek van 8 graden en een adhesie van 0,9 kPa. Deze schuifweerstand langs het HDPE Drill-Grout vlak is van kracht nadat de piek weerstand is opgetreden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Werkpakketten	6
1.3	Doelstelling	7
2	Testopstelling en uitgevoerde testen	8
2.1	Meetapparatuur	8
2.1.1	Meetapparatuur uithardingstesten	8
2.1.2	Meetapparatuur wrijvingstesten	9
2.2	Globale beschrijving testen	9
2.2.1	Meting uitharding	9
2.2.2	Meting schuifweerstand	10
2.3	Preparatie Drill-Grout	11
2.3.1	Uitharding	11
2.3.2	Schuifweerstand	11
3	Resultaten uithardingstesten	12
3.1	Drill-Grout experimenten Cebo Holland	12
3.2	Drill-Grout experimenten Deltares	12
3.2.1	Experimenten bij verschillende concentraties en twee temperaturen	13
3.2.2	Experiment bij hoge concentratie Drill-Grout en twee verschillende temperaturen	14
3.2.3	Experimenten op Drill-Grout afkomstig uit HDD werkzaamheden Lijnden	14
4	Resultaten wrijvingstesten	16
4.1	Meting van de schuifweerstand tijdens schuiven	16
4.2	Uitwerking DS proeven	17
5	Conclusie	19
A	Datasheet Drill-Grout	20

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden voor leidingen zoals E-Powerpipe, Direct Pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van HDD) is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Daarnaast blijken er uitvoeringstechnisch verbeteringen mogelijk ten aanzien van de toepassing van boorvloeistoffen en de beoordeling van de voorgestelde installatiemethoden in relatie tot de eisen met betrekking tot warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project 'AanlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD (AAMBEELD)' opgestart. Dit project brengt in beeld hoe in stedelijk gebied op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Door gebruik te maken van een verbeterde boorvloeistof die in de gebruiksfase van de transportleiding een hogere wrijvingsweerstand oplevert kunnen langere aangelegd worden met een kleiner aantal expansiebochten. Dit reduceert aanlegkosten en hinder voor de omgeving. Hieruit komen een aantal subdoelstellingen uit naar voren bij de huidige stand van de techniek:

- Methodiekontwikkeling vergelijking aanlegmethoden
- Ontwerp van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen
- Beoordeling geschiktheid bestaande en innovatieve installatiemethoden aan de hand van ervaringscijfers
- Optimalisatie boorvloeistof(fen) voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen
- Synthese ten behoeve van ontwikkeling praktijkrichtlijn(en)

1.2 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten tot Richtlijn.

Dit rapport is onderdeel van WP3. Als onderdeel van werkpakket 3 zijn door Cebo Holland en Deltares testen uitgevoerd op een uithardende boorvloeistof die bij de verschillende aanlegtechnieken kan worden gebruikt. De uithardende boorvloeistof wordt Drill-Grout genoemd.

1.3 Doelstelling

De uithardende boorvloeistof speelt een rol bij de interactie tussen de leiding en de grond als de leiding operationeel is. De eigenschappen van de Drill-Grout bepalen voor een deel de interactie met de leiding. Daarom is de doelstelling van dit rapport om de interactie eigenschappen van Drill-Grout te bepalen. Aangezien de uitharding in de tijd leidt tot een verandering van de eigenschappen in de tijd is een aanvullende doelstelling om het uithardingsproces te meten.

Door de ontwikkeling van de ongedraineerde schuifsterkte (s_u) van Drill-Grout (DG) in de tijd te meten kan het uithardingsproces worden beschouwd. Gekeken wordt naar verschillende concentraties Drill-Grout en verschillende temperaturen.

Na uitharden kan de wrijving- interactie tussen Drill-Grout en een warmteleiding worden gemeten in een shearapparaat waarmee de wrijvingshoek en de adhesie kunnen worden vastgesteld.

2 Testopstelling en uitgevoerde testen

2.1 Meetapparatuur

2.1.1 Meetapparatuur uithardingstesten

De ongedraineerde schuifsterkte (s_u) is bij de experimenten van Cebo Holland gemeten met de 'Vane tester' (zie foto 1). Bij Deltares zijn de s_u metingen uitgevoerd met de Haake Viscometer iQ Rheometer (zie Foto 2).



Foto 2.1 Vane tester gebruikt bij Cebo Holland onderzoek.

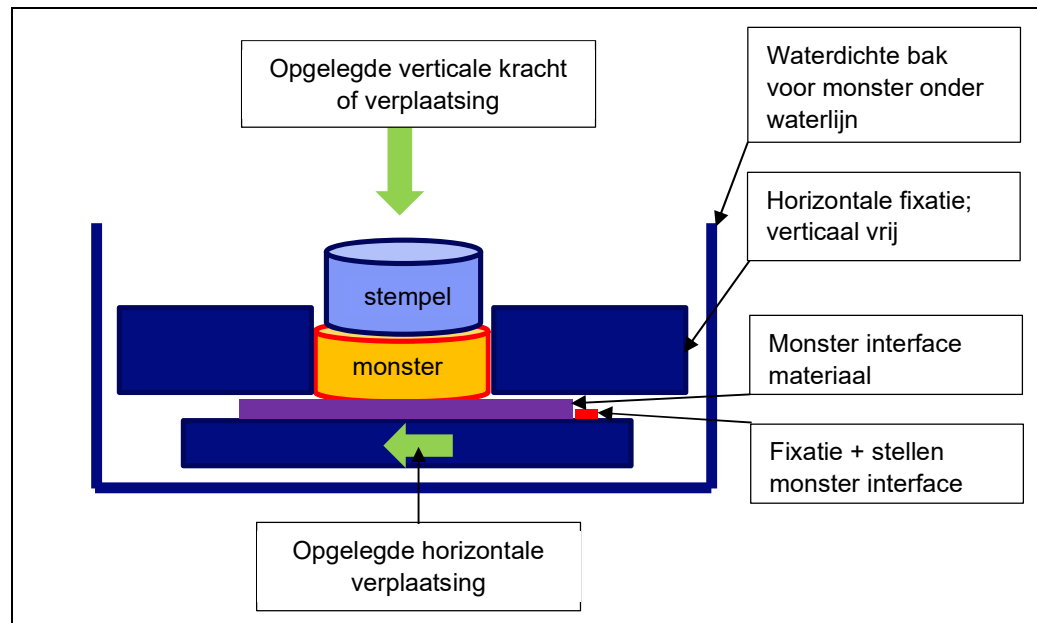


Foto 2.2 ViscoRheometer gebruikt bij Deltares onderzoek.

2.1.2 Meetapparatuur wrijvingstesten

De schuifweerstand van de Drill-Grout over de buitenzijde van de leiding is gemeten. Er is gebruikt gemaakt van een modified direct shearapparaat (DS) van Wille Geotechniek (APS, Rosdorf, BRD).

Bij een standaard DS proef wordt de weerstand langs een afschuifvlak door grond gemeten. Voor de weerstand langs de interface Drill-Grout/buis is een standaard DS apparaat omgebouwd, zodat het mogelijk is een stuk buis te beproeven samen met de Drill-Grout. Ook is het DS apparaat aangepast, zodat de proef onder water wordt uitgevoerd. Een schematische weergave staat in Figuur , daarin is het "monster" Drill-Grout, het "monster interface" is HDPE.



Figuur 2.1 Schematische weergave DS apparaat.

2.2 Globale beschrijving testen

2.2.1 Meting uitharding

De ontwikkeling van de ongedraineerde schuifsterkte (s_u) van Drill-Grout (DG) in de tijd wordt gemeten. Gekeken wordt naar verschillende concentraties Drill-Grout en verschillende temperaturen.

De volgende testen zijn uitgevoerd door Cebo Holland:

- DG 160 g/l.
- DG 160 g/l + 10% zand.
- DG 160 g/l + 15% zand.
- DG 160 g/l + 20% zand.
- DG 160 g/l + 10% OCMA.

De volgende testen zijn uitgevoerd door Deltares:

- DG 140 g/l bij 10 °C en 20 °C.
- DG 160 g/l bij 10 °C en 20 °C.
- DG 180 g/l bij 10 °C en 20 °C.
- DG 220 g/l bij 10 °C en 20 °C.
- DG praktijkproef Lijnden bij 10 °C – Inflow en mud pit monsters.

2.2.2 Meting schuifweerstand

Voor het buismateriaal bij de schuifproef is gebruik gemaakt van een staal PUR HDPE warmteleiding. Uit de leiding zijn monsters gezaagd. Het monster voor deze memo is een stuk buitenbuis HDPE getrimd tot 10x10 cm². Het PUR isolatiemateriaal en de coating zijn verwijderd.

Tabel 1.1 Buis.

Item	Sub-item	Leiding type DN700
binnenbuis	materiaal [-] buitendiameter [mm] wanddikte [mm]	Staal 711 8
Isolatie	materiaal	PUR
Buitenbuis	materiaal [-] buitendiameter [mm] wanddikte [mm]	HDPE 900 8,7
Coating	materiaal [-]	vezel versterkt kunststof

Bij de proeven is eerst een bovenbelasting op het monster aangebracht van 10 of 20 kPa. Gedurende de consolidatietijd van 16 uur is het Drill-Grout monster onder deze belasting voorbelast. Daarna is de onderplaat samen met het HDPE interface monster met een snelheid van 1,6 mm/uur horizontaal verschoven over een afstand van ca. 13 mm.

Tabel 2.2 Kenmerken DS proef.

Item	Sub-item	Data
grondmonster	materiaal [-] diameter [mm] hoogte [mm]	Drill-Grout 70 [mm] ca. 20 [mm]
Interface monster	materiaal afmeting	HDPE ca. 100x100 [mm ²]
Proef data	uitvoering consolidatie spanning consolidatie tijd afschuifsnelheid afschuifvervorming	onder water (waterbak) 10 of 20 [kPa] 16 [uur] 1,6 [mm/uur] ca. 13 [mm]

2.3 Preparatie Drill-Grout

2.3.1 Uitharding

Het Drill-Grout is met een Ultra turrax mixer gemengd bij 6000 rpm gedurende 5 minuten. Het gemengde Drill-Grout is in potjes verdeeld. Deze potjes zijn weggezet bij kamertemperatuur in het laboratorium (20 °C) en in de vochtige koelcel (10 °C). Bij elke meting wordt één potje gebruikt, deze wordt na afloop van de meting weggegooid.

2.3.2 Schuifweerstand

Drill-Grout is aangemaakt met een concentratie van 160 g/l. Het materiaal is bij een temperatuur van 10 °C opgeslagen.

Tabel 2.3 Drill-Grout parameters.

Drill-Grout	
Concentratie	160 g/l
Aanmaakdatum	21-12-2022
Verhardingsomstandigheden	afgesloten sample pot, opslag in koude ruimte (10 °C)
Verhardingstijd bij proef	11 maanden

Het monster is grijs/wit aan de buitenkant. Na doorsnijden is de binnenkant blauw (Figuur 1).



Figuur 1: Preparatie Drill-Grout monster.

3 Resultaten uithardingstesten

3.1 Drill-Grout experimenten Cebo Holland

Door Cebo Holland is één test serie uitgevoerd met één concentratie Drill-Grout (160 g/l), bij één temperatuur (10 °C) en vier verschillende toevoegingen, drie percentages zand en een percentage OCMA (natriumbentoniet).

Tabel 3.1 Resultaten ongedraineerde schuifsterkte DG met verschillende toevoegingen.

Drill-Grout 160 g/l	s_u 14 dagen [kPa]	s_u 20 dagen [kPa]	s_u 41 dagen [kPa]
160 g/l	< 7	< 12	10
160 g/l + 10% zand	< 7	< 12	< 10
160 g/l + 15% zand	< 7	< 12	14
160 g/l + 20% zand	< 7	< 12	14
160 g/l + 10% OCMA	< 3,5	< 7	n.a.



3.2 Drill-Grout experimenten Deltares

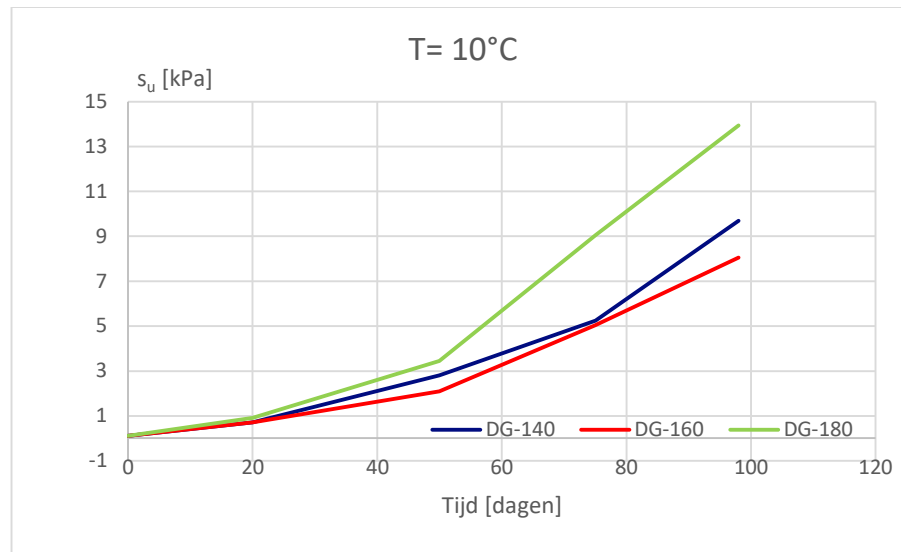
Deltares heeft drie test series uitgevoerd. De eerste serie proeven zijn uitgevoerd met drie verschillende concentraties Drill-Grout (140 g/l – 160 g/l – 180 g/l) en bij twee verschillende temperaturen (10 °C en 20 °C) weggezet.

Serie 2 is uitgevoerd bij een hogere concentratie Drill-Grout (220 g/l) en twee verschillende temperaturen (10 °C en 20 °C).

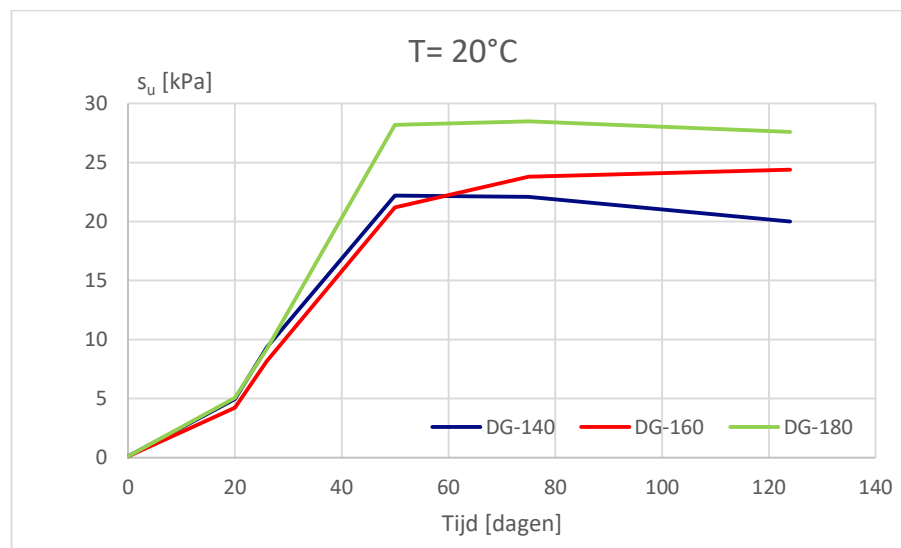
De derde serie is uitgevoerd op Drill-Grout dat is gebruikt bij een 'horizontal directional drilling' op de locatie Lijnden. Het Drill-Grout is genomen bij de 'Inflow' en direct uit de 'mud pit'.

3.2.1 Experimenten bij verschillende concentraties en twee temperaturen

De resultaten van de experimenten zijn weergegeven in de twee onderstaande grafieken. De ongedraineerde schuifsterkte (kPa) is uitgezet tegen de tijd (dagen).



Grafiek 3.1 Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterkte bij 10 °C en drie verschillende concentraties DG.



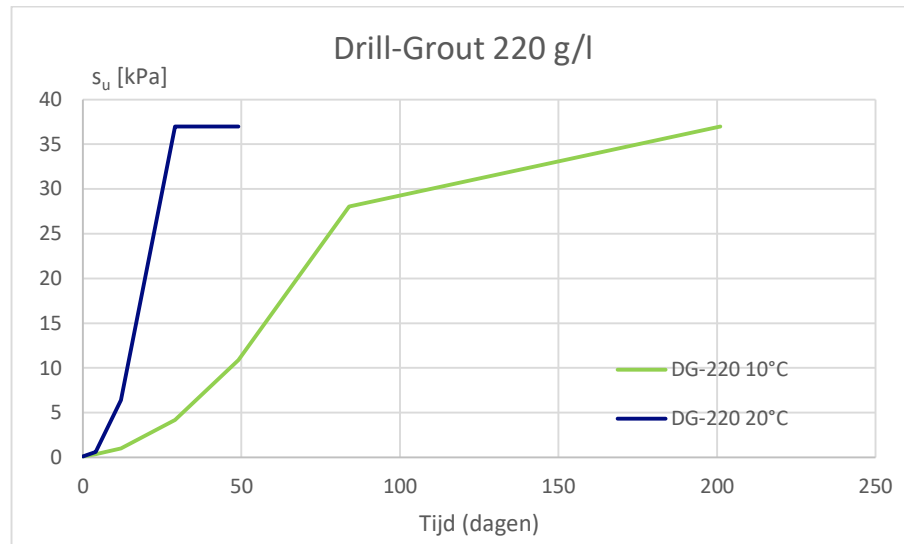
Grafiek 3.2 Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterkte bij 20 °C en drie verschillende concentraties DG.

Wanneer uitgegaan wordt van een te meten eindsterkte tussen de 20 kPa en 30 kPa wordt deze bij een temperatuur van 20 °C behaald na ongeveer 50 dagen. De sterkte bij 10 °C ligt na 50 dagen een factor 10 lager in vergelijking tot de sterkte bij 20 °C.

In vergelijking tot de datasheet Drill-Grout van Cebo Holland (zie Bijlage A) worden er na 28 dagen een lagere schuifsterkte gemeten in het lab, 1kPa in het lab ten opzichte van 7 kPa vermeld op de datasheet bij 10 °C.

3.2.2 Experiment bij hoge concentratie Drill-GROUT en twee verschillende temperaturen

De resultaten van de experimenten zijn weergegeven in de twee onderstaande grafieken.

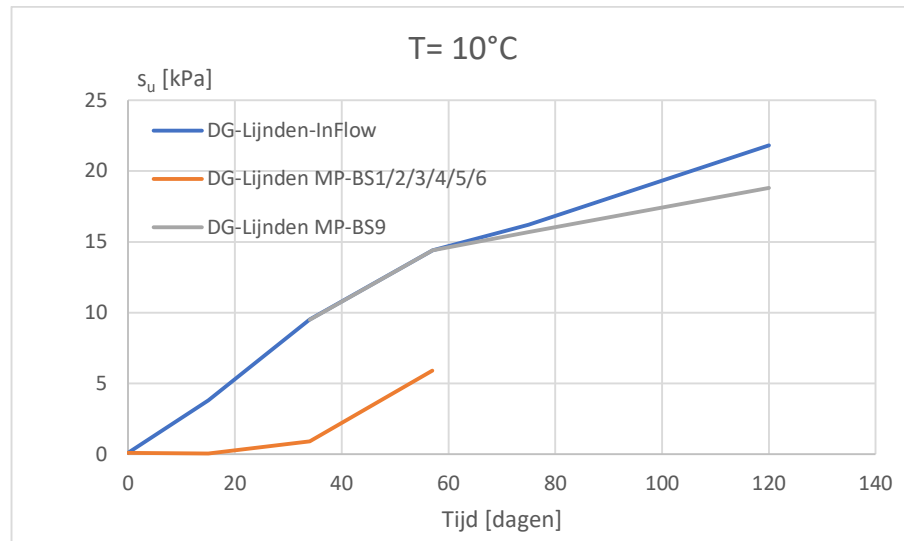


Grafiek 3.3 Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterkte DG 220 g/l bij twee temperaturen.

Ten opzichte van de lagere concentraties Drill-GROUT wordt de eindsterkte eerder gehaald bij 20 °C. De eindsterkte is bij Drill-GROUT 220 g/l binnen vier weken behaald. Bij lagere concentraties Drill-GROUT wordt de eindsterkte binnen acht weken behaald. Ook hier wordt een factor 10 gezien in behaalde schuifsterkte na ongeveer vier weken. Bij 10 °C wordt een schuifsterkte van 4 kPa gemeten, bij 20 °C is deze > 37 kPa.

3.2.3 Experimenten op Drill-GROUT afkomstig uit HDD werkzaamheden Lijnden

De experimenten zijn uitgevoerd bij 10 °C. De monsters zijn afkomstig uit de Inflow en de mud pit (MP). MP-BS11/2/3/4/5/6 is een mengmonster en is genomen na het trekken van de strengen 1 t/m 6. MP-BS9 is monster genomen na het trekken van de laatste streng.



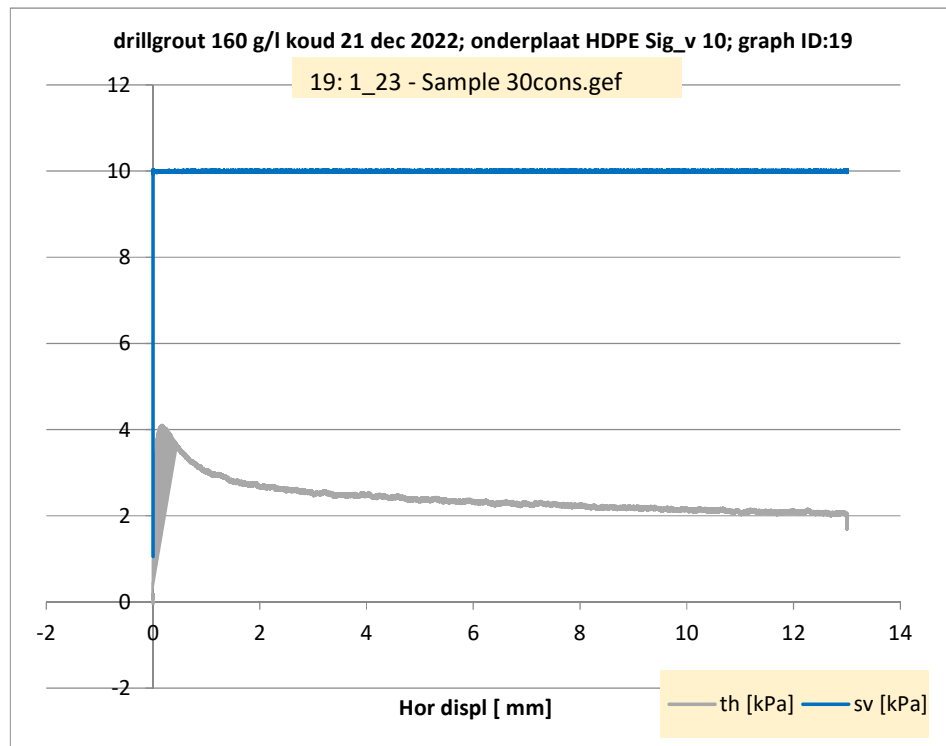
Grafiek 3.4 Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterkte DG bij 10 °C bij HDD aanleg te Lijnden.

De ontwikkeling van de schuifsterkte van het gebruikte Drill-Grout in de praktijk in Lijnden is te zien in de bovenstaande grafiek. Er wordt na 42 dagen een schuifsterkte van 11,2 kPa gemeten, volgens de datasheet zou dit 15 kPa moeten zijn. Bij de laboratoriumproef met een concentratie Drill-Grout van 160 g/l (beschreven in 3.2.1) wordt na 42 dagen een schuifsterkte van ongeveer 2 kPa gemeten.

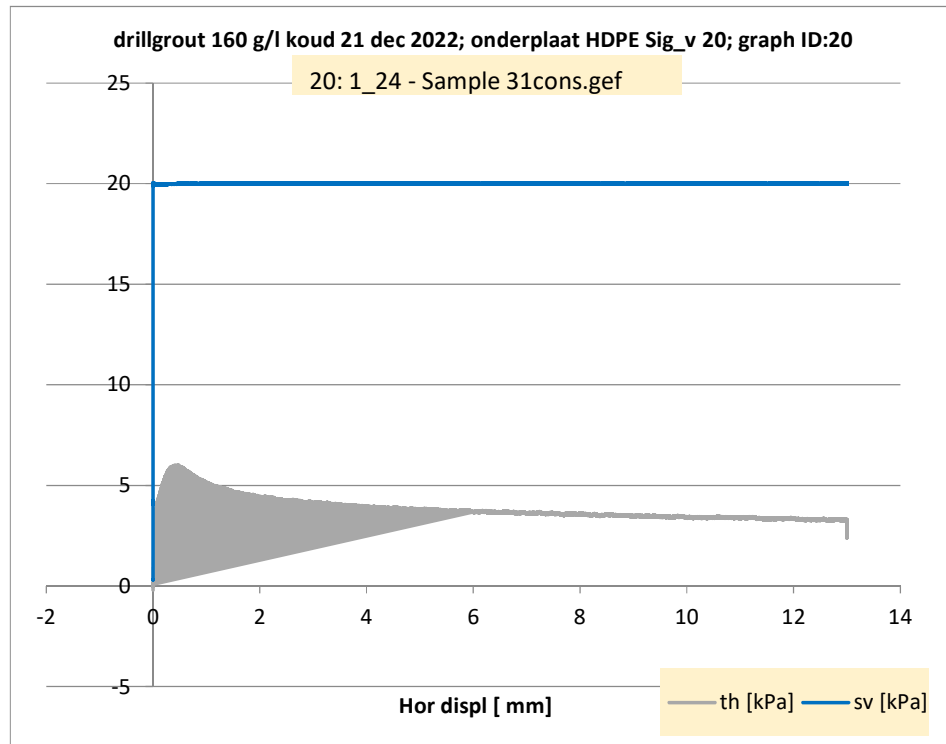
4 Resultaten wrijvingstesten

4.1 Meting van de schuifweerstand tijdens schuiven

Zowel de belasting (verticale spanning, sv) als de benodigde afschuifspanning in horizontale richting (horizontale spanning, th) zijn gemeten bij de wrijvingstesten. De wrijvingstesten zijn uitgevoerd bij twee verschillende bovenbelastingen. In Figuur 1 en Figuur 2 zijn de grootte van de verticale spanning en de horizontale afschuifspanning tegen de horizontale verplaatsing weergegeven.



Figuur 4.1 Resultaat afschuifproef DG 160 g/l/HDPE bij 10 kPa consolidatiespanning.



Figuur 2.2 Resultaat afschuifproef DG 160 g/l/HDPE bij 20 kPa consolidatiespanning.

Na het bereiken van een piekwaarde neemt de schuifweerstand af.

4.2 Uitwerking DS proeven

Het belangrijkste resultaat van de proeven is; τ_{rem} [kPa], dit is de waarde van de afschuifweerstand nadat er een piek weerstand is opgetreden. Voor de waarde τ_{rem} [kPa] is de waarde bij een verplaatsing van 6 mm gebruikt. De waarde van 6 is gekozen omdat daarmee voldoende vervorming wordt verwacht om zeker te zijn van een eindsterkte, maar nog niet zoveel vervorming dat een significant deel van het Drill-Grout monster over maagdelijk HDPE is geschoven.

De relatie tussen de schuifspanning en de normaalspanning is als volgt:

$$\tau = a + \sigma_{\perp} * \tan(\delta)$$

waarin:

τ bezwijk afschuifspanning [kPa]

a adhesie [kPa]

σ_{\perp} normaalspanning [kPa]

δ wrijvingshoek tussen verschillende materialen [graden]

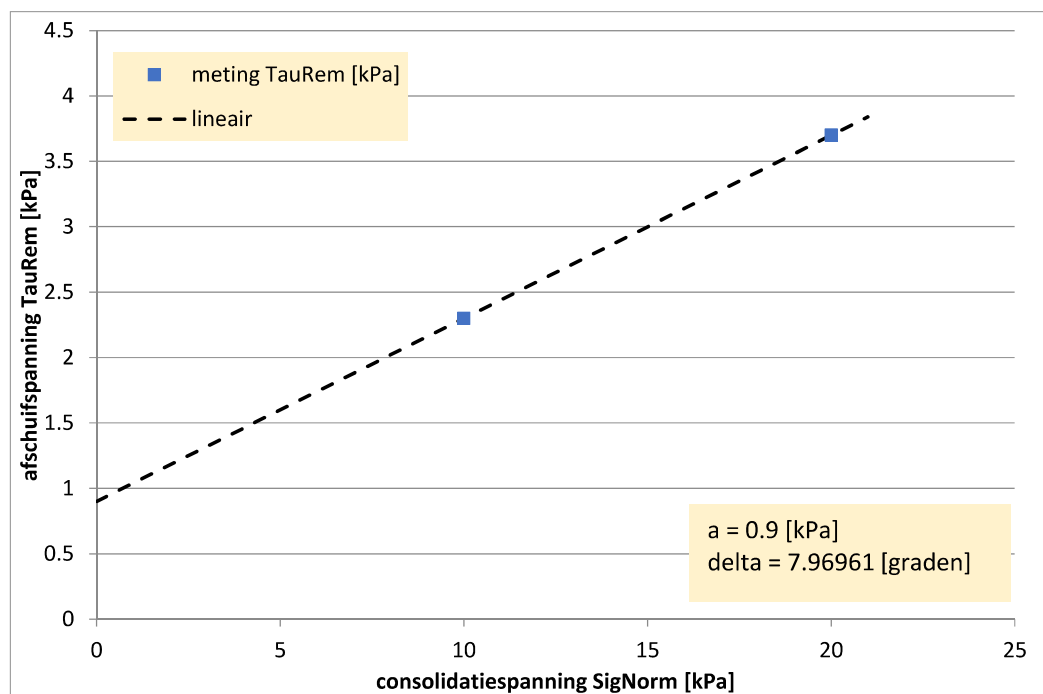
De gemeten waarden uit de proeven (Figuur en Figuur 2.2) en de waarden volgens bovenstaande formule staan in Tabel en zijn grafisch weergegeven in Figuur .

Tabel 4.1 Resultaten DS proeven Drill-Grout/HDPE, DG 160 g/l en 11 maanden uitharding bij 10 °C

σ_{\perp} [kPa]	τ_{pick} [kPa]	$\tau_{rem}^{1)}$ [kPa]	a_{rem} [kPa]	δ_{rem} [graden]
Meting			Uitwerking	
10	4,1	2,3	0,9	8
20	6,0	3,7		

¹⁾ Waarde bij 6 mm verplaatsing

De onderstaande grafiek geeft de waarden bij 6 mm verplaatsing.



Figuur 4.3 Grafische weergave wrijvingswaarden

5 Conclusie

Bij het onderzoek naar de uitharding van Drill-Grout is vastgesteld dat de temperatuur een belangrijke factor is. Zo wordt er een factor 10 gevonden in de gemeten schuifsterkte in de eerste acht weken tussen incubatie bij 20 °C en 10 °C. Hierdoor wordt de eindsterkte van het Drill-Grout bij incubatie bij 10 °C na 100 dagen nog niet gehaald.

De schuifweerstand van Drill-Grout over een HDPE buitenzijde van een warmte transportleiding kan worden berekend met een wandwrijvingshoek van 8 graden en een adhesie van 0,9 kPa. Deze schuifweerstand langs het HDPE Drill-Grout vlak is van kracht nadat de piek weerstand al is opgetreden en er een schuifverplaatsing heeft plaatsgevonden.

A Datasheet Drill-Grout



Product Data Sheet

Cebo Drill-Grout

Industrial Drilling

Cebo Drill-Grout is a self-setting suspension used to completely fill annular spaces in HDD, Microtunneling and Vertical Drilling operations. Cebo Drill-Grout can also be used for other applications such as sealing holes of pulled piles. The product hardens into a plastic material with a low water permeability, preventing underground water layers from mixing. By using Cebo Drill-Grout, subsidence of the ground can be prevented, and steel pipes are protected against corrosion.

Advantages

- Low water permeability
- Easy to mix
- Low mixing ratio
- High flowability

Typical Properties

<u>Parameter</u>	<u>Test method / In accordance with</u>	<u>Required</u>
Moisture content	DIN 18121-1	≤ 13%
Grain size	Passing 125 µm dry sieve	≥ 95% < 125 µ
Specific density	-	≈ 2300 kg/m ³
Bulk density	-	≈ 900 kg/m ³

In so far as we can ascertain, the above-stated information is correct. However, we are unable to provide any guarantees with regard to the results that you will achieve with this. This specification is provided on the condition that you determine yourself to what degree it is suitable for your purposes.

Typical Properties - 160 kg Cebo Drill-Grout / 1 m³ water

Parameter	Test method / In accordance with	Typical Property
Marsh Viscosity	-	≈ 45 s/l
Plastic Viscosity	-	≈ 9 cP
Yield Point	-	≈ 23 lb/100 ft ²
Gels	10 seconds	≈ 25 lb/100 ft ²
	10 minutes	≈ 29 lb/100 ft ²
Filtrate Loss	-	≈ 20 ml
Workability	-	< 48 hours
Shear strength / 14 days (10°C)	Vane shear tester	≈ 0 kPa
Shear strength / 21 days (10°C)	Vane shear tester	≈ 0 – 5 kPa
Shear strength / 28 days (10°C)	Vane shear tester	≈ 7 kPa
Shear strength / 42 days (10°C)	Vane shear tester	≈ 15 kPa

Recommended Use

The properties of Cebo Drill-Grout are being optimized when the make-up water has the following properties - Conductivity: < 1000 µS/cm, pH: 7.5 – 10, Total hardness: < 100 ppm.

Add a minimum of 160 - 180 kg Cebo Drill-Grout to 1m³ water. Fine adjustments are made to the consistency by varying the solid content; recommended Marsh Funnel Viscosity, minimal 45 seconds. Density should be 1.11 kg/m³ minimum.

Use in HDD: Cebo Drill-Grout is designed to be injected at the same time as the pipe is pulled. In this way, the existing slurry will be displaced. Therefore, it is advised to test the density of the suspension before pulling the pipe. The density of Cebo Drill-Grout should be higher than the slurry in the borehole. This will help to displace the fluid out of the borehole with the Cebo Drill-Grout. Use a barrel reamer (which is smaller than the last reamed diameter) for injecting the Cebo Drill-Grout during pulling of the pipe(s), with 2 nozzles on the machine side and the maximum nozzles at the pipe side open. This set-up will help to remove the old slurry at the front side of the barrel.

Use in Vertical Drilling: Inject Cebo Drill-Grout from the bottom of the borehole through a tremie pipe to remove the existing drilling fluid out of the hole and displace it completely by Cebo Drill-Grout. Warning! When installing a water well, it can be necessary to add a clay stop on top of the filter pack. In this way, it is not possible for Cebo Drill-Grout to penetrate into the filter pack and/or screened casing. The density of Cebo Drill-Grout should be higher than the slurry in the borehole. This will help you to displace the fluid out of the borehole with the Cebo Drill-Grout. The volume of Cebo Drill-Grout must be 15% more than the calculated volume to be sure that the drilling fluid is fully replaced with Cebo Drill-Grout. Thermal conductivity values for the Cebo Drill-Grout range from 0,6 to 0,7 W/m²K depending on the mixing ratio.

Certification & Accreditation

- Cebo Drill-Grout is tested for use in groundwater by the “Hygiene-Institut des Ruhrgebiets”.
- Cebo Drill-Grout is recognized and registered according to BRL 5078 by Bodem+

Expiry Date

Cebo Drill-Grout is to be used within 6 months after production date. Please speak to your Cebo contact person for information regarding use after expiry date.

Cebo Drill-Grout is available in 25 kg bags and in 1000 kg Big Bags.

Version; 06-2022

In so far as we can ascertain, the above-stated information is correct. However, we are unable to provide any guarantees with regard to the results that you will achieve with this. This specification is provided on the condition that you determine yourself to what degree it is suitable for your purposes.

Cebo Holland BV
Westerduinweg 1
NL-1976 BV IJmuiden
The Netherlands

info@cebo.com
www.cebo.com
Tel. +31(0)255-546262



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

D Rapporten WP4, Testen aanlegmethoden

D.1 Rapport testen met Pipe Thruster

Thruster testen op 28" leiding

AAMBEELD werkpakket WP4



Thruster testen op 28" leiding
AAMBEELD werkpakket WP4

Auteur(s)
Piet Meijers




Thruster testen op 28" leiding
AAMBEELD werkpakket WP4

Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleiding, sterkte, drukkracht

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	18-12-2023
Projectnummer	11207943-019
Document ID	11207943-019-GEO-0002
Pagina's	52
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)	
	Piet Meijers

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Piet Meijers 	Henk Kruse 	Ahmed Elkadi 

Samenvatting

De doelstelling van TKI project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) is het opstellen van een methodiek om verschillende aanlegmethoden voor leidingen te vergelijken. Als onderdeel van Werkpakket 4 zijn door Herrenknecht testen met een Pipe Thruster op een 28" warmteleiding uitgevoerd. De leiding bestond uit een stalen binnenbuis een PUR isolatie laag en een PE buitenbuis. Bij een aantal testen is er een GRP laag (Glasfibre Reinforced Plastic) aangebracht op de buitenbuis. De hiervoor gehanteerde productnaam is pau wrap®.

Bij het voortbewegen van de leiding door de Pipe Thruster wordt een radiale klemkracht aangebracht over de omtrek van leiding. De klem bestaat uit vier schalen, waarbij tussen de schalen een geringe open ruimte zit. Na het aanbrengen van de radiale kracht kan eveneens een axiale kracht worden aangebracht om de leiding voort te bewegen. Bij de testen is een buis tegen een reactie frame geduwd. Daarbij zijn beide krachten gemeten. De maximaal toepasbare radiale klemkracht is separaat voor de axiale test gemeten, zodat duidelijk was welke klemkracht kon worden toegepast.

Bij een standaard warmteleiding kon een maximale radiale kracht worden aangebracht van ongeveer 3600 kN. Toepassing van een dunne laag GRP van 5 mm leidde niet tot een hogere opneembare radiale kracht. Een dikke laag GRP van 12 mm maakte een verhoging van de opneembare radiale kracht tot ongeveer 16000 kN mogelijk.

Bij het uitvoeren van de axiale testen is eveneens geconstateerd dat een dunne laag van 5 mm GRP geen positieve invloed heeft op de maximaal te realiseren axiale drukkracht. Bij een standaard warmteleiding kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 450 kN. Tot aan de maximale drukkracht kon de buitenbuis de spanning via de PUR isolatie doorgeven aan de stalen binnenbuis. Boven deze waarde werden de vervormingen van de PE buitenbuis groter (plastisch) totdat er bezwijken optrad door het afschuiven van PUR over de stalen binnenbuis bij een kracht van 820 kN. In de proef opstelling was de afdracht lengte achter de klem van de Pipe Thruster gelimiteerd, zodat misschien een iets grotere waarde dan 450 kN kan worden bereikt bij een grotere lengte van de leiding achter de Pipe Thruster.

Door de dikte van het GRP te vergroten tot 12 mm ontstaat er een stijvere buitenbuis. Hierdoor kan de drukkracht over een grotere lengte worden afgedragen naar de stalen binnenbuis. Dit blijkt onder andere uit een EEM berekening, maar ook uit een uitgevoerde test met de Pipe Thruster. Tijdens de test kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 777 kN alvorens er plastische deformatie op zou treden. Daadwerkelijk bezwijken door afschuiving van PUR langs de stalen binnenbuis werd gemeten bij een kracht van 1438 kN.

Tijdens uitvoering van de testen werd duidelijk dat een hoge klemkracht nodig is om slippen van de leiding door de schalen van de klem van de Pipe Thruster tegen te gaan. Bij de standaard leiding werd een wrijvingscoëfficiënt tussen de 0,15 en 0,20 gemeten. Door het gladde oppervlak van GRP werd er bij de beklede leiding een wrijvingscoëfficiënt tussen de 0,12 en 0,17 gemeten.

Door de Pipe Thruster kan er een beperkte axiale kracht worden doorgegeven aan een standaard warmte leiding of een met GRP beklede leiding. De maximale kracht is hoger bij een met GRP beklede leiding.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstellingen AAMBEELD	7
1.3	Werkpakketten	7
1.4	Thruster testen als onderdeel van werkpakket 4	8
2	Testopstelling en uitgevoerde testen	9
2.1	Globale beschrijving testen	9
2.2	Testopstelling	9
2.3	Afmetingen leiding	11
2.4	Uitgevoerde testen	12
3	Resultaten testen radiale belasting	14
3.1	Meetresultaten	14
3.2	Bezwijkvorm	15
3.3	Kwantitatieve beschouwing	17
4	Resultaten testen axiale belasting	18
4.1	Meetresultaten	18
4.1.1	St-PUR-PE leiding, belasting	18
4.1.2	St-PUR-PE leiding, gemeten vervorming	22
4.1.3	Leiding met GRP, belasting	25
4.1.3.1	Axiale kracht, buis met 5 mm GRP	25
4.1.3.2	Axiale kracht, 12 mm GRP	29
4.1.4	Leiding met 5 mm GRP, gemeten vervorming	32
4.1.5	Leiding met 12 mm GRP, gemeten vervorming	34
4.2	Wrijving opstelling-ondergrond	36
4.3	Bezwijkvorm	37
4.4	Modelberekeningen	39
4.5	Kwantitatieve beschouwing, sterkte van de leiding	39
4.6	Kwantitatieve beschouwing, slip klem over buis	40
5	Conclusies	42
5.1	Algemeen	42
5.2	Standaard warmte leiding	43
5.3	Warmte leiding met GRP	43
5.4	EEM berekeningen	43

A	Data sheet pipe thruster	44
B	Verkennde berekeningen met PLAXIS	46
B.1	Modellering	46
B.2	Keuze parameters	46
B.3	Resultaten	47
B.4	Discussie en conclusies	50
C	Factual rapport Herrenknecht	51

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden zoals E-Power pipe, Direct pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van de bestaande HDD techniek) is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Daarnaast blijken er uitvoeringstechnisch verbeteringen mogelijk ten aanzien van de beoordeling van de voorgestelde installatiemethoden in relatie tot de eisen met betrekking tot warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

1.2 Doelstellingen AAMBEELD

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Door gebruik te maken van een uithardende boorvloeistof die in de gebruiksfase van de transportleiding een hogere wrijvingsweerstand oplevert kunnen langere leidingen worden aangelegd met een kleiner aantal expansiebochten. Dit reduceert aanlegkosten en hinder voor de omgeving. Hieruit komen een aantal subdoelstellingen uit naar voren bij de huidige stand van de techniek:

- Methodiekontwikkeling vergelijking aanlegmethoden.
- Ontwerp van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen.
- Beoordeling geschiktheid bestaande en innovatieve installatiemethoden aan de hand van ervaringscijfers.
- Ontwikkeling, optimalisatie boorvloeistof(fen) voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen.
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen.
- Synthese.

1.3 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten.

Dit rapport is onderdeel van WP4.

1.4 Thruster testen als onderdeel van werkpakket 4

Als onderdeel van werkpakket 4 zijn door Herrenknecht testen uitgevoerd met een Pipe Thruster. Door Herrenknecht is een uitgebreid factueel rapport opgesteld met alle resultaten van de uitgevoerde testen met de Pipe Thruster. Het rapport van Herrenknecht is te vinden in Bijlage C.

Dit rapport beschrijft op hoofdlijnen de testopstelling en de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde testen.

2 Testopstelling en uitgevoerde testen

2.1 Globale beschrijving testen

Het doel van de uitgevoerde testen is het verkrijgen van inzicht in de toelaatbare krachten op een warmteleiding bij het gebruik van een thruster tijdens de aanleg. Hiervoor zijn door Herrenknecht een aantal druktesten op een 28" warmteleiding uitgevoerd. De warmte leiding is een stalen leiding met een PUR omhulling en een PE buitenbuis.

2.2 Testopstelling

De testen zijn uitgevoerd op de locatie van Herrenknecht in Schwanau (D). Voor de testen is een Pipe Thruster, type HK500PT, van Herrenknecht gebruikt. Figuur 2.1 en Figuur 2.2 geven een beeld van de testopstelling.



Figuur 2.1 Meetopstelling, rechts de klem van de thruster en links het reactieframe (foto: Deltares).



Figuur 2.2 Meetopstelling, links de klem van de thruster en rechts het reactieframe (foto: Deltares).

In de testopstelling zijn twee onderdelen te onderscheiden, de eigenlijke thruster die de leiding klemt en een reactie constructie. Beide onderdelen zijn verbonden met twee trek cilinders die de eigenlijke drukkracht op de leiding leveren. De opstelling was niet verankerd maar stond koud op de vloer. De onderlinge afstand tussen beide onderdelen van de testopstelling veranderde tijdens de testen door de compressie van de leiding, maar met name bij de situaties waarbij de klem van de thruster over de leiding verschoof. Tijdens de testen is inderdaad geconstateerd dat de onderdelen van de testopstelling iets verschoven. Om de daardoor opgewekte wrijvingskracht tussen opstelling en ondergrond te bepalen is een aparte test uitgevoerd zonder buis. Voor het resultaat daarvan wordt verwezen naar paragraaf 4.2.

De gewichten van de beide onderdelen waren:

- Massa klem : 21200 kg.
- Massa reactie constructie: 29700 kg.

De lengte van de klem was 1,6 m.

Bij de testen op de warmte leiding was nabij het einde de PUR en PE laag van de warmte leiding verwijderd, zodat alleen de stalen binnenbuis van de leiding tegen het reactieframe ruste. Hierdoor was het duidelijk dat de axiale kracht via de stalen binnenbuis op het reactieframe werd overgedragen. Om dezelfde reden is kort achter de klem van de thruster de PUR+PE ook verwijderd.

Bij een aanvullende test (op 4 november) op een leiding met GRP laag is de ruimte tussen de PUR/PE/GRP en reactieframe opgevuld met hout.

Tijdens de testen zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Opgelegde klemkracht.
- Axiale kracht thruster.
- Vervorming leiding:
 - Laser 1: tussen ondergrond en klemunit, voor meting verplaatsing klemunit.
 - Laser 2: tussen einde buitenbuis en reactieframe, voor meting verplaatsing PE buitenbuis t.o.v. stalen binnenbuis.
 - Fotogrammetrie: voor vervorming leiding (alleen tijdens de testen op 27 en 28 oktober).

- Meting afstand tussen meetboutjes op de leiding (tijdens de testen op 4 november).

Bij de testen op 27 en 28 oktober is de vervorming van de leiding gemeten door SIGMA 3D middels fotogrammetrie. Bij de extra testen op 4 november was deze meting niet beschikbaar. Als alternatief is geprobeerd om de vervorming met meetboutjes en een schuifmaat te meten. Tevens is op 4 november de verplaatsing van twee meetpunten op de buis gemeten met een laser.

De klemkracht en de axiale kracht worden gestuurd door de druk in het hydraulische systeem. Hierbij wordt de hydraulische druk in het systeem gemeten, waarna deze omgerekend moet worden naar een kracht. De hier van toepassing zijnde conversie factoren voor het omrekenen van de druk naar de kracht zijn:

- Klemkracht: 1 bar komt overeen met 60,61 kN (6 mt).
- Axiale kracht: 1 bar komt overeen met 15,06 kN (1,5 mt).

2.3 Afmetingen leiding

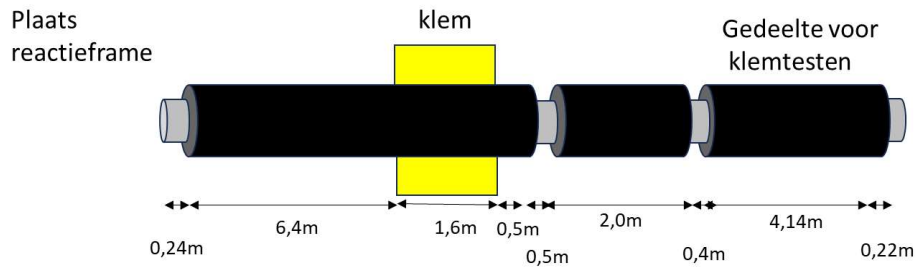
Voor de testen zijn door Gasunie 2 leidingsegmenten van fabrikant Isoplus beschikbaar gesteld. De leiding bestaat, van binnen naar buiten, uit een stalen binnenbuis, een PUR isolatielaag en een PE buitenbuis. Een deel van de testen is uitgevoerd op een leiding waarbij door TDC International een extra laag van GRP (Glasfibre Reinforced Plastic) aangebracht (twee dikten op verschillende buisgedeelten). De door TDC International hiervoor gehanteerde productnaam is pau wrap®.

De afmetingen van de leidingsegmenten zijn:

- Totale lengte: 16 m.
- Stalen binnenbuis:
 - Buitendiameter: 508 mm.
 - Wanddikte: 8 mm.
- PE Buitenbuis:
 - Buitendiameter: 710 mm.
 - Wanddikte: 9,4 mm (10 mm volgens meting na afloop test).
- Isolatielaag PUR:
 - Dikte: (dubbele dikte: $711 - 9,4 - 508 = 194$ mm dus 97 mm).
- Dikte GRP (pau wrap®):
 - Eerste deel buis: 5/6 mm (opgegeven).
 - Tweede deel buis:
 - 10 mm (opgegeven).
 - 11,5 mm (gemeten voor gedeelte met axiale test).
 - 11,8 mm (gemeten voor gedeelte met klemtest na afloop).

Naast de bovenstaande leidingen is door TDC-International een tweetal buisdelen aangeleverd met lengten van ongeveer 4 m, die alleen uit GRP bestaan. Een buisdeel had een opgegeven dikte van 8 mm en het andere buisdeel een opgegeven dikte van 10 mm.

Voor de verschillende testen zijn verschillende delen van de leiding gereserveerd. Figuur 2.3 en Tabel 2.1 geven de lengten van de verschillende gedeelten.



Figuur 2.3 Leiding met de verschillende delen voor de verschillende testen.

Tabel 2.1 Lengte verschillende delen leiding, gerekend vanaf einde bij reactieframe.

Omschrijving leidingsegment	Lengte segment [m]	Begin [m]	Einde [m]
Leiding zonder PUR etc.	0,24	0	0,24
Leiding met PUR etc.	6,4	0,24	6,64
klem	1,6	6,64	8,24
Leiding met PUR etc.	0,5	8,24	8,74
Leiding zonder PUR etc.	0,5	8,74	9,24
Gereserveerd voor schuifproeven Deltares (AAMBEELD WP3)	2	9,24	11,24
Leiding zonder PUR etc.	0,4	11,24	11,64
Klemproef, leiding met PUR etc.	4,14	11,64	15,78
Leiding zonder PUR etc.	0,22	15,78	16
totaal	16		

2.4 Uitgevoerde testen

De volgende testen zijn uitgevoerd op de beschikbaar gestelde leidingen:

- Leiding bestaande uit alleen GRP, dikte 5 mm:
 - Bepaling maximale klemkracht, zonder axiale kracht.
- Leiding bestaande uit alleen GRP, dikte 10 mm:
 - Bepaling maximale klemkracht, zonder axiale kracht.
- Warmteleiding:
 - Bepaling maximale klemkracht, zonder axiale kracht.
 - Bepaling maximale drukkracht.
- Warmteleiding met GRP (pau wrap ®), 5 mm:
 - Bepaling maximale drukkracht.
- Warmteleiding met GRP (pau wrap ®), 12 mm:
 - Bepaling maximale drukkracht.
 - Bepaling maximale klemkracht, zonder axiale kracht.

De volgende testen zijn uitgevoerd voor de bepaling van de maximale klemkracht:

- Standaard leiding.
- Leiding alleen van GRP, dikte 5 mm.
- Leiding alleen van GRP, dikte 10 mm.
- Standaard leiding met extra laag van 12 mm GRP.

Voor de bepaling van de maximale drukkracht zijn de volgende testen uitgevoerd:

- Standaard leiding.
- Leiding met GRP, 5 mm.
- Leiding met GRP, 10 mm.

De testen zijn op de volgende dagen uitgevoerd:

- 20 en 21 okt 2022: klemtesten.
- 27 oktober 2022: test op St-PUR-PE leiding.
- 28 oktober: test op St-PUR-PE-GRP leiding (10 mm GRP, Glassfibre Reinforced Plastic) op gedeelte radiale test, 5 mm GRP op gedeelte axiale test).
- 4 november: aanvullende test op St-PUR-PE-GRP leiding (12 mm GRP).

De aanvullende test op 4 november was een extra ingelaste test naar aanleiding van de testresultaten op 28 november. Voor deze testen is de leiding die op 28 oktober al was getest van een nieuwe, en dikkere, GRP laag voorzien.

3 Resultaten testen radiale belasting

3.1 Meetresultaten

De maximaal mogelijke klemkracht is bepaald door het opvoeren van de radiale druk. Bij de eerste serie testen is iedere keer een geselecteerd leidinggedeelte van 3 m zuiver radiaal belast. In aanvulling hierop is na afloop van de laatste axiale test op een St-PUR-PE-GRP buis daarop een radiale test uitgevoerd.

De klemkracht is gemeten middels de druk in het hydraulische systeem. De druk in het contactvlak tussen leiding en klem is niet apart gemeten.

De buisdelen die alleen uit GRP bestonden, begonnen bij een druk van ongeveer 20 bar te bewegen. Bij een druk van 35 bar was er een licht krakend geluid hoorbaar. Mogelijk was er daarbij al sprake van breuk van enige vezels. Voor de St-PUR-PE leiding was er bij 30 bar volledig contact tussen de schalen en de leiding. Bij een druk van 50 à 60 bar was er een licht krakend geluid. Bij een druk van 60 a 80 bar was er een goed hoorbaar krakend geluid hoorbaar.

In Tabel 3.1 zijn de gemeten radiale krachten op moment bezwijken van de buis weergegeven. De radiale kracht is zowel in de gemeten waarde (bar) als in (kN) weergegeven.

Tabel 3.1 Resultaten klemtesten.

Buis	Dikte GRP [mm]	F _{radial} [bar]	F _{radial} [kN]	Observaties tijdens de test
Alleen GRP	10 ¹⁾	104	1404	Bij 35 bar een licht gekraak, mogelijk eerste signaal van begin breuk; druk van 80 bar voor langere tijd mogelijk, bij druk van 104 bar breuk
Alleen GRP	8 ¹⁾	79	1023	Bij 35 bar een licht gekraak, mogelijk eerste signaal van begin breuk; breuk bij 79 bar; druk van 69 bar voor langere tijd mogelijk
St-PUR-PE	0	81	1034	eerste signalen van breuk bij druk van 50 a 60 bar (geluid van breuk); plastische vervorming bij 81 bar
St-PUR-PE	0	84	1085	2 ^e test, overlap plaats klem met eerdere test over ongeveer 0,25 m met plaats eerste test; plastische vervorming bij 84 bar; eerste signalen breuk niet gerapporteerd
GRP + PE	10	285	4431	Druk stapsgewijs opgevoerd, met openen klem bij iedere stap voor inspectie op mogelijke schade;
St-PUR-PE-GRP (axial test) ²⁾	5 ¹⁾	70	842	Combinatie van radiale en axiale kracht, bezwijken na herhaalde axiale belasting tot 15 bar
St-PUR-PE-GRP ²⁾	11,8	292	4536	Radiale test na afloop van axiale test
St-PUR-PE	0	80	3637	

¹⁾ volgens opgave leverancier (TDC-International).

²⁾ test na bezwijken op axiale kracht, geen hechting tussen PUR en stalen binnenbuis, lengte buissegment 9 m i.p.v. 3 m.

Opgemerkt moet worden dat bovenstaande waarden in bijna alle gevallen het resultaat zijn van testen waarbij geen axiale belasting is aangebracht. De waarden voor de test met 5 mm GRP zijn daarop een uitzondering. Welke klemkracht maximaal kan worden aangebracht in combinatie met een axiale kracht is tijdens de testen niet onderzocht. Bij de testen was het criterium voor de radiale kracht dat deze voldoende groot moet zijn om slip tussen klem en buitenbuis te voorkomen.

3.2 Bezwijkvorm

Figuur 3.1 laat de bezwijkvorm van de leiding voorzien van een GRP laag zien. Deze bezwijkvorm kan worden beschreven als delaminatie van de verschillende lagen van de GRP. Evenals bij de leiding zonder GRP treedt het bezwijken op tussen de schalen van de klem van de thruster (deze omhullen de buis niet over de gehele omtrek).



Figuur 3.1 Bezwijkmechanisme GRP leiding bij alleen klemkracht (foto: Deltares).



Figuur 3.2 Bezwijkmechanisme GRP leiding bij alleen een klemkracht (foto: Herrenknecht).



Figuur 3.3 Bezwijkvorm PE leiding bij alleen klemkracht (foto: Deltares).

Figuur 3.3 toont de bezwijkvorm is de warmte leiding met een PE buitenbuis. De testen met alleen een radiale belasting door de klemmen laten zien dat het bezwijkmechanisme bestaat uit het uitknikken van de buitenbuis in de open ruimte tussen de schalen van de klem. Dit betekent dat, naast de materiaaleigenschappen van de buis, ook de open ruimte tussen de schalen van de klem bepalend is voor de maximaal mogelijke klemkracht.



Figuur 3.4 Detail klem en leiding (foto: Deltares).

3.3 Kwantitatieve beschouwing

Uit de radiale belasting kan een radiale spanning worden berekend, en daarmee ook de tangentiële kracht in de omtreksrichting. Hieruit kan tevens de radiale spanning op de buitenzijde van de buis en de daaruit volgende normaalkracht in de buiswand bepaald.

In Tabel 3.2 zijn de gemeten en berekende bezwijkwaarden bij de verschillende testen samengevat. Voor de berekening van de spanningen op de buis (σ_{rad}) en de tangentiële normaalkracht (F_n) in de buiswand is uitgegaan van een verlies van 20 bar in het systeem (gebaseerd op visuele waarneming van het begin van beweging van de klemmen tijdens het opvoeren van de druk in het hydraulisch systeem).

Tabel 3.2 Klemkracht bij bezwijken.

buistype	dikte GRP [mm]	$F_{radiaal, bezwijk}$ [bar]	$F_{radiaal, bezwijk}$ [kN]	D_{outer} [mm]	σ_{rad} [kPa]	F_n [kN/m]
GRP	10 ¹⁾	104	5091	721,2	1404	506
GRP	8 ¹⁾	81	3697	719,2	1023	368
St-PUR-PE-GRP	10 ¹⁾	287	16062	721,2	4431	1598
St-PUR-PE-GRP ²⁾	5 ¹⁾	70	3031	716,2	842	301
St-PUR-PE-GRP ²⁾	11.8	292	16486	723,0	4536	1640
St-PUR-PE	0	80	3637	711,2	1017	362

¹⁾ volgens opgave leverancier (TDC-International).

²⁾ test na bezwijken op axiale kracht, geen hechting tussen PUR en stalen binnenbuis, lengte buissegment 9 m i.p.v. 3 m.

De waargenomen geluiden bij lagere klemkrachten kunnen duiden op bezwijken van onderdelen van de leiding bij lagere waarden. Daarbij kan worden gedacht aan het bezwijken van de afstandhouders in de isolatielaag. Hiermee is bij het bepalen van de bezwijkwaarde in Tabel 3.2 geen rekening gehouden.

Te zien is dat de dikte van de GRP laag medebepalend is voor de bezwijkwaarde. De combinatie van PE-GRP geeft een hogere bezwijkwaarde dan alleen een GRP laag. Bij een dikte van 5 mm is de bijdrage van GRP verwaarloosbaar.

Uit de testen is gebleken dat het bezwijkmechanisme voor de klemkracht het uitknikken van de buitenbuis tussen de schalen van de klem is. Daarmee wordt de toelaatbare radiale kracht op de buis afhankelijk van de buitendiameter van de leiding en de afmetingen van de schalen van de klem. De aanwezige kromming en de samenwerking tussen buitenbuis en isolatielaag zijn van belang. Een eerste conservatieve benadering zou zijn om uit te gaan van alleen de buitenbuis.

Bij leidingen waarbij de buitenbuis uit twee lagen bestaat, zoals leidingen waarop een GRP laag is aangebracht, is de situatie nog gecompliceerder vanwege de sterk verschillende stijfheden van de twee materialen. De meest stijve laag zal de meeste omtrek spanning naar zich toetrekken.

4 Resultaten testen axiale belasting

4.1 Meetresultaten

4.1.1 St-PUR-PE leiding, belasting

Bij het axiaal belasten van de buis door de thruster is er eerst een klemkracht aangebracht. Vervolgens is de axiale kracht opgevoerd. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de verschillende belastingcombinaties tijdens het testen van deze buis.

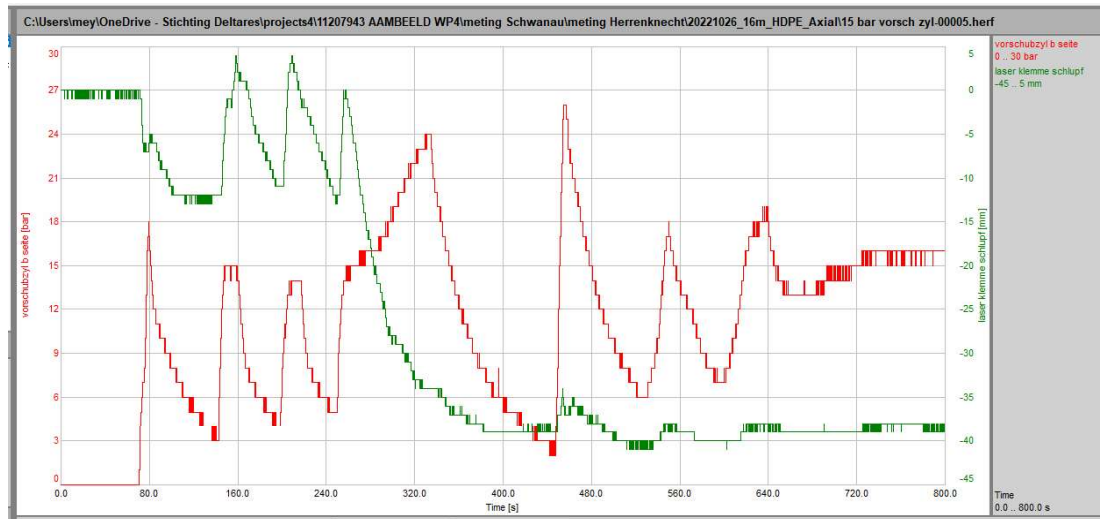
Tabel 4.1 Meting warmte leiding, data uit rapport Herrenknecht (Bijlage C).

Test	F _{klem} [bar]	F _{axial} [bar]	Observaties tijdens de test
1	50	20 (piek 26 bar)	Blijvende verplaatsing bij F _{ax} > 18 bar Opvallend is dat bij herhaald opvoeren van de belasting de verplaatsing afneemt en bij teruglopen weer toeneemt
2	50	52 (= piek)	Blijvende verplaatsing bij F _{ax} > 45 bar Blijvende verplaatsing klem: ongeveer 20 mm Verplaatsing klem over leiding ongeveer 1 à 2 cm, niet goed op te meten uit foto
3	50	60 (= piek)	Verplaatsing klem blijft toenemen, ook wanneer de axiale belasting terugvalt Blijvende verplaatsing klem tijdens deze stap ongeveer 12 cm; bij wegvallen axiale kracht van 37 bar naar 0 teruggang met ongeveer 12 mm; Bij 54 bar en 37 bar snelle terugval axiale belasting Totale verplaatsing klem ongeveer 12 cm, verplaatsing PUR over staal ongeveer 5 cm, Verplaatsing klem over PE: ongeveer 14 cm (beiden inclusief verplaatsing bij vorige belastingstap, bepaald uit opmeting in foto)

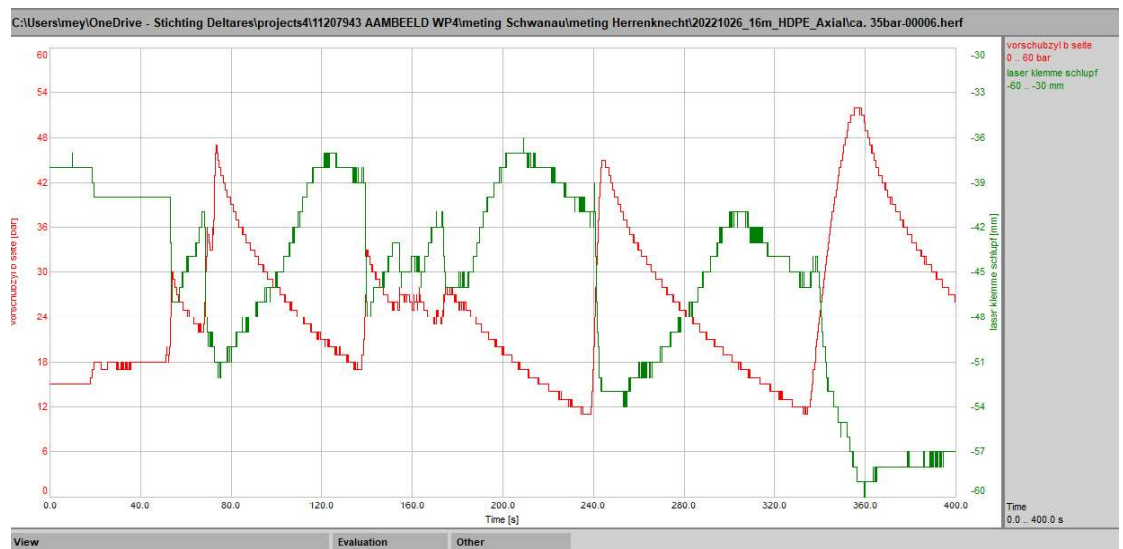
Tijdens de testen op de St-PUR-PE leiding is het niet mogelijk gebleken om de axiale kracht constant te houden. Als bij het inregelen een bepaalde kracht was opgelegd liep deze daarna weer terug. Dit is duidelijk te zien in de figuren met het gemeten verloop van de axiale kracht (Figuur 4.1, Figuur 4.2, Figuur 4.5, Figuur 4.6).

Als tevens naar het verloop van de verplaatsing van de klem wordt gekeken blijkt dat bij het bereiken van een piekwaarde de klem over de leiding gaat verschuiven. Deze verschuiving valt samen met een afname van de axiale kracht.

Bij de laatste belastingstap blijkt dat de verplaatsing van de klem blijft toenemen, ook voor de fasen waarbij de axiale belasting terugloopt. Dit suggereert dat er sprake is van een tijdsafhankelijk gedrag. De bereikte piekwaarde van de axiale belasting is daarmee slechts een bovengrens voor de sterkte.



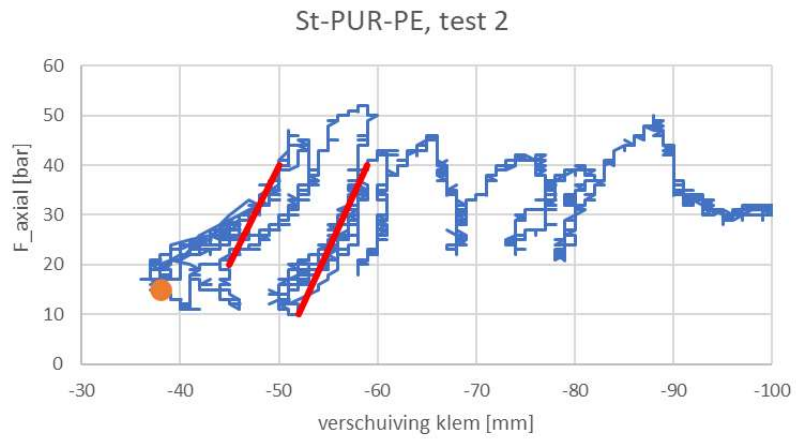
Figuur 4.1 Verloop axiale belasting en verplaatsing klem, eerste test, meetdata Herrenknecht.



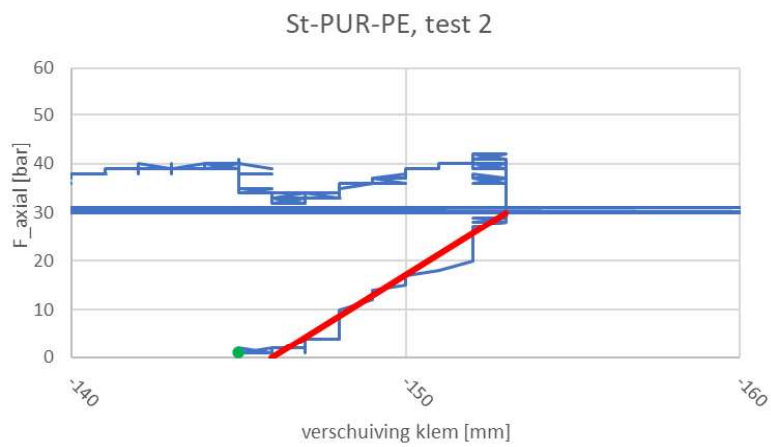
Figuur 4.2 Verloop axiale belasting en verplaatsing klem, tweede test (detail), meetdata Herrenknecht.

Het kracht-verplaatsingsverloop tijdens de testen is weergegeven in Figuur 4.3, Figuur 4.4 en Figuur 4.7).

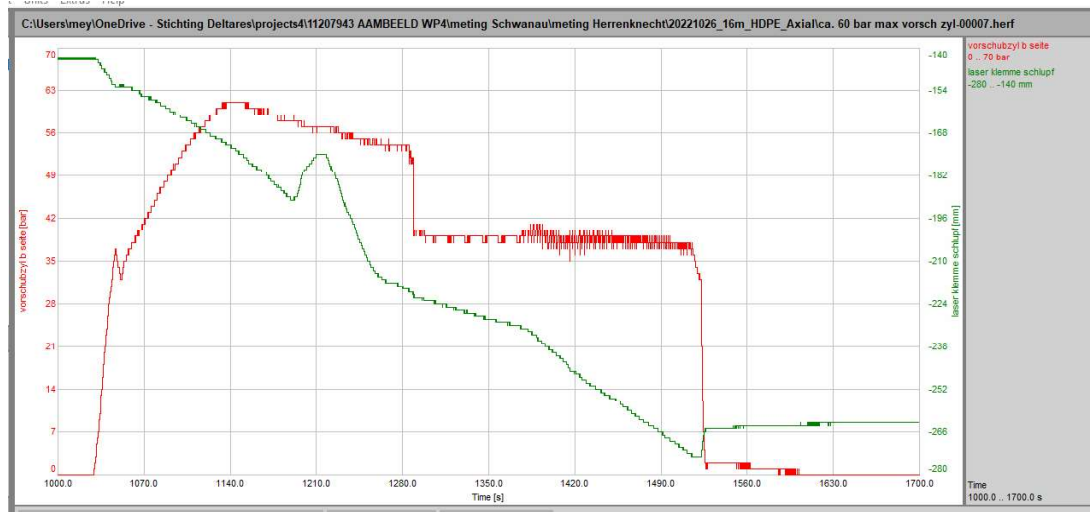
Figuur 4.3 toont het kracht-verplaatsingsverloop van de tweede test. Hier lijkt de stijfheid toe te nemen bij toenemende verplaatsing. Bij de ontlastfase (Figuur 4.4) wordt wel een lineair verband tussen vervorming en belasting gevonden.



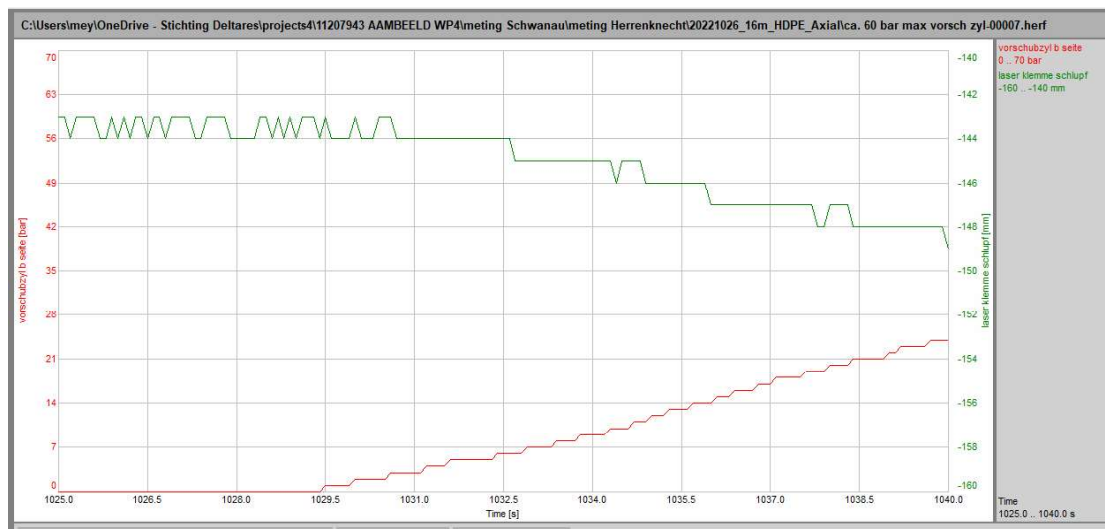
Figuur 4.3 Kracht-verplaatsing verloop axiale belasting, tweede test.



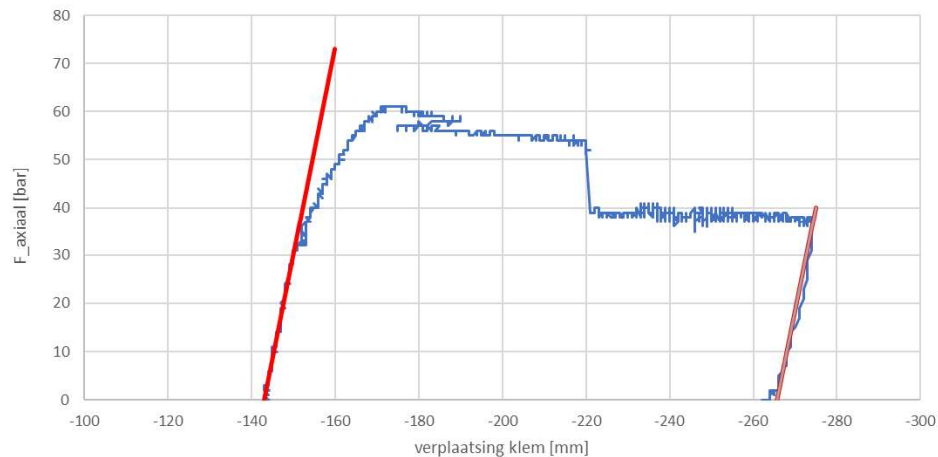
Figuur 4.4 Kracht-verplaatsing verloop axiale belasting bij ontlasten, tweede test.



Figuur 4.5 Verloop axiale belasting en verplaatsing klem, derde test, meetdata Herrenknecht.



Figuur 4.6 Verloop axiale belasting en verplaatsing klem, derde test (detail), meetdata Herrenknecht.



Figuur 4.7 Kracht-verplaatsing verloop axiale belasting, derde test.

Uit het verloop van de kracht en de verplaatsing in de tijd bij de derde test is niet direct het begin van bezwijken te zien. Daarom is in Figuur 4.7 het kracht-verplaatsingsverloop tijdens de derde test weergegeven. Te zien is dat tot een axiale belasting van ongeveer 35 bar er sprake is van een lineair verband. Dezelfde helling in het kracht-verplaatsingsverloop wordt ook gevonden tijdens de ontlastfase.

Boven een axiale belasting van 35 bar is het kracht-verplaatsingsverloop niet-lineair. Bij een axiale belasting van 60 bar wordt een piekwaarde bereikt waarna de belasting terugvalt. In deze fase is er sprake van een doorgaande verplaatsing in de tijd. Bij een terugval tot 40 bar wordt gedurende een stabilisering van de terugval gevonden, maar wel bij een doorgaande verplaatsing.

Het gevonden gedrag duidt op een begin van bezwijken bij 35 bar. Daarboven kan de kracht nog wel toenemen, en valt daarna terug. Bij een belasting van 40 bar is er sprake van een doorgaande vervorming. Dit duidt op een kruip gedrag.

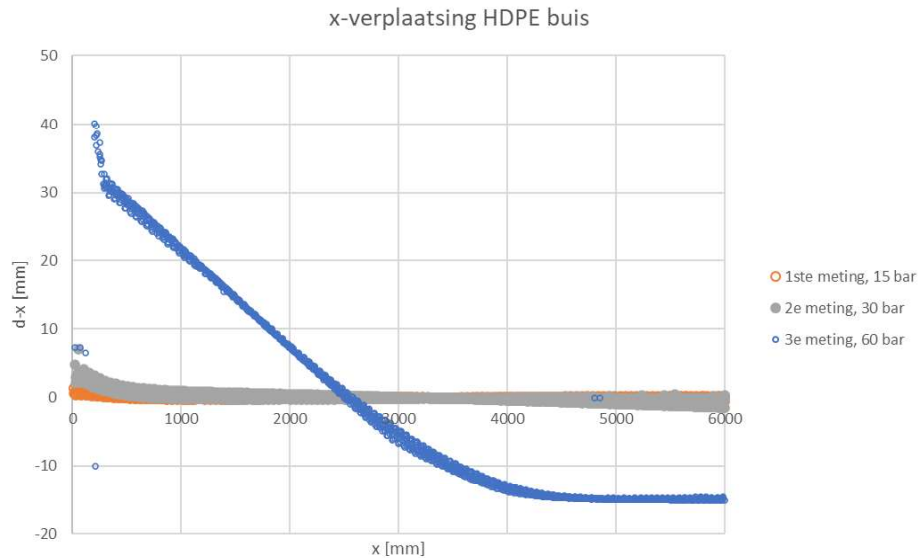
4.1.2 St-PUR-PE leiding, gemeten vervorming

Onderstaande figuren geven de gemeten verplaatsing in respectievelijk de x-richting, de y-richting en de z-richting voor drie axiale belastingen. Hierin is:

- x: axiale richting.
- y: transversale richting, horizontaal.
- z: verticale richting.

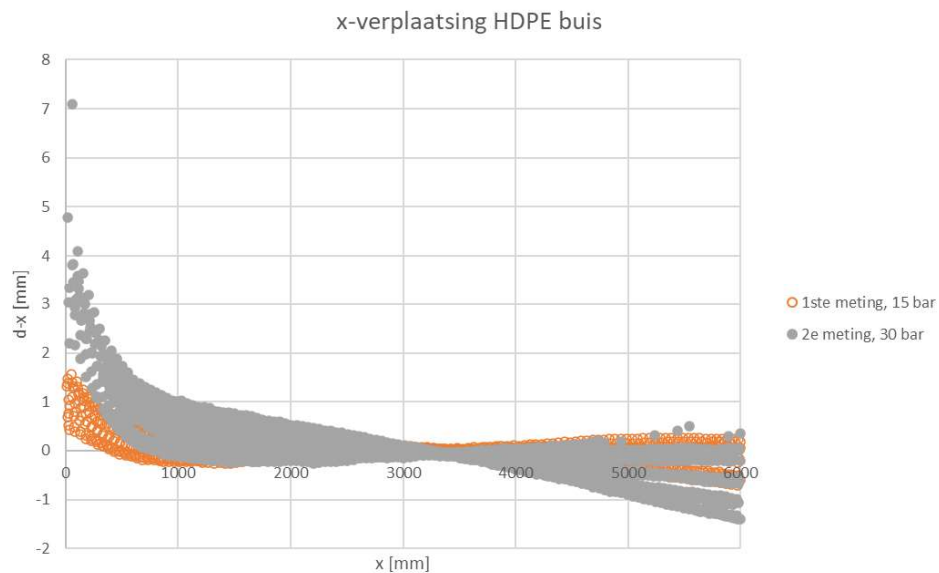
De meting is uitgevoerd terwijl de leiding onder een axiale belasting stond. Dit betekent dat in de meting zowel de elastische als de plastische vervorming is meegenomen.

In de figuren is $x = 0$ de rand van de klem en $x = 6000$ mm het einde van de PE-buis nabij het reactieframe.



Figuur 4.8 Verplaatsing in x-richting, alle metingen op St-PUR-PE buis.

Voor een betere inzicht in de axiale verplaatsing bij relatief lage axiale belastingen worden in Figuur 4.9 alleen de axiale verplaatsingen van de eerste twee metingen weergegeven.



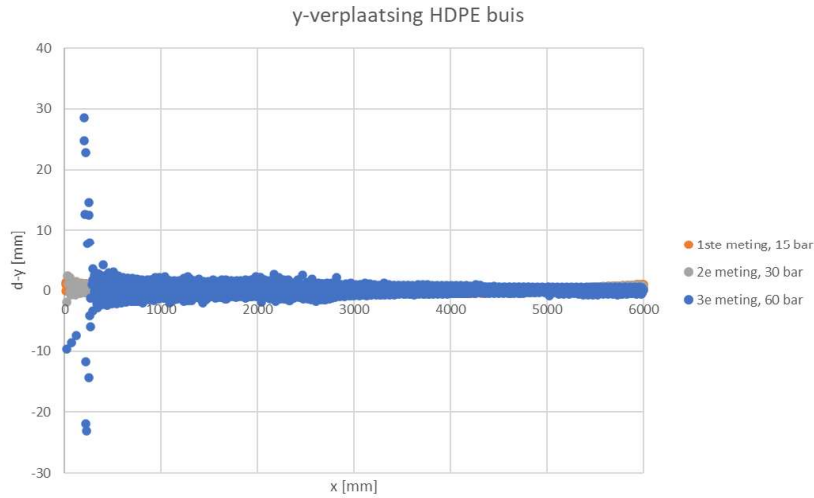
Figuur 4.9 Verplaatsing in x-richting, alleen eerste twee metingen op St-PUR-PE buis.

De axiale belasting geeft een verkorting van de leiding. De rek is het grootste nabij de klem. Dat betekent dat hier de axiale belasting in de buitenbuis snel afneemt met toenemende afstand tot de klem. Bij de meting bij 30 bar wordt nabij de reactie constructie ($x = 6000$ mm) een negatieve verplaatsing gevonden. Dit duidt op het verschuiven van de reactieconstructie richting de klem.

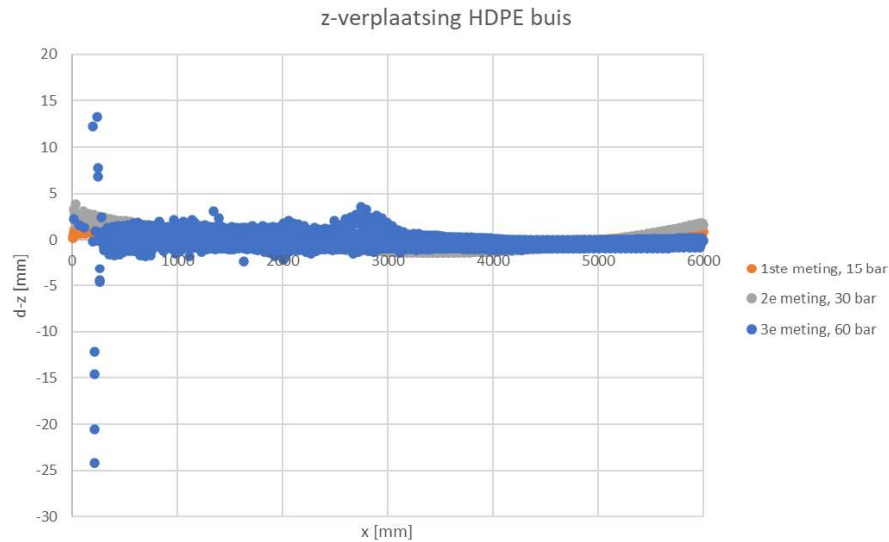
Bij de derde meting (60 bar axiale druk) is er nabij de klem over een korte afstand sprake van een grote axiale vervorming. Dit correspondeert met de geconstateerde plooiën van de

leiding nabij de klem. Bij het reactieframe is sprake van een negatieve verplaatsing, wat duidt op een horizontale verplaatsing van het reactie frame richting de klem. Opvallend is het constante verloop van de axiale vervorming tussen $x = 300$ mm en $x = 3000$ mm. Dit duidt op een constante axiale kracht in de PE buitenbuis over dit gedeelte. Over dit gedeelte wordt dus geen kracht vanuit de buitenbuis op de binnenbuis overgedragen, wat duidt op het bezwijken zijn van de aanhechting tussen de PUR en de binnenbuis over dit gedeelte.

Vervolgens wordt gekeken naar de vervorming in de dwarsrichting (Figuur 4.10 en Figuur 4.11).



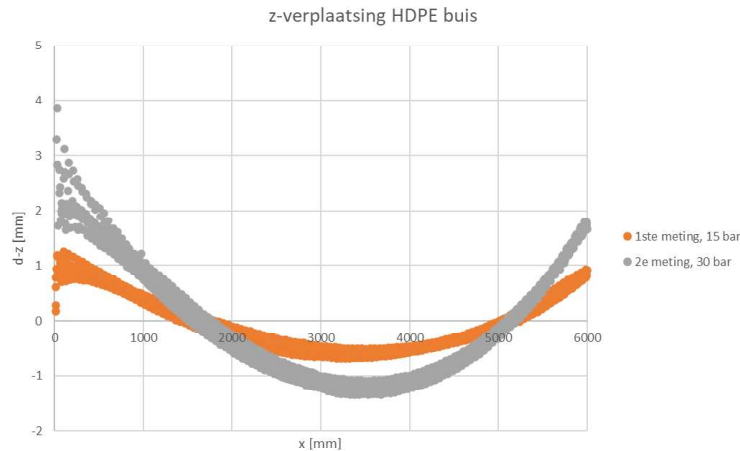
Figuur 4.10 Verplaatsing in y-richting, alle metingen op St-PUR-PE buis.



Figuur 4.11 Verplaatsing in z-richting, alle metingen op St-PUR-PE buis.

In deze figuren is duidelijk het plooiën van de buitenbuis nabij de klem bij een axiale belasting van 60 bar zichtbaar. Voor een beter inzicht in de transversale vervorming is in Figuur 4.12 de verticale vervorming bij de eerste twee metingen met relatief lage axiale

belasting weergegeven. Dit geeft aan dat er sprake is van een beperkte transversale vervorming, ongeveer 2 mm, bij het opvoeren van de axiale belasting.



Figuur 4.12 Verplaatsing in z-richting, alleen eerste 2 metingen op St-PUR-PE buis.

4.1.3 Leiding met GRP, belasting

4.1.3.1 Axiale kracht, buis met 5 mm GRP

Bij het axiaal belasten van de leiding met een GRP laag van 5 mm door de thruster wordt er eerst een klemkracht aangebracht. Vervolgens wordt de axiale belasting opgevoerd. Tabel 4.2 geeft een overzicht van de verschillende belastingstappen op de buis met 5 mm GRP.

Tabel 4.2 Axiale test op leiding met 5/6 mm GRP (uit rapport Herrenknecht Bijlage C).

Nr. meting	Klemkracht [bar]	Axiale kracht [bar]	Observaties tijdens de test
1	50	24	Slip van klem
2	50	56	Optreden van slip
3	60	60	Piekwaarden axiaal tot 58 bar, doorgaande slip bij 50 bar
4	70	70	Axiale kracht valt telkens terug
5	70	41	Lagere axiale kracht

Het verloop van de kracht en de verplaatsing in de tijd is weergegeven in de volgende figuren.

Evenals bij de buis zonder GRP was het niet mogelijk om de axiale kracht contant te houden. Bij elke meting is geconstateerd dat de axiale kracht een bepaalde waarde bereikte en daarna terugviel. In de verplaatsingsmetingen was op dat moment sprake van een toename van de vervorming. Bij de terugval van de axiale druk kwam deze verplaatsing gedeeltelijk terug, maar was er is nog steeds sprake van een blijvende verplaatsing. Dit is duidelijk te zien in de volgende figuren met het gemeten verloop van de axiale kracht en verplaatsing van de klem als functie van de tijd.

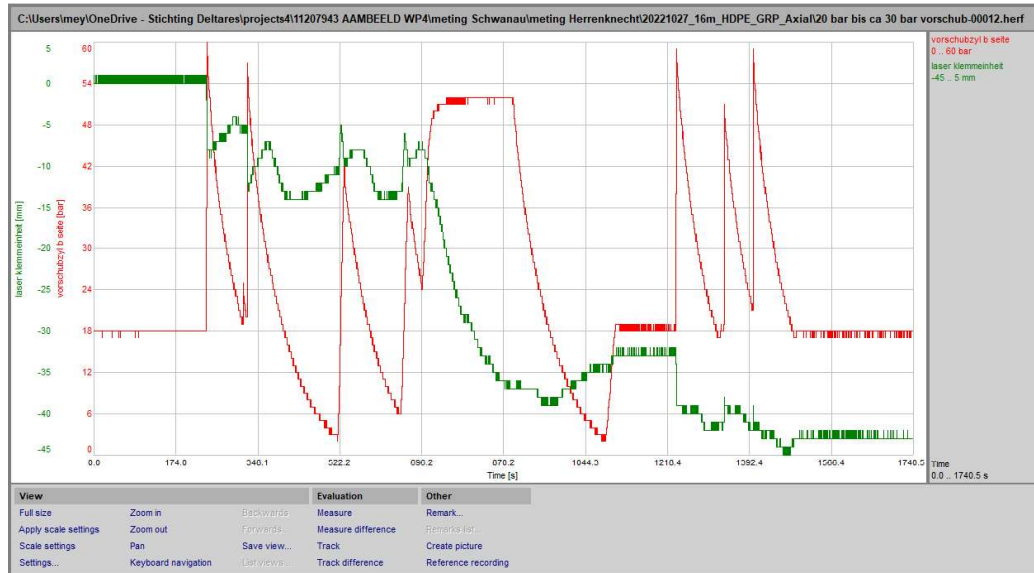


Figuur 4.13 Meting 1 op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding, meetdata Herrenknecht.



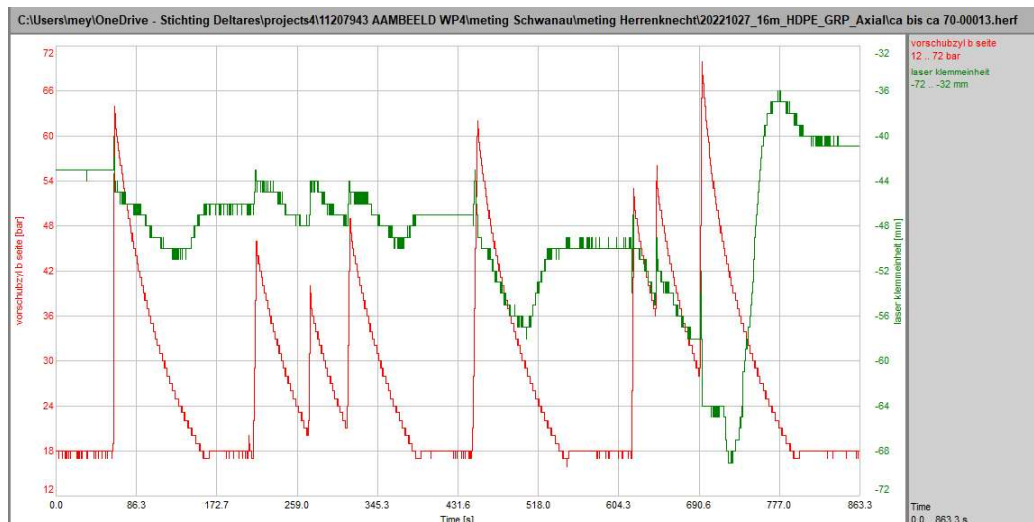
Figuur 4.14 Meting 2 op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding, meetdata Herrenknecht.

Door het dynamische karakter van de axiale kracht is het niet mogelijk om voor deze meting een exacte waarde te bepalen waarbij de klem gaat slippen.



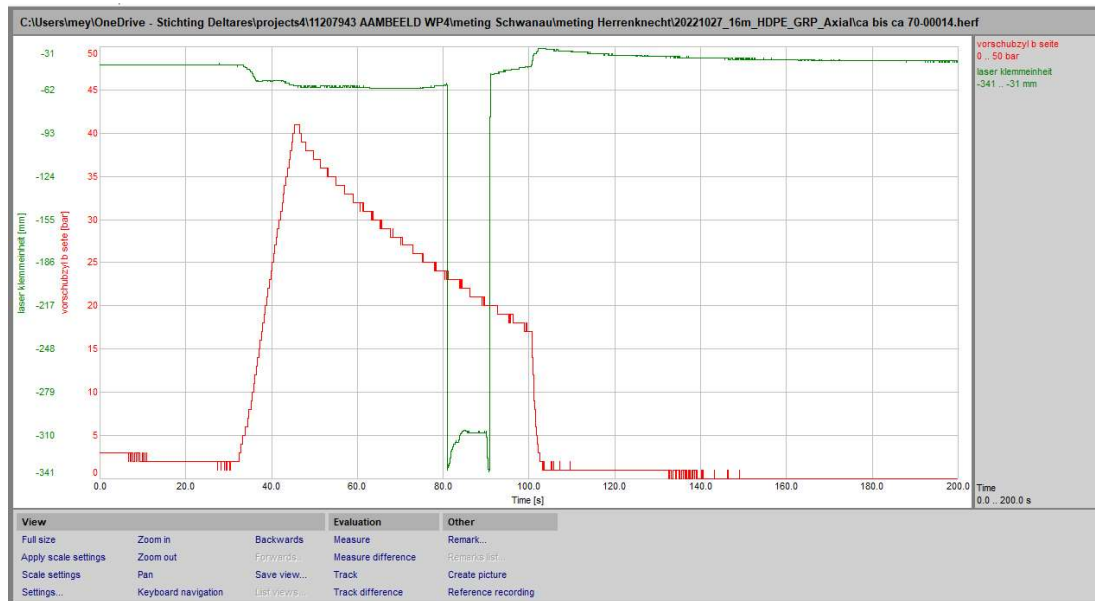
Figuur 4.15 Meting 3 op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding, meetdata Herrenknecht.

In Figuur 4.16 is te zien dat vanaf ongeveer $t = 700$ s er een fase is waarbij de axiale kracht constant is, maar de vervorming wel toeneemt. Hier was sprake van slippen van de klem.



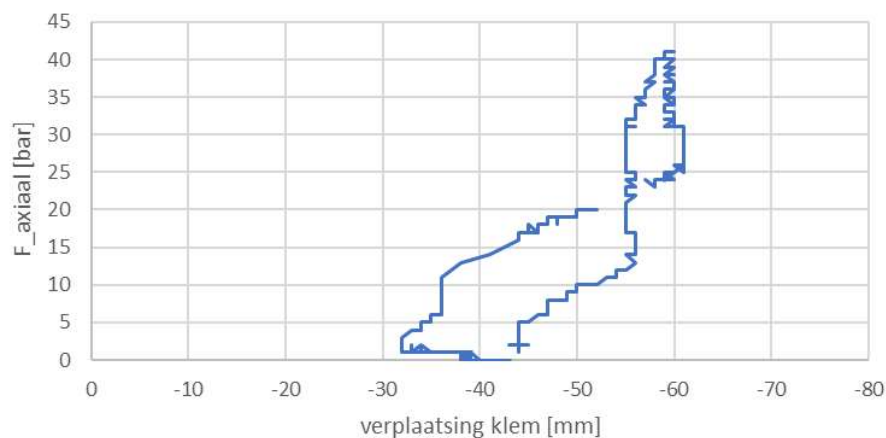
Figuur 4.16 Meting 4 op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding, meetdata Herrenknecht.

Figuur 4.17 toont de laatste meting, met op $t = 100$ s het vermoedelijke moment van bezwijken GRP laag. De axiale kracht is op dat moment ongeveer 18 bar en afnemend. In de klemkracht wordt geen noemenswaardige verandering geconstateerd.



Figuur 4.17 Meting 5 (laatste meting) op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding, meetdata Herrenknecht.

Bezwijken van de GRP laag treed op bij een klemkracht van 70 bar. Deze klemkracht is langere tijd aangehouden, waarbij de axiale kracht varieerde. In het kracht-verplaatsingsverloop (Figuur 4.18) is geen bezwijken op axiale belasting te zien. De oorzaak van bezwijken is dus het bezwijken op de klemkracht.



Figuur 4.18 Kracht-verplaatsingsverloop, meting 5 (laatste meting) op St-PUR-PE-GRP 5 mm leiding.

De exacte axiale klemkracht op moment dat de GRP laag bezwijkt is niet vastgelegd. Waarschijnlijk is dat het moment waarop bij de laatste meting zowel de axiale kracht als de axiale verplaatsing van de klem een sprong vertonen, een gedrag dat bij de andere wisselingen van de axiale kracht niet is waargenomen.

De oorzaak dat de GRP laag op dat moment bezwijkt en niet bij de eerder regelmatig bereikte waarden van meer dan 50 bar axiale kracht is niet duidelijk. Een mogelijke verklaring is kruip van de onderliggende PE buis en PUR laag bij de klem, waardoor de ondersteuning van de GRP laag afnam en de GRP laag steeds meer van de opgelegde radiale belasting

moest opnemen. In hoeverre vermoeiing van de GRP laag door de, niet geplande, wisselende axiale belasting een rol heeft gespeeld is niet te herleiden.

4.1.3.2 Axiale kracht, 12 mm GRP

Bij de aanvullende test op de leiding met 12 mm GRP is voor de test, in afwijking van het meetplan, de ruimte tussen de PUR en buitenbuis met de reactieconstructie niet vrijgehouden. De ruimte is opgevuld met hout (zie Figuur 4.19). De gedachte hierachter was het simuleren van een lange leiding. Nadeel is wel dat de feitelijke randvoorwaarden tijdens de test minder goed gedefinieerd zijn. Ook bleek dat bij het begin van de testen er sprake was van kieren tussen het hout met de leiding en het reactieframe.

De configuratie van de leiding was wel zodanig dat na deze test het mogelijk was de buis om te draaien en nog een test te doen waarbij alleen de stalen binnenbuis tegen het reactie frame drukte.



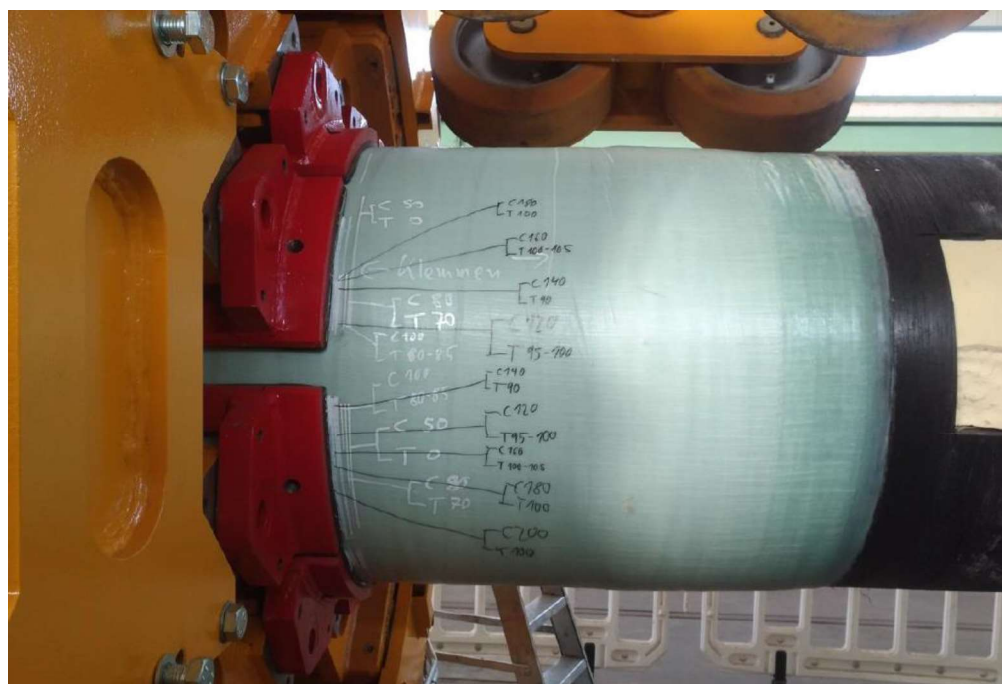
Figuur 4.19 Opvulling ruimte tussen PUR+PE en reactieframe met hout tijdens eerste serie testen op 4 november (foto: Deltares).

De metingen uit de aanvullende test op 4 november staan in Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Axiale test op leiding met 12 mm GRP (rapport Herrenknecht Bijlage C).

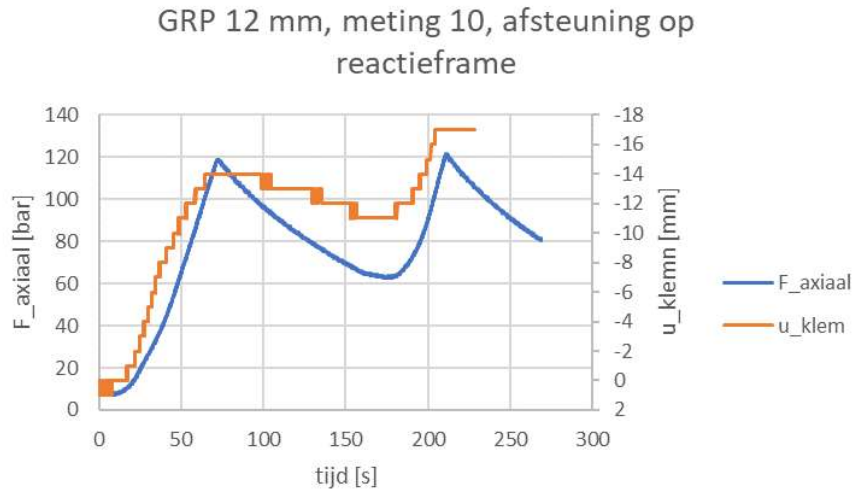
Nr. meting	Klemkracht [bar]	Axiale kracht [bar]	Opmerking / observaties
1	50	38	Verloop kracht, verloop verplaatsing klem
2 / 3	70	37	Verloop kracht, verloop verplaatsing klem
4	70	80	Verloop kracht, grootste toename verplaatsing op moment dat kracht minimaal was
5	100	82	Enige variatie kracht, verplaatsing neemt sterk toe bij kleien toename kracht maar stabiliseert bij constante kracht
6	120	100	Kracht nagenoeg constant, toename verplaatsing met stabilisatie bij constante kracht
7	140	94	Kracht nagenoeg constant, geen significante verandering verplaatsing
8	160	108	Kracht nagenoeg constant, kleine toename verplaatsing
9	180	108	Enig verloop kracht, verplaatsing lijkt elastische vervorming (praktische tot geen blijvende vervorming)
10	200	108	Enig verloop in kracht, lichte toename verplaatsing,

Figuur 4.20 toont de verschuiving van de klem ten opzichte van de buis bij de verschillende combinaties van klemkracht en axiale kracht.



Figuur 4.20 Markering op buis ter bepaling slip klem over buis (foto: Herrenknecht), de getallen geven de combinatie van klemkracht (C) en axiale kracht (T) aan (foto: Deltares).

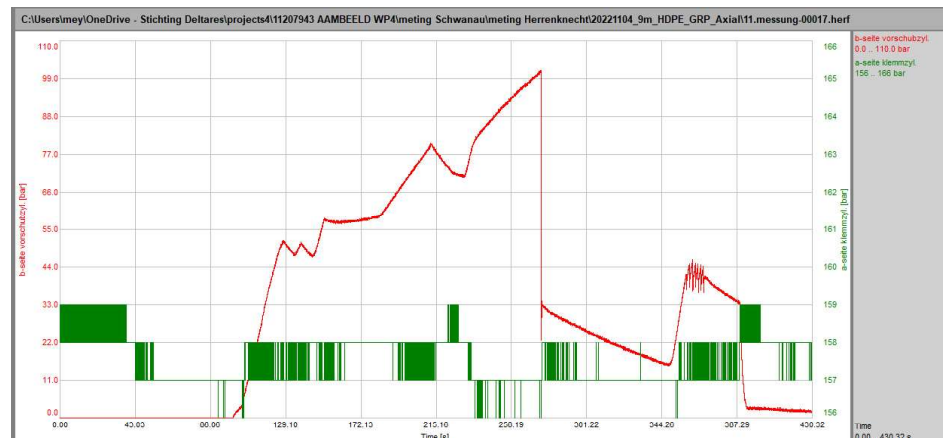
Bij deze test is het, binnen de capaciteit van de thruster, niet mogelijk gebleken om de buis tot bezwijken te belasten.



Figuur 4.21 Verloop axiale kracht en verplaatsing, meting 10, buis met 12 mm GRP, test met afsteunen buitenbuis op reactieframe.

Om toch informatie over de bezwijkbelasting te krijgen is een laatste test uitgevoerd waarbij de buitenbuis niet afsteunde op de houten opstopping. Bij het uitbouwen van de leiding bleek dat de binnenbuis ter plaatse van het reactieframe beschadigd was. Daarom is de buis omgedraaid, zodat een onbeschadigde deel van de binnenbuis tegen het reactieframe steunde. Hierbij zijn twee testen gedaan, een test tot axiaal bezwijken en vervolgens een test om de maximaal mogelijke klemkracht te bepalen.

In de eerste test is een klemkracht van 157 bar aangebracht. Vervolgens is de axiale kracht opgevoerd tot het moment van bezwijken. Figuur 4.22 toont het verloop van de krachten. Bij deze meting is de verplaatsing van de klem niet gemeten, zodat het niet mogelijk is om een kracht-verplaatsingsdiagram op te stellen.



Figuur 4.22 Verloop klemkracht (groene lijn) en axiale kracht (rode lijn) bij test tot axiaal bezwijken, meetdata Herrenknecht.

Tijdens het opvoeren van de test werden een paar keer harde knallen gehoord. De eerste keer was bij een axiale kracht van 95 bar, de tweede keer bij een axiale kracht van 101 bar. Daarbij was de maximale axiale kracht bereikt.

Uit de vervorming bij het einde van de buis (Figuur 4.23) blijkt dat het bezwijkmechanisme het afschuiven van de PUR over de stalen binnenbuis is.

Bij deze test is de verplaatsing van de klem niet gemeten. Daarom kan hier geen kracht-verplaatsingsdiagram worden geconstrueerd en daarmee is niet duidelijk wat de kracht geweest is waarbij het lineair-elastisch gedrag overgaat in een niet-lineair elastisch gedrag.

Aan vrije einde pijp geconstateerd dat er verschuiving optrad tussen PUR en staal (afschuiven over oppervlak PUR-staal). Bij iedere verdere kan werd de verschuiving sprongsgewijs groter. De axiale kracht die nog kon worden opgelegd nam af.



Figuur 4.23 Verschuiving PUR t.o.v. staal aan einde test, witte lijn is oorspronkelijke positie einde PUR t.o.v. staal, test na omdraaien leiding (foto: Deltares).

Het bezwijkmechanisme voor axiale belasting is het afschuiven van de PUR over de binnenbuis. De GRP laag, mits van voldoende dikte, verhoogt de bezwijkwaarde, van 60 bar bij de ST-PUR-PE leiding naar 101 bar bij de St-PUR-PE-GRP leiding.

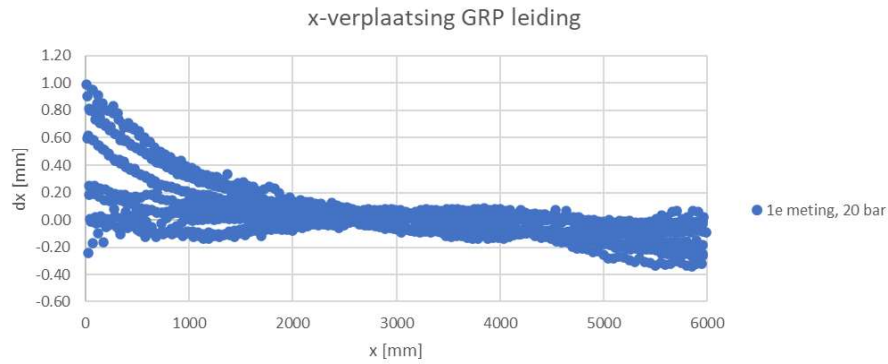
Bij de meting aan de St-PUR-PE leiding zijn er indicaties voor een tijdsafhankelijk gedrag, of hiervan bij de St-PUR-PE-GRP leiding ook sprake is laat zich uit de meetdata niet afleiden.

De laatste test was een test voor het bepalen van de klemkracht waarbij de buis bezwijkt. Voor de resultaten van deze meting wordt naar paragraaf 3.1 verwezen.

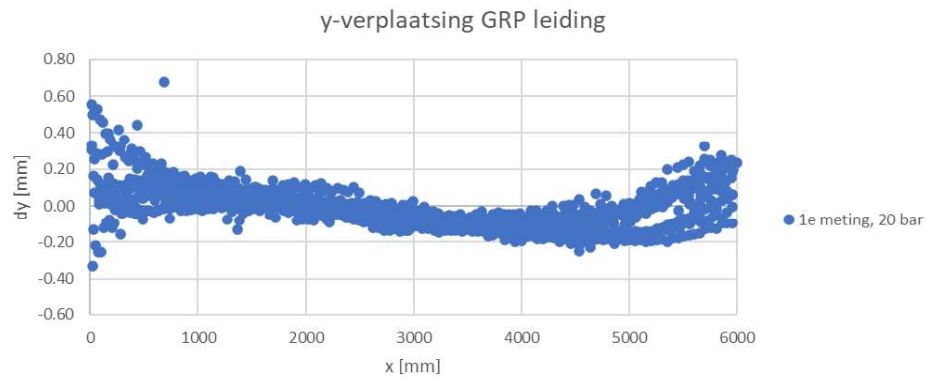
4.1.4 Leiding met 5 mm GRP, gemeten vervorming

Uit de resultaten van de fotogrammetrie is de vervorming van de leiding bepaald.

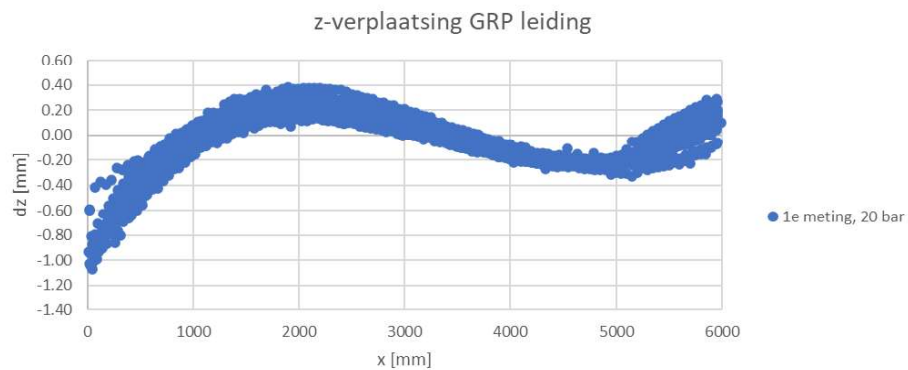
Onderstaande figuren geven de gemeten verplaatsing in x- y- en z-richting.



Figuur 4.24 Verplaatsing in x-richting, meting op St-PUR-PE-GRP buis.



Figuur 4.25 Verplaatsing in y-richting, meting op St-PUR-PE-GRP buis.



Figuur 4.26 Verplaatsing in z-richting, meting op St-PUR-PE-GRP buis.

Bij de hier gebruikte kracht (20 bar) is de vervorming beperkt gebleven tot 0,4 mm. In axiale richting is er over de eerste 2 m sprake van een relatief sterk verloop van de axiale rek in de GRP laag. Dit is het traject waarover de krachten vanuit de klem naar de binnenbuis worden overgebracht. Na $x = 2000$ mm is de vervorming beperkt tot ongeveer 0,2 mm over 4 m ($\epsilon = 5E-5$).

Aan het einde van de leiding, nabij het reactieframe, is er sprake van een axiale verschilverplaatsing van ongeveer 0,2 mm over de hoogte van de buis. Dit duidt op een kleine hoekvervorming van de leiding (ongeveer $0,2/710 = 1:3500$). Deze hoekvervorming is ook zichtbaar in de gemeten verplaatsing in verticale richting van ongeveer 0,3 mm over 1 m (1:3300). Dit soort hoekverdraaiingen zal het gevolg zijn van een ongelijkmatige verdeling van de axiale drukkracht over de omtrek van de leiding en/of een ongelijkmatige reactiekracht bij het reactieframe door het niet zuiver vlak zijn van het einde van de buis of oplegvlak van het reactieframe.

In de z-richting valt de gebogen vorm op. Dit suggereert een buiging in de verticale richting. De amplitude is beperkt (orde 0,3 mm). Ook in de y-richting lijkt er sprake te zijn van een kleine uitbuiging, de amplitude is orde 0,3 mm.

4.1.5 Leiding met 12 mm GRP, gemeten vervorming

Zoals aangegeven was het niet mogelijk om op 4 november de vervorming van de leiding te meten met fotogrammetrie. Daarom is voor deze dag gebruik gemaakt van meetboutjes (5 stuks, onderlinge afstand ongeveer 10 cm) en reflectoren voor meting met de laser (2 stuks) op de leiding. Figuur 4.27 toont de positie hiervan op de buis.



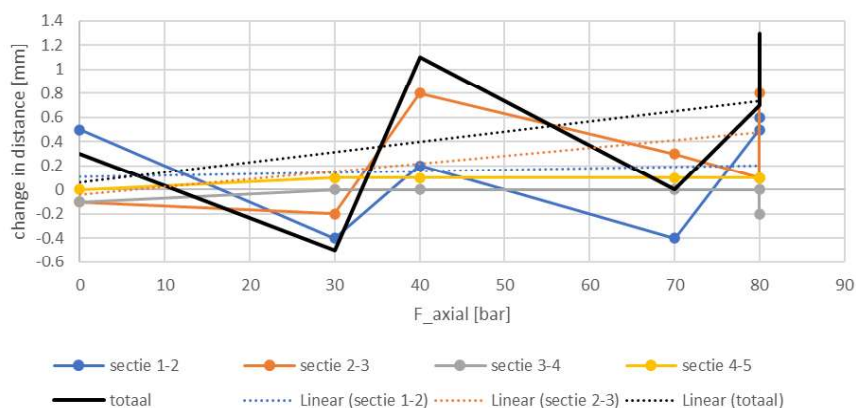
Figuur 4.27 Plaats 5 meetboutjes en 2 reflectoren op leiding, meting 4 november (foto: Deltares).

In Tabel 4.4 is de gemeten afstand tussen de meetboutjes gegeven.

Tabel 4.4 Gemeten afstand tussen meetboutjes, meting 4 november.

F_klem [bar]	F_ax [bar]	Sectie 1-2 [mm]	Sectie 2-3 [mm]	Sectie 3-4 [mm]	Sectie 4-5 [mm]
50	0	95,2	88,3	95,3	91,9
70	30	94,3	88,2	95,4	92
80	40	94,9	89,2	95,4	92
100	70	94,3	88,7	95,4	92
100	80	95,2	88,5	95,4	92
120	80	95,3	89,2	95,2	92
nulmeting	0	94,7	88,4	95,4	91,9

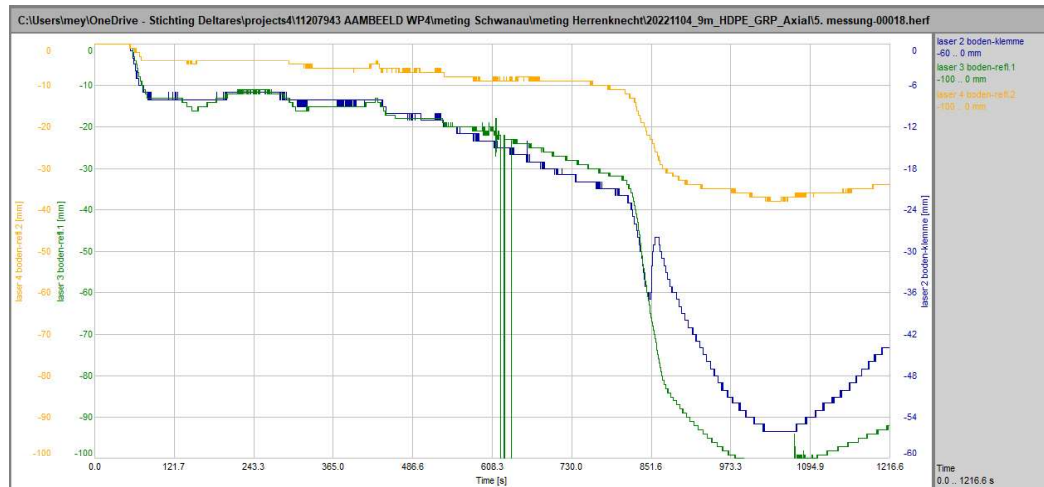
Uit deze meting is de verandering van de afstand bij de verschillende meetmomenten te bepalen. Het resultaat daarvan is grafisch weergegeven in Figuur 4.28.



Figuur 4.28 Gemeten vervorming met meetboutjes, test op 4 november.

De totale vervorming is hierbij de som van de vervorming van de vier meettrajecten tussen de meetboutjes. Qua orde van grootte is er sprake van een verkorting van ongeveer 0,5 mm over een lengte van ongeveer 40 mm, bij een totale axiale kracht van 80 bar (= 1205 kN). De variatie in de vervorming is echter relatief groot. (mogelijk is de nauwkeurigheid van de metingen beperkt).

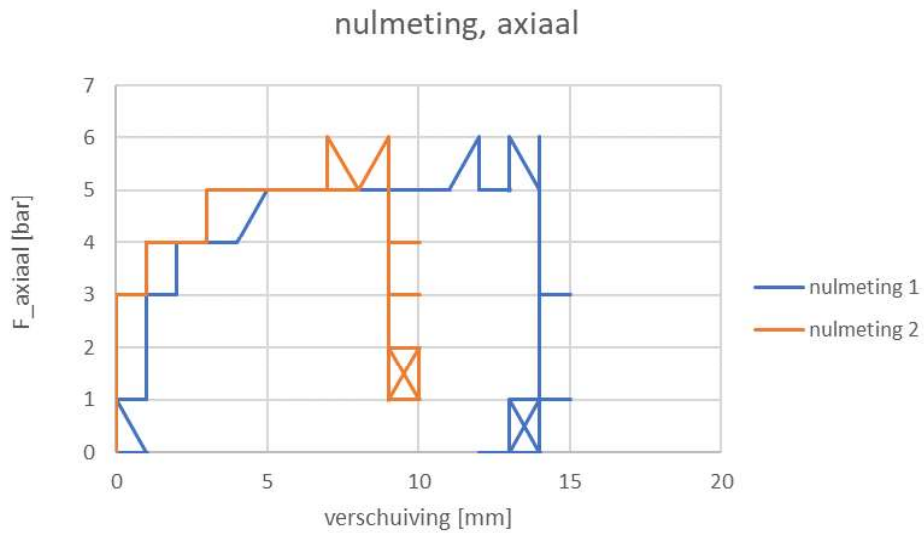
Daarnaast is de vervorming van de leiding met een laser gemeten. Figuur 4.29 toont het resultaat. De resultaten zijn zodanig dat ze als niet betrouwbaar kunnen worden beschouwd.



Figuur 4.29 Meting laser bij axiale belasting van 80 bar (laatste meting waarbij ook met meetboutjes is gemeten), meetdata Herrenknecht.

4.2 Wrijving opstelling-ondergrond

De opstelling stond koud op de ondergrond. Tijdens de axiale testen is geconstateerd dat de opstelling over de ondergrond verschoof. Dat betekent dat een deel van de axiale kracht nodig was om de wrijvingsweerstand met de ondergrond te overwinnen. Figuur 4.30 toont het kracht-verplaatsingsverloop.



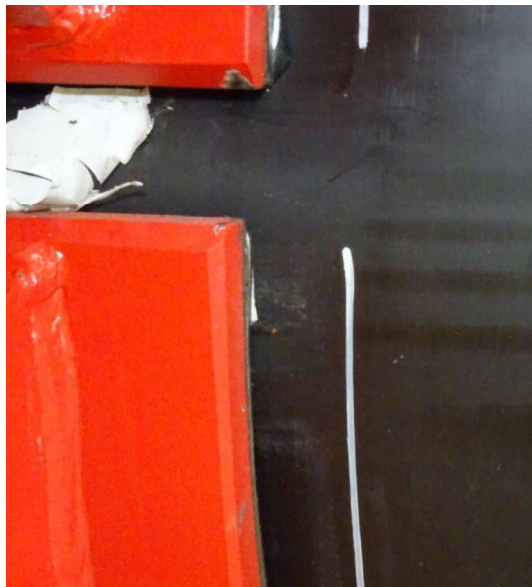
Figuur 4.30 Kracht-verplaatsing bij twee axiale testen zonder buis.

Het blijkt dat bij een axiale kracht van ongeveer 4 bar er een begin van beweging is, en dat bij ongeveer 5,5 bar axiale kracht de opstelling er sprake is van een doorgaand verschuiven. Daaruit volgt een wrijvingsweerstand van ongeveer 80 kN.

4.3 Bezwijkvorm

Bij de testen zijn er twee bezwijkmechanismen gevonden. Het eerste mechanisme is dat de klem, bij onvoldoende radiale kracht, over de leiding verschuift. Figuur 4.31 toont dit slippen van de klem over de buis-mechanisme. Het tweede mechanisme is dat de aanhechting binnen binnenbuis-PUR overschreden wordt en wegvalt, waarna de buitenbuis voor de klem opstuikt. Figuur 4.32 laat dit zien.

Bij de testen is geconstateerd dat er plaatsen zijn waar de PUR over de stalen buis verschuift. Lokaal kan, door de aanwezige afstandhouders in de PUR, er ook sprake zijn van afschuiven van de PUR over de PE buitenbuis. De gemeten axiale vervorming van de buitenbuis duidt erop dat bij de testen over een grote lengte de aanhechting van de PUR met de binnenbuis is overschreden.



Figuur 4.31 Slip van klem over leiding, de witte lijn geeft de oorspronkelijke positie van de klem aan (foto: Deltares).



Figuur 4.32 Bezwijkvorm leiding, de witte stippen op de leiding zijn gebruikt voor de fotogrammetrie (foto: Deltares).

In axiale richting was het bezwijken een afschuiven van de PUR over de stalen binnenbuis goed te zien bij het achter einde van de leiding. Bij het einde was lokaal ook als bezwijkvorm het verschuiven van de PUR ten opzichte van de buitenbuis te herkennen. Dit lijkt ingeleid te zijn door de aanwezige afstandhouders tussen de binnenbuis en de buitenbuis.



Figuur 4.33 Axiaal bezwijken (foto: Deltares).

Tijdens de testen is geconstateerd dat er bij het opvoeren van de axiale krachten op een gegeven moment knallen te horen waren. Waarschijnlijk betreft het daarbij het afbreken van de afstandhouders in de PUR laag.

Bij de ST-PUR-PE leiding is het bezwijkmechanisme het afschuiven van de PUR over de stalen binnenbuis. Waar dit afschuiven begon en hoe het zich ontwikkelde kon tijdens de testen niet worden vastgesteld. Denkbaar is dat het afschuiven begon op de plaatsen waar de schuifspanning het hoogst was. Volgens de uitgevoerde verkennende berekeningen was de hoogste schuifspanning aanwezig net voor de klem, zodat verwacht mag worden dat daar het bezwijken is begonnen. Op de plaats waar afschuiven plaats vindt zal er nog maar een beperkte afdracht van schuifspanning vanuit de isolatielaag naar de stalen binnenbuis plaatsvinden. De grootte van de afdracht wordt bepaald door de radiale spanning aldaar. De radiale spanning aanwezig vanuit de klemkracht (vasthoudkracht) bij de klem speelt mogelijk een rol. Door het plaatselijk bezwijken zal er een herverdeling van de axiale krachten, en daarmee van de schuifspanningen in de isolatielaag, plaatsvinden. Daarmee kan op een gegeven moment een doorgaand bezwijken (ritssluiting-effect) ontstaan.

Bij de leiding met een GRP laag van 5 mm kon er maar een beperkte axiale kracht op de leiding worden uitgeoefend. Bij een axiale kracht van 60 bar, in combinatie met een radiale kracht van 50 bar, bezweek de GRP laag. De bezwijkvorm was het uitbuigen van de GRP laag in de open ruimte tussen de schalen van de klem. Daarbij ontstond delaminatie van de verschillende glasvezel lagen.

Bij de leiding met een GRP laag van 12 mm, die tevens steunde op het reactieframe, kon een grote axiale kracht worden uitgeoefend. Het bezwijkmechanisme was ook hier het afschuiven van de PUR over de stalen binnenbuis. Daarnaast was plooien van de GRP laag tussen de schalen van de klem zichtbaar.

4.4 Modelberekeningen

Om inzicht te krijgen in de krachtswerking zijn een aantal verkennende EEM berekeningen gemaakt. Deze berekeningen zijn niet zozeer bedoeld om de uitgevoerde testen na te rekenen.

Voor de GRP laag zijn geen parameters voor de sterkte en stijfheid beschikbaar, zodat daarvoor een aanname gedaan moest worden. De gebruikte modellering en de resultaten van de berekeningen zijn beschreven in Bijlage B.

Uit de resultaten volgt dat:

- De axiale kracht vanuit de klem wordt niet alleen door de leiding voor de klem, maar ook door het gedeelte van de leiding achter de klem, opgenomen.
- De stijfheid van de buitenbuis de lengte waarover de axiale kracht van de klem wordt ingeleid beïnvloed. Een hogere axiale stijfheid, bijvoorbeeld door het toepassen van een GRP laag, is gunstig. Dit beperkt ook de maximaal optredende schuifspanning in de isolatielaag.
- De grootste schuifspanning in de isolatielaag wordt net voor de klem van de thruster gevonden.

4.5 Kwantitatieve beschouwing, sterkte van de leiding

In de testen is geconstateerd dat het niet altijd mogelijk was om de axiale kracht constant te houden. Dit maakt het bepalen van de werkelijke axiale bezwijkbelasting lastig. Het is immers mogelijk dat er bij de bereikte piekspanning al sprake was een begin van bezwijken, maar dat dit bezwijken niet tot volledige ontwikkeling kwam doordat de kracht terugviel.

Voor de ST-PUR-PE leiding is gevonden dat er bij een axiale belasting van 35 bar het krachtverplaatsingsgedrag niet-lineair wordt (Figuur 4.7). Dit wordt gezien als een begin van bezwijken. Deze axiale belasting kan ook gedurende enige tijd (8 minuten) worden vastgehouden. Kortdurend is een hogere axiale belasting mogelijk van 60 bar. Hieruit laten zich de bezwijkwaarden voor begin bezwijken en voor kortdurende belasting afleiden.

Tabel 4.5 Berekening bezwijkbelasting van de St-PUR-PE leiding vanuit de testresultaten.

Situatie	F _{axiaal,gemeten} [bar]	Correctie voor bodemwrijving [bar]	F _{axiaal} [bar]	F _{axiaal} [kN]
Kortdurend (piekwaarde)	60	5,5	54,5	821
Begin bezwijken	35	5,5	29,5	444

De verhouding tussen begin bezwijken en de piekwaarde is ongeveer 0,54.

Voor de St-PUR-PE-GRP leiding met 12 mm GRP is de gemeten axiale kracht bij bezwijken waarschijnlijk 101 bar. Er zijn geen meetdata om de exacte belasting bij begin bezwijken af te leiden. Op dezelfde wijze als hiervoor laat zich een bezwijkkracht (piekwaarde) van 1438 kN afleiden. Onder de veronderstelling dat voor een leiding met een GRP laag dezelfde verhouding van toepassing is als voor een leiding zonder GRP wordt de bezwijkwaarde voor begin bezwijken en voor enige tijd aangehouden belasting (0,54) 777 kN.

4.6 Kwantitatieve beschouwing, slip klem over buis

Uit de observaties tijdens de testen kan een indicatie voor de wrijvingscoëfficiënt tussen de klem en het buisoppervlak worden afgeleid.

Voor de St-PUR-PE buis is gevonden dat bij een axiale belasting van 35 bar (inclusief de wrijving over de ondergrond) er sprake is van niet-lineair gedrag. Bij een axiale belasting van 45 bar (inclusief de wrijving over de ondergrond) is duidelijk slip geconstateerd. In beide gevallen was de klemkracht 50 bar. Dit geeft de grenzen waartussen het begin van slip zal liggen. In Tabel 4.6 is hiermee de wrijvingscoëfficiënt tussen klem en PE buis berekend. Hierbij is voor de axiale kracht gecorrigeerd voor de wrijving tussen de opstelling en de ondergrond. Voor de klemkracht is niet gecorrigeerd voor mogelijke drukverliezen in het systeem.

Tabel 4.6 Bepaling wrijvingscoëfficiënt klem- PE buis.

F_{klem} [bar]	F_{axial} [bar]	F_{klem} [kN]	F_{axial} [kN] exclusief wrijving ondergrond	f [-]
50	35	3030,5	444	0,15
50	45	3030,5	595	0,20

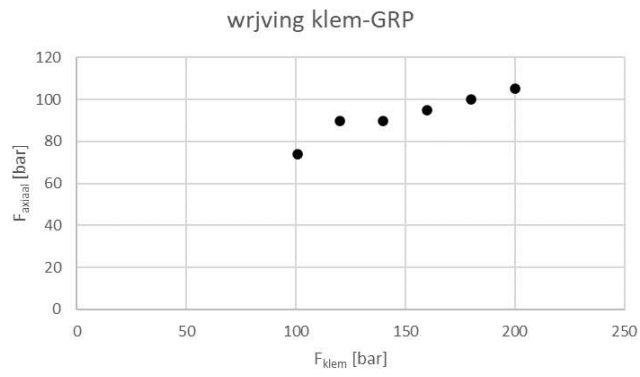
Tijdens de test op de buis met 12 mm GRP is bijgehouden bij welke belastingen de klem over de GRP laag verschoof. Hiermee is de wrijvingscoëfficiënt tussen klem en GRP berekend, zie Tabel 4.7.

Evenals hiervoor is hierbij voor de axiale kracht gecorrigeerd voor de wrijving tussen de opstelling en de ondergrond. Voor de klemkracht is niet gecorrigeerd voor mogelijke drukverliezen in het systeem.

Tabel 4.7 Bepaling wrijvingscoëfficiënt klem- GRP.

F_{klem} [bar]	F_{axial} [bar]	F_{klem} [kN]	F_{axial} [kN] exclusief wrijving ondergrond	f [-]
101	74	6122	1032	0,17
120	90	7273	1273	0,17
140	90	8485	1273	0,15
160	94	9698	1328	0,14
180	100	10910	1423	0,13
200	105	12122	1498	0,12

De wrijvingsweerstand is niet recht-evenredig met de klemkracht. Dit blijkt ook uit onderstaande Figuur 4.34.



Figuur 4.34 Wrijvingsweerstand klem-GPR, exclusief correcties.

5 Conclusies

5.1 Algemeen

Er zijn testen met de Pipe Thruster op een 28" warmte leiding uitgevoerd. De leiding bestond uit een stalen binnenbuis een PUR isolatie laag en een PE buitenbuis. Bij een aantal testen is er een GRP laag (Glasfibre Reinforced Plastic) aangebracht op de buitenbuis. De hiervoor gehanteerde productnaam is pau wrap®.

Bij het voortbewegen van de leiding door de Pipe Thruster wordt een radiale klemkracht aangebracht over de omtrek van leiding door schalen van de klem die een geringe tussenruimte hebben. Na het aanbrengen van de radiale kracht kan eveneens een axiale kracht worden aangebracht om de leiding voort te bewegen. Beide krachten zijn tijdens de testen gemeten door de leiding tegen een reactie frame aan te duwen. De maximaal toepasbare radiale klemkracht is separaat voor de axiale test gemeten, zodat duidelijk was welke klemkracht kon worden toegepast bij het duwen tegen het reactie frame.

Bij een standaard warmteleiding kon een maximale radiale kracht worden aangebracht van ongeveer 3600 kN. Toepassing van een dunne laag GRP van 5 mm leidde niet tot een hogere maximale radiale kracht. Een dikke laag GRP van 12 mm maakte een verhoging van de radiale kracht tot ongeveer 16000 kN mogelijk.

Bij het uitvoeren van de axiale testen is eveneens geconstateerd dat een dunne laag van 5 mm GRP geen positieve invloed heeft op de maximaal te realiseren axiale drukkracht. Bij een standaard warmteleiding kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 450 kN. Tot aan de maximale drukkracht kon de buitenbuis de spanning via de PUR isolatie doorgeven aan de stalen binnenbuis. Boven deze waarde werden de vervormingen van de PE buitenbuis groter (plastisch) totdat er bezwijken optrad door het afschuiven van PUR over de stalen binnenbuis bij een kracht van 820 kN. In de proef opstelling was de afdracht lengte achter de klem van de Pipe Thruster gelimiteerd, zodat misschien een iets grotere waarde dan 450 kN kan worden bereikt bij een langere leiding.

Door de dikte van het GRP te vergroten tot 12 mm ontstaat er een stijvere buitenbuis. Hierdoor kan de drukkracht over een grotere lengte worden afgedragen naar de stalen binnenbuis. Dit blijkt onder andere uit een EEM berekening, maar ook uit een uitgevoerde test met de Pipe Thruster. Tijdens de test kon een maximale axiale kracht worden aangebracht van ongeveer 777 kN alvorens er plastische deformatie op zou treden. Daadwerkelijk bezwijken door afschuiving van PUR langs de stalen binnenbuis werd gemeten bij een kracht van 1438 kN.

Tijdens uitvoering van de testen werd duidelijk dat een hoge klemkracht nodig is om slippen van de leiding door de schalen van de klem van de Pipe Thruster tegen te gaan. Bij de standaard leiding werd een wrijvingscoëfficiënt tussen de 0,15 en 0,20 gemeten. Door het gladde oppervlak van GRP werd er bij de beklede leiding een wrijvingscoëfficiënt tussen de 0,12 en 0,17 gemeten.

Door de Pipe Thruster kan er een beperkte axiale kracht worden doorgegeven aan een standaard warmte leiding of een met GRP beklede leiding. De maximale kracht is hoger bij een met GRP beklede leiding.

5.2 Standaard warmte leiding

Uit de uitgevoerde testen op de St-PUR-PE leiding volgt dat:

- De maximale radiale kracht 3600 kN is, de bijbehorende radiale spanning is 1160 kPa.
- Bezwijken op klemkracht komt door het bezwijken van de buis tussen de schalen van de klem, daarmee zijn de afmetingen van de klem sterk bepalend voor de maximaal mogelijke klemkracht.
- In axiale richting wordt de maximale kracht beperkt door:
 - Slip tussen klem en buis.
 - Opstuiken van de PE bij de klem.
 - Sterkte van de aanhechting tussen PUR en staal.
- Bij het bezwijken is er sprake van een tijdseffect, bij langer aangehouden belastingen neemt de sterkte af.
- De kracht vanuit de klem wordt over een beperkte lengte overgedragen vanuit de buitenbuis naar de binnenbuis.
- De wrijvingscoëfficiënt tussen klem en PE is ongeveer 0,15; er was niet genoeg meetdata of een mogelijke afhankelijkheid van deze factor met de grootte van de klemkracht, zoals gevonden voor de ST-PUR-PE-GRP buis, vast te stellen.

5.3 Warmte leiding met GRP

Uit de uitgevoerde testen op de St-PUR-PE-GRP leiding volgt dat:

- De maximale radiale kracht wordt bepaald door de dikte van de GRP laag.
- Bij een dikte van de GRP laag van 12 mm is de maximale radiale kracht 16,5 MN, de bijbehorende radiale spanning is 5000 kPa.
- Bij een dikte van de GRP laag van 5 mm is de maximale radiale kracht 3000 kN, de bijbehorende radiale spanning is 960 kPa; deze waarden liggen iets onder de waarden die voor een buis zonder GRP laag zijn gevonden, het toepassen van een dunne GRP laag is daarmee niet zinvol.
- De klemkracht beperkt wordt door het bezwijken (uitbuigen) van de GRP tussen de schalen van de klem.
- De maximale axiale kracht wordt kracht beperkt door:
 - Slip tussen klem en buis.
 - Opstuiken van de GRP tussen de schalen van de klem.
 - Sterkte van de aanhechting tussen PUR en staal.
- De kracht vanuit de klem wordt over een beperkte lengte overgedragen vanuit de buitenbuis naar de binnenbuis.
- De wrijving tussen de klem en de GRP oppervlakte is niet recht evenredig met de klemkracht.

5.4 EEM berekeningen

Uit de uitgevoerde verkennende berekeningen met PLAXIS volgt dat:

- De stalen binnenbuis, als stijfste element, uiteindelijk het grootste deel van de axiale kracht opneemt.
- De kracht vanuit de klem over een relatief korte afstand wordt overgedragen vanuit de buitenbuis naar de binnenbuis.
- Bij de overdracht van de kracht speelt niet alleen het deel van de leiding voor de klem, maar ook het gedeelte achter de klem een rol.

A Data sheet pipe thruster



PIPE THRUSTER

**MOBILE PUSH AND
PULL FORCE FOR
PIPELINE CONSTRUCTION**



**PIONEERING
UNDERGROUND
TECHNOLOGIES**

Herrenknecht A world leader in groundbreaking tunnelling technology

Herrenknecht is a professionally positioned and internationally oriented family enterprise. As the only company worldwide, Herrenknecht delivers cutting-edge tunnel boring machines for all ground conditions and in all diameters – ranging from 0.10 to 19 meters. Under the umbrella of the Herrenknecht Group, a team of innovative specialists has formed to provide integrated solutions for tunnel construction with project-specific, additional services and support. Pioneering technology by Herrenknecht is always involved when paving the way for the future, underground – whether for tunnelling, mining or exploration. Herrenknecht ensures safe and fast progress when constructing modern infrastructures in all areas of application. Exactly where they are needed.



Headquarters in
Graz, Austria
more than 4,100
project references,
we are a market
leader around
the globe.



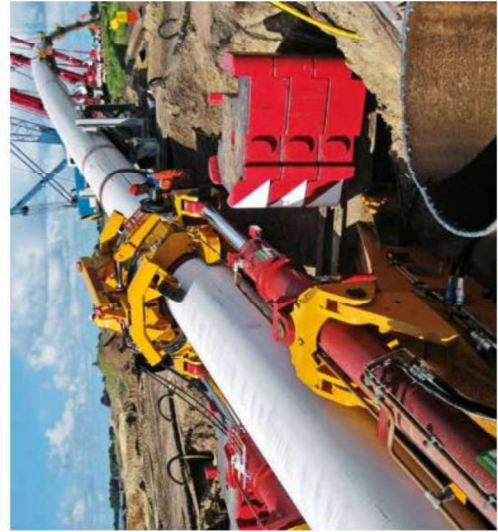
HERRENKNECHT AG
Herrenknechtstrasse
Germany
Phone: +49 7524 302-5970
Fax: +49 7524 302-3640
direct.pipe@herrenknecht.com
www.herrenknecht.com



Herrenknecht Pipe Thruster Powerful tool for various fields of application

The Herrenknecht Pipe Thruster with its thrust and pulling forces of up to 750 tonnes plays a key role in the trenchless installation of pipelines. This powerful equipment offers greater flexibility and increases the versatility of the HDD method towards even longer pipelines with large diameters and under difficult geological conditions. The Pipe Thruster can recover stuck or defective pipelines by clamping the pipeline and pulling it out of the ground. When using the Direct Pipe® or Pipe Express® method, the Pipe Thruster is always part of the system equipment. The Pipe Thruster is installed at the pipe side (see picture below) and supports the HDD rig during

pipeline installation. Additionally, it pushes the pipeline towards the rig side. Thus, the forces acting on the pipeline are applied more efficiently. The application range of the Herrenknecht Pipe Thruster is extremely flexible. The usable pipeline diameter can be varied from 8 to 80 inches, simply by changing the clamping plates. Other applications include the introduction of pipelines into existing tunnels or Sea Outfall projects, where gas pipelines, pipes for wastewater or desalination plants are pushed from land towards the sea using the Herrenknecht Pipe Thruster. This makes cost- and time consuming offshore drilling facilities unnecessary.



The Herrenknecht Pipe Thruster is used in Oudgou, Netherlands.

- PRODUCT HIGHLIGHTS**
- Max. thrust and pulling forces of up to 750t (1,700MN).
- Reverse force to the pipeline installation in HDD projects.
- Central technology component for the Direct Pipe® and the Pipe Express® method.
- Pipeline insertion into existing tunnels, pipes or boreholes.
- Recovery of stuck or damaged pipelines.

Gentle to coating and pipe – tested and proven.

A safe and trusted method is required when thrusting the pipeline, as the pipeline coating must not be damaged. Two axially arranged hydraulic cylinders of the Pipe Thruster exert their variably adjustable force on the duct pipe via a clamping unit. The hydraulically opening and closing clamping plates of the clamping unit which are lined with hot-vulcanized rubber have a sufficiently large contact surface to the pipe. In this way, they maintain the contact pressure and the shear stress applied on the pipe remains low. In cooperation with various gas suppliers and construction companies, Herrenknecht has demonstrated on many occasions, that no damage is caused to the coating. Pipes coated with Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Glasteile Reinforced Plastic (GRP on PE) and Fusion Bonded Epoxy (FBE) and concrete were tested.

Together with the former German gas supplier Open Grid IT was shown, that under full impact of push force neither the PE-Coating nor the GRP-Coating was damaged by the clamping unit. No compensation of the wall thickness or debonding was observed. The PP-Coating was tested together with the Dutch gas supplier Nederlandse Gasunie. Further tests have been conducted with Chevron, TransCanada and SAIPEV.

Since 2006 more than 20 Pipe Thrusters are in operation all over the world. In addition to the factory tests, more than 100 successful projects have proven that the pipeline as well as its coating is not damaged during operations.

A close-up view of the clamping plates.



TECHNICAL DATA

Machine:	HC300PT	HC500PT	HC750PT
1 Max. push/pull force:	3.000 tN / 750 t	5.000 tN / 1250 t	7.500 tN / 1750 t
2 Max. diameter:	914 mm / 36"	1.219 mm / 48"	1.524 mm / 60"
3 Stroke of hydraulic cylinder:	4 m / 13.1 ft	5 m / 16.4 ft	5 m / 16.4 ft
4 Weight:	37 t / 81.600 lbs	45 t / 99.200 lbs	85 t / 187.600 lbs
5 Shearing angle:	0°-15°	0°-15°	0°-15°

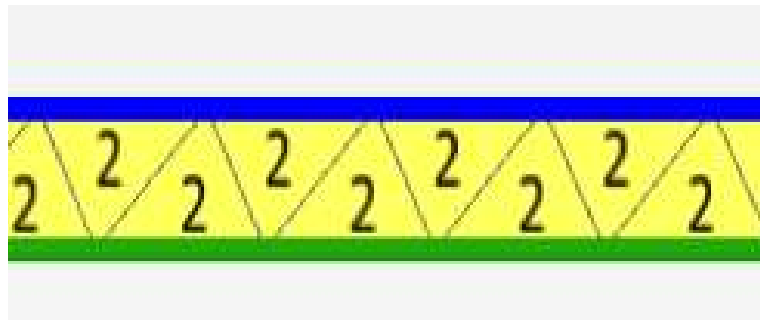
B Verkennende berekeningen met PLAXIS

B.1 Modelling

Om inzicht te krijgen in de krachtswerking tijdens de testen is een model in PLAXIS opgesteld. Uitgangspunt is het analyseren van de krachten in de axiale richting. De krachtswerking in de omtreksrichting blijft bij deze analyses buiten beschouwing. Dit maakt het mogelijk om de leiding als een 3-lagen systeem te beschouwen. De verschillende lagen zijn:

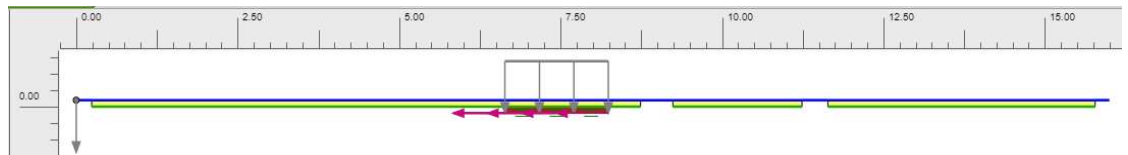
- Binnenbuis, gemodelleerd als een ligger.
- Isolatielaag, gemodelleerd als volume elementen.
- Buitenbuis, gemodelleerd als een ligger.

De opbouw is weergegeven in Figuur B.1.



Figuur B.1 Opbouw leiding in de berekening.

Figuur B.2 toont het opgestelde rekenmodel. Voor de volledigheid is in het model ook het niet belaste deel van de leiding achter de klem gemodelleerd.



Figuur B.2 Gemodelleerde leiding.

B.2 Keuze parameters

De eigenschappen van de drie lagen worden zodanig gekozen dat deze de juiste eigenschappen voor het gedrag in axiale richting representeren. Voor de binnenbuis en de buitenbuis betekent dit dat de juiste waarde voor EA wordt gebruikt. Voor de isolatielaag betekent dit dat de juiste waarde voor de schuifstijfheid wordt gebruikt.

In de berekening is de breedte loodrecht op het vlak 1 m.

Voor de berekening zijn de volgende waarden gebruikt:

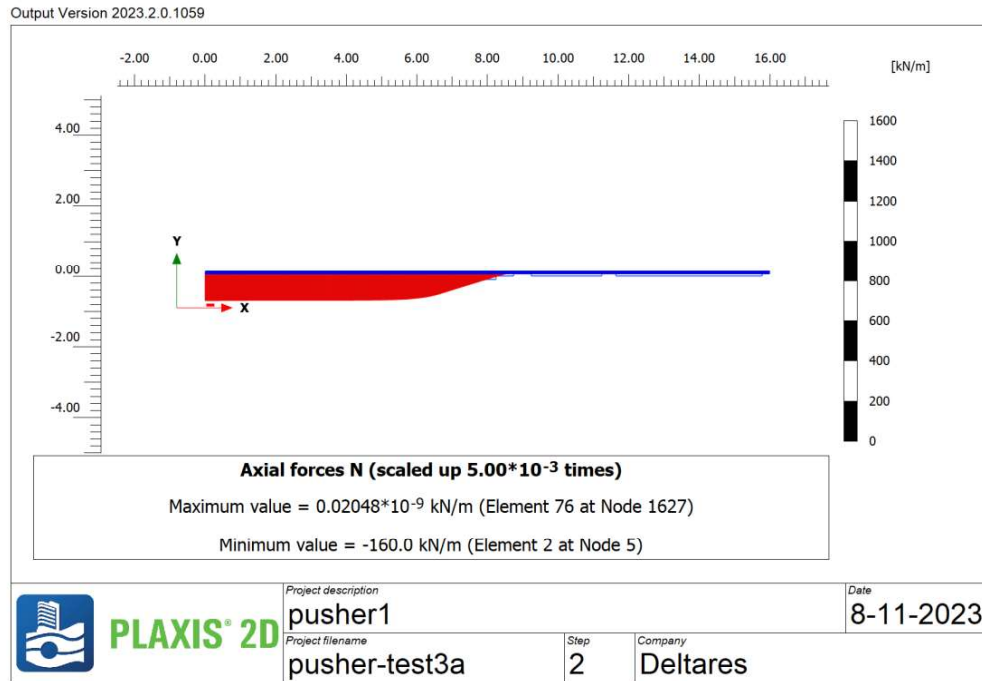
- Binnenbuis (staal):
 - $EA_1 = 2,64 E6 \text{ kN/m}$.
- Isolatielaag:
 - Dikte laag: $d = 0,1 \text{ m}$.

- $G = 7083 \text{ kN/m}^2$.
- Buitenbuis (PE):
 - $EA_3 = 22,3 \text{ E3 kN/m}$.

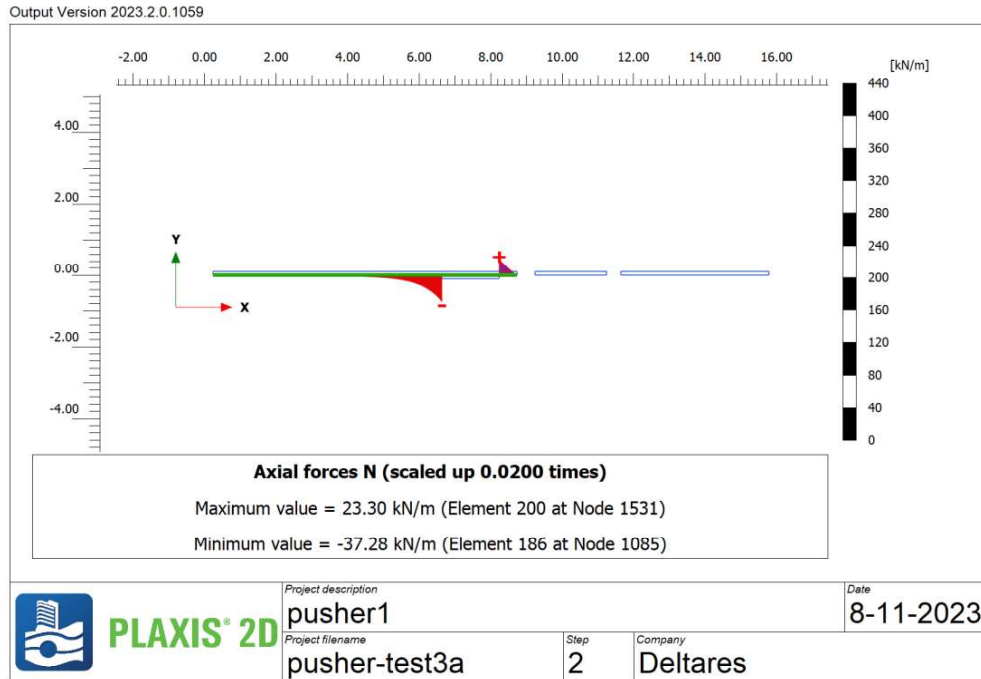
B.3 Resultaten

Getoond worden de resultaten bij een axiale drukkracht van 160 kN (100 kN/m over een lengte van 1,6 m).

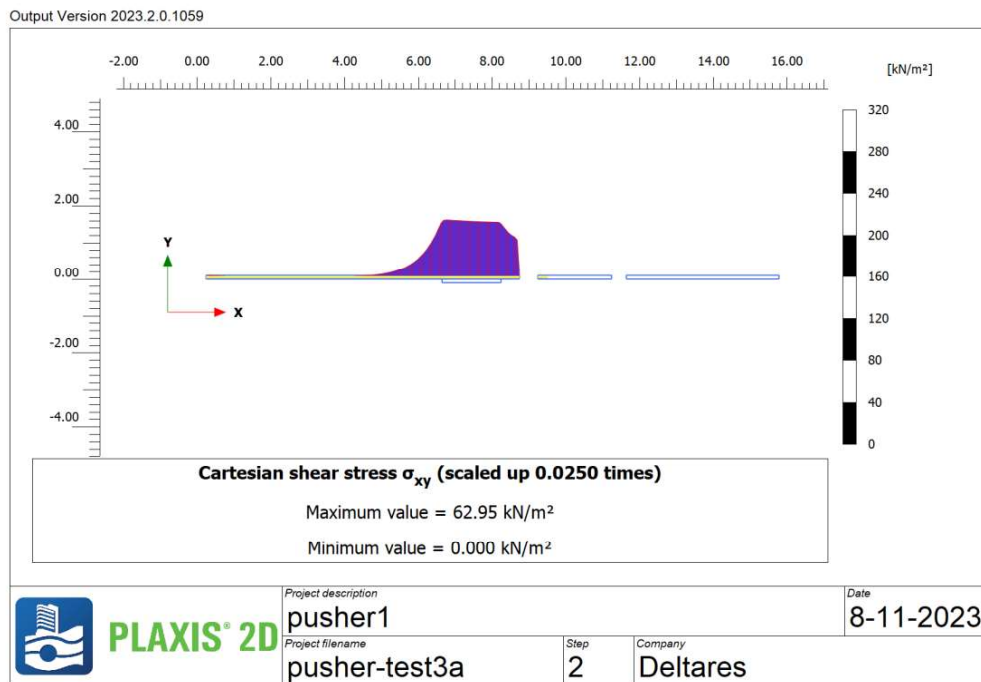
Als eerste worden de resultaten van de buis zonder GRP laag gepresenteerd.



Figuur B.3 Axiale kracht in de stalen binnenbuis, berekening.



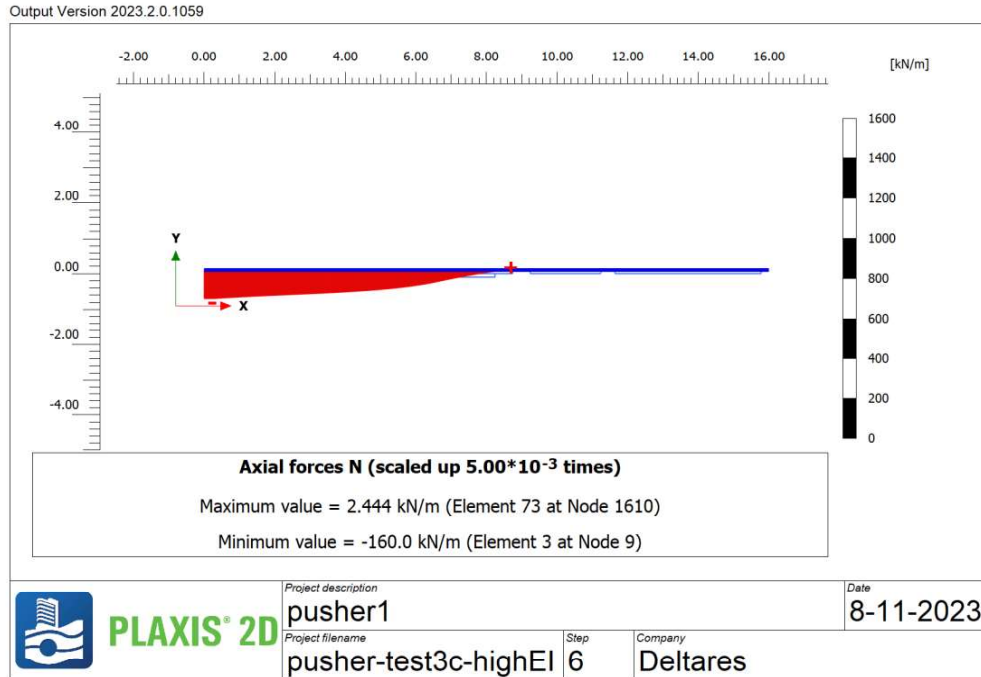
Figuur B.4 Axiale kracht in de buitenbuis.



Figuur B.5 schuifspanning in de isolatielaag.

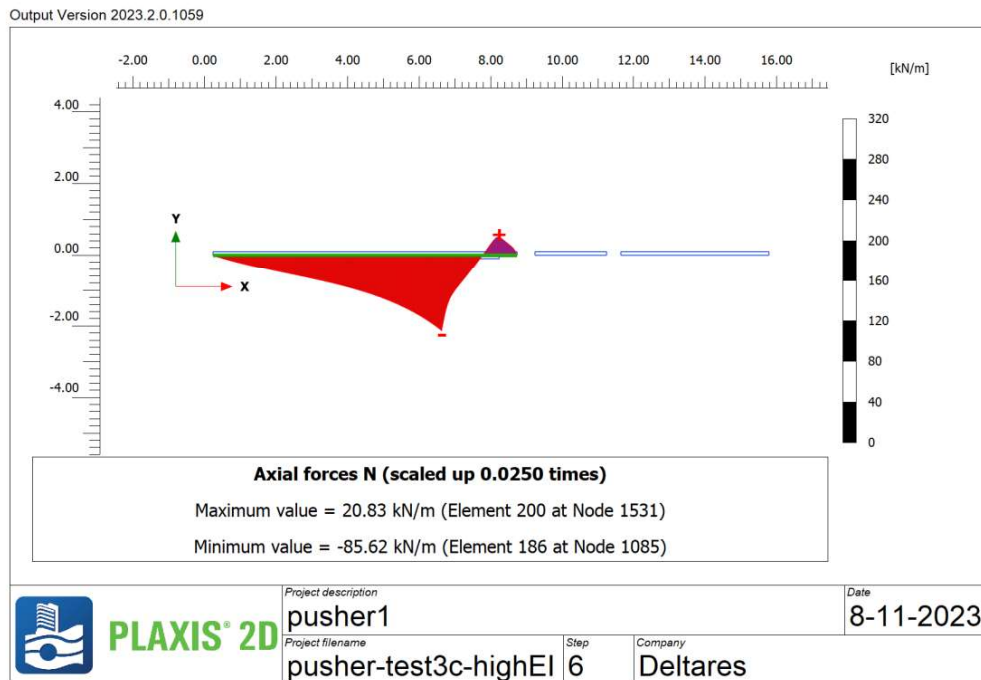
Ter vergelijking is ook een berekening gemaakt waarbij de aanwezigheid van een GRP laag op de buitenbuis is gesimuleerd. Dit is gedaan door de EA van de buitenbuis te verhogen tot $EA_3 = 4 \text{ E}5 \text{ kN/m}$. Omdat gegevens over de sterkte en de stijfheid van de GRP laag niet

beschikbaar zijn gesteld betreft het hier een voorlopige keuze. De berekeningsresultaten kunnen daarom slechts kwalitatief worden beschouwd.

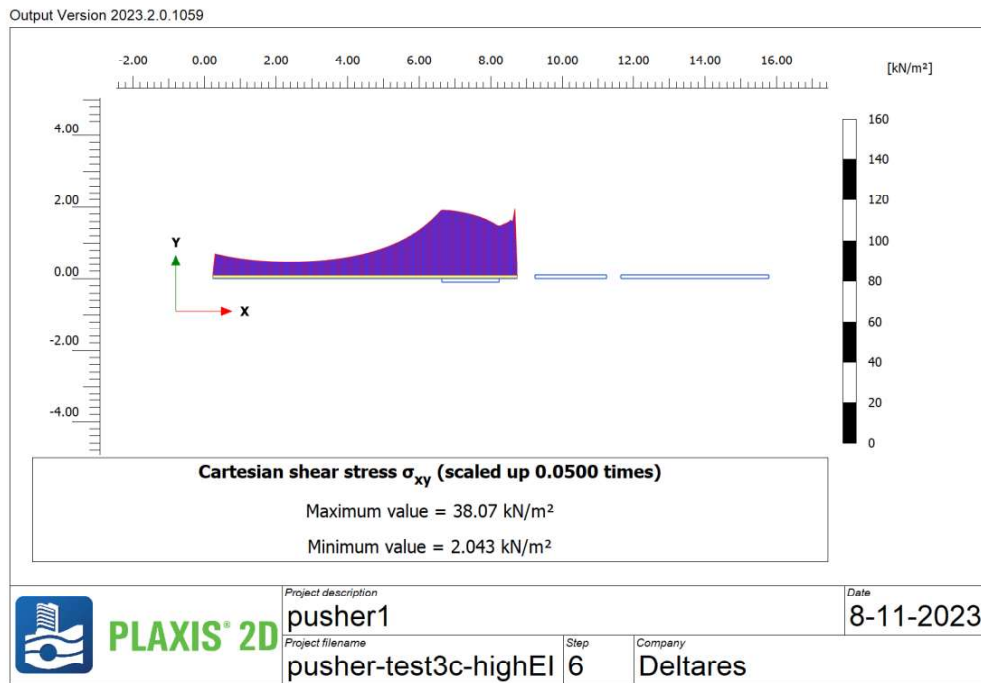


Figuur B.6 Axiale kracht in de stalen binnenbuis, situatie met hoge axiale stijfheid buitenbuis.

Vergeleken met de eerdere berekening neemt de axiale kracht in de leiding langzamer toe.



Figuur B.7 Axiale kracht in de buitenbuis, situatie met hoge axiale stijfheid buitenbuis.



Figuur B.8 Schuifspanning in de isolatielaag, situatie met hoge axiale stijfheid buitenbuis.

De schuifspanning in de PUR is over een grotere lengte aanwezig. Daarmee samenhangend is de piekwaarde beduidend lager.

B.4 Discussie en conclusies

Met een redelijk eenvoudige modellering is inzicht te krijgen in het axiaal gedrag van de leiding tijdens de testen. Uit de resultaten volgt dat de stijfheid van de buitenbuis de lengte waarover de axiale kracht van de klem wordt ingeleid beïnvloed. Een hogere axiale stijfheid, bijvoorbeeld door het toepassen van een GRP laag, is gunstig. Uit de berekeningen blijkt ook dat de axiale kracht vanuit de klem niet alleen door de leiding voor de klem, maar ook door het gedeelte van de leiding achter de klem, wordt opgenomen.

C Factual rapport Herrenknecht

Test Report

Project:

F-000620.2.1 Pipe Thruster Test

Description:

Testing the load limits of 28" heating pipes by
using a pipe thruster



Project Manager:	Tobias Engel
Project Manager (R&D):	Alexander Meyer
Author:	Alexander Meyer
Testing period:	19.10.2022 – 04.11.2022

Table of contents

1	Task.....	3
2	Test setup.....	3
2.1	Test setup of radial tests.....	3
2.2	Test setup of axial tests	6
2.3	Control and supply	7
3	Conversion from pressure to force	8
4	Testing.....	9
4.1	Radial test of 3 m GRP pipe with 10 mm wall thickness	9
4.1.1	Observations and comments	14
4.2	Radial test of 3 m GRP pipe with 8 mm wall thickness	15
4.2.1	Observations and comments	19
4.3	Radial test of 16 m 28" HDPE pipe.....	19
4.3.1	Observations and comments	24
4.4	Second radial test with 16 m 28" HDPE Pipe	25
4.4.1	Observations and comments	30
4.5	Radial test of 16 m 28" HDPE GRP.....	30
4.5.1	Exceeding the maximum pressure of the clamping unit	42
4.5.2	Observations and comments	47
4.6	Axial test with 16 m 28" HDPE pipe.....	47
4.6.1	Observations and comments	64
4.7	Pull test without pipes	65
4.8	Axial test with 16 m 28" HDPE GRP pipe	67
4.8.1	Observations and comments	88
4.9	Additional test with 9 m HDPE GRP pipe	89
4.9.1	Shear test	103
4.9.2	Destructive test.....	106
4.9.3	Measurement of the actual wall thickness	110
4.9.4	Observations and comments	112
5	Overall summary (keywords).....	113
6	Appendix	114
6.1	Measuring equipment	114
6.2	Data	116

1 Task

The task of these tests is to determine the thrust force as well as the clamping force of 28" heating pipes with different geometries until failure.

Another task is to obtain information about the pipe behaviour during the force application with the Pipe Thruster HK500PT.

The following measurements during the tests were defined together (see document 11207943-000-GEO-0001_v0.1):

- Axial deformation Outer Pipe
- Axial deformation Inner pipe
- Radial deformation outer pipe
- Possible occurrence crushing PUR
- Possible occurrence of rupture outer pipe
- Possible occurrence of buckling outer pipe
- Thrust axial force
- Thrust clamping/radial force
- Thrust axial displacement
- Thrust clamping/radial displacement

Due to the behaviour of the machine (dynamics) or for safety reasons (keeping safety distances), not all planned measurements could always be carried out. This will be discussed in more detail in the single tests. Also

The pre-defined pressure levels of all tests could not be set because the entire hydraulic system of the system is not designed for such "fine" adjustments.

The used HDPE pipes were applied with a GRP layer of approx. 10 mm (radial tests) and 5 mm (axial tests) by TDC.

Due to insufficient wall thickness (5 mm) of the GRP, another axial test with HDPE and 10 mm was carried out.

2 Test setup

The tests were carried out under protected conditions in a plant in Schwanau.

Principle, there were radial and axial tests with various 28" heating pipes. The setup of radial and axial tests is described in the points below.

2.1 Test setup of radial tests

To determine the maximum permissible clamping force for the different types of heating pipes the clamping unit were used.

For the first radial tests (GRP pipes only), the clamping unit was placed on the floor. For optimal height during the axial tests, the clamping unit was placed on supports.



Figure 1: Clamping unit of HK500PT

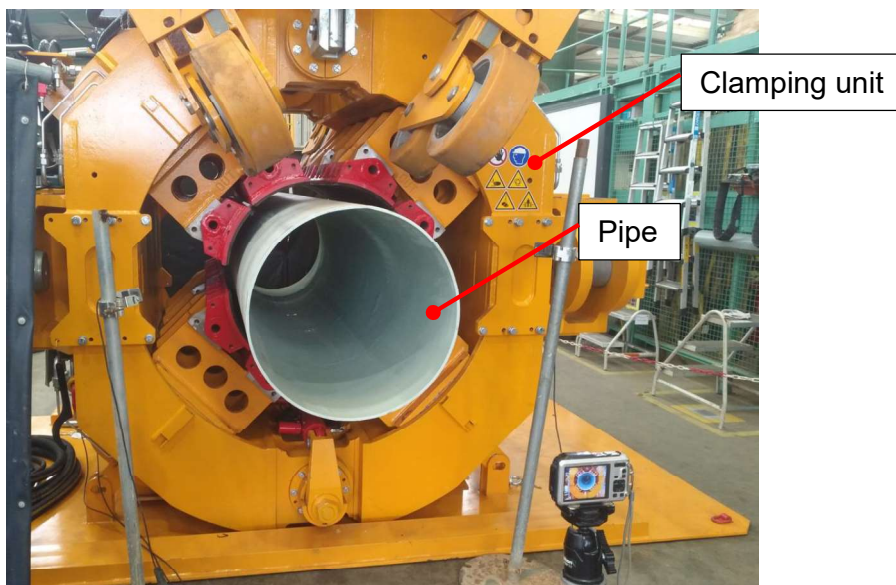


Figure 2: Clamping unit and pipe



Figure 3: Clamping unit of HK500PT placed on support

2.1.1 Properties of clamping unit and thrust unit (determined from the CAD)

Properties of clamping unit (incl. clamping shoes):

Weight (incl. 28" clamping shoes):	21.200 kg
Length:	3540 mm
Width:	3400 mm
Height:	3210 mm

Properties of support (underneath the clamping unit):

Weight of each support:	397 kg
Length:	1000 mm
Width:	1000 mm
Height:	1000 mm

Properties of thrust unit:

Weight (incl. traverse):	29700 kg
Length:	11840 mm
Width:	4100 mm
Height:	2250 mm

2.2 Test setup of axial tests

To determine the achievable thrust force during the axial test, the clamping unit was placed on a support and connected to the thrust cylinders by means of bolts. A traverse was also installed between the thrust cylinders as an abutment.

The pipes could thus be clamped radially in the clamping unit and pressed axially against the traverse (abutment). For radial securing, there was a steel ring on the crossbeam over which the steel pipe of the heating pipe was pushed.

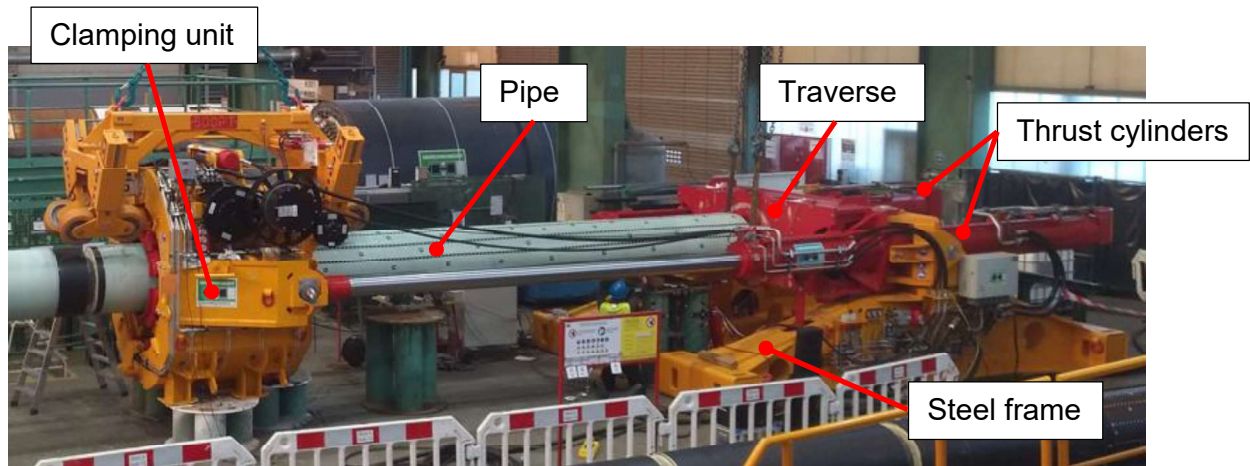


Figure 4: Test setup axial tests

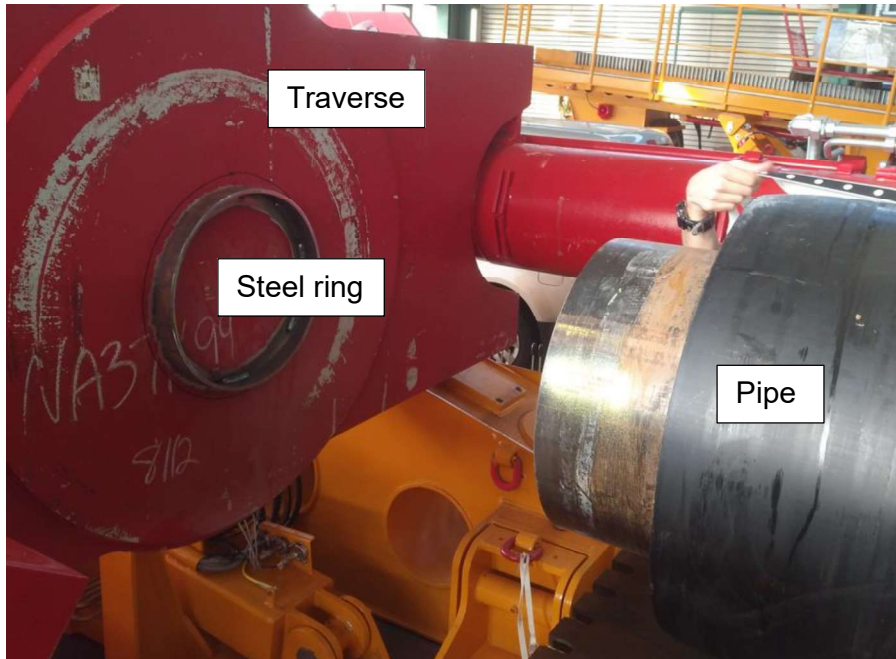


Figure 5: Traverse and heating pipe

2.3 Control and supply

For supply and operate the pipe thruster, a hydraulic power unit and a control panel were used.



Figure 6: Control Panel



Figure 7: Hydraulic power unit

3 Conversion from pressure to force

Since only hydraulic pressure can be measured, a conversion from pressure to force must be used based on the available data from the design department:

Clamping force

- The clamping cylinders are just pressure controlled, so theoretically the pressure is in every hydraulic cylinder the same
- **1 bar** means a theoretical total clamping force on the pipes of **60.61 kN** (6 mt)
Tests

Thrust force

- The thrust cylinders are also pressure controlled
- **1 bar** means a theoretically total thrust force of **15,06 kN** (1,5 mt)

4 Testing

In the following, each test is described individually and the data is evaluated.
The tests below are described according to actual order.

4.1 Radial test of 3 m GRP pipe with 10 mm wall thickness

For this test, a GRP pipe with a length of 3 m and a wall thickness of about 10 mm was symmetrically installed in the clamping unit.

After the installation, the pressure in the clamping cylinders was carefully increased. At approx. 20 bar did the clamping plates begin to move. The pressure was increased further until the clamping plates were in good contact with the pipe. This happened at about 35 bar. The measurements therefore start at approx. 35 bar clamping pressure (approx. offset pressure).



Figure 8: Placed GRP pipe in the clamping unit

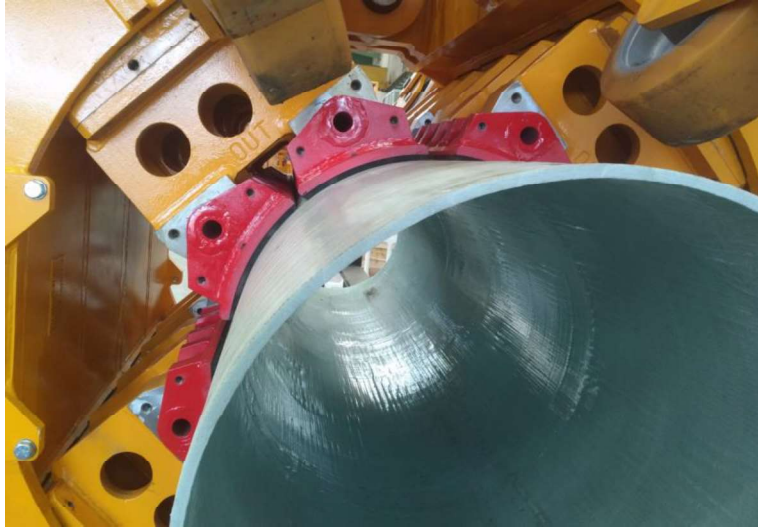


Figure 9: Clamping unit in contact with the pipe



Figure 10: Contact between clamps and pipe

When the clamping plates were in contact with the pipe, the pressure was increased step by step in consultation with all participants until destruction of the pipe.

The following graphs showing the pressure of clamping unit:

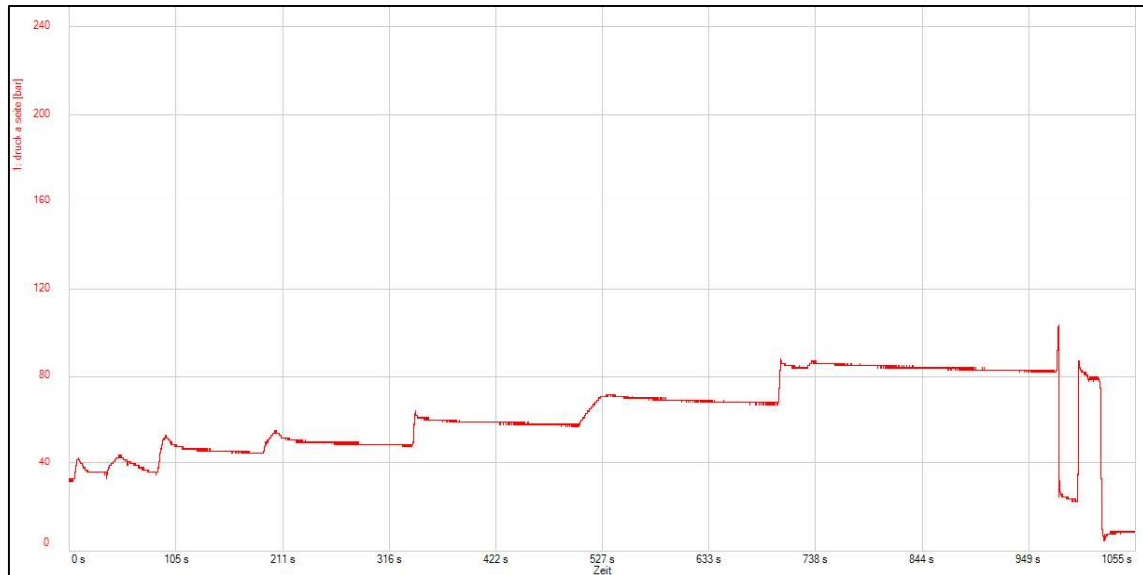


Figure 11: Graph of clamping pressure as a function of time

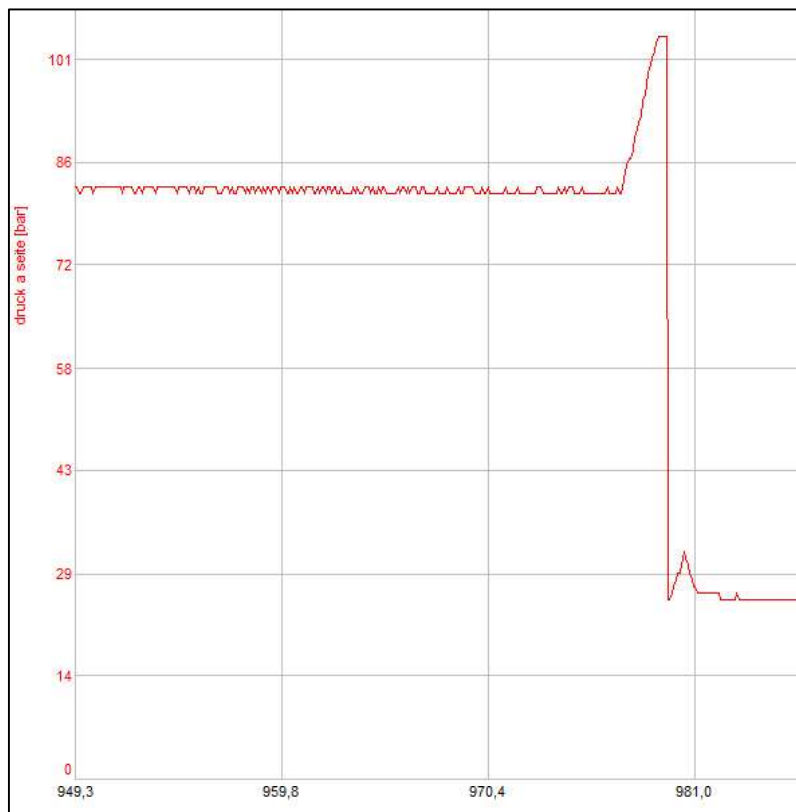


Figure 12: Zoomed graph of maximum pressure before failure of the pipe

Zeit [s]	druck a seite [bar]	
978,7	100	
978,8	101	
978,9	102	
979,0	103	
979,1	104	
979,2	104	
979,3	104	
979,4	104	
979,5	104	
979,6	25	
979,7	25	
979,8	26	
979,9	27	
980,0	28	
980,1	29	
980,2	29	

Figure 13: Table with the maximum pressure before failure

The following pictures showing the damage of the pipe:

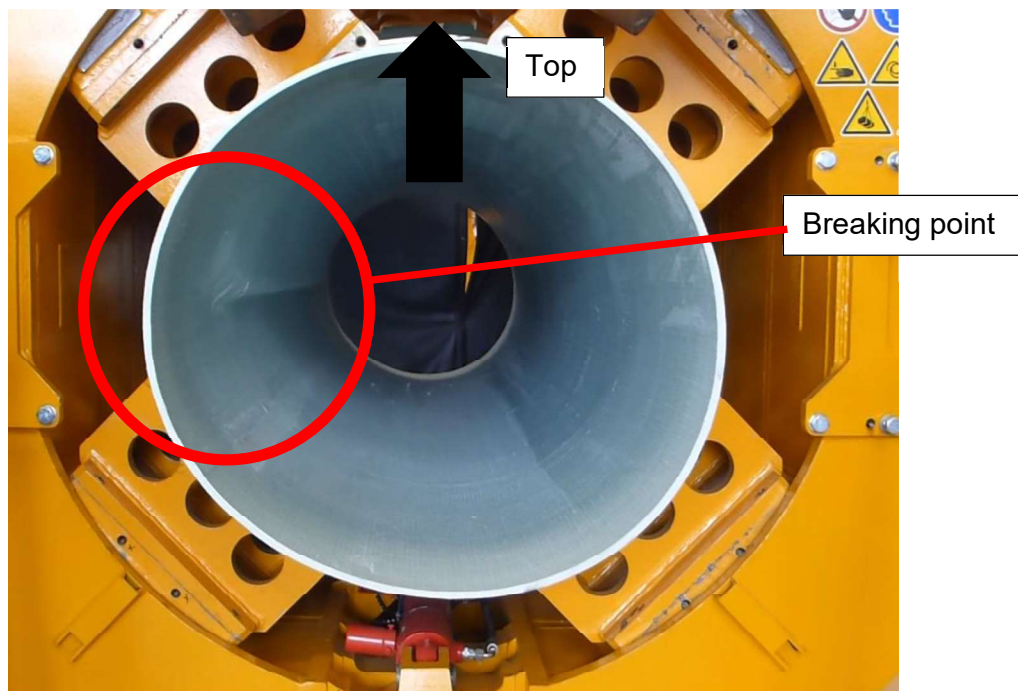


Figure 14: Deformed pipe (video recording)



Figure 15: Break of pipe between clamps



Figure 16: Breaking area and clamping points



Figure 17: Clamping shoes after the test

4.1.1 Observations and comments

As seen in Figure 11, the pressure could not be set exactly because of the hydraulic system. After a certain pressure has been set, it drops slightly. This probably happens because the pipe deforms and gives way. This is also clearly visible in the videos (Figure 14).

At 35 bar (approx. offset pressure) a slight "crackling" could be heard. This probably results from the fact that some of the fibres in the material move or detach. With increasing pressure, the noises of the material became more and more distinct.

As can be seen in Figure 12 and Figure 13, a maximum pressure of 101 bar was reached for a short time before the pipe failed and the pressure suddenly dropped.

Due to its mechanical properties, the pipe broke abruptly when the load limit was exceeded. At this point, the pipe broke between two clamps and along the whole clamping unit with a loud bang when the maximum pressure was reached. In Figure 15 shows the break between the clamps.

The Figure 16 shows that the clamps are not in full contact with the pipe at all points, which causes high stresses and the pipe has failed in this area.

4.2 Radial test of 3 m GRP pipe with 8 mm wall thickness

The test with GRP pipe with wall thickness of 8 mm was carried out analogously to the previous test with the GRP pipe and wall thickness of 10 mm.

The GRP pipe was symmetrically installed in the clamping unit.

After the installation, the pressure in the clamping cylinders was carefully increased. At approx. 20 bar did the clamping plates begin to move. The pressure was increased further until the clamping plates were in contact with the pipe. This happened at about 35 bar.

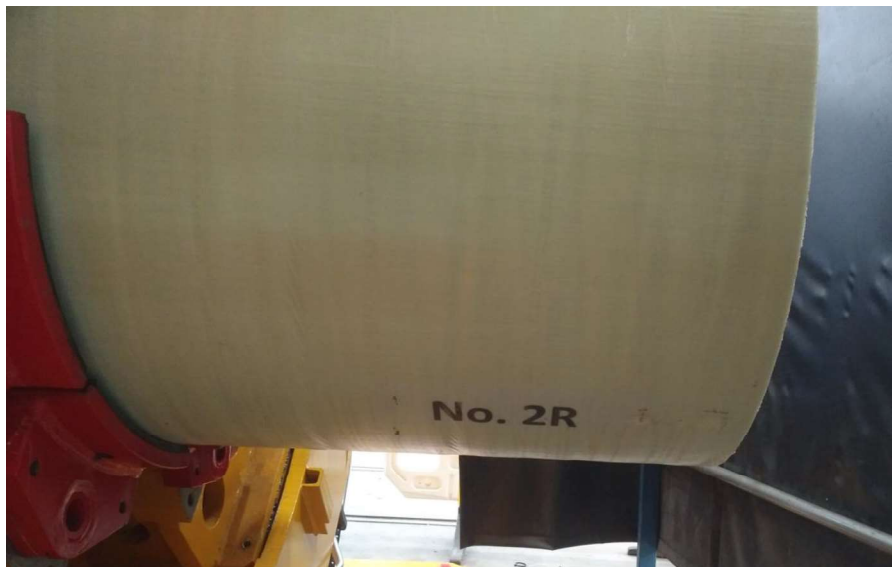


Figure 18: GRP pipe with 8 mm wall thickness in clamping unit

When the clamping plates were in contact with the pipe, the pressure was increased step by step in consultation with all participants until destruction of the pipe.

The following graphs showing the pressure of clamping unit:

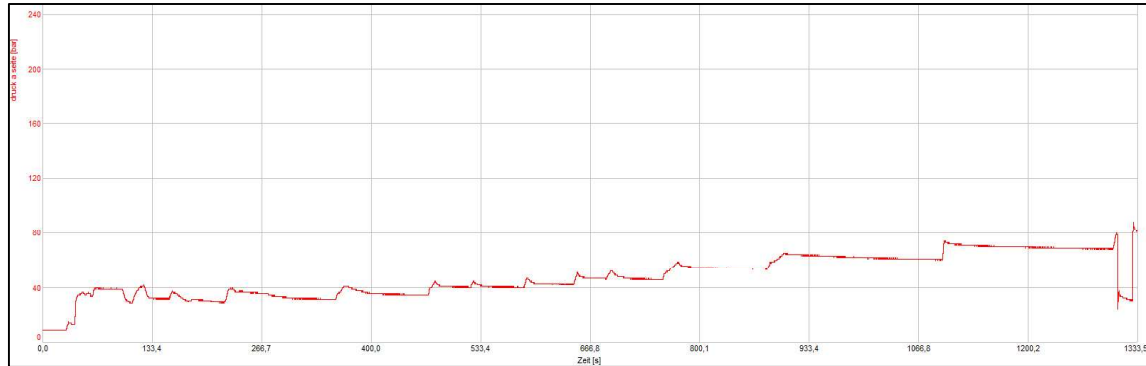


Figure 19: Graph of clamping pressure as a function of time

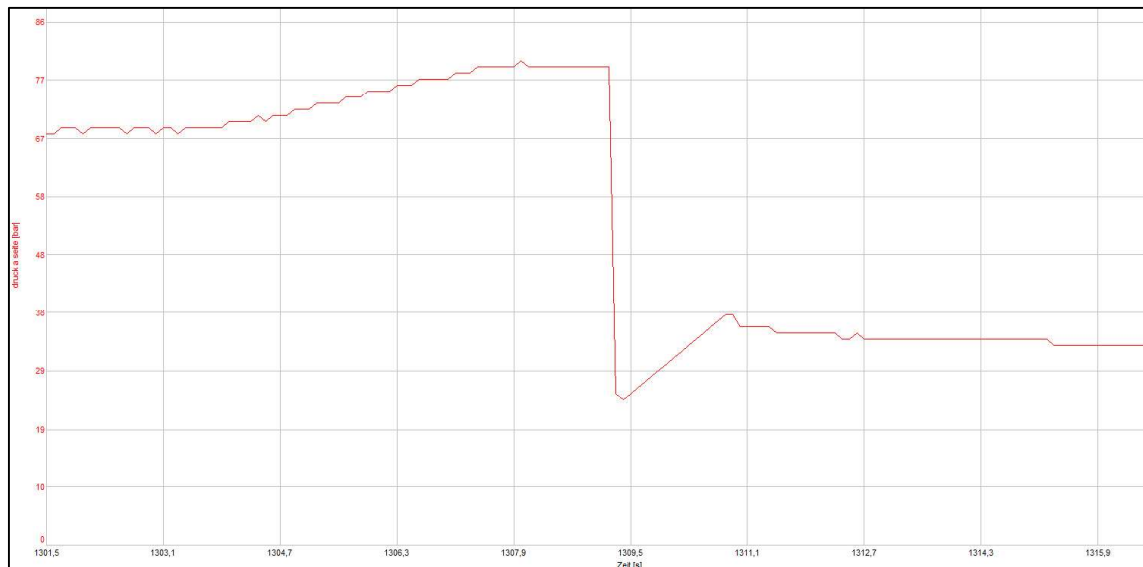


Figure 20: Zoomed graph of maximum pressure before failure of the pipe

Zeit [s]	druck a seite [bar]	
1308,3	79	
1308,4	79	
1308,5	79	
1308,6	79	
1308,7	79	
1308,8	79	
1308,9	79	
1309,0	79	
1309,1	79	
1309,2	79	
1309,3	25	
1309,4	24	
1309,5	25	
1309,6	26	
1309,7	27	
1309,8	28	

Figure 21: Table with the maximum pressure before failure

The following pictures showing the damage of the pipe:

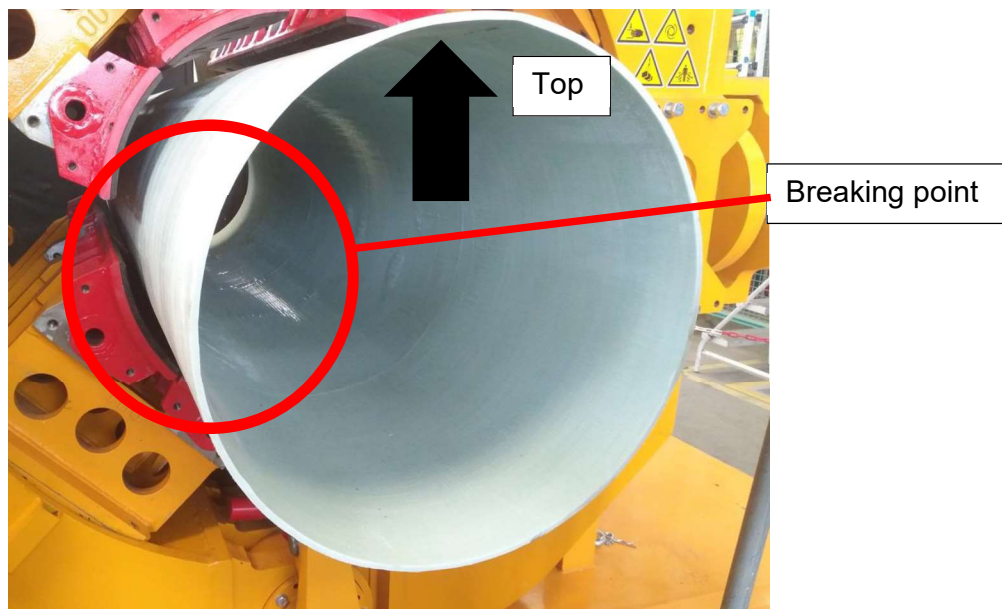


Figure 22: Position of breaking area



Figure 23: Break of pipe between clamps



Figure 24: Breaking area

4.2.1 Observations and comments

As in the test before the pressure could not be set exactly because of the hydraulic system. After a certain pressure has been set, it drops slightly.

As for the pipe with 10 mm GRP, also at 35 bar (approx. offset pressure) a slight "crackling" could be heard at the pipe with 8 mm GRP. This probably results from the fact that some of the fibres in the material move or detach. With increasing pressure, the noises of the material became more and more distinct.

As can be seen in Figure 20 Figure 12 and Figure 21, a maximum pressure of 79 bar was reached for a short time before the pipe failed and the pressure suddenly dropped.

The pipe also broke between two clamps and along the whole clamping unit with a loud bang when the maximum pressure was reached. In Figure 23 and Figure 15 shows the break between the clamps.

Also the Figure 24 shows that the clamps are not in full contact with the pipe at all points, which causes high stresses and the pipe has failed in this area.

4.3 Radial test of 16 m 28" HDPE pipe

For this test, a 28" HDPE heating pipe with a length of 16 m was installed in the clamping unit.

For mechanical decoupling, the HDPE and PUR was removed at two points over a length of 100 mm before the installation.

After the installation, the pressure in the clamping cylinders was carefully increased until the clamping plates were in contact with the pipe. This happened at about 35 bar.



Figure 25: 16 m HDPE pipe placed in clamping unit



Figure 26: Test setup radial test of HDPE pipe



Figure 27: Cut points

When the clamping plates were in contact with the pipe, the pressure was increased step by step in consultation with all participants until destruction of the pipe. While the pressure was increased, the pipe was closely observed in the area of the clamping unit in order to be able to detect deformations.

The following graphs showing the pressure of clamping unit:



Figure 28: Graph of clamping pressure as a function of time

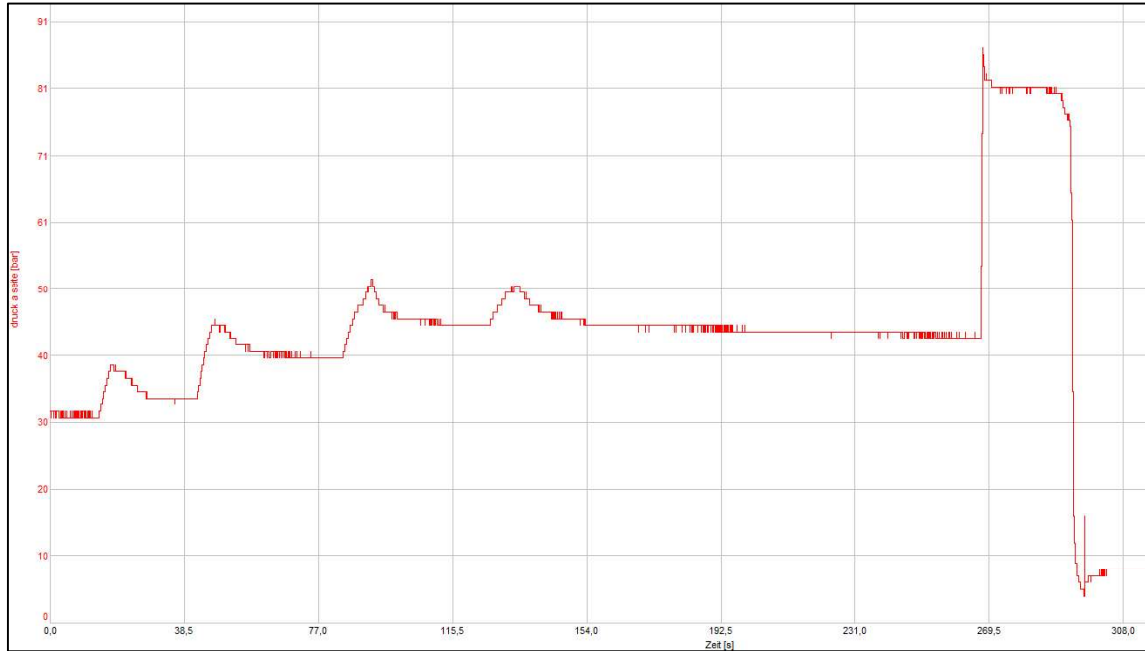


Figure 29: Zoomed graph of clamping pressure as a function of time

The following pictures showing the elastic and plastic deformation of the pipe:



Figure 30: Elastic deformation



Figure 31: Deformation test



Figure 32: Plastic deformation



Figure 33: Spacer between inner steel pipe and HDPE

4.3.1 Observations and comments

Since HDPE and PUR are soft materials, a deformation was already visible when the clamping shoes were in contact at 30 bar. However, this was probably an elastic deformation (see Figure 30) of about 5 mm.

At 50-60 bar a slight "crackling" could be heard.

This probably results from the fact that the PUR began to break. With increasing pressure, the noises of the material became more and more distinct.

At 60-80 bar loud cracking noises were heard. This probably results from the breaking of spacers (see Figure 33) between the inner steel pipe and the HDPE.

There is a presumption that due to the spacers there is no "homogeneous structure" under the HDPE, which means that the load of the clamping shoes cannot be distributed evenly. This can result in high load points, which can damage the pipe more easily.

At a pressure of 80 bar, the material was already plastically deformed. This was clearly observed when the pressure was lowered, and the clamping shoes were completely retracted (see Figure 31).

4.4 Second radial test with 16 m 28" HDPE Pipe

To obtain further results, it was decided with all participants that a second radial test should be carried out on the HDPE pipe. For this purpose, the pipe was moved slightly in the clamping unit.

It should be mentioned that a small part (250 mm) of the already damaged area was below the clamping shoes (see Figure 34 and Figure 35).

The second test was carried out analogously to the previous test. After the installation, the pressure in the clamping cylinders was carefully increased until the clamping plates were in contact with the pipe. This happened at about 35 bar (approx. offset pressure).



Figure 34: HDPE pipe before clamping

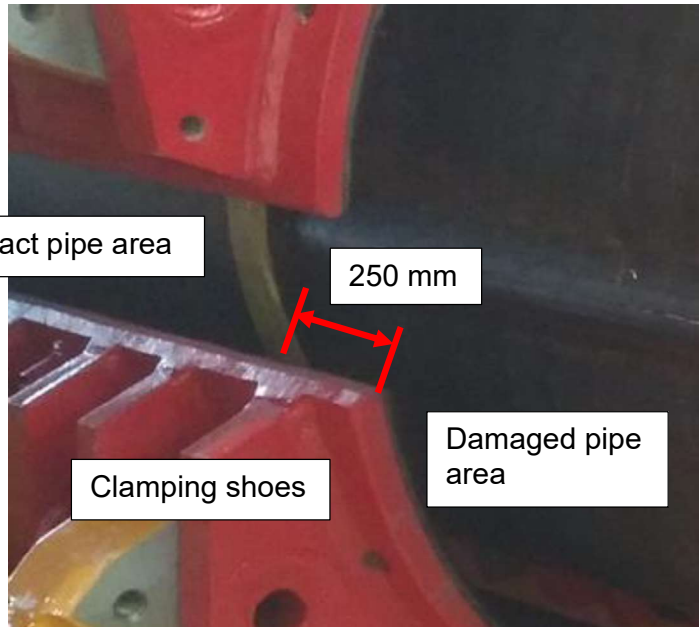


Figure 35: Transition from intact to damaged area



Figure 36: Clamped pipe at second test

When the clamping plates were in contact with the pipe, the pressure was increased step by step in consultation with all participants until destruction of the pipe. While the pressure was increased, the pipe was closely observed in the clamping unit in order to be able to detect deformations.

The following graphs showing the pressure of clamping unit:

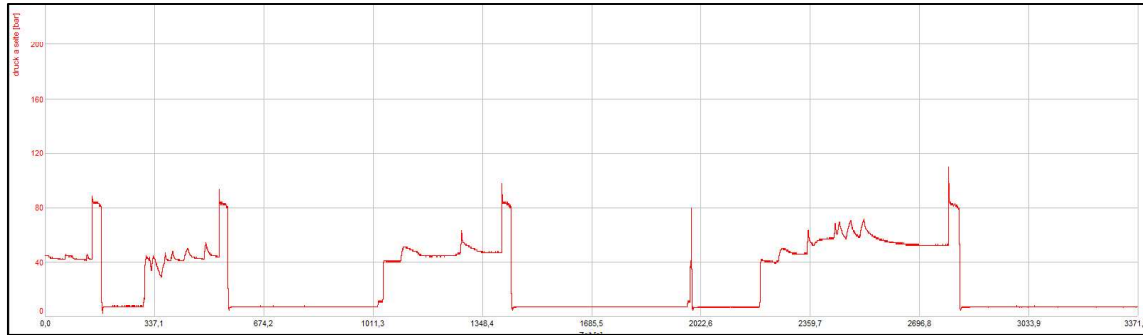


Figure 37: Graph of clamping pressure as a function of time

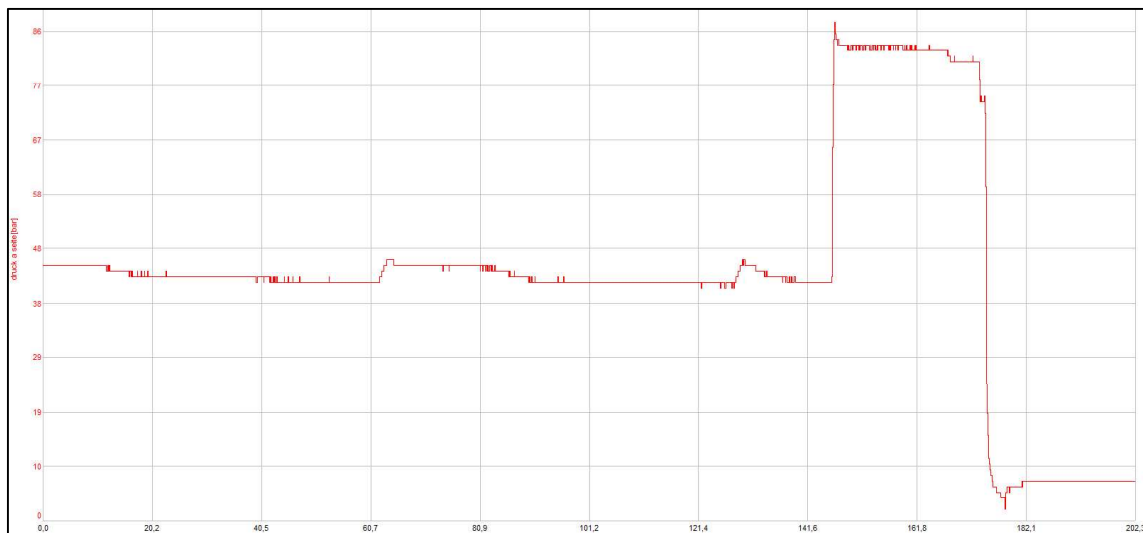


Figure 38: Zoomed graph of clamping pressure as a function of time

The following pictures showing the elastic and plastic deformation of the pipe:



Figure 39: Displacement of the clamping shoes



Figure 40: Displacement of clamping shoes



Figure 41: Displacement on another clamping shoes



Figure 42: Plastic deformation



Figure 43: Clamping shoes after test

4.4.1 Observations and comments

As the first test has already shown, the material already begins to be elastically deformed during clamping with 35 bar.

Since the recording of the pressures was started later, it is unfortunately not possible to see in the graph of the pressures (see) that the clamps were opened again at 50 bar in order to visually check whether elastic or plastic deformation has occurred. However, the behaviour was recorded in writing, so it can be confirmed.

As can be seen in Figure 37, the pressure has risen abruptly to approx. 80 bar due to the hydraulic system. After opening the clamps, plastic deformation was observed.

4.5 Radial test of 16 m 28" HDPE GRP

The test with the HDPE GRP pipe carried out analogously to the previous test with the HDPE pipe.

The heating pipe with a length of 16 m was installed in the clamping unit. For mechanical decoupling, the GRP, HDPE and PUR was removed at the same points as at the HDPE pipe.

After the installation, the pressure in the clamping cylinders was carefully increased until the clamping plates were in contact with the pipe. This happened at about 35 bar.

Note: Wall thickness of the GRP layer is 10 mm (according to TDC)

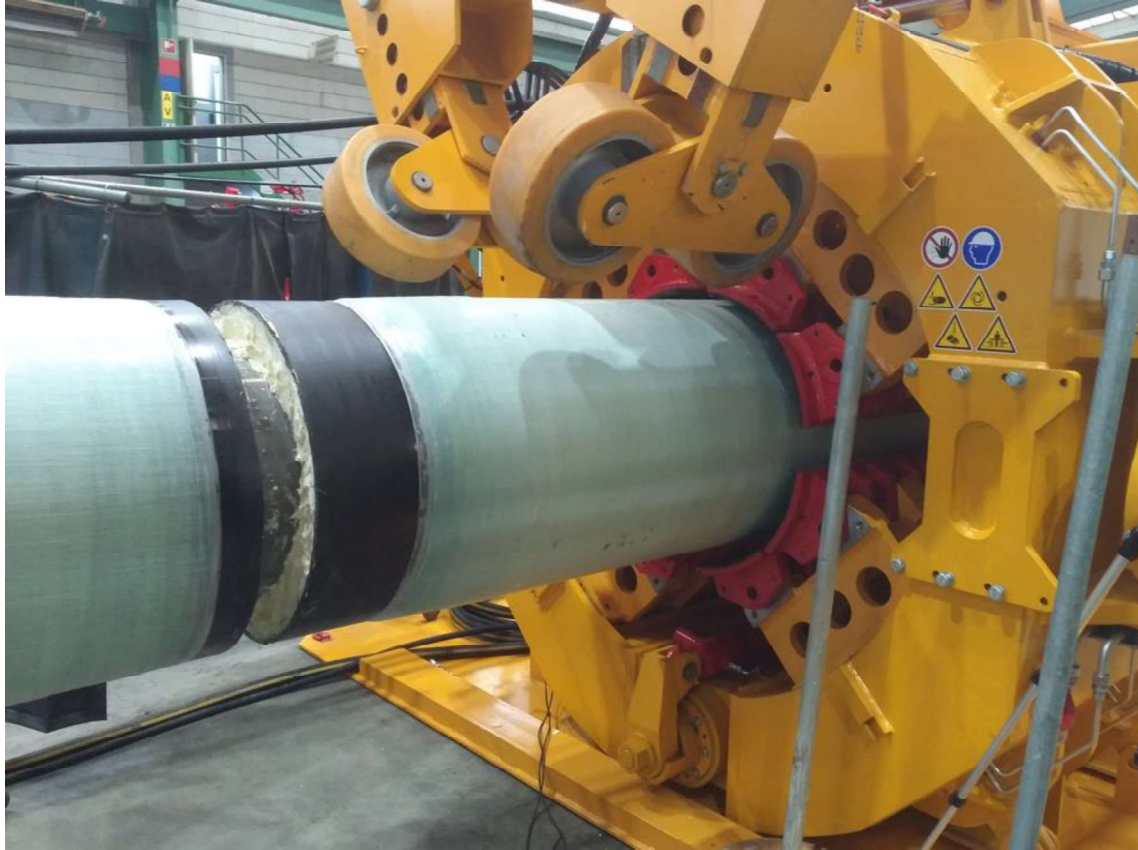


Figure 44: Installation of HDPE GRP pipe



Figure 45: Installation of HDPE GRP pipe



Figure 46: Clamping of HDPE GRP pipe

The following graphs showing the pressure of clamping unit until 275 bar:

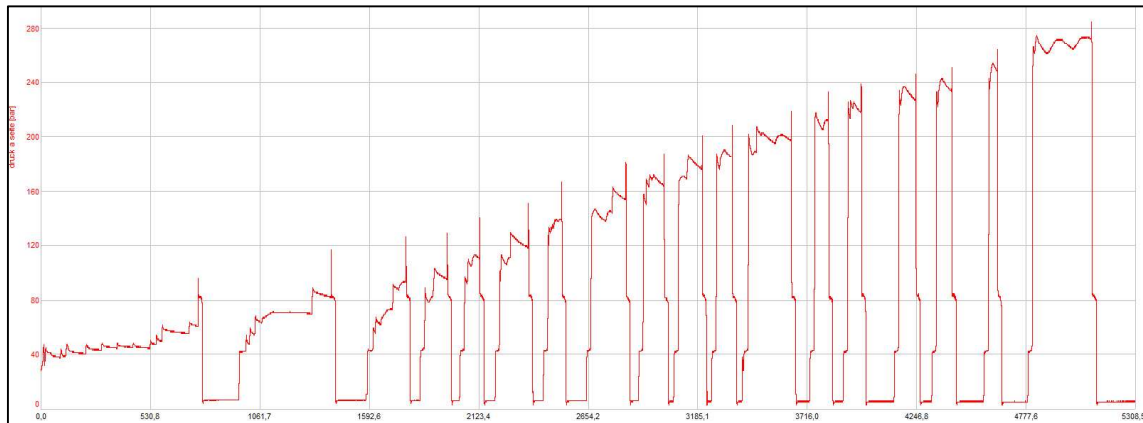


Figure 47: Graph of clamping pressure as a function of time

Zeit [s]	druck a seite [bar]	
5096,8	272	
5096,9	272	
5097,0	272	
5097,1	272	
5097,2	270	
5097,3	270	
5097,4	273	
5097,5	279	
5097,6	283	
5097,7	285	
5097,8	281	
5097,9	270	
5098,0	259	
5098,1	250	
5098,2	243	
5098,3	235	
5098,4	228	
5098,5	218	
5098,6	208	
5098,7	199	
5098,8	189	
5098,9	180	
5099,0	171	
5099,1	162	
5099,2	154	
5099,3	145	
5099,4	137	
5099,5	129	
5099,6	122	
5099,7	114	
5099,8	107	
5099,9	101	
5100,0	96	
5100,1	92	
5100,2	89	
5100,3	88	

Figure 48: Table with the maximum pressure before release



Figure 49: No damage visible after 60 bar clamping pressure



Figure 50: No damage visible after 86 bar clamping pressure



Figure 51: No damage visible after 110 bar clamping pressure



Figure 52: No damage visible after 130 bar clamping pressure



Figure 53: No damage visible after 170 bar clamping pressure



Figure 54: No damage visible after 200 bar clamping pressure



Figure 55: No damage visible after 240 bar clamping pressure

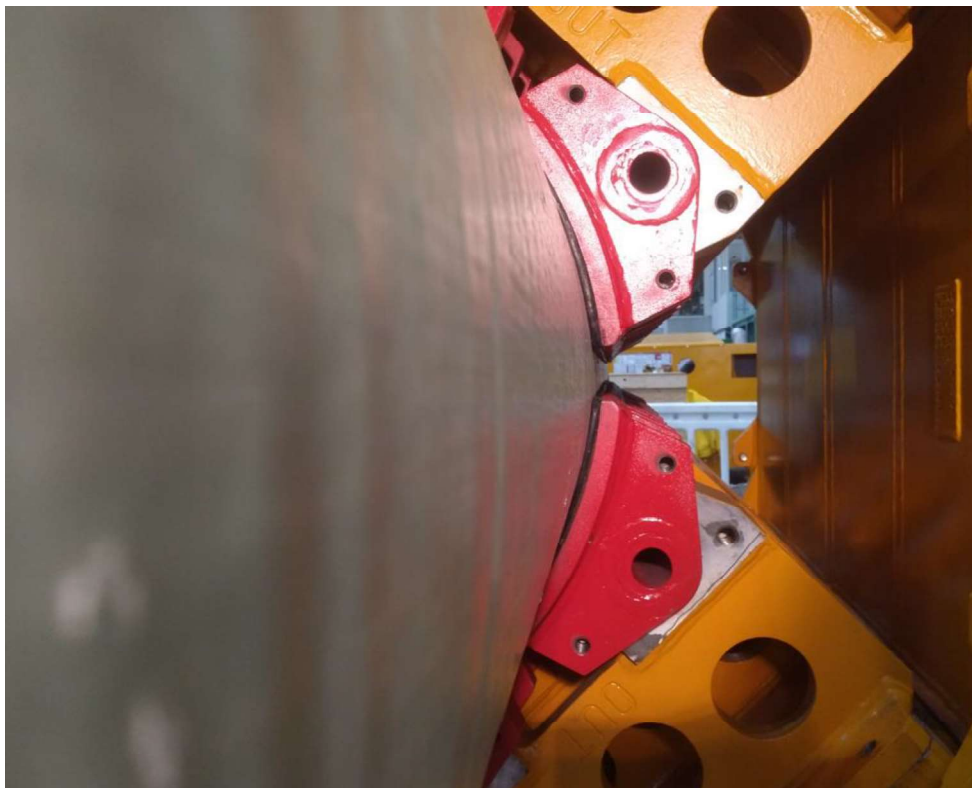


Figure 56: Clamping with full 275 bar (no damage recognised)

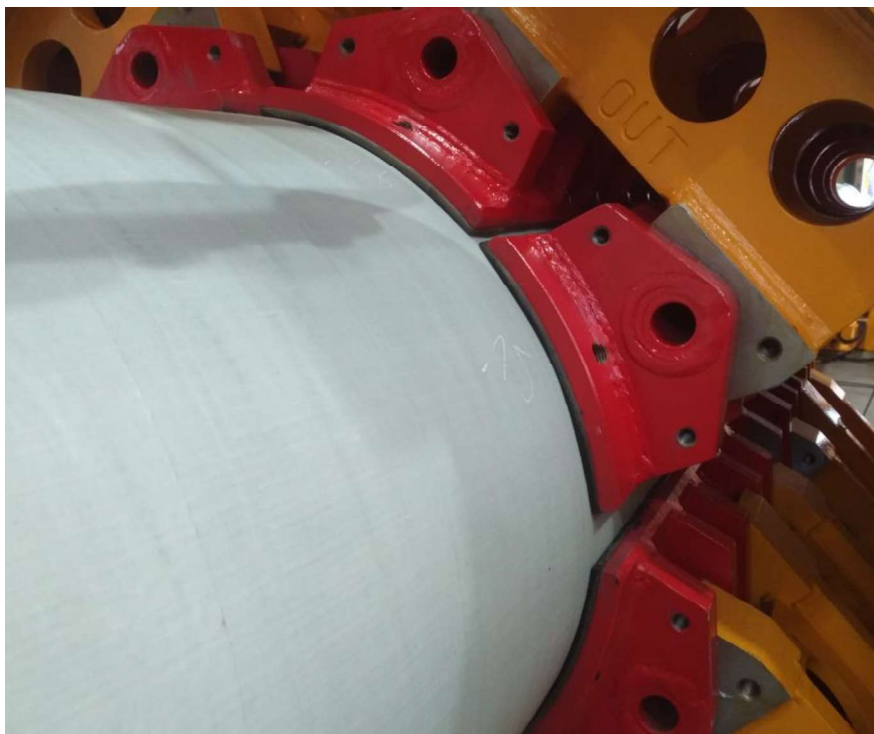


Figure 57: Clamping with full 275 bar (no damage recognised)



Figure 58: Clamping with full 275 bar (no damage recognised)



Figure 59: No damage visible after 275 bar clamping pressure



Figure 60: Figure 56: No damage visible after 275 bar clamping pressure



Figure 61: Figure 56: No damage visible after 275 bar clamping pressure



Figure 62: No damage visible after 275 bar clamping pressure



Figure 63: No damage visible after 275 bar clamping pressure

The pressure was increased to 275 bar. The pressure diagram shows that at regular intervals the pressure was lowered, and the clamps were opened. This was done to visually check for damage (see picture above).

4.5.1 Exceeding the maximum pressure of the clamping unit

After slight noises were heard but no damage was detected up to 275 bar, all participants decided to increase the pressure further until the pipe was destroyed.

Normally, the pressure is limited to approx. 275 - 280 bar. After modifying the system, the pressure could be increased further until the pipe was destroyed.

The following graphs showing the pressure of clamping unit until destroying the pipe:

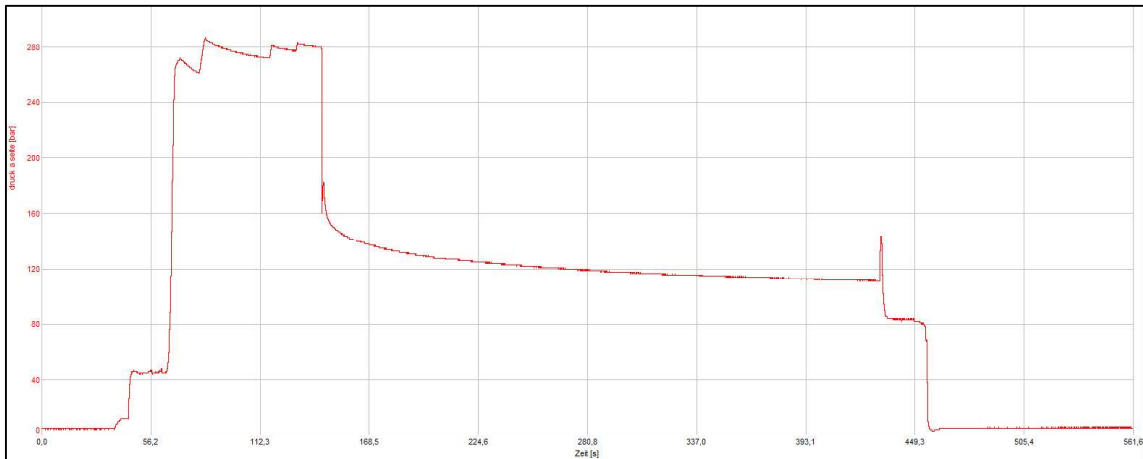


Figure 64: Graph of clamping pressure as a function of time

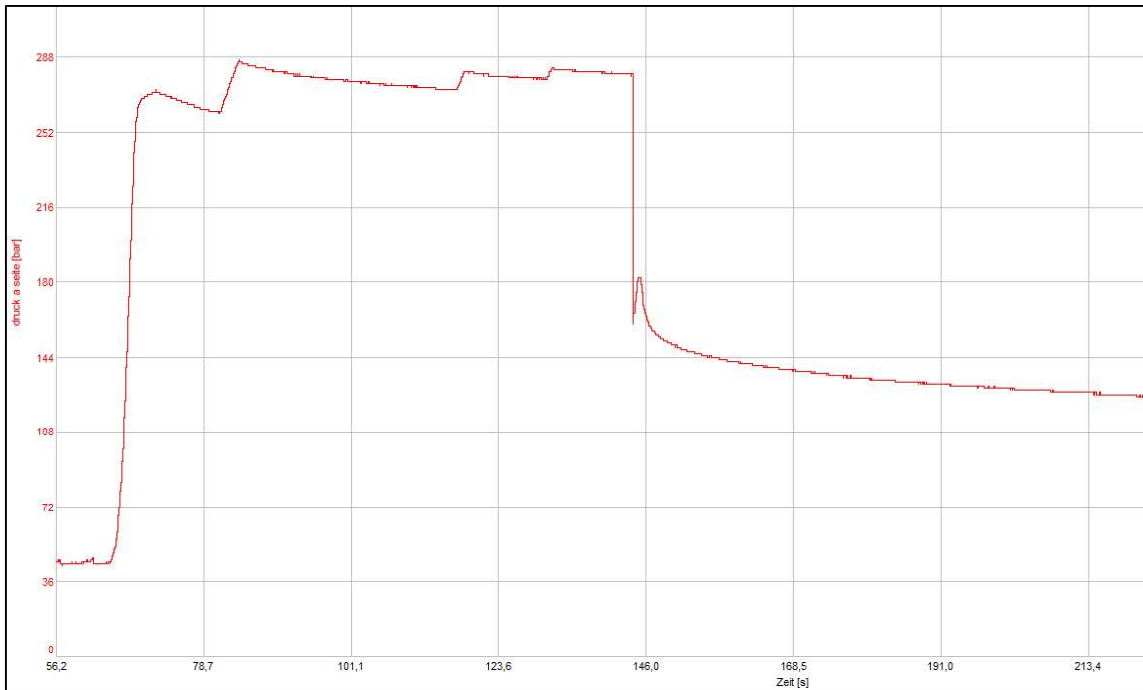


Figure 65: Zoomed graph of clamping pressure as a function of time

Zeit [s]	druck a seite [bar]
82,3	272
82,4	273
82,5	274
82,6	275
82,7	276
82,8	277
82,9	278
83,0	278
83,1	279
83,2	280
83,3	281
83,4	282
83,5	283
83,6	284
83,7	284
83,8	285
83,9	286
84,0	286
84,1	287
84,2	286
84,3	286
84,4	286
84,5	285
84,6	285
84,7	285
84,8	285
84,9	285
85,0	285
85,1	285
85,2	285
85,3	285
85,4	284
85,5	284
85,6	284
85,7	284
85,8	284
85,9	284
86,0	284
86,1	284
86,2	284
86,3	284
86,4	284
86,5	283

Figure 66: Table with the maximum pressure before destroying

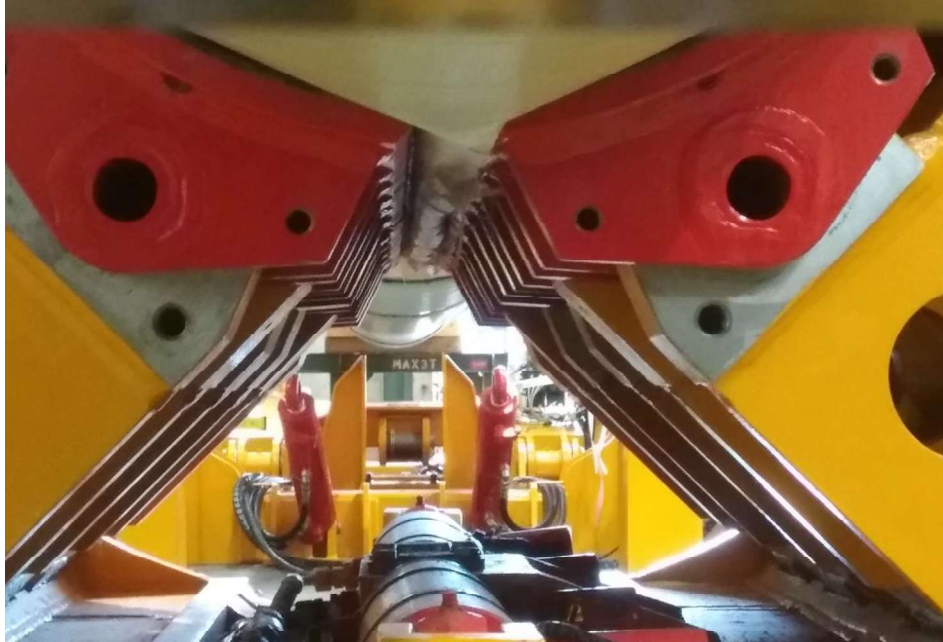


Figure 67: Damaged pipe between the lower clamps



Figure 68: Zoomed damaged pipe between the lower clamps



Figure 69: Side view of damaged pipe between the lower clamps



Figure 70: Side view of damaged pipe between the lower clamps



Figure 71: Damaged pipe after disassembly



Figure 72: Condition of clamps after test

4.5.2 Observations and comments

As can be seen in the photos and recordings, the pressure was initially increased to approx. 275bar without any damage to the pipe being detected.

When the pressure reached 287 bar did the GRP break abruptly between the lower clamping shoes (see) and the pressure dropped.

It is assumed that the material (HDPE, PUR) underneath the GRP layer serves as a support and thus the shape of the GRP is largely preserved, making significantly higher radial forces possible

4.6 Axial test with 16 m 28" HDPE pipe

For this test, the 16 m HDPE pipe was clamped in the clamping unit and pushed against the abutment (traverse). This allows radial and axial forces to be applied to the pipe.

The pressures of the clamping cylinders and thrust cylinders were measured and recorded again.

In addition, an attempt was made to measure the deformation of the pipe using photogrammetry. For this purpose, the pipe (deforming part) was marked with 1464 marks, the clamping unit (fixed part) and the traverse (fixed part) were also marked with measuring points (see pictures below).

In consultation with all participants, the measurement was carried out after certain pressure levels.

Likewise, a displacement of the clamping unit was to be detected by means of a laser to detect slip. In addition, the pipe was marked with a marker in the area of the clamps.

A displacement of HDPE and PUR to the steel pipe was to be detected with another laser.

To prevent damage to the pipe during clamping, the hydraulic valve was manually set to 50 bar. This value was chosen with all participants and results from the radial tests.

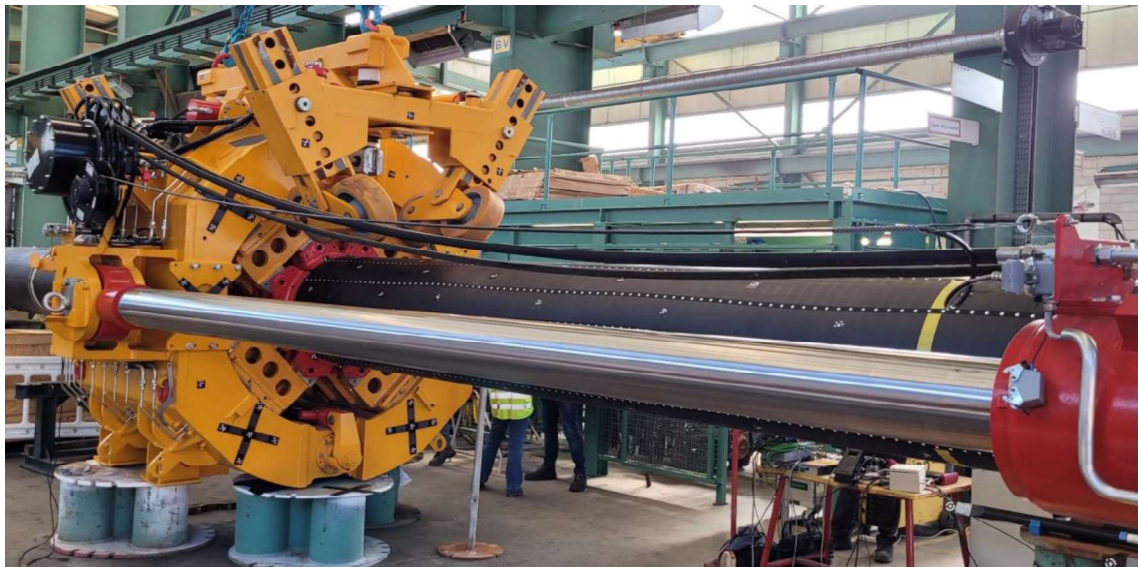


Figure 73: 16 m Pipe with measuring points



Figure 74: Measuring points at the traverse



Figure 75: Measuring points at the clamping unit

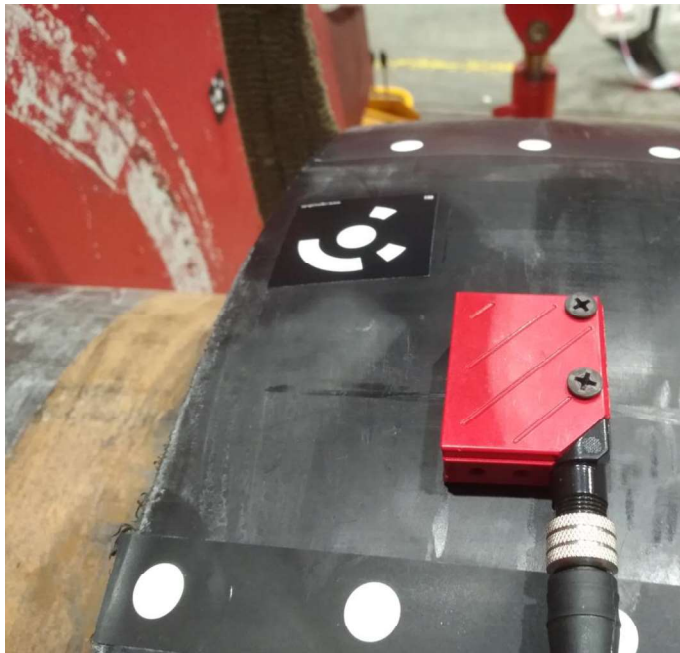


Figure 76: Laser between HDPE and fixed traverse



Figure 77: Laser between fixed ground and clamping unit

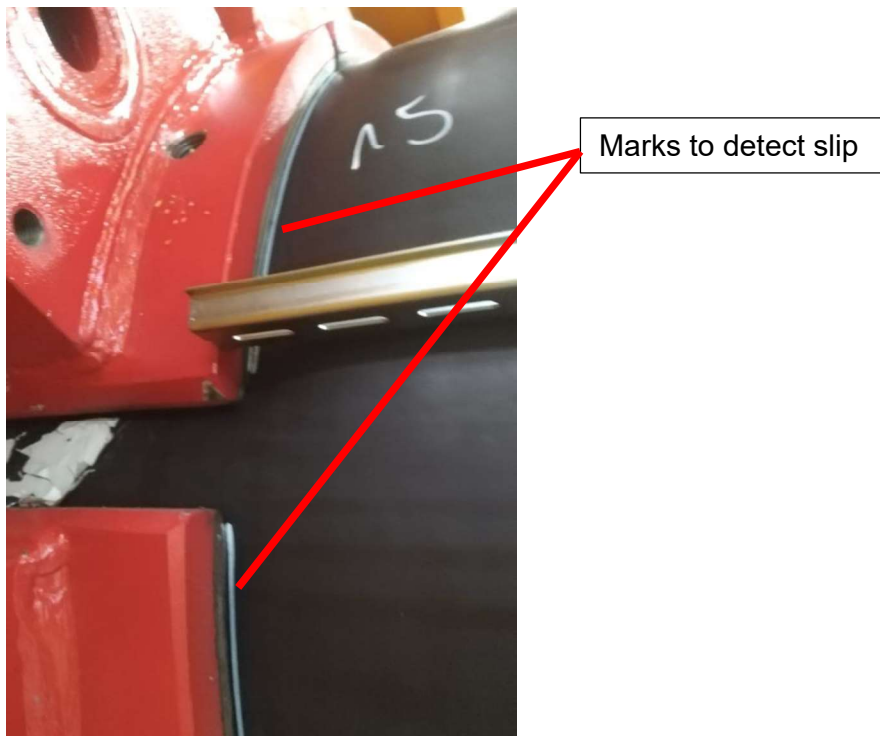


Figure 78: Marks on pipe to detect slip

When the pipe was in position and clamped with 50 bar, the pressure of the thrust cylinders was increased step by step in consultation with all participants until slip occurred.

The following graphs showing the pressure of clamping unit, thrust cylinders and lasers:

First recording:

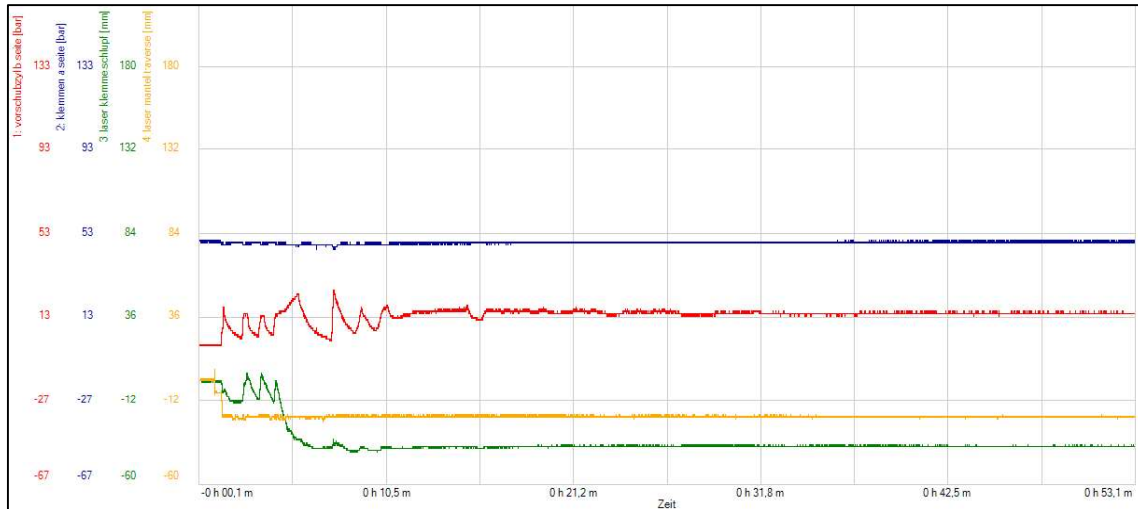


Figure 79: Graph of thrust pressure (up to approx. 20 bar), clamping pressure (of 50 bar), laser at clamps and laser at pipe as a function of time

Second recording:

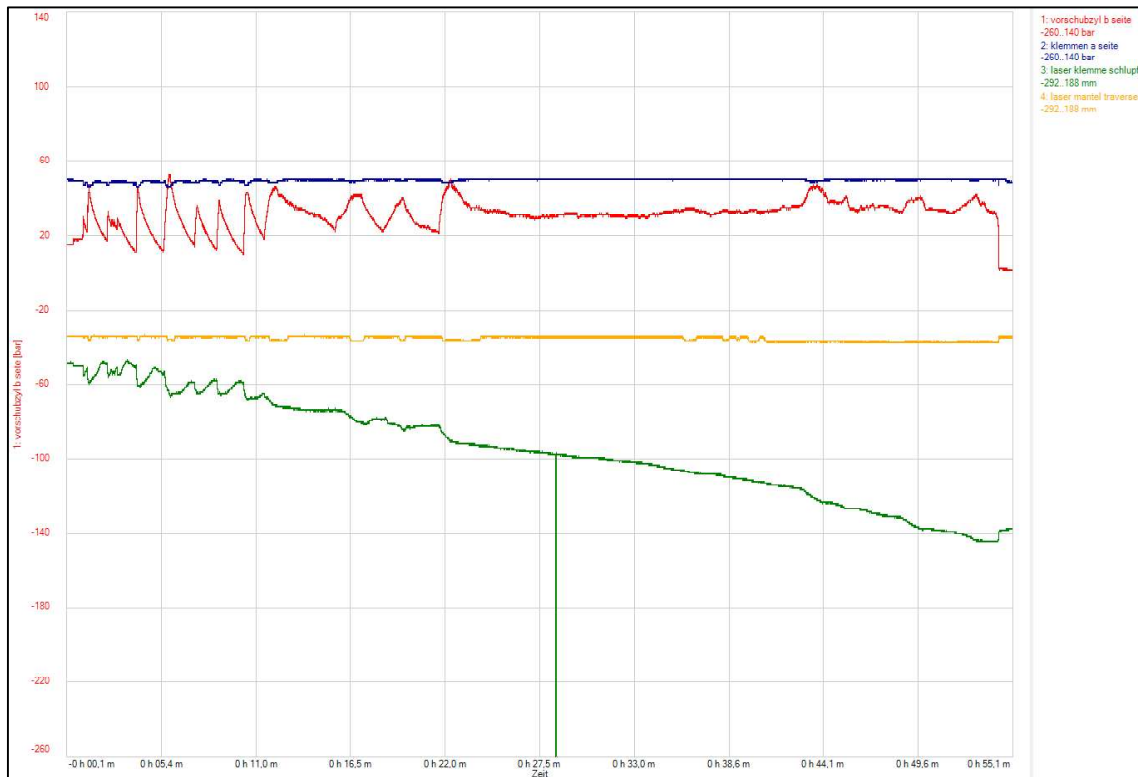


Figure 80: Graph of thrust pressure (up to approx. 52 bar), clamping pressure (of 50 bar), laser at clamps and laser at pipe as a function of time

Third recording

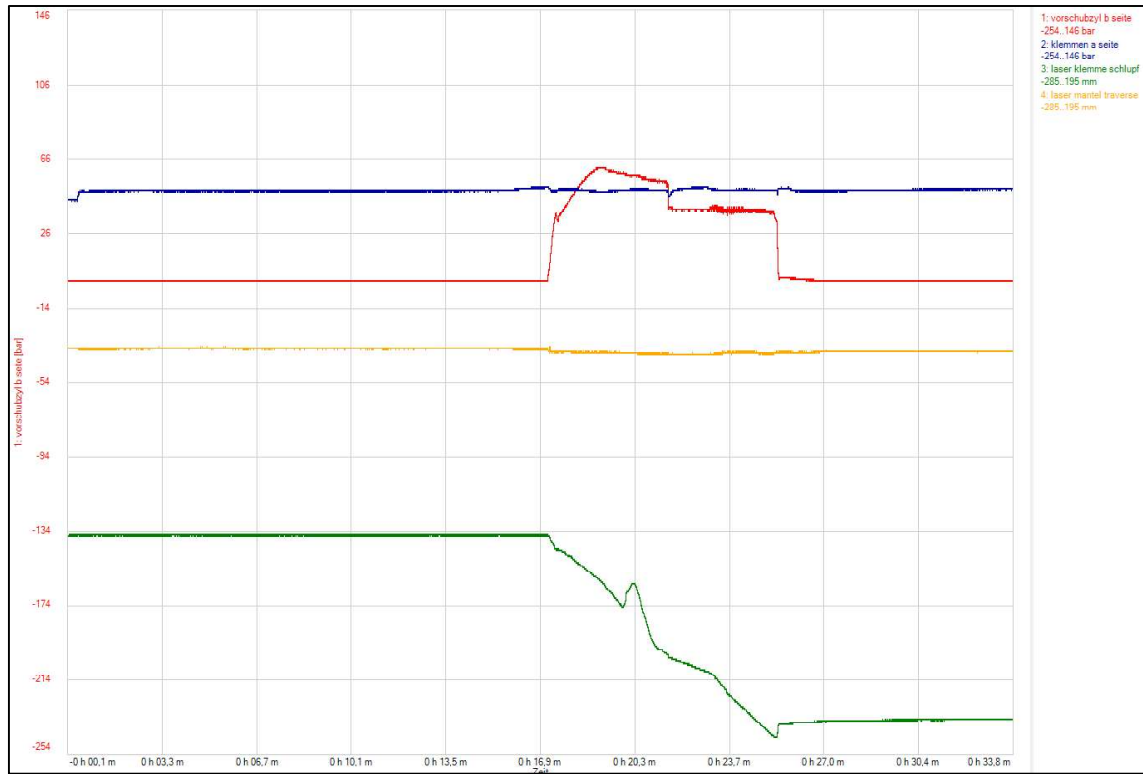


Figure 81: Graph of thrust pressure (up to approx. 60 bar), clamping pressure (of 50 bar), laser at clamps and laser at pipe as a function of time

3D measurement

Second measuring:

Centre: Centre of the tube on the side of the clamping unit

Vector: Centre line pipe in direction of force +X

Vector: Vertical upwards +Z

Reference measurement: Pipe clamped at 50 bar

Second measurement: Pipe clamped with 50 bar & 15 bar thrust

Note:

- for more details, please see the measurement report
- first test is the reference measurement
- the timing and frequency for carrying out the 3D measurements was always done in consultation with all participants

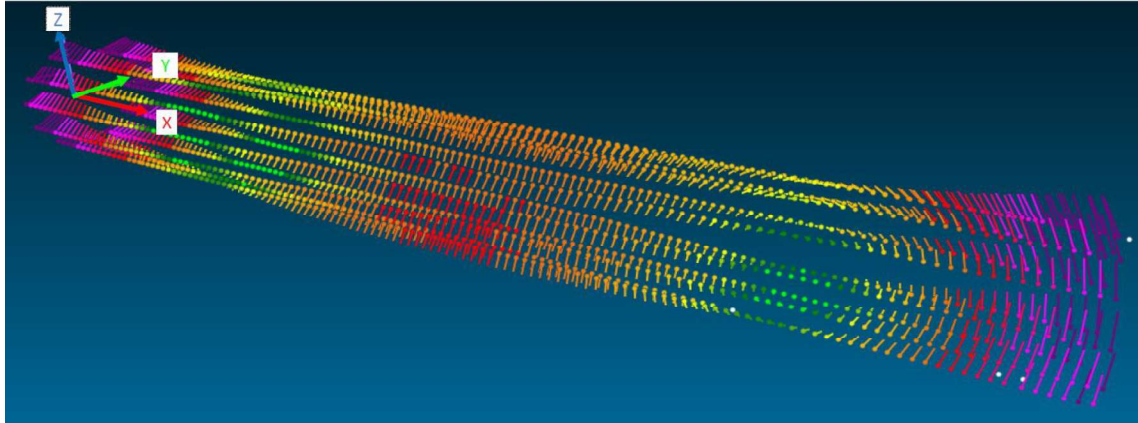


Figure 82: Movement of the measuring points at 50 bar clamping and 15 bar thrust

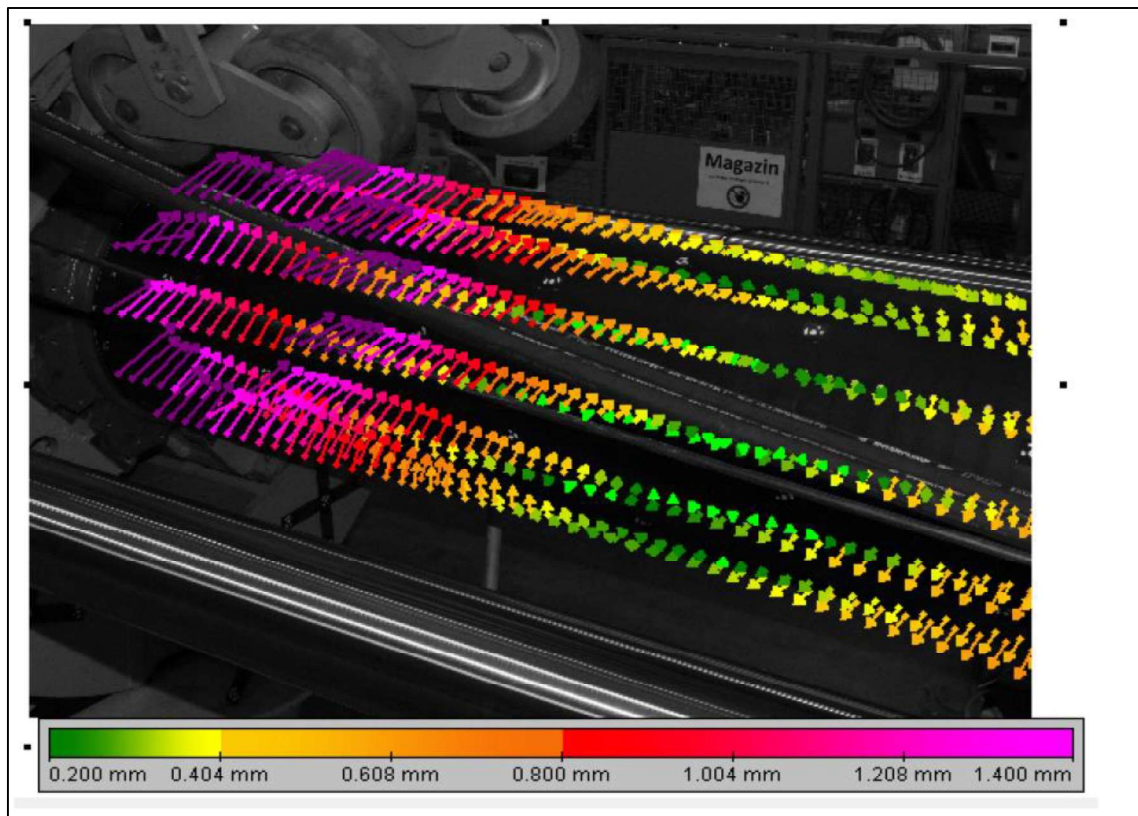


Figure 83: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 15 bar thrust

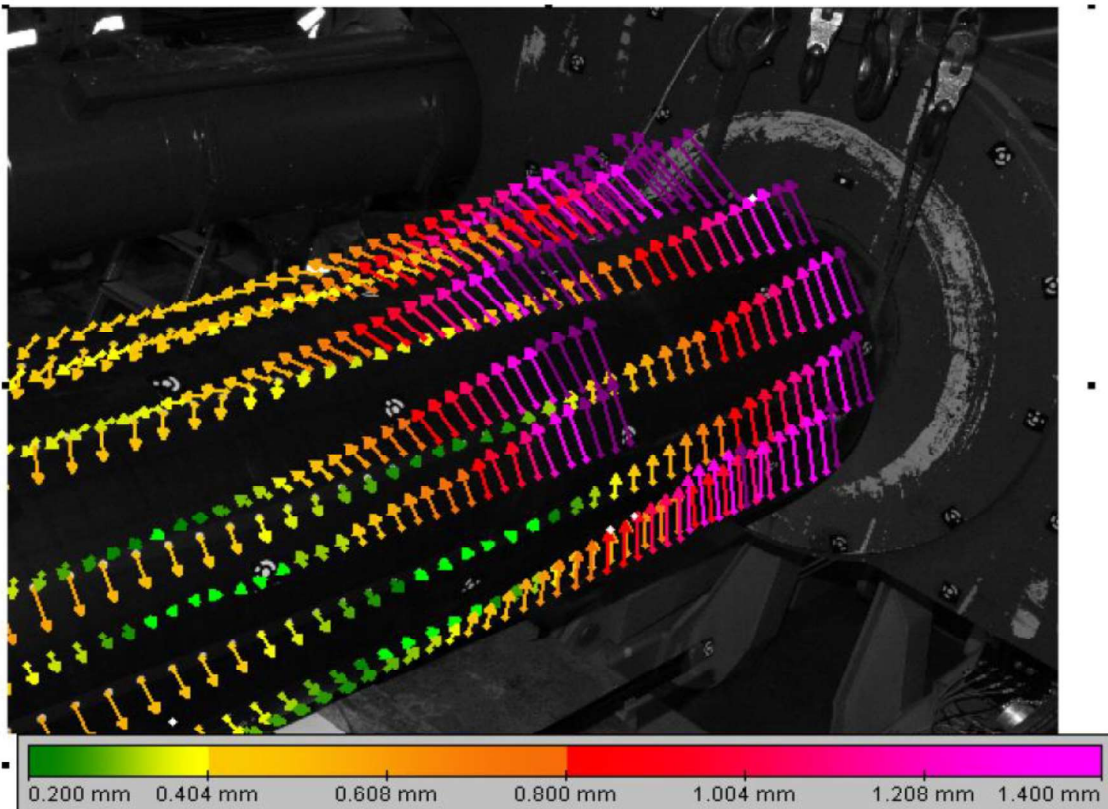


Figure 84: Movement at traverse of the measuring points at 50 bar clamping and 15 bar thrust

Third measurement:

Centre: Centre of the tube on the side of the clamping unit

Vector: Centre line pipe in direction of force +X

Vector: Vertical upwards +Z

Reference measurement: Pipe clamped at 50 bar

Third measurement: Pipe clamped with 50 bar & 30 bar thrust

Note:

- for more details, please see the measurement report
- first test is the reference measurement
- the timing and frequency for carrying out the 3D measurements was always done in consultation with all participants

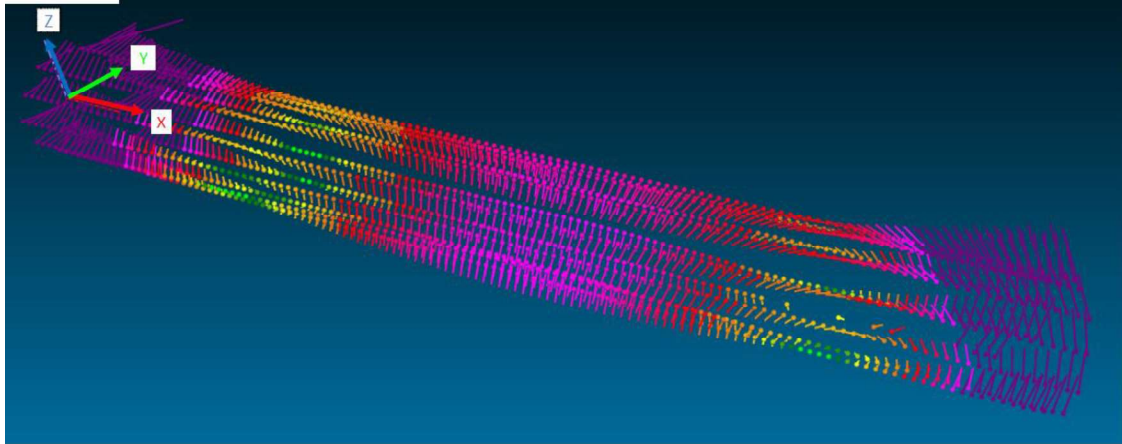


Figure 85: Movement of the measuring points at 50 bar clamping and 30 bar thrust

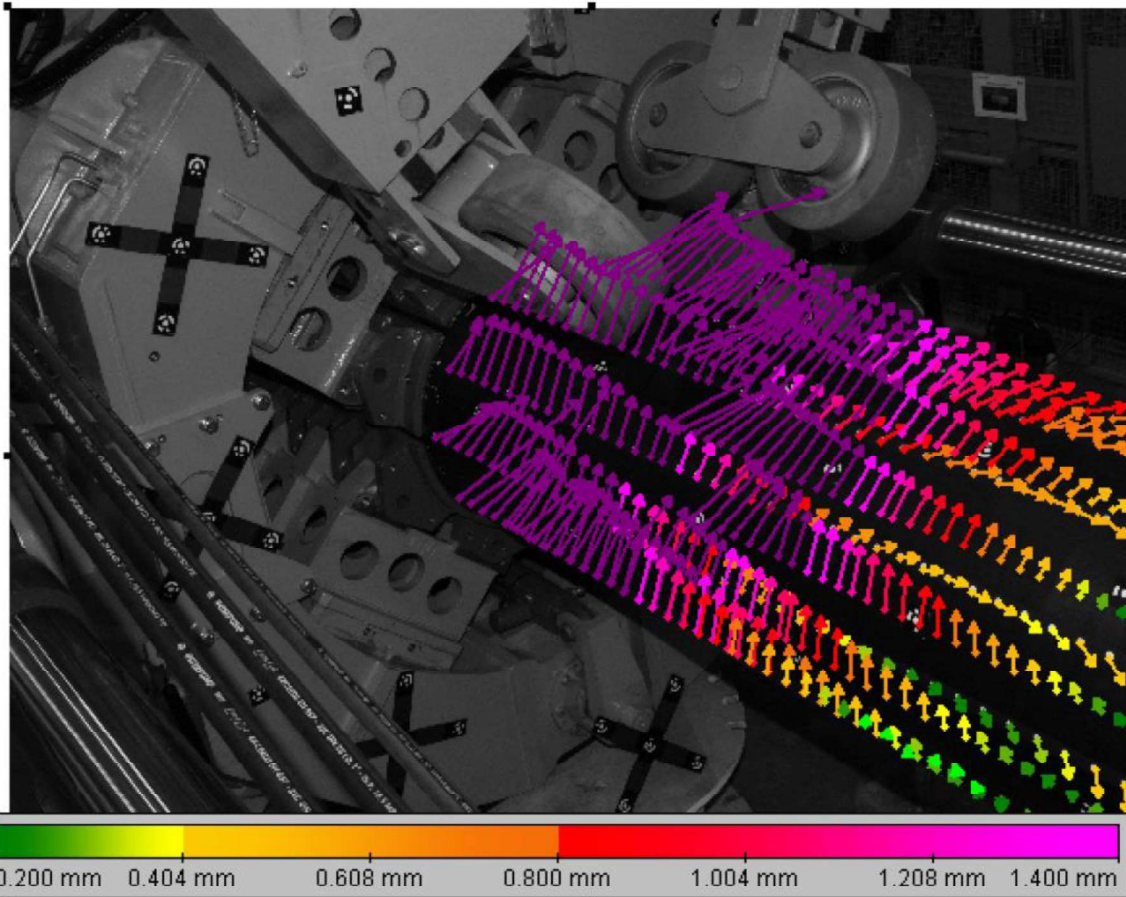


Figure 86: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 30 bar thrust

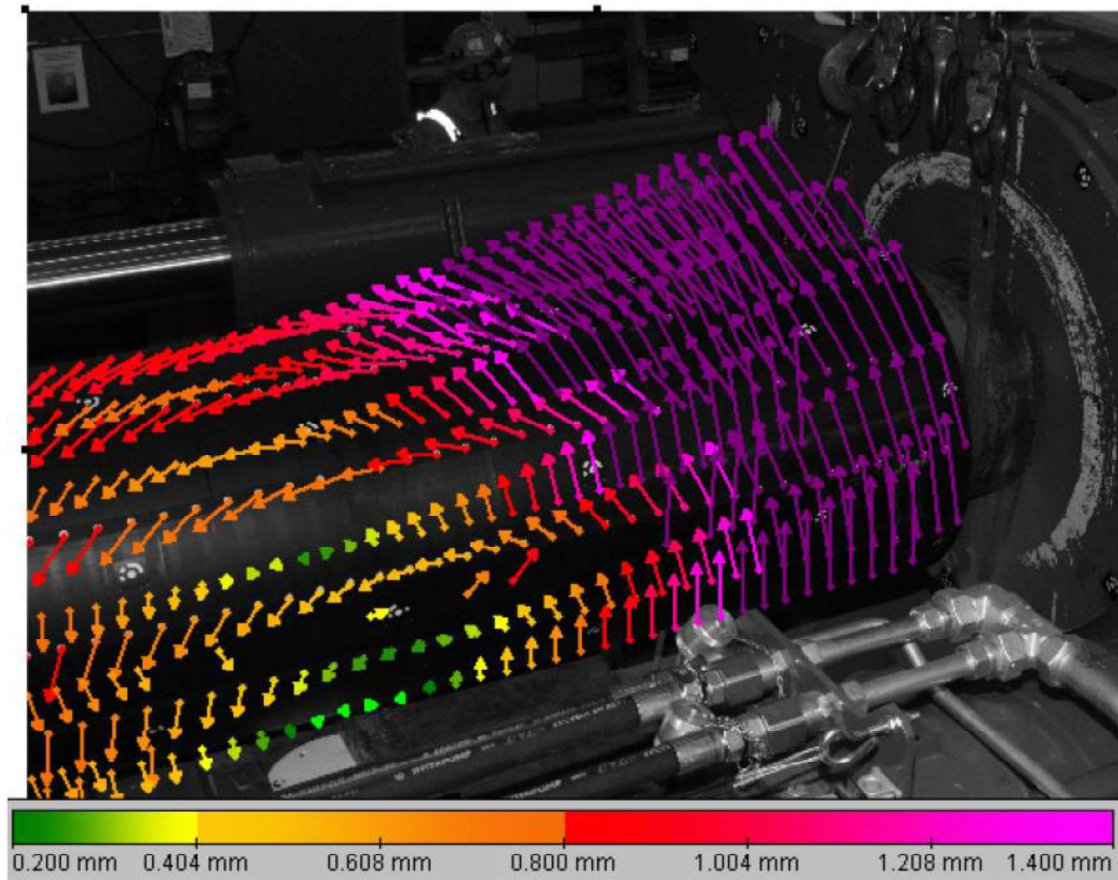


Figure 87: Movement at traverse of the measuring points at 50 bar clamping and 30 bar thrust

Fourth measurement:

Centre: Centre of the tube on the side of the clamping unit

Vector: Centre line pipe in direction of force +X

Vector: Vertical upwards +Z

Reference measurement: Pipe clamped at 50 bar

Fourth measurement: Pipe clamped with 50 bar & 60 bar thrust

Note:

- for more details, please see the measurement report
- first test is the reference measurement
- the timing and frequency for carrying out the 3D measurements was always done in consultation with all participants

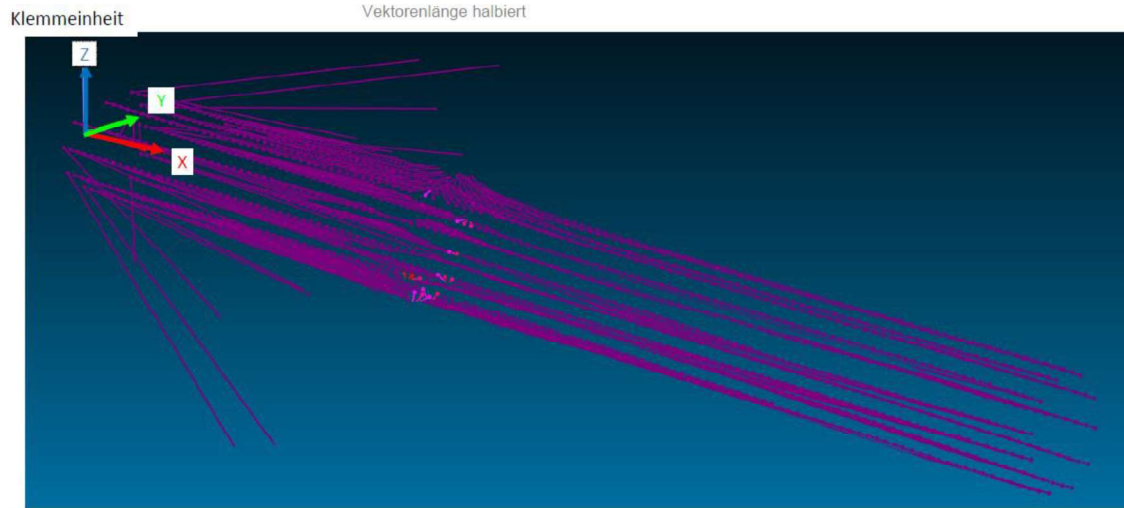


Figure 88: Movement of the measuring points at 50 bar clamping and 60 bar thrust

The following pictures showing the elastic and plastic deformation as well movements:



Figure 89: Elastic deformation of the pipe at 50 bar clamping and 0 bar thrust

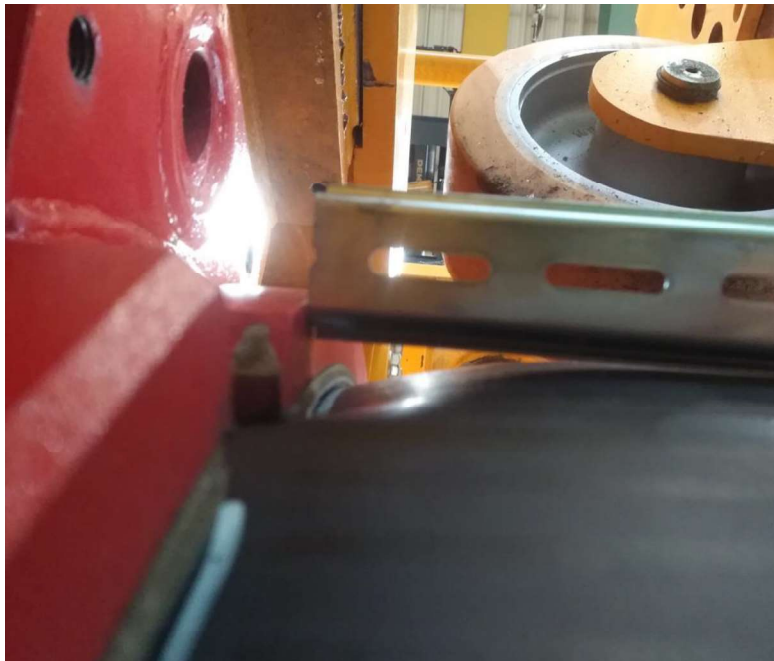


Figure 90: Plastic deformation



Figure 91: Shifting the line of the marker



Figure 92: Compressed HDPE pipe at 50 bar clamping and 60 bar thrust

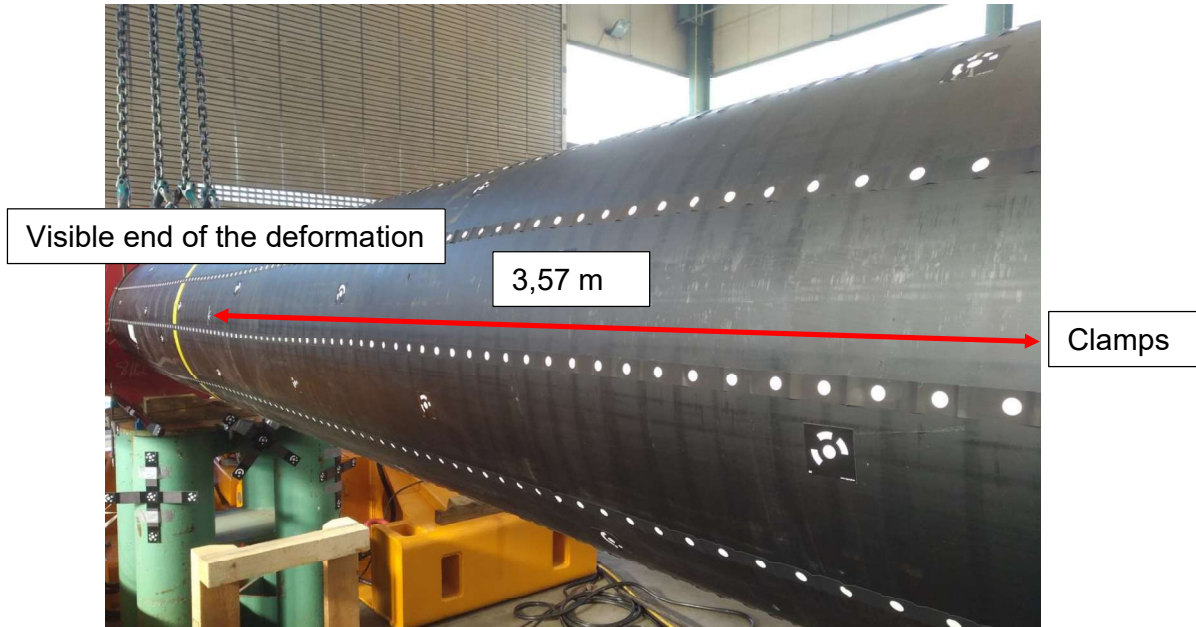


Figure 93: 3,57 m length of compressed area (between clamps and marked line)



Figure 94: Broken spacer and PUR



Figure 95: Displacement of PUR



Figure 96: Wall thickness of nearly 10 mm in the non-stressed area



Figure 97: Wall thickness of nearly 9 mm in the stressed area



Figure 98: Displacement of the clamping unit



Figure 99: Displacement of support (underneath the clamping unit)



Figure 100: Displacement of thruster unit

4.6.1 Observations and comments

First of all, it was found during this test that the clamping shoes had already penetrated the material at one point at approx. 50 bar (see Figure 90), although at the radial test and 50 bar they had not done so. The participants suspected that there was a defect (hole, etc.) in the PUR at this point and that it therefore could not support properly. A spacer was also a possibility here.

However, as there was no further possibility of clamping at another position, it was decided to increase the pressure of the thrust cylinders (see Figure 79 and Figure 80 and Figure 81).

With increasing pressure of thrust cylinders and constant clamping force, the pipe deformed further and further in axial and radial directions.

In the axial direction because the HDPE was compressed more and more. One indication is that the pressure of the feed cylinders had to be readjusted again and again. This can be clearly seen in the thrust pressure diagrams (see Figure 79, Figure 80).

In the radial direction, because the pressure was kept almost constant, and the clamps were able to penetrate further and further into the material due to the stretching of the material.

The wall thickness of the HDPE was re-measured after this test (see Figure 96 and Figure 97) and a reduction was found. This confirms the assumption that the pipe was stretched in the area of the clamps.

The clamping unit and the thrust unit also moved in relation to each other, so that the values of the laser for slip detection were unusable. Likewise, the line on the pipe that served as a marker could no longer be reliably viewed, as the pipe was probably stretched in the area of the marker.

The laser between the pipe and the crossbeam reported about a few millimetres, but a mark was also made there, which did not suggest any displacement between the PUR and the steel pipe.

While the pressure of the feed cylinders was further increased and reached approx. 35 bar, clear cracking noises could be heard. At the maximum pressure of approx. 60 bar (see Figure 81), there were loud cracking noises. It can be seen that the noises originate from the broken spacers. This is why the PUR is pulled along by the HDPE at the broken point and is fixed at another point (see Figure 94, Figure 95).

After consultation with the engineer for the 3D measurement, a measurement by photogrammetry is most likely incorrect and not usable due to the dynamic and non-stopping movements. Nevertheless, it was decided to take three measurements. At 15 bar, 30 bar and 60 bar thrust.

As already suspected in advance, the data (see measuring reports and Figure 82, until Figure 88) must be critically analysed.

4.7 Pull test without pipes

To determine how much thrust force is needed to move the clamping unit and or thrust unit, the pipe was removed, and the pressure of the thrust cylinders was increased until movement occurred.

First recordings:

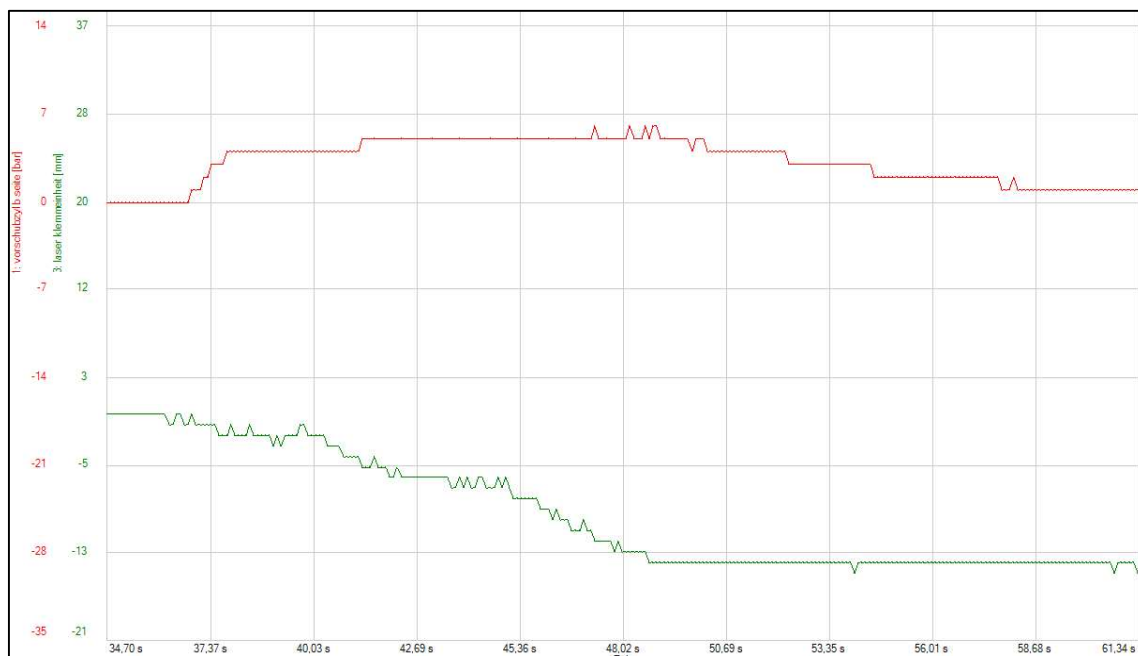


Figure 101: Pressure of clamps and movement of clamping unit as a function of time (first test)

Second recordings:



Figure 102: Pressure of clamps and movement of clamping unit as a function of time (second test)

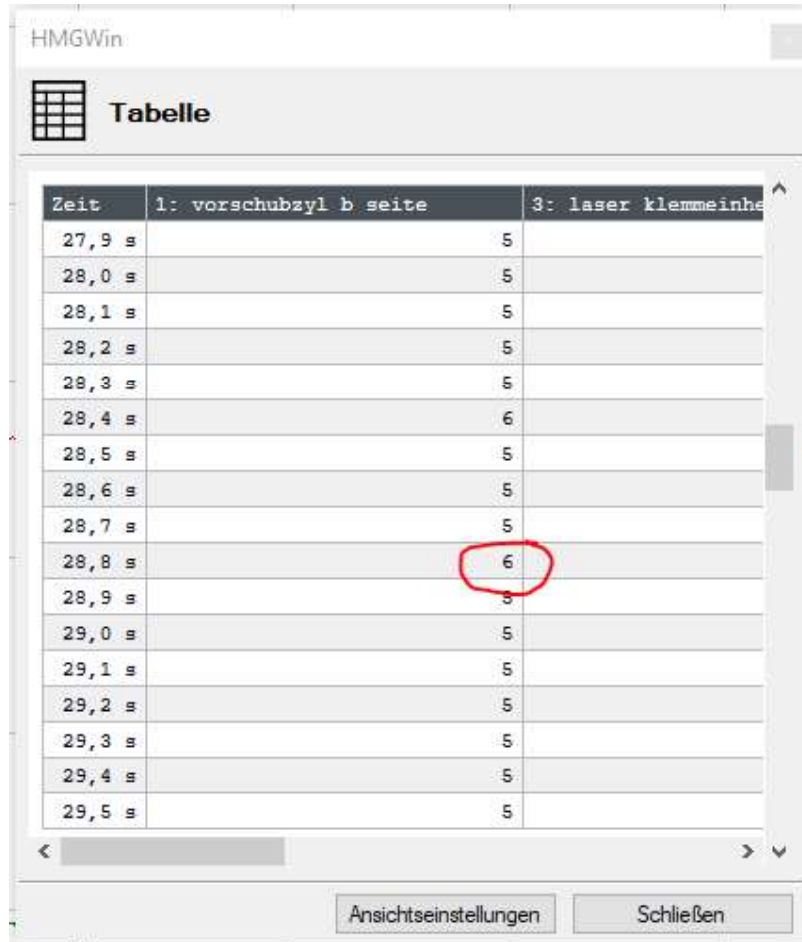
HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubzyl b seite	3: laser klemmeinhe
48,3 s		5
48,4 s		5
48,5 s		5
48,6 s		6
48,7 s		5
48,8 s		6
48,9 s		6
49,0 s		5
49,1 s		5
49,2 s		5
49,3 s		5
49,4 s		5
49,5 s		5
49,6 s		5
49,7 s		5
49,8 s		4
49,9 s		5

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 103: Maximum pressure of first test



The screenshot shows a software window titled 'HMGWin' with a 'Tabelle' (Table) view. The table has three columns: 'Zeit' (Time), '1: vorschubzyl b seite' (1: advance cylinder b side), and '3: laser klemmeinhe' (3: laser clamping unit). The data is as follows:

Zeit	1: vorschubzyl b seite	3: laser klemmeinhe
27,9 s		5
28,0 s		5
28,1 s		5
28,2 s		5
28,3 s		5
28,4 s		6
28,5 s		5
28,6 s		5
28,7 s		5
28,8 s		6
28,9 s		5
29,0 s		5
29,1 s		5
29,2 s		5
29,3 s		5
29,4 s		5
29,5 s		5

At the bottom of the window, there are two buttons: 'Ansichtseinstellungen' and 'Schließen'.

Figure 104: Maximum pressure of second test

4.8 Axial test with 16 m 28" HDPE GRP pipe

For this test, the 16 m HDPE GRP pipe was clamped in the clamping unit and pushed against the abutment (traverse). This allows radial and axial forces to be applied to the pipe.

The pressures of the clamping cylinders and thrust cylinders were measured and recorded.

In addition, an attempt was made to measure the deformation of the pipe using photogrammetry. For this purpose, the pipe (deforming part) was marked with 1472 marks. The clamping unit and traverse were equipped with measuring points. However, since these did move during the axial test and this is not required for photogrammetry, the supports standing on the ground were used as a reference (see Figure 105). In consultation with all participants, the measurement was carried out after certain pressure levels.

Likewise, a displacement of the clamping unit was to be detected by means of a laser to detect slip. In addition, the pipe was marked with a marker in the area of the clamps.

A displacement of the thrust unit was to be detected with another laser.

Note: Wall thickness of the GRP layer differed from the previous test. For this axial test it was only 5 mm (according to TDC).



Figure 105: Axial test setup with 16 m HDPE GRP pipe

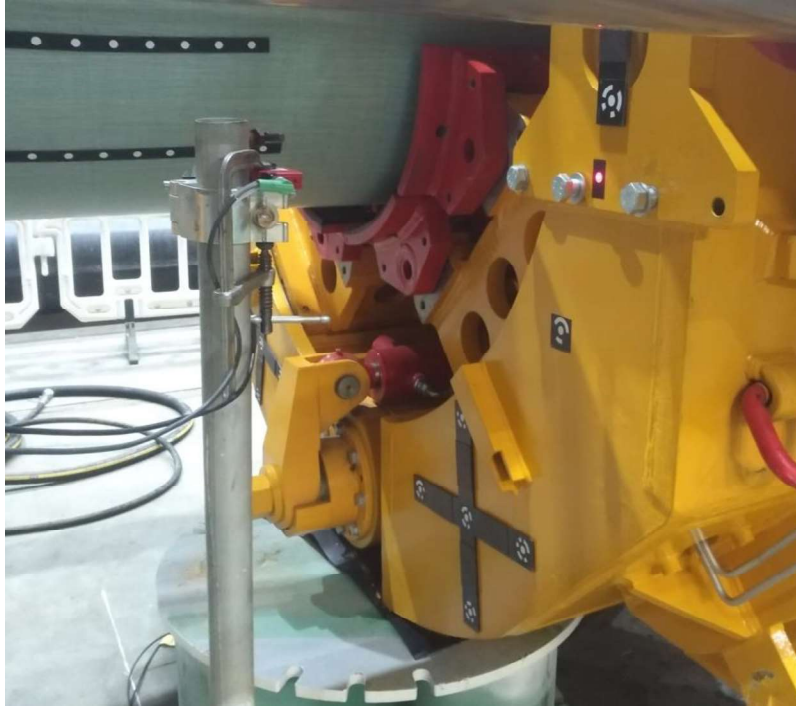


Figure 106: Laser for detecting the movement of the clamping unit



Figure 107: Laser for detecting movement of the thrust unit



Figure 108: Marks for detecting slip

When the pipe was in position and clamped with 50 bar, the pressure of the thrust cylinders was increased step by step in consultation with all participants until slip occurred.

The following graphs showing the pressure of clamping unit, thrust cylinders and lasers:

First recordings:

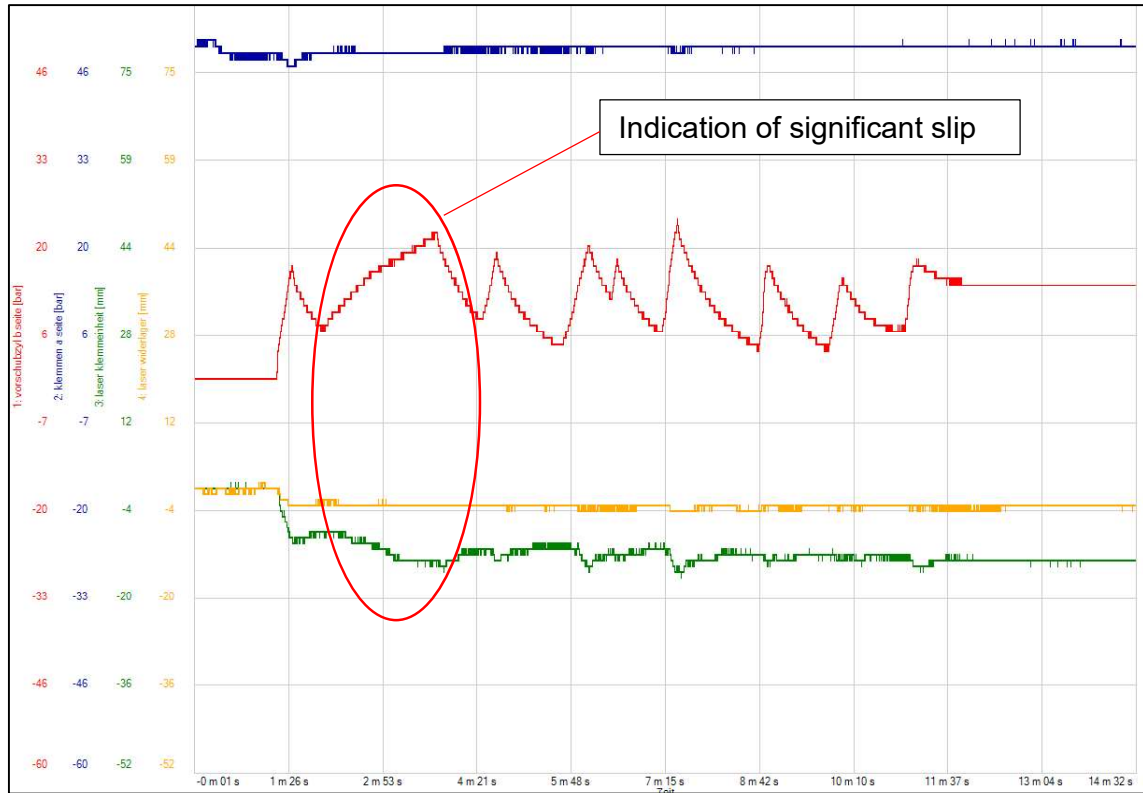


Figure 109: Graph of thrust pressure (up to approx. 24 bar), clamping pressure (of 50 bar), laser at clamps and laser at thrust unit

HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubzyl b seite	2: klemmen a seite
7 m 26,0 s		23
7 m 26,1 s		23
7 m 26,2 s		23
7 m 26,3 s		23
7 m 26,4 s		23
7 m 26,5 s		23
7 m 26,6 s		23
7 m 26,7 s		24
7 m 26,8 s		24
7 m 26,9 s		23
7 m 27,0 s		23
7 m 27,1 s		23
7 m 27,2 s		23
7 m 27,3 s		23
7 m 27,4 s		23
7 m 27,5 s		23
7 m 27,6 s		23
7 m 27,7 s		22
7 m 27,8 s		22
7 m 27,9 s		22
7 m 28,0 s		22
7 m 28,1 s		22
7 m 28,2 s		22
7 m 28,3 s		22
7 m 28,4 s		22

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 110: Table of maximum pressure (24 bar)

Second recordings:

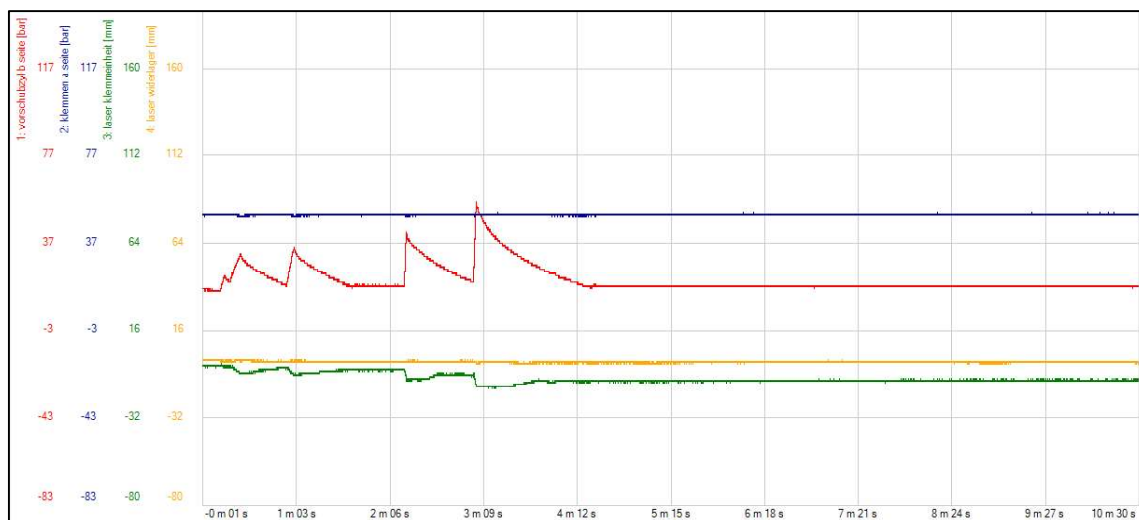


Figure 111: Graph of thrust pressure (up to approx. 56 bar), clamping pressure (of 50 bar), laser at clamps and laser at thrust unit

HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubszyl b seite	2: klemmen a seite
3 m 03,3 s		46
3 m 03,4 s		46
3 m 03,5 s		48
3 m 03,6 s		50
3 m 03,7 s		51
3 m 03,8 s		53
3 m 03,9 s		55
3 m 04,0 s		56
3 m 04,1 s		55
3 m 04,2 s		55
3 m 04,3 s		55
3 m 04,4 s		54
3 m 04,5 s		54
3 m 04,6 s		54
3 m 04,7 s		54
3 m 04,8 s		53
3 m 04,9 s		53

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 112: Table of maximum pressure (56 bar)

Third recordings:

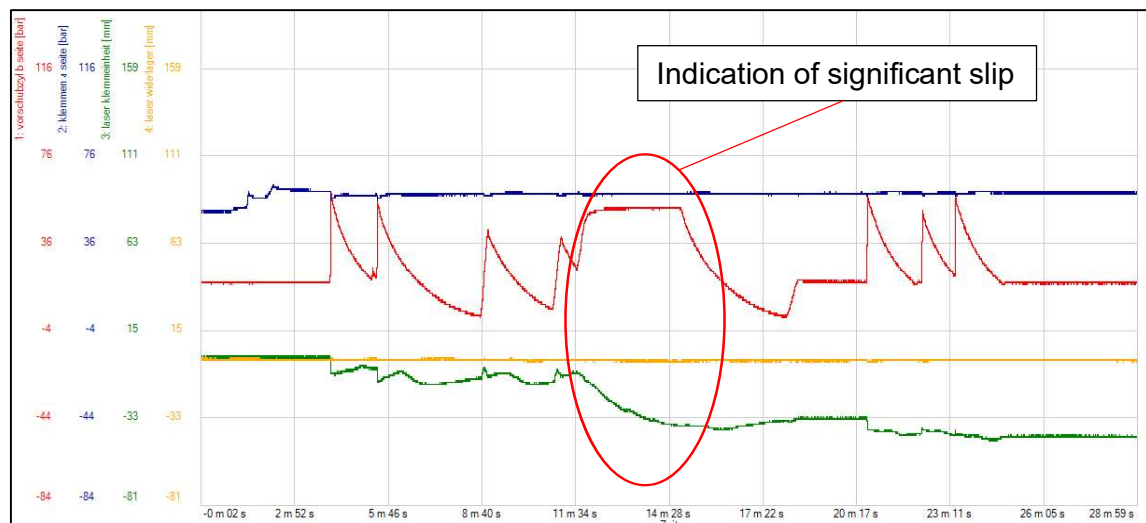


Figure 113: Graph of thrust pressure (up to approx. 60 bar), clamping pressure (of 60 bar), laser at clamps and laser at thrust unit

HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubszyl b seite	2: klemmen a
4 m 00,2 s		41
4 m 00,3 s		43
4 m 00,4 s		46
4 m 00,5 s		48
4 m 00,6 s		51
4 m 00,7 s		53
4 m 00,8 s		55
4 m 00,9 s		58
4 m 01,0 s		60
4 m 01,1 s		59
4 m 01,2 s		59
4 m 01,3 s		59
4 m 01,4 s		59
4 m 01,5 s		59
4 m 01,6 s		58
4 m 01,7 s		58
4 m 01,8 s		58

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 114: Table of maximum pressure (60 bar)

Fourth recordings:

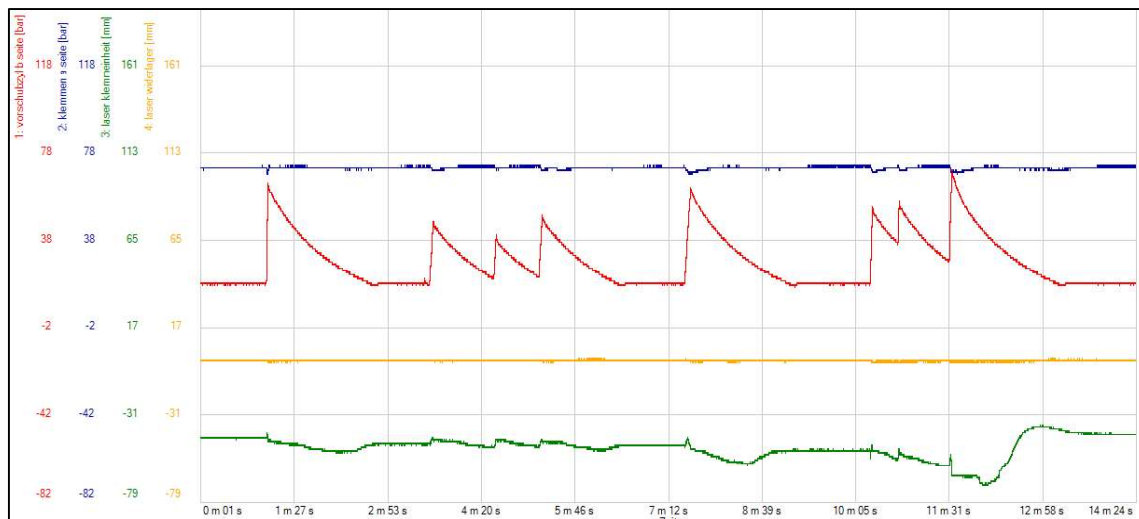


Figure 115: Graph of thrust pressure (up to approx. 70 bar), clamping pressure (of 70 bar), laser at clamps and laser at thrust unit

HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubzyl b seite	2: klemmen a s
11 m 33,6 s		61
11 m 33,7 s		63
11 m 33,8 s		65
11 m 33,9 s		66
11 m 34,0 s		67
11 m 34,1 s		69
11 m 34,2 s		70
11 m 34,3 s		70
11 m 34,4 s		69
11 m 34,5 s		70
11 m 34,6 s		69
11 m 34,7 s		69
11 m 34,8 s		68
11 m 34,9 s		68
11 m 35,0 s		68
11 m 35,1 s		68
11 m 35,2 s		68

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 116: Table of maximum pressure (70 bar)

Fifth recordings:

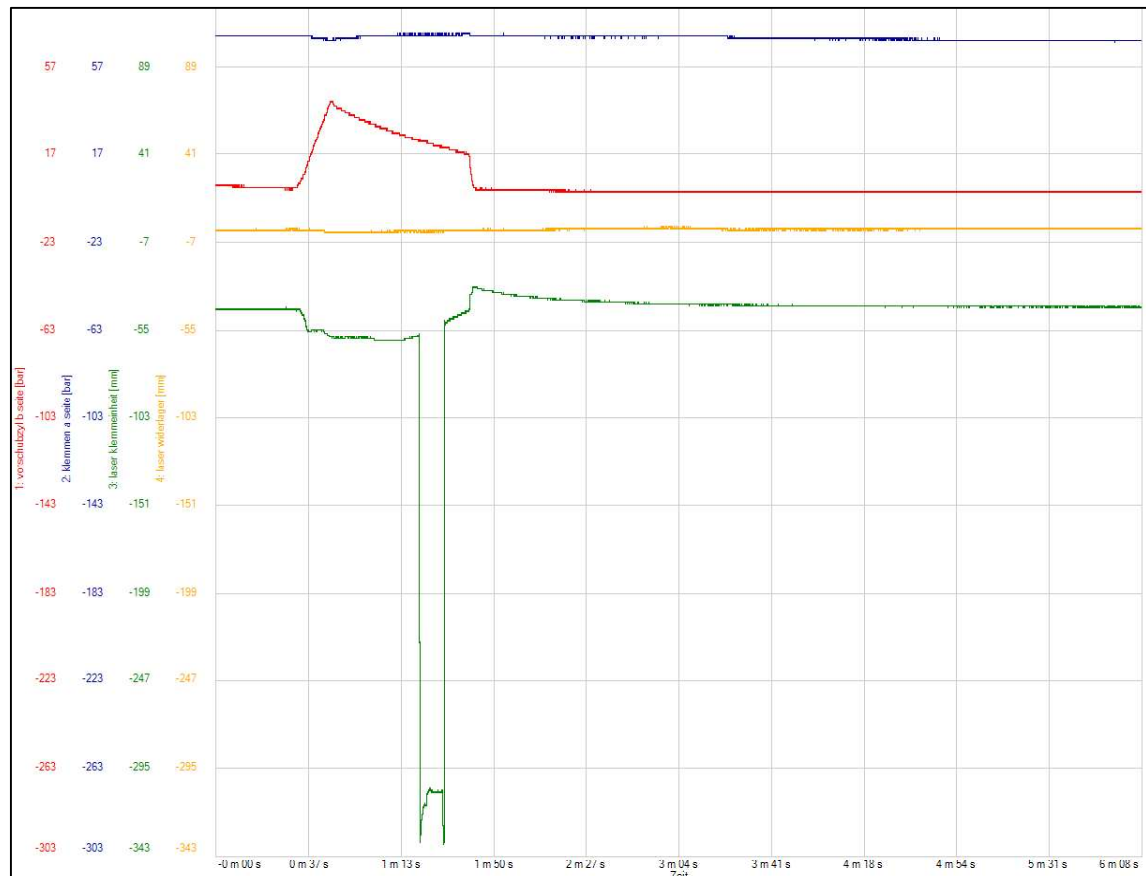


Figure 117: Graph of thrust pressure (up to approx. 41 bar), clamping pressure (of 70 bar), laser at clamps and laser at thrust unit

HMGWin

Tabelle

Zeit	1: vorschubzyl b seite	2: klemmen a seite
0 m 45,1 s		40
0 m 45,2 s		40
0 m 45,3 s		40
0 m 45,4 s		41
0 m 45,5 s		41
0 m 45,6 s		41
0 m 45,7 s		41
0 m 45,8 s		41
0 m 45,9 s		41
0 m 46,0 s		41
0 m 46,1 s		41
0 m 46,2 s		41
0 m 46,3 s		41
0 m 46,4 s		41
0 m 46,5 s		40
0 m 46,6 s		40
0 m 46,7 s		40

Ansichtseinstellungen Schließen

Figure 118: Table of maximum pressure (41 bar)

3D measurement:

Centre: Centre of the tube on the side of the clamping unit

Vector: Centre line pipe in direction of force +X

Vector: Vertical upwards +Z

Reference measurement: Pipe clamped at 50 bar

Second measurement: Pipe clamped with 50 bar & 20 bar thrust

Note:

- for more details, please see the measurement report
- first test is the reference measurement
- the timing and frequency for carrying out the 3D measurements was always done in consultation with all participants

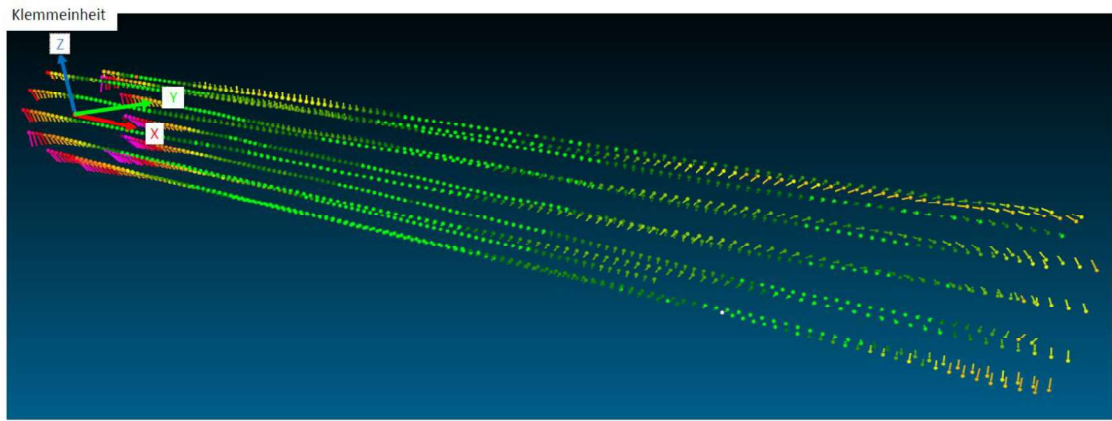


Figure 119: Movement of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

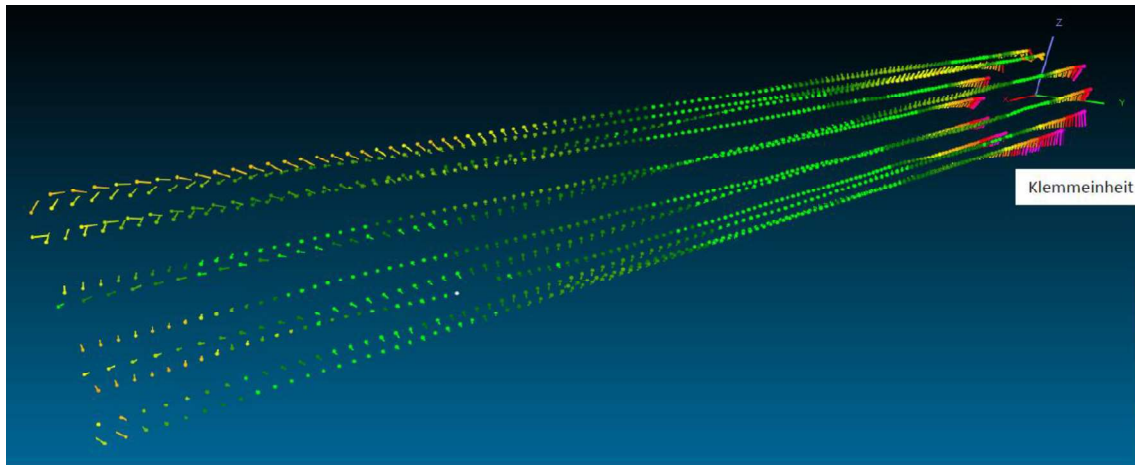


Figure 120: Movement of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

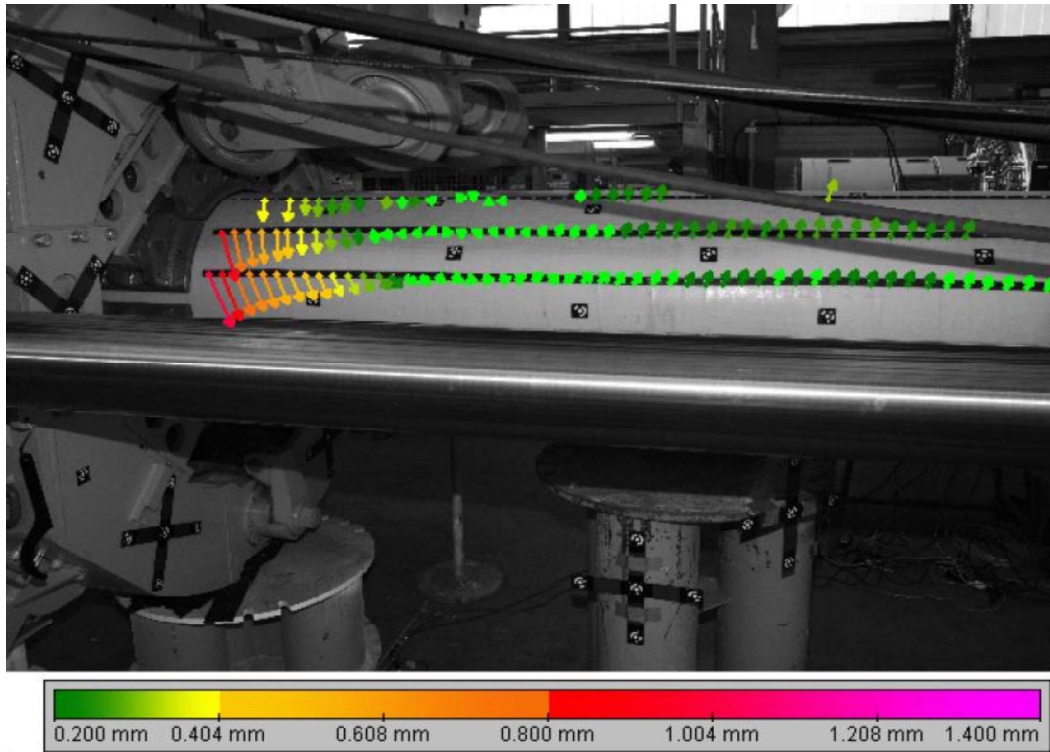


Figure 121: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

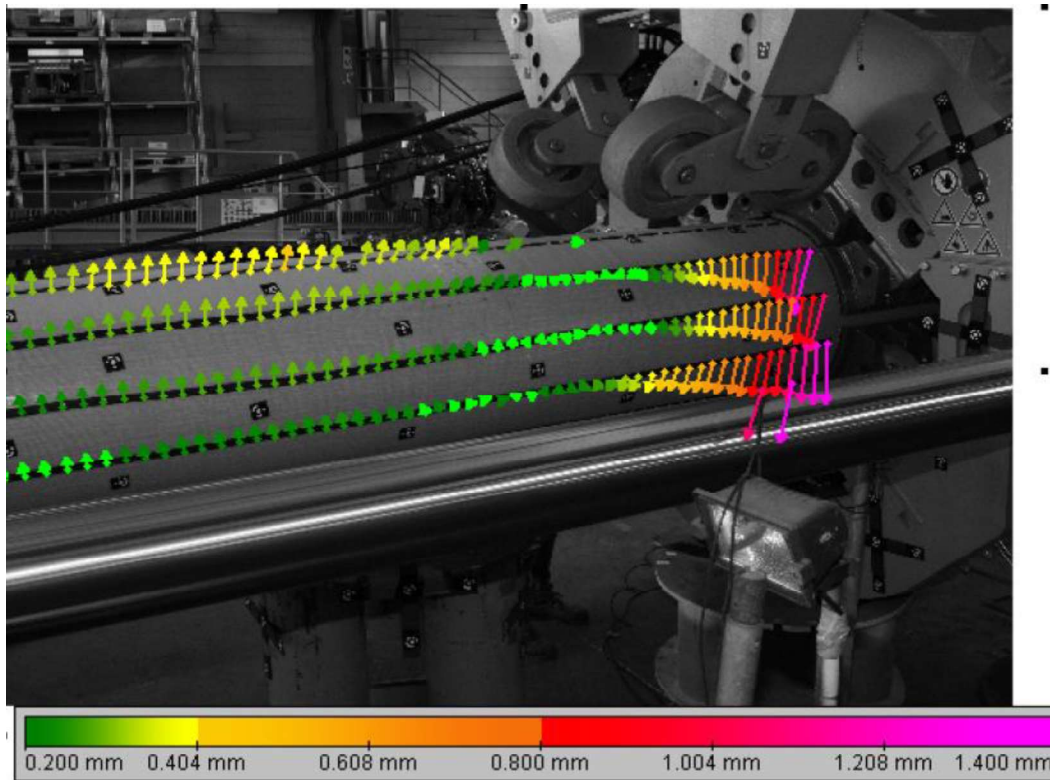


Figure 122: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

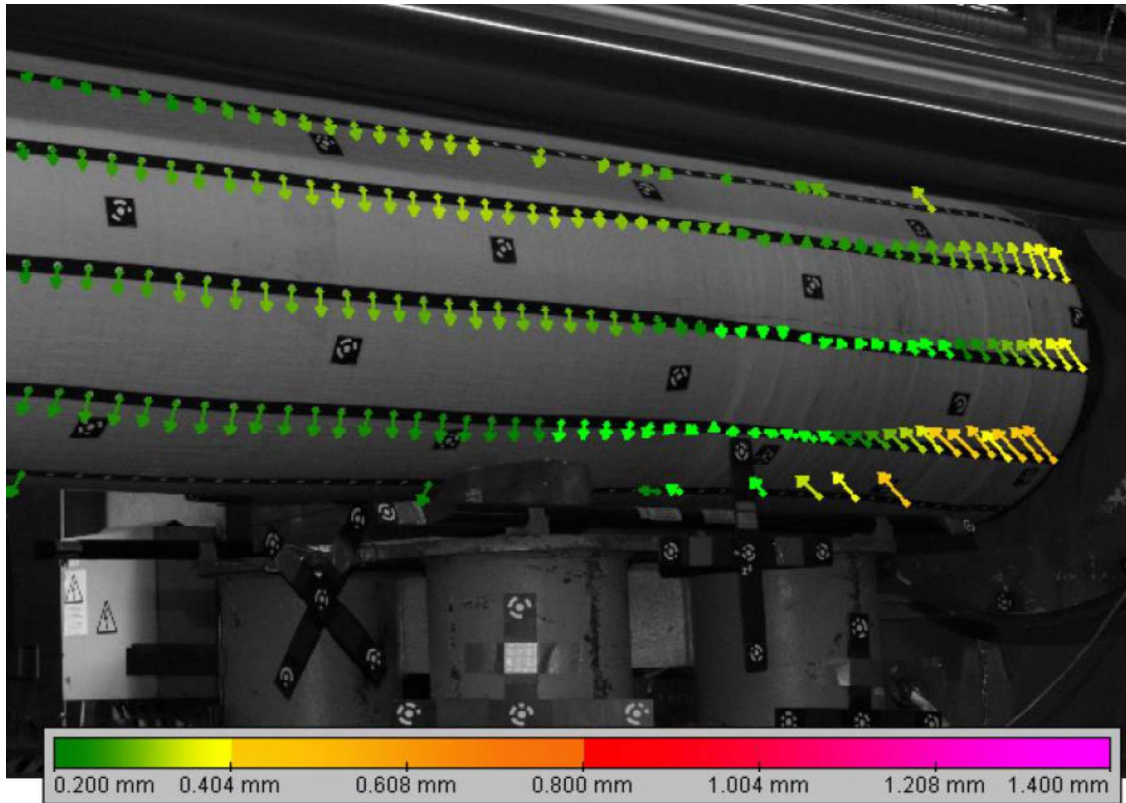


Figure 123: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

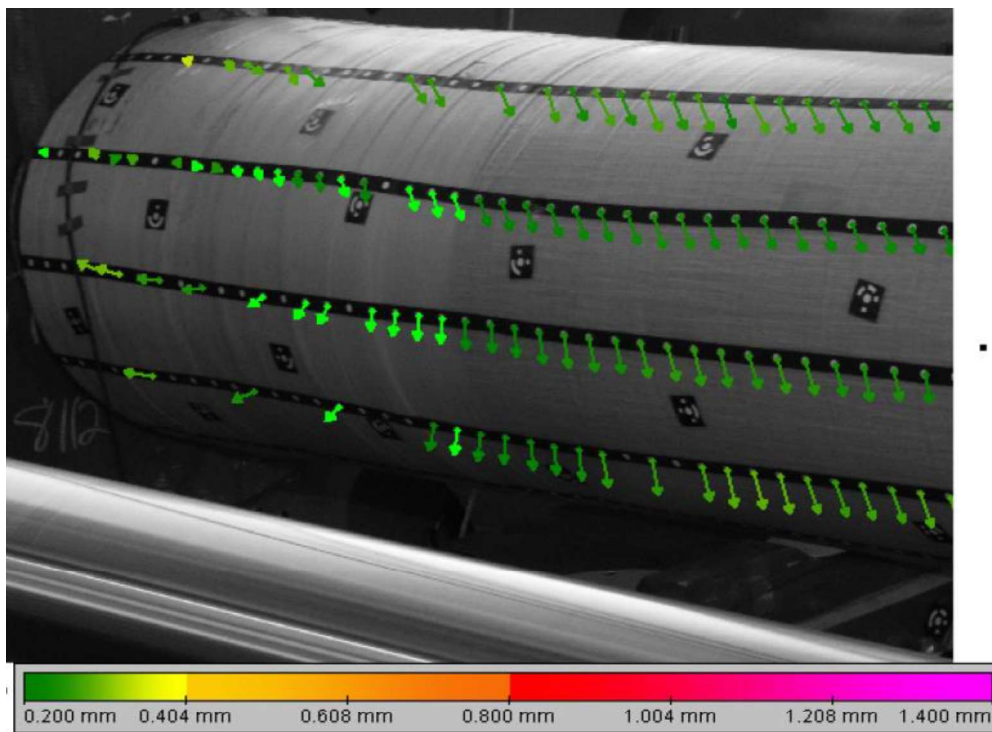


Figure 124: Movement at clamping unit of the measuring points at 50 bar clamping and 20 bar thrust

The following pictures showing the elastic and plastic deformation as well movements:



Figure 125: Marks showing slip

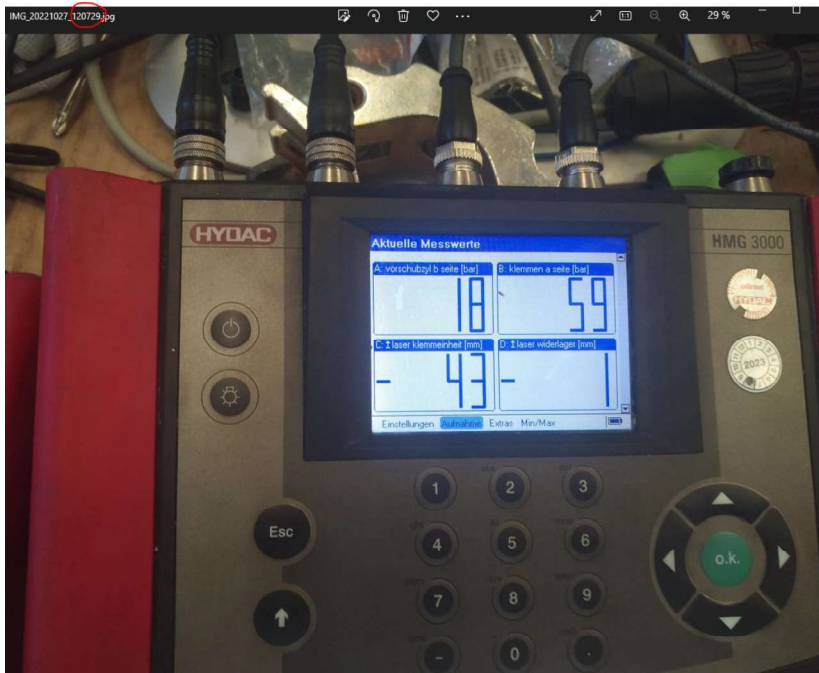


Figure 126: Pressure and time (red mark) at the moment the photo was taken

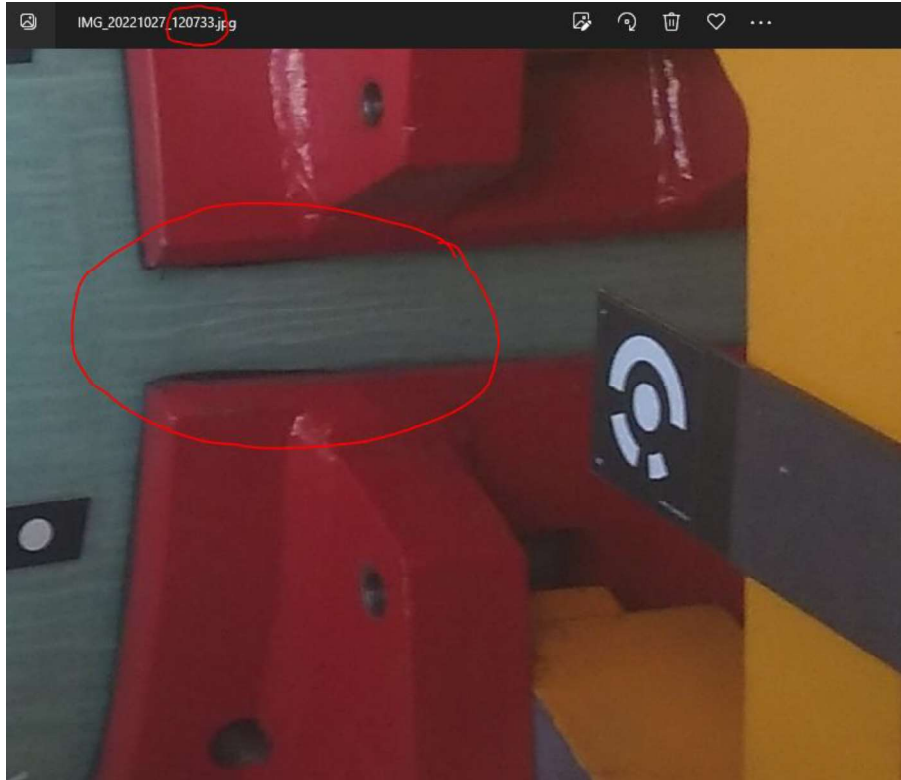


Figure 127: Damage at the moment the photo was taken



Figure 128: Damage of the pipe between the side clamps

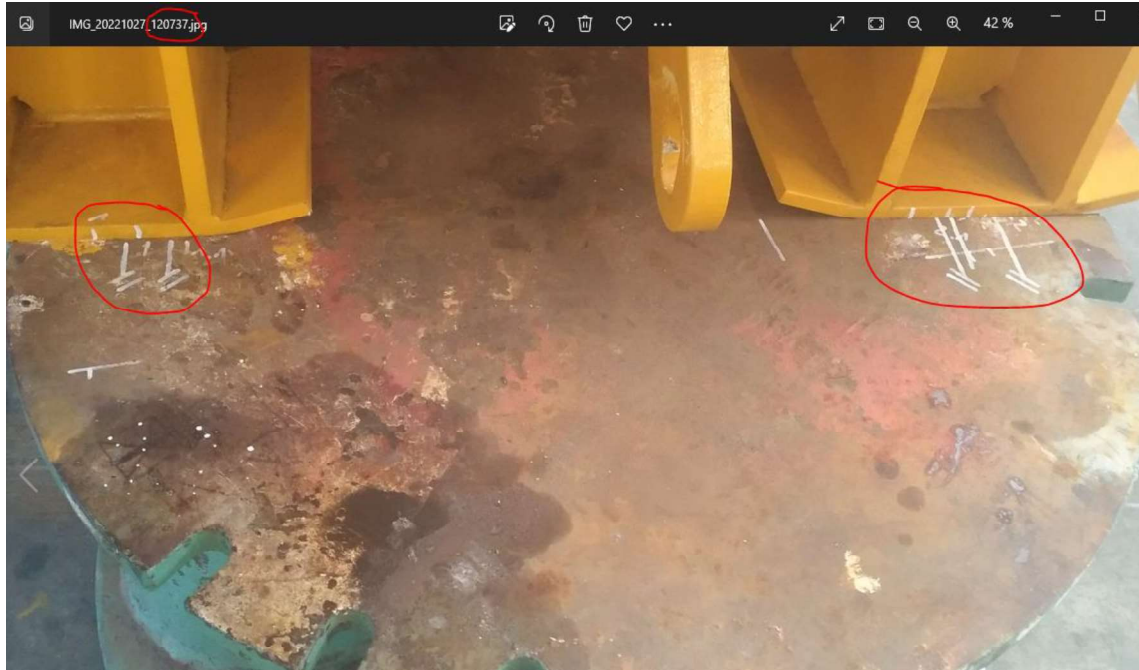


Figure 129: Movement of Clamping unit at the moment the photo was taken

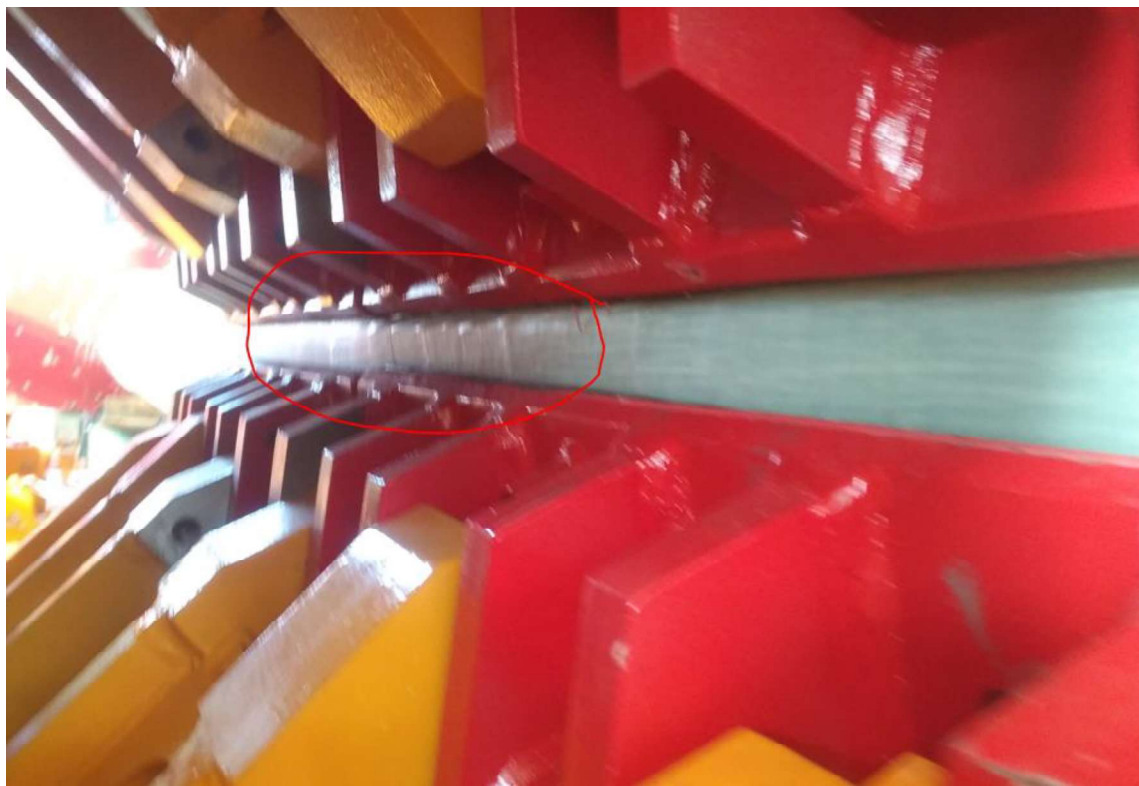


Figure 130: Damage of the pipe between the side clamps



Figure 131: Damage between the side clamps



Figure 132: Damage of the pipe between the lower clamps

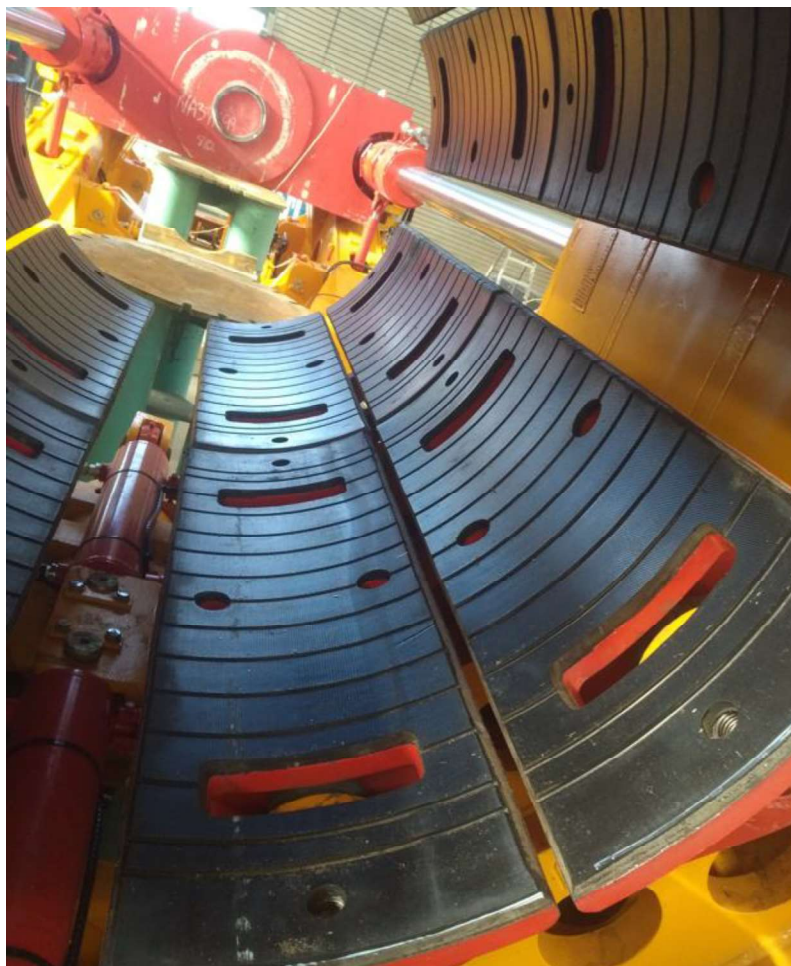


Figure 133: Condition of the clamps after testing



Figure 134: Damaged pipe after disassembly



Figure 135: Damaged pipe after disassembly



Figure 136: Opened pipe after test



Figure 137: Spacer

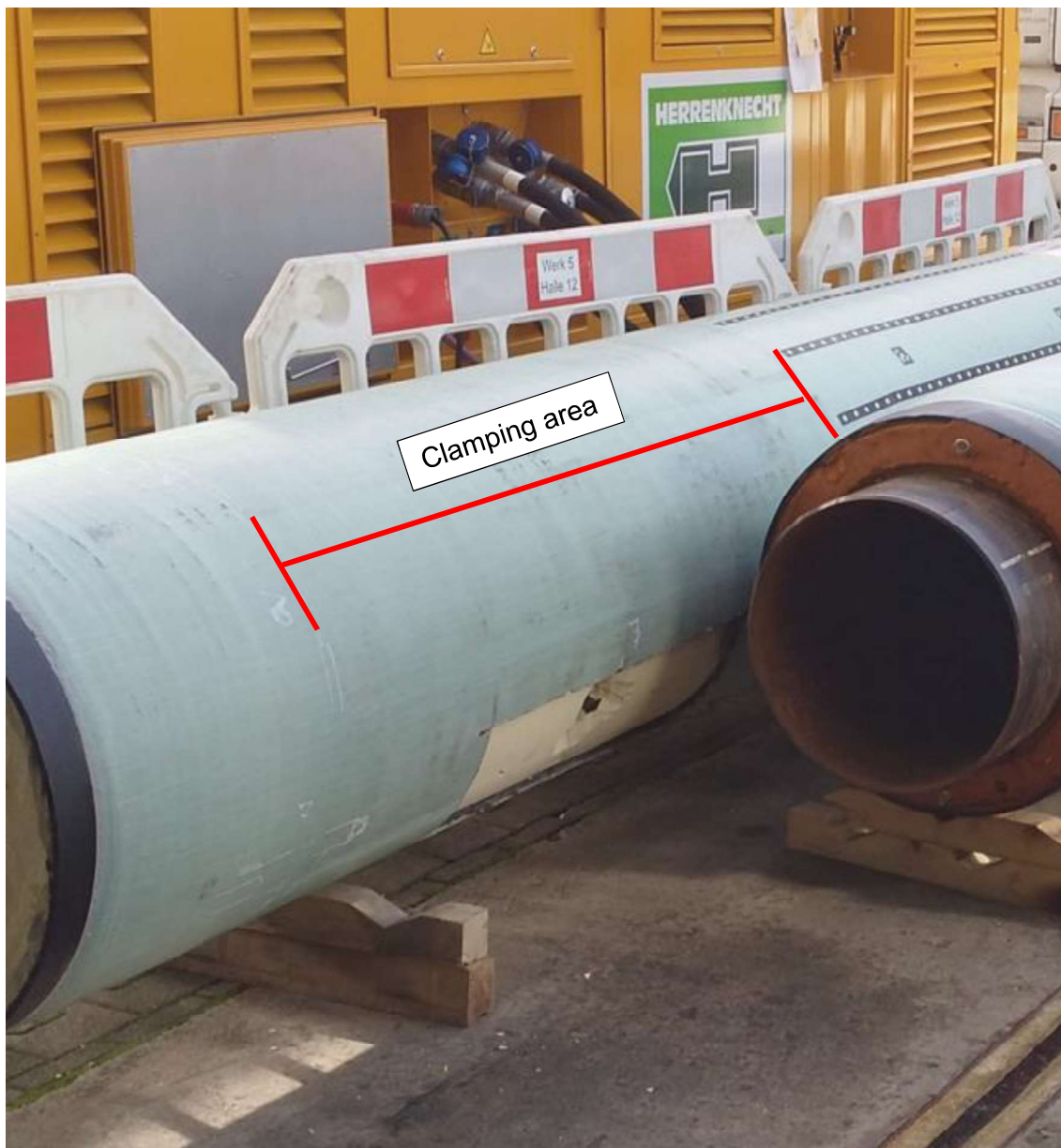


Figure 138: Position of opening

4.8.1 Observations and comments

It unfortunately turned out that the pipe was lowered a bit behind the clamping unit between the reference measurement and the next measurement (2nd measurement), as it was supported there on a wooden element and the clamps would otherwise have bent the pipe.

This most likely results in a clear downward deformation at the clamping unit and upward deformation at the traverse in the report of the 3D measurement. A second measurement could not be carried out because of the sudden and unforeseen destruction.

As shown in Figure 125, slip was visually visible at 50 bar clamping pressure and approx. 25 bar feed. The diagram in Figure 109 also gives the indication of significant slippage. This corresponds to a friction coefficient of approx. 0,12 ($F_R/F_N = 376,5 \text{ kN}/3030,5 \text{ kN} = 0,12$)

Likewise, there was slip at 60 bar clamping pressure and 50 bar thrust. The diagram in Figure 113 also gives the indication of significant slippage. This corresponds to a friction coefficient of approx. 0,21 ($753 \text{ kN}/3636,6 \text{ kN} = 0,21$).

Further observations of the slip were no longer possible due to destruction.

In the previous tests, the pipes without PUR and HDPE broke abruptly.

In the Figure 128 until Figure 132 you can also see that the fracture is visually different from the tests with only GRP pipes.

However, cracking noises were clearly heard before the damage was detected.

After evaluating the pressure data and photos against time (see Figure 126 and Figure 127), it is suspected that the pipe started to break at approx. 60 bar clamping pressure and approx. 20 bar thrust.

As can be seen in the pictures above, the pipe is broken in several places. After removing the pipe, one clearly noticed a larger break (see Figure 134).

Due to the reduced wall thickness of only 5 mm, the achieved pressures remained below expectations.

This pipe was also opened to see if spacers were in the area of the clamps and encouraged a break at this point. This was the case (see Figure 136 until Figure 138).

As can be seen in Figure 133, the clamps are still in good condition after the test.

In conclusion, this test also showed that the entire interaction of the components is very dynamic and that many points must be taken into consideration when evaluating the data.

4.9 Additional test with 9 m HDPE GRP pipe

As the HDPE GRP pipe only had a wall thickness of 5 mm during the axial test, it was jointly decided to repeat this test with a 10 mm GRP layer.

For this purpose, the pipe was cut to approx. 9 m and machined in a rush process and sent back to Herrenknecht in Schwanau.

The set-up was similar to the previous test with 5 mm GRP, but with no cut behind the clamps. Nevertheless, there are some differences. Since 3D measurement was not possible due to time constraints, an attempt was made to measure the axial deformation by means of glued-on bolts in a specific area. Likewise, an attempt was made to measure the axial deformation by means of lasers pointing from a fixed point to two reflection points on the pipe and detecting their movement (see).

To prevent the PUR being pulled from the steel pipe, a special wooden plate was installed between the GRP and the traverse. This transmits the force from the GRP directly into the traverse. This is also how it is on the job site.

For the shear test, the wooden plate should be removed again so that the force is transmitted via the PUR into the traverse.



Figure 139: Wooden plate at traverse



Figure 140: Pipe and wooden plate

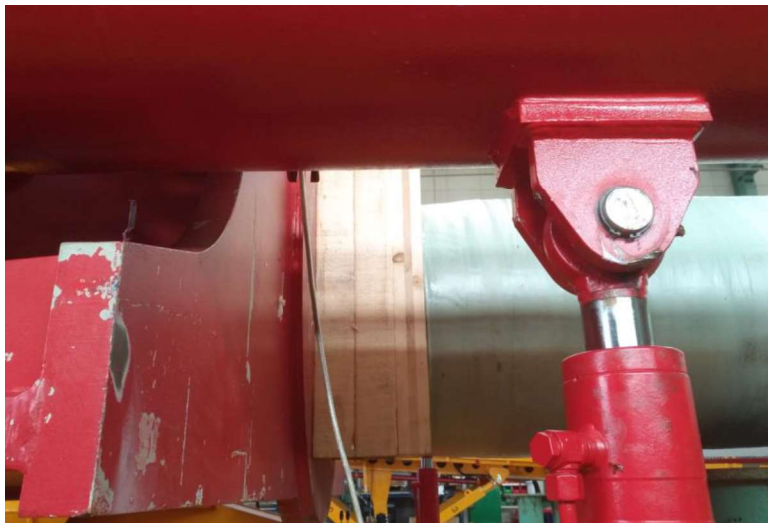


Figure 141: Mounted pipe

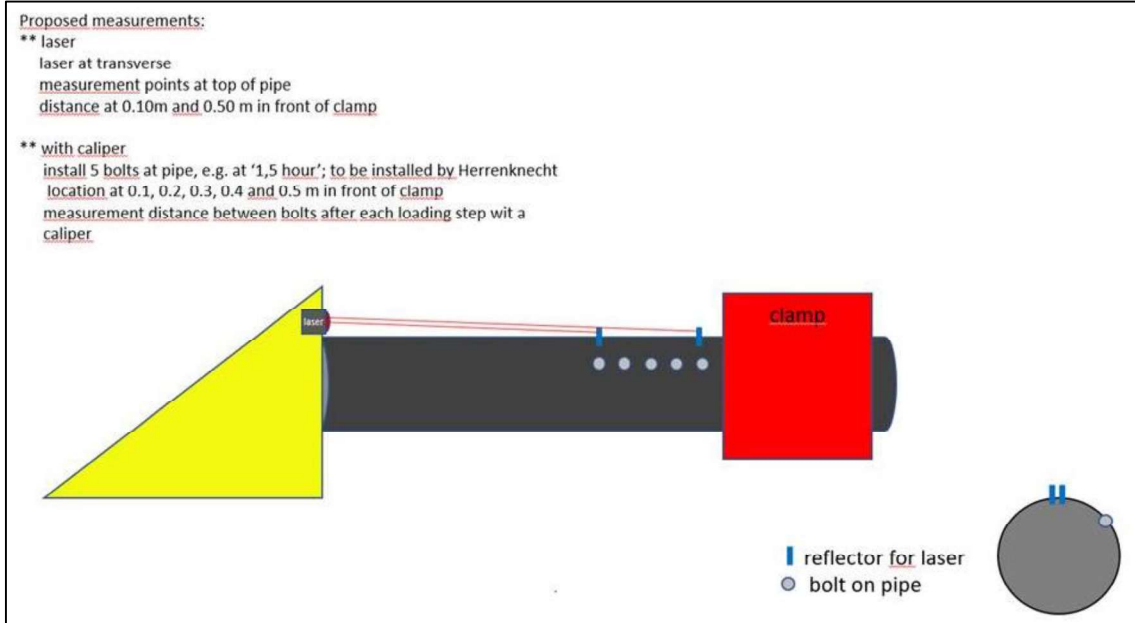


Figure 142: Planned arrangement of the measurement



Figure 143: Two lasers for measuring axial deformation

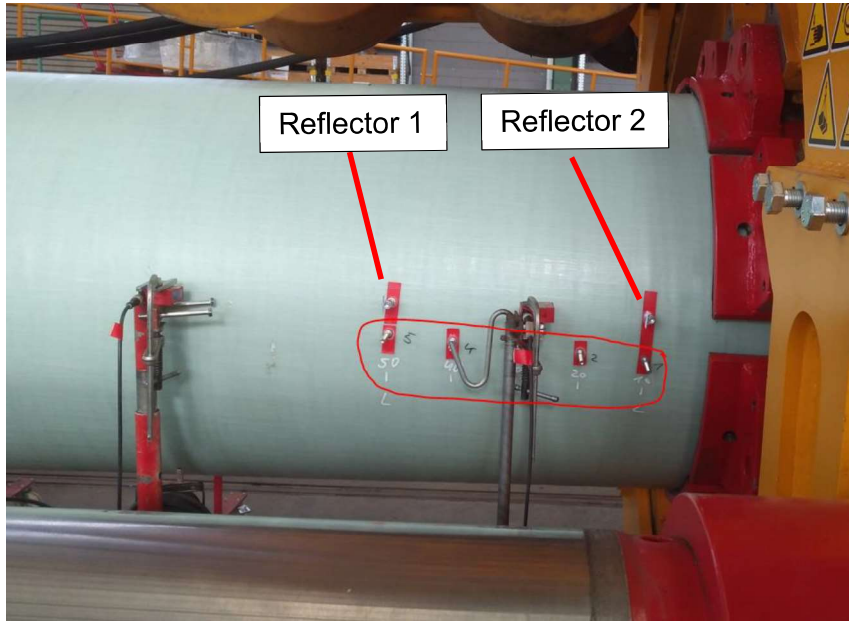


Figure 144: Bolts and laser for measuring axial deformation



Figure 145: Marks to detect slipp

The following showing the data of pressures, distances and manual measuring:

First recordings:

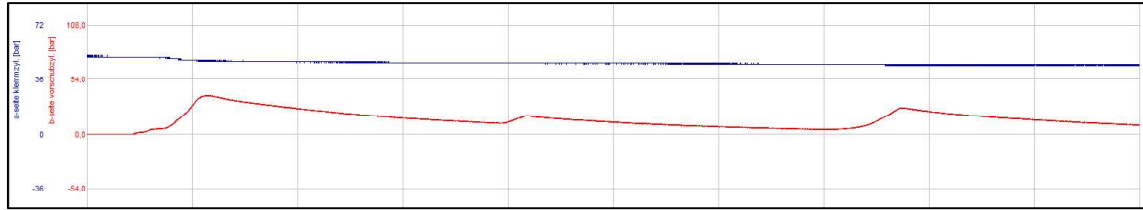


Figure 146: Graph of thrust pressure (up to approx. 38 bar), clamping pressure (of 50 bar) as a function of time

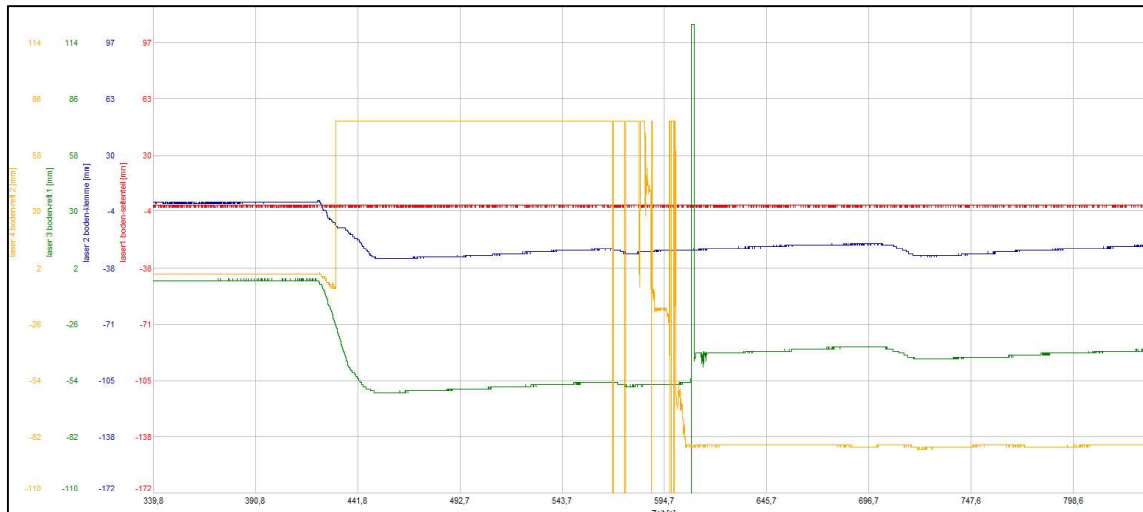


Figure 147: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Table 1: Manual measured distances between the bolts

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	95,2	94,7
2-3	88,3	88,4
3-4	95,3	95,4
4-5	91,9	91,9

Second/third recordings:

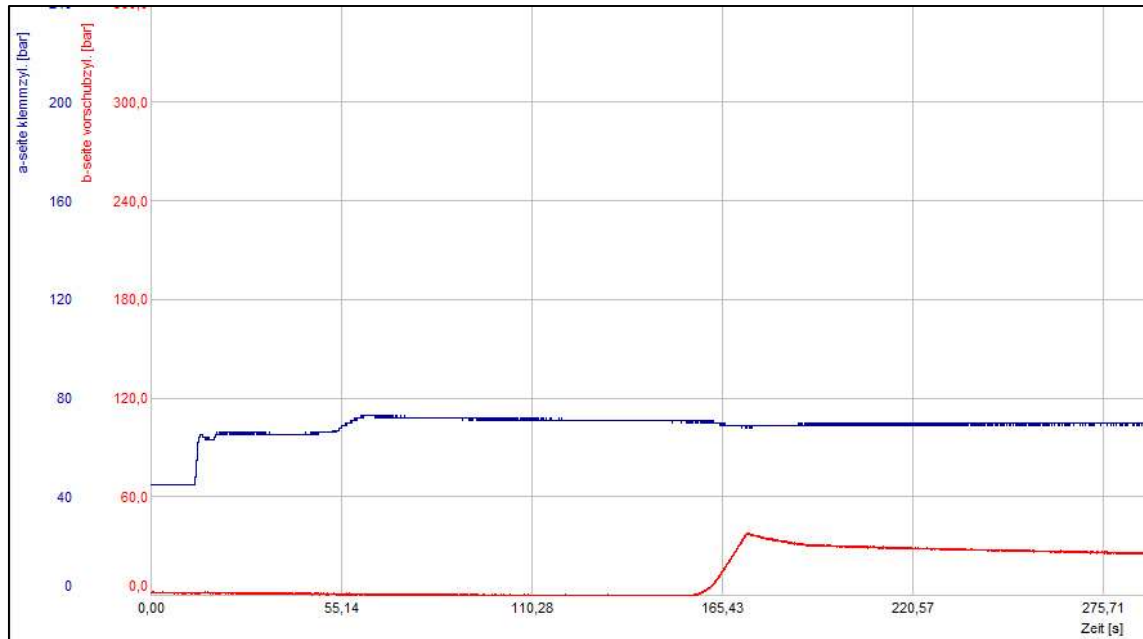


Figure 148: Graph of thrust pressure (up to approx. 37 bar), clamping pressure (of 70 bar) as a function of time

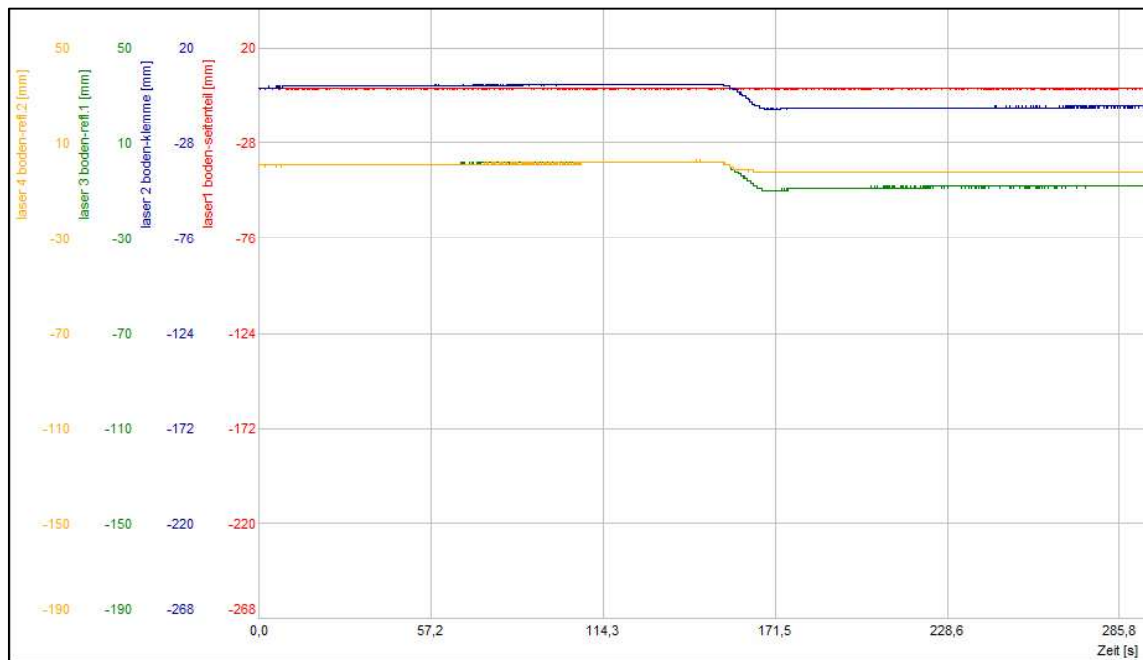


Figure 149: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Table 2: Manual measured distances between the bolts

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	94,9	94,7
2-3	88,2	88,4
3-4	95,4	95,4
4-5	92,0	91,9

Fourth recordings:

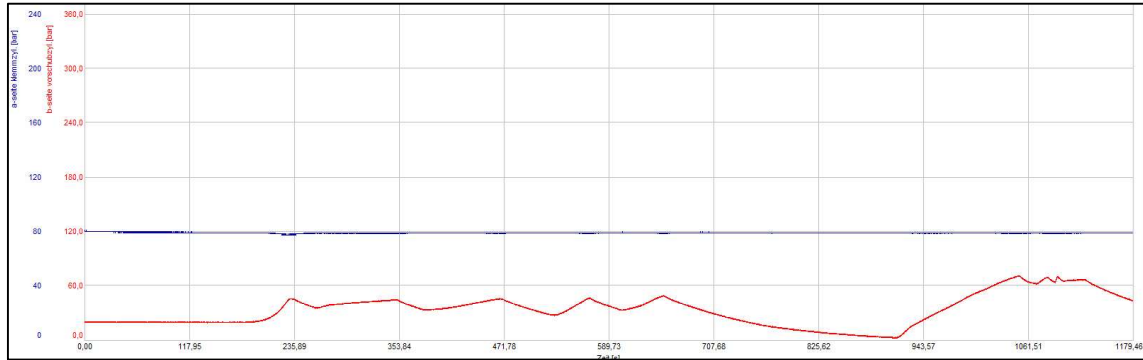


Figure 150: Graph of thrust pressure (up to approx. 70 bar), clamping pressure (of 80 bar) as a function of time



Figure 151: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Table 3 :Manual measured distances between the bolts

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	N/A	94,7
2-3	N/A	88,4
3-4	N/A	95,4
4-5	N/A	91,9

Fifth recordings:

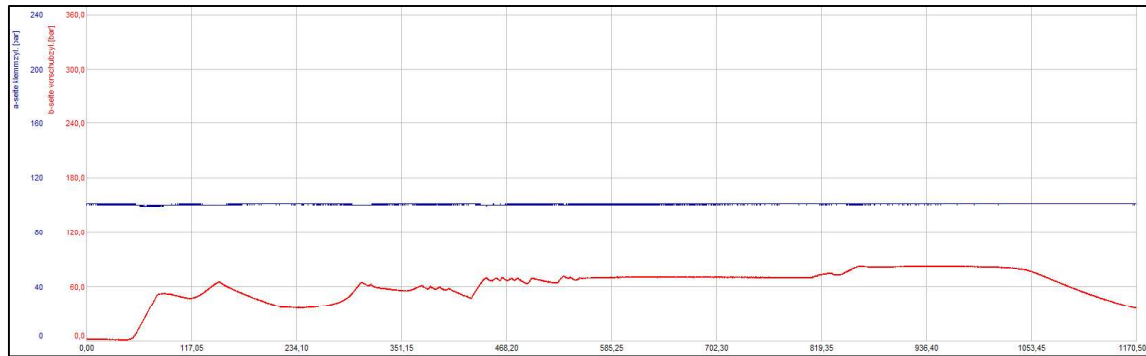


Figure 152: Graph of thrust pressure (up to approx. 82 bar), clamping pressure (of 100 bar) as a function of time

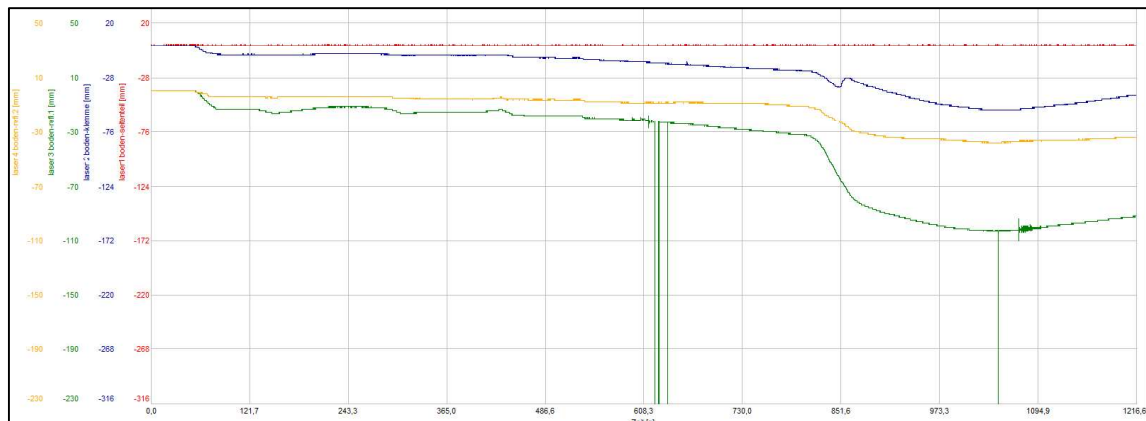


Figure 153: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Table 4: Manual measured distances between the bolts at 100 bar clamping and 70 bar thrust

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	94,3	94,7
2-3	88,7	88,4
3-4	95,4	95,4
4-5	92,0	91,9

Table 5: Manual measured distances between the bolts at 100 bar clamping and approx. 80 bar thrust

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	95,2	94,7
2-3	88,5	88,4
3-4	95,4	95,4
4-5	92,0	91,9

Sixth recordings:

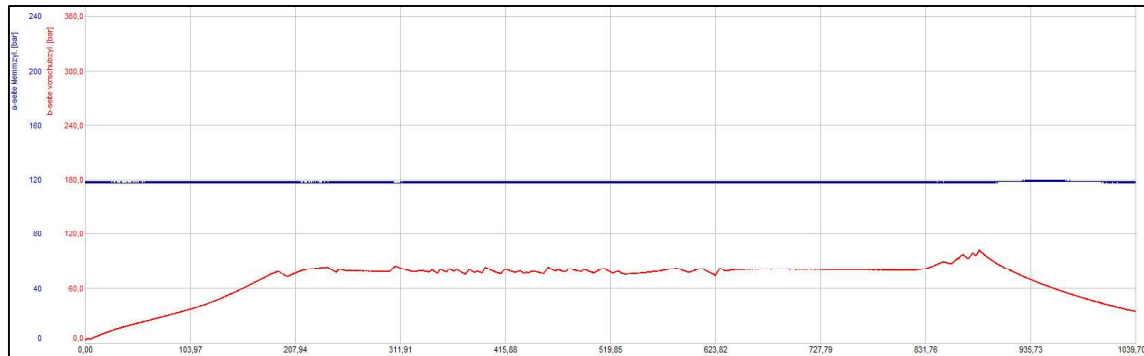


Figure 154: Graph of thrust pressure (up to approx. 100 bar), clamping pressure (of 120 bar) as a function of time

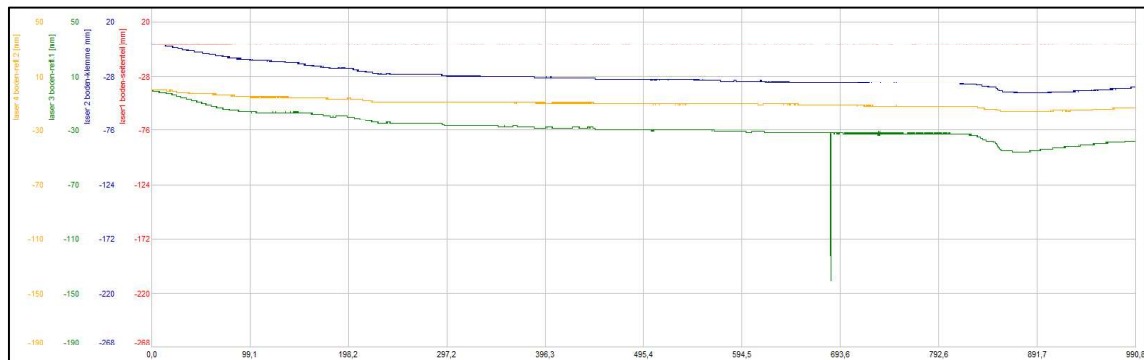


Figure 155: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Table 6: Manual measured distances between the bolts

Bolts	Distance between the bolts [mm]	Reference distance (system pressureless) [mm]
1-2	95,3	94,7
2-3	89,2	88,4
3-4	85,2	95,4
4-5	92,0	91,9

Seventh recordings:

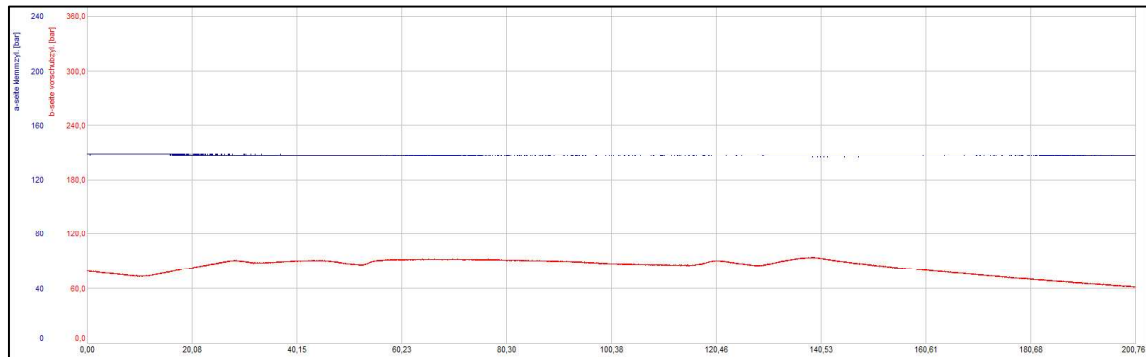


Figure 156: Graph of thrust pressure (up to approx. 94 bar), clamping pressure (of 140 bar) as a function of time

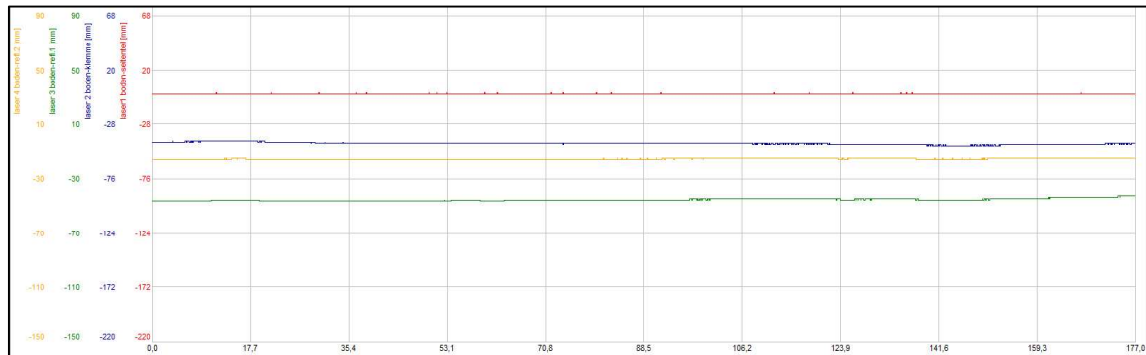


Figure 157: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Eighth recordings:

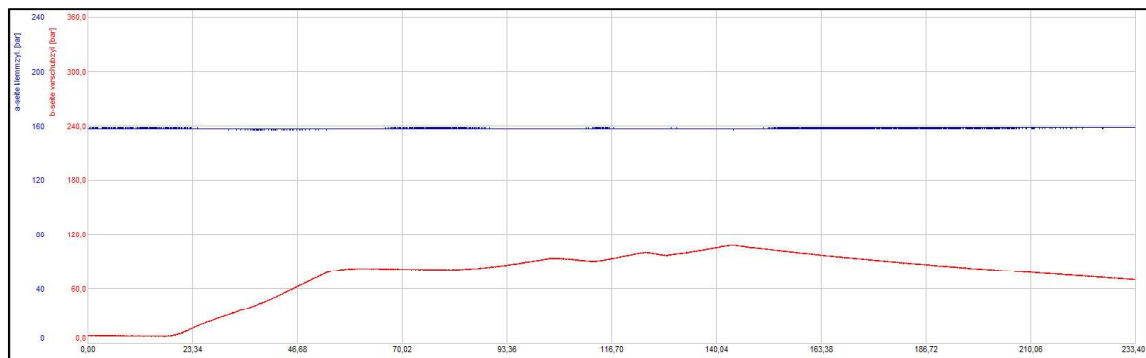


Figure 158: Graph of thrust pressure (up to approx. 108 bar), clamping pressure (of 160 bar) as a function of time

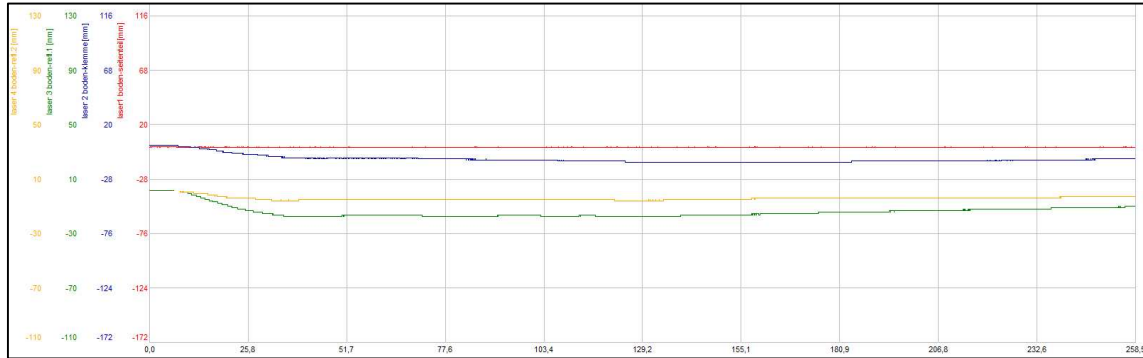


Figure 159: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Ninth recordings:

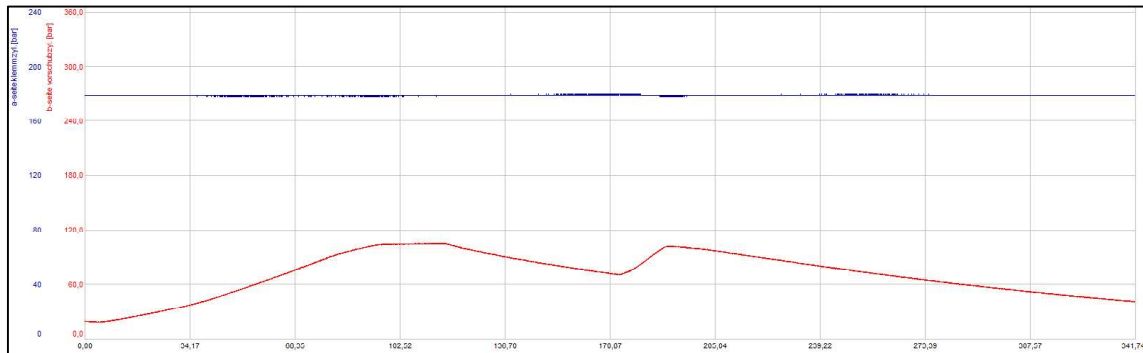


Figure 160: Graph of thrust pressure (up to approx. 108 bar), clamping pressure (of 180 bar) as a function of time

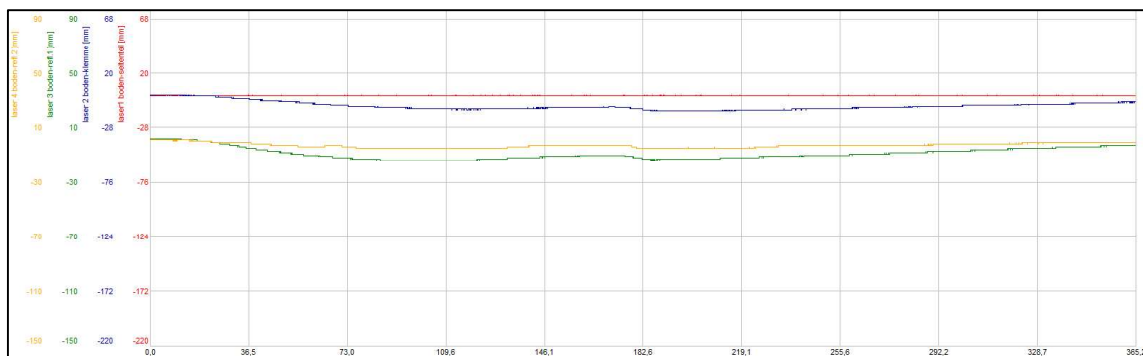


Figure 161: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time

Tenth recordings:

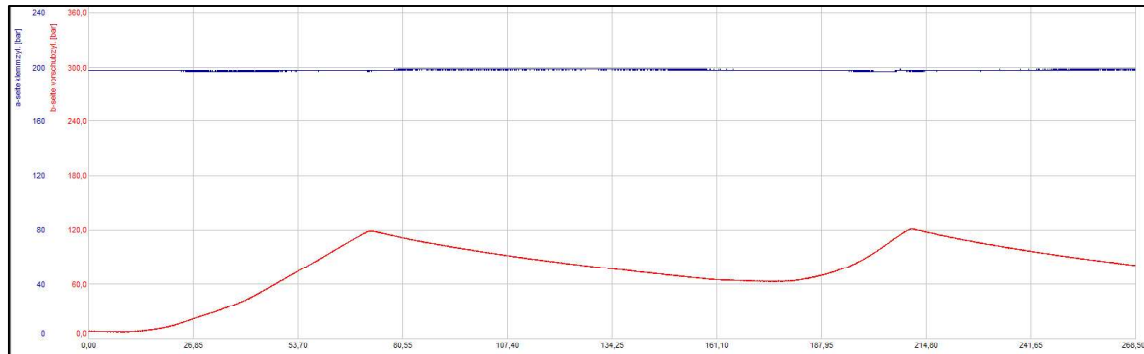


Figure 162: Graph of thrust pressure (up to approx. 108 bar), clamping pressure (of 200 bar) as a function of time

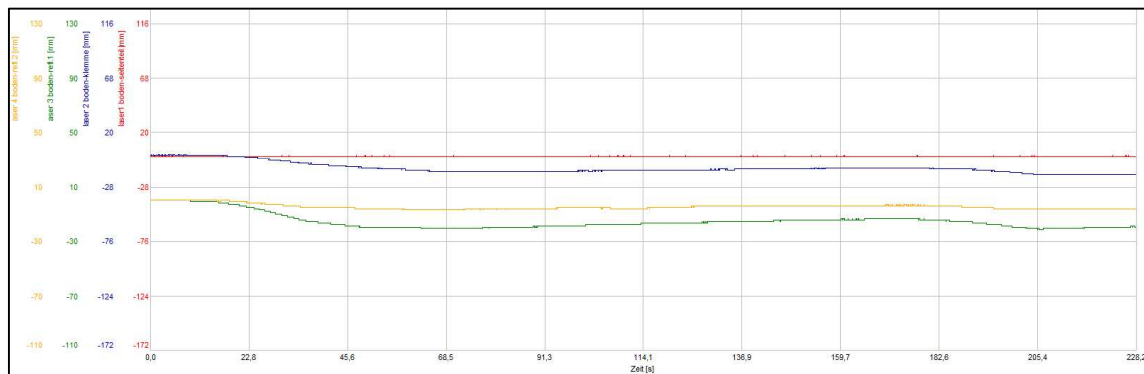


Figure 163: Graph of movement of thrust unit (red), clamping unit (blue), reflector 1 (green) and reflector 2 (yellow) as a function of time



Figure 166: Damaged steel pipe



Figure 167: Compressed wooden plate

4.9.1 Shear test

After it was determined that a further increase in pressure would not lead to a higher thrust force, it was decided to carry out the shear test.

For this, the wooden plate between the traverse was to be removed. It turned out that the steel pipe was already damaged. Therefore, it was decided to turn the entire pipe in order to achieve sufficient force transmission from the intact steel pipe to the traverse.



Figure 168: Turned pipe for shear test

The following showing the data of pressures:

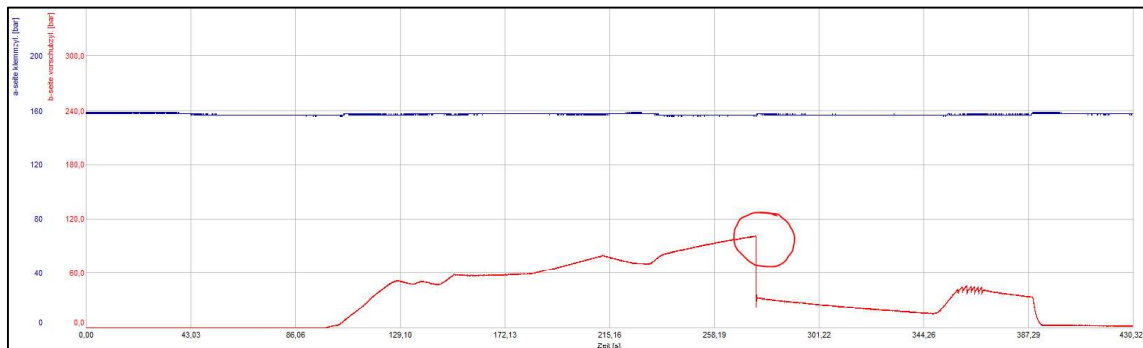


Figure 169: Graph of thrust pressure (up to approx. 101 bar), clamping pressure (of 157 bar) as a function of time

Zeit [s]	b-seite vorschubzyl. [bar]	a-seite klemmzyl. [bar]	
274,94	100,9	157	
274,96	100,8	157	
274,98	100,9	157	
275,00	100,8	157	
275,02	100,9	157	
275,04	100,9	157	
275,06	101,3	157	
275,08	101,1	157	
275,10	100,8	157	
275,12	101,1	157	
275,14	101,1	157	
275,16	101,1	157	
275,18	101,3	157	
275,20	101,4	157	
275,22	101,1	157	
275,24	101,1	157	
275,26	100,9	157	
275,28	100,8	157	
275,30	101,1	157	
275,32	101,4	157	
275,34	100,9	157	
275,36	77,5	157	
275,38	34,5	156	
275,40	30,1	156	
275,42	22,7	156	
275,44	28,8	156	
275,46	24,9	156	
275,48	40,4	156	
275,50	40,2	156	
275,52	40,0	156	
275,54	26,8	156	
275,56	25,9	156	
275,58	29,5	156	
275,60	33,3	157	
275,62	36,8	157	

Figure 170: Table of maximum pressure (101,4 bar)



Figure 171: Movement of HDPE PUR GRP



Figure 172: Movement of HDPE PUR GRP

4.9.2 Destructive test

To determine when the pipe fails in the clamping area, the clamping pressure was increased until the pipe was destroyed.

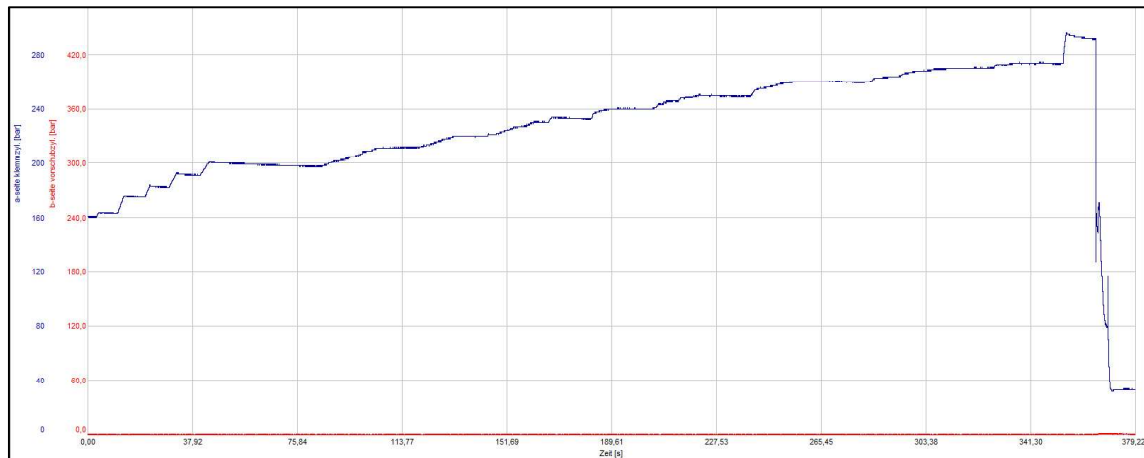


Figure 173: Graph of thrust pressure (0 bar), clamping pressure (up to 157 bar) as a function of time

Zeit [s]	b-seite vorschubzyl. [bar]	a-seite klemmzyl. [bar]
364,52	0,3	291
364,54	0,1	291
364,56	0,0	291
364,58	0,5	291
364,60	0,5	291
364,62	0,1	291
364,64	0,0	292
364,66	0,3	291
364,68	0,3	291
364,70	0,3	291
364,72	0,0	291
364,74	0,0	291
364,76	0,3	291
364,78	0,3	291
364,80	0,1	291
364,82	0,1	291
364,84	0,1	292
364,86	0,3	291
364,88	0,1	291
364,90	0,1	291
364,92	0,5	292
364,94	0,3	291
364,96	0,3	291
364,98	0,1	292
365,00	0,5	291
365,02	0,5	234
365,04	0,3	127
365,06	0,1	169
365,08	0,3	163
365,10	0,5	160
365,12	0,5	163
365,14	0,0	159
365,16	0,5	161
365,18	0,3	159
365,20	0,3	160
365,22	0,3	159
365,24	0,5	158
365,26	0,3	158
365,28	0,5	157
365,30	0,6	157
365,32	0,5	155
365,34	0,5	155
365,36	0,5	154

Figure 174: Table of maximum pressure (292 bar)



Figure 175: Destroyed pipe



Figure 176: Destroyed pipe



Figure 177: Destroyed pipe



Figure 178: Destroyed pipe

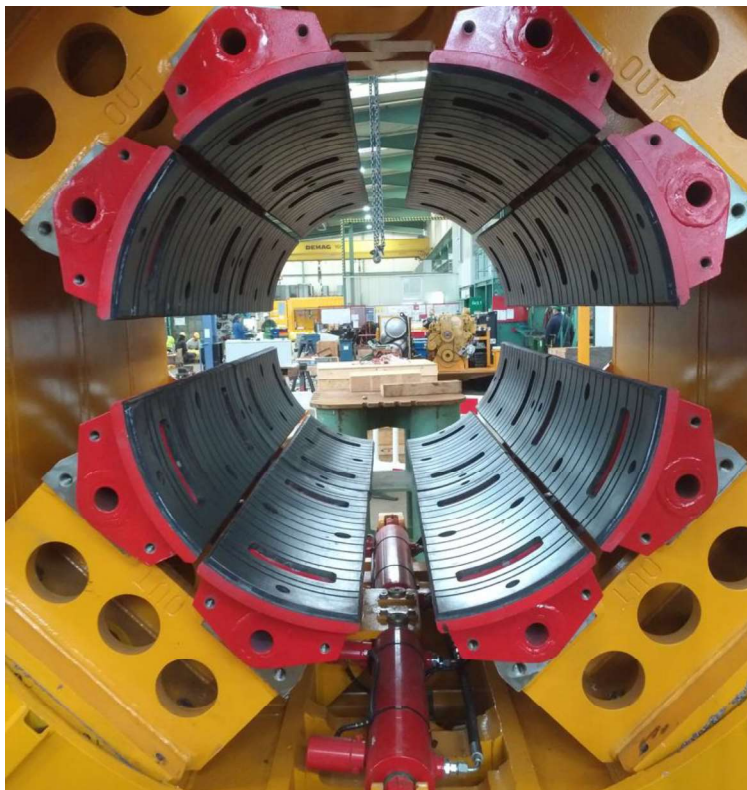


Figure 179: Condition of clamps after all tests

4.9.3 Measurement of the actual wall thickness

In order to determine the actual layer thickness of the GRP, the pipe was drilled four times in the clamping area after removal and the layer thickness was measured by means of callipers.

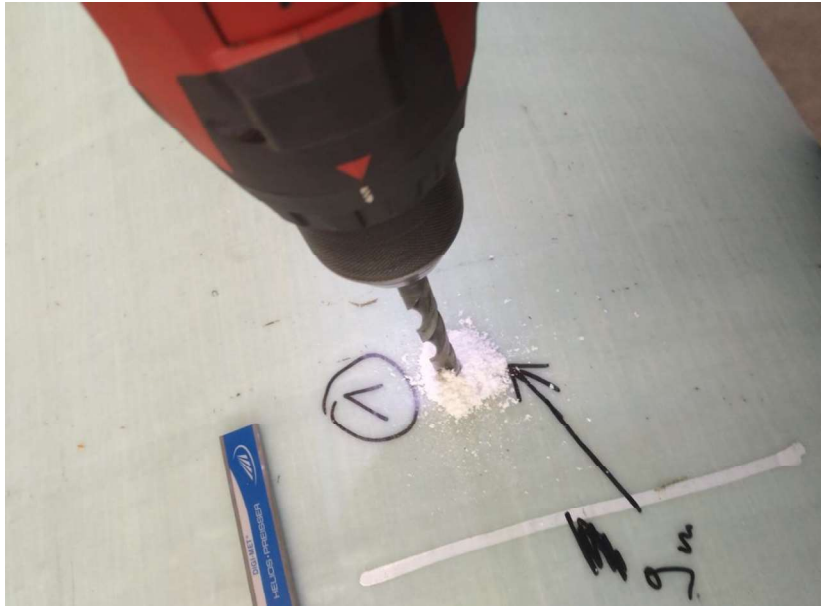


Figure 180: Drilling the GRP layer



Figure 181: Drill holes of the first clamping (axial test)

Table 7: Layer thickness first clamping

Number of hole	GRP Layer thickness [mm]
1	11,47
2	12,08
3	11,9
4	10,7

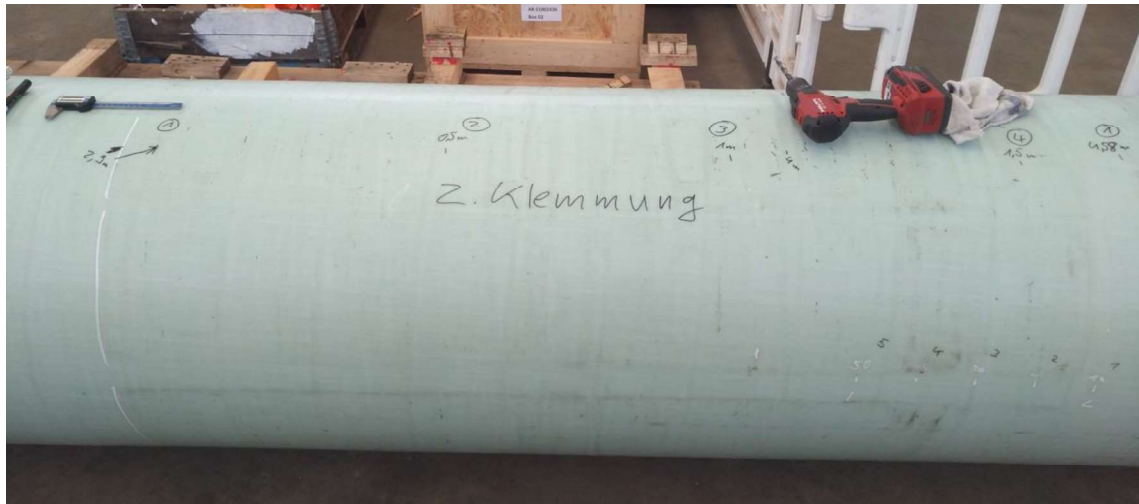


Figure 182: Drill holes of the second clamping (shear and destructive test)

Table 8: Layer thickness second clamping

Number of hole	GRP Layer thickness [mm]
1	12,15
2	11,45
3	11,50
4	11,95

4.9.4 Observations and comments

It is to be mentioned that the length between the clamps and the traverse is less than in the previous test. This results from the fact that this pipe is already radially damaged by the previous test and the clamps had to be placed further in front.

Since the recording of the pressures and laser distances had to be recorded on different devices, the times do not match exactly.

For measurements 1 to 12, the clamping pressure was set and then the pressure of the thrust cylinders was increased until slip was detected.

Since the dynamics of the system meant that slip could not be reliably measured by laser, the slip was determined by marking and observation and recorded in writing.

As already known, above a certain clamping pressure, a higher thrust force is no longer achieved and the pipe just slips through.

This seems to be the case from approx. 120 bar clamping pressure (see write-up).

For safety reasons (safety distance), no manual measurements could be carried out from measurement 7 onwards.

Shear test

In Figure 169 can be seen that at about 101 bar thrust and about 160 bar clamping pressure there was a strong pressure drop. A loud noise was also heard. It was suspected that the spacers were broken.

It could also be seen in Figure 169 that from approx. 40 bar feed, it was no longer possible to increase the pressure. Observations showed that the HDPE PUR GRP was pulled further and further down from the steel pipe in a kind of slip stick.

In can be seen that about 40 mm was pulled down during the shear test.

Destructive test

As seen in, the pipe failed at a pressure of bar. The break was again between the lower clamps

Layer thickness GRP

Since the surface of the GRP layer is not flat, the values vary in part. Maybe there is also a certain inaccuracy due to the measurement procedure.

5 Overall summary (keywords)

- Pressure cannot be adjusted correctly due to the hydraulic system of the "standard" system.
- Partially strong point loads due to deformation of the pipes with insufficient wall thickness or lack of support by HDPE, PUR layer
- Very dynamic movements (due to steel construction, hydraulics, wooden plate). Therefore no reliable distance measurement (slip detection, deformations) by laser possible.
- Photogrammetry can only be used to a certain extent, as this method is dependent on static conditions
- Deformations with pure HDPE PUR pipe significantly higher than with GRP layer
- Radial deformation (bending) is negligible.
- Deviations of the outer diameters due to GRP layer. The tubes with GRP layer do not correspond to the 28" dimension and therefore do not fit exactly into the 28" clamps.
- Clamping force increase does not result in higher thrust from a certain point onwards
- Spacers are potential weak points of the pipes
- Detachment of the GRP or HDPE layer from PUR could not be detected
- When a certain force is reached, PUR is pushed off the steel pipe
- Only the relevant pressures are shown in all graphs. No B-side of the clamping cylinders, no A-side of the thrust cylinders
- Conversion of pressure into force is a theory. Due to various influencing factors, it can be assumed that the actual forces applied differ.

6 Appendix

6.1 Measuring equipment

Laser ODSL 8/C66-200-S12

Leuze electronic

ODSL 8

Specifications

Optical data

Measurement range ¹⁾	20 ... 200mm
Resolution ²⁾	0,1 ... 0,2mm
Light source	laser
Laser class	2 acc. to IEC 60825-1:2007
Wavelength	650nm (visible red light)
Max. output power	<1.2 mW
Pulse duration	4ms
Light spot	Ø 1mm at 200mm

Error limits (relative to measurement distance)

Absolute measurement accuracy ¹⁾	± 2% up to 200mm
Repeatability ³⁾	± 1% up to 200mm
B/W detection thresh. (6 ... 90% rem.)	≤ 1,5%
Temperature drift	≤ 0,2%/°C

Timing

Measurement time	2 ... 7ms
Response time	≤ 20ms
Delay before start-up	≤ 300ms

Electrical data

Operating voltage U_B	18 ... 30VDC (incl. residual ripple)
Residual ripple	≤ 15% of U_B
Open-circuit current	≤ 50mA
Switching output/function ⁴⁾	2 push-pull switching outputs pin 2: Q2, PNP light switching, NPN dark switching pin 4: Q1, PNP light switching, NPN dark switching
Signal voltage high/low	≥ ($U_B - 2V$) / ≤ 2V
Analog output	voltage 1 ... 10V, $R_L \geq 2k\Omega$ / current 4 ... 20mA, $R_L < 500\Omega$

Indicators

Green LED	continuous light	ready
	flashing (no teach)	fault, teach values were not applied
	off	no voltage
Yellow LED	continuous light	object within teach-in measurement distance (output Q1 ⁵⁾)
	flashing (no teach)	teach values were not applied
	off	object outside teach-in measurement distance (output Q1 ⁶⁾)

Mechanical data

Housing	metal
Optics cover	glass
Weight	70g
Connection type	M 12 connector, 5-pin, turning

Environmental data

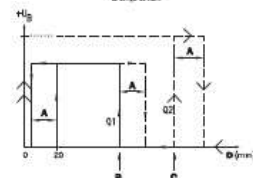
Ambient temp. (operation/storage)	-40°C ... +50°C / -40°C ... +70°C
Protective circuit ⁶⁾	2, 3
VDE safety class ⁷⁾	II, all-insulated
Protection class ⁸⁾	IP 67, IP 69K ⁹⁾
Environmentally tested acc. to	ECOLAB
Standards applied	IEC 60947-5-2
Certifications	UL 508, CSA C22.2 No.14

- 1) Luminosity coefficient 6% ... 90%, at 20°C, measurement object ≥ 20x20mm²
- 2) Minimum and maximum value depend on measurement distance and configuration of the analog output
- 3) Same object, identical environmental conditions, measurement object ≥ 20x20mm²
- 4) The push-pull switching outputs must not be connected in parallel
- 5) No display for output Q2
- 6) 2=polarity reversal protection, 3=short-circuit protection for all outputs
- 7) Rating voltage 250VAC
- 8) In stop position of the turning connector (turning connector locked)
- 9) IP 69K test acc. to DIN 40050 part 9 simulated, high pressure cleaning conditions without the use of additives, acids and bases are not part of the test

Tables

Diagrams

Characteristic curve of switching outputs:



- A Hysteresis
- B Switching point Q1 (teach point)
- C Switching point Q2 (teach point)
- D Measurement distance

Remarks

Operate in accordance with the manual!
 This product is not a safety sensor and is not intended as personnel protection.
 The product may only be put into operation by competent persons.



HDA 4748-H-0600-000 Electronic Pressure Transmitter

Technical data:

Input data												
Measuring ranges	bar	6	16	40	60	100	250	400	600	1000	1600	2000
Overload pressures	bar	15	32	80	120	200	500	800	1000	1600	2400	3000
Burst pressure	bar	100	200	200	300	500	1000	2000	2000	3000	3000	4000
Mechanical connection	G1/4 A ISO 1179-2 G1/2 B DIN EN 837											
Tightening torque, recommended	20 Nm (G1/4); 45 Nm (G1/2)											
Parts in contact with fluid	Mech. connection: Stainless steel Seal: FKM											
Output data												
Output signal, permitted load resistance	4 .. 20 mA, 2-conductor $R_{L,max} = (U_B - 8 V) / 20 \text{ mA}$ [k Ω] 0 .. 10 V, 3-conductor $R_{L,min} = 2 \text{ k}\Omega$											
Accuracy acc. to DIN 16086, terminal based	$\leq \pm 0.25 \%$ FS typ. $\leq \pm 0.5 \%$ FS max.											
Accuracy, B.F.S.L.	$\leq \pm 0.15 \%$ FS typ. $\leq \pm 0.25 \%$ FS max.											
Temperature compensation	$\leq \pm 0.008 \%$ FS / °C typ.											
Zero point	$\leq \pm 0.015 \%$ FS / °C max.											
Temperature compensation	$\leq \pm 0.008 \%$ FS / °C typ.											
Span	$\leq \pm 0.015 \%$ FS / °C max.											
Non-linearity acc. to DIN 16086, terminal based	$\leq \pm 0.3 \%$ FS max.											
Hysteresis	$\leq \pm 0.1 \%$ FS max.											
Repeatability	$\leq \pm 0.05 \%$ FS											
Rise time	$\leq 1 \text{ ms}$											
Long-term drift	$\leq \pm 0.1 \%$ FS typ. / year											
Environmental conditions												
Compensated temperature range	-25 .. +85 °C											
Operating temperature range ¹⁾	-40 .. +85 °C / -25 .. +85 °C											
Storage temperature range	-40 .. +100 °C											
Medium temperature range ¹⁾	-40 .. +100 °C / -25 .. +100 °C											
CE mark	EN 61000-6-1 / 2 / 3 / 4											
RoHS mark ²⁾	Certificate no.: E318391											
Vibration resistance acc. to DIN EN 60068-2-6 at 10 .. 500 Hz	$\leq 20 \text{ g}$											
Shock resistance acc. to DIN EN 60068-2-29	$\leq 100 \text{ g} / 6 \text{ ms}$											
Protection class acc. to DIN EN 60529 ³⁾	IP 65 (Binder 714 M18) IP 67 - M12x1 male connector - Male connector EN175301-803											
Other data												
Supply voltage	8 .. 30 V DC 2-conductor 12 .. 30 V DC 3-conductor											
when applied acc. to UL specifications	- limited energy - acc. to 9.3 UL 61010; Class 2; UL 1310/1585; LPS UL 60950											
Residual ripple of supply voltage	$\leq 5 \%$											
Current consumption	$\leq 25 \text{ mA}$											
Life expectancy ⁴⁾	$> 10 \text{ million cycles, } 0 \dots 100 \%$ FS											
Weight	$\sim 150 \text{ g}$											

Note: Reverse polarity protection of the supply voltage, excess voltage, override and short circuit protection are provided.

FS (Full Scale) = relative to complete measuring range

B.F.S.L. = Best Fit Straight Line

¹⁾ -25 °C with FKM seal, -40 °C on request

²⁾ Environmental conditions acc. to 1.4.2 UL 61010-1; C22.2 No 61010-1

³⁾ With mounted mating connector in corresponding protection class

⁴⁾ Measuring ranges $\geq 1000 \text{ bar}$: $> 1 \text{ million cycles}$ (0 .. 100 % FS)

EN 18.306.7/02.18

Recording device Hydac HMG3000



6.2 Data

The diagrams shown are extracts from the recordings. Due to the overview, not all values can be shown in detail. The complete diagrams and tables are available digitally. They can be analysed with suitable software. Likewise, the data of the 3D survey as well as further photos and videos are available digitally. The pressures of the B-side clamping unit and A-side feed cylinder were also recorded. However, these are not included in the diagrams in this document for ease of presentation.

In addition to the digital data, important information from the tests was also recorded in writing:

19.10.2022
 Soll druck ↑ Start: 11:20 Ende: 12:00
 Radialer Test mit 3 m Röhren aus GRE (Rohr 2) $\varnothing R_{Dr} 3$ $t = 10$ mm

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	~35	17,5	Zyl. fallen erst ab 20 bar \Rightarrow bei 35 bar (Zyl. - Fallen)
2	~40 (39 bar \Rightarrow 10% Füll.)	"	3min Geräusche hörbar dann löst sich von Folie
3	~50	"	3min, Druck fällt auf ca
4	~60	"	" , Geräusche hörbar
5	~70	"	" , "
6	~80	"	" , "
7	100	"	Rohr spritzt
8			
9			
10			

Klemmen nicht an

Genauer Druck einzustellen ist kaum möglich, aufgrund des Hydrauliksystems
 \Rightarrow Druck wird eingestellt nicht automatisch und fällt dann wie in \Rightarrow Rohr gibt nach

Soll 19.10.2022
 Radialer Test mit 3 m Röhren aus GRE (Rohr 1) \Rightarrow Rohr $t = 8 \text{ mm}$
 Start: 13:00 Ende 14:30

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	~35	18,7	Klemmen liegen nicht an Zwischen, Geräusche zu hören
2	~40	"	Zwischen, Klemmen liegen an, Geräusche zu hören
3	~50	"	" " " "
4	~60	"	" " " "
5	~70	"	" " " "
6	~80	"	Rohr zerstört
7			
8			
9			
10			

\Rightarrow Druck auf Sollwert eingestellt und gehalten
 \Rightarrow Druck stellt sich dann ein

20.10.2022
 Radialer Test mit 16 m Röhren mit HDPE Mantel
 Start: 10:10 Uhr Ende: 11:45 Uhr

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	35/37	17,1	Klemmen liegen an
2	45	"	keine Auffälligkeiten
3	60	"	HDPE plastisch ca. 3-4 mm \rightarrow PT Seite
4	80	"	deutliche Geräusche (Kugeln zu hören) / plastisch 30-40 mm eingedrückt \Rightarrow siehe Foto
5	45	16,4	25cm als Auflagefläche fehlen, da schon eingedrückt \rightarrow keine Beschädigungen
6	50	"	Keine Beschädigung sichtbar
7	55	"	Schein komprimiert (unter Last), dann Geräusche / drücke der Öffnung der Klemme auf Rohr, \Rightarrow siehe Foto
8	60	"	kurzzeitig 67 bar (wegen Hydr. Steuerung) / zum Kompromitt bei 60 bar
9			16 Klemmenplatten teilweise unterschiedlich tief eingedrückt (ca. 1cm)
10			

Test 1 (hintere Bereich)
 Test 2 (vorne Fläche von Test 1)

21.10.2022
 Start: 9:56 Ende: Radialer Test mit 16 m Rohren mit HDPE und GRE Mantel

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	45	16,4	keine Auffälligkeiten, Klemme (L) - gest. an
2	50	"	" " " " " Klemme nicht geöffnet
3	55	"	kurzzeitig 60 bar, dann abgefallen, Klemme nicht geöffnet
4	60	"	Klemme geöffnet, keine Auffälligkeiten
5	70	"	Ab hier größere Schritte, weil GRE Schicht 10mm und erst ab 100bar (Vorlast 3m) etwas passierte (zerstört)
6	86	"	86 bar wegen Steuerung (Hydr.)
7	90	"	Nichts hörbar, keine Auffälligkeiten
8	100	"	Nichts hörbar, keine Auffälligkeiten
9	110	"	" " " "
10	130	"	130 bar wegen Steuerung, Poti bei 50% Nichts hörbar, keine Auffälligkeiten

→ keine Auffälligkeiten
 → Klemme nicht geöffnet

Radialer Test mit 16 m Rohren mit HDPE und GRE Mantel

Laststufe	Klemmdruck [bar]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
11	140	16,5	keine Auffälligkeiten, nichts hörbar
12	150	"	160 bar (Steuerung), keine Auffälligkeiten, nichts hörbar
13	170	"	" " " "
14	180	"	185 (Steuerung), " " " "
15	190	"	" " " "
16	200	"	" " " "
17	210	"	215 (Steuerung), " " " "
18	220	"	234 (Steuerung), " " " "
19	240	"	" " " "
20	256	"	254 (Steuerung)

System deutlich steifer, sonst würde der Druck * " " " " schnell fallen (siehe HDPE Druck)
 heißt: keine Auffälligkeiten
 keine Geräusche

	Druck Klemmzyl.	Temp	Kommentar	
11:45 Uhr ↓ Pause ↓ 12:45 Uhr	21	275	16,8	Leichtes Kristern, sonst keine Auffälligkeit
	22	300	17,2	Bei 285 zerstört
	23			
	24			
	25			

Start 10:23 Uhr 26.10.2022
 Ende 14:45 Uhr

Axialer Test mit 16 m Rohren und HDPE Mantel

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Druck Vortriebszylinder [bar]	Weg Vortriebszylinder [mm]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	50			17,7	Bei 60 bar ist Rohr plastisch verformt. Bei Klemme Nr. 1 ca. 8mm plastisch/weil PUR-Gewicht (Gesamtwicht)
2	50	15		"	Leichte Verschiebung aufgrund des weichen Materials (ca. 5mm), nach gewisser Zeit ist Druck stabil abstr.
3	50	30 ^{real}		"	Verschleiß wegen Elastizität (HDPE dehnt sich) siehe auch Werte (Klemme ändert sich, Traverse-PUR stabil)
4	50	40		"	
5	60			"	Deutliche "Korngeräusche" HDPE von PUR gegen Stauchabklemme bis 3,5m ca
6					↳ Zwischen Traverse und HDPE keine oder kaum Bewegung
7					Distanz hinter Klemme (Nr. 14, 11, etc.) durch Schlupf, Dehnen
8					Verformung wahrscheinlich durch Dehnen und Klemme drückt sich durch je je
9					Wandstärke immer weiter weg
10					

axial Force/bar 15,06 kN/bar ~~15,06 kN/bar~~ 1,506 €/bar
 radial Force/bar 60,61 kN/bar (6€) bar

→weiterer Test:
 axial Ziehen ohne Rohr

Seite 1

27.10.2022
 Start: 9:50 Ende: 12:45 Axialer Test mit 16 m Röhren und HDPE und GRE Mantel

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Druck Vortriebszylinder [bar]	Weg Vortriebszylinder [mm]	Temperatur Rohr [°C]	Kommentar/Beobachtungen
1	50	15		17,3	Und Reflektormessy hinter Piez. etwas heutz...
2	✓	20	27 bar ca. 11mm	"	Photometrie keine 20 bar da wir 47 nötig \Rightarrow Reflektor P
3	"	30		"	\Rightarrow bei ca. 25 bar glattes Schlupf
4	"	40	zur 47		Photometrie
5	60	40-45	zur 47		n. Buchwert 35 bar, bei 50 bar Schlupf und deutliche Geräusche
6	70	50			
7	80	"			
8	90	"			
9	100	"			
10	110	40-45			Photometrie

$F_R \leq \mu \cdot F_N$
 $\mu = \frac{F_R}{F_N}$

axial Force / bar 15,06 kN/bar
 radial Force / bar 60,61 kN/bar

Seite 1

Verschiebetest 2x durchgeföhrt \Rightarrow bis ca. 6 bar (9°C) Verschiebetest mit Kleinteil

Start 13:30 4. Nov. 2022
 Axialer Test mit 9 m Röhren und HDPE und GRE Mantel

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Druck Vortriebszylinder [bar]	Weg Reflektor 1/2 [mm]	Temperatur Rohr [°C]	Abstand Schrauben [mm]	Kommentar/Beobachtungen
1	50	20		16	1-2 95,2 2-3 95,3 3-4 95,3 4-5 97,3	Kein Schlupf, keine Metalle der Deformation in Ab-seite nicht abzuföhrt!
2	70	30		"	1-2 94,8 2-3 95,2 3-4 95,4	Kein Schlupf
3	80	40		"	1-2 94,3 2-3 94,2 3-4 95,4	Kein Schlupf Druck der Vorschubzyl fällt ab
4	80	40... 70	Schlupf	"	Keine Messy Dynamisch	Klebrigkeit hat sich bewirkt, trotz ohne Schlupf \Rightarrow dynamisch
5	100	70... 85	70 halten (versucht) Schlupf	155 (70)	1-2 94,3 2-3 94,7 3-4 95,4	1-2 95,2 2-3 98,5 3-4 95,4
6	120	80... 95-100	Schlupf	~80	1-2 95,3 2-3 94,2 3-4 95,2	
7	140	95	Schlupf	"		Ab hier aus Sicherheitsgründ keine hässliche Messy mehr
8	160	105-105	Schlupf	"		
9	180	100	Schlupf	"		
10	200	100	Schlupf	"		

Komplett entlastet Vorschub und Kleben Obw \Rightarrow 1-2 94,7 ~ 94,3
 2-3 98,4
 3-4 95,4
 4-5 94,4

axial 15,06 kN/bar (1,5 t/bar)
 radial 60,61 kN/bar (6,06 t/bar)

Seite 1

* Lastmessy auf Refl. nicht zuverlässig, da stativ auf Boden und Rohr liegt sich evtl. hebt \Rightarrow Reflektor, Bohrer Rohr
 * (Case) immer stabil

1/2

Axialer Test mit 9 m Röhren und HDPE und GRE Mantel

Laststufe	Druck Klemmzylinder [bar]	Druck Vortriebszylinder [bar]	Weg Reflektor 1/2 [mm]	Temperatur Rohr [°C]	Abstand Schrauben [mm]	Kommentar/Beobachtungen
11	160			16,2		Schertest (PUR-Stahlrohr) Aufschlag Last nicht genug => über Druck hinaus steigt -> fällt
12	max. 5			16		Versagt bei ca. 290-295 -> steigt wie vor bei ca. 300 bar Spacer kaputt dann Druck weg und wie vor hochgedrückt auf ca. 60 bar
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

D.2 Rapport testen EPP met ruimer

Testen op combinatie ruimer met EPP

AAMBEELD werkpakket WP4



Testen op combinatie ruimer met EPP
AAMBEELD werkpakket WP4

Auteur(s)
Piet Meijers

Testen op combinatie ruimer met EPP

AAMBEELD werkpakket WP4

Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleiding, aanlegmethoden EPP, ruimer

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	17-01-2024
Projectnummer	11207943-019
Document ID	11207943-019-GEO-0001
Pagina's	38
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	

Samenvatting

Als onderdeel van het TKI project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) is de toepasbaarheid van een ontwikkelde Ruimer in combinatie met een EPP voor verschillende grondslagen getest. Hiervoor is door Herrenknecht een testopstelling gebouwd. Tijdens de test is de ruimer gemonteerd op het EPP systeem getest door de ruimer in een met grond gevulde container voort te bewegen. Bij alle vier gebruikte grondsoorten (los zand, verdicht zand, slap veen, stijve klei) kon het systeem over de volledige lengte van 4,5 worden verplaatst. Hiermee is aangetoond dat het systeem in deze grondsoorten kan worden gebruikt. Aanvullend is door Herrenknecht aangetoond dat de ruimer ook in grind kan worden gebruikt.

Bij de testen op de verschillende grondsoorten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij los gepakt zand is er een kans op maaiveld zakking. Het wordt aanbevolen om de voortgangssnelheid en de hoeksnelheid van de ruimer hierop aan te passen. Een hogere voortgangssnelheid in combinatie met een lagere hoeksnelheid vermindert de kans om maaiveld zakking. Meting van de druk in de boorkop zou hierbij wenselijk zijn. Er kan dan worden aangetoond dat de gronddrukken dusdanig hoog blijven dat de zakking van het maaiveld gering is.
- Bij vast gepakt zand is de maaiveld zakking door de ruimer zeer gering. Bij de uitgevoerde testen en de gebruikte procesparameters, bleek de maaiveld zakking te verwaarlozen.
- Bij veen dient er aandacht te worden besteed aan de voortgangssnelheid. Bij de test is er sprake geweest van een hoge voortgangssnelheid om maaiveld zakking te verminderen, maar bij een te hoge voortgangssnelheid kan er te weinig veen worden weggeboord en wordt het maaiveld omhoog gedrukt.
- Bij stijve klei is het van belang een hogere hoeksnelheid van de ruimer te hanteren en een lage voortgangssnelheid, zodat verstopping van het afvoersysteem niet optreedt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Doelstellingen AAMBEELD	6
1.3	Werkpakketten	6
1.4	Ruimer testen als onderdeel van werkpakket 4	7
2	Testopstelling en uitgevoerde testen	8
2.1	Achtergrond en principe van EPP met ruimer	8
2.2	Afmetingen EPP en ruimer tijdens de testen	8
2.3	Testopstelling	9
2.4	Globale beschrijving testen	12
2.5	Grond classificatie	13
2.6	Preparatie grondpakket	14
2.7	In-situ meting grondeigenschappen	16
2.7.1	Slagsondering	16
2.7.2	Penetrologger metingen	17
3	Resultaten metingen Herrenknecht	21
3.1	Metingen tijdens de testen	21
3.2	Test met los gepakt zand	21
3.3	Test met vast gepakt zand	25
3.4	Test met veen	28
3.5	Test met klei	30
3.6	Aanvullende testen op klei en grind	33
4	Conclusies	34
A	Korrelverdeling zand	35
B	Korrelverdeling klei	36
C	Factual rapport Herrenknecht	37

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden zoals E-Power pipe, Direct pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van de bestaande HDD techniek) is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen. Daarnaast blijken er uitvoeringstechnisch verbeteringen mogelijk ten aanzien van de beoordeling van de voorgestelde installatiemethoden in relatie tot de eisen met betrekking tot warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

1.2 Doelstellingen AAMBEELD

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Door gebruik te maken van een uithardende boorvloeistof die in de gebruiksfase van de transportleiding een hogere wrijvingsweerstand oplevert kunnen langere leidingen worden aangelegd met een kleiner aantal expansiebochten. Dit reduceert aanlegkosten en hinder voor de omgeving.

Hieruit komen een aantal subdoelstellingen uit naar voren bij de huidige stand van de techniek:

- Methodiekontwikkeling vergelijking aanlegmethoden.
- Ontwerp van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen.
- Beoordeling geschiktheid bestaande en innovatieve installatiemethoden aan de hand van ervaringscijfers.
- Ontwikkeling, optimalisatie boorvloeistof(fen) voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen.
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen.
- Synthese.

1.3 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten.

Dit rapport is onderdeel van WP4.

1.4 Ruimer testen als onderdeel van werkpakket 4

Als onderdeel van werkpakket 4 zijn door Herrenknecht testen uitgevoerd met een thruster en een ontwikkelde ruimer voor het EPP systeem.

Door Herrenknecht is een uitgebreid factual rapport opgesteld ([1]) met alle resultaten van de uitgevoerde testen met combinatie van ruimer met EPP.

Dat rapport is hier opgenomen als bijlage C. In dat rapport wordt de testopstelling beschreven, evenals de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde testen met de ruimer.

Dit rapport betreft de uitgevoerde testen met de ontwikkelde ruimer. De testen met de thruster zijn in een apart rapport beschreven.

[1] Herrenknecht AG (2013). Test Report, Project: F-000620.2.2 Reamer Test. Description: Testing the operational capability of a Ø 790 mm reamer Rev. 0, prototype, 2023-08-18.

2 Testopstelling en uitgevoerde testen

2.1 Achtergrond en principe van EPP met ruimer

De EPP-techniek (E-Power Pipe) is gebaseerd op het systeem van een AVN (Automatischer Vortrieb Nass)-machine. Door de kleine diameter van 505 mm is het echter een speciale vorm van een AVN. De EPP-techniek is oorspronkelijk ontworpen om kabelbeschermingsbuizen aan te leggen. De voordelen van de EPP zijn de zeer precieze sturing en de mogelijkheid om op een geringe diepte van slechts 1 tot 1,5 m onder maaiveld leidingen aan te leggen. Door middel van een boorbuizen systeem is het bovendien mogelijk leidinglengtes tot 2000m te realiseren.

De aanleg gaat in twee fasen. In de eerste fase wordt een pilot boring uitgevoerd vanaf de startschacht tot de eindschacht. Daarna wordt de boorkop zelf losgekoppeld van de laatste boorbuis en wordt de productleiding wordt aangesloten. Tijdens het terugtrekken wordt de productleiding in het boorgat getrokken. Het boorgat blijft bij deze methode permanent ondersteund.

Een uitgebreidere beschrijving is te vinden op:
<https://www.herrenknecht.com/en/newsroom/keytopicdetail/e-power-piper/>.

De huidige EPP machine heeft een diameter van 505 mm. Voor het aanleggen van leidingen met een grotere diameter is een aanpassing van de methode nodig. Door Herrenknecht is hiervoor een aanpassing van de methode met een ruimer ontwikkeld. De eerste fase (pilot boring) blijft hetzelfde. Tijdens de tweede fase (intrekfase) wordt een ruimer gemonteerd waarachter de te installeren leiding met grotere diameter wordt gekoppeld. Bij het intrekken van de grotere diameterleiding wordt de benodigde extra ruimte verkregen door met de ruimer grond te verwijderen en via de boorbuizen van de EPP machine af te voeren.

Bij het aanleggen van een leiding met deze methode zijn de bouwfases dus als volgt:

1. Maken van een boring met de standaard EPP machine.
2. Monteren van de ruimer en de te installeren leiding.
3. Terugtrekken van de combinatie EPP buis met ruimer en de te installeren leiding.

De in dit rapport beschreven testen vormen een onderdeel van de verdere ontwikkeling van deze techniek. Het doel van de testen was de werking van de ruimer onderzoeken en nagaan of deze techniek in verschillende grondsoorten toepasbaar is.

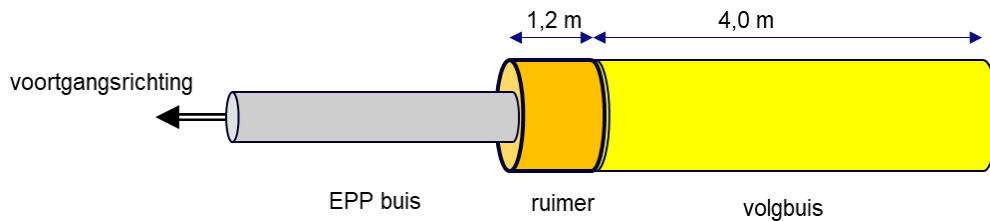
2.2 Afmetingen EPP en ruimer tijdens de testen

De buitendiameter van de bij de testen gebruikte EPP buis en ruimer zijn:

- EPP buis: 506 mm.
- Ruimer: 790 mm.
- Volgbuis 790 mm.

Gezien de afmetingen van de modelbak, en de doelstelling van de test, is het systeem zonder aan te leggen productleiding getest.

Figuur 2.1 toont de opbouw van de EPP buis en ruimer in langsrichting.



Figuur 2.1 Opbouw EPP en ruimer in langsrichting, tijdens intrekken leiding.

2.3 Testopstelling

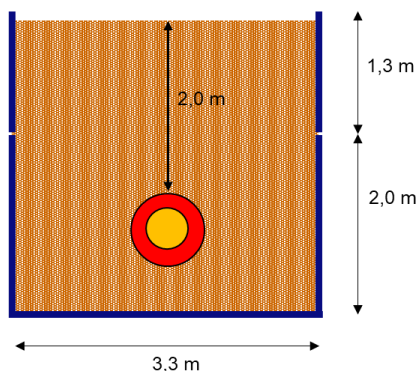
De testen zijn uitgevoerd op de locatie van Herrenknecht in Schwanau (D). Voor de testen is een opstelling gebouwd, die bestaat uit een container, een opzetbox, een EPP ruimer met aansluiting op buizen systeem, een grondscheidingsinstallatie en een controle ruimte. Figuur 2.3 tot Figuur 2.6 tonen de meetopstelling.

Het doel van de opzetbox is om voldoende gronddekking (minimaal 2,0 m) op de ruimer en de leiding te krijgen.

De afmetingen van de modelcontainer zijn:

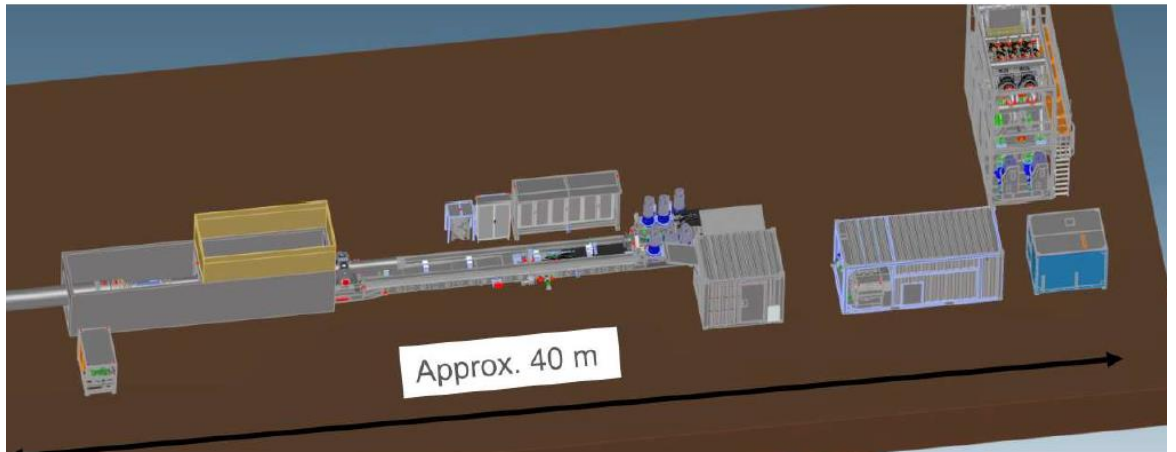
- Lengte: 4,8 m.
- Breedte: 3,3 m.
- Hoogte: 2 m.
- Bovenkant ruimer: 1,3 m.
- Hoogte opzetbox van 1,3 m.

Figuur 2.2 toont een doorsnede over de modelcontainer.



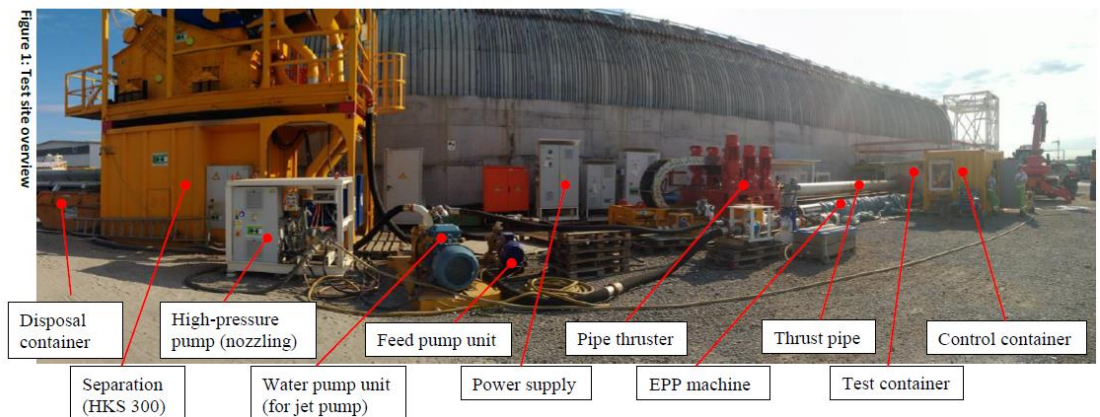
Figuur 2.2 Doorsnede over modelcontainer.

Tijdens de test is over een lengte van 4,5 m geboord. De startpositie en eindpositie van de ruimer lagen ongeveer 0,2 m uit de kopwanden.

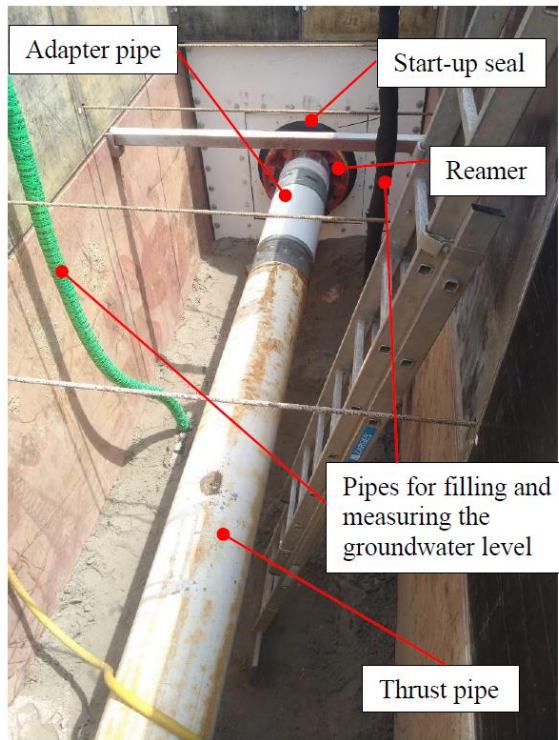


Figuur 2.3 Meetopstelling, links de container voor de eigenlijke testen, rechts de grondscheidingsinstallatie.

Aan de bovenkant van de container zijn twee dwarsverbanden aanwezig voor de benodigde sterkte.



Figuur 2.4 Meetopstelling, buitenaanzicht (foto: Herrenknecht).



Figuur 2.5 Meetopstelling, bovenaanzicht (foto: Herrenknecht).



Figuur 2.6 Aandrijving testopstelling, op de voorgrond ligt de EPP machine die is gebruikt voor de aansturing.

Figuur 2.7 en Figuur 2.8 tonen de ruimer.



Figuur 2.7 EPP met ruimer (foto: Herrenknecht).



Figuur 2.8 EPP met ruimer op startpositie (foto: Herrenknecht).

2.4 Globale beschrijving testen

Het doel van de uitgevoerde testen was na te gaan of de combinatie van EPP met een ruimer in verschillende grondsoorten werkt. Er zijn vier testen uitgevoerd. De testdata van deze testen waren:

- 28 juni 2023: test op los gepakt zand.
- 30 juni: test op vast gepakt zand.
- 4 juli 2023: test op veen.
- 6 juli 2023: test op klei.

In aanvulling op deze vier testen zijn na afloop door Herrenknecht nog een aantal testen uitgevoerd, die zijn gedaan naar aanleiding van de resultaten van de testen..

De startsituatie bij alle testen is dat de EPP buis en de kop van de ruimer in de modelcontainer aanwezig zijn. Vervolgens wordt het grondpakket aangebracht en zonodig verdicht. Bij het aanbrengen van het grondpakket is erop gelet dat er onder de EPP buis geen open ruimte aanwezig is.

Voor de testen in het zand is de grondwaterstand op het gewenste niveau gebracht. Dit niveau ligt boven de bovenkant van de ruimer, zodat er altijd in verzadigd zand rondom de ruimer aanwezig is.

Bij de test wordt de EPP buis met ruimer voortbewogen totdat de ruimer de andere zijde van de modelcontainer bereikt. Tijdens dit proces worden de diverse procesparameters gemeten.

2.5 Grond classificatie

Op de gebruikte grondsoorten zijn een aantal classificatietesten uitgevoerd. De resultaten per grondsoort staan in de Tabel 2.1 voor zand, in Tabel 2.2 voor klei en in Tabel 2.3 voor veen.

Tabel 2.1 Resultaten classificatie zand.

Parameter	Waarde
d_{50}	0,185 mm
d_{60}/d_{10}	1,96
Minimum dichtheid ρ_{min}	1,326 Mg/m ³
Maximum dichtheid ρ_{max}	1,635 Mg/m ³
Korrelvorm, volgens Powers	medium
Hoekigheid, volgens Powers	Subangular (R = 0,30)

Een betrouwbare waarde voor de in-situ dichtheid van de los gepakte en vast gepakte zandmonsters kon helaas niet worden bepaald. De gestoken monsters waren tijdens het proces van steken en vervoer vanuit Duitsland naar het laboratorium teveel verstoord.

Tabel 2.2 Resultaten classificatie klei.

Parameter	Waarde
d_{50}	0,012mm
Fines Content	83,1 %
vloeigrens	36,07 %
Plastic limit	17,08 %
Plasticiteitsindex PI	18,99
Natte dichtheid ρ_{wet}	1,95 Mg/m ³

Tabel 2.3 Resultaten classificatie veen.

Parameter	Waarde
LOI (loss on ignition)	66,08 %
Natte dichtheid ρ_{wet}	0,98 Mg/m ³

2.6 Preparatie grondpakket

Voorafgaand aan de preparatie van het grondpakket was de EPP boorbuis al aanwezig. De consequentie was dat tijdens de preparatie de aan te brengen grond ook onder de boorbuis moest worden aangebracht. Tijdens het aanvullen is daarom speciale aandacht besteed aan een goede aansluiting tussen de boorbuis en de grond teneinde te voorkomen dat er onder de EPP boorbuis een holle ruimte aanwezig was.

Het benodigde zand en klei voor de testen is van lokale oorsprong en door een lokale aannemer geleverd. Het benodigde veen is afkomstig uit Nieuwerkerk a/d/ IJssel. Hiervoor is gekozen omdat er lokaal geen veen beschikbaar is.

Voor de test met los gepakt zand is het zand voorzichtig in de testcontainer gestrooid. Er is geen verdichting toegepast.

Tijdens het verzadigen van het losgepakte zandpakket is geconstateerd dat de bovenkant ongeveer 0,1 m zakte.

Voor de test met vast gepakt zand is het zand in lagen met een dikte van 0,5 à 0,8 m met een dieplepel in de container gebracht en per laag verdicht met een trilplaat.

Voor de test met veen is het veen met een dieplepel in de bak gebracht. Hier is verder geen verdichting gebruikt. Ter hoogte van de boorbuis is het veen in eerste instantie aan een zijde aangebracht en daarna met de dieplepel aangedrukt zodat het veen onder de boorbuis werd door geperst. Op deze wijze is verzekerd dat er een goede aansluiting tussen de boorbuis en het veen aanwezig is.



Figuur 2.9 Gebruikt veen in de test (foto: Deltares).

De aangeleverde klei was onverzadigd. De klei is vochtig gemaakt voor betere verwerkbaarheid. Rondom de boorbuis is de klei verdicht door aandrukken met de bak van de dieplepel. Daarboven is de klei in drie lagen aangebracht en per laag met een relatief zware trilplaat verdicht.



Figuur 2.10 Aanvullen modelcontainer met klei (foto: Deltares).



Figuur 2.11 Bovenzijde klei na aanvullen en verdichten (foto: Deltares).

2.7 In-situ meting grondeigenschappen

2.7.1 Slagsondering

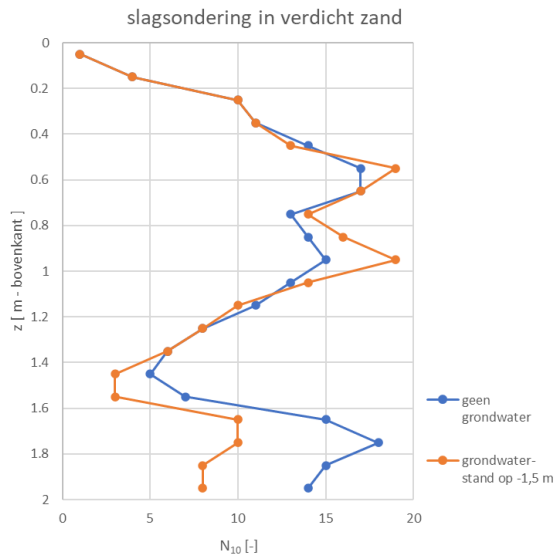
Door Herrenknecht is de dichtheid van de grondslag bepaald met een zogenaamde slagsondering (Rammsonde/Künzel bar) van het type DPL (Dynamic Probing Light). Hierbij wordt een stang met een puntdiameter van 10 cm² in de grond geslagen. De slagkracht komt door het optillen van een gewicht van 10 kg over 0,5 m en deze vervolgens te laten vallen.

Het aantal benodigde slagen per 10 cm wordt geteld. Voor de verdere details wordt verwezen naar DIN EN ISO 22476-2.

Alleen in het verdichte zand en in de klei kon een slagsondering worden uitgevoerd. In los gepakt zand en in veen kon geen slagsondering worden uitgevoerd, het gewicht van het apparaat was al voldoende om deze geheel te laten wegzakken.

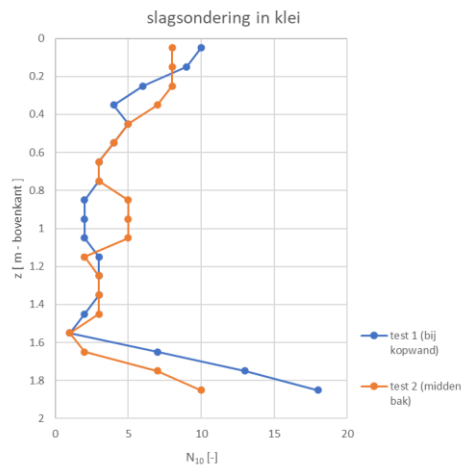


Figuur 2.12 Uitvoering slagsondering (foto: Deltares).



Figuur 2.13 Slagsondering in verdicht zand, bovenkant ($z = 0$ m) is de bovenkant van de opzetbox, de bovenkant van de ruimer ligt op ongeveer 2 m diepte.

Slagsondering is uitgevoerd vanaf een hoogte van 2 m, dus bovenkant is de bovenkant van de container zonder opzetbox.



Figuur 2.14 Slagsondering in klei, bovenkant ($z = 0$) is bovenkant container; bovenkant ruimer ligt op ongeveer 0,7 m diepte en onderkant op ongeveer 1,4 m diepte.

De slagsondering laat duidelijk de verdichte toplaag op $z = 0$ zien. Door de aanwezigheid van de buis kon naast de buis alleen door aandrukken van de klei worden verdicht.

2.7.2 Penetrologer metingen

Naast de slagsondering zijn er ook metingen met de penetrologer gedaan. Een penetrologer is een klein formaat sondering die met handkracht in de grond wordt gedrukt. Tijdens het indrukken worden de kracht en de diepte continu geregistreerd. De bereikte diepte met een penetrologer is ongeveer 0,8 m, zodat deze voornamelijk informatie over de toplaag geeft.

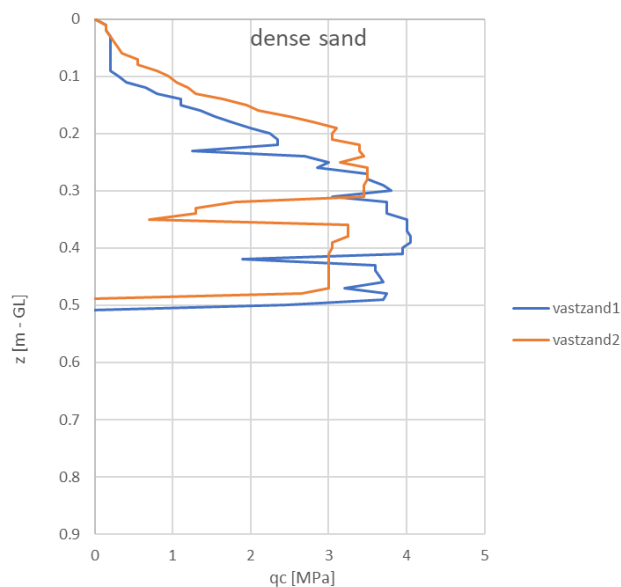


Figuur 2.15 Uitvoering penetrologger meting (foto: Deltares).

Bij het uitvoeren van de penetrologger zijn de volgende puntafmetingen gebruikt:

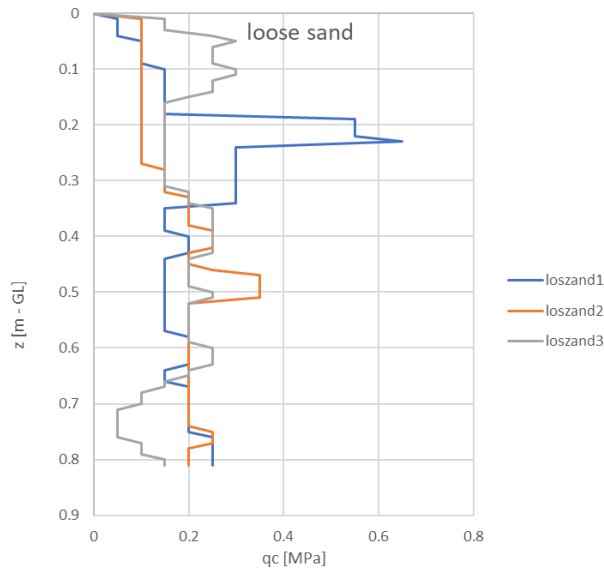
- Los zand: $A = 200 \text{ mm}^2$.
- Vast zand: $A = 200 \text{ mm}^2$.
- Veen: $A = 500 \text{ mm}^2$.
- Klei: $A = 200 \text{ mm}^2$.

De volgende figuren geven de geregistreerde conusweerstand. Deze zijn gebaseerd op de getallen in de uitvoerfiles van de penetrologger.



Figuur 2.16 Penetrologger meting in vast zand.

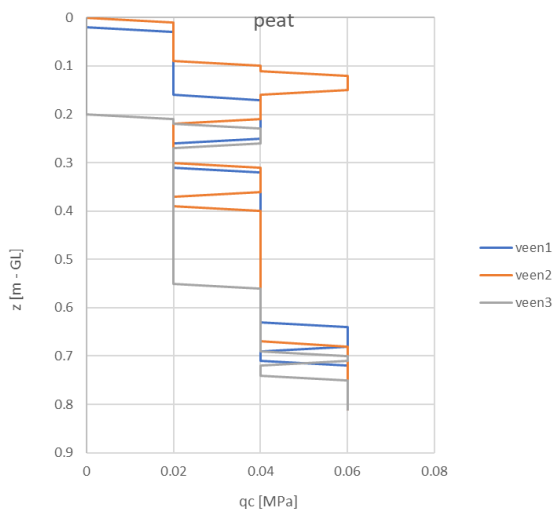
Bij deze meetmethode kon slechts tot een diepte van 0,5 m een meting worden uitgevoerd. Daarmee is er geen directe meting van de dichtheid van het zand ter hoogte van de ruimer. De gevonden conusweerstand duidt op een hoge dichtheid van het zand, in de orde van 70% relatieve dichtheid.



Figuur 2.17 Penetrologer meting in los zand.

Bij deze meetmethode kon tot een diepte van 0,8 m (de lengte van de sondeerstang) een meting worden uitgevoerd. Daarmee is er geen directe meting van de dichtheid van het zand ter hoogte van de ruimer. De gevonden conusweerstand duidt op een zeer lage dichtheid van het zand, in de buurt van de minimale dichtheid.

Dat het zand los gepakt is wordt ook bevestigd door de geconstateerde zakking tijdens het verzadigen. Bij vochtig zand kan, dankzij de capillaire spanning, een zeer los korrelskelet worden gerealiseerd bij aanvullen. Bij het verzadigen wordt deze capillaire spanning opgeheven en neemt het losgepakte korrelskelet een iets dichtere pakking aan.

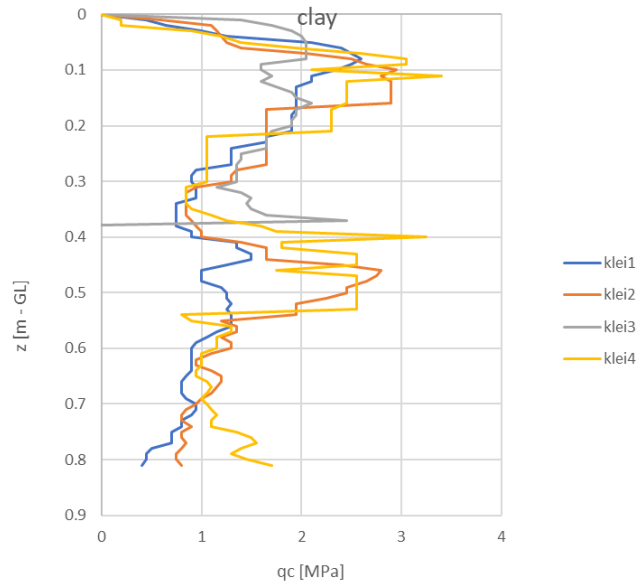


Figuur 2.18 Penetrologer meting in veen.

Bij deze meetmethode kon tot een diepte van 0,8 m (de lengte van de sondeerstang) een meting worden uitgevoerd. Daarmee is er geen directe meting van het veen ter hoogte van de ruimer.

De gemeten lage conusweerstand duidt op een zeer lage sterkte van het veen. De ongedraineerde schuifsterkte van de toplaag van het veen is 1 à 3 kPa op 0,5 m diepte. Ter

hoogte van de ruimer zal de ongedraineerde schuifsterkte mogelijk iets hoger zijn door het hogere spanningsniveau op de grotere diepte.



Figuur 2.19 Penetrologer meting in klei.

Bij deze meetmethode kon tot een diepte van 0,8 m (de lengte van de sondeerstang) een meting worden uitgevoerd. In afwijking van de andere metingen is hier de meting uitgevoerd na het aanvullen van de modelcontainer, maar voorafgaand aan het aanvullen van de opzetbox. Daarmee is er hier wel een directe meting van de klei ter hoogte van de ruimer.

In de meting zijn duidelijk de laagscheidingen waarop is verdicht te zien. De gemeten conusweerstand ter hoogte van de ruimer duidt op een hoge sterkte. De ongedraineerde schuifsterkte varieert tussen de 60 en 100 kPa.

3 Resultaten metingen Herrenknecht

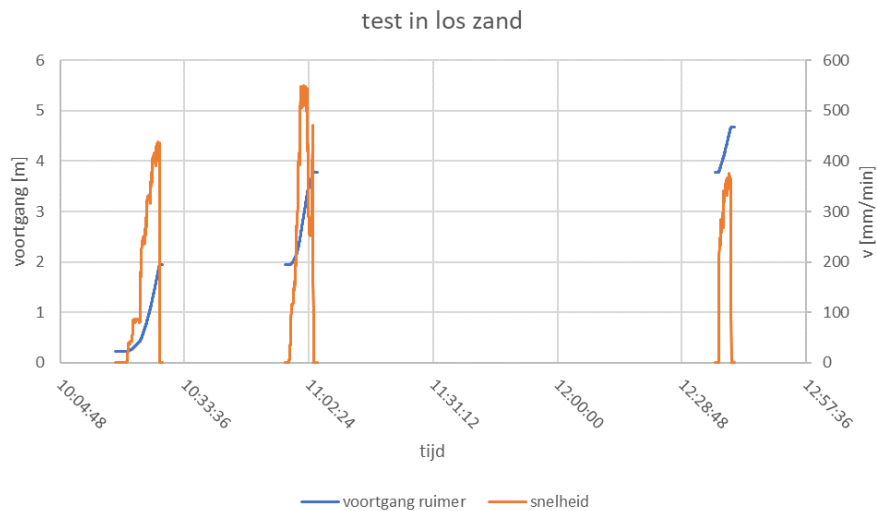
3.1 Metingen tijdens de testen

Tijdens iedere test zijn continu de procesparameters van het ruimen, zoals de drukken in de leidingen en de debieten gemeten. Voor een volledig overzicht wordt naar het factual rapport van Herrenknecht (bijlage C) verwezen.

In dit hoofdstuk worden per test een aantal geselecteerde resultaten gepresenteerd, die inzicht geven in het grondgedrag tijdens de testen. Hierbij is gebruik gemaakt van de meetfiles van Herrenknecht.

3.2 Test met los gepakt zand

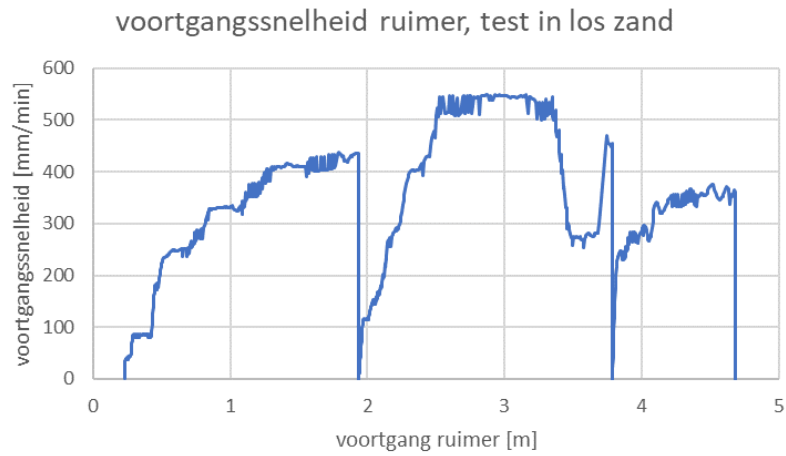
Figuur 3.1 toont de voortgang van de ruimer en de voortgangssnelheid in de tijd.



Figuur 3.1 Verloop test in los zand, voortgang ruimer en snelheid ruimer als functie van de tijd.

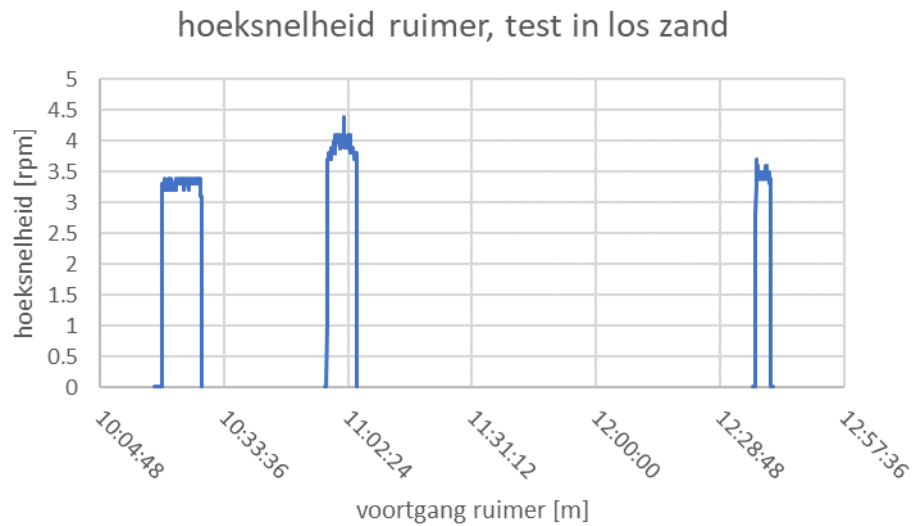
Figuur 3.2 toont de voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer. De voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer was ongeveer 400 mm per minuut.

Tijdens deze test waren er twee perioden met stilstand. Deze waren na een voortgang van de ruimer van ongeveer 1,94 m en 3,79 m. De duur van de stilstand volgt uit Figuur 3.1. Bij deze eerste test was er tijd nodig om de apparatuur bij te stellen.



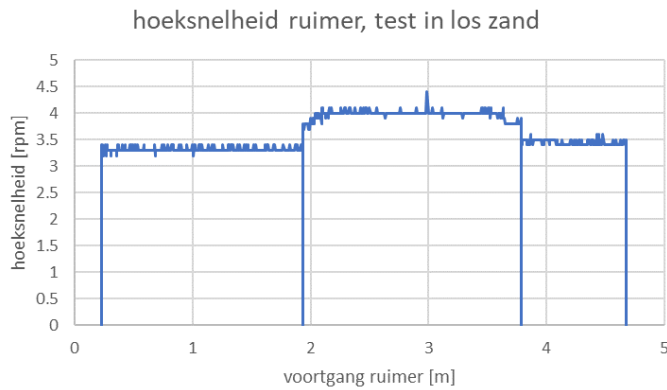
Figuur 3.2 Verloop test in los zand, voortgang voortgangssnelheid ruimer als functie van de plaats.

De voortgangssnelheid is voor het eerste gedeelte ongeveer 400 mm/min en voor het tweede gedeelte ongeveer 500 mm/min. Op het einde was de snelheid minder dan 400 mm/min.



Figuur 3.3 Test in los zand, hoeksnelheid ruimer als functie van de tijd.

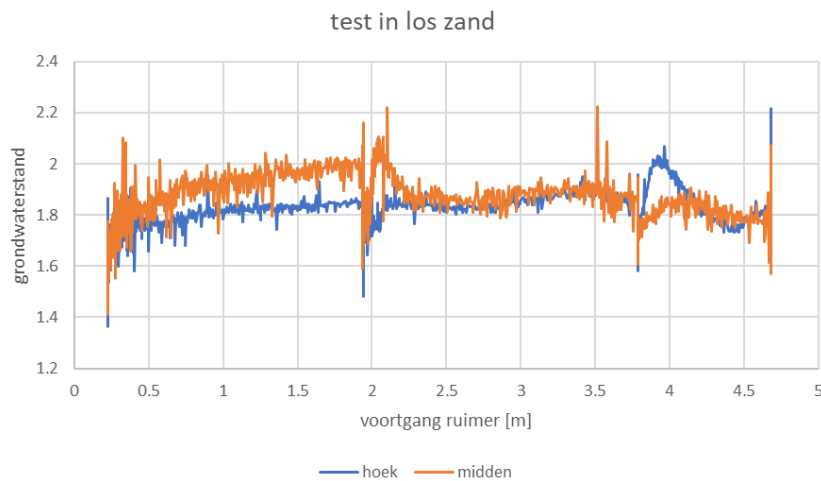
De omwentelingssnelheid van de ruimer wordt in Figuur 3.4 weergegeven. Deze is 3,5 à 4 rpm.



Figuur 3.4 Verloop test in los zand, hoeksnelheid ruimer als functie van de tijd.

De hoeksnelheid van de ruimer was ongeveer 3,5 rpm over de eerste 2 m en de laatste 0,5 m. Over de middelste 2 m was het 4 rpm. Deze periode valt samen met het gedeelte waarover ook een hogere voortgangssnelheid is gebruikt.

Bij deze test is de grondwaterstand gemeten. Het verloop van de grondwaterstand tijdens de test is weergegeven in Figuur 3.5. Hieruit blijkt dat de waterstand altijd op of boven 1,8 m lag, en daarmee altijd minstens 0,5 m boven de bovenkant van de ruimer.

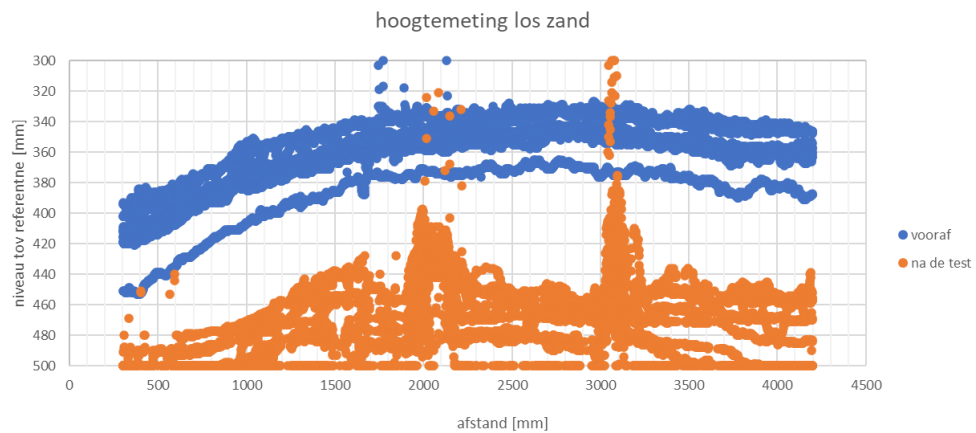


Figuur 3.5 Verloop test in los zand, grondwaterstand op twee plaatsen als functie van de voortgang ruimer.

Het meetpunt in het midden vertoont tijdens het eerste gedeelte een iets hogere stijghoogte dan het meetpunt in de hoek. De overhoogte verloopt van nihil op $x = 0,25$ m tot 0,2 m bij het naderen van het meetpunt. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de waterdruk door de ruimer. Na het passeren van het meetpunt in het midden is de stijghoogte in het midden en in de hoek gelijk. Aan het einde van de meting loopt de waterdruk in het meetpunt in de hoek op. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door het naderen van de ruimer naar dit meetpunt toe. De waterdrukken zijn beperkt. Daarmee is het niet waarschijnlijk dat verweking van het losgepakte zand nabij de ruimer is opgetreden.

Figuur 3.6 toont de ligging van de bovenkant van het zand ten opzichte van de meetbalk. Het meetbereik van de gebruikte laser is 500 mm.

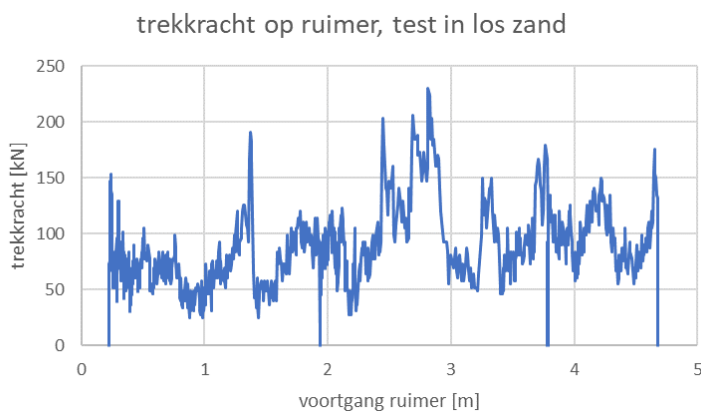
Bij de preparatie van het zandpakket is tijdens het verzadigen van het zand een zakking van ongeveer 0,1 m geconstateerd. Het verschijnsel van zakking bij het stijgen van de grondwaterstand is in zeer los gepakt zand niet ongewoon. Door de capillaire werking in onverzadigd zand kan een zeer losse pakking worden bereikt. Bij verzadiging vna het zand verdwijnt dit capillair effect en zakt het korrelskelet in elkaar, met zakking als gevolg.



Figuur 3.6 Test in los zand, hoogtemeting bovenkant grondpakket vooraf (na verzadiging) en na afloop test, alle meetraaien, afstand vanaf start.

De zakking in dit losgepakte zand is aanzienlijk. Globaal was deze 8 cm aan begin en 12 cm aan einde (vanaf ongeveer 2 m). In de meting na afloop is op 2 m en 3 m de invloed van de koppelstangen van de container te zien.

Bij het tweede deel van de test was zowel de voortgangssnelheid als de hoeksnelheid hoger dan voor het eerste gedeelte. Bij een hogere voortgangssnelheid is de kans op te veel zand wegboren kleiner dan bij een lagere snelheid. Een hogere hoeksnelheid in zand ondergrond met een losse pakking kan leiden tot het makkelijker in beweging geraken van het zand waardoor er meer zand wordt weggeboord dan bij een lagere hoeksnelheid.



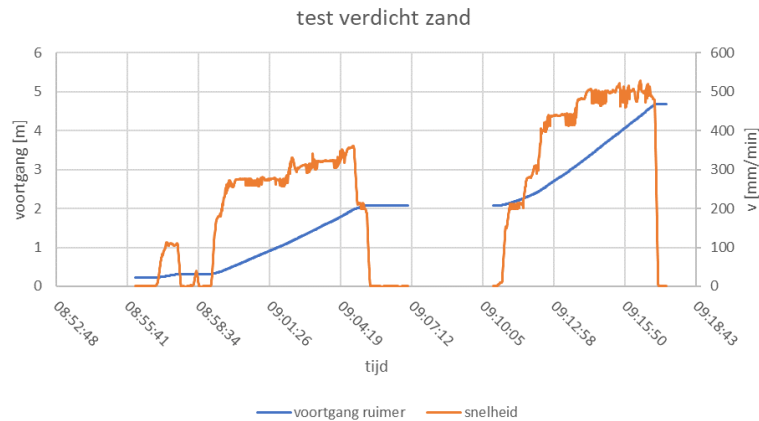
Figuur 3.7 Trekkracht op systeem.

De uitgeoefende trekkracht ligt gemiddeld tussen de 50 kN en 100 kN. Welk gedeelte hiervan nodig was om de grondweerstand en grondwrijving te overwinnen en welk deel nodig was om de overige wrijvingscomponenten in de meetopstelling, zoals de doorvoer in de wand van de modelcontainer, te overwinnen is niet bekend.

Opvallend is dat tussen $x = 2,5$ m en $x = 3,0$ m de hoogste kracht is uitgeoefend. Dit wordt ook gevonden bij de testen in vast zand en in veen. Bij de test in klei wordt zo'n traject met verhoogde trekkracht niet gevonden. Er is geen verband met bijvoorbeeld de hoeksnelheid van de ruimer gevonden.

3.3 Test met vast gepakt zand

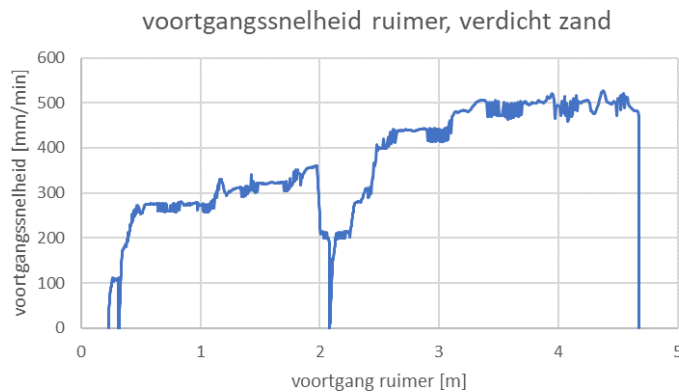
Figuur 3.1 toont de voortgang van de ruimer en de voortgangssnelheid in de tijd bij de test op vast gepakt zand.



Figuur 3.8 Verloop test in vast gepakt zand, voortgang ruimer en snelheid ruimer als functie van de tijd.

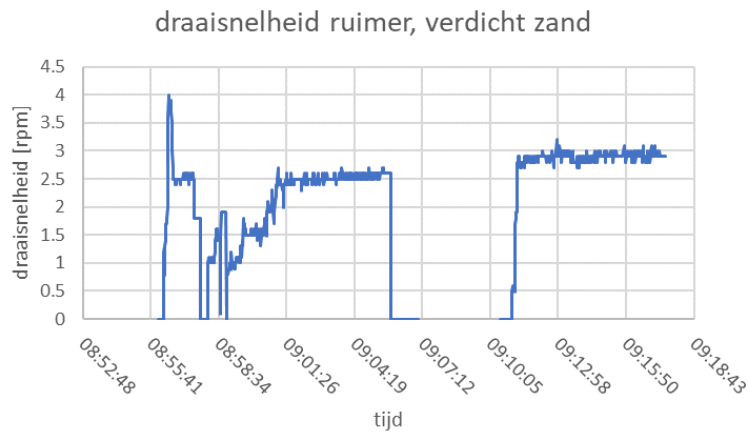
Tijdens de test was er een stilstand op $x = 2,09$ m. Na stilstand is besloten om het tweede deel met een hogere voortgangssnelheid proberen te boren.

Figuur 3.2 toont de voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer. De voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer was over het eerste gedeelte 300 mm/min en voor het tweede gedeelte 500 mm/min.

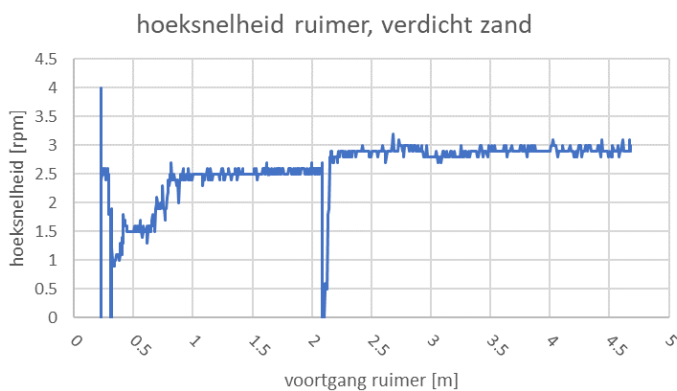
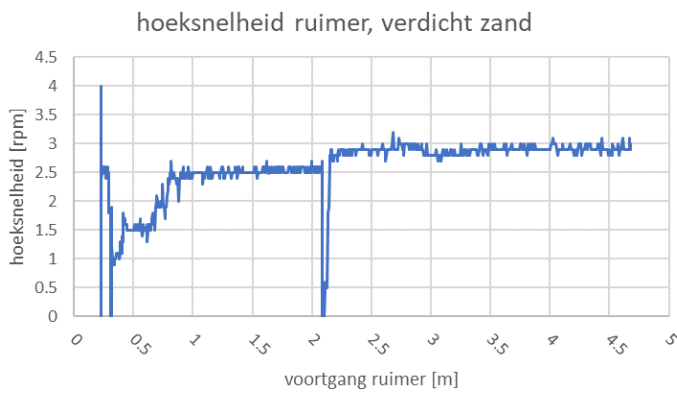


Figuur 3.9 Test in vast gepakt zand, voortgangssnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.

In Figuur 3.10 is de hoeksnelheid van de ruimer in de tijd aangegeven en in Figuur 3.11 als functie van de voortgang van de ruimer. Het moment van stilstand is goed te zien in deze figuren.

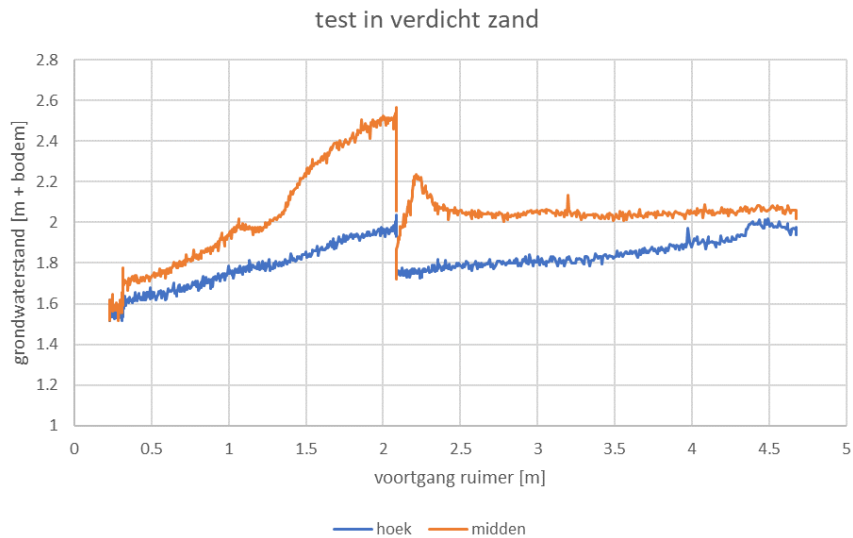


Figuur 3.10 Verloop test in vast zand, hoeksnelheid ruimer als functie van de tijd.



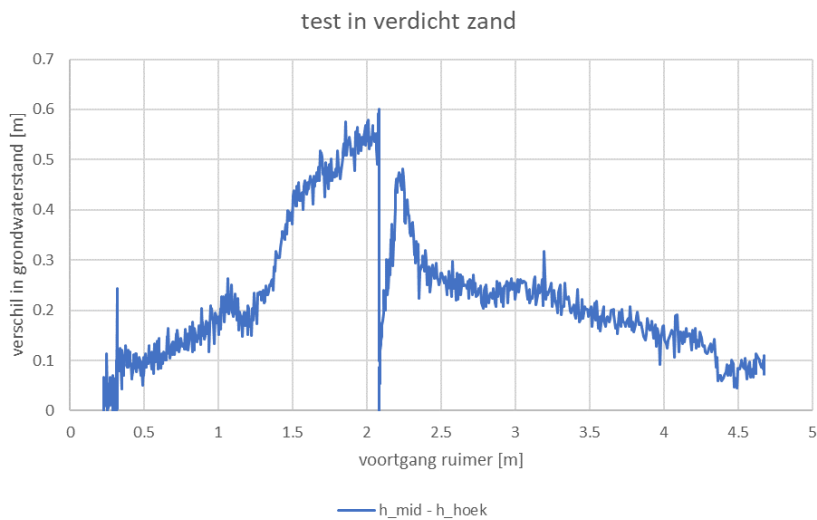
Figuur 3.11 Verloop test in vast zand, hoeksnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.

Bij deze test is de grondwaterstand op de twee meetpunten gemeten. Het verloop tijdens de test is weergegeven in Figuur 3.12. Hieruit blijkt dat de waterstand altijd op of boven 1,6 m lag en meestal boven 1,8 m. Daarmee lag de waterstand altijd boven de bovenkant van de ruimer.



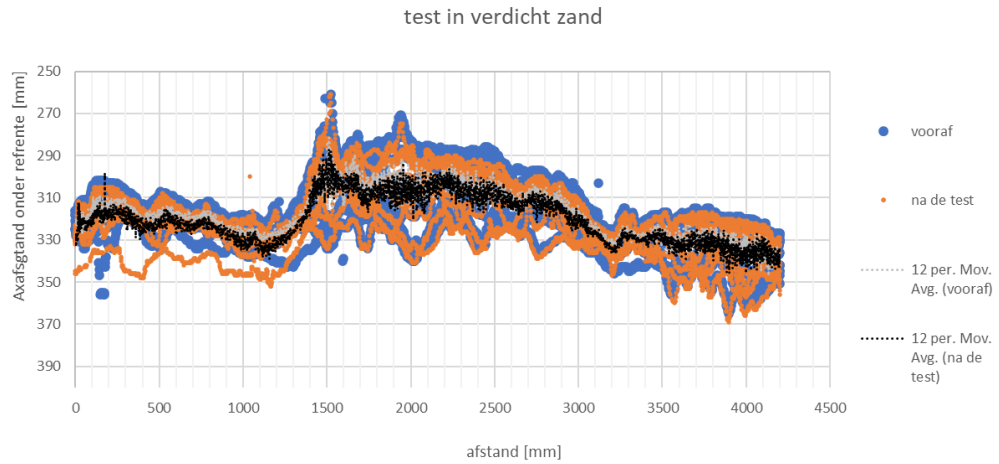
Figuur 3.12 Test in vast zand, verloop waterstand als functie voortgang ruimer.

Gedurende de test neemt, voor de tijd dat er wordt geboord, de waterstand in de hoek geleidelijk toe. Verder is de waterstand in het midden gedurende de hele test hoger dan in de hoek. In de eerste fase van het boorproces loopt het verschil op tot 0,55 m. Bij de tweede fase, na het passeren van het meetpunt in het midden, neemt het verschil langzaam af. Dit geeft aan dat tijdens de test er water vanuit de ruimer in het grondpakket is gekomen. In Figuur 3.13 is dit verschijnsel zichtbaar gemaakt.



Figuur 3.13 Test in vast zand, verschil in stijghoogte als functie voortgang ruimer.

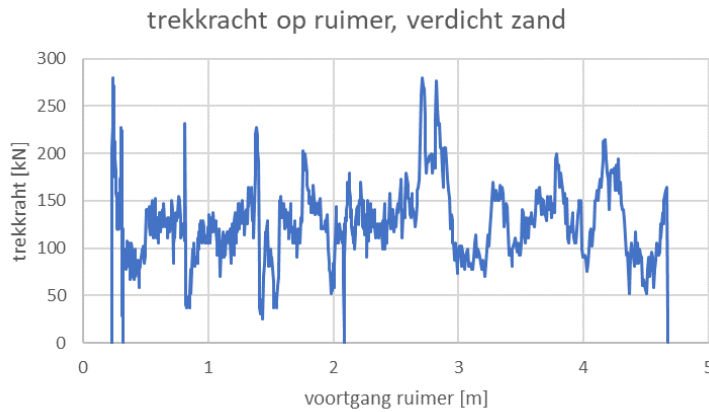
Figuur 3.14 geeft de positie van het maaiveld ten opzichte van de meetbalk weer.



Figuur 3.14 Test in verdicht zand, meting ligging maaiveld voor en na de test, Voor een bete inzicht is tevens een lopend gemiddelde weergegeven, afstand vanaf start.

De gemeten zetting ligt tussen 0 en 4 mm en is gemiddeld ongeveer 2 mm. Dit is veel minder dan bij de test in losgepakt zand is gemeten.

De gemeten trekkracht is in Figuur 3.15 te zien.

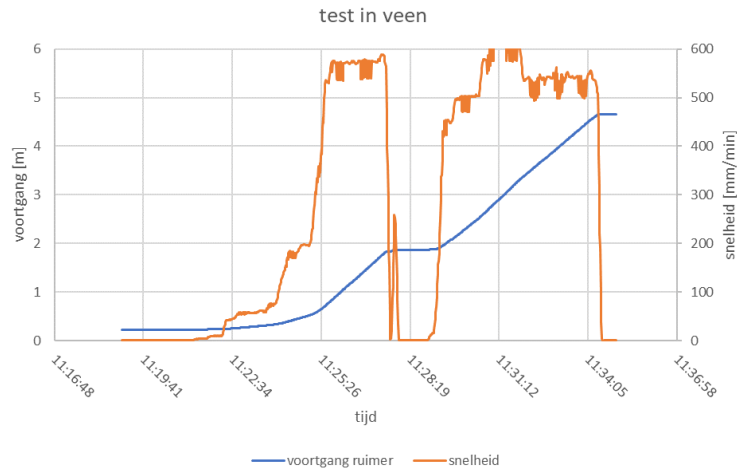


Figuur 3.15 Trekkracht op systeem.

De uitgeoefende trekkracht ligt gemiddeld tussen de 100 kN en 150 kN. Dit is meer dan bij de test in losgepakt zand.

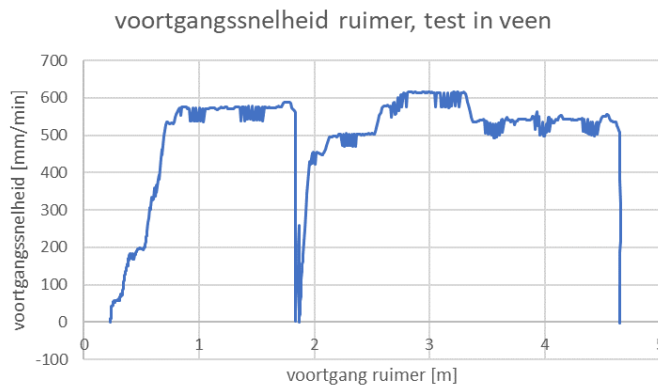
3.4 Test met veen

Figuur 3.1 toont de voortgang van de ruimer en de voortgangssnelheid in de tijd tijdens de test in het veen.



Figuur 3.16 Verloop test in veen, voortgang ruimer en snelheid ruimer als functie van de tijd.

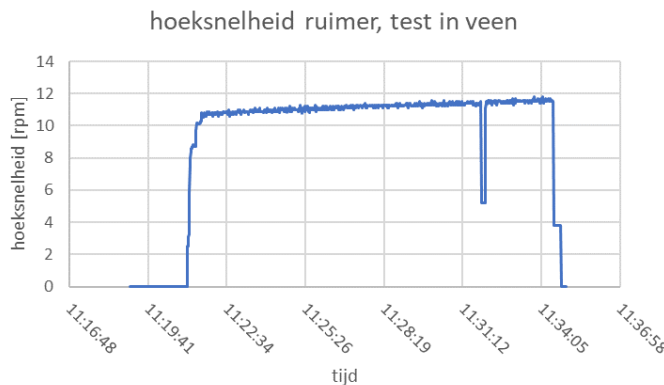
Figuur 3.17 toont de voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer. Tijdens de test was er een stilstand. Te zien dat dit op een afstand van $x = 1,87$ m was.



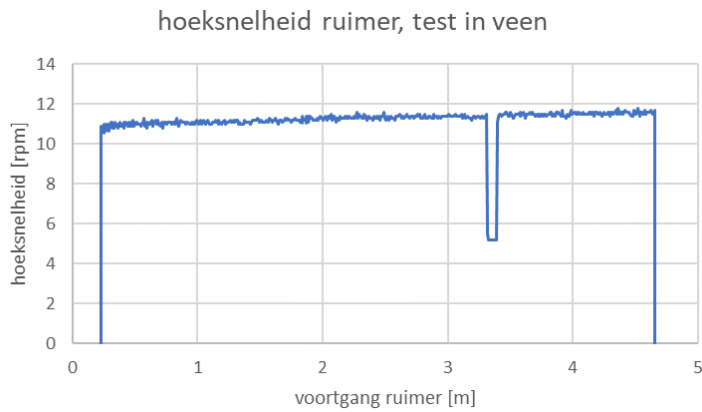
Figuur 3.17 Test in veen, voortgangssnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.

De voortgangssnelheid liep in de eerste 0,75 m op naar ongeveer 570 mm/min, waarna het praktisch constant was.

Figuur 3.18 en Figuur 3.19 tonen de hoeksnelheid van de ruimer tijdens deze test.

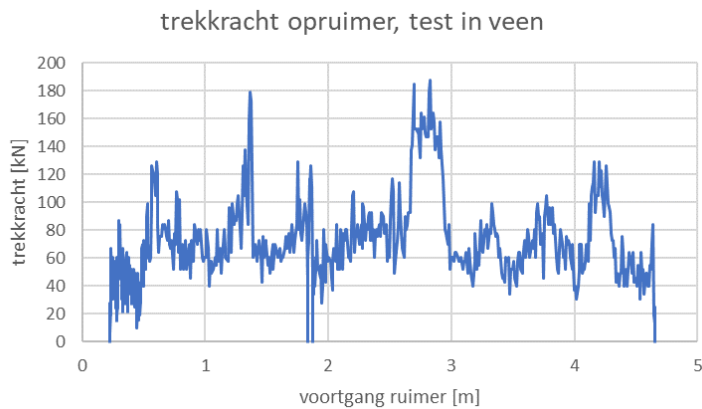


Figuur 3.18 Test in veen, hoeksnelheid ruimer als functie van de tijd.



Figuur 3.19 Test in veen, hoeksnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.

De meetwaarden van de uitgevoerde hoogtemeting zijn door Herrenknecht als onbetrouwbaar beoordeeld. Daarom zijn deze resultaten niet gerapporteerd. Uit visuele observaties is een rijzing van de bovenkant van ongeveer 4 cm voor het tweede gedeelte van het traject afgeleid. Over dit traject is met een hoge voortgangssnelheid gewerkt. Waarschijnlijk is hier sprake geweest van verdringing van het veen.

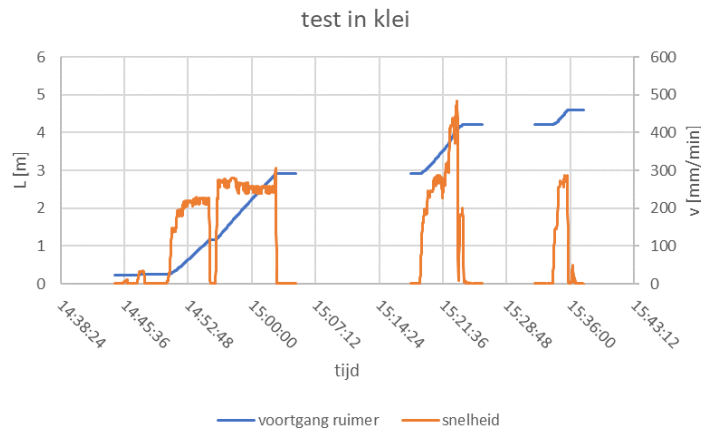


Figuur 3.20 Trekkracht op systeem.

De uitgeoefende trekkracht ligt gemiddeld tussen de 60 kN en 80 kN en is lager dan bij de testen die in zand zijn uitgevoerd.

3.5 Test met klei

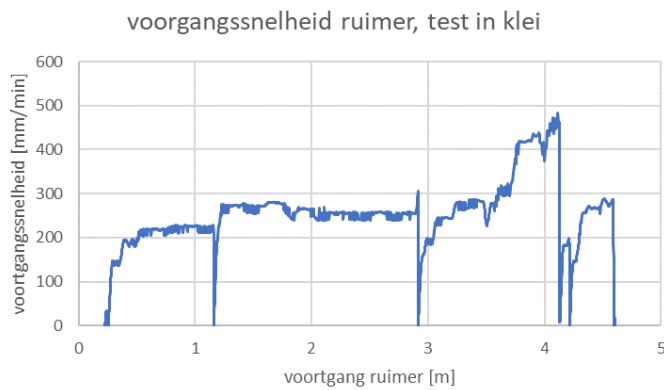
Figuur 3.1 toont de voortgang van de ruimer en de voortgangssnelheid in de tijd in de kleigrond.



Figuur 3.21 Verloop test in klei, voortgang ruimer en snelheid ruimer als functie van de tijd.

Tijdens de test was er een stilstand op $x = 2,92$ m en $x = 4,22$ m. Bij stilstand is er een verstopping van de afvoer van de klei geconstateerd.

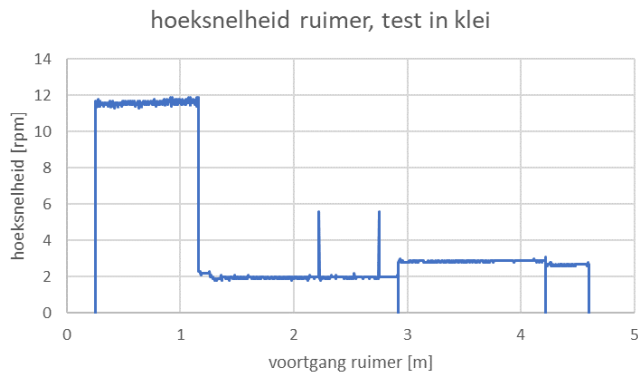
Figuur 3.2 toont de voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer. De voortgangssnelheid als functie van de plaats van de ruimer was minder dan 300 mm/min.



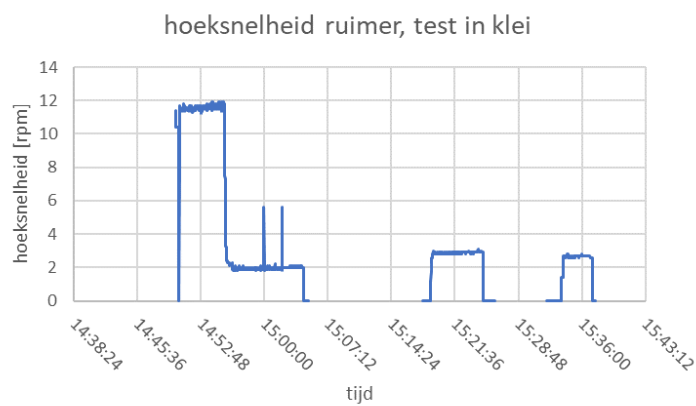
Figuur 3.22 Test in klei, voortgangssnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.

De voortgangssnelheid was over grote delen ongeveer 200 a 250 mm/min. Op $x = 4$ m was de voortgangssnelheid 400 a 450 mm/min. Hiermee was de voortgangssnelheid in deze test de laagste van alle hier gerapporteerde testen.

Figuur 3.23 en Figuur 3.24 geven de hoeksnelheid van de ruimer.

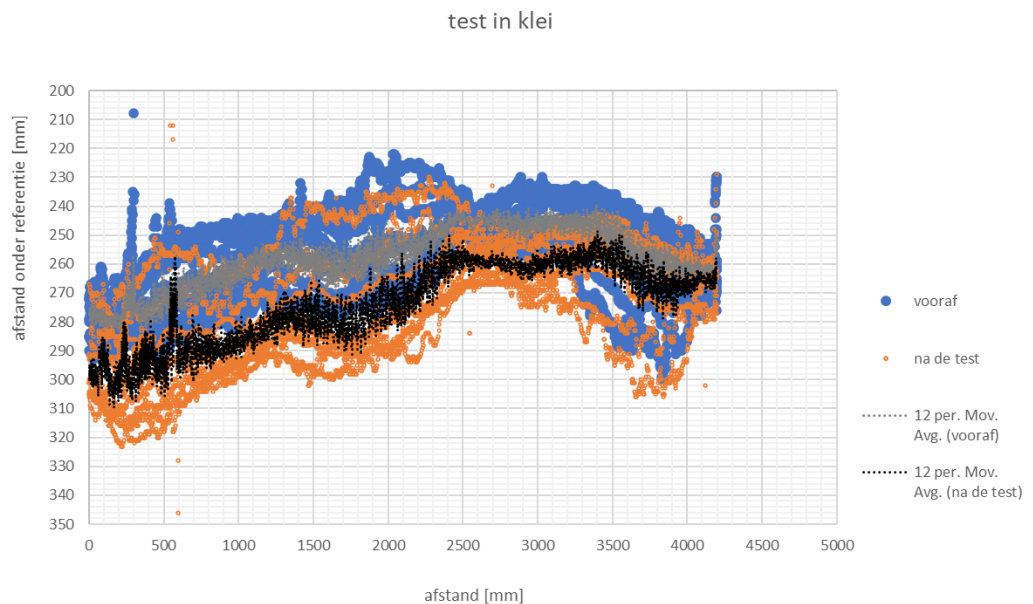


Figuur 3.23 Test in klei, hoeksnelheid ruimer als functie van de voortgang ruimer.



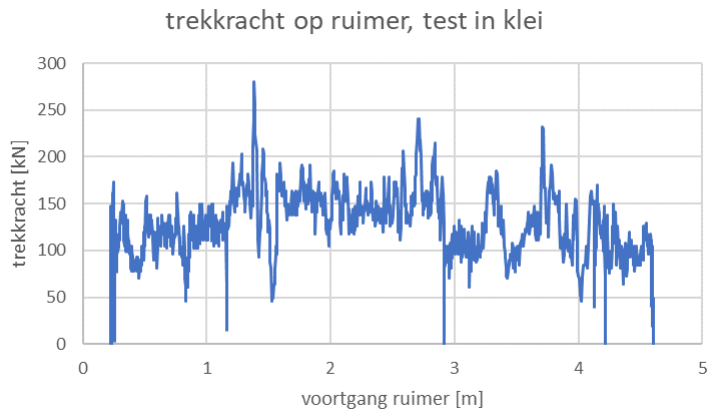
Figuur 3.24 Test in veen, hoeksnelheid ruimer als functie van de tijd.

Bij het beging van de test, over de eerste meter, is een hoge hoeksnelheid gebruikt. Voor de rest van de test was de hoeksnelheid lager.



Figuur 3.25 Test in klei, meting ligging bovenkant voor en na de test, voor een beter inzicht is tevens een lopend gemiddelde weergegeven, afstand is vanaf start.

De gemeten zetting verloopt van ongeveer 2 a 3 cm aan het begin naar 2 a 4 mm aan het einde van het boortraject. Bij aanvang van de test is de meeste klei weggeboord.



Figuur 3.26 Trekkracht op systeem.

De uitgeoefende trekkracht ligt gemiddeld tussen de 100 kN en 150 kN.

3.6 Aanvullende testen op klei en grind

In aanvulling op de vier testen die in het kader van AAMBEELD zijn uitgevoerd, zijn door Herrenknecht drie aanvullende testen uitgevoerd, genummerd test 5, 6 en 7. De testen zijn toegevoegd aan het testprogramma vanwege de geconstateerde verstopping in de return flow bij de klei testen en vragen die ontstonden omtrent de toepassing bij grovere grondsoorten dan zand. Het doel van deze aanvullende testen was de werking van de ruimer te beschouwen, daarom zijn er bij deze testen geen geotechnisch relevante metingen uitgevoerd.

Bij Test 5 is de test op klei herhaald. De klei is op dezelfde wijze aangebracht als bij de eerdere test. Bij deze test is nader bekeken waar de verstopping optrad en wanneer de verstopping optrad. Er bleek bij een te hoge voortgang snelheid verstopping op te treden. Bij een verlaging van de voortgangssnelheid bleek de ruimer zonder verstopping door de klei te kunnen worden bewogen.

Bij Test 6 is de ruimer door grind voortbewogen. Er zijn twee gradaties grind toegepast. Voor de eerste helft is gradering 0 – 45 mm gebruikt en voor de tweede helft 0 – 56 mm. Bij test 6 zijn een aantal verstoppingen geconstateerd. De grinddelen bleken te groot voor de nozzles bij de jet pomp. Daarop is de ruimer aangepast. De openingen in de suction box zijn verkleind. Vervolgens is de test met grind herhaald (test 7). Daarbij bleken de aanpassingen het gewenste resultaat te hebben.

Voor een volledige beschrijving van de aanvullende testen wordt verwezen naar de rapportage van Herrenknecht, die hier is opgenomen als Bijlage **Error! Reference source not found.**

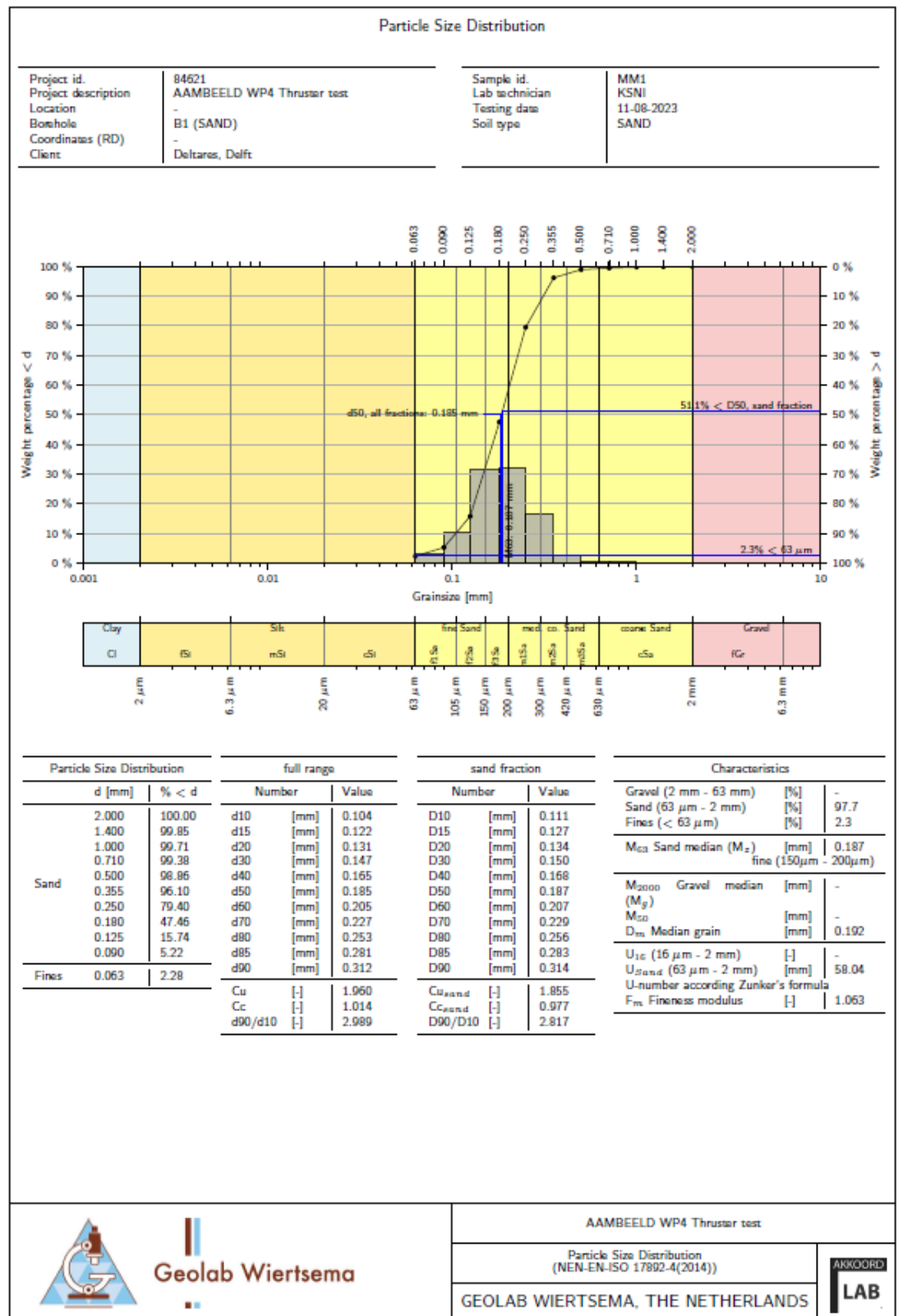
4 Conclusies

Als onderdeel van het TKI project AAMBEELD (AAnlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD) is de toepasbaarheid van een ontwikkelde Ruimer in combinatie met een EPP voor verschillende grondslagen getest. Hiervoor is door Herrenknecht een testopstelling gebouwd. Tijdens de test is de ruimer gemonteerd op het EPP systeem getest door de ruimer in een met grond gevulde container voort te bewegen. Bij alle vier gebruikte grondsoorten (los zand, verdicht zand, slap veen, stijve klei) kon het systeem over de volledige lengte van 4,5 worden verplaatst. Hiermee is aangetoond dat het systeem in deze grondsoorten kan worden gebruikt. Aanvullend is door Herrenknecht aangetoond dat de ruimer ook in grind kan worden gebruikt.

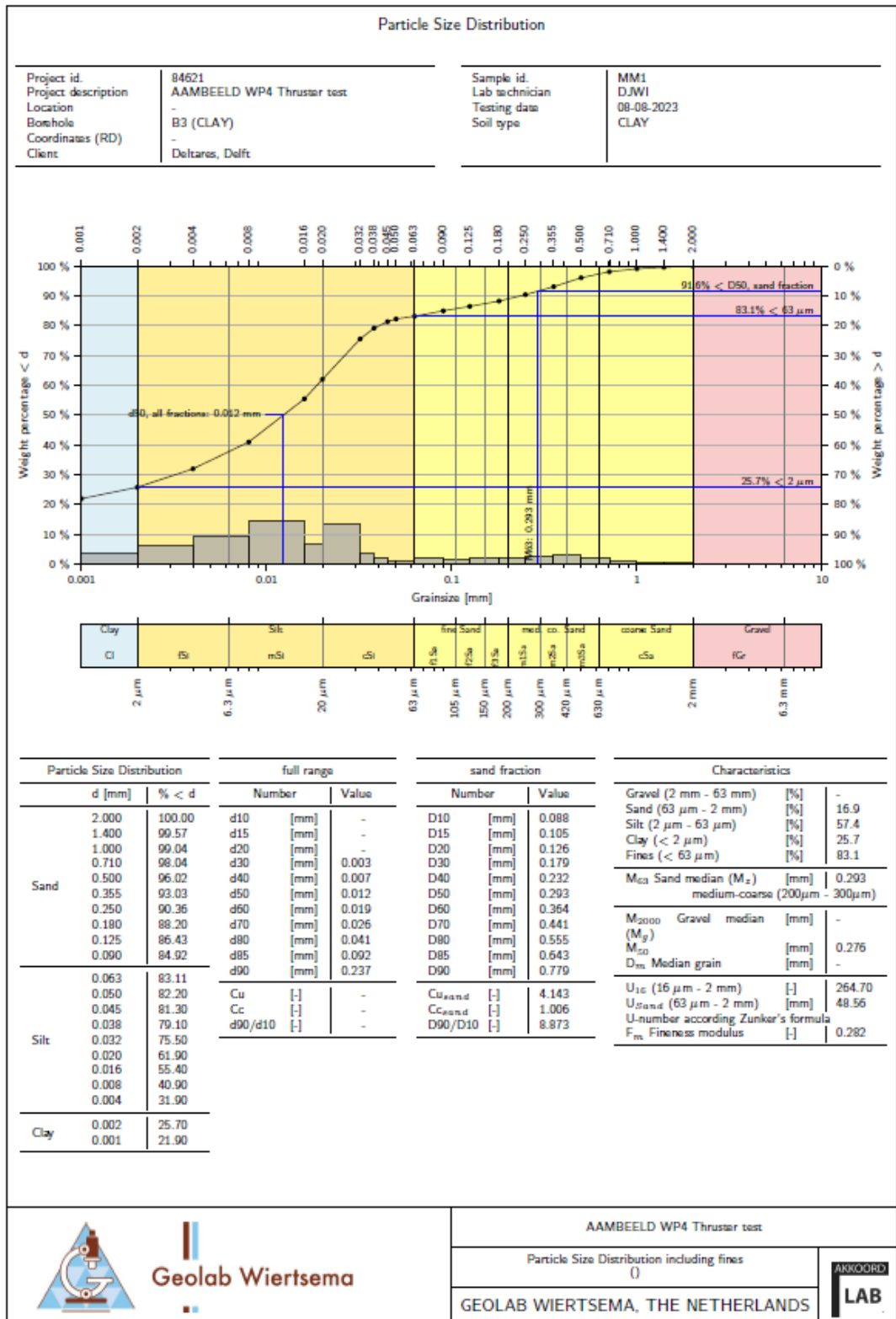
Bij de testen op de verschillende grondsoorten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij los gepakt zand is er een kans op maaiveld zakking. Het wordt aanbevolen om de voortgangssnelheid en de hoeksnelheid van de ruimer hierop aan te passen. Een hogere voortgangssnelheid in combinatie met een lagere hoeksnelheid vermindert de kans om maaiveld zakking. Meting van de druk in de boorkop zou hierbij wenselijk zijn. Er kan dan worden aangetoond dat de gronddrukken dusdanig hoog blijven dat de zakking van het maaiveld gering is.
- Bij vast gepakt zand is de maaiveld zakking door de ruimer zeer gering. Bij de uitgevoerde testen en de gebruikte procesparameters, bleek de maaiveld zakking te verwaarlozen.
- Bij veen dient er aandacht te worden besteed aan de voortgangssnelheid. Bij de test is er sprake geweest van een hoge voortgangssnelheid om maaiveld zakking te verminderen, maar bij een te hoge voortgangssnelheid kan er te weinig veen worden weggeboord en wordt het maaiveld omhoog gedrukt.
- Bij stijve klei is het van belang een hogere hoeksnelheid van de ruimer te hanteren en een lage voortgangssnelheid, zodat verstopping van het afvoersysteem niet optreedt.

A Korrelverdeling zand



B Korrelverdeling klei



C Factual rapport Herrenknecht

Test Report

Project:

F-000620.2.2 Reamer Test

Description:

Testing the operational capability of a Ø 790 mm
reamer prototype



Project Manager:	Maximilian Bischoff
Project Manager (T&I P):	Alexander Meyer
Author:	Alexander Meyer
Testing period:	28.06.2023 – 19.07.2023

Involved external persons of the tests:

Henk Kruse (Deltares)

Piet Meijers (Deltares)

Hans Landwehr (Deltares)

Sijbrand Stratingh (Gasunie)

Ralf Koll (Gasunie)

Kasper Hoiting (Gasunie)

Peter Dennig (DS&A)

Table of contents

1	Nomenclature	5
2	Task.....	5
3	Test setup	6
3.1	Reamer	11
3.2	Hydraulic power unit	14
3.3	Circulation	14
4	Groundwater simulation.....	16
5	Principle experimental procedure.....	17
6	Test parameters.....	18
6.1	Assisting display of the advance speed	18
7	Test plan	20
8	Measuring and data	20
8.1	Circulation	20
8.2	Cutter head	21
8.3	Pipe thruster.....	22
8.4	Heaving and settlement of the surface	22
8.5	Stiffness of the soil	23
9	Data	24
10	Test	26
10.1	Test procedure.....	26
10.2	Test 1 in loose sand	26
10.3	Test 2 in densified sand.....	29
10.4	Test 3 in peat	30
10.5	Test 4 clay	31
10.6	Problems encountered	31
10.7	Test 5 in clay.....	33
10.8	Test 6 in mixed gravel	33
10.9	Test 7 in mixed gravel (second advance).....	34
11	Evaluation of the tests	34
11.1	Evaluation of driving rod	34

11.2	Evaluation of the data recordings	36
11.3	Test 1 in loose sand	37
11.4	Test 2 in densified sand.....	45
11.5	Test 3 in peat	51
11.6	Test 3 in clay.....	56
11.7	Evaluation of the planned tests.....	64
11.8	Test 5 in clay.....	64
11.9	Test 6 in mixed gravel	70
11.10	Test 6 in mixed gravel.....	75
12	Design optimisation options	78
13	Conclusion.....	78
14	Outlook.....	79

1 Nomenclature

T_{CH}	Torque of cutter head	Nm
V_M	Displacement of hydraulic Motor	m^3
Δ_p	Pressure difference across the motor	Pa
Δ_w	Working pressure	Pa
η_{mh}	Mechanical-hydraulic efficiency	
z	Number of hydraulic motors	
i	Gear transmission ratio	
$V_{Overburden}$	Overburden volume flow	m^3/h
V_{Slurry}	Slurry volume flow	m^3/h
V_{Feed}	Feed volume flow	m^3/h
V_{Jet}	Jet pump volume flow	m^3/h
$V_{Advance}$	Calculated advance speed	mm/min.
d_M	Diameter machine	m
d_P	Diameter pipe	m

2 Task

In principle, the test was carried out to investigate and optimise the excavation process of the machine in different soil types. Among other things, the test is intended to show that the machine is an efficient method for installing heating pipes or other kind of pipelines. In this context, the material flow within the suction chamber of the machine is also being examined.

More precisely, the aim is to reliably transport the cuttings (loosened at the working face) via a suction chamber and to optimise the material flow in such a way that the maximum advance rate is achieved.

To achieve this goal, the focus of the tests was on the proper functioning of the water circuit. This means that adjustments may be made to the nozzle of the cutter head and the suction chamber to optimise overburden extraction.

The actual design of the machine and the associated cutter head will not be changed, as this has already been developed by the design department and adapted to the geological requirements.

The customer's requirements for the tests were:

- Tunnel length of min. 4 metres
- Cover from the upper edge of the machine at least 2 metres
- Four different soils are to be tested:
 - loosened sand with groundwater up to the upper edge of the AW
 - compacted sand with groundwater up to the top of the AW
 - Dutch peat with wood content (< 0.1m)
 - compacted clay
- Recording of all relevant parameters of the WKL, including the advance forces and rates and velocities
- Documentation of settlements and heave

Please note:

To avoid misunderstandings, we will continue to use the designation reamer for the tunnelling system, which was previously used and communicated with the customer.

3 Test setup

The tests were carried out in Schwanau with mostly original EPP (E-Power Pipe) system components to simulate a real job site situation as far as possible.

Only the special test components are described below. Information on standard components such as the separation can be found, at <https://www.herrenknecht.com/>.

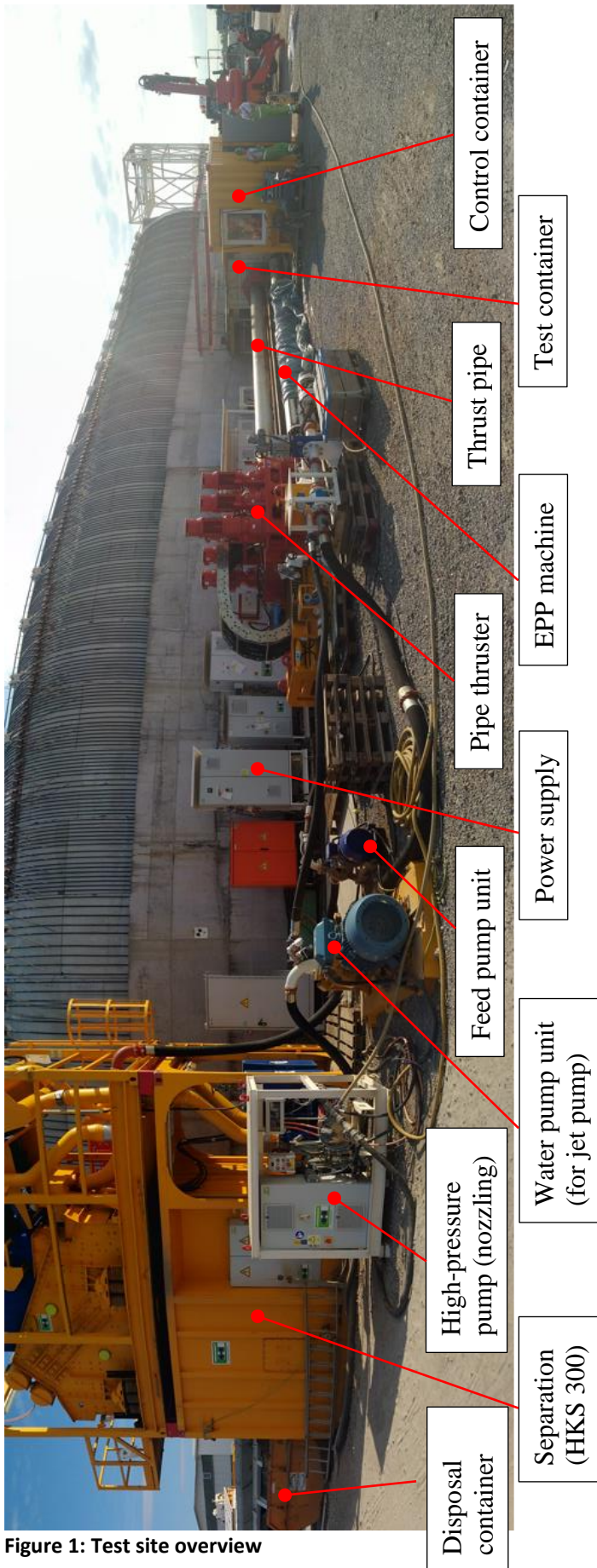


Figure 1: Test site overview



Figure 2: Test site overview 1

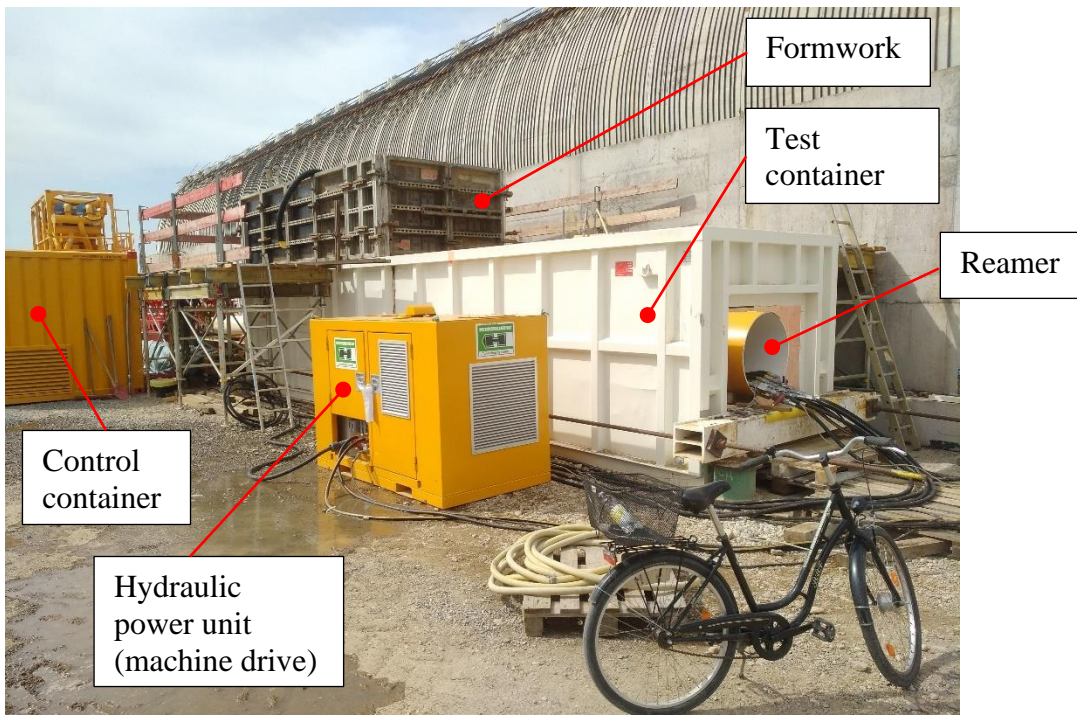


Figure 3: Test side overview 2



Figure 4: Pipe thruster, thrust pipe, EPP

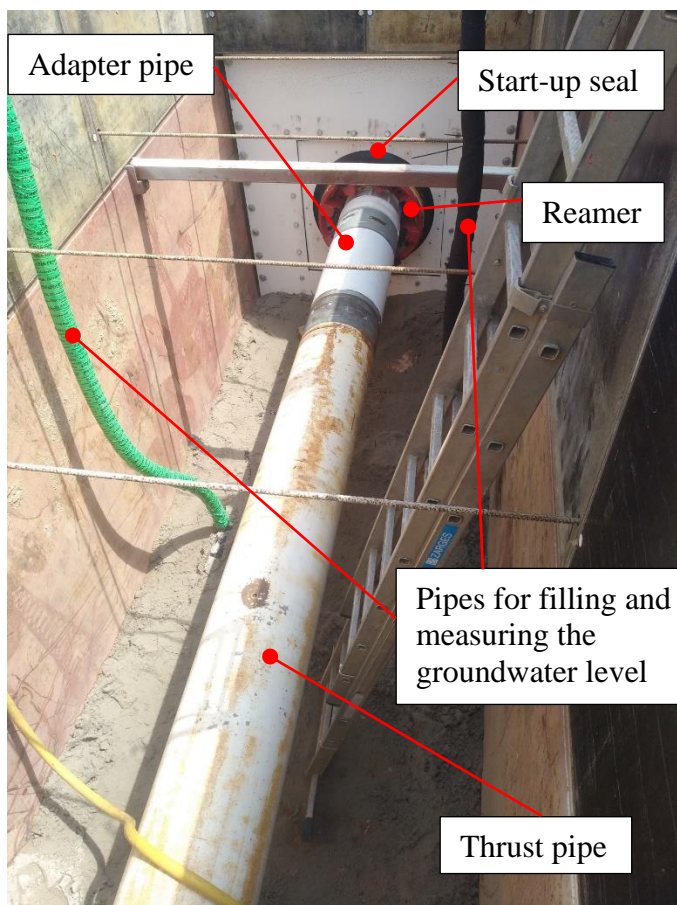


Figure 5: Inside view of test container (reamer)



Figure 6: Transparent pipe

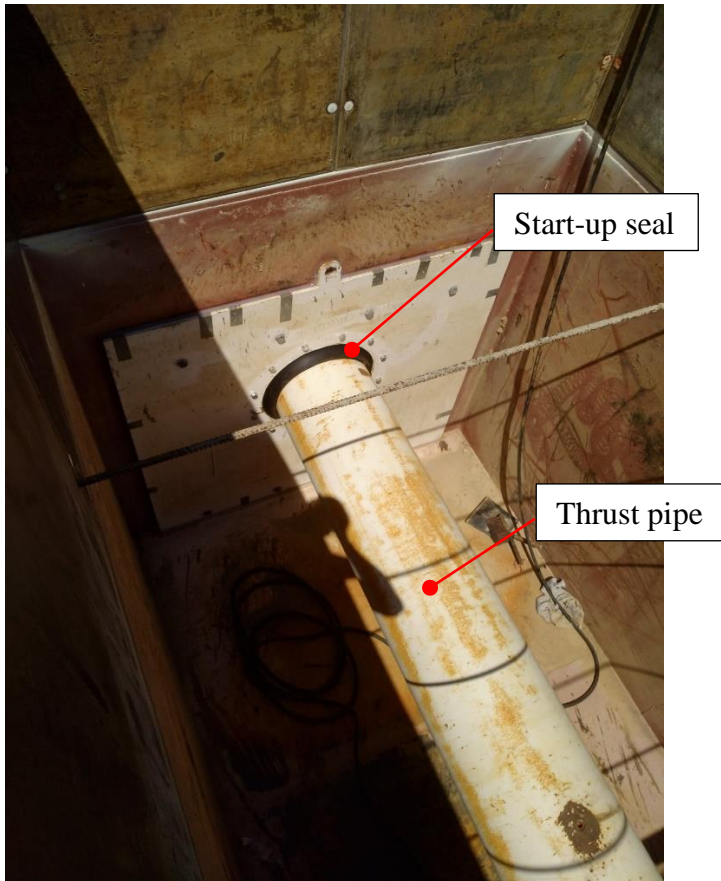


Figure 7: Inside view of test container (thrust pipe)

3.1 Reamer

The prototype of the reamer consists among other things a cutter head and the tunnel enlargement machine with nozzles, drive, crusher strips, ZSM connection as well as a back-up tube. For the connection of the machine with a thrust pipe, a specially manufactured adapter pipe was used.

The supply and cable connections run into the machine from the rear. The slurry line leads out the front and is connected to the thrust pipe via the adapter pipe.

For good accessibility and flexibility, the circulation lines were fitted with ball valves. Some dimensions can be seen in the Figure 11.



Figure 8: Front view of the reamer



Figure 9: Side view of the reamer



Figure 10: Back view of the reamer

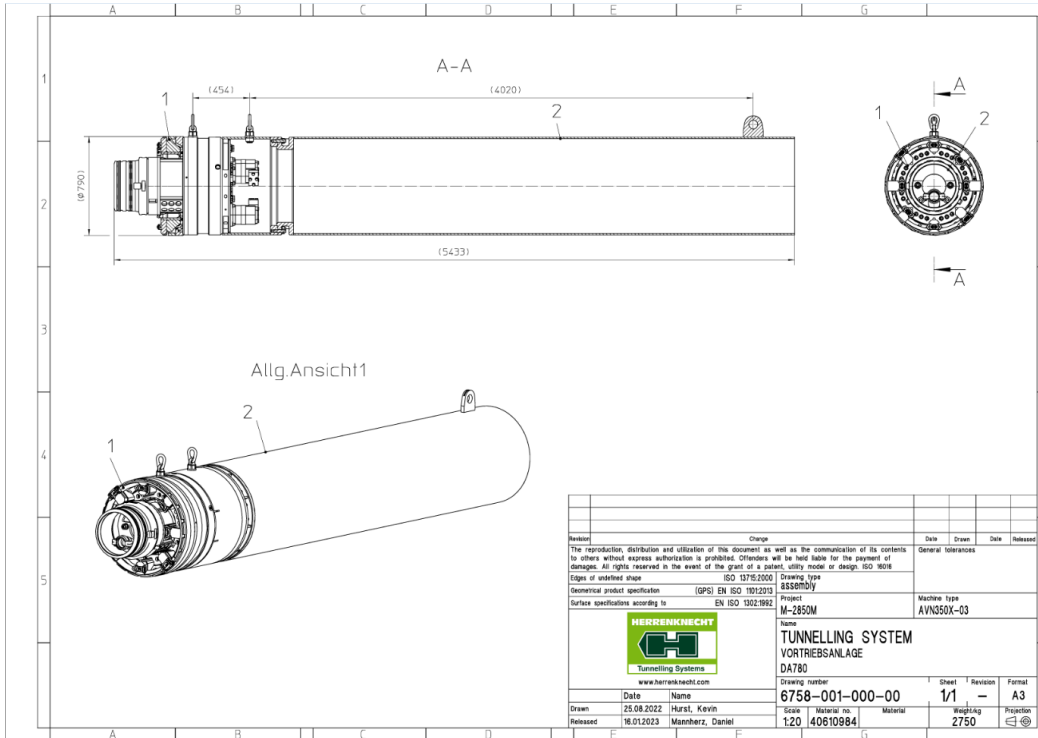


Figure 11: Main dimensions of the reamer

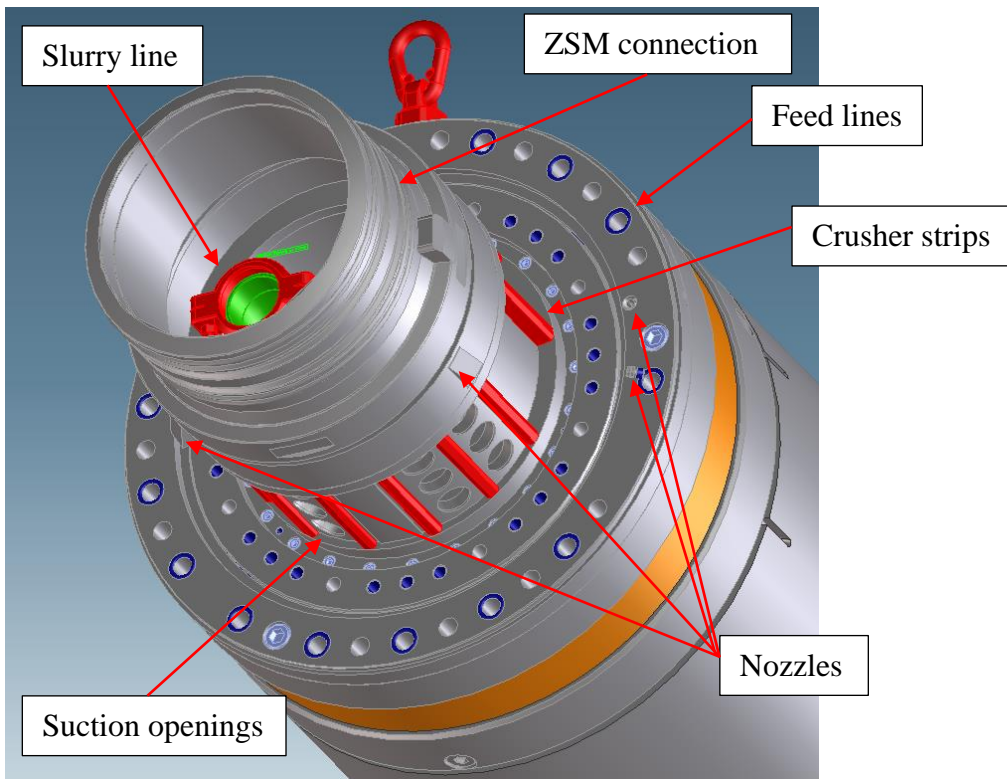


Figure 12: View of the reamer without cutter head

3.2 Hydraulic power unit

The hydraulic unit located in the EPP cannot be used due to its power of 22 kW according to the internal design for the hydraulic drive. A hydraulic power unit with at least 30 kW power is necessary.

For the tests, a hydraulic power unit which was available from the Herrenknecht AG rental park with a power of 55 kW was used. Since the cutter head torque cannot be measured directly, it is calculated after the tests by knowing the cutter head rate and the working pressure.

In addition, the power consumption is calculated to facilitate the subsequent selection of the hydraulic power unit to be used in the machine.

3.3 Circulation

The schematic shown in Figure 13 illustrates the circulation system, which consists of the components of the EPP (purple) and the reamer (green). The setup differs from the original EPP system in that the suction line and the feed line are each extended by 30 m to overcome the distance to the reamer caused by the test setup.

The antler used in the EPP to divide the feed line into four individual lines after the feed slide cannot be removed, which is why the increased friction losses due to four individual lines over the 30m distance have to be accepted. In addition, the increased length of the suction line leads from the reamer through the thrust pipe, through the energy chain of the drill carriage and through the pipe thruster frame.

Approximately 0.3 bar pressure loss is assumed due to the 30 m line length. Due to the negative pressure in the suction line during the subsequent advance, care is taken to pipe the suction line as far as possible because the risk of the hose giving way and blocking the pipeline due to the contraction.

For the circulation function properly, it is important that its components are adjusted to each other and that they achieve the expected flow rates and pressure values. This is to prevent the jet pump from operating at the lower end of its performance range. This also reduces the risk of the jet pump collapsing.

The necessary pressure values in the water line for the jet pump can be determined based on values and tests already carried out on the behaviour of the jet pump and can be calculated and defined in advance.

4 Groundwater simulation

The simulation of groundwater in the sandy experimental soils is an essential part of the test set-up, as the groundwater level is one of the most significant factors for the advance of the AVN machine. The sand used for the tests with groundwater is hydrogeological classified as a so-called aquifer since the water can flow through the cavities between the sand grains. This creates a very soft, mushy soil.

The groundwater level should be controllable in the experimental set-up, so that an increase level by adding water and a lowering of the level by withdrawal of water. With such a controllable set-up it is possible to precisely and the experimental setup will be independent of environmental influences such as rain.

After a small test with a 20 l and 50 l bucket, to check how much water is needed to reach a given water level, a model test was carried out with 700 litres of sand in an IBC container. A measuring tube with a level sensor was installed on the side so that the level could be determined via the pressure of the water column in the measuring tube.

The water is brought in from below with a drainage pipe consisting of 1" rubber hose with 30 x 5mm holes distributed along the length of the hose. The hose is laid out in a ring and wrapped with fleece to prevent the sand particles from penetrating the drainage line

The documentation of the water level via the sensor is sufficiently accurate and filling via the drainage pipe from below also works.

For the tests with the widening machine, the groundwater was introduced via a taped DN80 pipe and the water level was controlled by means of two DN80 drainage pipes with fleece (see Figure 5).



5 Principle experimental procedure

In all tests, the reamer was pulled through the soils by using the drill carriage and a thrust pipe. After each test and completed measurements, the machine was pushed back through the soil, a new soil was installed and the machine was brought back to the start position.

The core component of the test setup was a container equipped with one start-up seal for the thrust pipe and one start-up seal for the machine. The test setup shown in Figure 14 as a sectional view shows the machine in the starting position shortly before the start of advance. To enable the required cover of 2 m, an additional 1.3 m high formwork was placed on the test container.

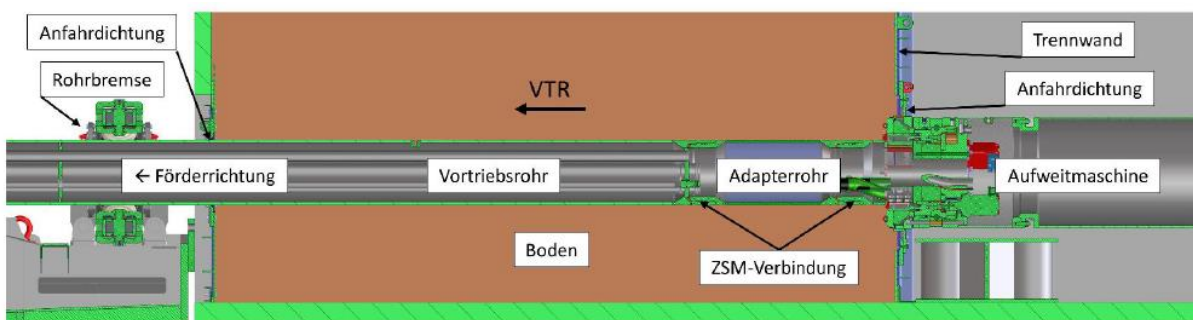


Figure 14: Sectional view of the test container

6 Test parameters

The parameters for circulation and machine components can only be determined in advance based on experience. The machine operator adjusts them to the current advance behaviour. Other parameters, such as the procedure during soil installation, as well as the position of the reamer after it has been pushed through the start-up seal were still defined.

This is to ensure that the tests are comparable in retrospect. Since each machine operator controls the machine individually, care is also taken to ensure that the same driver always operates the machine.

The following parameters are available to the machine operator for the advance. It should be noted that these are dependent on each other and cannot be set at will.

- cutter head rate: 0-12.5 min⁻¹
- Working pressure: 0-200 bar (not directly adjustable, mainly dependent on soil properties, the cutter head rate and the advance rate).
- Advance rate: 0-600 mm/min (higher is possible, but not realistic)
- High-pressure water spraying: 0-40 l/min at up to 200 bar distributed to 4 nozzles; 2 nozzles each via nozzles; 2 nozzles each can be shut off via ball valves
- Feed flow: 0-40 m³ at up to 6 bar
- Feed lines of the suction chamber are divided into upper and lower section and can be shut off individually (see Fig. 4.5).
- Water line for jet pump: 0-45 m³ at up to 13 bar

In all test runs, the advance was started at a tunnel length of 0.24m. This ensured that the start-up seal was in full contact and no contact with the cutter head. In addition, all ball valves of the feed lines were opened in order to have the same start situation for each test run. The advance is 4.7m, leaving 0.2m between the cutter head and the wall of the test container.

6.1 Assisting display of the advance speed

In order to reduce the risk of heave and settlement, a table is created according to equation below to serve as a guide for the machine operator. Table 5.1 can be used to determine the rate of advance in comparison to the volume of overburden currently volume of excavated material. However, it should be noted that, depending on the

type of soil, the optimum rate of advance cannot be determined only based on the parameters such as the working pressure. Equation for the advanced rate is obtained by the overburden volume flow is set in relation to the annular drilling area. The factor of 200/3 in equation is obtained by converting the units.

$$\dot{V}_{Overburden} = \dot{V}_{Slurry} - (\dot{V}_{Feed} + \dot{V}_{Jet})$$

$$v_{Advance} = \frac{200 * \dot{V}_{Overburden}}{3 * \pi * (d_M^2 - d_p^2)}$$

With the diameter of the machine of 0.79 m and the diameter of the pipe of 0.457 m, the following value results:

Table 1: Advance rate depending on overburden volume flow

Overburden volume flow [m ³ /h]	1	2	3	4	5	6	7
v _{Advance} [mm/min.]	51	102	153	204	256	307	358

7 Test plan

Table 2: Test plan

Nr.	Soil	Groundwater	Comment
1	0/1 loose sand	yes (level: 1,7 m)	Test of the general interaction of all components
2	0/1 densified sand	yes (level: 1,7 m)	Real soil conditions for the first time
3	Peat uncompact, moist wood particles (< 0, 1m)	no	Size and weathering condition of the wood particles are decisive
4	Densified clay	no	Uniform densification is doubtful

8 Measuring and data

In the following, the measurements during the tests are described.

8.1 Circulation

Feedline:

The volume flow and the pressure of the feed line inside the EPP machine as well as the pressure of the feed line in the reamer were measured and recorded.

Waterline for jet pump:

The volume flow and the pressure of the waterline for the jet pump were measured and recorded.

Slurry line:

The volume flow and the pressure of the slurry line were measured and recorded.

High pressure water:

The pressure of the high-pressure water for water nozzles of the reamer was measured and recorded.

Water level in the test container:

Two level measurement sensors were used to monitor the groundwater level in the test container. In addition, the water level was monitored visually by means of a transparent pipe, which was placed outside the test container (see Figure 6).

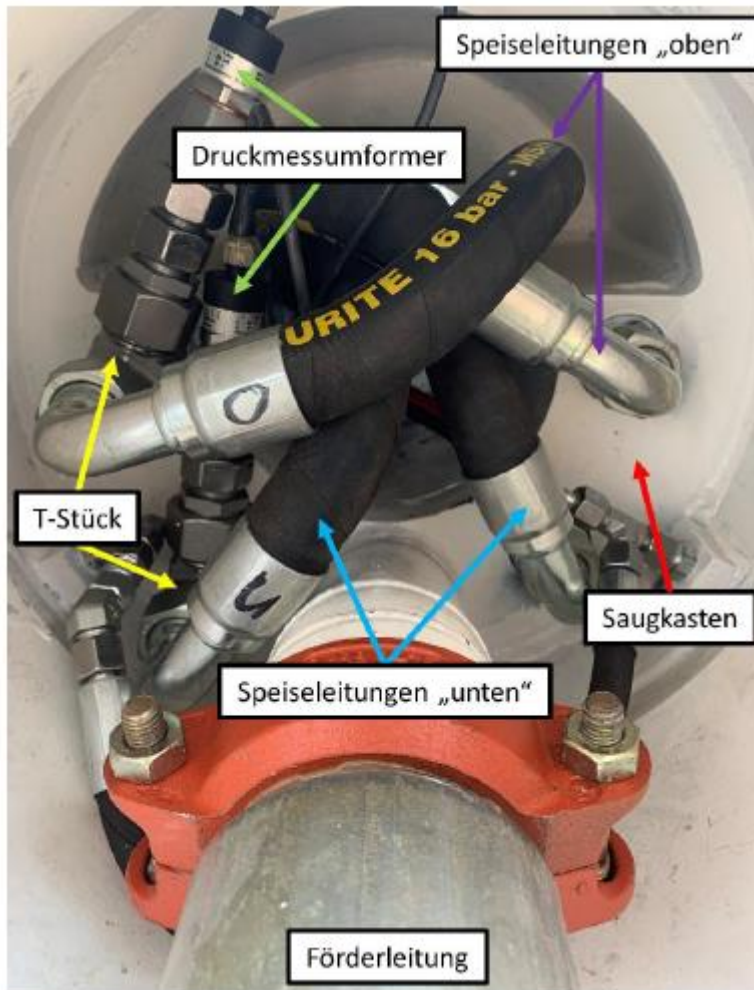


Figure 15: Connections on the suction box of the reamer

8.2 Cutter head

Torque:

The working pressure was measured and recorded near to the hydraulic motors of the reamer. This is an important value for machine operators to drive the machine. The torque of the cutter head can be calculated by means of the working pressure with the following formula:

To calculate the cutter head torque T_{CH} , first the torque of the of the hydraulic motors T_M in the machine is calculated and then multiplied by the number z of motors and the transmission ratio of the transfer gearbox multiplied. The following is an example calculation for an operating point during the test in sand. For reasons of space, the calculation will not be repeated. The cutter head torque is thus given by:

$$T_{CH} = \frac{V_M * \Delta p * \eta_{mh}}{2 * \pi} * z * i$$

Where V_M is the displacement per motor, Δp is the pressure difference across the motor

and η_{mh} is the mechanical-hydraulic efficiency. The values for the displacement, the mechanical-hydraulic efficiency and the transmission ratio transfer gearbox are taken from the design for the hydraulic drive. The pressure difference Δp at the hydraulic motor results from the working pressure p_w , which is reduced by a general loss coefficient due to line resistances of 3%. This results in:

$$\Delta p = 0,97 * p_w$$

By taking the values from the exemplary time 10:26:00 hrs. (Figure 30 Figure 30: Test in loose sand (circulation, first third)), the cutter head torque at this point is given by:

$$T_{CH} = \frac{499 * 10^{-6} m^3 * 0,97 * 20 * 10^5 Pa * 0,88}{2 * \pi} * 3 * 6,5 = 2643,9 Nm$$

Rotational rate:

The rotational rate of the cutter head was measured and recorded at the gearing.

8.3 Pipe thruster

Position:

The position of the carriage is measured.

Force:

The force required to move the drill carriage is also measured and recorded.

Tunnel length and advance rate:

The tunnel length and advance rate is measured by a measuring wheel placed between the start-up seal and the thrust pipe.

8.4 Heaving and settlement of the surface

To detect heave and settlement of the surface, a trolley with two lasers was used. One laser measured the path of the carriage, the other laser measured the distance to the surface. The measurements were taken before and after each drilling. By comparing the two measurements, heave or settlement should be detected.

Please note:

The fifth measurement (measurement directly above the machine) was chosen for the graphs.



Figure 16: Trolley for detection of heave and settlement

8.5 Stiffness of the soil

The installation of the soil for each test was carried out by an external construction company and was additionally compacted in layers depending on the desired soil composition and density.

To document the density of the installed soils, a Künzel bar was used which according to DIN EN ISO 22476-2, falls under the category of pile-driven soundings in the geotechnical exploration and investigation. The Künzel bar is one of the light ram penetrometers of the type DPL (Dynamic Probing Light).

The procedure is based on the repeated lifting and dropping of a weight (so-called ram), which is mounted on a rod, which is rammed into the ground by the dropping of the weight. The number of hits per ten centimetres of penetration is recorded as the number of hits N10. The Künzel rod is rammed into the ground to the desired depth.

According to DIN 4020, "[...] supplementary direct explorations (key drillings) are always to be carried out during probing for the exploration of the ground.

Such a key borehole was not used for the tests of the reamer, as no different, superimposed soil types are planned in the tests. The soil type only changes between the tests. Thus results can be quantitatively evaluated by knowing the soil type even without a keyhole.

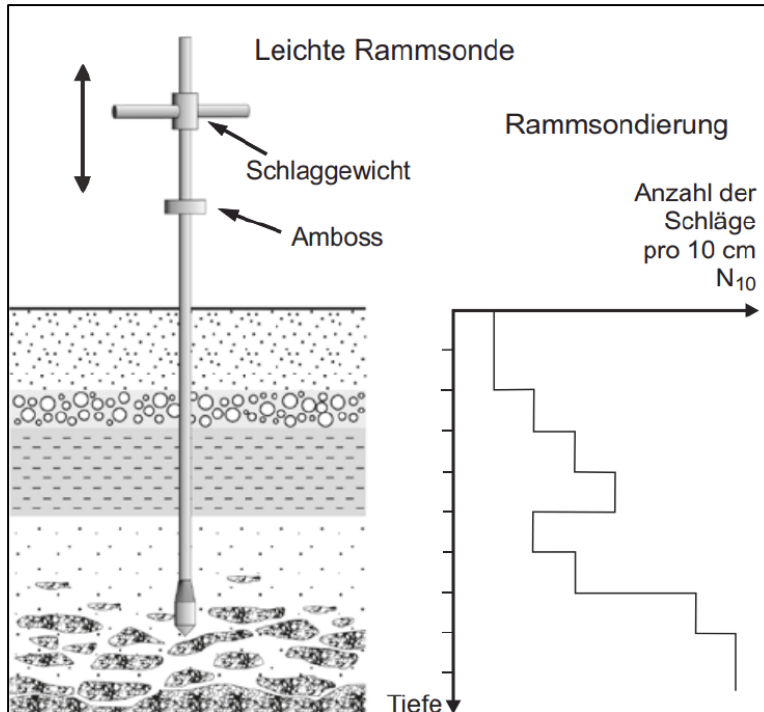


Figure 17: Sectional view of a penetration test with the Künzel bar (left) and the sounding diagram (right) (Source: Ulrich Sebastian. Gesteinskunde - Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender)

9 Data

To be able to implement the requirement for the test regarding the documentation of machine parameters during tunnelling, various electrical measuring equipment was installed. These devices are limited to two systems:

- Hydac HMG3010 measuring computer
- SPS control of the machine (all machine data of the SPS program are permanently recorded and can be viewed online in the Herrenknecht Connected portal)

Two water level measuring sensors were connected to the Hydac measuring computer and inserted into the measuring pipes mentioned above down to the bottom of the test container. In addition, a pressure transducer was connected to the Hydac measuring computer, which measures the pressure in the hydraulic circuit (working pressure). An external hydraulic unit was used to drive the reamer, this pressure cannot be recorded via the SPS, this would only be able to record data from the hydraulic unit installed in the EPP.

The working pressure in the machine indicates whether material is present at the machine's drilling head and how strong it is. The working pressure is also related to the rate of advance. By knowing the working pressure (and the hydraulic motors in use), the applied cutter head torque can be determined. In addition, two pressure transmitters (measuring range: -1 to 9 bar) were connected, each mounted on a T-piece positioned between the feed lines and the inlet to the suction chamber of the reamer (see Figure 15).

All other machine data is recorded via the SPS programme of the EPP machine. As the complete water circuit of the EPP is used for the tests, there is no change of the installed sensor technology.



Figure 18: Hydac HMG3010



Figure 19: Visualisation in the control container

10 Test

10.1 Test procedure

The experimental plan in Table 2 is used as a basis for carrying out the experiments. The following chapters summarise the respective tests and contain sections, without which the further execution of the tests would not have been possible.

Detailed evaluation follows from chapter 11 onwards.

10.2 Test 1 in loose sand

The installation of the sand turned out without any problems. Care was taken to ensure that sand is also in place under the thrust pipe. Filling with groundwater was also no problem. However, it was always necessary to wait a certain amount of time until the levels were even. During the filling, the level of the sand has dropped about 0.1m.

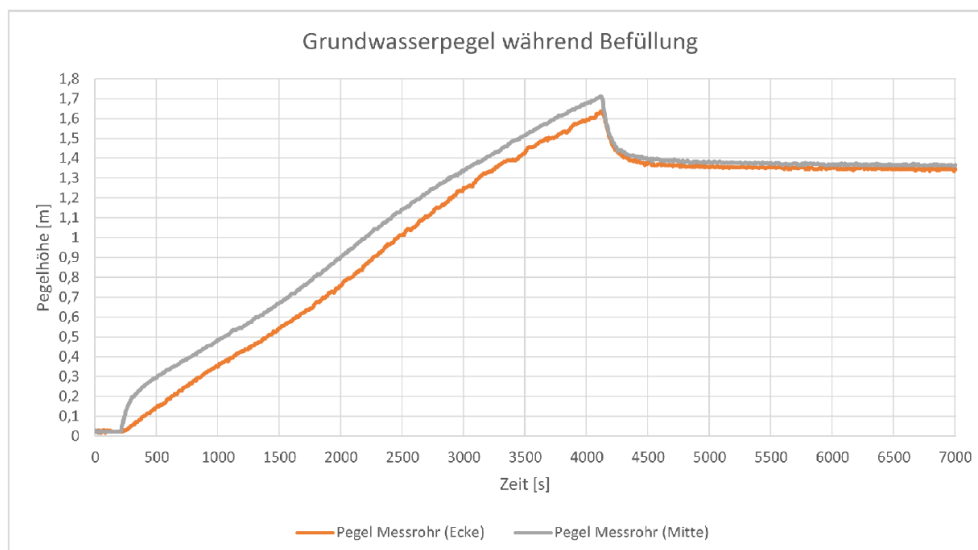


Figure 20: Groundwater level in loose sand during filling

For the test, the groundwater level was raised to 1.7 m to completely cover the reamer with groundwater.

A measurement with the Künzel rod that is reliable for evaluation was not possible, because after three hits the rod has reached the depth of two metres.

After 1.0m of advance, it became apparent that water had leaked between the container and the formwork positioned on top of the container. This indicates that the groundwater must have risen to 2 m height. The rise can only have been caused by soaking feed water, as otherwise no liquid medium was introduced.

After 1.8m of advance, the signal for the working pressure failed due to a broken sensor cable. In order to be able to measure the working pressure the advance was stopped and the sensor

replaced. The borehole was drilled to the end. The water leakage between the container and the formwork continued until the end of the drilling.

During advance, it became apparent that the volume flow of the feed line at maximum power output of the feed pump does not exceed 12 m³ at a pressure of 1.8 bar. This behaviour is untypically low and, according to the pump characteristic curve, the feed pump was operating in this range below the minimum volume flow.

After checking whether the behaviour changes when the feed line goes via the bypass, it was clear that it was due to the long feed line between the EPP and the reamer. To reduce the pressure loss in these lines, the previous hoses (25S; ID = 20mm) are replaced by larger hoses (42L; ID = 38mm).

This should also contribute to the fact that in the second test the difference between the feed and delivery volume flow is smaller, so that there is no extra discharge and the settlements are reduced. A measurement of the suction volume flow is also carried out in order to be able to estimate the suction volume flow that the jet pump produces at full capacity.

If this is significantly higher than the maximum feed volume flow that can be brought in, there is a difference between these volume flows which leads to an additional discharge. For the measurement, the jet pump is run up to full capacity and the bypass is opened. The feed pump is set in such a way that a feed pressure of 0 bar results.

If this is significantly higher than the maximum feed volume flow that can be brought in, there is a difference between these volume flows which leads to an additional discharge. For the measurement, the jet pump is run up to full capacity and the bypass is opened. The feed pump is set in such a way that a feed pressure of 0 bar results.

According to Figure 21 the suction volume flow is 47 m³/h at 09:38:20 hrs. and corresponds at this point to the feed volume flow shown in the diagram.

This value indicates that the 12m³/h of the feed line was not sufficiently high enough to prevent excess discharge. Due to the shorter section, the open bypass position compared to the closed position during the advance, the 47m³/h do not quite correspond to the actual feed volume to be aimed for. It was assumed that a feed volume flow in the range of 30-40m³/h is sufficiently high.

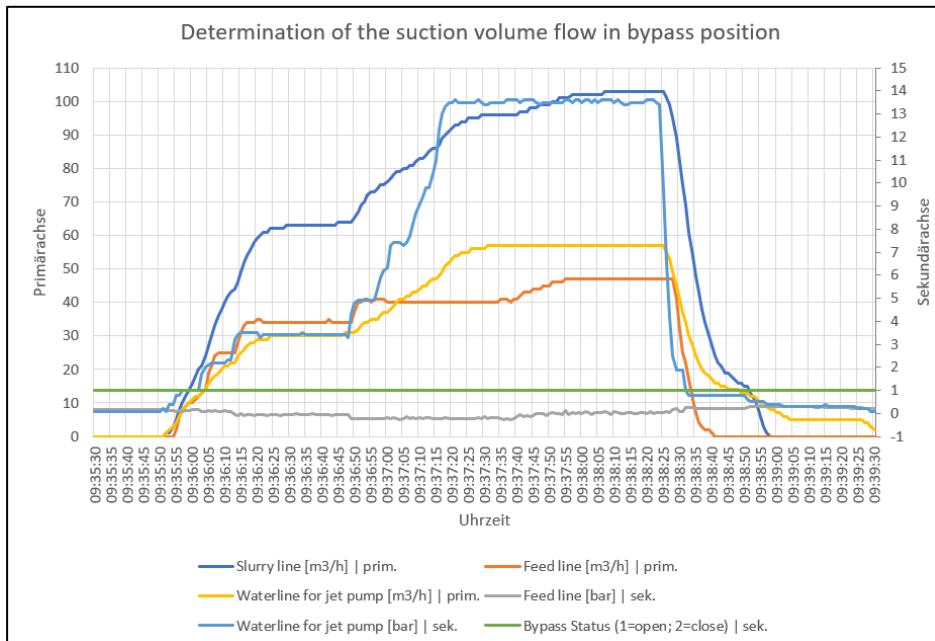


Figure 21: Diagram for determining the suction volume flow in bypass position

There is a strong settlement ($> 0, 1\text{m}$) during advance. In Figure 22 it can be clearly seen that the surface of the sand has settled and cracks have formed.



Figure 22: Settlement before (left) and after advance (right)

The cracks and slight accumulations of material in the transverse direction to the tunnel axis are due to tension bars that are located inside the formwork and absorb the lateral forces of the ground load.

A detailed evaluation of all data is given in chapter 11.3.

10.3 Test 2 in densified sand

The filling with groundwater showed a similar behaviour as in loose sand. The level rose first in the area around the filler neck, so that the level in the centrally placed measuring tube rose first (Figure 23: Height of the groundwater level in densified sand during filling). In the measuring tube placed in the corner, the level rises with a corresponding delay. The faster rise in the level is notable.

The three clearly visible peaks of the curve in Fig. 5.5 are due to a stop during filling to allow the water to percolate. The filling up to a level of 1.7m was not recorded due to time constraints. During filling in compacted sand, in comparison to loosen sand, there is no settlement.

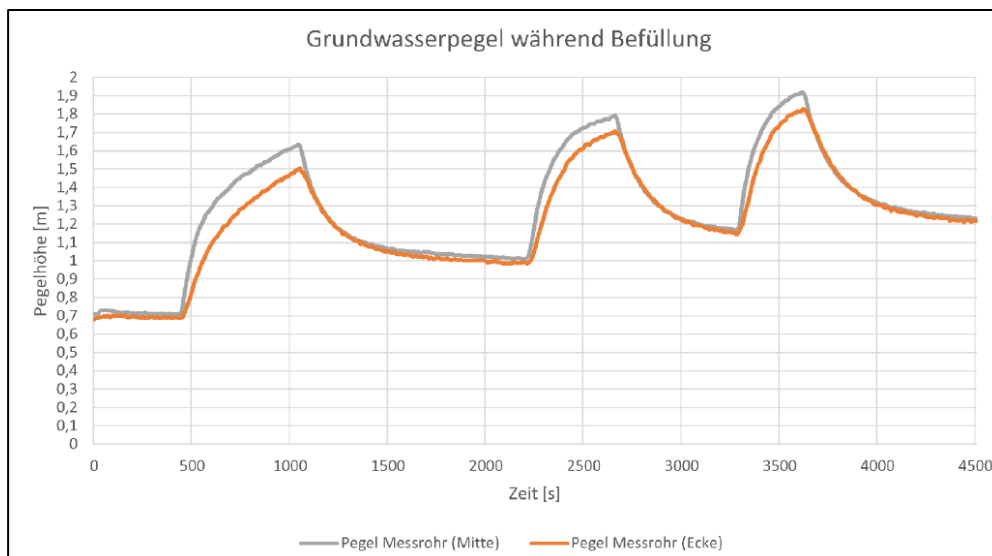


Figure 23: Height of the groundwater level in densified sand during filling

The advance was stable for the first metre at an advance rate of 250-300 mm/min for the first metre until, at a tunnel length of 1.3 m, the start-up seal overturned in a section of approx. 0.4 m. As a result, no more pressure could be built up in the cutter head space and the flow rate drops, as most of the water flows out directly through the start-up seal. In addition, as in the in the first test, there is also a lateral water leakage between the container and the formwork.

During a stop in the advance process, the start-up seal was successfully fold down again. The second half of the section can be driven up with advance rates between 350 - 500 mm/min. However, water continued to leak out of the sides during this time.



Figure 24: End position in densified sand

10.4 Test 3 in peat

The third test was carried out with Dutch peat. As it was decided for practical reasons to leave the drainage pipes in the container, a layer of 0.3 m of sand remained in the lower part of the container. To ensure that peat would also be present under the thrust pipe after the soil had been installed, one side next to the thrust pipe was first filled with peat and then pressure was applied to the soil with the excavator shovel until the soil began to swell out from under the pipe.

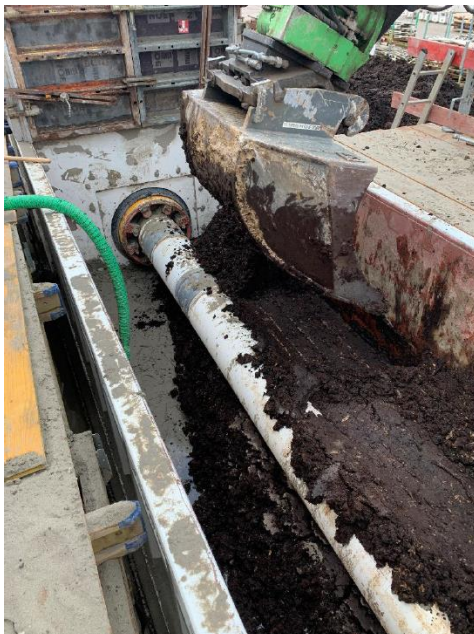


Figure 25: Installation of peat

During installation, compaction by means of a vibratory plate was not carried out, as this would only force out the water contained in the peat. The consistency of the peat was sticky, soft and slightly jelly-like. A measurement with the Künzel rod is not possible, because it

sinks into the soil due to its own weight.

Due to the release of gases in the peat, the volume decreased after installation. This process, as well as subsequent settlement of the peat by evaporating water, was taken into consideration in so far as another settlement measurement was carried out two hours after the end of advance.

No measurement of the groundwater level took place during advance. Nevertheless, as in the first two tests, water leaked out between the container and the formwork after 1.5m of advance. The parameters of the circulation were uniformly stable and advance rates between 450-600mm/min were achieved. There was a slight heave of the peat (< 3 cm) during the test. Whether the uplift is related to the high advance rate will be clarified in the evaluation in chapter 11.5.

It was noticeable that little to no overburden was dropped from the separation. A sample taken from the slurry showed that the peat particles were so small that they apparently went into suspension with the water. Sedimentation of the peat particles in the sample only occurred after more than one hour. Since the separation equipment used was not able to separate the fine peat particles from the drilling fluid, the entire overburden volume remained in the drilling fluid. To separate these particles, an even finer separation stage would be necessary - a so-called finestage.

10.5 Test 4 clay

In order to create neutral starting conditions for the test with clay after the first three tests, the water of the separation was exchanged and the sediments in the two chambers of the separation were shovelled out. After the sand tests, there was a sand layer of between five and ten centimetres in both chambers and the measured density was 1.1 g/cm³.

Advance rates of 200-400mm/min were achieved.

There was also, as in the previous tests, a water leakage between the formwork and the container. The behaviour of the circulation is unusual in that the suction pressure shortly jumped to positive. These jumps indicate irregularities in the suction process and may have been caused by short-term blockages. A more detailed description and analysis of these observations is carried out in chapter 10.6.

10.6 Problems encountered

The problems encountered during the tests are limited to the following major points:

1. Due to a missing sealing possibility between the experimental basin and the formwork positioned on it, drilling fluid leaked during all planned tests. The total volume can only be estimated on the basis of the filling level of the separation and amounts to less than 1 m³ per test. The values of the slurry volume can no longer provide reliable information about

- the amount of overburden from the point of water discharge. The problem of the leaking drilling fluid is related to the fact that it reaches a high
2. percolation rate in loose and dense sand, as well as in peat, and thus the groundwater rises quickly with a slight increase in inflow at the working face. The experiment with clay showed the same phenomenon, whereby here the escaping drilling fluid suggests existing cavities (despite compaction) through which the drilling fluid can distribute itself within the soil. In addition, it is possible that too much water was fed into and at the same time too little was pumped. The difference is distributed in permeable soils and causes the groundwater to rise.
 3. During test run no.2 (densified sand), the start-up seal folded over, causing water to escape at this point. Due to the escape of drilling fluid, pressure could no longer be built up at the working face. At the same time, overburden extraction was made more difficult because less water was available for it.
 4. During all test runs, visible settlements and heave occurred, suggesting that material was displaced in front of the cutter head (heave), or too much material was extracted (subsidence). Such behaviour is associated with a rate of advance that was not adapted to the parameters of the water circuit.
 5. During test run no.4 (clay), it was noticeable that the suction pressure did not remain in the negative range, but jumped into positive ranges up to 1.5 bar. Such behaviour suggests that the jet pump is clogged by larger overburden particles such as pieces of clay or stones. At the same time, the negative pressure generated by the jet pump collapses and takes on the value of the overpressure present due to the feed nozzle in the space of the cutter head. The pressure transducer considered in this case is located in the EPP machine just before the bypass. A detailed investigation of the problem is given in chapter 11.10.

In order to adjust the risk of heave and settlement, a table is created to serve as a guide for the machine operator. The value can be used to determine the rate of advance in comparison with the volume of overburden volume currently being extracted. However, it should be noted that, depending on the type of soil, the optimum advance rate cannot be determined precisely, because it is also influenced by other important parameters such as the working pressure.

As the occurrence of clogging at the jet pump has a considerable influence on the the reliable functioning of the reamer, the clay test was carried out again, however without the formwork, as the height of the cover plays only a minor role in the investigation of this behaviour. In addition, another test run was carried out in which the first half was mixed 0-45 ,mm gravel and the other half with 0-56 mm gravel.

Both tests are intended to show to what the occurrence of tampers is reproducible and whether the grain size and strength of the particles have an influence on the overburden transport.

10.7 Test 5 in clay

In order to carry out the previous test in the clay again, the clay was placed in the same layers as in the previous test. This was to achieve reproducibility of the observations. It was found that the suction pressure again jumped into the positive range after 0.5 m advance. At this point, however, the ball valves of the suction box nozzle were still closed. It was forgotten to open them before the start of tunnelling. This showed very clearly that the correct suction box nozzle has a big influence to the suction process.

After opening the ball valves, there are no further irregularities in the suction pressure.

10.8 Test 6 in mixed gravel

For the tests in the mixed gravel, the machine was first retracted after the clay test and the clay removed to the depth of the jacking pipe. Subsequently the first half of the borehole, which was still stable, was filled with 0-45mm gravel, the second half with 0-56mm gravel. This was followed by a layer of clay as top layer, which was compacted with the vibratory plate. After 0.4m of excavation, the sudden drop in the in the flow rate indicates a blockage in the jet pump. It succeeds the blockage by running up the pumps several times. Shortly after resuming advance, there was another blockage. The cause was found to be a stone stuck in the jet pump's nozzle. In addition, there is an accumulation of material in the suction line shortly before the jet pump.

The stuck stone indicates that the diameter of the nozzle of the jet pump (45mm) is too small, or the grain limiting openings on the suction box of the reamer are too large.

Since the jet pump is an internally balanced system in which the diameters of the individual components are designed to maximize the efficiency of the system, the grain limiting openings were considered in more detail.

It turned out that the openings, which were 40 mm in size according to the drawing, sometimes had diameters of up to 43 mm due to tolerances in the application of the wear protection. The only way to prevent further blockages is to increase the diameter of these openings by applying more wear protection.

The diameter of the openings was reduced to 35 mm and checked with a gauge. It only minimizes the risk of clogging at the jet pump and does not eliminate. Due to their large ratio between length and width, elongated, narrow stones, so-called fish, can be transported through the grain limiting openings and become stuck crosswise in front of the jet pump's catching nozzle. Such cases cannot be completely excluded, but are rather unlikely, since the narrow stones orient themselves with their longitudinal axis during the conveying in the direction of the flow.



Figure 26: Grain limiter on the suction box

10.9 Test 7 in mixed gravel (second advance)

Following the optimization of the grain limiting openings, this test serves to prove that the reduced openings of the suction box prevent further blockage at the jet pump. Due to the increased occurrence of large stones (>45mm) during advance, the working pressure exceeds the set limit of 200 bar at times.

The average advance rate was between 100-150 mm/min and no further blockage occurred. The advance rate was adjusted to the theoretically optimum value. The frequently occurring pressure pulsations at the working pressure indicate that the stones were cracked by the crusher bars.

Nevertheless, this test was an exception for the use of the reamer, as the design is not for continuous operation through rough gravel.

11 Evaluation of the tests

11.1 Evaluation of driving rod

The probes with the Künzel rod are mainly carried out for documentation purposes. If a soil had to be installed a second time in the test container, the previous probe could then be used as a reference. Nevertheless, the data obtained provide important insights into the soil layers in the test container. Due to the low storage density of loose sand and peat, only probes in compacted sand and clay can be carried out.

Figure 27 shows the number of impacts N10 required per ten centimeters of penetration depth as a function of the absolute depth. The course of the blow counts in sand with

groundwater is similar to the course of the blow counts in sand without groundwater up to a depth of 1.4m. By filling with groundwater, the level is adjusted to 1.7m.

This corresponds to a depth, measured from the surface from the surface of the sand of 1.6m, since the experimental container has a height of 2m and the formwork on top of it has a height of 1.3m. The formwork is filled with sand to the upper edge. Figure 27 shows that already from a depth of 1.5 m, the impact numbers in sand with groundwater are significantly lower than in dry sand.

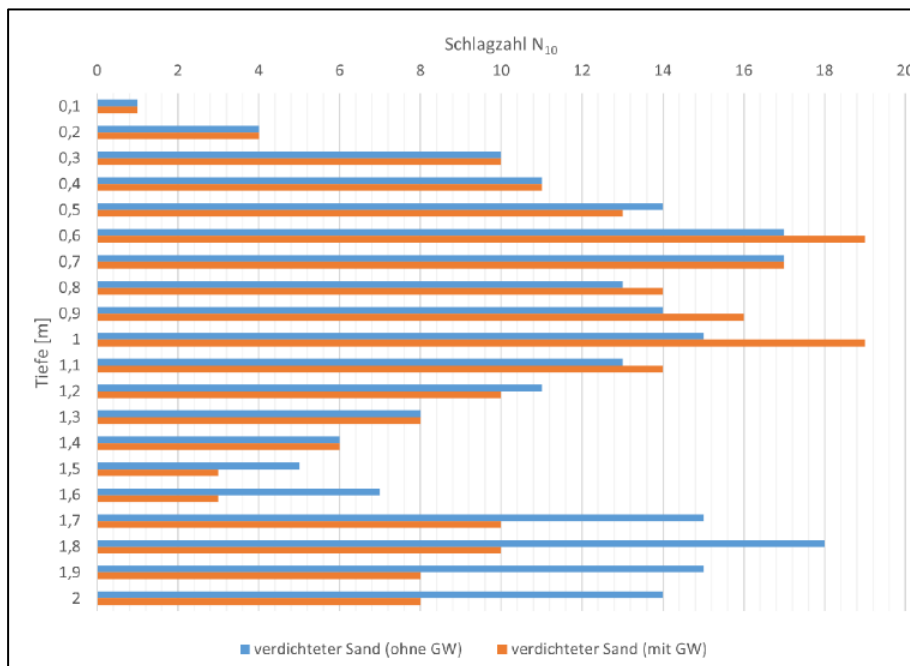


Figure 27: Impact diagram for penetration tests in compacted sand

Thus, the level of the groundwater can be read directly from the diagram. In addition, clear differences in the compactness in the individual depth ranges can be recognized. In the range between 0,6-1,0m depth the number of strokes is about 15 strokes. For a non-cohesive soil this corresponds to a loose to medium density.

Meanwhile, the impact numbers are at a depth of 1,3 - 1,6m at 3-8 impacts, so that at this place a very loose to loose bedding density is present. These differences in the density are due to the individual compaction levels, which occur because the use of a vibratory plate.

Soundings in clay were carried out at an installation height of 2m of the soil, as this allowed timely determination of whether irregularities had occurred in the bearing density. The timely detection of irregularities is necessary because the installation of the clay soil is time-consuming and

it cannot be poured like the other types of soil and, moreover, it must be compacted in smaller layer thicknesses than, for example, sand. This is to avoid the need for repeated excavation and installation.

Probes were carried out at two locations. The diagram resulting from both probes. In Figure 28 it can be seen that the clay was installed homogeneously up to a depth of 1.6m. Only in the range of 0.9 - 1.1m a significant difference in the impact numbers is observed. This is possibly

due to the fact that the clay at position 2 up to a height of 1m had already been placed the day before and that the top layer had therefore dried out and hardened.

The sudden increase the number of impacts from a depth of 1.7 m can be attributed to the presence of a sand layer of 0.3 m in the lower part, which protects the drainage pipes of the first two tests. A measurement of the impact number for a depth of 2.0 m is not possible, because at this depth the bottom of the test basin is reached.

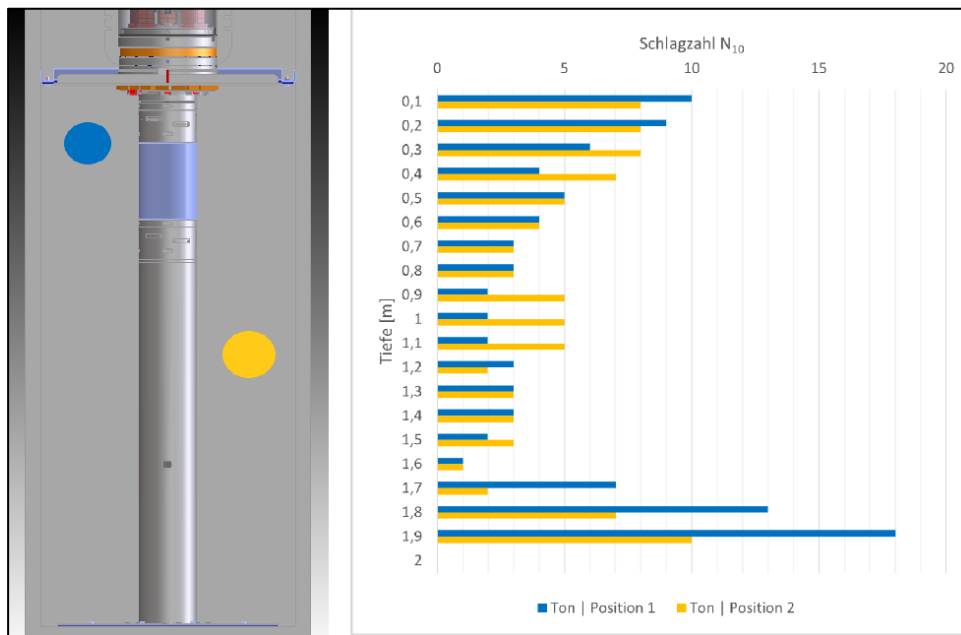


Figure 28: Position of the samples and diagram of the impact numbers in the clay

In general, the data of the probing carried out show comprehensible and acceptable values for the tests. At the same time, the data provide a good reference for future applications of a penetration test with the Künzel rod.

11.2 Evaluation of the data recordings

To be able to evaluate the data recorded during the advance, it is necessary to link the data from the SPS program with the data from the Hydac measuring computer.

The respective time stamps are compared and a collective data record is created in Excel. Based on these data sets, the diagrams are created. The scaling of the diagrams is chosen in such a way, that significant occurrences during tunnelling are recognisable, which is however often necessary to identify them sections.

A possibility of detailed reading of data from individual sensors in the diagrams has been deliberately neglected for reasons of space. However, it is still possible to view in the Herrenknecht Connected database.

The evaluation for the first four tests is divided into a general part, settlement and cutter head head torque.

11.3 Test 1 in loose sand

General

The data recorded during advance (Figure 30, Figure 32, Figure 34) clearly show the already mentioned problem that the feed volume flow of of 12m³/h was not sufficiently high. In addition, the pressure at the jet pump was set much too low at the beginning with 1-2 bar and later on with 3 bar was also set too low. The incorrect setting of these parameters a stable system cannot be built up, since the overburden conveying does not work reliably.

Due to the lack of overburden pumping, the introduced feedwater dispersed into the ground and caused the water to rise to a maximum level of 2m (see Figure 30 at 10:27:00, Figure 32 at 10:58:30).

From this point on, the water leaked laterally between the test container and the formwork. Due to the loose soil conditions, there was no significant working pressure (always less than 30 bar) during advance, which would be a reference point for the machine operator when setting the driving parameters. Moreover, the loose ground conditions do not correspond to any geological conditions to be found during a real excavation and are therefore mainly used to test the components of the reamer for the first time. In addition, this test was important for the machine operator to learn about the system.

Settlement

The settlement that occurs is shown in Figure 29 a significant settlement has occurred, since in the diagram the curve after the end of advance is below the curve at the beginning of advance. There was settlement of between 10-14 cm in most areas.

Up to 0.8m tunnel length, the distance between the surface of the soil and the laser was outside the maximum measuring distance of the laser (500mm). Accordingly, only the values from 0.8m tunnel length are comparable. The clearly visible peaks of the curve at 1.9 m and at 2.9 m are due to sand deposits on the inner tensioning on the internal tie rods of the formwork. At these points the sand was sinking correspondingly only slightly.

Cutter head torque

The calculated cutter head torque can be seen in Figure 31, Figure 33and Figure 35.

It should be noted that the hydraulic power is not equal to the power consumed electrically. To calculate this line, the losses of the hydraulic pump and the electric motor in the hydraulic

power unit be included. At this point, however, only the hydraulic power will be determined since this can be used to calculate the actual electrical power.

The maximum cutter head torque was 10 kNm and the maximum hydraulic power was 5 kW. The average cutter head torque during advance was 2-4 kNm and the hydraulic power was 1-3 kW.

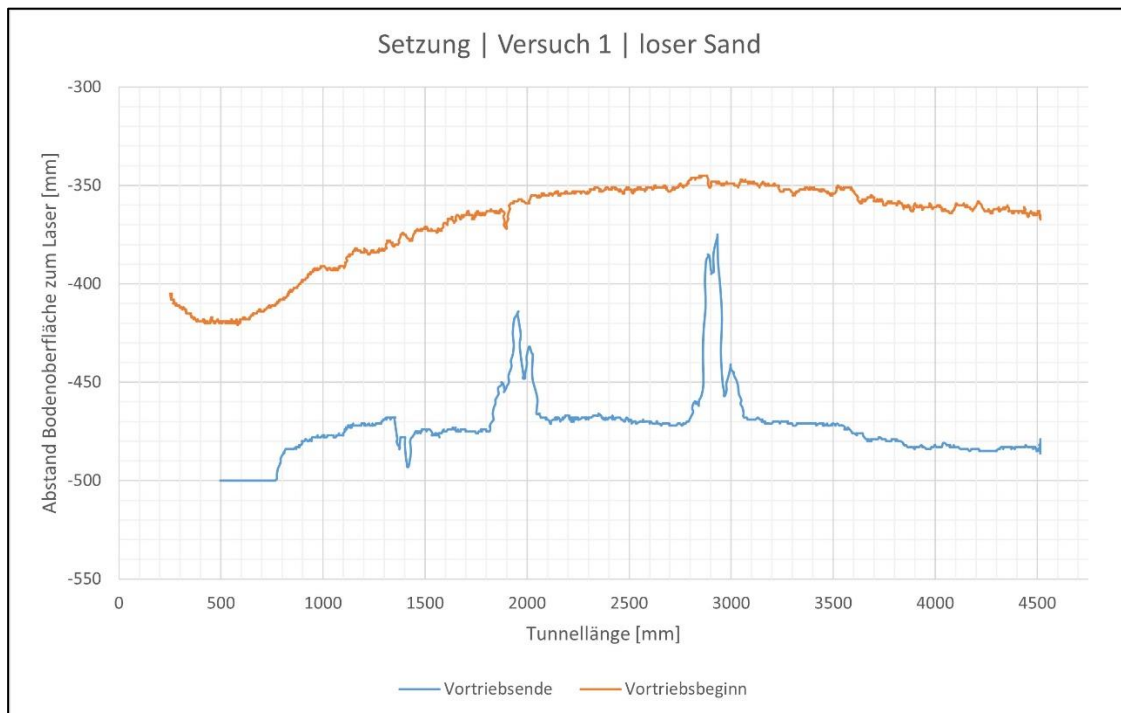


Figure 29: Settlement at loose sand

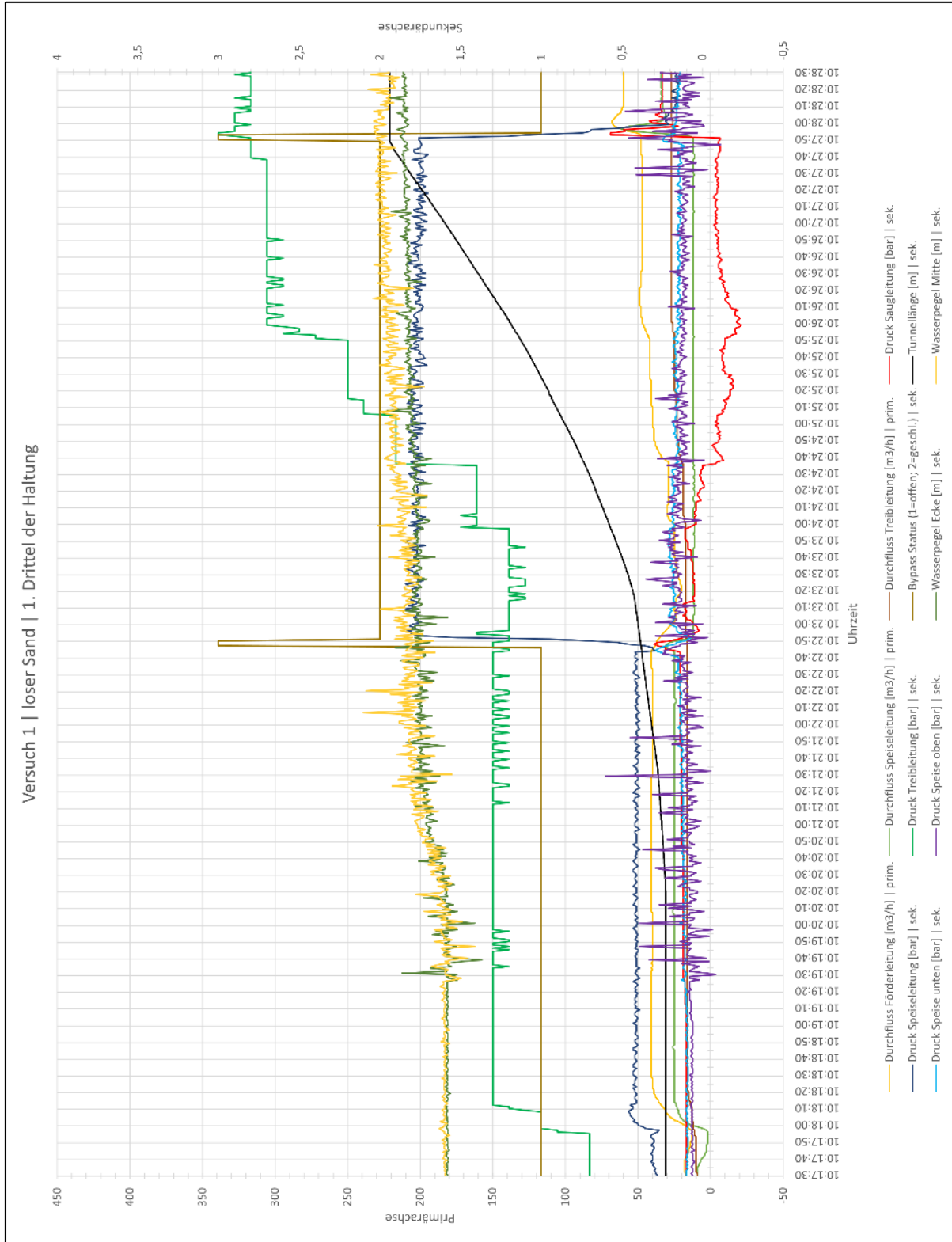


Figure 30: Test in loose sand (circulation, first third)

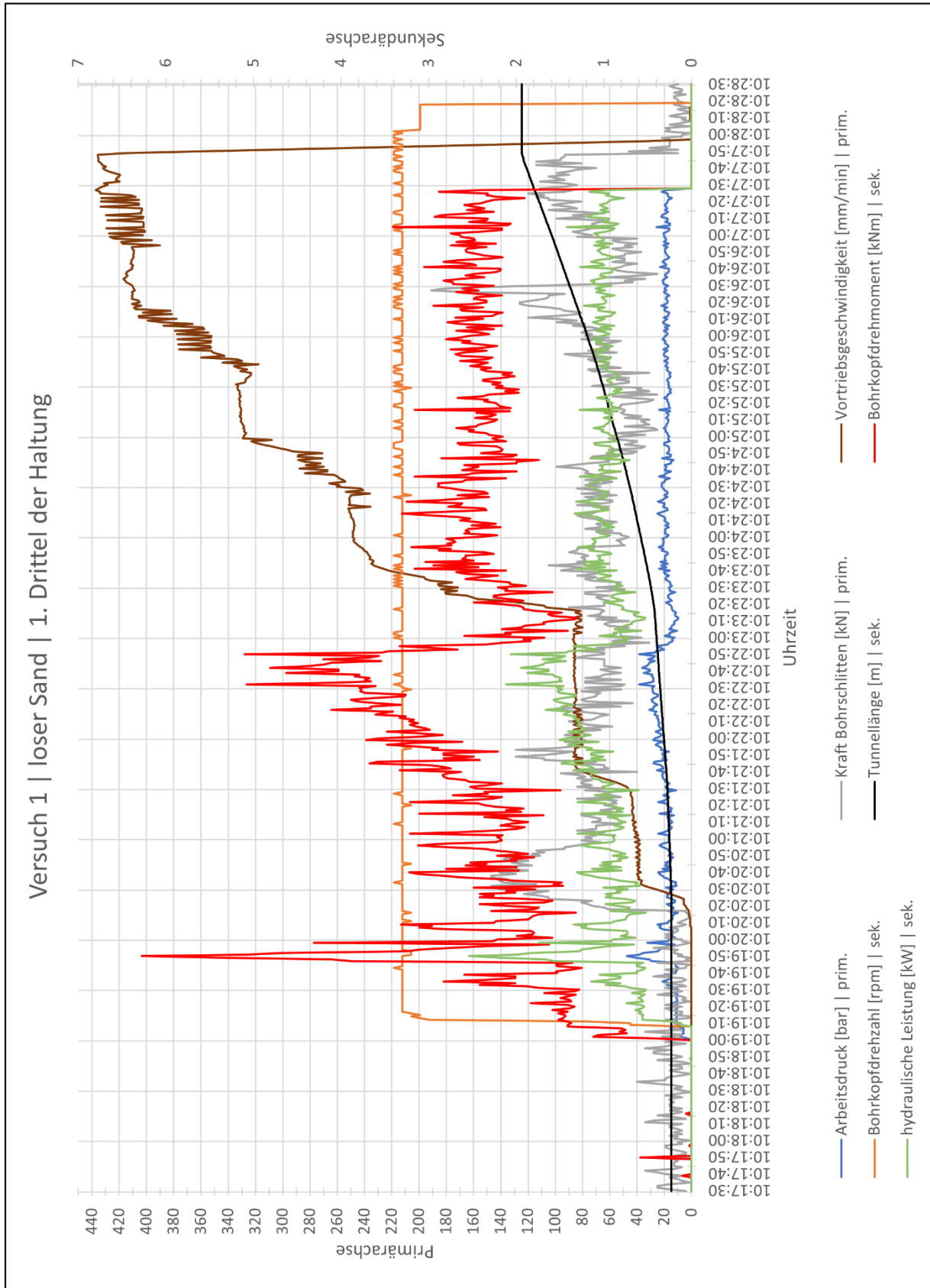


Figure 31: Test in loose sand (cutter head and carriage, first third)

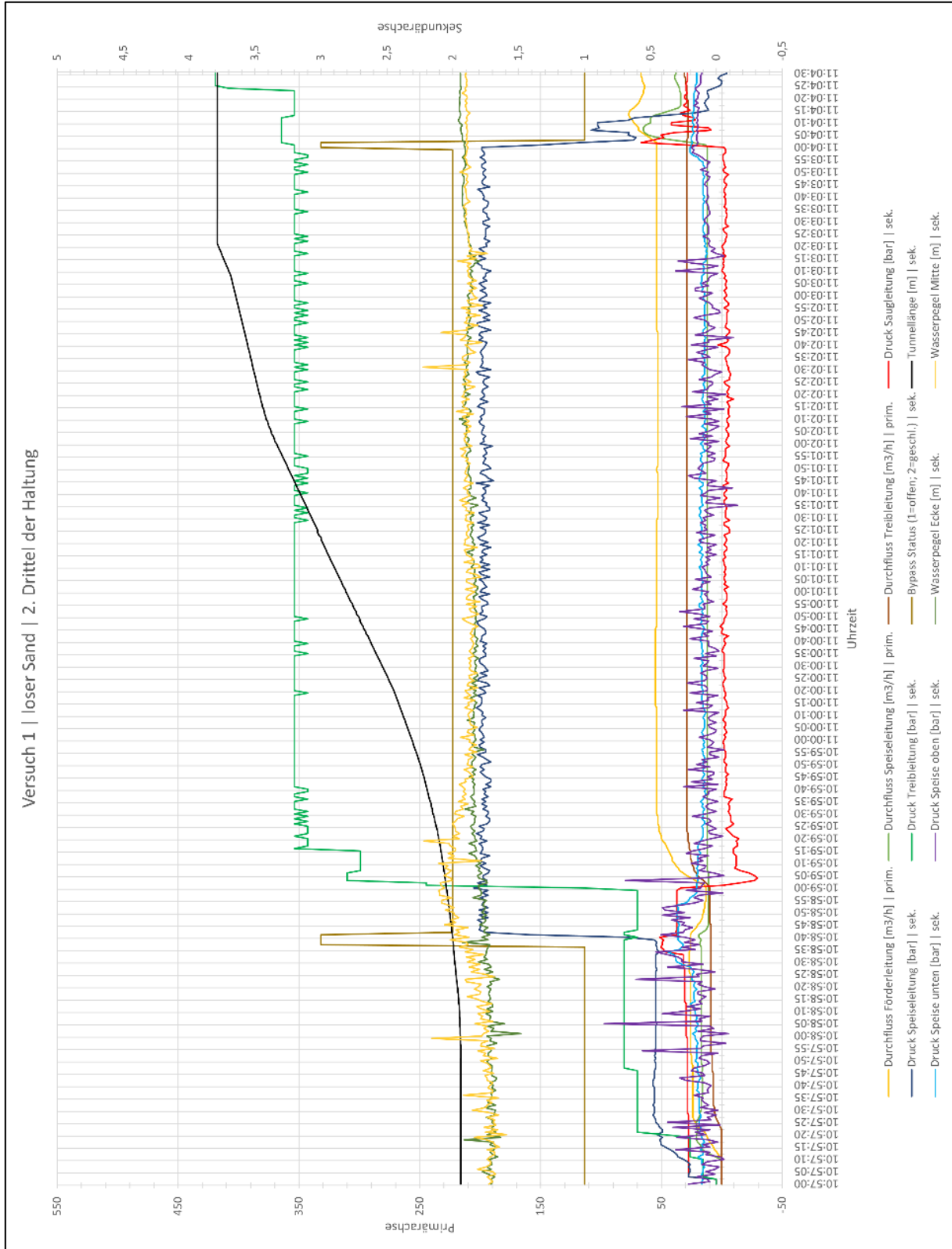


Figure 32: Test in loose sand (circulation, second third)

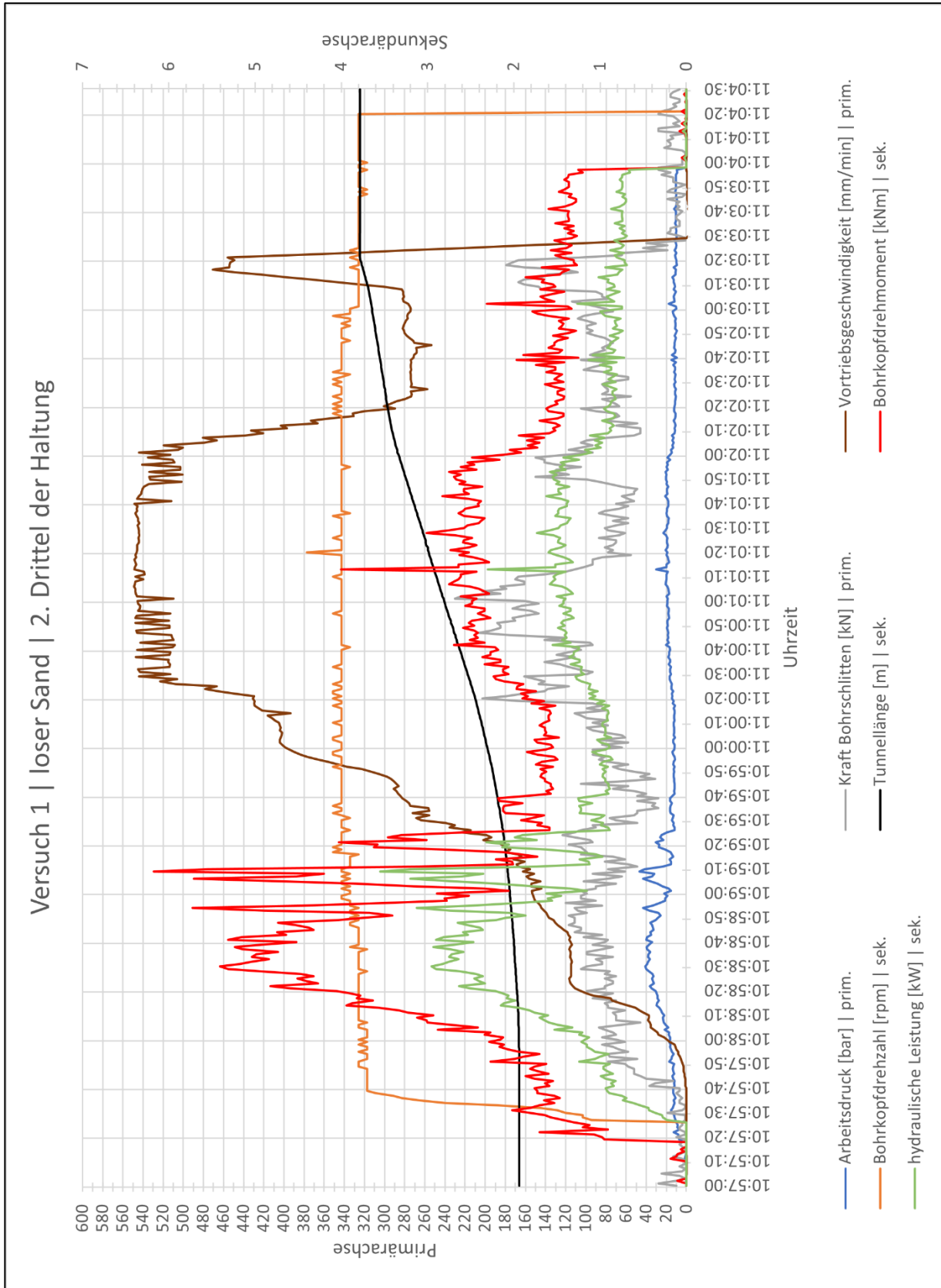


Figure 33: Test in loose sand (cutter head and carriage, second third)

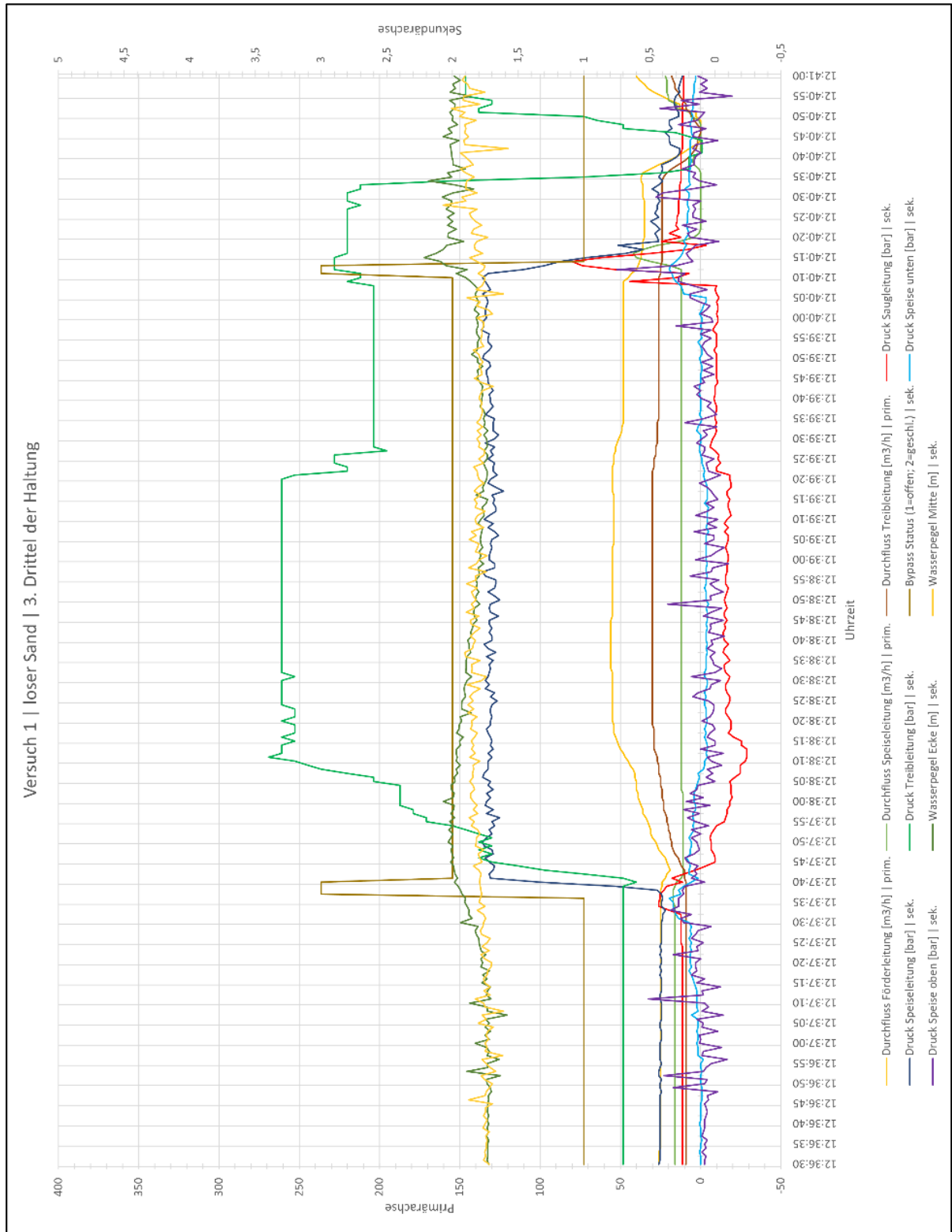


Figure 34: Test in loose sand (circulation, last third)

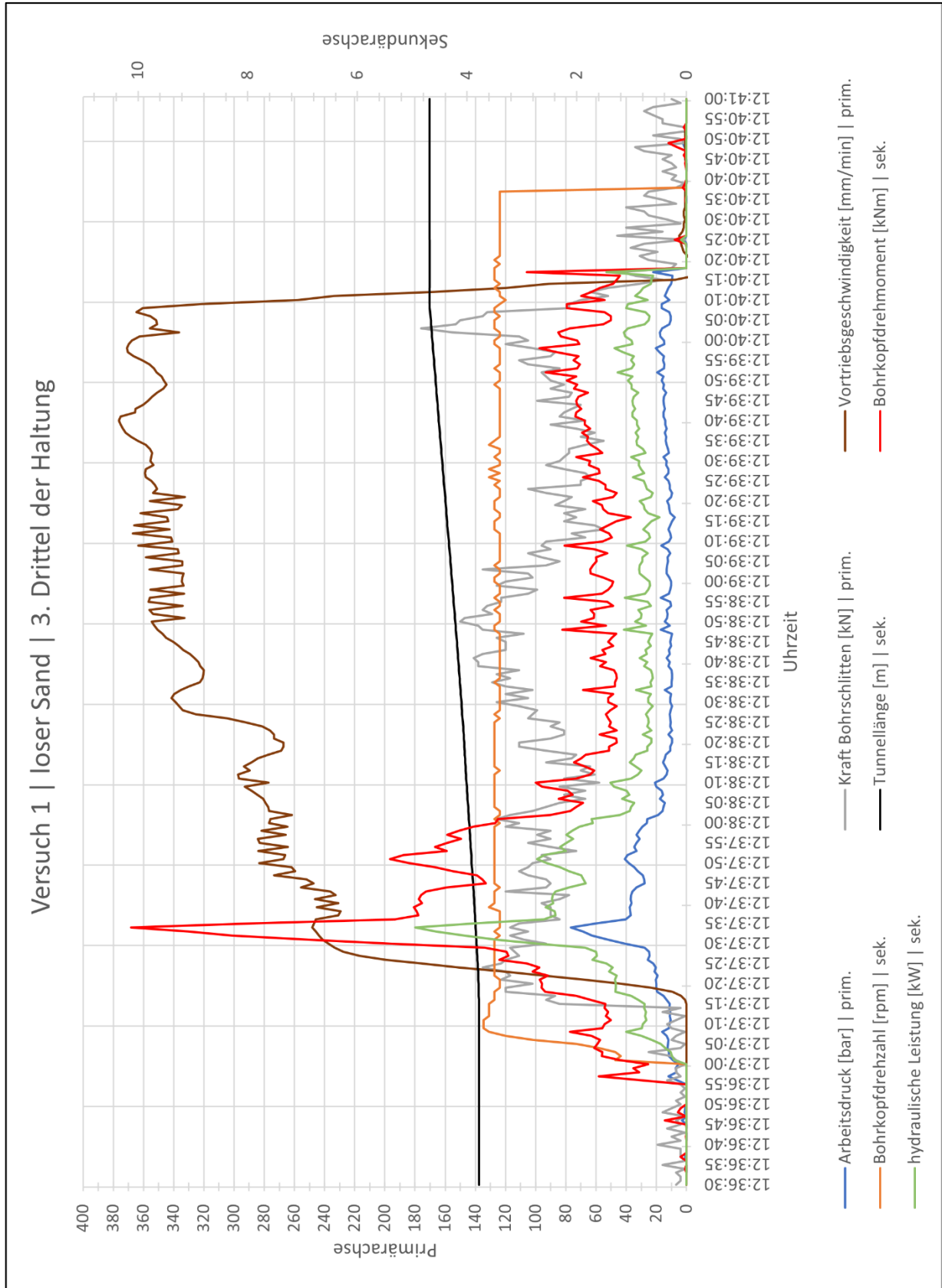


Figure 35: Test in loose sand (cutter head and carriage, last third)

11.4 Test 2 in densified sand

General

According to Figure 37 and Figure 39, high jumps in the working pressure occur at the beginning of advance in the area between 08:57:00 and 08:59:00, reaching the limit of 200 bar. In retrospect, it is inexplicable why such high pressure values occur in such soft soil. As a follow-up to the tests, the gear unit should therefore be examined for damage in order to rule out the possibility that the high pressure values are due to wear or foreign particles in the gear unit.

The advance is relatively constant in the range of 250-350 mm/min and the flow rate of the feed line reaches the desired range of 30-40 m³/h (after the exchange of the feed lines). After about 1.2 m, the start-up seal turns. This can be seen in Figure 37 at about 09:02:00 by the drop in pressure in the feed lines and the associated slight increase in the feed volume flow. It is possible that at this time the suction chamber is already so clogged with soil that the introduced feed water is distributed in the annular gap up to the start-up seal and the pressure present causes the start-up seal to fold down. The feed water then escapes through the start-up seal and the suction chamber becomes further clogged with overburden.

In Figure 37 it can be seen that shortly at 09:02:50, clogging of the jet pump occurs - despite the soft soil material. At this point, the previously negative suction pressure suddenly rises to positive while in parallel the flow rate of the delivery line drops.

Due to the soft soil, which does not contain any larger particles such as stones, it can initially be that the jet pump is clogged. It is possible that the jet pump has collapsed.

In this case, the collapse is due to the low pressure in the waterline for the jet pump. This is 3.7 bar at this point and should actually be set to at least 6-8 bar. The circulation does not recover from the collapse until the bypass is opened. It can be assumed that from the time of the blockage, very little to no material is transported. No blockages occur in the second half of the section (Figure 39), but the jet pump is still set too low at 3.3 bar.

The suction pressure is 0 bar and thus also too low. This should be in the slightly negative range in order to have a suction pressure of approx. -0.1-0 bar due to line losses up to the suction chamber.

Settlement

The settlement that occurred is shown in Figure 36. It can be seen that settlement has occurred, since in the diagram the curve after the end of advance is below the curve at the beginning of advance, but it is very slight. In most areas there is a settlement between 0-4 mm. The general fluctuations in the measured curves are due to inaccuracies in the installation of the soil and the nature of the ground surface.

Due to the low settlement, however, it cannot be ruled out that there was an additional discharge of overburden, since due to the densification of the sand the supporting properties of the soil are considerably higher than in loose sand. As a result, cavities may have occurred despite the low settlement.

Cutter head torque

The diagrams of the cutter head torque and the hydraulic power consumed are shown in Figure 38 and Figure 40. The maximum cutter head torque during advance is up to 27 kNm and the maximum hydraulic power is up to 10 kW. The average torque during advance is 5-10 kNm and the hydraulic power is 2-4 kW.

The cutter head torque shows very high values (>10 kNm) at the beginning of the advance. In addition, the working pressure at these points reaches the maximum value of 200 bar set on the power unit. It cannot be explained on the basis of the data where these extreme pressure surges come from.

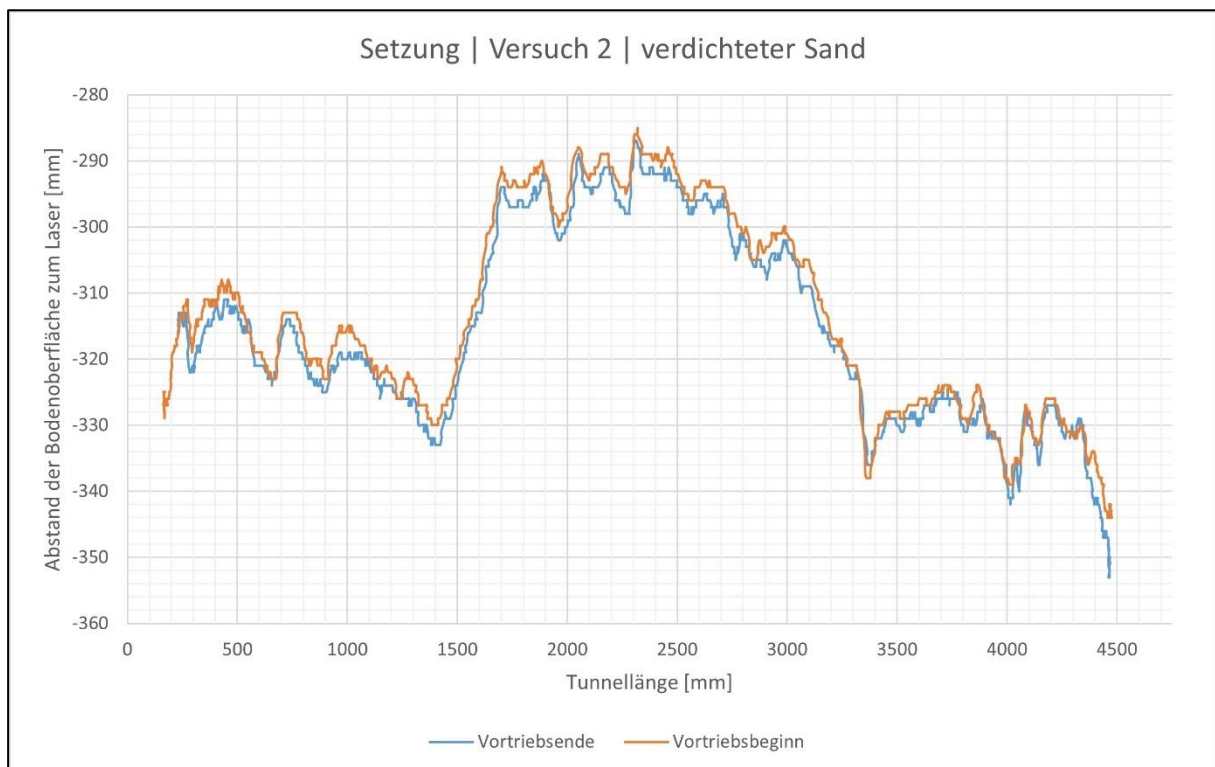


Figure 36: Settlement at densified sand

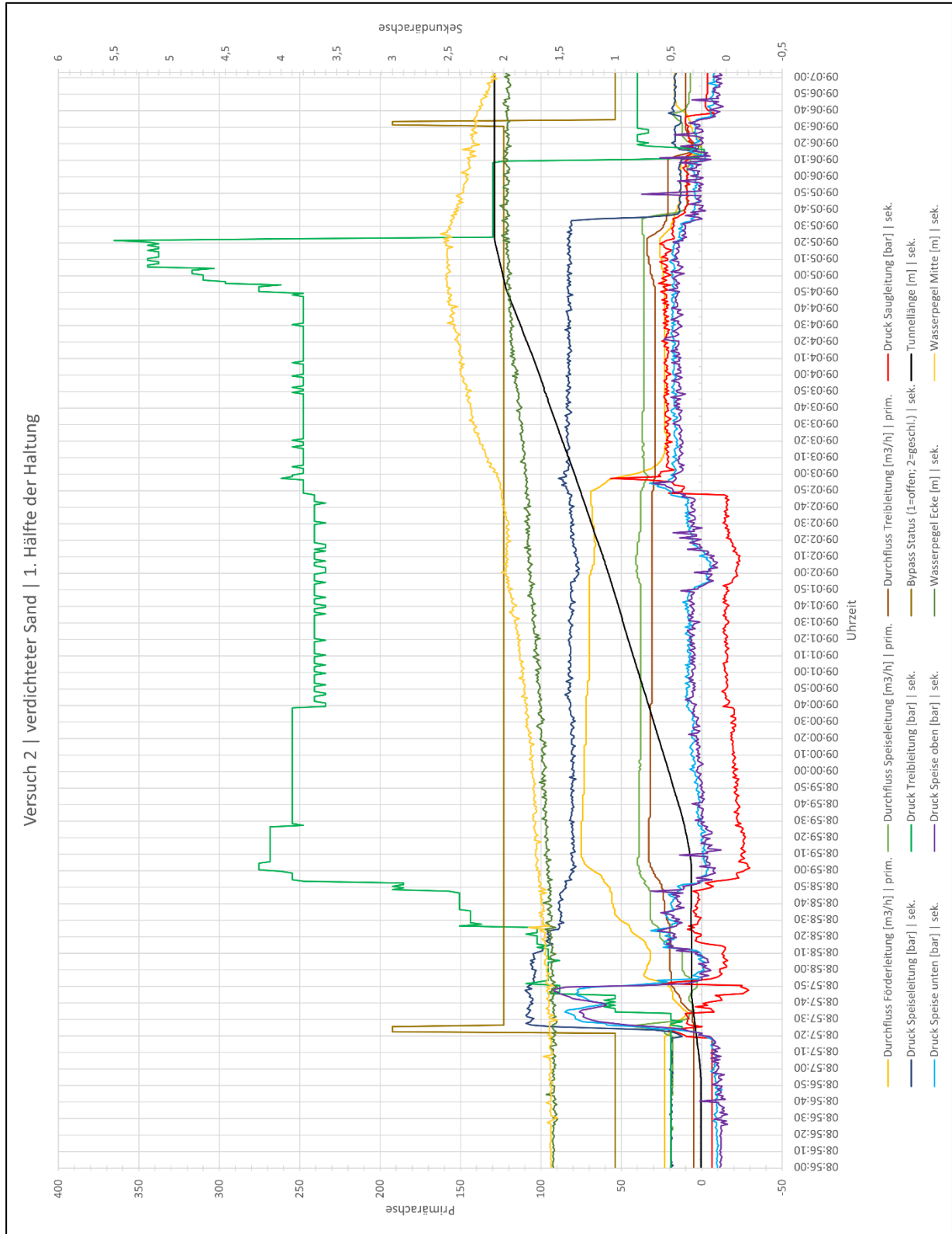


Figure 37: Test in densified sand (circulation, first half)

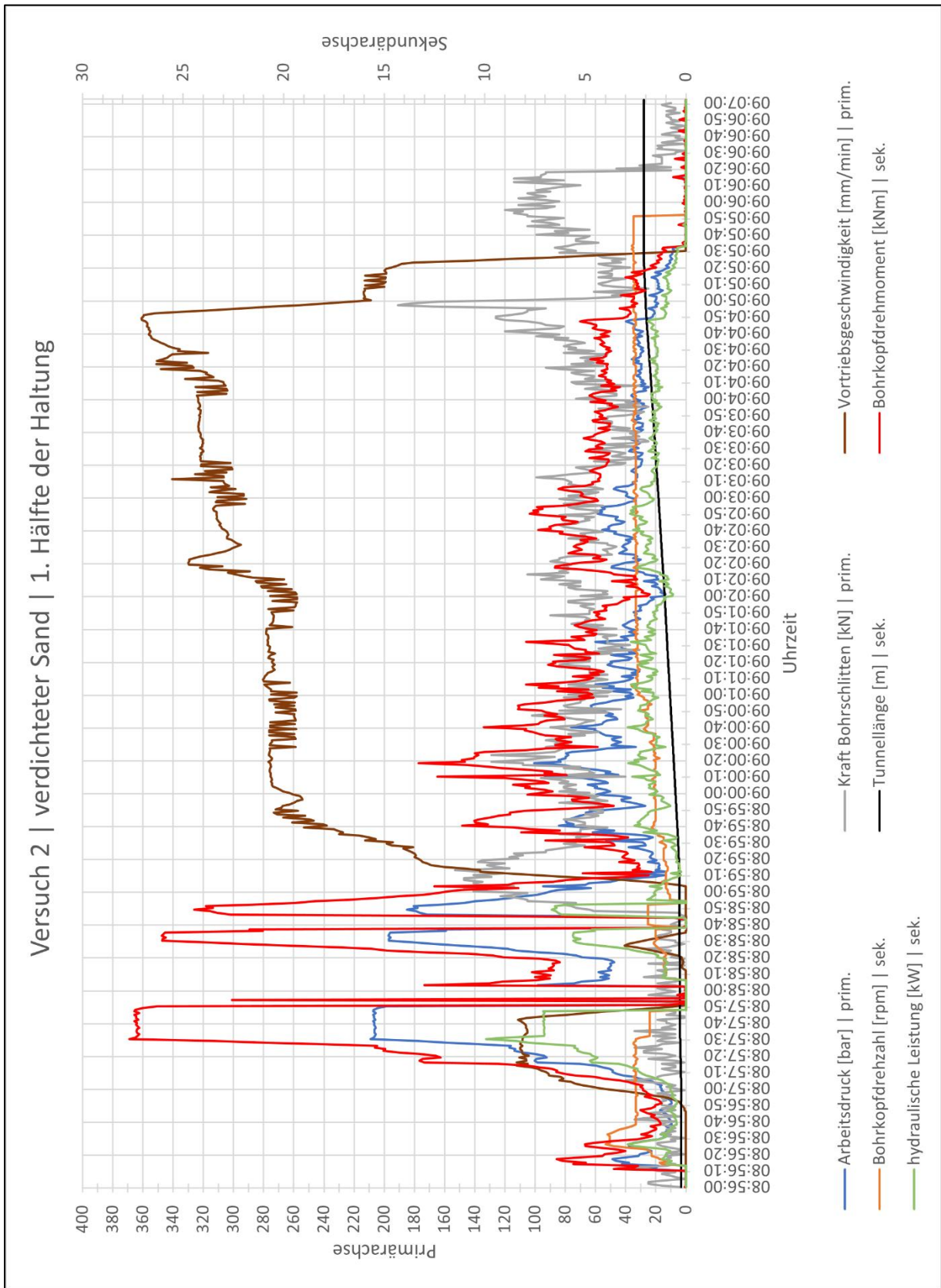


Figure 38: Test in densified sand (cutter head and carriage, firsts half)

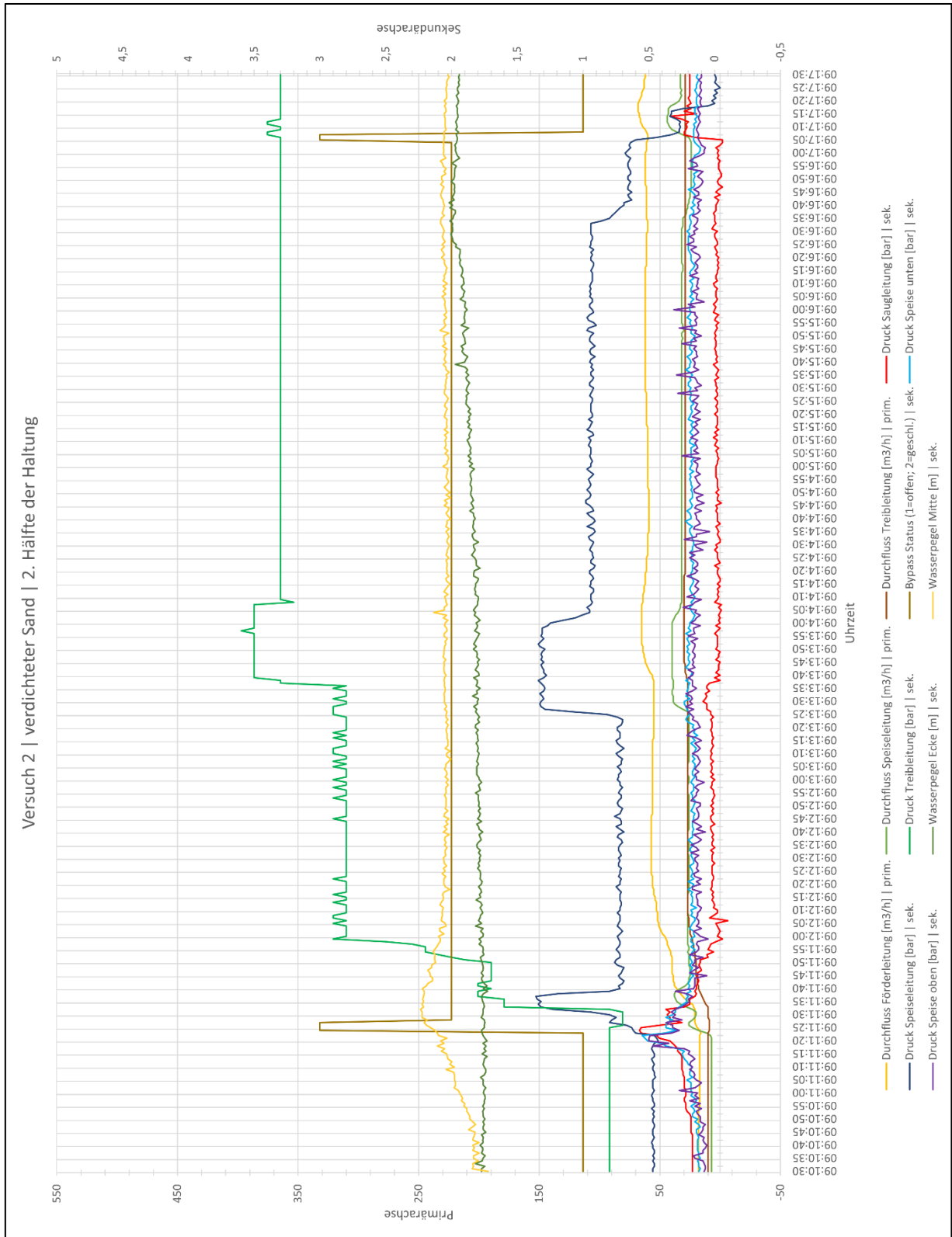


Figure 39: Test in densified sand (circulation, second half)

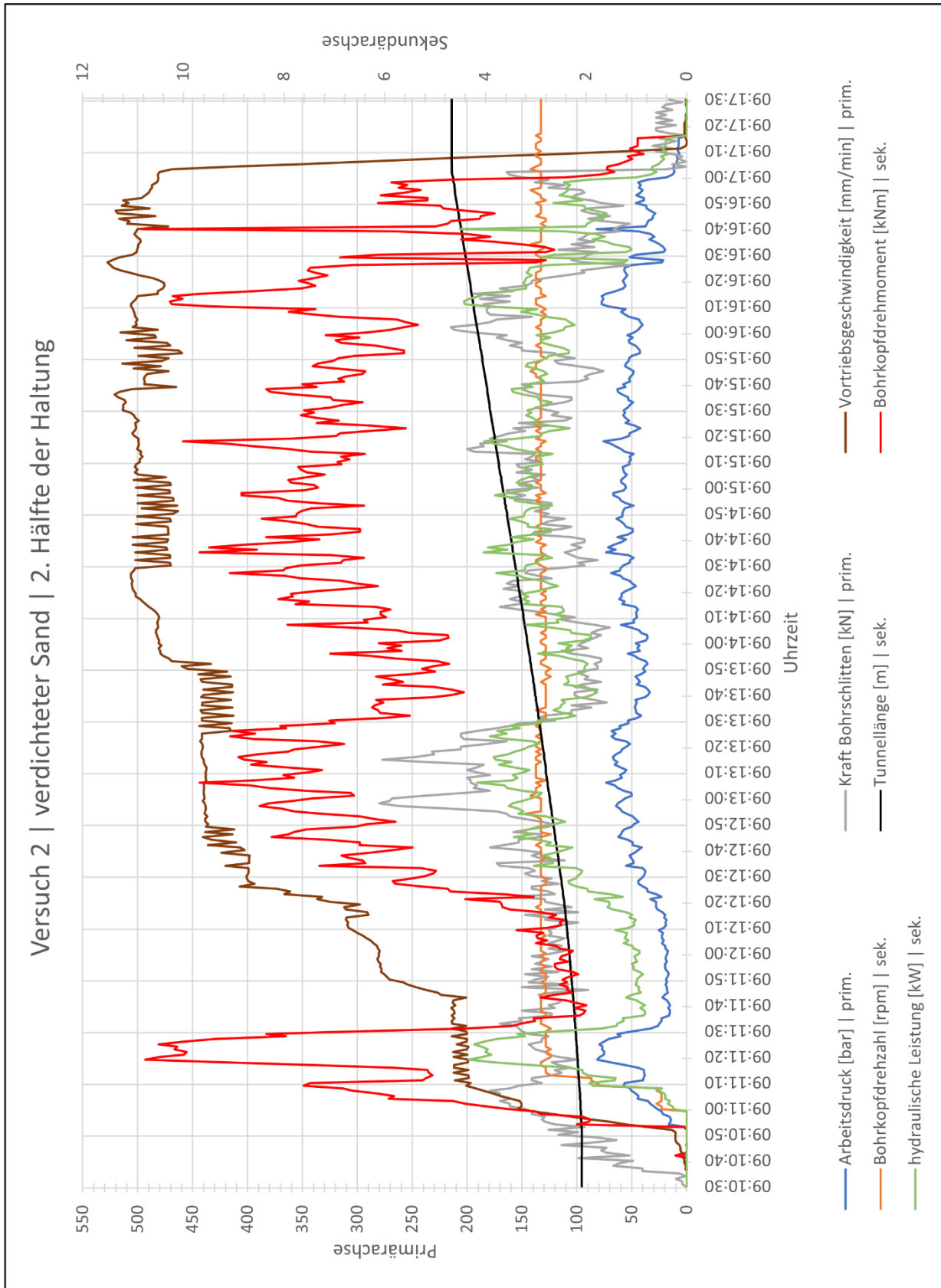


Figure 40: Test in densified sand (cutter head and carriage, second half)

11.5 Test 3 in peat

General

The evaluation of the data shows that for the first time during the tests the jet pump was set correctly at 5-6 bar, so that the suction pressure was in the slightly negative range of -0.4 to -0.2 bar. Due to the solubility of the peat in water, it can be pumped without clogging. These facts tempt to a high advance rate.

However, this must be adapted to the parameters of the conveying circuit so that no additional discharge occurs. It can be seen that the advance rate of 620 mm/min at 11:31:05 (Figure 43) was selected too high, at a differential volume of 7 m³ /h, an advance rate of 358 mm/min would have been ideal at this point in order to avoid excess discharge or displacement. The fact that the rate was selected too high is also shown in the following chapter when evaluating the settlement. The advance data otherwise show no relevant occurrences, except for the fact that the data recording with the Hydac measuring computer is not started until 11:31:10 (Figure 44) and therefore data on the working pressure and the feed pressures at the suction chamber are only available from this time.

Settlement

The data recording of the laser measuring system cannot be evaluated because the laser did not record reliable values for the horizontal distance of the measuring carriage. This means that only a visual evaluation of the settlement results was possible.

During the first measurement with the laser measuring system, there were approximately 3 cm between the rail which the measuring carriage is guided and the surface of the peat. After tunnelling, the surface was about 1 cm higher than the lower edge of the rail, resulting in an uplift of 4 cm. The uplift occurs from halfway through the hole to the end. This indicates that the reamer pushed the peat in front of it due to the excessive advance rate and this pushed the peat upwards.

Cutter head torque

The diagram of the available torque and the absorbed hydraulic power is shown in Figure 42 and Figure 44. The maximum torque during driving was 0.3 kNm. The average torque during tunnelling was 0.2-0.3 kNm. The maximum hydraulic power is 0.5 kW and the average 0.3-0.4 kW.

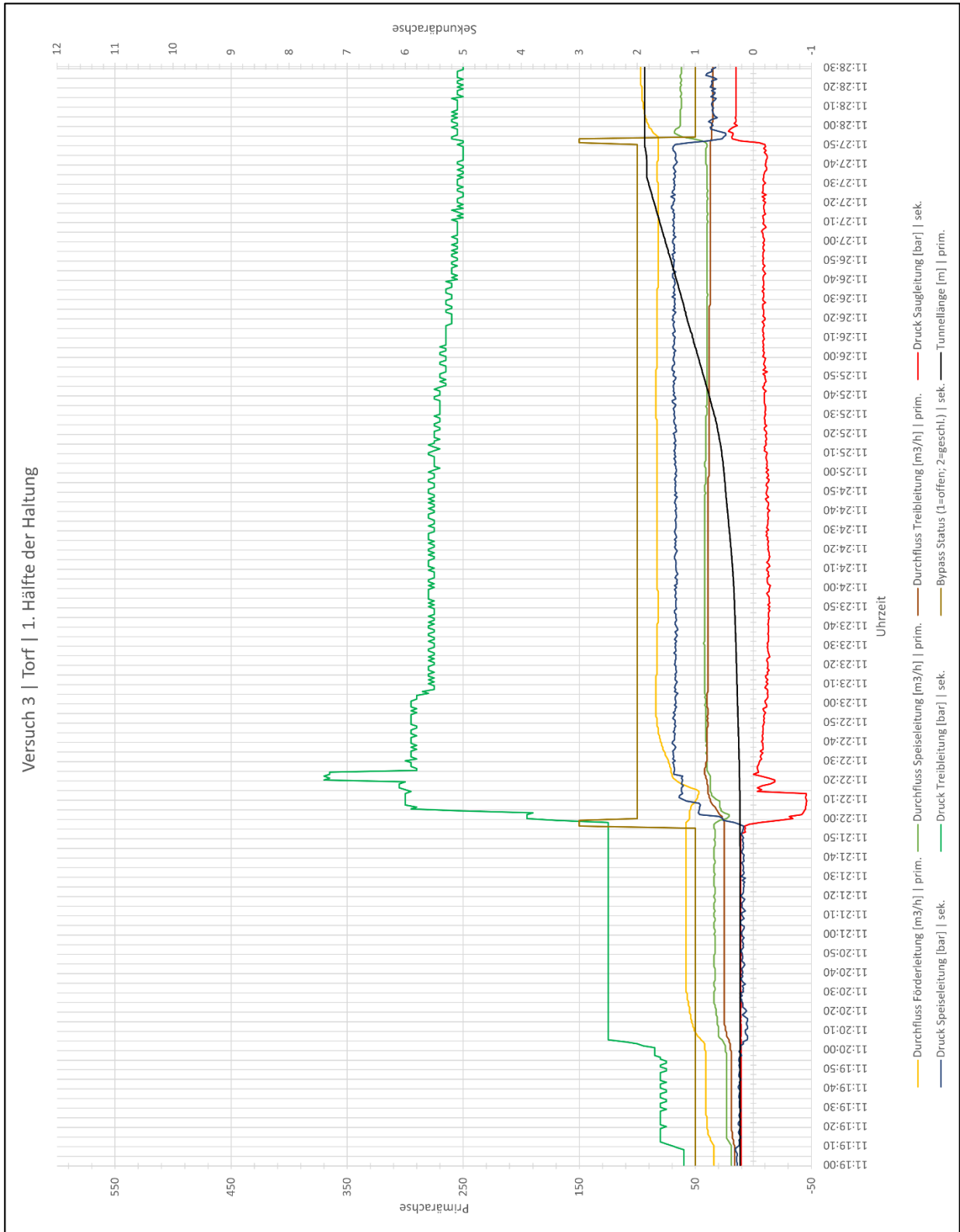


Figure 41: Test in peat (circulation, first half)

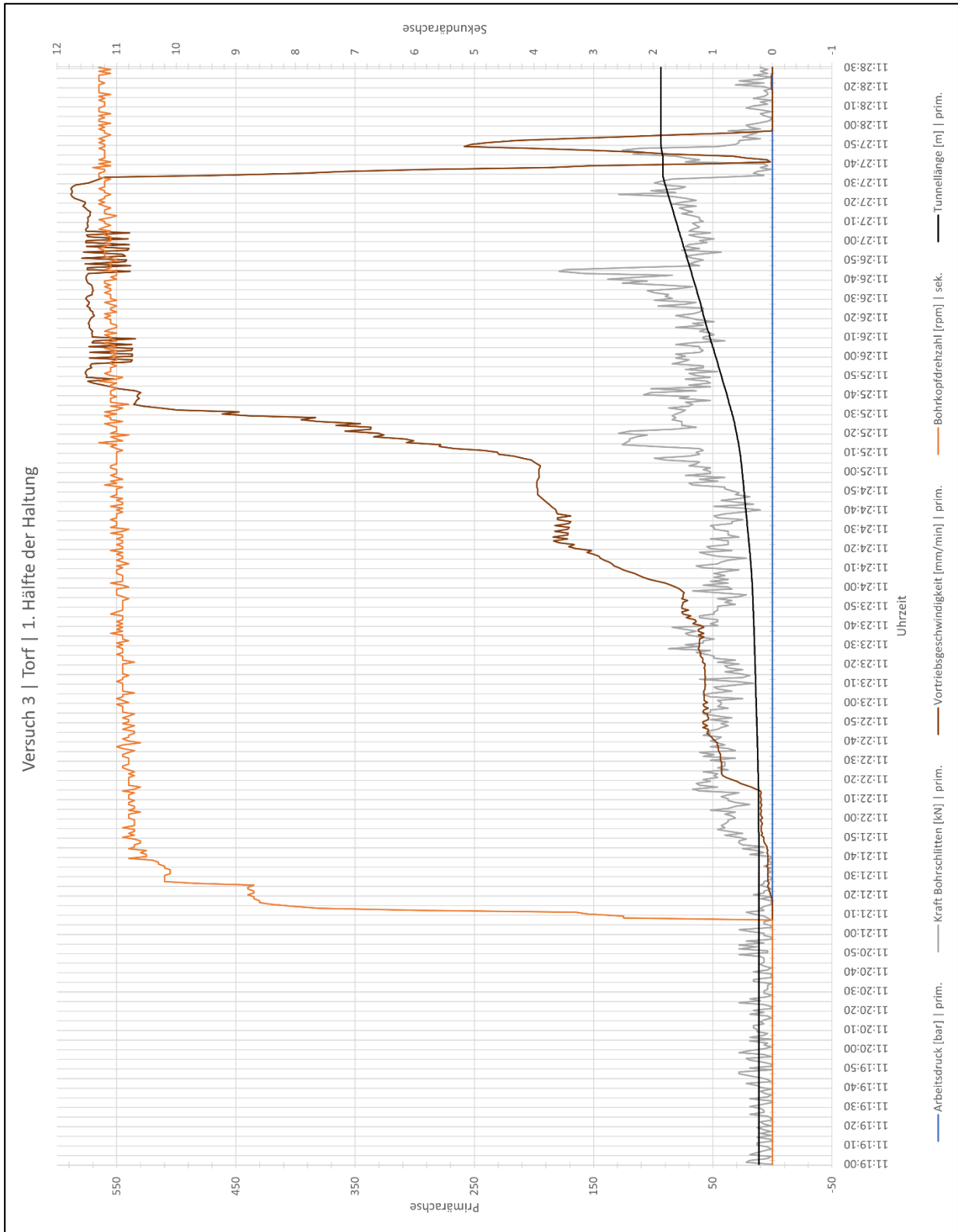


Figure 42: Test in peat (cutter head and carriage, first half)

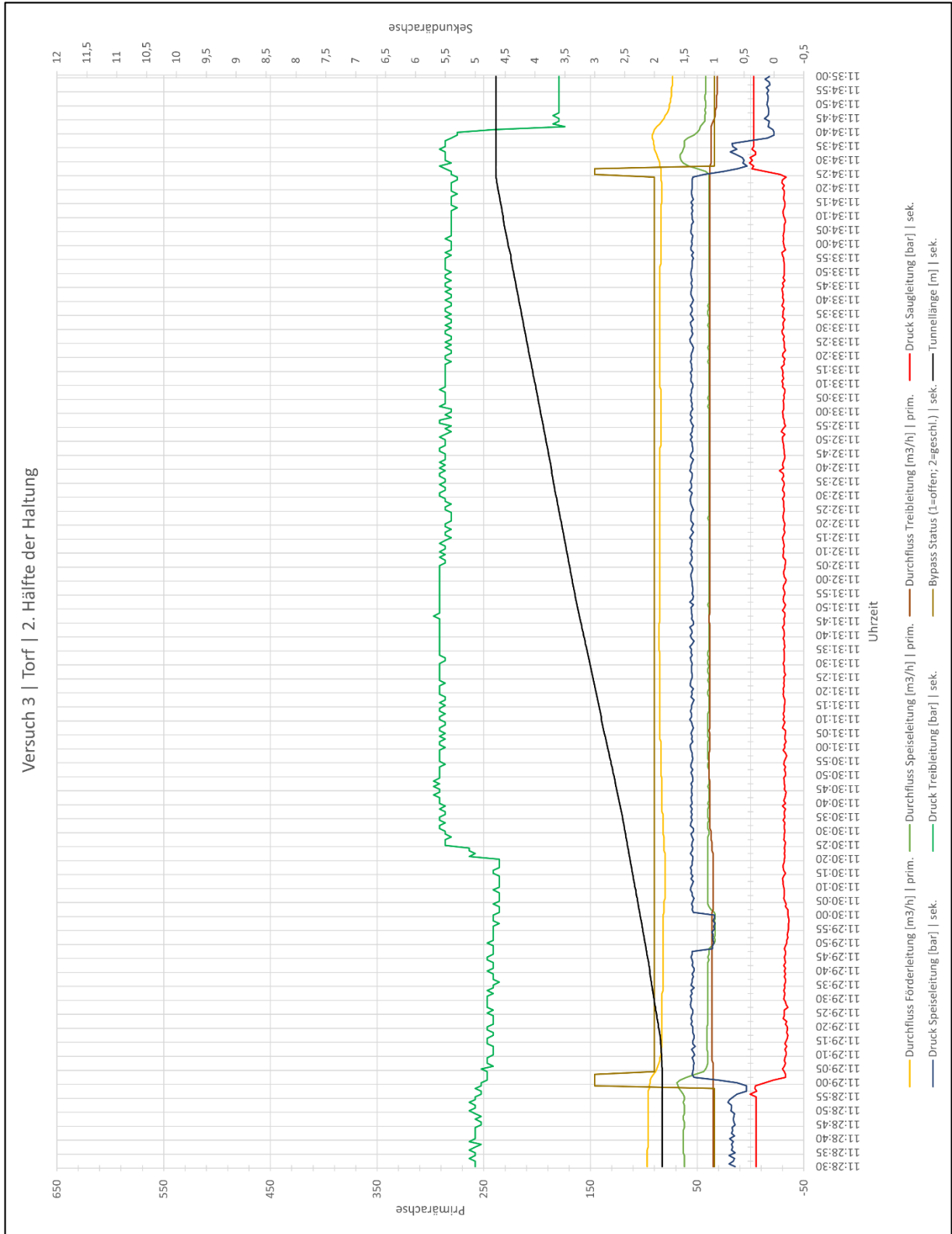


Figure 43: Test in peat (circulation, second half)

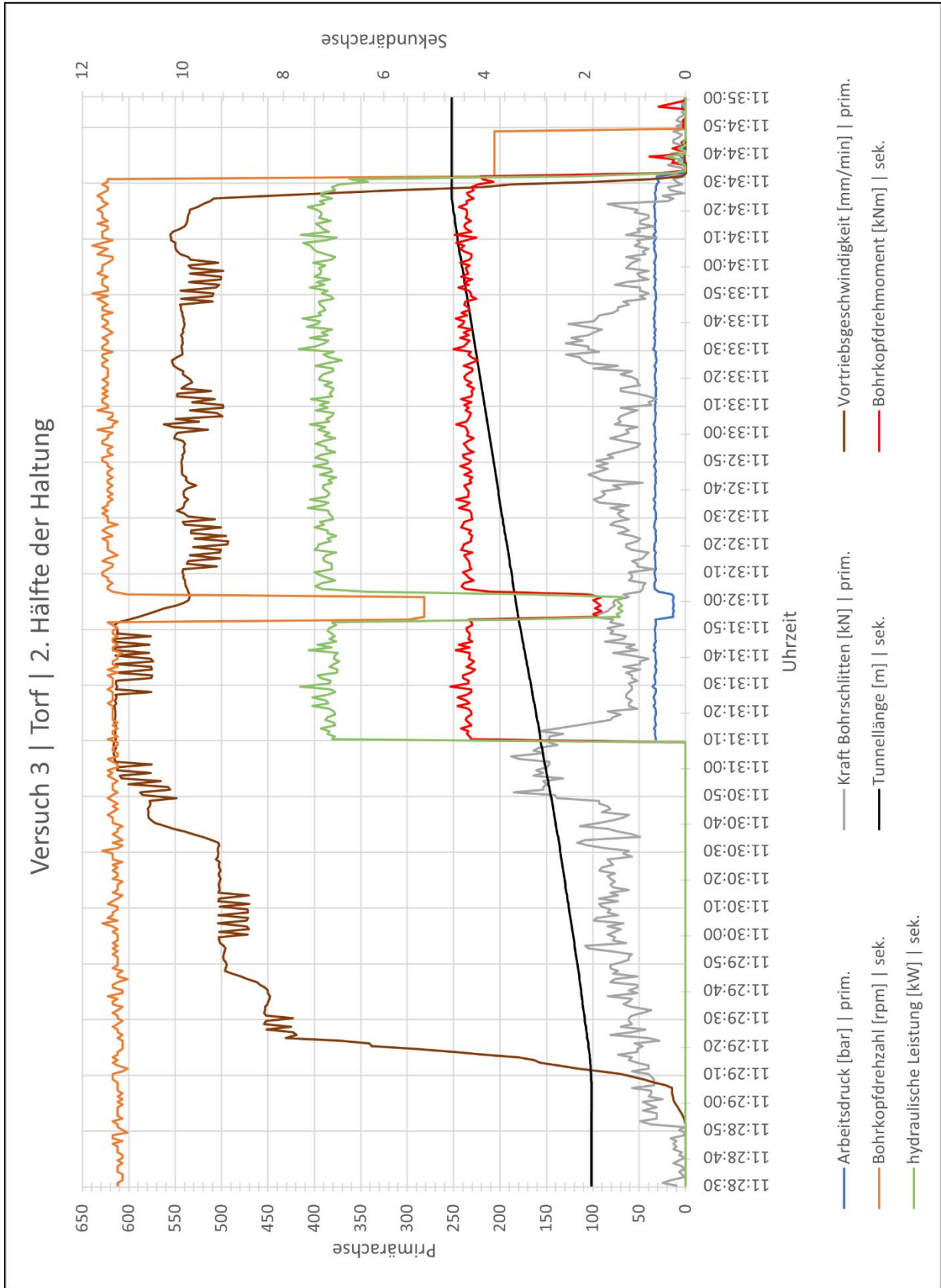


Figure 44: Test in peat (cutter head and carriage, second half)

11.6 Test 3 in clay

General

Various clogging phenomena at the jet pump can be seen in the data. It is interesting to note that reducing the cutter head rate from 11.5 min⁻¹ to 2 min⁻¹ does not make a significant difference in terms of material delivery and working pressure.

This compares the operating points at 14:54:45 and 15:01:00 in Figure 46.

The difference in working pressure of 10 bar between the points is due to the increased advance rate during the later time. The clogging phenomena can be seen at 15:02:00 (Figure 46) and at 5:20:45 (Figure 48). Due to the blockage, water again leaked laterally between the container and the formwork. Probably because of this, the feed pump was throttled at 5:22:40 in order not to lose more water via the cutter head. However, the fact that this makes overburden transport more difficult was neglected. At this time, the volume flow has already collapsed. Why the advance was continued for another 1 m from the beginning despite the reduced overburden transport is up to the machine operator.

A third blockage occurred at 15:33:25 (Figure 50). Since the blockage occurred about 0.1 m before the end of the advance, no further statements can be made at this point about the behaviour of the circulation after the blockage.

Overall, the test shows the highest incidence of clogging compared to all previous tests. These are probably provoked by hard, dry pieces of clay and are difficult to detect due to the water solubility of the clay, as these have dissolved by the time the jet pump is opened. In addition, when the bypass is opened, there is a pressure surge that can cause the clogging to be loosened. This shows that follow-up tests are necessary, in which the clogging persists in the long term, so that it can be proven by opening the jet pump that the observed behaviour is really due to a clogging of the jet pump nozzle.

Settlement

The settlement that occurred is shown in Figure 45. At a maximum tunnel length of 0.5 m, it amounts to about 32 mm. It is clear, that the settlement decreased towards the end of the section. The general fluctuations of the measurement curves are due to inaccuracies in the installation of the soil and the nature of the ground surface. The settlement at the beginning of the advance is most likely due to the drilling fluid that leaked laterally.

Cutter head torque

The diagrams of the cutter head torque and the hydraulic power consumed are shown Figure 47, Figure 49, Figure 51. The maximum cutter head torque during advance amounts to 8 kNm and the maximum hydraulic power amounts to 10 kW. The average cutter head torque during advance was 3-7 kNm and the hydraulic power is 1-3 kW. Note that no rate signal is available until 14:50:00 due to a sensor error, so no hydraulic power can be calculated. The cutter head torque can nevertheless be calculated, since a working pressure was applied and the cutter head therefore also rotated.

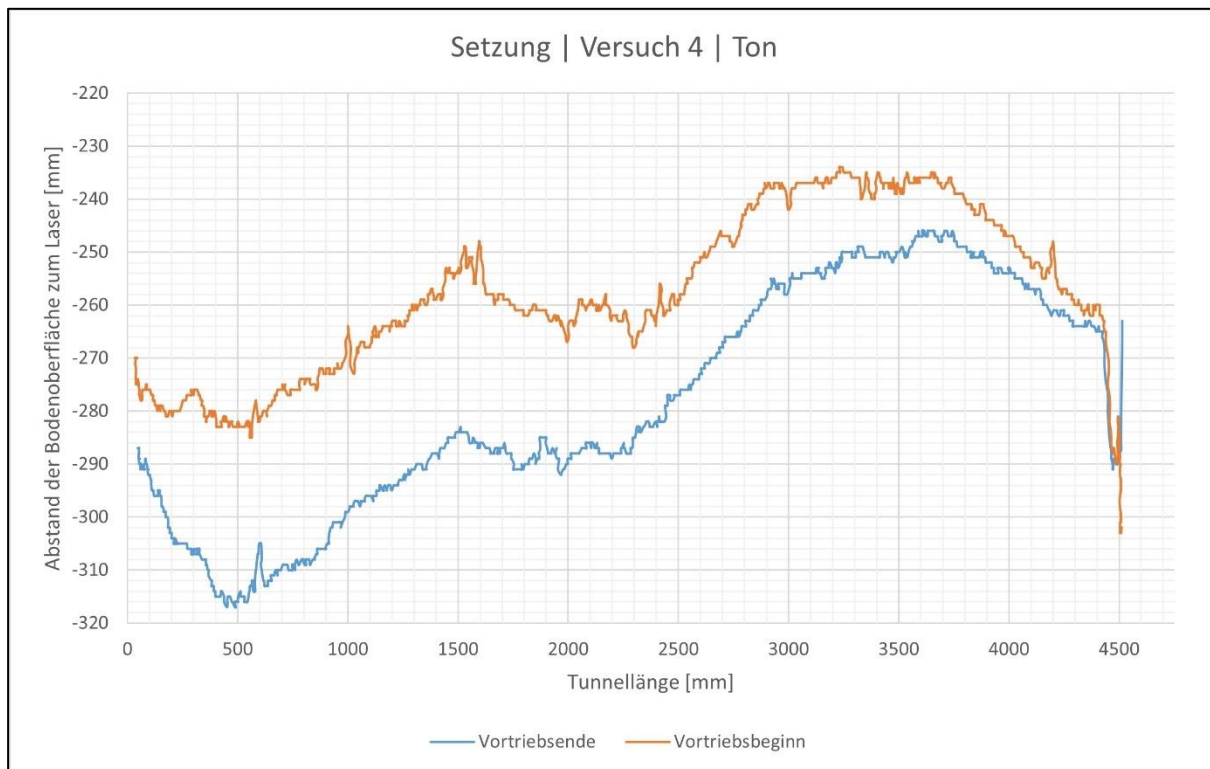


Figure 45: Settlement at clay

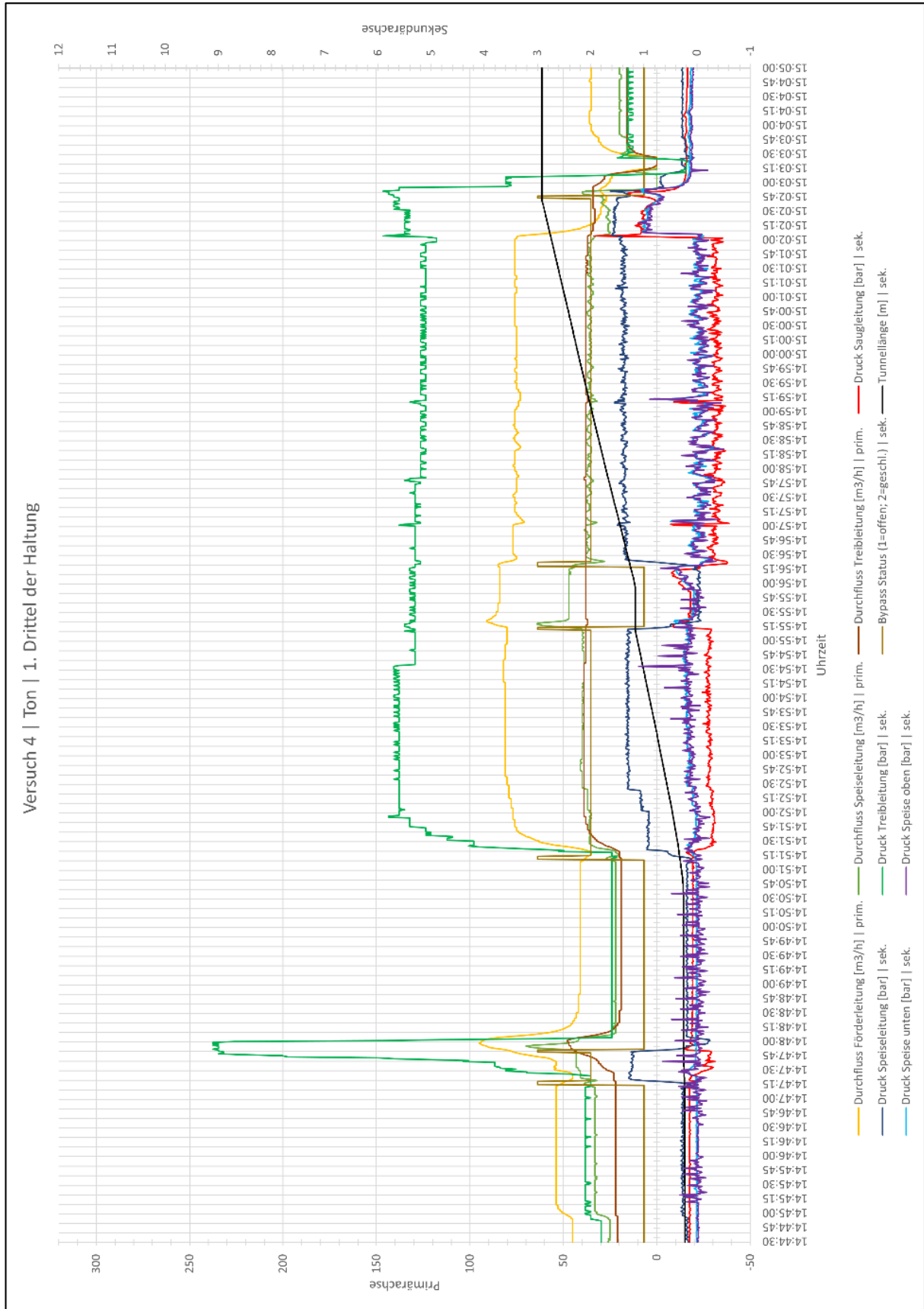


Figure 46: Test in clay (circulation, first third)

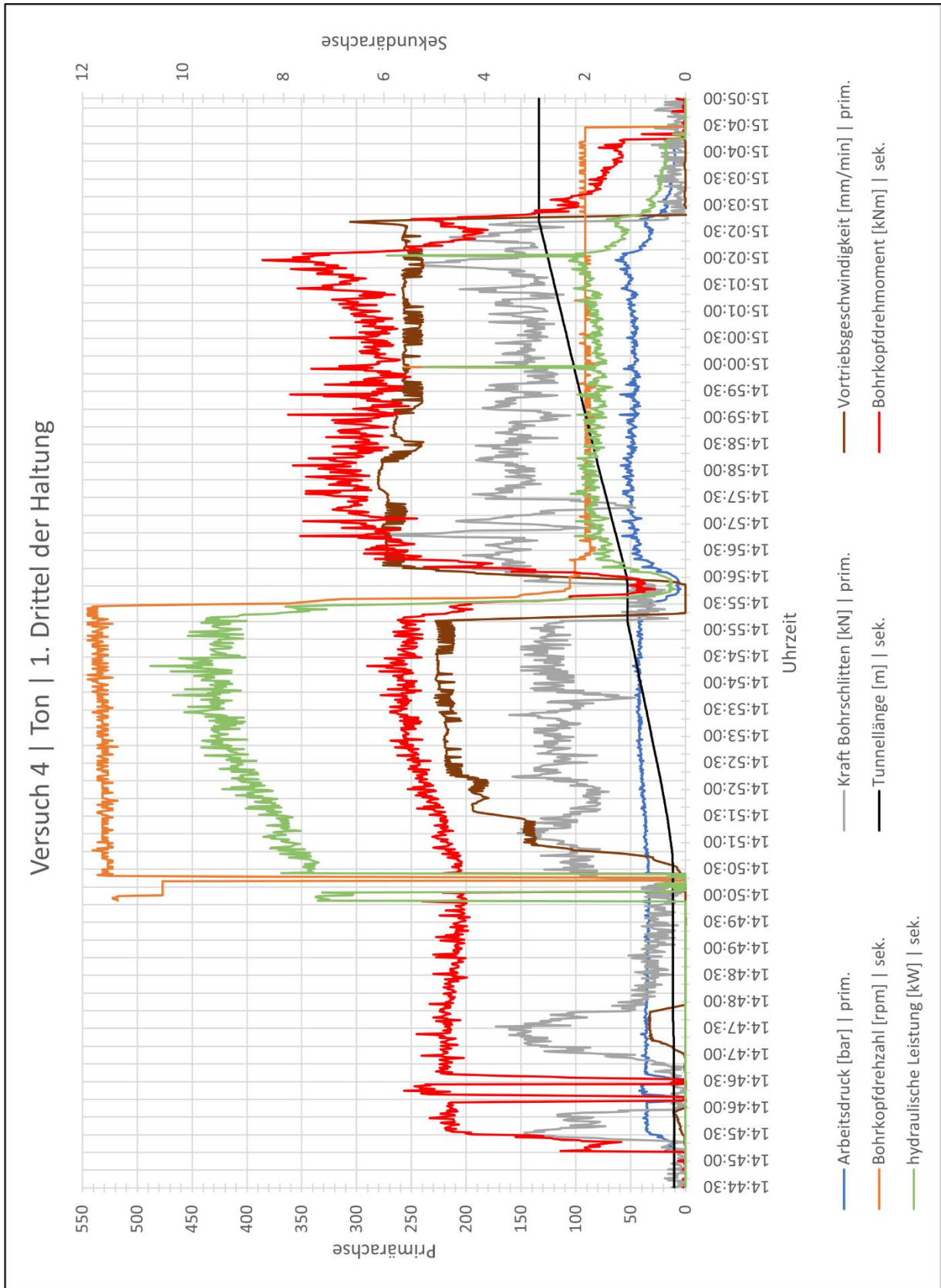


Figure 47: Test in clay (cutter head and carriage, first third)

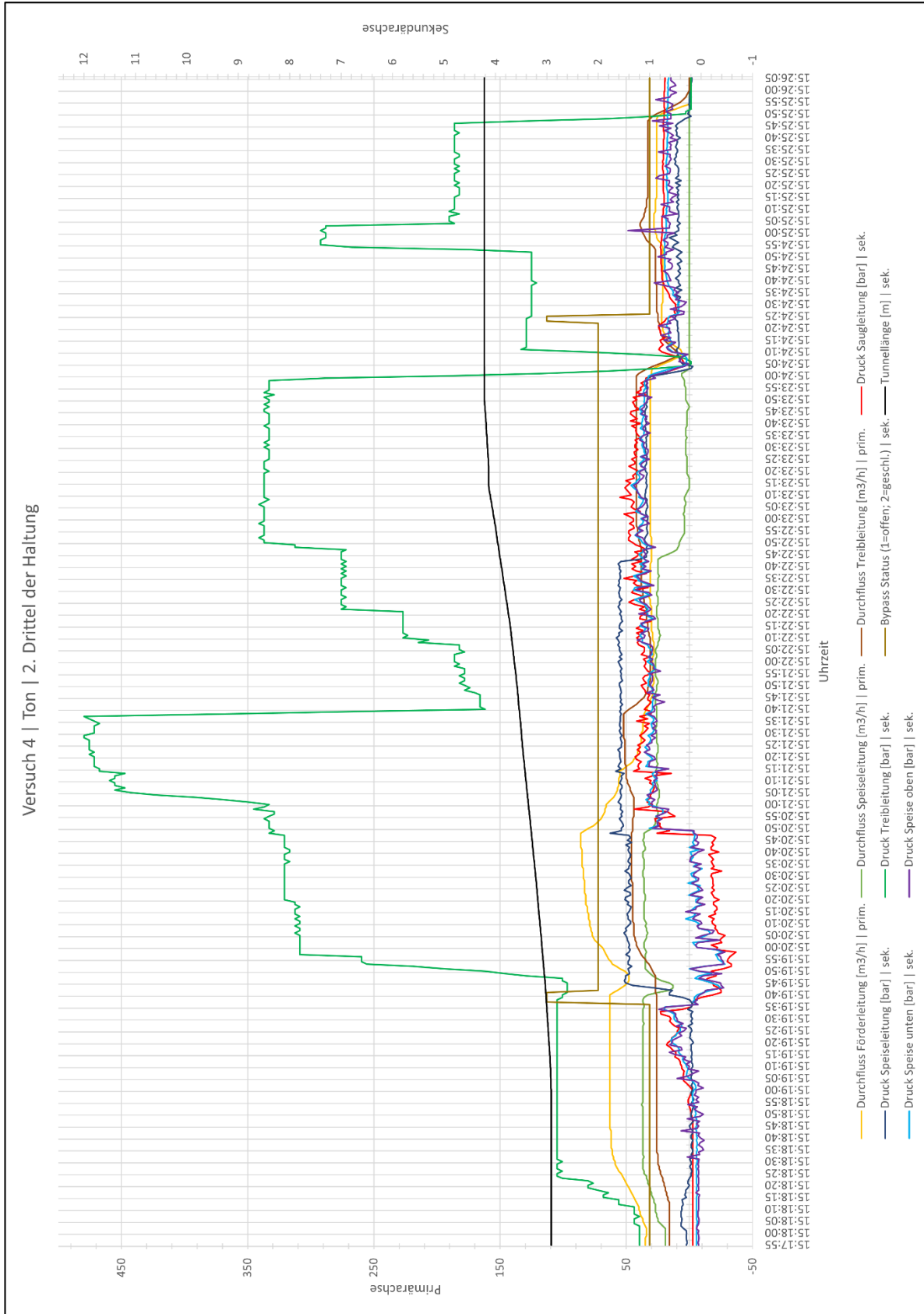


Figure 48: Test in clay (circulation, second third)

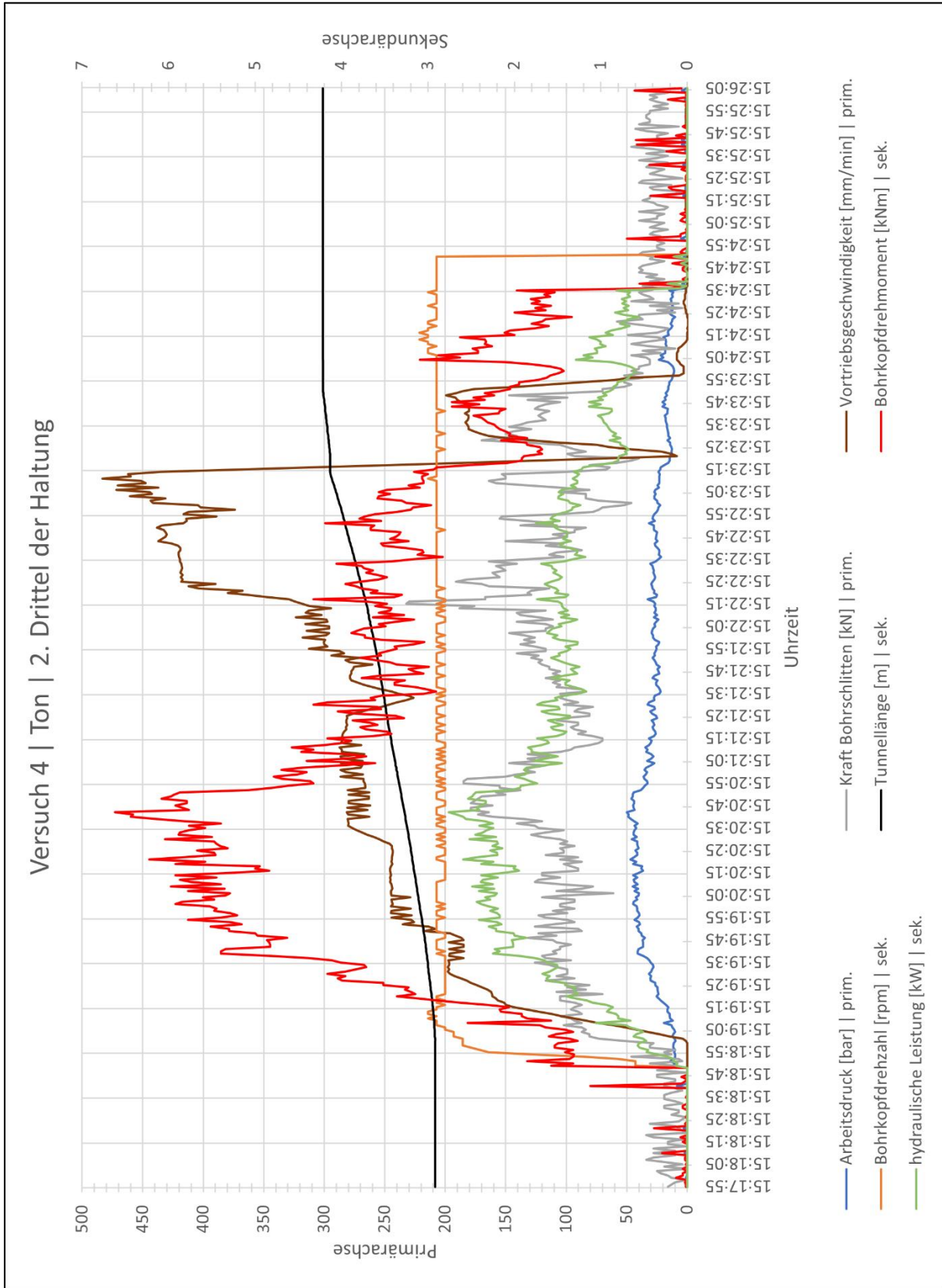


Figure 49: Test in clay (cutter head and carriage, second third)

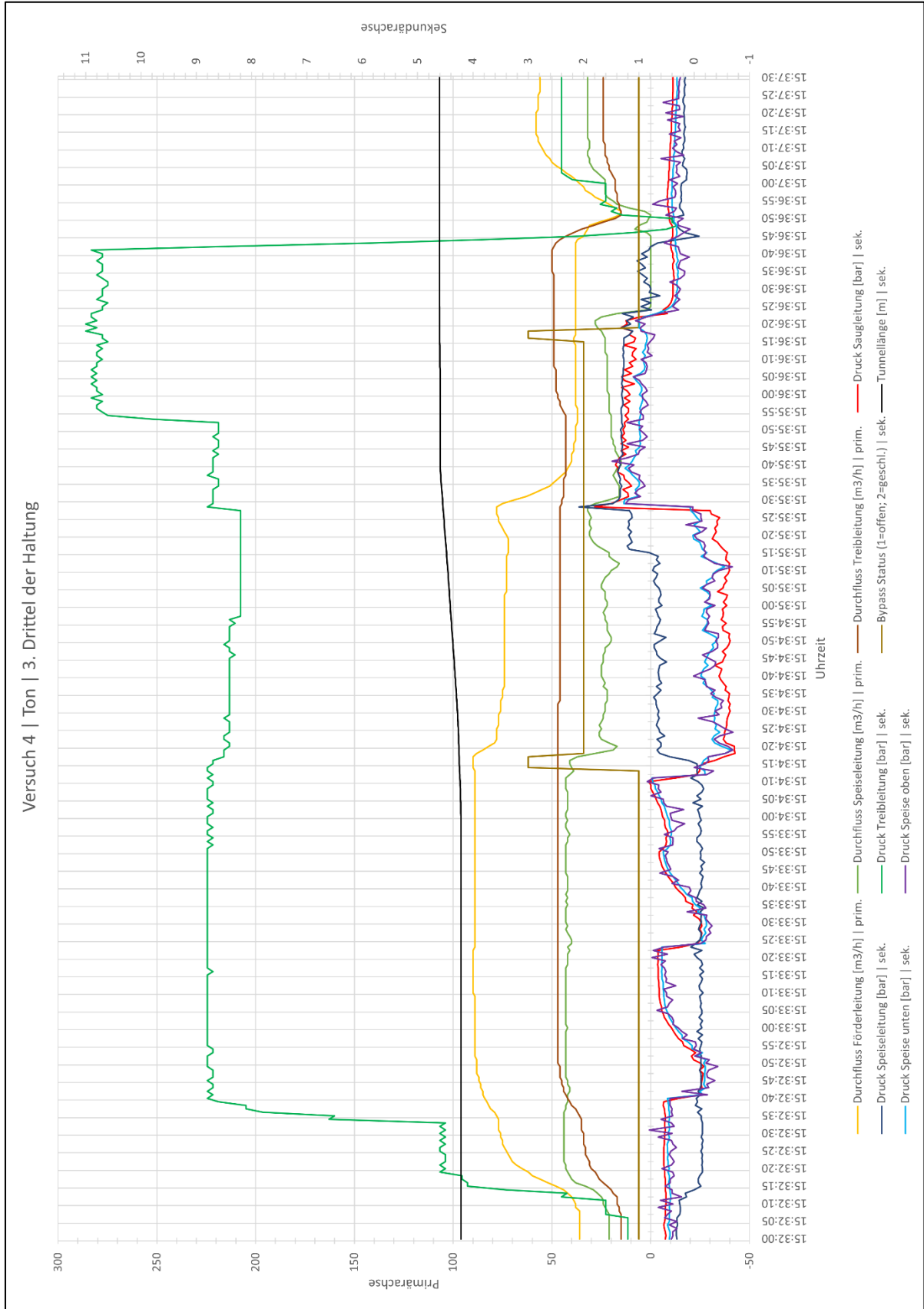


Figure 50: Test in clay (circulation, last third)

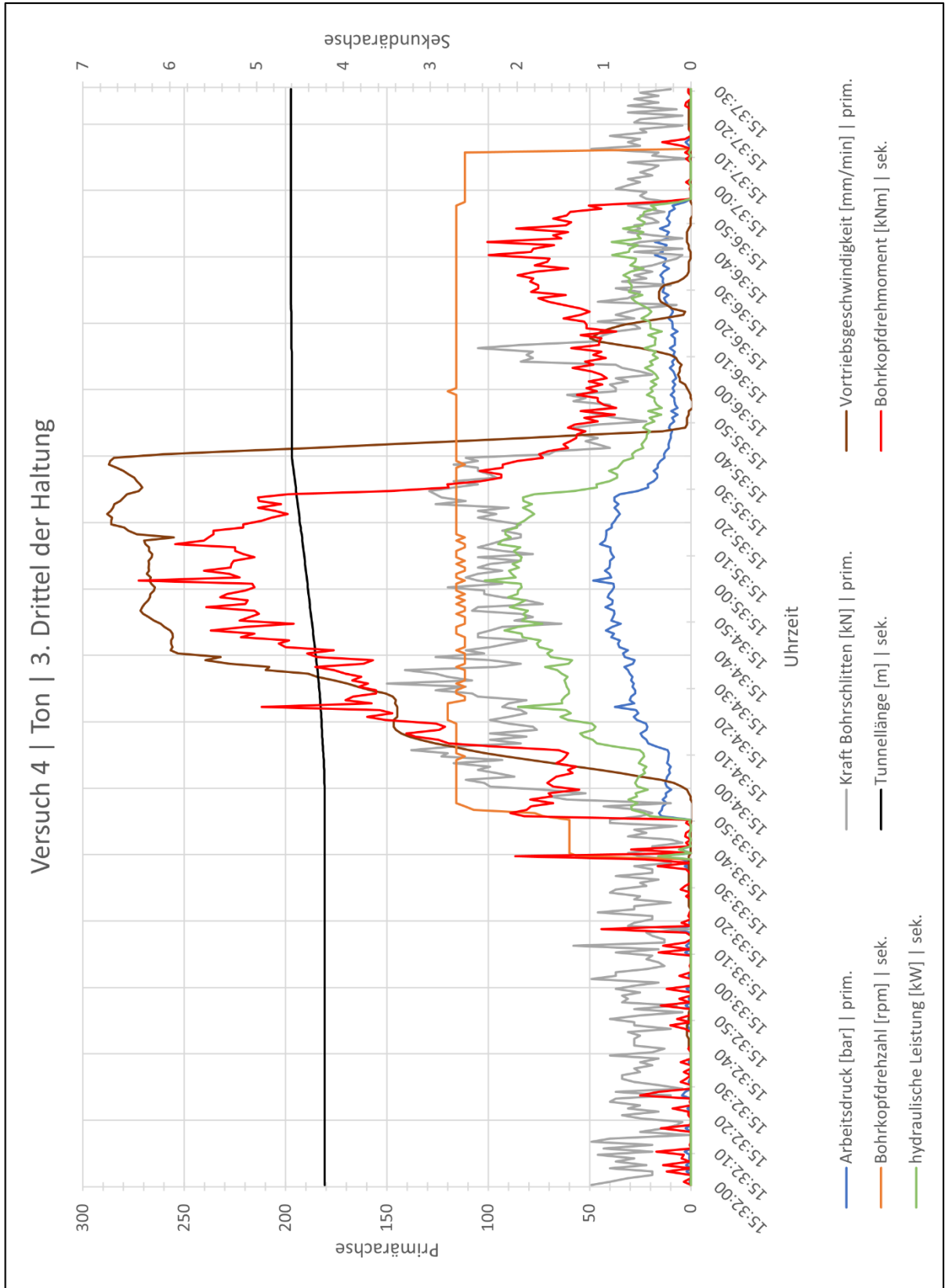


Figure 51: Test in clay (cutter head and carriage, last third)

11.7 Evaluation of the planned tests

The tests carried out show that the principle of overburden transport by the reamer works in sand and clay. However, the test in clay showed that individual pieces of clay are too large for the maximum permeable diameter of the jet pump and clogged it. At the same time, it is evident during all the tests that the machine operator needs more information to indicate an adapted advance rate. This should reduce the risk of heave and settlement, as well as the risk of clogging of the suction chamber. It should be noted, however, that the dimensions of the test setup represent a limited model of the real conditions and that changes in the groundwater level and an inaccurately adjusted advance rate will lead to more significant results than would be expected under real job site conditions.

For example, an increase in the groundwater level due to an insufficient volume flow would not be possible as quickly on a later job site as in the test setup. At the same time, any heave and settlement would be distributed over a larger area and be smaller if the machine were used in real conditions.

11.8 Test 5 in clay

General

The purpose of the test was to reproduce a blockage of the jet pump, which was shown in test 4. Accordingly, the data recording was examined for the typical circulation behavior for a blockage at the jet pump.

This includes the abrupt rise of the suction pressure to positive, which in normal operation is between -0.2 bar and -0.7 bar. Parallel to the drop in negative pressure in the suction line, there was a drop in the slurry volume flow, as well as an increase in the feed pressure. The pressure in the suction chamber also became positive (Figure 52). After 0.6 m of advance, this behavior appeared for the first time (Figure 52, 08:41:10) and the advance was interrupted.

Opening the jet pump showed that it is not blocked and that no material had collected in the suction pipe in front of the jet pump. However, this does not rule out the possibility that a piece of clay has clogged the pump, as this gradually dissolves due to the soluble properties of the clay. In addition, the opening of the bypass, which was associated with a stop, can cause further pressure surges in the circulation, which flush away any blockage. No blockages occurred during the rest of the advance, but two time periods show that excessive rate led to a gradual clogging of the suction chamber. In the first area between 09:24:00 and 09:27:30 (Figure 54), the pressure in the suction chamber and the pressure in the suction line rise continuously into the negative. At the same time, the feed and slurry volume flow decreases, while the pressure in the feed line increases. The same behavior can be seen in the area between 09:28:30 and 09:31:30.

All other advance parameters are not changed during these periods. The rotational rate is 2.5 min⁻¹ and the advance rate is 250 mm/min. According to calculated values, it can be seen that the advance rate was too high in these areas, since the difference between the conveying volume flow and the sum of the jet pump and feeding volume flow is between 2-4 m³ /h. The advance rate is also too high. The calculated suitable advance rate according to calculated values is 100-200 mm/min. The excessive advance rate forced too much overburden into the suction chamber. The gradual clogging of the suction chamber then causes the flow rate to drop. If the advance was stopped, the accumulated overburden is released and the conveying volume flow increases again. In the range between 09:42:00 and 09:52:00, it can be seen that an adapted advance rate prevents clogging of the suction chamber, since in this range all relevant advance parameters, such as the suction pressure and the conveying volume flow, remain constant.

Cutter head torque

The diagrams of the drill head torque and the hydraulic power consumed are shown in Figure 53 and Figure 55. The maximum drillhead torque during tunnelling amounts to 11 kNm and the maximum hydraulic power called up amounts to 7 kW. The average drill head torque during tunnelling is 5-9 kNm and the hydraulic power is 1-4 kW.

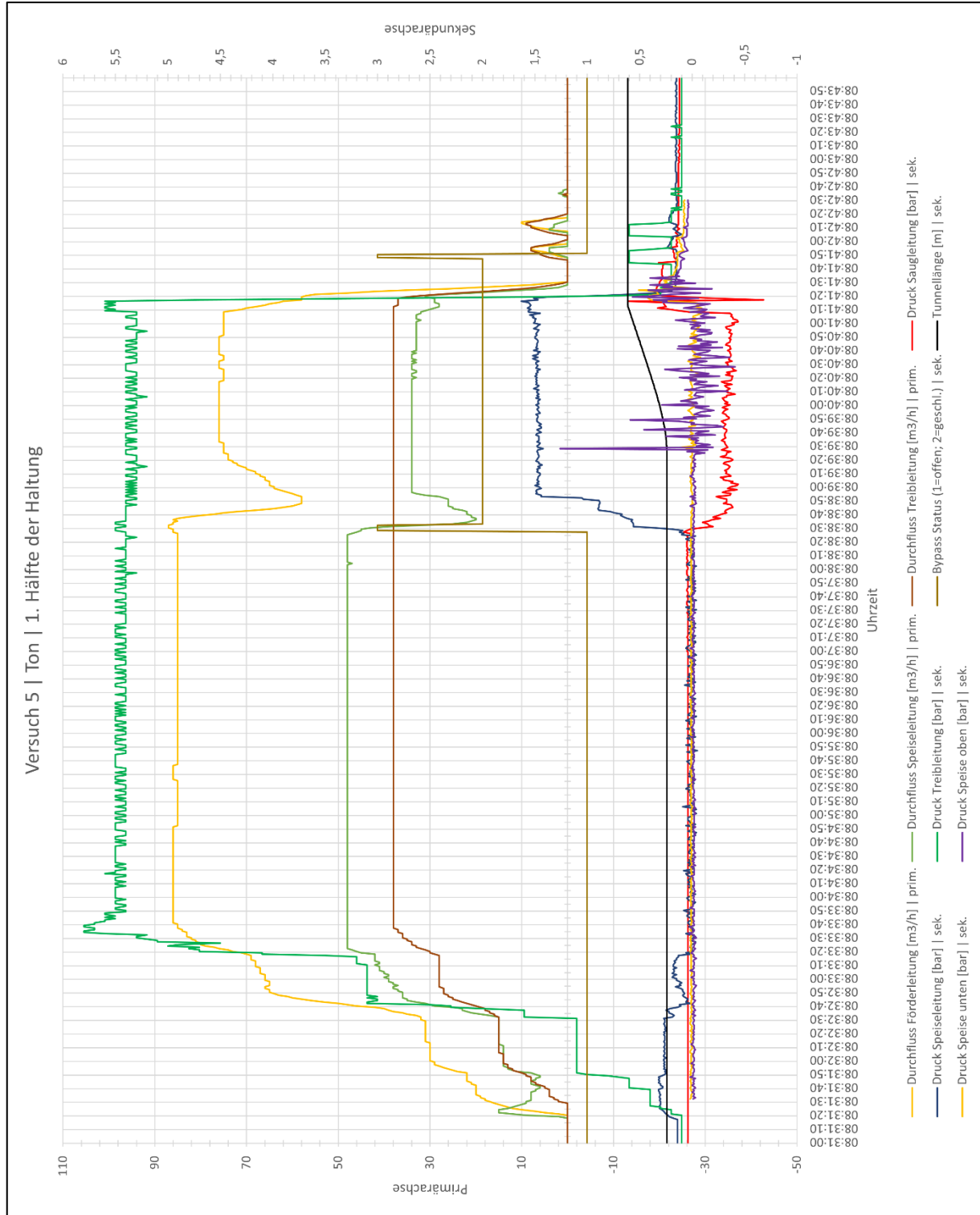


Figure 52: Test 2 in clay (circulation, first half)

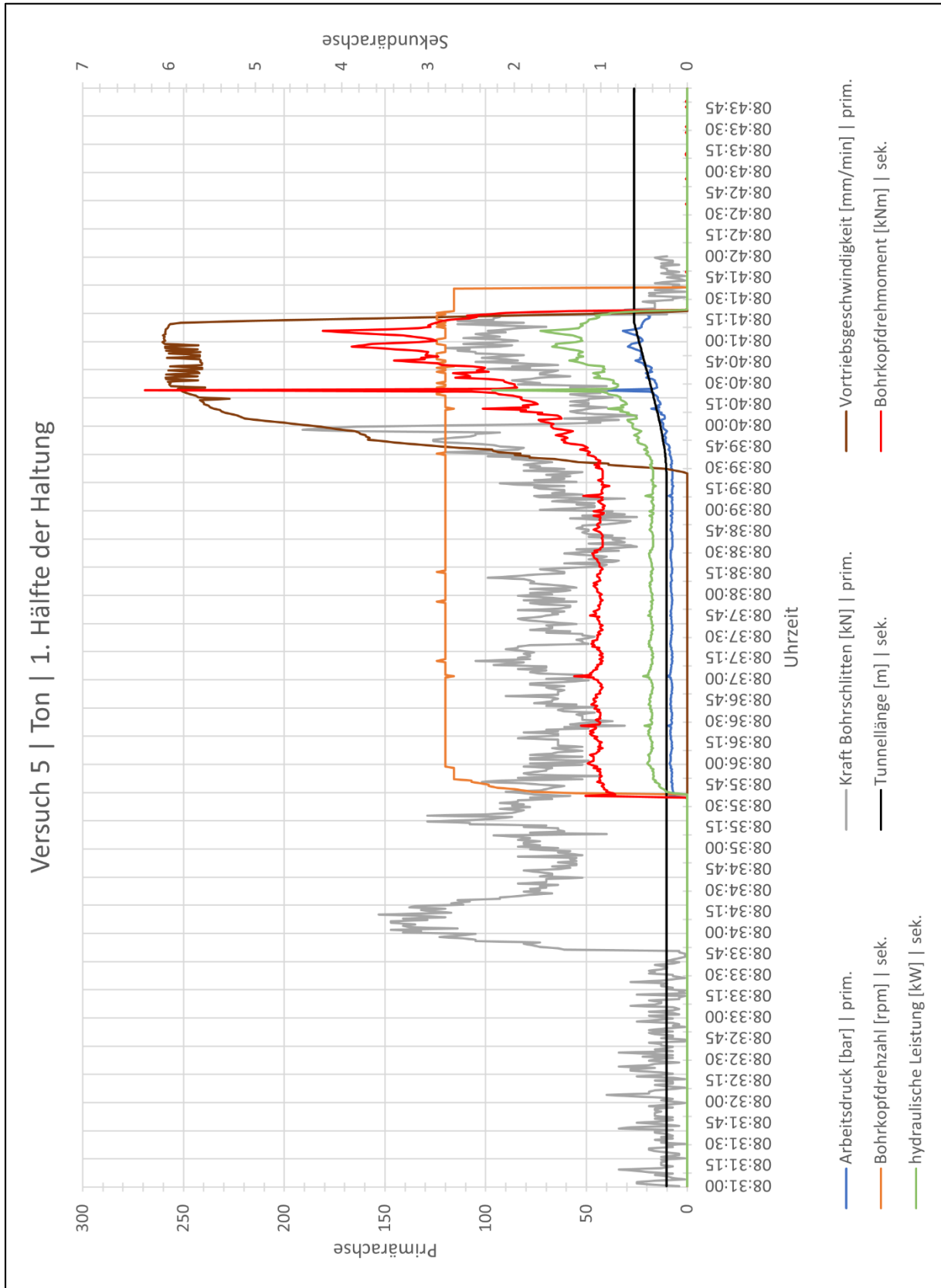


Figure 53: Test 2 in clay (cutter head and carriage, first half)

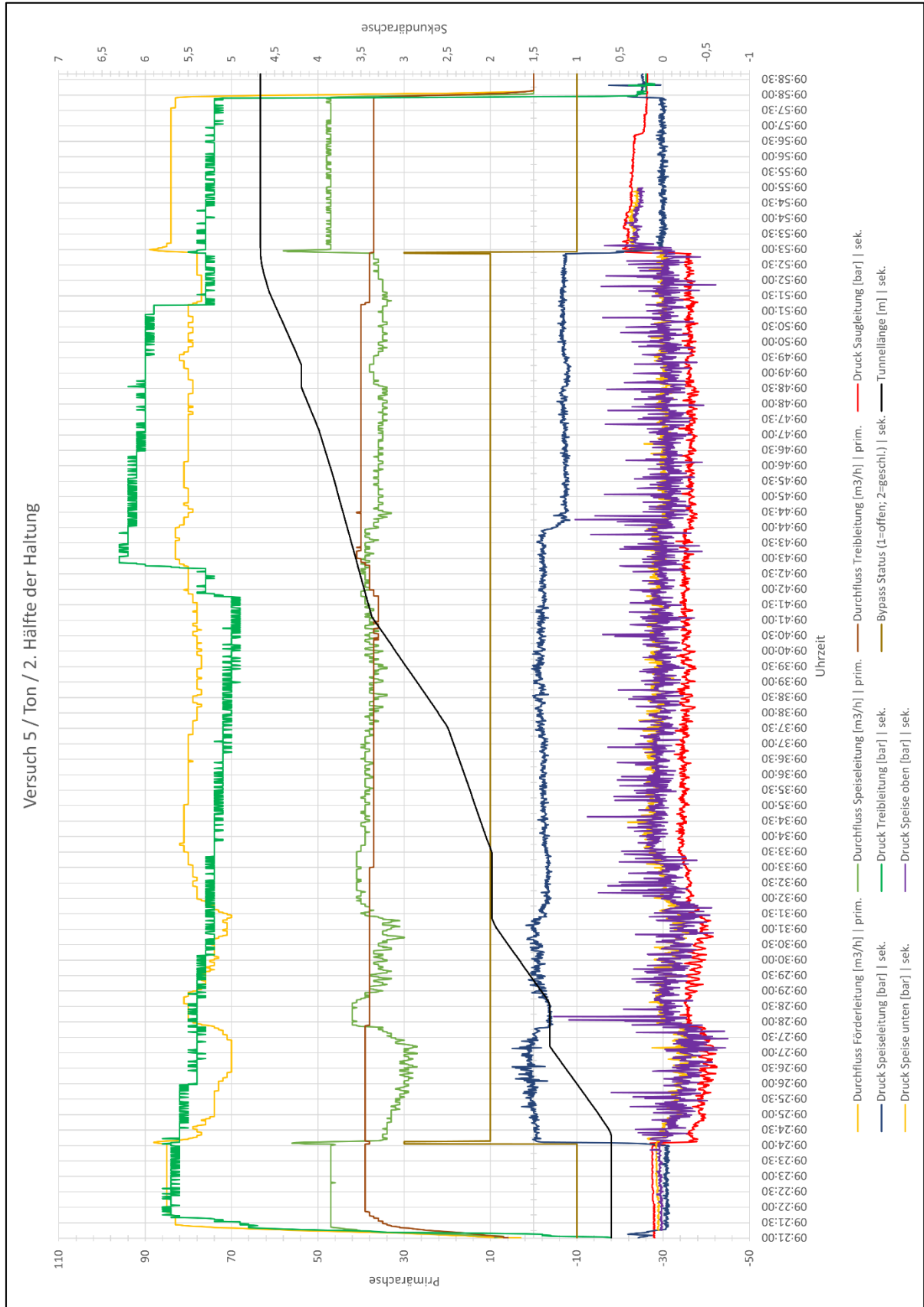


Figure 54: Test 2 in clay (circulation, second half)

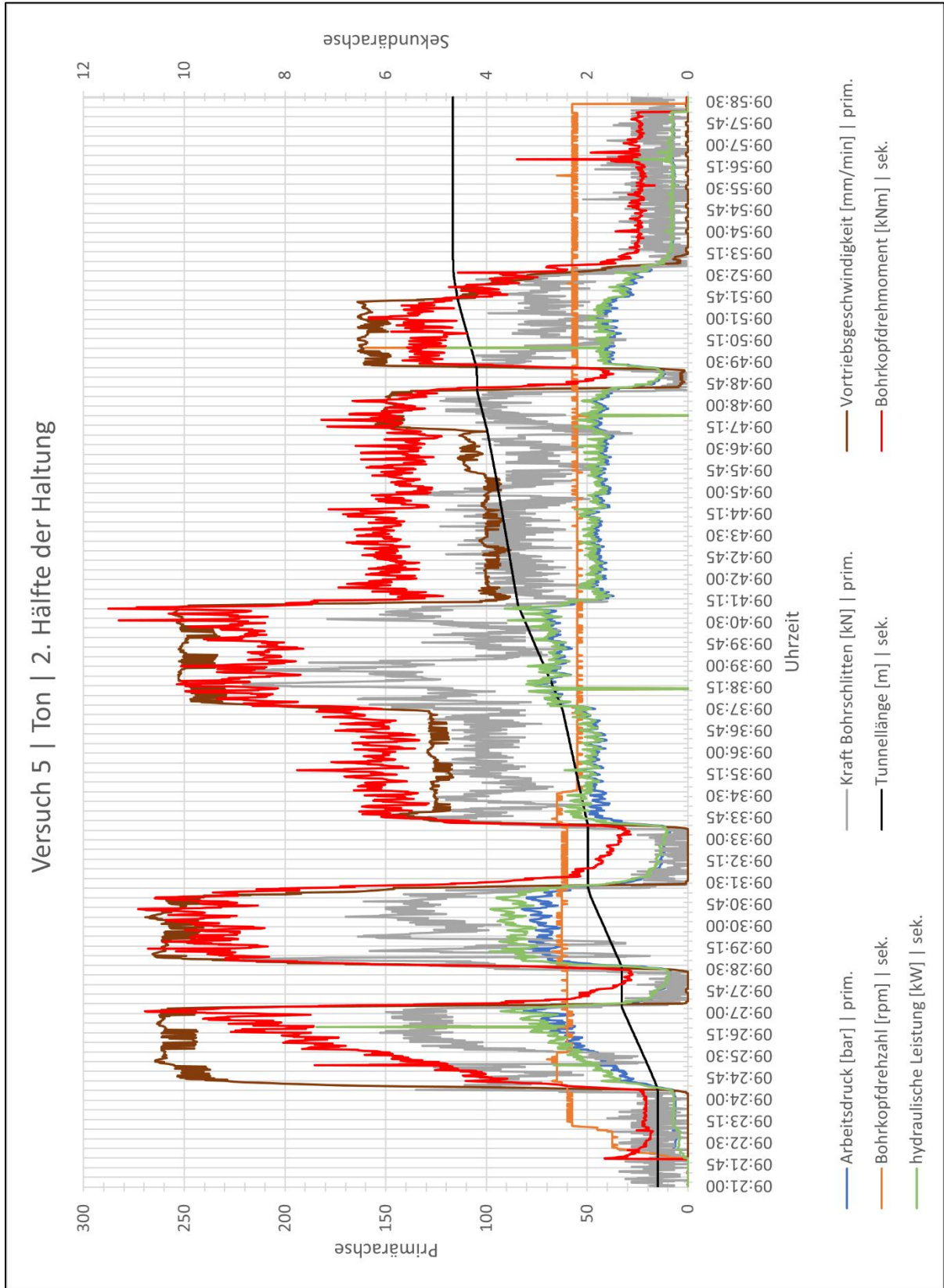


Figure 55: Test 2 in clay (cutter head and carriage, second half)

11.9 Test 6 in mixed gravel

General

At the beginning of the advance, the recorded data show the already mentioned blockage at the jet pump due to a jammed stone. Clearly visible is the increase of the suction pressure to positive at 08:55:50 (Figure 56), which remains positive until the bypass is opened at 08:56:20. This indicates a long-term blockage that will not clear on its own. Another indication of clogging is the value of the feed flow rate when the circulating through the bypass. This was 45 m³ /h at the beginning of the maintenance, while after the blockage there is no more flow at the feed line. It later turns out that this was due to the accumulation of debris in the bend of the suction line upstream of the jet pump. In the area between 09:05:00 and 09:08:00, attempts are made to retrieve the flow in the feed line by starting up the jet pump several times. Finally, at 09:09:40, the feed flow is retrieved for the first time after the pressure for the jet pump has been increased up to 11.5 bar shortly before. A renewed start of advance and the associated closing of the bypass at 09:11:00 does not improve the situation. Until 12:06:40 (Figure 58), an attempt was made to loosen the blockage by starting up the jet pump again. No progress was made either, so the jet pump and the suction line are opened. The blockage caused by a stone that is too large for the nozzle.

Of the jet pump. It was then decided to reduce the openings on the suction box of the flaring machine and to carry out a seventh advance with reduced openings.

Cutter head torque

The diagram of the drill head torque is shown in Figure 57 and Figure 59. The maximum drill head torque during advance was 7.5 kNm. The average torque during advance is 3-5 kNm. No statements can be made about the hydraulic power, since the cutter head speed required for this was not recorded. This is due to a sensor problem that cannot be rectified before the start of advance.

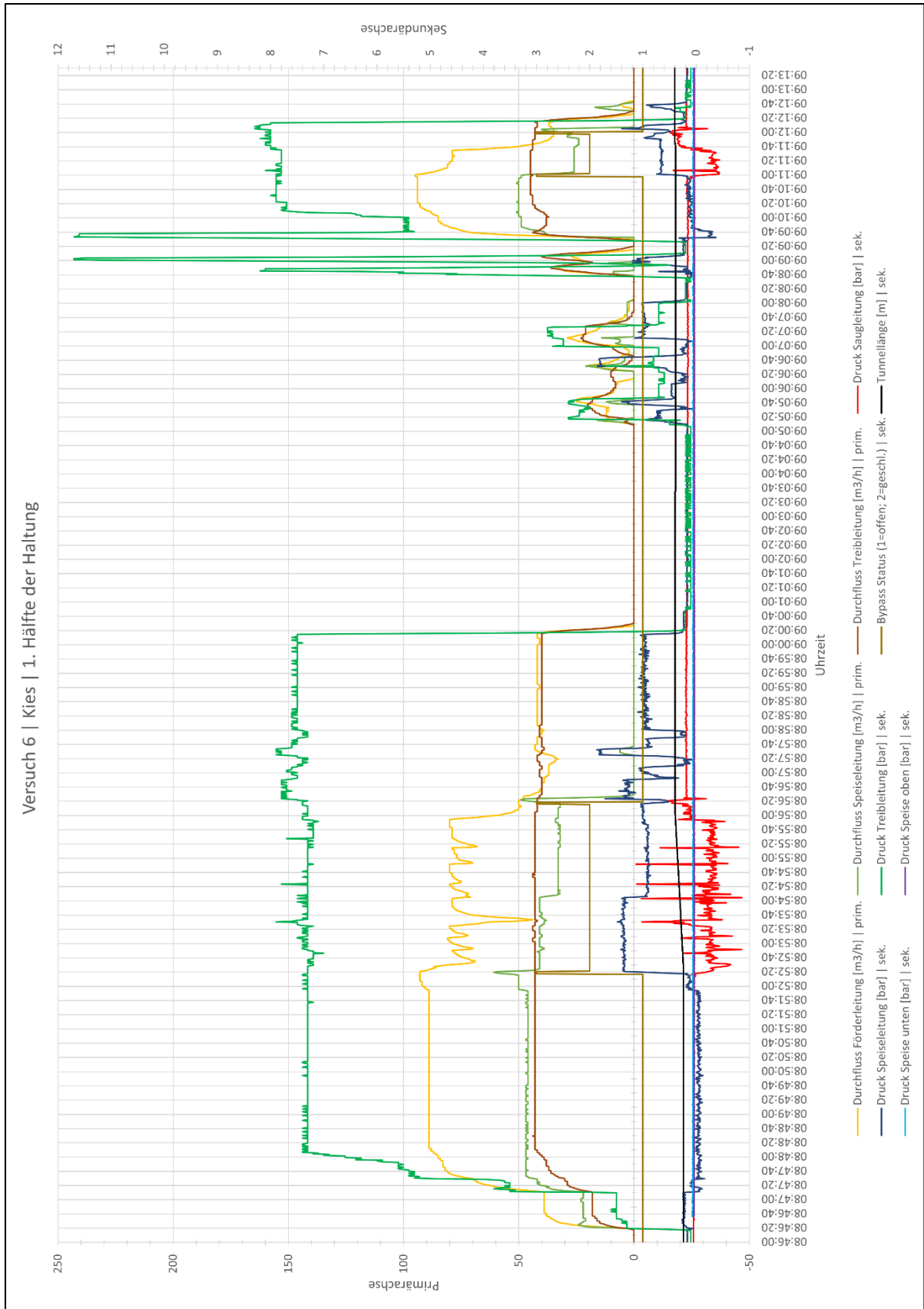


Figure 56: Test in mixed gravel (circulation, first half)

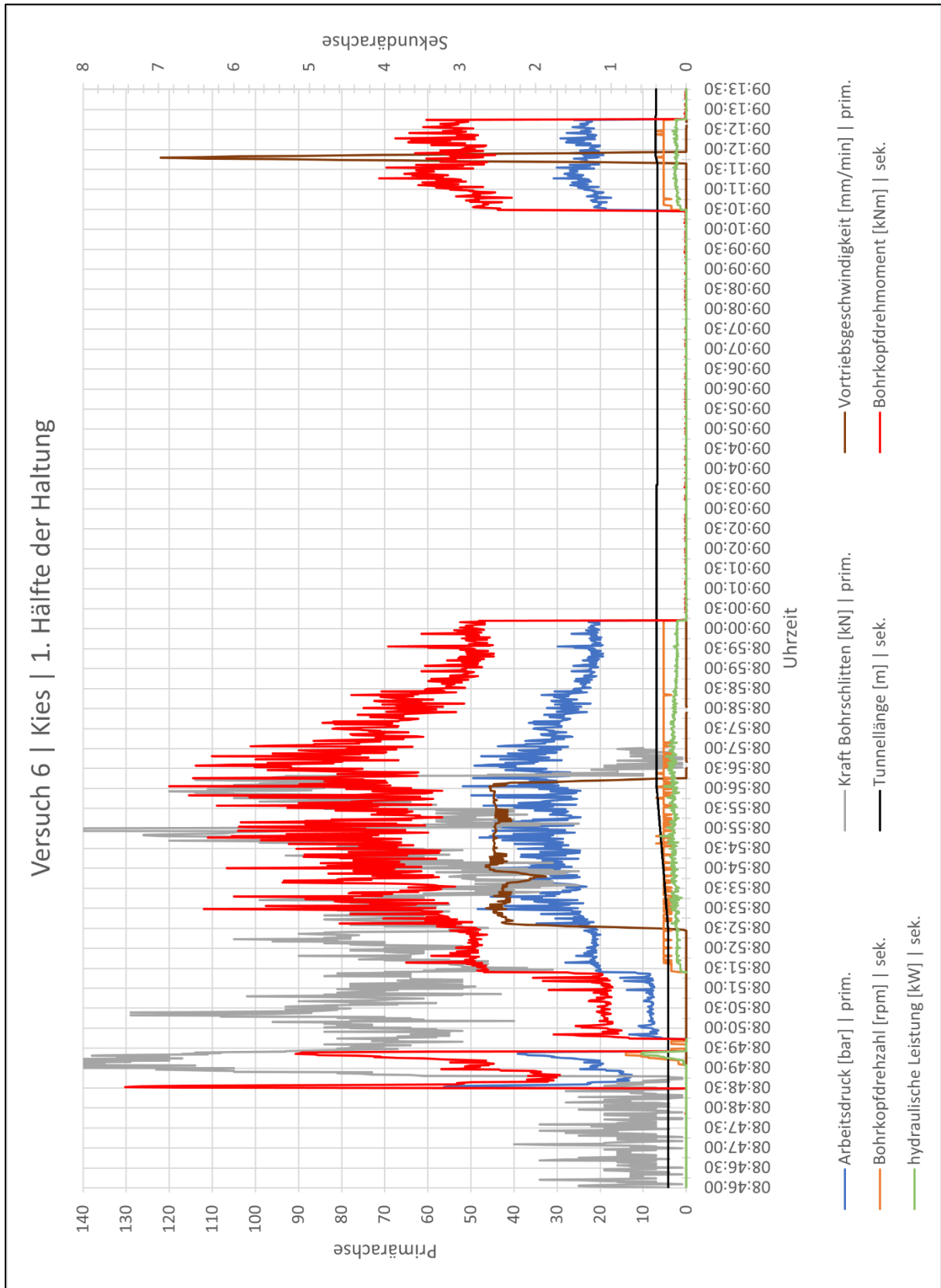


Figure 57: Test in mixed gravel (cutter head and carriage, first half)

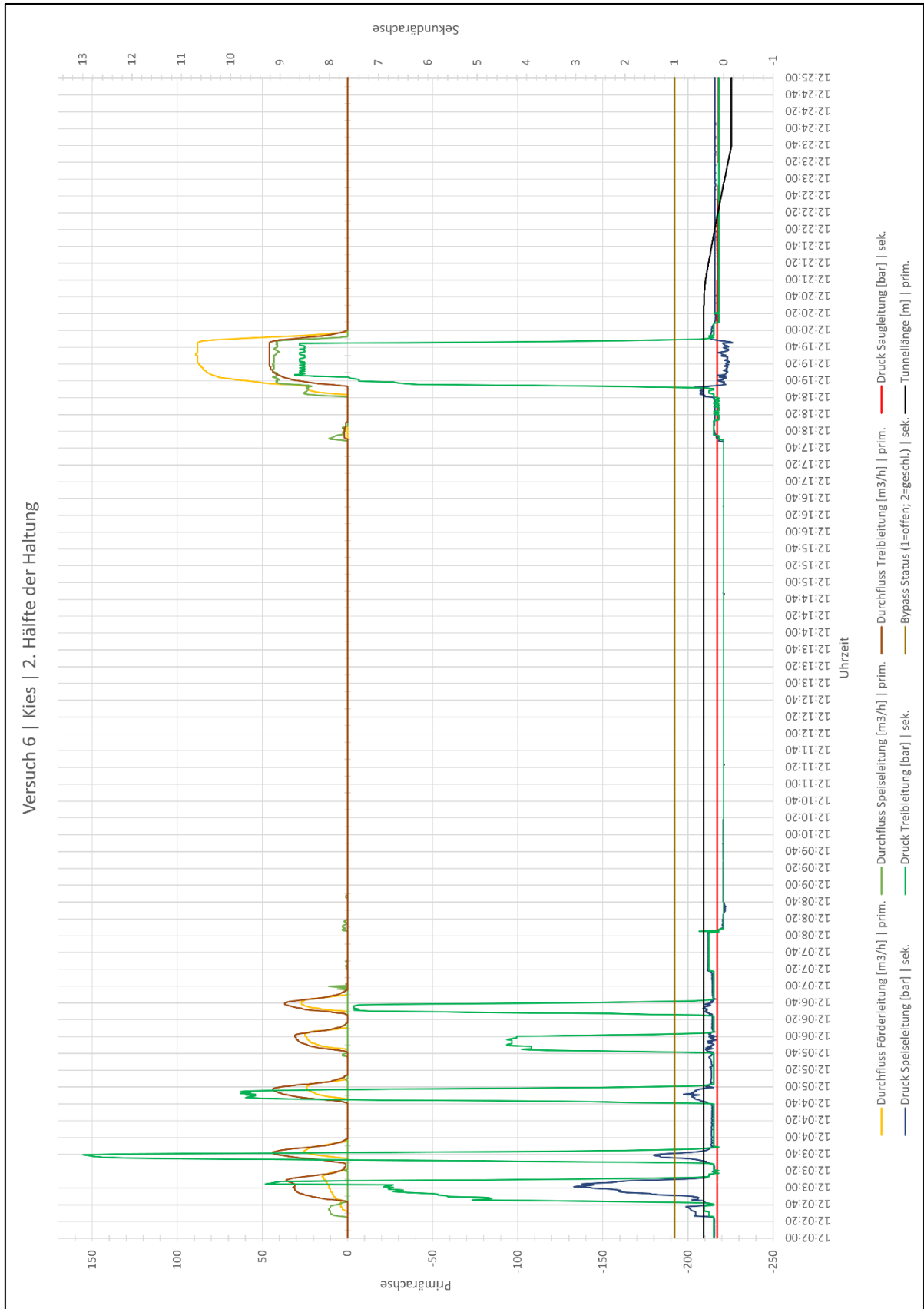


Figure 58: Test in mixed gravel (circulation, second half)

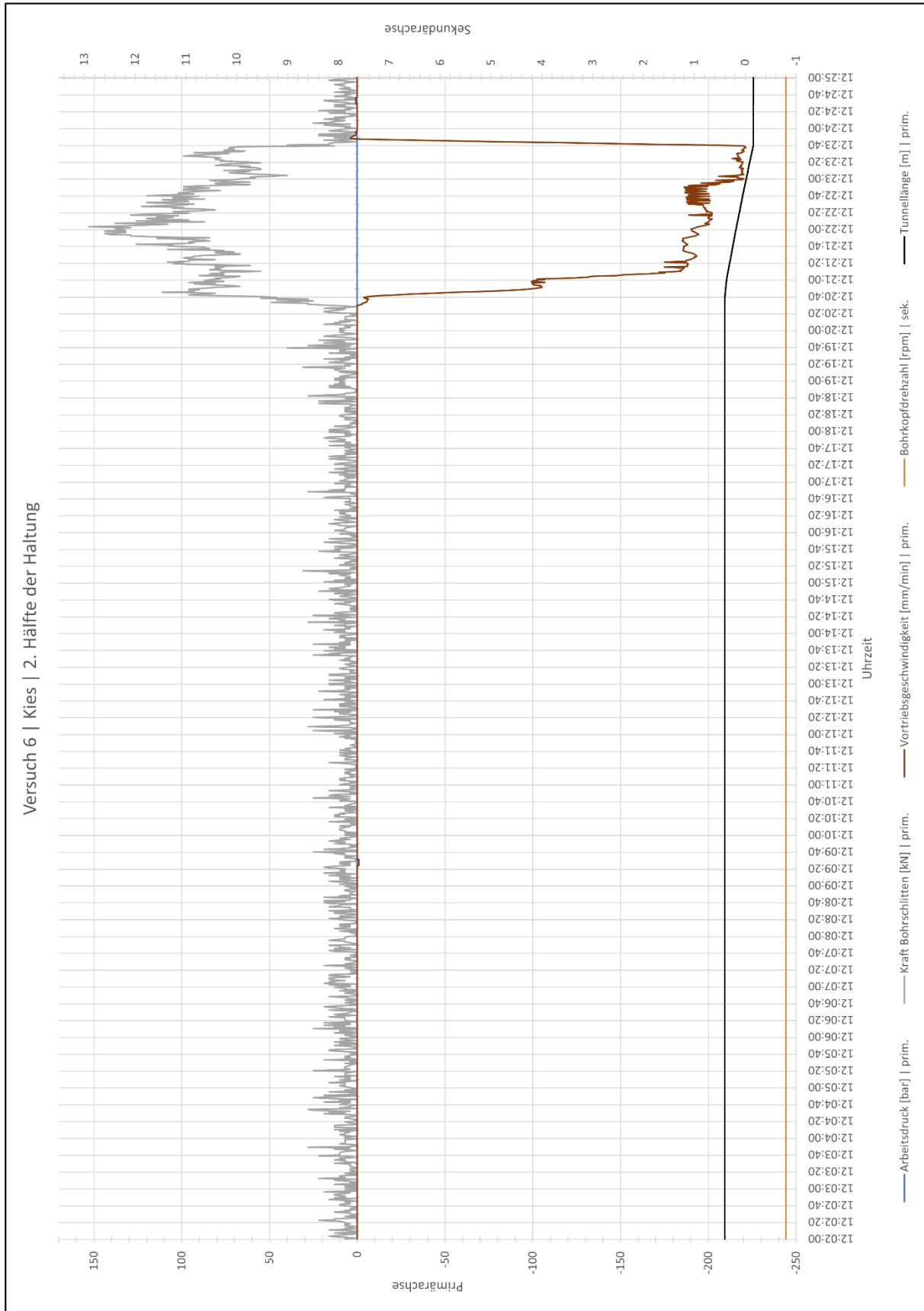


Figure 59: Test in mixed gravel (cutter head and carriage, second half)

11.10 Test 6 in mixed gravel

General

During advance, the jet pump was set to an even higher pressure of 8-10 bar compared to the other tests (Figure 60). This was to prevent the jet pump from collapsing directly in the event of short-term stoppers, which quickly release on their own. The advance rate, which is adapted to the parameters of the circulation according to calculated values, ensures an optimal, uniform overburden transport. Despite the reduction of the suction openings to 35 mm, there are individual pressure surges in the course of the suction pressure which indicate blockages. For example, the suction pressure briefly jumps to positive at 13:48:30, at 14:01:45, and at 14:04:45. This indicates short-term clogging at the jet pump trap nozzle. The suction pressure jumps to positive after the clogging, since in this case the pressure of the waterline for the jet pump was briefly present in the suction line. However, since the values of the suction pressure dropped back to negative after the pressure surge (approx. -0.3 bar), the clogging phenomena are clearly not long-term. During the advance, the bypass is opened several times in order to flush the lines of the circulation and, in particular, the bend of the suction line just upstream of the jet pump. The only critical point of the posture occurs at 14:09:45, when the suction pressure jumps to positive for a longer period (about 10 s) and the flow rate of the slurry line collapses. In this case, a reduction of the advance speed from 80 mm/min to 30 mm/min is sufficient to give the system enough time to flush itself free. The working pressure of 40-70 bar was significantly higher than in the previous tests. This is due to the strength of the stones in the gravel, which must first be broken by the crusher bars after entering the drill head space.

Cutter head torque

The diagram of the torque and the hydraulic power consumed is shown in Figure 61. The maximum torque during advance was 10 kNm and the maximum hydraulic power consumed was 16 kW. The average torque during advance was 5-9 kNm and the hydraulic power was 6-10 kW.

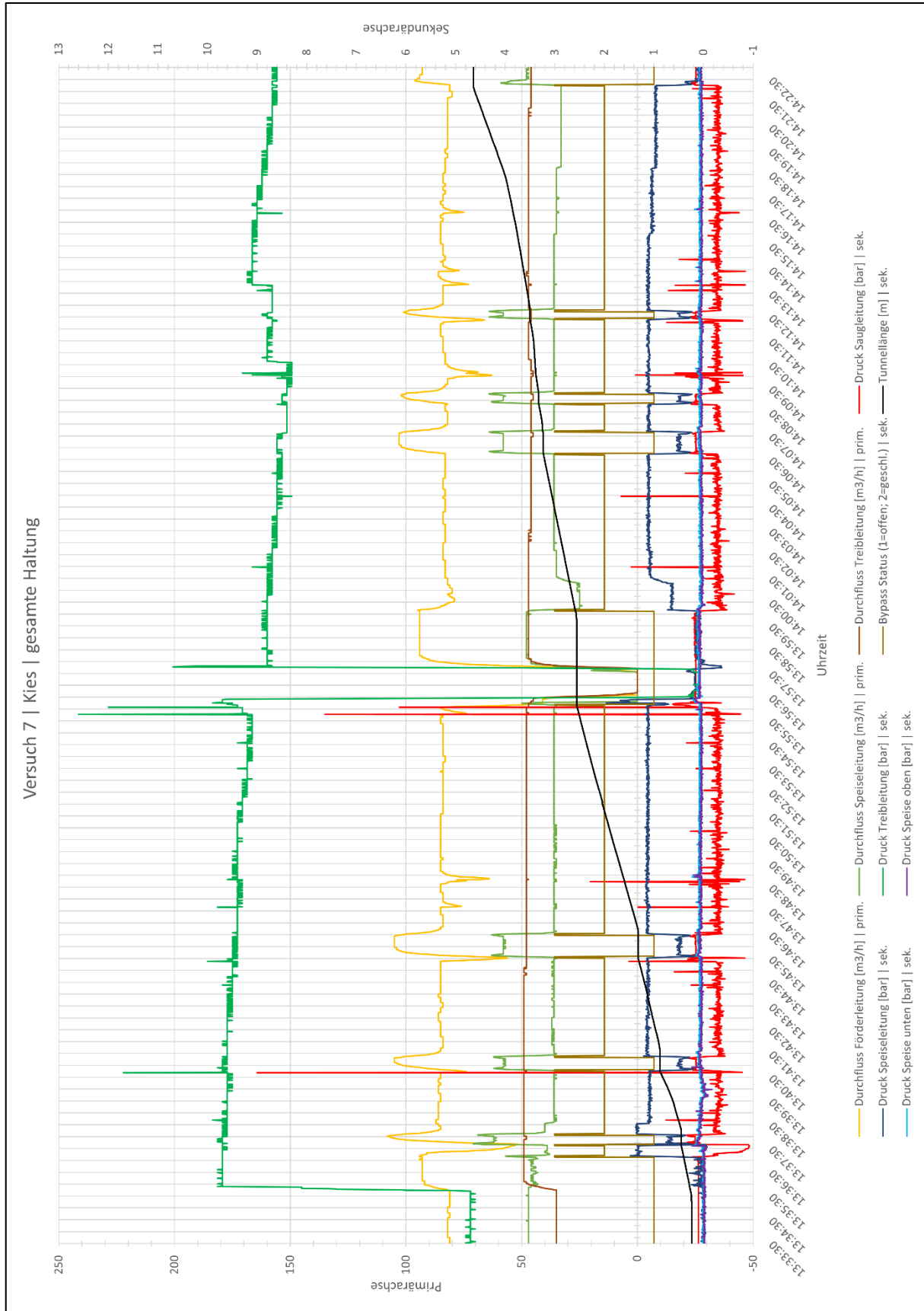


Figure 60: Test 2 in mixed gravel (circulation)

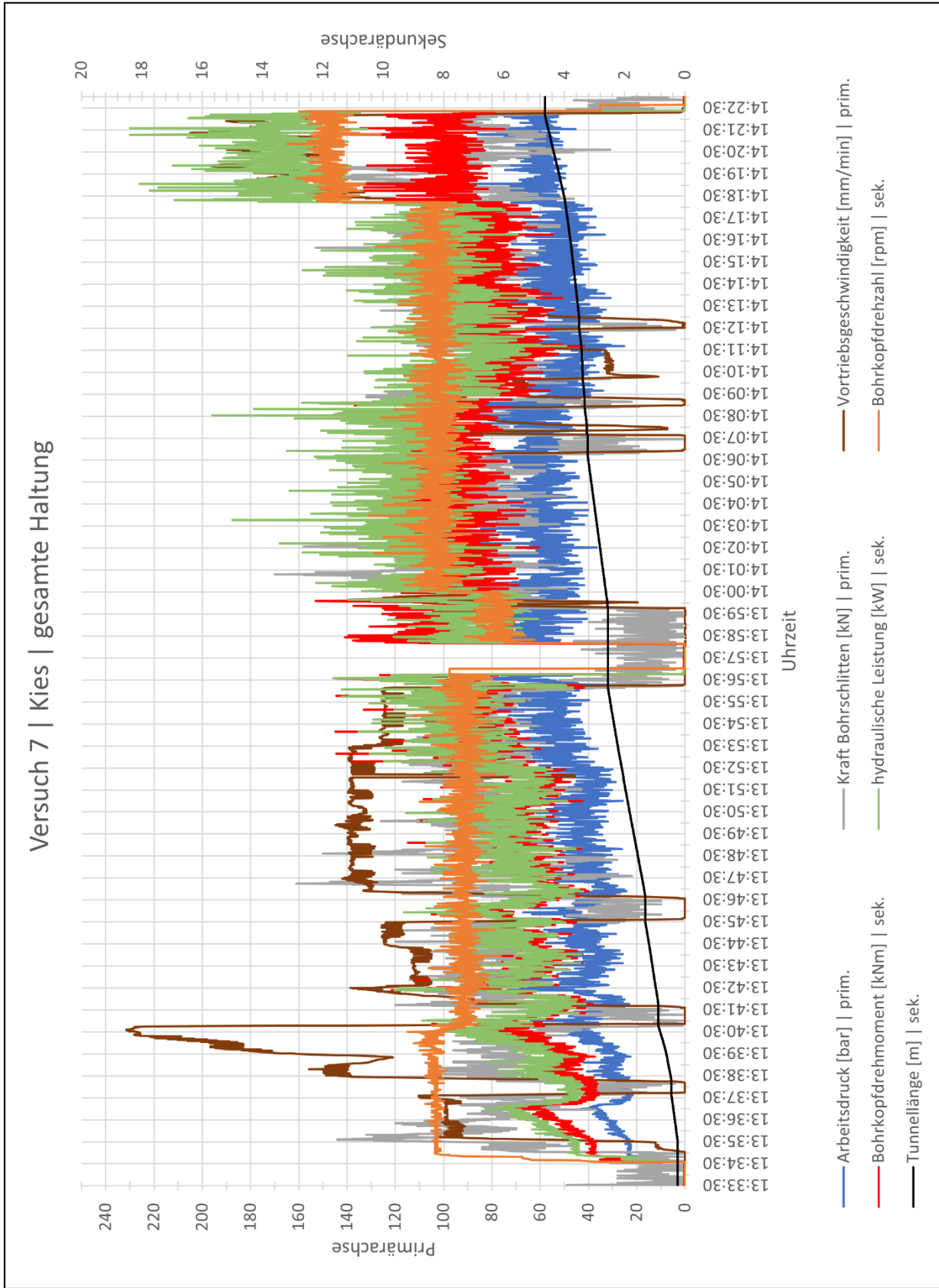


Figure 61: Test 2 in mixed gravel (cutter head and carriage)

12 Design optimisation options

During the test and after the evaluation, a number of points emerged that should be discussed in the further design development of the reamer. It would also be interesting to clarify for which soils the machine would also be suitable in addition to those tested so far.

13 Conclusion

The testing of the reamer in combination with the EPP machine mentioned in the title of this paper could be tested in the course of the tests carried out and the interaction of the components could be optimised.

The experiments show that the principle of overburden extraction works in principle, however, it reaches its limits depending on the geological conditions. This is particularly evident in the fourth test, where the jet pump becomes clogged with dry clay particles. The following test in mixed gravel illustrates this problem with a stone jammed in the jet pump's nozzle. The subsequent reduction of the openings to 35mm shows, when driving through the mixed gravel again, that this optimisation is sufficient to enable stable overburden extraction. Further mechanical adjustments are not required.

In addition to the difficulties in overburden extraction, it is particularly noticeable in the control of the machine and the associated setting of the circulation that parameters incorrectly selected by the machine operator, such as a pressure for the jet pump that is too low, have a strong impact on the test result. Therefore, during the first four tests, settlement, heave and water leakage occurred, which in retrospect could probably have been avoided.

It should be noted, however, that the test uses a prototype for which no empirical values are available, which could provide the machine operator with indications for correct settings.

In addition, the test limits are very low due to the dimensions of the test container compared to reality. The dimensions of the test container are very small compared to reality, which means that reactions of the machine and the circulation are more pronounced.

Nevertheless, in the future there should be a prior sensitisation of the effects of individual unadjusted machine parameters should take place in advance.

The new display of the recommended advance speed, which was introduced in the visualisation from the sixth test onwards, shows that this value is of interest to the machine operator.

After the last test in mixed gravel, the reamer has been optimised to such an extent that it can break stones up to 56 mm in diameter, that are in the ground. In order to fully integrate the machine into the system of the EPP, further adaptations will be necessary in the future, such as the construction of a longer adapter pipe between the last thrust pipe and the reamer. The

jet pump should be placed in this to achieve the shortest possible length of the suction pipe. During the tests a longer suction and slurry line is also possible, but is not recommended, because this is associated with high pressure losses and the risk of material deposits.

14 Outlook

The successfully completed tests with the reamer provide the basis for further design adjustments, which include an electrical and hydraulic supply of the machine, as well as the placement of individual components.

The aim of these adjustments will be to enable the machine to be supplied with energy from the side of the launch shaft. This includes the selection of a suitable hydraulic power unit that is powerful enough to achieve the desired drilling head speed and torque and at the same time does not significantly increase the existing cable cross-section. This is limited due to the thrust pipes of the EPP and the cable bushing contained therein.

Furthermore, it is necessary to develop a connection possibility between the reamer and the heating pipes that can withstand the tensile forces that occur.

For this purpose, it would be possible to adapt the tension head system of the EPP for the cable protection pipes to the diameter of the heating pipes.

A pressure sensor in the suction line near the cutting wheel will make sense.

Once this work has been completed, the reamer can be used in combination with the EPP for the first time in a field test. A successful application of the machine will significantly increase the application possibilities of the EPP system and improve the economic efficiency of trenchless installation of pipelines.

Widening to 36 inches would have potential for certain projects. However, this must be evaluated in more detail (design, power requirements, etc.).

Table of figures

Figure 1: Test site overview	7
Figure 2: Test site overview 1	8
Figure 3: Test side overview 2	8
Figure 4: Pipe thruster, thrust pipe, EPP	9
Figure 5: Inside view of test container (reamer)	10
Figure 6: Transparent pipe	10
Figure 7: Inside view of test container (thrust pipe)	11
Figure 8: Front view of the reamer.....	12
Figure 9: Side view of the reamer	12
Figure 10: Back view of the reamer	12
Figure 11: Main dimensions of the reamer	13
Figure 12: View of the reamer without cutter head	13
Figure 13: Schematic layout of the water cycle	15
Figure 14: Sectional view of the test container	17
Figure 15: Connections on the suction box of the reamer.....	21
Figure 16: Trolley for detection of heave and settlement	23
Figure 17: Sectional view of a penetration test with the Künzel bar	24
Figure 18: Hydac HMG3010.....	25
Figure 19: Visualisation in the control container	25
Figure 20: Groundwater level in loose sand during filling	26
Figure 21: Diagram for determining the suction volume flow in bypass position.....	28
Figure 22: Settlement before (left) and after advance (right).....	28
Figure 23: Height of the groundwater level in densified sand during filling.....	29
Figure 24: End position in densified sand.....	30
Figure 25: Installation of peat	30
Figure 26: Grain limiter on the suction box	34
Figure 27: Impact diagram for penetration tests in compacted sand.....	35
Figure 28: Position of the samples and diagram of the impact numbers in the clay.....	36
Figure 29: Settlement at loose sand.....	38
Figure 30: Test in loose sand (circulation, first third).....	39
Figure 31: Test in loose sand (cutter head and carriage, first third).....	40
Figure 32: Test in loose sand (circulation, second third)	41
Figure 33: Test in loose sand (cutter head and carriage, second third)	42
Figure 34: Test in loose sand (circulation, last third).....	43
Figure 35: Test in loose sand (cutter head and carriage, last third)	44
Figure 36: Settlement at densified sand	46
Figure 37: Test in densified sand (circulation, first half)	47
Figure 38: Test in densified sand (cutter head and carriage, first half).....	48
Figure 39: Test in densified sand (circulation, second half)	49
Figure 40: Test in densified sand (cutter head and carriage, second half)	50
Figure 41: Test in peat (circulation, first half)	52
Figure 42: Test in peat (cutter head and carriage, first half)	53
Figure 43: Test in peat (circulation, second half).....	54
Figure 44: Test in peat (cutter head and carriage, second half)	55
Figure 45: Settlement at clay.....	57
Figure 46: Test in clay (circulation, first third).....	58

Figure 47: Test in clay (cutter head and carriage, first third).....	59
Figure 48: Test in clay (circulation, second third)	60
Figure 49: Test in clay (cutter head and carriage, second third)	61
Figure 50: Test in clay (circulation, last third).....	62
Figure 51: Test in clay (cutter head and carriage, last third).....	63
Figure 52: Test 2 in clay (circulation, first half)	66
Figure 53: Test 2 in clay (cutter head and carriage, first half)	67
Figure 54: Test 2 in clay (circulation, second half).....	68
Figure 55: Test 2 in clay (cutter head and carriage, second half)	69
Figure 56: Test in mixed gravel (circulation, first half).....	71
Figure 57: Test in mixed gravel (cutter head and carriage, first half).....	72
Figure 58: Test in mixed gravel (circulation, second half)	73
Figure 59: Test in mixed gravel (cutter head and carriage, second half)	74
Figure 60: Test 2 in mixed gravel (circulation).....	76
Figure 61: Test 2 in mixed gravel (cutter head and carriage)	77

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

E Rapport WP5, Keuzemethodiek aanlegmethoden

Keuze van een aanlegmethode

AAMBEELD WP5



Keuze van een aanlegmethode
AAMBEELD WP5

Keuze van een aanlegmethode

AAMBEELD WP5

Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Trefwoorden	Warmte transportleiding, landelijk gebied, stedelijk gebied, aanlegmethode

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	05-03-2024
Projectnummer	11207943-020
Document ID	11207943-020-GEO-0001
Pagina's	24
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Henk Kruse HK	Piet Meijers Pm	Ahmed Elkadi

Samenvatting

Er zijn verschillende mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen zijn in WP1 een aantal aanlegmethoden die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe.
- EPP.
- Ploegen.

Voor deze methoden is een keuze methode uitgewerkt. De keuze methode is gebaseerd op een ingekorte multi criteria analyse. Door op een systematische wijze de aanlegmethode te beschouwen aan de hand van criteria, die worden bepaald door meerdere parameters wordt een objectieve en reproduceerbare keuze voor een aanlegmethode mogelijk, voor een bepaald leidingtracé.

Er is sprake van een groot aantal parameters per criterium. Getalsmatig kunnen daarom belangrijke parameters minder een rol van betekenis spelen. Het daarom van belang om aan te geven welke parameter van welke methode de inzet van een bepaalde methode onmogelijk maakt. Dit wordt de zogenaamde Afbreuk-parameter genoemd.

De keuze van de parameter waarden en de weegfactoren zijn het resultaat van een kwalitatieve beoordeling, maar de berekening van de criteria waarden en de eind score per aanlegmethode volgen uit eenvoudige formules, die in het rapport zijn beschreven. Door de resultaten van de tussenstappen van de berekeningen vast te leggen wordt de keuze voor een methode reproduceerbaar.

Bij de toepassing van de keuze methode worden de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaling van de waarde van de criteria aan de hand van de individuele parameter waarden.
2. Bepaling van de weegfactoren die aangeven hoe belangrijk een criterium is ten opzichte van de andere criteria. Hierbij wordt het criterium kosten op een andere manier meegenomen.
3. Bepaling van de score per aanlegmethode en vergelijking van de best scorende methode met de andere aanlegmethoden.

Bij een voorbeeld van de toepassing van de keuze methode voor een warmte transportleiding tracé in stedelijk gebied is de EPP methode als voorkeur aanlegmethode naar voren gekomen. In landelijk gebied is de methode Ploegen naar voren gekomen bij de toepassing van de ingekorte MCA keuze methodiek voor selectie van de aanlegmethode.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Algemeen	6
1.2	Werkpakketten	6
2	Aanlegsituaties	7
2.1	Cases	7
2.1.1	Stedelijk gebied	7
2.1.2	Landelijk gebied	7
2.2	Aanlegmethoden	7
2.2.1	Algemeen	7
2.2.2	Horizontaal gestuurd boren	7
2.2.3	Direct Pipe methode	8
2.2.4	E Power Pipe	9
2.2.5	Ploegen	11
3	Keuze van methode	12
3.1	Algemeen	12
3.2	Multi criteria analyse	12
3.3	Criteria en parameters	12
3.3.1	Criteria	12
3.3.2	Parameters van de criteria	13
3.4	Ingekorte MCA keuze methode	15
4	Voorbeeld van een keuze	17
4.1	Algemeen	17
4.2	Voorbeeld stedelijk gebied	17
4.3	Voorbeeld landelijk gebied	18
5	Conclusie	20
	A Specialisten	21
	B Voorbeeld stedelijk gebied	22
	C Voorbeeld landelijk gebied	23

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Afgelopen jaren is onderzoek gedaan naar verbetering van aanlegmethoden voor leidingen zoals E-Powerpipe, Direct Pipe en de Ploegmethode. Bij de beoordeling en keuze uit beschikbare aanlegmethoden (inclusief toepassing van HDD) is er behoefte aan een vergelijkingssystematiek ten behoeve van de aanleg van warmtetransportleidingen.

Om bovenstaande aspecten nader te onderzoeken is het project 'AanlegMethoden warmtetransportleidingen in BEELD (AAMBEELD)' opgestart. Dit project brengt in beeld hoe op een duurzame manier en met weinig overlast voor de omgeving warmtetransportleidingen kunnen worden aangelegd op een veilige en kosteneffectieve wijze.

In algemene zin is de doelstelling om te komen tot kennisontwikkeling om efficiënt warmtetransportleidingen aan te kunnen leggen tegen lage maatschappelijke kosten. Door een meer gestructureerde keuzesystematiek te ontwikkelen neemt de zekerheid toe dat in de beginstadia van een project de juiste keuzes gemaakt worden en wordt het uitvoeringsrisico voor de geselecteerde installatiemethode verkleind. Dit reduceert aanlegkosten en hinder voor de omgeving.

Hieruit komen een aantal subdoelstellingen uit naar voren bij de huidige stand van de techniek:

- Methodiekontwikkeling vergelijking aanlegmethoden.
- Ontwerp van verschillende installatiemethoden voor warmtetransportleidingen.
- Beoordeling geschiktheid bestaande en innovatieve installatiemethoden aan de hand van ervaringscijfers.
- Optimalisatie boorvloeistof(fen) voor aanleg en gebruik warmtetransportleidingen.
- Nadere analyse aanlegbelasting warmtetransportleidingen.
- Synthese ten behoeve van ontwikkeling praktijkrichtlijn(en).

1.2 Werkpakketten

De werkzaamheden van AAMBEELD zijn onderverdeeld in de volgende vijf werkpakketten:

- Werkpakket 1 Selectie van aanlegmethoden.
- Werkpakket 2 Ontwerpen met de geselecteerde kansrijke aanlegmethoden.
- Werkpakket 3 Optimalisatie boorvloeistof voor warmtetransportleidingen.
- Werkpakket 4 Aanlegtesten van warmte leidingen.
- Werkpakket 5 Synthese werkpakketten tot Richtlijn.

Dit rapport beschrijft de resultaten van WP5. In een vervolg op werkpakket 1 is door verschillende specialisten naar de mogelijke aanlegmethoden voor warmte leidingen gekeken en is een methode afgeleid om een keuze te kunnen maken tussen methoden die kansrijk zijn voor de aanleg van warmte transportleidingen.

2 Aanlegsituaties

2.1 Cases

Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. De verschillende aanlegmethode zullen dus zowel voor een stedelijke case als een landelijke case worden beschouwd.

2.1.1 Stedelijk gebied

De ondergrond in stedelijk gebied wordt gekenmerkt door zandgrond. In west Nederland is dat antropogene zandgrond, in oost Nederland is de zandgrond van nature aanwezig. Het stedelijk gebied bestaat voor een groot deel uit bovengrondse infrastructuur zoals wegen, tram en buslijnen, parkeergelegenheden, recreatie locaties met groenvoorzieningen en gebouwen. Naast bovengrondse infrastructuur is er ondergrondse riolering aanwezig. Er zijn grote diameter vrij verval rioleringen en persriolen aanwezig. Er zijn veel elektriciteitskabels aanwezig met een verschillend voltage. Gas en water leidingen van het distributie net en van transport netwerken zijn aanwezig. Om relatief geringe diepte zijn glasvezelkabels aanwezig.

In het stedelijke gebied is de ondergrondse infrastructuur, met uitzondering van de vrij verval riolering, vaak gelegen boven een diepte van 1,5 m onder maaiveld. Op verschillende plaatsen in het stedelijke gebied zijn wel diepere leidingen aanwezig die door middel van horizontaal gestuurde boringen zijn aangelegd.

2.1.2 Landelijk gebied

In west Nederland is het landelijk gebied te beschrijven als een polder met een grondsoort die voornamelijk uit klei of veen bestaat. De grondwaterstand in het gebied is hoog, zowel in de zomer als in de winter. Onder natte omstandigheden, als er veel neerslag is gevallen, is het gebied slecht te betreden en zijn er voorzieningen nodig om schade aan de bovenste grondlagen te vermijden

Bovengronds bestaat het landelijk gebied vooral uit agrarisch gebied. In dit geval is er meestal sprake van grasland. Ter plaatse van het beschouwde gebied kunnen drainage voorzieningen aanwezig zijn. De drainage bestaat uit flexibele poreuze ondiep gelegen afwateringsbuizen. Lokaal zijn er op enkele plaatsen kruisende leidingen en kabels aanwezig.

2.2 Aanlegmethoden

2.2.1 Algemeen

In het eerste werppakket van AAMBEELD, WP1 zijn een aantal aanlegmethoden geselecteerd voor nadere beschouwing. De aanlegmethoden die zijn geselecteerd worden als kansrijk beoordeeld om in te zetten in landelijk of stedelijke gebied.

Hieronder volgt een korte beschrijving van de geselecteerde aanlegmethoden.

2.2.2 Horizontaal gestuurd boren

Horizontaal gestuurd boren maakt het mogelijk om eerst een boorgat te creëren waarin een warmte transportleiding kan worden geïnstalleerd.

Tijdens de pilot boring wordt vanaf het intrede punt waar de boorstelling is gesitueerd een relatief klein boorgat gemaakt onder het te kruisen object door naar het uitrede punt. Afhankelijk van de gebruikte boorapparatuur en de samenstelling van de te doorboren grondlagen bedraagt de diameter van het pilot boorgat 120- 360 mm. Afhankelijk van de diameter van de aan te leggen leiding kan het initiële boorgat worden vergroot door in een aantal stappen een zogenaamde ruimer, waarvan de diameter per ruim-stap toeneemt, door het boorgat te trekken. Uiteindelijk kan de leiding of kabel worden ingetrokken in het geruimde boorgat. Aan het uiteinde van de leiding wordt ten behoeve van het intrekken een trekkop gemonteerd. Om er zeker van te zijn dat het boorgat niet is ingestort wordt vaak een ruimer voor de trekkop geplaatst. De boorstangen en de ruimer roteren, zodat er tussen de trekkop en de ruimer een zogenaamde swivel moet worden geplaatst die rotatie van de leiding tijdens het intrekken voorkomt. Om bij het intrekken de leiding het boorgat in te leiden wordt een intrekboog geconstrueerd (zie onderstaande figuur).



Figuur 2.1 Aanleg leiding middels HDD.

2.2.3 Direct Pipe methode

Bij de Direct Pipe methode wordt een leiding met daarvoor een boormachine in de grond gedrukt.

De Direct Pipe-methode maakt het mogelijk een leiding met een relatief grote diameter in een continue operatie op grote diepte te installeren met een Pipe Thruster. Net als bij microtunnelling wordt de ontgraving van de grond verzorgd door een microtunnelboormachine, die is bevestigd vóór de leiding. Het ontgravingsfront voor de machine wordt gesteund door een boorvloeistof, die gecontroleerd ontgraven mogelijk maakt.

De Pipe Thruster is horizontaal en verticaal gefixeerd en bevindt zich op geringe diepte onder het maaiveld. De Pipe Thruster heeft grote klemmen waarmee de leiding door het gecreëerde boorgat wordt geduwd. Doordat de microtunnelboormachine een iets grotere diameter heeft dan de te installeren leiding, ontstaat een zogenaamde oversnijdingsruimte

tussen de leiding en de boorgatwand. Deze ruimte wordt gevuld met een smeervloeistof om het doorvoeren van de leiding te vergemakkelijken.



Figuur 2.2 Aanleg leiding middels Direct Pipe (afbeelding: Herrenknecht).

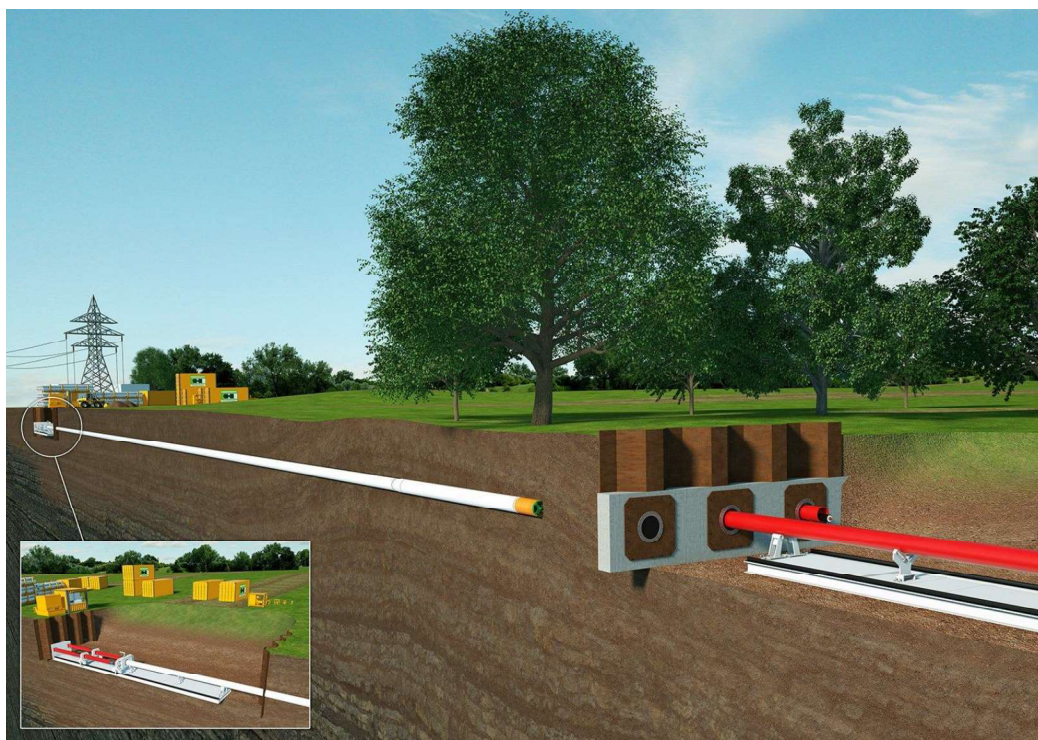
Er zijn in WP 4 van het AAMBEELD onderzoek testen met de Pipe Thruster op een 28'' warmte leiding uitgevoerd. De leiding bestond uit een stalen binnenbuis een PUR isolatie laag en een PE buitenbuis. Bij een aantal testen is er een GRP laag Glasfibre Reinforced Plastic) aangebracht op de buitenbuis.

Bij het voortbewegen van de leiding door de Pipe Thruster wordt een radiale klemkracht aangebracht over de omtrek van leiding door schalen van de klem die een geringe tussen ruimte hebben. Na het aanbrengen van de radiale kracht kan eveneens een axiale kracht worden aangebracht om de leiding voort te bewegen. Beide krachten zijn tijdens de testen gemeten door de leiding tegen een reactie frame aan te duwen. De maximaal toepasbare radiale klemkracht is separaat voor de axiale test gemeten, zodat duidelijk was welke klemkracht kon worden toegepast bij het duwen tegen het reactie frame.

Door de dikte van het GRP te vergroten ontstaat er een stijvere buitenbuis. Hierdoor kan de drukkracht van de Pipe Thruster over een grotere lengte worden afgedragen naar de stalen binnenbuis en is het mogelijk om de warmte transportleiding met de Direct Pipe methode te installeren.

2.2.4 E Power Pipe

De zogenaamde E-Power Pipe techniek (afgekort: EPP) is een sleufloze methode die door Herrenknecht is ontwikkeld voor het aanleggen van leidingen.



Figuur 2.3 Aanleg leiding middels E-Power Pipe techniek).

De standaard E-Power Pipe techniek maakt gebruik van een op afstand bestuurbare tunnelboormachine AVNS350XB, die een ontgravingsdiameter heeft van 505 millimeter en is ontworpen voor aandrijflengtes van meer dan 1.000 meter. De machine is in staat om met hoge precisie naar de geplande uitlijning te boren en onder bestaande infrastructuur zoals pijpleidingen, wegen, spoorwegen of kanalen door te steken. De tunnelmachine is uitgerust met een jetcamp en een geïntegreerd hydraulisch aggregaat.

De aanleg gaat in twee fasen. In de eerste fase wordt een pilot boring uitgevoerd vanaf de startschacht tot de eindschacht. Daarna wordt de boorkop zelf losgekoppeld van de laatste boorbuis en wordt de productleiding aangesloten. Tijdens het terugtrekken wordt de productleiding in het boorgat getrokken. Het boorgat blijft bij deze methode permanent ondersteund.

De huidige EPP machine heeft een diameter van 505 mm. Voor het aanleggen van leidingen met een grotere diameter is een aanpassing van de methode nodig. Door Herrenknecht is hiervoor een aanpassing van de methode met een ruimer ontwikkeld. De eerste fase (pilot boring) blijft hetzelfde. Tijdens de tweede fase (intrekfase) wordt een ruimer gemonteerd waarachter de te installeren leiding met grotere diameter wordt gekoppeld. Bij het intrekken van de grotere diameterleiding wordt de benodigde extra ruimte verkregen door met de ruimer grond te verwijderen en via de boorbuizen van de EPP machine af te voeren.

Bij het aanleggen van een leiding met deze methode zijn de bouwfases dus als volgt:

1. Maken van een boring met de standaard EPP machine.
2. Monteren van de ruimer en de te installeren leiding.
3. Terugtrekken van de combinatie EPP buis met ruimer en de te installeren leiding.

Als onderdeel van werkpakket WP4 van AAMBEELD zijn bij Herrenknecht testen met een ontwikkelde EPP- ruimer uitgevoerd. Hierdoor is het mogelijk om een grotere diameter warmte transportleiding ook met de EPP methode te installeren.

2.2.5 Ploegen

Voor het inploegen van de leidingen worden twee machines gebruikt, de ploeg voor het intrekken van de leiding en de lier voor het opwekken van de trekkracht.

Bij het inploegen wordt de in te trekken leiding verbonden met een ploeg. Figuur 2.4 toont de ploeg met aangekoppelde leiding en torpedo die zich aan de achterzijde van de ploeg bevindt.



Figuur 2.4 Ploeg met aangekoppelde leiding, de oranje-rode buis is de zogenaamde torpedo (foto: Deltares).

De methode is grondverdringend. De grondverdringing vindt plaats bij de ploeg zelf. De torpedo is vastgemaakt aan een zogenaamd zwaard, waarmee de grond (verticaal) wordt losgesneden. Dit zwaard is voorzien van een 'ripper shoe', die de grond horizontaal doorsnijdt. Vervolgens kan de leiding in de grond worden getrokken. Daarbij wordt de leiding onder een opgegeven helling in de grond getrokken, totdat het aanlegniveau is bereikt. Vervolgens wordt de leiding horizontaal verder getrokken tot de gewenste lengte is bereikt.

Als onderdeel van het TKI FLIP onderzoek zijn er in 2022 in Biddinghuizen en Sliedrecht veldtesten uitgevoerd. De uitgevoerde onderzoeken en de resultaten laten zien dat het mogelijk is om een warmte transport leiding door middel van ploegen te installeren.

3 Keuze van methode

3.1 Algemeen

Bij het maken van een keuze voor een aanlegmethode wordt doorgaans rekening gehouden met verschillende aspecten. Om beter inzichtelijk te krijgen hoe de keuze voor een aanlegmethode tot stand komt wordt in dit hoofdstuk het maken van een keuze beschreven aan de hand van verschillende criteria.

3.2 Multi criteria analyse

Bij een uitgebreide analyse kunnen de verschillende aanlegmethode worden beoordeeld aan de hand van een Multi criteria analyse. Een MCA is een zeer bewerkelijke analyse. Een MCA bestaat uit de volgende stappen:

1. Het definiëren van de evaluatiecriteria.
2. Het vastleggen van de scores voor de criteria.
3. Het standaardiseren van de scores.
4. Het wegen van de criteria door de stakeholders.
5. Het vaststellen eind score.

Bij een volledig uitgevoerde MCA neemt het standaardiseren van scores veel tijd in beslag als er sprake is van veel parameters die de criteria bepalen. Bij complexe criteria met veel parameters is het vaak niet mogelijk om tot een onderbouwde standaardisatie te komen. Daarom wordt in de praktijk vaak een vereenvoudigde MCA toegepast. Door de MCA te vereenvoudigen (in te korten) wordt de methode makkelijker toepasbaar. De opzet met een MCA aanpak is een systematische benadering, zodat de beslisser over de keuze van een aanlegmethode een afweging maken kan die objectief is en reproduceerbaar is (door een goede beschrijving en vastlegging).

3.3 Criteria en parameters

3.3.1 Criteria

De criteria voor een aanleg van een warmte transport leiding zijn beschreven in WP 1. De criteria zijn gerelateerd aan de leiding en de directe omgeving en zijn ingebracht door specialisten tijdens de WP1 sessies (Bijlage A). Ook zijn de aanlegkosten natuurlijk een belangrijk criterium. Hieronder zijn de geselecteerde criteria uit WP 1 weergegeven:

- Grondwater problematiek, Bij het aanleggen van de leiding moet rekening worden gehouden met grondwaterstroming. De grondwateromstandigheden moeten zodanig zijn dat aanleggen van de leiding niet wordt belemmerd. Ook moet de aanleg geen verslechtering opleveren van de grondwater condities.
- Grond problematiek, Bij aanleg van de leiding moet grond worden verplaatst of verwijderd. De verplaatsing of verwijdering moet met de apparatuur behorend bij de aanlegmethode kunnen worden uitgevoerd.
- Ervaring met methode. Een methode voor leidingaanleg kan beter worden toegepast als er in eerdere projecten al ervaring mee is opgedaan. Leidingen zoals warmte transport leidingen met isolatie en een omhullende buis reageren anders bij een leidingaanleg methode dan leidingen van een ander materiaal. Ervaring met de aanleg van het type leiding bij inzet van een bepaalde methode is daarom ook van belang.
- Leidingbelasting versus sterkte bij aanleg. Bij de aanleg worden er allerlei belastingen op de leiding uitgevoerd. De belastingen moeten toelaatbaar zijn. De leiding mag tijdens aanleg niet worden beschadigd.

- Complexiteit uitvoering. Afhankelijk van de omgeving kunnen er bij het uitvoeren van een bepaalde aanlegmethode allerlei handelingen nodig zijn die bijdragen aan de complexiteit van een methode.
- Functioneren leiding na aanleg. Als de leiding is aangelegd met een bepaalde methode dient de leiding goed te functioneren voor de voorziene levensduur van de leiding.
- Benodigde ruimte. In sommige gevallen is er niet veel ruimte beschikbaar voor leiding aanleg. De benodigde ruimte is afhankelijk van de aanlegmethode. Ook speelt de omgeving een rol.
- Kosten. De kosten zijn een natuurlijk ook een criterium bij de keuze van een aanlegmethode. Alhoewel deze kosten afhankelijk zijn van verschillende variabelen, kan een globale beschouwing nuttig zijn bij de afweging van aanlegmethoden.

3.3.2 Parameters van de criteria

In de onderstaande tabel zijn de parameters behorende bij de verschillende criteria weergegeven. De parameters zijn tijdens een werk sessie met de specialisten (Bijlage A) vastgesteld. De onderstaande lijst met parameters is niet volledig voor iedere situatie en dient per project opnieuw te worden vastgesteld.

Tabel 3.1 Overzicht beoordelingscriteria en parameters.

Criterion	Parameters	Nr
Grondwater problematiek	Bemaling	P1
	Lozing	P2
	Nazakking maaiveld door bemaling	P3
	Verslechtering grondwater kwaliteit	P4
Grond problematiek	Instorten boorgat	P1
	Nazakking maaiveld door vervorming annulus	P2
	Afvoer grond	P3
	Grondbalans	P4
	Grondvervormingen bij funderingen	P5
	Grondvervormingen bij leidingen	P6
Ervaring methode	Toepassing coating	P1
	Geleide constructies leiding	P2
	Bouwkuipen intrede punt	P3
	Bouwkuipen uittrede punt	P4
	Toepassen boorvloeistof	P5
	Toepassen smeervloeistof	P6
	Snelheid van aanleg	P7
	Nauwkeurigheid	P8
	Capaciteit Krachten equipment	P9
	Nauwkeurigheid aansturing krachten	P10
Belasting leiding bij aanleg	Beschadiging coating	P1
	Te hoge spanning medium voerende buis	P2
	Beschadiging isolatie	P3
	Aanlegkrachten	P4
Complexiteit uitvoering	Nazakking maaiveld/verharding	P1
	Opduwen maaiveld	P2
	Beïnvloeding overige infrastructuur	P3
	Verkeersmaatregelen	P4
	Leiding preparatie	P5
	Hoogte equipment	P6
	Gewicht equipment	P7
	Veiligheid	P8
	Stilstand-Continuïteit	P9
	Tijdsduur	P10
Functioneren aangelegde leiding	Beschikbare wrijving	P1
	Kwaliteit coating buitenbuis	P2
	Kwaliteit isolatie	P3
	Verschilvormingen leiding	P4
	Kwaliteit lassen Sleeve	P5
	Kwaliteit lassen binnenbuis	P6
	Kwaliteit PUR overgangen	P7
	Verticaal evenwicht constructie	P8
Benodigde ruimte	Verharding herstel	P1
	Overlast verkeer	P2
	Overlast terrein	P3
	Overlast geluid	P4
	Uitstoot	P5
	Verkeer afsluiting	P6
	Onregelmatig maaiveld	P7
	Omvang werkterrein	P8
	Haalbare lengte expansie lussen	P9
Kosten	Materialen	P1
	Mobilisatie en demobilisatie	P2
	Materieel	P3
	Herstelwerkzaamheden	P4
	Overlast reductie	P5

3.4 Ingekorte MCA keuze methode

Om voor een deel van een leidintrace een keuze te maken voor een aanlegmethode kan een ingekorte MCA keuze methode worden toegepast. Met deze methode wordt een waarde voor een aanlegmethode bepaald die is vastgesteld door vergelijking met de aanleg in open sleuf. Bij de toepassing van de ingekorte MCA keuze methode worden 3 stappen onderscheiden:

1. Bepaling van de waarde van de criteria aan de hand van parameters.
2. Vaststelling van de weegfactoren en de Afbreuk-parameter.
3. Bepaling van de score per aanlegmethode.

1) De eerste stap betreft om voor het betreffende tracé deel de bovenstaande tabel door te lopen en de parameters van de verschillende criteria een waarde toe te kennen. De toe te kennen waarden voor de parameters vallen in de range (0-10). Hierbij zou de waarde voor de open sleuf aanlegmethode 5 moeten bedragen.

Er is sprake van een groot aantal parameters. Getalsmatig kunnen daarom belangrijke parameters minder een rol van betekenis spelen. Het daarom van belang om separaat aan te geven welke parameter van welke methode de inzet van een bepaalde methode onmogelijk maakt. Dit wordt de zogenaamde Afbreuk-parameter genoemd.

Door voor een bepaald criterium de som van de parameter waarden P te nemen en te delen door het aantal parameters Np, kan dan de criteriumwaarde Cp worden bepaald:

$$Cp = \frac{\sum Pi}{Np}$$

Als de eerste stap voor alle criteria zijn beschouwd wordt per criterium Cp een waarde tussen 0 en 10 gevonden. Voor het criterium kan dan worden beschouwd hoe de aanlegmethode scoort ten opzichte van de open sleuf methode (zie onderstaande figuur).

Tabel 3.2 Betekenis score Cp.

	vergelijking met aanleg in sleuf
score:	
10	veel beter
9	duidelijk beter
8	beter
7	iets beter
6	bijna gelijk
5	gelijk
4	bijna gelijk
3	iets slechter
2	slechter
1	duidelijk slechter
0	veel slechter

2) In de tweede stap moet voor het betreffende deel van het leidingtracé worden aangegeven welk criterium het meeste mee zou moeten wegen. In veel gevallen zijn de kosten voor de aanleg van een warmte transport leiding van groot belang. Daarom worden de kosten in de berekening op een speciale manier meegenomen.

Voor het meewegen van een criterium kan een waarde W_{cp} worden toegekend (0-10). Hoe hoger de waarde hoe meer een criterium meeweegt. Voor het kosten criterium C_{pc} kan een percentage $C\%$ worden opgegeven bij een percentage van 50 procent wegen de kosten voor helft mee en bepalen de andere criteria de overige 50 %.

3) Als de waarden uit stap 2 zijn opgegeven kan in de derde stap de score voor een aanlegmethode A worden berekend:

$$A = \frac{\sum(W_{cpi} \cdot C_{pi})}{100} + \frac{\sum(W_{cpi})}{\frac{C\%}{100 - C\%}} \cdot \frac{C_{pc}}{100}$$

De berekende waarde van A is dan de score voor de aanlegmethode voor het betreffende deel van het leidingtracé. Deze waarde wordt per aanlegmethode berekend. Uit de vergelijking van de A-waarden volgt dan de meest voor de hand liggende aanlegmethode.

4 Voorbeeld van een keuze

4.1 Algemeen

Als voorbeeld is voor een klein deel van het leiding tracé in het landelijke gebied en een klein deel van het stedelijke gebied de methode uit hoofdstuk 3 toegepast voor de aanleg van een DN700/900 warmte transport leiding bestaand uit een stalen binnenbuis en een PE omhulling met PUR isolatie. De cases zijn beschreven in de WP 1 rapportage.

4.2 Voorbeeld stedelijk gebied

Voor de toepassing van de ingekorte MCA keuze methode is als voorbeeld het zuidelijk deel van Marathonweg in Vlaardingen genomen. Dit is stedelijk gebied. Enkele specialisten hebben de tabel ingevuld. De tabel met parameter waarden is te zien in Bijlage B.

Voor de methode Direct Pipe is ondanks de onderzoeksuitkomsten uit WP 4 een score 0 (Afbreuk parameter waarde) toegekend aan de mogelijkheid tot beschadiging van de coating door de Pipe Thruster. Ondanks de mogelijkheid om met GRP de coating te versterken wordt de werking van de Pipe Thruster toch nog als een Afbreuk-parameter gezien. Bij de methode inploegen van de warmte transport leiding is de aanwezigheid van de ondergrondse infrastructuur in de stad als een Afbreuk-parameter benoemd.

Met betrekking tot de criteria kwamen de specialisten tot de weegfactoren voor het stedelijke gebied die in de onderstaande tabel zijn weergegeven. Er is gekozen om de kosten 60 % van de keuze voor de aanlegmethode te laten uitmaken. De berekening van de weegfactor voor de kosten is af te leiden uit de laatste formule uit hoofdstuk 3.

Tabel 4.1 Voorbeeld weegfactoren stedelijk gebied.

criterium	Weegfactoren
Grondwater problematiek	7,1
Grond problematiek	6,2
Ervaring methode	7,5
Belasting leiding bij aanleg	9,2
Complexiteit uitvoering	6,9
Functioneren aangelegde leiding	9,8
Benodigde Ruimte	5,6
Kosten	78,5 (60%)

De toepassing van de weegfactoren op de waarden van de criteria leidde tot de waarden in de onderstaande tabel. In de tabel zijn tevens de Afbreuk parameters weergegeven. Door de afbreuk parameters komen de methoden Direct Pipe en Ploegen niet in aanmerking om in stedelijk gebied te worden toegepast. Mogelijk kan aan de hand van een aanvullende studie met betrekking tot de versteviging van de PE buitenbuis toekenning van de Afbreuk-parameter waarde veranderen.

Tabel 4.2 Voorbeeld score MCA stedelijk gebied.

	Afbreuk parameter	Score A
Open sleuf		6,5
HDD		7,7
Direct Pipe	Coating buitenbuis	7,6
EPP		8,2
Ploegen	Overige Infrastructuur	8,9

Uit de tabel komt duidelijk naar voren dat de EPP methode het beste kan worden ingezet in stedelijk gebied. De warmte leiding kan onder de bestaande infrastructuur worden aangelegd en de aanleg kan nauwkeurig plaatsvinden. De overlast is beperkt. Het dient te worden opgemerkt dat de kosten inschatting voor de EPP methode is gebaseerd op een geringe hoeveelheid informatie (Nieuwe techniek), zodat een herbeschouwing van de kosten is aan te raden bij toekomstige projecten.

4.3 Voorbeeld landelijk gebied

Voor de toepassing van de ingekorte MCA keuze methode voor het landelijke gebied is als voorbeeld het middengedeelte van het tracé tussen Vlaardingen en Delft, nabij Zweth genomen. Enkele specialisten hebben de tabel ingevuld. De tabel met parameter waarden is te zien in Bijlage C.

Voor de methode Direct Pipe is ondanks de onderzoeksuitkomsten uit WP 4 een score 0 (Afbreuk parameter waarde) toegekend aan de mogelijkheid tot beschadiging van de coating door de Pipe Thruster. Ondanks de mogelijkheid om met GRP de buitenzijde van de coating te versterken wordt de interactie tussen de Pipe Thruster en de warmteleiding toch nog als een Afbreuk-parameter gezien.

Met betrekking tot de criteria kwamen de specialisten tot de weegfactoren voor het stedelijke gebied die in de onderstaande tabel zijn weergegeven. Er is gekozen om de kosten 60 % van de keuze voor de aanlegmethode te laten uitmaken. De berekening van de weegfactor voor de kosten is af te leiden uit de laatste formule uit hoofdstuk 3.

Tabel 4.3 Voorbeeld weegfactoren landelijk gebied.

criterium	Weegfactoren
Grondwater problematiek	8,2
Grond problematiek	6,0
Ervaring methode	7,5
Belasting leiding bij aanleg	9,2
Complexiteit uitvoering	6,4
Functioneren aangelegde leiding	9,8
Benodigde Ruimte	5,1
Kosten	78,3 (60%)

De toepassing van de weegfactoren op de waarden van de criteria leidde tot de waarden in de onderstaande tabel. In de tabel zijn tevens de Afbreuk parameters weergegeven. Door de afbreuk parameter komt de aanlegmethode Direct Pipe niet in aanmerking.

Tabel 4.4 Voorbeeld score MC landelijk gebied.

	Afbreuk parameter	Score A
Open sleuf		6,5
HDD		7,8
Direct Pipe	Coating buitenbuis	7,6
EPP		8,2
Ploegen		9,1

Uit de tabel komt duidelijk naar voren dat de Ploegen methode het beste kan worden ingezet in het landelijke gebied. De methode Ploegen scoort hoger dan de EPP methode. De warmte transportleiding kan snel en kosteneffectief worden aangelegd door Ploegen en de aanleg heeft nagenoeg geen effect op het grondwater. De overlast is door de toepassing van deze aanlegmethode is zeer beperkt.

5 Conclusie

Er zijn verschillende mogelijke aanlegmethoden voor warmte transportleidingen. Aangezien de warmte transportleidingen zowel in stedelijk als in landelijk gebied worden aangelegd is ervoor gekozen om beide situaties mee te nemen. Uit de beschouwing van de voor- en nadelen zijn in WP1 een aantal aanlegmethoden die kansrijk zijn voor de toekomstige aanleg van warmte transportleidingen:

- Open Sleuf.
- Horizontaal gestuurd boren.
- Direct Pipe.
- EPP.
- Ploegen.

Voor deze methoden is een keuze methode uitgewerkt. De keuze methode is gebaseerd op een ingekorte multi criteria analyse. Door op een systematische wijze de aanlegmethode te beschouwen aan de hand van criteria, die worden bepaald door meerdere parameters wordt een objectieve en reproduceerbare keuze voor een aanlegmethode mogelijk, voor een bepaald leiding tracé.

Er is sprake van een groot aantal parameters per criterium. Getalsmatig kunnen daarom belangrijke parameters minder een rol van betekenis spelen. Het daarom van belang om aan te geven welke parameter van welke methode de inzet van een bepaalde methode onmogelijk maakt. Dit wordt de zogenaamde Afbreuk-parameter genoemd.

De keuze van de parameter waarden en de weegfactoren zijn het resultaat van een kwalitatieve beoordeling, maar de berekening van de criteria waarden en de eind score per aanlegmethode volgen uit eenvoudige formules, die in het rapport zijn beschreven. Door de resultaten van de tussenstappen van de berekeningen vast te leggen wordt de keuze voor een methode reproduceerbaar.

Bij de toepassing van de keuze methode worden de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaling van de waarde van de criteria aan de hand van de individuele parameter waarden.
2. Bepaling van de weegfactoren die aangeven hoe belangrijk een criterium is ten opzichte van de andere criteria. Hierbij wordt het criterium kosten op een andere manier meegenomen.
3. Bepaling van de score per aanlegmethode en vergelijking van de best scorende methode met de andere aanlegmethoden.

Bij een voorbeeld van de toepassing van de keuze methode voor een warmte transportleiding tracé in stedelijk gebied is de EPP methode als voorkeur aanlegmethode naar voren gekomen. In landelijk gebied is de methode Ploegen naar voren gekomen bij de toepassing van de ingekorte MCA keuze methodiek voor selectie van de aanlegmethode.

A Specialisten

Gasunie:
Sijbrand Stratingh
Kasper Hoiting
Remco Toxopeus
Age Buitenrust Hetteema

WarmtelinQ:
Ralf Koll
Marcel Stam
Patrick Vogel
Robert Honkoop

DSA:
Peter Dennig

Rotterdam Engineering:
Marco den Burger
Arjan Smoorenberg

Denys:
Dirk Derycke
Stan Koevoets

Kouwenberg:
Jacob Verhoeve
Frans Verduijn

Royal Haskoning DHV:
Roland Boon
Mark van Oostende

Antea:
Jos van Seters
Willem Bakker

Deltares:
Piet Meijers
Harry van Essen
Henk Kruse

B Voorbeeld stedelijk gebied

VOORBEELD Stedelijk gebied		Open Sleuf			HDD			Direct Pipe			EPP			Ploegen				
		6.5			7.7			7.6			8.2			8.9				
Criterion	Parameter	NR	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W	
Grondwater problematiek	Bemaling	P1	5.0	5.0	7.1	9.8	9.4	7.1	9.2	9.4	7.1	9.2	9.4	7.1	9.2	7.5	7.4	7.1
	Lozing	P2	5.0						9.5				9.5			7.5		
	Nazakking maaiveld door bemaling	P3	5.0						8.9				8.9			7.2		
	Verslechtering grondwater kw alleit	P4	5.0						9.4				9.8			7.3		
Grond problematiek	Instorten boorgat	P1	5.0	5.0	6.2	3.8	8.1	6.2	4.7	8.7	6.2	4.9	8.8	6.2	8.2	9.2	6.2	
	Nazakking maaiveld door vervorming	P2	5.0						8.5				9.4			8.6		
	Afvoer grond	P3	5.0						9.7				9.7			9.7		
	Grondbalans	P4	5.0						9.9				9.9			9.9		
	Grondvervormingen bij funderingen	P5	5.0						8.5				9.5			9.5		
	Grondvervormingen bij leidingen	P6	5.0						8.4				9.4			9.4		
Ervaring methode	Toepassing coating	P1	5.0	5.0	7.5	3.8	4.7	7.5	0.0	4.4	7.5	2.8	4.8	7.5	3.8	4.9	7.5	
	Geleide constructies leiding	P2	5.0						3.2				2.9			2.8		4.3
	Bouw kuipen intrede punt	P3	5.0						4.9				4.9			4.9		
	Bouw kuipen uitrede punt	P4	5.0						4.5				4.5			4.5		
	Toepassen boorvloeistof	P5	5.0						4.1				4.1			4.8		
	Toepassen smeervloeistof	P6	5.0						4.1				4.1			4.8		
	Snelheid van aanleg	P7	5.0						8.6				8.8			8.8		
	Nauw keurigheid	P8	5.0						5.2				8.2			5.0		
	Capaciteit Krachten equipment	P9	5.0						4.1				4.1			4.2		
	Nauw keurigheid aansluiting krachten	P10	5.0						4.1				2.8			4.0		
Belasting leiding bij aanleg	Beschadiging coating	P1	5.0	5.0	9.2	2.9	3.2	9.2	0.0	1.1	9.2	4.8	4.2	9.2	4.5	4.3	9.2	
	Te hoge spanning medium voerende buis	P2	5.0						3.8				1.1			4.6		
	Beschadiging isolatie	P3	5.0						3.1				1.8			4.2		
	Aanleg krachten	P4	5.0						3.1				1.5			3.8		
Complexiteit Uitvoering	Nazakking maaiveld/verharding	P1	5.0	5.0	6.9	6.1	5.6	6.9	7.5	5.8	6.9	7.8	6.1	6.9	6.1	4.0	6.9	
	Opluw en maaiveld	P2	5.0						6.8				4.8			6.8		
	Beïnvloeding overige infrastructuur	P3	5.0						9.2				8.9			0.0		
	Verkeersmaatregelen	P4	5.0						9.2				9.2			5.1		
	Leiding preparatie	P5	5.0						4.9				2.1			5.1		
	Hoogte equipment	P6	5.0						0.5				3.1			4.1		
	Gewicht equipment	P7	5.0						0.5				2.1			3.1		
	Veiligheid	P8	5.0						2.8				5.1			1.1		
	Stilstand-Continuïteit	P9	5.0						6.8				6.2			2.8		
	Tijdsduur	P10	5.0						9.2				8.9			6.1		
Functioneren	Beschikbare w rijving	P1	5.0	5.0	9.8	2.8	5.5	9.8	3.5	3.8	9.8	4.1	4.5	9.8	4.8	5.2	9.8	
	Kw alleit coating buitebuis	P2	5.0						4.1				0.8			4.2		
Aangelegde leiding	Kw alleit isolatie	P3	5.0						4.1				1.4			4.1		
	Verschilervormingen leiding	P4	5.0						8.6				8.8			8.6		
	Kw alleit lassen Sleeve	P5	5.0						4.7				2.1			4.7		
	Kw alleit lassen binnenbuis	P6	5.0						4.8				2.1			4.8		
	Kw alleit PUR overgangen	P7	5.0						4.9				2.1			4.9		
	Verticaal evenwicht constructie	P8	5.0						9.8				9.5			5.1		
	Verharding herstel	P1	5.0	5.0	5.6	9.8	8.2	5.6	9.8	8.2	5.6	6.2	6.5	5.6	9.8	8.2	5.6	
Ruimte	Overlast verkeer	P2	5.0						9.5				9.5			9.5		
	Overlast terrein	P3	5.0						9.2				9.2			9.2		
	Overlast geluid	P4	5.0						6.1				6.1			6.1		
	Uitstoot	P5	5.0						7.2				7.2			7.2		
	Verkeer afsluiting	P6	5.0						9.2				9.2			9.2		
	Onregelmatig maaiveld	P7	5.0						9.2				9.2			9.2		
	Omvang w erktein	P8	5.0						8.1				8.1			8.1		
	Haalbare lengte expansie lussen	P9	5.0						5.2				5.2			5.2		
	Kosten	Materialen	P1	5.0	5.0	60.0	4.2	5.7	60.0	4.2	6.0	60.0	4.2	6.3	60.0	6.8	7.4	60.0
Mobilisatie en demobilisatie		P2	5.0						4.8				3.8			6.5		
Materieel		P3	5.0						4.8				3.7			4.8		
Herstel werkzaamheden		P4	5.0						8.2				9.2			9.8		
Overlast reductie		P5	5.0			78.5	6.5	78.5	9.2	78.5	9.2	78.5	9.2	78.5	9.2	78.5	9.2	78.5

C Voorbeeld landelijk gebied

VOORBEELD Landelijk gebied		Open Sleuf				HDD				Direct Pipe				EPP				Ploegen			
		6.5				7.8				7.6				8.2				9.1			
Criteria	Parameter	NR	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W	P	Cp	W				
Grondwater probleem	Bemaling	P1	5.0	5.0	8.2	9.8	9.4	8.2	9.2	9.4	8.2	9.2	9.4	8.2	9.2	9.4	8.2	7.5	7.4	8.2	
	Lozing	P2	5.0			9.5			9.5			9.5			9.5			7.5			
	Nazakking maaiveld door bemaling	P3	5.0			8.9			8.9			8.9			8.9			7.2			
	Verslechtering grondwater kwaliteit	P4	5.0			9.4			9.8			9.8			9.8			7.3			
Grondproblematiek	Instorten boorgat	P1	5.0	5.0	6.0	3.8	8.1	6.0	4.7	8.7	6.0	4.9	8.8	6.0	8.2	9.2	6.0	9.2	6.0		
	Nazakking maaiveld door vervorming annulus	P2	5.0			8.5			9.1			9.4			8.6						
	Afvoer grond	P3	5.0			9.7			9.7			9.7			9.7						
	Grondbalans	P4	5.0			9.9			9.9			9.9			9.9						
	Grondvervormingen bij funderingen	P5	5.0			8.5			9.5			9.5			9.5						
	Grondvervormingen bij leidingen	P6	5.0			8.4			9.4			9.6			9.4						
Ervaringmethode	Toepassing coating	P1	5.0	5.0	7.5	3.8	4.7	7.5	0.0	4.4	7.5	2.8	4.8	7.5	3.8	4.9	7.5				
	Geleide constructies leiding	P2	5.0			3.2			2.9			2.8			4.3						
	Bouw kuipen intrrede punt	P3	5.0			4.9			4.9			4.9			4.9						
	Bouw kuipen uitrede punt	P4	5.0			4.5			4.5			4.5			4.5						
	Toepassen boorvloeistof	P5	5.0			4.1			4.1			4.1			4.8						
	Toepassen smeervloeistof	P6	5.0			4.1			4.1			4.1			4.8						
	Snelheid van aanleg	P7	5.0			8.6			8.6			8.8			8.8						
	Nauw keurigheid	P8	5.0			5.2			8.2			8.4			5.0						
	Capaciteit Krachten equipment	P9	5.0			4.1			4.1			4.0			4.2						
	Nauw keurigheid aansturing krachten	P10	5.0			4.1			2.8			4.0			4.2						
Belasting leiding bij aanleg	Beschadiging coating	P1	5.0	5.0	9.2	2.9	3.2	9.2	0.0	1.1	9.2	4.8	4.2	9.2	4.5	4.3	9.2				
	Te hoge spanning medium voerende buis	P2	5.0			3.8			1.1			4.2			4.6						
	Beschadiging isolatie	P3	5.0			3.1			1.8			3.9			4.2						
	Aanleg krachten	P4	5.0			3.1			1.5			3.8			3.8						
Complexiteit uitvoering	Nazakking maaiveld/verharding	P1	5.0	5.0	6.4	6.1	7.0	6.4	7.5	6.4	6.4	7.8	6.7	6.4	6.1	6.3	6.4				
	Opduwen maaiveld	P2	5.0			6.8			4.8			5.1			6.8						
	Beïnvloeding overige infrastructuur	P3	5.0			9.2			8.9			8.9			4.5						
	Verkeersmaatregelen	P4	5.0			9.2			9.2			9.2			5.1						
	Leiding preparatie	P5	5.0			4.9			2.1			2.1			5.1						
	Hoogte equipment	P6	5.0			5.5			3.1			3.1			6.8						
	Gewicht equipment	P7	5.0			5.5			6.8			7.2			7.8						
	Veiligheid	P8	5.0			6.8			6.8			7.8			7.8						
	Stilstand-Continuïteit	P9	5.0			6.8			6.2			6.4			7.2						
	Tijdsduur	P10	5.0			9.2			8.9			9.2			6.1						
Functioneren aangelegde leiding	Beschikbare wrijving	P1	5.0	5.0	9.8	2.8	5.5	9.8	3.5	3.8	9.8	4.1	4.5	9.8	4.8	5.2	9.8				
	Kw aaliteit coating buitebuis	P2	5.0			4.1			0.8			1.2			4.2						
	Kw aaliteit isolatie	P3	5.0			4.1			1.4			2.8			4.1						
	Verschilvervormingen leiding	P4	5.0			8.6			8.8			8.6			8.6						
	Kw aaliteit lassen Sleeve	P5	5.0			4.7			2.1			2.8			4.7						
	Kw aaliteit lassen binnenbuis	P6	5.0			4.8			2.1			2.8			4.8						
	Kw aaliteit PUR overgangen	P7	5.0			4.9			2.1			3.8			4.9						
	Verticaal evenwicht constructie	P8	5.0			9.8			9.5			9.8			5.1						
Benodigde ruimte	Verharding herstel	P1	5.0	5.0	5.1	9.8	8.2	5.1	9.8	8.2	5.1	6.2	6.8	5.1	9.8	8.2	5.1				
	Overlast verkeer	P2	5.0			9.5			9.5			5.2			9.5						
	Overlast terrein	P3	5.0			9.2			9.2			6.2			9.2						
	Overlast geluid	P4	5.0			6.1			6.1			6.1			6.1						
	Uitstoot	P5	5.0			7.2			7.2			8.3			7.2						
	Verkeer afsluiting	P6	5.0			9.2			9.2			9.2			9.2						
	Onregelmatig maaiveld	P7	5.0			9.2			9.2			7.1			9.2						
	Omvang werkterrein	P8	5.0			8.1			8.1			8.1			8.1						
	Haalbare lengte expansie lussen	P9	5.0			5.2			5.2			5.2			5.2						
Kosten	Materialen	P1	5.0	5.0	60.0	4.2	5.7	60.0	4.2	6.0	60.0	4.2	6.3	60.0	6.8	7.4	60.0				
	Mobilisatie en demobilisatie	P2	5.0			4.8			3.8			4.2			6.5						
	Materieel	P3	5.0			4.8			3.7			4.3			4.8						
	Herstewerkzaamheden	P4	5.0			8.2			9.2			9.8			9.8						
	Overlast reductie	P5	5.0			78.3	6.5		78.3	9.2		78.3	9.2		78.3	9.2					

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl