

# WARMING UP

Innovatief Duurzaam Warmtecollectief

## Installation of heating pipelines by shallow drilling

feasibility of the E-power method



With cooperation of:



Sijbrand Stratingh and Ralf Koll



Tobias Engel and Marc Peters



Peter Dennig



Marco den Burger



Jacob Verhoeve and Stefan Kouwenberg



Marcel Bijleveld and Fred Blomsma

# Deltares

Remco Boeije, Piet Meijers and Henk Kruse

**Installation of heating pipelines by shallow drilling**  
feasibility of the E-power method

# Installation of heating pipelines by shallow drilling

## feasibility of the E-power method

<b>Keywords</b>	Pipeline installation, E-power, heating pipeline, shallow drilling
-----------------	--

### Document control

<b>Version</b>	1.0
<b>Date</b>	02-11-2021
<b>Project nr.</b>	11205556-001
<b>Document ID</b>	11205556-001-GEO-0001
<b>Pages</b>	24
<b>Classification</b>	
<b>Status</b>	final

### Author(s)


# Summary

The so called E-Power Pipe technique is a trenchless method which was developed for the installation of underground cables in sleeve pipes. The innovative technique closes a technical gap because it allows drives with ten times greater lengths, shallower depths as well as high precision and speed. This trenchless technique for shallow drilling and pipeline installation can be used for the installation of large diameters transport heating pipelines. Modification of the technique is necessary to enlarge the borehole to the required size. The use of a reamer head or micro tunnelling machine in front of the product heating pipeline is a promising modification. With this modification it is assumed that a pipeline DN 700 with an outer diameter of 900 mm could be installed over a length of about 1000 m.

The effect of the installation load on the different parts of the heating pipeline (outer PE shell, PUR insulation and the steel carrier pipe) is allowable for larger drilling lengths in case of using the drill grout lubricant with a low friction. The friction during the installation is determined by the arching of the soil around the borehole. In non-cohesive soils the friction can be higher due to insufficient pressure in the borehole. Sufficient filling of the borehole and a static pressure of the lubricant fluid during installation allows longer drilling lengths in non-cohesive soil types.

After installation of the pipeline, the friction in between the outer shell of the pipeline and the drill grout is increased. Some experiments to measure the friction of the drill grout have been carried out. Although the results show a certain friction the magnitude of the real friction for design purposes along a heating pipeline could not be determined yet. Additional research is required.

Since the magnitude of this friction could not be determined yet, a relative low friction was assumed in the operational phase of the pipeline. The assessment of the strength of the pipeline in the operational phase shows that measures such as prestressing and/or cushions are required at the expansion bends.

In case the friction of drill grout appears higher than assumed in this study, the efforts near the expansion bends to meet the assessment requirements (according NEN3650:2020 and EN13941:2019), can be reduced. Further reduction of the efforts (prestressing and/or cushions) will be possible by using a higher steel grade for the carrier pipeline.

# Contents

	<b>Summary</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
1.1	General	6
1.2	Background	6
1.2.1	E- power pipe method	6
1.2.2	Heating pipelines	7
1.3	Feasibility of the E-Power Pipe method	7
1.4	Work packages	8
<b>2</b>	<b>Installation method</b>	<b>9</b>
2.1	Report	9
2.2	Conclusions	10
<b>3</b>	<b>Lubrication fluid</b>	<b>11</b>
3.1	Report	11
3.2	Conclusions	12
<b>4</b>	<b>Installation load</b>	<b>13</b>
4.1	Report	13
4.2	Conclusions	13
<b>5</b>	<b>Pipeline in operation</b>	<b>14</b>
5.1	Report	14
5.2	Conclusions	14
<b>6</b>	<b>Conclusions</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Installation method</b>	<b>16</b>
<b>B</b>	<b>Drilling fluid</b>	<b>19</b>
<b>C</b>	<b>Installation load</b>	<b>22</b>
<b>D</b>	<b>Pipeline in operation</b>	<b>23</b>

# 1 Introduction

## 1.1 General

The energy transition prescribes the use of other energy sources than fossil fuel. One of the alternatives is the use of earth or industrial heat. This requires the installation of heating networks. The required capacity of the heating network requires the installation of large diameter transport heating pipelines.

Transport heating pipelines are always installed with a feed and a return line. In case of large diameter transport pipelines, the medium-carrying pipes consist of steel and are provided with insulating material and an outer casing. The diameters of the main transport pipelines vary but are usually in the order of 500-700 mm with insulated outer diameters up to 900 mm.

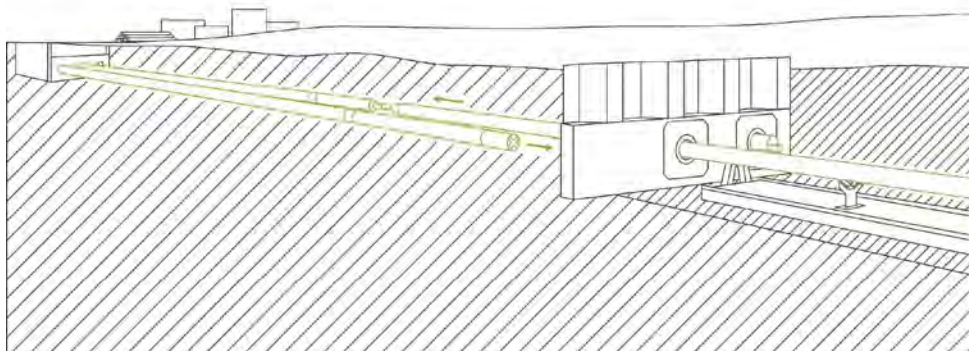
The conventional installation of heating pipes is based on a trench with a relative shallow depth of the trench bottom of approximately 2 to 2.5 m, which allows maintenance or reparations. In urban areas this is a fine depth below other underground infrastructure, and in rural areas this is a fine depth to reduce temperature effects on vegetation. The relatively deep trenches to be dug often cause nuisance. Drainage and/or an earth retaining constructions are often required. Due to temperature effects on the pipeline, a bend has to be made in the pipe after a certain distance (a so-called expansion bend).

Nuisance when digging the trench and excavation damage can be prevented by using trenchless techniques. Current drilling techniques are not suitable for laying pipelines at a shallow depth of 2 to 2.5 m below ground level over great distances. By using an innovative drilling technique, the pipeline can be laid at a depth of approximately 2 to 2.5 m below ground level without digging.

## 1.2 Background

### 1.2.1 E- power pipe method

The so-called E-Power Pipe technique is a trenchless method which was developed by Herrenknecht for the installation of underground cables in sleeve pipes. The innovative technique closes a technical gap because it allows small diameter drives with greater lengths than 1000 m and shallow depths as well as high precision and high installation speed.



Figuur 1-1 E-Power Pipe technique (bron: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/e-power-pipe/>)

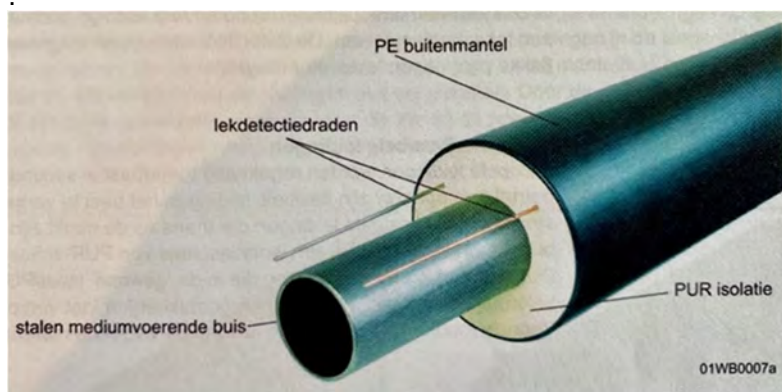
The standard E-Power Pipe technique uses a remote controlled tunnel boring machine AVNS350XB, which has an excavation diameter of 505 millimeters and is designed for drive lengths of more than 1,000 meters. The machine is able to drill to the planned alignment with high precision and to cross under existing infrastructure such as pipelines, roads, railways or canals. The tunnelling machine is equipped with a jet pump and an integrated hydraulic power unit.

At the starting point, a push and pull unit is installed and its thrust is used to push the jacking pipes and the TBM along the specified drilling line in the direction of the target point. The borehole remains supported by the machine and the jacking pipes. After reaching the exit point, the TBM is separated from the jacking pipes. Subsequently, the pipeline is connected to the jacking pipes still located in the borehole and pulled back and thus into the borehole by the push and pull unit in the launch shaft at the other end.

The drilling method enables to install pipelines such as heating pipelines below other underground infrastructure.

### 1.2.2 Heating pipelines

The transport heating pipelines with a feed and return line are usually made of steel. The steel pipeline is the carrier pipe. The steel is surrounded by an insulating layer of polyurethane foam (PUR foam), which is especially suited due to its high insulation qualities compared to mass and volume. On the outside is a protective shell of plastic. PE (polyethylene) is often used as shell around the heating pipe.



Figuur 1-2 Transport heating pipeline

In this research two pipeline diameters are considered. A smaller DN 300 steel pipe with an outer diameter of the shell equal to 450 mm and a larger DN 700 steel pipe with an outer diameter of the shell equal to 900 mm.

Although the insulation prevents large heat losses to the surroundings of the pipeline, a slight temperature increase may be expected. The installation of the pipelines at a larger depth below the surface reduces the thermal impact on vegetation and drinking water infrastructure.

## 1.3 Feasibility of the E-Power Pipe method

The feasibility of the installation of large diameter heating pipelines is investigated. The feasibility depends on the suitability of the technique and the behavior of the pipeline. The pipeline behavior depends on the friction of the surrounding of the pipeline.

The E-Power Pipe technique was developed for the installation of a narrow range pipeline. The applicability of this technique for larger diameter pipelines requires modification of the current installation method.



The use of drilling fluid and lubrication fluid is necessary for this trenchless technique. Especially the behavior of the lubrication fluid is important for the installation of heating pipelines. During the installation a low friction allows the installation of long pipeline sections and during the operational phase when the pipeline is in use a high friction prevents large pipeline expansions.

During the installation, the forces on the different parts of the pipelines may not cause higher stresses than the allowable values of the different materials. When the pipeline is in use the combined loads on the pipeline due to internal pressure, thermal extension and external loads may not cause higher stresses than the allowable values of the different materials.

## 1.4 Work packages

To investigate the feasibility of the installation of large diameter heating pipelines by using the E-Power Pipe technique, the relevant aspects are considered. The following aspects were investigated in work packages:

- Installation method
- Friction of the lubrication fluid
- Behaviour of the pipeline
  - During installation
  - Operational phase

The findings of each work package are reported in a separate report. These reports are included as appendices in this report.

## 2 Installation method

### 2.1 Report

The findings of the required modification of the technique are described in Appendix A1. The findings of this Appendix is based on the report presented in Appendix A2. In Appendix A2 various modification options are described

The E-Power Pipe method is designed for a diameter pull-in pipe up to 500 mm. The transport heating pipelines have diameters of 700 mm and 900 mm. This requires modification of the method, which is described in the mentioned Appendixes A1 and A2.

The proposed procedure for the installation of the larger diameters starts the same as for the smaller diameters. The E-Power Pipe drilling by means of the drilling pipes is carried out at shallow depth. The minimum depth is around 1.5 meters below the surface and the maximum length to be drilled is approximately (until today) 1500 meters. After finalizing the pilot, the diameter of the borehole can be enlarged by a special reamer or microtunnelling machine in front of the product pipe (see figure 2.1) . In this way a two-staged approach is obtained. Variations to this principle in multiple stages are also described.

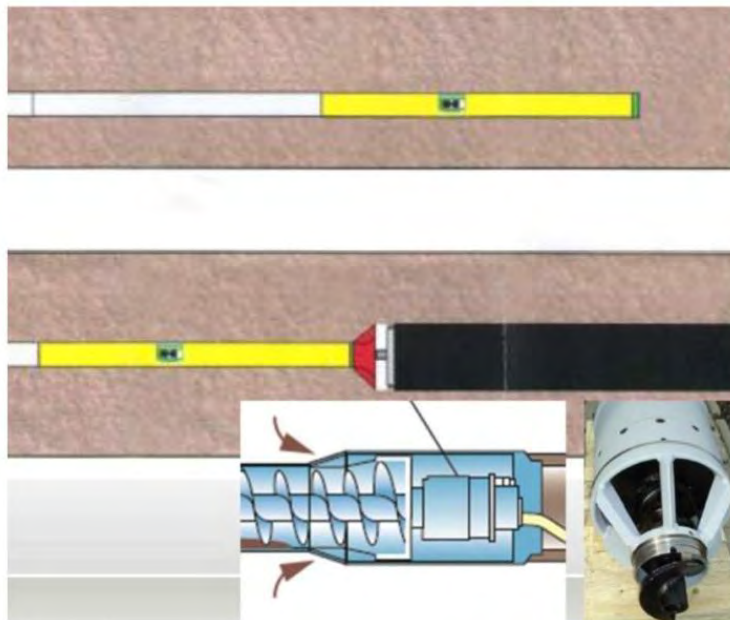


Figure 2.1 Modified E-Power Pipe technique

The size of the borehole in relation to the outer diameter of the heating pipeline is not considered in detail. Based on sufficient arching around the borehole and a limited long-term settlement of the surface (including shallow underground infrastructure) an overcut in the range of 20-30 mm could be used. The arching is considered in appendix C1. The settlement is not considered in this report and is based on experiences in other projects

## 2.2 Conclusions

The E-Power Pipe technique can be modified specially to install larger diameter heating pipelines. The first phase of the installation process, the pilot drilling does not need to be changed. After the completion of the pilot drilling a reamer head or a micro tunneling unit can be positioned in front of the product heating pipe, in order to enlarge the borehole diameter to the required size.

## 3 Lubrication fluid

### 3.1 Report

The lubrication fluid during the E-Power Pipe installation is used to reduce the friction during installation. Drill-Grout is a self-setting suspension which can be used for lubrication during drilling. Drill-Grout hardens into a plastic material with a low water permeability and a strength that is increasing in time. The specifications of Drill grout can be found in Appendix B1. The increasing strength indicates a possible increase in friction between soil and with pipeline in time.

Although the Dutch NEN3650 prescribes that no friction due to the drill grout may be taken into account for heat pipes, a measured friction in tests is taken into account in this study (see chapter 5).

Tests are carried out to measure the friction in between the drill grout and a plastic pipe (PVC). The PVC surface was thought to be more or less similar to the PE shell around the heating pipeline. Measurements are reported in appendix B2. In Annex A van Appendix C1 the friction values (adhesion values) are calculated from the test results. An adhesion of 0.6 kPa and 0.9 kPa is found in two tests.



*Figure 3.1 Test on frictional behavior drill grout*

## 3.2 Conclusions

The tests carried out to measure the friction in between the drill grout and the pipelines indicate a certain frictional behavior of the drill grout. The magnitude of the friction cannot be determined yet in a reliable way, since the boundary conditions of the tests were not defined sufficiently.

The friction in between the drill grout and the pipeline found in the tests are used in the calculations in chapter 4 and 5, but additional tests are required to determine the friction for design purposes. The additional research should be based on boreholes in soil, with a relative small annulus filled with drill grout.

## 4 Installation load

### 4.1 Report

The installation of the heating pipeline can be performed in different soil types with different ground water conditions. During installation the friction on the pipeline (when pulling the pipe into borehole) is partly determined by the drill grout and is also partly determined by the soil. The soil friction depends in turn on the so-called arching behavior of the soil around the borehole. The overpressure in the annulus during construction is important here, in addition to the properties of the soil. With sufficient overpressure or with sufficient soil strength, there is no subsiding soil column that causes an increase in soil pressure during construction.

The report in Appendix C1 considers the installation of a heating pipeline (DN 300 and DN 700) in clay. The annex B of the report in Appendix C1 describes the higher friction in case of a less perfect borehole in sand.

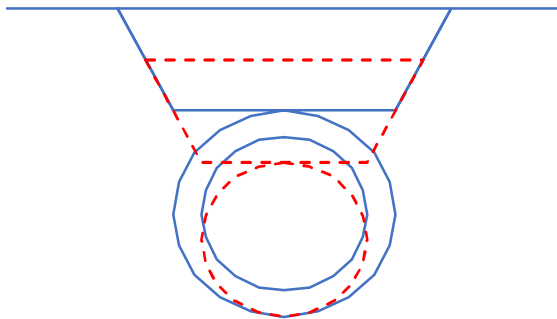


Figure 4.1 Less arching in case of sand with insufficient static lubricant pressure

The report considers the effect of the friction on the allowable values of:

- The inner carrier pipeline
- The outer PE shell
- The insulation

The calculated stresses in the pipelines are compared with the allowable stresses in the inner carrier pipeline and the outer PE shell. The shear stresses in the isolation layer are compared with the allowable shear stress.

### 4.2 Conclusions

The calculation of the installation load and the assessment of the load on the different parts of the heating pipeline shows that the installation loads allow installation of long pipeline section (> 1000 m). Although unfavorable borehole conditions reduce the maximum installation length. The possible lengths in unfavorable conditions are still high. It should be mentioned that the amount of measurements on the forces during E-power Pipe projects is limited. It is recommended to carry out additional measurements on thrust and pulling forces in future E-power Pipe projects.

# 5 Pipeline in operation

## 5.1 Report

After the installation by using the E-Power Pipe technique the drill grout hardens and the friction is increasing to a maximum value. This maximum value determines the conditions for the pipeline in operation. The operational temperature of a heating pipeline is about 120 °C. The temperature difference with the surrounding soil is therefore 110 °C.

The assessment of the strength of the pipeline in the pipe stress analysis is carried out according NEN3650:2020 and EN13941:2019. These codes prescribe the consideration of several limit states. The assessment based on standard steel properties is described in the report in Appendix D1.

The limit states of a heating pipeline in a typical configuration were assessed. The typical situation considers a straight section where the pipeline is installed by using the E-Power Pipe technique and the so-called expansion bends with a trench installation. The E-Power Pipe installation length in the assessment was equal to  $L = 1000$  m.

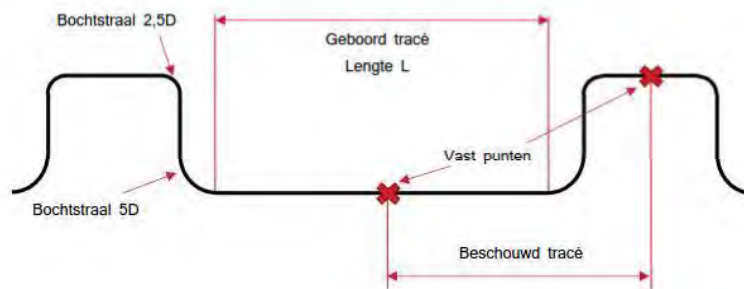


Figure 5.1 Heating pipeline configuration

The report in Appendix D1 describes that the assumed low friction in the borehole yields large deformations in the expansion bends. The deformation is relatively large so that measures are required. Possible measures are:

- Expansion cushions (number of cushions is limited)
- Thermal prestressing of the pipeline, by using the adjacent trench (high friction in trench required)

The report in Appendix D1 compares the installation in a borehole with an installation in a trench with higher friction values. The comparison shows that increasing friction reduces the efforts near the expansion bends to meet the assessment requirements according NEN3650:2020 and EN13941:2019.

## 5.2 Conclusions

It is possible to install a heating pipeline with the E-Power Pipe method with a relative long length. For the assessment of the strength of the pipeline, the friction in the borehole is important. In case of low friction measures such as prestressing and/or cushions are required at the expansion bends.

Applying a higher steel grade, P355NH instead of P235GH is a possibility to reduce the measures at the expansion bends.

## 6 Conclusions

The E-Power Pipe method is recent developed by Herrenknecht. The trenchless technique for shallow drilling and pipeline installation can be used for the installation of large diameters transport heating pipelines. Modification of the technique is necessary to enlarge the borehole to the required size. The use of a reamer head or microtunnelling machine in front of the product heating pipeline is a promising modification. With this modification it is expected that a pipeline DN 700 with an outer diameter of 900 mm could be installed over a length of about 1000 m.

The effect of the installation load on the different parts of the heating pipeline (outer PE shell, PUR insulation and the steel carrier pipe) is allowable for larger drilling lengths in case of using the drill grout lubricant with a low friction. The friction during the installation is determined by the arching of the soil around the borehole. In non-cohesive soils the friction can be higher due to insufficient pressure in the borehole. Sufficient filling of the borehole and a static pressure of the lubricant fluid during installation allows longer drilling lengths in non-cohesive soil types. Although insight in the friction process is gained during the research, It should be mentioned that the amount of measurements on the friction during E-power Pipe projects is limited. It is recommended to carry out additional measurements on thrust and pulling forces in future E-power Pipe projects.

After installation of the pipeline, the friction in between the outer shell of the pipeline and the drill grout is increased. Some experiments to measure the friction of the drill grout have been carried out. Although the results show a certain friction, the magnitude of the real friction for design purposes along a heating pipeline could not be determined yet. Additional research is required.

Since the magnitude of this friction could not be determined yet, a relative low friction was assumed in the operational phase of the pipeline. The assessment of the strength of the pipeline in the operational phase shows that measures such as prestressing and/or cushions are required at the expansion bends.

In case the friction of drill grout appears higher than assumed in this study, the efforts near the expansion bends to meet the assessment requirements (according NEN3650:2020 and EN13941:2019), can be reduced. Further reduction of the efforts (prestressing and/or cushions) will be possible by using a higher steel grade for the carrier pipeline.



# A Installation method

A.1



## Het toepassen van de EPP methodiek voor de installatie van VPS buizen van een grotere diameter

### Inleiding .

Op dit moment wordt er in Nederland meerdere honderden km tracé gepland voor de aanleg van een leidingstelsel, welke restwarmte uit de Rotterdamse Haven naar de omliggende grotere steden moet gaan transporteren. Restwarmte wordt in de laatste jaren steeds meer toepast als alternatieve energiebron. De vrij ingewikkelde aanlegmethodiek voor dit medium kan negatieve effecten met zich meebrengen, zodoende is de studiegroep "*Optimaal ruimtegebrek bij aanleg warmte transport leidingen*" opgericht om te bezien hoe dit medium onder de tegenwoordig nieuwe geldende milieueisen voordeliger en efficiënter aangelegd kan worden. Dit moet men kunnen realiseren door het toepassen van alternatieve sleufloze technieken. Men zal hier verder dieper op de materie ingaan.

### Inhoudsopgave

- 1. Technologie
- 2. Uitdaging
- 3. Oplossing
- 4. Doel
- 5. Specificatie voor de aan te passen aanlegmethodiek
- 6. Conclusie



## 1. Technologie

Door de jaren heen heeft men dit leidingstelsel in een open ontgraving en of d.m.v. van de HDD techniek geïnstalleerd op sommige aan te leggen tracé is er hier en daar zelf nog een persing aan te pas gekomen. Dit ingewikkelde leiding systeem heeft tijdens de aanleg van het warmwater stelsel een grote impact op de omgeving qua aanlegwerkzaamheden en is vrij arbeidsintensief tijdens het construeren van dit systeem, zekere in stedelijk gebied.

## 2. Uitdaging

Door het toepassen van nieuwe innovatie aanlegmethodieken kan men trachten om de impact t.b.v. de aanleg van de warmte water systeem te beperken. De nieuwe geldende en toe te passen milieu eisen en de steeds drukker wordende ondergrondse bestaande infrastructuur vragen naar alternatieve aanlegtechnieken oftewel er is steeds meer vraag naar innovatieve aanlegmethodieken in het kader van omgevingsmanagement.

## 3. Oplossing

Op dit moment is men aan het bezien wat en hoe men optimaal verschillende techniek zou kunnen toepassen t.b.v. de vraag en tevens de optimalisatie van een warm water leiding t.b.v. de aanleg van sleufloze aanlegmethode :

Er zijn verschillende sleufloze technieken in de markt beschikbaar zoals ;

- Aanleg d.m.v. HDD techniek , specifiek de aanleg van een boogzinker m.b.v. de HDD techniek
- Het aanleggen van warmte leidingen d.m.v. persingen
- Het inploegen van de leidingen vooral als VPS systeem ,echter grotere diameter boven de 24" is nog niet gerealiseerd
- Aanleg van de warm waterleiding door middel van de EPP techniek , de EPP techniek was in 1<sup>e</sup> instantie bedoelt voor de grote hoeveelheid aan te leggen HS kabelprojecten in Duitsland ontwikkeld maar is een goed alternatief voor tevens de aanleg van grotere warm water leidingen in Nederland . Deze methode zal in dit gremium verder bekeken en toegelicht gaan worden



#### 4. Doel

Zoals al eerder benoemd is de EPP oftewel Energie Power Pipe van oorsprong ontwikkeld om HS kabelsysteem op een ondiepe diepte evenwijdig aan elkaar aan te leggen. De EPP is toepasbaar in stedelijk gebied maar ook in tracé in een open veld. De techniek is ontworpen door de Firma Herrenknecht in opdracht van Amprion t.b.v. de aanleg van diverse HS Kabels Tracés. De ontwerp diameter van de TBM machine is 505 mm uitwendig, om grotere warm water leidingen aan te brengen zal er gekeken moeten worden op welke manier men m.b.v. de EPP boortechniek de grotere leidingen geïnstalleerd kunnen worden.

#### 5. Specificatie voor de aan te passen aanlegmethodiek

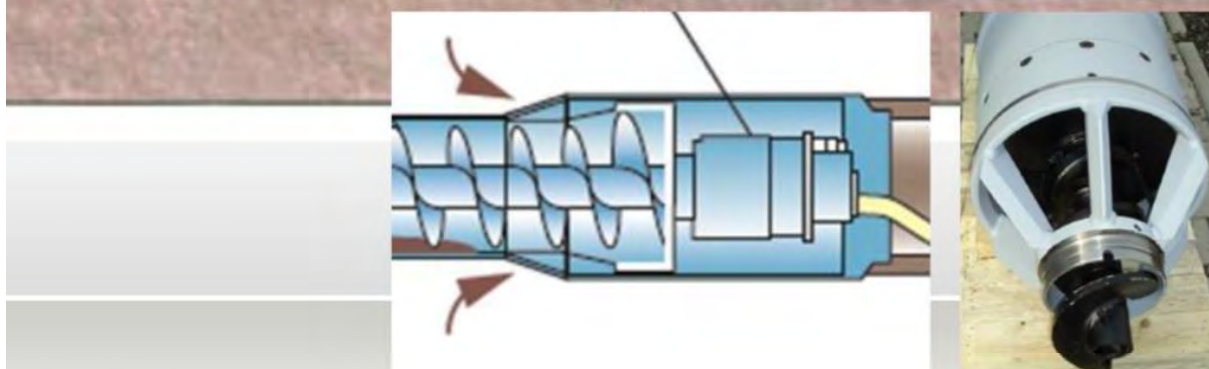
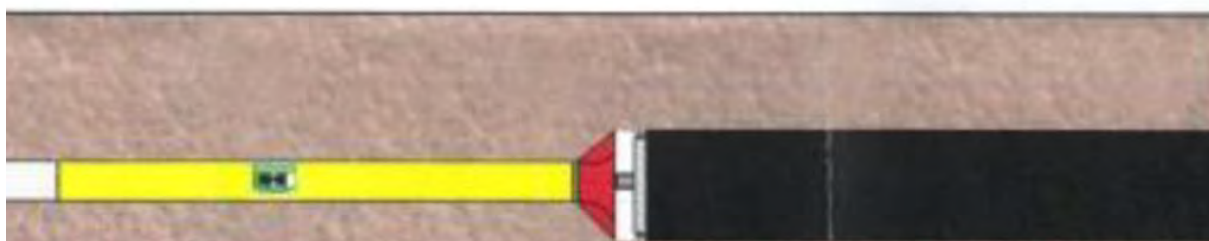
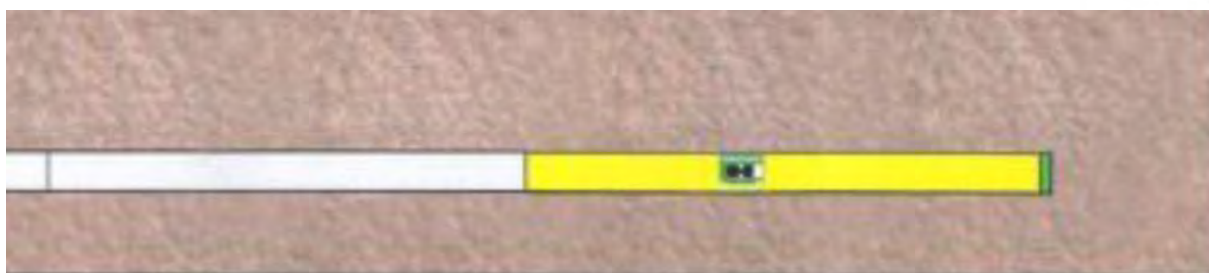
Voor de precisie werking met de verdere technische details van de EPP verwijs ik na de rapportage F-00620 van Tobias Engel Projectleider van de firma Herrenknecht. De 1<sup>e</sup> uitvoering van een EPP in Nederland zal bij Tennet op een kabelproject 150 kV van Tilburg – Best dit jaar toegepast worden, de te boren lengtes zijn 2 x 400 meter en 2 x 2000 meter. Tennet kiest voor de EPP om zodoende meer kennis te kunnen vergaren om in de toekomst deze boormethode toe te kunnen passen omdat in het kader van de wet VET steeds meer bovengrondse HS kabels in stedelijke gebied, onder de grond verlegd moeten worden en daar is deze boormethode uiterst geschikt voor.

Nu is deze methode ontworpen voor een diameter in te trekken leiding van maximaal 500 mm en wij uitteeraard geïnteresseerd naar de diameter van een warm water leiding als SIS en of VPS leiding van 700 mm en zelf 900 mm dit geeft nog wel de mogelijke uitdagingen. De optimalisatie ligt hem juist in dat men met een systeem, vooralsnog met de EPP methode en de daarbij behorende casingbuizen, meerdere sleufloze aanlegmethodieken kan gaan bestrijken. De investering van dit materieel is vrij prijzig en kan door meerdere sleufloze aanlegmethodieken makkelijker terug verdiend worden.

Voor de aanleg van de HS kabels is er tot op dit moment nog geen behoefde aan een grotere te boren buitendiameter, bij de warm water leiding echter wel. Doordat men de warm water rotonde is gaan ontwerpen is de dimensie van de warm water leiding vergroot van een buiten diameter van 700 naar zelfs 900 mm.

Nu is het mogelijk de EPP voor het aanleg van HS kabelsystemen toe te passen men heeft daar ook de benodigde ervaring mee opgedaan, voor de installatie van de VPS/ SIS leidingen is men nu aan het bezien in welke hoedanigheid men ook deze techniek voor de grotere diameters van de warmte leiding kan gaan toepassen.

De werkwijze is hetzelfde als voor de kleinere diameters, het boren d.m.v. de casingbuizen op ondiepere dieptes. De minimale diepte van de EPP ligt rond de 1,5 meter onder MV en de te boren lengte is circa (tot vandaag) 1500 meter. Als de verbinding tussen persput en ontvangstput is gerealiseerd, kan men afhankelijk van de te installeren diameter een ruimerverdringerkop toepassen om de gewenste dimensie van de warm water leiding te installeren. De combinatie verdringerkop en medium voerende buis kan tevens met de casingbuizen van de EPP als een gang ingetrokken worden (zie foto).



Voorbeeld voor het toepassen van een ruimerverdringerkop t.b.v. het installeren van grotere warm waterleidingen





## 6. Conclusie

De reeds bestaand EPP techniek zou mijn inzien nog breder ingezet moeten worden door te bezien door hoe men de grotere diameter kan gaan installeren . Als men naar de HDD techniek kijkt kan men met een vrijwel kleine diameter aan boorbuis m.b.v. van ruimers grotere diameters over langere lengtes installen. Door de opgedane kennis en ervaringen binnen de HDD sector kan men nu al lengtes van meerdere duizend meters grote medium voerende buizen installeren.

Bij het toepassen van EPP techniek worden nu al projecten ontworpen over lengtes van circa twee kilometers wel nog met een kleinere diameter echter zal dit met de komende projecten binnen de energietransmissie voor stroom- en restwarmte voorzieningen gaan veranderen door het toe passen van bijvoorbeeld een verdringerkop met de gewenste grote afmeting welke aan de casingbuizen van de EPP geïntegreerd kan worden.

Tijdens het terugtrekken van de EPP casingbuis kan gelijk , m.b.v. de grote geïntrigeerde verdringerkop in een run met medium voerende buis ingetrokken worde. Bij deze boortechniek is een groot voordeel dat er een vrij grote casingbuis in het boorgat aanwezig is en de kans op een instabiel boorgat nagenoeg nihil is .

Het zou wenselijk zijn om op een volgende stads verwarming project de optie een keer toe te passen.





Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

**Contractor:** Intern:  
R&D UT

**Client:** Internal:  
Herrenknecht UT

External:  
Deltares

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

## Table of contents

<b>1</b>	<b>CURRENT E-POWER PIPE® PARAMETERS .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>TECHNICAL PARAMETERS WHICH ARE FIX BASED ON THE E-PP SYSTEM .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REQUIRED SPECIFICATIONS FOR E-POWER PIPE® HEATING PIPE INSTALLATION ..</b>	<b>4</b>
3.1	Specification of the geology .....	4
3.2	Specification of the technical parameters .....	4
3.3	Specification of the Installation Method .....	5
3.3.1	Two-stage installation process .....	6
3.3.2	Three-stage installation process .....	8
3.3.3	Four-stage installation process .....	9

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

## 1 Current E-Power Pipe® Parameters

	E-Power Pipe®
<b>Product pipe diameter [mm]</b>	ID 250-457 (10"-18")
<b>Pipe material</b>	Steel/Plastic (HDPE)
<b>Max drive length* dep. on Ø</b>	Ø to 18": 1.500m
<b>Accuracy</b>	+/- 100 mm in vertical and horizontal direction at a drilling depth of 1.5 to 2 m The accuracy of position is approximately +/- 2% of the coil to probe distance
<b>Min. drilling depth</b>	1,5 m
<b>Max. drilling depth</b>	Up to the groundwater pressure and the required accuracy (approx. 30m)
<b>Curved drives (horizontal, vertical)</b>	3D-curves possible / min. radius 350m
<b>Geology</b>	Soft soil conditions & Rock up to 30 MPa*
<b>Soil protection</b>	Bentonite suspension for pipe lubrication / Low chance for blow outs during drilling
<b>Max. (ground) water pressure</b>	Up to 3bar
<b>Shaft</b>	Small shaft with concrete ground plate and launch sealing, Front & rear counter bearing
<b>Access</b>	No
<b>Drilling angle of the jacking frame</b>	0° to 1,8°

\*with standard-cutter head; rock-cutter head enables harder formations, useful for pure rock drives. The application of drilling in rock might reduce the maximum drilling length – depending on rock parameters (UCS, TS, CAI).

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

## 2 Technical Parameters which are fix based on the E-PP system

1. Diameter of the jacking pipes with 457mm
2. Minimum bore diameter of the AVN with 494 mm
3. Curve radius with minimum 350 m
4. Pull and pushing forces of maximum 340 t
5. Drive length of maximum 1.500 m (depending on the ground conditions)

## 3 Required specifications for E-Power Pipe® heating pipe installation

### 3.1 Specification of the geology

1. Type of underground for which the technique has to be designed:
  - a. All soft soil: clay, silt, sand , gravel ?
  - b. Only non-cohesive soil: sand, gravel ?
  - c. Cobbles and boulders ?
  - d. weak rock up to 30 MPa
  - e. stronger rock up to XX MPa

These variations will have the biggest influence on the needed design/concept
2. Groundwater level

### 3.2 Specification of the technical parameters






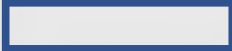

1. Maximum single drive length
2. Minimum curve radius (as limited by the jacking pipes its already defined with 350 m)
3. Maximum required overburden
4. Required product pipe outer diameter
5. Limitations for the size of the start-, and reception shaft / How does a typical construction area for the installation of district heating pipes look like
6. Demand of the drilling accuracy
7. Demand to the positional accuracy of the pipeline
8. Maximum size of the annulus. → This has an impact of the possibility to use different pipeline ODs with the same borehole diameter.
9. Kind of annular filling (WP 3)
10. Required drilling angle of the jacking frame → Impacts the required size for the start shaft
11. Maximum pulling force of the product pipe

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

### 3.3 Specification of the Installation Method

In the following chapters several installation methods are described as examples. These are to show the basic possibilities which can be realized on the basis of the E-PP procedure. The color legend shown in Table 1 describes the respective equipment which would be used for the installation methods.

Table 1 Color legend for the following installation methods

Color	Description
	Tunnel boring machine
	Cutterhead
	Pull head
	Jacking Pipe
	Product pipe
	Additional Casing
	Pull rod / rope

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

### 3.3.1 Two-stage installation process

In principle, there are two ways of carrying out the two-stage laying process.

For the first option, a pilot hole with a diameter of approx. 500 mm would be drilled and then expanded to the final diameter with another machine during the retraction process. At the same time, the product pipe is pulled into the drill hole by a pulling device. The annulus between the enlarged drill hole and the product pipe can also be filled during the retraction process. The enlarging machine does not require any additional steering as the enlarging bore follows the pilot bore guided by the jacking pipes.

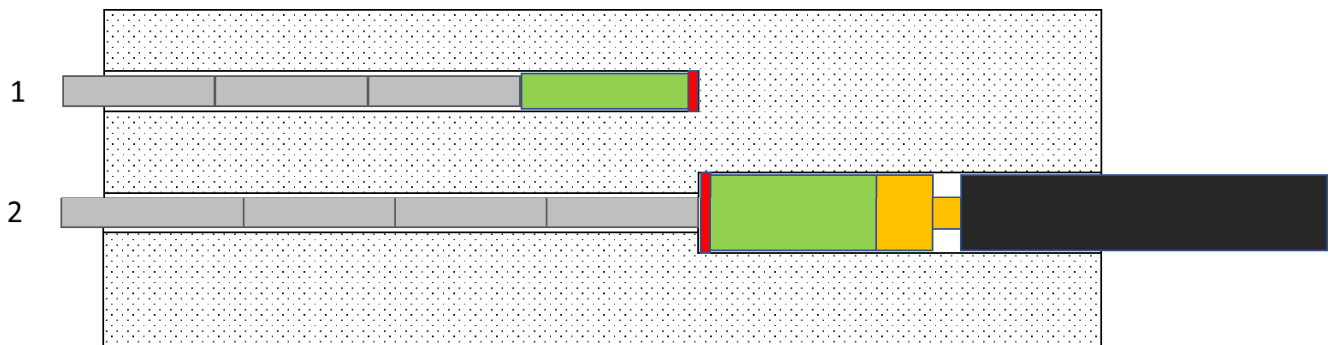


Figure 1 Two-stage installation process with additional expanding machine

For the second option, the pilot hole could be drilled directly with the required hole diameter and then the product pipe could be drawn in.

In this case, however, there would be a large annular gap between the borehole and the jacking pipes. This could have a negative effect on the controllability of the jacking machine. This also reduces the stability of the borehole.

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

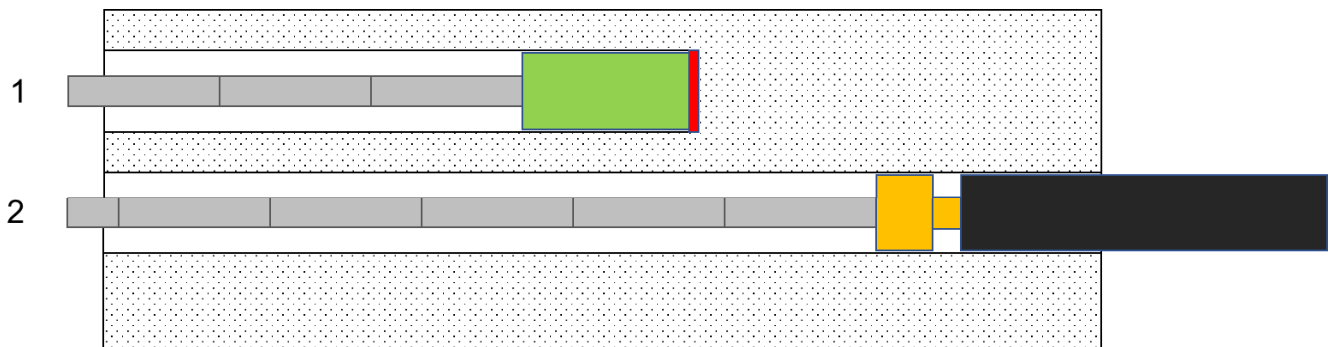


Figure 2 Two-stage installation process with a huge annulus during the pilot drill



Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

### 3.3.2 Three-stage installation process

Based on the two variants described for the two-stage installation process, an additional protective pipe can be pulled in before the product pipe is pulled in. In a third work step, the product pipe would then be drawn into the protective pipe.

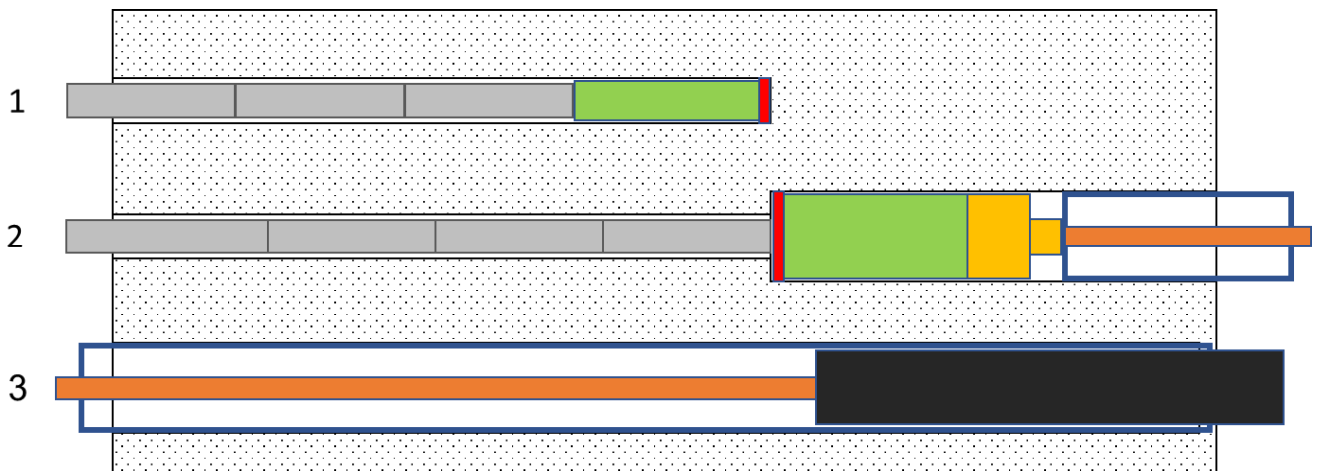


Figure 3 Three-stage installation process with an additional expanding machine and an additional protective pipe

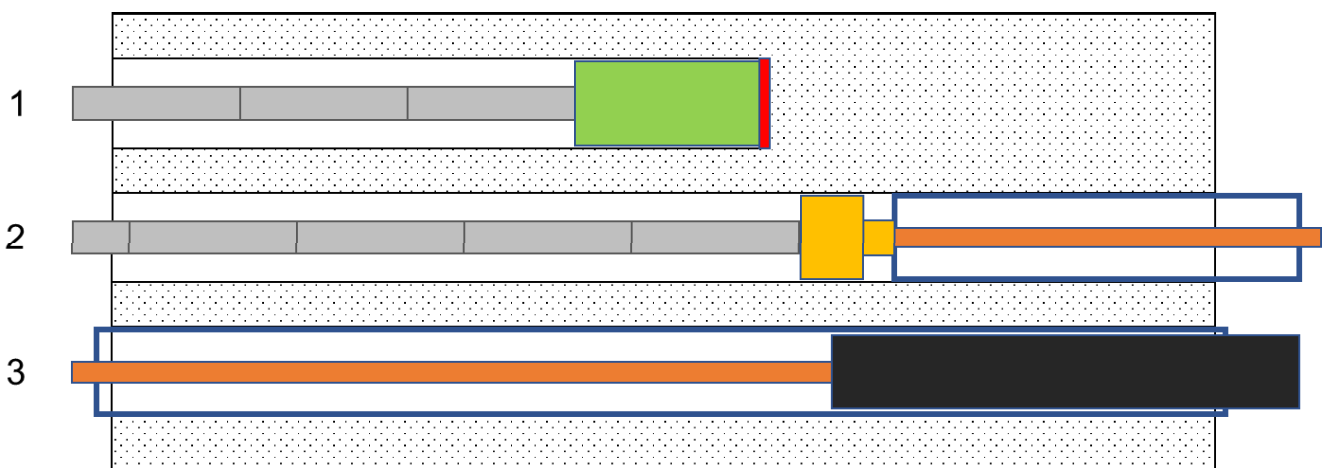


Figure 4 Three-stage installation process with a huge annulus during the pilot drill and an additional protective pipe

Description: Warming Up WP2 Method	Responsible: Tobias Engel	Revision: 0
	Creator: Tobias Engel	Rev. Datum
Proj.- Nr.:	Status:	F-Nr. F-000620

### 3.3.3 Four-stage installation process

With regard to the three-step installation process, the additional protective pipe could be removed in a further process step. The figure shows an example of a four-step installation process.

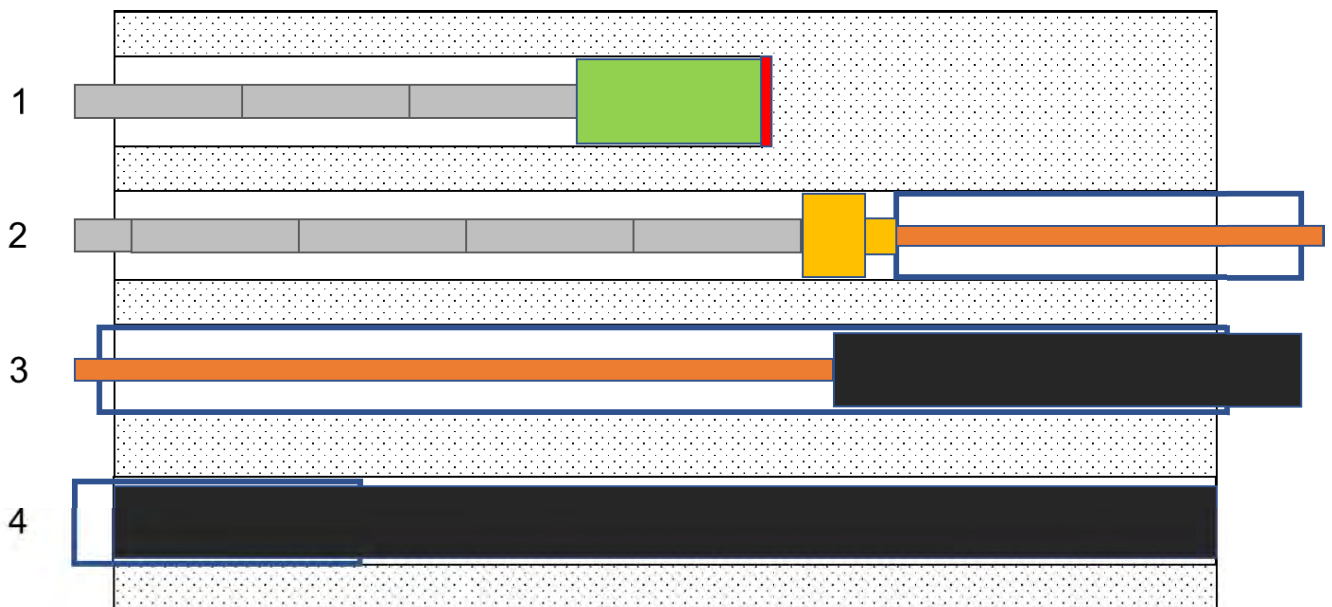


Figure 5 Four-stage installation process with a huge annulus during the pilot drill and an removabel protective pipe

## B Drilling fluid

B.1



# Cebo Drill-Grout

Industrial Drilling

## Description & Properties

Cebo Drill-Grout is a **self-setting suspension** which can be used for HDD drilling, Micro Tunnelling as well as Vertical Drilling to fill annular spaces completely. Cebo Drill-Grout can also be used for other applications such as **filling holes of pulled piles**.

Cebo Drill-Grout hardens into a **plastic material** with a low water permeability which prevents mixing of underground water layers. By using Cebo Drill-Grout subsidence of the ground can be prevented and steel pipes are protected against corrosion.

Cebo Drill-Grout is tested for use in groundwater by the "**Hygiene-Institut des Ruhrgebiets**".

### Typical properties

<u>Parameter</u>	<u>Test method / In accordance with</u>	<u>Requirement</u>	<u>Typical property</u>
Grain size	Passing 125 µm dry sieve	Min. 95% < 125 micron	≈ 95.0%
Moisture content	DIN 18121-1	≤ 13% (m/m)	4 - 8%
Specific density			≈ 2600 kg/m <sup>3</sup>
Bulk density			≈ 900 kg/m <sup>3</sup>
Composition			Cement/Bentonite

### Typical properties 16% suspension

<u>Parameter</u>	<u>Test method / In accordance with</u>	<u>Requirement</u>	<u>Typical property</u>
Marsh viscosity			45 s/l
Plastic viscosity			9 cP
Yield Point			23 lb/100 ft <sup>2</sup>
Gels	10 seconds		25 lb/100 ft <sup>2</sup>
	10 minutes		29 lb/100 ft <sup>2</sup>
Specific density	ANSI/API RP 13B-1		1.11
Suspension density			1.110 t/m <sup>3</sup>
Filtrate loss			20 ml
pH	ANSI/API RP 13B-1		12.1
Shear strength after 7 days (20°C)	Vane shear tester		3.5 kPa
Shear strength after 21 days (20°C)	Vane shear tester		11.0 kPa
Shear strength after 28 days (20°C)	Vane shear tester		22.0 kPa
Max. pressure strength after 28 days	CUR 189		≈ 0.15 N/mm <sup>2</sup>
Permeability (K-value)	CUR 189		1 x 10 <sup>-9</sup> (m/s)
Workability			< 48 hours

## Contact us for more information

### Cebo Holland BV

Westerduinweg 1  
NL-1976 BV IJmuiden  
The Netherlands

info@cebo.com  
www.cebo.com  
Tel. +31(0)255-546262





Cebo Holland

# Product Data Sheet



## Cebo Drill-Grout

Industrial Drilling

### Recommended use

The properties of Cebo Drill-Grout are being optimized when the make up water has the following properties;

Conductivity : < 1000  $\mu$ S/cm

pH : 7.5 - 10

Total hardness : < 100 ppm

Add min. 160 - 180 kg Cebo Drill-Grout to 1 m<sup>3</sup> water. Fine adjustments are made to the consistency by varying the solid content; recommended Marsh time minimal 45s. S.G. should be min. 1.11

### Use in HDD:

Cebo Drill-Grout is designed to add at the same time as the pipe is pulled in. In this way, the existing slurry will be driven out the hole. Therefore it is advised to test the density of the suspension before pulling the pipe. The density of Cebo Drill-Grout should be much higher than the slurry in the drilling hole. This will help you to replace the slurry 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:

Add Cebo Drill-Grout from the bottom through a tremie pipe to remove the existing drilling fluid out of the hole and replace it completely by Cebo Drill-Grout.

**Warning!** When working on a water source, 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 filter tubes. Test the specific density of the fluid in the borehole before injecting the Cebo Drill-Grout. This specific density should be as low as possible.

**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.**

Cebo Drill-Grout is available in 25 kg bags and in big bags.

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.

Date : 13.08.2019  
Document number : 111901GB

### Contact us for more information


#### Cebo Holland BV

Westerduinweg 1  
NL-1976 BV IJmuiden  
The Netherlands

info@cebo.com  
www.cebo.com  
Tel. +31(0)255-546262



B.2

 <b>Cebo International</b>	<h1>Case E-power</h1>	<p>28-05-2021</p>
<b>Senior Field sales rep:</b>	Marcel Bijleveld	
<b>Date:</b>	18-02-2021	
<b>Project Name:</b>	E-power pipe	
<b>Location:</b>	Laboratory Cebo Holland B.V	
<b>Project Owner:</b>	Deltares	
<b>Lab responsibility:</b>	Pieter Jan Wiersema	

### Project scope;

A wooden box was made in the following dimensions, 110 x 60 x 30cm, a plastic pipe was installed with rubber seals from site to site. This box was filled with  $\pm$  250 liter Drill-Grout on 19-02-2021. The box is closed with a lid, on top was a additional weight of 5 kg. (see attached pictures 19-02-21)

After a period of 5 days standing in our lab with 20 decrees, the lid was removed and a Vane share test was performed. The results from the Vane share were 5.2 kPa with the large Vane. To remove the plastic pipe, we need to much force by hand. This was not possible manually. We had to remove pieces form the Drill-Grout section by section. First we removed 25 cm and tried again, then 50 cm and then 75 cm of the hardened Drill-Grout. On that moment the Drill-Grout required 20 – 25 kg pulling force to remove the plastic pipe. (see pictures 26-02-21)

A second test was done with Drill-Grout on the 08-03-21 with 15 kg on top of the lid, theses results came out quite the same. Vane share test was done after 5 days and the smaller vane was used, result was 2 kPa. Startup with 52 kg pulling force and when in motion 25 kg on the scale (see pictures 08-03-21)

A third test was done again with the same setup, but now full of sand, 0.2 – 2 mm, the box full of sand and pressed together till a strength of 1 MPa with the penetrometer. The sand was giving a similar pulling force as the Drill-Grout, the pipe started moving with 35 kg and when down when moving. (see pictures 16-03-21)

### Solution(s);

The pulling force differences between Drill-Grout and sand are quit similar, 52 kg – 35 kg. They both give a similar friction like our soil.



**Fluid Properties;**

Sample DG 160 kg / m3			
MF (sec.)	52		
600	N.A		
300	N.A		
PV / YP	N.A		
10" / 10'	N.A		
FL (30 min)	N.A		
Sand cont. (%)	< 1%		
Density (sg)	1.10		



**Economic value created for customer;**



# C Installation load

## Optimale ondiepe geboorde aanleg van warmteleidingen

Leiding grond interactie



# Optimale ondiepe geboorde aanleg van warmteleidingen

## Leiding grond interactie

### Auteur(s)

Remco Boeije

Piet Meijers

## Optimale ondiepe geboorde aanleg van warmteleidingen

Leiding grond interactie

<b>Opdrachtgever</b>	
<b>Contactpersoon</b>	
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	E-power, aanleg leidingen, warmteleidingen, intrekken, opwarmen

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	21-05-2021
<b>Projectnummer</b>	11205556-002
<b>Document ID</b>	Optimaal ruimtegebruik bij aanleg warmtetransportleidingen
<b>Pagina's</b>	33
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	final

### Auteur(s)

	R. Boeije	
	P. Meijers	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	R. Boeije P. Meijers	H. Kruse	A. Elkadi	



# Samenvatting

Dit rapport beschrijft de deelresultaten van onderzoek naar de ondiepe aanleg van geboorde warmteleidingen. Dit deelresultaat betreft de leiding grond interactie en krachtswerking op en in dubbelwandige warmteleidingen. De focus ligt op de transportleidingen tijdens de aanleg en gebruiksfase.

Er wordt gekeken naar de specifieke aspecten van het gebruik van de E-Power methode. Relevant voor dit rapport zijn twee aspecten:

- Bij de aanleg wordt de warmteleiding ingetrokken en niet in een sleuf aangelegd.
- In de eindfase is er een schil van oude boorvloeistof rondom de leiding.

In dit rapport worden de volgende aspecten beschouwd:

- bepaling grondveren
- axiale belastingen tijdens intrekken van de leiding
- axiale belastingen tijdens opwarmen leiding
- ringspanningen bij ligging leiding in een bocht

In een aparte studie worden de krachten en spanningen in de leiding met meenemen van alle belastingen beschouwd.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Projectbeschrijving</b>	<b>7</b>
2.1	Aanlegmethode	7
2.2	Doelstelling	7
2.3	Gebruikte parameters	7
2.3.1	Leidingen	7
2.3.2	Ondergrond	9
2.3.3	Boorproces	10
2.3.4	Temperatuur verschil	11
2.3.5	Leiding lengte	11
2.4	Fase grondveren/berekeningstype	12
2.5	Mechanica berekeningstype	12
<b>3</b>	<b>Berekeningen</b>	<b>13</b>
3.1	Grondveren	13
3.1.1	Model	13
3.1.2	Grondveren; berekeningsresultaten	15
3.2	Intrekken	17
3.2.1	Mechanica model	17
3.2.2	Parameters mechanica model	17
3.2.3	Berekeningsresultaat	18
3.3	Warmte belasting	20
3.3.1	Toets locaties	20
3.3.2	Mechanica model	20
3.3.3	Parameters mechanica model	21
3.3.4	Berekeningsresultaat en toetsing locatie 1	21
3.4	Ring belasting	24
3.4.1	Algemeen	24
3.4.2	Mechanica model	25
3.4.3	Berekeningsresultaten locatie 3	26
<b>A</b>	<b>Boorvloeistof CeBo</b>	<b>29</b>
<b>B</b>	<b>Invloed grondsoort op gewelfwerking en schuifweerstand</b>	<b>30</b>

# 1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de deelresultaten van onderzoek naar de ondiepe aanleg van geboorde warmteleidingen. Dit deelresultaat betreft de leiding grond interactie en krachtswerking op en in dubbelwandige warmteleidingen. De focus ligt op de transportleidingen tijdens de aanleg en gebruiksfase. Er wordt gekeken naar de specifieke aspecten van het gebruik van de E-Power methode.

Dit is een onderzoeksproject zodat er dieper naar de ontwerp- en berekeningsmethode wordt gekeken. De bestaande normen en leidingontwerpen zijn voor dit rapport een referentie, maar geen vast gegeven. Dit rapport bevat dan ook geen ontwerpberekeningen voor een specifieke leiding of voorschriften hoe de leiding ontworpen moet worden.

De volgende onderwerpen worden in dit rapport gepresenteerd:

- Bepaling grondstijfheid voor twee verschillende leidingdiameters, deze waarden worden in een andere deelstudie gebruikt
- De axiale krachten tijdens het intrekken van de leiding
- De axiale krachten tijdens het opwarmen van de leiding
- De ringspanningen (tangentele spanningen) bij een bocht

Bij de drie laatste onderdelen wordt expliciet uitgegaan van de situatie bij een dubbelwandige leiding.

Dit rapport hoort bij de rapportage van Rotterdam Engineering:

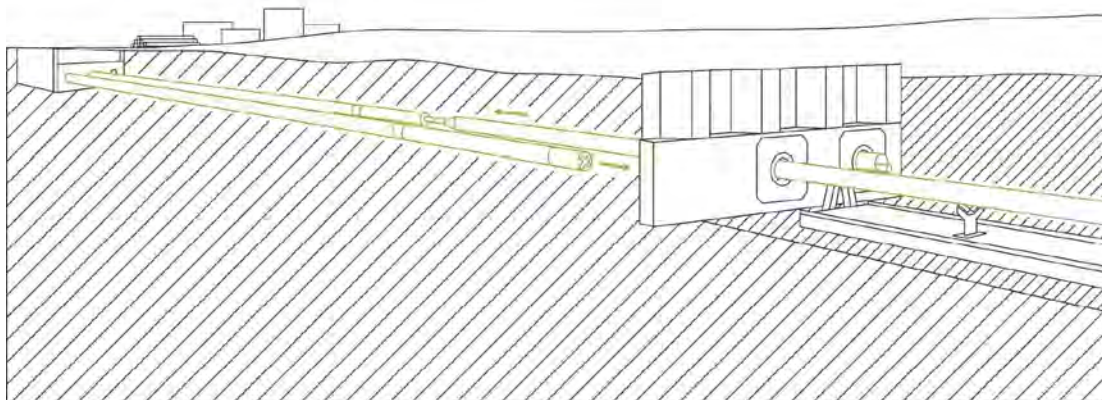
[RE 2021]Rotterdam Engineering, Ondiepe aanleg van geboorde warmteleidingen, sterkte technische toetsing conform NEN3650 en EN13941, rev 3., kenmerk RE20100-R01, 9 april 2021.



## 2 Projectbeschrijving

### 2.1 Aanlegmethode

Voor de installatie methode wordt uitgegaan van de de E-power methodiek van Herreknecht. Bij deze methode wordt de leiding in twee stappen aangelegd. Bij deze methode wordt er eerst met micro-tunneling een leiding geboord, waarna deze met de productleiding wordt teruggetrokken. Figuur 2-1 illustreert deze methode.



Figuur 2-1 Aanleg leiding met E-power (bron: <https://www.herreknecht.com/en/products/productdetail/e-power-pipe/>)

Relevant voor dit rapport zijn twee aspecten:

- Bij de aanleg wordt de warmteleiding ingetrokken en niet in een sleuf aangelegd.
- In de eindfase is er een schil van oude boorvloeistof rondom de leiding.

### 2.2 Doelstelling

Zoals in Hoofdstuk 1 al geformuleerd is de doelstelling van dit rapport de berekening van de leiding grond interactie en krachtwerving op en in dubbelwandige warmteleidingen. In dit rapport worden de axiale krachten tijdens intrekken en tijdens warmtebelasting berekend. Daarvoor worden recentelijk door Deltares ontwikkelde rekenmethoden gebruikt. Parallel hieraan worden door Rotterdam Engineering berekeningen gemaakt met PLE4win voor de temperatuurbelasting in combinatie met de overige belastingen (gronddrukken) op de leiding.

### 2.3 Gebruikte parameters

#### 2.3.1 Leidingen

Tabel 2-1 geeft de afmetingen en materiaalparameters van de twee in deze studie beschouwde buizen. De afmetingen van de buizen volgen uit onderling overleg waarvan geen referentie is. De overige parameters zijn gekozen door Deltares, doch worden niet onderbouwd. .

Tabel 2-1 Leiding typen met parameters

parameter	omschrijving	eenheid	waarde	
			1	2
			DN300	DN700
type	materialen	[-]	staal PUR PE	staal PUR PE
Do o	uitwendige diameter buiten buis	[m]	0,4500	0,9000
Do i	uitwendige diameter binnen buis	[m]	0,3239	0,7110
to	wanddikte buiten buis	[m]	0,0052	0,0087
ti	wanddikte binnen buis	[m]	0,0056	0,0080
Eo	elasticiteitsmodulus buiten buis korte/lange duur	[MPa]	825/300	825/300
Ei	elasticiteitsmodulus binnen buis	[MPa]	210000	210000
G2	glijdingsmodulus tussenlaag	[MPa]	1,1	1,1
vo	dwarscontractiecoëf. buiten buis <sup>1)</sup>	[-]	0	0
vi	dwarscontractiecoëf. binnen buis	[-]	0,3	0,3
v2	dwarscontractiecoëf. Tussenlaag <sup>1)</sup>	[-]	0	0
yo	volumiek gewicht buiten buis	[kN/m <sup>3</sup> ]	9,5	9,5
yi	volumiek gewicht binnen buis	[kN/m <sup>3</sup> ]	78	78
γ2	volumiek gewicht isolatie <sup>2)</sup>	[kN/m <sup>3</sup> ]	0,6	0,6
γ <sub>med</sub>	volumiek gewicht medium	[kN/m <sup>3</sup> ]	10	10
σ <sub>e o</sub>	MRS buiten buis (Minimum Required Strength)	[MPa]	8	8
σ <sub>e i</sub>	vloeispanning binnen buis <sup>3)</sup>	[MPa]	355 (235)	355 (235)
τ <sub>2; ax</sub>	afschuifsterkte axiaal grens isolatie/binnen <sup>4)</sup>	[MPa]	0,12	0,12
σ <sub>2; comp</sub>	compressie druksterkte isolatie <sup>5)</sup>	[MPa]	0,15	0,15
α <sub>i</sub>	lineaire uitzettingscoëf. binnen buis	[1/°K]	12,3·10 <sup>-6</sup>	12,3·10 <sup>-6</sup>
<p>1) waarde nul voorkomt dwarscontractie en daarmee complicaties</p> <p>2) EN253:2019 noemt 0,55 als minimale waarde</p> <p>3) P355NH (P235GH). Bij 120 °C neemt de vloeispanning af tot 207/296 MPa. Gebruikelijk is de lage kwaliteit P235GH, logisch is de hier aangehouden gangbare kwaliteit P355NH</p> <p>4) EN253:2019 noemt in tabel 6 0,12 MPa als "minimum unaged shear strength". Dit is de gangbare waarde voor sleufloos aangelegde leidingen</p> <p>5) De EN13941 geeft limit states voor het PUR schuim in laterale richting. De eis is maximaal 0,15 MPa. Dit wordt gezien als uiterst conservatief. Leveranciers geven aan dat een praktische waarde eerder rond de 0,28 MPa zal liggen. Die laatste waarde wordt ook vaak aangehouden in een ontwerp.</p>				

### 2.3.2 Ondergrond

Voor de ondergrond wordt aangenomen dat de leiding wordt aangelegd in klei. Bij de gangbare grondopbouw in Nederland en de gangbare aanlegdiepten komt de leiding onder de grondwaterstand.

De gebruikte grondparameters zijn samengevat in Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Grondparameters

parameter	omschrijving	eenheid	waarde
type	grondsoort	[-]	klei
$\gamma'_{\text{gemiddeld}}$	gem. effectieve vol. gewicht (boven/onder freatische lijn)	[kN/m <sup>3</sup> ]	5 <sup>1)</sup>
a	adhesie, maximale schuifspanning buis/grond	[kPa]	5
$\delta$	wrijvingshoek buis/grond	[deg]	10
c	cohesie	[kPa]	5
$\phi$	hoek van inwendige wrijving	[deg]	17,5
$K_0$	neutrale horizontale korrelspanningscoëfficiënt	[-]	0,7
1) De freatische niveau is iets onder maaiveld. Daarmee komt dit ongeveer overeen met waarden $\gamma=13 \text{ kN/m}^3$ ( $\gamma'=13 \text{ kN/m}^3$ ) boven het freatische niveau en $\gamma_{\text{sat}}=13 \text{ kN/m}^3$ ( $\gamma'=3 \text{ kN/m}^3$ ) onder het freatische niveau.			

Adhesie en wrijvingshoek worden gebruikt voor berekening grondveren. Voor berekening axiale schuifweerstand in bijlage B worden de getallen uit paragraaf 2.4 gebruikt.

De leiding wordt ondiep aangelegd. Om ook bij sloten een dekking te hebben, wordt als ondiepe ligging een niveau van 3 m onder het gemiddelde maaiveld niveau aangehouden.

Tabel 2-3 Diepteligging van de leiding

ligging	niveau [m maaiveld]
ondiep	-3

In Bijlage B zijn berekeningen naar de gewelfwerking van het boorgat bij verschillende grondsoorten opgenomen. De corresponderende grondparameters zijn eveneens opgenomen in Bijlage B.

### 2.3.3 Boorproces

Zowel de aanleg van een leiding in een sleuf als met een boring is een gangbare aanlegmethode. Als voor de aanleg van de leiding voor een boring is gekozen, is aangenomen dat een boorvloeistof in de vorm van drill grout is gebruikt. In de onderstaande Tabel 2-4 zijn de gebruikte boorvloeistof parameters van drill grout weergegeven en ook de standaard eigenschappen van bentoniet. Het dient te worden opgemerkt dat de standaard eigenschappen van bentoniet uit de NEN 3650 zijn afgeleid. Lopende het project zijn meer gegevens beschikbaar gekomen over het toe te passen drillgrout, daarom zijn alleen de berekeningen met drillgrout gerapporteerd. Ter verduidelijking zijn de parameters voor bentoniet in Tabel 2-4 grijs gemaakt om aan te geven dat deze alleen zijn opgenomen ter vergelijking.

Tabel 2-4 Parameters boorvloeistof

Boorvloeistof parameters				
par	omschrijving	eenheid	waarde	
			1	2
			Bentoniet	Drillgrout 1)
f2	wrijving boorvloeistof/leiding	[kPa]	0,050	0,015 <sup>1)</sup>
f3	wrijvingsfactor grond/leiding met smering	[-]	0,2	0,2
$\gamma$	volumiek gewicht	[kN/m <sup>3</sup> ]	11	11
$\tau$	zwichts spanning/yield stress <sup>2)</sup>	[kPa]	0,014	0,015 <sup>2)</sup>
a/c	adhesie/cohesie gerijpte boorvloeistof <sup>3)</sup>	[kPa]	1	0,6 <sup>3)</sup>
$\delta$	wrijvingshoek gerijpte boorvloeistof	[deg]	8,75	0 <sup>4)</sup>
p	boorvloeistof overdruk	[kPa]	2	2
E	elasticiteitsmodulus gerijpte boorvloeistof	[kPa]	200	200

1) NEN geeft aan dat voor warmteleidingen geen sterkte gerekend mag worden. Gezien het onderzoeks karakter van dit rapport wordt toch een sterkte in rekening gebracht. Voor het ontwerp is nader onderzoek, ander keuze of onderbouwing vereist.

2) uit meting CeBo bij intrekken zwichts spanning 15 Pa (Bijlage A)

3) uit meting CeBo volgt een cohesie van 5 kPa en een adhesie van 0,6 kPa en 0,9 kPa. Wegens koppeling a adhesie/c cohesie uit NEN en risico opspannen is/moet de laagste waarde worden gekozen (Bijlage A)

4) CeBo heeft hier geen meetdata voor. Gezien de ongunstige verhouding tussen de adhesie en cohesie, zoals gerapporteerd door CEBO, is er geen waarde groter dan 0 te verdedigen.

Bij het boorproces is het boorgat iets groter dan de leidingdiameter. Dit is de annulus (in het Engels meestal "overcut"). Voor beide leiding diameters is dezelfde annulus aangehouden.

Tabel 2-5 Boring annulus

Boring			
parameter	omschrijving	eenheid	waarde
lovercut	annulus, verschil in straal tussen boorkop en leiding	[m]	0,02

### 2.3.4 Temperatuur verschil

Een redelijke mediumtemperatuur voor warmte transportleidingen is 120 °C. Voor de berekeningen wordt het temperatuurverschil tussen de binnen en buiten buis gebruikt. De temperatuur van de buiten buis zal overeenkomen met de temperatuur van de omringende grond. Temperatuur verschillen in de ondergrond worden niet in rekening gebracht. Een realistische temperatuur voor de buitenbuis is 10°C zodat een temperatuurverschil  $\Delta T=110^{\circ}\text{C}$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) een redelijke waarde is.

Tabel 2-6 Temperatuur verschil

Medium temperatuur t.b.v. mechanica berekening	
omschrijving	$\Delta T$ [ $^{\circ}\text{K}$ ]
Temperatuur verschil tussen binnen en buiten buis	110

### 2.3.5 Leiding lengte

Voor de berekeningen is de lengte van de leiding relevant. Boven een zekere lengte is de leiding bij opwarmen gefixeerd. Bij langere lengten zullen de verplaatsingen en krachten niet meer toenemen door opwarmen. Voor het intrekken van de leiding tijdens de aanleg heeft een grotere lengte wel invloed.

Berekeningen naar het opwarmen van de leiding modelleren slechts de halve leidinglengte wegens de symmetrie.

Tabel 2-7 Leiding lengten

Leiding lengte t.b.v. mechanica berekening			
	eenheid	kort	lang
L totale lengte leiding voor aanleg	[m]	200	1000
( $\frac{1}{2}L$ ) (halve lengte ivm symmetrie bij opwarmen)	[m]	(100)	(500)

## 2.4 Fase grondveren/berekeningstype

De leiding wordt geboord aangebracht. Tijdens het boren en bij het intrekken is de leiding omringd door boorvloeistof. Het is minder wenselijk dat de leiding in de eindfase omringd is met een boorvloeistof waarvan het gedrag onzeker is. Daarom wordt er waarschijnlijk gekozen voor een verhardende boorvloeistof zoals drill grout.

*Tabel 2-8 Berekening grondveren fase*

Fase/berekeningstype grondveren	
omschrijving	waarde
Tijdens en direct na het boren, vloeibare drillgrout	aanleg
Met verharde drillgrout	eind
Aanleg in sleuf	ref

## 2.5 Mechanica berekeningstype

Voor de modellering van de vervorming en de krachten in de leiding zijn er twee fasen/berekeningstypen onderscheiden, zoals aangegeven in de onderstaande Tabel 2-9.

*Tabel 2-9 Mechanica berekening leiding, aanleg en eind fase*

Berekeningstype vervorming van en krachten in de leiding	
omschrijving	waarde
De buis wordt in het boorgat getrokken	pull
De binnenbuis wordt opgewarmd door warm medium	warm

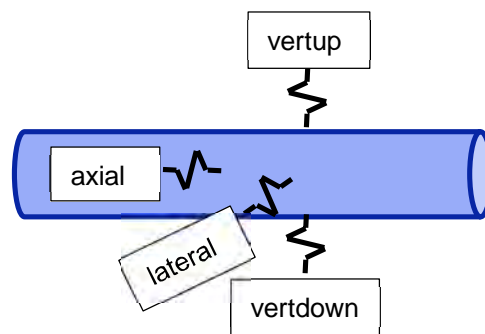
## 3 Berekeningen

### 3.1 Grondveren

#### 3.1.1 Model

Met het intrekken van de leiding of het opwarmen van de leiding verplaatst de leiding zich ten opzichte van de grond.

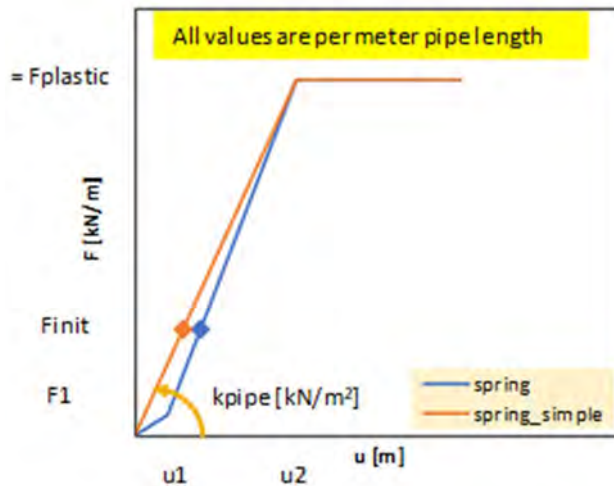
Door verkeersbelastingen en grondzettingen of axiale vervormingen door temperatuurverschillen verplaatst de grond ten opzichte van de leiding. In beide gevallen geeft dit verschil in verplaatsing een tegenwerkende kracht. Het mechanica model hiervoor is een veer. De verschillende veren zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 3-1



*Figuur 3-1 Grondveren richtingen*

Voor de relatie tussen de indrukking en kracht (constitutieve relatie) is het gedrag volgens Figuur 3-2 bepaald. Het is gebruikelijk om voor de grondveer een elasto plastisch gedrag te modelleren. In deze rapportage is berekening van de veer uitgevoerd volgens de Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, AmericanLifelinesAlliance, July 2001 with addenda through February 2005.

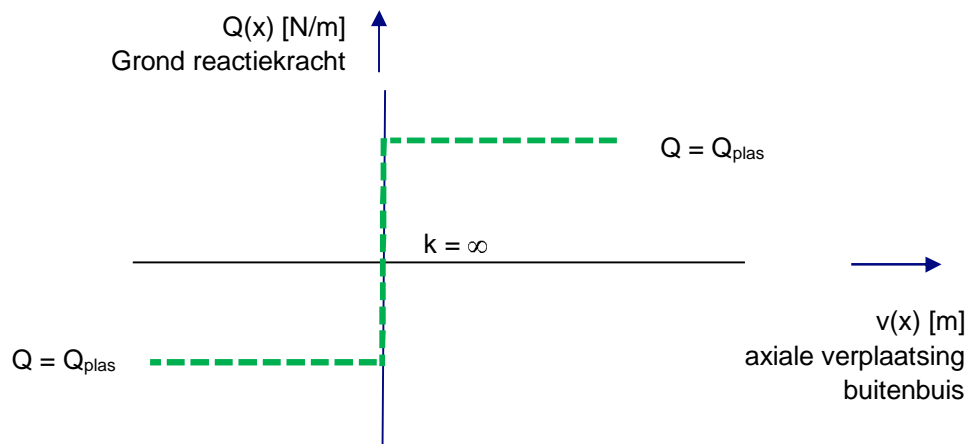
Een complicatie is de zone met boorvloeistof rondom de leiding. Dit geeft een extra, veelal slappere, schil rondom de leiding. Dit gecombineerde gedrag leidt tot de drie takken in Figuur 3-2. Figuur 3-2 geeft het typische gedrag voor een laterale veer. De eerste tak geeft het relatief slappe gedrag waarmee de ruimte van de overcut wordt overbrugd. Vervolgens ontstaat een stijvere tak waarmee de boorgangwand wordt ingedrukt. Tenslotte bezwijkt de grond plastisch waarmee een plastische tak ontstaat.



Figuur 3-2 Grondveren kracht verplaatsing gedrag (constitutieve relatie)

In numerieke berekeningen is dit gedrag vaak lastig te modelleren. Vooral de toenemende stijfheid nadat de gap is gesloten vereiste een hoogwaardige numerieke routine. Een logische vereenvoudiging is om de oranje lijn uit Figuur 3-2 aan te houden. Daarmee ontstaat een model dat bijvoorbeeld in PLE is in te voeren.

Een verdere vereenvoudiging is om een vol plastische modellering toe te passen. In deze rapportage is dat gebruikt voor de modellering van het axiale gedrag van de leiding. Dit model geeft voor de relatie tussen de verplaatsing en kracht (constitutieve relatie) het gedrag volgens Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Axiale Grondveer kracht verplaatsing gedrag (constitutieve relatie)

De voordelen van deze vereenvoudigde veer zijn:

- De onzekere grondstijfheid speelt geen rol bij de resultaten.
- Zonder grondstijfheid is er een analytische oplossing beschikbaar.

Het nadeel is uiteraard dat de vervorming iets wordt onderschat. Dit is maximaal de grootte van de elastische vervorming (= 8 mm).

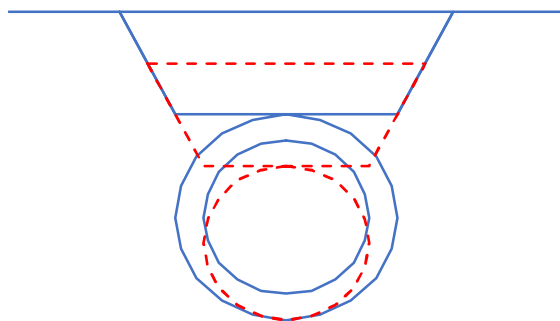


### 3.1.2 Grondveren; berekeningsresultaten

Voor de leiding DN300 is de uitwendige diameter 0,45 m. Het hart van de leiding bevindt zich dan op  $3+0,45/2 = 3,225$  m onder maaiveld in een sleuf (direct contact met de grond). De effectieve verticale grondspanning is  $\sigma'_{v0} = 3,225 \cdot 5 = 16,125$  kPa. De axiale plastische reactiekracht is dan  $F_{ax; plas} = 7,66$  kN/m

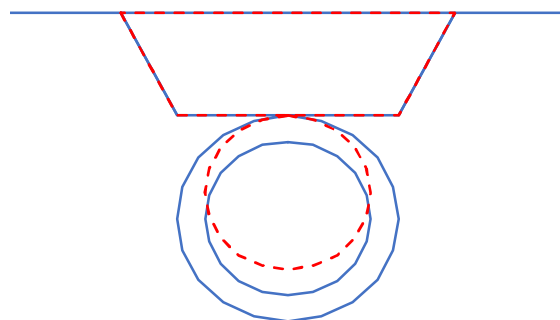
Bij de aanleg door middel van de E-power techniek in een boorgat bestaat de wrijving zowel uit een grond aandeel als uit een aandeel van de boorvloeistof in de annulus. Hierbij is de overdruk in de annulus bij aanleg van belang naast de eigenschappen van de grond. Bij voldoende overdruk of bij voldoende grondsterkte is er geen zakkende grondkolom aanwezig die voor een toename van de gronddruk zorgt tijdens de aanleg. In de eind situatie na het boren is er geen overdruk meer en is de volume reductie van de boorvloeistof van belang. Bij de uitharding van drillgrout is de volume reductie nihil.

In de situatie met een klei grond en de grondparameters zoals in het vorige hoofdstuk beschreven, is er bij 2 kPa overdruk bij de aanleg op een diepte van drie meter geen sprake van een zakkende grondkolom (zie Figuur 3-4).



*Figuur 3-4 Niet bij klei: zakkende grondkolom bij een boorgat (blauw initiële situatie, rood na passage boor)*

Er is wel sprake van een boorgat dat in stand blijft waarbij de leiding opdrijft (zie Figuur 3-5).

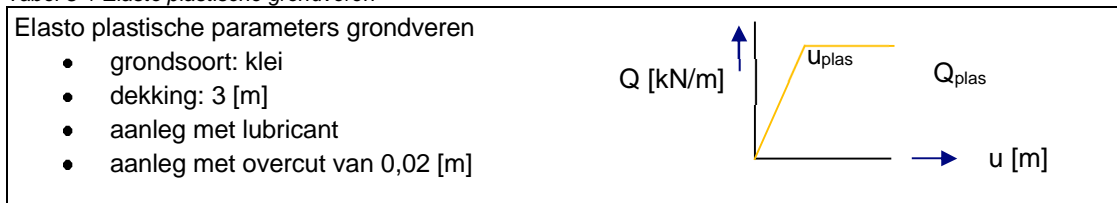


*Figuur 3-5 Wel bij klei: Niet zakkende grondkolom bij een boorgat (blauw initiële situatie, rood na passage boor)*

De uitwerking staat in de onderstaande Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Elasto plastische grondveren

buis- type	fase	axiaal		lateraal		verticaal ↑		verticaal ↓	
		U <sub>plas</sub>	Q <sub>plas</sub>	U <sub>plas</sub>	Q <sub>plas</sub>	U <sub>plas</sub>	Q <sub>plas</sub>	U <sub>plas</sub>	Q <sub>plas</sub>
[-]	[-]	[m]	[kN/m]	[m]	[kN/m]	[m]	[kN/m]	[m]	[kN/m]
DN300	aanleg	0.0013	0.26	0.0481	40.72	0.047	41.74	0.083	68.63
	eind	0.0012	0.85	0.0481	40.72	0.047	41.74	0.083	68.63
	ref	0.008	7.66	0.0281	40.72	0.045	41.74	0.045	68.63
DN700	aanleg	0.0017	1.08	0.0763	75.74	0.092	55.08	0.128	149.72
	eind	0.0012	1.7	0.0763	75.74	0.092	55.08	0.128	149.72
	ref	0.008	15.79	0.0563	75.74	0.09	55.08	0.09	149.72

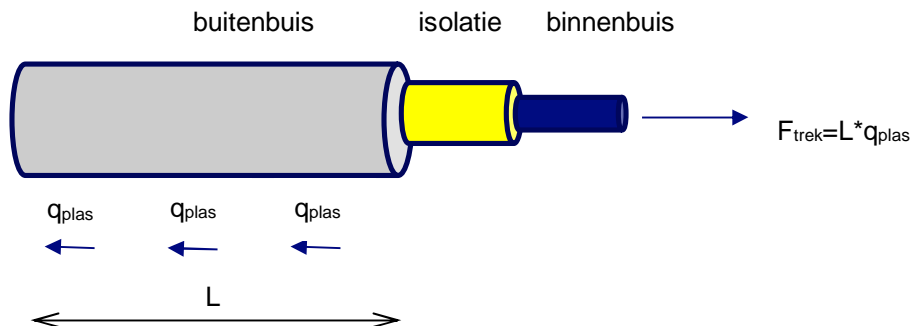


In Bijlage B zijn aanvullende berekeningen met andere grondsoorten gerapporteerd.

## 3.2 Intrekken

### 3.2.1 Mechanica model

Voor het intrekken van de leiding is een mechanica model gemaakt. De externe krachten zijn weergegeven in Figuur 3-6. De grond wordt gemodelleerd met een plastische bezwijk kracht  $q_{plas}$ . Deze bezwijk kracht is berekend in de voorgaande paragraaf en gerapporteerd in Tabel 3-1.



Figuur 3-6 Mechanica model externe krachten intrekken leiding

### 3.2.2 Parameters mechanica model

Bij het intrekken van de leiding wordt de weerstand conform Tabel 3-1 “aanleg” “axiaal” overwonnen.

Op grond van de basis parameters uit Tabel 2-1 zijn in Tabel 3-2 aanvullende afgeleide parameters bepaald die worden gebruikt bij de berekening en toetsing van het mechanica model.

Tabel 3-2 Leiding typen met afgeleide parameters

parameter	omschrijving	een- heid	waarde	
			1	2
			DN300	DN700
EA1	axiale normaalstijfheid binnen buis	[kN]	1175963	3710347
KS2	afschuifstijfheid isolatielaag	[kN/m]	22804	32096
EA3 (kort, lang)	axiale normaalstijfheid buiten buis (korte duur aanleg, lange duur eind)	([kN], [kN])	(5995, 2180)	(20098, 7308)
F1 u	max ax kracht binnenbuis $F1u = \sigma_{e,i} \frac{\pi}{4} (D_{o,i}^2 - (D_{o,i} - 2t_i)^2)$	[kN]	1988	6272
F2 u	max ax afschuifkracht isolatie $F2u = \tau_{2,ax} \pi D_{o,i}$	[kN/m]	122	268
F3 u	max ax kracht buitenbuis $F3u = \sigma_{e,o} \frac{\pi}{4} (D_{o,o}^2 - (D_{o,o} - 2t_o)^2)$	[kN]	218	731

### 3.2.3 Berekeningsresultaat

De berekeningsresultaten zijn samengevat in de onderstaande Tabel 3-3.

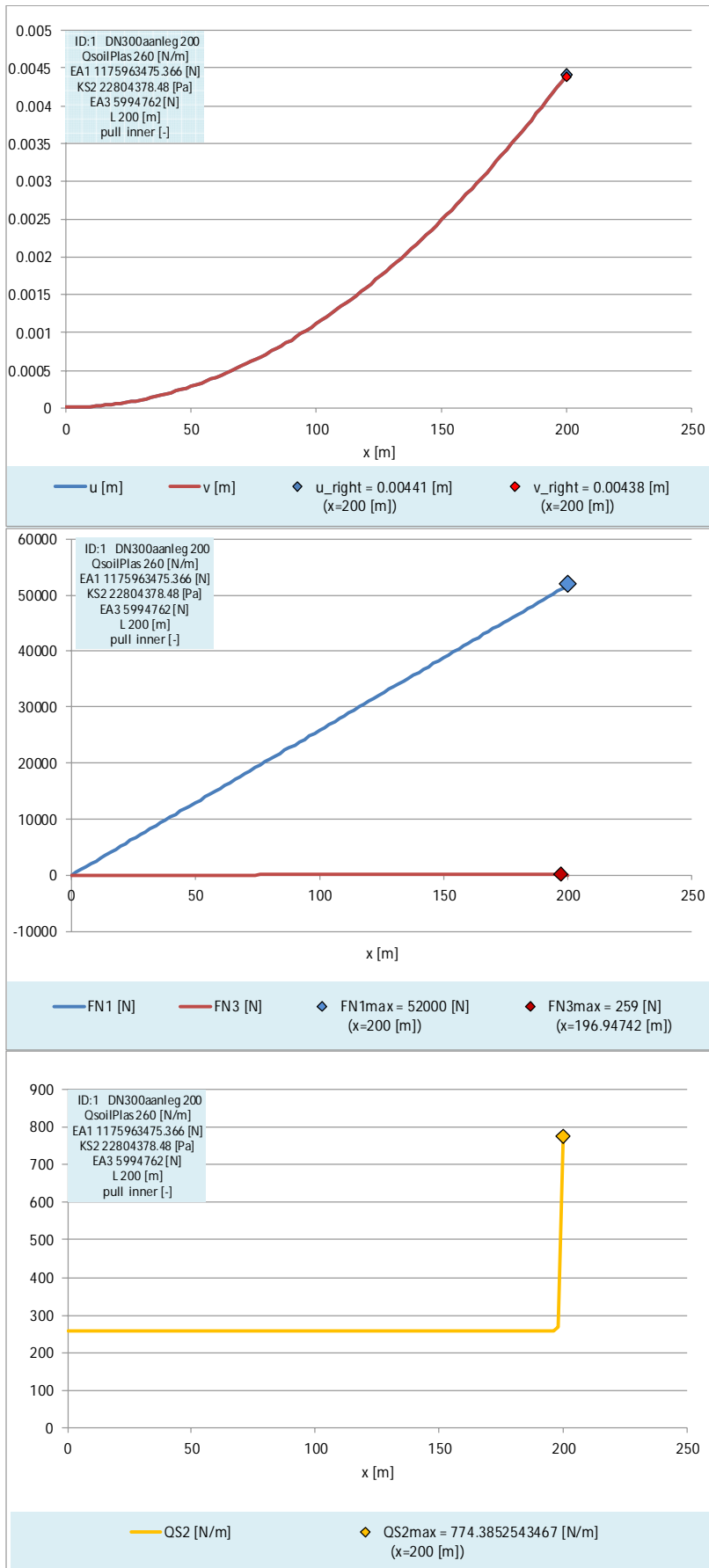
Tabel 3-3 Berekeningsresultaten intrekken leiding

intrekken leiding aanleg					
item	eenheid	L=200 m		L=1000 m	
		DN300	DN700	DN300	DN700
u max maximale verplaatsing	[m]	0.004	0.006	0.11	0.145
FN1max maximale kracht in binnenbuis	[N]	52000	216000	260000	1080000
QS2max maximale afschuifkracht isolatie	[N/m]	774	2549	2837	8447
FN3max maximale kracht in buitenbuis	[N]	259	1134	1313	5781
UC FN1max max. kracht in binnenbuis	[-]	0.0262	0.0344	0.1308	0.1722
UC QS2max max. afschuifkracht isolatie	[-]	0.0063	0.0095	0.0232	0.0315
UC FN3max max. kracht in buitenbuis	[-]	0.0012	0.0016	0.006	0.0079
UC Unity Check  voldoet  voldoet niet					

Ter illustratie zijn hierna in Figuur 3-7 grafisch de resultaten van kleinste leiding DN300 met de kortste lengte van 200 m weergegeven.

In deze figuur is:

- blauw de binnenbuis met identificatie nummer 1
- geel het isolatiemateriaal met identificatie nummer 2
- rood de buitenbuis met identificatie nummer 3

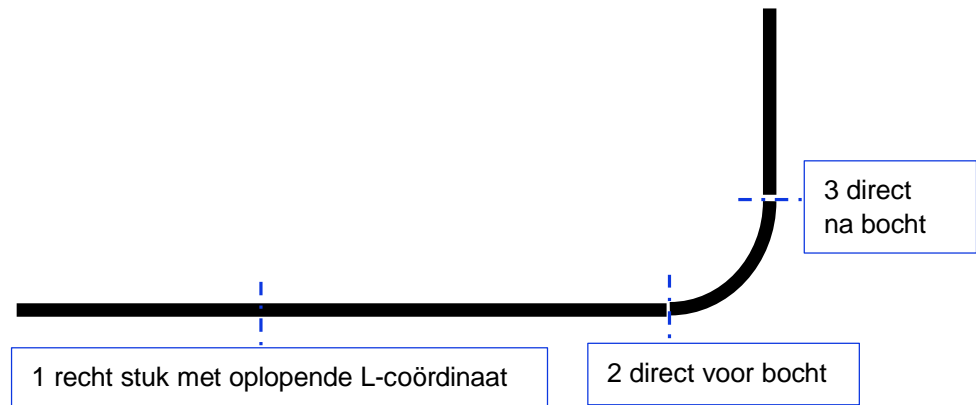


Figuur 3-7 Intrekken leiding DN300 200 m lang

### 3.3 Warmte belasting

#### 3.3.1 Toets locaties

Bij het opwarmen van de leiding wordt de toetsingen uitgevoerd op een aantal karakteristieke locaties. Deze zijn weergegeven in Figuur 3-8.

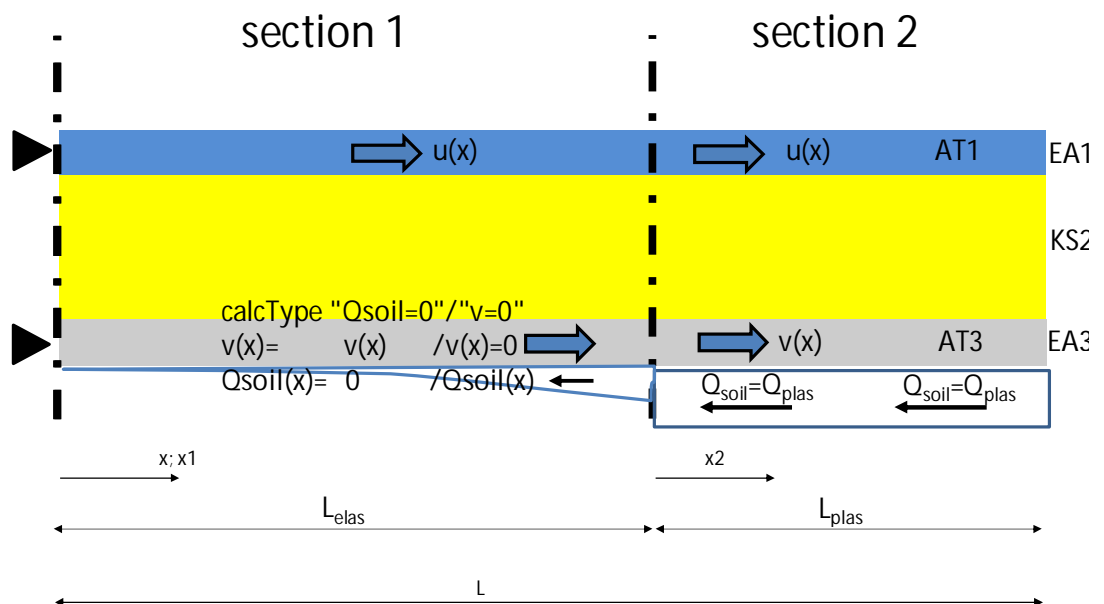


Figuur 3-8 Toets locaties model warmte belasting leiding

In paragraaf 3.3.2, 3.3.3 en 3.3.4 wordt de situatie van een rechte leiding beschouwd. Dat komt overeen met toetslocatie 1. Paragraaf 3.4 gaat in op locatie 3. Locatie 2 wordt in dit rapport verder niet besproken.

#### 3.3.2 Mechanica model

Het mechanica model is hieronder weergegeven in Figuur 3-9.



Figuur 3-9 Mechanica model warmte belasting leiding

### 3.3.3 Parameters mechanica model

De parameters zijn analoog aan die in Tabel 3-2. In de onderstaande Tabel 3-4 is een additionele parameter voor de temperatuurbelasting gegeven.

Er wordt geen inwendige druk en geen verticale grondbelasting in rekening gebracht, het betreft dus een BC3 berekening ( de verticale grondbelasting is immers gering).

Tabel 3-4 Leiding typen met afgeleide parameters

parameter	omschrijving	eenheid	waarde	
			1	2
			DN300	DN700
AT1	temperatuurrek binnen buis $\alpha \Delta T$ staal $\alpha_{staal}=12,3 \cdot 10^{-6} [1/^{\circ}K]$ ; $\Delta T=110 [^{\circ}K]$	[-]	0,001352	0,001352

### 3.3.4 Berekeningsresultaat en toetsing locatie 1

De berekeningsresultaten zijn samengevat in de onderstaande Tabel 3-5. De laatste regels geven het resultaat van de Unity Check (UC).

Tabel 3-5 Berekeningsresultaten opwarmen leiding

opwarmen leiding recht deel locatie 1									
item	eenheid	eind				ref			
		$\frac{1}{2}L=100$ m		$\frac{1}{2}L=500$ m		$\frac{1}{2}L=100$ m		$\frac{1}{2}L=500$ m	
		DN300	DN700	DN300	DN700	DN300	DN700	DN300	DN700
L <sub>plas</sub> lengte plastisch grondgedrag	[m]	100	100	500	500	100	100	201	308
u max. verplaatsing binnenbuis	[m]	0.131	0.133	0.585	0.618	0.103	0.114	0.14	0.215
v max. verplaatsing buitenbuis	[m]	0.131	0.132	0.585	0.617	0.102	0.113	0.14	0.214
FN1max kracht in binnenbuis	[N]	-87525	-178726	-426896	-857389	-764938	-1578211	-1591079	-5020099
QS2max afschuifkracht isolatie	[N/m]	10379	22397	10379	22397	17177	36459	17177	36459
FN3max kracht in buitenbuis	[N]	2939	9853	2939	9853	2911	9758	2911	9758
UC FN1max kracht in binnenbuis	[-]	0.044	0.0285	0.2147	0.1367	0.3848	0.2516	0.8004	0.8004
UC QS2max afschuifkracht isolatie	[-]	0.085	0.0836	0.085	0.0836	0.1407	0.136	0.1407	0.136
UC FN3max kracht in buitenbuis	[-]	0.0135	0.0135	0.0135	0.0135	0.0134	0.0134	0.0134	0.0134
UC Unity Check    ● voldoet    ● voldoet niet									

De krachten in de binnenbuis en in de isolatie nemen toe met toename van de (buiten-) diameter en met toename van de leidinglengte. De maximale kracht in de buitenbuis is evenredig met de doorsnede van de buitenbuis. Deze wordt gelimiteerd door de situatie waarbij de rek van de binnenbuis door de normaalkracht gelijk is aan, maar tegengesteld van teken, de rek door de opwarming. Bij de hier gebruikte parameters is die kracht voor de DN300 leiding 1,6 MN en voor de DN700 leiding 5,0 MN.

Opvallend is het grote verschil in de krachten tussen de situatie 'eind' en de situatie 'ref'. Qua invoerparameters is het enigste verschil tussen deze twee situaties de waarde van Q<sub>plas</sub> (Tabel 3-1). De sterkte van de aanhechting buis-grond heeft een grote invloed op de normaalkracht in de leiding.

Ter illustratie zijn hierna in Figuur 3-10 grafisch de resultaten van leiding DN700 met een halve lengte van 500 m weergegeven.

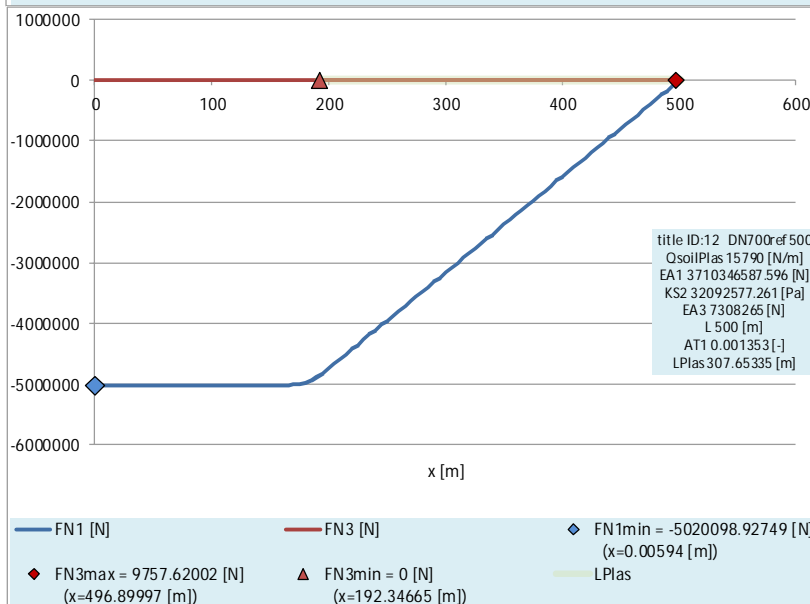
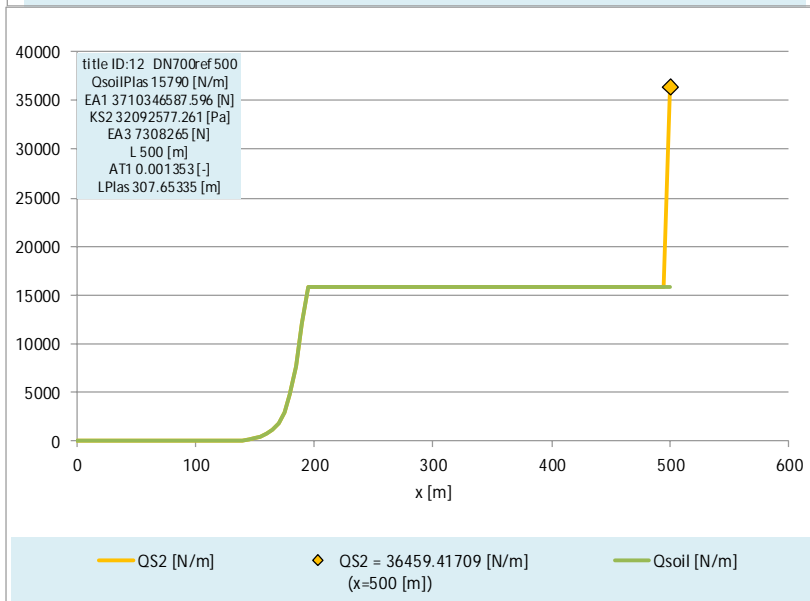
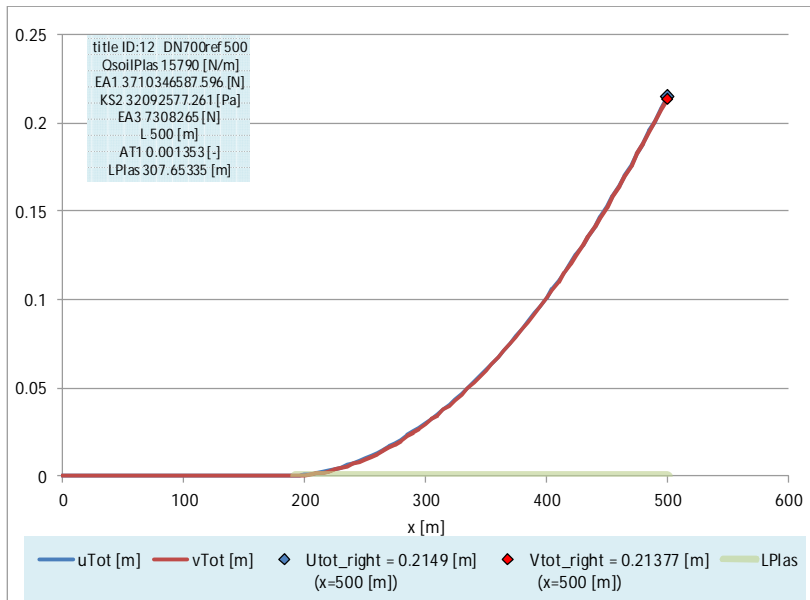
In deze figuur is voor de lijnen de volgende kleurcode gebruikt:

- Blauw: de binnenbuis, met nummer 1
- Geel: het isolatiemateriaal, met nummer 2
- Rood: de buitenbuis, met nummer 3

Te zien is dat de verplaatsing van de binnen- en de buitenbuis praktisch gelijk is. Verder is te zien dat tussen  $x = 0$  en  $x = 200$  m (dat is op 300 m van het vrije einde) de verplaatsing van

de leiding nihil is. Hier is de normaalkracht in de leiding groot genoeg om de uitzetting door temperatuur te compenseren. Hier wordt door het isolatiemateriaal geen schuifkracht meer overgebracht van de binnenbuis naar de buitenbuis, dicht bij het vrije einde wordt nog wel een schuifkracht overgebracht.





Figur 3-10 Opwarmen leiding DN700 1000 m lang; m halve lengte 500 m

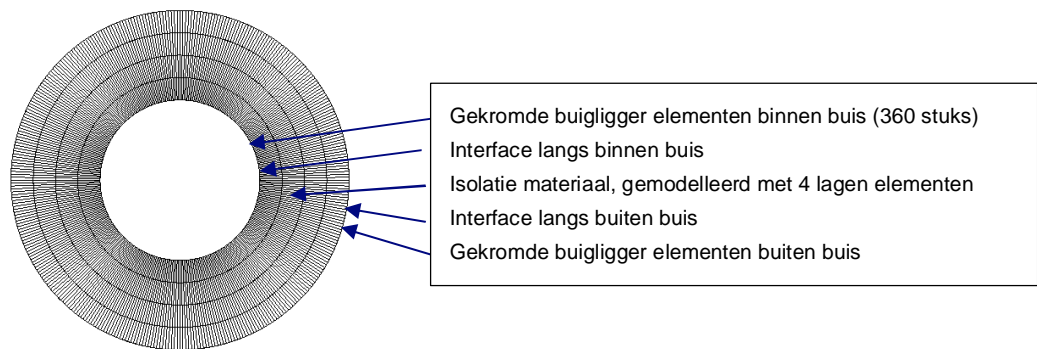
## 3.4 Ring belasting

### 3.4.1 Algemeen

Een warmteleiding is een afwijkend leidingtype omdat er sprake is van een binnen buis, een buiten buis en verbindend isolatie materiaal. In de voorgaande paragrafen is de gunstige invloed van de stijfheid van het isolatie materiaal in rekening gebracht voor de axiale belasting. In deze paragraaf worden referentie berekeningen gemaakt naar het effect van de stijfheid van het isolatie materiaal op de ring berekeningen (=doorsnede berekeningen).

De berekeningen zijn gemaakt met het door Deltares ontwikkelde Eindige Elementen Methode model Pluto. De beide buizen zijn gemodelleerd met gekromde buigliggers. Het isolatie materiaal is gemodelleerd met 4-hoeks volume elementen. De overgang tussen de buigligger elementen en de volume elementen is gemaakt met zogenaamde interface elementen. De berekeningen zijn lineair elastisch. Wegens de onzekerheid over het belastingsniveau en over het plastische gedrag zijn de berekeningen lineair elastisch.

In deze paragraaf zijn alleen de effecten van de horizontale gronddruk beschreven. Een inwendige druk en een verticale grondbelasting zijn niet in de berekeningen meegenomen.



*Figuur 3-11 Voorbeeld mesh Eindige Elementen Methode*

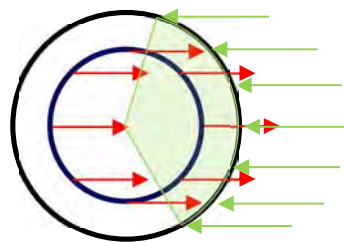
### 3.4.2 Mechanica model

Een belangrijke belasting treedt op voorbij een bocht (locatie 3 in Figuur 3-8). De uitzetting door de temperatuursverhoging zorgt dat de leiding voorbij de bocht horizontaal tegen de grond wordt gedrukt, zoals weergegeven in Figuur 3-12.



Figuur 3-12 Schematisch model leiding verplaatsing locatie 3

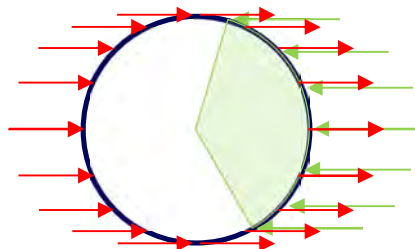
Nabij locatie 3 wordt de leiding horizontaal weggedrukt door de kracht op de binnenbuis. De verplaatsing wordt tegengewerkt door een horizontale grondreactie. Gebruikelijk is om een opleghoek van  $\gamma=120^\circ$  aan te houden, zoals weergegeven in onderstaande Figuur 3-13.



Figuur 3-13 Mechanisch model ring berekening leiding kracht en grondreactie kracht verplaatsing

De grootte van de aandrijvende belasting, weergegeven met de groene pijlen in Figuur 3-13, kan volgen uit een PLE berekening. Met een PLE berekening kan alleen de enkelwandige buis gemodelleerd worden. De kracht van de rode pijlen volgt dan uit de dwarskracht per lengte eenheid.

Gebruikelijk is om de ringdoorsnede te berekenen met het model volgens Figuur 3-14.

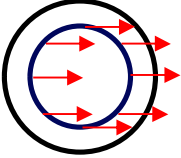


Figuur 3-14 Traditioneel mechanisch model ring berekening leiding kracht en grondreactie kracht verplaatsing

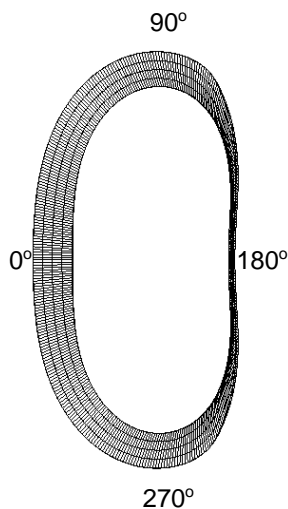
### 3.4.3 Berekeningsresultaten locatie 3

De berekeningsresultaten zijn weergegeven in de onderstaande Tabel 3-6. Er is tevens een berekeningsresultaat toegevoegd voor een enkele stalen leiding ( om te vergelijken). Voor de belasting wordt een eenheidsbelasting van 1 kN(/m) gebruikt. Omdat de berekeningen lineair elastisch zijn, is het mogelijk om andere belastingen te schalen.

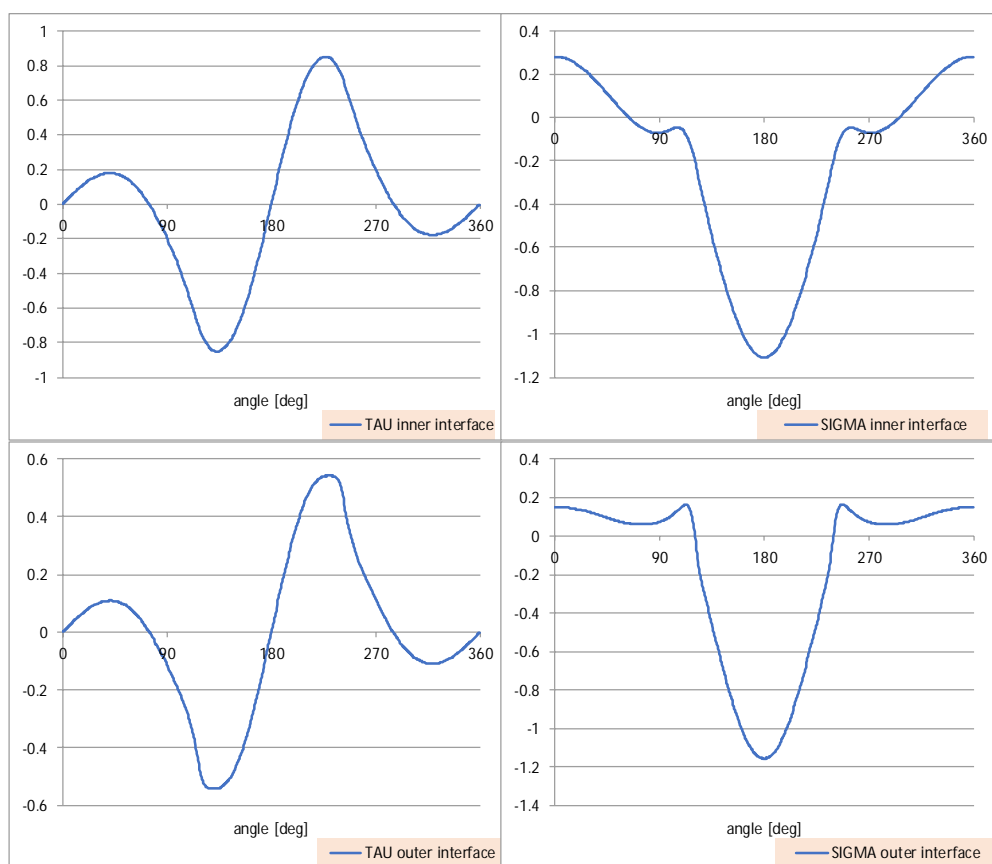
Tabel 3-6 Resultaten ringberekening voor eenheidsbelasting

berekening	resultaat			
	buigend moment binnenbuis/ staal	buigend moment buitenbuis/ PE	afschuif kracht interface/ PUR	normaal kracht interface/ PUR
	$M_{bin.buis; extr}$ [kNm /m]	$M_{buit.buis; extr}$ [kNm /m]	$\tau// buis; extr$ [kN/m /m]	$\sigma_{normaal buis; extr}$ [kN/m /m]
EEM berekening Eenheidsbelasting 1 kN gelijkmatig verdeeld over omtrek binnenring Dwarscontractie coëfficiënt staal gelijk aan 0 gekozen wegens beperkte lengte langs leiding as van de belasting.				
DN 300 traditioneel; enkele buis $\gamma=120^\circ$	0.0131786	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
DN 300 warmteleiding $\gamma=120^\circ$	0.0101126	0.000049055	1.4286	2.58145
DN 700 traditioneel; enkele buis $\gamma=120^\circ$	0.0291092	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
DN 700 warmteleiding $\gamma=120^\circ$	0.021345	0.000070738	0.849904	1.15801

Voor het inzicht zijn in de onderstaande figuren de vervormde mesh en de spanning in de interfaces voor de berekening "DN 700 warmteleiding  $\gamma=120^\circ$ " getekend.



Figuur 3-15 Mesh met opgeschaalde vervormingen "DN 700 warmteleiding  $\gamma=120^\circ$ "

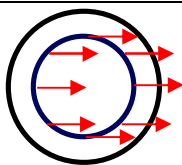


Figuur 3-16 Schuifspanning (links) en normaalspanning (rechts) in PUR interface langs binnen (boven) en buiten buis (onder) "DN 700 warmteleiding  $\gamma=120^\circ$ ", bij eenheidsbelasting, dimensie spanning [kPa]

Als de verplaatsing groot is zal de laterale plastische kracht gemobiliseerd zijn. Deze kracht is voor de leidingen DN300 en DN700 resp. 40,72 kN/m en 75,74 kN/m (zie Tabel 3-1). Vermenigvuldigen van deze waarden met de eenheidswaarden van Tabel 3-6 geeft de maximale waarden voor de relatief slappe kleigrond (zie Tabel 3-7 2e blok). In dit geval geeft slappe grond een optimistisch berekeningsresultaat omdat de plastische krachten relatief laag zijn. Als de bocht in zand is aangelegd is het resultaat dus minder gunstig. Een leiding in

kleigrond waarbij voor de bocht een grondverbetering met zand is aangebracht is dus ongunstig.

Tabel 3-7 Resultaten ringberekening locatie 3

EEM berekening						
laterale belasting $Q_{lat; plas}$		eenheid	DN 300 traditioneel enkele buis $\gamma=120^\circ$	DN 300 warmte- leiding $\gamma=120^\circ$	DN 700 traditioneel enkele buis $\gamma=120^\circ$	DN 700 warmte- leiding $\gamma=120^\circ$
$Q_{lat; plas}$	laterale belasting	[kN/m]	40.72		75.74	
$W_{binnen}$	weerst. mom. binnenbuis	[m <sup>3</sup> /m]	0.0000523		0.00001067	
$W_{binnen}$	weerst. mom. buitenbuis	[m <sup>3</sup> /m]	0.00000451		0.00001262	
$M_{binnen; extr}$	buig. mom. binnenbuis	[kNm/m]	0.536633	0.411785	2.204731	1.616670
$M_{buiten; extr}$	buig. mom. buitenbuis	[kNm/m]		0.001998		0.005358
$\tau_{// buis; extr}$	afschuifsp. interf/PUR	[kN/m/m]		58.172592		64.371729
$\sigma_{PUR extr}$	normaalsp. interf/PUR	[kN/m/m]		105.116644		87.707677
$\sigma_{binnen; extr}$	spanning. binnenbuis	[kPa]	102672	78785	206694	151563
$\sigma_{buiten; extr}$	spanning. buitenbuis	[kPa]	0	443	0	425
UC $\tau_{// buis; extr}$		[-]		● 0.485		● 0.536
UC $\sigma_{PUR extr}$		[-]		● 0.701		● 0.585
UC $\sigma_{binnen; extr}$		[-]	● 0.289	● 0.222	● 0.582	● 0.427
UC $\sigma_{buiten; extr}$		[-]		● 0.055		● 0.053
UC Unity Check ● voldoet ● voldoet niet						

De toetsing is uitgevoerd als Unity Check. De toetsing voldoet, zie laatste blok van Tabel 3-7.

# A Boorvloeistof CeBo

De eigenschappen van de boorvloeistof zijn vastgelegd in een aantal e-mails. Hieronder zijn de relevante gedeelten daarvan opgenomen ter vastlegging en onderbouwing van de gekozen waarden.

Interne E-mail Deltares 9 feb 2021, citaat

Overigens voor de axiale veer meldt CEBO een cohesie van 5 kPa voor de drillgrout en een adhesie aan PE van 0,6 kPa. Dat is na opstijven in de eind toestand. Mogelijk nemen de waarden nog toe in de tijd. Bij het intrekken is de cohesie/zwichtspanning 23-30 lb/100 ft2. Dat is 12-15 Pa.

E-mail CeBo 1 maart 2021, citaat

Ik heb vanmorgen de bak met DG los gehaald, de plastic folie heeft goed gewerkt en alles zit goed los van het hout. Alleen zijn we tegen het volgende probleem aan gelopen, is dat de buis echt hermetisch vast zat en wij met ons trek unster en de kracht van een sterke medewerker de buis niet in beweging konden krijgen. Ik ben begonnen om in de bak van 100 cm elke keer een 25 cm DG weg te halen en dan iedere keer geprobeerd om de buis los te trekken. Pas bij het restant van 25 cm DG nog vast om de leiding kregen we met het trek unster en 20 - 25 kg de buis los, en trokken met een  $\pm 5$  kg de buis verder uit de bak. Zo je dit doorrekenen op de lengte van de bak en buis zal er meer dan  $> 100$  kg nodig zijn geweest om de buis los te trekken. Voor deze grote trek krachten hebben wij niet de juiste apparatuur. Het mooiste zou zijn een trek unster van bijvoorbeeld  $> 250$  kg en een ketting ratel, die we kunnen monteren op een frame tegen de bak aan, maar dan moeten we ook een metalen buis gaan nemen.

Uitwerking Deltares

L	0.25	[m]
Do	0.07	[m]
Fpull_init	22.5	[kg]
Fpull_re moulded	5	[kg]
Fpull_init	0.225	[kN]
Fpull_re moulded	0.05	[kN]
$A=L*Do*pi$	0.054978	[m <sup>2</sup> ]
$Tau/a\ init=F/A$	4.092556	[kPa]
$Tau/a\ re moulded=F/A$	0.909457	[kPa]

## B Invloed grondsoort op gewelfwerking en schuifweerstand

In het algemeen is zandgrond gunstiger dan klei. Voor het intrekken van de leiding kan het zijn dat zandgrond juist minder gunstig is omdat de gewelf werking minder is. Daarom staan in deze bijlage enkele berekeningen naar de grondschuifkracht bij aanleg voor verschillende grondsoorten en steundrukken.

De parameters voor de ondergrond zijn conform Tabel 2-2 en Tabel 2-4, aangevuld met extra grondsoorten zoals weergegeven in de onderstaande Tabel .

Tabel B-1 Grondparameters

parameter	omschrijving	eenheid	1	2	3
			klei	veen	zand, matig
$\gamma'_{gem}$	gemiddeld effectieve vol. gewicht	[kN/m <sup>3</sup> ]	5	3	10
$f_2$	wrijving boorvloeistof/leiding	[-]	0,015	0,015	0,015
$f_3$	wrijvingsfactor grond/leiding met smering	[kPa]	0,2	0,2	0,2
$c$	cohesie	[kPa]	5	1	0
$\varphi$	hoek van inwendige wrijving	[deg]	17,5	15	32,5
$K_0$	neutrale hor. korrelspanningscoëf.	[-]	0,70	0,74	0,46

Voor de krachten in de leiding tijdens het intrekken is naast de lengte van de leiding ook de grondweerstand per meter leidinglengte (Tabel 3-1 kolom axiaal  $Q_{plas}$ ) in [kN/m] van belang. Om te anticiperen op verschillende grondsoorten zijn de berekeningen gemaakt voor verschillende overdrukken in de boorvloeistof (zie Tabel 2-4 "p" "boorvloeistof overdruk" "[kPa]"). De overige parameters van de boorvloeistof zijn conform Tabel 2-4. Berekeningsresultaten die zijn opgenomen in Tabel 3-1 zijn weergegeven met een grijze achtergrond.

Tabel B-2 Schuifweerstand leiding bij aanleg

<ul style="list-style-type: none"> <li>• fase: aanleg</li> <li>• dekking: 3 [m]</li> <li>• aanleg met lubricant</li> <li>• aanleg met overcut van 0,02 [m]</li> </ul>				
buistype	grondsoort	$Q_{plas}$ ; axiaal [kN/m]		
		boorvloeistof overdruk p=2 kPa	boorvloeistof overdruk p=10 kPa	boorvloeistof overdruk p=25 kPa
DN300	klei	0,26	0,26	0,26
	veen	0,26	0,26	0,26
	zand, matig	1,66	0,26	0,26
DN700	klei	1,08	1,08	1,08
	veen	1,08	1,08	1,08
	zand	4,79	1,78	1,32



<ul style="list-style-type: none"> <li>• fase: aanleg</li> <li>• dekking: 3 [m]</li> <li>• aanleg met lubricant</li> <li>• aanleg met overcut van 0,02 [m]</li> </ul>							
buistype	grondsoort	boorvloeistof overdruk p=2 kPa		boorvloeistof overdruk p=10 kPa		boorvloeistof overdruk p=25 kPa	
		$\sigma_{z,top}$ [kPa]	$Q_{plas; axiaal}$ [kN/m]	$\sigma_{z,top}$ [kPa]	$Q_{plas; axiaal}$ [kN/m]	$\sigma_{z,top}$ [kPa]	$Q_{plas; axiaal}$ [kN/m]
DN300	klei	0	0,26	0	0,26	0	0,26
	veen	1,36	0,26	1,36	0,26	1,36	0,26
	zand, matig	11,6	1,66	11,6	0,26	11,6	0,26
DN700	klei	0	1,08	0	1,08	0	1,08
	veen	4,20	1,08	4,20	1,08	4,20	1,08
	zand matig	17,73	4,88	17,73	1,88	11,73	1,08

Het blijkt duidelijk dat het balanceren van de boorvloeistofdruk met de verticale gronddruk de gewelfwerking verzekerd en daarmee de axiale plastische grondreactiekracht reduceert. Daarmee wordt de intrekkracht beperkt.

Opmerkingen:

- In de berekeningen is geen rekening gehouden met een mogelijke blowout.
- In de berekeningen is geen rekening gehouden met verhoogde sterkte door kortdurende belasting.

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](http://www.deltares.nl)



## D Pipeline in operation



Rapportage

## **Ondiepe aanleg van geboorde warmteleidingen**

**Sterktetechnische toetsing conform NEN3650 en EN13941**

Opdrachtgever: Deltares  
Project: E-Power methode  
Kenmerk: RE20100-R01  
Revisie: 0.3

Auteur(s): Dr. ir. M. den Burger

Datum: 9 april 2021

<b>Revisie</b>	<b>Datum</b>	<b>Beschrijving</b>	<b>Opgesteld</b>	<b>Gecontroleerd</b>
0.1	04-03-2021	Concept	M. den Burger	
0.2	10-03-2021	Opmerkingen Deltares	M. den Burger	
0.3	09-04-2021	Aanvullingen na presentatie	M. den Burger	

Handtekening

Handtekening

\_\_\_\_\_

© Copyright Rotterdam Engineering

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie of op welke andere wijze ook zonder uitdrukkelijke toestemming van de uitgever.

## Inhoudsopgave

<b>1. Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1. Project beschrijving	4
1.2. Doel en scope van de berekening	4
1.3. Leeswijzer	4
<b>2. Uitgangspunten</b>	<b>5</b>
2.1. Normen en standaarden	5
2.2. Beschouwd Model	6
2.3. Materiaalgegevens	7
2.4. Interactie leiding en grond	9
2.5. Belastingen	11
<b>3. Toetsing leidingontwerp volgens EN13941 en NEN3650</b>	<b>13</b>
3.1. Berekeningsmethode	13
3.2. Limit states volgens EN13941	14
3.3. Belastingcases volgens de NEN3650	25
<b>4. Bespreking resultaten</b>	<b>32</b>
4.1. De leiding verankert niet in de boring	33
4.2. De leiding verankert wel in de boring	34
<b>5. Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>36</b>

# 1. Inleiding

## 1.1. Project beschrijving

Voor de projectbeschrijving wordt verwezen naar het rapport van Deltares: Optimale ondiepe geboorde aanleg van warmteleidingen, Leiding grond interactie.

## 1.2. Doel en scope van de berekening

Deze rapportage betreft de sterkteteknische toetsing van de maatgevende locaties in het beschouwde ontwerp.

## 1.3. Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de uitgangspunten en randvoorwaarden voor de sterkteberekening gepresenteerd. Hierin worden zowel de uitgangspunten omtrent materiaal besproken als alle belastingen die van toepassing zijn op het leidingsysteem. Hoofdstuk 3 beschrijft ten eerste de berekeningsmethode en presenteert vervolgens de relevante resultaten getoetst aan de vigerende normen. Ten slotte wordt er in Hoofdstuk 4 een conclusie gegeven en worden eventuele randvoorwaarden gesteld waaraan dient te worden voldaan.



## 2. Uitgangspunten

### 2.1. Normen en standaarden

Voor ondergrondse warmteleidingen in openbaar gebied kunnen 2 ontwerpnormen van toepassing zijn:

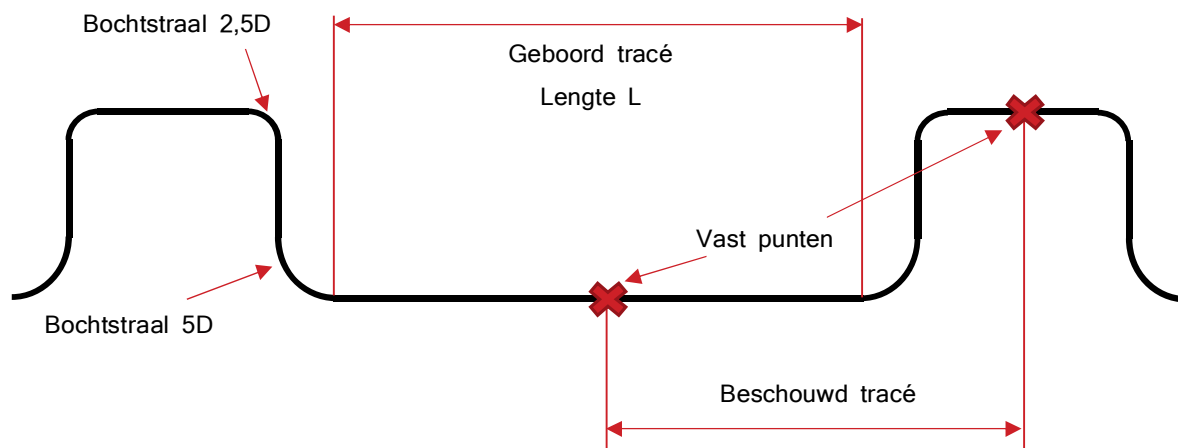
- NEN3650:2020
- EN13941:2019

De NEN3650 serie is de Nederlandse norm van toepassing voor ondergrondse transportleidingen, waaronder warmteleiding ook kunnen vallen. De EN13941 is de Europese norm specifiek van toepassing voor warmteleidingen.

Wat betreft spanningen toetst de NEN3650 met name op een toelaatbaar spanningstraject, waar de EN13941 zich meer richt op toelaatbare spanningswisselingen. De belastingcases uit de NEN3650, of limit states uit de EN13941, vullen elkaar veelal aan. Vandaar dat de van toepassing zijnde belastingcases/ limit states uit beide normen worden beschouwd.

## 2.2. Beschouwd Model

Het standaard ontwerp dat zal worden beschouwd is een boring (via E-Power methode) met een totale lengte  $L$ , met aan weerszijden een expansielus.



*Figuur 2.1: Schematische weergave van het rekenmodel*

De expansielussen hebben een afmeting van 10 m x 10 m. Dit is voor zowel de DN300/450 als DN700/900 leiding groot genoeg om effectief te functioneren als expansielus, waardoor er geen secundaire verschijnselen een rol gaan spelen. Voor de bochten grenzend aan de boring is gekozen voor een bochtstraal van  $5D$  en voor de boven bochten in de lus voor  $2,5D$ .

Vanwege de symmetrie is in het rekenmodel het ontwerp opgenomen vanaf het midden van de boring tot het midden van de expansielus. Voor beide grenzen is een vast punt verondersteld (verplaatsingsnulpunt). Conform het rapport van Deltares wordt zowel een korte als een lange boring beschouwd.

*Tabel 2.1: Leidinglengte*

Gegevens	Eenheid	Kort	Lang
Totale lengte boring ( $L$ )	m	200	1000
Lengte in rekenmodel ( $L/2$ )	m	100	500

Naast de beschouwingen van de boring wordt ook de referentie case beschouwd (zie rapport Deltares) waarbij wordt uitgegaan van de aanleg in open sleuf in plaats van via een boring.

## 2.3. Materiaalgegevens

### 2.3.1. Staalkwaliteit

In Tabel 2.2 worden de materiaaleigenschappen van de mediumvoerende stalen leiding gegeven zoals in het leidingtracé wordt toegepast.

Tabel 2.2: Eigenschappen van toegepaste materialen

Gegevens		Waarde	Eenheid
Categorie Staal		P355NH	-
Type		EW	-
Norm		EN10217-3	-
Elasticiteitsmodulus bij 120°C	E	210.000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson coëfficiënt	$\nu$	0,30	-
Dichtheid staal	$\rho_{\text{staal}}$	7850	kg/m <sup>3</sup>
Vloegrens bij +10°C	R <sub>e</sub>	355	N/mm <sup>2</sup>
Vloegrens bij +120°C <sup>1</sup>	R <sub>eθ</sub>	296	N/mm <sup>2</sup>
Uitzettingcoëfficiënt +120°C <sup>2</sup>	$\alpha$	1,23 x 10 <sup>-5</sup>	(mm/mm) K <sup>-1</sup>

### 2.3.2. Specificaties line pipe

Er wordt zowel een DN300/450 als een DN700/900 VPS leiding beschouwd. In Tabel 2.3 zijn de relevante materiaaleigenschappen weergegeven zoals wordt toegepast.

Tabel 2.3: Materiaalgegevens bestaande line-pipe

Gegevens		Waarde	Waarde	Eenheid
Kwaliteit staal	-	P355NH	P355NH	-
Type leiding	DN	300	700	-
Uitwendige diameter	D <sub>u</sub>	323,9	711,0	mm
Wanddikte leiding	t <sub>staal</sub>	5,6	8,0	mm
Negatieve fabricage tolerantie <sup>(1)</sup>	-	0	0	%
Diameter PE mantelbuis	D <sub>PE</sub>	450	900	mm
Wanddikte PE	t <sub>PE</sub>	5,2	8,7	mm
Dichtheid PE	$\rho_{\text{PE}}$	950	950	kg/m <sup>3</sup>

<sup>(1)</sup>Vooralsnog wordt de fabricage tolerantie achterwege gelaten

### 2.3.3. Specificaties bochten

In Tabel 2.4 zijn de relevante materiaaleigenschappen weergegeven van de toegepaste bochten.

Tabel 2.4: Materiaalgegevens bochten staal-PUR-PE

Gegevens		Waarde	Waarde	Eenheid
Kwaliteit staal	-	P355NH	P355NH	-
Type leiding	DN	300	700	-
Uitwendige diameter	$D_u$	323,9	711,0	mm
Bochtstraal 2,5xD	$R_{2,5D}$	810	1778	mm
Bochtstraal 5xD	$R_{5D}$	1620	3555	mm
Minimale wanddikte	$t_{2,5D}$	5,6	8,0	mm
Minimale wanddikte	$t_{5D}$	5,6	8,0	mm

### 2.3.4. Isolatiemateriaal

De mediumvoerende buizen zijn voorzien van een PE buitenmantel. De ruimte tussen de buitenmantel en de mediumvoerende buis is opgevuld met polyurethaanschuim (PUR), gebaseerd op de norm EN 253. In Tabel 2.5 zijn de specificaties van het toegepaste PUR gegeven. De toetsing van de PUR-spanning is terug te vinden in Hoofdstuk 3.

Tabel 2.5: Specificaties van toegepaste PUR

Gegevens		Waarde	Eenheid
Dichtheid PUR	$\rho_{PUR}$	60	kg/m <sup>3</sup>
Gegarandeerde lange duur PUR-drukspanning <sup>3</sup>	$\sigma_{PUR}$	0,28	N/mm <sup>2</sup>
Gegarandeerde lange duur HD-PUR-drukspanning	$\sigma_{HDPUR}$	0,50	N/mm <sup>2</sup>
Gegarandeerde PUR-schuifspanning	$\tau_{PUR}$	0,08	N/mm <sup>2</sup>

<sup>3</sup> De gegarandeerde lange duur drukspanning van het PUR conform de EN13941-1 bedraagt 0,15 N/mm<sup>2</sup>. 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.

### 2.3.5. Expansiekussens

Vooralsnog worden er geen expansiekussens toegepast. Worden deze in het vervolg wel toegepast dan voldoen ze aan de specificaties conform Tabel 2.6.

*Tabel 2.6: Specificaties van toegepaste expansiekussens*

Gegevens	Waarde
Dikte	40 mm
Maximaal aantal lagen	3 (120 mm)
Structuur	Gesloten cel structuur
Drukspanning bij 25%	45 kPa
Drukspanning bij 50%	110 kPa

Om de levensduur van de kussens te garanderen is de maximale drukspanning 200 kPa conform de EN13941-1. Het kussenpakket bestaat uit maximaal 3 lagen met elk een dikte van 40 mm, om warmteophoping te voorkomen.

## 2.4. Interactie leiding en grond

### 2.4.1. Grondsoort

Er wordt aangenomen dat de leidingen in klei worden aangelegd. Voor de grondparameters wordt verwezen naar het rapport van Deltares.

### 2.4.2. Grondmechanische eigenschappen

De grondmechanische eigenschappen staan gegeven in Tabel 3.1 uit het rapport van Deltares. Voor de berekeningen met het software pakket PLE4Win dienen deze parameters vertaald te worden naar parameters (grondveren) werkend op de stalen leiding.

In Tabel 2.7 worden de grondparameters gegeven voor de DN300/450 leiding voor de aanleg fase, de eind fase en de referentiefase (aanleg in open sleuf). In Tabel 2.8 worden de grondparameters gegeven voor de DN700/900 leiding.

In de berekeningen worden de partiele factoren voor de grondparameters gebruikt conform de NEN3650-1. Alleen voor de wrijving tijdens de aanleg en eindfase wordt de

gemiddelde wrijving gebruikt zoals berekend door Deltares omdat het hier voornamelijk gaat om de wrijving van de leiding met bentoniet of drill grout.

Tabel 2.7: Grondparameters werkend op de stalen leiding DN300/450

Grondparameter	Aanleg	Eind	Ref	Eenheid
Neutrale grondbelasting	0,0281	0,0281	0,0281	N/mm <sup>2</sup>
Gereduceerde maximale passieve grondreactie boven buis	0,1289	0,1289	0,1289	N/mm <sup>2</sup>
Verticaal evenwichtsdraagvermogen	0,2119	0,2119	0,2119	N/mm <sup>2</sup>
Verticale beddingconstante omhoog	0,0027	0,0027	0,0029	N/mm <sup>3</sup>
Verticale beddingconstante omlaag	0,0026	0,0026	0,0047	N/mm <sup>3</sup>
Horizontaal evenwichtsdraagvermogen	0,1257	0,1257	0,1257	N/mm <sup>2</sup>
Horizontale beddingconstante	0,0026	0,0026	0,0045	N/mm <sup>3</sup>
Maximale wrijving	0,00026	0,00084	0,00753	N/mm <sup>2</sup>
Verplaatsing bij maximale wrijving	1,3	1,2	8	mm

Tabel 2.8: Grondparameters werkend op de stalen leiding DN700/900

Grondparameter	Aanleg	Eind	Ref	Eenheid
Neutrale grondbelasting	0,0259	0,0259	0,0259	N/mm <sup>2</sup>
Gereduceerde maximale passieve grondreactie boven buis	0,0775	0,0775	0,0775	N/mm <sup>2</sup>
Verticaal evenwichtsdraagvermogen	0,2106	0,2106	0,2106	N/mm <sup>2</sup>
Verticale beddingconstante omhoog	0,0008	0,0008	0,0009	N/mm <sup>3</sup>
Verticale beddingconstante omlaag	0,0016	0,0016	0,0023	N/mm <sup>3</sup>
Horizontaal evenwichtsdraagvermogen	0,1065	0,1065	0,1065	N/mm <sup>2</sup>
Horizontale beddingconstante	0,0014	0,0014	0,0019	N/mm <sup>3</sup>
Maximale wrijving	0,00048	0,00076	0,0071	N/mm <sup>2</sup>
Verplaatsing bij maximale wrijving	1,7	1,2	8	mm

### 2.4.3. Ondersteuningshoek

Voor de minimale ondersteuningshoek van de leiding is uitgegaan van  $\beta = 70^\circ$  conform de NEN3650-1. Deze ondersteuningshoek is voor staal-PUR-PE geprojecteerd op de mediumvoerende stalen buis wat tot grotere waarden leidt. De minimale waarde die hiervoor wordt aangehouden in de berekeningen is  $\beta = 90^\circ$ .

#### 2.4.4. Horizontale steundruk

Horizontale steundruk mag worden toegepast voor drukloze leidingen volgens paragraaf C.4.2.5 van NEN3650-1. In de berekeningen is geen horizontale steundruk toegepast.

### 2.5. Belastingen

#### 2.5.1. Ontwerpdruk

De ontwerpdruk van de warmteleidingen bedraagt 25 bar(g). Vooralsnog worden er geen belastingfactoren in rekening gebracht om de resultaten direct te kunnen vergelijken.

Belastingfactor = 1 (in berekeningen)

Belastingfactor = 1,15 (NEN3650-2)

#### 2.5.2. Temperatuur

In de berekeningen wordt een temperatuurtraject van 110°C meegenomen, uitgaande van:

- Aanlegtemperatuur = 10°C
- Maximale bedrijfstemperatuur = 120°C

Belastingfactor = 1 (in berekeningen)

Belastingfactor = 1,1 (NEN3650-2)

#### 2.5.3. Eigengewicht

Bij de bepaling van het eigengewicht zijn de volgende componenten verdisconteerd: stalen leiding, PUR-PE mantel en medium (water) en er is rekening gehouden met de grondwaterstand (GWS).

Belastingfactor = 1 (in berekeningen)

Belastingfactor = 1,1 (NEN3650-2)

#### **2.5.4. Bovenbelasting grond**

Afhankelijk van de omstandigheden na aanleg wordt de bovenbelasting van de grond gemodelleerd als neutrale of reële grondbelasting. De reële grondbelasting is de verticale belasting die voortkomt uit klink van de sleufaanvulling en kan optreden bij in sleuf aangelegde leidingen in de eerste 1 á 2 jaar na aanleg.

Voor de geboorde leiding is dit niet van toepassing en wordt er gerekend met de neutrale grondbelasting. Voor de neutrale grondbelasting

Belastingfactor = 1,1 (NEN3650-2)

#### **2.5.5. Verkeersbelasting**

Verkeersbelasting wordt niet meegenomen in de berekeningen.

#### **2.5.6. Uitvoeringszakking**

Uitvoeringszakkingen worden niet meegenomen in de berekeningen.

#### **2.5.7. Zettingen**

Zettingen worden niet meegenomen in de berekeningen.



## 3. Toetsing leidingontwerp volgens EN13941 en NEN3650

### 3.1. Berekeningsmethode

De leidingsterkteberekeningen voor de leidingen zijn uitgevoerd met het computerprogramma PLE4Win versie 4.4.2. Voor het modelleren van de leidingconfiguratie is gebruik gemaakt van idents.

#### PLE opties

Volgende PLE model-instellingen werden gehanteerd bij alle berekeningen:

- |                               |            |
|-------------------------------|------------|
| - Bend Angle:                 | Limited    |
| - Geometry Model:             | Non-linear |
| - Section Model:              | Ovalising  |
| - Material Model:             | Linear     |
| - Soil Ring-Stiffening:       | Ignore     |
| - Soil Model:                 | Standard   |
| - Ovalisation Redistribution: | Allowed    |
| - Loading Redistribution:     | Apply      |

#### PLE invoerdata

De PLE invoergegevens, zoals deze zijn opgenomen in de betreffende bijlagen voor de gemaakte berekeningen, bestaan uit de volgende onderdelen:

- de leidingconfiguratie;
- het materiaal en de dimensies van de leiding;
- het grondmodel met grond-mechanische leidingparameters;
- de randvoorwaarden voor het berekeningsmodel;
- de belastingen op de leiding en de belastingfactoren.

#### PLE uitvoerdata

De PLE uitvoerresultaten bestaan uit de volgende onderdelen:

- de leidingconfiguratie;
- plot en/of maximale waarden van:
  - o axiale en laterale verplaatsingen (U-AX,U-LAT)
  - o zettingen en verticale verplaatsingen (SETLZ•F, UZ)
  - o grondreactiekrachten (R-LAT)
  - o krachten en momenten (F-AX,F-LAT,M-BEN)
  - o spanningen in axiale en tangentiële richting (SXHT-M, SFHT-M)
  - o vervormingen (W+WD/D-M)

Voor het bepalen van spanningen en vervormingen zijn de belastingcases, c.q. limit states, conform de EN13941 en NEN3650 van toepassing. Niet alle belastingcases zullen worden bekeken, maar alleen die belastingcases die speciale aandacht vragen in combinatie met de E-power aanlegmethode.

## 3.2. Limit states volgens EN13941

De limit states volgens de EN13941 die worden beschouwd zijn:

- Limit State A.2
- Limit State B.1
- Limit State C.1
- Limit State C.2

In onderstaande paragrafen worden deze nader toegelicht.

### 3.2.1. Limit state A.2 Stapsgewijs plastisch bezwijken (Ratcheting)

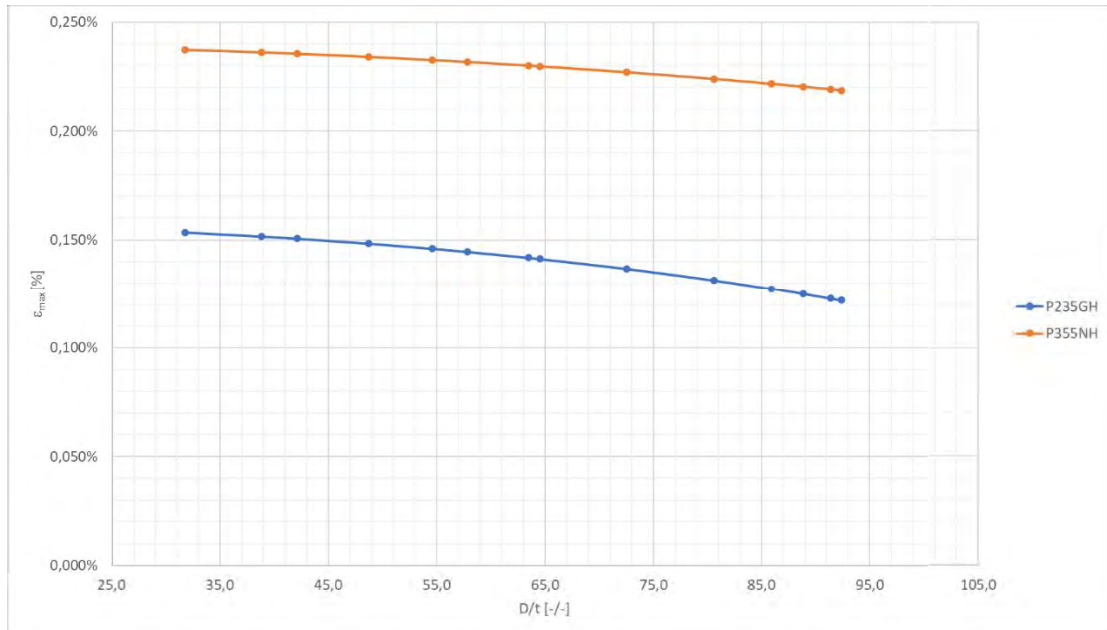
Hierbij wordt getoetst of er in de leiding voortschrijdende plastische vervormingen optreden bij elke belastingwisseling, die kunnen leiden tot overmatige vervorming of zelfs breuk. Dit kan al optreden bij een beperkt aantal wisselingen.

Limit state A.2 is met name van belang voor verankerde leidingdelen met in omtreksrichting een hoge membraanspanning uit inwendige druk en in langsrichting een hoge axiaal drukspanning t.g.v. verhinderde expansie. De limit state toetst hierbij aan een maximaal toelaatbare rek (of toelaatbare  $\Delta T$ ).

De EN13941 geeft aan dat stapsgewijs plastisch bezwijken alleen kan worden veroorzaakt door hoge inwendige druk en bij grote leidingdiameters ( $>DN300$ ). Voor het bepalen van de grenswaarde is uitgegaan van een inwendige druk van 25 barg.

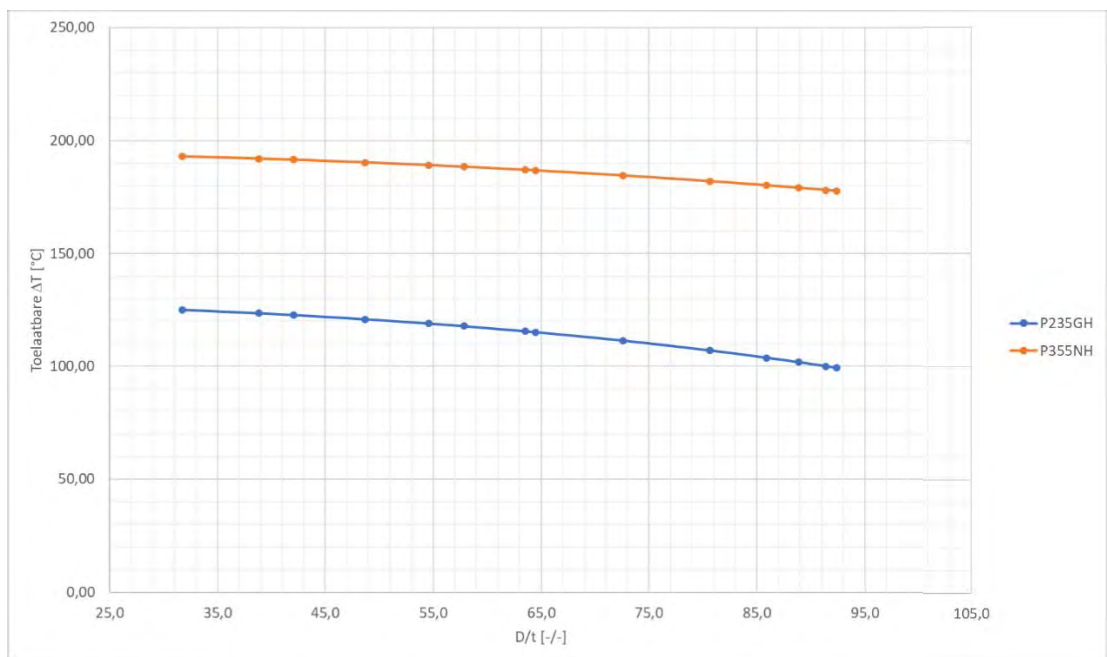
In Figuur 3.1 wordt de maximaal toelaatbare rek conform Limit state A.2 gegeven. De EN13941 is specifiek van toepassing voor P235GH (blauwe lijn) maar de formule uit de EN13941 is ook geldig voor overige materialen zoals P355NH (oranje lijn).

Het is duidelijk dat het risico op stapsgewijs plastisch bezwijken aanzienlijk gereduceerd kan worden door P355NH toe te passen in plaats van P235GH.



Figuur 3.1: Max toelaatbare rek conform EN13941 m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken

De toelaatbare rek met betrekking tot stapsgewijs plastisch bezwijken kan ook vertaald worden naar een toelaatbaar temperatuurtraject. Dit is te zien in Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Max toelaatbaar temperatuurtraject m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken

Waar voor P235GH het toelaatbare temperatuurtraject tussen de ca. 100°C en 125°C ligt, ligt dit voor P355NH altijd boven de 175°C.

Tabel 3.1 geeft de toelaatbare temperatuurtrajecten voor de DN300/450 en DN700/900 leiding voor zowel P235GH als P355NH.

Tabel 3.1: Toelaatbare temperatuurtraject m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken

Do	t	r <sub>m</sub> /t	D/t	$\Delta T_{\max}$	$\Delta T_{\max}$
				P235GH [°C]	P355NH [°C]
323,9	5,6	28,4	57,8	117,6	188,4
711	8	43,9	88,9	101,6	179,1

Voor de DN300/450 leiding (en P235GH) is een temperatuurtraject van 110°C, zoals beschouwd in dit rapport, nog toelaatbaar maar een traject van 120°C net niet meer (theoretisch). Voor de DN700/900 leiding en P235GH is het temperatuurtraject beperkt tot net boven de 100°C.

### Berekeningsresultaten

Alle berekeningen (Eind) laten zien dat de leiding in de boorgang niet verankert vanwege de lage wrijving in de boorgang. Zelfs bij een boring van 1000 m (L/2 =500 m) verankert de leiding niet. Voor de boringen met lage wrijving wordt altijd voldaan aan Limit State A.2.

Voor de referentiecasse (aanleg in open sleuf, hogere wrijving) zijn de verankeringslengten gegeven in onderstaand tabel.

Tabel 3.2: Verankeringslengten voor de referentiecasse

Diameter	F-ax, max [N]	Maximale wrijving [N/mm]	Verankeringslengte <sup>1)</sup> [m]
DN300/450	1,45E+06	7,66	189
DN700/900	4,56E+06	15,86	288

Hieruit volgt dat een boring met een boorlengte van 1000 m (L/2 = 500 m) wel zal verankeren voor beide diameters en een boring met een lengte van 200 m (L/2 = 100 m) niet.

<sup>1)</sup> De hier berekende waarden kunnen iets afwijken van de gerapporteerde waarden uit het rapport van Deltares vanwege:

- Het meenemen van de inwendige druk in bovenstaande berekeningen.

- Voor de grondwrijving wordt ook het elastische deel van de wrijving meegenomen in de berekeningen en niet alleen het plastische deel.
- In bovenstaande berekeningen zal de stijfheid van het been in de expansielus ook enige invloed hebben.

Voor de situatie met hoge wrijving (referentiecasi) voldoen de korte boringen aan Limit State A.2. Uitgaande van P355NH als staalsoort voldoen ook de lange boringen aan Limit State A.2 voor zowel de DN300/450 leiding als de DN700/900 leiding.

Onderstaand tabel geeft een overzicht van de resultaten van de toetsing aan Limit State A.2.

Tabel 3.3: Overzicht toetsing Limit State A.2

Diameter	Fase	Limit State A.2	
		Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet <sup>2)</sup>
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet <sup>2)</sup>

<sup>2)</sup>Opmerking:

Indien het uitgangspunt P235GH zou zijn dan voldoet de DN700/900 leiding niet aan Limit State A.2. Voor de DN300/450 leiding ligt het net op de grens.

### 3.2.2. Limit state B.1, Low cycle fatigue (Force controlled-, Displacement controlled actions)

Hierbij wordt getoetst op vermoeiing. Het aantal belastingwisselingen in combinatie met de grootte van de spanningswisseling is van belang. De vraag is in hoeverre de E-power methode specifieke eisen stelt aan deze toets.

Het is wel interessant als we verschillende ontwerpen gaan bekijken. Bijvoorbeeld de situatie met expansieloop en de situatie waarbij de leiding in het verlengde door wordt gelegd (als lange doorgaande leiding). Maar dit zou ook gelden voor de aanleg in open ontgraving.

Voor het bepalen van de toelaatbare spanning in de leidingen met betrekking tot vermoeiing geldt:

- DN300/450 en DN700/900 zijn transportleidingen
- Aantal vollastwisselingen over 50 jaar
  - DN300/450 420
  - DN700/900 420
- Project classes
  - DN300/450 B
  - DN700/900 C
- Veiligheidsfactor voor vermoeiing
  - DN300/450 6,67
  - DN700/900 10

Toelaatbare spanning vermoeiing

$$S_v = \frac{5000}{\sqrt[4]{N_v}}$$

Dit geeft:

Tabel 3.4: Toelaatbare spanning m.b.t. vermoeiing

Diameter	Project Class	Veiligheidsfactor	$S_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]
DN300/450	B	6,67	687
DN700/900	C	10	621

### Berekeningsresultaten

De berekende verplaatsingen en spanningen die volgen uit de PLE berekeningen staan gegeven in onderstaande tabellen. Tabel 3.5 geeft de axiale verplaatsing en spanningen voor de korte boring ( $L/2 = 100$  m) en Tabel 3.6 de axiale verplaatsing en spanningen voor de lange boring ( $L/2 = 500$  m).

Tabel 3.5: Berekende verplaatsingen en spanningen voor  $L/2 = 100$  m

Diameter	Fase	Maximale axiale verplaatsing [mm] <sup>1)</sup>	Max berekende spanning [N/mm <sup>2</sup> ]	Toelaatbare spanning $S_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]
DN300/450	Eind	108	432	687
	Ref	87	417	687
DN700/900	Eind	111	468	621
	Ref	99	399	621

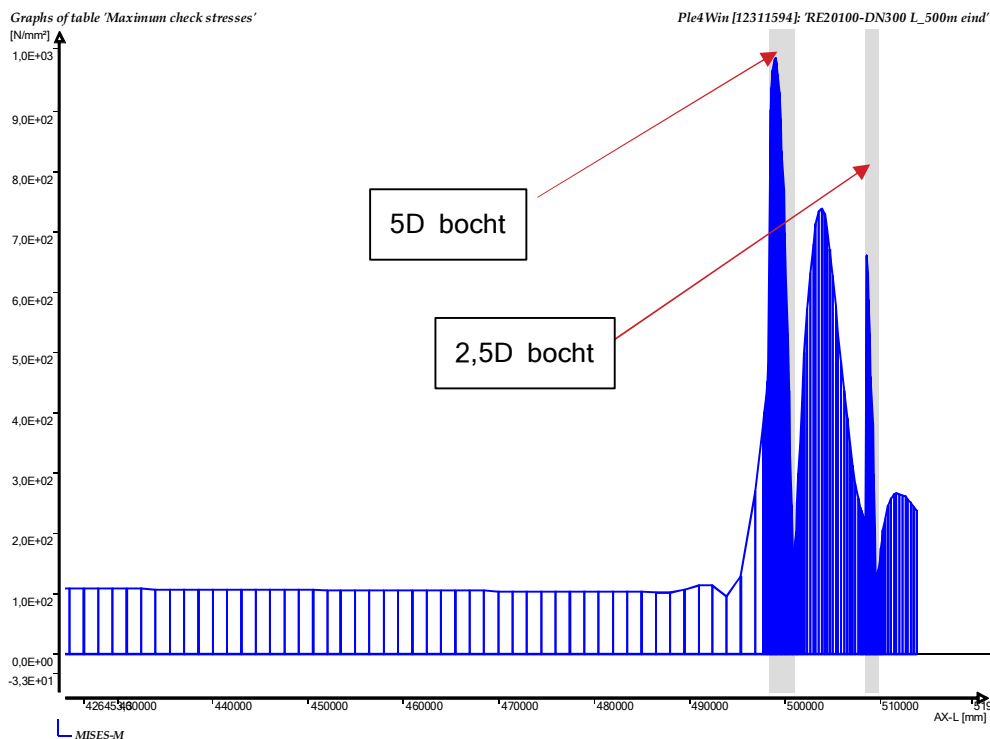
Tabel 3.6: Berekende verplaatsingen en spanningen voor  $L/2 = 500$  m

Diameter	Fase	Maximale axiale verplaatsing [mm] <sup>1)</sup>	Max berekende spanning [N/mm <sup>2</sup> ]	Toelaatbare spanning $S_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]
DN300/450	Eind	429	989	687
	Ref	97	452	687
DN700/900	Eind	477	1138	621
	Ref	203	645	621

<sup>1)</sup> De hier berekende waarden kunnen iets afwijken van de gerapporteerde waarden uit het rapport van Deltares vanwege:

- Het meenemen van de inwendige druk in bovenstaande berekeningen.
- Voor de grondwrijving wordt ook het elastische deel van de wrijving meegenomen in de berekeningen en niet alleen het plastische deel.
- In bovenstaande berekeningen zal de stijfheid van het been in de expansielus ook enige invloed hebben.

Onderstaand figuur geeft de berekende spanningen voor de DN300/450 leiding met een lengte  $L/2 = 500$  m.



Figuur 3.3: Berekende von Mises spanning voor de DN300/450 leiding met  $L/2 = 500$  m

De maximaal berekende spanning treedt op in de bochten. Bij een niet effectieve expansielus kan het echter ook net voor of na een bocht zijn.

In het figuur geven de grijze verticale vlakken de locaties van de 5D, resp. 2,5D bocht. De hoogste spanning treedt op in de 5D bocht die aansluit op de geboorde sectie. Tussen de 5D en de 2,5D bocht, in het expansiebeen, is ook een duidelijke piek te zien. Deze wordt veroorzaakt door de grote vervorming in het expansiebeen en daarmee hoge buigende momenten. Het toepassen van expansiekussen zou hier een oplossing kunnen zijn maar dat wordt buiten beschouwing gelaten.

Onderstaand tabel geeft een overzicht van de resultaten van de toetsing aan Limit State B.1.

Tabel 3.7: Overzicht toetsing Limit State B.1

Diameter	Fase	Limit State B.1	
		Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet niet

**Opmerking:**

De vermoeiingscurven die de EN13941 geeft zijn van toepassing voor P235GH. Deze verschilt echter niet van de curve voor P355NH. Het toepassen van P355NH maakt voor Limit State B.1 dan ook geen verschil ten opzichte van P235GH.

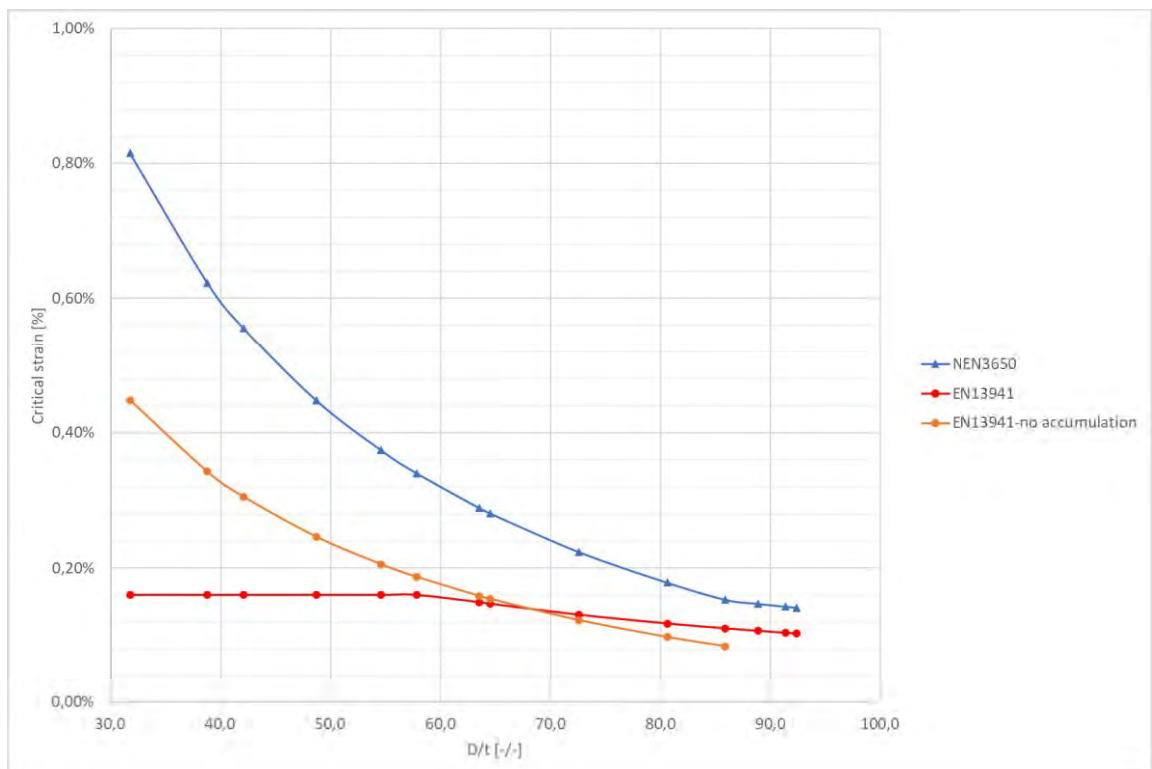
### 3.2.3. Limit state C.1, Local buckling

Limit state C.1 geeft de toetsing op lokale knik ofwel plooi door compressie. Dit wordt binnen de EN13941 getoetst aan de hand van een maximaal toelaatbare of kritische rek (critical strain). Net als bij Limit State A.2 kan local buckling een risico zijn voor leidingen die verankerd liggen.

Voor een leiding waarbij er geen risico is op lokale accumulatie van rekken of stapsgewijs plastisch vervormen (zie limit state A.2), is de toetswaarde conform de EN13941 gelijk aan de toetswaarde conform de NEN3650.



De EN13941 geeft hierbij wel de opmerking dat het gaat om spanningen vanuit buigende momenten (bijvoorbeeld door zettingen) terwijl de NEN3650 die beperking niet geeft. Bovendien hanteert de EN13941 een veel hogere veiligheidsfactor ten opzichte van de NEN3650; i.e. 2 in de EN13941 ten opzichte van 1,1 in de NEN3650. In Figuur 3.4. wordt de kritische rek gegeven volgens de EN13941 en de NEN3650 als functie van de D/t verhouding door de blauwe en oranje lijn. Hierbij is aangenomen dat de maximale ovalisatie 5% bedraagt. Als de ovalisatie groter wordt zal de toelaatbare kritische rek snel afnemen. Door de hogere veiligheidsfactor ligt de toetswaarde volgens de EN13941 duidelijk lager.



Figuur 3.4: Kritische rek volgens de EN13941 en de NEN3650

Voor rechte leidingdelen geeft de EN13941 een aanvullende restrictie met betrekking tot het plooiën van de leiding. Dit wordt in Figuur 3.4 aangegeven met de rode lijn. Het is onduidelijk waar deze voorwaarde op gebaseerd is maar de impact is groot voor met name leidingen met een  $D/t < 68$  (DN400 en kleiner). Voor leidingen met  $D/t > 68$  wordt de oranje lijn maatgevend door de hoge veiligheidsfactor.

De EN13941 geeft de volgende concrete restricties voor de maximaal toelaatbare axiale spanning en temperatuurtraject gebaseerd op de kritische rek:

Tabel 3.8: Toelaatbare axiaalspanning en temperatuurtraject m.b.t. plooi

Do	t	$r_m/t$	D/t	$\Delta\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta T_{\max}$ [°C]
323,9	5,6	28,4	57,8	334	130
711	8	43,9	88,9	222,2	87,7

Voor de DN700/900 leiding zou dit betekenen dat het temperatuurtraject beperkt is en de maximale bedrijfstemperatuur van 120°C niet toelaatbaar zou zijn.

De EN13941 geeft hierbij echter ook de volgende opmerking:

- f) the equations are valid for steel grades with specified minimum yield of approximately 235 MPa. (For steels with  $R_e > 235$  MPa other values may be derived in the future.)

De EN13941 is dus specifiek van toepassing voor P235GH en zegt niets over staalsoorten met een hogere sterkte (bijvoorbeeld P355NH). De invloed van staalsoorten met een hogere rekgrens op limit state C.1 wordt momenteel onderzocht.

### Berekeningsresultaten

Aangezien de leidingen bij de korte boringen ( $L/2 = 100$  m) niet verankeren en de maximaal toelaatbare axiaalspanning niet gehaald wordt, zal local buckling voor deze situaties geen risico vormen voor de boring. Ook voor de cases met lage wrijving (Eind) bij de lange boringen verankeren de leidingen niet en blijven de axiaalspanningen onder de maximaal toelaatbare waarde. Bij deze cases zal local buckling ook geen risico vormen voor de boring. De DN300/450 leiding zal bij de lange boring wel gaan verankeren bij de referentiecasse (hoge wrijving) maar er wordt wel voldaan aan Limit State C.1. Alleen de DN700/900 leiding voldoet niet aan Limit State C.1 bij de lange boring en de referentiecasse.

Tabel 3.9: Overzicht toetsing Limit State C.1

Diameter	Fase	Limit State C.1	
		Boring $L/2 = 100$ m	Boring $L/2 = 500$ m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet niet

Om bij grotere leidingdiameter toch te voldoen aan Limit State C.1 kan gekozen worden voor:

- Thermisch voorspannen van de kritische leidingdelen, i.e. de boring.

**Opmerking:**

In de berekeningen zijn geen buigende momenten meegenomen in de boring. Zouden er zettingsverschillen optreden en daarmee buigende momenten dan dienen deze meegenomen te worden in de berekening en kunnen de resultaten minder gunstig zijn. Vanwege de lage axiaalkracht bij de bochten zal local buckling hier een minder groot risico zijn. Voor de bochten is Limit State B.1 maatgevend.

### 3.2.4. Limit state C.2, Global instability

Deze limit state beschrijft het globaal uitknikken van de leiding vanwege een hoge axiaalkracht in compressie. Ook wordt hierbij gekeken naar de maximale vrijgraaf lengte naast de warmteleiding. Bij het vrijgraven van de grond naast de warmteleiding (bijvoorbeeld als er een nieuwe leiding parallel wordt gelegd) kan de warmteleiding uitknikken.

**Berekeningsresultaten**

In onderstaand tabel wordt voor beide leidingen de berekende normaalkracht en toelaatbare normaalkracht gegeven indien de leiding volledig verankert. Ook wordt voor die situatie de vrijgraaf lengte gegeven.

*Tabel 3.10: Berekende normaalkracht en toelaatbare normaalkracht*

	Limit State C.2		
Diameter	Vrijgraaf lengte [m]	Normaalkracht [kN]	Maximaal toelaatbaar [kN]
DN300/450	2	1568	8534
DN700/900	5	4979	27657

Aangezien de leidingen voldoen aan de eisen conform Limit State C.2 voor de situatie waarbij de leidingen verankert liggen (worst case), zullen de leidingen voldoen in alle situaties.

Tabel 3.11 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 3.11: Overzicht toetsing Limit State C.2

Diameter	Fase	Limit State C.2	
		Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet

De vrijgraaf lengte is conservatief berekend en daardoor vrij klein. Door thermisch voorspannen kan de lengte vergroot worden.

### 3.3. Belastingcases volgens de NEN3650

De belasting cases volgens de NEN3650 die worden beschouwd zijn:

- BC3
- BC4
- Toets op wisselend vloeien
- Toets op plooi
- Toets op stapsgewijs plastisch bezwijken
- Toets op uitknikken

#### 3.3.1. BC3

In deze belastingcase wordt de leiding getoetst als deze drukloos is, maar wel een temperatuurbelasting heeft (net na uitbedrijf gaan). In deze belastingcase wordt een toelaatbaar spanningstraject en de vervormingen getoetst. De resultaten van de BC3 berekeningen worden gepresenteerd bij de BC4 berekeningen in de volgende paragraaf.

#### 3.3.2. BC4

Vergelijkbaar met BC3, maar nu inclusief inwendige druk. Voor beide belastingcases geldt een toelaatbaar spanningstraject gelijk aan:

$$S_v = 0,85 \frac{(Re + Re(T))}{1,1} = 0,85 \frac{355 + 296}{1,1} = 503 \text{ N/mm}^2$$

Waarbij  $Re$  de rekgrens is van het staal voor temperaturen onder de 50°C en  $Re(T)$  de rekgrens bij de ontwerptemperatuur.

De BC3 en BC4 berekening zijn beide vergelijkbaar met de Limit State B.1 berekening volgens de EN13941 (zie paragraaf 3.2.2). De toelaatbare spanning is echter beduidend lager volgens de NEN3650. Dit komt doordat de EN13941 toetst op vermoeiing en de NEN3650 op een toelaatbaar spanningstraject. Een groot verschil ten opzichte van de EN13941 is dat het toelaatbare spanningstraject wel afhankelijk is van de staalsoort (vanwege verschillende rekgrenzen). Het toepassen van P355NH heeft hier een duidelijk positief effect in tegenstelling tot Limit State B.1 volgens de EN13941.

## Berekeningsresultaten

De berekeningsresultaten voor zowel de BC3 als de BC4 belastingcase voor de korte boring staan gegeven in Tabel 3.12 en voor de lange boring in Tabel 3.13.

Uit de resultaten blijkt de BC3 belastingcase (drukloos) maatgevend te zijn. De hoge spanningen worden ook weer gevonden in de bochten.

Tabel 3.12: Berekende verplaatsingen en spanningen voor  $L/2 = 100\text{ m}$

Diameter	Fase	Maximale axiale verplaatsing [mm] <sup>1)</sup>	Max berekende spanning BC4 [N/mm <sup>2</sup> ]	Max berekende spanning BC3 [N/mm <sup>2</sup> ]	Sv [N/mm <sup>2</sup> ]
DN300/450	Eind	108	432	519	503
	Ref	87	417	494	503
DN700/900	Eind	111	468	550	503
	Ref	99	399	431	503

Tabel 3.13: Berekende verplaatsingen en spanningen voor  $L/2 = 500\text{ m}$

Diameter	Fase	Maximale axiale verplaatsing [mm] <sup>1)</sup>	Max berekende spanning BC4 [N/mm <sup>2</sup> ]	Max berekende spanning BC3 [N/mm <sup>2</sup> ]	Sv [N/mm <sup>2</sup> ]
DN300/450	Eind	429	989	1247	503
	Ref	97	452	529	503
DN700/900	Eind	477	1138	1662	503
	Ref	203	645	815	503

Bij de korte boring (Tabel 3.12) voldoet de leiding niet voor de Eindcase in de drukloze situatie. Dit valt echter nog wel op te lossen door het aanbrengen van expansiekussens om de 5D bochten van de expansielus. Dit geldt ook voor de DN300/450 leiding en de Referentiecasi in de drukloze situatie bij de lange boring (Tabel 3.13).

Tabel 3.14 geeft een overzicht van de resultaten voor de toetsing van zowel BC3 als BC4.

Tabel 3.14: Overzicht toetsing BC3 en BC4

		BC3 en BC4	
Diameter	Fase	Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet niet

### 3.3.3. Toets op wisselend vloeien

Deze toets is vooral van toepassing indien de leidingen thermisch voorgespannen zijn en dit in de berekeningen wordt meegenomen. Vaak zijn het de bochten aan weerszijden van een boring die zwaar belast worden, waarbij er een risico is op wisselend vloeien.

Indien het temperatuurtraject volledig wordt meegenomen in de berekening en voldaan wordt aan zowel de BC3 als de BC4 belastingcase is automatisch voldaan aan het criterium van wisselend vloeien.

Voor de leidingdelen die verankeren, is ook aan het criterium van wisselend vloeien voldaan indien deze delen voldoen aan de toets op stapsgewijs plastisch bezwijken (zie paragraaf 3.3.5).

#### Berekeningsresultaten

Tabel 3.15 geeft het overzicht van de resultaten van de toets op wisselend vloeien.

Tabel 3.15: Overzicht toets op wisselend vloeien

		Wisselend vloeien	
Diameter	Fase	Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet niet
	Ref	Voldoet	Voldoet niet

### 3.3.4. Toets op plooi (local buckling)

Deze toets is vergelijkbaar met de toets op local buckling uit paragraaf 0 en van toepassing bij stuik door buiging en hoge normaalkrachten (verankerde leidingdelen).

De toets op plooi volgens de NEN3650 lijkt minder kritisch dan bij de EN13941, zoals ook blijkt uit Figuur 3.4. Voor een deel wordt dit veroorzaakt door de hoge veiligheidsfactor die de EN13941 hanteert. De NEN3650 maakt ook geen onderscheid tussen leidingen die met name belast worden door buigende momenten en lange rechte leidingen die met name axiaal belast worden.

De toetswaarde voor kritische rek ligt daardoor aanzienlijk hoger dan bij de EN13941. Tabel 3.16 geeft de kritische rek conform de NEN3650 en het maximaal toelaatbare temperatuurtraject dat daarbij hoort.

Tabel 3.16: Kritische rek en temperatuurtraject m.b.t. plooi

Do	t	$r_m/t$	D/t	$\epsilon_{cr}$ [%]	$\Delta T_{max}$ [°C]
323,9	5,6	28,4	57,8	0,340	276
711	8	43,9	88,9	0,147	119,6

Bij de berekening is weer uitgegaan van een ovalisering van de leiding van 5%.

#### Berekeningsresultaten

Aangezien de leidingen bij de korte boringen ( $L/2 = 100$  m) niet verankeren, en ook voor de case met lage wrijving nooit verankeren (Eind), zal local buckling voor deze situaties geen risico vormen voor de boring.

Beide leidingen zullen bij de lange boring wel gaan verankeren bij de referentiecasse (hoge wrijving) maar het temperatuurtraject ligt onder de maximaal toelaatbare waarde conform Tabel 3.16. Hiermee wordt voldaan aan criterium.



Tabel 3.17: Overzicht toetsing plooi

Diameter	Fase	Toets op plooiën	
		Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet

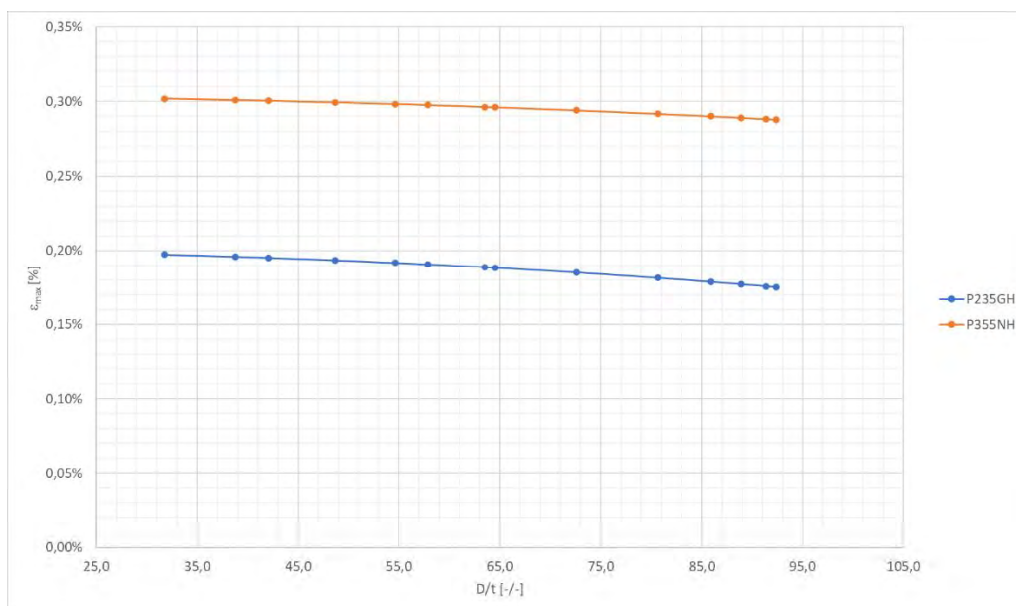
Opmerking:

In dit rapport is uitgegaan van een maximale temperatuur van 120°C en een temperatuurtraject van 110°C. Bij een ontwerptemperatuur van 130°C is het temperatuurtraject 120°C en voldoet de DN700/900 leiding net niet. Er is in ieder geval weinig reserve aanwezig. Om bij grotere leidingdiameters het risico op plooi te verlagen kan het volgende overwogen worden:

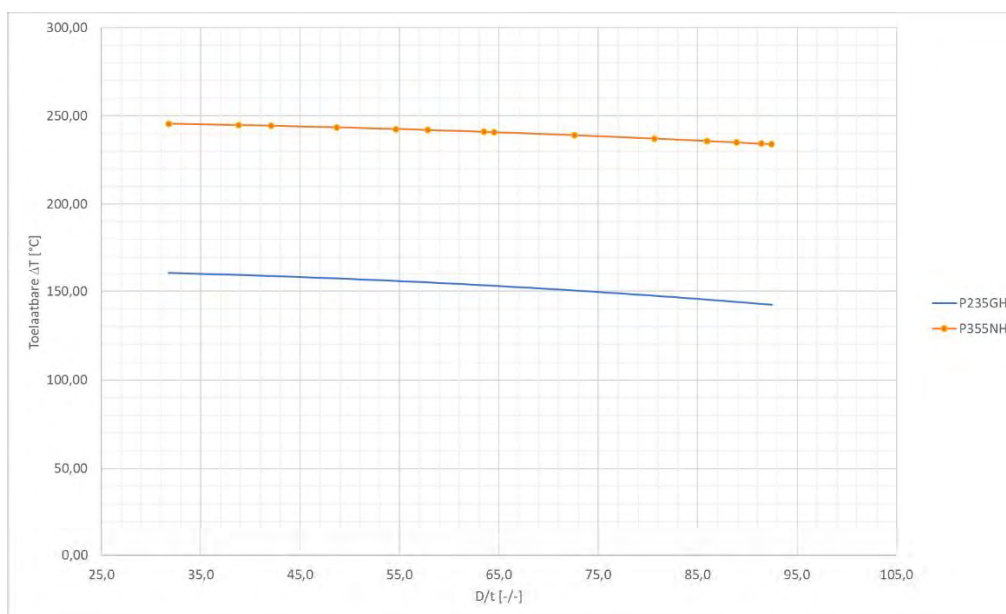
- Thermisch voorspannen van de kritische leidingdelen, i.e. de boring.

### 3.3.5. Toets op stapsgewijs plastisch bezwijken

In Figuur 3.5 wordt de maximaal toelaatbare rek conform de NEN3650 gegeven ten aanzien van het stapsgewijs plastisch bezwijken. De formule lijkt sterk op de formule uit de EN13941, maar is minder conservatief, waardoor de waarden voor de toelaatbare rek hoger liggen. In Figuur 3.6 is de toelaatbare rek vertaald naar een toelaatbaar temperatuurtraject.



Figuur 3.5: Max toelaatbare rek conform NEN3650 m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken



Figuur 3.6: Max toelaatbaar temperatuurtraject m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken

Voor staalsoort P355NH ligt de toelaatbare rek en daarmee het toelaatbare temperatuurtraject beduidend hoger dan voor P235GH.

Tabel 3.18 geeft de toelaatbare temperatuurtrajecten voor de DN300/450 en DN700/900 leiding voor zowel P235GH als P355NH.

Tabel 3.18: Toelaatbare temperatuurtraject m.b.t. stapsgewijs plastisch bezwijken

Do	t	$r_m/t$	D/t	$\Delta T_{\max}$ P235GH [°C]	$\Delta T_{\max}$ P355NH [°C]
323,9	5,6	28,4	57,8	155	242
711	8	43,9	88,9	144	235

### Berekeningsresultaten

Aangezien de toetswaarden bij de NEN3650 hoger liggen dan bij de EN13941, en het toelaatbare temperatuurtraject hoger is dan in dit rapport beschouwd (i.e. 110°C), is er geen risico op stapsgewijs plastisch bezwijken in de boring bij volledige verankering.

Onderstaand tabel geeft een overzicht van de resultaten van de toetsing op stapsgewijs plastisch bezwijken.

Tabel 3.19: Overzicht toetsing stapsgewijs plastisch bezwijken

		Stapsgewijs Plastisch Bezwijken	
Diameter	Fase	Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet

**Opmerking:**

Waarbij de toetsing conform de EN13941 laat zien dat een DN700/900 leiding met staalsoort P235GH niet zou voldoen, voldoet deze wel aan de eisen conform de NEN3650.

### 3.3.6. Toets op uitknikken

De toets op uitknikken conform de NEN3650 is volledig identiek aan de toets conform de EN13941.

**Berekeningsresultaten**

Tabel 3.20 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 3.20: Overzicht toetsing uitknikken

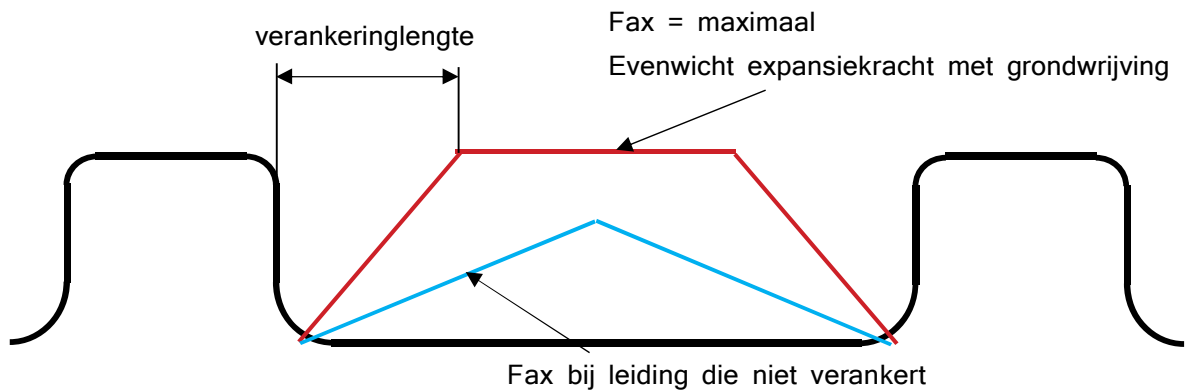
		Uitknikken	
Diameter	Fase	Boring L/2 = 100 m	Boring L/2 = 500 m
DN300/450	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet
DN700/900	Eind	Voldoet	Voldoet
	Ref	Voldoet	Voldoet

## 4. Bespreking resultaten

De berekeningen laten zien dat er 2 situaties te onderscheiden zijn:

1. De leiding verankert niet (in de boring)
2. De leiding verankert wel (in de boring)

Hierbij speelt de verankeringlengte een cruciale rol. In Figuur 4.1 worden 2 situaties schematisch weergegeven.



*Figuur 4.1: Verankeringslengte en axiaalkracht*

De rode lijn geeft de situatie waarbij de wrijving tussen leiding en grond groot genoeg is en ook de lengte van de boring groot genoeg is dat de leiding verankert in het midden. In het verankerde deel is de expansiekracht in evenwicht met de grondwrijving. De axiaalkracht heeft hier zijn maximale waarde bereikt en de leiding zelf heeft geen axiale verplaatsing in dit deel.

De blauwe lijn geeft de axiaalkracht voor de situatie waarbij de leiding niet verankert. Dit kan vanwege een lage wrijving in de boog of door een relatief korte lengte van de boring.

Voor het ontwerp is verankeren van de leiding cruciaal. In de volgende paragraaf wordt nader ingegaan op beide situaties.

## 4.1. De leiding verankert niet in de boring

De leiding verankert niet als de wrijving tussen de leiding en de grond in de boorgang te laag is of door een te korte lengte van de boring. In het laatste geval wordt de verankeringlengte dus niet bereikt.

Uit de berekeningen conform zowel de EN13941 als de NEN3650 blijkt dat het toetsen op plooiën (local buckling) en stapsgewijs plastisch bezwijken in deze situatie over het algemeen niet maatgevend is voor de leiding in de boorgang. Hierbij wordt er wel vanuit gegaan dat de leiding duidelijk niet verankert waardoor de axiaalspanning en rekken onder de maximaal toelaatbare waarde blijven.

De kritische locaties zijn in dit geval de bochten aan weerszijden van de boring. De maatgevende belastingcases zijn de toets op vermoeiing volgens de EN13941 en de BC3 en BC4 belastingcases volgens de NEN3650. Voor korte boringen zijn er voldoende mogelijkheden om de spanningen en vervormingen te laten voldoen aan de eisen volgens de NEN3650 en de EN13941. Het toepassen van expansiekussens is hierbij vaak een goede oplossing.

Voor lange boringen zit er een limiet aan het kunnen toepassen van expansiekussens. Over het algemeen worden maximaal 3 lagen van 40 mm toegestaan met een absoluut bovengrens van 66% indrukking per kussen. Dit komt overeen met maximaal 80 mm expansie bij de bochten. Bovendien zullen de expansieebenen groter worden bij grotere lengte van de boring om nog effectief als expansievoorziening te kunnen fungeren. Zeker voor grotere diameters leiding zal deze grote ruimte voor een expansielus niet altijd aanwezig zijn.

Het thermisch voorspannen van de boring kan hierbij uitkomst bieden. Hierbij moet wel goed nagedacht worden hoe het terugtrekken van de boring wordt tegengehouden tijdens het afkoelen van de leiding. Bij de conventionele manier van voorspannen betekent dit dat aan weerszijden van de boring voldoende leidinglengte in open ontgraving moet liggen en er voldoende wrijving moet worden opgebouwd om het terugtrekken te voorkomen. De leidinglengte dat in open ontgraving moet zijn aangelegd om voldoende wrijving op te bouwen is gelijk aan de verankeringlengte die hoort bij de  $\Delta T$  tijdens het voorspannen. Indien voorgespannen wordt van 10°C naar 70°C betekent dit dus een  $\Delta T$  van 60°C. In een goede zandgrond kan dit enkele tientallen meters zijn voor kleine diameters, terwijl voor grote diameters en slappe grond dit ook meer dan 150 m kan zijn. Dit zal maatwerk zijn.

Opmerking:

Indien de boring thermisch voorgespannen dient te worden is het juist gunstig als de wrijving in de boorgang zeer laag is. In dat geval zal de expansie het hoogst zijn tijdens opwarmen en de axiaalkracht minimaal. Als de boring dan verbonden wordt met de veldstrekking is de voorspanning optimaal als de leiding afkoelt (i.e. hoge trekkracht in de boring).

## 4.2. De leiding verankert wel in de boring

Indien de leiding wel verankert in de boring wordt de maximale axiaalkracht bereikt in het verankerde deel. Voor deze situatie zijn plooien en stapsgewijs plastisch bezwijken in het verankerde deel een risico. Hierin toetst de EN13941 kritischer dan de NEN3650. Volgens de NEN3650 kan de leiding volledig verankeren voor gangbare temperatuurtrajecten van 110°C of 120°C. Voor plooien (local buckling) heeft het toepassen van P355NH ten opzichte van P235GH geen toegevoegde waarde volgens de eisen van de NEN3650. Voor stapsgewijs plastisch bezwijken heeft het toepassen van P355NH wel een positief effect. De toelaatbare waarde ligt dan hoger, maar ook voor P235GH wordt al voldaan aan het criterium volgens de norm.

Voor het verankerde deel van de DN700/900 leiding wordt conform de EN13941 officieel niet voldaan aan het criterium voor plooien (local buckling). De EN13941 is alleen van toepassing voor P235GH en niet voor P355NH. De invloed van de staalsoort op plooien wordt momenteel onderzocht.

Aan het criterium voor stapsgewijs plastisch bezwijken conform de EN13941 wordt voldaan indien P355NH wordt gekozen als staalsoort. P235GH voldoet niet voor de DN700/900 leiding en voldoet, maar net voor de DN300/450 leiding. Om in alle gevallen te voldoen aan de eisen conform de EN13941 kan gekozen worden om de leiding thermisch voor te spannen. Hiermee wordt de rek en axiaalspanning in het verankerde deel verlaagd. Dit hoeft ook niet per definitie op 70°C. Bij een effectieve voorspanning op 40°C à 50°C zal ook voldaan worden aan het criterium op plooien en/of stapsgewijs plastisch bezwijken. Het voordeel hiervan is dat er minder lengte in open ontgraving nodig is om het terugtrekken van de boring bij afkoelen tegen te houden. Het nadeel is een grotere expansie in de bedrijfssituatie. Maar als deze expansie opgevangen kan worden is dit een goed alternatief.

Indien de leidingen verankeren betekent dit ook dat de maximale expansie op de bochten is bereikt. Als de boring langer wordt, wordt ook het verankerde leidingdeel langer, maar de verankeringlengte en daarmee de expansie op de bocht blijft gelijk.

De bochten aan weerszijden kunnen hierbij weer de kritische locaties zijn, waarbij de toets op vermoeiing volgens de EN13941 en de BC3 & BC4 belastingcases volgens de NEN3650 de maatgevende belastingcases zijn.

Indien de boring zelf niet zou verankeren (door lage wrijving) kan door het leggen van de leiding in open ontgraving in het verlengde van de boring wel voldoende wrijving opgebouwd worden om het geheel te laten verankeren. De lengte van de leidingdelen aan weerszijden moeten minimaal gelijk zijn aan de verankeringslengte van de leiding die hoort bij de wrijving in open ontgraving. Als de leidingdelen in open ontgraving aan weerszijden van de boring verankeren dan zal ook de boring vastliggen.

Voorwaarde is wel dat er geen grote richtingveranderingen plaatsvinden in het tracé waar de leiding kan uitknikken. De maximaal toelaatbare hoek zal sterk afhangen van de samenstelling van de grond.

Door het handig toepassen van thermische voorspanning kan de leiding, inclusief boringen, over grote lengte recht doorgelegd worden zonder expansielussen. Het opvangen van de expansie kan ook verplaatst worden naar een locatie waar er wel ruimte is voor een expansielus. Het voordeel van thermisch voorspannen is ook dat de ontgravingslengte naast de leiding groter wordt, omdat het risico op uitknikken lager wordt.

Het nadeel van een voorgespannen leiding is dat de leiding z'n voorspanning kwijt raakt als deze doorgehaald wordt. Het aanbrengen van een T-stuk in de toekomst zal dan veel lastiger zijn.

**Opmerking:**

Ook hier geldt weer dat indien de boring thermisch voorgespannen dient te worden, het juist gunstig is als de wrijving in de boorgang zeer laag is. In dat geval zal de expansie het hoogst zijn tijdens opwarmen en de axiaalkracht minimaal. Als de boring dan verbonden wordt met de veldstrekking is de voorspanning optimaal als de leiding afkoelt (i.e. hoge trekkracht in de boring).

## 5. Conclusies en aanbevelingen

Onder strikte voorwaarden is het mogelijk een boring aan te leggen met de E-power methode met onbeperkte lengte. Voor het ontwerp zal de wrijving in de boorgang, maar zeker ook de wrijving tussen de leiding en grond in open ontgraving cruciaal zijn. Indien niet thermisch voorgespannen wordt is een hoge wrijving tussen grond en de leiding over het gehele tracé gunstig.

Door het thermisch voorspannen van de leiding kunnen risico's gemitigeerd worden en beschikt men ook over een middel om te voldoen aan de eisen conform zowel de EN13941 als de NEN3650. Voor de boring geldt dat als deze thermisch wordt voorgespannen een lage wrijving gunstig is. Voor de veldstrekking geldt dat een hoge wrijving gunstig is, ervan uitgaande dat de veldstrekking altijd wordt voorgespannen met open sleuf.

Het toepassen van P355NH in plaats van P235GH geeft meer ruimte in het ontwerp omdat veel grenswaarden voor spanningen of rekken hoger komen te liggen. Dit geldt met name voor een ontwerp conform de NEN3650 en in mindere mate voor een ontwerp conform de EN13941.





**Rotterdam  
ENGINEERING**

**RE Rotterdam Engineering B.V**  
Vasteland 78  
3011 BN Rotterdam  
Postbus 23155  
3001 KD Rotterdam  
Telefoon: 010-22 64 935

Copyright © 2020  
Niets uit deze uitgave mag worden  
verveelvoudigd en/of openbaar worden  
gemaakt door middel van druk, fotokopie,  
elektronisch of op welke wijze dan ook,  
zonder schriftelijke toestemming van de  
auteurs.

Rotterdam Engineering is onderdeel van



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](http://www.deltares.nl)