

Mechanisch gedrag distributie warmteleidingen

WarmingUp 2B3



Mechanisch gedrag distributie warmteleidingen
WarmingUp 2B3

Auteur(s)
Piet Meijers

Mechanisch gedrag distributie warmteleidingen

WarmingUp 2B3

Opdrachtgever	Warming Up
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Warmteleidingen, dubbelwandige leidingen, intrekken, opwarmen, bochten

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	05-07-2022
Projectnummer	11205150-003
Document ID	11205150-003-HYE-0003
Pagina's	23
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	

Samenvatting

Voor distributie warmteleidingen worden dubbelwandige leidingen gebruikt, waarbij de ruimte tussen de binnen- en buitenbuis gevuld is met een isolatiemateriaal.

Voor het modelleren van het mechanisch gedrag van de warmte leidingen is momenteel nog geen methode beschikbaar die expliciet zowel de binnen- als buitenbuis en de isolatie laag meeneemt. In dit rapport worden berekeningsmethoden afgeleid voor het mechanisch gedrag van deze distributie leidingen in de grond bij aanleg en als de leiding in gebruik genomen is. Berekeningen met verschillende modellen worden beschreven waarvan vervolgens de resultaten worden gecombineerd. Het betreft de volgende modellen:

- Axiaal gedrag warmte leiding met binnen- als buitenbuis en de isolatie laag.
- Gedrag leiding in omtreksrichting met binnen- als buitenbuis en de isolatie laag.
- Gecombineerd gedrag in Ple4Win met equivalente buisparameters .

De beschouwde situaties zijn het intrekken van een leiding in een boorgat (aanlegfase), het opwarmen van een leiding bij in gebruik name en het gedrag van de leiding bij bochten, zoals expansielussen (gebruiksfase).

Met de ontwikkelde berekeningsmethoden zijn een groot aantal berekeningen uitgevoerd waarbij diverse parameters, zoals de leidingeigenschappen en de grondeigenschappen, zijn gevarieerd. In dit rapport zijn vier typen leidingen beschouwd:

- Een stalen binnenbuis en een kunststof buitenbuis (staal-PUR-PE).
- Een kunststof binnenbuis en buitenbuis (Polybuteen-Polyolefin-PE).
- Een kunststof binnenbuis en buitenbuis (PEX-PUR-PE).
- Een stalen binnenbuis en stalen buitenbuis, beide geribbeld.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Algemeen	6
1.2	Doelstelling	7
1.3	Leeswijzer	7
2	Axiaal gedrag	8
2.1	Uitgangpunten voor de berekeningsvarianten	8
2.1.1	Leidingen	8
2.1.2	Aanleg en gebruiksfase	8
2.1.3	Grondveren	8
2.2	Modellering intrekken	8
2.2.1	Model	8
2.2.2	Typische resultaten	11
2.3	Modellering opwarmen leiding	11
2.3.1	Model	11
2.3.2	Typische resultaten	13
3	Modellering gedrag omtreksrichting	14
4	Modellering gedrag in bochten	16
4.1	Modellering	16
4.2	Typische resultaten	16
5	Conclusies en aanbevelingen	18
5.1	Modellering	18
5.2	Gecombineerde berekening	18
5.3	Materiaaleigenschappen leidingen	18
	Bijlage A, rapport modellering axiaal gedrag	20
	Bijlage B, memo ringberekeningen	21
	Bijlage C, rapport modellering gedrag in bochten	22

1 Inleiding

1.1 Algemeen

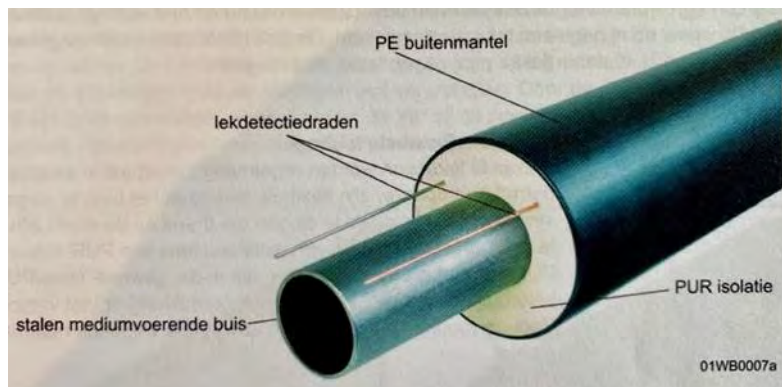
De energietransitie schrijft het gebruik van andere energiebronnen dan fossiele brandstof voor. Een van de alternatieven is het gebruik van aardwarmte of industriële warmte. Dit vereist de installatie van warmtenetwerken. De benodigde capaciteit van het warmtenet vereist de aanleg van transportleidingen met een grote diameter. Voor de distributieleidingen in de wijken en de huisaansluitingen worden leidingen met een kleinere diameter gebruikt.

Warmte leidingen worden altijd aangelegd met een aanvoer- en een retourleiding. Bij transportleidingen met een grote diameter bestaat de mediumvoerende leiding uit staal en is deze voorzien van isolatiemateriaal en een buitenmantel. Voor distributieleidingen worden ook binnenbuizen van kunststof gebruikt. De diameters van distributieleidingen variëren, maar liggen vaak in de orde van 100 - 200 mm voor de binnenbuis en tot 400 mm voor de buitenbuis. Figuur 1-1 toont de opbouw van een warmteleiding.

Deze rapportage betreft de distributie leidingen. Deze leidingen liggen doorgaans in de grond onder de straten van de verschillende wijken.

In dit rapport zijn vier typen leidingen beschouwd:

- Een stalen binnenbuis en een kunststof buitenbuis (staal-PUR-PE).
- Een kunststof binnenbuis en buitenbuis (Polybuteen-Polyolefin-PE).
- Een kunststof binnenbuis en buitenbuis (PEX-PUR-PE).
- Een stalen binnenbuis en stalen buitenbuis, beide geribbeld.



Figuur 1-1 Voorbeeld van een warmteleiding.

Het onderhavige rapport over leidingsterkte berekeningen van distributie leidingen behoort tot Thema 2 van Warming UP. De rapportage betreft werkpakket 2B3 met de modellering van de distributie leiding met betrekking tot de sterkte. Binnen dit werkpakket zijn de volgende deelrapporten uitgebracht:

- [1] Deltares. WarmingUp 2B3 Axiaal gedrag warmteleiding bij aanleg en bij opwarmen. Kenmerk 11205150-003-HYE-0002, 28 januari 2022 (opgenomen als Bijlage A)
- [2] Deltares. WarmingUp, ringberekening met PLUTO. Memo 13 juli 2021 (opgenomen als Bijlage B)

[3] R+K Consulting Engineers. WarmingUp – onderdeel 2B Berekeningen warmteleidingen met verschillende buiten- en binnenbuis combinaties. rapport 5-226-496-B1 v3, 21 januari 2022 (opgenomen als Bijlage C).

1.2 Doelstelling

De doelstelling van werkpakket 2B3 is inzichtelijk te maken hoe de leidingsterkte berekening van distributie leidingen uitgevoerd zou kunnen worden. Er moeten berekeningen kunnen worden gemaakt voor:

- Aanleg van leidingen in een boorgat en aanleg in een sleuf.
- Leidingen in gebruik met belasting door opwarmen, inwendige druk, verkeersbelasting en zetting.

Door het ontbreken van modellen en software om de warmte leidingen (die uit meerdere componenten bestaan) door te rekenen, zijn er modellen ontwikkeld en zijn bestaande modellen aangepast. Vervolgens zijn de modellen aan elkaar gekoppeld.

1.3 Leeswijzer

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste resultaten van de binnen dit werkpakket uitgebrachte deelrapporten samengevat. De berekening van de krachten in axiale richting wordt beschreven in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 gaat kort in op de berekening van de spanningen in de omtreksrichting. Vervolgens gaat hoofdstuk 4 over het gedrag in bochten. Hoofdstuk 5 geeft de belangrijkste conclusies en aanbevelingen weer.

2 Axiaal gedrag

In dit hoofdstuk worden de modellen voor axiaal gedrag bij intrekken (paragraaf 2.2) en bij opwarmen (paragraaf 2.3) beschreven. Met behulp van de modellen zijn een groot aantal berekeningen gemaakt. De daarbij gehanteerde uitgangspunten zijn kort beschreven in paragraaf 2.1.

2.1 Uitgangspunten voor de berekeningsvarianten

2.1.1 Leidingen

Bij de berekeningen zijn vier typen leidingen beschouwd, te weten een variant met een stalen binnenbuis en een kunststof buitenbuis (PE-PUR-staal), twee varianten met een kunststof binnenbuis en buitenbuis (PE-PUR-PolyoE en PE-PUR-PEX) en een variant waarbij zowel de binnenbuis als de buitenbuis een ribbelbuis is.

Bij het bepalen van de benodigde mechanische eigenschappen van warmteleidingen is gebleken dat deze moeilijk te verkrijgen zijn. Binnen dit project zijn deze parameters op basis van publiek beschikbare gegevens en aanvullend verstrekte gegevens zo goed mogelijk bepaald zonder de pretentie dat de gebruikte parameters altijd juist zijn.

2.1.2 Aanleg en gebruiksfase

Bij aanleg is het intrekken van een warmte leiding in een boorgat berekend. In de gebruiksfase is het opwarmen van de leiding gelegen in een boorgat of in een aangevulde sleuf doorgerekend. Dit geeft de volgende drie situaties:

- Aanleg in een sleuf.
- Aanleg in een boorgang, direct na het boren.
- Aanleg in een boorgang, geruime tijd na het boorproces.

Bij deze situaties zijn er verschillen in de grondreactie.

2.1.3 Grondveren

De grondreactie wordt beschreven door middel van grondveren. De veerstijfheid van deze grondveren is bepaald volgens de methode beschreven in: American Lifelines Alliance, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, July 2001 (with addenda through February 2005).

In de huidige modellering wordt, om pragmatische redenen, voor de grond uitgegaan van een bezwijk gedrag, zodat in de modellering van het axiale gedrag de maximaal te mobiliseren grondweerstand wordt meegenomen.

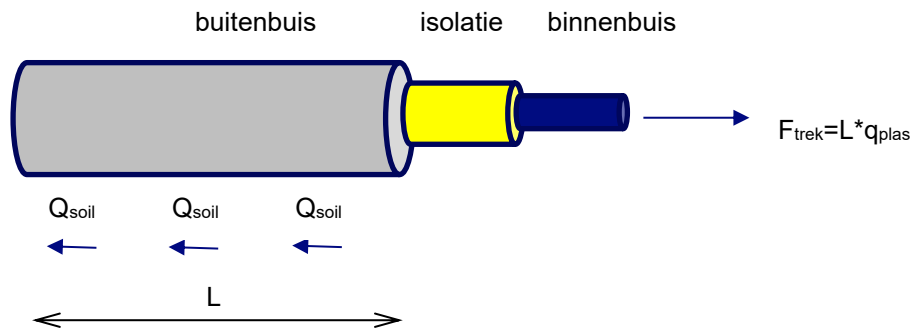
2.2 Modelling intrekken

2.2.1 Model

Er is een numeriek model opgesteld waarmee de krachten en vervormingen van een warmte leiding tijdens intrekken kunnen worden gesimuleerd. In het model wordt uitgegaan van een leidingwand die uit drie delen bestaat: binnenbuis, isolatielaag, buitenbuis. Door de isolatielaag werken de binnenbuis en de buitenbuis samen.

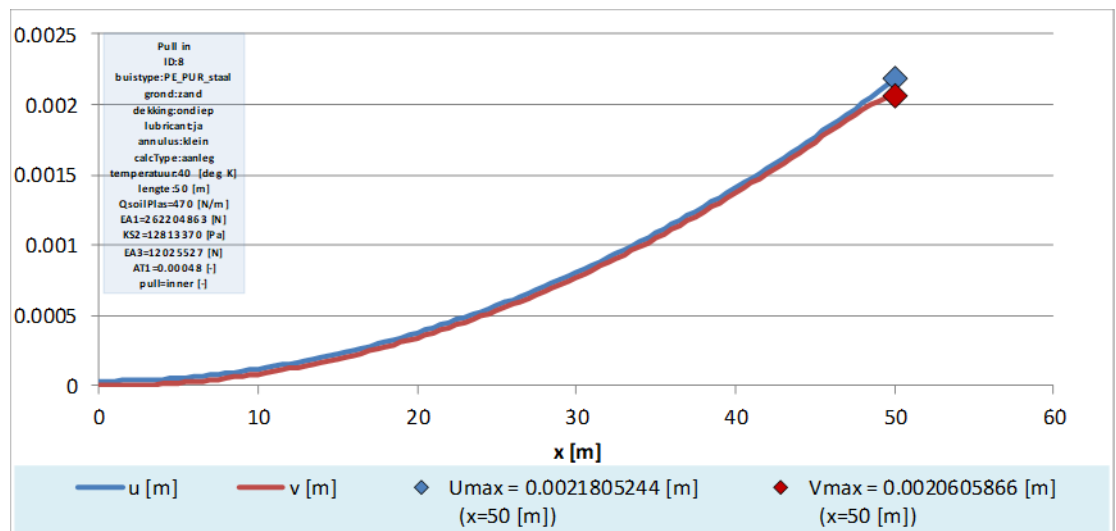
Voor het intrekken kan in het model worden gekozen uit alleen aan de binnenbuis trekken of gelijktijdig aan de binnen- en buitenbuis trekken. De weerstand tijdens het intrekken wordt

geleverd door de grondweerstand. Omdat tijdens het intrekken de gehele leiding verplaatst zal over de gehele lengte ook de volledige grondweerstand worden gemobiliseerd. Figuur 2-1 toont het opgestelde model.

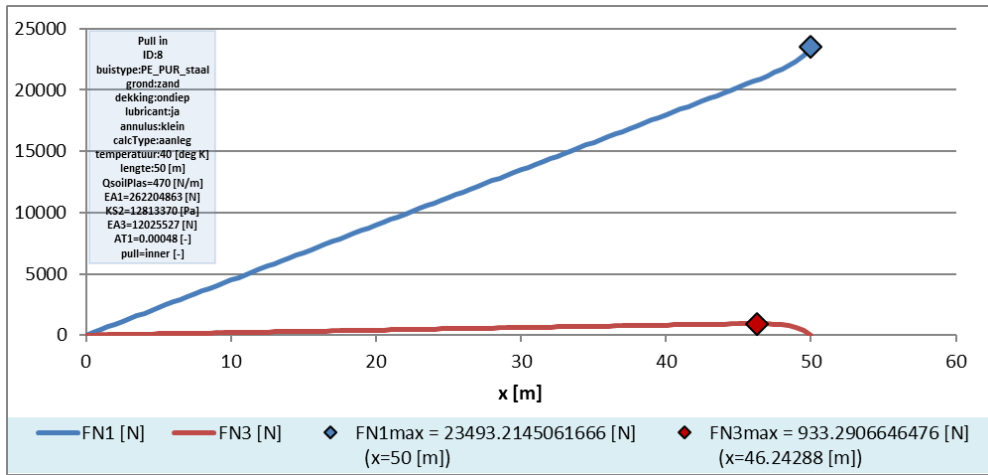


Figuur 2-1 Mechanica model externe krachten intrekken leiding.

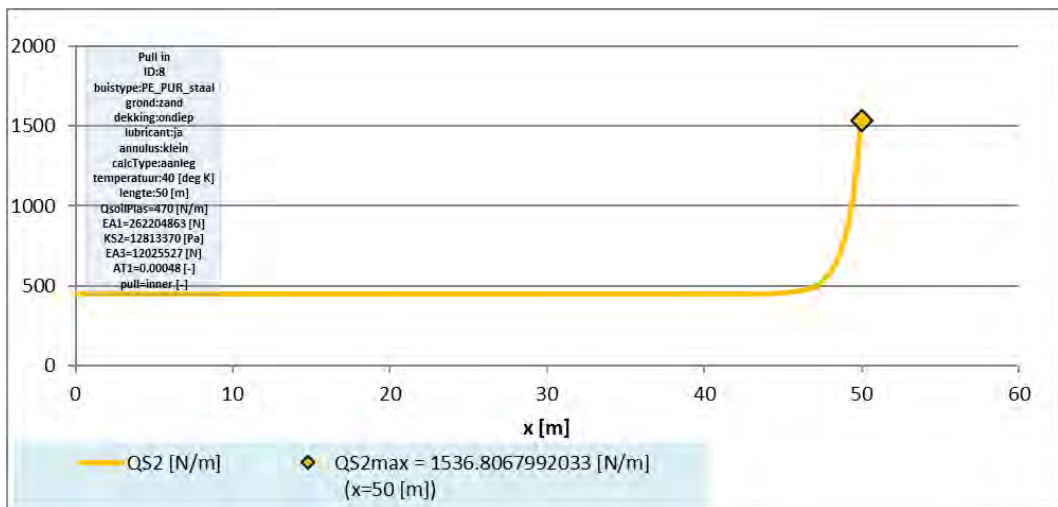
Het model is geprogrammeerd in een spreadsheet. De volgende figuren tonen de resultaten van een staal PUR-PE-leiding. De details van de berekeningen zijn opgenomen in [1] (Bijlage A). Het vrije uiteinde ligt bij $L = 100$ m.



Figuur 2-2 Berekeningsresultaat intrekken variant ID=8 verplaatsingen; de rode lijn is de verplaatsing van de buitenbuis en de blauwe lijn de verplaatsing van de binnenbuis; verplaatsingen zijn gegeven ten opzichte van vrij (linker) einde buitenbuis.



Figuur 2-3 Berekeningsresultaat intrekken variant ID=8, normaalkrachten; de rode lijn is de normaalkracht in de buitenbuis en de blauwe lijn de normaalkracht in de binnenbuis.



Figuur 2-4 Berekeningsresultaat intrekken variant ID=8; de gele lijn is de schuifkracht in de isolatie

In dit voorbeeld komen een aantal kenmerkende resultaten naar voren. Er is sprake van een kleine verschilverplaatsing tussen de binnen- en de buitenbuis. Deze verschilverplaatsing komt door de (schuif-)vervorming van de isolatielaag. De kracht in de isolatielaag is op enige afstand achter de trekkop ongeveer gelijk aan de grondweerstand. De verdeling van de krachten in binnen- en buitenbuis wordt bepaald door de verhouding in de axiale stijfheid. De stijvere buis binnenbuis zal meer kracht naar zich toetrekken.

Bij het rechteruiteinde (de kant waar aan de binnenbuis wordt getrokken) is de schuifkracht in de isolatielaag groter. Dit is nodig om de trekkracht vanuit de binnenbuis in de buitenbuis in te leiden. Daar is dus ook de verschilverplaatsing tussen binnen- en buitenbuis groter.

2.2.2 Typische resultaten

Voor een groot aantal varianten zijn de krachten etc. berekend en gerapporteerd in een tabel in het rapport dat is opgenomen in [1] (Bijlage A). De volgende parameters zijn gevarieerd:

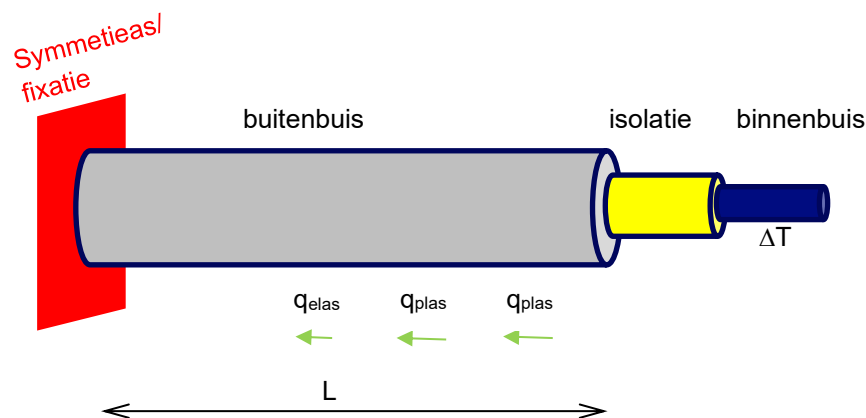
- Leidingparameters (4 varianten).
- Ondergrond (2 varianten, zand of klei).
- Diepteligging (2 varianten).
- Dikte annulus (ruimte tussen leiding en boorgang, 2 varianten).
- Bouwfase (3 varianten).
- Leidinglengte (3 varianten).
- Plaats trekkop (alleen binnenbuis bij PE-PUR-staal leiding, bij de overige leidingtypen zowel binnen- als buitenbuis).

Dat geeft 504 varianten. De berekende axiale krachten zijn vergeleken met de toelaatbare waarden. Tabellen met de resultaten zijn in [1] (Bijlage A) opgenomen.

2.3 Modelling opwarmen leiding

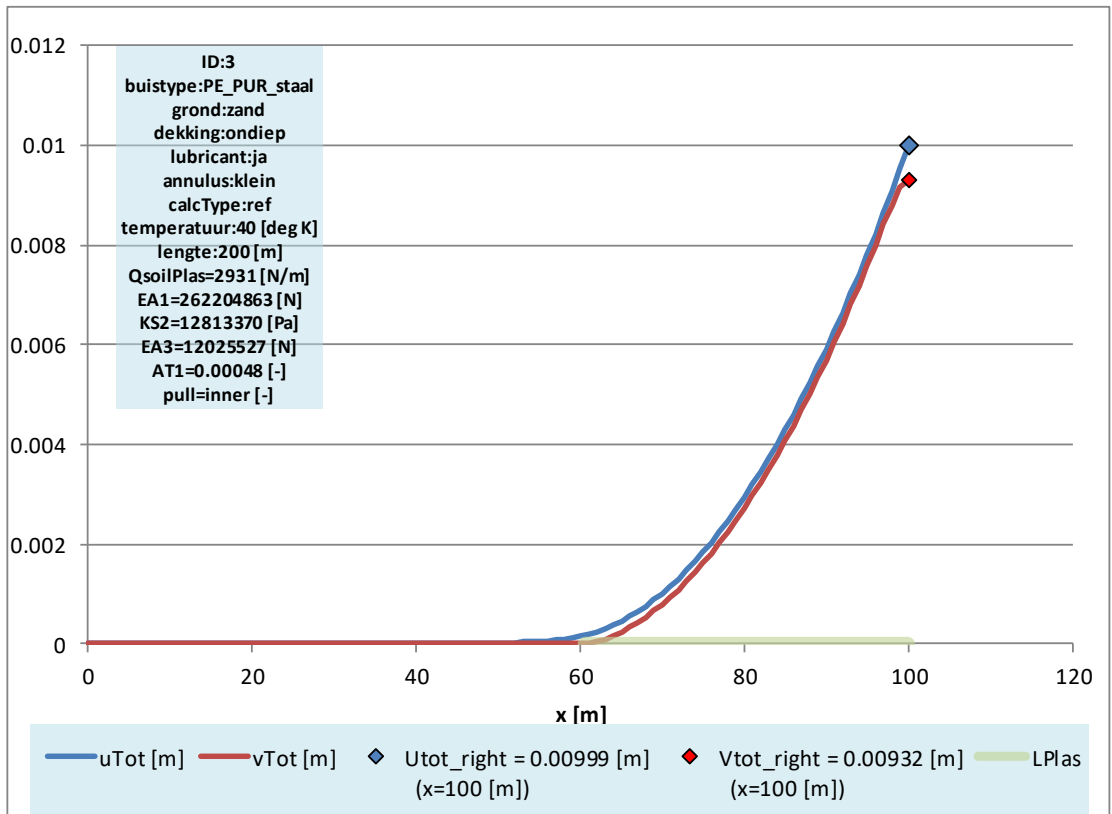
2.3.1 Model

Er is een numeriek model opgesteld waarmee de vervorming van en de krachten in een warmte leiding bij opwarmen kunnen worden berekend. In het model wordt uitgegaan van een leidingwand die uit drie delen bestaat: binnenbuis, isolatielaag, buitenbuis. Door de isolatielaag werken de binnenbuis en de buitenbuis samen. Door de temperatuurverhoging zal de binnenbuis willen uitzetten. Dit wordt tegengewerkt door de grondweerstand (schuifweerstand) langs de buitenbuis. Figuur 2-5 toont het model.

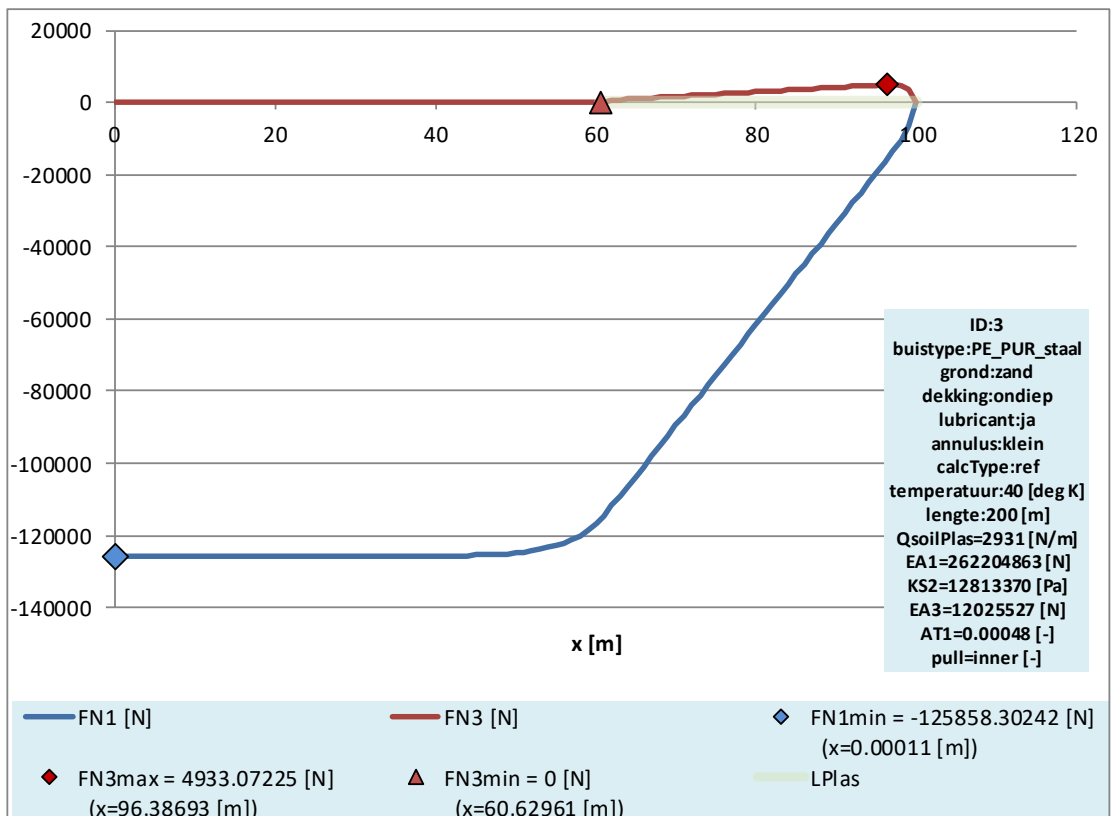


Figuur 2-5 Mechanica model externe krachten opwarmen leiding.

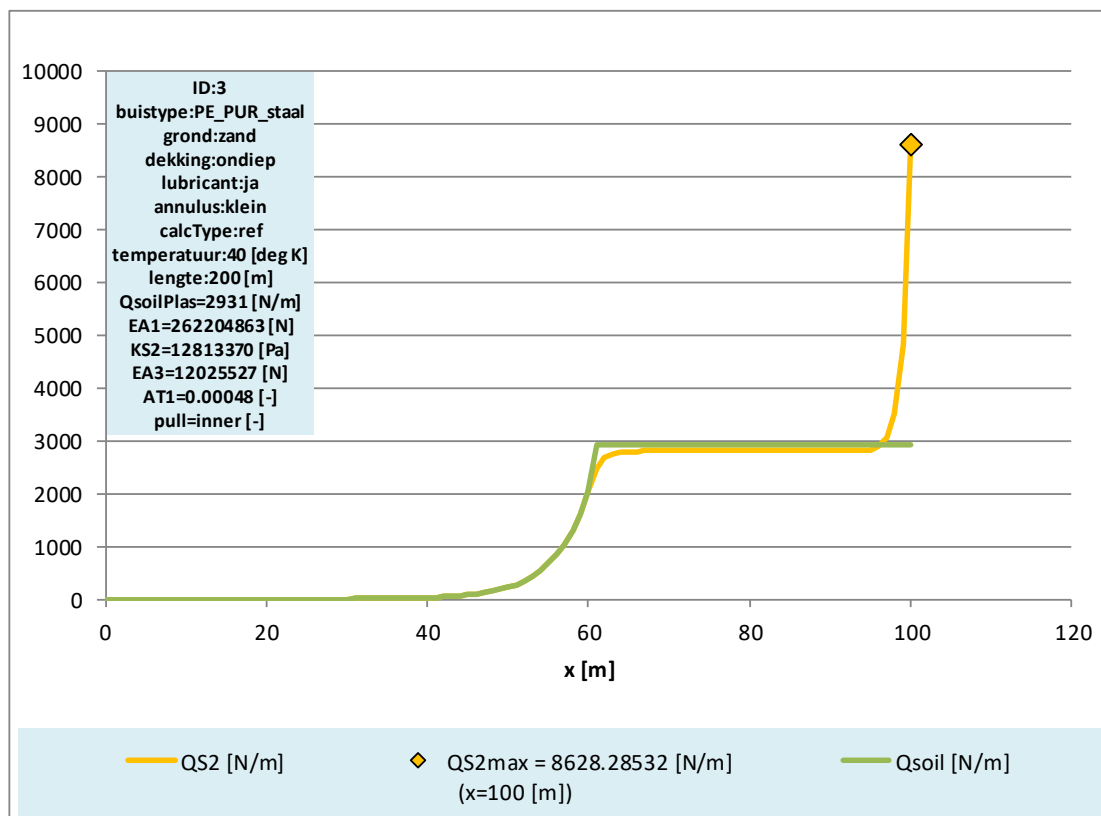
Het model is geprogrammeerd in een spreadsheet. De volgende figuren tonen enkele typische resultaten. Het vrije uiteinde ligt bij $L = 100$ m.



Figuur 2-6 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3 verplaatsingen; de rode lijn is de verplaatsing van de buitenbuis en de blauwe lijn de verplaatsing van de binnenbuis.



Figuur 2-7 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3, normaalkrachten; de rode lijn is de normaalkracht in de buitenbuis en de blauwe lijn de normaalkracht in de binnenbuis.



Figuur 2-8 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3; de gele lijn is de schuifkracht in de isolatie en de groene lijn de gemobiliseerde grondweerstand.

In het voorbeeld van bovenstaande figuren komen een aantal kenmerkende aspecten van het gedrag van een warmteleiding naar voren. De grote veranderingen van de normaalkracht ontstaan bij het vrije uiteinde. Verder weg van het vrije uiteinde, in dit voorbeeld bij $x < 50$ m, is de normaalkracht in de binnenbuis constant. De grootte van deze kracht is gelijk aan de kracht om de rek door opwarmen te compenseren, zodat er netto geen rek aanwezig is. Dat volgt ook uit de verplaatsingen, die voor dit gedeelte nul zijn. De normaalkracht in de buitenbuis is kleiner dan de kracht in de binnenbuis, en voor enige afstand tot het vrije uiteinde nul geworden. In de isolatielaag treden alleen nabij het vrije uiteinde grote schuifspanningen op.

2.3.2 Typische resultaten

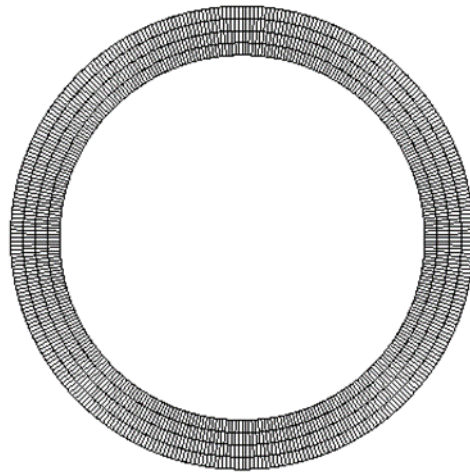
In totaal zijn 576 configuraties berekend. Per configuratie zijn de volgende parameters gevarieerd:

- Leidingconfiguratie: 4 varianten (per variant ook andere diameters).
- Grondslag (zand, klei).
- Aanlegdiepte (ondiep, diep).
- Afmeting van de annulus (klein en groot), dit is vertaald in verschillende waarden voor de axiale grondweerstand.
- Aanlegmethode (ref, aanleg, eind).
- Temperatuurverhoging (40 K en 90 K).
- Leidinglengte (10m, 50m en 500 m).

Dat geeft $4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 = 576$ varianten. Voor alle combinaties is een berekening gemaakt. Tabellen met de resultaten zijn in [1] (Bijlage A) opgenomen.

3 Modelling gedrag omtreksrichting

Met de modellen in [1], zoals beschreven in hoofdstuk 2, kunnen de krachten in axiale richting worden bepaald. De krachten en spanningen in omtreksrichting zijn door middel van een ander model berekend. Het model bestaat uit een pre- en postprocessor voor een EEM berekening. In de EEM berekening is de warmteleiding opgebouwd uit een binnenbuis en buitenbuis van schaalementen, met daartussen een isolatielaag die is gemodelleerd met volume elementen. Figuur 3-1 toont een voorbeeld van het gegenereerde elementennet voor deze berekeningen.



Figuur 3-1 Model warmteleiding voor berekeningen spanningen in omtreksrichting.

Een aantal veel voorkomende belastingsituaties kan hiermee worden doorgerekend. Een voorbeeld van een berekening met een bovenbelasting is weergegeven in Figuur 3-2.

```

copy input
nEle      720 [-]
R_inner   0.0552 [m]
E_inner   2.1E+08 [kPa]
nu_inner  0 [-]
t_inner   0.0036 [m]
E_insulation 2200 [kPa]
nu_insulation 0 [-]
R_outer   0.1058 [m]
E_outer   300000 [kPa]
nu_outer  0 [-]
t_outer   0.0134 [m]
p         0 [kPa]
Qtot     2.5 [kN]
alpha    180 [deg]
beta     70 [deg]
F_inner  0 [kN]
F_outer  0 [kN]
gamma    180 [deg]
Fopp     0 [kN]

EI_outer  0.060153 [kNm2/m]
EI_inner  0.81648 [kNm2/m]
EA_outer  4020 [kN/m]
EA_inner  756000 [kN/m]

```

```

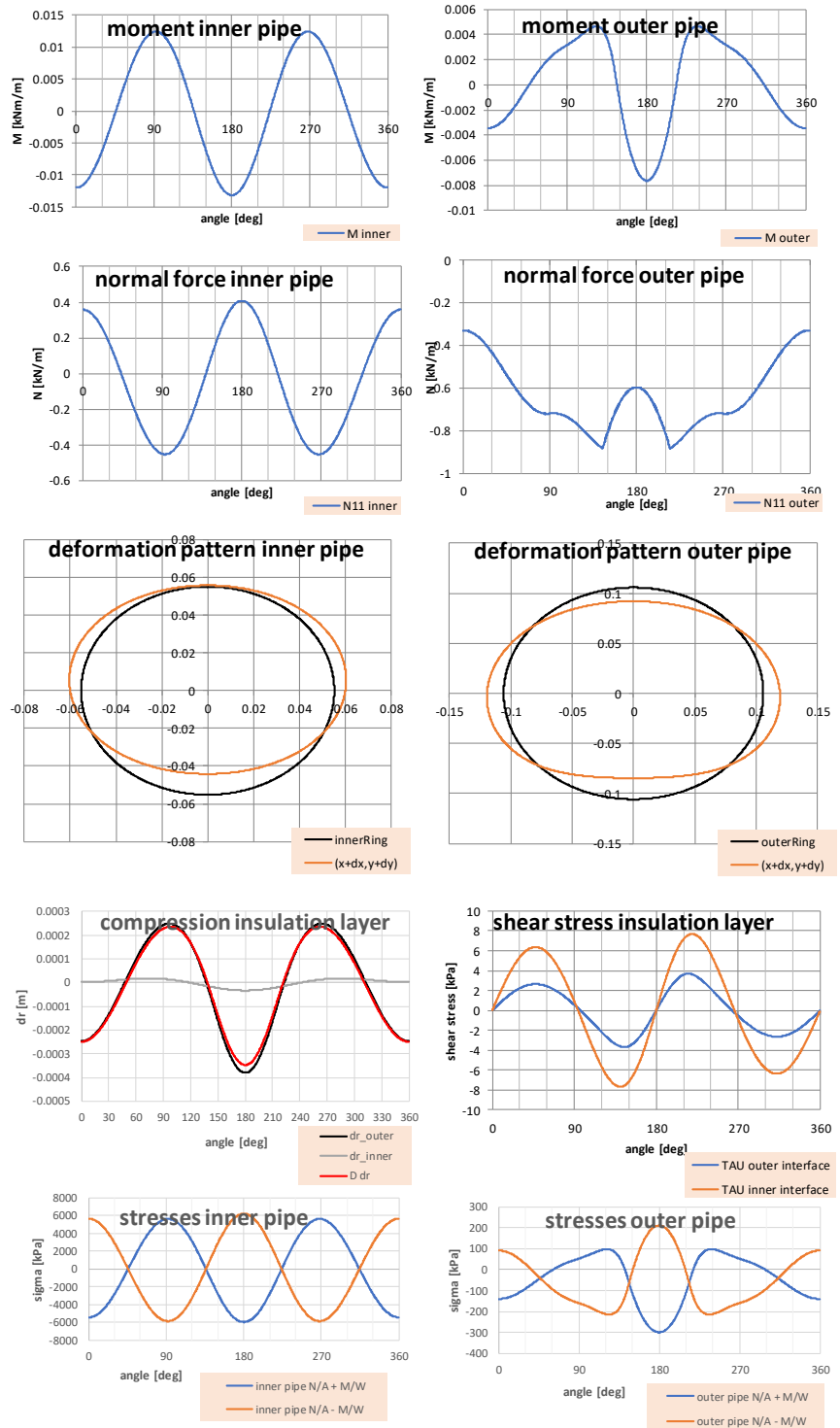
dx,max,inner 1.55E-05 [m]
dy,max,inner 3.32E-05 [m]

```

```

dx,max,outer 0.000252 m
dy,max,outer 0.000381 m

```



Figuur 3-2 Voorbeeld berekeningsresultaat ringberekening.

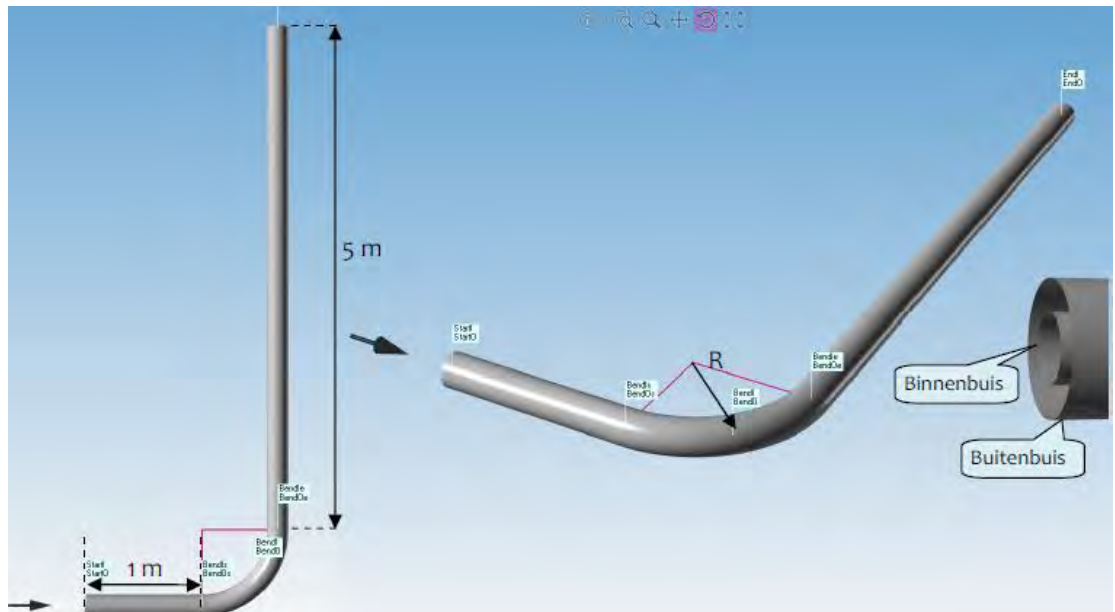
Een uitgebreide beschrijving van berekeningen in de omtreksrichting is te zien in [2] (Bijlage B).

4 Modelling gedrag in bochten

4.1 Modelling

Hoofdstuk 3 beschrijft de modellen die gebruikt zijn om voor de gebruiksfase het gedrag van de leiding in axiale richting te berekenen en om het gedrag in de omtreksrichting te berekenen. In [3] (Bijlage C) wordt het gedrag van warmteleidingen in een bocht beschreven. De berekeningen zijn uitgevoerd met het programma Ple4Win.

Voor de berekeningen is de situatie bij een bocht of een expansie lus beschouwd. De gebruikte geometrie is weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Gebruikt model

Als randvoorwaarde wordt de verplaatsing van het vrije einde van een rechte warmteleiding gebruikt, zoals berekend in [1] (Bijlage A)]. Deze verplaatsing is middels een veer vertaald in een normaalkracht. Naast deze belasting door opwarmen zijn ook de andere belastingen (interne druk en grondbelasting) aangebracht. In [3] (Bijlage C) is beschreven hoe de leiding is gemodelleerd in Ple4Win en hoe de resultaten van de berekende grondreactie worden gebruikt om een separate berekening van de omtreksrichting te kunnen maken.

4.2 Typische resultaten

Met het opgestelde leidingmodel in Ple4Win zijn vervolgens alle combinaties van leidingen zoals die ook in [1] (Bijlage A) zijn gebruikt doorgerekend. De berekende spanningen zijn vergeleken met de toelaatbare spanningen voor de betreffende buizen. Op basis daarvan zijn een aantal conclusies getrokken. De belangrijkste worden hier kort weergegeven:

- Aanleg op grotere diepte heeft twee gevolgen. Door de grotere grondweerstand nemen de leidingverplaatsingen af. Anderzijds nemen door de hogere gronddruk de materiaalspanningen toe, vooral in de isolatielaag.

- In (slappe) kleigronden is de bocht reactie niet zo groot als bij zand. Het toepassen van expansie-kussens is dan minder zinvol; de grondstijfheid is al laag en de leidingverplaatsingen zijn al groot.
- Een lagere temperatuur in de gebruiksfase resulteert in een lagere ΔT (het verschil in temperatuur bij aanleg van de leiding en de hoogste temperatuur van de leiding als deze in gebruik is) en daarmee lagere spanningen in de leiding; dit geeft de meeste mogelijkheden met betrekking tot aanleg van warmteleidingen; er is meer keuze in toe te passen materialen en er zijn minder expansievoorzieningen nodig.
- Een leiding met een geribbelde binnen- en buitenbuis heeft als voordeel dat deze van zichzelf een deel van de axiale uitzetting kan compenseren. Tevens is een stalen ribbelbuis bestand tegen een hogere temperatuur in vergelijking met een kunststof binnenbuis. De ribbelbuis heeft een complex gedrag en kan helaas niet goed worden gemodelleerd. Een nadere studie naar de modellering van dit type buis en de te gebruiken waarden voor de eigenschappen van een ribbelbuis is daarom wenselijk.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Modelling

Voor de analyse van distributie warmteleidingen zijn drie rekenmodellen opgesteld:

- Model axiaal gedrag bij intrekken in boorgat en opwarmen.
- Model voor berekenen spanningen in de omtreksrichting.
- Model equivalente leiding met alle belastingen, inclusief gedrag in bochten.

Tevens zijn de grondveren die de grond-leiding interactie schematiseren beschouwd.

Als de distributie leidingen in gebruik zijn, zijn er belastingen door opwarmen, inwendige druk, verkeersbelasting en zetting. Er kan niet een enkele sterkte berekening worden gemaakt maar er moeten meerdere berekeningen met de verschillende modellen worden gemaakt om de spanningen en vervormingen van de leidingen in beeld te brengen.

5.2 Gecombineerde berekening

Met de ontwikkelde modellen kunnen de benodigde berekeningen worden uitgevoerd. Een mogelijke aanpak bij de berekening van een bocht is:

1. bepaling uitzetting van rechte leiding bij opwarmen, hieruit volgt
 - a. verplaatsing binnenbuis, vrij einde
 - b. verplaatsing buitenbuis, vrij einde
 - c. kracht in binnenbuis
 - d. kracht in buitenbuis
 - e. schuifspanning in isolatie
2. bepaal de normaalkracht op begin bocht
3. idem voor einde bocht
4. maak hiermee een berekening met Ple4Win met een leiding met equivalente leidingeigenschappen, dit geeft
 - a. krachten in langsrichting
 - b. grondreactie in bocht
5. maak een ringberekening met de grondreactie uit 4, dit geeft
 - a. spanningen in de omtreksrichting binnenbuis
 - b. spanningen in omtreksrichting buitenbuis
 - c. spanningen in isolatielaag
6. combineer de spanningen van de verschillende berekeningen voor
 - a. binnenbuis
 - b. buitenbuis
 - c. isolatielaag
7. toets de spanningen in binnenbuis, isolatie en buitenbuis

Deze aanpak zal binnen project 2D van WarmingUp verder worden uitgewerkt.

5.3 Materiaaleigenschappen leidingen

Opvallend is dat de benodigde mechanische eigenschappen van warmteleidingen moeilijk te verkrijgen zijn. Binnen dit project zijn de benodigde leidingparameters op basis van publiek beschikbare gegevens en verstrekte gegevens zo goed mogelijk bepaald zonder de pretentie dat ze altijd juist zijn.

Onzekerheid is er met name over de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de leidingmaterialen voor lange duur en/of bij hogere temperaturen. Het verdient aanbeveling deze eigenschappen beter in kaart te brengen.

Voor ribbelbuizen is er sprake van samenwerking tussen binnenbuis, buitenbuis en isolatiemateriaal. Het aanwezige isolatiemateriaal zal de vervorming van de ribbels bij axiale belasting beperken, waardoor in axiale richting een stijver gedrag wordt verwacht vergeleken met een ribbelbuis zonder isolatie. Aanbevolen wordt om de mechanische eigenschappen van dubbelwandige ribbelbuizen nader te onderzoeken. .

Bijlage A, rapport modellering axiaal gedrag

WarmingUp 2B3

Mechanisch gedrag warmteleiding



WarmingUp 2B3
Mechanisch gedrag warmteleiding

Auteur(s)
Remco Boeije
Piet Meijers

WarmingUp 2B3

Mechanisch gedrag warmteleiding

Opdrachtgever	WarmingUp
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	WarmingUp, warmteleiding, intrekken, opwarmen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	06-07-2022
Projectnummer	11205150-003
Document ID	11205150-003-HYE-0002
Pagina's	78
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Remco Boeije, Piet Meijers	

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

Samenvatting

In dit rapport zijn axiale modelberekeningen voor distributie warmte leidingen beschreven. Zowel de aanleg als de situatie als de warmte leidingen opwarmen zijn beschouwd. Er zijn verschillende distributie warmte leidingen uitgekozen om het gedrag van deze leidingen bij verschillende scenario's te bekijken. In dit rapport zijn vier typen leidingen beschouwd:

- een stalen binnenbuis en een kunststof buitenbuis (staal-PUR-PE),
- een kunststof binnenbuis en buitenbuis (Polybuteen-Polyolefin-PE)
- een kunststof binnenbuis en buitenbuis (PEX-PUR-PE)
- een stalen binnenbuis en stalen buitenbuis, beide geribbeld

De resultaten van deze axiale berekeningen zullen door R+K consulting engineers in een separate studie worden gebruikt om sterkte berekeningen voor de gekozen warmte leidingen te maken en de uitkomsten van deze sterkte berekeningen te toetsen aan de toelaatbare waarden van de leidingen.

Het bleek lastig om voor de verschillende gekozen leidingen de mechanische leidingparameters van de verschillende leidingdelen te verkrijgen. De leiding parameters zijn vastgesteld op basis van de beschikbare informatie.

Bij de aanleg van leidingen in een horizontaal boorgat wordt de leiding ingetrokken in het boorgat. Bij het intrekken van de leiding is een "Staal-PUR-PE" leiding gunstig, omdat de stalen binnenbuis zorgt voor een beperkte verlenging van de leiding en een grote opneembare kracht. De andere leidingen vertonen bij grotere lengtes tot 200 m verlengingen in de orde van tientallen centimeters, ook kan de kracht in de andere leidingen hoog oplopen.

Bij het opwarmen van de leiding in de gebruiksfase daarentegen is het gunstig als de binnenbuis slap is en weinig uitzet. De "Staal-PUR-PE" leiding is dan ongunstig, omdat de stalen binnenbuis stijver is dan de binnenbuizen van de andere leidingtypen. Hierdoor kan bij langere leidingen de kracht in een "Staal-PUR-PE" leiding hoog oplopen.

Tot bepaalde lengte geldt: Hoe langer de leiding, hoe groter de krachten en vervormingen. Bij het ontwerp van een leidingnet wordt de lengte soms kunstmatig beperkt door het aanbrengen van expansielussen. Met een expansielus maakt de leiding haakse bochten waarmee de opbouw van krachten en vervormingen wordt doorsneden. Bij kunststof leidingen zijn de krachten bij een beperkte leiding lengte al volledig ontwikkeld, daarom hebben expansielussen geen effect bij kunststof leidingen. Voor leidingen met een stalen binnenbuis speelt de lengte wel een rol en worden expansielussen toegepast.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
2	Project gegevens	10
2.1	Algemeen	10
2.2	Leidingen	10
2.3	Ondergrond	12
2.4	Boorgang	12
2.5	Fase grondveren/berekeningstype	12
2.6	Medium temperatuur	13
2.7	Leiding lengte	13
2.8	Modelberekeningen	14
2.9	Aantal modelberekeningen	14
3	Berekeningen; model, theorie en achtergrond	15
3.1	Grondveren	15
3.1.1	Algemeen	15
3.1.2	Ref; Aanleg in sleuf	16
3.1.3	Aanleg; tijdens en direct na het boren	16
3.1.4	Eind; na het boorproces	17
3.2	Intrekken van de leiding	18
3.2.1	Algemeen	18
3.2.2	Intrekmodel	19
3.2.3	Oplossing differentiaalvergelijking; karakteristieke lengte warmteleiding	22
3.2.4	Toetsing berekeningsuitkomsten	22
3.3	Opwarmen	23
3.3.1	Algemeen	23
3.3.2	Opwarm model	23
3.3.3	Toetsing berekeningsresultaten	28
4	Berekeningsresultaten	29
4.1	Grondveren	29
4.2	Intrekken	29
4.2.1	Algemeen	29
4.2.2	Intrekken met verschillende trekkoppen	30
4.2.2.1	Voorbeeld trekkop = binnen; intrekken PE-PUR-staal (variant ID:8)	30
4.2.2.2	Voorbeeld trekkop = beide; intrekken kunststof_PUR_kunststof (variant ID:152)	32
4.2.3	Intrekken zonder of met lubricant	34
4.2.3.1	Intrekken met lubricant (calcType = aanleg)	34
4.2.3.2	Intrekken zonder lubricant (calcType = ref)	37
4.2.4	Intrekken; berekeningsmatrix	40

4.2.4.1	Intrekken; aanleg	43
4.3	Opwarmen	45
4.3.1	Algemeen	45
4.3.2	Opwarmen; invloed leidinglengte	46
4.3.2.1	Algemeen	46
4.3.2.2	PE_PUR_staal leiding	47
4.3.2.3	PE_polyoE_PE leiding	49
4.3.3	Opwarmen; invloed type leiding	51
4.3.4	Opwarmen; berekeningsmatrix	53
4.3.4.1	Opwarmen; ref	53
4.3.4.2	Opwarmen; eind	55
5	Discussie	57
5.1	Algemeen	57
5.2	Grondveren	57
5.3	Intrekken	57
5.3.1	Globaal gedrag	57
5.3.2	Verschil stalen of kunststof binnenbuis	57
5.3.3	Trekkop	58
5.4	Opwarmen	58
5.4.1	Globaal gedrag	58
5.4.2	Invloed leidingtype	58
6	Samenvatting en conclusies	61
A	Leiding data	62
B	Veergedrag boorvloeistof	63
C	Stabiliteit boorgat	65
C.1	Afmetingen	65
C.2	Verticale effectieve spanning	65
C.3	Evenwicht grondkolom boven leiding	66
D	Resultaten berekening grondveren	67
E	Resultaten berekening intrekken	68
E.1	Fase "ref" leiding PE PUR staal	68
E.2	Fase "ref" leiding PE PolyoE PB	69
E.3	Fase "ref" leiding PE PUR PEX	69
E.4	Fase "ref" leiding ribbel PUR ribbel	70
E.5	Fase "aanleg" leiding PE PUR staal	70
E.6	Fase "aanleg" leiding PE PolyoE PB	71
E.7	Fase "aanleg" leiding PE PUR PEX	71
E.8	Fase "aanleg" leiding ribbel PUR ribbel	72

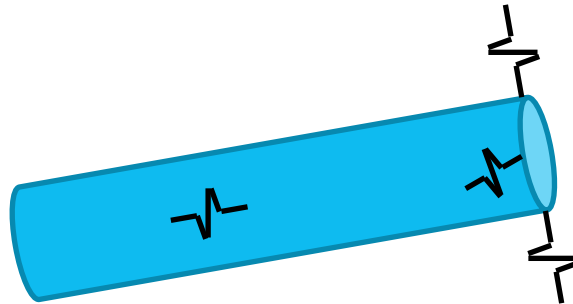
F	Resultaten berekening opwarmen	73
F.1	Fase “ref” leiding PE PUR staal	73
F.2	Fase “ref” leiding PE PolyE PB	73
F.3	Fase “ref” leiding PE PUR PEX	74
F.4	Fase “ref” leiding ribbel PUR ribbel	74
F.5	Fase “eind” leiding PE PUR staal	75
F.6	Fase “eind” leiding PE PolyE PB	75
F.7	Fase “eind” leiding PE PUR PEX	76
F.8	Fase “eind” leiding ribbel PUR ribbel	76

1 Inleiding

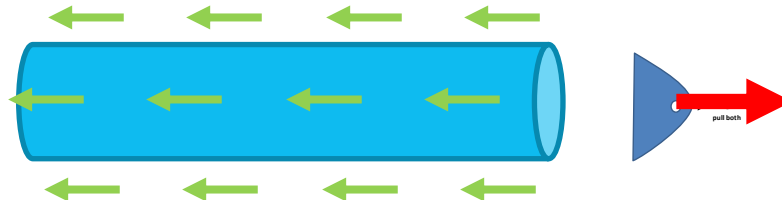
Deze deelrapportage van het Warming up project beschouwt axiale modelberekeningen van een distributie warmteleiding tijdens het aanleggen en tijdens de gebruiksfase waarbij de leiding uitzet door het opwarmen van de leiding. De grond leiding interactie staat centraal bij deze beschouwing. De beschouwing is uitgevoerd aan de hand van modelberekeningen.

Er zijn bij de axiale modelberekeningen drie aspecten bekeken:

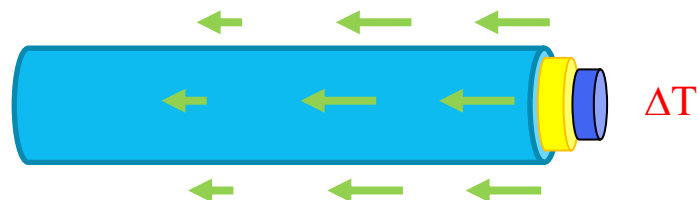
- de modellering van de ondergrond rondom een leiding door de zogenaamde grond veren (Figuur 1)
- de modellering van het gedrag van de leiding tijdens het intrekken (Figuur 2)
- de modellering van het gedrag van de leiding tijdens opwarmen (Figuur 3).



Figuur 1 Model grondveren



Figuur 2 Model intrekken



Figuur 3 Model opwarmen

De aspecten zullen worden beschreven aan de hand van axiale model berekeningen voor een aantal distributie warmte leidingen voor een aantal scenario's. De resultaten van de axiale modelberekeningen zullen worden gebruikt om leidingsterkte berekeningen te maken (waarbij ook de omtreksrichting wordt beschouwd). De resultaten van de sterkte berekeningen kunnen worden getoetst met de toelaatbare waarden van de warmteleidingen.

De uiteindelijke sterkte berekeningen van de gekozen distributie warmteleidingen voor bepaalde scenario's worden door R+K consulting engineers beschreven in een separaat rapport.

2 Project gegevens

2.1 Algemeen

In dit rapport worden een aantal distributie warmte leidingen beschouwd. De gekozen warmte leidingen behoren tot verschillende soorten leidingen die voor de distributie van warm water in de wijken worden gebruikt. Er worden modelberekeningen genaakt voor verschillende scenario's.

In de volgende paragrafen worden de uitgangspunten voor de modelberekeningen en de verschillende scenario's toegelicht

2.2 Leidingen

Leidingparameters zijn ontleend aan verschillende bronnen (zie bijlage A). Ter controle zijn de waarden van de leiding parameters zoals opgenomen in *Tabel 2.2* verzonden naar enkele producenten. Eén producent heeft daarop inhoudelijk gereageerd resulterend in enkele aanpassingen in de tabel. De betrouwbaarheid van de invoer is beperkt, zodat de resultaten in deze rapportage als indicatief beschouwd moeten worden.

De vier gekozen distributie warmte leidingen met de bijhorende parameters zijn weergegeven in de *Tabel 2.2*.

Voor de diepteligging van de leiding zijn 2 diepten beschouwd, zie *Tabel 2.1*

Tabel 2.1 Diepteligging van de leiding

ligging	niveau [m maaiveld]
ondiep	-1
diep	-2

Tabel 2.2 Leiding typen (distributie leidingen) met parameters

parameter	omschrijving	een- heid	waarde			
			1	2	3	4
			PE PUR staal	PE PolyoE+ PB	PE PUR PEX	ribbel PUR ribbel 3)
Do o	uitwendige diameter buiten buis	[m]	0,225	0,182	0,163	0,3096
Do i	uitwendige diameter binnen buis	[m]	0,114	0,110	0,110	0,218
to	wanddikte buiten buis	[m]	0,0134	0,0031	0,0032	0,02 ⁴⁾
ti	wanddikte binnen buis	[m]	0,0036	0,010	0,01	0,01 ⁴⁾
Eo	elasticiteitsmodulus buiten buis	[MPa]	1350	900	900	160 ⁴⁾
Ei	elasticiteitsmodulus binnen buis	[MPa]	210000	450	800	770 ⁴⁾
G2	glijdingsmodulus tussenlaag	[MPa]	1,1	1,1	1,1	1,1
vo	dwarscontractiecoëf. buiten buis ¹⁾	[-]	0	0	0	0
vi	dwarscontractiecoëf. binnen buis ¹⁾	[-]	0	0	0	0
v2	dwarscontractiecoëf. Tussenlaag ²⁾	[-]	0	0	0	0
γo	volumiek gewicht buiten buis	[kN/m ³]	9,5	9,5	9,3	8,3 ⁴⁾
γi	volumiek gewicht binnen buis	[kN/m ³]	78	9,4	9,63	8,7 ⁴⁾
γ2	volumiek gewicht isolatie	[kN/m ³]	0,55	0,6	0,55	0,55
γmed	volumiek gewicht medium	[kN/m ³]	10	10	10	10
σe o	vloeispanning buiten buis ⁵⁾	[MPa]	30	30	30	10
σe i	vloeispanning binnen buis ⁵⁾	[MPa]	400	17	30	10
τ2; ax di	afschuifsterkte axiaal grens iso/binnen ⁵⁾	[MPa]	0,12	0,12	0,12	0,12
pull	lineaire uitzettingscoëf. binnen buis	[1/°K]	12.10 ⁻⁶	130.10 ⁻⁶	180.10 ⁻⁶	50.10 ⁻⁶
	intrekken, kracht op binnen/buiten buis	[-]	binnen	beide	beide	beide
F1 u	max ax kracht binnenbuis $F1u = \sigma_{e,i} \frac{\pi}{4} (D_{o,i}^2 - (D_{o,i} - 2t_i)^2)$	[kN]	499	53	94	65
F2 u	max ax afschuifkracht isolatie $F2u = \tau_{2,ax} \pi D_{o,i}$	[kN/m]	43	41	41	82
F3 u	max ax kracht buitenbuis $F3u = \sigma_{e,o} \frac{\pi}{4} (D_{o,o}^2 - (D_{o,o} - 2t_o)^2)$	[kN]	267	52	48	182
<p>1) waarde nul voorkomt dwarscontractie en is daarmee in lijn met §2.8</p> <p>2) waarde nul gekozen wegens de grote onzekerheid in de waarde (extra onzekerheid: invloed: tijd, belastingsniveau en aanhechting). Een waarde gelijk aan 0 is een veilige aanname omdat deze waarde altijd mogelijk is.</p> <p>3) De waarden voor de binnen- en buitenbuis zijn een combinatie van het geplooid buismateriaal en een gewogen bijdrage van het isolatiemateriaal en de buitenlaag.</p> <p>4) Betreft equivalente waarde.</p> <p>5) Sterkte parameters gebruikt voor nabewerking van de berekeningen. Dit geeft de weergave van z.g. "unity checks" in tabellen in deze rapportage. Daarom is werkelijke waarde minder relevant en dus indicatief.</p>						

2.3 Ondergrond

Voor de ondergrond worden twee typen grond beschouwd: zand en klei. De gebruikte grondparameters zijn samengevat in *Tabel 2.3*.

Tabel 2.3 Grondparameters

parameter	omschrijving	eenheid	grondsoort	
			zand	klei
γ'	effectief volumiek gewicht boven freatisch niveau	[kN/m ³]	18	17
γ'_{sat}	effectief volumiek gewicht onder freatisch niveau	[kN/m ³]	10	7
a	adhesie, maximale schuifspanning buis/grond	[kPa]	0	5
δ	wrijvingshoek buis/grond	[deg]	20	10
c	cohesie	[kPa]	0	5
φ	hoek van inwendige wrijving	[deg]	32,5	17,5

2.4 Boorgang

Zowel de aanleg van een leiding in een sleuf als met een horizontale boring is mogelijk. Als voor de aanleg van de leiding voor een boring is gekozen, is aangenomen dat een boorvloeistof is gebruikt. In *Tabel 2.4* zijn de in de modelberekeningen gebruikte boorvloeistof parameters weergegeven.

Tabel 2.4 Parameters boorvloeistof

Boorvloeistof parameters			
parameter	omschrijving	eenheid	waarde
f_2	wrijving boorvloeistof/leiding	[kPa]	0,05
f_3	wrijvingsfactor grond/leiding met smering	[-]	0,2
γ	volumiek gewicht	[kN/m ³]	11
τ	zwich spanning/yield stress	[kPa]	0,014
c	cohesie gerijpte boorvloeistof	[kPa]	1
δ	wrijvingshoek gerijpte boorvloeistof	[deg]	8,75
p	boorvloeistof overdruk	[kPa]	2
E	elasticiteitsmodulus gerijpte boorvloeistof	[kPa]	200

Bij het boorproces is het boorgat iets groter dan de leidingdiameter. Dit is de annulus (In het Engels "overcut").

Tabel 2.5 Boring annulus

Boring				
parameter	omschrijving	eenheid	waarde	
			klein	groot
lovercut	annulus, verschil in straal tussen boorkop en leiding	[m]	0,01	0,05

2.5 Fase grondveren/berekeningstype

Voor de modellering van de grond rondom de leiding als "grondveer" zijn er drie fasen/berekeningstypen onderscheiden, zoals aangegeven in *Tabel 2.6*.

Tabel 2.6 Berekening grondveren fase

Fase/berekeningstype grondveren	
omschrijving	waarde
Aanleg in sleuf, als referentie tijdens en direct na het boren geruime tijd na het boorproces (dus gerijpte boorvloeistof)	ref aanleg eind

2.6 Medium temperatuur

Er is een relatief brede temperatuur band gebruikt voor de modelberekeningen (voor de huidige kunststofbuizen zal de hoge temperatuur materiaaltechnische problemen geven, welke niet in dit rapport zijn beschouwd):

Tabel 2.7 Temperatuur medium

Medium temperatuur t.b.v. modelberekening	
omschrijving	ΔT temperatuur verschil binnenbuis en buitenbuis [°K]
Lage temperatuur	40
hoge temperatuur	90

2.7 Leiding lengte

Voor de modelberekeningen is de lengte van de leiding relevant. Voor de modellering kan uitgegaan worden van een vrij uiteinde aan beide zijden. Bij de berekening van de effecten door opwarming hoeft daarom wegens symmetrie alleen een halve leidinglengte gemodelleerd te worden, waarbij op de symmetrie-as de juiste randvoorwaarde wordt gebruikt. De gebruikte lengten van de hele leiding staan in Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Leiding lengten

Leiding lengte t.b.v. modelberekening		
omschrijving	model lengte [m]	
	berekening= intrekken	berekening= opwarmen
1 kort; vrije lengte = 20 m	20	20/2=10
2 midden; vrije lengte = 50 m	50	50/2=25
3 lang; vrije lengte = 200 m	200	200/2=100

2.8 Modelberekeningen

Voor de modellering van de vervorming van en krachten in de leiding zijn er twee berekeningstypen onderscheiden, zoals aangegeven in *Tabel 2.9*:

Tabel 2.9 Model berekening leiding, fase

Fase/berekeningstype vervorming van en krachten in de leiding	
omschrijving	waarde
Intrekken; de buis wordt met een trekkop in het boorgat getrokken.	pull
Opwarmen; de binnenbuis wordt opgewarmd door warm medium	warm

Er wordt geen inwendige druk in rekening gebracht in de model berekeningen. De uitzetting door opwarmen in omtreksrichting wordt in de berekening niet meegenomen.

2.9 Aantal modelberekeningen

Het combineren van de verschillende opties leidt tot een aantal scenario's voor de 4 gekozen leidingen. Het aantal berekeningen is te zien in *Tabel 2.10*.

Tabel 2.10 Berekeningsmatrix

item	berekeningsvarianten		
	tabel	grond-veren berekeningen aantal n [-]	leiding berekeningen aantal n [-]
leidingstypen	<i>Tabel 2.2</i>	4	4
<i>Grondparameters</i>	<i>Tabel 2.3</i>	2	2
Diepteligging van de leiding	<i>Tabel 2.1</i>	2	2
<i>Parameters boorvloeistof</i>	<i>Tabel 2.4</i>	1	1
<i>Boring annulus</i>	<i>Tabel 2.5</i>	2	2
<i>Berekening grondveren fase</i>	<i>Tabel 2.6</i>	3	3
<i>Leiding lengten</i>	<i>Tabel 2.7</i>	-	3
<i>Temperatuur medium</i>	<i>Tabel 2.8</i>	-	2
<i>Model berekening leiding, fase</i>	<i>Tabel 2.9</i>	-	(2)
totalen		96	576 (1152)

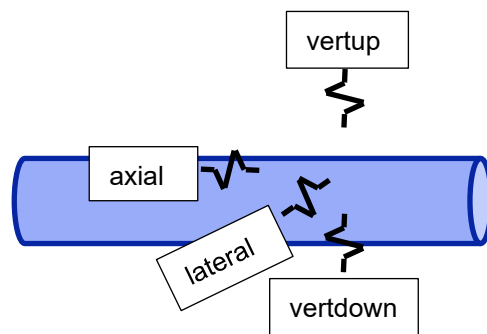
3 Berekeningen; model, theorie en achtergrond

3.1 Grondveren

3.1.1 Algemeen

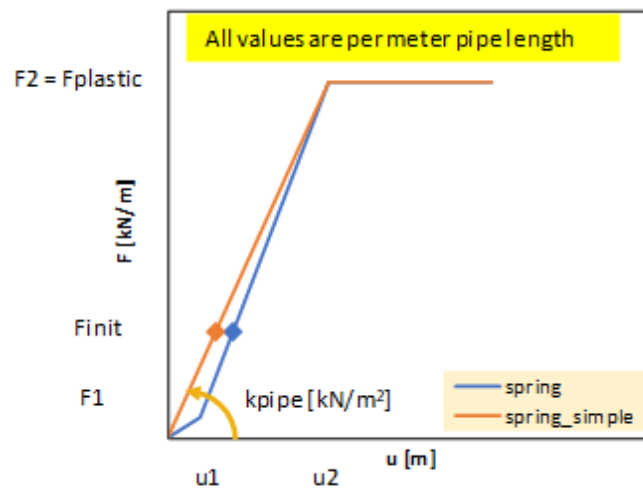
Met het intrekken van de leiding in het boorgat of het opwarmen van de leiding verplaatst de leiding zich ten opzichte van de grond. Door verkeersbelastingen of grondzettingen verplaatst de grond ten opzichte van de leiding. In beide gevallen leidt dit verschil in verplaatsing tot de opbouw van een kracht. Deze grondleiding interactie wordt geschematiseerd door een veer.

De verschillende grondveren zijn weergegeven in Figuur 4



Figuur 4 Grondveren richtingen

Voor de relatie tussen de indrukking en kracht (constitutieve relatie) is het gedrag volgens Figuur 5 bepaald.



Figuur 5 Grondveren kracht verplaatsing gedrag (constitutieve relatie)

Voor de grondveren zijn er, conform paragraaf 2.5 Tabel 2.6, 3 fasen (varianten). De volgende drie paragrafen beschrijven deze 3 varianten.

3.1.2 Ref; Aanleg in sleuf

Deze berekeningen voor de aanleg in een sleuf zijn uitgevoerd en hier gerapporteerd omdat:

- *Referentie*; de aanleg in sleuf is de traditionele aanlegmethode en daarmee handig om als referentie mee te nemen
- *Bovengrens*; bij een boorproces wordt de grond geroerd en wordt veelal gebruik gemaakt van een boorvloeistof. Dit zal zorgen voor slappere grondveren. In geen geval zullen de grondveren stijver worden, waarmee de ref berekening tevens een maat is voor de maximaal te bereiken veerwaarden.

Voor de berekening van de grondveren is gebruik gemaakt van de Amerikaanse norm:

- American Lifelines Alliance, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, July 2001 (with addenda through February 2005)

Er is afgeweken van de Nederlandse norm, omdat de structuur van bovenstaande norm consistent is en omdat de veerstijfheden volgens de Nederlandse norm niet altijd juist zijn.

3.1.3 Aanleg; tijdens en direct na het boren

Algemeen

Tijdens en direct na het boren is er een boorgang die gevuld is met boorvloeistof. De boorkop heeft een grotere straal dan de leiding. Dit verschil is de zogenaamde annulus of "overcut". In de boorvloeistof kan de leiding met een relatief kleine kracht verplaatst worden, totdat de annulus is overbrugd.

Grootte annulus

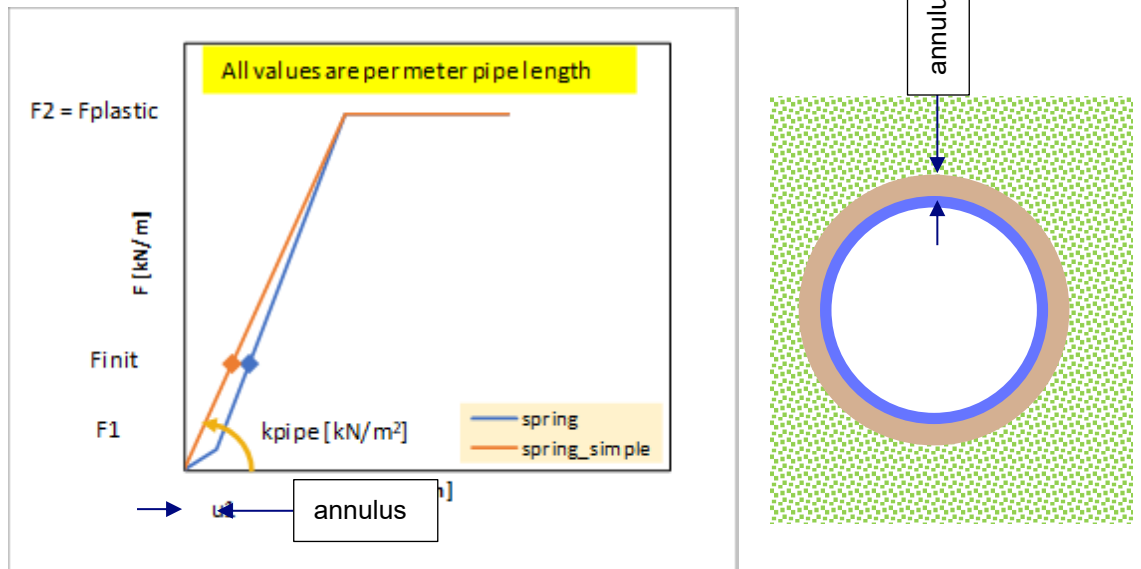
In principe volgt de grootte van de annulus direct uit het boorproces. Het is echter niet automatisch zo dat de leiding in het midden van het boorgat ligt. Een complicatie kan ontstaan als het boorgat niet stabiel is:

- Aan weerszijden van de leiding wordt aangenomen dat de annulus dezelfde grootte heeft. Er wordt dus aangenomen dat de leiding in midden van het boorgat ligt en blijft liggen. In de praktijk zal dat niet het geval zijn. Maar er is geen betere keuze mogelijk.
- Aan de boven en de onderzijde van de leiding zal de annulus veranderen doordat de leiding opdrijft of zinkt in het boorgat. Een verdere complicatie is dat de grond boven het boorgat kan bezwijken. In dat geval verdwijnt de verticale annulus.

Details van deze berekening zijn gegeven in Bijlage C.

Gecombineerde veerstijfheid

Bij verplaatsingen loodrecht op de leidingas bestaat de veerstijfheid uit twee takken. Allereerst wordt de boorvloeistof samengedrukt c.q. verdrongen. Dit geeft een lage stijfheid. Vervolgens ligt de leiding tegen de boorgatwand en geeft een verdere verplaatsing een indrukking van de boorgatwand. Hiervoor geldt de standaard grondveerstijfheid. In Figuur 6 is dit weergegeven.



Figuur 6 Grondveren kracht verplaatsing gedrag (constitutieve relatie)

De stijfheid bij het contact met de boorgatwand is analoog aan het gedrag bij de “ref” grondveren volgens paragraaf 3.1.2. De veren van de boorgatwand en van de boorvloeistof staan in serie. Het gedrag van de boorvloeistof is afgeleid en beschreven in Bijlage B.

Ook bij een belasting in axiale richting staan de veren van de boorgatwand en van de boorvloeistof staan in serie. Een verschil is dat in axiale richting de stijfheid van de boorvloeistof wegvalt bij het bereiken van de maximale kracht (=overschrijden zwichtspanning), in loodrechte richting wordt de stijfheid van de boorvloeistof oneindig bij het bereiken van de maximale verplaatsing (=dichtdrukken annulus). Een voorbeeld van beide richtingen is beschreven in Bijlage B.

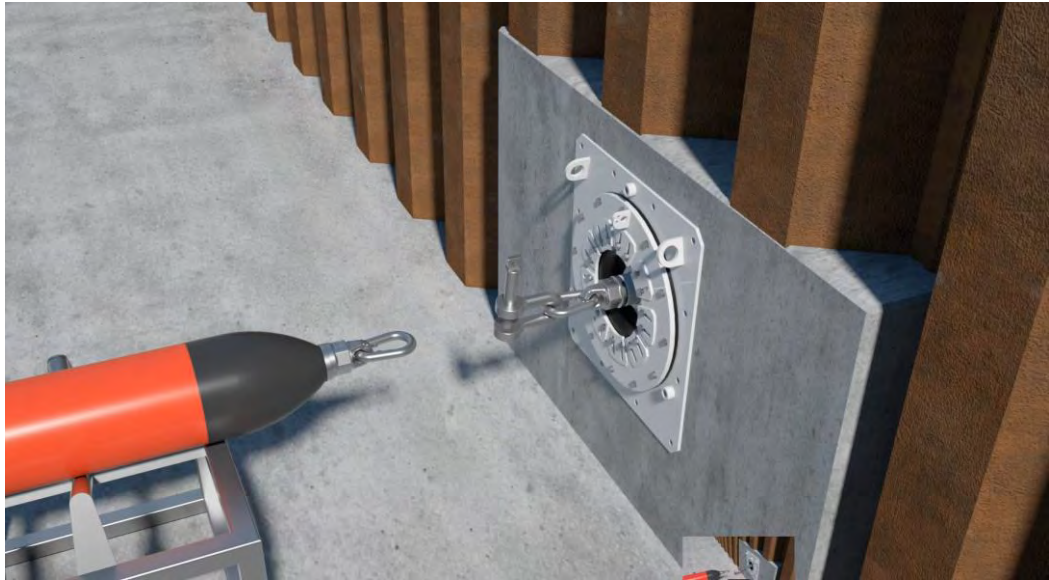
3.1.4 Eind; na het boorproces

Na het boorproces zal de boorvloeistof “rijpen”. Waar het tijdens het boren een gedrag als een vloeistof heeft, verandert dat in de loop van de tijd in een klei achtig materiaal. Dit geeft een hogere schuifweerstand.

3.2 Intrekken van de leiding

3.2.1 Algemeen

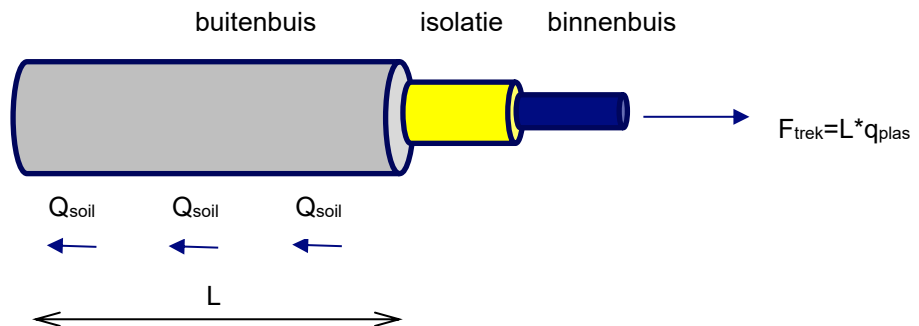
Bij een boring wordt de leiding ingetrokken nadat de boorgang gereed is. Bij traditionele leidingen is dit intrekproces te toetsen op basis van de trekspanning die volgt uit de intrekkracht gedeeld door de buisdoorsnede. Warmteleidingen bestaan uit een binnenbuis isolatielaag en een buitenbuis, waarbij de isolatielaag zorgt voor de interactie tussen binnenbuis en buitenbuis. Hierdoor zal de trekkracht zich niet gelijkmatig over de doorsnede verdelen waarmee het krachterspel complexer is.



Figuur 7 Intrekken leiding

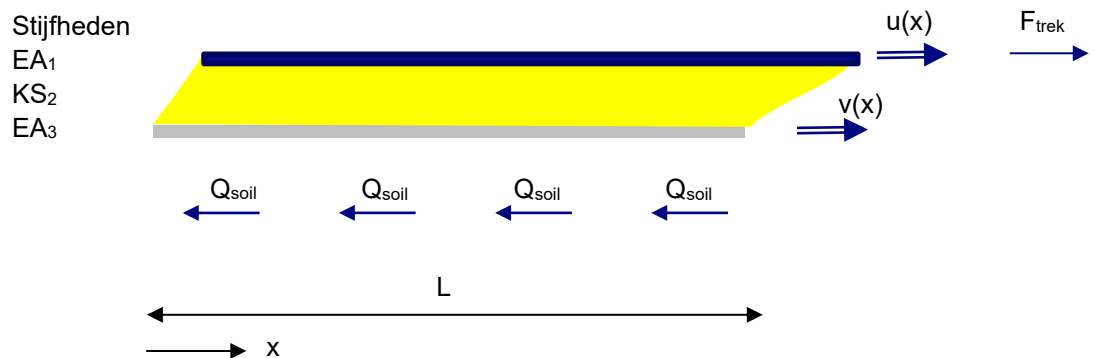
3.2.2 Intrekmodel

Voor het intrekken van de leiding is een model gemaakt. De externe krachten zijn weergegeven in Figuur 8. De grond wordt gemodelleerd met een plastische bezwijk spanning. Deze spanning is berekend in de voorgaande paragraaf en gerapporteerd in de tabel van Bijlage D kopje "axial F2 [kN/m]". In Figuur 8 grijpt de trekkracht aan op de binnenbuis. Het is ook mogelijk dat de trekkracht aangrijpt via een koppeling waarin de binnen- en buitenbuis gefixeerd zijn (zie Tabel 2.2 item "intrekken leiding, kracht op binnen/buiten buis").



Figuur 8 Intrekmodel externe krachten intrekken leiding

Voor de verdeling van de inwendige krachten worden de binnen- en buitenbuis gemodelleerd als een op extensie belaste staaf, dus met een stijfheid EA (elasticiteitsmodulus maal doorsnede). Het isolatie materiaal wordt gemodelleerd als afschuiflaag, met stijfheid KS₂ = afschuifkracht/afschuifverplaatsing. Dit is weergegeven in Figuur 9, waarbij de buis is "open geklapt".



Figuur 9 Intrekmodel voor intrekken leiding

Voor dit systeem is de volgende differentiaal vergelijking op te stellen:

$$\begin{aligned}
 EA_1 \ddot{u} + KS_2 (v - u) &= 0 \\
 EA_3 \ddot{v} + KS_2 (u - v) - q_{soil} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Deze differentiaalvergelijkingen volgen uit de evenwichtsbeschouwing van een deeltje van de leiding. Voor de binnenbuis geeft dit:

$$dN - T \cdot dx = 0 \Rightarrow dN/dx - T = 0 \tag{2}$$

Met:

- dN verandering in normaalkracht
- T schuifkracht in isolatiemateriaal

Het verband tussen de schuifkracht en de (verschil-)verplaatsing van binnen- en buitenbuis is

$$T = KS_2 \cdot (u - v) \quad (3)$$

Het verband tussen kracht en rek is

$$N = EA_1 \cdot \varepsilon = EA_1 \cdot du/dx \quad (4)$$

Differentiëren hiervan geeft

$$\frac{dN}{dx} = EA_1 \cdot d^2u/dx^2 \quad (5)$$

Invullen hiervan in vergelijking (2) geeft

$$EA_1 \cdot \frac{d^2u}{dx^2} = KS_2 \cdot (u - v) \quad (6)$$

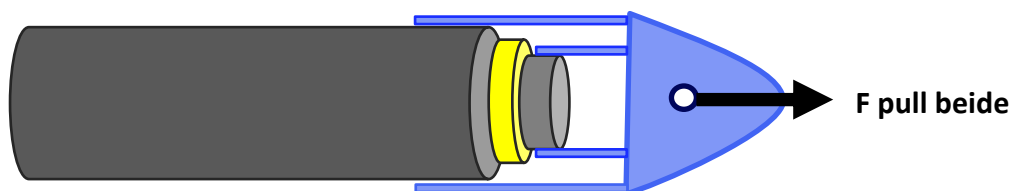
Voor de buitenbuis verloopt de afleiding van de differentiaalvergelijking op identieke wijze.

Voor dit systeem met 2 gekoppelde 2^e orde differentiaalvergelijking gelden bij een trekkraft die aangrijpt op de binnenbuis de volgende $2 \times 2 = 4$ randvoorwaarden:

- Linkerzijde ($x = 0$)
 - Geen verplaatsing buitenbuis $v(0) = 0$
 - Geen rek binnenbuis $u'(0) = 0$
 - Rechterzijde ($x = L$, zijde trekkraft)
 - Geen rek buitenbuis $v'(L) = 0$
 - Voorgescreven rek binnenbuis $u'(L) = F/EA_1 = q_{\text{soil}} \cdot L/EA_1$
- (7)

De randvoorwaarde voor de buitenbuis aan de linkerkzijde betekent dat de verplaatsingen worden gegeven ten opzichte van de linkerkzijde van de buitenbuis. De berekende verplaatsingen bij intrekken zijn daarmee relatief en niet absoluut. De randvoorwaarde voor de binnenbuis aan de linkerkzijde volgt uit het gegeven dat de binnenbuis daar onbelast is, en dus een rek van nul heeft.

De drie buizen met een kunststof binnenbuis of een geribbelde binnenbuis vertonen een significant slapper gedrag dan de traditionele buizen met een stalen binnenbuis. Voor dit type buizen is het nodig om niet alleen aan de binnenbuis, maar aan beide buizen te trekken. In Tabel 2.2 is dit opgenomen onder item "pull" als "beide".



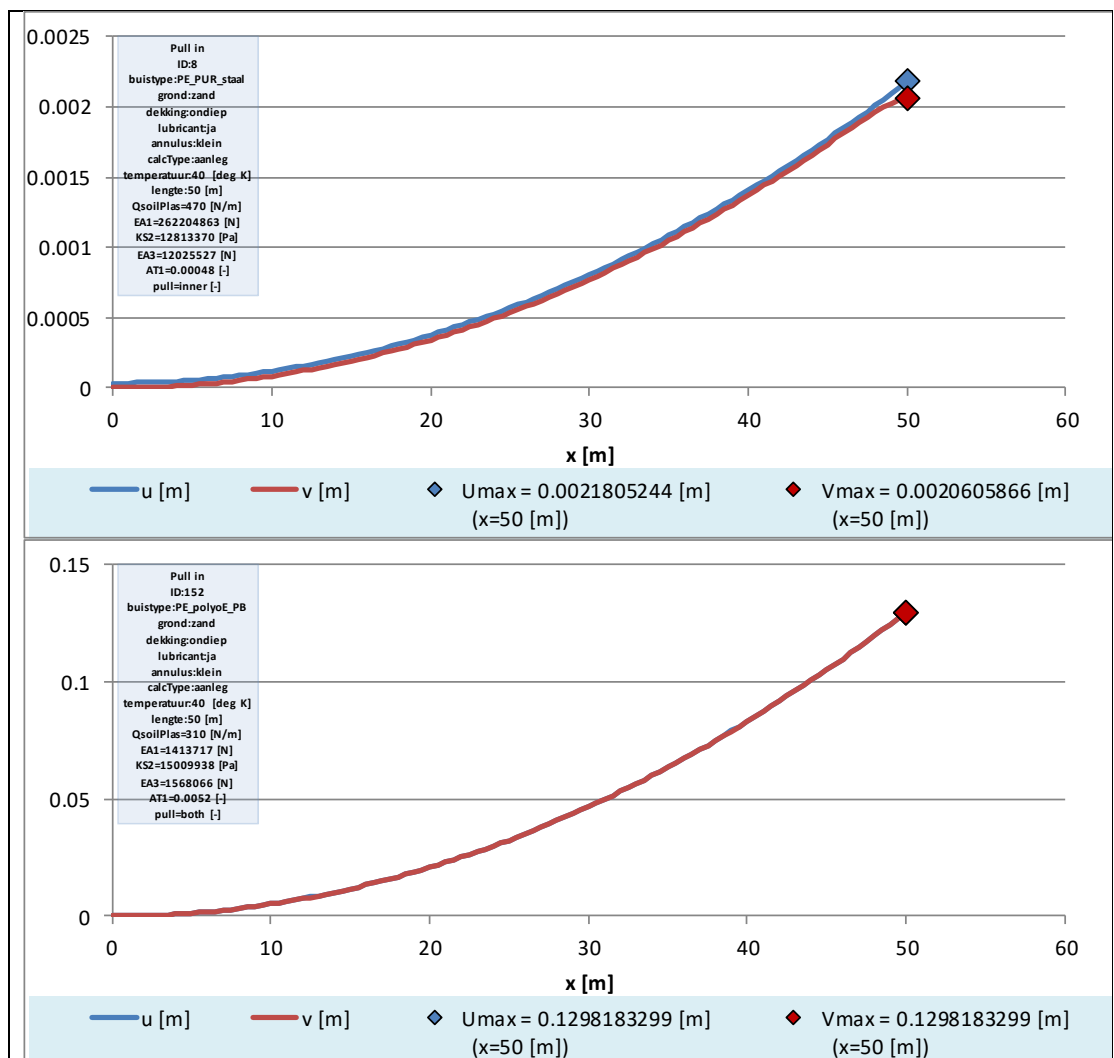
Figuur 10 Model met trekkop voor kunststof leidingen

Als de trekkraft aangrijpt op de binnen- en buitenbuis gelden voor $x=L$ andere randvoorwaarden. Voor de linkerkzijde gelden de eerder genoemde randvoorwaarden. Dit geeft als set randvoorwaarden:

- Linkerzijde ($x = 0$)
 - Geen verplaatsing buitenbuis $v(0) = 0$
 - Geen rek binnenbuis $u'(0) = 0$
- Rechterzijde ($x = L$, zijde trekkracht) (8)
 - Verplaatsing binnenbuis en buitenbuis gelijk $u(L) = v(L)$
 - Som krachten in binnenbuis en buitenbuis is gelijk aan de grondweerstand: $EA_1 \cdot u'(L) + EA_3 \cdot v(L) = q_{\text{soil}} \cdot L$

Zowel voor de situatie dat alleen aan de binnenbuis wordt getrokken als voor de situatie waarbij de kracht op beide buizen aangrijpt is een analytische oplossing beschikbaar. De oplossing daarvan is met een excel spreadsheet uitgewerkt, waarbij ook de afgeleide resultaten zoals rekken en krachten zijn opgenomen.

In Figuur 11 zijn voorbeelden van de oplossing van differentiaalvergelijking (1) opgenomen. De figuren betreffen twee scenario's die zijn aangegeven met een ID nummer. De bovenste figuur laat de axiale verplaatsing van een Staal PUR PE leiding zien. Zowel de verplaatsing van de binnen buis (u) als de verplaatsing van de buiten buis (v) is weergegeven. In de onderste figuur is een scenario voor intrekken van een kunststof binnenbuis weergegeven. Bij de kunststof binnen buis wordt er aan beide buizen tegelijkertijd getrokken.



Figuur 11 Vervormingslijnen voor een trekpop die respectievelijk alleen de binnenbuis/beide buizen trekt

3.2.3 Oplossing differentiaalvergelijking; karakteristieke lengte warmteleiding

In de oplossing van de differentiaalvergelijking (1) ontstaat een lengte die kan worden gezien als de karakteristieke lengte van een warmteleiding, analoog aan de slingerlengte van een verend ondersteunde ligger:

$$L_{\text{kar}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{KS_2}{EA_1} + \frac{KS_2}{EA_3}}} \quad (9)$$

Uit (9) volgt dat de karakteristieke lengte kleiner wordt als de stijfheid van het isolatie materiaal (KS_2) toeneemt.

Uit (9) volgt dat de karakteristieke lengte kleiner wordt als kleinste axiale stijfheid van een buis (kleinste EA van binnen- en buitenbuis) afneemt.

Voorbeeld PE_PUR_staal (ID=8):

De stijfheid van de binnenbuis is $EA_1=262$ kN

De afschuifstijfheid van het isolatiemateriaal is $KS_2=13$ kPa

De stijfheid van de buitenbuis is $EA_3=12$ kN

De karakteristieke lengte wordt gedicteerd door KS_2 en de kleinste axiale buisstijfheid, dus EA_3 .

Dit geeft:

$$L_{\text{kar}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{KS_2}{EA_1} + \frac{KS_2}{EA_3}}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{13}{12}}} \approx 1 \text{ [m]} \quad (10)$$

Net als bij de slingerlengte van een verend ondersteunde ligger is een dergelijke lengte niet direct in de resultaten terug te zien. Het is een vergelijkingsmaat voor de afstand waarover processen zich ontwikkelen. In dit geval is dat dus in de orde van een meter.

Voor dit buistype geeft paragraaf 4.3.2.2 de grafische weergave van de berekeningsresultaten. Die zijn in lijn met de lengte van 1 m uit vergelijking (10).

3.2.4 Toetsing berekeningsuitkomsten

In de modelberekeningen is geen gebruik gemaakt van de sterkte van de materialen van de leidingen. Daarmee zijn de berekeningen onafhankelijk van de sterkteparameters van de leidingen.

Voor een objectieve vergelijking van de resultaten van de modelberekeningen zijn UC (Unity Check) waarden bepaald op basis van de grenswaarden uit *Tabel 2.2*.

3.3 Opwarmen

3.3.1 Algemeen

Bij het opstarten van een warmtenet worden de leidingen voor de eerste keer opgewarmd. De leidingen van een warmtenet zetten uit bij verwarming. Als de leiding vrij uitzet, is het gevolg dat de leiding wat langer wordt, maar er ontstaan geen spanningen in de leiding. Dit volgt uit ook uit de onderstaande basis vergelijkingen:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{mech}} + \varepsilon_{\text{ther}}$$

$$\sigma = E\varepsilon_{\text{mech}}$$

met :

ε_{tot} totale rek

$\varepsilon_{\text{mech}}$ rek door spanning

$\varepsilon_{\text{ther}}$ rek door temperatuur

σ spanning

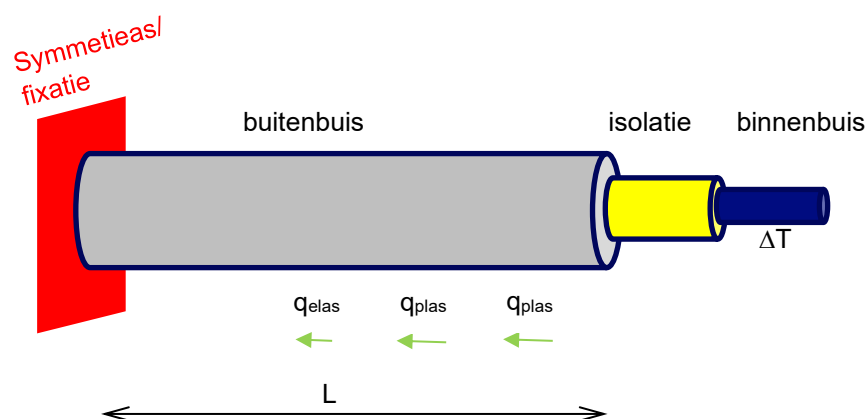
E elasticiteitsmodulus

(11)

Bij vrij uitzetten is er geen spanning ($\sigma=0$) en volgt $\varepsilon_{\text{mech}} = 0$. Maar er is wel een rek ($\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{ther}}$). Dat lijkt strijdig met de gebruikelijke manier waarop vergelijking (3) wordt geschreven, $\sigma = \varepsilon E$, waarbij de rek direct volgt uit de spanning. Deze gebruikelijke schrijfwijze vereist echter dat er geen temperatuur invloed is, wat inderdaad vrijwel altijd juist is, maar niet bij opwarming van warmteleidingen.

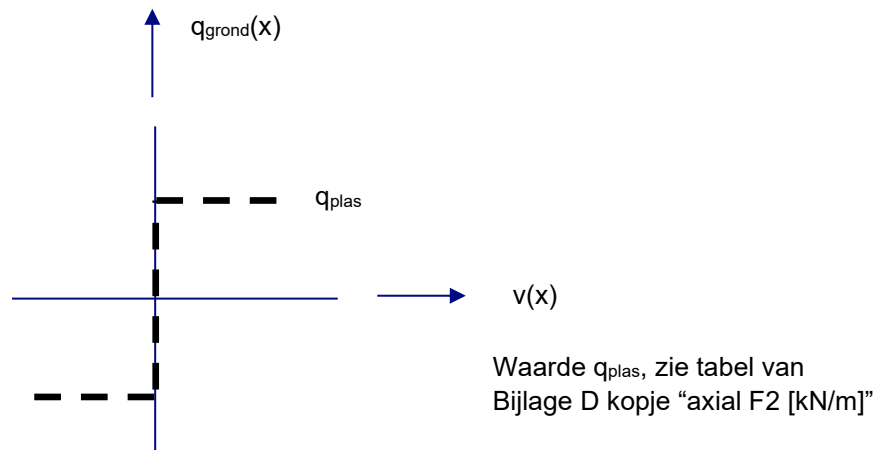
3.3.2 Opwarm model

Voor het uitzetten van de leiding door opwarmen is een model gemaakt. De externe krachten zijn weergegeven in Figuur 12. De figuur lijkt op Figuur 8 "Intrekmodel externe krachten intrekken leiding". Naast de belasting is een belangrijk verschil met intrekken dat de grond reactie kracht niet langs de hele leiding lengte ontwikkeld is tot de plastische kracht q_{plas} . Aan de linkzijde is een symmetrie as/fixatie getekend. Voor een leiding met vrije uiteinden is dit de symmetrie as, dus het midden van de leiding.



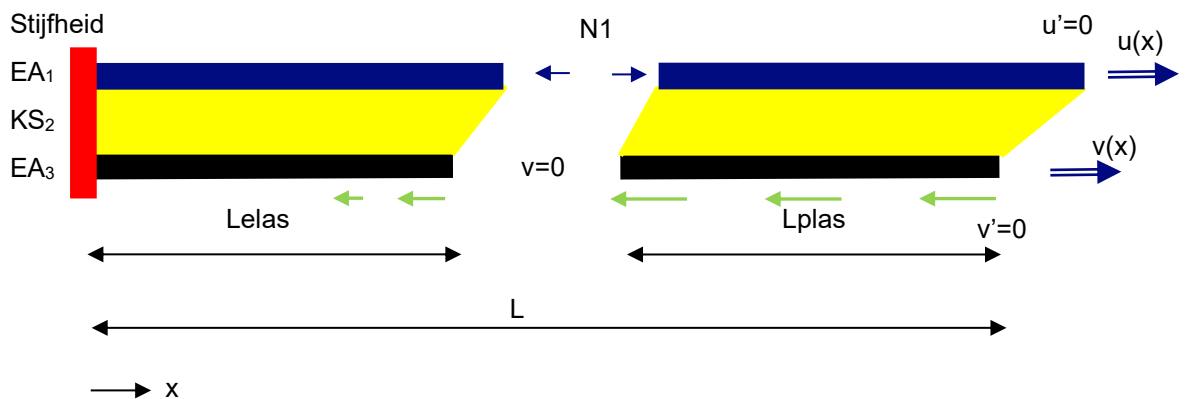
Figuur 12 Opwarm model met externe krachten bij opwarmen leiding

De grond wordt gemodelleerd met een plastische bezwijk spanning, met het constitutieve gedrag volgens Figuur 13.



Figuur 13 Mechanica model grond veer

Voor de verdeling van de krachten worden de binnen- en buitenbuis gemodelleerd als een op extensie belaste staaf, dus met een stijfheid EA (elasticiteitsmodulus maal doorsnede). Het isolatie materiaal wordt gemodelleerd als afschuiflaag, met stijfheid $KS_2 =$ afschuifkracht/afschuifverplaatsing. Dit leiding model is analoog aan het model voor het intrekken van de leiding uit de voorgaande paragraaf. De belasting en de krachten zijn uiteraard wel anders, het mechanica model is weergegeven in Figuur 14, waarbij de buis wederom is “opengeklapt”.



Figuur 14 Mechanica model opwarmen leiding

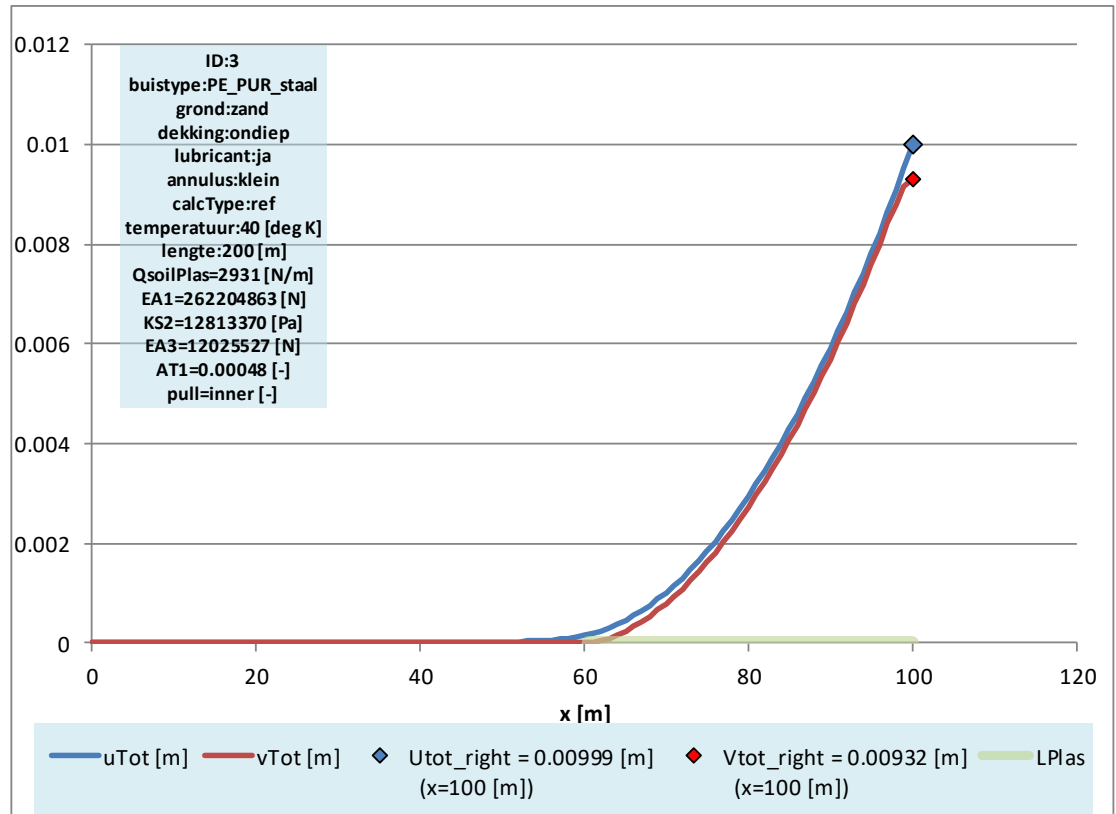
De oplossing is in eerste instantie bepaald met het EEM programma Tilly dat is ontwikkeld door de TU Delft. Met een excel spreadsheet worden de berekeningen aangestuurd en de berekeningsresultaten uitgewerkt tot figuren. Buiten dit project is simultaan een analytische oplossing bepaald, welke ook ontsloten is met een excel spreadsheet. Lopende het project bleek dat de numerieke onnauwkeurigheid van een EEM oplossing storend was, waarna uiteindelijk (vrijwel) alle berekeningen met een analytische oplossing zijn gemaakt.

Op de volgende pagina is de oplossing van differentiaalvergelijking (1) met verwerking van de rek door temperatuursverandering en de geldende rek- en overgangsvoorwaarden weergegeven voor variant ID=3. Dit is, op de grondweerstand na (ref i.p.v. aanleg), dezelfde variant als gebruikt in paragraaf 3.2 “Intrekken”. Opgemerkt wordt dat dit een staal in plastic variant is met een (halve) lengte van 100 m en een opwarming van 40 graden. De

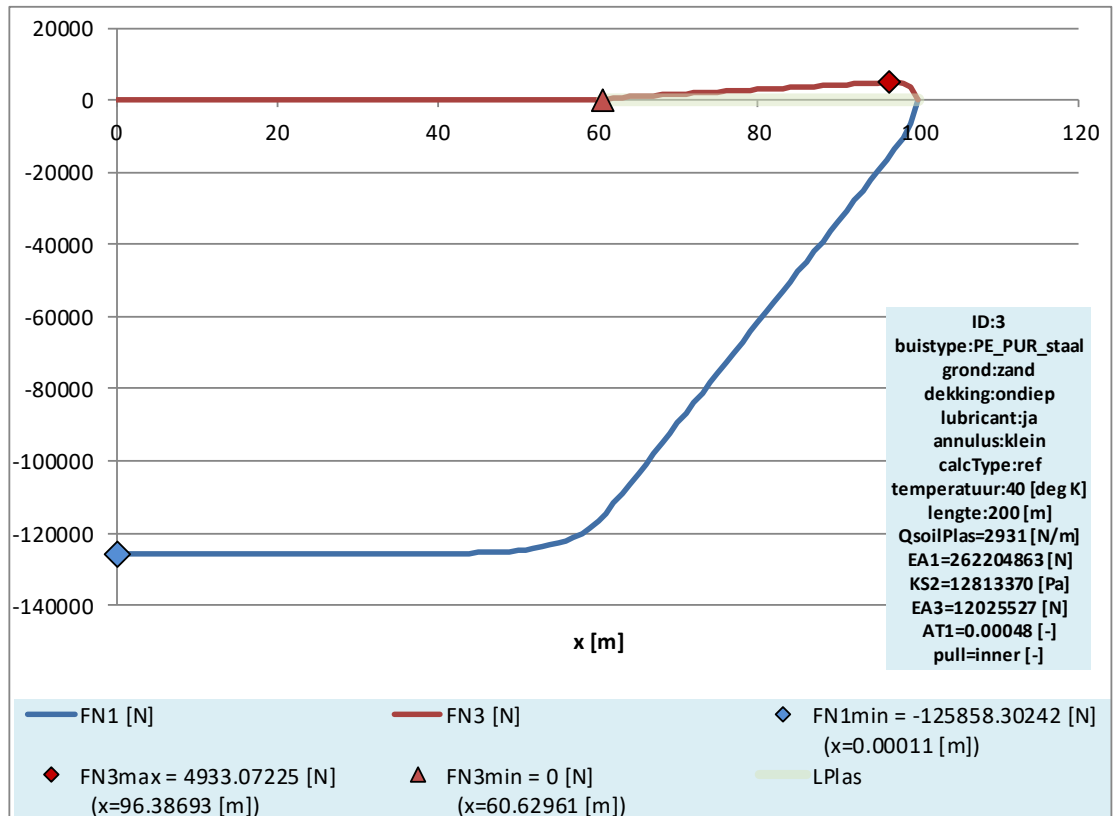
grondveren zijn gebaseerd op een aanleg in sleuf. De motivatie om deze resultaten te tonen is:

- Bij deze grondveren is langs een deel van de leiding de plasticiteit niet volledig ontwikkeld, waarmee inzicht wordt verkregen in het model.
- De grondparameters conform "ref" zijn een bovengrens voor de maximale grondsterkte bij speciale boorvloeistoffen.
- De overeenkomst met de voorgaande paragraaf.

Conform Tabel 2.10 wijkt de grondveernummering af, de corresponderende grondveer variant is 1. Voor Figuur 15 en Figuur 16 geldt wederom dat de blauwe lijn de binnen buis is en de rode lijn de buiten buis en. De gele lijn (Figuur 17) is het isolatie materiaal.



Figuur 15 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3 verplaatsingen



Figuur 16 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3 normaalkrachten

In Figuur 16 is te zien dat de kracht in de binnenbuis (blauwe lijn) de maximale waarde heeft bereikt bij $x=0$. Bij een lange leiding wordt de uitzetting volledig verhinderd door de grondweerstand. In dat geval volgt de normaalkracht eenvoudig uit de thermisch rek en mechanische rek die gelijk zijn maar tegengesteld van teken. Dit geeft:

$$N_{1;L=\infty} = EA_1 * \alpha \Delta T_1$$

waarin:

- E elasticiteitsmodulus [Pa] (12)
- A doorsnede (binnenbuis) [m²]
- α uitzettingscoëfficiënt [-]
- ΔT temperatuur toename binnenbuis [°K]

Invullen van de waarden uit de figuren geeft:

$$N_{1;max} = EA\alpha\Delta T = 262205 * 0,00048 = 125,86 \text{ [kN]} \quad (13)$$

Dit is gelijk aan de waarde van 125858 N zoals weergegeven in Figuur 16.

In Figuur 15 is te zien dat nabij $x=0$ de binnenbuis (blauwe lijn) geen verplaatsing heeft. Dit correspondeert met de bovengenoemde fixatie.

De verplaatsing van de binnen- en buitenbuis loopt redelijk gelijk op. De blauwe lijn ligt steeds over of boven de rode lijn. Dat betekent dat de binnen buis iets naar rechts verschuift ten opzichte van de buitenbuis. Dat is ook logisch omdat de binnen buis verlengt door de opwarming en daarmee de "aandrijving" is. Over het linkse deel kent de buitenbuis geen verplaatsing, de overige 39 m (zie Bijlage F.1 ID=3 LPlas=39.37 [m]) leiding ondergaat

voldoende grondweerstand om de leiding (vrijwel) te fixeren. Deze fixatie lengte is bekend van “standaard” enkelwandige buizen. Voor die buizen volgt de fixatie lengte eenvoudig uit de maximale normaalkracht van formule (12) gedeeld door de plastische grondweerstand:

$$L_{fix} = \frac{EA_1 * \alpha \Delta T}{q_{soil;plas}} \quad (14)$$

waarin:

$q_{soil;plas}$ plastische grondweerstand per leidinglengte [N/m]

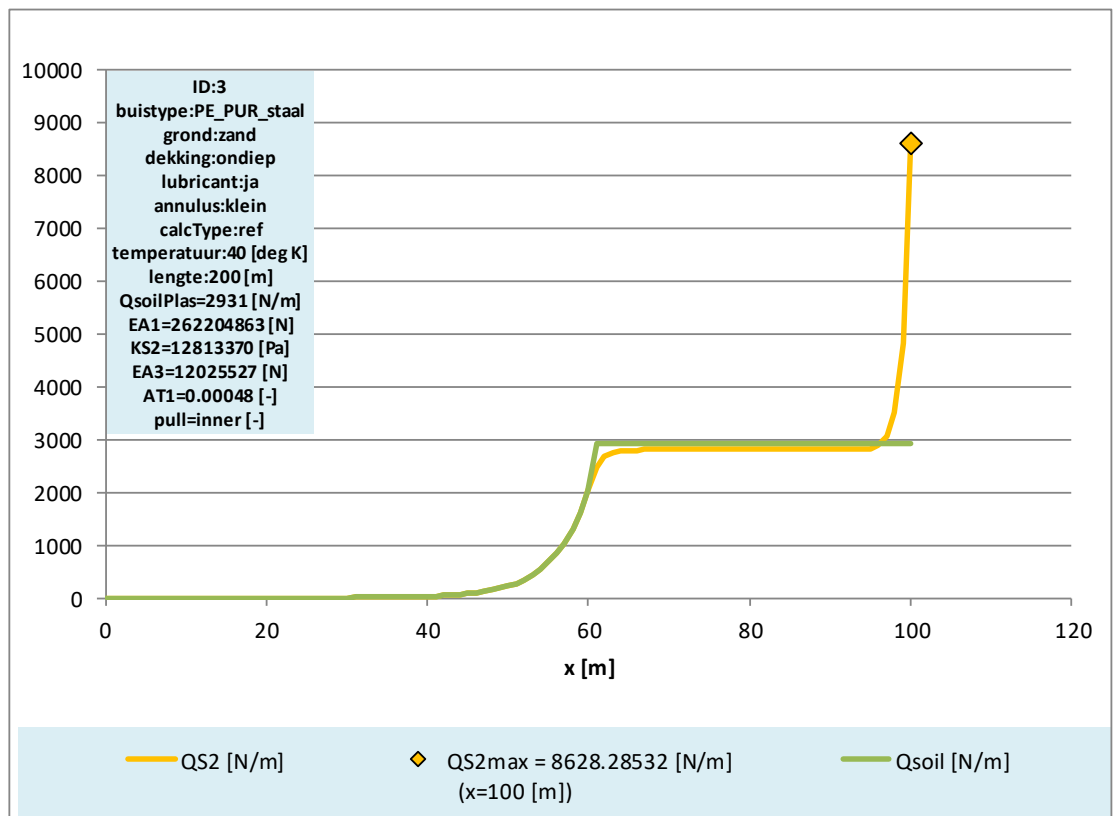
Invullen van de waarden uit het tekstblok van Figuur 15 geeft:

$$L_{fix} = \frac{262205 * 0,00048}{2,931} = 43 \text{ [m]} \quad (15)$$

waarin:

$q_{soil;plas}$ plastische grondweerstand per leidinglengte [N/m]

Omdat bij een staal in kunststof leiding het globale gedrag wordt bepaald door het dominante staal, is de overeenkomst goed (39 m \approx 43 m). De plastische lengte is altijd kleiner dan de fixatie lengte omdat er ook een elastische bijdrage is bij een dubbelwandige leiding. De corresponderende kracht per lengte in het isolatie materiaal en in de grond zijn opgenomen in Figuur 17. De elastisch bijdrage is te herkennen als het gebogen deel van de groene lijn.



Figuur 17 Berekeningsresultaat opwarmen variant ID=3kracht per lengte in isolatie materiaal

3.3.3 Toetsing berekeningsresultaten

De toetsing met behulp van UC waarden is analoog aan toetsing voor het intrekken, zie paragraaf 3.2.4. Aanvullend wordt er getoetst op de verplaatsingen en verschilverplaatsingen van *Tabel 2.2*.

4 Berekeningsresultaten

4.1 Grondveren

De berekening van de grondveren en grondweerstand is gemaakt met een excel spreadsheet met VBA code. Conform *Tabel 2.10* zijn dat 96 berekeningen. De berekeningsresultaten zijn opgenomen in Bijlage D. Doel van deze berekening is om invoer voor de vervolg berekeningen te genereren. Voor deze rapportage betreft dat de modelberekeningen. De resultaten van de modelberekeningen zijn beschreven in de volgende paragrafen:

- §4.2 Intrekken
- §4.3 Opwarmen

In het huidige model wordt voor het grondgedrag uitgegaan van een star-plastisch gedrag, zodat alleen de grondweerstand in de berekeningen wordt meegenomen.

4.2 Intrekken

4.2.1 Algemeen

Het berekeningsmodel is beschreven in § 3.2.

De berekeningen voor het intrekken van de leiding zijn gerapporteerd in bijlage E. In §4.2.2 zijn berekeningsresultaten voor het intrekken van de leiding met een trekkop die alleen de binnenbuis of de binnen- en buitenbuis grijpt vrij gerapporteerd. In §4.2.3 zijn berekeningsresultaten voor het intrekken van de leiding met of zonder lubricant beknopt gerapporteerd. Dit zijn dus de berekeningen uit *Tabel 2.2* met "calcType" = "aanleg"/"ref". Bij "aanleg" wordt de leiding ingetrokken met een lubricant. Dat is dus de gebruikelijke methode. Bij "ref" is er geen lubricant aanwezig (dit is geen realistische aanleg methode maar geeft de bovengrens voor de maximaal te mobiliseren grondweerstand).

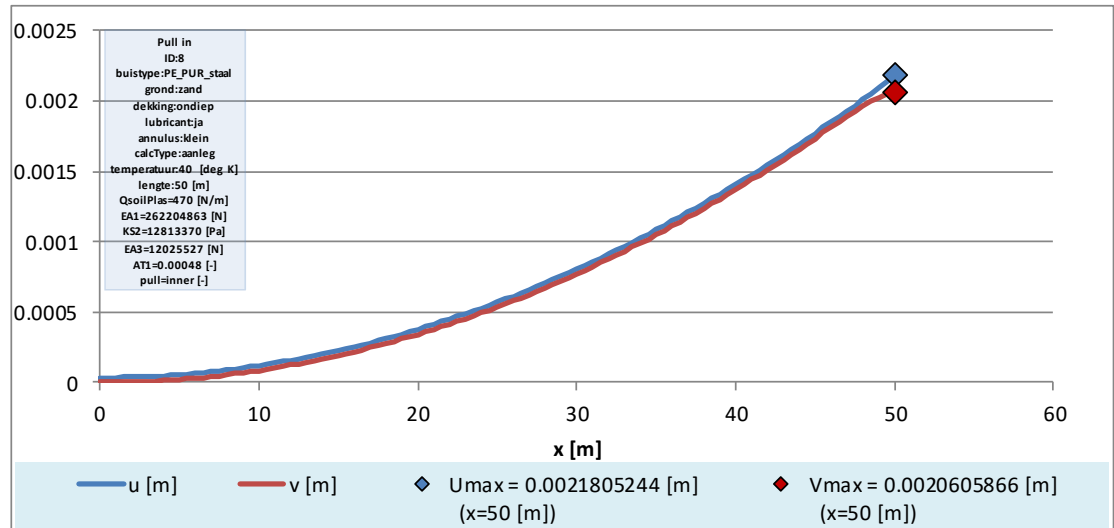
Conform *Tabel 2.10* zijn er 576 berekeningen. De 2 temperaturen hebben geen invloed op de berekeningen voor het intrekken van de leiding. Er zijn 3 fasen (*Tabel 2.6*; calcType=ref/aanleg/eind), per fase/"CalcType" zijn er dus $576/2/3 = 96$ berekeningen.

De berekeningsresultaten met lubricant "aanleg" zijn opgenomen in §4.2.3.1 en de berekeningsresultaten zonder lubricant "ref" zijn opgenomen in § 4.2.3.2. Hierbij is als voorbeeld steeds de grootste lengte van een buistype gebruikt.

4.2.2 Intrekken met verschillende trekkoppen

4.2.2.1 Voorbeeld trekkop = binnen; intrekken PE-PUR-staal (variant ID:8)

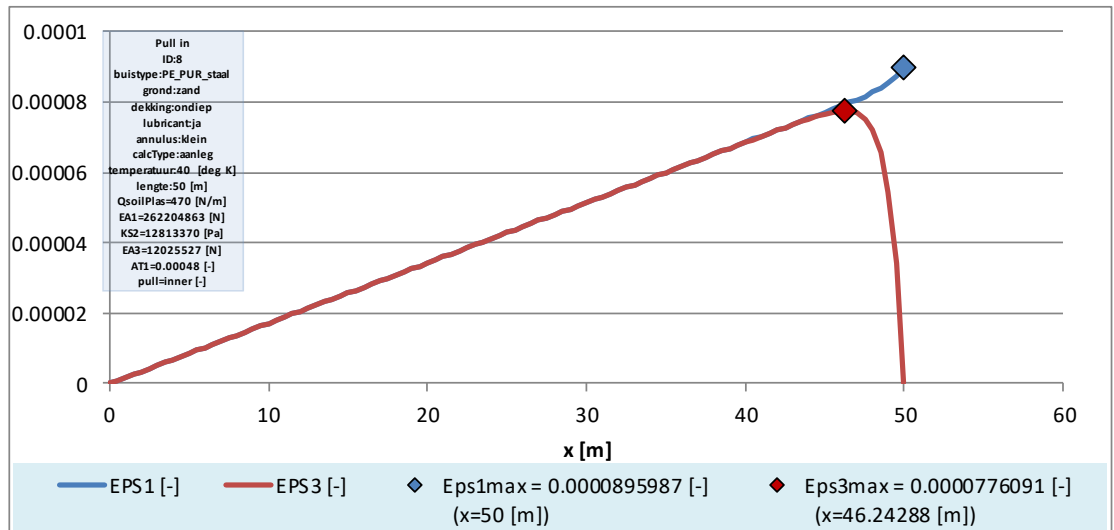
Voor de ID=8 berekening conform de invoer van hoofdstuk 2 zijn hieronder de resultaten weergegeven. Opgemerkt wordt dat variant 8 een PE-PUR staal leiding betreft, ingetrokken met boorspoeling en met een lengte van 50 m. Voor de figuren geldt dat de blauwe lijn de binnenbuis is, de rode lijn de buitenbuis en de gele lijn het isolatie materiaal.



Figuur 18 Berekeningsresultaat intrekken PE-PUR-staal (variant ID:8), blauwe lijn = binnenbuis, rode lijn = buitenbuis

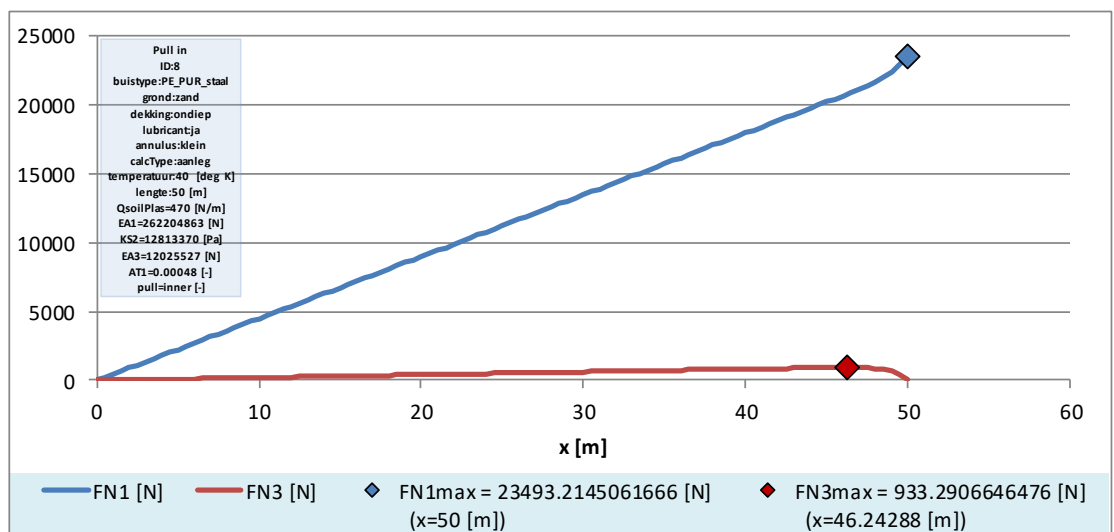
In de bovenstaande figuur is te zien dat de binnen- en buitenbuis vrijwel dezelfde verplaatsing hebben. Overigens is verplaatsing hier een relatieve term omdat de leiding wordt ingetrokken zodat de hele leiding een grote verplaatsing heeft. Het systeem is “gefixeerd” met de randvoorwaarde $v(0)=0$. De blauwe lijn ligt iets boven de rode lijn, dat geeft aan dat de binnenbuis iets naar rechts verplaatst ten opzichte van de buitenbuis. Dat is logisch, omdat bij het intrekken de binnenbuis wordt “uitgetrokken” uit de isolatie van de leiding. De vervorming van de leiding is ca 0,002 m = 2 mm. Dat is beperkt. Bij een langere leiding of een slechtere smering zal deze (verschil) verplaatsing uiteraard toenemen. Aan de rechterzijde ($x=50$ m) lopen de blauwe en rode lijn verder uit elkaar. Dat wordt veroorzaakt door de inleiding van de trekkraft van de binnenbuis naar de buitenbuis.

De corresponderende rekken en krachten zijn weergegeven in de volgende figuren.



Figuur 19 Berekeningsresultaat intrekken PE_PUR-staal (variant ID:8) rek in buizen

De rek in de buizen is weergegeven in Figuur 19. De rek in de leiding is wiskundig de afgeleide van de verplaatsing naar de afstand. De verplaatsing van beide buizen is grotendeels gelijk, dan is het logisch dat ook de rek grotendeels gelijk is. Aan de rechter zijde, bij de kracht inleiding, ontstaat er een verschil in verplaatsing tussen binnen- en buitenbuis (verschil blauwe en rode lijn in Figuur 18). Er ontstaat daar ook een verschil in rek (Figuur 19). De rek in de buitenbuis (rode lijn) gaat naar nul, wat overeenkomt met de situatie van geen kracht in de buis.

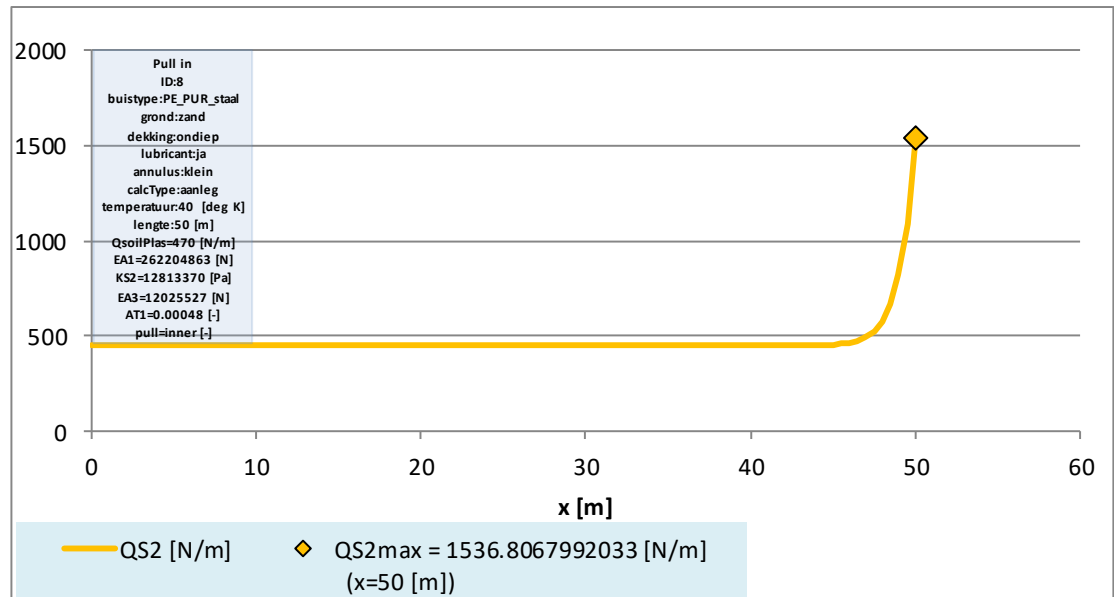


Figuur 20 Berekeningsresultaat intrekken PE_PUR-staal (variant ID:8) krachten in buizen

Eigenlijk is deze rek slechts een tussenresultaat. Veel belangrijker is de normaalkracht in de buizen, die direct gekoppeld is aan de rek via: $\text{kracht} = \text{stijfheid} \cdot \text{rek}$; $F = EA \cdot \varepsilon$. Dat resultaat is te zien in Figuur 20. De kracht heeft exact hetzelfde verloop als de rek. Maar door het verschil in stijfheid tussen de binnen- en buitenbuis zijn de krachten in de buitenbuis kleiner dan in de binnen buis (rode lijn veel lager dan blauwe lijn in Figuur 20). Duidelijk is dat de grootste kracht ontstaan in de binnenbuis aan de rechterzijde, dat is het aangrijpingspunt

van de trekkracht. In de legenda staat de grootte: 23493 N = 23,5 kN. Dit is de kracht die nodig is om de wrijving van $Q_{\text{plas}}=470$ N/m (tekstblok) over een lengte van 50 m (tekstblok) te overwinnen ($470 \cdot 50 = 23500$). Door de lagere stijfheid is de kracht in de buitenbuis aanzienlijk kleiner, maximaal 0,9 kN. Deze maximale kracht treedt op enige afstand van de rechterzijde (rode ruit in Figuur 20) op, eigenlijk op de plek waar je gevoelsmatig zegt dat de kracht volledig is ingeleid.

De corresponderende afschuifkracht per lengte in het isolatie materiaal is opgenomen in Figuur 21.



Figuur 21 Berekeningsresultaat intrekken PE_PUR-staal (variant ID:8) kracht per lengte in isolatie materiaal

De kracht in het isolatie materiaal ontstaat door het verschil in verplaatsing tussen de binnen- en buitenbuis, ofwel door de afschuifvervorming van het isolatiemateriaal. Vermenigvuldiging met de stijfheid van het isolatie materiaal geeft de resulterende kracht:

$$\text{kracht} = \text{stijfheid} \cdot \text{vervorming}, \quad QS2(x) = KS2 \cdot (u(x) - v(x)).$$

Aan de rechterkant van de grafiek ontstaat de grootste kracht. Dat is de plek waar door het intrekken van de leiding de binnen- of buitenbuis de neiging heeft om los te scheuren van het isolatie materiaal. Bedacht moet worden dat in het model de trekkracht op het uiterste einde van de leiding wordt aangebracht. Als deze over enige lengte wordt aangebracht zal de piekwaarde kleiner worden en daarmee het risico van losscheuren ook.

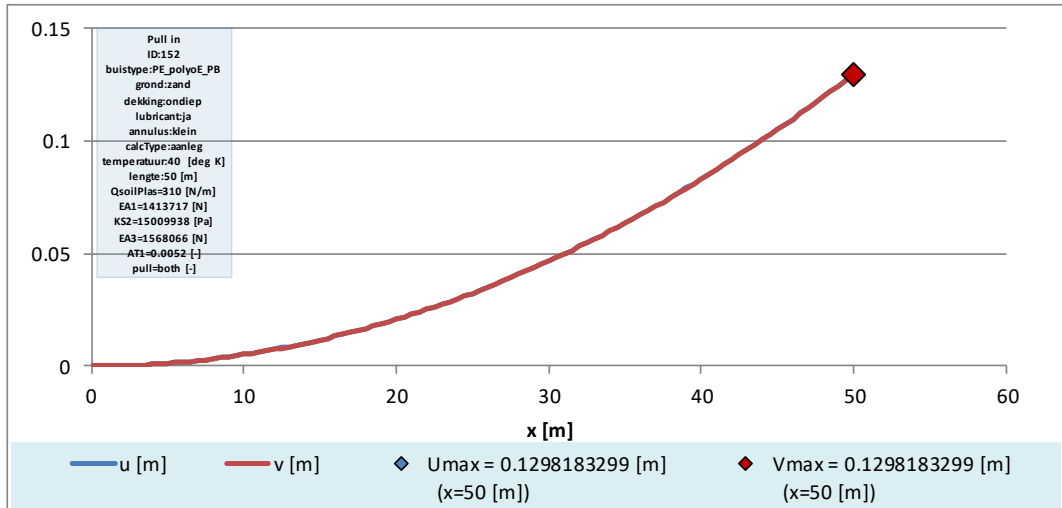
Voor het grootste deel van de leiding is de afschuifkracht in het isolatie materiaal iets kleiner dan de plastische grond reactiekracht (zie legenda $Q_{\text{soilPlas}} = 470$ N/m; uit onderliggende data $QS2 = 449$ N/m). Over de hele lengte treedt dus een vrij constante afschuifkracht in het isolatiemateriaal op, welke piekt bij de inleiding van de trekkracht.

4.2.2.2 Voorbeeld trekkop = beide; intrekken kunststof_PUR_kunststof (variant ID:152)

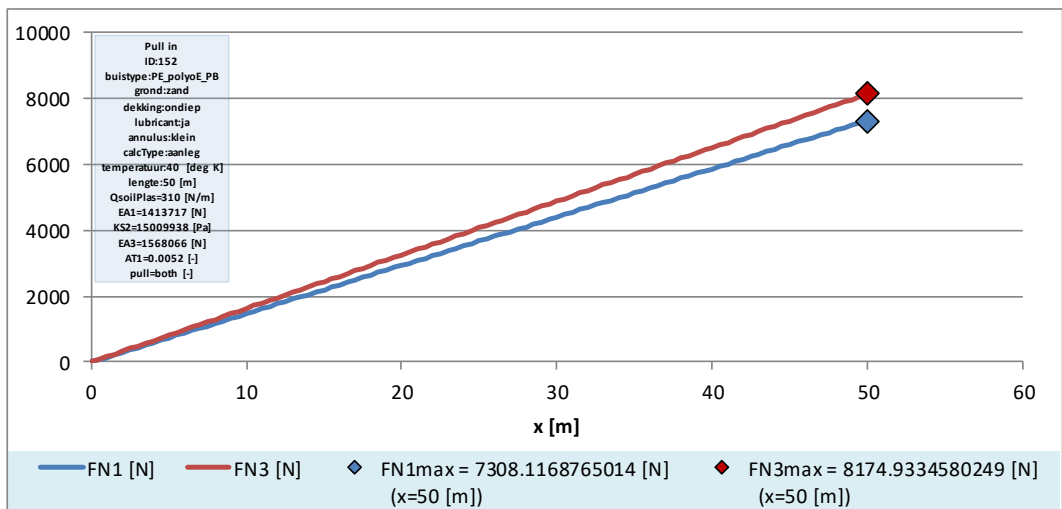
De trekkop die zowel op de binnenbuis als op de buitenbuis werkt geeft andere berekeningsresultaten. Dat heeft twee oorzaken:

- Het effect van de significant slappere binnenbuis, wat maakt dat beide buizen een significant deel van de trekkracht afdragen.
- Het effect dat de kracht wordt ingeleid in beide buizen, waardoor een grote verschilverplaatsing tussen de binnen- en buitenbuis wordt voorkomen.

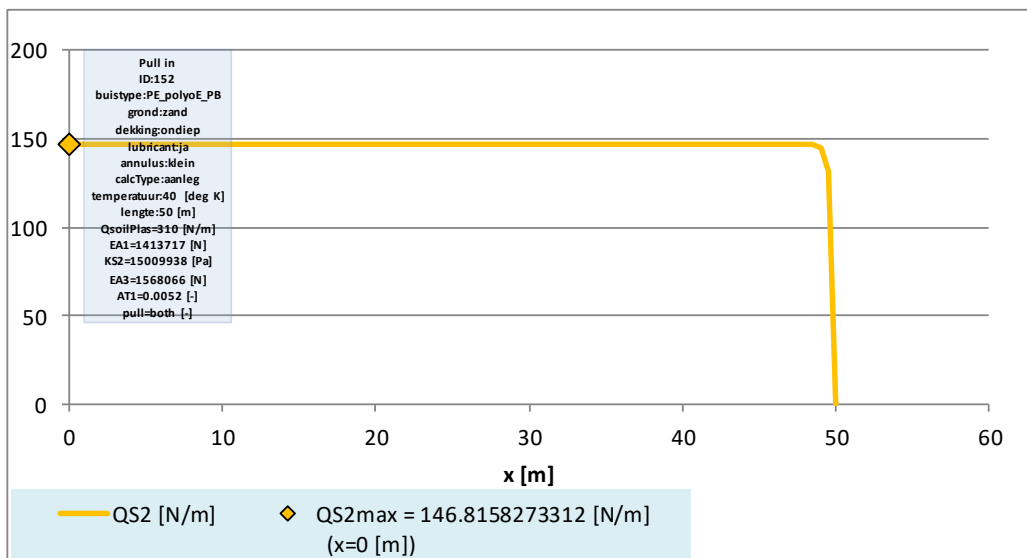
De resultaten zijn weergegeven in de volgende figuren.



Figuur 22 Intrekken kunststof_PUR_kunststof (variant ID:152), blauwe lijn = binnenbuis, rode lijn = buitenbuis



Figuur 23 Intrekken kunststof_PUR_kunststof (variant ID:152), krachten in buizen



Figuur 24 Intrekken kunststof_PUR_kunststof (variant ID:152), kracht per lengte in isolatie materiaal

Als we de bovenstaande figuren bekijken blijkt dat :

- De vormingen bij kunststof binnenbuis en stalen binnenbuis zijn anders
 - De PE-PUR-staal leiding (Figuur 18) krijgt bij het aangrijpingspunt van de trekkop een verschilverplaatsing tussen de binnenbuis en buitenbuis, omdat de trekkop alleen aangrijpt op de binnenbuis. Bij de kunststof leidingen (Figuur 22) is dat niet het geval omdat de trekkop op beide buizen aangrijpt.
 - Bij een stalen binnenbuis zijn de verplaatsingen kleiner (Figuur 18; 0,002 m) dan bij een kunststof binnenbuis (Figuur 22; 0,013 m). Dat is logisch door het verschil in stijfheid van de binnenbuizen.
- Het verloop van de axiale kracht in de buizen is verschillend. Bij een stalen binnenbuis speelt de buitenbuis een bijrol in het krachten spel (Figuur 20 $F_{\text{binnenbuis; max}} = FN1_{\text{max}} = 23000 \text{ N}$; $F_{\text{buitenbuis; max}} = FN3_{\text{max}} = 900 \text{ N}$; bij een kunststofbuis binnenbuis heeft de buitenbuis wel een rol in de krachtsafdracht (Figuur 23; $F_{\text{binnenbuis; max}} = FN1_{\text{max}} = 7000 \text{ N}$; $F_{\text{buitenbuis; max}} = FN3_{\text{max}} = 8000 \text{ N}$). De trekkracht in de koppeling is bij een stalen binnenbuis groter ($23000 \text{ N} > 7000 \text{ N} + 8000 \text{ N}$) omdat de grondweerstand groter is.
- Het verloop van de afschuifkracht in het isolatie materiaal is voor beide buistypen substantieel anders, met als gevolg dat het isolatiemateriaal bij een stalen binnenbuis zwaarder wordt belast:
 - Bij een stalen binnenbuis is de afschuifkracht in het isolatiemateriaal meestal ongeveer gelijk aan de plastische grond/buis afschuifkracht: (Figuur 21 $Q_{\text{soilplas}} = 470 \text{ N/m}$ (tekstblok) $QS2 < 500 \text{ N/m}$ (gele lijn)) Bij een kunststof binnenbuis wordt een deel van de grondkracht direct opgenomen en afgedragen door de buitenbuis: (Figuur 24 $Q_{\text{soilplas}} = 310 \text{ N/m}$ (tekstblok) $QS2 = QS2_{\text{max}} = 150 \text{ N/m}$)
 - Bij een stalen binnenbuis loopt de afschuifkracht bij de trekkoppeling sterk op door de krachtinleiding. (Figuur 21 ($QS2_{\text{max}} = 1500 \text{ N/m} > QS2_{\text{gemiddeld}} \approx 500 \text{ N/m}$). Bij een kunststof trekkop die beide buizen grijpt treedt dit effect niet op.

4.2.3 Intrekken zonder of met lubricant

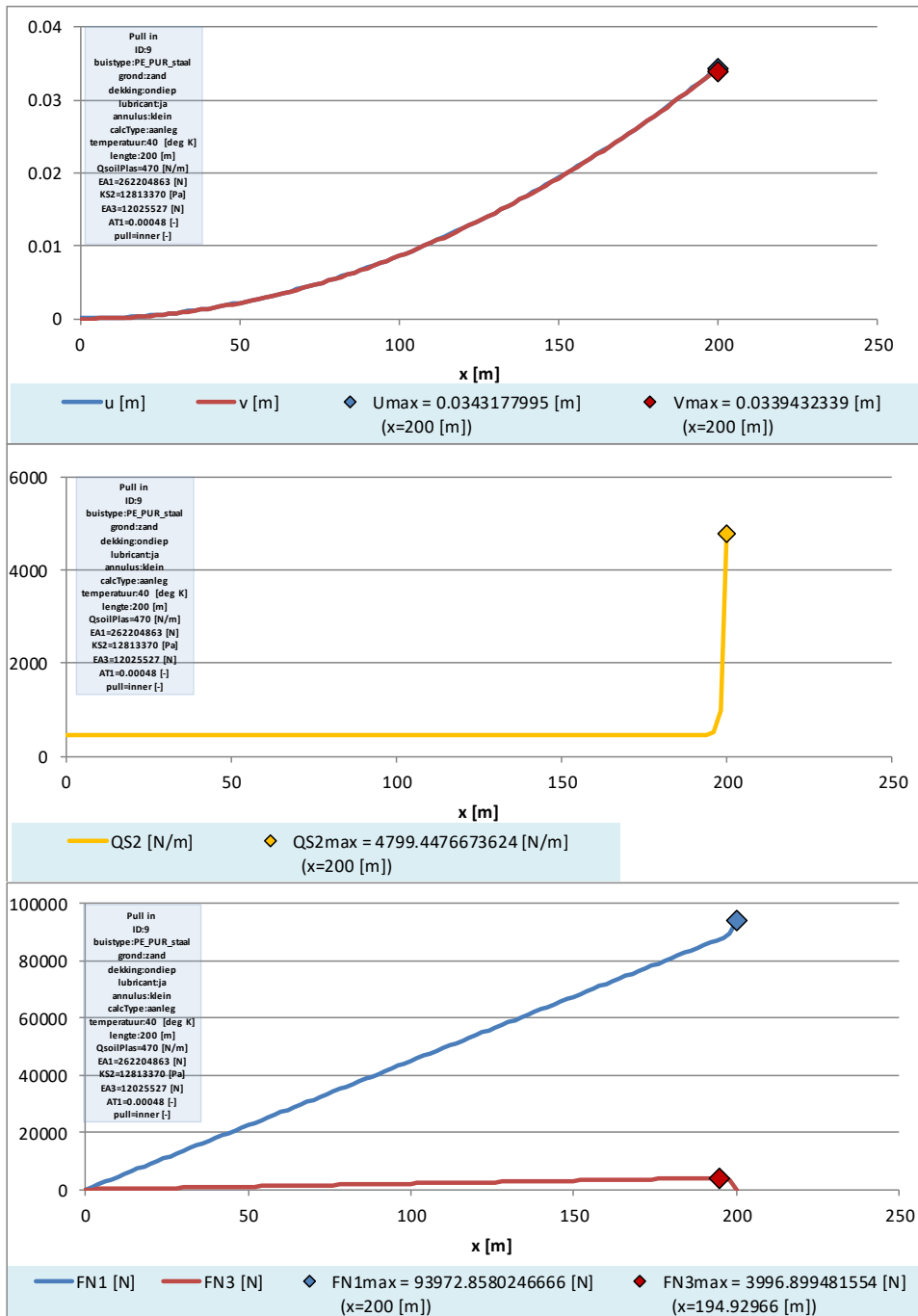
4.2.3.1 Intrekken met lubricant (calcType = aanleg)

In Bijlagen E.5 t/m E.8 zijn de berekeningsresultaten in tabelvorm gegeven voor het intrekken van een warmteleiding met lubricant (calcType = "aanleg").

Hieronder is grafisch het resultaat weergegeven voor het intrekken van de eerste lange (L=200 m) PE-PUR-staal leiding (ID=9) met lubricant.

PE_PUR_staal;

- de leiding wordt ca. 0,03 m (Figuur 25 $u_{\text{max}}=0,0343 \text{ m}$) uitgerekt bij het intrekken van een lange leidingen (L=200 m).
- Trekkkracht buitenbuis voldoet (Bijlage E.5 $0,3 < 267$; UC=0,00).
- De trekkracht in de binnenbuis voldoet (Bijlage E.5 $9 < 449$; UC=0,019).
- afschuifkracht in het PUR voldoet (Bijlage E.5 $5 < 43$; UC=0,11).

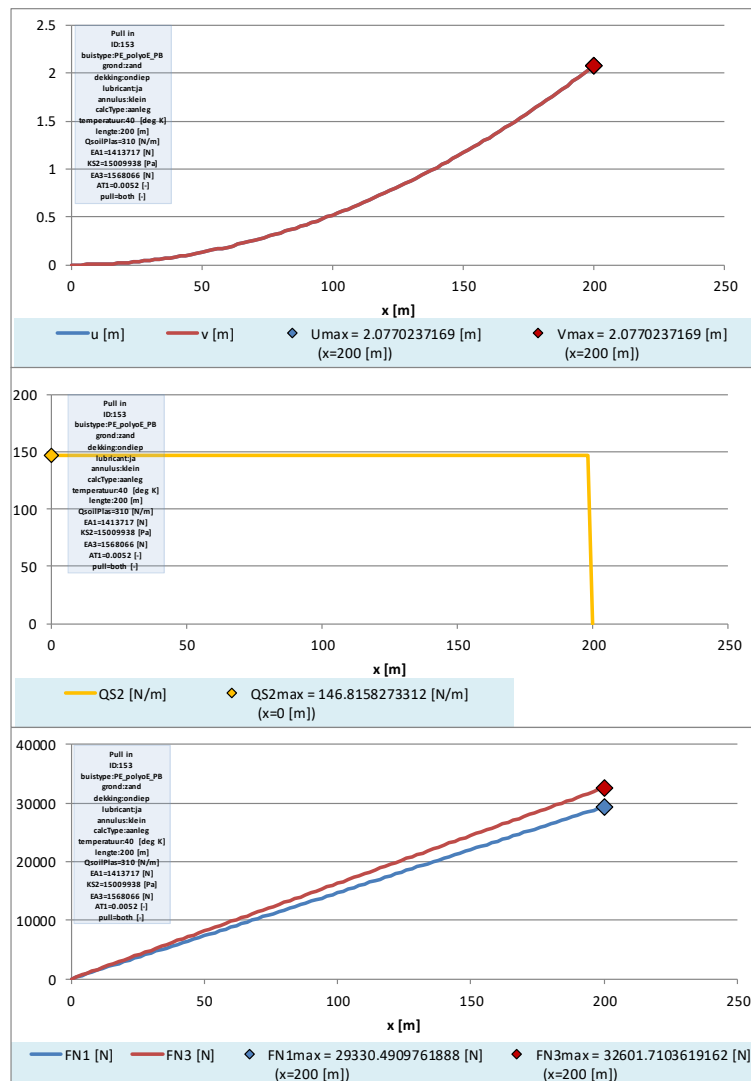


Figuur 25 Intrekken PE_PUR_staal leiding (ID:9), resp. verplaatsing, afschuifkracht en kracht

Hieronder is grafisch het resultaat weergegeven voor het intrekken met lubricant van de eerste lange (L=200 m) kunststof leiding (PE_polyoE_PE) (ID=153). De resultaten zonder stalen binnenbuis (dus "PE_polyoE_PE", "PE_PUR_PEX" en "ribbel_PUR_ribbl") zijn min of meer analoog.

PE_polyoE_PE;

- bij een lange leiding (L=200 m) wordt de leiding meters uitgerekt (Figuur 26 $u_{max}=2$ m).
- Trekkraft buitenbuis voldoet (Bijlage E.6; ID=153; $33<52$; $UC=0,62$).
- Trekkraft in de binnenbuis voldoet (Bijlage E.6; ID=153; $29<53$; $UC=0,55$).
- afschuifkracht in isolatie voldoet (Bijlage E.6; ID=153; $0<41$; $UC=0,00$).
- De bovenstaande resultaten zijn voor een ondiepe aanleg in zand met een kleine annulus. Bij een diepe aanleg in zand met een grote annulus voldoet de buitenbuis niet.



Figuur 26 Intrekken PE_polyoE_PB leiding (ID:153), resp. verplaatsing, afschuifkracht en kracht

PE_PUR_PEX; min of meer analoog aan PE_polyoE_PE
 ribbel_PUR_ribbl; min of meer analoog aan PE_polyoE_PE, doch kracht in de buitenbuis
 groter waardoor intrekken van 200 m buis niet voldoet bij zand grond.

De conclusies voor het intrekken van een leiding met lubricant zijn:

- PE_PUR_staal leidingen tot een lengte van meer dan 200 m kunnen met een lubricant worden ingetrokken.
- Het intrekken van kunststof leidingen met een lubricant kent, afhankelijk van de ondergrond en leidingtype, een maximale lengte van ca. 200 m. Maatgevend is de kracht in de binnen- of buitenbuis. Daarmee is dit terug te leiden naar de toetaalbare normaalkrachten F1u en F3u in *Tabel 2.2* en de onzekere onderliggende parameters. De ribbel_PUR_ribbel buis is ongunstig door de grotere diameter, daardoor moet een grotere grondweerstand overwonnen worden.

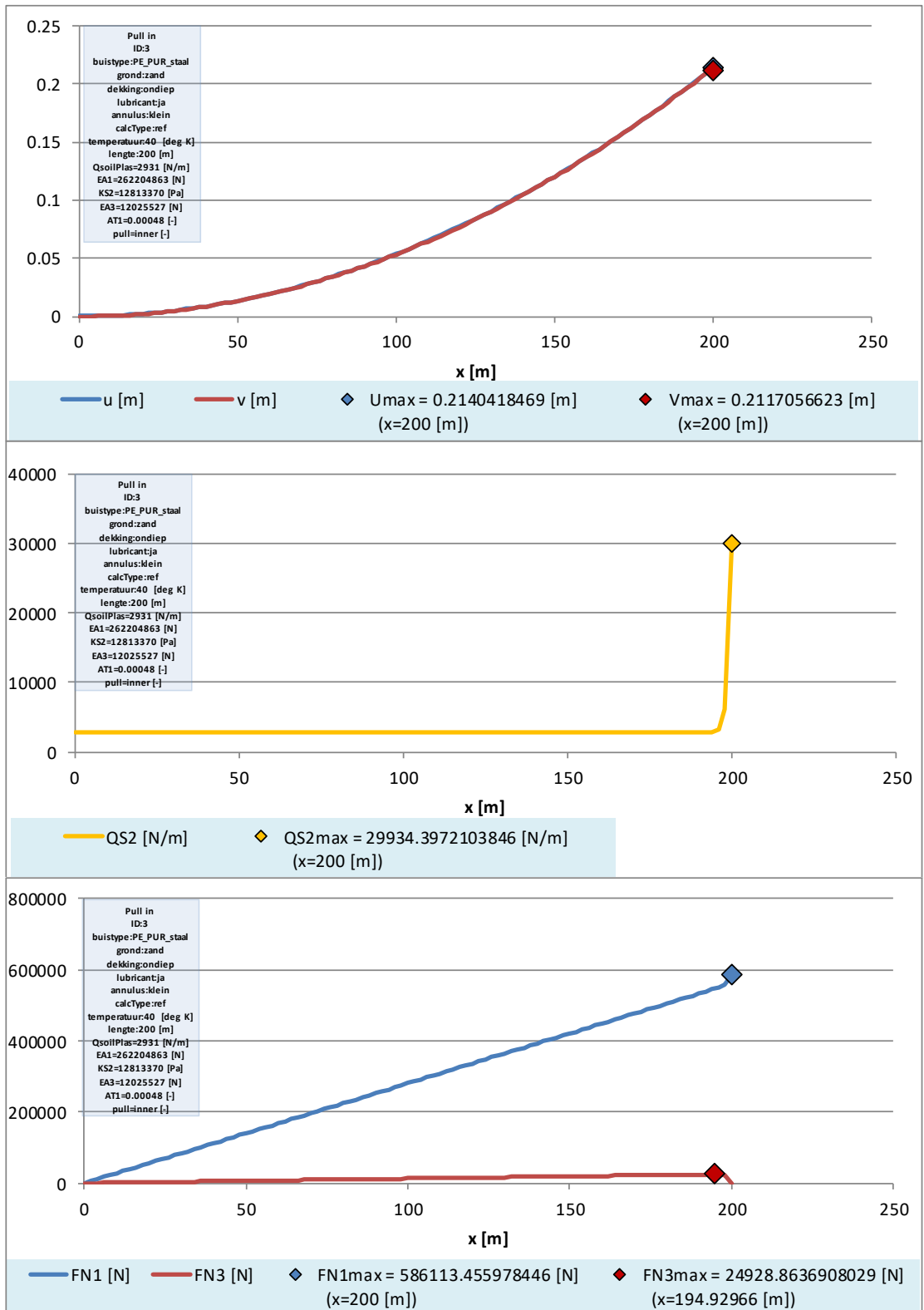
4.2.3.2 Intrekken zonder lubricant (calcType = ref)

Intrekken zonder lubricant is niet gebruikelijk. De berekeningen zonder lubricant geven een bovengrens aan (bijvoorbeeld voor een geheel ingestort boorgat. In Bijlagen E.1 t/m E.4 zijn de berekeningsresultaten in tabelvorm gegeven voor het intrekken van een warmteleiding zonder lubricant (calcType = ref).

Als voorbeeld is hieronder grafisch het resultaat weergegeven voor het intrekken van de eerste lange (L=200 m) PE-PUR-staal leiding (ID=3).

PE_PUR_staal;

- De leiding wordt ca. 0,2 m (Figuur 27 $u_{max}=0,214$ m) uitgerekt bij het intrekken van wat langere leidingen (L=200 m). De grootte van deze uitrekking neemt kwadratisch toe met de leiding lengte (L=500 m geeft $u_{max}=1,3$ m).
- Trekkraft buitenbuis voldoet (Bijlage E.1 ID=3; $25 < 267$; UC=0,09).
- De trekkraft in de binnenbuis voldoet niet (Bijlage E.1 ID=3; $586 > 449$; UC=1,17). afschuifkracht in het PUR voldoet (Bijlage E.1 ID=3; $30 < 43$; UC=0,70).

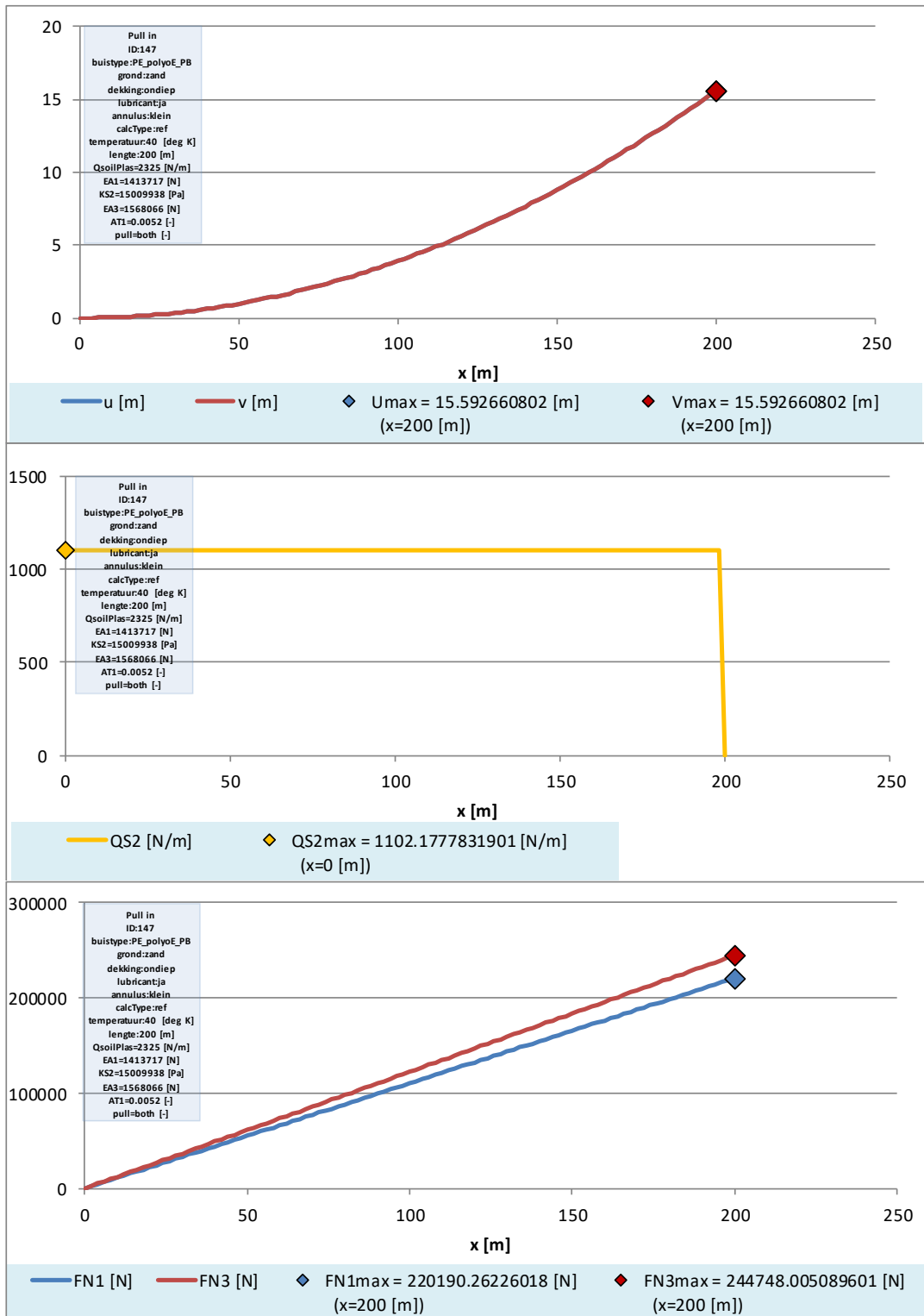


Figuur 27 Intrekken PE_PUR_staal leiding (variant ID:3), resp. verplaatsing, afschuifkracht PUR en kracht

Bij het intrekken van een kunststof leiding wordt aan beide buizen getrokken. Een scenario voor een kunststof buis is hieronder beschreven.

PE_polyoE_PE;

- Bij een lange leiding (L=200 m; Figuur 28 $u_{max}=16$ m) worden de beide buizen meters uitgetrokken. De toetsing staat in Bijlage E.2 (ID=147).
- De trekkracht in zowel de binnen- als de buitenbuis voldoet niet, de afschuifkracht in het PUR voldoet wel (bij kunststof leidingen is gemodelleerd dat de trekkop aan beide buizen is verbonden).



Figuur 28 Intrekken PE_polyoE_PE leiding (variant ID:147), resp. verplaatsing, afschuifkracht PUR en kracht

4.2.4 Intrekken; berekeningsmatrix

De resultaten zijn weergegeven in Bijlage E. Een beknopt en meer overzichtelijke weergave staat in de hierna volgende twee paragrafen in tabelvorm.

Intrekken; ref

Tabel 4.1 Berekeningsresultaten intrekken leiding; ref; PE_PUR_staal

buis: PE_PUR_staal fase: ref		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
lengte [m]		klein	groot	klein	groot	klein	groot
20		0.117	0.117	0.128	0.128	0.008	0.008
		0.223	0.223	0.244	0.244	0.015	0.015
		0.142	0.142	0.155	0.155	0.009	0.009
		0.192	0.192	0.210	0.210	0.013	0.013
50		0.293	0.293	0.223	0.223	0.022	0.022
		0.557	0.557	0.424	0.424	0.041	0.041
		0.354	0.354	0.269	0.269	0.026	0.026
		0.481	0.481	0.366	0.366	0.036	0.036
200		● 1.174	● 1.174	0.697	0.697	0.093	0.093
		● 2.228	● 2.228	● 1.323	● 1.323	0.177	0.177
		● 1.415	● 1.415	0.840	0.840	0.113	0.113
		● 1.924	● 1.924	● 1.142	● 1.142	0.153	0.153

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.2 Berekeningsresultaten intrekken leiding; ref; PE_polyoE_PB

buis: PE_polyoE_PB fase: ref		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
lengte [m]		klein	groot	klein	groot	klein	groot
20		0.408	0.408	0.027	0.027	0.472	0.472
		0.782	0.782	0.051	0.051	0.906	0.906
		0.498	0.498	0.032	0.032	0.577	0.577
		0.679	0.679	0.044	0.044	0.785	0.785
50		● 1.027	● 1.027	0.027	0.027	● 1.174	● 1.174
		● 1.969	● 1.969	0.051	0.051	● 2.250	● 2.250
		● 1.254	● 1.254	0.032	0.032	● 1.433	● 1.433
		● 1.708	● 1.708	0.044	0.044	● 1.952	● 1.952
200		● 4.123	● 4.123	0.027	0.027	● 4.682	● 4.682
		● 7.902	● 7.902	0.051	0.051	● 8.974	● 8.974
		● 5.031	● 5.031	0.032	0.032	● 5.714	● 5.714
		● 6.854	● 6.854	0.044	0.044	● 7.784	● 7.784

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.3 Berekeningsresultaten intrekken leiding; ref; PE_PUR_PEX

buis: PE_PUR_PEX fase: ref		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
lengte [m]							
20		0.275	0.275	0.032	0.032	0.319	0.319
		0.529	0.529	0.061	0.061	0.613	0.613
		0.337	0.337	0.039	0.039	0.391	0.391
		0.460	0.460	0.053	0.053	0.533	0.533
50		0.692	0.692	0.032	0.032	0.788	0.788
		1.332	1.332	0.061	0.061	1.516	1.516
		0.849	0.849	0.039	0.039	0.966	0.966
		1.158	1.158	0.053	0.053	1.318	1.318
200		2.777	2.777	0.032	0.032	3.134	3.134
		5.345	5.345	0.061	0.061	6.031	6.031
		3.407	3.407	0.039	0.039	3.844	3.844
		4.646	4.646	0.053	0.053	5.242	5.242

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.4 Berekeningsresultaten intrekken leiding; ref; rbbI_PUR_rbbI

buis: rbbI_PUR_rbbI fase: ref		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
lengte [m]							
20		0.802	0.802	0.032	0.032	0.172	0.172
		1.496	1.496	0.060	0.060	0.321	0.321
		0.946	0.946	0.038	0.038	0.203	0.203
		1.281	1.281	0.052	0.052	0.275	0.275
50		2.019	2.019	0.032	0.032	0.425	0.425
		3.768	3.768	0.060	0.060	0.793	0.793
		2.382	2.382	0.038	0.038	0.501	0.501
		3.225	3.225	0.052	0.052	0.679	0.679
200		8.106	8.106	0.032	0.032	1.690	1.690
		15.13	15.13	0.060	0.060	3.153	3.153
		9.561	9.561	0.038	0.038	1.993	1.993
		12.95	12.95	0.052	0.052	2.699	2.699

UC Unity Check ● groter dan 1

4.2.4.1 Intrekken; aanleg

Tabel 4.5 Berekeningsresultaten intrekken leiding; aanleg; PE_PUR_staal

buis: PE_PUR_staal fase: aanleg		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
lengte [m]		klein	groot	klein	groot	klein	groot
20		0.019	0.025	0.021	0.028	0.001	0.002
		0.025	0.033	0.027	0.036	0.002	0.002
		0.003	0.003	0.003	0.003	0.000	0.000
		0.003	0.003	0.003	0.003	0.000	0.000
50		0.047	0.063	0.036	0.048	0.003	0.005
		0.062	0.083	0.047	0.063	0.005	0.006
		0.008	0.008	0.006	0.006	0.001	0.001
		0.008	0.008	0.006	0.006	0.001	0.001
200		0.188	0.254	0.112	0.151	0.015	0.020
		0.247	0.332	0.147	0.197	0.020	0.026
		0.030	0.030	0.018	0.018	0.002	0.002
		0.030	0.030	0.018	0.018	0.002	0.002

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.6 Berekeningsresultaten intrekken leiding; aanleg; PE_polyoE_PB

buis: PE_polyoE_PB fase: aanleg		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
lengte [m]		klein	groot	klein	groot	klein	groot
20		0.054	0.078	0.004	0.005	0.063	0.090
		0.067	0.096	0.004	0.006	0.078	0.111
		0.012	0.012	0.001	0.001	0.014	0.014
		0.012	0.012	0.001	0.001	0.014	0.014
50		0.137	0.197	0.004	0.005	0.156	0.225
		0.170	0.242	0.004	0.006	0.194	0.277
		0.030	0.030	0.001	0.001	0.034	0.034
		0.030	0.030	0.001	0.001	0.034	0.034
200		0.549	0.789	0.004	0.005	0.624	0.896
		0.680	0.972	0.004	0.006	0.773	1.104
		0.120	0.120	0.001	0.001	0.136	0.136
		0.120	0.120	0.001	0.001	0.136	0.136

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.7 Berekeningsresultaten intrekken leiding; aanleg; PE_PUR_PEX

buis: PE_PUR_PEX fase: aanleg		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
lengte [m]							
20		0.034	0.050	0.004	0.006	0.039	0.058
		0.040	0.059	0.005	0.007	0.047	0.069
		0.007	0.007	0.001	0.001	0.008	0.008
		0.007	0.007	0.001	0.001	0.008	0.008
50		0.085	0.125	0.004	0.006	0.097	0.143
		0.101	0.149	0.005	0.007	0.116	0.170
		0.018	0.018	0.001	0.001	0.021	0.021
		0.018	0.018	0.001	0.001	0.021	0.021
200		0.340	0.503	0.004	0.006	0.384	0.567
		0.407	0.599	0.005	0.007	0.459	0.676
		0.074	0.074	0.001	0.001	0.084	0.084
		0.074	0.074	0.001	0.001	0.084	0.084
UC Unity Check		● groter dan 1					

Tabel 4.8 Berekeningsresultaten intrekken leiding; aanleg; rbbI_PUR_rbbI

buis: rbbI_PUR_rbbI fase: aanleg		Unity Checks [-]					
Unity Check annulus		binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
lengte [m]							
20		0.143	0.182	0.006	0.007	0.031	0.039
		0.212	0.267	0.009	0.011	0.045	0.057
		0.030	0.030	0.001	0.001	0.007	0.007
		0.030	0.030	0.001	0.001	0.007	0.007
50		0.360	0.459	0.006	0.007	0.076	0.097
		0.533	0.673	0.009	0.011	0.112	0.142
		0.076	0.076	0.001	0.001	0.016	0.016
		0.076	0.076	0.001	0.001	0.016	0.016
200		● 1.444	● 1.841	0.006	0.007	0.301	0.384
		● 2.139	● 2.704	0.009	0.011	0.446	0.564
		0.307	0.307	0.001	0.001	0.064	0.064
		0.307	0.307	0.001	0.001	0.064	0.064
UC Unity Check		● groter dan 1					

4.3 Opwarmen

4.3.1 Algemeen

Het berekeningsmodel is beschreven in § 3.3. Analooq aan een enkelwandige leiding zal ook bij een dubbelwandige leiding (mits opwarming buitenbuis beperkt is) de normaalkracht bij een oneindig lange leiding de waarde volgens formule (12) bereiken. In *Tabel 4.9* zijn deze normaalkrachten voor de verschillende temperaturen en buistypen opgenomen.

Tabel 4.9 Maximale normaalkracht in binnenbuis bij opwarming

Temperatuurstoename binnenbuis [°K]	Maximale normaalkracht per buistype en temperatuurstoename [kN]			
	PE_PUR_staal	PE_polyoE_PB	PE_PUR_PEX	rbbi_PUR_rbbi
40	126	7	18	10
90	283	17	41	23

Uit *Tabel 4.9 Maximale normaalkracht in binnenbuis bij opwarming* blijkt dat, conform verwachting, de kunststof buizen een lagere maximale normaalkracht bij opwarmen hebben.

Om inzicht te krijgen in het model en de resultaten zijn in §4.3.2 berekeningen beschreven voor een oplopende leidinglengte.

In §4.3.3 worden de resultaten van de berekeningsmatrix beschreven. De volledige matrix geeft 576 berekeningen. Om de resultaten tabellen leesbaar te houden worden zijn voor de fasen en leidingtypen separate tabellen gemaakt. Omdat er 3 fasen en 4 leidingtypen zijn is het aantal regels $576/3/4 = 48$ per tabel. Omdat er 2 fasen ("ref" en "eind") en 4 buistypen worden gerapporteerd, zijn er 8 tabellen.

4.3.2 Opwarmen; invloed leidinglengte

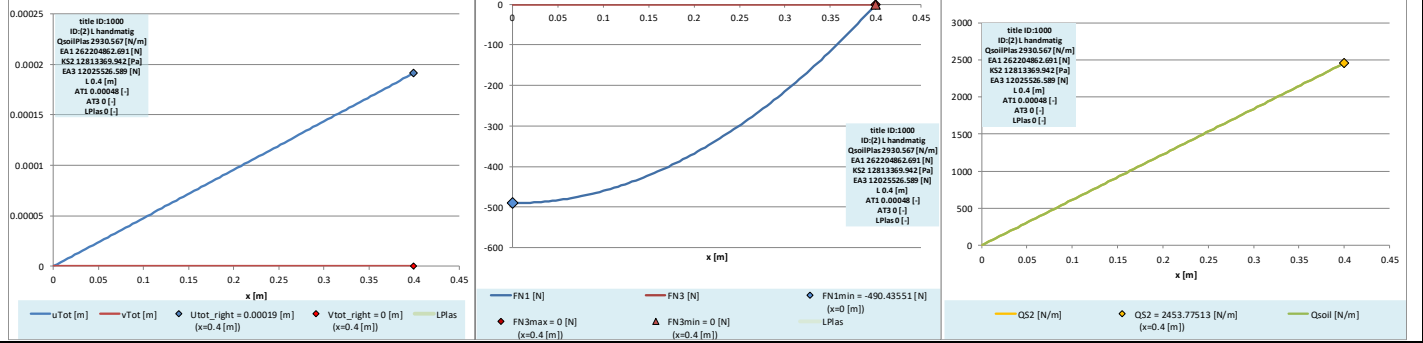
4.3.2.1 Algemeen

Met een toenemende leidinglengte neemt de uitzetting van de binnenbuis toe. Dit vormt een toenemende belasting. Met de toename van de uitzetting verandert ook de grondweerstand. Door het elastoplastische gedrag van de grondweerstand in combinatie met de elastische stijfheid van de binnenbuis ontstaan omslagpunten in de buislengte. Wiskundig geeft dat een andere oplossing van de differentiaalvergelijking (1). Praktisch is dat zichtbaar in het berekeningsresultaat in de grafiek die een andere vorm krijgt.

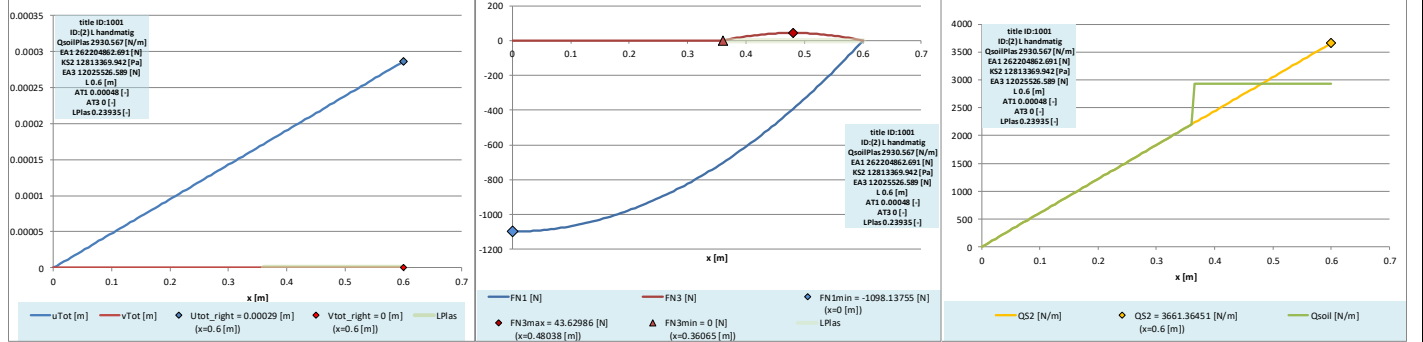
Voor een PE_PUR_ staal en een PE_polyoE_PE leiding is dat hierna in respectievelijk §4.3.2.2 en §4.3.2.3 uitgewerkt door grafieken voor oplopende leidinglengten te tekenen. Daarmee wordt inzicht verkregen in de ontwikkeling van de vervormingen en krachten bij toenemende leidinglengte. Er is gekozen om de grafieken te maken voor ID=2 en ID=146. Dat correspondeert met de genoemde buistypen, zand, ondiepe aanleg, 40 graden temperatuur verschil, en de aanleg in een sleuf (ref).

De berekeningen zijn uitgevoerd met de analytische oplossing waarbij over de buislengte 101 resultaten zijn bepaald. De extreme waarden zijn separaat berekend (dus niet simpelweg de maximale waarde van de 101 resultaten, maar een separate maximalisatie berekening). Door het gekozen raster van 101 punten is er voor L=500 m in Figuur 30 schijnbaar geen kracht in de binnenbuis. In de legenda is echter te zien dat de extreme waarde 2872 N is. De extreme waarde treedt op bij $x=499,5$ tussen de rasterpunten $x=495$ en $x=500$ welke zelf beide de waarde 0 hebben.

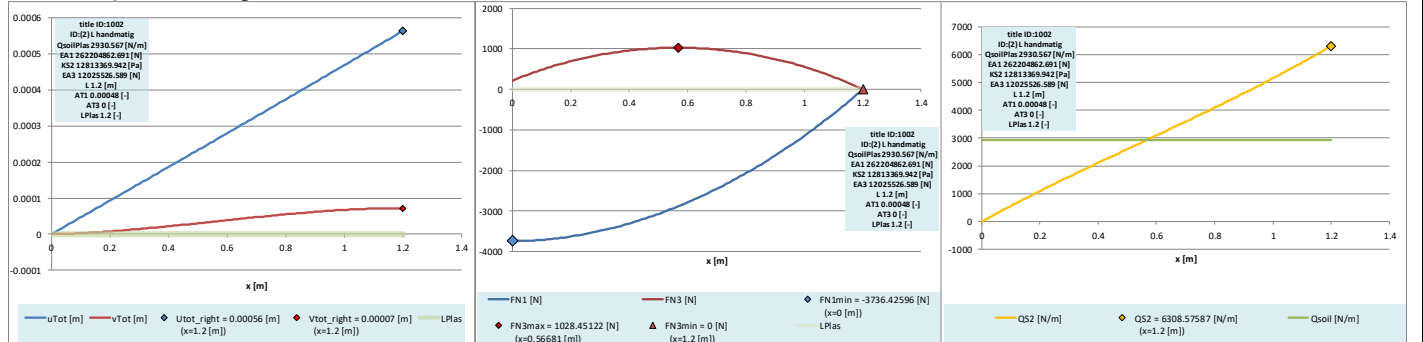
L=0,4 m elastische grondweerstand



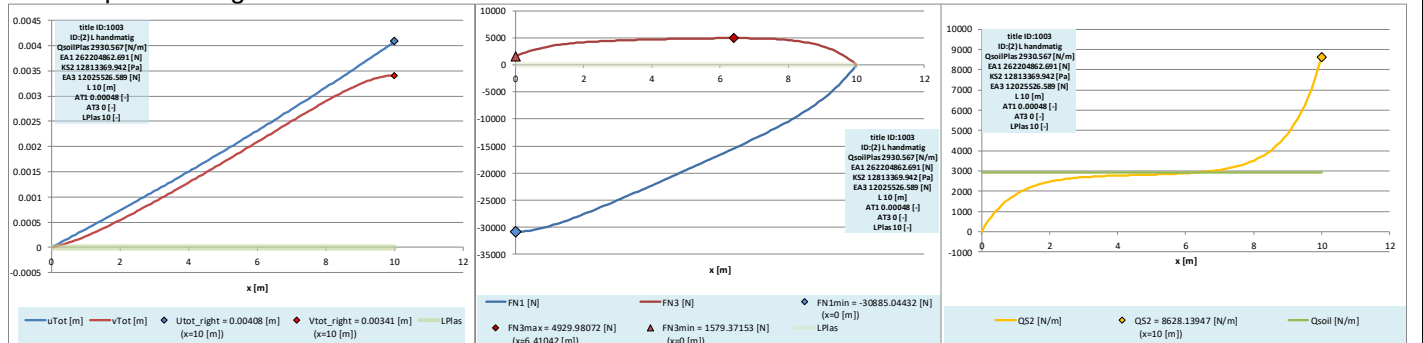
L=0,6 m elastisch & plastisch grondweerstand



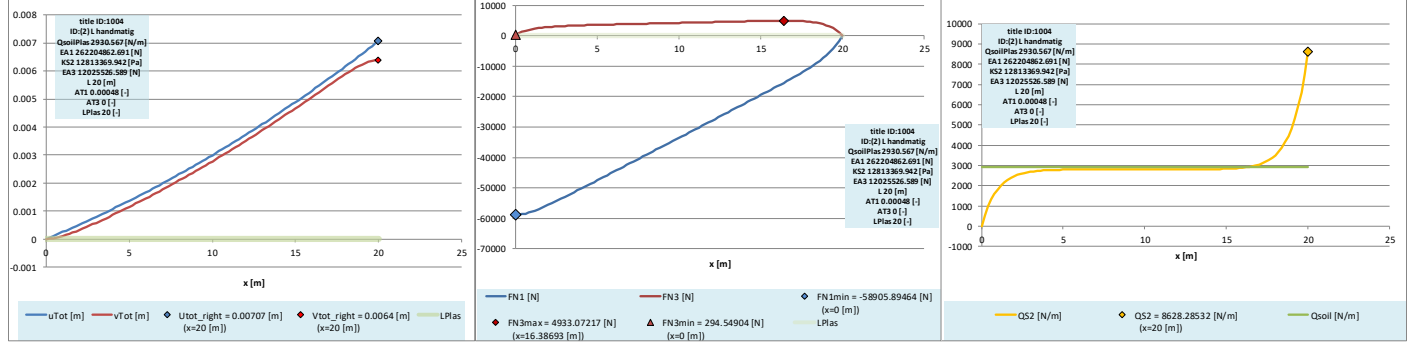
L=1,2 m plastische grondweerstand



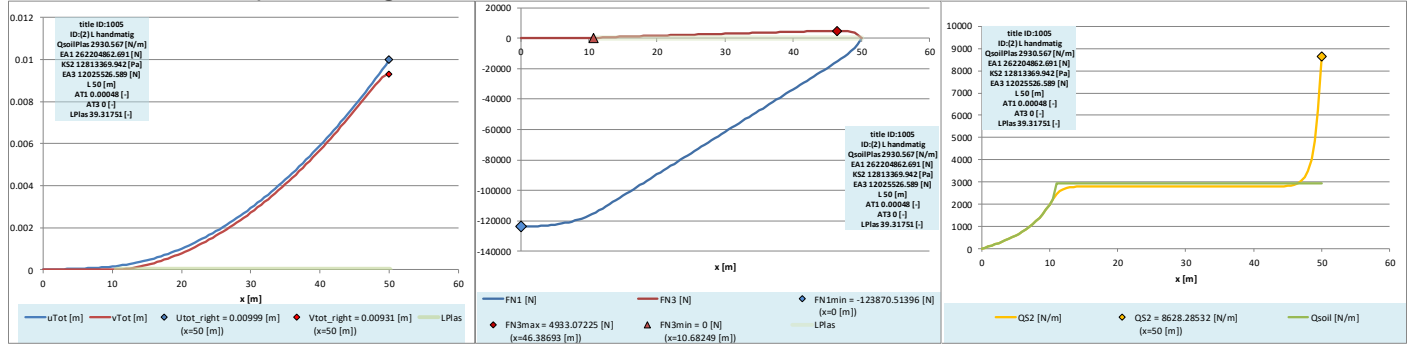
L=10 m plastische grondweerstand



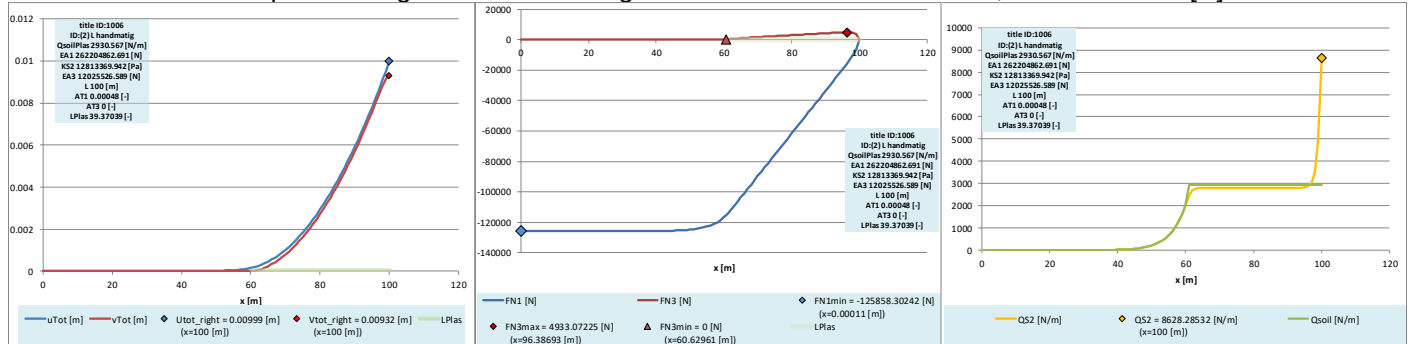
L=20 m plastische grondweerstand



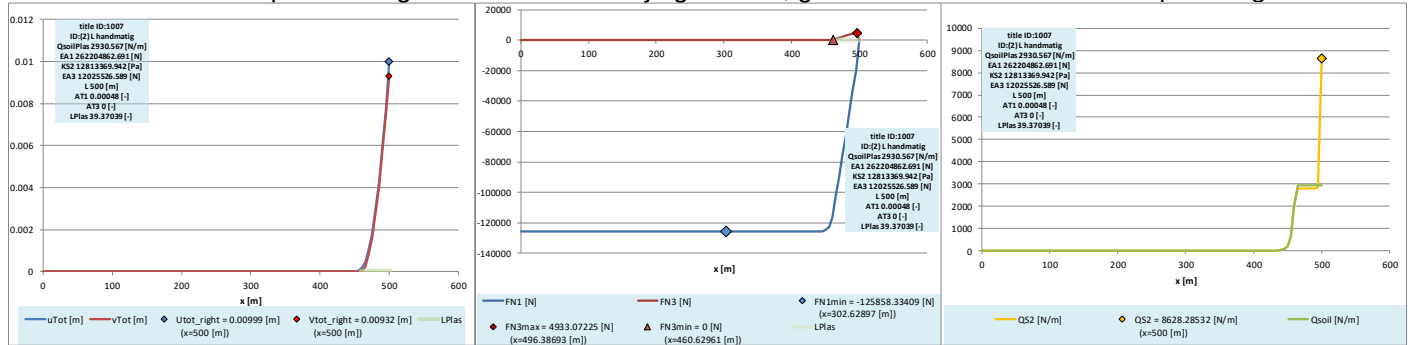
L=50 m elastische & plastische grondweerstand



L=100 m elastische & plastische grond. Binnenbuis gefixeerd $EA\alpha\Delta T=262204863*0.00048=125858$ [N]

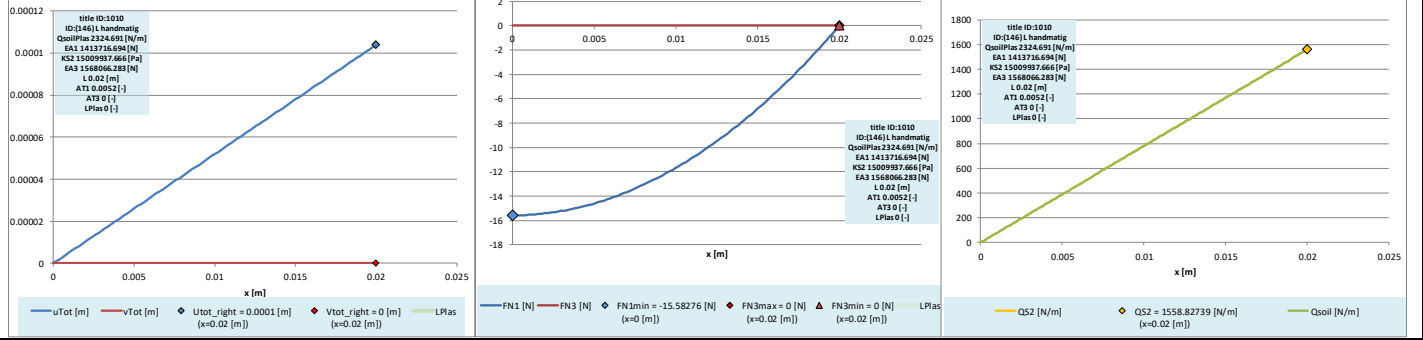


L=500 m elastische & plastische grond. Binnenbuis blijft gefixeerd; geen toename krachten en verplaatsingen

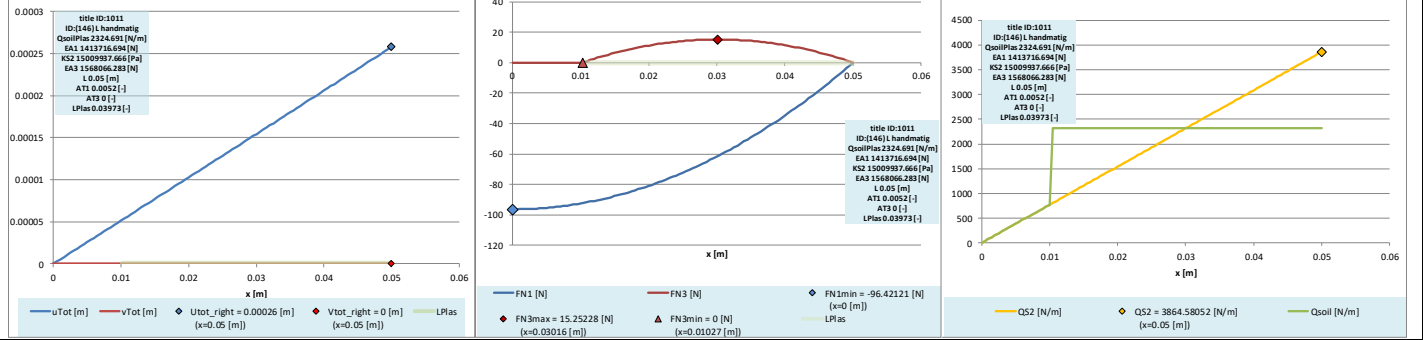


Figur 29 Opwarmen variant ID=2; PE_PUR_staal leiding, serie resultaten bij olopende lengte

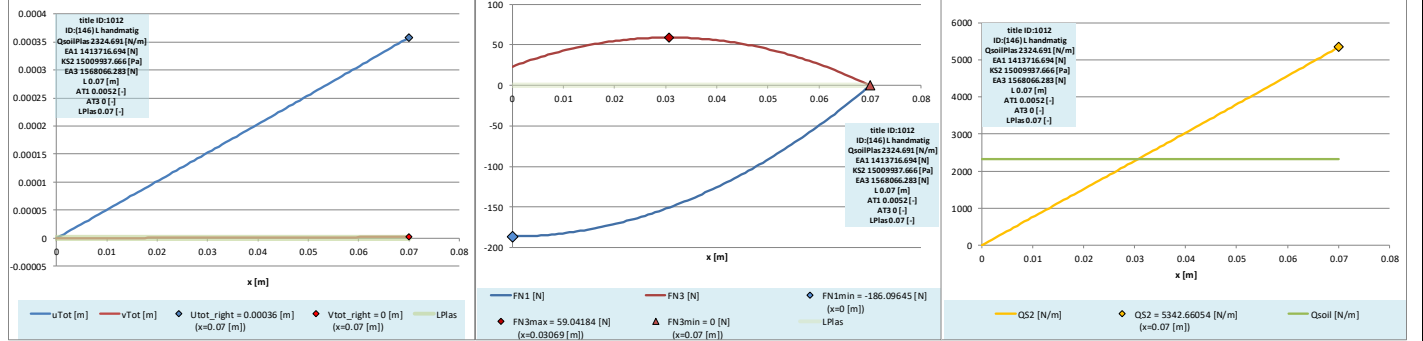
L=0,02 m elastische grondweerstand



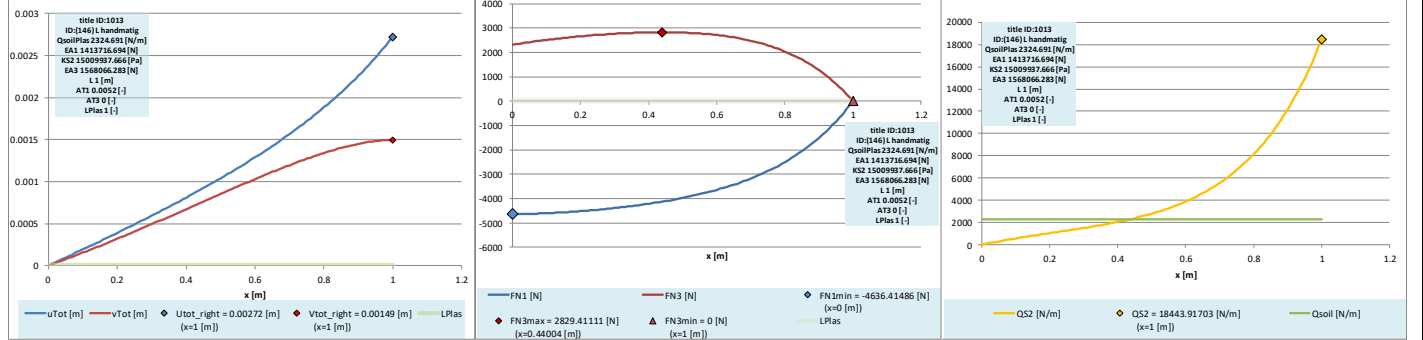
L=0,05 m elastisch & plastisch grondweerstand



L=0,07 m plastische grondweerstand

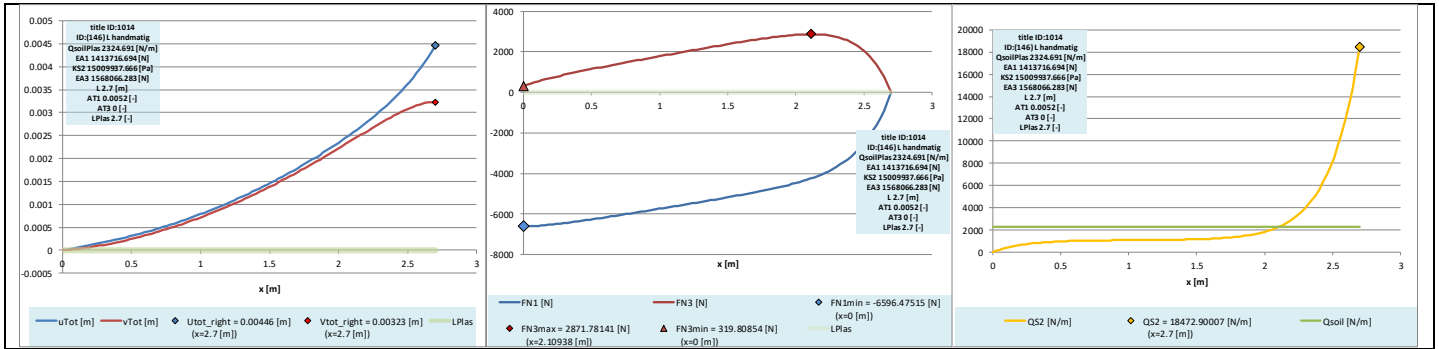


L=1 m plastische grondweerstand

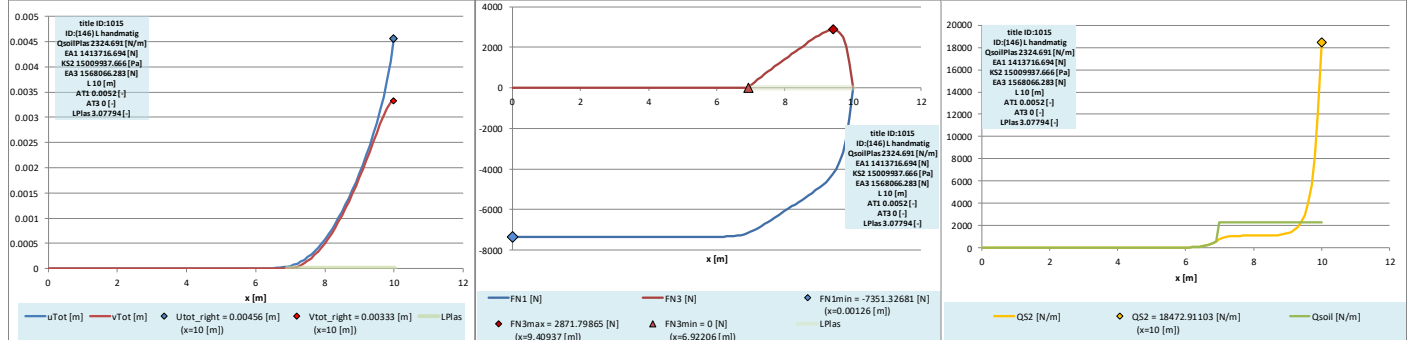


L=2,7 m plastische grondweerstand

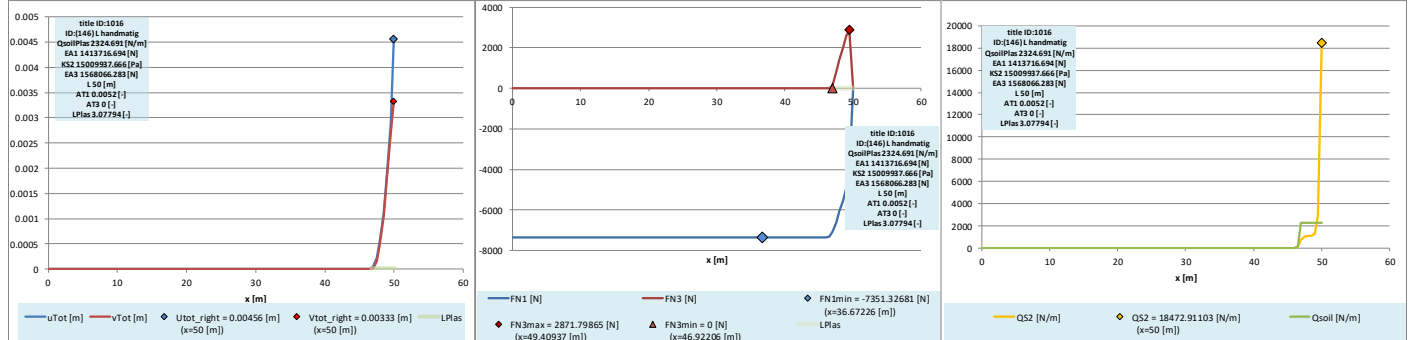




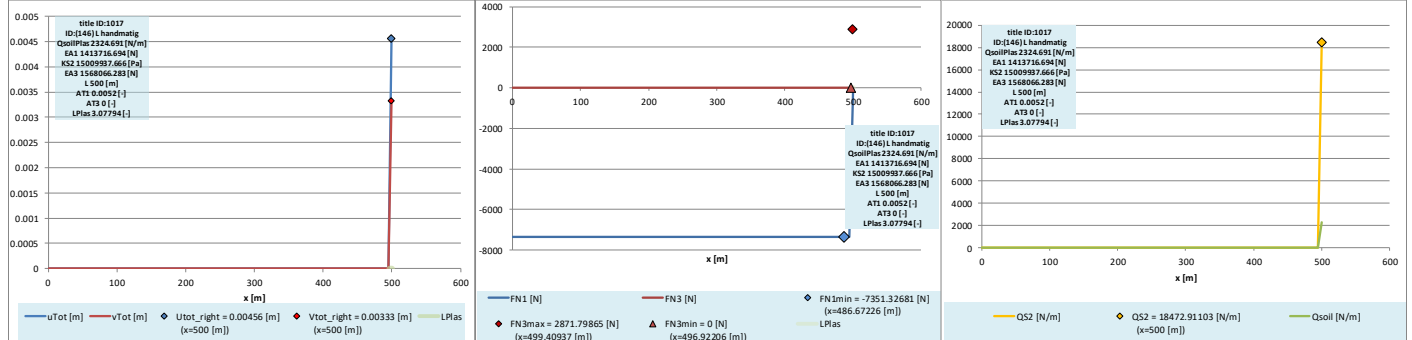
L=10 m elastische & plastische grondweerstand



L=50 m elastische & plastische grondweerstand



L=500 m elastische & plastische grondweerstand

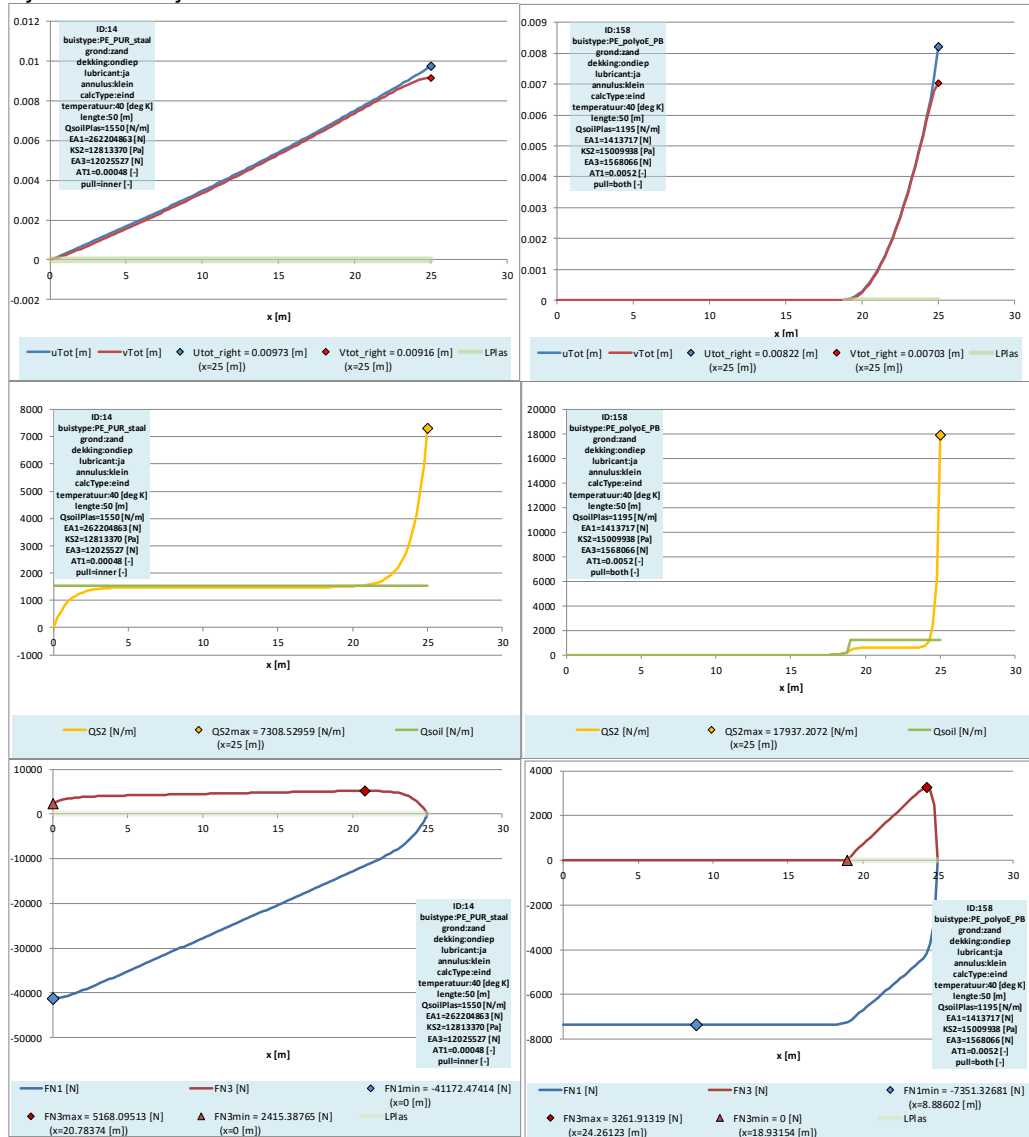


Figuur 30 Opwarmen variant ID=146, PE_polyoE_PE leiding; serie resultaten bij oplopende lengte

4.3.3 Opwarmen; invloed type leiding

In Figuur 31 staat een grafische weergave van de berekeningsresultaten bij het opwarmen van de leiding in gerijpte boorvloeistof (fase "eind"). Links staat het resultaat voor de "PE_PUR_staal" leiding, rechts voor een PE_polyoE_PE leidingstype.

De linkerzijde van de figuren (x=0) is steeds een vast punt of een symmetrie as, de rechter zijde is een vrij uiteinde.



Figuur 31 Opwarmen van een stijve binnenbuis (PE-PUR-staal, links) en PE_polyoE_PE (rechts)

Figuur 31 bovenste plaatjes; vervorming

Voor beide leidingen is de vervorming van de binnen- en buitenbuis nagenoeg gelijk. Aan de ruit symbolen aan de rechterzijde ($x=25$ m) is te zien dat er daar toch een duidelijk verschil in verplaatsing is. Dat verschil is niet onbelangrijk omdat de grootte van het verschil via de stijfheid van het isolatie materiaal KS2 direct de schuifkracht in het isolatie materiaal geeft. Bij de "PE-PUR-staal" leiding in het linker plaatje is de verplaatsing een nagenoeg rechte lijn. Kennelijk domineert de uitzetting door verwarming het beeld en heeft de weerstand uit de grond en uit de buitenbuis nauwelijks invloed. Qua mechanica is dit een korte leiding, bij een langere leiding zullen de verplaatsingen en krachten nog toenemen. In het rechter plaatje is de verplaatsing nabij de symmetrie-as ($x=0$) nul. Daarna neemt naar rechts de verplaatsing in een parabool vorm toe tot de eindwaarde. Qua mechanica is dit een lange leiding, bij een langere leiding zullen de verplaatsingen en krachten niet toenemen. In dit geval is de maximale verplaatsing van beide buizen (toevallig) van dezelfde orde (0,01 m).

Figuur 31 middelste plaatjes; schuifkracht

De grootste afschuifkracht treedt op in het isolatie materiaal aan de rechterzijde. Bij het opwarmen is de rechterzijde het vrije uiteinde. Na deze piek gaat in het linkerplaatje de schuifkracht in het isolatie materiaal nagenoeg naar de plastische schuifkracht van de grond (gele lijn valt vrijwel samen met groene lijn). Aan de linkerzijde bij $x=0$ duikt de schuifkracht in het isolatie materiaal naar nul. In het rechter plaatje neemt de schuifkracht eerst af naar een waarde significant kleiner dan de plastische schuifkracht van de grond. Om vervolgens verder af te nemen naar nul.

Figuur 31 onderste plaatjes; normaalkrachten

Bij een "PE-PUR-staal" leiding is te zien dat de binnenbuis (linker plaatje FN1 blauwe lijn) een drukkracht heeft die maximaal is bij de symmetrie-as. De buitenbuis heeft een trekkracht (linker plaatje FN3 rode lijn), de maximale trekkracht treedt op nabij van het vrije uiteinde (op ca 4 m van dat uiteinde).

Met een dikke transparante licht groene lijn is de plastische zone aangegeven. In de linker figuur is de grond langs de hele leidinglengte plastisch. Daarmee zal de maximale drukkracht in de binnenbuis zich nog niet volledig ontwikkeld hebben met een leidinglengte van 25 m. Dat is ook te zien aan het verloop van de blauwe lijn welke nog geen constante waarde heeft nabij $x=0$.

Bij een slappere binnen- en buitenbuis is de relatieve buislengte veel groter. De rechter zijde van de leiding gedraagt zich analoog aan de "PE-PUR-staal" leiding. In de richting van de symmetrie-as stabiliseert de normaalkracht tot een constante waarde. Daarmee is de maximale waarde met een leidinglengte van 25 m bereikt. Dat is ook te zien aan de lengte van de plastische zone (dikke licht groene lijn) die kleiner is dan de leidinglengte. Bij de oorsprong $x=0$ is de normaalkracht in de buitenbuis gelijk aan nul. Voor de binnen buis is die gelijk aan de fixatie waarde:

$$N_1 = EA_1 * a\Delta T = 1413717 * 0,0052 = 7351 \text{ [N]} = 7 \text{ [kN]} \quad (16)$$

4.3.4 Opwarmen; berekeningsmatrix

De resultaten zijn weergegeven in Bijlage F. Een beknopte weergave staat in de paragrafen hierna in de vorm van tabellen.

4.3.4.1 Opwarmen; ref

Tabel 4.10 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; ref; PE_PUR_staal

buis: PE_PUR_staal fase: ref		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
		40	10	0.062	0.062	0.201	0.201
		0.106	0.106	0.259	0.259	0.017	0.017
		0.072	0.072	0.214	0.214	0.018	0.018
		0.094	0.094	0.242	0.242	0.017	0.017
	25	0.146	0.146	0.201	0.201	0.018	0.018
		0.232	0.232	0.259	0.259	0.017	0.017
		0.173	0.173	0.214	0.214	0.018	0.018
		0.217	0.217	0.242	0.242	0.017	0.017
	100	0.252	0.252	0.201	0.201	0.018	0.018
		0.252	0.252	0.259	0.259	0.017	0.017
		0.252	0.252	0.214	0.214	0.018	0.018
		0.252	0.252	0.242	0.242	0.017	0.017
90	10	0.076	0.076	0.370	0.370	0.044	0.044
		0.121	0.121	0.429	0.429	0.042	0.042
		0.086	0.086	0.384	0.384	0.043	0.043
		0.108	0.108	0.412	0.412	0.043	0.043
	25	0.160	0.160	0.370	0.370	0.044	0.044
		0.281	0.281	0.429	0.429	0.042	0.042
		0.188	0.188	0.384	0.384	0.043	0.043
		0.246	0.246	0.412	0.412	0.043	0.043
	100	0.558	0.558	0.370	0.370	0.044	0.044
		0.567	0.567	0.429	0.429	0.042	0.042
		0.567	0.567	0.384	0.384	0.043	0.043
		0.567	0.567	0.412	0.412	0.043	0.043

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.11 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; ref; PE_polyoE_PB

buis: PE_polyoE_PB fase: ref		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
		40	10	0.138	0.138	0.445	0.445
		0.138	0.138	0.470	0.470	0.044	0.044
		0.138	0.138	0.451	0.451	0.052	0.052
		0.138	0.138	0.463	0.463	0.047	0.047
	25	0.138	0.138	0.445	0.445	0.055	0.055
		0.138	0.138	0.470	0.470	0.044	0.044
		0.138	0.138	0.451	0.451	0.052	0.052
		0.138	0.138	0.463	0.463	0.047	0.047
	100	0.138	0.138	0.445	0.445	0.055	0.055
		0.138	0.138	0.470	0.470	0.044	0.044
		0.138	0.138	0.451	0.451	0.052	0.052
		0.138	0.138	0.463	0.463	0.047	0.047
90	10	0.310	0.310	0.969	0.969	0.143	0.143
		0.310	0.310	0.993	0.993	0.128	0.128
		0.310	0.310	0.975	0.975	0.139	0.139
		0.310	0.310	0.987	0.987	0.132	0.132
	25	0.310	0.310	0.969	0.969	0.143	0.143
		0.310	0.310	0.993	0.993	0.128	0.128
		0.310	0.310	0.975	0.975	0.139	0.139
		0.310	0.310	0.987	0.987	0.132	0.132
	100	0.310	0.310	0.969	0.969	0.143	0.143
		0.310	0.310	0.993	0.993	0.128	0.128
		0.310	0.310	0.975	0.975	0.139	0.139
		0.310	0.310	0.987	0.987	0.132	0.132

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.12 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; ref; PE_PUR_PEX

buis: PE_PUR_PEX fase: ref		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.192	0.192	0.771	0.771	0.121	0.121
		0.192	0.192	0.800	0.800	0.111	0.111
		0.192	0.192	0.778	0.778	0.119	0.119
		0.192	0.192	0.792	0.792	0.113	0.113
	25	0.192	0.192	0.771	0.771	0.121	0.121
		0.192	0.192	0.800	0.800	0.111	0.111
		0.192	0.192	0.778	0.778	0.119	0.119
		0.192	0.192	0.792	0.792	0.113	0.113
	100	0.192	0.192	0.771	0.771	0.121	0.121
		0.192	0.192	0.800	0.800	0.111	0.111
		0.192	0.192	0.778	0.778	0.119	0.119
		0.192	0.192	0.792	0.792	0.113	0.113
90	10	0.294	0.294	1.696	1.696	0.290	0.290
		0.419	0.419	1.725	1.725	0.277	0.277
		0.325	0.325	1.703	1.703	0.287	0.287
		0.385	0.385	1.717	1.717	0.280	0.280
	25	0.432	0.432	1.696	1.696	0.290	0.290
		0.432	0.432	1.725	1.725	0.277	0.277
		0.432	0.432	1.703	1.703	0.287	0.287
		0.432	0.432	1.717	1.717	0.280	0.280
	100	0.432	0.432	1.696	1.696	0.290	0.290
		0.432	0.432	1.725	1.725	0.277	0.277
		0.432	0.432	1.703	1.703	0.287	0.287
		0.432	0.432	1.717	1.717	0.280	0.280

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.13 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; ref; rbbi_PUR_rbbi

buis: rbbi_PUR_rbbi fase: ref		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.154	0.154	0.221	0.221	0.014	0.014
		0.154	0.154	0.249	0.249	0.010	0.010
		0.154	0.154	0.227	0.227	0.013	0.013
		0.154	0.154	0.240	0.240	0.011	0.011
	25	0.154	0.154	0.221	0.221	0.014	0.014
		0.154	0.154	0.249	0.249	0.010	0.010
		0.154	0.154	0.227	0.227	0.013	0.013
		0.154	0.154	0.240	0.240	0.011	0.011
	100	0.154	0.154	0.221	0.221	0.014	0.014
		0.154	0.154	0.249	0.249	0.010	0.010
		0.154	0.154	0.227	0.227	0.013	0.013
		0.154	0.154	0.240	0.240	0.011	0.011
90	10	0.346	0.346	0.457	0.457	0.037	0.037
		0.346	0.346	0.485	0.485	0.033	0.033
		0.346	0.346	0.463	0.463	0.036	0.036
		0.346	0.346	0.476	0.476	0.034	0.034
	25	0.347	0.347	0.457	0.457	0.037	0.037
		0.347	0.347	0.485	0.485	0.033	0.033
		0.347	0.347	0.463	0.463	0.036	0.036
		0.347	0.347	0.476	0.476	0.034	0.034
	100	0.347	0.347	0.457	0.457	0.037	0.037
		0.347	0.347	0.485	0.485	0.033	0.033
		0.347	0.347	0.463	0.463	0.036	0.036
		0.347	0.347	0.476	0.476	0.034	0.034

UC Unity Check ● groter dan 1

4.3.4.2 Opwarmen; eind

Tabel 4.14 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; eind; PE_PUR_staal

buis: PE_PUR_staal fase: eind		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.038	0.041	0.170	0.174	0.019	0.019
		0.045	0.049	0.179	0.184	0.019	0.019
		0.024	0.024	0.152	0.152	0.020	0.020
		0.031	0.031	0.161	0.161	0.020	0.020
	25	0.082	0.091	0.170	0.174	0.019	0.019
		0.101	0.111	0.179	0.184	0.019	0.019
		0.044	0.044	0.152	0.152	0.020	0.020
		0.064	0.064	0.161	0.161	0.020	0.020
	100	0.252	0.252	0.170	0.174	0.019	0.019
		0.252	0.252	0.179	0.184	0.019	0.019
		0.148	0.148	0.152	0.152	0.020	0.020
		0.230	0.230	0.161	0.161	0.020	0.020
90	10	0.052	0.055	0.340	0.343	0.045	0.045
		0.059	0.062	0.349	0.353	0.045	0.044
		0.037	0.037	0.321	0.321	0.046	0.046
		0.045	0.045	0.331	0.331	0.045	0.045
	25	0.096	0.104	0.340	0.343	0.045	0.045
		0.115	0.125	0.349	0.353	0.045	0.044
		0.058	0.058	0.321	0.321	0.046	0.046
		0.078	0.078	0.331	0.331	0.045	0.045
	100	0.319	0.352	0.340	0.343	0.045	0.045
		0.396	0.436	0.349	0.353	0.045	0.044
		0.162	0.162	0.321	0.321	0.046	0.046
		0.245	0.245	0.331	0.331	0.045	0.045

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.15 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; eind; PE_polyoE_PB

buis: PE_polyoE_PB fase: eind		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.138	0.138	0.433	0.434	0.062	0.061
		0.138	0.138	0.436	0.438	0.060	0.059
		0.124	0.124	0.426	0.426	0.067	0.067
		0.138	0.138	0.430	0.430	0.064	0.064
	25	0.138	0.138	0.433	0.434	0.062	0.061
		0.138	0.138	0.436	0.438	0.060	0.059
		0.138	0.138	0.426	0.426	0.067	0.067
		0.138	0.138	0.430	0.430	0.064	0.064
	100	0.138	0.138	0.433	0.434	0.062	0.061
		0.138	0.138	0.436	0.438	0.060	0.059
		0.138	0.138	0.426	0.426	0.067	0.067
		0.138	0.138	0.430	0.430	0.064	0.064
90	10	0.267	0.280	0.956	0.958	0.153	0.151
		0.292	0.307	0.960	0.962	0.150	0.149
		0.214	0.214	0.949	0.949	0.159	0.159
		0.244	0.244	0.953	0.953	0.155	0.155
	25	0.310	0.310	0.956	0.958	0.153	0.151
		0.310	0.310	0.960	0.962	0.150	0.149
		0.293	0.293	0.949	0.949	0.159	0.159
		0.310	0.310	0.953	0.953	0.155	0.155
	100	0.310	0.310	0.956	0.958	0.153	0.151
		0.310	0.310	0.960	0.962	0.150	0.149
		0.310	0.310	0.949	0.949	0.159	0.159
		0.310	0.310	0.953	0.953	0.155	0.155

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.16 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; eind; PE_PUR_PEX

buis: PE_PUR_PEX fase: eind		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.139	0.149	0.756	0.758	0.128	0.127
		0.156	0.166	0.760	0.762	0.126	0.125
		0.105	0.105	0.748	0.748	0.132	0.132
		0.125	0.125	0.752	0.752	0.129	0.129
	25	0.192	0.192	0.756	0.758	0.128	0.127
		0.192	0.192	0.760	0.762	0.126	0.125
		0.158	0.158	0.748	0.748	0.132	0.132
		0.192	0.192	0.752	0.752	0.129	0.129
	100	0.192	0.192	0.756	0.758	0.128	0.127
		0.192	0.192	0.760	0.762	0.126	0.125
		0.192	0.192	0.748	0.748	0.132	0.132
		0.192	0.192	0.752	0.752	0.129	0.129
90	10	0.227	0.236	1.680	1.682	0.298	0.297
		0.243	0.254	1.684	1.686	0.296	0.295
		0.192	0.192	1.672	1.672	0.303	0.303
		0.213	0.213	1.677	1.677	0.300	0.300
	25	0.333	0.357	1.680	1.682	0.298	0.297
		0.375	0.401	1.684	1.686	0.296	0.295
		0.246	0.246	1.672	1.672	0.303	0.303
		0.297	0.297	1.677	1.677	0.300	0.300
	100	0.432	0.432	1.680	1.682	0.298	0.297
		0.432	0.432	1.684	1.686	0.296	0.295
		0.432	0.432	1.672	1.672	0.303	0.303
		0.432	0.432	1.677	1.677	0.300	0.300

UC Unity Check ● groter dan 1

Tabel 4.17 Berekeningsresultaten opwarmen leiding; eind; rbbi_PUR_rbbi

buis: rbbi_PUR_rbbi fase: eind		Unity Checks [-]					
ΔT [deg K]	Unity Check annulus lengte [m]	binnenbuis UC FN1		isolatie UC QS2		buitenbuis UC FN3	
		klein	groot	klein	groot	klein	groot
40	10	0.154	0.154	0.206	0.208	0.016	0.016
		0.154	0.154	0.211	0.214	0.015	0.015
		0.152	0.152	0.197	0.197	0.018	0.018
		0.154	0.154	0.201	0.201	0.017	0.017
	25	0.154	0.154	0.206	0.208	0.016	0.016
		0.154	0.154	0.211	0.214	0.015	0.015
		0.154	0.154	0.197	0.197	0.018	0.018
		0.154	0.154	0.201	0.201	0.017	0.017
	100	0.154	0.154	0.206	0.208	0.016	0.016
		0.154	0.154	0.211	0.214	0.015	0.015
		0.154	0.154	0.197	0.197	0.018	0.018
		0.154	0.154	0.201	0.201	0.017	0.017
90	10	0.339	0.345	0.442	0.444	0.040	0.040
		0.346	0.346	0.448	0.450	0.039	0.039
		0.223	0.223	0.433	0.433	0.043	0.043
		0.282	0.282	0.438	0.438	0.042	0.042
	25	0.347	0.347	0.442	0.444	0.040	0.040
		0.347	0.347	0.448	0.450	0.039	0.039
		0.346	0.346	0.433	0.433	0.043	0.043
		0.346	0.346	0.438	0.438	0.042	0.042
	100	0.347	0.347	0.442	0.444	0.040	0.040
		0.347	0.347	0.448	0.450	0.039	0.039
		0.347	0.347	0.433	0.433	0.043	0.043
		0.347	0.347	0.438	0.438	0.042	0.042

UC Unity Check ● groter dan 1

5 Discussie

5.1 Algemeen

In de berekeningen is uitgegaan van de beschikbare gegevens die kunnen worden beschouwd als gemiddelde waarden. De berekeningsresultaten zijn dus verwachtingswaarden (Best Estimate). Het bleek lastig om berekeningsparameters voor de verschillende leidingtypen te achterhalen.

5.2 Grondveren

Zoals te verwachten is, neemt de sterkte en de stijfheid van de grondveren toe in de volgorde van de fasen: "aanleg, eind, ref". Dit correspondeert met de afnemende invloed van de boorvloeistof. De hoogste waarde bij de aanleg in de sleuf (ref) geeft aan wat maximaal mogelijk is met b.v. een uithardende boorvloeistof die sterker en stijver is dan de omringende grond.

5.3 Intrekken

5.3.1 Globaal gedrag

Hoe langer de leiding hoe groter de plastische grondreactie, hoe groter de krachten in de leiding. Om de leiding toch in te kunnen trekken wordt gesmeerd met een boorvloeistof of lubricant. Het gunstige effect van de smering is goed te zien in het verschil tussen respectievelijk tabellen "ref" *Tabel 4.1 t/m Tabel 4.4* en "aanleg" *Tabel 4.5 t/m Tabel 4.8*, waarbij de laatste serie met lubricant c.q. smering veel lagere trekkrachten geeft.

Voor het intrekken van de leiding is het gunstig als de buitenbuis relatief stijf is en er (ook) aan de buitenbuis wordt getrokken. De "PE-PUR-staal" leiding gedraagt zich minder gunstig. Vanuit mechanica oogpunt is het omgekeerde opbouw: een slappe binnenbuis met een stijve buitenbuis waarop de trekkracht aangrijpt, gunstiger.

5.3.2 Verschil stalen of kunststof binnenbuis

Het gedrag van de "PE_PUR_staal" leiding is fundamenteel anders dan dat van de overige leidingtypen. De oorzaak is de hoge stijfheid van de binnenbuis bij een "PE_PUR_staal" leiding. Daarom wordt bij het intrekken van een PE_PUR_staal leiding alleen aan de binnenbuis wordt getrokken. Bij de andere leidingtypen wordt aangenomen dat gelijktijdig aan beide buizen wordt getrokken.

Lange kunststof leidingen (200 m) rekken meters uit bij het intrekken (zie kunstleiding met lubricant *Figuur 26* $U_{max} = 2,08$ m). Deze rek zal grotendeels verdwijnen na het intrekken. Maar door het plastisch gedrag van de grond en bentoniet zullen er rekken (trekspanningen) aanwezig blijven. Dat heeft (waarschijnlijk gunstige) gevolgen voor de vervorming tijdens het latere opwarmen.

Behalve de grote rek vormt de kracht in de leiding ook een beperking voor het intrekken van lange kunststof leidingen (zie *Tabel 4.6* en *Tabel 4.8*).

Met het ontwerp van de leiding, de toegepaste lubricant en de diepteligging in combinatie met de ondergrond zijn mogelijkheden om lange kunststofleidingen in te trekken. Dat blijkt uit de

genoemde tabellen, er zijn weliswaar situaties waar een lengte van 200 m een te hoge UC waarde geeft, maar dat aantal is de minderheid.

5.3.3 Trekkop

Een trekkop die zowel de binnen- als de buitenbuis trekt is gunstig. Door gelijktijdig aan beide buizen te trekken treden spanningspieken niet op. Een trekkop die alleen de buitenbuis grijpt is mogelijk ook een optie voor kunststof leidingen.

5.4 Opwarmen

5.4.1 Globaal gedrag

In paragraaf 4.3.2 is te zien dat boven een bepaalde leidinglengte de krachten en verplaatsingen niet meer verder toenemen. Voor een enkelwandige leiding wordt dit de fixatie lengte genoemd en kan die lengte met een eenvoudige formule berekend worden (8). Voor de warmteleidingen is in dit rapport de plastische lengte gerapporteerd die vergelijkbaar is. De fixatie/plastische lengte is kleiner als:

- De maximale kracht in de leiding beperkt is (waarden *Tabel 4.9*).
- De plastische grondreactiekracht groter is.

Een kleine fixatie/plastische lengte is gunstig omdat de vervormingen en krachten dan veelal kleiner zijn. Bovendien treden de vervormingen over een kleiner gebied op.

Daarmee zijn de kunststof leidingen in het voordeel wegens de kleinere maximale kracht (*Tabel 4.9*). Een aanleg in sleuf ("ref") is gunstiger dan een boring ("aanleg") wegens het ontbreken van de boorvloeistoflaag die de plastische grondreactiekracht reduceert.

Een grotere stijfheid van de buitenbuis zorgt voor een afname van de vervormingen. Een grotere stijfheid van de binnenbuis zorgt voor een toename van de vervormingen.

Voor de berekening van de invloed van de stijfheid op de krachten is er geen eenvoudige algemene regel.

5.4.2 Invloed leidingtype

De berekeningsresultaten zijn in tabelvorm opgenomen in §4.3.3. Sub paragraaf 4.3.4.1 betreft de fase "ref". De conclusies zijn:

PE_PUR_staal leiding

- *Tabel 4.10*;
de stalen binnenbuis is maatgevend. Bij de maximale halve leidinglengte van 100 m en $dT=90^\circ$ voldoet de kracht met $UC_{max} \approx 0,6$. De maximale verplaatsing van de binnenbuis voldoet net niet aan de gestelde eis voor een aftakking ($<0,05$ m) met $UC_{max} = 1$. De plastische lengte volgens Bijlage F.1 is veelal gelijk aan de leidinglengte. Daarmee zijn de maximale kracht en verplaatsing nog niet ontwikkeld, dus bij grotere buislengten kunnen de krachten en verplaatsingen nog verder toenemen.
- PE_polyoE_PB leiding *Tabel 4.11*;
PUR isolatie maatgevend maar voldoet met $UC_{max} \approx 1,0$.
Ook aan de eis voor de aftakking wordt voldaan met $UC_{max} = 0,4$ waarmee de maximale verplaatsing dus ongeveer $0,05 \cdot 0,4 = 0,03$ m is. Opvallend is dat de lengte geen invloed heeft op de resultaten. Dit klopt met de plastische lengte welke is terug te zoeken in Bijlage F.2. De maximale waarde van 7 m valt ruim binnen de kleinst geëvalueerde leidinglengte van 10 m. Daarmee zijn de maximale kracht en verplaatsing volledig ontwikkeld, dus bij grotere buislengten kunnen de krachten en verplaatsingen niet verder toenemen.

- PE_PUR_PEX leiding *Tabel 4.12*;
PUR isolatie maatgevend. Bij het hogere temperatuurverschil van 90°K voldoet de schuifspanning in de isolatie voor geen van de lengten, $UC_{max} \approx 2$.
De plastische lengte volgens Bijlage F.3 is maximaal 16 m. Daarmee is de maximale kracht en verplaatsing ontwikkeld bij de grotere leidinglengtes.
- Ribbel_PUR_ribbel leiding *Tabel 4.13*;
de ribbel binnenbuis en PUR isolatie zijn maatgevend maar voldoen met $UC_{max} \approx 0,4$.
De maximale verplaatsingen voldoen.
De plastische lengte volgens Bijlage F.4 is maximaal 5 m. Daarmee is de maximale kracht en verplaatsing ontwikkeld bij alle leidinglengtes.

Fase “eind”:

- PE_PUR_staal leiding *Tabel 4.14*;
de stalen binnenbuis en het isolatie materiaal zijn maatgevend voor de krachten, deze voldoen met $UC_{max} \approx 0,3$. De maximale verplaatsing van de binnenbuis voldoet niet aan de eis voor een aftakking met $UC_{max} \approx 2$.
De plastische lengte volgens Bijlage F.5 is maximaal 100 m. Daarmee zijn de maximale kracht en verplaatsing niet ontwikkeld.
- PE_polyoE_PB leiding *Tabel 4.15*;
qua krachten is PUR isolatie maatgevend, maar voldoet met $UC_{max} \approx 1,0$.
De maximale verplaatsing van de binnenbuis voldoet niet met $UC_{max} \approx 1,6$.
De plastische lengte volgens Bijlage F.6 is maximaal 28 m. Daarmee is de maximale kracht en verplaatsing ontwikkeld bij de grotere leidinglengtes.
- PE_PUR_PEX leiding *Tabel 4.16*;
voor de krachten is de PUR isolatie maatgevend, deze voldoet niet met $UC \approx 1,7$.
De maximale verplaatsing van de binnenbuis is groeter dan de grenswaarde voor een aftakkingen met $UC_{max} \approx 8$.
De plastische lengte volgens Bijlage F.7 is maximaal 77 m. Daarmee is de maximale kracht en verplaatsing net wel of net niet ontwikkeld bij de grootste leidinglengte van 100 m.
- Ribbel_PUR_ribbel leiding *Tabel 4.17*;
de ribbel binnenbuis en PUR isolatie zijn maatgevend maar voldoen met $UC_{max} \approx 0,4$. De maximale verplaatsingen voldoen.
De plastische lengte volgens Bijlage F.8 is maximaal 22 m. Daarmee is de maximale kracht en verplaatsing ontwikkeld bij grotere leidinglengtes.

Tot bepaalde lengte geldt: Hoe langer de leiding, hoe groter de krachten en vervormingen. Bij het ontwerp van een leidingnet wordt de lengte soms kunstmatig beperkt door het aanbrengen van expansielussen. Met een expansielus maakt de leiding haakse bochten waarmee de opbouw van krachten en vervormingen wordt doorsneden. Bij kunststof leidingen zijn de krachten bij een beperkte leiding lengte al volledig ontwikkeld, daarom hebben expansielussen geen effect bij kunststof leidingen. Voor leidingen met een stalen binnenbuis speelt de lengte wel een rol en worden expansielussen vaak wel toegepast.

Bij de modelberekeningen is knik niet getoetst. Bij het opwarmen van een warmteleiding kunnen grote normaal drukkrachten optreden in de binnenbuis, zoals hiervoor uitvoerig gerapporteerd.

Voor constructies is bekend dat een kolom onder een drukbelasting kan uitknikken. Ook een leiding kan uitknikken. Bij een kolom komt de belasting uit een kracht die op de kolom staan, bijvoorbeeld het gewicht van een verdiepingsvloer.

Voor een leiding is de kracht het gevolg van de interne belasting door het uitzetten bij temperatuursverhoging. Aspecten die spelen bij knik van een leiding zijn:

- De grootte van de normaalkracht, een grote kracht is ongunstig.
- De knikweerstand uit buigstijfheid. Een grote buigstijfheid EI is gunstig.
- De ondersteuning. Een grote steunkracht door omringende grond is gunstig.

Uiteraard is de eerste aanpak om te voorkomen dat knik zal optreden. De gevolgen van knik hoeven echter niet altijd desastreus te zijn. Als met het uitknikken de normaalkracht snel terugloopt kan ook de uitgeknikte vorm nog functioneren.

Ook zijn effecten van een repeterende belasting niet beschouwd in de modelberekeningen. Dit kan ervoor zorgen dat plastische vervormingen zich opbouwen. Kruip is een vorm van dergelijk materiaalgedrag. Voor een leiding kan het voorkomen dat een herhaaldelijk axiale vervorming zorgt voor een ophoping van vervormingen. Dit is te vergelijken met een rups die zich kan voortbewegen door herhaalde axiale vervormingen. Eigenlijk zijn daar alleen engelse namen voor, ratcheting en axial creep.

6 Samenvatting en conclusies

In dit rapport zijn axiale modelberekeningen voor distributie warmte leidingen beschreven. Zowel de aanleg als de situatie als de warmte leidingen opwarmen zijn beschouwd. Er zijn verschillende distributie warmte leidingen uitgekozen om het gedrag van deze leidingen bij verschillende scenario's te bekijken. In dit rapport zijn vier typen leidingen beschouwd:

- een stalen binnenbuis en een kunststof buitenbuis (staal-PUR-PE),
- een kunststof binnenbuis en buitenbuis (Polybuteen-Polyolefin-PE)
- een kunststof binnenbuis en buitenbuis (PEX-PUR-PE)
- een stalen binnenbuis en stalen buitenbuis, beide geribbeld

De resultaten van deze axiale berekeningen zullen door R+K consulting engineers in een separate studie worden gebruikt om sterkte berekeningen voor de gekozen warmte leidingen te maken en de uitkomsten van deze sterkte berekeningen te toetsen aan de toelaatbare waarden van de leidingen.

Het bleek lastig om voor de verschillende gekozen leidingen de mechanische leidingparameters van de verschillende leidingdelen te verkrijgen. De leiding parameters zijn vastgesteld op basis van de beschikbare informatie.

Bij de aanleg van leidingen in een horizontaal boorgat wordt de leiding ingetrokken in het boorgat. Bij het intrekken van de leiding is een "Staal-PUR-PE" leiding gunstig, omdat de stalen binnenbuis zorgt voor een beperkte verlenging van de leiding en een grote opneembare kracht. De andere leidingen vertonen bij grotere lengtes tot 200 m verlengingen in de orde van tientallen centimeters, ook kan de kracht in de andere leidingen hoog oplopen.

Bij het opwarmen van de leiding in de gebruiksfase daarentegen is het gunstig als de binnenbuis slap is en weinig uitzet. De "Staal-PUR-PE" leiding is dan ongunstig, omdat de stalen binnenbuis stijver is dan de binnenbuizen van de andere leidingtypen. Hierdoor kan bij langere leidingen de kracht in een "Staal-PUR-PE" leiding hoog oplopen.

Tot bepaalde lengte geldt: Hoe langer de leiding, hoe groter de krachten en vervormingen. Bij het ontwerp van een leidingnet wordt de lengte soms kunstmatig beperkt door het aanbrengen van expansielussen. Met een expansielus maakt de leiding haakse bochten waarmee de opbouw van krachten en vervormingen wordt doorsneden. Bij kunststof leidingen zijn de krachten bij een beperkte leiding lengte al volledig ontwikkeld, daarom hebben expansielussen geen effect bij kunststof leidingen. Voor leidingen met een stalen binnenbuis speelt de lengte wel een rol en worden expansielussen toegepast.

A Leiding data

Voor de isolatie van de buizen lijkt PUR het standaard materiaal te zijn. PUR schuim kent echter een groot spectrum aan parameters. Voor de dwarscontractie coëfficiënt wordt $\nu=0$ aangehouden. De onderbouwing is dat daarmee een meer stabiel model ontstaat. In het algemeen is de dwarscontractiecoëfficiënt in vergelijking met de elasticiteitsmodulus een lastiger te bepalen. Dit komt voort uit de aard van de parameter die een vervorming modelleert in de richting loodrecht op de belastingsrichting. In berekeningen resulteert dit in een lastiger te begrijpen vervormings- en krachtsverdeling. Gezien het onderzoeks karakter van dit project is hier een waarde gelijk aan nul een veilige aanname. Voor ontwerpberoeeningen moet de afweging opnieuw gedaan worden.

De parameters voor een PE polyoE+ PB leiding en de ribbel leiding zijn deels gebaseerd op verstrekte informatie door leveranciers. Voor de ribbelbuizen is tevens gebruik gemaakt van beschikbaar gestelde resultaten van trek- en buigproeven.

In feite komt dit erop neer dat een metalen ribbelbuis wordt gecombineerd met een schil van isolatie materiaal. Voor de buitenbuis komt daar de buitenlaag nog bij. Voor dit onderzoeksproject worden de gebruikte parameters als acceptabel beoordeeld. Of dit voor ontwerpberoeeningen is toegestaan is discutabel.

Uit de rapportage van werkgroep 2B1 volgt:

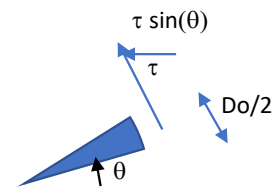
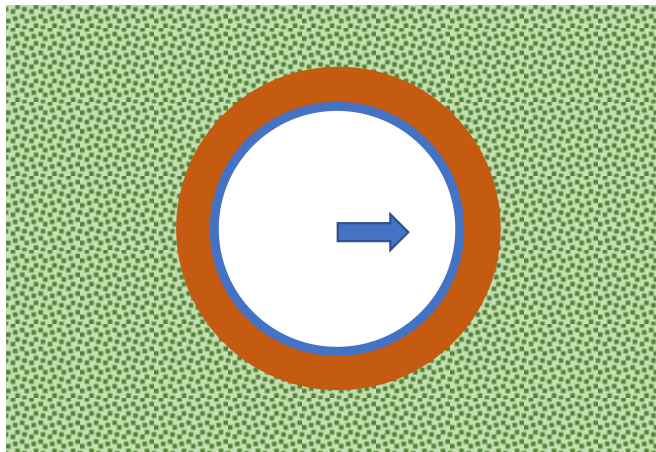
- Email 10 sep 2020 <Niels.vanSchie@eneco.com> -> H.Kruse Deltares "Werkgroep 2B1.pdf"
- Maximale schuifspanning PUR staal $\tau = 0,04$ MPa
- Maximale drukspanning PUR 0,3 MPa
- Treksterkte HDPE buitenbuis 23-30 MPa
- Specificaties Kunststof leidingen.xlsx -> flexalen buitenmantel $\alpha=0,00018$ [1/°K]
flexalen mediumbuis $\alpha=0,00013$ [1/°K]
flexalen buitenmantel $\sigma_{trek} = 32$ [MPa]
flexalen buitenmantel $E = 800$ [MPa]

In vergelijking met bovenstaande is de afschuifsterkte van het isolatie materiaal in *Tabel 2.2 Leiding typen (distributie leidingen) met parameters Tabel 2.2* relatief laag. Een motivatie is dat bezwijken zal optreden bij de zwakste schakel. In dit geval zal dat de interface met de buis zijn.

B Veergedrag boorvloeistof

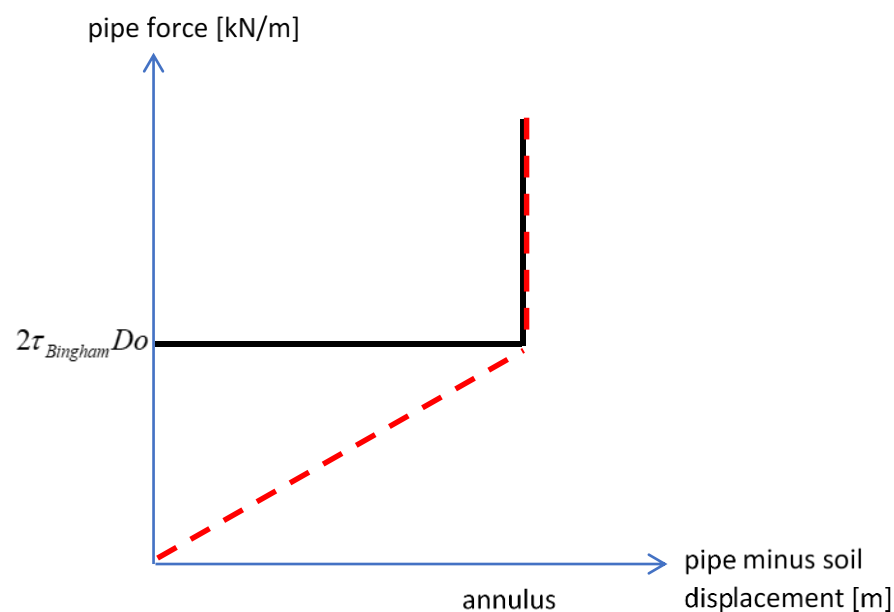
De flexibiliteit van de bentoniettschil is in rekening gebracht als een veer met maximale indrukking gelijk aan grootte van de overcut. Bij kleine snelheid is de kracht gelijk aan

$$F_{start} = 2 \int_{\theta=0}^{\pi} \tau_{Bingham} \frac{Do}{2} \sin(\theta) d\theta = 2\tau_{Bingham} Do$$



Figuur B1 Krachswerking boorvloeistof

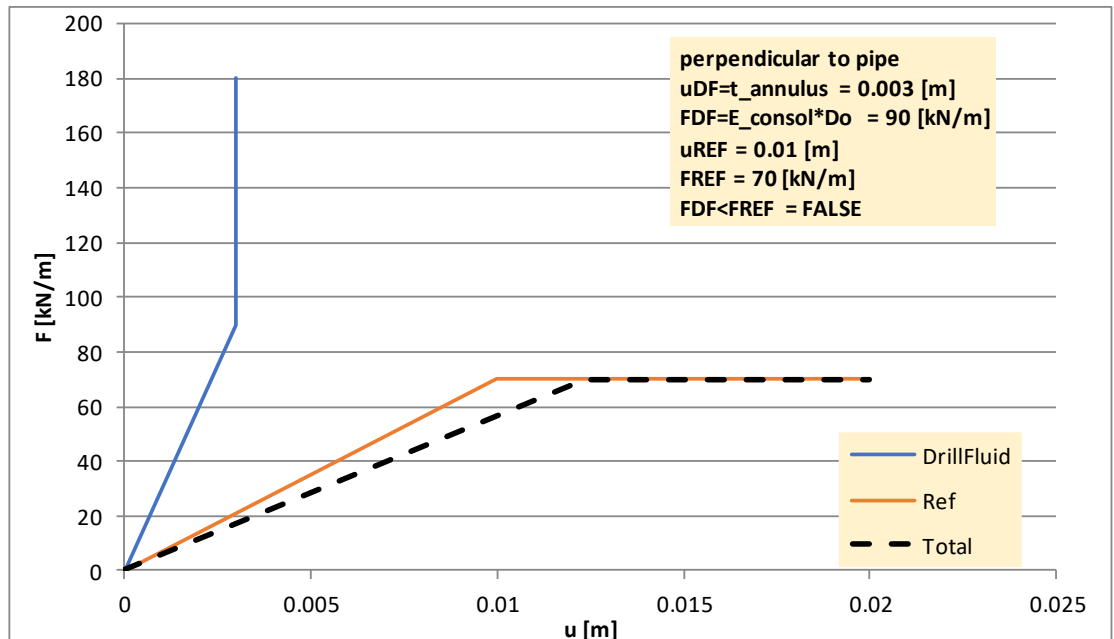
Het theoretische model is de zwarte lijn in het onderstaande kracht verplaatsingsdiagram (Figuur B.2). Om numerieke benaderingen mogelijk te maken is de rode stippellijn gekozen.



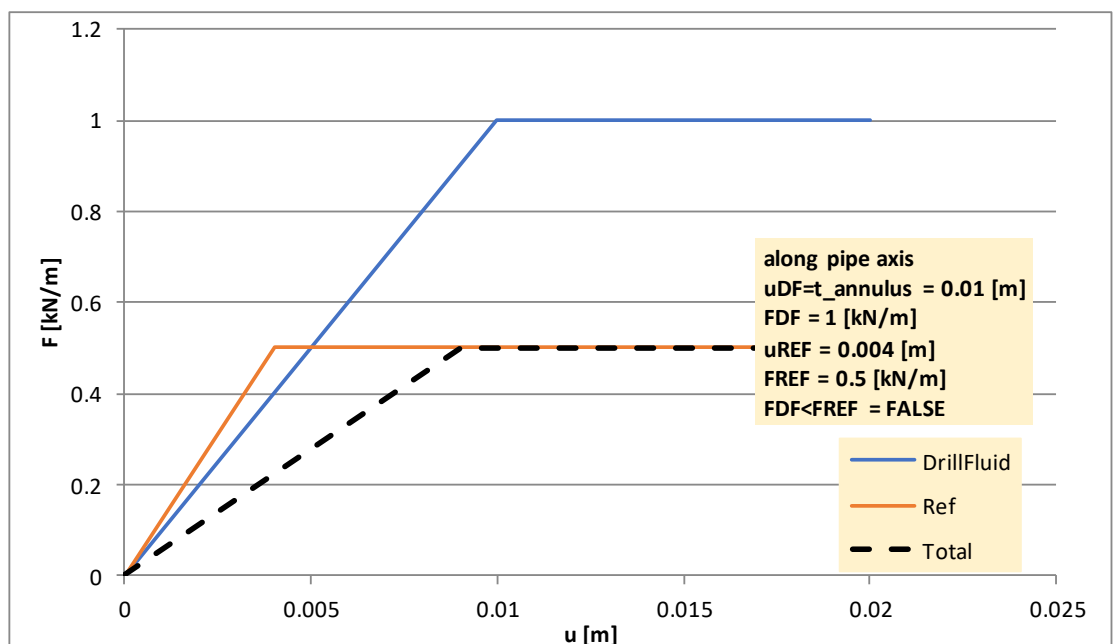
Figuur B2 Last verplaatsingsdiagram boorvloeistof

De grond wordt gemodelleerd met een elasto plastisch gedrag.

De veer voor de boorvloeistof en voor de grond staan in serie. Het gecombineerde gedrag is weergegeven in de onderstaande figuren B.3 en B.4.



Figuur B3 Belasting loodrecht op leidingas

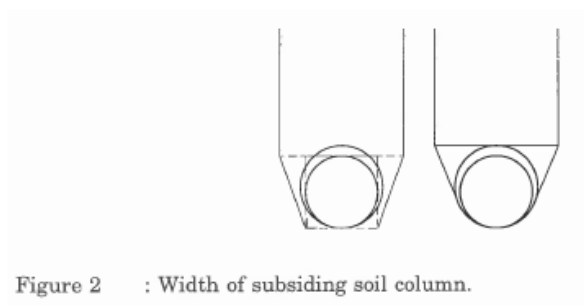
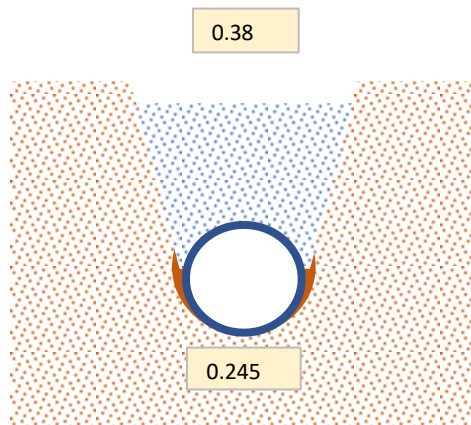


Figuur B4 Belasting evenwijdig aan leidingas

C Stabiliteit boorgat

Berekening in hoofdlijnen van stabiliteit boorgat uitgewerkt voor de eerste berekening.

C.1 Afmetingen



Figuur C1 Afmetingen

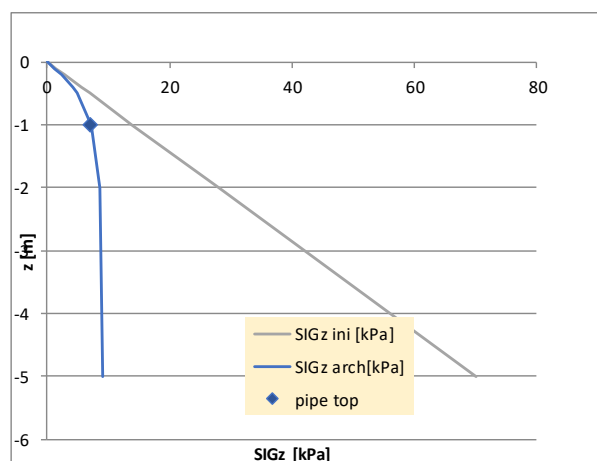
De breedte van het boorgat is de diameter van de leiding plus 2 maal de annulus.

$$0.225 + 2 \cdot 0.01 = 0.245 \text{ m}$$

De zakkende grondkolom verbreedt zich onder een hoek van $45^\circ + \varphi/2$ tot 0.38 m conform:

- P.Meijers and R.A.J. de Kock, A calculation method for earth pressures on directionally drilled pipelines, 1995

C.2 Verticale effectieve spanning

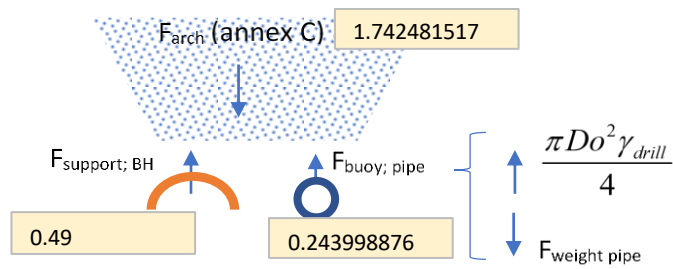


Figuur C2 Verloop effectieve verticale spanning

Het verloop van de effectieve verticale spanning is weergegeven in de figuur hierboven. Op het niveau van de kruin van de leiding geldt: $\sigma'_v = 7.11 \text{ kPa}$.

C.3 Evenwicht grondkolom boven leiding

De stabiliteit van de grondkolom boven de leiding is weergegeven in Figuur C.3.



Figuur C3 Stabiliteit grondkolom boven leiding

De neerwaartse kracht volgt uit de breedte van het boorgat maal de verticale korrelspanning:
 $0.245 \cdot 7.11 = 1.74 \text{ kN}$.

De tegenwerkende krachten volgen uit de grootte van de boorvloeistof overdruk en de (eventuele) opwaartse kracht van de leiding. In dit geval is het boorgat niet stabiel omdat de neerwaartse kracht groter is dan de opwaartse krachten ($1.74 > 0.49 + 0.24$)

F.3 Fase "ref" leiding PE PUR PEX

ID	buistype	grond	dekking	annulus	calcType	temper	length	QsoiPAs	FNtu	QSSu	FNu	Uhuisu	UHuisu	Ubochtu	U'bochtu	L'PAs	FNmin	QSSmax	FN3max	Ubot_right	Vst_right	U'CFNtu	U'CHQSSu	U'CFR'Fu
289	PE_PUR_PEX	zand	ondep	klein	ref		40	100 2063.875	94247.78	41469.02	48194.54	0.05	0.01	0.1	0.02	8.626689	-18083.2	3190.71	5844.116	0.020649	0.019031	0.1919	0.7712	0.1213

F.4 Fase "ref" leiding ribbel PUR ribbel

ID	buistype	grond	dekking	annulus	calcType	temper	length	QsoiPAs	FNtu	QSSu	FNu	Uhuisu	UHuisu	Ubochtu	U'bochtu	L'PAs	FNmin	QSSmax	FN3max	Ubot_right	Vst_right	U'CFNtu	U'CHQSSu	U'CFR'Fu
433	ribbel_PUR_ribbel	zand	ondep	klein	ref		40	100 4185.785	85345.13	82184.06	18191.05	0.05	0.01	0.1	0.02	2.2491	-10063.1	1872.35	2479.956	0.001753	0.001196	0.154	0.2211	0.0136

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

Bijlage B, memo ringberekeningen

Memo

Aan

...

Datum

13 juli 2021

Contactpersoon

Piet Meijers

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7532

E-mail

Piet.Meijers@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 8

Onderwerp

WarmingUp, ringberekening met PLUTO

1 Inleiding

In het kader van het project WarmingUp wordt het programma ple4win gebruikt voor leidingberekeningen. Dit programma bevat nog geen module specifiek voor dubbelwandige leidingen met isolatie.

Als onderdeel van de ontwikkeling van het rekenmodel wordt nu in ple4win gewerkt met een 'equivalente' buis. Door R+K zijn hiermee de eerste berekeningen gemaakt. Een onzekerheid in de resultaten is de invloed van de samenwerking tussen de binnenbuis, de buitenbuis en het isolatiemateriaal.

Door Deltares is een rekenmodel ontwikkeld, gebaseerd op een EEM pakket PLUTO, om voor een ringdoorsnede de krachtwerking in een dubbelwandige buis te bepalen.

In deze memo worden eerste resultaten van de PLUTO berekeningen gepresenteerd.

2 Schematisatie in PLUTO

2.1 Opzet

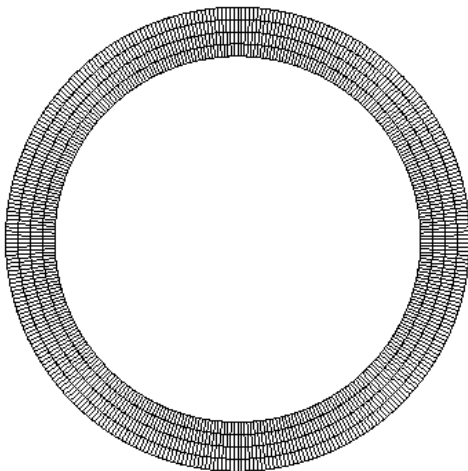
Er is een pre- en postprocessor ontwikkeld waarmee eenvoudig een aantal standaard situaties kan worden doorgerekend. Paragraaf 2.2 beschrijft de geometrie en paragraaf 2.3 de voorgeprogrammeerde belastingcombinaties.

2.2 Geometrie

De leiding is gemodelleerd als een ronde buis. De volgende parameters kunnen worden opgegeven:

binnenbuis	' nEle number of elements along ring.
	' Rin inner radius of ring
	' Ein inner Youngs modulus ring
	' nuin inner Poison ratio
	' tin inner thickness
isolatie	' Eins insulation Youngs modulus
	' nuins insulation Poison ratio
buitenbuis	' Rout outer radius of ring
	' Eout outer Youngs modulus ring
	' nuout outer Poison ratio
	' tout outer thickness

De binnen- en buitenbuis worden gemodelleerd met liggerelementen, het tussenliggende isolatiemateriaal met volume elementen. Figuur 2-1 toont een voorbeeld van een gegenereerd elementennet.



Figuur 2-1 Voorbeeld EEM model

2.3 Belastingcombinaties

Er zijn vier voorgeprogrammeerde belastingen, die kunnen worden gecombineerd. Dit zijn:

- LOAD1: Een puntlast
- LOAD2: Belasting (gronddruk) aan een zijde, het krachtenevenwicht wordt geleverd door aan de andere zijde een tegendruk aan te brengen. De opleghoek van de belasting en oplegspanning kan worden opgegeven; standaard is de belastingrichting verticaal
- LOAD3: Een gelijkmatig verdeelde belasting op de binnenbuis, tegendruk wordt geleverd door een druk op de buitenbuis; standaard is de belastingrichting horizontaal
- LOAD3: Een gelijkmatig verdeelde belasting op de binnenbuis, tegendruk wordt geleverd door een druk op de buitenbuis; standaard is de belastingrichting horizontaal
- LOAD4: Interne druk

Tabel 2-1 Overzicht voorgeprogrammeerde belastingsituaties

load1	' Fopp	Size of loads at top and bottom	LOAD 1
load2	' Qtot	Total load on top (downward positive)	LOAD 2
	' alpha	loading angle according to NEN 3650 [deg]	LOAD 2
	' beta	support/bedding angle according to NEN 3650 [deg]	LOAD 2
load3	' Fin	total load on inner pipe, spreaded equal along circumference	LOAD 3
	' Fout	total load on outer pipe, spreaded equal along circumference	LOAD 3
	' gamma	support/bedding angle along bottom [deg]	LOAD 3
load 4	' p	Internal pressure	LOAD 4

2.4 Combinatie horizontale en verticale belasting

In de huidige preprocessor kan alleen een verticale belasting, of eigenlijk een belasting in 'richting 2', worden opgegeven. De combinatie van een horizontale en verticale belasting is nu nog niet mogelijk.

Bij een situatie met belastingen in zowel horizontale als verticale richting moeten daarom twee berekeningen worden gemaakt en de resultaten vervolgens worden gecombineerd, rekening houdend met de verschillende oriëntatie van de belastingrichtingen.

3 Berekeningen equivalente buis

3.1 Algemeen

Bij een bocht in een warmte leiding zal de grondbelasting op de buitenbocht via de binnen- en de buitenbuis op de rest van de leiding worden overgebracht. Aan de binnenbocht werkt geen gronddruk.

Verondersteld wordt dat de verticale component de verticale grondbelasting betreft, die wordt opgenomen door de grond onder de leiding (load 2 in de PLUTO invoer). De horizontale component wordt verondersteld de horizontale grondbelasting in de bocht te zijn. Ook wordt verondersteld dat er in de binnenbocht geen gronddruk tegen de leiding werkt en dat deze belasting wordt opgenomen door dwarskracht in de binnen- en buitenbuis.

De verdeling van de reactie over binnen- en buitenbuis is niet met een 2D model te bepalen en zal daarom uit de ple4win berekening moeten worden afgeleid. Hiervoor kan mogelijk het verloop van de (horizontale) dwarskracht worden gebruikt. Als eerste benadering wordt verondersteld dat de verdeling van de krachten over binnen- en buitenbuis overeenkomt met de verhouding in buigstijfheid (EI) van de binnen- en buitenbuis.

3.2 Staal-PUR-PE buis

Voor deze configuratie zijn door R+K de volgende parameters gebruikt:

- Staal-PUR-PE: ID 2: Zand, ondiep
- PE80: Do=225mm, t=13,4mm, E'=300 N/mm² (3E5 kN/m²)
- Staal: Do=114mm, t=3,6mm, E=210.000, N/mm² (2,1E8 kN/m²).

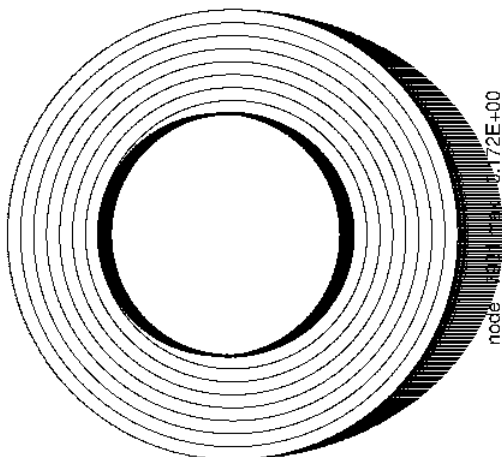
Voor deze configuratie worden de volgende buigstijfheden berekend:

Tabel 3-1 Gebruikte parameters

binnenbuis	
R_out	0.057
R_in	0.0534
EI	340
EA	262205
EI/EI_tot	0.964
Buitenbuis	
R_out	0.1125
R_in	0.0991
EI	15
EA	2672
EI/EI_tot	0.036

Zowel voor de verticale als voor de horizontale belasting is een PLUTO berekening gemaakt. De volgende belastingen zijn daarbij gebruikt:

- Belasting 1 (zijdelingse gronddruk)
 - Gemodelleerd volgens "load 3"
 - Belasting 40 kN/m, verdeeld over binnen- en buitenbuis volgens verhouding buigtijfheid, dat geeft
 - $F_{inner} = 38,4$ kN/m
 - $F_{outer} = 1,6$ kN/m
- Belasting 2 (verticale grondbelasting)
 - Gemodelleerd volgens "load 2"
 - $F = 2,5$ kN/m



Figuur 3-1 Belasting 1 in PLUTO berekening

Er zijn twee PLUTO berekeningen gemaakt. De resultaten zijn vervolgens gecombineerd. Bijlage A van deze memo geeft het verloop van de divers krachten (Moment, Normalkracht en Schuifspanning interface buis-isolatiemateriaal) en vervormingen over de omtreksrichting van de binnenbuis en de buitenbuis (A1 voor de horizontale belasting, A2 voor de verticale belasting en A3 geeft de resultaten voor de combinatie van de belastingen). In de figuren met de vervormingen van de binnenbuis en de buitenbuis zijn de vervormingen verschaald met de maximale vervorming, deze figuren geven dus wel de vorm maar niet de grootte van de vervorming. Verder is in de bijlage een figuur opgenomen met de radiale verplaatsing van de

binnen- en buitenbuis, uit het verschil volgt de compressie van het isolatiemateriaal. De laatste figuren in de bijlage geven de spanning in de omtreksrichting.

Voor een goed inzicht zijn eerst de resultaten van de twee belastingen afzonderlijk gepresenteerd, en vervolgens is het resultaat van de combinatie van deze twee belastingen gegeven.

4 Analyse resultaten

De resultaten zijn in bijlage A.3 beschreven. De spanning in de omtreksrichting is ongeveer $30 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ (30 N/mm^2). Dit is beduidend lager dan de spanningen in de berekeningen van R+K. Deels zal dit veroorzaakt worden door de axiale effecten, die via de dwarscontractie ook in de omtreksrichting een effect hebben. Of hiermee het verschil volledig verklaard kan worden zal nader onderzocht moeten worden.

De spanningen in de leiding worden voornamelijk veroorzaakt door de horizontale belasting in de bocht. De aanwezigheid van de verticale belasting (grondbelasting) beperkt de maximale spanningen enigszins.

Naast de hier beschreven berekening zijn er een aantal variantberekeningen gemaakt. Eerste conclusies daaruit zijn:

- Voor load 1 heeft de gekozen verdeling van de belasting over de binnen- en buitenbuis weinig invloed op het resultaat
- De stijfheid van het isolatiemateriaal heeft invloed op de berekende spanningen, bij afname van de stijfheid nemen de krachten in de binnenbuis af en in de buitenbuis toe. Dit wijst op een verminderde samenwerking van binnenbuis en buitenbuis bij een slapper isolatiemateriaal

A Berekeningsresultaat

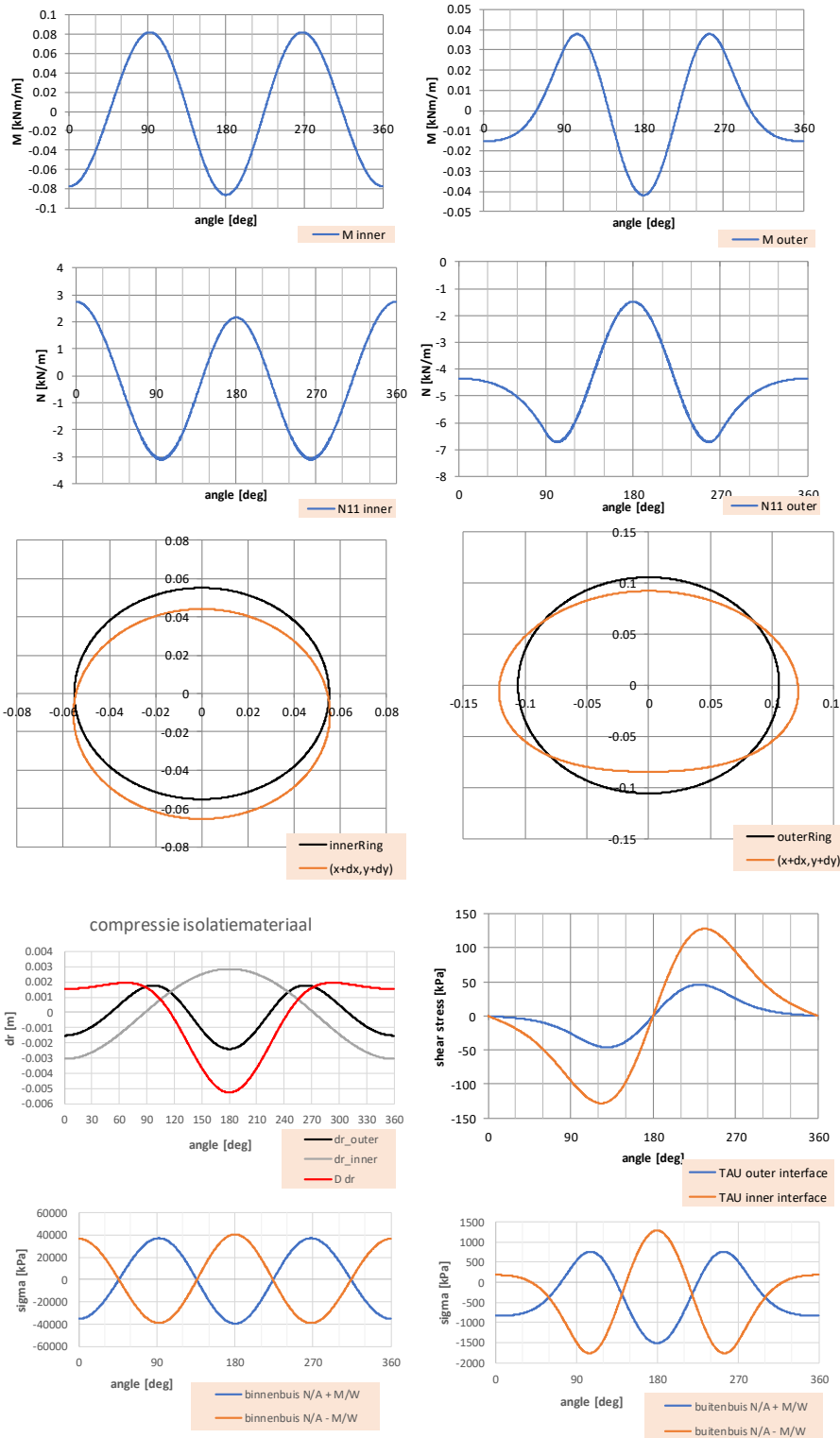
A.1 Belasting 1 (horizontale belasting)

In de berekening is de hoek van nul graden de bovenkant. Voor de interpretatie van de belasting als een horizontale belasting moet dit worden geïnterpreteerd als de schouder waarop de horizontale gronddruk werkt. In de figuur met vervormde ringen staan de assen nog verkeerd.

```

copy input
nEle      720 [-]
R_inner   0.0552 [m]
E_inner   2.10E+08 [kPa]
nu_inner  0 [-]
t_inner   0.0036 [m]
E_insulati 2200 [kPa]
nu_insulal 0 [-]
R_outer   0.1058 [m]
E_outer   3.00E+05 [kPa]
nu_outer  0 [-]
t_outer   0.0134 [m]
p          0 [kPa]
Qtot      0 [kN]
alpha     180 [deg]
beta      70 [deg]
F_inner   38.4 [kN]
F_outer   1.6 [kN]
gamma     180 [deg]
Fopp      0 [kN]

El_outer  15.01658 [kNm2/m]
El_inner  399.8991 [kNm2/m]
    
```

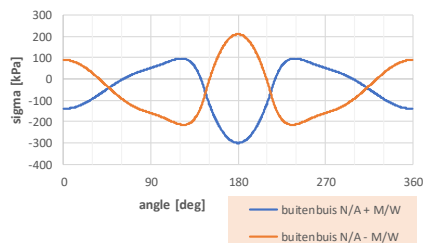
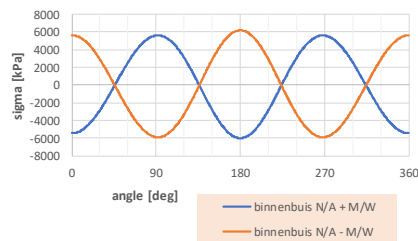
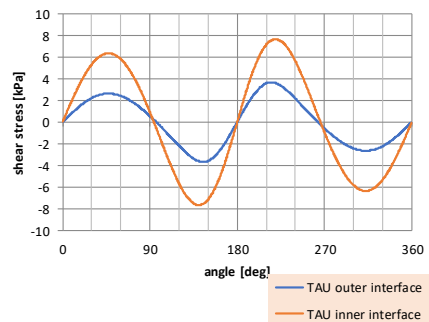
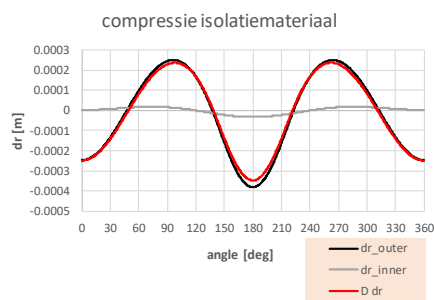
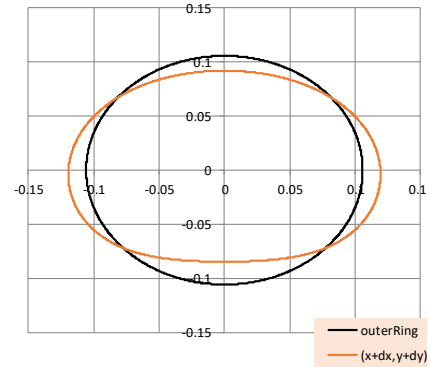
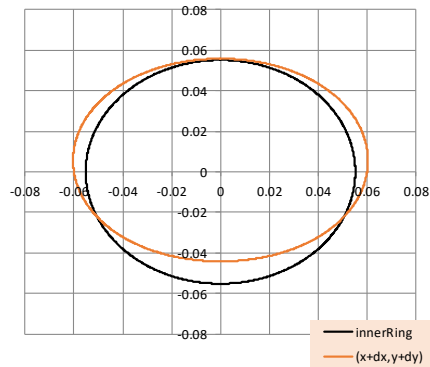
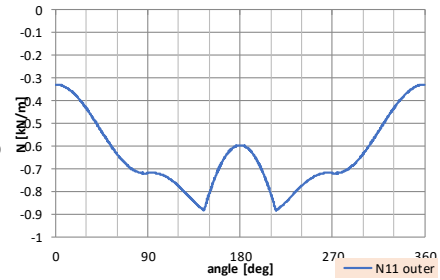
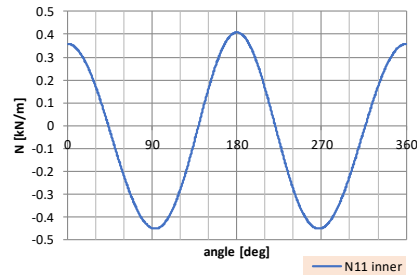
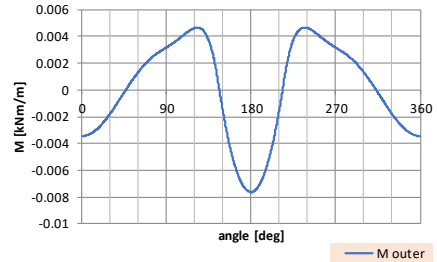
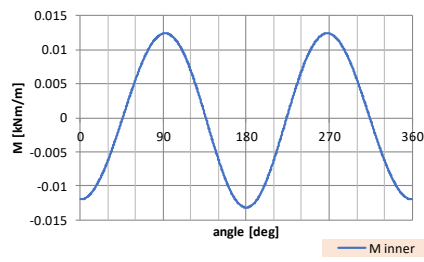


A.2 Belasting 2 (verticale belasting)

```

copy input
nEle      720 [-]
R_inner   0.0552 [m]
E_inner   2.10E+08 [kPa]
nu_inner  0 [-]
t_inner   0.0036 [m]
E_insulati 2200 [kPa]
nu_insulati 0 [-]
R_outer   0.1058 [m]
E_outer   3.00E+05 [kPa]
nu_outer  0 [-]
t_outer   0.0134 [m]
p         0 [kPa]
Qtot      2.5 [kN]
alpha     180 [deg]
beta      70 [deg]
F_inner   0 [kN]
F_outer   0 [kN]
gamma     180 [deg]
Fopp      0 [kN]

El_outer  15.01658 [kNm2/m]
El_inner  399.8991 [kNm2/m]
    
```



A.3 Gecombineerde belasting

In de figuren is de hoek van nul graden de bovenkant en de hoek van 90 graden de zijde waartegen de horizontale gronddruk werkt.

copy input

```

combination 2 calculations
factor on load 1      1
factor on load 2      1

nEle                  720 [-]
R_inner, centre li   0.0552 [m]
E_inner              2.1E+08 [kPa]
nu_inner             0 [-]
t_inner              0.0036 [m]
E_insulation         2200 [kPa]
nu_insulation        0 [-]
R_outer, centre li  0.1058 [m]
E_outer              300000 [kPa]
nu_outer            0 [-]
t_outer              0.0134 [m]
p                    0 [kPa]
Qtot                 2.5 [kN]
alpha                180 [deg]
beta                 70 [deg]
F_inner              38.4 [kN]
F_outer              1.6 [kN]
gamma                180 [deg]
Fopp                 0 [kN]

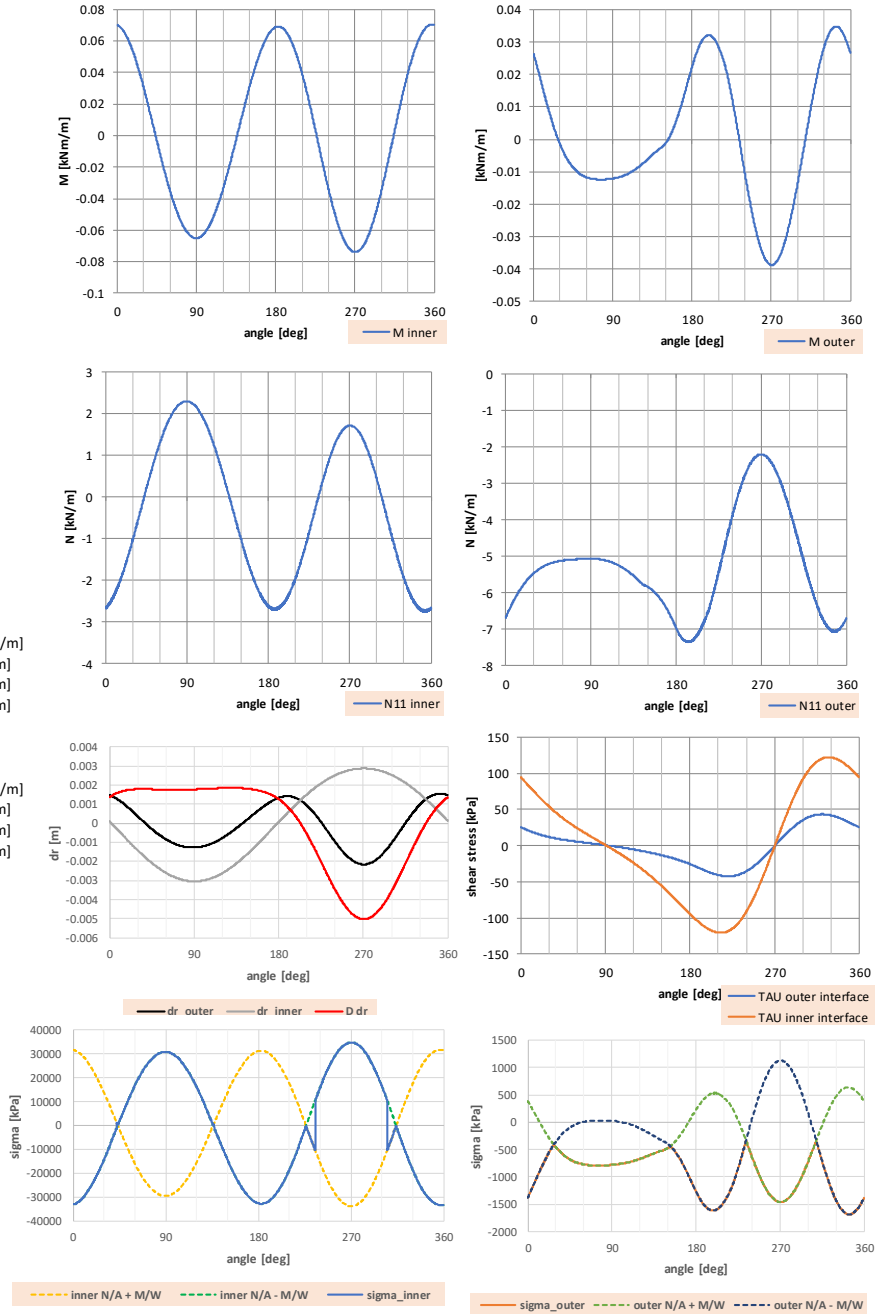
El_inner tube        399.8991
El_outer tube        15.01658
    
```

extreme values

```

inner tube
M_max                0.073965 [kNm/m]
N11,max              2.751974 [kN/m]
N33,mass              0 [kN/m]
S_max                2.730822 [kN/m]
sigma_tan             34718.63 [kPa]

outer tube
M_max                0.038753 [kNm/m]
N11,max              7.354123 [kN/m]
N33,mass              0 [kN/m]
S_max                0.921534 [kN/m]
sigma_tan            1689.359 [kPa]
    
```



Bijlage C, rapport modellering gedrag in bochten



r+k Consulting Engineers

Raadgevend Ingenieurs- en konstruktieadviesbureau b.v.
Röntgenlaan 3
2719 DX Zoetermeer
The Netherlands
tel: +31-70-3906890
website: www.rkconsult.nl

WarmingUp – onderdeel 2B

Berekeningen warmteleidingen

met verschillende buiten-
en binnenbuis combinaties

rapport 5-226-496-B1 v3

In opdracht van:



Deltares - Delft

3	DEFINITIEVE UITGAVE	21 jan. 2022	Ir. B. Bharatadjaya	√	Ir. M. Lammers	√
2	AANGEPASTE UITGAVE	17 maart 2021	Ir. B. Bharatadjaya	√	Ir. M. Lammers	√
1	INITIELE UITGAVE	11 dec. 2020	Ir. B. Bharatadjaya	√	Ir. M. Lammers	√
REVISIES		DATUM	AUTEUR	QA CONTROLE		
Client ref.: Overeenkomst 11205150-003-HYE-0001		r+k project:		5-226-496		

INHOUD

1.	INLEIDING	3
1.1.	Het model.....	3
1.2.	De initiele verplaatsing	5
1.3.	De Ple4Win databases	6
2.	DE PLE4WIN INPUT GEGEVENS.....	7
3.	DE BEREKENINGEN.....	9
4.	DE RESULTATEN.....	10
5.	OPVALLENDE RESULTATEN EN CONCLUSIE	15
	BIJLAGE A: Korte beschrijving van <i>Ple4Win</i>	16

1. INLEIDING

Voor het WarmingUp project zal door Deltares en door r+k raadgevend ingenieursbureau worden gekeken naar het gedrag van warmteleidingen in de grond. Dit wordt niet alleen gedaan voor de veelgebruikte VPS (verbonden pijp systeem; staal-PUR-PE) buizen, maar ook voor andere combinaties van binnen- en buitenbuizen. Deze berekeningen zijn in twee delen opgesplitst: in het eerste deel kijkt Deltares naar het gedrag van een lange rechte leiding onder verschillende omstandigheden. In het tweede deel kijkt r+k naar een 90° bocht die aansluit op dit lange rechte leidingdeel. Dit rapport gaat over het tweede deel van de berekeningen.

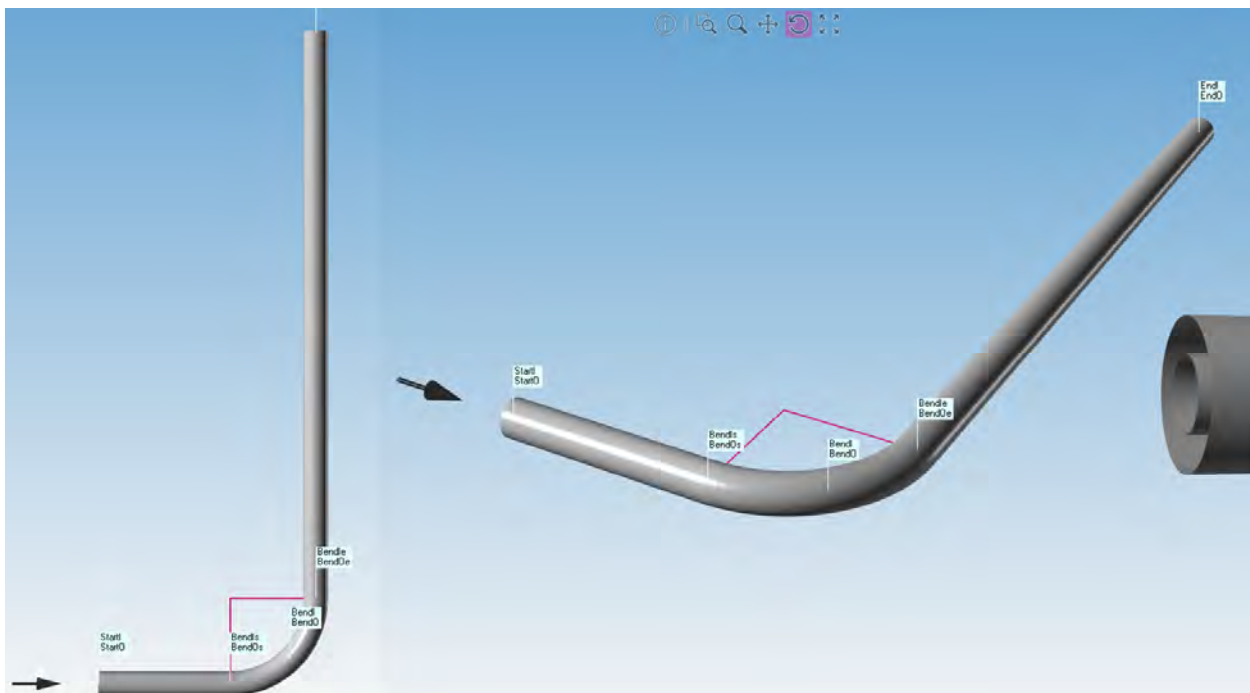
Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van Ple4Win; een programma dat in Nederland veel gebruikt wordt om buisleidingen in de grond te berekenen. In dit rapport wordt vooral het gedrag van warmteleidingen in en nabij een bocht geanalyseerd. Één van de uitgangspunten voor de Ple4Win berekening is de eindverplaatsing van de binnenbuis en de buitenbuis. Deze zijn beschreven in de rapportage van Deltares.

In de berekeningen worden 4 verschillende leidingtypes beschouwd (staal-PUR-PE, PE-polyO-PB, PE-PUR-PEX en ribbel-PUR-ribbel) met 3 verschillende pijplengtes (10, 50 en 500 meter), 2 verschillende grondsoorten (klei en zand), 2 verschillende gronddekkingen (1 en 2 meter), 2 verschillende medium temperaturen (delta T: 40 K en 90 K), 2 verschillende boor annuli (klein en groot) en 3 verschillende fasen (referentie [=aanleg in een sleuf], aanleg [=aanleg met boring] en eind [=aanleg met boring waarbij de bentoniet na verloop van tijd stijf is geworden]).

1.1. Het model

Voor deze opdracht is in Ple4Win een pijp-in-pijp model gemaakt dat bestaat uit een klein stukje rechte pijp aan het begin (1 m), aansluitend een 90° bocht (bochtstraal $R=3D$) en een langer recht stuk vanaf het eind van de bocht (5 m). Het einde van het model is een vast punt. Dergelijke bochten komen bij VPS leidingen veelvuldig voor in expansielussen en vormen veelal de locaties waar de leiding het meeste te verduren heeft. Het is interessant om te zien hoe de verschillende leidingtypes zich gedragen in zo'n bocht.

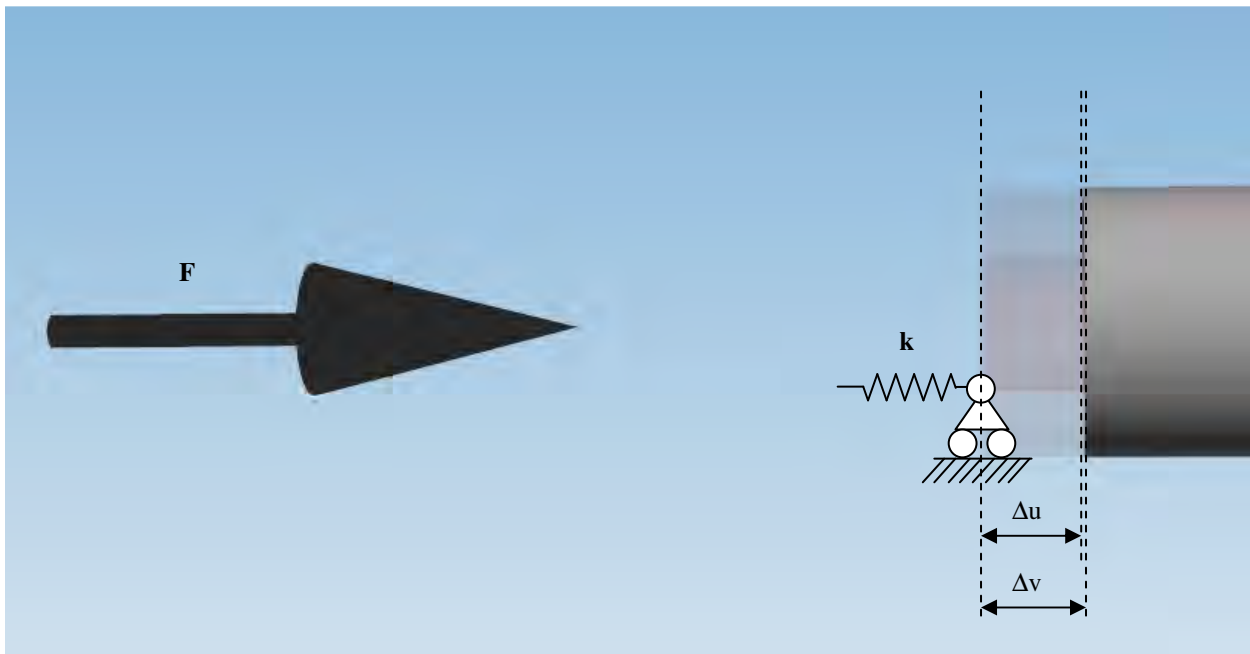
Hieronder is een afbeelding van het gebruikte leidingmodel te zien.



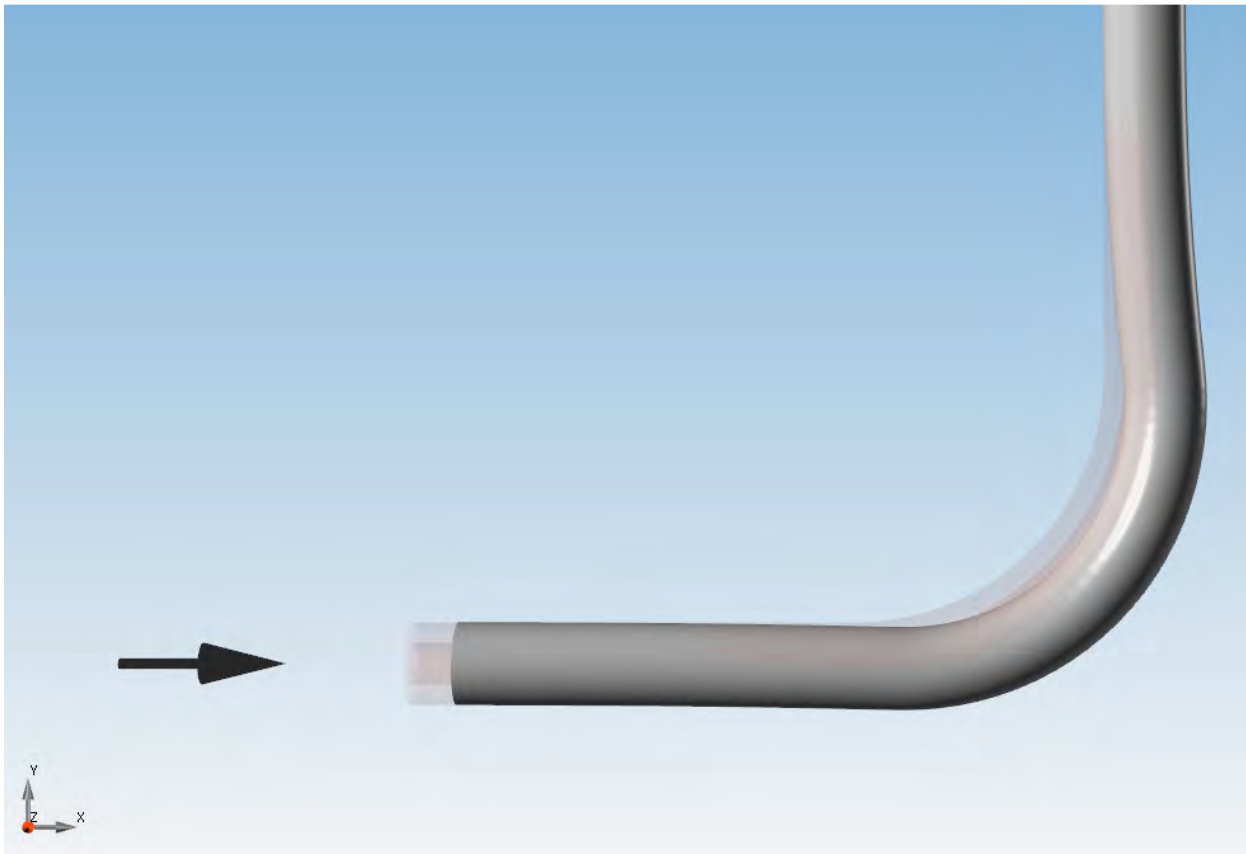
Dit Ple4Win bochtmodel sluit als het ware aan bij het uiteinde van het (rechte) leidingmodel van Deltares. Deltares heeft met dit model bepaald hoe groot de axiale verplaatsingen zijn, waarbij rekening is gehouden met de invloed van de temperatuur, de stijfheid van de buizen, de isolatielaag tussen de binnen- en buitenbuis en de wrijving met de grond. Belangrijk is dat de axiale verplaatsingen die uit het Deltares model volgen, op de juiste manier in het door r+k gemaakte Ple4Win model terecht komen. Dit is gedaan door het beginpunt (van zowel de binnen- als buitenbuis in de juiste positie te duwen).

Aan het begin van het PLE model is een verende oplegging geplaatst bij zowel de binnen- als buitenbuis en aan het eind een vast punt. Bij het beginpunt zullen de verplaatsingen t.g.v. de thermische uitzetting, die zijn berekend in het model van Deltares, moeten worden aangebracht. Dit wordt gedaan door een axiale kracht aan te brengen op het beginpunt. Omdat we de veerstijfheid van het beginpunt zelf kunnen bepalen, weten we ook welke kracht er nodig is om de juiste verplaatsing te verkrijgen. Doordat we voor deze (axiale) veerstijfheid een hoge waarde nemen, zullen andere axiale invloeden gering zijn en zal de beginverplaatsing in hoge mate overeenkomen met de door Deltares berekende verplaatsingen. Op deze manier kan voor binnen- en buitenbuis de verplaatsing in het Ple4Win model worden opgelegd. De (axiale) kracht die nodig is om de veer in te drukken heeft niets te maken met de daadwerkelijke axiale kracht in de binnen of buitenbuis en dat geeft niet: deze kracht drukt alleen de veer in en heeft geen invloed op de rest van het Ple4Win leidingmodel.

De afbeelding hieronder simuleert de situatie van de binnenbuis maar voor de berekeningen wordt dit zowel bij de binnen- als de buitenbuis gedaan.



Nadat de duwkracht op zowel de binnen- als buitenbuis berekend is, kan het bochtgedrag van het model in Ple4Win worden gesimuleerd. Naast de beginverplaatsing zullen de overige belastingen op de buizen worden aangebracht: een inwendige druk en een temperatuurverschil bij de binnenbuis en grondbelastingen en -steun bij de buitenbuis. In het Ple4Win bochtmodel is geen isolatie opgenomen en er kan geen interactie plaatsvinden tussen de binnen- en buitenbuis. De binnen- en buitenbuis werken daardoor niet samen en in theorie kan de binnenbuis door de buitenbuis heen bewegen. De resultaten uit het model zullen daardoor ongunstiger kunnen zijn dan de werkelijkheid. Dit is een beperking van het Ple4Win model. Indien de verschilverplaatsingen tussen de binnen- en buitenbuis in het bochtstuk beperkt zijn, achten we het resultaat toelaatbaar.



De volgende Ple4Win resultaten zijn interessant in het kader van het WarmingUp project:

1. De maximale spanning in de binnen- en buitenbuis;
2. De laterale grondreactie op de buis;
3. De maximale ovalisatie van de binnen- en buitenbuis.

1.2. De initiele verplaatsing

De relatie tussen veerstijfheid, de duwkracht en de uiteindelijke verplaatsing is beschreven door de volgende formule:

Verplaatsing = kracht / veerstijfheid

De veerstijfheid kunnen we zelf kiezen, we nemen hiervoor een hoog en rond bedrag; 1000 kN/mm. De eindverplaatsing van de buizen in het Deltares model is bekend, zodat we in de bovenstaande formule de kracht kunnen berekenen. Deze duwkracht wordt vervolgens in Ple4Win als puntbelasting aan het beginpunt van het model ingevoerd. Omdat de binnen- en buitenbuis een verschillende verplaatsing kunnen hebben, wordt per buis een veer aangebracht en een kracht bepaald.

Kracht = Verplaatsing [in mm] * 10^6 N/mm

Om de nauwkeurigheid van de berekeningsresultaten te waarborgen, hebben we de volgende zaken gedaan:

[1] De door Ple4Win berekende verplaatsingen bij het startpunt van de binnen- en buitenbuis moeten binnen 1% liggen van de verplaatsingen die door Deltares zijn bepaald. Na de berekeningen bleek dat bij een deel van de berekeningen (5,2%) niet aan deze eis werd voldaan. Hierbij ging het om relatief kleine initiele verplaatsingen. Deze gevallen zijn niet maatgevend omdat de krachten en spanningen in de bocht beperkt blijven. Problemen zijn dan niet te verwachten. We kunnen wel stellen dat de berekeningen waar niet aan de 1% eis is voldaan, de leidingen geen problemen zullen ondervinden omdat het iedere keer om kleine initiele (axiale) verplaatsingen gaat.

[2] Als extra check wordt de hoekverdraaiing van de binnenbuis bij het beginpunt (Phi-Z) ook bekeken. Hoe groter deze is, hoe onnauwkeuriger het resultaat in de bocht. Het volgende is aangehouden: hoekverdraaiing 1° of minder; zeer betrouwbare uitkomst. Hoekverdraaiing tussen de 1° en 10° ; voldoende betrouwbare uitkomst. Hoekverdraaiing boven de 10° ; onvoldoende betrouwbare uitkomst. Er is een handvol berekeningen waarbij de hoekverdraaiing boven de tien procent uitkomt. Bij deze berekeningen wist het programma geen eindevenwicht te vinden en zijn er daardoor ook geen resultaten. De hoekverdraaiing is terug te vinden in de DISPLAC uitvoertabel in DF5 van PLE en is tevens terug te vinden in de het excel formulier 'WarmingUp berekeningen.xlsx' op het eerste tabblad 'uitWarmTRK', regel 228.

1.3. De Ple4Win databases

Deltares heeft in totaal 576 berekeningen [in dit rapport ook wel cases genoemd] gedaan met een rechte buis-in-buis combinatie. Er zijn 4 verschillende leidingtypen en tevens zijn er verschillende pijp-, grond-, aanleg- en procesparameters. Dit betekent dus ook dat hetzelfde aantal berekening nodig is om het bochtgedrag van al die verschillende combinaties met behulp van Ple4Win te bepalen. De verschillende leidingtypen (buis-in-buis combinaties) en de bijbehorende (case) ID's, worden voor dit project in 4 verschillende batches onderverdeeld.

Tabel 1. De 4 verschillende leidingtypen (buis-in-buis combinaties) en de bijbehorende (case) ID's

Batch	(Case) ID
1. Staal-PUR-PE	001 - 144
2. PE polyoE+ PB	145 - 288
3. PE PUR PEX	289 - 432
4. rbbl PUR rbbl	433 - 576

De leidingtypen ID's

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	ID	[-]	1			2			3			4	
2	buisstype	[-]	PE_PUR_staal			PE_PUR_staal			PE_PUR_staal			PE_PUR_staal	
3	grond	[-]	zand			zand			zand			zand	
4	dekking	[-]	ondiep			ondiep			ondiep			ondiep	
5	vervallen	[-]	vervallen			vervallen			vervallen			vervallen	
6	lubricant	[-]	ja			ja			ja			ja	
7	annulus	[-]	klein			klein			klein			klein	
8	calcType	[-]	ref			ref			ref			ref	
9	temperatuur	[deg K]	40			40			40			90	
10	lengte	[m]	10			50			500			10	
11	QsoilPlas	[N/m]	2930,56728			2930,56728			2930,56728			2930,56728	
12	EA1	[N]	262204862,7			262204862,7			262204862,7			262204862,7	
13	KS2	[Pa]	12813369,94			12813369,94			12813369,94			12813369,94	
14	EA3	[N]	12025526,59			12025526,59			12025526,59			12025526,59	
15	L	[m]	10			50			500			10	
16	AT1	[-]	0,00048			0,00048			0,00048			0,00108	
17	AT3	[-]	0			0			0			0	
18	pull	[-]	inner			inner			inner			inner	
19	mechanical	[-]	*** WARNING ***			*** WARNING ***			*** WARNING ***			*** WARNING ***	
20			x [m]	u_tot [m]	v_tot [m]	x [m]	u_tot [m]	v_tot [m]	x [m]	u_tot [m]	v_tot [m]	x [m]	u_tot
21			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22			0,05	0,00001811	0,00000687	0,25	0,0000019	0	2,5	0	0	0,05	0

Met elk Ple4Win project database worden 36 verschillende berekeningen gedaan (36 cases) met de volgende parameter combinaties:

- 3 verschillende pijplengtes (10, 50 en 500 meter), hiervan wordt de door Deltares berekende verplaatsing gebruikt.
- 2 verschillende temperaturen (dT: 40 en 90 Kelvin)
- 2 verschillende boor annuli (klein en groot)
- 3 verschillende fasen (referentie, aanleg en eind)

Voor de 2 verschillende grondsoorten (zand en klei) en de 2 verschillende diepteliggingen (1 en 2 meter) worden aparte Ple4Win project databases aangemaakt. Hierdoor zijn er in totaal 144 berekeningen gemaakt voor elke batch en 576 in totaal.

2. DE PLE4WIN INPUT GEGEVENS

Voor de PLE berekeningen worden de door Deltares gebruikte gegevens toegepast (zie tabel 2.1 hieronder).

Tabel 2.1 Leiding typen (distributie leidingen) met parameters

parameter	omschrijving	eenheid	waarde			
			1	2	3	4
			PE PUR staal	PE PolyoE+ PB	PE PUR PEX	ribbel PUR ribbel 3)
Do o	uitwendige diameter buiten buis	[m]	0,225	0,182	0,163	0,3096
Do i	uitwendige diameter binnen buis	[m]	0,114	0,110	0,110	0,218
t _o	wanddikte buiten buis	[m]	0,0134	0,0031	0,0032	0,02 ⁴⁾
t _i	wanddikte binnen buis	[m]	0,0036	0,010	0,01	0,01 ⁴⁾
E _o	elasticiteitsmodulus buiten buis	[MPa]	1350	900	900	160 ⁴⁾
E _i	elasticiteitsmodulus binnen buis	[MPa]	210000	450	800	770 ⁴⁾
G2	glijdingsmodulus tussenlaag	[MPa]	1,1	1,1	1,1	1,1
v _o	dwarscontractiecoëf. buiten buis 1)	[-]	0	0	0	0
v _i	dwarscontractiecoëf. binnen buis 1)	[-]	0	0	0	0
v ₂	dwarscontractiecoëf. Tussenlaag 2)	[-]	0	0	0	0
v _o	volumiek gewicht buiten buis	[kN/m ³]	9,5	9,5	9,3	8,3 ⁴⁾
v _i	volumiek gewicht binnen buis	[kN/m ³]	78	9,4	9,63	8,7 ⁴⁾
v ₂	volumiek gewicht isolatie	[kN/m ³]	0,55	0,6	0,55	0,55
γ _{med}	volumiek gewicht medium	[kN/m ³]	10	10	10	10
σ _{o 5}	vloeispanning buiten buis 5)	[MPa]	30	30	30	10
σ _{i 5}	vloeispanning binnen buis 5)	[MPa]	400	17	30	10
T _{z, ak}	afschuifsterkte axiaal grens iso/binnen 5)	[MPa]	0,12	0,12	0,12	0,12
α _i	lineaire uitzettingscoëf. binnen buis	[1/°K]	12.10 ⁻⁶	130.10 ⁻⁶	180.10 ⁻⁶	50.10 ⁻⁶
pull	intrekken leiding, kracht op xxx buis	[-]	binnen	beide	beide	beide

1) waarde nul voorkomt dwarscontractie en is daarmee in lijn met §2.8
 2) waarde nul gekozen wegens de grote onzekerheid in de waarde (extra onzekerheid: invloed: tijd, belastingsniveau en aanhechting). Een waarde gelijk aan 0 is een veilige aanname omdat deze waarde altijd mogelijk is.
 3) De waarden voor de binnen- en buitenbuis zijn een combinatie van het geplooid buismateriaal en een gewogen bijdrage van het isolatiemateriaal en de buitenlaag.
 4) Betreft equivalente waarde.

Een aantal parameters zijn aangepast om een nauwkeuriger rekenresultaat te verkrijgen:

- v_o (PE) = 0,4 (de buitenbuizen van batch 1, 2 en 3)
- v_i (PB) = 0,4 (binnenbuis van batch 2)
- v_i (PEX) = 0,4 (binnenbuis van batch 3)
- v_o en v_i (ribbel) = 0,4 (binnen- en buitenbuizen van batch 4)
- $\alpha_o = 0,00016$ (geldt voor alle buitenbuizen zowel PE als ribbel buitenbuis)
- S_{allow} (toelaatbare spanningen van de kunststof binnenbuizen) = de vloeispanning van de binnenbuis voor de andere 3 pijpcombinaties (batch 2, 3 en 4) gebruiken.

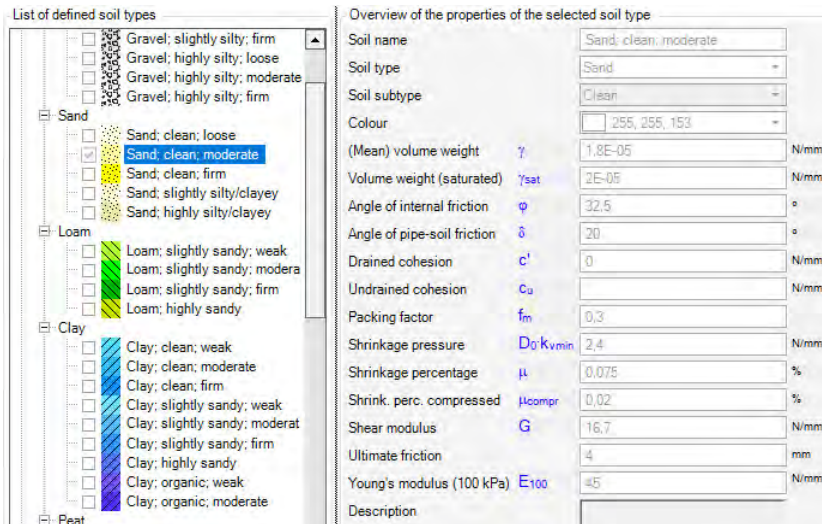
Na de eerste berekening werden de wanddikten van de PE buitenbuis in een aantal batches veranderd omdat deze te dun bleken te zijn, waardoor een te grote ovalisatie optrad en instabiliteit in de berekeningen ontstond. In werkelijkheid zal de isolatielaag tussen de binnen- en buitenbuis de buitenbuis ondersteunen en verstijven, maar aangezien dat niet in het model kan worden meegenomen en we wel graag resultaten hebben, is de wanddikte aangepast;

- Batch 2 (PE PolyoE+ PB): $t_0 = 10.7$ mm (SDR = 17)
- Batch 3 (PE PUR PEX): $t_0 = 9.6$ mm (SDR = 17)

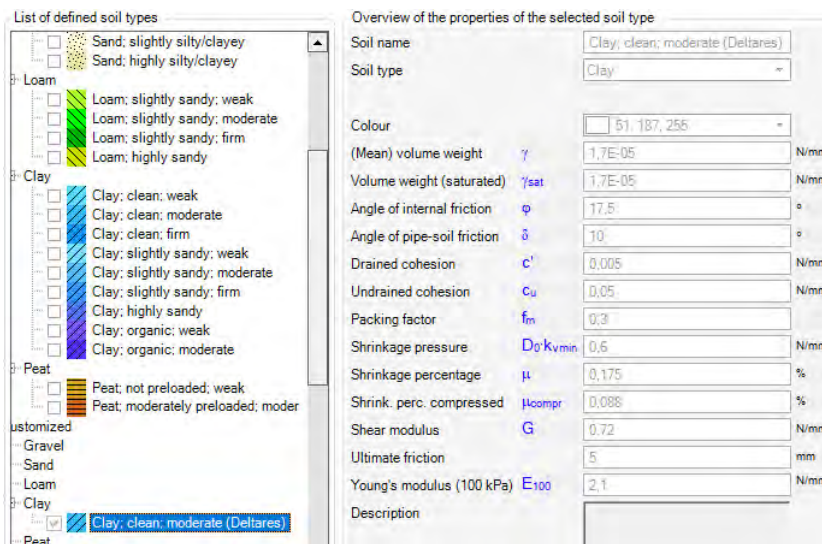
Dit houdt in dat de berekende ovalisatie van de betreffende buitenbuizen niet zal overeenstemmen met de werkelijkheid. Om de juiste ovalisatie te bepalen, moet bekend zijn wat de (ring)stijfheid van de door de isolatie gesteunde buitenbuis is. Het is ook mogelijk een ringmodel te maken waarbij (naast de binnen- en buitenbuis) de isolatie wel in het model wordt meegenomen, zodat een betere schatting / berekening van de ovalisatie van de buitenbuis mogelijk wordt.

Voor de grondtypen worden de volgende grondtypen gebruikt in de Soil Wizard van Ple4Win:

- Zand: Sand, clean, moderate



- Klei: Clay, clean, moderate (aangepast)



Daarnaast worden de uncertainty waarden in UNCER table aangepast van 'Low' naar 'Mean'; we gebruiken de gemiddelde waarden voor de grondparameters.

De binnenbuis wordt omgeven door isolatie en geeft via deze isolatie krachten door aan de buitenbuis en de grond. In het Ple4Win model kunnen we dit niet op deze manier aanbrengen. In plaats van de isolatielaag wordt grond rondom de binnenbuis aangebracht. Deze grond is vergelijkbaar met de grond die zich om de buitenbuis bevindt en dient als vervanging van het isolatiemateriaal tussen de binnen- en buitenbuis. Helaas kan de invloed van de binnen- op de buitenbuis en omgekeerd van de buiten- op de binnenbuis in het bochtstuk niet in het Ple4Win model worden meegenomen. Dat houdt in dat verschillen in verplaatsing tussen de binnen- en buitenbuis niet te groot moeten worden (maximaal de helft van de tussenruimte tussen binnen- en buitenbuis) omdat bij grotere verschillen de interactie tussen de binnen- en buitenbuis in werkelijkheid zal toenemen, terwijl deze in het Ple4Win model bijna niet worden meegenomen.

3. DE BEREKENINGEN

De volgende Ple4Win resultaten zijn interessant om verder te onderzoeken:

		Ple benaming	Design Functie	Tabel naam
1.	De laterale grondreactie op de buis	R-LAT	DF 5	SOILREA
2.	De maximale Von Mises spanning (bij een stalen buis)	MISES-M	DF 6.2	CSTRMAX
3.	De maximale axiale spanningen van de buis doorsnede	SXHT-M	DF 6.2	CSTRMAX
4.	De maximale omtrekspanningen van de buis doorsnede	SFHT-M	DF 6.2	CSTRMAX
5.	De maximale ovalisatie van de buis	W+WD/D-M	DF 6.2	RDPLMAX

- Ad 1. De laterale grondreactie kan worden gebruikt om de isolatielaag tussen de binnen- en buitenbuis te toetsen.
 Ad 2. De Von Mises vergelijkspanning wordt gebruikt om stalen leidingen te toetsen op sterkte.
 Ad 3 en 4. De axiale- en omtrekspanningen worden gebruikt om thermoplastische kunststoffen te toetsen op sterkte.
 Ad 5. De ovalisatie (onrondheid) van de buis wordt gebruikt om te toetsen op doorsnede-ervorming van de leiding.

De toelaatbare spanning van de isolatie is in dit geval gebaseerd op de toegestane spanning van het isolatiemateriaal (PUR) en is als volgt gedefinieerd:

$$R-LAT \leq (R-LAT)_{allow} = (\sigma_v)_{PUR} \cdot D_{buitenbuis}$$

Voor dit project is een waarde $(\sigma_v)_{PUR}$ van 0.3 aangehouden.

De toelaatbare Von Mises spanning is bepaald volgens de grenstoestandspanningen in NEN 3650-2:

$$\sigma_v \leq 0.85 \cdot \frac{(R_e + R_e(\theta))}{\gamma_m}$$

Waarbij:

- σ_v : de vervangende spanning volgens Von Mises [N/mm²]
 R_e : de vloeispanning op kamertemperatuur (de rekgrens) [N/mm²]
 $R_e(\theta)$: de vloeispanning op hoge temperatuur θ (de warmrekgrens) [N/mm²]
 γ_m : de materiaalfactor [-]

Voor P355 staal (zie ook NEN 3650-2 tabel B.1):

- $R_e = 355 \text{ N/mm}^2$ bij $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
 $R_e(\theta) = 304 \text{ N/mm}^2$ bij $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Voor de materiaalfactor is een waarde van 1,1 genomen (materiaalfactor bij rekgrens, zie ook NEN 3650-2 tabel D.2). Dit geeft toelaatbare Von Mises spanning van:

$$\sigma_v \leq 0.85 \cdot \frac{(355 + 304)}{1.1} = 509.23 \text{ N/mm}^2$$

De toelaatbare spanning van de kunststofbuizen is gelijk aan de MRS (minimum required strength) van het gebruikte buismateriaal.

PE	10	N/mm ²
PEX	10	N/mm ²
PB	17	N/mm ²
ribbel	10	N/mm ²

De bovenstaande waarden zijn terug te vinden in tabel 2.1 (zie begin van hoofdstuk 2).

Voor de maximale toegestane ovalisatie is een waarde van 8% genomen voor alle buismaterialen, zowel kunststof als staal, hoewel die waarde bij staal eigenlijk 15% mag bedragen.

39.	Node R-LAT Ext Binnen	[mm]	knoopnummer waar 'R-LAT Ext Binnen' optreedt (n.v.t. voor de binnenbuis)
40.	R-LAT Ext Buiten	[N/mm]	Extrema van de laterale grondreactie op de buitenbuis
41.	PHI-LAT Buiten	[°]	Hoek van de laterale grondreactie op de buitenbuis
42.	Node R-LAT Ext Buiten	[mm]	Knoopnummer waar 'R-LAT Ext Buiten' optreedt op de buitenbuis
43.	MISES-M Ext Binnen	[N/mm ²]	Extrema van de maximale von Mises spanning op de binnenbuis (n.v.t. op kunststofmaterialen)
44.	MISES-M Node Binnen	[-]	Knoopnummer waar 'MISES-M Ext Binnen' optreedt op de binnenbuis (n.v.t. op kunststofmaterialen)
45.	MISES-M Ext Buiten	[N/mm ²]	Extrema van de maximale von Mises spanning op de buitenbuis (n.v.t. op kunststofmaterialen)
46.	MISES-M Node Buiten	[-]	Knoopnummer waar 'MISES-M Node Buiten' optreedt op de buitenbuis (n.v.t. op kunststofmaterialen)
47.	W+WD/D-M Ext Binnen	[%]	Maximale diameterverandering van de binnenbuis
48.	W+WD/D-M Node Binnen	[-]	Knoopnummer waar 'W+WD/D-M Ext Binnen' optreedt
49.	W+WD/D-M Ext Buiten	[%]	Maximale diameterverandering van de buitenbuis
50.	W+WD/D-M Node Buiten	[-]	Knoopnummer waar 'W+WD/D-M Node Buiten' optreedt
51.	SXHT-M Ext Binnen	[N/mm ²]	Maximale longitudinale normaalspanningen over de omtrek van de binnenbuis doorsnede
52.	SXHT-M Node Binnen	[-]	Knoopnummer waar 'SXHT-M Ext Binnen' optreedt
53.	SXHT-M Ext Buiten	[N/mm ²]	Maximale longitudinale normaalspanningen over de omtrek van de buitenbuis doorsnede
54.	SXHT-M Node Buiten	[-]	Knoopnummer waar 'SXHT-M Ext Buiten' optreedt
55.	SFHT-M Ext Binnen	[N/mm ²]	Maximale omtrekspanningen over de omtrek van de binnenbuis doorsnede
56.	SFHT-M Node Binnen	[-]	Knoopnummer waar 'SFHT -M Ext Binnen' optreedt
57.	SFHT-M Ext Buiten	[N/mm ²]	Maximale omtrekspanningen over de omtrek van de buitenbuis doorsnede
58.	SFHT-M Node Buiten	[-]	Knoopnummer waar 'SFHT -M Ext Buiten' optreedt

De 4 verschillende batches (verschillende buismaterialen) kunnen eenvoudig worden herkend door de verschillende achtergrondkleuren die zijn gebruikt voor de kolom ID.

	20	21	22	23	24	25	26
	ID	Totale verpl. Binnen	Init. PLE verpl. Binnen	Verpl.versch. Binnen	Limit verpl. Binnen	Init. Model Status Binnen	Totale verpl. l
PE PUR staal	1	4,08471	4,064355604	0,020354396	0,0408471	Goed	3
	143	46,38995	46,35708111	0,032868889	0,4638995	Goed	45
	144	126,04904	126,0086522	0,040387838	1,2604904	Goed	125
PE polyoE PB	145	4,5588	4,554671319	0,004128681	0,045588	Goed	3
	146	4,48193	4,477854512	0,004075488	0,0448193	Goed	3
	287	50,09612	50,08159261	0,014527388	0,5009612	Goed	47
	288	49,14083	49,12630285	0,014527153	0,4914083	Goed	48
PE PUR PEX	289	20,6449	20,62897381	0,01592619	0,206449	Goed	19
	290	20,56912	20,55319646	0,015923539	0,2056912	Goed	19
	431	252,59004	252,5749375	0,015102536	2,5259004	Goed	249
rbbl PUR rbbl	432	251,57078	251,555676	0,01510396	2,5157078	Goed	250
	433	1,75168	1,768151446	0,016471446	0,0175168	Goed	1
	434	1,73259	1,749100011	0,016510011	0,0173259	Goed	1
	575	20,1241	20,11319742	0,010902577	0,201241	Goed	19
	576	19,70803	19,69723583	0,010794171	0,1970803	Goed	19

De materialen worden van buiten naar binnen benoemd, dus bij PE PUR staal is de PE het materiaal van de buitenbuis en het staal het materiaal van de binnenbuis, de PUR isolatie bevindt zich tussen de buiten- en binnenbuis.

De achtergrondkleur en de range van de batch is als volgt gedefinieerd.

	1	2	3
1			
2	Case of materials used		
3	PE PUR staal	1	144
4	PE polyoE PB	145	288
5	PE PUR PEX	289	432
6	rbbl PUR rbbl	433	576

De resultaten van de toetsing zijn ook eenvoudig te herkennen door het gebruik van dezelfde kleurenafspraken: ID's die niet aan de voorwaarden of het toetscriterium voldoen zijn met rode cijfers of letters weergegeven met dezelfde achtergrondkleuren voor de verschillende buismaterialen.

20	40	43	47	49	51	53	55	57
ID	R-LAT Ext Buiten	MISES-M Ext Binnen	W+WD/D-M Ext Binnen	W+WD/D-M Ext Buiten	SXHT-M Ext Binnen	SXHT-M Ext Buiten	SFHT-M Ext Binnen	SFHT-M Ext Buiten
1	6,169337991	147,9007814	0,539034039	-0,271792266	n.v.t	-0,983229261	n.v.t	-0,99077585
143	37,04499904	493,1529551	1,832634819	4,778479259	n.v.t	-10,9036572	n.v.t	-11,75582544
144	37,04672429	841,9082268	3,164962424	8,321255073	n.v.t	-18,97226904	n.v.t	-18,88728887
145	3,7966384		-0,578304007	n.v.t	-1,073584657	n.v.t	5,76578569	n.v.t
146			49675	n.v.t	-1,062281381	n.v.t	5,763032007	n.v.t
287	30,69679918	n.v.t	-1,778694215	n.v.t	-7,590157341	n.v.t	7,068692965	n.v.t
288	30,73198109	n.v.t	-1,765708478	n.v.t	-7,525077236	n.v.t	7,053780625	n.v.t
289	19,11205127	n.v.t	-1,2868069	n.v.t			7,716545626	n.v.t
290	19,21990901	n.v.t	-1,285512187	n.v.t	266732	n.v.t	7,712007408	n.v.t
431	27,83368052	n.v.t	-3,464642865	n.v.t	-24,78555697	n.v.t		
432	27,8341988	n.v.t	-3,458411724	n.v.t	-24,73923712	n.v.t		
433	1,018216935	n.v.t	-0,716140052	-2,038958428	3,456131266	-0,271794844	11,69073006	-0,716650464
434	1,038490588	n.v.t	-0,714940767	-2,036607371	3,457551644	-0,272331238	11,6896523	-0,716030379
575	16,30251789	n.v.t	-2,261519093	-2,363494001	-2,486963171	-1,070089348	12,91112108	-1,30894637
576	16,62606099	n.v.t	-2,246225381	-2,32766213	-2,426378678	-1,08841447	12,89760229	-1,346710555

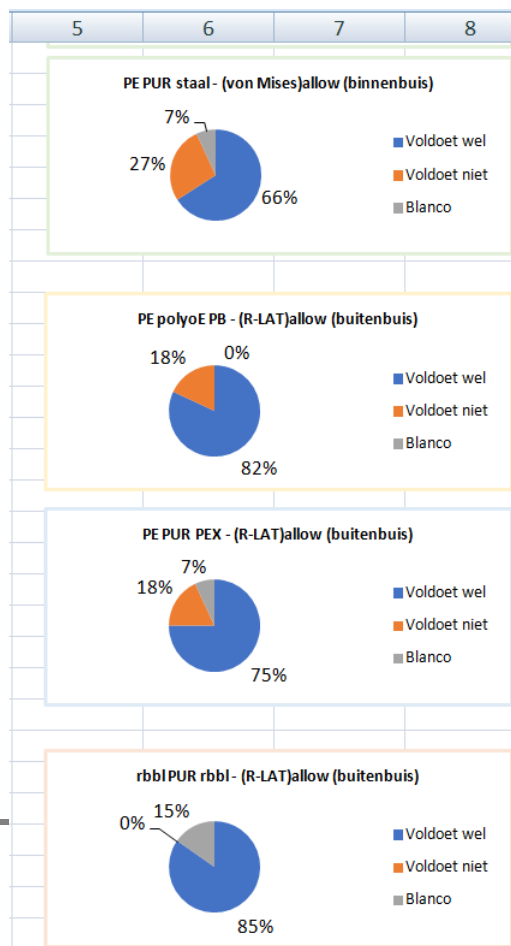
Deze 'PE PUR staal' voldoen niet

Deze 'PE PUR PEX' voldoen

Deze 'rbbl PUR rbbl' voldoen niet

Om de resultaten nog eenvoudiger te kunnen analyseren, zijn ze tevens grafisch weergegeven. Zie de voorbeeld afbeelding hiernaast.

De resultaten zijn in kolom 5 tot en met kolom 19 te zien als taartgrafieken. ID's die niet aan de voorwaarden voldoen zijn oranje, ID's die wel aan de voorwaarden voldoen zijn blauw terwijl grijs wordt gebruikt als er geen resultaat is voor die specifieke ID. Dit laatste kan optreden doordat het model niet aan de randvoorwaarden voldoet of omdat de berekening niet uitgeïtereerd is en daarom geen bruikbare resultaten heeft opgeleverd.



Om de resultaten nog beter te kunnen gebruiken, er is een mogelijkheid om bepaalde variabelen te wijzigen. Dit is beschikbaar in kolom 3 en 4. Velden met oranje achtergrond zijn vrij te wijzigen en de resultaten in zowel de overzichtstabel als in de grafieken worden dan automatisch aangepast.

	1	2	3	4
1				
2	Case of materials used			Outer/Dia Binnenbuis
3	PE PUR staal	1	144	0,11
4	PE polyoE PB	145	288	0,11
5	PE PUR PEX	289	432	0,11
6	rbbl PUR rbbl	433	576	0,218
7				
8				
9	PE PUR staal - (von Mises)allow		P355	
10		Vloeigrens op kamertemperatuur	355	
11		Vloeigrens op hoge temperatuur	304	
12		Gamma	1,1	
13				
14		Staal	509,22727	
15				
16	Kunststof toelaatbare spanning (SFHT & SXHT)			
17		PE	10	
18		PEX	10	
19		PB	17	
20		ribbel	10	
21				
22		Max. ovalisatie kunststof (PE) [%]	8	
23		Max. ovalisatie kunststof (PEX) [%]	8	
24		Max. ovalisatie kunststof (PB) [%]	8	
25		Max. ovalisatie kunststof (rbbl) [%]	8	
26		Max. ovalisatie staal [%]	8	
27				
28		Laagste toegestane spanning van PUR	0,3	
29	Kunststof BUITENBUIS toelaatbare laterale reactie (R-LAT)allow			
30		PE PUR staal - (R-LAT)allow	34,2	
31		PE polyoE PB - (R-LAT)allow	33	
32		PE PUR PEX - (R-LAT)allow	33	
33		rbbl PUR rbbl - (R-LAT)allow	65,4	

Deze oranje velden zijn vrij te wijzigen

Deze grijze velden zijn berekeningsresultaat dus mogen niet worden gewijzigd

5. OPVALLENDE RESULTATEN EN CONCLUSIE

Omdat er een grote hoeveelheid berekeningen is gemaakt, en de meeste mensen de tijd niet hebben om rustig alle resultaten door te nemen, zullen hieronder een aantal opvallende resultaten worden uitgelicht en conclusies worden getrokken.

Het verschil in axiale verplaatsing tussen de binnen- en buitenbuis blijft beperkt tot enkele millimeters; de isolatielaag zal geen probleem ondervinden om dit te overbruggen.

In (slappe) kleigronden is het toepassen van expansie-kussens niet zinvol; de grondstijfheid is al laag en de leidingverplaatsingen zijn al groot.

Aanleg op grotere diepte is meestal ongunstig voor de leiding; hoewel de leidingverplaatsingen afnemen, nemen de materiaalspanningen toe, vooral bij de isolatielaag. Dit houdt tevens in dat je de diepte van boringen wilt beperken.

Het verdichten van de aanvulgrond rondom de leiding heeft bij rechte leidingdelen een gunstig effect op de leiding; de wrijving tussen de buis en de grond neemt toe, de verplaatsingen en ovalisaties worden minder en de materiaalspanningen nemen af.

Een lagere ΔT (het verschil in temperatuur bij aanleg van de leiding en de hoogste temperatuur van de leiding als deze in gebruik is) geeft de meeste mogelijkheden met betrekking tot aanleg van warmteleidingen; er is meer keuze in toe te passen materialen en er zijn minder expansievoorzieningen nodig.

De maximale lengte van rechte stukken bij staal-PUR-PE leidingen bedraagt ongeveer 100 meter. Bij grotere lengten zijn expansievoorzieningen nodig.

Warmteleidingen die bestaan uit een kunststof binnen- en buitenbuis met daartussen isolatie, zijn een geschikte manier om warm water te transporteren. De maximale temperatuur waaraan de binnenbuis blootgesteld kan worden, kan nog wel een beperking zijn.

Tevens is het bij het bovenstaande type van belang dat de thermische uitzettingscoëfficiënt van de binnenbuis zo laag mogelijk is, zodat uitzetting, verplaatsingen en spanningen niet te hoog worden.

Een geribbelde binnen- en buitenbuis heeft als voordeel dat deze van zichzelf een deel van de axiale uitzetting kan compenseren. Tevens kan een stalen ribbelbuis tegen een hogere temperatuur t.o.v. een kunststof binnenbuis.

Bij een aantal warmteleidingen is de buitenbuis erg dunwandig. Hierdoor lijkt deze buis een beperking te vormen met betrekking tot de bovenbelasting die deze buis kan weerstaan, maar ook indien de buis zijdelings de grond in wordt geduwd (bij een bocht, ten gevolge van axiale expansie van de leiding). Zijn er al proeven gedaan waarin dit getest is?

De ribbel binnenbuis bij leidingtype 4 is niet sterk genoeg (in het rekenmodel). Er zijn aannames gedaan betreffende de wanddikte en de sterkte, die zijn waarschijnlijk te conservatief geweest.

De geribbelde buizen lijken zeer geschikt te zijn voor warmwater transport; ze kunnen in zandgrond in lange rechte stukken worden toegepast en zetten minder uit dan de gladde buizen. Het lijkt zinvol om proeven te doen met dit soort buizen om te bepalen waar de grenzen van de mogelijkheden liggen.

Een geribbelde binnen- en buitenbuis heeft als voordeel dat deze van zichzelf een deel van de axiale uitzetting kan compenseren. Tevens kan een stalen ribbelbuis tegen een hogere temperatuur t.o.v. een kunststof binnenbuis.

De kunststof buizen doen het beter dan de staal-PUR-PE buizen, zolang de temperatuur van het vervoerde water maar niet te warm wordt. Voor midden- en lage temperatuur warmtenetten zijn ze dus erg geschikt.

BIJLAGE A: KORTE BESCHRIJVING VAN *Ple4Win*

Short description of Ple4Win

Ple4Win is a Computer Aided Design tool for the pipeline design engineer, who has to design and evaluate the strength and stability of buried or partly buried transport pipelines, that have to meet safety requirements as they are specified in Pipeline Codes and Regulations. The pipeline may be a high or low-pressure transmission pipeline, onland or offshore.

Ple4Win is based on a 3D geometric model, in which the pipeline is schematised by means of a string of straight pipe, curved bend and T-connection elements.

Branches and loops are allowed and as a result stations may be analysed as well.

Pipe diameter, pipe wallthickness and the properties of the pipeline materials may change along the pipeline axis.

Support and loading of the pipeline result from the surrounding soil. The soil model is based on the mechanical properties of the soil, which depend on the deformation direction (upward, sideward and downward) of the pipe relative to the soil and counteracted by the friction reaction of the soil.

Based on soil failure mechanics in the four principal directions a 3-D soil model is built in such a way that in the model the soil reaction is defined in any direction of the pipeline displacement. The deformation behaviour of the soil is considered to be non-linear elastic or elasto-plastic and primarily based on a bi-linear curve. Over the first part of the curve the deformation behaviour of the soil is considered to be linear elastic (constant ratio between soil reaction and pipe displacement), whereas over the second part the soil behaviour is considered to be ideal plastic (constant soil reaction independent of the pipe displacement). Other, smooth, curves can be applied too. Even slacks (for instance in a jacket tube) are possible.

At the end points of the pipeline structure to be taken into account, a free end or rigid support or a connected half-infinite long pipeline can be specified. Along the pipeline axis external linear elastic supports can be specified. For instance a "table" support with friction properties.

The loadings that may be placed on the pipeline structural model result from

installation conditions.

- elastic bends
- towing forces focused on the pulling point
- preheating conditions
- sequence of installation phases

operational conditions:

- internal or external overpressure
- variations in temperature
- deadweight of the pipeline structure

and environmental conditions:

- 3-D deformations of the surrounding soil as a result of consolidation settlements from extra loading and soil subsidence as a result of disturbance of the soil structure or earthquakes
- temporary loadings on top of the soil, e.g. as a result of traffic loads
- wave and current loadings at sea

Additional loadings may be modelled by means of point load patterns.

The loading condition on the pipeline structure is constituted by means of individual load factors on each loading component. The loading condition as a whole may be given an overall load factor. In this way it is possible to work in a traditional manner with actual loadings and admissible stresses, that are derived from the ultimate yield stress of the pipe material by means of a safety factor. Or to work in a more advanced way in which the various loadings each have their own individual loading factor,

together constituting an ultimate loading condition to the pipeline. In the latter case resulting stresses and strains are compared directly to the ultimate bearing capacity of the pipe material or pipe geometry. The ultimate bearing capacity in general is defined as the yield stress or the breaking stress, but can as well be a limit strain or buckling behaviour. For instance collapse of the cross-section or a buckled state. The rather complex pipeline model, built from circular cylinder shells and toroidal shells into a spatial structure, is made accessible for calculation through splitting of the 3-D model into two independent models, being:

- a *"beam" model*, consisting of the pipeline axis with the stiffness properties of the pipe cross-section. At the location of the bends (toroids) the reduction of the bending stiffness of the cross-section, as a result of ovalisation, is taken into account. The counteracting effect of the internal pressure on this stiffness reduction is considered as well.

The beam model is loaded by the internal or external overpressure, temperature variations that mainly cause longitudinal deformations, deadweight of the pipeline and soil deformations that mainly cause lateral deformations of the pipeline. Wave and current loads at offshore pipelines may be present as well. Point load patterns may act in overall directions or they may be attached to the local pipeline orientation. At bends longitudinal deformations are transformed into lateral deformations and vice versa. Determination of displacement behaviour and internal forces in the pipeline is done by means of a finite element based method of calculation in which the pipe and soil properties are treated in an integrated way. From the internal forces in the pipeline, stresses in the pipe cross-sections are calculated. At the bends the influence of the ovalisation of the cross-section on the stress distribution over the circumference is considered. This ovalisation causes higher order pipe bending stresses that are known as stress intensification. The counteracting effect of the internal pressure is introduced in the calculation method. Optionally the limited bend angle stiffness and related stressing can be taken into account. The pipeline material can be specified as iso-

tropic, even elasto-plastic, mainly for ductile materials or as anisotropic mainly for brittle composite materials, like glass fibre reinforced plastic pipes. Geometric non-linearity (large displacements or "stress stiffening") may be accounted for optionally too.

- a *"ring" model*, consisting of the pipe cross-section with the stiffness properties of the pipe wall. The "rerounding" effect of the internal pressure on the deformation behaviour of the cross-section is taken into account. The ring model primarily is loaded by the internal pressure. On the cross-section the local soil reaction, resulting from the displacement of the cross-section as a whole, causes deformation of the cross-section. In a similar way the overburden weight and temporary top loads cause deformation of the cross-section. Calculation of the stresses over the circumference of the cross-section is done by means of a differential equation that is solved through Fourier-series. Calculation of stresses in the pipe material is carried out in 48 points equidistantly distributed over the cross-section circumference at the inner as well as the outer wall face. In case of elasto-plastic material behaviour stresses are calculated in 144 points and the mid wall points are included. Successive ring ovalisations may be "re-distributed" to account for the longitudinal integration.

The following stress components are considered, where in the overall stress calculation weighing factors can be applied on individual stress components in order to allow a distinction between primary and secondary stresses.

- longitudinal stresses as a result of the axial force in the pipeline
- longitudinal pipe bending stresses resulting from the pipe bending moment. First order pipe bending stresses occur in straight pipe sections and in pipe bend sections, whereas higher order pipe bending stresses only occur at pipe bends, or in case of geometric non-linear analysis in the bended straight pipes.
- circumferential wall bending stresses as a result of ovalisation of the pipe cross-section at bends due to pipe bending. Due to

the Poisson effect related longitudinal stress components exist.

- full wall shear stresses as a result of the shear force acting on the pipe cross-section
- full wall shear stresses as a result of the twisting moment acting on the pipe cross-section.
- circumferential stresses resulting from the internal (or external) overpressure
- circumferential wall bending stresses resulting from local soil (and traffic) loadings with related longitudinal Poisson stress components.

From these stress components following evaluation stresses are calculated:

- equivalent stress according to Von Mises
- principal stresses according to Mohr
- maximum shear stress according to Tresca
- maximum uni-axial stresses in longitudinal and circumferential direction.

In case of use of the elasto-plastic pipe material facility analysis the internal forces and related stressing are based on the straining behaviour of the pipe material.

Design process

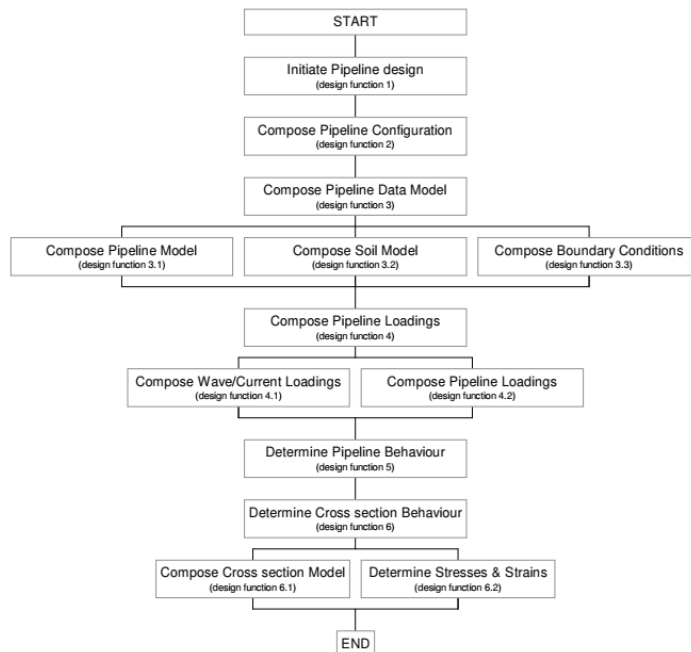
Characteristic for the use of Ple4Win is the application of a design methodology in the structure of the user interface. A great deal of effort has been put into the design of the user interface to facilitate the easy use of the system. The design process is sub-divided into six main design functions as shown in the diagram. Each design function is modelled in a standard layout to enable easy use by the engineer. The same applies to the standard layout of input and result tables. Result data can be interpreted easily through the use of a large number of graphical representation facilities. These enable clear reporting as well. Combination of plot files is possible to arrange overviews of graphically represented results. Successive design functions in the design flow scheme are processed one by one. Results from each function can thus be monitored easily. Set back functions provide the option to step

back in the design process to allow for parameter variation in order to obtain optimal structural results. Graphical facilities allow for comparison of results from different calculations.

QA of Ple4Win

Ple4Win is formally approved by Dutch authorities for analysis of pipeline structures to meet code requirements. However, in Belgium, France, Germany, Denmark, Great Britain, Norway, Israel and other countries results of Ple4Win analyses have been formally accepted as sound engineering analyses. The system is in use by a great number of engineering companies but certifying bodies and universities use Ple4Win as well.

Verification of results is one of the major efforts put into the program development since the beginning of the development of the design method as early as 1965. Where analytical comparative results are missing because of the complexity of the applied mechanics, test results are used.



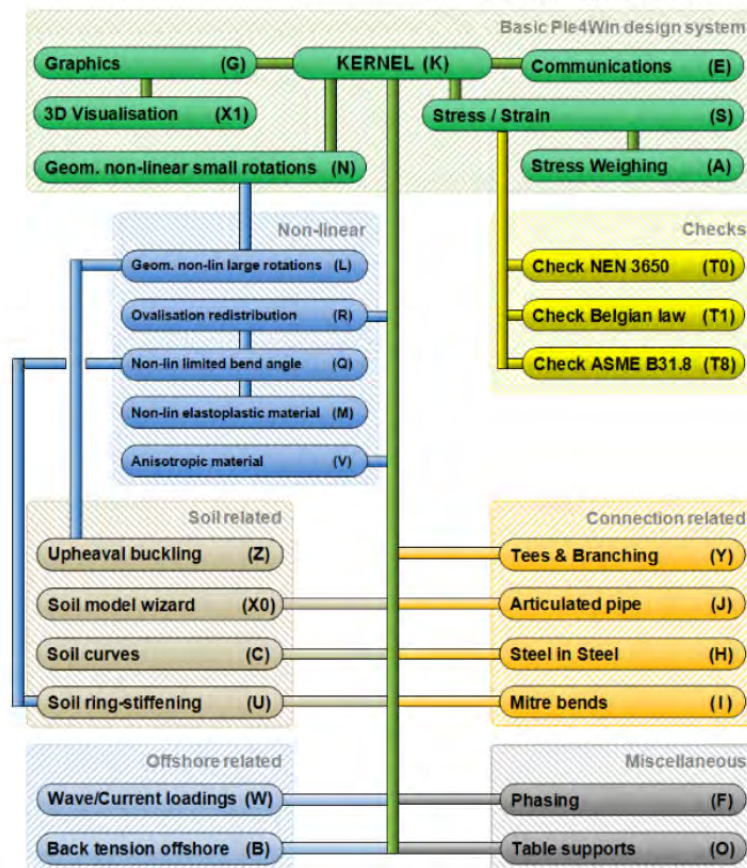
Modular structure of Ple4Win

The structure of Ple4Win is of a modular nature with basic modules to perform basic flexibility and stress/strain analyses and special modules to accommodate special applications. Various "Code checking" modules are available to directly adhere to specific code requirements. However, the main model is kept as free from code based ad hoc requirements as possible.

New developments

With the ongoing development of Ple4Win in the wake of new Pipeline Codes becoming available and new construction and installation methods developed, new modules are added in time to include further advanced functionality. Especially the fit-for-purpose analyses on existing pipelines is a first order technical challenge.

The developments are performed by r+k consulting engineers, a sister company of Expert Design Systems bv.



Further information:

	EXPERT DESIGN SYSTEMS b.v Geestbrugweg 44 2281 CM Rijswijk, The Netherlands tel: +31-(0)70-3902386 e-mail: info@eds-ple.nl website: www.ple4win.com	r+k consulting engineers Geestbrugweg 44 2281 CM Rijswijk, The Netherlands tel: +31-(0)70-3906890 e-mail: info@rkconsult.nl website: www.rkconsult.nl	
	© 1987-2019 Expert Design Systems b.v., Rijswijk, The Netherlands		

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