A network diagram with various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2023.072 | Oktober 2023

**Relatie tussen
inhomogene
aantasting en conditie
van AC buizen, een
eerste analyse**

Colofon



Relatie tussen inhomogene aantasting en conditie van AC buizen, een eerste analyse

BTO 2023.072 | Oktober 2023

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045/317

Projectmanager

Ina Vertommen MSc

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

dr. Mohamad Zeidan, Bram Hillebrand MSc., dr. Amitosh Dash

Kwaliteitsborger(s)

dr. Ir. Mirjam Blokker

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Dit rapport is door de Themagroep Distributie openbaar gemaakt op het moment van publiceren.

Keywords

AC

Jaar van publicatie

2023

Meer informatie

Bram Hillebrand, MSc.

T 030-6069590

E Bram.Hillebrand@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

KWR

Oktober 2023 ©

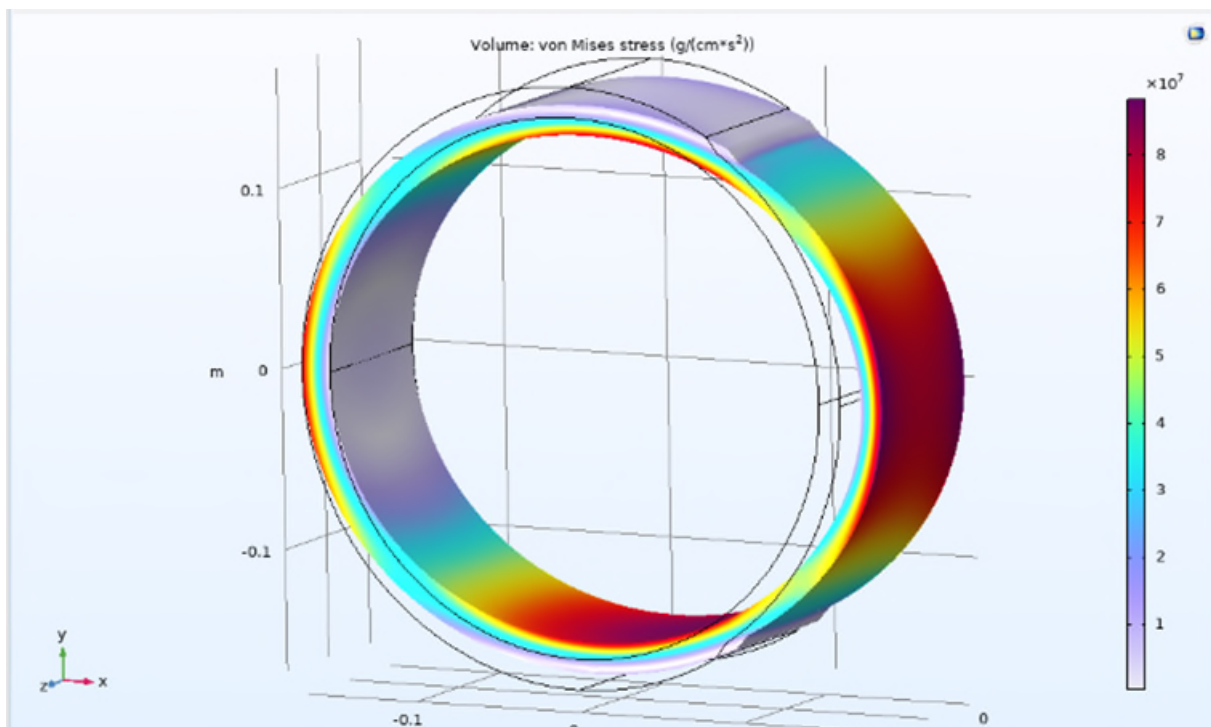
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

Inhomogene aantasting van AC buizen beïnvloedt hun conditie

Auteur(s) dr. Mohamad Zeidan, Bram Hillebrand MSc., dr. Amitosh Dash

Aantasting van asbestcement (AC) buizen is vaak inhomogeen. Toch zijn bestaande conditiemodellen als het Kennissysteem Levensduurbepaling KSLB gebaseerd op homogene aantasting van de buis. Een eerste analyse van het effect van inhomogene aantasting op de conditie van de buis laat zien dat inhomogene aantasting van de buis zowel tot lagere maximale spanningen als tot hogere maximale spanningen kan leiden, afhankelijk van de oriëntatie van de aantasting op de omtrek van de buis. Wanneer aantastingen worden gemeten, is het daarom belangrijk te weten wat de oriëntatie van die aantasting is om beter te kunnen inschatten wat de consequenties zijn voor de conditie van de buis. Aanbevolen wordt om een meetprotocol op te stellen waarin omtrekprofielen worden bepaald met een meetdichtheid die groot genoeg is om de breedte van de aantasting te kunnen detecteren. Het is bovendien belangrijk om vast te leggen waar de aantasting zich bevindt: aan de binnenkant of aan de buitenkant van de buis en wat de oriëntatie is ten opzichte van de onderkant van de buis.



Figuur 1: Doorberekening van een inhomogeen uitgeloopte AC buis. In dit geval gaat het om een buis die aan de buitenkant aan de zijkant (rechts in het figuur) een uitgeloopte band heeft van 120 graden. De zwarte lijnen geven de originele vorm van de buis weer en het gekleurde deel de overdreven deformatie. De kleuren geven de stress concentratie weer.

Belang: Inzicht nodig in het effect van inhomogene aantasting op levensduur van een leiding

Bij de huidige KLSB-berekeningen wordt verondersteld dat de aantasting van AC homogeen is, dus dat de buis overal tot op dezelfde diepte is aangetast. CT-scans en thymoftaleïne-tests hebben juist laten zien dat aantasting van AC buizen sterk inhomogeen is. Daarom is het belangrijk om te weten hoe inhomogene aantasting zich verhoudt tot homogene aantasting. Zodat uiteindelijk kan worden beoordeeld of restlevensduur eventueel wordt overschat of onderschat door de aanname van homogene aantasting.

Aanpak: CT-scans, modellering met eindige-elementen-modellen

Eerst zijn de CT-scans geanalyseerd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen aantasting aan de binnenkant en aan de buitenkant van de buis. De vorm, afmetingen en diepte van de aantasting zijn bepaald. Deze resultaten zijn gebruikt als input voor eindige-elementen-modellen (Finite Element Models, FEM). De eindige-elementen-modellen is een manier om een probleem te discretiseren. Een continu medium wordt hierbij opgedeeld in blokjes (vierkantjes of driehoekjes in 2d of kubusjes of tetraëders in 3d). De verschillende fysische parameters worden vervolgens berekend op de randen van deze discrete blokjes.

Voor de eindige-elementen-modellen is gebruik gemaakt van het rekenpakket COMSOL. Er zijn modellen doorgerekend met aantastingen op verschillende locaties (binnen- of buitenkant), op verschillende oriëntaties (bovenkant, zijkant en 45 °), breedtes (30, 60, 90 of 120 °), en uitlogingsdieptes (1,2,3 of 4 mm). Een totaal van 96 modellen is doorgerekend.

Resultaten: De oriëntatie van de inhomogene aantasting is alles bepalend

Uit de analyse van de CT-scans is gebleken dat inhomogene aantasting vooral in twee vormen voorkomt. De eerste vorm betreft banden in de lengterichting van de buis. Deze banden kunnen een verschillende breedtes hebben en er kunnen meerdere banden op een buis voorkomen, zowel aan de binnenkant als aan de buitenkant. De tweede vorm betreft vlekken. Hier gaat het om (bijna) ronde aantastingen die of random zijn verdeeld, of enigszins olijnen in de lengterichting. Ook dit komt aan de binnenkant en aan de buitenkant voor.

Of inhomogene aantasting tot hogere of lagere maximale spanningen leidt ten opzichte van een homogene aantasting van dezelfde diepte is afhankelijk van de oriëntatie (klokstand) van de aantasting, en/of de aantasting zich aan de binnenkant of de buitenkant bevindt. Dit betekent dat bij het meten van (inhomogene) aantasting het belangrijk is om ook de oriëntatie van de aantasting vast te leggen. Verder is het belangrijk om onderscheid te maken tussen aantasting aan de binnenkant en aantasting aan de buitenkant.

Toepassing: Meetprotocollen zouden moeten worden aangepast

Voor de in dit rapport onderzochte inhomogene aantastingsvormen zijn oriëntatie, breedte en diepte belangrijke parameters. Aanbevolen wordt om een meetprotocol op te stellen waarin omtrekprofielen worden bepaald met een meetdichtheid die groot genoeg is om de breedte van de aantasting te kunnen detecteren. Het is bovendien belangrijk om vast te leggen waar de aantasting zich bevindt: aan de binnenkant of aan de buitenkant van de buis en wat de oriëntatie is ten opzichte van de onderkant van de buis.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Relatie tussen inhomogene aantasting en conditie van AC buizen* (BTO-2023.072).

Inhoud

Colofon	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	5
1 Introductie	6
1.1 Doel	6
1.2 Leeswijzer	6
2 Analyse van CT Scans	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Voorbeeld van een analyse	8
2.3 Resultaten van de analyse	9
3 Methodes voor de modelberekeningen	11
3.1 Introductie	11
3.2 Model geometrie	11
3.3 Model materiaalspanningen	14
3.4 Numerieke experimenten experiments	16
4 Resultaten en discussie modelering	17
4.1 Uitloging op de zij aan de buitenkant	17
4.2 Uitloging op de zij aan de binnenkant	19
4.3 Uitloging op de top aan de buitenkant	21
4.4 Uitloging op de top aan de binnenkant	22
4.5 Uitloging op de diagonaal aan de buitenkant	24
4.6 Uitloging op de diagonaal aan de binnenkant	26
4.7 Spanningsmodelering	28
5 Consequenties voor meetprotocollen	29
6 Conclusie, Bedrijfsparagraaf en aanbevelingen	31
6.1 Aanbevelingen	31
6.2 Bedrijfsparagraaf	31
7 Bibliografie	32

1 Introductie

1.1 Doel

Voor de beoordeling van de vervanging van leidingen is het noodzakelijk om leidingen met een hoog faalrisico te prioriteren, aangezien niet alle leidingen in één keer kunnen worden vervangen. Bij de beoordeling van de toestand en restlevensduur van AC-buizen worden verschillende parameters in aanmerking genomen. Een belangrijke overweging is het structurele vermogen van de leiding om verschillende belastingen te weerstaan, zowel van binnenuit als van buitenaf. Wanneer op dit moment wordt vastgesteld dat een leiding tot op een bepaalde diepte is uitgelopen, wordt de gehele leiding beschouwd als homogeen uitgelopen tot op dezelfde diepte, d.w.z. de gehele leidingdikte wordt gereduceerd. Op deze manier kunnen de restlevensduur en de gebruikslimieten van de leiding worden geschat (zoals gedaan in de KSLB-methode). Een mogelijk probleem met de KSLB-methode is deze aanname van homogene uitloging omdat CT-scans (en ook al eerder in thymoftaleinetests (Slaats & Mesman, 2004) en (Beuken, 2016)) aantonen dat de uitloging in echte leidingen inhomogeen is.

In dit project willen we Eindige elementen modellen (Finite Element Method, FEM) gebruiken om het belang van inhomogene uitloging op de resterende reststerkte van leidingen te onderzoeken en dit vervolgens vergelijken met een situatie van homogene uitloging. Zo kunnen we bepalen of inhomogene uitloging leidt tot langere of kortere restlevensduren van leidingen, hoe deze inhomogene uitloging het best kan worden gemeten en of de KSLB-methode moet worden herzien.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de analyse van de CT-scans van verschillende AC leidingen. Deze scans zijn gemaakt in het kader van het BTO project Kennisopbouw van AC met behulp van CT (van Steen, Holzhaus, & Laarhoven, 2021). De resultaten hiervan zijn gebruikt als input voor de modelberekeningen in hoofdstuk 3 en de resultaten van deze modelberekeningen zijn vervolgens besproken in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft de eerste aanbevelingen voor het aanpassen van meetprotocollen voor AC. In hoofdstuk 6 worden enkele conclusies, aanbevelingen alsook de bedrijfsparagraaf weergegeven.

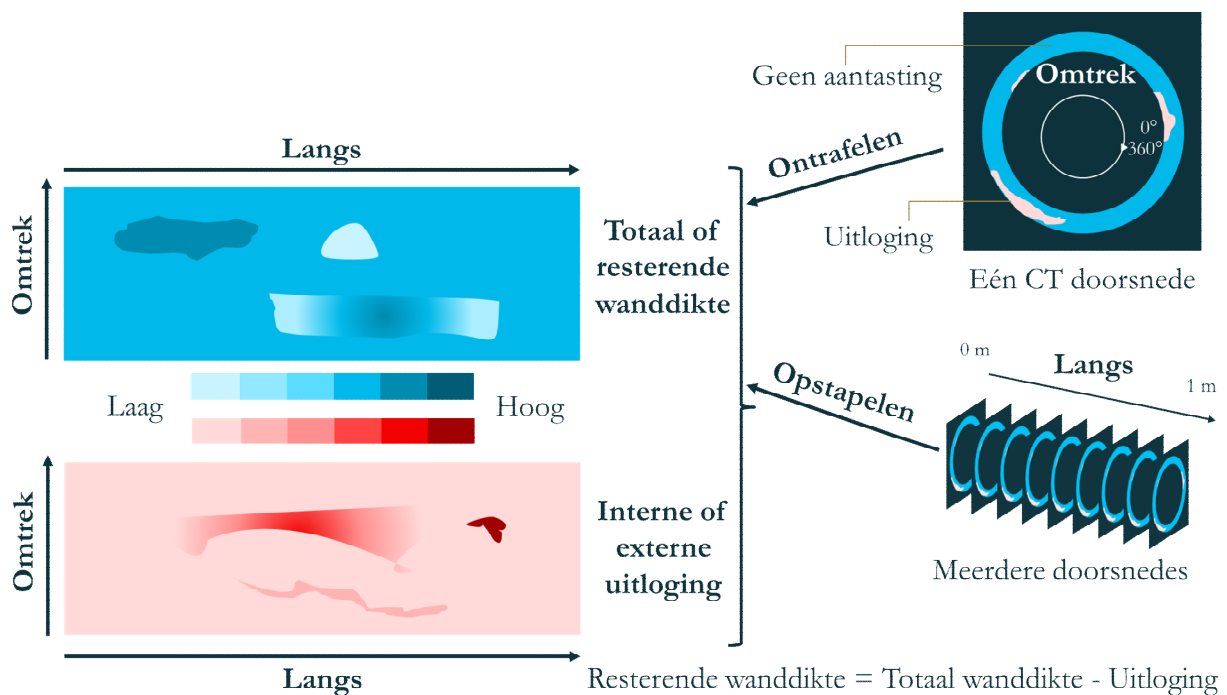
2 Analyse van CT Scans

2.1 Inleiding

De CT-scans zijn (handmatig) geanalyseerd om de belangrijkste kenmerken van de aantasting in kaart te brengen. Zo is informatie verzameld over de vormen waarin aantasting voorkomt. Dit is input voor de FEM.

De eerdere analyses (van Steen, Holzhaus, & Laarhoven, 2021), laten zien dat de aantasting de vorm van vlekken (ronde tot semironde plekken van aantasting) heeft of van banden (langgerekte banden in de lengterichting met min of meer uniforme aantasting). Destijds is alleen de resterende wanddikte gerapporteerd (N.B. Resterende wanddikte = Originele wanddikte – (interne aantasting + externe aantasting)). Bovendien is voor de resterende wanddikte het effect van interne en externe aantasting bij elkaar opgeteld. Voor de FEM-analyses in dit onderzoek is een uitsplitsing naar interne en externe aantasting belangrijk.

In deze studie is gebruik gemaakt van de eerder ontwikkelde code om de CT-scans van de AC-buizen te splitsen naar interne en externe aantasting. De analyse van de CT-scans is vervolgens handmatig gedaan.



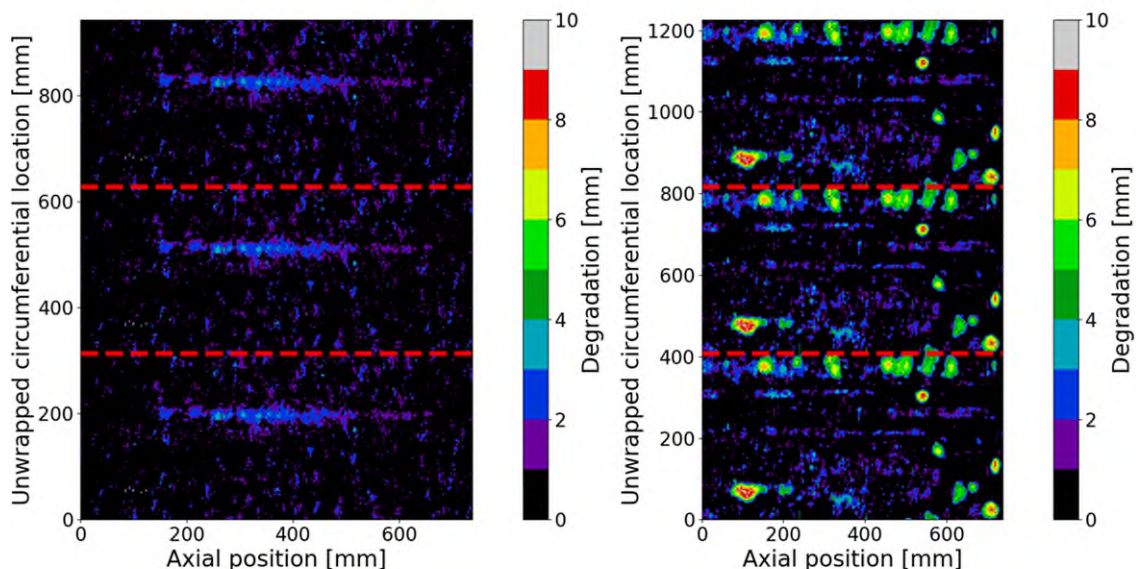
Figuur 2: Overzicht van hoe pre-processed CT-scans naar dikte/uitloging kaarten vertaald worden.

In Figuur 2 wordt het proces verder toegelicht:

1. Rechtsboven ziet men een fictieve CT-scan van een buisdoorsnede na pre-processing (van Laarhoven & Quintiliani, 2020). Daarin is de hele omtrek van een buis zichtbaar met aanwezigheid (rood) of afwezigheid (blauw) van aantasting. De ruimtelijk resolutie van het beeld is 0,29 mm x 0,29 mm (grootte van een pixel).
2. Rechtsonder ziet men dat er meerdere doorsnedes bestaan langs de hele lengte van de buis. Er zijn CT-scans om de 1,5 mm.
3. Door het ontrafelen van een buisdoorsnede en het opstapelen van meerdere doorsnedes kunnen kaarten van totaal/resterende wanddikte en/of interne/externe uitloging gemaakt worden. De verticale as van deze kaart is de ontrafeling van de omtrek van één CT-scan terwijl de horizontale as de opstapelning is van de CT-scans van doorsnedes in de langsrichting. De kleuren in deze kaarten representeren de diktes en/of mate van uitloging.

2.2 Voorbeeld van een analyse

Figuur 3 geeft een voorbeeld van een CT-scan van een buis. De ontrafelde en opgestapelde kaarten zijn drie keer aan elkaar geplakt (met de rode gestippelde lijnen als grenzen). Dit vergemakkelijkt de visualisatie wanneer een kenmerk zich op de rand van de kaart bevindt. Bijvoorbeeld, wanneer een kenmerk zich langs de omtrek uitstrekt van 358 graden tot 2 graden (dus 4 graden breed, rondom de rode stippellijn), wordt dit kenmerk tijdens de ontrafeling in twee gesplitst, en lijkt het op twee kenmerken, in plaats van één. In de kaart zijn de hoeken naar afstanden vertaald met behulp van interne/externe diameters, zodat de vorm van de kenmerken eenduidig is (waarbij de x-as en de y-as dezelfde afmetingen hebben). De kleuren (mate van uitloging) zijn op een discrete manier weergegeven (elke kleur heeft een stap van 1 mm uitloging), zodat de handmatige analyse zo eenvoudig mogelijk gedaan kon worden.



Figuur 3: Voorbeeld van uitlogingskaarten voor de Buis met ID 103679. (Links) Interne uitloging (Rechts) Externe uitloging

De buis van Figuur 3 is een goed voorbeeld omdat de interne uitloging met name banden laat zien en de externe uitloging met name vlekken. Voor het voorbeeld in Figuur 3 zijn de volgende waarnemingen over de vorm van interne/externe uitloging gemaakt.

- Interne uitloging:
 - Het achtergrondniveau (homogene uitloging) van de degradatie is tussen 0 en 1 mm.
 - Er is één band aanwezig met lengte 350 mm, en breedte 30 graden (~25 mm), en uitlogingsdiepte tussen 2 en 3 mm.
 - Er zijn meerdere vlekken met een uitlogingsdiepte tussen 1 en 3 mm.
- Externe uitloging:
 - Het achtergrondniveau van de degradatie is tussen 0 en 1 mm.
 - Vlekken hebben een uitlogingsdiepte tussen 2 en 8 mm. met lengtes tussen 20 en 100 mm en breedte tussen 20 en 60 graden.
 - De kortste afstand tussen vlekken is 2 mm in langsrichting en 40 graden (~35 mm) in de omtrek.
 - De langste afstand tussen vlekken is 150 mm in axiale richting en 60 graden (~50 mm) in de omtrek.
 - De vlekken liggen dichtbij elkaar, waarbij de helft op dezelfde oriëntatie ligt, en de andere helft is verspreid.
 - De hoofdas van een vlek is meestal parallel aan de as van de buis, maar het komt ook voor dat de hoek tussen beide assen 40, 60 of 75 graden is.
 - De verhoudingen tussen de lengte (langs de hoofdas) en de breedte van de vlekken zijn rond de 1-2
 - De typische ruimtelijke dichtheid van de vlekken tussen 10 en 15 procent van de oppervlakte.

2.3 Resultaten van de analyse

Deze analyse is uitgevoerd voor 19 buizen waarvan een samenvatting is gegeven in Tabel 1. Hierin is te zien dat we zowel banden als vlekken waarnemen. Een buis kan meerdere banden hebben. Banden en vlekken kunnen zowel intern als extern voorkomen en iedere combinatie (bv banden intern en vlekken extern) is aangetroffen.

Een analyse van 19 buizen is niet genoeg om met voldoende zekerheid te bepalen hoe vaak verschillende kenmerken voorkomen. We hebben de informatie vooral gebruikt om de bandbreedtes voor de FEM te bepalen.

- Voor banden geldt: Er zijn (meestal) 1 tot 3 banden op een buis. De breedte van die banden is van 15 tot 240 graden waarbij buizen met meerdere banden uiteraard kleinere banden hebben. De diepte varieert tussen de 2 en 7 mm.
- Voor de vlekken geldt: Vlekken zijn 5 – 50 mm in doorsnede en 2 – 8 mm diep. De hoeveelheid varieert sterk. We zien dat vlekken ook vaak olijnen (zie ook Figuur 3). Het is aannemelijk dat opgelijnde vlekken over de loop van de tijd banden worden.

In de analyse is niet bekend wat de bovenkant van de buizen is, en dus is de oriëntatie (of klokstand) van de aantastingen onbekend.

In dit onderzoek hebben we modellen gemaakt van uitloging in de vorm van banden met in het begin 1 band. Van de CT-scans hebben we gezien dat deze zowel aan de binnenkant als aan de buitenkant kunnen voorkomen. De breedtes kunnen variëren tussen de 15 en 240 graden van de omtrek en dieptes van 2 t/m 7 mm. Omdat we het aantal modellen behapbaar moeten houden hebben we gekozen om de breedte te variëren in 4 stappen tussen 30 en 120 graden en de diepte ook in 4 stappen tussen de 1 en 4 mm. De verschillende modellen die zijn doorgerekend staan in meer detail beschreven in paragraaf 3.4 en in Tabel 2.

Tabel 1: Overzicht van al de geanalyseerde buizen.

Buis ID	Lengte [mm]	Buitendiameter [mm]	Wanddikte [mm]	Eigenschappen interne uitloging	Eigenschappen externe uitloging
10026-1	1010	130	15.0	Bandstructuren	Bandstructuren
103679	890	130	<u>15.0</u>	Enkele band	Vlekken
168218	1040	130	14.8	Opvallende band	Enkele band
177340	830	130	14.6	Twee banden	Enkele band
177598	1140	130	12.5	Eén opvallende band	Verspreide vlekken
BLERICK-1	560	130	<u>15.0</u>	Eén opvallende band	Schaarse vlekken
BLERICK-2	490	135	<u>17.5</u>	Eén opvallende band	Schaarse vlekken
BLERICK-3	610	130	<u>15.0</u>	Eén opvallende band	Zeer schaarse vlekken
BLERICK-4	700	120	<u>10.0</u>	Eén opvallende band	Bijna geen vlekken
D10_365-1	950	130	14.5	niet bruikbaar	niet bruikbaar
D09586-1	1170	130	13.0	Eén opvallende band	Eén opvallende band
D09930	870	130	17.0	Een paar bandstructuren	Twee duidelijk verschillende gebieden
(P/)D10427-01	890	130	14.8	Eén opvallende band	Eén opvallende band
D10915-1	1160	130	14.9	Banden + vervuiling in data	Banden + vervuiling in data
D161290	980	130	15.1	Zwakke bandstructuren	Vlekken
DUN004	1100	130	14	Vlekken + vervuiling in data	Banden + vervuiling in data
ONB-03	890	120	15.6	Een dunne band + vervuiling in data	Eén band + vervuiling in data
(D/)P10915new	1070	120	11.8	Vlekken met beperkte axiale oriëntatie	Vlekken met sterke axiale oriëntatie
WML-01	760	130	15.6	Combinatie van banden en vlekken	Vlekken

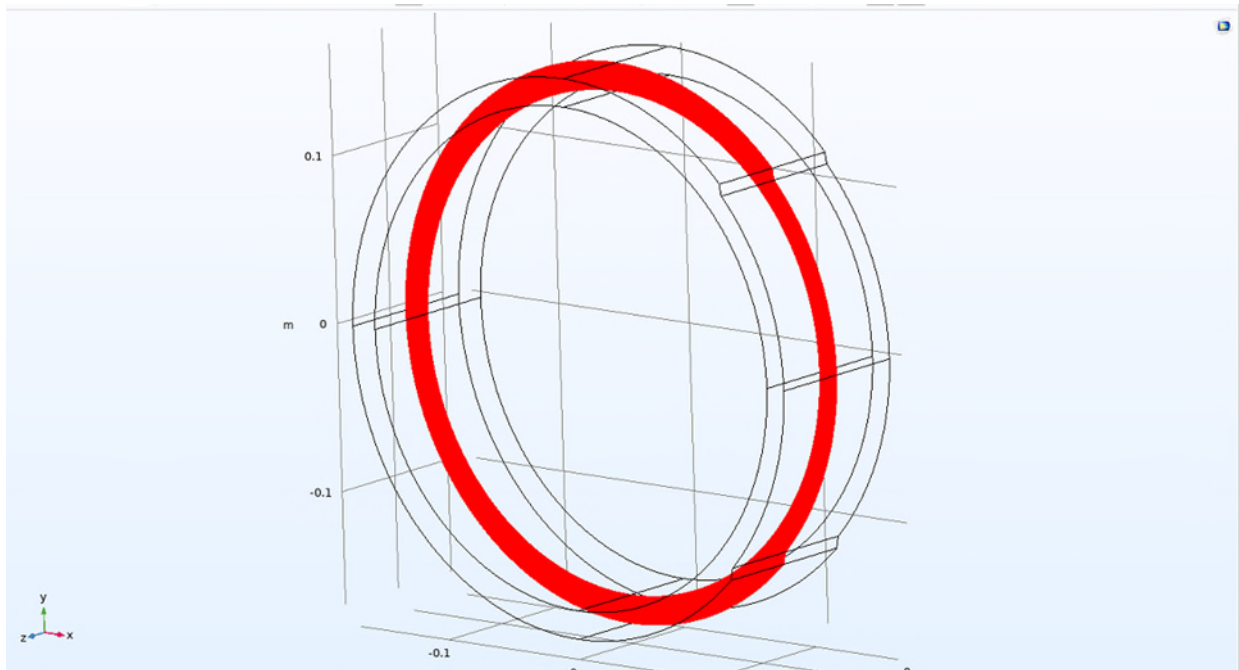
3 Methodes voor de modelberekeningen

3.1 Introductie

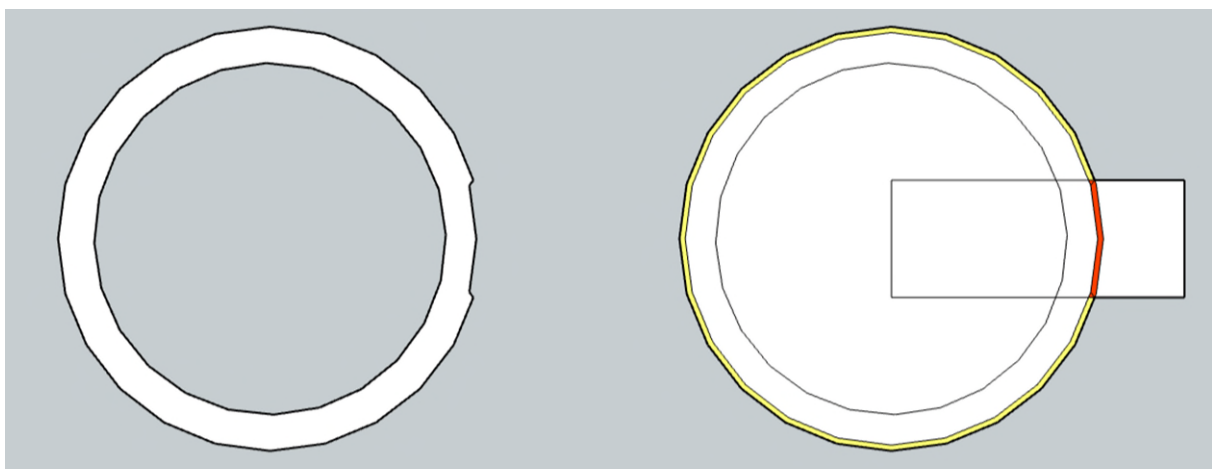
De modelberekeningen in dit rapport zijn gemaakt met een eindige elementen methode. De eindige elementen methode is een manier om een probleem te discretiseren. Een continu medium wordt hierbij opgedeeld in blokjes (vierkantjes of driehoekjes in 2d of kubusjes of tetraëders in 3d). De verschillende fysische parameters worden vervolgens berekend op zogenoemde integratiepunten. Deze liggen in de discrete blokjes en de hoeveelheid ervan hangt af van het type element (eerste of tweede orde). Vervolgens is het belangrijk om zogenoemde randvoorwaarden op te stellen. De details hiervan zijn te vinden in de volgende twee secties (3.2 en 3.3). Het eindige elementen model van een AC buis met verschillende uitlogingen is opgesteld met (het commerciële softwarepakket) COMSOL, waarbij met name gebruik is gemaakt van de structurele mechanica module. Waarden van systeemparameters en randvoorwaarden zijn zoveel mogelijk gebaseerd op informatie uit hoofdstuk 2, en aangevuld met benaderingen en typische waarden uit normen en de wetenschappelijke literatuur.

3.2 Model geometrie

In deze modelstudie modelleren we een fictieve AC-buis en niet één van de onderzochte buizen uit hoofdstuk 2. We hebben gekozen voor één specifieke diameter en bijbehorende wanddikte om alle resultaten vergelijkbaar te houden. Deze AC-buis wordt gemodelleerd als een holle cilinder. De buitendiameter, D , en wanddikte e zijn gekozen in overeenstemming met de nominale waarden die bekend zijn voor de leiding ($D = 334$ mm, $e = 17$ mm). Het volgende proces werd uitgevoerd om een degradatieband te modelleren. Eerst werd een 2D-model getekend en vervolgens geëxtrapoleerd tot de gewenste lengte. Zoals Figuur 3 laat zien bestaat de doorsnede uit 1) de buiswand met de wanddikte behorend bij de diameter (in geel) en 2) de deuk veroorzaakt door de degradatie waar de effectieve wanddikte is afgenomen door uitloging. (in rood). We modeleren enkel de buiswand. De grond eromheen is gemodelleerd als een druk vanaf de buitenkant die op de wand van de buis werkt en de waterdruk als druk die werkt vanuit binnen op de buiswand (zie Figuur 8 in Sectie 3.3). De invloed van de lengte van de buis werd getest voor verschillende scenario's en er werd geconcludeerd dat de lengte in dit specifieke model geen rol speelt in de ontwikkelde spanningen. We kiezen L als 0,1 meter. Dit helpt rekenkosten te beperken en maakt het daardoor ook mogelijk om een nog fijner grid (het discrete grid, een fijner grid betekent dat de individuele elementen kleiner zijn en dat de oplossing nauwkeuriger is) te gebruiken in de FEM-berekeningen binnen het toegewezen tijdsbestek. Om de invloed van eventuele plaatselijke randvoorwaarden te minimaliseren, werden de spanningen geanalyseerd in het midden van de buiswand. Zie ook Figuur 4.

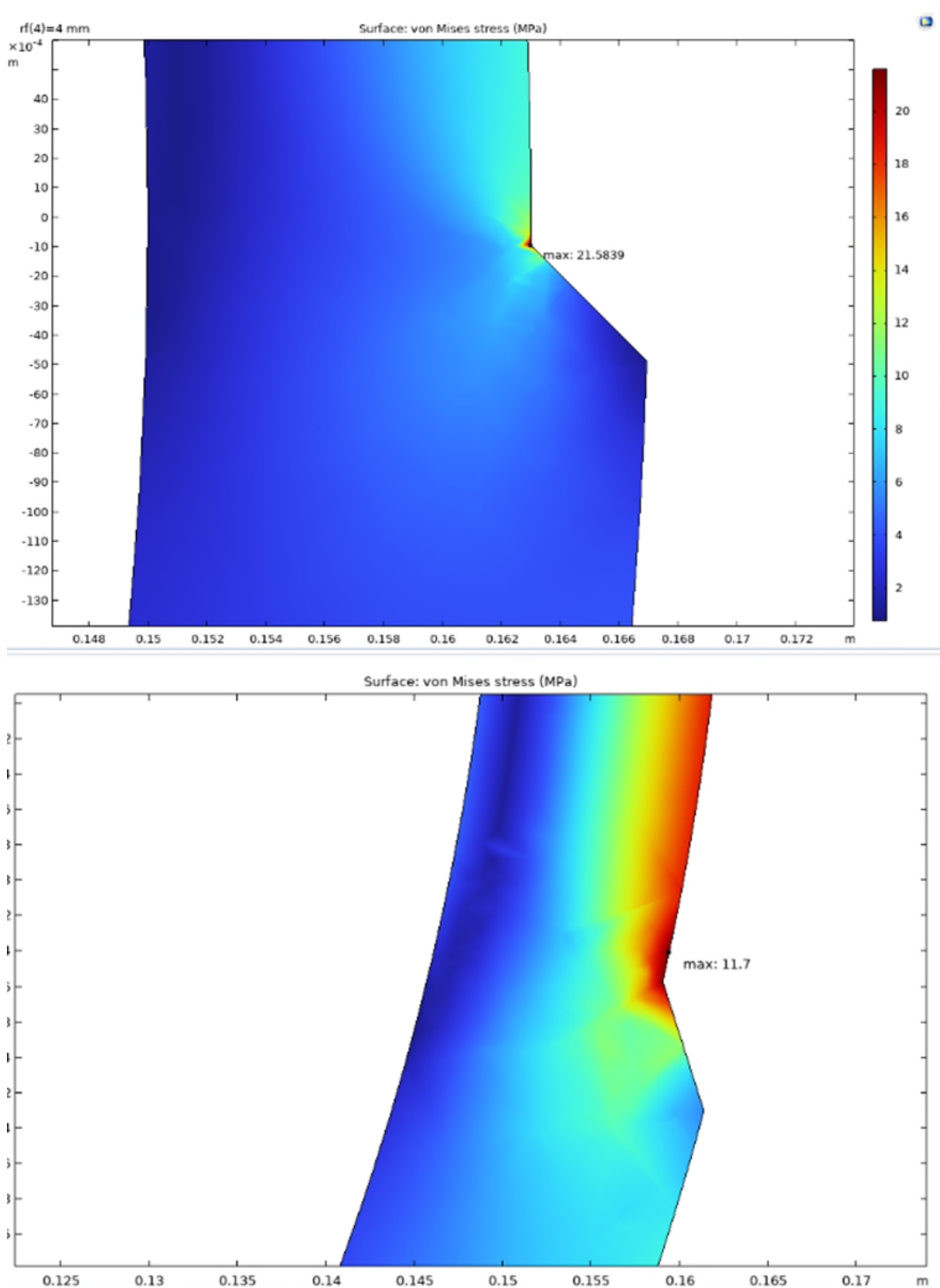


Figuur 4: layout van het model. Het rode vlak illustreert de crossectie in het midden waar de spanningen worden geanalyseerd. Iedere gerapporteerde maximale spanning in dit rapport bevindt zich dus op deze crossectie. Het zwarte wireframe laat de overige dimensies zien van, indt geval, een model met uitloging aan de buitenkant zijkant.



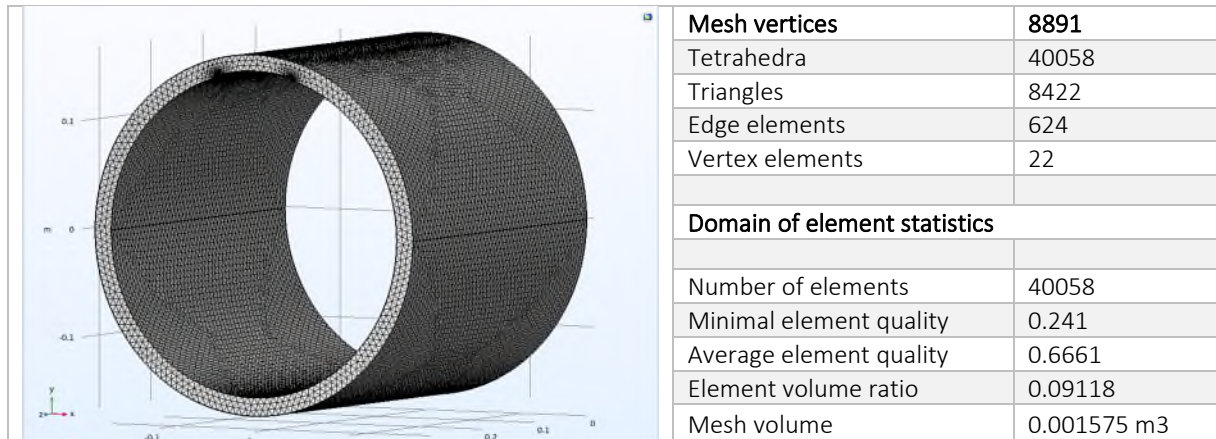
Figuur 5. De algemene doorsnede van de uitgeloogde AC-buis.

In het streven om de ontwikkeling van hoge plaatselijke spanningen bij de discontinuïteiten tussen de rode en gele gebieden in Figuur 5 te voorkomen, werd bovendien onderzoek gedaan naar de mechanica die de spanningsverdeling bepaalt. Gelocaliseerde spanningen, afkomstig van de scherpe en plotselinge veranderingen in de geometrie, bleken de werkelijke spanningsontwikkeling in praktische scenario's onvoldoende weer te geven. Als remedie werden de scherpe randen systematisch veranderd door handmatige ingrepen, waarbij zowel schuine als ronde methoden werden gebruikt (zie Figuur 6).



Figuur 6. (a en b) Lokale hoge spanningen ontwikkelden zich bij de discontinuïteiten in het model.

Voor de modellen werd het grid automatisch gegenereerd door de COMSOL-software op basis van de afmetingen en de fysieke aard van het probleem in kwestie (in dit geval mechanisch). De gridkwaliteit werd ingesteld op de hoogste definitie "extremely fine mesh" om zo nauwkeurig mogelijke resultaten te verkrijgen. Zoals te zien is in Figuur 7 wordt een dicht grid gegenereerd in kleine discontinuïteiten (de twee zwarte vlekken aan de bovenkant van de cilinder), terwijl een grover grid wordt gegenereerd in gebieden met uniformiteit. Het grid bestaat uit quadratic serendipity elementen.



Figuur 7. grid modellering die overeenkomt met de geometrie en discontinuïteiten. Grid statistieken worden weergegeven in de tabel ernaast.

3.3 Model materiaalspanningen

Het buismateriaal is gemodelleerd als lineair elastisch, zonder plastische vervorming. Bij de beoordeling van de structurele integriteit van de ondergrondse AC-buis werd rekening gehouden met bepaalde factoren door middel van een uitgebreide spanningsanalyse. Een belangrijk aspect van deze analyse was de evaluatie van de Von Mises-spanning (σ_{VM}), een fundamenteel criterium voor de beoordeling van de gecombineerde spanningen die zich in de buis opbouwen. In deze context werd rekening gehouden met de invloed van zowel hoepelspanning (σ_h) als langsspanning (σ_l) als gevolg van interne druk binnen de leiding, als gevolg van externe belastingen of momenten die op de leiding worden uitgeoefend. De Von Mises spanning (σ_{VM}) wordt als volgt uitgedrukt:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2 + \sigma_h \sigma_l} \quad (1)$$

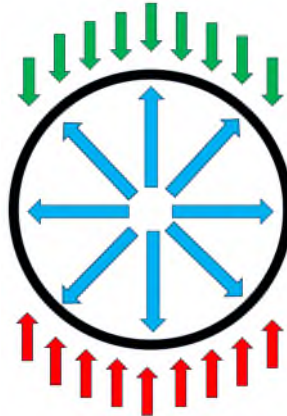
We gebruiken de von Mises spanning om de inhomogene en homogene situaties met elkaar te vergelijken (door middel van 1 getal). De vertaling van spanning naar probleem is wat genuanceerder vanwege de materiaaleigenschappen van AC hiervoor kunnen we ook niet het von Mises criterium gebruiken en zou een Coulomb criterium beter zijn. Daar zijn we in dit project echter niet aan toegekomen en dit maakt dan ook deel uit van de aanbevelingen.

Wanneer leidingen begraven zijn, worden ze blootgesteld aan externe druk veroorzaakt door de omringende grond. De grootste (externe) belasting treedt op in verticale richting en is het gevolg van het gewicht van de grond en extra belastingen door het verkeer (Poduska, et al., 2019). We gaan ervan uit dat de aanwezigheid van de buis geen invloed heeft op de spanningsverdeling rond de buis (Milewski, 2021) In werkelijkheid zal de spanningsverdeling complexer zijn (Sheil, et al., 2018) Een nominale normaalkracht is echter wel een praktische en consistente benadering voor ontwerpschattingen.

- De interne druk (de waterdruk) is gekozen als 4 [atm] wat overeenkomt met 400.000 [Pascal] of 400 [kPa].
- Het model gaat uit van een grondbelasting van 22.367 [Pa] op de bovenste helft van de buis, wat overeenkomt met de belasting van 1,2 [m] grond met een dichtheid van 1.900 [kg/m³].
- Daarnaast werken reactiekrachten van de grond in tegengestelde richting in op de onderste helft van de buis.

- We nemen aan dat er geen verkeersbelasting is.

Deze verschillende belastingen zijn te zien in Figuur 8.

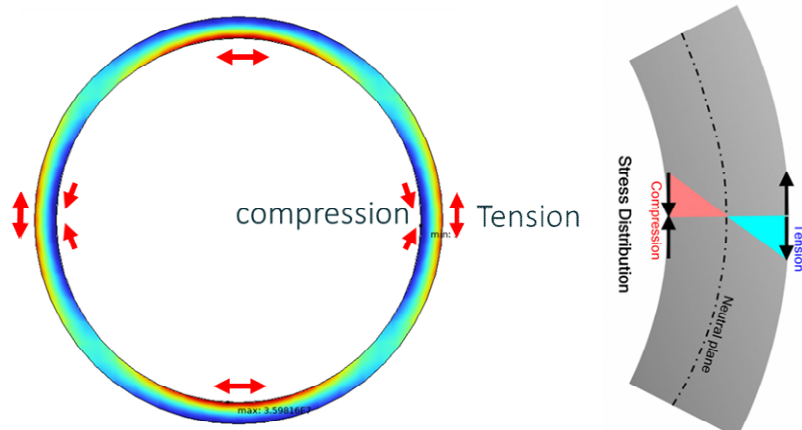


Figuur 8: Overzicht van de verschillende drukken die werken op de leiding. Gronddruk van boven (groen) een reactie hierop van onderen (rood) en de waterdruk vanuit binnen (blauw). Dit overzicht is een schets en de verschillende drukken zijn niet op schaal

De AC Young's modulus E is 2,600 Mpa, en de Poisson's ratio ν is 0.306 (Francois, Dourthe, & Jaouen, 1987). Deze zijn handmatig toegekend omdat ze niet beschikbaar waren in de materiaalbibliotheek van COMSOL.

In dit FEM-model zouden vaste constraints aan de randen van de buis vervorming en ongewenste spanningen aangrenzend aan de vaste grenzen veroorzaken. Daarom wordt, om ongewenste grenseffecten te voorkomen, de rigid Motion Suppression domain constraint feature toegepast. Deze functie past achter de schermen een set beperkingen toe die alle verplaatsing en rotatie van starre lichamen verwijdert. De constraints worden zo gekozen dat er geen reactiekrachten zijn als de externe belastingen zelf-equilibrerend zijn.

De vervorming van de leiding wordt beschreven als een samendrukking op de verticale as en een uitzetting langs de horizontale as. De bovenste en onderste secties van de buis ondervinden dus compressie op de buitenschaal en spanning op de binnenschaal. De linker- en rechtergedeelten van de leiding ondervinden spanning op de buitenschaal en compressie op de binnenschaal, zie Figuur 9.



Figuur 9. buisvervorming onder grondbelasting.

3.4 Numerieke experimenten experiments

De maximaal optredende spanning in de buiswand is berekend met het bovenstaande model. De berekening is herhaald voor verschillende uitlogingsbanden van verschillende breedtes die 30, 60, 90 en 120 graden van de omtrek van de buis beslaat. De berekening is ook herhaald voor drie verschillende uitloogoriëntaties voor uitloging aan zowel de binnen- als de buitenkant van de buis. In totaal zijn er 96 verschillende gevallen onderzocht. Daarnaast hebben we in totaal 12 gevallen onderzocht als referentiegevallen. Dit zijn homogeen uitgeloopte buizen (binnen of buiten) met een uitloogdiepte van 0, 1, 2, 3, 4 en 5 mm, wat in totaal 108 modellen oplevert.

Tabel 2: overzicht van de verschillende modellen

Locatie	Breedte van de band	Diepte van de uitloging	Oriëntatie	Totaal aantal modellen
Buitenkant	30, 60, 90 en 120 graden	1, 2, 3, en 4 mm	Top, zij, diagonaal	$4 \times 4 \times 3 = 48$
binnenkant	30, 60, 90 en 120 graden	1, 2, 3, en 4 mm	Top, zij, diagonaal	$4 \times 4 \times 3 = 48$
buitenkant	360 graden (homogeen uitgeloopt)	0, 1, 2, 3, 4 en 5 mm	-	$1 \times 6 = 6$
binnenkant	360 graden (homogeen uitgeloopt)	0, 1, 2, 3, 4 en 5 mm	-	$1 \times 6 = 6$

In Tabel 2: overzicht van de verschillende modellen kunnen we zien dat we uitloging op drie verschillende locaties van de buis modeleren. Wanneer de bovenkant van de buis positie 0 graden is, dan modeleren we op 0 graden (bovenkant of top), 45 graden (diagonaal) en 90 graden (zijkant of zij). Om verwarring met de breedtes van de uitlogingsbanden te voorkomen zullen we de drie posities aanduiden in de tekst als top, zij en diagonaal.

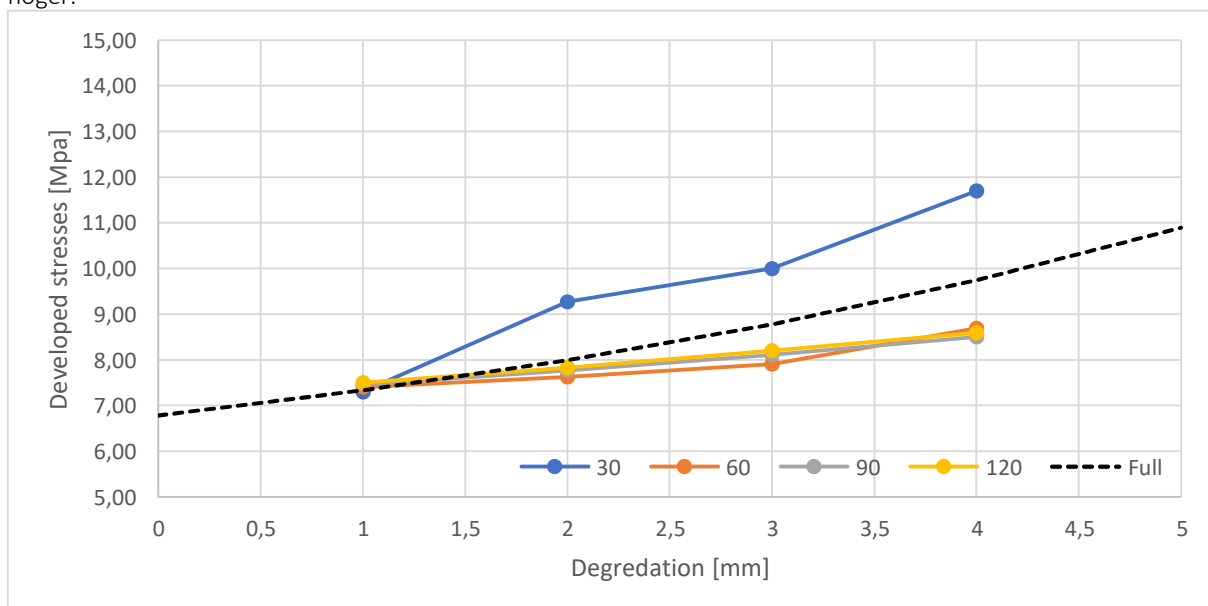
4 Resultaten en discussie modelering

In deze paragraaf onderzoeken we de ontwikkelde spanningen als gevolg van potentiële uitlogingen in een AC buis. We richten ons op de maximaal optredende spanning in een doorsnede genomen in het midden van de buis.

De resultaten voor de homogene uitloging voor binnen- en buitenkant dienen als basislijn voor de banduitloging op respectievelijk de binnen- en buitenkant. Voor het gemak wordt de homogene uitloging aangeduid met 'volledig uitgeloozd' en in grafieken weergegeven als 'Volledig'.

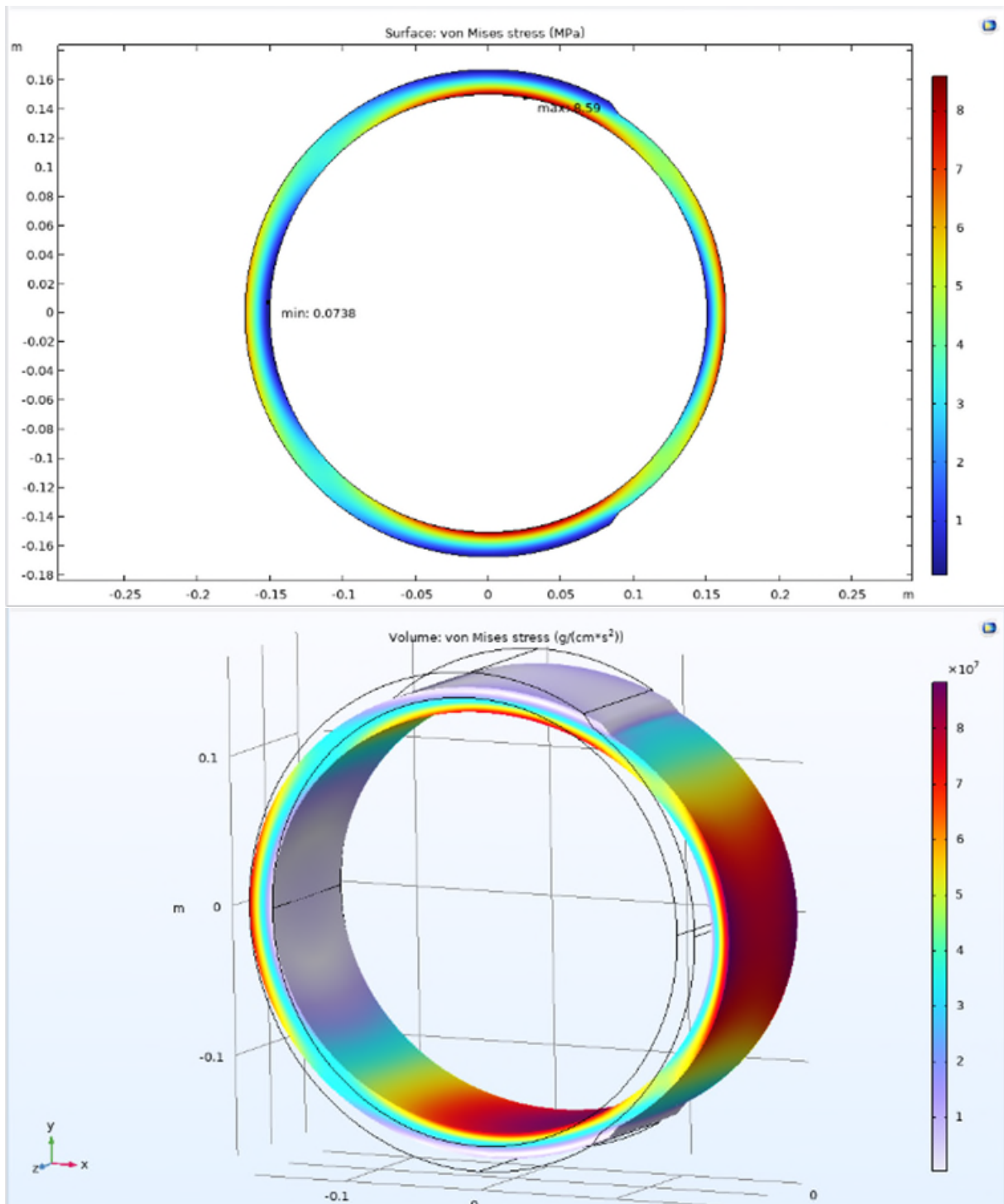
4.1 Uitloging op de zij aan de buitenkant

Het eerste scenario onderzoekt de banduitloging die optreedt aan de buitenste zijden van de buis (het gedrag is symmetrisch, we modelleerden de uitloging als zijnde aan de rechterkant, maar de resultaten zouden identiek zijn geweest aan de linkerkant). Figuur 10 illustreert de ontwikkelde spanningen (in het midden van de buis) die corresponderen met de bandbreedte en het degradatieniveau. De stippellijn geeft de ontwikkelde spanning voor een homogeen uitgeloozd buitenkant van de buis weer, terwijl de andere grafieken de verschillende scenario's voor zijdelingse uitloging weergeven. Zoals in de grafiek te zien is, ontwikkelt de kleine bandbreedte van 30° hogere spanningen dan het volledig uitgeloozd geval. In sommige gevallen zijn de ontwikkelde spanningen 1-1,5 [Mpa] hoger.



Figuur 10. Spanningen bij uitloging op de zij aan de buitenkant

Om beter te begrijpen waarom de grotere bandbreedtes niet groter zijn dan het volledig uitgeloozd geval, is het belangrijk om een specifiek voorbeeld te onderzoeken, zoals de 120°, 4 mm uitloog die in Figuur 11 wordt getoond. Bij een grotere bandbreedte zijn de spanningen gelijkmatiger verdeeld over de hele doorsnede in plaats van gelokaliseerd in specifieke gebieden. Zoals te zien is in Figuur 11, is de maximaal ontwikkelde spanning in dit geval niet te vinden in het uitgeloozd gebied, maar eerder aan de binnenkant van het bovenste deel.

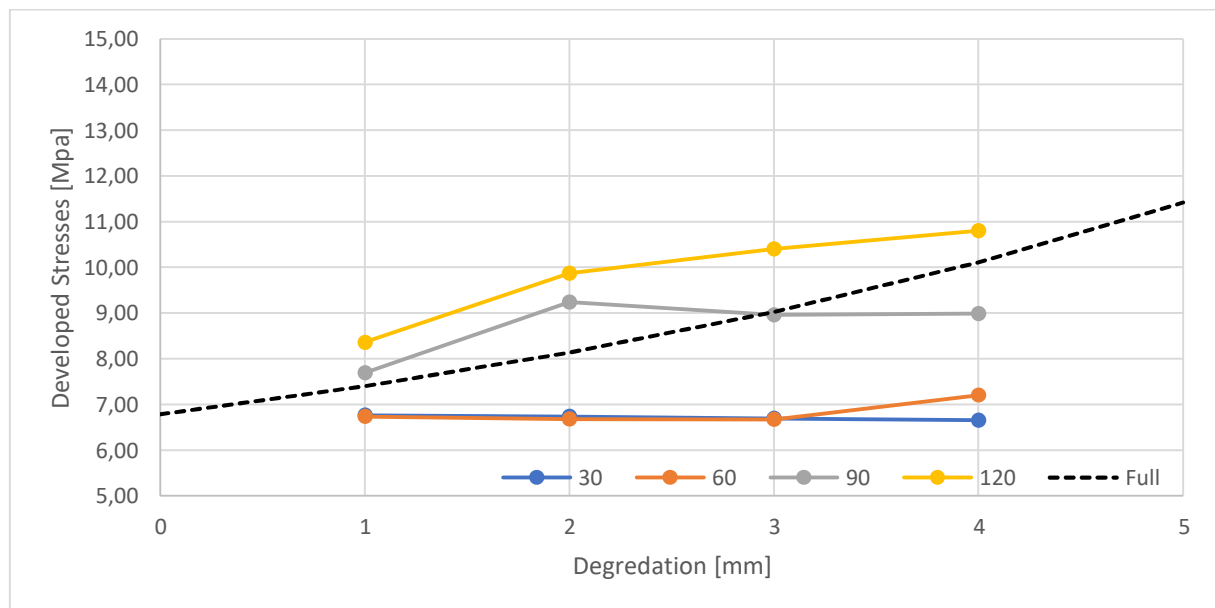


Figuur 11. Plots van de ontwikkelde von-Mises spanning voor het geval van 120°, 4 mm buitenkant uitloging met schuine randen.

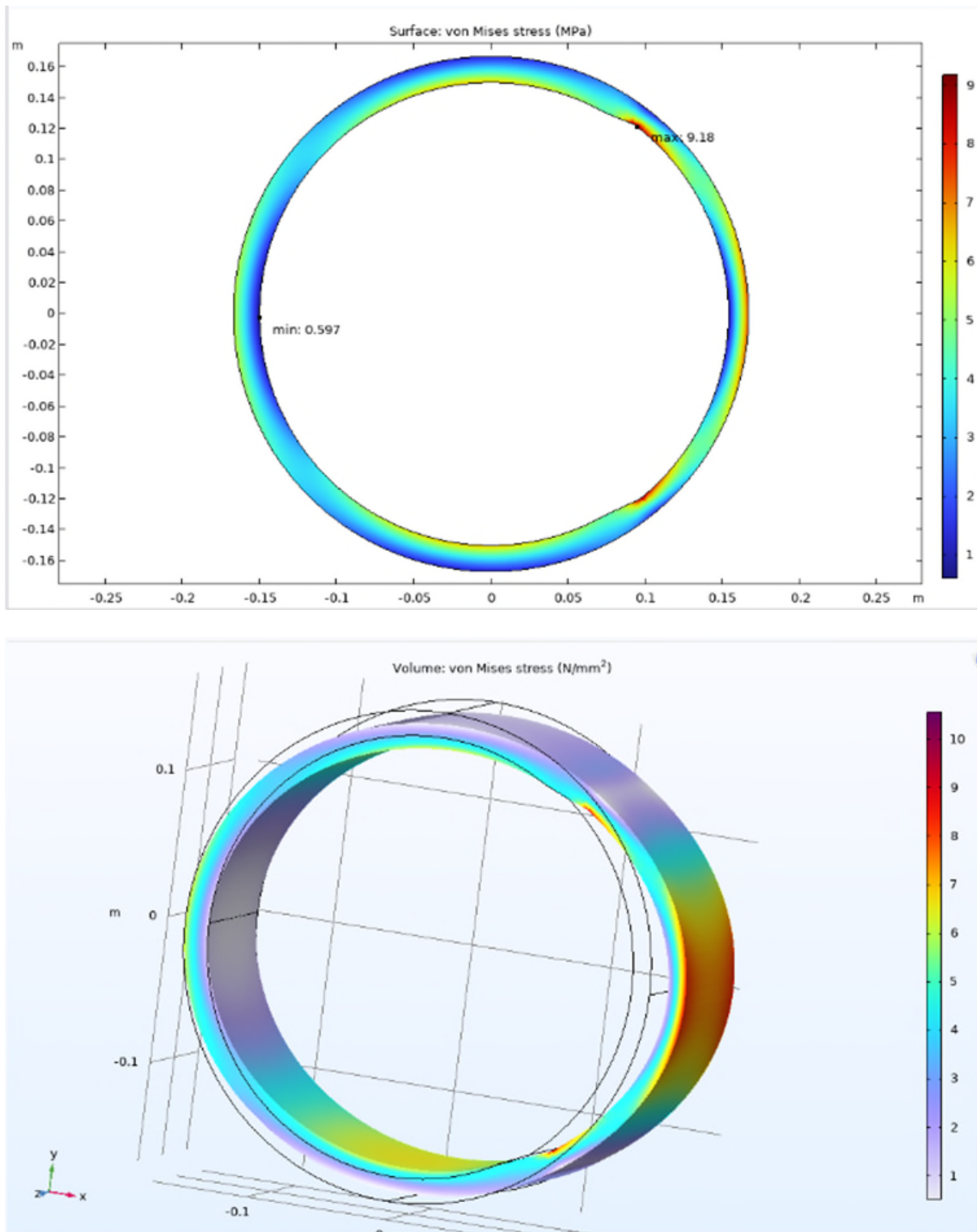
4.2 Uitloging op de zij aan de binnenkant

Het volgende scenario onderzoekt banduitloging die optreedt aan de binnenkant op de zij (90°). Figuur 12 illustreert de resultaten.

Zoals weergegeven in de grafiek, ontwikkelt de uitlogings band van 120° spanningen die hoger zijn dan het volledig uitgeloopte geval. In sommige gevallen zijn de ontwikkelde spanningen 1-2 [Mpa] hoger. Dit is te wijten aan het binnendringen van de uitloging in de bovenste binnenste zone van hoge spanning (zie Figuur 13). De 90° band ontwikkelt spanningen vergelijkbaar met het volledig uitgeloopte geval. De 30° en 60° ontwikkelde spanningen zijn lager dan het volledig uitgeloopte geval.



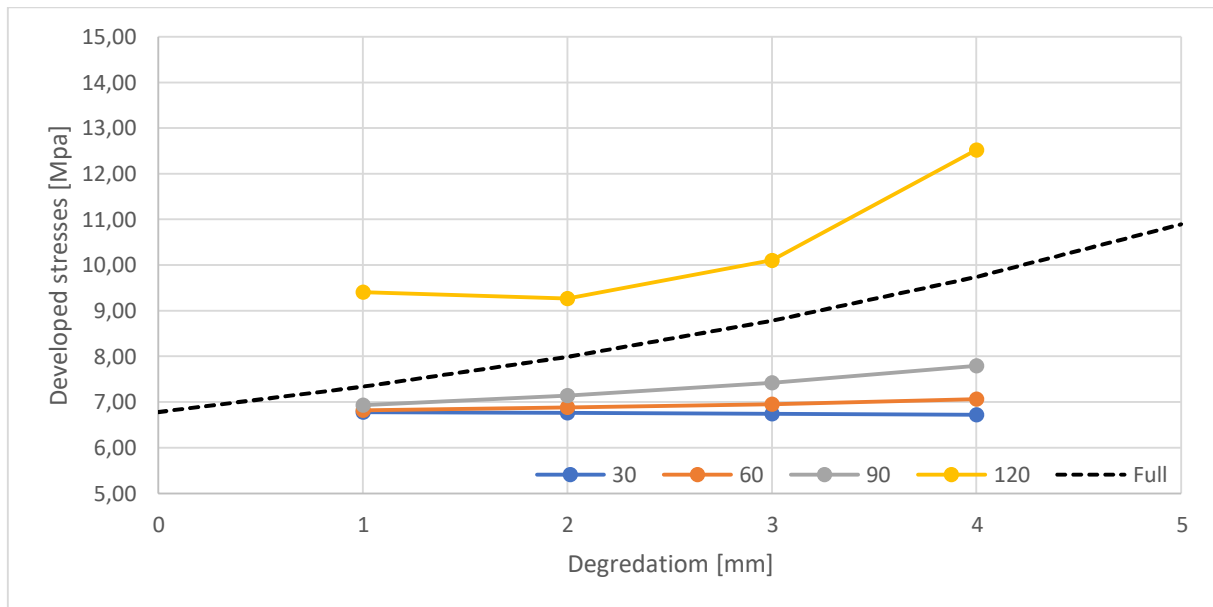
Figuur 12. Ontwikkelde spanningen voor uitloging op de zij aan de binnenkant.



Figuur 13. Plots van de ontwikkelde von-Mises spanning voor het geval van 120°, 4 mm binnenkant uitloging met schuine randen.

4.3 Uitloging op de top aan de buitenkant

De uitloging op de top aan de buitenkant wordt in dit scenario onderzocht. Door de compressie in het buitenste bovendeel van de buis is deze minder gevoelig voor breuk. Daarom wordt verwacht dat de ontwikkelde spanningen in dit gebied minimaal zijn en geen risico vormen voor de structurele integriteit van de buis.

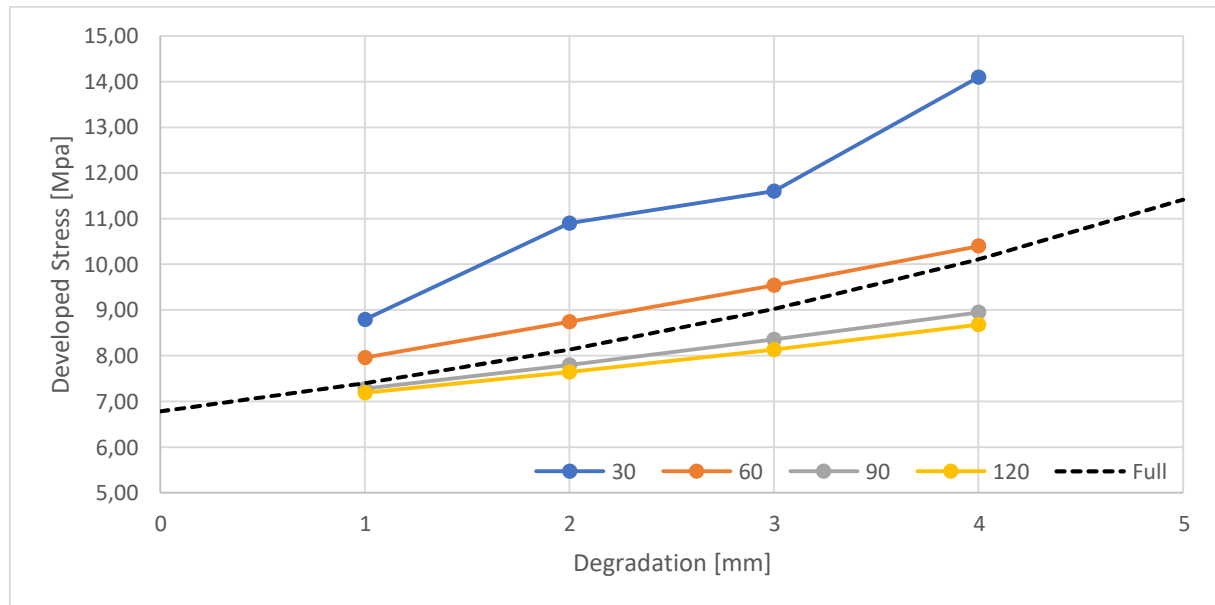


Figuur 14. Spanningen voor uitloging op de top aan de buitenkant

De bevindingen zijn consistent voor de 30°, 60° en 90° gevallen, zoals weergegeven in Figuur 14, waar de ontwikkelde spanningen lager zijn dan die van het volledig uitgeloopte scenario, variërend tussen 6,5-8 [Mpa]. In het geval van het 120° scenario zijn de ontwikkelde spanningen echter hoger dan die van het volledig uitgeloopte geval en hoger dan die van de zijdelingse uitlogingen. Dit kan op een vergelijkbare manier worden verklaard als in de voorgaande gevallen, waarbij de uitloging de hoge-spanningszone aan beide zijden van de buitenkant binnendringt en in combinatie met het al verzwakte buisprofiel de buis meer vervorming en hogere ontwikkelde spanningen ondervindt. Opgemerkt moet worden dat andere bandbreedtes geen grotere bedreiging vormen voor de structurele integriteit van de buizen dan homogene uitloging.

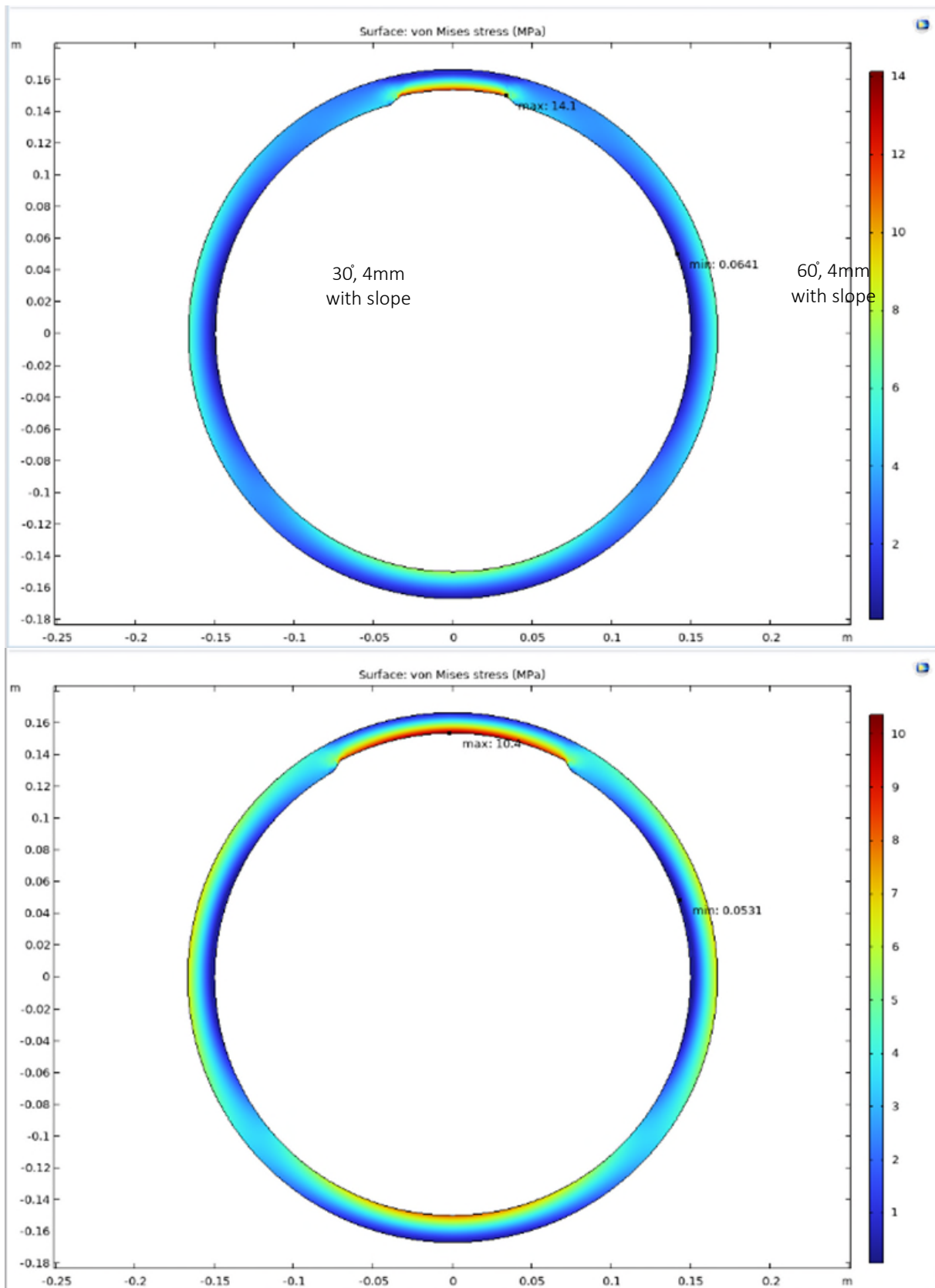
4.4 Uitloging op de top aan de binnenkant

In tegenstelling tot de uitloging aan de buitenkant, zal de uitloging aan de binnenkant naar verwachting een aanzienlijk effect hebben op de spanningen in de buis. Aangezien het bovenste binnenste deel van de buis spanning ondervindt, wordt dit beschouwd als een gevoelige plek met de hoogste spanningen in de hele buissectie. Figuur 15 illustreert de ontwikkelde spanningen voor de verschillende uitlooggevallen voor de bovenste binnenwand.



Figuur 15. Spanningen voor uitloging op de top aan de binnenkant

Figuur 15 toont dat de spanningen in de top aan de binnenkant hoger zijn dan die op de top aan de buitenkant en de andere gevallen. De banden van 30° en 60° ontwikkelen hogere spanningen dan de volledig uitgeloopte lijn en de grotere banden van 90° en 120° ontwikkelen hoge spanningen maar lager dan de volledig uitgeloopte lijn.

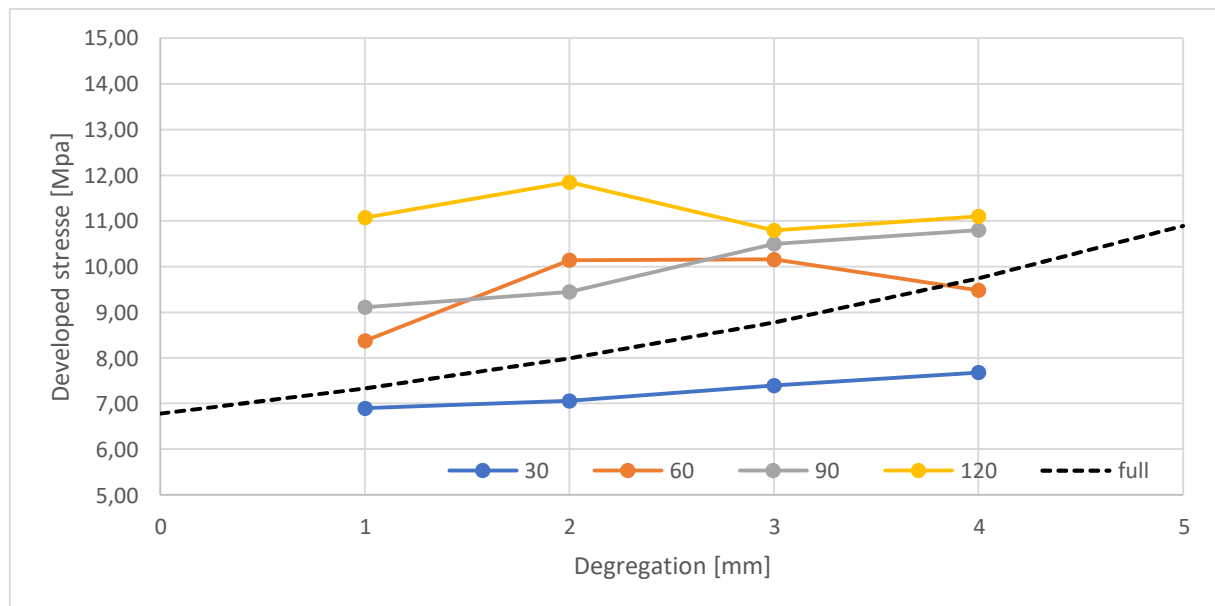


Figuur 16. De ontwikkelde spanningen voor de 30 en 60 graden band met 4 mm uitloging.

Figuur 16 toont de doorsneden van de 30 en 60 graden met elk 4 mm uitloging, waarbij de kleur de ontwikkelde spanningen volgens het von mises model weergeeft. Zoals getoond in Figuur 13 ontwikkelen de spanningen zich plaatselijk en verspreiden ze zich niet over de hele doorsnede, waardoor veel hogere plaatselijke spanningen ontstaan. Het is essentieel om op te merken dat deze spanningen niet worden veroorzaakt door discontinuïteiten in de grid. In het geval van de 30° lijkt de hoogste spanning zich bij de discontinuïteit te bevinden, maar deze is verspreid over het hele uitloging. Dit betekent dat de spanning niet veroorzaakt wordt door de discontinuïteit, maar eerder representatief is voor de huidige situatie.

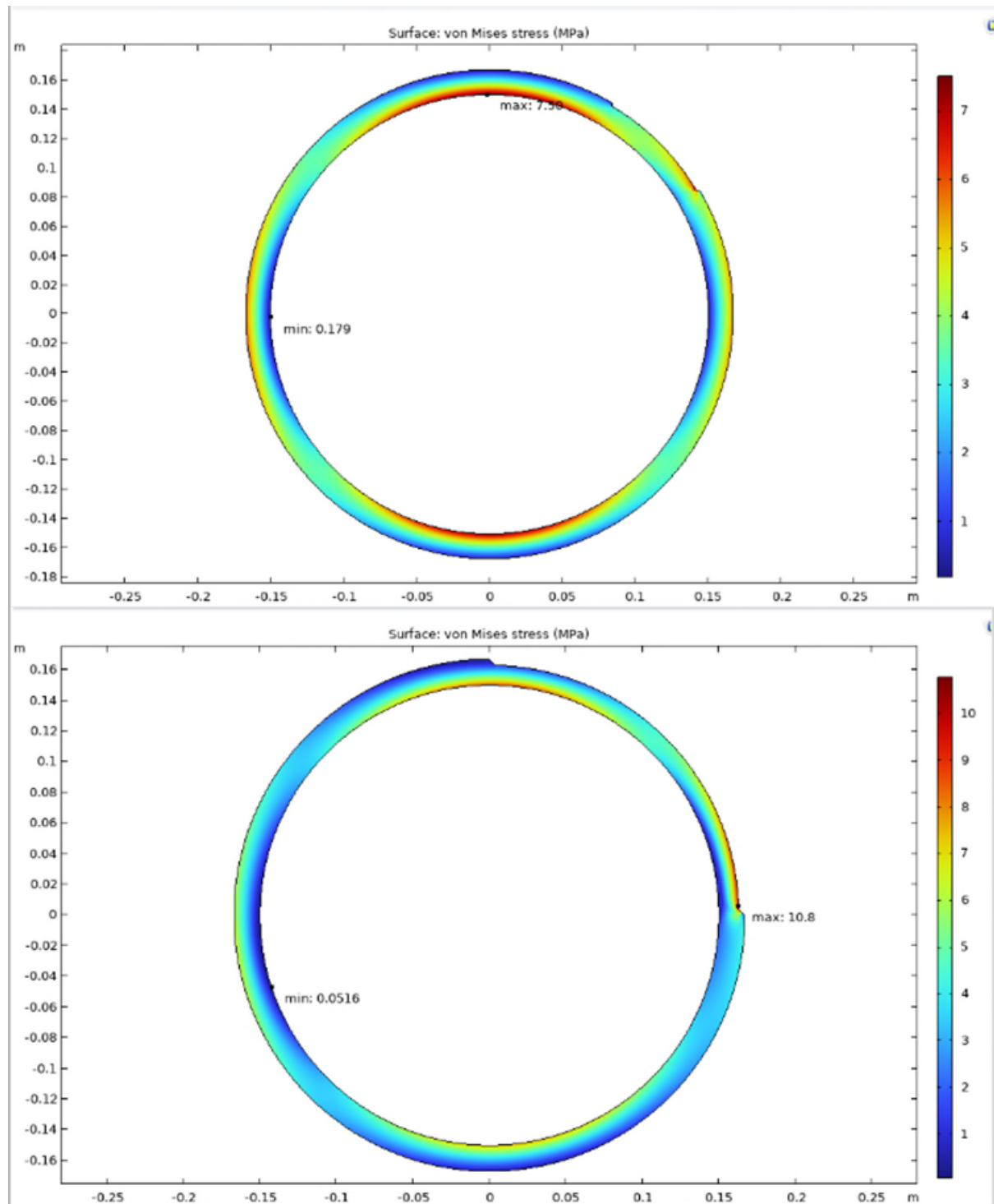
4.5 Uitloging op de diagonaal aan de buitenkant

Op het diagonale deel van de buis zijn er geen duidelijke hoge spanningszones. Als de buis echter breed genoeg wordt uitgelogd, kan deze toch de ontwikkelde spanningen op verschillende niveaus beïnvloeden, afhankelijk van of de uitloging een hoge spanningszone binnendringt.



Figuur 17. Spanning voor uitloging op de diagonaal aan de buitenkant

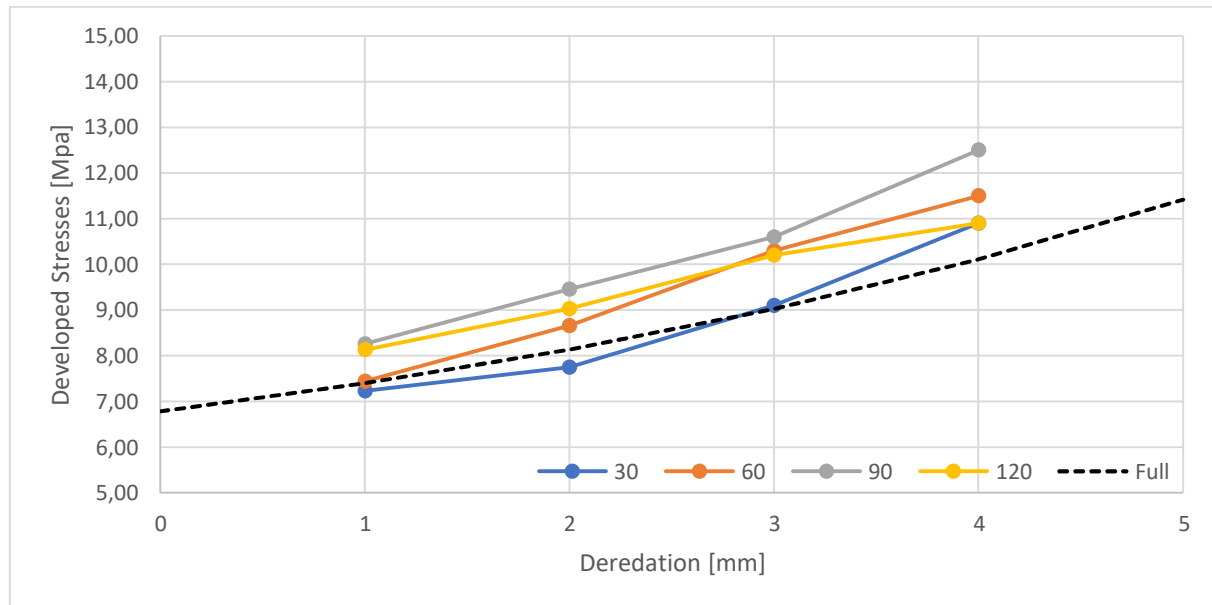
Figuur 17 laat zien dat voor een band van 30° op de diagonaal aan de buitenkant de ontwikkelde spanningen lager zijn dan de homogeen uitgelogde lijn. Figuur 18 geeft aan dat het veilig is om aan te nemen dat de 30° band geen hoge spanningszones binnendringt en dus geen bedreiging vormt. De ontwikkelde spanningen voor bandbreedtes van 60°, 90° en 120° zijn echter hoger dan de homogeen uitgelogde lijn. In sommige gevallen (bijv. 120 graden ,2 mm) zijn de ontwikkelde spanningen 4 [Mpa] hoger dan de homogeen uitgelogde lijn. Met dergelijke effecten moet rekening worden gehouden bij het schatten van de conditie van de buis en de verwachte levensduur.



Figuur 18. De ontwikkelde spanningen voor de 30° en 90° band uitloging

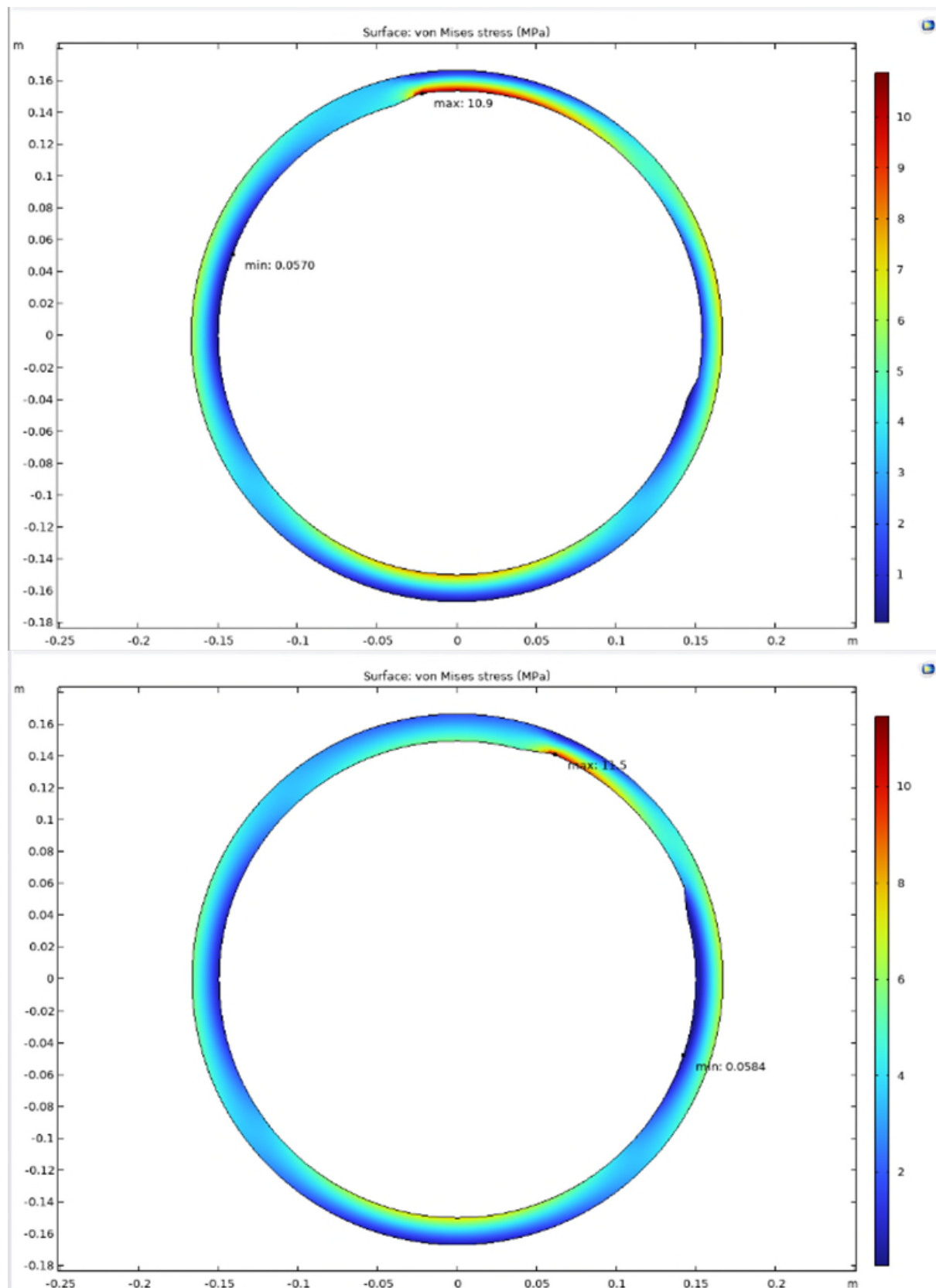
4.6 Uitloging op de diagonaal aan de binnenkant

Net als bij de diagonale uitloging van de buitenkant wordt verwacht dat de uitloging van brede banden aan de binnenkant een aanzienlijke invloed heeft op de ontwikkelde spanningen, afhankelijk van het feit of de uitloging een hoge spanningszone aan de binnenkant op de top binnendringt. Figuur 19 toont de ontwikkelde spanningen voor verschillende uitloogscenario's op de diagonale binnenkant.



Figuur 19. Spanningen voor uitloging op de diagonaal aan de binnenkant

Figuur 19 geeft aan dat de ontwikkelde spanningen hoger zijn en zich relatief dicht bij de homogeen uitgeloopte lijn bevinden. Er werd verwacht dat bredere bandbreedtes tot hogere spanningen zouden leiden, maar dit is niet helemaal het geval. De 90° band genereert hogere spanningen in vergelijking met de 120° band, ondanks dat deze dicht bij elkaar liggen. In tegenstelling tot de diagonale uitloging van de buitenkant genereert de hoek van 30° in dit geval hoge spanningen in de buurt van de homogeen uitgeloopte lijn, wat niet over het hoofd gezien kan worden. Figuur 20 toont de ontwikkelde spanningen in de gevallen van 120 en 60 graden band uitloging.



Figuur 20. De ontwikkelde spanningen voor de 120° en 60° vand uitlogingen.

4.7 Spanningsmodellering

In deze studie is, net zoals in Comsima, gewerkt met de von Mises spanning. Dit is (zoals vermeld in paragraaf 3.3) een manier om de spanningstoestand samen te vatten in een getal. Dit brengt ook beperkingen met zich mee. Het maakt bijvoorbeeld geen onderscheid tussen compressie en tensie, een verschil wat wel degelijk belangrijk is voor het anisotrope materiaal dat asbest cement is. Asbest cement is namelijk gevoeliger voor tensie. Ook het von Mises faalcriterium is minder toepasbaar omdat het bedoelt is voor ductiele materialen wat asbest cement niet is. In deze studie maken we echter geen gebruik van het faalcriterium. We vergelijken enkel de waarde van de von Mises spanning in verschillende situaties met elkaar om te zien welke uitlogingssituatie tot hogere maximale spanningen leidt. Om er zeker van te zijn dat we het goede met elkaar vergelijken hebben we voor de gerapporteerde spanningen gecontroleerd of deze zich bevinden in locaties waar we tensie verwachten. (zie ook Figuur 9) Dit is (zoals ook te zien in enkel figuren in het hoofdstuk hierboven) inderdaad het geval. Als laatste hebben we voor enkele gevallen gecontroleerd hoe de verdeling van de 1st principal stress, een maat voor de maximale tensie spanning, eruit ziet. Deze was in de gecontroleerde gevallen in grote overeenstemming met de hier gerapporteerde von Mises spanningen.

De verschillende maximale spanningen in dit rapport dienen dus met elkaar vergeleken te worden en geven aan welke inhomogene uitlogingstoestanden tot hogere spanningen leiden dan in een homogeen geval. Voor vervolg onderzoek is het echter wel aan te raden (zoals ook opgenomen in de aanbevelingen) om te werken met andere spanningsmodellering en hier te zijner tijd ook Comsima en de KSLB op aan te passen.

5 Consequenties voor meetprotocollen

Wanneer een AC buis onderzocht wordt dan gebeurt dit met scanners welke een discreet meetprotocol hebben. Er wordt dus niet overal gemeten maar met bepaalde intervallen, in de lengterichting en enkele omtrekken. Op basis van de bevindingen in dit rapport kunnen we enkele randvoorwaarden stellen aan de metingen die plaats vinden.

In Tabel 3 en Tabel 4 staat een samenvatting van de grafieken uit het vorige hoofdstuk. Hieraan is het verschil te zien tussen het gedrag van aantasting aan de buiten- en binnenkant en aan de boven- of de zijkant. De vergelijking die hier gemaakt wordt is tussen inhomogene en homogene aantasting. Als voorbeeld nemen we uit Tabel 3 de 30 graden band van 1 mm op de bovenkant (linksboven in de tabel). Hier gaat het dus om een buis die een inhomogene aantasting heeft in de vorm van een band in de lengterichting aan de bovenkant van de buis. De breedte van deze band is 30 graden, de uitloging op zijn diepst is 1 mm en de uitloging is aan de buitenkant van de buis. Dit wordt vergeleken met een buis die homogeen aan de buitenkant is aangetast met 1 mm. In dit geval is de waarde 7 MPa in het groen. Dit betekent dat de maximale spanningen die optreden in de inhomogene aangetaste buis (7 MPa) lager zijn dan in de homogeen aangetaste buis (7,5 MPa). Zoals beschreven zijn de waardes in rood hoger dan homogene aantasting, groen lager dan bij homogene aantasting en zwart is gelijk aan bij homogene aantasting. Om dit in perspectief te zetten. 7 MPa is ~30% van het toelaatbare maximum (uitgaande van een maximum van 23 MPa) en 7,5 MPa ~33% van het toelaatbare maximum. 0,5 MPa is dus geen groot verschil. Er is echter ook een voorbeeld (120 graden uitloging van 3 mm op de diagonaal) waar het verschil 2,5 MPa is (11 i.p.v. 8,5 voor het homogene geval.) Hier gaat het dus om ~48% van het maximum voor de inhomogene uitloging en 37% voor de homogene uitloging. Wanneer uitloging van deze vorm dus wordt gemodelleerd als homogeen dan wordt de restlevensduur overschat. Er zijn dus voor sommige configuraties van de inhomogene uitloging significante verschillen met de homogene referentie uitlogingen. Op basis hiervan kunnen we, voor inhomogene aantasting in de vorm van banden, de volgende conclusies trekken:

- Oriëntatie op de buis van een band is erg belangrijk. Het is dus belangrijk om te weten wat de bovenkant van een buis is.
- De locaties die tot hoge spanning leiden zijn andere aan de binnenkant dan aan de buitenkant. Differentiatie tussen aantasting aan binnen- en buitenkant is dus belangrijk
- De breedte van een band (30 graden – 120 graden) is ook belangrijk (waarbij het gedrag weer afhangt van de oriëntatie). Deze conclusie heeft consequenties voor de resolutie in de omtrekrichting. Deze moet dicht genoeg zijn om te kunnen zien hoe breed een band ongeveer is. Stel de AC buis heeft een diameter van 100 mm. Dat geeft een omtrek van ~314 mm. 30 graden op zo'n omtrek is dan 26 mm. Wanneer we dus een band van 30 graden willen kunnen herkennen, dan moet de resolutie minimaal 26 mm zijn.
- Over de meetdichtheid in de lengterichting kan op basis van deze modellen met banden die homogeen zijn in de lengterichting geen uitsluitel worden gegeven.

Op basis van de modellen die we nu hebben doorgerekend kunnen we concluderen dat voor verzwakking in de vorm van banden omtrekprofielen nuttiger zijn dan lengteprofielen. Dit omdat dit aantasting op elke oriëntatie kan vinden en omdat oriëntatie heel belangrijk is voor het resultaat. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan 3 profielen (uiteinden en midden). Lengteprofielen zijn waarschijnlijk nuttig wanneer de aantasting de vorm van vlekken aanneemt. Om dit verder te specificeren moet eerst meer modellerwerk plaatsvinden.

Tabel 3: samenvatting van de verschillende optredende maximale spanning (in MPa) bij de verschillende combinaties van aantastingsdiepte en locatie. Deze tabel geldt voor aantasting aan de **buitenkant**. Rood betekent hogere spanningen dan in een homogeen aantastingsscenario, groen betekent lagere spanning en zwart geeft aan dat de opgebouwde maximum spanning hetzelfde is als in het homogene geval. De getallen zijn bij benadering (afgerond op een half)

Uitloging/aantasting aan de buitenkant												
	Top (0 °)				Diagonaal (45 °)				Zij (90 °)			
	1mm	2mm	3mm	4mm	1mm	2mm	3mm	4mm	1mm	2mm	3mm	4mm
30 °band	7	7	7	7	7	7	7,5	8	7,5	9	10	12
60 °band	7	7	7	7	8,5	10	10	9,5	7,5	8	8	8,5
90 °band	7	7	7,5	8	9	9,5	10,5	11	7,5	8	8	8,5
120 °band	9,5	9,5	10	12,5	11	12	11	11	7,5	8	8	8,5
360 ° (homogeen)	7,5	8	8,5	9,5	7,5	8	8,5	9,5	7,5	8	8,5	9,5

Tabel 4: samenvatting van de verschillende optredende maximale spanning (in MPa) bij de verschillende combinaties van aantasting diepte en locatie. Deze tabel geldt voor aantasting aan de **binnenkant**. Rood betekent hogere spanning dan in een homogeen aantastingsscenario, groen betekent lagere spanning en zwart geeft aan dat de opgebouwde maximum spanning hetzelfde is als in het homogene geval. De getallen zijn bij benadering (afgerond op een half)

Uitloging/aantasting aan de binnenkant												
	Top (0 °)				Diagonaal (45 °)				Zij (90 °)			
	1mm	2mm	3mm	4mm	1mm	2mm	3mm	4mm	1mm	2mm	3mm	4mm
30 °band	9	11	11,5	14	7	8	9	11	7	7	7	7
60 °band	8	9	9,5	10,5	7,5	8,5	10	11,5	7	7	7	7
90 °band	7	8	8	9	8	9,5	10,5	12,5	8	9	9	9
120 °band	7	8	8	9	8	9	10	11	8,5	10	10,5	11
360 ° (homogeen)	7	8	9	10,5	7	8	9	10,5	7	8	9	10,5

6 Conclusie, Bedrijfsparagraaf en aanbevelingen

Numerieke analysetechnieken werden toegepast om de ingewikkelde relatie tussen inhomogene aantastingspatronen en de algemene conditie en sterkte van AC-buizen te ontcijferen. In deze poging werd licht geworpen op de variaties in verslechtering en werden verbeterde meetprotocollen voorgesteld. Hoewel de specifieke optimalisatie van de prioritering van de vervanging van AC leidingen en de vermindering van voortijdige vervanging niet binnen het bereik van dit onderzoek vielen, draagt het bij aan toekomstige inspanningen om de betrouwbaarheid van waterdistributiesystemen te verbeteren en storingen te voorkomen.

De uitkomsten geven aan dat de oriëntatie van uitloging een cruciale factor is die de conditie van leidingen beïnvloedt. De invloed van anomalieën op de degradatie van leidingen varieert afhankelijk van hun locatie. Het is daarom niet juist om de degradatie van leidingen te evalueren uitgaande van een symmetrische of gelijkmatige verdeling. Vanwege de variërende krachten en vervormingen die de leiding ondergaat, wordt aanbevolen om de positie en oriëntatie van fouten op te nemen in de tabel met conditiegegevens van de leiding. Dit helpt bij het asset management, de beoordeling van de levensduur en het plannen van de vervanging van leidingen. Uit dit onderzoek is gebleken dat afwijkingen in gebieden met hoge spanningszones een grotere invloed hebben en destructiever zijn. De gebieden met de grootste invloed, gerangschikt in afnemende volgorde, omvatten de binnenste boven- en onderkant, de buitenste horizontale zijden en de grote brede banden op de diagonale delen van de buis.

6.1 Aanbevelingen

Inhomogene uitlogingen verschijnen niet alleen als banden, maar ook als puntvormige uitlogingen. Helaas was er binnen dit project onvoldoende tijd om ook deze grondig te onderzoeken. Daarom is verder onderzoek nodig om het effect van uitgeloopte plekken op de structurele stabiliteit te beoordelen. Eigenschappen zoals grootte, diepte, verdeling en superpositie van de vlekken moeten worden onderzocht. Het wordt ook aanbevolen om het effect van een combinatie van soorten uitloging (banden en vlekken) en binnen- en buitenuitloging te onderzoeken. De reden hiervoor is om te onderzoeken of er combinaties zijn die elkaar versterken en daardoor tot hogere spanningen leiden dan hun afzonderlijke delen samen. De banduitlogingen die we nu hebben onderzocht waren homogeen in de lengterichting van de buis. Dit is echter niet het geval voor puntuitlogingen. Wanneer we deze onderzoeken is het ook belangrijk om het effect te onderzoeken van de anisotropie van asbest cement. Uiteindelijk is het ook belangrijk om met de, voor Asbest cement meer toepasselijke, coulomb criterium te werken i.p.v. de von Mises spanning. Dit alles zal helpen om nog beter de werkelijkheid te benaderen en daarmee uiteindelijk de meetstrategieën verder aan te passen om de belangrijkste kenmerken vast te leggen en het zou ook kunnen leiden tot een verdere aanscherping van de KSLB-methode.

6.2 Bedrijfsparagraaf

[Deze paragraaf komt van de hand van projectgroepleden die betrokken waren bij het voorliggende onderzoek. Namens de drinkwaterbedrijven reflecteren zij hier op de volgende vraag: Wat heb je nog nodig om de resultaten van dit onderzoek te implementeren?]

Dit onderzoek helpt de drinkwaterbedrijven in het op waarde schatten van de uitkomsten van conditieonderzoek van AC buizen. Inzichten uit het onderzoek maakt duidelijk dat de locatie en patronen van uitloging in een buis op verschillende wijze impact heeft op de sterkte van de buis. Dit geeft drinkwaterbedrijven meer zicht op een meetprotocol voor conditiemeting die de meeste zeggingskracht geeft over de sterkte van de buis. Uitdagingen daarbij blijven de meetdichtheid en praktische toepassing van een optimaal meetprotocol. Dat zal samen met de conditiemeetbedrijven verder bekeken kunnen worden.

7 Bibliografie

- Beuken, R. (2016). *Exitbeoordelingen AC leidingen bij WML*. Nieuwegein: KWR BTO 2016.094.
- Francois, Y., Dourthe, M., & Jaouen, C. (1987). *Mechanical behaviour of the asbestos-cement container for geological disposal of a level of technological wastes from Cogema reprocessing plants*. Fontenay-aux-Roses: CEA Centre d'Études Nucleaires.
- Milewski, H. (2021). Axial pipeline restraint afforded by rockfill: Experimental data. *The 31st international Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- Poduska, J., Hutar, P., Frank, A., Kucera, J., Sadilek, J., Pinter, G., & Náhlik, L. (2019). Soil load on plastic pipe and its influence on lifetime. *Journal of mechanical Engineering*, 101-106.
- Sheil, B., Martin, C., Byrne, B., Plant, M., Williams, K., & Coyne, D. (2018). Full-scale laboratory testing of a buried pipeline in sand subjected to cyclic axial displacements. *Geotechnique*, 684-698.
- Slaats, P., & Mesman, G. (2004). *Conditiebepaling asbestcement waterleidingen - wanddikte, belastingen*. Nieuwegein: Kiwa BTO 2003.039.
- van Laarhoven, K., & Quintiliani, C. (2020). CT Scans of Asbestos Cement Pipes to Support the Development of Better Condition Assessments. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(11).
- van Steen, J., Holzhaus, P., & Laarhoven, K. (2021). *BTO 2021.028 Kennisopbouw AC met behulp van CT*. KWR Water Research Institute.