

Bedrijfstakonderzoek  
BTO 2023.006 | Juni 2023

# Verbinding verbroken: storingsanalyse en veldonderzoek van gefaalde verbindingen



Bedrijfstakonderzoek

**KWR**

Bridging Science to Practice



# Rapport

## Verbinding verbroken: storingsanalyse en veldonderzoek van gefaalde verbindingen

BTO 2023.006 | Juni 2023

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

### Opdrachtnummer

402045/315

### Projectmanager

I. (Ina) Vertommen MSc

### Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

### Auteur(s)

Dr. Ir. A. (Amitosh) Dash, Dr. ir. J.H.G. (Jan) Vreeburg, M.E. (Mollie) Torello MSc

### Kwaliteitsborger(s)

Dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

### Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

### Keywords

Assetmanagement, Leidingconditie, Storingsanalyse, Faalmechanisme, Exitbeoordeling, Verbinding, Zadel, PVC, AC

#### Jaar van publicatie

2023

#### Meer informatie

Dr. ir. A. (Amitosh) Dash  
T +31 (0)30 60 69 696  
E amitosh.dash@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

Juni 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.

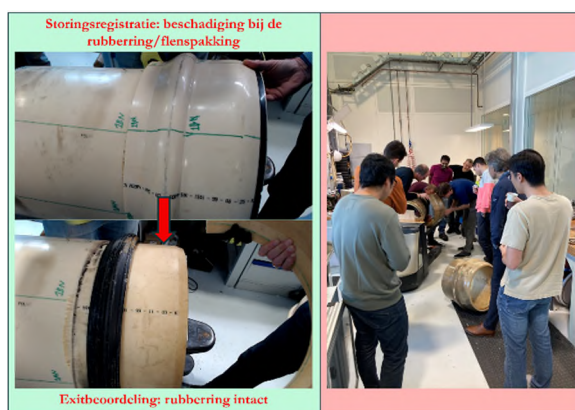
# Managementsamenvatting

## Gebruik exitbeoordelingen om de juiste faalmechanismen van verbindingen te registreren in de storingsregistratie

**Auteurs: Amitosh Dash, Jan Vreeburg, Mollie Torello**

Er zijn inspectietechnieken nodig om de conditie van verbindingen en appendages beter te bewaken. Om geschikte inspectietechnieken te kunnen inventariseren is het nodig te weten welke faalmechanismen (ziekte) en faalwijzen (symptomen, ook wel ‘verschijningsvorm’) er bij verbindingen bestaan. Daarom is aan de hand van storingsgegevens en uitgenomen verbindingen uit het veld onderzoek gedaan naar faalmechanismen.

De storingsregistratie bevat twee typen informatie: data van kwantitatieve, meetbare aard (bijvoorbeeld materiaal, diameter, aanlegjaar) en informatie van kwalitatieve aard die moet worden geduid/ingevuld op basis van domeinkennis (bijvoorbeeld oorzaak of type falen). Door de kwantitatieve storingsgegevens te analyseren bleek dat verbindingen zorgen voor 35% van alle PVC storingen en voor 23% van alle storingen in AC leidingen. PVC verbindingen storen relatief gezien iets vaker dan AC verbindingen storen, (68 tegenover 60 keer per miljoen verbindingen per jaar), maar de onderliggende oorzaken blijken anders dan verondersteld. In geen van de zes gefaalde exemplaren is de geregistreerde, veronderstelde oorzaak voor het falen tijdens het destructief onderzoek waargenomen. Dit is een aanwijzing dat de kwalitatieve aspecten van storingsregistratie makkelijk vervuild kunnen raken. Daardoor zullen conclusies over de kwalitatieve aspecten van storingsregistratie behoedzaam beschouwd moeten worden. Nederlandse drinkwaterbedrijven lopen voorop wat betreft het verzamelen van storingsgegevens en het ordelijke registreren daarvan. Systematische destructief onderzoek na storingen (exitbeoordeling) zou dit krachtige middel verder kunnen versterken door de kwalitatieve aspecten (e.g. oorzaak) explicieter te achterhalen en te beschrijven, zodat deze betrouwbaarder kunnen worden ingeschat en geregistreerd.



*Exitbeoordelingen leggen niet alleen de onvolkomenheden van storingsregistratie bloot maar trekken ook veel nieuwsgierige toeschouwers aan.*

### **Belang: Geschikte inspectiemethodes kiezen na het begrijpen van faalmechanismen verbindingen**

In vervangingsprogramma's van distributieleidingen gaat veel geld om. De conditie van de leiding speelt een belangrijke rol bij de uiteindelijke beslissing om wel of niet

te vervangen. Onderzoek naar de conditie van de leiding is voornamelijk gericht op het bepalen van de kwaliteit van het materiaal. Het leidingsysteem bestaat echter uit meer elementen dan alleen de leidingen. De verbindingen tussen de leidingdelen onderling en tussen de appendages en de

leidingen zijn ook elementen die aanleiding kunnen zijn voor het falen van een leiding. Zij zijn dus ook een factor die telt voor de conditie. De wens bestaat om inspectietechnieken toe te passen om de conditie van de verbindingen te bepalen en zo onderhoudsstrategieën aan te scherpen. Om geschikte inspectietechnieken uit te kiezen, is eerst een beter begrip van faalmechanismen van verbindingen nodig.

#### **Aanpak: Grondige analyse van storingsgegevens en uitgenomen verbindingen/appendages**

Deze studie beschouwt werkelijke incidenten om de faalmechanismen van verbindingen te begrijpen. Twee methodes van aanpak zijn gebruikt: analyse van storingen vanuit de USTORE database en destructieve analyse van acht stukken die door drinkwaterbedrijven aangeleverd zijn. De data-analyse is toegespitst op aspecten zoals storingsfrequentie als functie van materiaal, diameter, leeftijd, type falen of verschijningsvorm, type verbinding, mogelijk oorzaak en seizoen. De exitbeoordelingen bestaan uit zorgvuldige destructieve analyses. Voor het onderzoek zijn negen verbindingen/appendages nader geanalyseerd (acht geanalyseerd in dit rapport, waarbij bij zes lekkages zijn opgetreden). In geen van de zes gefaalde exemplaren is de geregistreerde, veronderstelde oorzaak voor het falen tijdens het destructief onderzoek waargenomen.

#### **Resultaten: PVC verbindingen storen iets vaker dan AC verbindingen**

De storingsanalyses hebben laten zien dat de storingsfrequentie van PVC verbindingen 68 per miljoen verbindingen per jaar is, tegenover 60 per miljoen per jaar voor AC verbindingen. Verbindingen zorgen voor 35% van alle PVC storingen en voor 23% van alle storingen in AC leidingen. Bij AC verbindingen worden de storingen het vaakst toegeschreven aan scheuren en beschadiging van de afdichtring. Voor PVC verbindingen wordt uitschuiven van buizen en scheurvorming het vaakst geregistreerd als oorzaak. Storingen vanwege uitschuiven worden iets vaker in de winter geregistreerd. Storingen door scheurvorming of beschadiging van afdichtingsmateriaal komen vaker voor in de zomer.

Zes gefaalde stukken zijn destructief onderzocht. Vier hiervan zijn 500 mm PVC verbindingen die dichtbij elkaar lagen en snel achter elkaar zijn gaan lekken. Eén van deze had zelfs een opvallend slijtspoor. De in de

storingsregistratie vermelde aard van storing (beschadiging van de rubberring) is in de destructieve analyse niet bevestigd. Voor een korte grijze mof is de lekkage aan grondzakking toegeschreven bij de storingsregistratie, terwijl tijdens de destructieve analyse is waargenomen dat de rubberring scheef zat, waarbij niet is uit te sluiten dat dit al vanaf montage het geval is geweest. Bij een zadel is de storing aan de buis toegeschreven, terwijl destructieve analyse duidelijk liet zien dat een lekkage op het zadel de oorzaak was.

Een belangrijk inzicht vanuit de destructieve analyse is dat in geen van de exemplaren het geregistreerde veronderstelde type falen/verschijningsvorm en/of oorzaak correct zijn vastgesteld. Dit is een aanwijzing dat de kwalitatieve aspecten van storingsregistratie makkelijk vervuld kunnen raken. Daardoor zullen conclusies over de kwalitatieve aspecten van storingsregistratie behoedzaam beschouwd moeten worden.

#### **Toepassing: Voer systematische exitbeoordelingen vaker uit om faalmechanismen beter vast te stellen**

Onderzoek naar een beperkt aantal uitgenomen verbindingen heeft laten zien dat de veronderstelde geregistreerde oorzaak van de storing niet overeenkwam met de uiteindelijk vastgestelde oorzaak. Omdat de “in het veld” vastgestelde faalwijzen en storingsoorzaken geen betrouwbaar beeld geven van de werkelijke omstandigheden bij de onderzochte verbindingen, wordt aanbevolen om in een vervolg een systematisch onderzoek te doen naar gefaalde verbindingen om de werkelijke faalmechanismen en bijbehorende faalwijzen en oorzaken te kunnen vaststellen. Nederlandse drinkwaterbedrijven lopen voorop wat betreft het verzamelen van storingsgegevens en het ordelijke registreren daarvan. Systematische destructief onderzoek na storingen (exitbeoordeling) zou dit krachtige middel verder kunnen versterken door de kwalitatieve aspecten (e.g. oorzaak) explicieter te achterhalen en te beschrijven, zodat deze betrouwbaarder kunnen worden ingeschat en geregistreerd.

#### **Rapport**

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Verbinding verbroken: storingsanalyse en veldonderzoek van gefaalde verbindingen* (BTO-2023.006).

# Inhoud

<b>Managementsamenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>1 Vervanging van distributieleidingen</b>	<b>7</b>
1.1 Inleiding	7
1.2 Functie en conditie van andere elementen dan de buisleiding	7
1.3 Aanpak onderzoek	8
<b>2 Analyse van geregistreerde storingsgegevens in USTORE, gericht op verbindingen</b>	<b>9</b>
2.1 USTORE – korte inleiding	9
2.1.1 Terminologie	9
2.1.2 Gebruikte data	9
2.2 Storingen bij verbindingen per materiaal en type oorzaak	10
2.3 Normaliseren van storingsfrequenties van buis en verbinding voor AC en PVC	11
2.4 Genormaliseerde storingen bij verbindingen per diameterklasse voor AC en PVC	13
2.5 Storingen bij PVC en AC verbindingen per leeftijd	16
<b>3 Onderzoek van uitgenomen verbindingen en appendages</b>	<b>18</b>
3.1 Stukken vanuit Vitens voorzieningsgebied	18
3.1.1 Analyse – Stuk zonder erosie (#1)	20
3.1.2 Analyse – Stuk met erosie	25
3.1.3 Analyse – Stukken zonder erosie (#2 en #3)	29
3.2 Stukken vanuit Evides voorzieningsgebied	34
3.2.1 Gestoorde korte grijze mof	34
3.2.2 Gestoord zadel	34
3.2.3 Gestoord zadel (gepland voor CT scan)	35
3.2.4 Gezonde korte grijze mof	36
3.2.5 Gezond zadel	37
<b>4 Beschouwing resultaten</b>	<b>39</b>
4.1 Analyses van storingen door bedrijven	39
4.2 Beschouwing analyses USTORE en fysieke stukken	39
4.3 Conclusies	40
4.4 Aanbevelingen	41

4.5	Bedrijfsparagraaf	42
4.5.1	De Watergroep	42
4.5.2	Vitens	42
<b>Geciteerde werken</b>		<b>43</b>
I	Analyses uitgevoerd door drinkwaterbedrijven zelf of uitbesteden door drinkwaterbedrijven	44
II	Literatuurstudie	61
III	Overige USTORE analyses	75

# 1 Vervanging van distributieleidingen

## 1.1 Inleiding

In vervangingsprogramma's van distributieleidingen gaat veel geld om. Initiatie van dit soort programma's wordt voor een deel bepaald door de conditie van de leidingen en voor een deel door de externe ontwikkelingen, zoals bijvoorbeeld ingrepen in de omgeving als gevolg van aanpassingen aan of vervanging van andere ondergrondse infrastructuur. Met de komende ontwikkelingen in de stedelijke voorzieningen, denk aan de vervanging en uitbreiding van het elektriciteitsnet, aanpassing van de riolering, aanleg collectieve warmtesystemen en mogelijk het verwijderen van gasleidingen, wordt het belangrijker om een goede inschatting te kunnen maken of de drinkwaterleidingen ook 'mee-gaan'. Daarnaast zal de autonome vervangingsopgave ook vragen om een goede prioritering van vervanging.

De conditie van de leiding speelt een belangrijke rol bij de uiteindelijke beslissing om wel of niet te vervangen. Onderzoek naar de conditie van de leiding is voornamelijk gericht op het bepalen van de kwaliteit van het materiaal. Storingsgegevens, inspectie en observatie van omgevingsfactoren vormen de kern van de conditiebepaling van de leiding. Voorspellen van het verloop van de conditie middels modellen en kennissystemen zijn de bouwstenen voor een lange termijn vervangingsprogramma.

Het leidingsysteem bestaat echter uit meer elementen dan alleen de leidingen. De appendages als afsluiters en brandkranen, afsluiters, verbindingsstukken en aanboringen zijn extra elementen die een onderdeel vormen van het transport- en distributiesysteem. De verbindingen tussen de leidingdelen onderling en tussen de appendages en de leidingen zijn ook elementen die aanleiding kunnen zijn voor het falen van een leiding en daarmee een onderdeel van de conditie vormen.

## 1.2 Functie en conditie van andere elementen dan de buisleiding

Andere elementen dan de buisleiding zijn appendages als afsluiters, brandkranen, verbindingsstukken (T-stukken etc.), aanboringen, en zadels. Deze appendages komen veel voor in de leidingsystemen: naar schatting 650.000 afsluiters [1] en waarschijnlijk net zoveel brandkranen. Nederland kent ruim 7 miljoen aansluitingen [2] voor ruim 7,8 miljoen woningen<sup>1</sup>, waarvan ruim 64% ééngesinswoningen. Nagenoeg alle aansluitingen worden gemaakt door (aanboor)zadels<sup>2</sup>. Al die appendages zijn verbonden met de buisleidingen en deze verbindingen zijn ook onderdeel van de conditie van het leidingnet. In dit onderzoek wordt de functie van de verschillende appendages niet beschouwd, maar alleen het effect dat er is op het al dan niet falen van het leidingsysteem. Voor de conditie van een appendage, zoals bijvoorbeeld een afsluiter, wordt niet gekeken naar het functioneren van de afsluiter (afsluiten), maar naar de rol van het constructief falen van de appendage binnen het falen van het leidingsysteem. Op basis van kennis en ervaring wordt gesteld dat het mechanisch falen van een appendage, zoals bijvoorbeeld het lekken van het afsluiterhuis, zeer weinig voorkomt. Bovendien wordt dit soort falen veelal beschouwd als het functioneel falen van de appendage. De verbindingen waarmee de appendages in het leidingnet zijn opgenomen zijn echter vergelijkbaar met de verbindingen waarmee leidingen aan elkaar zijn verbonden. Het belang van appendages in dit onderzoek is dus de manier waarop ze zijn verbonden met het leidingsysteem. Dit heeft een groot effect op het totaal aantal te

---

<sup>1</sup> Compendium voor de leefomgeving <https://www.clo.nl/indicatoren/nl2166-woningvoorraad-naar-bouwjaar-en-woningtype>

<sup>2</sup> Alleen in gietijzeren leidingen kunnen aanboringen rechtstreeks in het materiaal gemaakt worden (in Nederland). In Vlaanderen wordt ook rechtstreeks aangeboden in alle andere materialen.



beschouwen verbindingen. Voor een appendage zoals een afsluiter of een brandkraan voegt dit twee verbindingen per appendage toe<sup>3</sup>.

### 1.3 Aanpak onderzoek

Dit onderzoek richt zich op de verbindingen. Naast de buisdelen zijn dit de meest storende en meest voorkomende elementen. Ieder appendage is met verbindingen opgenomen in het leidingnet.

De hypothese die ten grondslag ligt aan dit onderzoek is dat er een faalmechanisme is dat specifiek is voor de verbindingen. Als deze hypothese bevestigd kan worden, kan worden bepaald of dit faalmechanisme tijdsduur afhankelijk is, of afhankelijk is van andere beschrijvende parameters. Deze kennis kan worden gebruikt om een onderhoudsstrategie te bepalen voor dit aspect van leidingnetten.

Er is een korte literatuurstudie verricht die in een bijlage is opgenomen. De studie is in het Engels geschreven, omdat deze is uitgevoerd door een Engelstalige onderzoeker en zich heeft beperkt tot internationaal beschikbare literatuur. Daarnaast zijn er drie specifiek gerapporteerde onderzoeken gevonden die ook besproken worden in Bijlage II. Twee interessante rapporten (een Amerikaanse inventariserende studie en een historisch onderzoek naar de conditie van natuurrubber ringen in verbindingen) zijn nader beschouwd.

Vervolgens is de storingsdatabase USTORE gebruikt om storingsgegevens te analyseren. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Hoofdstuk 2. Overige analyses zijn in Bijlage III te vinden. Zes uitgenomen verbindingen, ieder praktijkgevallen van storingen, zijn nader geanalyseerd middels destructief onderzoek. De resultaten daarvan zijn in Hoofdstuk 0 opgenomen. Daarnaast zijn een aantal analyses van storingen aangeleverd die zijn opgenomen in de bijlagen; de resultaten daarvan zijn kort beschreven in het laatste Hoofdstuk 4.

In dat laatste Hoofdstuk 4 is een beschouwing gegeven op alle resultaten en hoe die toegepast kunnen worden in het bepalen van een onderhoudsstrategie<sup>4</sup> van verbindingen. Tevens is aangegeven welke stappen nog gezet kunnen worden om de keuze van een onderhoudsstrategie verder te onderbouwen c.q. de randvoorwaarden voor een andere strategie te bepalen.

---

<sup>3</sup> Het opnemen van een ondergrondse brandkraan in het leidingnet kan in theorie tot een stuk meer verbindingen leiden dan slechts 2. In het leidingnet van De Watergroep zit een brandkraan zelfde rechtstreeks op de distributieleiding: er is sprake van een T-stuk, een afsluiter, een voetbocht, (...) In totaal gemakkelijk 6 of 7 extra verbindingen, alles in beschouwing genomen.

<sup>4</sup> Een onderhoudsstrategie kan storingsafhankelijk, tijdsafhankelijk c.q. gebruiksduurafhankelijk of conditieafhankelijk zijn.

Storingsafhankelijke onderhoud is mogelijk als 1) de gevolgen van een storing gering zijn, óf 2) de storing min of meer willekeurig optreedt, óf 3) er geen duidelijk meetbaar of voorspelbaar degradatieproces is óf 4) het meten van de conditie (veel) te duur is ten opzichte van de schade die de storing veroorzaakt.

Tijdsafhankelijk c.q. gebruiksduurafhankelijk onderhoud is mogelijk als 1) er een duidelijk tijdsafhankelijk degradatieproces is én 2) het onderhouden goedkoper is dan vervangen.

Conditieafhankelijk onderhoud is mogelijk als 1) er een duidelijk degradatieproces is én 2) er een parameter is die dat proces beschrijft (anders dan alleen tijd) én 3) deze parameter tegen – in relatie tot de gevolgen van storingsafhankelijk onderhoud – redelijke kosten meetbaar of voorspelbaar is.

## 2 Analyse van geregistreeerde storingsgegevens in USTORE, gericht op verbindingen

### 2.1 USTORE – korte inleiding

USTORE oftewel Uniforme STOringsREgistratie is een database waarin informatie over de drinkwaterleidingen (bijvoorbeeld materiaal, aanlegjaar, diameter, kilometers etc.) en gemelde storingen (datum, materiaal, aanlegjaar, diameter, storend object, verschijningsvorm, oorzaak, omgevingsfactoren etc.) door drinkwaterbedrijven met elkaar worden gedeeld.

Informatie wordt door acht drinkwaterbedrijven ingebracht. USTORE biedt een manier om het faalgedrag van groepen van vergelijkbare leidingen (cohorten) te analyseren. Hiermee kan saneringsbeleid voor korte/lange termijn onderbouwd worden.

#### 2.1.1 Terminologie

Een uitgebreide uitleg van de terminologie die binnen USTORE gebruikt wordt, is in PCD-9 [3] beschikbaar. Hieronder worden de belangrijkste termen voor het huidige project kort samenvat:

- **Materiaal:** Er zijn kunststoffen zoals polyvinylchloride (PVC), verstrekt PVC (PVCV), en polyetheen (PE, PE100, PE80, PE\_AND). Daarnaast zijn er overige materialen zoals grijs gietijzer (GG), nodulair gietijzer (NG), asbest cement (AC), staal (ST), beton (BET). Soms wordt materiaal als onbekend (ONB) of anders (AND) gemeld.
- **Diameter:** Bij kunststoffen wordt de uitwendige diameter gemeld en voor overige materialen wordt de inwendige diameter gemeld.
- **Storend object:** Een storing kan op de buis, de verbinding of op een hulpstuk plaatsvinden.
- **Type verbinding:** Er zijn zeven typen verbindingen – trekvastе steekverbindingen, niet-trekvastе steekverbindingen, klemverbindingen, flensverbindingen, lasverbindingen, loodmof, PVC-lijmverbindingen
- **Verschijningsvorm:** ook wel 'faalwijze'. Hiermee wordt de aard van de storing bedoeld. De volgende verschijningsvormen kunnen aan verbindingen toegeschreven worden – uit elkaar geschoven, afdichtingsmateriaal beschadigd, verbinding gescheurd, bouten beschadigd, lasverbinding beschadigd.
- **Oorzaak:** Er worden drie soorten geïdentificeerd – interne factoren (eigen bedrijfsvoering), externe factoren (door derden), spontaan (niet aanwijsbaar intern of extern). Onder interne factoren kan onderscheid gemaakt worden tussen aanleg of montagefouten, schade door monteur of gecontracteerde aannemers of schade door beheer pompen (zoals drukstoten). Onder spontane factoren kan onderscheid gemaakt worden tussen aantasting (corrosie of uitloging) en uitwendige belasting (verkeer, zetting, wortel ingroei, storm etc.).
- **Omgevingsfactoren:** Factoren over de omgeving van de storing zoals aanwezigheid van bomen, gronddekking, verkeersdrempel, drempelafstand.

#### 2.1.2 Gebruikte data

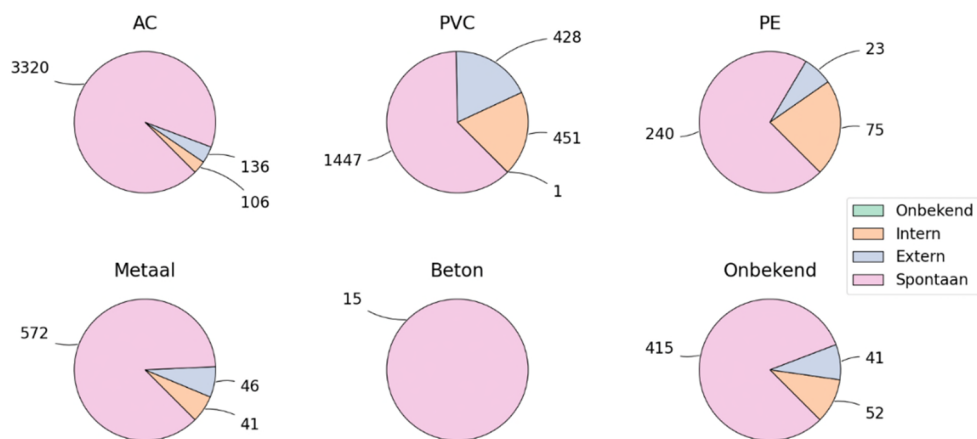
Alle storingen in de database van 2009 tot en met 2021 (en beschikbaar om te downloaden in Juli 2022) zijn meegenomen in de analyse. De ruwe data is gebruikt; er is geen filtering op bijvoorbeeld schijnbaar onmogelijke, onwaarschijnlijke of onlogische combinaties toegepast, tenzij het gemeld wordt. Bij wijze van een eerste ruwe analyse is het totaal aantal op het jaar 2015 gebaseerd. Dit betreft een vereenvoudiging die geen recht doet aan het effect van sanering en nieuw aanleg op de totale leidinglengte. Bijvoorbeeld, in het jaar 2009 was er meer kilometers van AC dan in 2021. Daar waar dit mogelijk hinderlijk is, wordt dit toegelicht.

## 2.2 Storingen bij verbindingen per materiaal en type oorzaak

Voor deze analyse is per materiaal bekeken hoeveel storingen er te vinden waren per type object (verbinding, buis, hulpstuk, reparatiestuk, onbekend). Per materiaal is onderscheid gemaakt in de oorzaak (onbekend, intern, extern, spontaan).

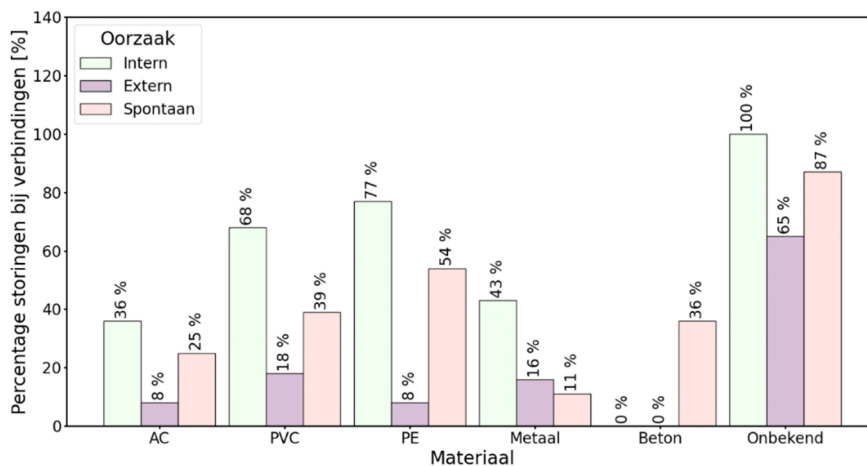
In Figuur 1 wordt per materiaal getoond hoe verschillende oorzaken bijdragen bij aan het falen van verbindingen. Bijvoorbeeld, voor asbest cement AC, zijn er 3320 storingen als spontaan gemarkeerd, 106 door interne oorzaken, 136 door externe oorzaken.

Wat duidelijk is in deze figuur is dat spontane storingen domineren als oorzaak voor bijna alle materialen behalve kunststoffen zoals PVC en PE waar andere type oorzaken ook een rol spelen. Eén hypothese is dat dit komt doordat kunststoffen relatief nieuwer zijn waardoor aanlegfouten vaker optreden. Aanlegfouten worden bij USTORE als interne oorzaak beschouwd.



*Figuur 1: Classificatie van oorzaak storingen per materiaal voor verbindingen. Leeswijzer: Voor storingen bij het materiaal "X" (taart) meet oorzaak "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt/cijfer) gemeld. Elke cirkel diagram is voor een materiaal en de kleuren vertegenwoordigen de oorzaak. Cijfers zijn het aantal geregistreerde storingen per oorzaak (AC = Asbest Cement, PVC = Polyvinyl Chloride (alle types), PE = Poly Ethyleen (alle types), Metalen = Grijs gietijzer, nodulair gietijzer, en staal).*

Vervolgens is er gekeken naar het percentage van de storingen die aan de verbinding gerelateerd zijn ten opzichte van het totale aantal storingen. Er is onderscheid gemaakt naar materiaal en oorzaak. Dit wordt in Figuur 2 getoond. Bijvoorbeeld, voor alle spontane storingen voor het materiaal asbest cement heeft 25% te maken met de verbinding; de overige 75% met de buis, hulpstukken etc. Voor alle storingen toegeschreven aan externe en interne oorzaken worden 8% en 36% bij de verbinding geïdentificeerd.



Figuur 2: Percentage storings bij verbinding ten opzichte van alle storings per type oorzaak. Leeswijzer: Van alle storings bij het materiaal "X" (groep van staffen) met oorzaak "Y" (kleur), "Z %" zijn wegens verbindingen (hoogte van staf).

De volgende waarnemingen kunnen in Figuur 2 gemaakt worden:

- Als het materiaal onbekend is, dan worden nagenoeg alle storings toegeschreven aan verbindingen.
- Het percentage spontane storings toegeschreven aan verbindingen is aanzienlijk hoger bij kunststoffen (39-54%) vergeleken met materialen asbest cement en metalen (8-36%).
- Voor externe oorzaken is een minderheid van de storings bij verbindingen.

### 2.3 Normaliseren van storingsfrequenties van buis en verbinding voor AC en PVC<sup>5</sup>

Twee van de meest voorkomende materialen in het leidingnet zijn AC en PVC. Het type verbinding in deze materialen is gelijksoortig, maar het aantal verbindingen per meter is verschillend. Om een onderscheid te kunnen maken, is een analyse gemaakt met storings genormaliseerd op zowel lengte als aantal. Voor buizen wordt genormaliseerd naar "aantal storings per kilometer leiding per jaar". Bij verbindingen wordt genormaliseerd naar "aantal storings per aantal verbindingen per jaar". Hieronder zijn de uitgangspunten toegelicht:

- Het aantal kilometer leidingen is geregistreerd in de Geografische Leiding Informatie Systeem database. Het totaal aantal storings is in de storings database geregistreerd.
- De registratie van elk jaar (leiding informatie) of kwartaal (storings) in de database is niet compleet, zoals aangegeven in Tabel 1.
- De storings van bepaalde bedrijven van bepaalde jaren zijn gebruikt voor de analyse (Zie Tabel 1).
- Alle storings zijn samen geanalyseerd en niet uitgesplitst op interne, externe of spontane oorzaak. Er is dus voornamelijk naar kwantitatieve informatie gekeken
- Voor het aantal kilometers leiding per materiaal of diameterklasse, wordt er als benadering gebruik gemaakt van het aantal kilometers in 2015. Het gevolg van deze vereenvoudiging is dat het effect van saneren en aanleggen van nieuwe leidingen niet expliciet in de analyse meegenomen wordt. Het effect hiervan wordt nader beschouwd bij de belangrijkste conclusies
- Er is geen correctie uitgevoerd voor ontbrekende storingsregistratie. Bijvoorbeeld, in 2013, hebben zeven van de acht bedrijven die storings registreren in USTORE. Echter, tijdens de normalisatie van storings van 2013, zijn toch de leidinglengtes van alle acht bedrijven in acht genomen. Dit kan de resultaten enigszins vertekenen.
- Het effect van de drie vereenvoudigingen die hierboven genoemd, zal nader beschouwd worden.

<sup>5</sup> De analyse hierin is verkennend in aard en omvat een paar versimpelingen. De cijfers geproduceerde in deze analyse zou dus als een eerst orde schatting gezien worden.

- Om het aantal verbindingen te schatten is er aan een aantal bedrijven informatie over gemiddelde buislengtes gevraagd:
  - Vitens: AC en gietijzeren leidingen zijn 4 en 5 meter. PVC heeft een standaard lengte van 10 meter maar in de begin jaren was dat 6 meter.
  - De Watergroep: AC leidingen hebben een lengte van 4 of 5 meter. PVC leidingen hebben een lengte van of 12 meter of 6 meter maar wordt gedomineerd door 12 meter.
  - Evides: PVC leidingen hebben een typisch lengte van 10 meter.
- Het aantal verbindingen is geschat met een gemiddelde buislengte van 4 meter voor AC en 10 meter voor PVC.

Tabel 1: Jaren/kwartalen waarin informatie op USTORE gebruikt werd per bedrijf vanaf 2009 t/m 2021 (data gedownload in Juli 2022).

Bedrijf	Storingen	Leiding informatie
Brabant Water	[Q1, 2009 – Q4, 2019]	[2010 - 2018]; [2020 - 2021]
Dunea	[Q1, 2009 – Q2, 2020]	[2009 - 2016]
Evides		
Oasen	[Q2, 2014 – Q4, 2020]	[2014 - 2017]
PWN	[Q1, 2009 – Q4, 2016]; [Q1, 2021 – Q4, 2021]	[2009 - 2017]; [2020 - 2021]
Vitens		
Waternet	[Q1, 2010 – Q4, 2014]	[2010 - 2016]
Waterbedrijf Groningen	[Q1, 2009 – Q4, 2021]	[2010 - 2015]; [2017]; [2020 - 2021]
Watermaatschappij Drenthe	[Q1, 2009 – Q4, 2020]	[2009 - 2018]; [2020 - 2021]
Watermaatschappij Limburg	[Q1, 2009 – Q4, 2021]	[2009 - 2017]

Tabel 2: (Geschatte genormaliseerde) Storingen voor AC en PVC zoals geregistreerde op USTORE. De cijfers tussen de hakjes zijn de relatief bijdrage van de buis of de verbinding voor alle storingen bij buisstukken en verbindingen (hulpstukken zijn genegeerd).

Materiaal	Buis	Verbinding
<b>Aantal storingen</b>		
AC	11744 (77%)	3562 (23%)
PVC	4375 (65%)	2327 (35%)
<b>Aantal kilometer leidingen en geschatte aantal verbindingen</b>		
AC	18189	4547154
PVC	26322	2632181
<b>Genormaliseerde storingen per buis (aantal storingen per kilometer leiding per jaar) en verbinding (aantal storingen per miljoen verbindingen per jaar)</b>		
AC	0.0497	60.26
PVC	0.0128	68.00

In Tabel 2 zijn de genormaliseerde storingen op buis en verbinding weergegeven voor AC en PVC. Deze twee materialen zijn dominant in het leidingbestand en zijn verschillend van aard en verouderingsproces. De volgende waarnemingen kunnen gemaakt worden:

- Het aantal kilometer leidingen van AC is driekwart van PVC. Er zijn bijna twee keer zo veel verbindingen per km leiding bij AC leidingen dan bij PVC door het verschil in buislengte.
- Na normaliseren blijkt het aantal storingen op de buis per kilometer leiding per jaar vier keer zo hoog is voor AC vergeleken met PVC.
- Na normaliseren is het aantal storingen op de verbinding per miljoen verbindingen per jaar bijna gelijk voor zowel PVC en AC.

Uit de waarnemingen volgt dat de verbindingen in AC en PVC zich voor wat betreft het totaal aantal storingen ongeveer gelijk gedragen (60 tegen 68 storingen per miljoen verbindingen per jaar). In PVC leidingen zitten echter minder verbindingen én is de faalkans van het buismateriaal lager (0.01 tegen 0.05 storingen per kilometer per jaar). Hierdoor is het aandeel van de verbindingen binnen het totaal aantal storingen in PVC groter dan dat in AC. Eén hypothetische verklaring voor het feit dat de verbindingen van de verschillende materialen zich meer vergelijkbaar gedragen dan de buisdelen van de verschillende materialen is dat het falen van de buizen veelal gerelateerd is aan de mechanische eigenschappen van het materiaal (scheuren), terwijl het falen van de verbindingen met factoren te maken heeft die niet zozeer van het buismateriaal afhangen (uitschuiven, afdichtproblemen).

Het effect van de vereenvoudigingen in de analyse is tweërlei: Het aandeel AC in het totale leidingbestand neemt af, terwijl het aandeel PVC iets meer dan evenredig zal toenemen. Dan nemen we aan dat de sanering van AC leidingen door PVC zal gebeuren en dat nieuwe leidingen in PVC worden uitgevoerd. Het effect zal zijn dat het verschil tussen de storingsfrequentie van de leidingen zal toenemen en dus meer geprononceerd zal worden. De storingsfrequentie van AC zal toenemen door de afnemende lengte, terwijl dat van PVC zal afnemen door toenemende lengte.

Kwantitatief zal hetzelfde gebeuren bij de storingen op de verbindingen, maar het effect hier zal zijn dat het verschil in de storingsfrequenties AC en PVC zal afnemen en dus nog dichter bij elkaar komen te liggen. Dit zal de waarneming versterken dat het materiaal significant verschillende storingsfrequenties heeft, maar de verbindingen nagenoeg gelijke storingsfrequenties hebben.

## 2.4 Genormaliseerde storingen bij verbindingen per diameterklasse voor AC en PVC

De resultaten uit Sectie 2.3 werden verder uitgediept door de analyse uit te splitsen op diameterklassen. De resultaten hiervan worden in Tabel 3 en Tabel 4 getoond.

Voor PVC zijn de belangrijkste punten als volgt:

- PVC leidingen falen met 12,8 storingen per duizend kilometer leidingen per jaar en PVC verbindingen storen met 68,0 storingen per miljoen verbindingen per jaar.
- De diameterklasse 92-111 mm heeft verreweg het meeste kilometers leidingen en dus aantal verbindingen (bijna 40% van de totaal PVC voorraad). De buizen in deze klasse hebben 10 storingen per duizend kilometer per jaar. De verbindingen in deze klasse hebben 63 storingen per miljoen verbindingen per jaar.
- De diameterklasse van 34-41 mm, 42-51 mm, 52-64 mm, 130-162 mm, 163-203 mm bepalen ongeveer 45% van het totale PVC bestand. Het aantal storingen in de buis per duizend kilometer per jaar is 20 voor de klasse 42-51 mm en 17,3 voor de klasse 163-203 mm. Dit is lager dan voor de andere klassen. Het aantal storingen in de verbinding per miljoen verbindingen is ongeveer 88 voor de klassen 42-51 mm en 52-64 mm. Dat is hoger dan voor de andere klassen. Vanuit deze klassen moet de klasse 42-51 mm veel aandacht krijgen voor zowel buis als verbinding, terwijl de klasse 52-64 mm presteert minder goed voor de verbinding.
- Vanuit de resterende klassen hebben de klassen 77-91 mm en 112-129 mm 28 storingen per duizend kilometer per jaar (twee keer hoger dan gemiddeld). De klassen 65-76 mm en 77-91 mm hebben 79 respectievelijk 122 storingen per miljoen verbindingen per jaar.

In Figuur 3 wordt een grafische weergave van Tabel 3 gegeven. De grootte van de markers daarin vertegenwoordigt het aantal kilometers voor de bijbehorende diameterklasse.

Voor AC zijn de belangrijkste punten als volgt:

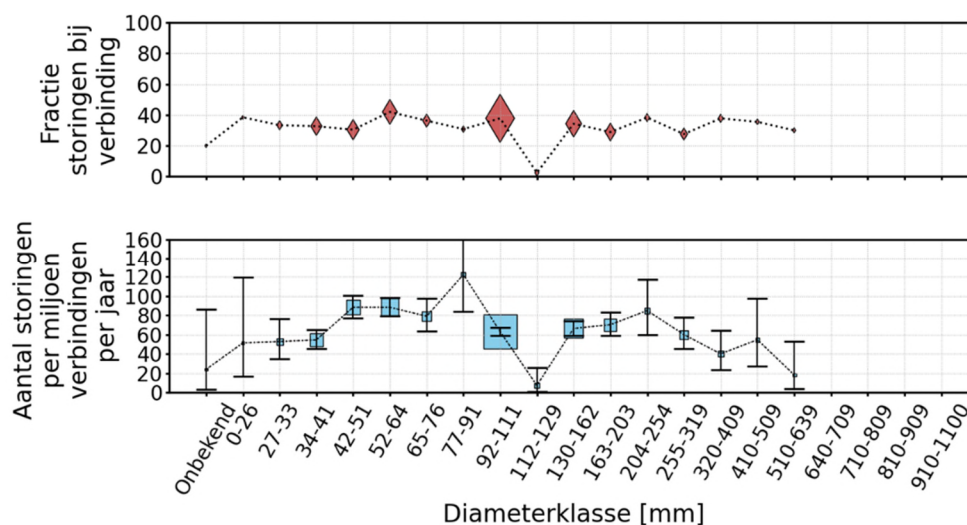
- AC leidingen falen gemiddeld met 49,7 storingen per duizend kilometer leidingen en AC verbindingen storen met 60,2 storingen per miljoen verbindingen.

- De diameterklasse 90-114 mm heeft verreweg het meeste kilometers leidingen en dus aantal verbindingen (meer dan 50% van het totale AC bestand). De buizen in deze klasse hebben 54 storingsen per duizend kilometer per jaar. De verbindingen in deze klasse hebben 43 storingsen per miljoen verbindingen per jaar.
- De diameterklasse van 115-139 mm, 140-164 mm, 190-214 mm, 290-324 mm vertegenwoordigen ongeveer een derde van het totale AC bestand. Het aantal storingsen bij de buis per duizend kilometer per jaar is 108 voor de klasse 115-139 mm. Het is veel lager voor de andere klassen. Het aantal storingsen bij de verbinding per miljoen verbindingen is ongeveer 105 voor de klasse 115-139 mm, 92 voor de klasse 190-214 mm, 81 voor 140-164 mm.
- Vanuit de resterende klassen hebben de klassen 215-239 mm en 165-189 mm relatief hoge waarden voor buizen met 142 en 75 storingsen per duizend kilometer per jaar respectievelijk. De klassen 215-239 mm en 165-189 mm hebben 403 respectievelijk 131 storingsen per miljoen verbindingen per jaar.

In Figuur 4 is de prestatie van AC verbindingen samenvat. De grootte van de markers daarin vertegenwoordigt het aantal kilometers voor de bijbehorende diameterklasse. Deze figuur toont eigenlijk dezelfde informatie als Tabel 4.

Tabel 3: Genormaliseerde storingsen per diameterklasse voor PVC. Per kolom worden de drie grootste waarden in vet gezet.

Diameterklasse	Buis			Verbinding		
	Aantal storingsen	Kilometer leidingen	Storingsen per kilometer per jaar	Aantal storingsen	Aantal verbindingen	Storingsen per miljoen verbindingen per jaar
Onbekend	8	64.6227509	0.0095	2	6462	23.81
0 – 26 mm	8	74.9485945	0.0082	5	7495	51.32
27 – 33 mm	56	408.164259	0.0106	28	40816	52.77
34 – 41 mm	243	1667.139821	0.0112	118	166695	54.45
42 – 51 mm	<b>531</b>	2019.883224	<b>0.0202</b>	232	201980	<b>88.35</b>
52 – 64 mm	473	<b>2978.767596</b>	0.0122	<b>342</b>	<b>297839</b>	<b>88.31</b>
65 – 76 mm	151	836.887647	0.0139	86	83689	79.05
77 – 91 mm	72	201.2646263	<b>0.0276</b>	32	18928	<b>122.30</b>
92 – 111 mm	<b>1517</b>	<b>11247.40874</b>	0.0104	<b>922</b>	<b>1030260</b>	63.06
112 – 129 mm	80	215.230659	<b>0.0286</b>	2	21523	7.15
130 – 162 mm	<b>567</b>	<b>3432.094841</b>	0.0127	<b>296</b>	<b>318635</b>	66.34
163 – 203 mm	342	1521.566066	0.0173	139	142376	70.27
204 – 254 mm	58	326.1642446	0.0137	36	30375	84.90
255 – 319 mm	147	717.8870707	0.0158	56	69598	60.01
320 – 409 mm	28	327.504765	0.0066	17	32750	39.93
410 – 509 mm	20	154.898934	0.0099	11	15490	54.63
510 – 639 mm	7	127.372677	0.0042	3	12737	18.12
640 – 709 mm	0	0	0	0	0	0
710 – 809 mm	0	0	0	0	0	0
810 – 909 mm	0	0	0	0	0	0
910 – 1100 mm	0	0	0	0	0	0

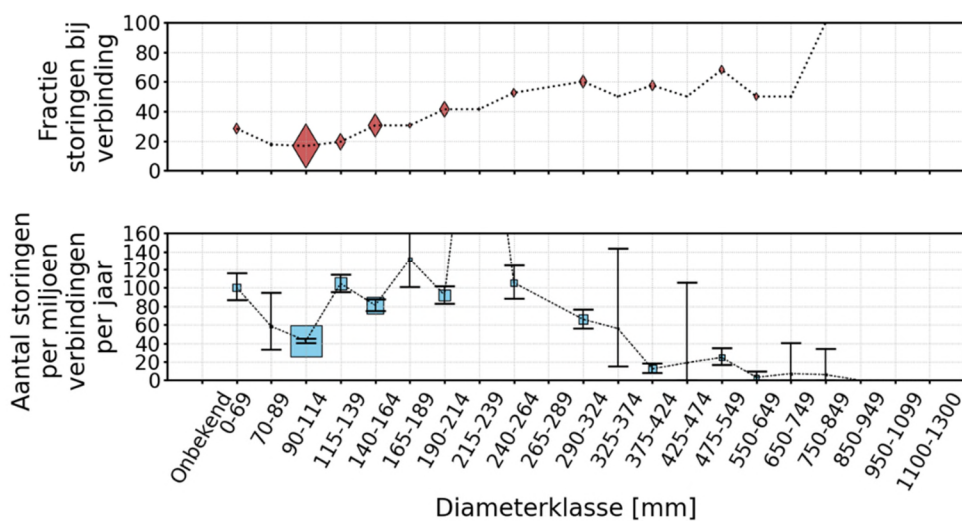


Figuur 3: Samenvatting voor storings bij PVC verbindingen per diameterklasse. Grootte van markers is proportioneel aan aantal kilometers leidingen. Deze figuur vat de informatie van Tabel 3 samen. Leeswijzer: Van alle storings van diameterklasse "X" (horizontale as), "Y<sub>1</sub> %" zijn bij de verbinding (verticale as, boven) en er zijn "Y<sub>2</sub>" storings per miljoen verbindingen per jaar (verticale as, onder). Grootte van vierkant/diamant is proportioneel aan kilometer leiding. Onzekerheidsmarge van 95% is getoond voor het onderste plaatje.

Tabel 4: Genormaliseerde storings per diameterklasse voor AC. Per kolom worden de drie grootste waarden in vet gezet.

Diameterklasse	Buis			Verbinding		
	Aantal storings	Kilometer leidingen	Storings per kilometer per jaar	Aantal storings	Aantal verbindingen	Storings per miljoen verbindingen per jaar
Onbekend	0	0.00412047	0	0	1	0
0 – 69 mm	477	579.041	0.0634	189	144760	100.43
70 – 89 mm	75	84.405	0.0684	16	21101	58.33
90 – 114 mm	<b>6616</b>	<b>9495.61</b>	0.0536	1318	<b>2373902</b>	42.71
115 – 139 mm	<b>1902</b>	<b>1351.8</b>	<b>0.1082</b>	460	<b>337951</b>	104.7
140 – 164 mm	<b>1571</b>	<b>2616.92</b>	0.0462	690	<b>654230</b>	81.13
165 – 189 mm	148	152.293	<b>0.0748</b>	65	38073	<b>131.33</b>
190 – 214 mm	534	1259.43	0.0326	377	314857	92.11
215 – 239 mm	103	55.6874	<b>0.1423</b>	73	13922	<b>403.35</b>
240 – 264 mm	121	390.361	0.0238	134	97590	<b>105.62</b>
265 – 289 mm	0	0.0118999	0	0	3	0
290 – 324 mm	116	816.704	0.0109	175	204176	65.93
325 – 374 mm	4	21.9735	0.014	4	5493	56.02
375 – 424 mm	17	569.336	0.0023	23	142334	12.43
425 – 474 mm	1	16.1384	0.0048	1	4035	19.06
475 – 549 mm	15	397.545	0.0029	32	99386	24.77
550 – 649 mm	3	284.54	0.0008	3	71135	3.24
650 – 749 mm	1	42.2608	0.0018	1	10565	7.28
750 – 849 mm	0	50.1959	0	1	12549	6.13
850 – 949 mm	0	0.0544994	0	0	14	0
950 – 1099 mm	1	4.28833	0.0179	0	1072	0
1100 – 1300 mm	0	0.0171941	0	0	4	0





Figuur 4: Samenvatting voor storingen bij AC verbindingen per diameterklasse. Grootte van markers is proportioneel aan aantal kilometers leidingen. Deze figuur samenvat informatie van Tabel 4. Leeswijzer: Van alle storingen van diameterklasse “X” (horizontale as), “Y<sub>1</sub>%” zijn bij de verbinding (verticale as, boven) en er zijn “Y<sub>2</sub>” storingen per miljoen verbindingen per jaar (verticale as, onder). Grootte van vierkant/diamant is proportioneel aan kilometer leiding. Onzekerheidsmarge van 95% is getoond voor het onderste plaatje.

## 2.5 Storingen bij PVC en AC verbindingen per leeftijd<sup>6</sup>

Voor PVC en AC is er verder onderzocht hoe leidingen en verbindingen storen op basis van leeftijd, nu genormaliseerd naar het aantal verbindingen. De resultaten zijn getoond in Figuur 5.

Voor normalisering werd de volgende benadering toegepast:

- Vanaf 2010 t/m 2018 is per leeftijd (met resolutie van één jaar) berekend voor welk percentage het bijdraagt aan alle leidingen.
- Om het aantal kilometer voor een leeftijd te schatten is het percentage vermenigvuldigd met het bijbehorende aantal kilometer leiding geregistreerd in 2015.
- Er is niet gecorrigeerd voor de invloed van verschillen in databeschikbaarheid. Bijvoorbeeld, als een bedrijf een bovengemiddeld aantal kilometer leidingen heeft, maar storingen niet regelmatig registreert, dan zal hun aantal storingen ondervetegenwoordigd zijn wat tot een vertekening kan leiden.

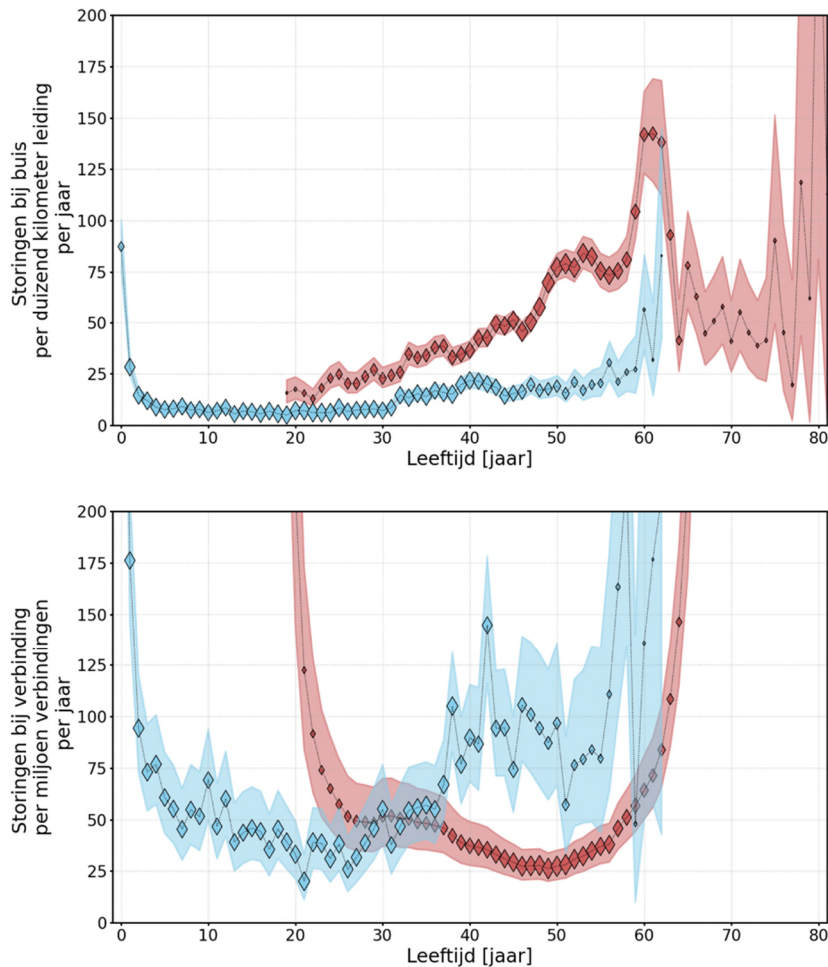
Voor AC zijn de volgende waarnemingen te maken:

- Het is duidelijk dat AC leidingen al veel langer worden aangelegd dan PVC. Bovendien kan men zien dat sinds ongeveer 20 jaar geen AC meer wordt aangelegd.
- Conform vele andere analyses is te zien dat het aantal storingen bij de buis geleidelijk toeneemt tussen leeftijden van 20-45 jaar; tussen leeftijden van 45-55 jaar is er een wat scherpere stijging in het aantal storingen en tussen leeftijden van 55-60 jaar is een snelle toename in het aantal storingen. De onzekerheden bij de hogere leeftijden worden veroorzaakt door het relatief geringe aantal leidingen in die leeftijd.
- Het aantal storingen bij de verbinding blijft bijna onveranderd tussen leeftijden van 25-35 jaar. Daarna dalen het aantal storingen tot een minimum bij een leeftijd van 50 jaar waarna het scherp stijgt.

Voor PVC zijn de volgende waarnemingen te maken:

<sup>6</sup> De analyse hierin is verkennend in aard en omvat een paar versimpelingen. De cijfers geproduceerde in deze analyse zou dus als een eerst orde schatting gezien worden.

- Het aantal storingen bij de buis is relatief hoog voor nieuw aangelegde leidingen. Na 2 jaar tot 30 jaar blijft het aantal storingen bijna constant. Hierna is er een stijging in het aantal storingen tussen leeftijden van 30-45 jaar waarna het fluctueert.
- Het aantal storingen bij de verbinding volgt min of meer dezelfde trend als de buis zelf met meer storingen bij nieuw aangelegde verbindingen. Ook is er een duidelijk verhoogde storingsfrequentie te zien bij de hogere leeftijden. Het is niet onderzocht of dit samenvalt met een hoger aandeel 'scheuren van verbindingen', wat verwacht zou kunnen worden uit het samenvallen van dit plateau met de veranderingen in het PVC materiaal sinds de jaren 70.



*Figuur 5: Genormaliseerde storingen voor AC/PVC buizen (boven) en verbindingen (onder). In rood wordt data van AC weergegeven en in blauw van PVC. Grootte van marker is proportioneel aan aantal kilometer leiding. De gekleurde oppervlaktes vertegenwoordigen een onzekerheidsmarge van 95%. Als de bijbehorende leidinglengte korter dan 10 km is, wordt er geen marker weergegeven. Leeswijzer: Van alle storingen voor AC/PVC met leeftijd "X" (horizontale as), zijn er "Y<sub>1</sub>" storingen bij de buis per duizend kilometer leiding per jaar (verticale as, boven) en er zijn "Y<sub>2</sub>" storingen bij de verbinding per miljoen verbindingen per jaar (verticale as, onder). Grootte van vierkant/diamant is proportioneel aan kilometer leiding.*

### 3 Onderzoek van uitgenomen verbindingen en appendages

In dit hoofdstuk wordt naar een aantal gestoorde verbindingen gekeken. Er zijn verbindingen vanuit voorzieningsgebied van Vitens en Evides gehaald.

#### 3.1 Stukken vanuit Vitens voorzieningsgebied

Vitens heeft aanvankelijk twee lekkende PVC verbindingen met buitendiameter 500 mm voor onderzoek ter beschikking gesteld, zie Figuur 6. Deze horen bij een transportleiding in Aalten en de storingen zijn binnen 1 km van elkaar. Na reparatie van één storing werd er weer druk in de leiding gebracht wat meteen tot een tweede lekkage heeft geleid. Zo hebben in totaal zes verbindingen gelekt.

De verbinding is met bijbehorende buisstukken aangeleverd. In beide gevallen is het lek toegeschreven aan beschadiging bij de rubberring/flenspakking. In één buis was het lekverlies 20 m<sup>3</sup> en 233 m<sup>3</sup> bij de andere, zonder nadere aanduiding van de tijdsduur van het lek. Deze cijfers zijn inschattingen die ter plekke door de monteur gemaakt is. Eén van de twee stukken toont een opvallende erosie krater in het buisoppervlakte nabij de verbinding. Het stuk met de erosie krater wordt “met erosie” genoemd, de andere “zonder erosie”. De buis “zonder erosie” leek meer verkleurd te zijn, hetgeen verder geen betekenis heeft voor de kwaliteit van het materiaal, zoals in eerder onderzoek naar kwaliteit van PVC is getoond [4]. Er was geen markering van de bovenkant van de buis en ook geen markering van de stroomrichting.

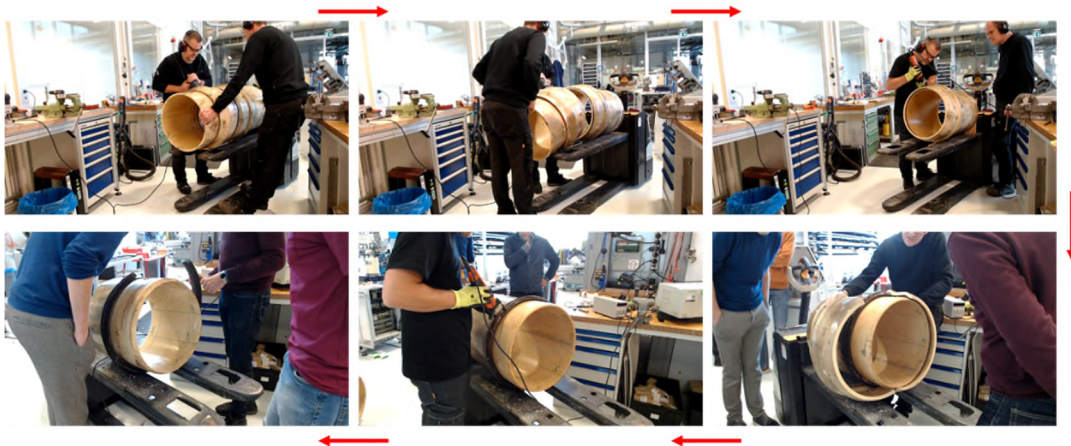


*Figuur 6: Twee lekkende PVC verbindingen vanuit de Vitens voorzieningsgebied met diameter 500 mm. Degene aan de rechterkant heeft een opvallende erosie op de oppervlakte van de buis.*

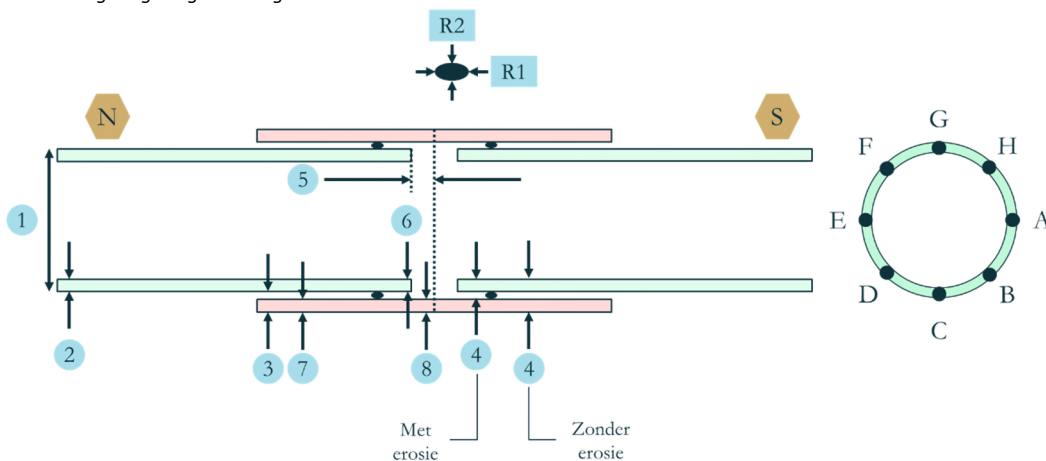
De procedure van openzagen is in Figuur 7 getoond. De indicaties voor de maatvoering zijn in Figuur 8 weergegeven. Er zijn acht afmetingen die bij de buis en mof horen (per kant). Bij elke ring horen twee afmetingen. In Figuur 9 is weergegeven hoe afmetingen 3 en 4 in de werkelijkheid gemeten zijn.

Procedure van openzagen:

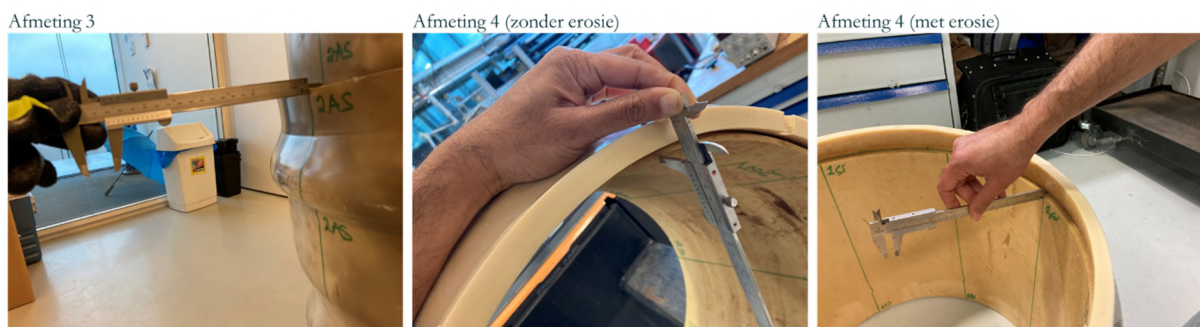
- Eerst is aan de buitenkant van de buisstukken en mof lijnen geschetst. Acht punten langs de omtrek zijn hiervoor gekozen en zijn met de letters A t/m H aangeduid. De acht punten zijn ongeveer 45° verdeeld. Omdat het niet duidelijk is waar de bovenkant van de leiding lag, kunnen de locaties A t/m H niet ten opzichte van de bodem worden geduid. Daarnaast zijn de lijnen ook aan de binnenwand van de buizen getekend.
- De twee buizen worden met N(orth) en S(outh) gemarkeerd. Omdat de stroomrichting niet bekend is kan er niet meteen gezegd worden welke buis bovenstrooms lag.
- Hierna zijn metingen 1 t/m 3 uitgevoerd. Daarnaast is een visuele inspectie uitgevoerd van hoe de buis eruitzag. Naast foto's is ook een camera door de buis gevoerd met behulp van een statief.
- De buis is door het midden van de mof langs de omtrek open gezaagd waardoor twee stukken los kwamen. Hiervoor is een zwarte tape op de mof geplakt als referentie. Hierdoor was er genoeg toegang om metingen 4 en 5 uit te kunnen voeren.
- De twee stukken zijn verder in de langs richting op locaties D en H open gezaagd. De twee helften van de mof werden als deksels uitgehaald. Hierna is de ring open gezaagd bij locatie D waardoor deze los komt.
- Hierna kan er nog een ronde van visuele inspectie plaats vinden.
- In een later stadium zijn metingen 6, 7, en 8 uitgevoerd.
- De ring is verder in twee stukken gesneden waarna afmetingen R1 en R2 bepaald konden worden. Hierbij zijn de locaties niet precies gemarkeerd. Daarnaast kunnen vanwege de onregelmatige vorm en flexibiliteit van de rubberring onnauwkeurigheden optreden.



Figuur 7: (Linksboven) Zagen van mof in het midden langs omtrek. (Midden boven) Twee stukken als gevolg van vorige actie (Rechts boven) Mof snijden in de langs richting (Rechts onder) Twee stukken van mof als gevolg van vorige actie (Midden onder) Snijden van rubber ring (Links onder) Los komen van de ring als gevolg van vorige actie



Figuur 8: Markering van de buizen en uitgevoerde afmetingen. Dit is alleen een voorbeeld en de locatie G is geen bovenkant van de leiding.



Figuur 9: Afmetingen 3 en 4 met schuifmaat. Afmeting 4 vindt na een doorzag actie plaats.

### 3.1.1 Analyse – Stuk zonder erosie (#1)

Eerst is het stuk zonder erosie geanalyseerd. Het is duidelijk dat er verkleuring aan de buitenwand van de buis en mof aanwezig is. De verkleuring is een indicatie dat de buis in een anaerobe grond gezet is, maar heeft geen consequenties voor de kwaliteit van het materiaal. De algemene analyse vond op de volgende manier plaats – een visuele analyse toen de leiding nog intact was, daarna opensnijden gevolgd door nog een visuele analyse.

Visuele analyse (voor snijden) – Figuur 10:

- Als de buis verticaal gelegd wordt met S aan de bovenkant, is het duidelijk dat het gat tussen de buis en de mof vanuit de buitenkant groter lijkt bij D, E, F, G. Een soortgelijke analyse met de N buis aan de bovenkant geeft aan dat de afstand tussen buis en mof van de buitenkant groter bij B, C, D, E is. Dit wordt door afmeting 3 in Figuur 12 bevestigd. De buis zat dus verwrongen in de mof.
- Er is een bruine kleur aan de buitenrand van de mof om GHAB-N aanwezig.
- Voor het openzagen van de buis was het al duidelijk dat er – buiten de afdichting – wortelen tussen de mof en buis verspreid waren tussen AB-N.
- Buisstuk N is tijdens aanleg waarschijnlijk met de hand ter plekke op maat gezaagd. Dit kan aan de hand van de vorm van het buis eind (afkanting niet overal gelijk) in de mof gezien worden.

Visuele analyse (tijdens en na snijden) – Figuur 11:

- Er was veel "troep"<sup>7</sup> (ijzer of zand) bij de ring aan de kant in contact met drinkwater. Vooral CD-S.
- Er werd een monster genomen vanuit AB-S.
- De buitenkant van de rubberring leek nog nat te zijn. Er is nog wat water binnen de ring.
- Er is capillaire wortelgroei richting de binnenkant van de buis bij de binnenzijde van de ring (en niet om de buitenzijde van de ring heen) dichtbij DEF-S.
- Er kan niet met 100% zekerheid beweerd worden of de buis onder het grondwater lag. Dit kan ook de wortelgroei verklaren
- Er was een wortel aan de binnenkant van de ring dichtbij BS aanwezig. In de buurt is natte zand ook aanwezig.
- Er is wat wortelgroei bij EF-N, maar veel minder dan bij de S kant.
- Er is wat zand bij BC-N tussen de buitenkant van de buis en binnenkant van de ring terwijl het aan de rest van de omtrek schoon is. Bij BC-N zou ook lek geweest kunnen zijn.
- Er zijn indrukken (wellicht van de wortels) op de rubberring aanwezig.
- Er was ook een veronderstelling dat de sporen van de ringbeweging vanwege temperatuurverschillen door de jaren heen zichtbaar zou zijn. Echter werd dit niet gezien.
- Het is moeilijk om het invloed van uithalen van buis/verbinding en het doorzagen van de stukken te kunnen schatten.

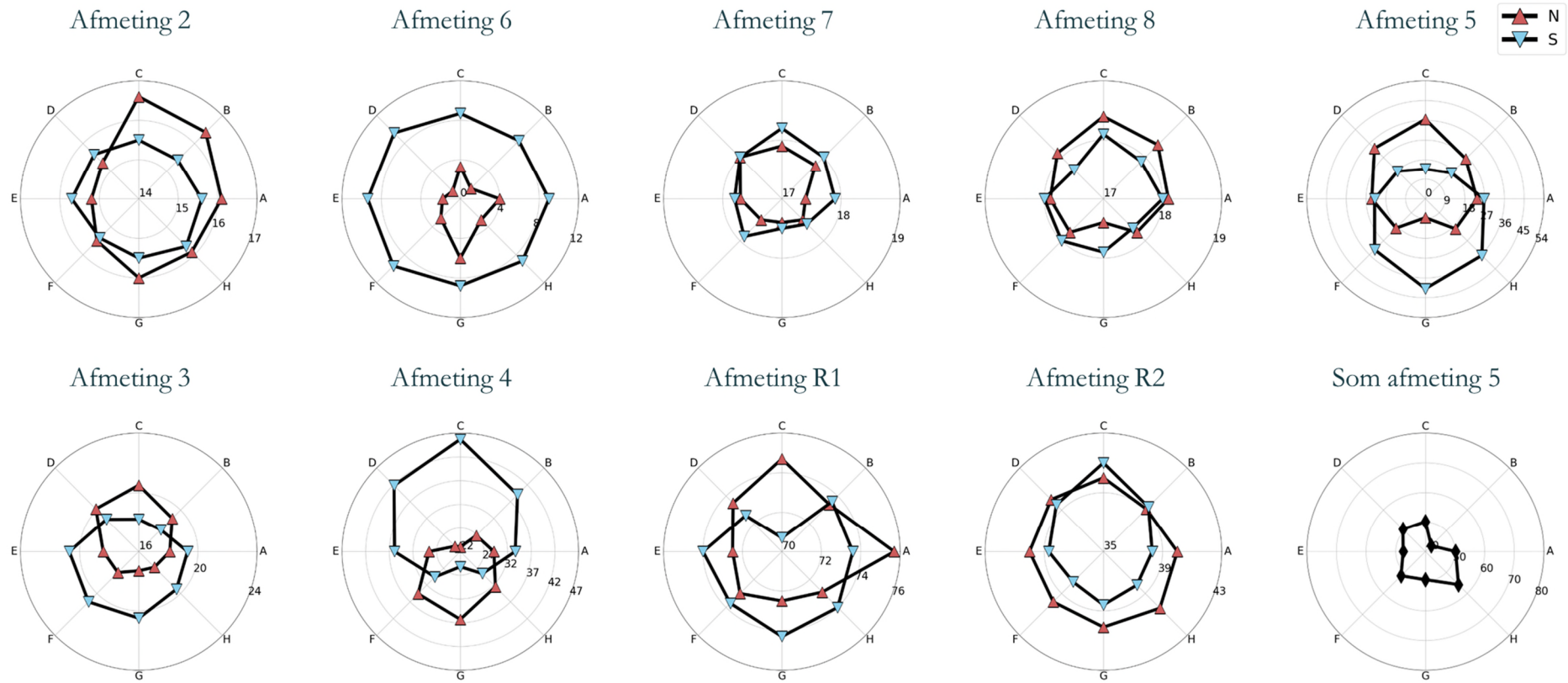
<sup>7</sup> Er moet opgelet worden dat er veel zaagsel los komt tijdens het zagen van de buis/mof en kan ook ophopen.



Figuur 10: Visuele analyse voor openzagen van verbinding. (Links en rechts boven respectievelijk) Asymmetrie in buis ligging binnen mof gezien van S en N kant respectievelijk. (Linksonder) Relatief grote gat tussen buis en mof buitenkant FG-S. (Midden onder) Relatief grote gat tussen buis en mof binnenkant BC-S. (Rechtsonder) Aanwezigheid van wortelen tussen mof en buis.



Figuur 11: Visuele analyse tijdens en na openzagen van verbinding (Linksboven) Zand en ijzer aan de waterkant van de ring (Midden boven) Indruk op de rubberring (Rechtsboven) Capillaire wortelen op de buiswand (Linksonder) Wortelen die onder de ring vast zitten (Rechtsonder) Wortel die in de ring zat.



Figuur 12: Overzicht van afmetingen voor de stuk zonder erosie (Vitens).

Tabel 5: Afmetingen voor stuk zonder erosie. Alle waardes zijn in mm.

AN	BN	CN	DN	EN	FN	GN	HN	Meting	HS	GS	FS	ES	DS	CS	BS	AS
502	501	497	499	499	501	497	500	1	499	499	501	502	499	498	501	501
16.1	16.4	16.6	15.3	15.2	15.5	16.0	15.9	2	15.7	15.5	15.4	15.7	15.6	15.5	15.4	15.6
18.1	19.2	20.5	20.1	18.4	18.0	17.3	17.5	3	19.6	20.5	20.8	20.7	19.1	18.2	18.1	19.3
29.1	26.8	23.0	23.6	28.6	34.6	36.3	32.5	4	28.6	25.2 <sup>8</sup>	29.6	35.9	41.8	45.7	39.1	33.6
23.5	26.0	36.5	32.8	24.4	18.9	8.6	19.4	5	36.4	40.9	32.7	23.1	17.9	13.7	16.8	26.7
4.0	1.5	3.3	1.1	1.8	2.8	6.0	3.0	6	8.9	8.8	9.6	9.4	9.5	8.7	8.4	9.0
17.4	17.8	17.9	18.0	17.7	17.5	17.4	17.5	7	17.6	17.5	17.9	17.8	18.0	18.2	18.0	17.9
18.1	18.3	18.4	18.1	17.9	17.8	17.4	17.8	8	17.7	17.9	18.0	18.0	17.7	18.1	17.9	18.0
75.7	73.4	74.7	73.5	72.5	73.0	72.5	72.9	R1	74.0	74.3	73.7	74.0	72.6	70.7	73.6	73.6
40.6	39.1	40.0	40.0	40.0	39.8	40.1	40.4	R2	38.2	38.6	37.9	38.7	39.5	41.0	39.3	38.3
0.7	1.4	2.6	2.1	0.7	0.5	-0.1	0.0	Vershil (3 – 7)	2.0	3.0	3.9	3.9	1.1	0.0	0.1	1.4
7.0	7.0	1.3	4.4	8.9	14.0	12.9	11.7	Vershil (4 – 6 – 8)	2.0	-1.5	2.0	8.5	14.6	18.9	12.8	6.6
50.2	42.8	50.2	50.7	47.5	51.6	49.5	55.8	Som 5 (N + S)	55.8	49.5	51.6	47.5	50.7	50.2	42.8	50.2

Afmetingen analyse – Figuur 12 en Tabel 5:

- Eerst wordt de wanddikte van de buizen (afmeting 2) gemeten. De wanddikte van N stuk is minder uniform vergeleken met de S stuk. In beide gevallen zijn de wanddiktes dikker dan de voorgeschreven 14,6 mm. Bij afmeting 6 (wanddikte van buis binnen de mof) kan er gezien worden dat de cijfers veel lager zijn. Dat is vanzelfsprekend omdat deze einden de mof in verschoven moeten worden. Bij de N stuk zijn afmetingen 6 veel lager wellicht omdat het met de hand afgeslepen werd.
- Afmetingen 7 en 8 geven informatie over de wanddikte van de mof aan. Voor allebei N en S stukken is deze afmeting behoorlijk uniform tussen 17,0 en 18,5 mm.
- Afmeting 3 is de afstand tussen de buitenkant van de mof en de buitenkant van de buis. Als de wanddikte van de mof (afmeting 7) afgetrokken wordt kan er informatie over het gat tussen de buis en mof aan de buitenkant gekregen worden. Aan de N kant is de afstand groter dichtbij CD-N terwijl de gat groter is bij EFG-S bij de S kant. De extra wijidte kan tot 4 mm lopen. De gat wordt heel klein bij GH-N en BC-S dat de mof en buis bijna in direct contact met elkaar komen.
- Afmeting 4 is de afstand tussen de binnenkant van de buis en de buitenkant van de mof. Dit bevat informatie over de gaten tussen buis en mof aan twee kanten. Aftrekken van mof en buis wanddikte (afmetingen 6 en 8) van afmeting 4 dus geeft informatie over de wijidte tussen de binnenkant van de mof en de buitenkant van de

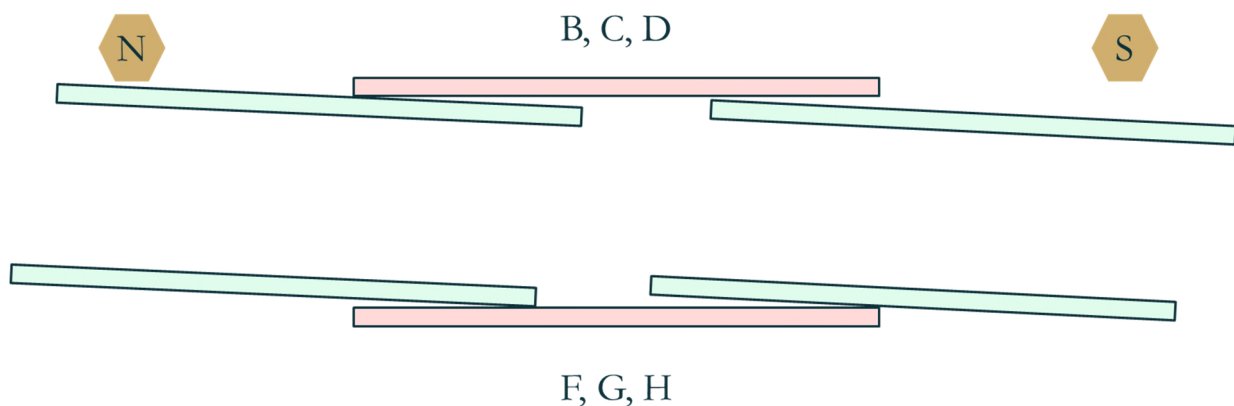
<sup>8</sup> Meting is verkeerd uitgevoerd



buis. Het gat bij BCD-S is aanzienlijk groot waar ook veel zand aanwezig was. Bij B-S werd een worteltje gevonden. Bij CD-S was er veel sediment/zand. De capillaire wortelen lagen bij DEF-S (waarschijnlijk ingang via D-S). Aan de N kant is het gat groter bij FGH-N. Er werd wortelen gevonden bij EF-N (na snijden) en AB-N (voor snijden).

- Afmeting 5 geeft aan in hoeverre de buis binnen de mof verschoven zit. Een kleinere waarde van deze afmeting betekent een hogere mate van verschuiving. De buis lijkt het meest binnen verschoven bij FGH-N en BCD-S te zijn. Dat is bijna diagonaal. Let op dat afmeting 5 gevoelig is voor de precieze locatie van het doorzagen en dikte van de zaagtand.
- De optelsom van afmeting 5 bij de N en S kanten geeft informatie over de spleetwijdte wat vaak gemeten wordt om hoekverdraaiing te constateren. Er is een duidelijke asymmetrie in de spleetwijdte. Maar, bij de vier klokstanden (A, C, E, G) is de spleetwijdte bijna gelijk. Dit toont aan hoe spleetwijdte op zich niet genoeg informatie aanbiedt en dat er nuances bijzitten. Eén zo'n nuance is de mate van verschuiving van de buizen binnen de mof (afmeting 5 dus).
- Afmetingen R1 en R2 (lengte van rubberring in langs richting en dikte in radiale richting) lijken best uniform te zijn. De lokale afwijkingen zijn binnen een paar procent. Bij de S stuk lijkt de radiale dikte van de rubberring een paar millimeter lager dan bij de N stuk.

Het is duidelijk dat bij BCD-N, de buis niet diep in de mof ligt (afmeting 5). Dat is ook waar de radiale afstand tussen de buis en mof aanzienlijk kleiner is (afmeting 4). Bij FGH-N is het andersom. In de S stuk ligt FGH-S niet diep in de mof en tegelijkertijd zijn deze de plekken waar de radiale gat tussen de buis en mof het kleinst is. Het is niet duidelijk of dit met opzet zo gelegd werd of het als aanlegfout genoemd moet worden. Een schematische weergave hiervan is in Figuur 13 te zien.



*Figuur 13: Dit plaatje is bedoeld als voorbeeld. Er is geen bewijs dat F, G, H aan de onderkant gelegen zijn.*

### 3.1.2 Analyse – Stuk met erosie

Als tweede werd het stuk met erosie geanalyseerd. Het algemene analyse vond op de volgende manier plaats – een visuele analyse toen de leiding nog intact was, daarna opensnijden vervolgd door nog een visuele analyse.

Bij dit stuk was er een duidelijk slijtspoor bij de buitenkant van de buis – het opvallendste. Hierdoor was het vermoeden dat de analyse na het opensnijden vooral in de buurt van de slijtspoor interessant zou zijn ten aanzien van het eventueel falen van de rubberring.

Visuele analyse (voor snijden) – Figuur 14:

- Bij FG-N kant van de buis was er een uitsteeksel. Hoogstwaarschijnlijk is dit de onderkant van de buis die automatisch afbrak tijdens het uitzagen.
- Het slijtspoor omvat ongeveer 20 cm of ongeveer een achtste van de omtrek. Er zijn duidelijke ribbelige patronen erop die informatie over aan het manier van slijten kan geven. Dit werd waarschijnlijk door een continu hogedrukwaterspuit in de langsrichting in combinatie met uitspoelend zand veroorzaakt. Vooral de menging met zand zou voor de uitslijting zorgen (mondelling informatie Piet Hammers). Het slijtspoor ligt tussen AB-N.
- Het gat tussen mof en buis van de binnenkant leek groter bij EFG-S en ABC-N.
- Vergeleken met de buis zonder erosie leek deze buis veel schoner te zijn zonder aanwezigheid van ijzer/wortels.

Visuele analyse (tijdens en na snijden) – Figuur 15:

- Uithalen van de mof toont aan dat er geen duidelijke oorzaak voor het slijtspoor is, zoals bijvoorbeeld een falende afdichtingsring. Het slijtspoor is vooral op de buiswand buiten de mof aanwezig. Er is geen beschadiging aan de buiswand die binnen de mof zit. Er zijn kleine slijtsproen aan de binnenkant van de mof bij dezelfde locaties. Dit bevestigt wellicht het uitspoelende zand in combinatie met de waterstraal als oorzaak voor de erosie.
- Bij C-N is er ook één kleine slijtspoor.
- Er zijn stukken van rubber vast op de binnenkant van de mof.
- Bij AB-N zijn er ook sporen dat de rubberring uit zijn voeg geschoven werd. Bij de andere kant was er geen spoor van het verschuiven de rubberring.
- De slijtage/lekkage lijkt het meest te zijn waar de ring het meest uitgeschoven is.
- Er werd geen ijzerneerslag of sediment binnen gezien.
- Er was nog water in de ring.
- Er was wat zand aan de binnenkant van de rubberring (in contact met de buis)
- Er is wat zand bij de ring en buiswand EF-S.

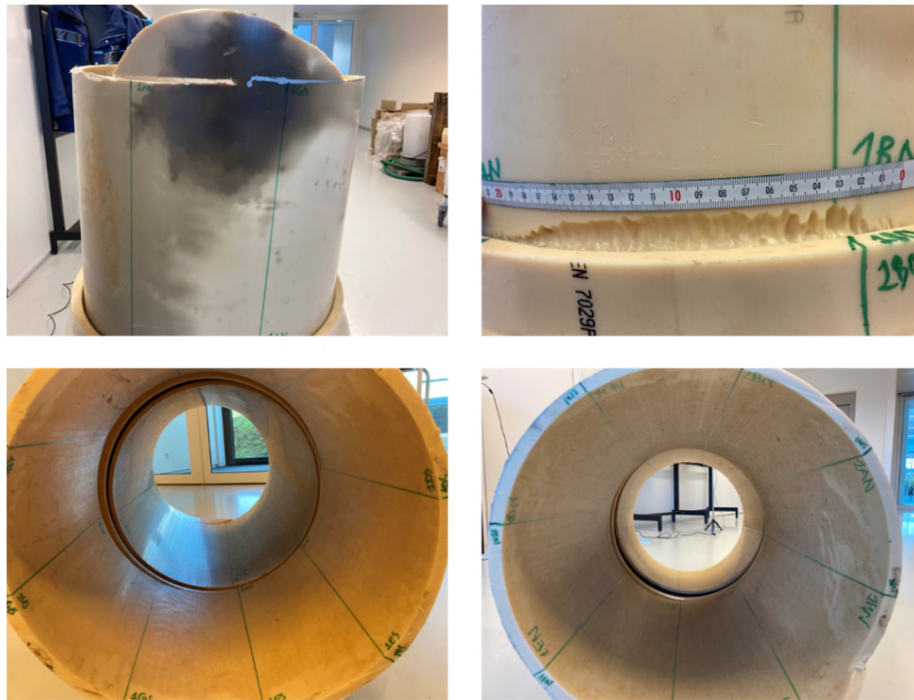
Afmetingen analyse – Figuur 16 en Tabel 6:

- Eerst wordt de wanddikte van de buizen (afmeting 2) gemeten. Bij het S stuk is de wanddikte bijna uniform in de buurt van 16 mm. Voor het N stuk zijn er meer afwijkingen met relatief dunnere wanden bij ABC-N. Afmeting 6 bevat informatie over de wanddikte van het buis eind dat in de mof zit. Voor beide stukken is deze dikte uniform in de buurt van 9 mm.
- Afmetingen 7 en 8 geven informatie over de wanddikte van de mof. Afmeting 7 is de wanddikte van de mof aan zijn eind. Bij het N stuk is deze waarde het laagst bij AB-N, waar toevallig ook het slijtspoor aanwezig is. Dezelfde trend is ook bij het S stuk zichtbaar. Bij afmeting 8 lijkt de wanddikte iets dunner te zijn bij AB-N en AB-S. Wellicht was er een inherente milde asymmetrie in de mof.
- Afmeting 3 is de afstand tussen de buitenkant van de mof en de buitenkant van de buis. Als de wanddikte van de mof (afmeting 7) afgetrokken wordt kan er informatie over het gat tussen de buis en mof aan de buitenkant gekregen worden. Vergeleken met de buis zonder erosie, wordt er relatief vaker gezien dat afmeting 7 groter dan afmeting 3 is. Aan de N kant is de afstand groter dichtbij EF-N terwijl het gat groter is bij ABC-S bij de S kant. Het gat is groter aan de N kant dan bij de S kant. De diepte van het slijtspoor is in de buurt van 3 á 4 mm. Het gat wordt zo klein bij HAC-N en EF-S dat de mof en buis bijna in direct contact met elkaar komen.

- Afmeting 4 is de afstand tussen de binnenkant van de buis en de buitenkant van de mof. Dit bevat informatie over de gaten tussen buis en mof aan twee kanten. Afrekken van buis wanddikte (afmetingen 6) van afmeting 4 dus geeft informatie over de breedte tussen de binnenkant van de mof en de buitenkant van de buis. Hier werd ook waargenomen dat afmeting 6 afmeting 4 vaker overschrijdt waardoor negatieve waarden van het gat gevonden worden. Het is onduidelijk of dit een uitkomst van meetfout is. Niettemin kan er toch een paar waarnemingen gemaakt worden. Het gat bij AB-N is groot (dus in dezelfde lijn als de slijtspoor). Aan de N kant is het gat groter bij EF-S. De negatieve waarden kunnen leiden tot de conclusie dat er op veel plekken direct contact was tussen de mof en de buis.
- Afmeting 5 geeft aan in hoeverre de buis binnen de mof verschoven zit. Een kleinere waarde van deze afmeting betekent een hogere mate van verschuiving. De buis lijkt het meest binnen verschoven bij EF-S en HAB-N te zijn. Let op dat afmeting 5 gevoelig is voor de precieze locatie van het doorzagen en dikte van de zaagtand.
- De optelsom van afmeting 5 bij de N en S kanten geeft informatie over de spleetbreedte die vaak wordt gemeten om hoekverdraaiing te bepalen. Vergelijken met het stuk zonder erosie is er een grotere symmetrie in de spleetbreedtes. Dit voorbeeld toont ook hoe spleetbreedte onvolledige informatie over verbinding conditie geeft.
- Afmetingen R1 en R2 (lengte van rubberring in langs richting en dikte in radiale richting) lijken minder uniform dan bij de ring in de stuk zonder erosie. Bij de afmeting R2 zijn de diktes lager bij D en H, waar de rubber gezaagd werd. Het is onduidelijk of het zagen de rubberring vervormd heeft.

Tabel 6: Afmetingen voor stuk met erosie. De slijtspoor ligt bij AB-N. Afmeting 1 is niet uitgevoerd. Alle waardes zijn in mm.

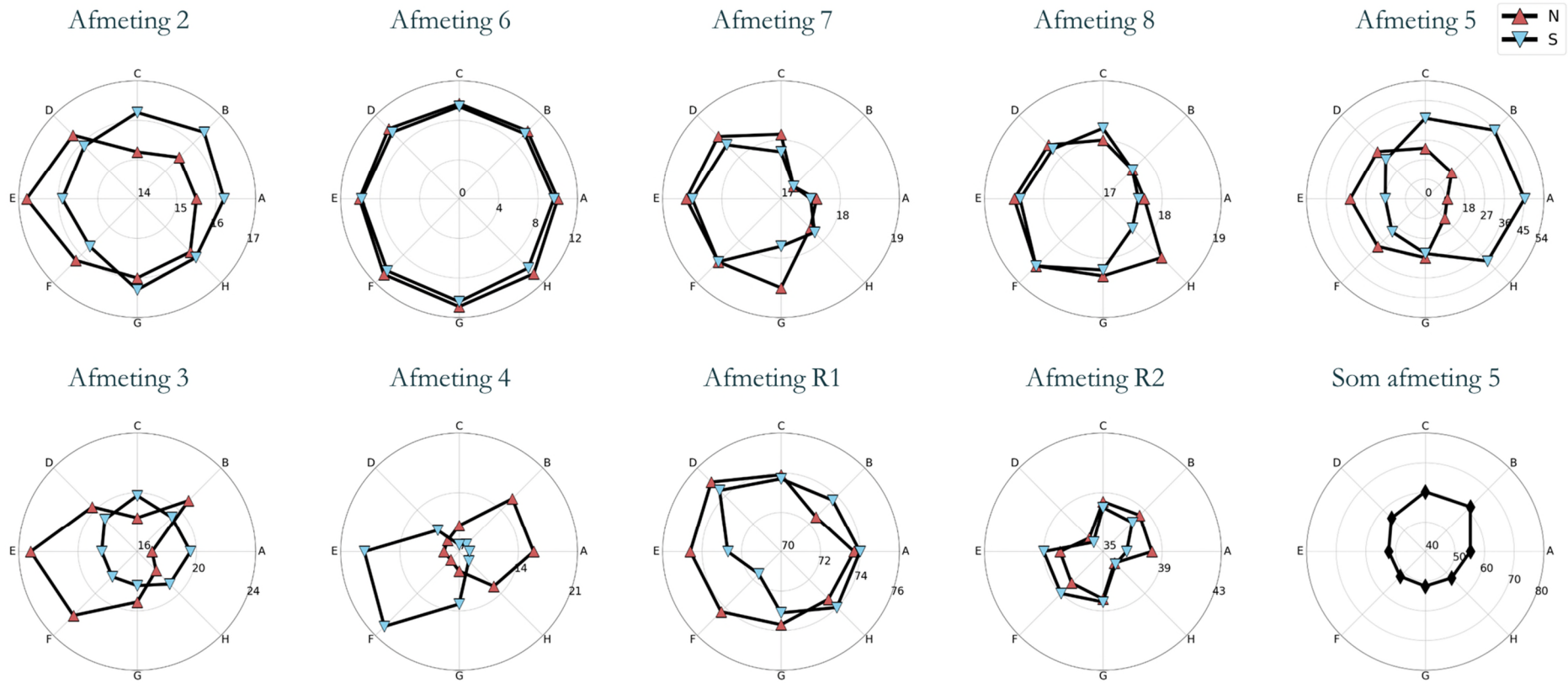
AN	BN	CN	DN	EN	FN	GN	HN	Meting	HS	GS	FS	ES	DS	CS	BS	AS
15.5	15.5	15.2	16.3	16.8	16.2	16.0	15.9	2	16.1	16.3	15.7	15.9	15.9	16.2	16.4	16.2
17.0	20.9	18.3	20.3	23.2	22.1	19.4	17.8	3	19.1	18.3	18.4	18.4	19.1	19.8	19.3	19.6
15.8	15.9	10.1	8.9	8.8	8.4	9.3	12.8	4	8.6	13.2	19.5	18.2	10.6	7.8	8.2	8.2
10.0	17.0	23.3	30.7	34.1	30.6	26.8	12.5	5	40.1	24.9	21.3	18.2	25.4	37.0	44.5	45.2
10.0	9.8	9.7	10.1	10.1	10.8	10.9	10.7	6	9.9	10.4	10.3	9.9	9.6	9.4	9.4	9.6
17.6	17.3	18.1	18.5	18.6	18.5	18.5	17.7	7	17.8	17.8	18.5	18.5	18.3	17.8	17.3	17.5
17.7	17.7	18.0	18.3	18.5	18.6	18.3	18.4	8	17.7	18.2	18.6	18.4	18.2	18.2	17.7	17.6
73.7	72.5	73.9	75.0	74.6	74.3	73.7	73.4	R1	74.0	73.1	71.6	72.7	74.1	73.7	73.7	74.0
38.3	38.5	38.4	36.3	37.9	38.0	38.2	36.1	R2	36.2	38.4	39.0	39.0	35.9	38.0	37.8	36.6
-0.6	3.6	0.2	1.8	4.6	3.6	0.9	-0.1	Vershil (3 – 7)	1.3	0.5	-0.1	-0.1	0.8	2.0	2.0	2.1
5.8	6.1	0.4	-1.2	-1.3	-2.4	-1.6	2.1	Vershil (4 – 6)	-1.3	2.8	9.2	8.3	1.0	-1.6	-1.2	-1.4
55.2	61.5	60.3	56.1	52.3	51.9	51.7	52.6	Som 5 (N + S)	52.6	51.7	51.9	52.3	56.1	60.3	61.5	55.2



Figuur 14: Visuele analyse voor openzagen van verbinding. (Linksboven) Overgebleven uitsteeksel tijdens het uitzagen van de buis – dus hoogstwaarschijnlijk bij de onderkant. (Rechtsboven) Slijtspoor bij de buis (Linksonder) Zicht binnen de buis van de S kant. (Rechtsonder) Zicht binnen de buis van de N kant.



Figuur 15: Visuele analyse tijdens en na openzagen van verbinding. (Linksboven) Indruk van lokale verschuiving van rubberring dichtbij de slijtspoor. (Rechtsboven) Veel kleinere slijtsoren aan de buiswand (Linksonder) Indruk van slijtspoor aan de vinnenkant van de mof wand (Rechtsonder) Indrukken op de rubberring.



Figuur 16: Overzicht van afmetingen voor de stuk met erosie (Vitens).

Net als bij het stuk zonder erosie is er asymmetrie die niet op een gewone hoekverdraaiing lijkt. Het is duidelijk dat bij HABC-S, de buis niet diep in de mof ligt (afmeting 5). Dat is ook waar de radiale afstand tussen de buis en mof aanzienlijk kleiner is (afmeting 4). Bij EF-N is het andersom. In de N stuk ligt HAB-N relatief dieper in de mof en tegelijkertijd zijn dit de plekken waar het radiale gat tussen de buis en mof het grootst is. Als de mof een milde asymmetrie heeft in zijn wanddikte met lagere waardes bij AB-N zou dat reden geweest voor een klein gat tussen de ring en de buis. Dit zou waarschijnlijk lekkage veroorzaakt kunnen hebben dat uiteindelijk tot de slijtsporen heeft geleid. De hierboven beschreven tekst is een hypothese waarin de metingen passen, maar verder geen duidelijke signalen zijn dat het zo gebeurd zou kunnen zijn.

### 3.1.3 Analyse – Stukken zonder erosie (#2 en #3)

Een tweede batch van lekkende verbindingen zijn op een latere termijn naar KWR gebracht. Het waren verbindingen zonder slijtsporen van erosie. Aan de hand van de eerste analyse is het onderzoek van deze twee stukken vooral toegespitst op de afmetingen (scheef montering) en niet zozeer op de kwaliteit/toestand van de afdichtingsring. In dit geval zijn de bovenkanten van de leidingen door een expert tijdens aanlevering geschat en gemarkeerd. De locatie A aan de omtrek van deze twee buizen vertegenwoordigt de bovenkant.

Visuele analyse (voor snijden) – Figuur 17:

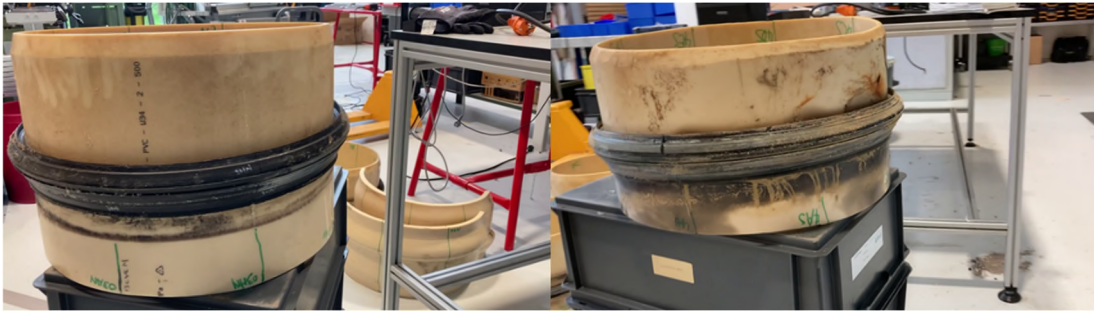
- Bij buisstuk #2 is de gat tussen de mof en buis aan de buitenkant hoger bij DEFG-N en GHAB-S. De gat tussen de mof en buis aan de binnenkant is hoger bij EF-N en BC-S.
- Bij buisstuk #3 is de gat tussen de mof en buis aan de buitenkant hoger bij 3DE-N en 3BC-S. De gat tussen de mof en buis aan de binnenkant is hoger bij 3EF-N en 3BC-S.



Figuur 17: Buisstukken zonder erosie #2 en #3 links en rechts respectievelijk

Visuele analyse (tijdens en na snijden) – Figuur 18:

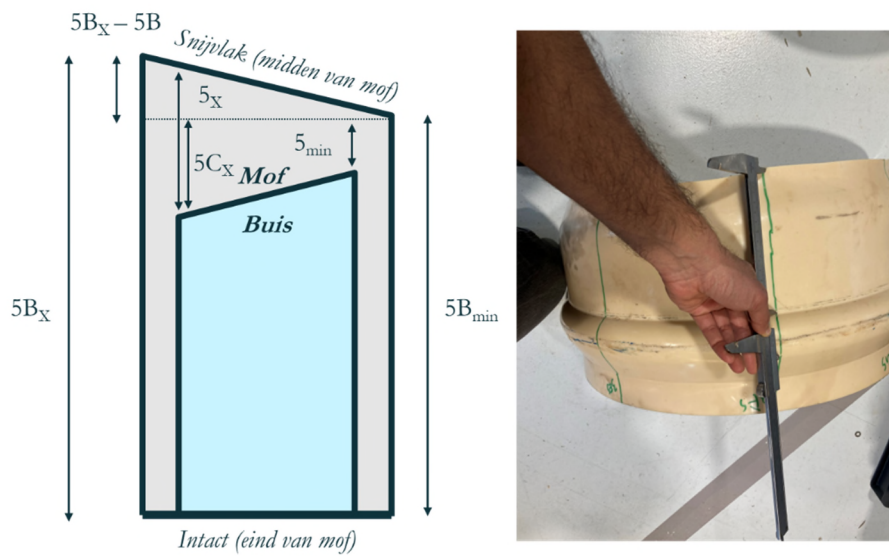
- Bij buisstuk #3 leek dat beide buizen door de hand afgezaagd/afgewerkt zijn om gemonteerd te krijgen. Dit is afgeleid aan de hand van de onregelmatige randen aan het eind dat in de mof ligt.
- Bij beide buizen waren er sporen van beweging van de rubberring in de axiale richting. Bij buisstuk #2 was het zichtbaar bij FGHA-N en DEFGHA-S. Bij buisstuk #3 was het lastig om vast te stellen waar of überhaupt of de rubberring bewogen is. De verkleuring op de PVC wand maakte het lastig om met zekerheid te bepalen op welke locaties langs de omtrek er bewogen is. De kleur van de spoor van rubberringbeweging lijkt sterk op de verkleuring wat voor de verwarring zorgt.
- Voor beide buisstukken was er geen opvallende aantasting van de rubberring zichtbaar. Zand is aangetroffen.



Figuur 18: Voorbeelden van verkleuring dichtbij de afdichtingsring voor buisstuk #2 en #3.

Tabel 7: Afmetingen voor stuk zonder erosie 2. Alle waardes zijn in mm.

AN	BN	CN	DN	EN	FN	GN	HN	Meting	HS	GS	FS	ES	DS	CS	BS	AS
15.9	15.4	15.2	15.8	16.0	15.1	15.5	15.6	2	15.2	15.4	16.0	15.7	15.2	15.3	15.5	15.3
16.7	17.7	19.4	22.4	22.7	18.8	17.7	16.7	3	17.3	17.4	17.0	17.8	18.7	21.0	22.9	19.8
15.4	9.6	7.8	7.6	7.4	7.4	7.7	13.1	4	6.9	9.9	14.4	12.7	7.1	6.6	6.2	6.7
7.6	20.5	38.2	52.9	45.9	31.3	22.1	14.1	5	33.6	21.9	17.6	16.7	11.0	28.1	38.8	40.7
159.8	163.5	172.4	177.0	168.0	163.1	161.2	161.2	5B	165.3	162.8	157.6	154.3	145.7	153.0	162.2	166.2
7.6	16.8	25.6	35.7	37.7	28.0	20.7	12.7	5C	14.0	4.8	5.7	8.1	11.0	20.8	22.3	20.2
9.4	9.1	9.5	9.5	10.6	10.0	10.3	10.3	6	8.6	9.3	8.8	8.8	8.9	8.9	9.2	9.1
18.2	17.9	19.1	18.3	17.6	17.2	18.7	17.3	7	17.0	17.2	17.3	18.1	17.6	18.5	18.6	17.1
17.2	18.0	18.8	18.0	17.5	17.4	17.9	18.3	8	17.9	18.1	18.0	17.9	18.5	18.7	18.5	17.7
71.9	73.6	75.3	74.2	74.0	72.9	74.6	73.0	R1	72.9	74.1	73.6	72.7	72.6	73.1	75.3	74.9
35.6	35.8	36.3	36.4	35.5	35.0	36.7	37.0	R2	36.0	35.9	35.6	36.5	36.3	34.3	34.1	35.0
48.3	59.3	66.3	63.9	62.6	48.9	44.0	47.7	Som 5 (N+S)	47.7	44.0	48.9	62.6	63.9	66.3	59.3	48.3
326.0	325.7	325.4	322.7	322.3	320.7	324.0	326.5	Som 5B (N+S)	326.5	324.0	320.7	322.3	322.7	325.4	325.7	326.0



Figuur 19: (Links) 2D schematische weergave van het corrigeren voor het kronkelende traject van de zaag. (Rechts) Afmeting 5B.

Tabel 8: Afmetingen voor stuk zonder erosie 3. Alle waardes zijn in mm.

AN	BN	CN	DN	EN	FN	GN	HN	Meting	HS	GS	FS	ES	DS	CS	BS	AS
15.0	15.0	15.3	15.6	15.6	15.8	15.6	16.5	2	15.5	15.7	15.7	15.4	15.6	16.0	15.3	15.3
18.6	18.0	18.2	17.9	18.9	20.0	20.0	19.0	3	22.2	19.3	17.7	16.3	16.4	17.1	19.1	22.7
18.6	15.0	10.0	7.9	7.3	6.6	12.2	15.6	4	9.7	9.9	13.0	18.8	16.4	8.3	9.7	11.3
26.1	26.4	26.4	30.9	37.1	39.6	41.7	35.8	5	40.1	31.7	19.6	12.3	19.2	22.7	36.6	45.8
162.6	163.6	161.8	160.4	159.5	165.3	165.2	165.6	5B	154.6	155.9	156.4	160.7	158.7	156.3	154.2	156.4
23.0	22.3	24.1	30.0	37.1	33.8	36.0	29.7	5C	39.7	30.0	17.4	5.8	14.7	20.6	36.6	43.6
9.3	8.7	9.0	8.3	8.5	8.3	5.0	9.0	6	8.6	6.8	8.9	6.4	6.4	9.4	9.9	8.8
18.5	17.7	18.2	18.3	17.5	18.3	18.0	18.0	7	17.6	18.3	17.5	16.9	16.6	17.3	17.9	18.5
18.1	17.8	17.9	17.6	17.8	18.2	18.3	18.1	8	18.0	17.7	17.9	18.0	17.3	17.6	17.6	18.2
73.4	72.4	73.4	72.0	74.0	73.7	73.6	72.3	R1								
36.2	36.0	38.0	37.4	36.5	34.6	36.6	36.6	R2								
71.9	63.0	49.1	50.1	49.4	59.2	73.4	75.9	Som 5 (N + S)	75.9	73.4	59.2	49.4	50.1	49.1	63.0	71.9
319.0	317.8	318.1	319.1	320.2	321.7	321.1	320.2	Som 5B (N + S)	320.2	321.1	321.7	320.2	319.1	318.1	317.8	319.0



Tijdens het doormidden zagen van stuk #2 is het vergeten om een zwarte tape op de verbinding te plakken. Hierdoor ontbrak er een gids voor het sturen van de zaag en de traject van de zaag is bepaald door de vaktechnisch vaardigheden van de technicus. Bij stuk #3 is er juist een zwarte tape geplakt (net zoals buis zonder erosie #1 en de buis met erosie). Toch hoeft het traject van de zag niet perfect recht te zijn.

Om het effect van het zagen op afmeting 5 te bepalen is afmeting 5B uitgevoerd (B = buiten) op basis waarvan afmeting 5C is bepaald (C = Correctie). Afmeting 5B meet de afstand tussen het einde van de mof en de snijvlak af. Afmeting 5 bij locatie X kan gecorrigeerd worden met behulp van de minimale waarde van afmeting 5B langs de omtrek. Dus  $5C_x = 5_x - (5B_x - 5B_{min})$ . De optelsom van 5B bij de N en S stuk moet langs de omtrek ongeveer gelijk zijn. De optelsom van 5C heeft geen fysieke betekenis en is dus niet gemeld. Dit is schematisch in Figuur 19 weergegeven.

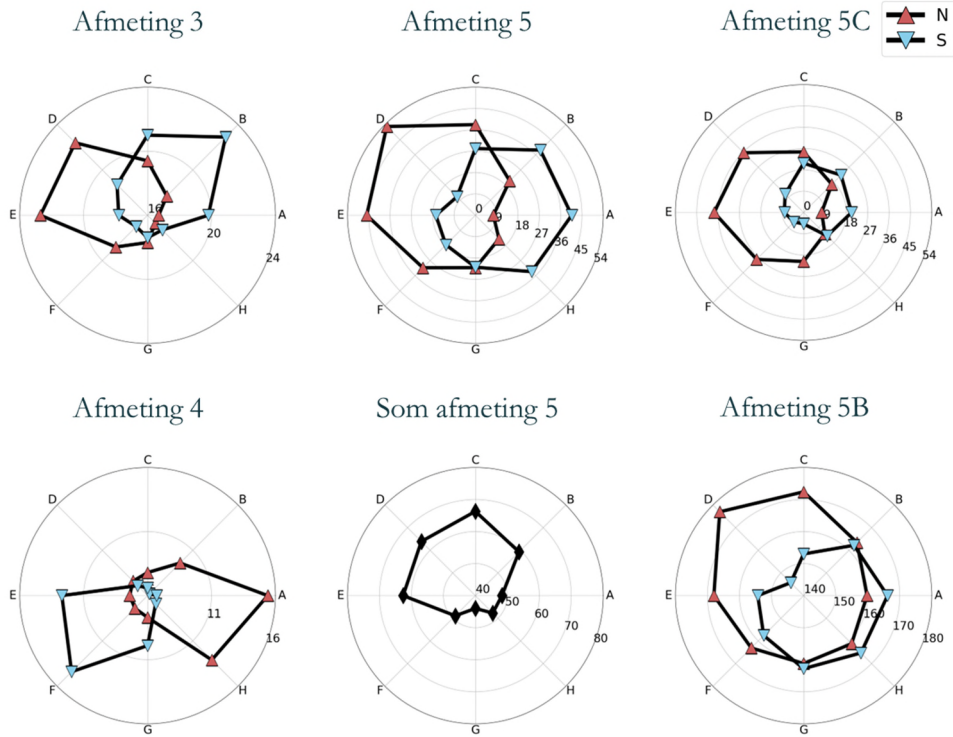
Als voorbeeld beschouwen we buisstuk #2 bij locaties D en H aan de S kant. Bij DS is afmeting 5B het minst voor de S stuk met een waarde van 145,7 mm ( $5B_{min}$ ) en het hoogst bij HS met een waarde van 165,3 mm ( $5B_x$ ). Kortom, er is een afwijking van 19,6 mm ( $5B_x - 5B_{min}$ ). Afmeting 5 bij locatie HS is 33,6 mm. Om het gecorrigeerde waarde te krijgen moet 19,6 mm van 33,6 mm afgetrokken worden wat tot 14,0 mm leidt ( $5C_x$ ).

Afmetingen analyse – Figuur 20, Figuur 21, Tabel 7, en Tabel 8:

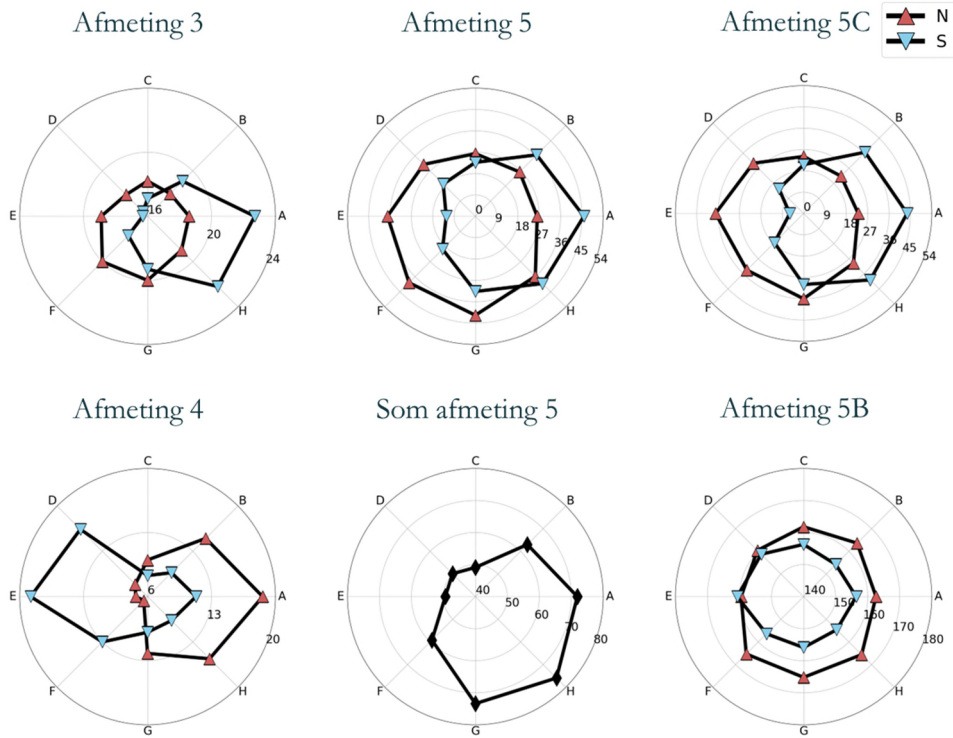
- Voor de analyse van deze twee buisstukken is er bewust voor gekozen om slechts afmetingen 3, 4, en 5 te bestuderen. Dit is gemotiveerd aan de hand van de resultaten van de analyse voorheen.
- De verwachting is dat afmeting 3 een negatieve correlatie met afmeting 4 en een positieve correlatie met afmeting 5 zal tonen. In de huidige analyse wordt afmeting 5C van belang.
- Bij buisstuk #2 is afmeting 3 hoog bij ED-N en ABC-S. Afmeting 4 is het hoogst bij HA-N en EF-S (diametraal tegenovergestelde kanten) waardoor de negatieve correlatie bevestigd is.
- Bij buisstuk #3 is afmeting 3 hoog bij FG-N en HA-S. Afmeting 4 is het hoogst bij HAB-N en DE-S (diametraal tegenovergestelde kant voor S stuk) waardoor de negatieve correlatie bevestigd is.
- Afmeting 5B toont afwijkingen tot ongeveer 20 mm (12% kronkeligheid) langs de omtrek bij de buisstuk #2 terwijl voor buisstuk #3 is de waarde maar 6 mm (4% kronkeligheid). Dit toont de effectiviteit van het gebruik maken van een zwarte tape als gids voor het zagen. Achteraf gezien zou afmeting 5B voor het stuk zonder erosie #1 en het stuk met erosie uitgevoerd moeten zijn.
- De optelsom van afmeting 5B bij de N en S stukken toont afwijkingen onder de 6 mm (<2%).
- Afmeting 5 is gecorrigeerd zoals eerder uitgelegd. Het corrigeren kan tot milde veranderingen in de conclusie leiden. Dit geldt in grotere mate voor de buisstuk #2 waar de kronkeligheid groter is geweest. Bijvoorbeeld voor buisstuk #2 aan de N kant is afmeting 5 het hoogst bij D met een waarde van 52.9 mm vervolgd door D met een waarde van 45.9 mm. Na correctie, dus afmeting 5C, zijn de rollen omgedraaid. Nu heeft locatie E de hoogste waarde van 37.7 mm vervolgd door locatie D met een waarde van 35.7 mm.
- Bij buisstuk #2 is afmeting 5C het hoogst bij locatie DEF-N en HAB-S. Bij buisstuk #3 is afmeting 5C het hoogst bij positie DEFG-N en HAB-S. Deze locaties komen bijna overeen met de hoogte punten van afmeting 3.
- De optelsom van afmeting 5 bij de N en S stukken is de voegwijdte, het meten waarvan vaak gebruikt wordt om hoekverdraaiing vast te stellen. Bij deze twee buisstukken heeft de spleetwijdte een asymmetrische vorm zoals vaak gezien bij de gewone hoekverdraaiing ontstaan door verticale verschilzetting in de bodem. Het enig verschil is dat de richting van de hoekverdraaiing bij deze twee stukken ook een laterale component lijkt te hebben en niet alleen de verticale.

Net zoals de twee stukken voorheen lijken deze twee stukken een scheve montering hebben gehad en er is geen bewijs van aantasting aan de afdichtingsring zoals vermeld bij de storingsregistratie van Vitens. In alle vier voorbeelden is er gezien dat de buizen scheef in de verbinding lagen. Dit suggereert dat dit de oorzaak is achter de lekkages. Het feit dat de oriëntatie van de buisuiteinden ten opzichte van elkaar niet alleen 'reguliere' hoekverdraaiing, maar ook verwringing van de mof suggereren, zou er op kunnen duiden dat de afdichting hierdoor onvoldoende werd ondersteund zodat er water onderdoor kon komen zonder dat er degradatie in het spel was. Echter zijn er geen gezonde (dus niet-lekkende) stukken geleverd. Als de gezonde stukken geen scheve montering

zouden tonen, zou er wat sterker geconcludeerd kunnen worden dat scheve montering de oorzaak achter de lekkages zijn geweest.



Figuur 20: Overzicht van afmetingen voor de stuk zonder erosie #2 (Vitens). De locatie A is wellicht de bovenkant van de leiding geweest.



Figuur 21: Overzicht van afmetingen voor de stuk zonder erosie #3 (Vitens). De locatie A is wellicht de bovenkant van de leiding geweest.

## 3.2 Stukken vanuit Evides voorzieningsgebied

### 3.2.1 Gestoorde korte grijze mof

Het eerste stuk dat geanalyseerd werd was een gestoorde korte grijze mof. Het heeft een diameter van 200 mm en is van PVC uit 1981. Volgens de storingsregistratie was er lekkage bij een insteek mof met als oorzaak grondzetting of ongelijkmatige zakking. Er was een lekkage in een flauwe bocht nabij overgang tussen 200 mm en 250 mm PVC. De leiding werd gerepareerd en 0,8 m werd vervangen met PVC-O.

Vergeleken met de stukken vanuit Vitens werd dit stuk alleen visueel geanalyseerd. Het stuk werd zoals de Vitens voorbeelden gemarkeerd – dus A t/m H langs de omtrek en N of S bij de twee kanten. In dit geval werd de mof direct in de langs richting gesneden langs bij D en H. Dus geen stap waar de mof eerder in het midden gesneden werd. De bovenkant en de stromingsrichting zijn onbekend. Foto's van het stuk worden in Figuur 22 getoond.



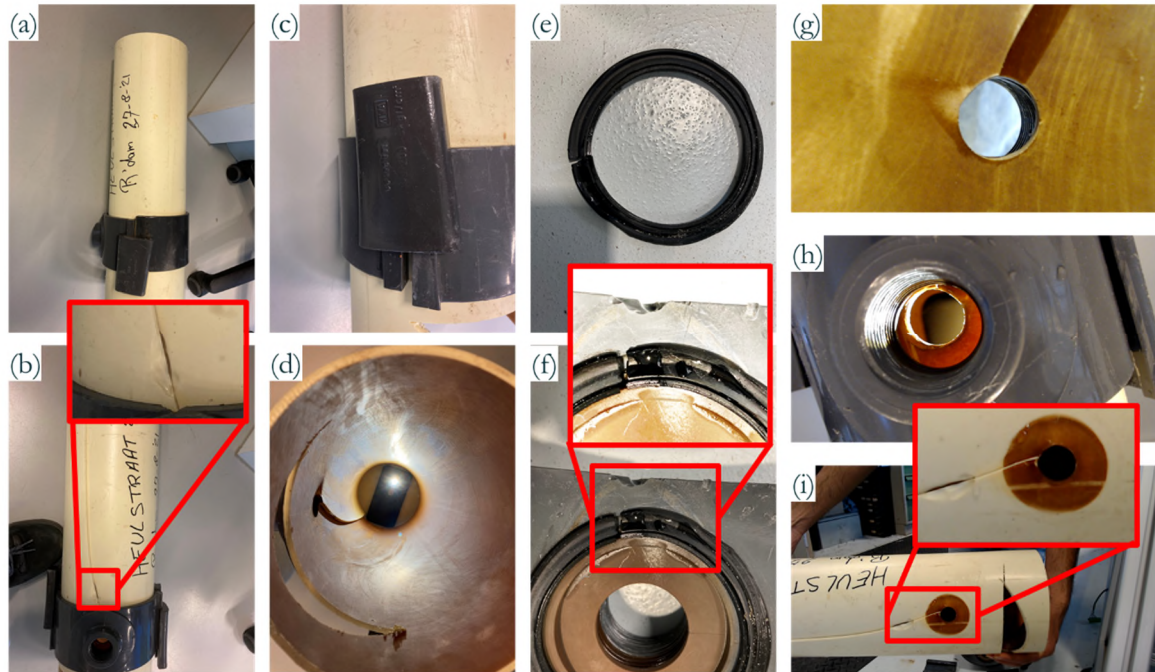
*Figuur 22: (Linksboven) Gestoorde korte grijze mof (Linksonder) Rubberring die uitsteekt vanuit zijn voeg (Midden boven) Indruk van rubberring op de buis (Midden onder) Indruk van de rubberring op de mof (Rechtsboven) Verslijting op de rubberring en zijn ligging op de buis (Rechts midden) Beschadigde rubberring (Rechtsonder) Slijtage op de rubberring op de mof.*

Ook voor het openzagen kon er gezien worden dat een stuk van de ring uit zijn voeg hing bij de GH-S kant. Na het openzagen werd het duidelijk dat bij de S kant de rubberring totaal beschadigd was waardoor het in twee grote stukken en nog één klein stuk afgebroken was. De ring was gesneden bij DS (toevallig ook waar er gezaagd werd). Bij GH-S was de ring versleten/gerodeerd (bijna alsof erop gekauwd was). De slijtsproen op de ring waren duidelijk niet vanwege het zagen. Bovendien was er een opvallende indruk zichtbaar op de buitenwand van buis en de binnenwand van de mof in de buurt van GH-S. Op de buis was de kleur van de indruk wit terwijl het oranje was op de mof. De oranje kleur zou waarschijnlijk vanwege ijzer geweest kunnen zijn (grondwater). In dit geval is het vermoeden dat de lekkage het gevolg van een montagefout is en niet vanwege de kwaliteit van de rubberring. Wellicht werd de ring vervormd ingezet – waarschijnlijk met geweld ingeduwd. De indruk is opvallend en scherp, wat suggereert dat de ring lang vervormd heeft gezeten.

### 3.2.2 Gestoord zadel

Daarna werd een gestoord zadel geanalyseerd. Het heeft een diameter van 160 mm en is van PVC uit 1974. Bij de storingsregistratie wordt de storing toegewezen aan een lekkage bij de buis omdat een PVC buisdeel gescheurd is. De oorzaak werd aan grondzetting of ongelijkmatige zakking toegeschreven. De asset werd vervangen met een passtuk PVC-O van 1,8 meter. Het is opmerkelijk dat de storing aan de buis toegeschreven wordt terwijl de storing blijkbaar

bij het zadel begint. In dit gebied worden de zadels horizontaal gelegd. De analyse was relatief eenvoudiger met alleen een visuele analyse. Het zadel werd opengemaakt door de sleutel weg te schuiven met een kunststof hamer. Foto's van de analyse worden in Figuur 23 aangetoond.



*Figuur 23: (a) Zicht van de zadel en buis bij de onbeschadigde kant. (b) Zicht van de zadel en buis bij de beschadigde kant. (c) Verschuiving van de sleutel op de zadel. (d) Zicht van de scheur van de binnenkant van de buis. (e) Rubberring met schade. (f) Schade op de rubberring en zadel. (g) Schade bij de aan boring van binnenkant. (h) Asymmetrische ligging van de zadel ten opzichte van de aan boring. (i) Schade dichtbij de aan boring aan de buitenkant.*

Het lijkt dat het zadel niet goed in zijn plaats zit. Dat is duidelijk vanuit de positie van de sleutels die verschoven zijn (Figuur 23 (a), (c)). De sleutels zaten zo verschoven ook in het magazijn van Evides, dus deze verschuiving heeft niet tijdens transport of reparatie plaatsgevonden. Bovendien zaten de twee sleutels in tegenovergestelde oriëntaties. Natuurlijk kan er niet bewezen worden of de sleutels zo in de bodem lagen. Wat er ook duidelijk werd is dat het gat van het zadel niet parallel lag met het gat van de aan boring (Figuur 23(h)). Er is ook een punt waar de omtrekken van de twee gaten samenkomen. Dat is ook de plek waarbij de scheur begint (Figuur 23(g)). De scheur loopt in de langs richting van de buis. Een paar centimeters weg van het uiteinde van de scheur is een erosiespoor zichtbaar op de scheur (Figuur 23 (b), (d)). Meest waarschijnlijk is dat er een straal water uit het zadel is gekomen wat voor de diepere erosie op de buis zorgt. Het erosiespoor daarvan is ook zichtbaar op het zadel en de rubberring (Figuur 23(e), (f), (i)). Meest waarschijnlijk is dat de verbinding heeft gelect en daarmee de erosie van het buismateriaal heeft veroorzaakt. Daardoor is de buiswand verzwakt, hetgeen uiteindelijk tot de (buis) breuk heeft geleid. Hoewel de aanleiding voor de melding van de lekkage een buisbreuk was, was de initiële faalwijze een lekkende verbinding. De oorzaak achter de lekkage van de verbinding kan inderdaad de opgegeven bodembeweging zijn in combinatie met de horizontale plaatsing van het zadel, mogelijk in combinatie met extra aanlegfouten, aangezien het zadel niet recht en sluitend gemonteerd is aangetroffen (hoewel het ook mogelijk is dat het zadel na uitname verschoven is).

### 3.2.3 Gestoord zadel (gepland voor CT scan)

Nog een gestoord zadel werd ontvangen. Het heeft een diameter van 160 mm en is van PVC uit 1970. Bij de storingsregistratie word de storing qua verschijningsvorm aangewezen als een lekkage van de buis omdat een PVC buisdeel tussen twee zadels een splitbreuk had. De oorzaak wordt als onbekend doorgegeven. De asset werd gerepareerd met een passtuk PVC-O van 1,4 meter. In Rotterdam worden de zadels horizontaal gelegd. Het analyse

was relatief eenvoudig met alleen een visuele analyse. Er werd besloten om dit zadel niet open te maken voor het huidige project. In een andere project toegespitst op CT scannen van PVC materiaal zou dit stuk gebruikt worden. Hiermee kan een niet-destructieve analyse plaats vinden. Op latere termijn zou het zadel makkelijk open gemaakt worden. Foto's van het stuk worden in Figuur 24 getoond.



*Figuur 24: (Links) Beschadigde buis naast de zadel. (Midden boven) Schade op de buis en uitsteken van rubberring vanuit zadel (Midden onder) Begin van scheur zoals gezien van buiten (Rechts) Scheur op de aanboring gezien van binnen*

Vanuit de plaatjes kan het gezien worden dat er door de erosie een scheur is ontstaan die zich in beide richtingen over de buis heeft uitgebreid. De oorzaak van de storing is de gereduceerde wanddikte als gevolg van de erosie van een waterstraal waarschijnlijk vermengd met zand. Bij het zadel is te zien dat de afdichtingsring is beschadigd. Waarschijnlijk is ook hier de oorzaak een montagefout, waarbij de ring verwrongen is in het zadel. In tegenstelling tot het vorige voorbeeld van de gestoorde zadel, zaten de sleutels in dezelfde oriëntatie en was het aanboorgat symmetrisch in het zadel, wat erop wijst dat het zadel nog op de originele plek zit en niet naderhand is verschoven.

### 3.2.4 Gezonde korte grijze mof

Naast gestoorde verbindingen/appendages werden ook gezonde verbindingen/appendages geanalyseerd. Tijdens een veldbezoek van werkzaamheden werd een gezonde korte grijze mof uitgenomen. Net zoals de moffen vanuit de Vitens voorzieningsgebied werden de buizen en mof gemarkeerd langs de omtrek met A t/m H en de twee buisstukken als N en S. Hierbij was de bovenkant van de mof bekend (tussen DE-N/S). De mof heeft de markering "160 6 kgf/cm<sup>2</sup>" en een lengte van 182 cm. Foto's van de analyse worden in Figuur 25 getoond.

Voor het opzagen werd tijdens de visuele analyse niets opvallends gemerkt. De wanddikte van de buizen leek uniform tussen 5,0-5,7 mm (afmeting 2 bij de Vitens voorbeeld). De afstand tussen de buis en mof (afmeting 3 van het Vitens voorbeeld) toont aan dat deze waarde relatief lager is bij DEFG-S en DEFG-N (dus symmetrisch).

Het opzagen van deze mof werd zoals het Vitens voorbeeld uitgevoerd. Dus, eerst werd er door het midden doorgezaagd. Om het nauwkeurig door het midden te kunnen zagen werd met een schuifmaat op de oppervlakte gekrast. Hierbij werd er gemerkt dat er veel gebrand werd waardoor het opzagen onder een afzuigkap plaats moest vinden. Er was best veel kracht nodig om de mof open te krijgen in vergelijking met de grote mof van Vitens. Nadat er door het midden gezaagd werd kon gezien worden dat veel PVC gesmolten was waardoor de randen van de doorsnede van de doorgezaagde locatie ruw was geworden. Hierdoor werd het lastig om afstand tussen binnenkant

van de mof en buis (afmeting 4) uit te voeren. De afstand tussen het midden van de mof en de einden van de buis (afmeting 5) konden er na kwalitatief en deels kwantitatief gezien worden. Bij het N-stuk was deze afmeting lager bij DEF-N met een minimum bij E-N. Deze afstand was het grootst bij HAB-N. Bij het S-stuk was afmeten nog moeilijker. Deze afmeting was hoger bij ABC-S en bij de andere locaties kon er niet gemeten worden. Kwalitatief, was deze afstand hoger bij HABC-S en lager bij EF-S. In dit geval tonen de trends aan dat de verbinding een hoekverdraaiing heeft met lagere spleetwijdte bij de bovenkant en hogere spleetwijdte bij de onderkant. Uiteraard zou dit ook tijdens de montage met opzet gemaakt kunnen zijn om een kromming in het traject te kunnen volgen.



*Figuur 25: (Boven rij) Procedure van open maken van mof. (Beneden rij, links) Binnenkant van de buis-mof. (Beneden rij, midden links) Manier om mate van verschuiving van buis in de mof af te meten. In de inset wordt de ruwheid als gevolg van het smelten van PVC aangetoond (Beneden rij, midden rechts) Slib aan de onderkant van de buis. In de inset wordt vet aan de ring aangetoond. (Beneden rij, rechts) Slib aan de onderkant van de mof.*

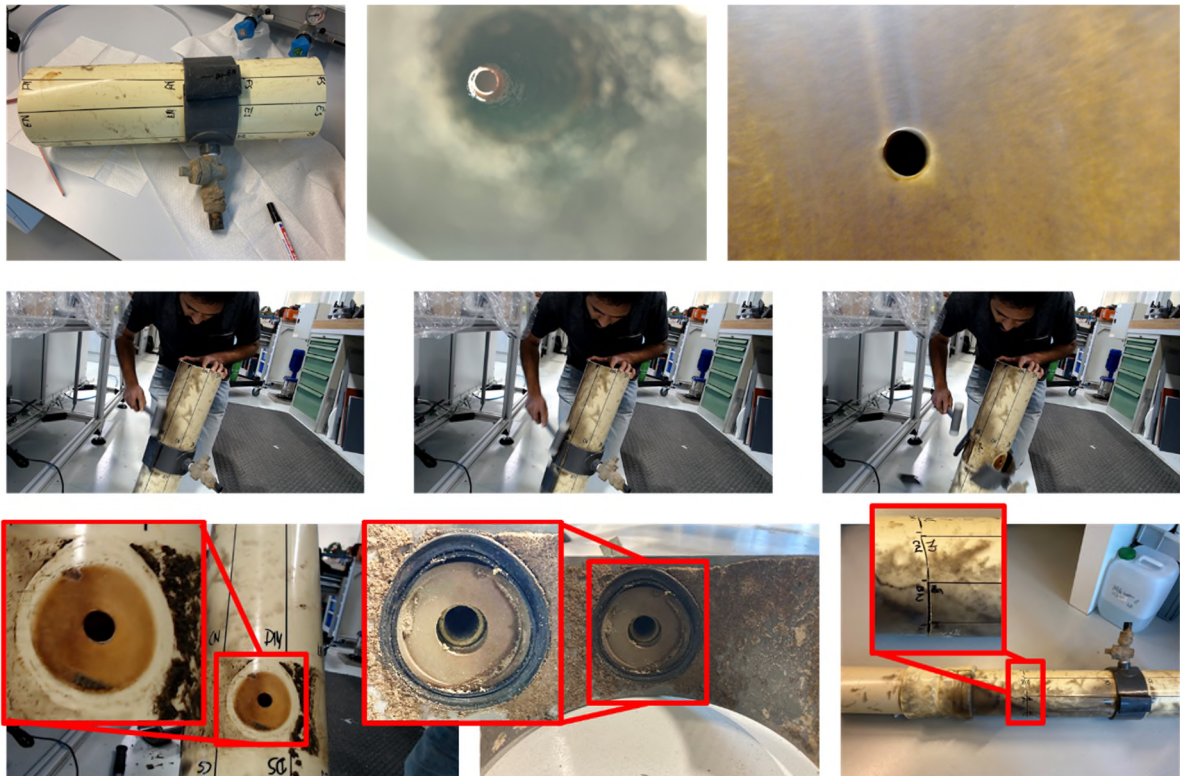
Hierna werd de mof aan de twee kanten open gezaagd om de ring vrij te maken. Er was veel kracht nodig om de mof uit te halen. De ring leek in goede staat te zijn, maar het was ook duidelijk dat er vet op gesmeerd werd om de constructie te maken. Bovendien werd er slib getroffen aan de onderkant van de buis en mof (GHA-N en HA-S).

### 3.2.5 Gezond zadel

Tijdens een veldbezoek werd ook een buis verkregen met een mof en zadel erop (een paar meter apart). De buis werd in twee stukken gezaagd om makkelijker te kunnen vervoeren. Het stuk met het gezonde zadel werd geanalyseerd. In Figuur 26 worden foto's van de analyse getoond.

Tijdens de visuele analyse voor het openzagen werd er niets opvallends gemerkt. Alleen de locatie van de sleutel was niet optimaal wat moeilijker zou worden om te draaien. Bij de aanboring leek er geen externe schade aanwezig te zijn. Nadat het zadel uitgehaald werd, kon er gezien worden dat er geen spoor van schade erbij aanwezig was. Er was slib aanwezig in de buurt van de ring (net erboven). De ring lijkt een beetje uit zijn voeg te liggen maar het is moeilijk om aan te tonen of het openmaken hierop invloed zou gehad hebben of niet.

Zoals eerder geschreven, zat het zadel op een buis in de buurt van de mof. Na het uitnemen werd de bovenkant gemarkeerd. Echter werd later de buis in twee doorgezaagd waardoor bij het stuk met de mof geen markering meer beschikbaar was. De twee stukken werden dus naast elkaar om soortgelijke patronen op de buiswand te zoeken waarmee de bijbehorende locaties gemarkeerd kon worden. Een willekeurig patroon op de buiswand heeft hiermee geholpen om de oorspronkelijke connectie tussen de twee delen te achter halen.



*Figuur 26: (Boven rij, linker kolom) Zadel als gezien van buiten (Boven rij, midden kolom) Aanboring als gezien van buiten (Boven rij, rechter kolom) Aanboring als gezien van binnen (Midden rij) Open maken van de zadel (Beneden rij, linker kolom) Buis nadat de zadel uitgenomen wordt (Beneden rij, midden kolom) Plaatsing van de ring in zijn voeg (Beneden rij, rechter kolom) Reverse engineeren van de locatie van de mof ten opzichte van de zadel die bij dezelfde buis horen.*

## 4 Beschouwing resultaten

### 4.1 Analyses van storingsen door bedrijven

Door de Watergroep, Vitens en Evides zijn resultaten van storingsanalyses aangeleverd die zijn opgenomen in de bijlagen. Een korte toelichting daarop in deze paragraaf.

#### De Watergroep

De beschrijving van de verschillende materialen en verbindingen komt overeen met de analyse van USTORE gegevens. Opmerkelijk is de uitgebreide analyse van de PVC zadels, waaruit blijkt dat afdichtingsmiddelen (pakkingen) wellicht het zwakke punt zijn. Rubberringverbindingen in AC blijken het verwachte storingverloop van de natuurrubber ringen te hebben. Het is eerder opmerkelijk dat rubberringverbindingen zo oud zijn geworden en nu pas storingsen vertonen.

#### Vitens

Naast de fysieke stukken die Vitens heeft aangeleverd, is ook een rapport van Kiwa ter beschikking gesteld over het falen van een AC verbinding met rubberringen. De aantasting van de natuurrubber ringen van de in 1958 aangelegde leiding is volgens verwachting. Wellicht ook hier opmerkelijk dat de ringen het nog zo lang hebben uitgehouden.

#### Evides

De uitgebreide analyses van de aanboorzadels levert vooral op dat de wijze van aanleg van belang kan zijn/is bij het storingsgedrag van deze aanboringen. Ook het geval van de speciale verbindingstukken tussen AC en staal laat zien dat een specifiek storingsmechanisme speelt, namelijk van corroderende bouten. De ingreep die de levensduur kan verlengen is het beter beschermen van de bouten. Voor de aanleg van nieuwe verbindingen is de instructie hierop aangepast.

#### Algemeen

De gegevens aangeleverd door de deelnemende bedrijven laten zien dat het moeilijk is om kwantitatieve analyses te doen op een relatief beperkt aantal waarnemingen. De 'in het oog springende' storingsen hebben veelal een oorzaak die relatief veel voorkomt in het specifieke geval (natuurrubber ringen, corroderende bouten). Dit geeft eventueel gerichte acties voor die specifieke gevallen, maar leren weinig over het algemene gedrag van verbindingen.

### 4.2 Beschouwing analyses USTORE en fysieke stukken

De gegevens van USTORE geven goede kwantitatieve informatie over het optreden van storingsen. De analyse laat zien dat de meest gebruikelijke type verbinding, de niet-trekvaste spie-mof verbinding, min of meer onafhankelijk van het materiaal blijkt te falen. Voor de materialen AC en PVC is dat het beste vast te stellen vanwege de grotere aantallen in relatie tot het aantal verbindingen in het leidingnet. Voor gietijzer is het beeld moeilijker vast te stellen. Ten eerste omdat de leidinglengte tussen verbindingen variabel is waardoor het relatieve aantal verbindingen per eenheid lengte niet goed is te bepalen. Ten tweede omdat het type lood-mof als apart verbindingstype wordt gezien, terwijl dit in feite ook een niet-trekvaste (of semi-trekvaste) spie-mof verbinding is.



De ‘in het veld’ geregistreerde oorzaken van falen vormen een belangrijke basis voor meer gedetailleerde analyse van storingsregistratie. Op geen van de proefstukken die we daadwerkelijk hebben kunnen onderzoeken werden deze oorzaken echter bevestigd. Eén uitzondering, wellicht, was het eerste aanboorzadel, dat inderdaad door bodembeweging zou kunnen zijn losgekomen. Daarbij mag echter worden opgemerkt dat voor dit geval de initiële verschijningsvorm van de storing genuanceerder had moeten worden vastgelegd om verklarende waarde te hebben (lekkend zadel in plaats van scheurende buis). Uit de proefstukken blijkt dat het moeilijk is om een precieze oorzaak en een gedetailleerde faalwijze aan te geven zonder aandachtig onderzoek. Toch wordt een oorzaak aangegeven, maar dit heeft het gevaar in zich dat ‘voor de hand liggende’ oorzaken en aannames worden vermeld. In de loop van de tijd neemt daardoor het aantal ‘voor de hand liggende’ oorzaken van schade toe, waardoor een schijnbare bevestiging plaatsvindt. Hierdoor kan een kring ontstaan die de ‘self fulfilling prophecy’ benadert.

Uit de gedetailleerde analyse van de stukken blijkt bijvoorbeeld herhaaldelijk dat een lekkage van de verbinding, om wat voor reden dan ook, kan leiden tot erosie van het materiaal dat vervolgens leidt tot breuk in de leiding. De schade presenteert zich dan als een leidingbreuk, eventueel als gevolg van een klein lek in het materiaal dat verder erodeert, terwijl de werkelijke oorzaak een lekkende verbinding was.

Dit alles pleit ervoor om terughoudend te zijn met de kwalitatieve informatie over type storing en mogelijke oorzaak zonder gedegen onderzoek. Voor de hand ligt het dan om aan te bevelen om storingen aan een meer gedetailleerd onderzoek bloot te stellen door bijvoorbeeld materiaal zo goed mogelijk veilig te stellen voor latere analyse in geconditioneerde omstandigheden in een werkplaats of laboratorium. Het zou goed zijn hier aandacht aan te besteden en proberen de contouren van een systeem te ontwerpen om meer objectieve informatie te verkrijgen uit de werkelijke storingen.

In dat verband is het goed om het onderzoek naar de oorzaak van het falen van natuurrubber ringen in AC en gietijzer verbindingen in herinnering te brengen. In bijlage van dit rapport wordt nog een korte beschouwing hiervan gegeven. Dit onderzoek is uitgevoerd in de periode 1949-1960 en was zeer gedegen en zorgvuldig. Beroemde namen als drs J Rook, prof Kluivert worden als auteur vermeld, en vele andere illustere personen uit de geschiedenis van de drinkwatervoorziening waren betrokken. Op basis van zeer gedegen onderzoek komt het onderzoek tot de onomstotelijke conclusie dat natuurrubber ringen zeer gevoelig zijn voor biologische aantasting. Dit heeft begin jaren 60 geleid tot de ontwikkeling, normering en certificering van de synthetische rubbers en daarmee tot de impliciete ban op de toepassing van natuurrubber. Gezien het enorme belang van synthetische rubberringen in de huidige leidingnetten is dit onderzoek van onschatbare waarde gebleken. Het is daarbij ook opmerkelijk dat er in totaal 651 rubberringen werden aangeleverd van leidingen ‘in het veld’ uit het leidingnet. De totale lengte van het toenmalige leidingnet was ongeveer 30% van het huidige leidingnet<sup>9</sup>. Hierdoor was de kwaliteit van het onderzoek zo goed dat het gerechtvaardigd was om deze vergaande conclusies te trekken.

### 4.3 Conclusies

- Het meest gebruikelijke verbindingstype in AC en PVC (ruim 80% van het leidingnet), de niet-trekvlaste spie-mof verbinding, heeft in beide materialen een storingsfrequentie van 60,2 tot 68,0 storingen per miljoen verbindingen per jaar.
- Op basis van literatuur of ervaringen van bedrijven is geen duidelijk en meer algemeen geldend degradatie- of verouderingsmechanisme vast te stellen. Er zijn anekdotische gevallen, die in veel gevallen zijn te wijten aan aanleg onvolkomenheden of onvoldoende kwaliteit van de toegepaste materialen.
- “In het veld” vastgestelde storingsoorzaken en faalwijzen geven geen betrouwbaar beeld van de werkelijke oorzaken bij de onderzochte verbindingen.

---

<sup>9</sup> Hierbij moet ook worden opgemerkt dat er toen ongeveer 150 drinkwaterbedrijven waren die dus gemiddeld 4-5 rubberringen per bedrijf ter beschikking stelden.

- In dit onderzoek is geen eenduidig degradatiemechanisme specifiek voor verbindingen vastgesteld. Tijds- of toestandsafhankelijke aantasting van het afdichtingsmiddel is op basis van de beschikbare gegevens niet vastgesteld, noch is progressieve vervorming van de verbinding gezien.
- Montageonvolkomenheden lijken een dominante oorzaak te zijn van storingen die zijn opgetreden in de geanalyseerde stukken.

#### 4.4 Aanbevelingen

Betrouwbaar vaststellen van de oorzaak van falen van een verbinding gaat makkelijk fout ter plaatse van de storing, zoals uit het onderzoek aan de geleverde stukken blijkt. Om dit goed te kunnen doen, moet een gestoorde verbinding zorgvuldig worden uitgenomen en aandachtig nader worden onderzocht, bij voorkeur in een werkplaats of laboratorium. Bij voorkeur door een team van gewezen deskundigen die systematisch onderzoek kunnen doen aan het storingsgedrag van verbindingen, zodat zij de benodigde aandacht, routine en expertise kunnen opbouwen. Op termijn zal dit een goed beeld opleveren van storingsmechanismen. In de huidige studie is het proces van destructief onderzoek en bijbehorende analyse zorgvuldig opgenomen. Dit kan een basis vormen voor een kennisbank voor hoe drinkwaterbedrijven zichzelf soortgelijke analyses uit kunnen voeren. Analyse van nieuwe type verbindingen/appendages zal deze kennisbank alleen maar verbreiden. Zo'n kennisbank handig zal handig zijn in het opleiden van andere destructief onderzoeken in de toekomst.

Het onderzoek leert ook dat een beperkt aantal praktijkgevallen geen goed beeld geeft van algemene processen, maar wel verrassende nieuwe fenomenen laat zien. Het praktijkonderzoek is weliswaar kostbaar door het arbeidsintensieve karakter ervan, in combinatie met de noodzakelijke kennis en ervaring.

Er is vastgesteld dat het aantal storingen in het type niet-trekvast spie-mof verbinding onafhankelijk is van het materiaal van de leiding AC of PVC. Ongeveer 80% van het leidingnet is gemaakt met deze materialen, hetgeen betekent dat er naar schatting 12 miljoen<sup>10</sup> verbindingen van dit type zijn. Bij een storingsfrequentie van ongeveer 60-65 per miljoen verbindingen per jaar levert dit ongeveer 750 storingen per jaar<sup>11</sup>. Als 10% hiervan kan worden aangeboden voor nader onderzoek geeft dit binnen een afzienbare periode van enkele jaren een goede inschatting van het storingsgedrag op.

Het opzetten van een eventueel protocol voor uitname en onderzoek van gestoorde verbindingen zal in nauwe samenwerking met drinkwaterbedrijven gedaan moeten worden om een goed werkbare procedure te kunnen komen.

De storingsfrequentie 'per verbinding' is extreem laag: 0,00006 per verbinding per jaar, terwijl het handelingsperspectief voor verbetering voornamelijk klein is. Ook het observeren van eventuele verslechtering van verbindingen is niet goed mogelijk op dit moment. Dit heeft tot gevolg dat de best toepasbare onderhoudsstrategie het storingsafhankelijk onderhoud is, totdat meer inzicht bestaat in gedrag van de verbindingen. De randvoorwaarden voor andere onderhoudsstrategie, gebruiksduurafhankelijk of conditieafhankelijk is dat er een duidelijk tijdsafhankelijk of omgevingsafhankelijk of conditieafhankelijk verslechterings- of storingsproces moet zijn. Het aanbevolen onderzoek aan uitgenomen verbindingen kan hier uitsluitsel over geven, zodat op termijn een andere onderhoudsstrategie kan worden overwogen.

Het nadeel van de storingsafhankelijke strategie is de onzekerheid over tijdstip en omvang van de storing en de daaruit voortvloeiende onzekerheid in de planning van capaciteit en budget. Het voorgestelde praktijkonderzoek zal

---

<sup>10</sup> 80% van 120.000 km leiding is 96.000 km. Met een gemiddelde buislengte van 8 meter levert dit 12 miljoen verbindingen in de leidingen op. Uiteraard is dit een ruwe schatting, maar de orde grootte van 10-15 miljoen verbindingen geeft een realistisch beeld. Er is geen rekening gehouden met extra verbindingen aan weerszijden van appendages. Als dat ook wordt meegenomen, dan is 12 miljoen een conservatieve schatting.

<sup>11</sup> Een schatting van de analyse van een storing is ongeveer 6 uur per storing. Bij een tarief van €160,- is dat jaarlijks ongeveer 75 k€

voldoende uitsluitel kunnen geven over de haalbaarheid van een gebruiksduurafhankelijke of conditieafhankelijke onderhoudsstrategie, die een beter planbare en beheersbare onderhoudsstrategie haalbaar kan maken. Eventueel kan de gebruiksduurafhankelijke of conditieafhankelijke strategie op situaties worden toegepast waar de randvoorwaarde voor de storingsafhankelijke strategie (geringe gevolggkosten van falen) niet geldig zijn en het dus rendabel is om meer te investeren in het voorkomen van falen.

## 4.5 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?

### 4.5.1 De Watergroep

Het overgrote deel van het onderzoek naar faalmechanismen en storingen werd tot op heden uitgevoerd op leidingmateriaal, niet op de verbindingen tussen buizen en appendages. De opzet van het project was om bestaande methoden voor niet-destructieve conditiebepaling van verbindingen in kaart te brengen en deze te evalueren aan de hand van minstens 1 concrete case. Aan de hand van de analyse van storingsgegevens en exitbeoordelingen werd echter vastgesteld dat eerst meer kennisopbouw nodig is over faalmechanismen van verbindingen. De geregistreerde, kwalitatieve, informatie over faalmechanismen bij storingsregistratie blijkt niet betrouwbaar. Ook de identificatie van waar de storing zich voordeed (leiding, verbinding, hulpstuk) kan in twijfel worden getrokken omdat het onderliggende mechanisme niet goed onderschreven is en niet eenvoudig in het veld vast te stellen.

Binnen De Watergroep wordt eveneens aan storingsregistratie gedaan, en de conclusie is dus evenzeer van toepassing. Beter onderzoek naar faalmechanismen, resulterend in een andere classificatie bij registratie van lekken, zal nodig zijn om de data te verbeteren. Het leert ons ook dat we voorzichtig moeten zijn met het meenemen van kwalitatieve data bij analyses op de huidige data set.

Daarnaast is er de observatie dat er vaak een link kan gelegd worden tussen het falen van de verbinding en onvolkomenheden bij aanleg. Dit bevestigt nogmaals het primaire belang van correcte aanleg om problemen op langere termijn te verminderen. Dat betekent: meer opleiding van eigen personeel alsook evaluatie van de opleidingsgraad binnen het personeel van onze aannemers. Ook hier zijn exitbeoordelingen en een beter begrip van de faalmechanismen een belangrijk ondersteunend gegeven bij het opmaken van opleidingsmateriaal. Uiteraard speelt niet enkel de manier van aanleggen, maar ook de veroudering van het materiaal een belangrijke rol bij het falen van een verbinding.

### 4.5.2 Vitens

In het rapport is onderzoek gedaan naar faalmechanismen voor diverse verbindingen bij een select aantal waterbedrijven. Voor Vitens zijn de resultaten niet direct toepasbaar en vraagt om een eigen onderzoek naar bedrijfseigen assets en storingen. (Aangezien we dat laatste niet centraal registreren in USTORE). De uitkomsten van dat onderzoek kunnen we gebruiken om, bij storingen van een specifieke verbindingen, een vertaalslag te maken naar soortgelijke assets in de buurt. Een mogelijkheid is onderzoek naar in een bepaalde periode en materiaalsoort, ongetwijfeld eenzelfde koppeling/appendage gebruikt. Daarna zouden we die vertaalslag kunnen gebruiken om gebieden te classificeren voor het beter/sneller kunnen lokaliseren van lekkages, of bij de langeretermijn prioritering van leidingen (in het geval van koppelingen) in die specifieke gebieden.

## Geciteerde werken

- [1] R. H. S. Beuken, „Afsluitbeheer,” KWR, Nieuwegein, 2022.
- [2] Vewin, „Drinkwaterstatistieken 2022: van bron tot kraan,” 2022.
- [3] R. H. Beuken en A. Moerman, „Uniforme storings registratie (USTORE): Praktijkcode voor het beheer van storingsregistratie leidingen (PCD 9),” KWR, 2017.
- [4] G. A. M. Mesman en K. A. van Laarhoven, „BTO 2018.009 Kennisregels PVC leidingen, update 2017,” KWR Water Research Institute, Nieuwegein, 2018.
- [5] J. J. Rook, „Microbiological deterioration of vulcanized rubber,” *Applied Microbiology*, vol. 3, pp. 302 - 309, 1955.
- [6] M. Kwakkel, I. Vloerbergh, P. van Thienen, R. Beuken, B. Wols en K. van Daal., „Uniform failure registration: from data to knowledge,” in *IWA-LESAM conference*, Sydney, 2013.
- [7] B. A. Wols en P. van Thienen, „Impact of weather conditions on pipe failure: a statistical analysis,” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 63, nr. 3, pp. 212-223, 2014.
- [8] R. Beuken, *Personal communication*, 2022.

# I Analyses uitgevoerd door drinkwaterbedrijven zelf of uitbesteden door drinkwaterbedrijven

Hierbij worden een aantal analyses uitgevoerd door drinkwaterbedrijven zelf of door externe partijen in opdracht van de drinkwaterbedrijven worden samenvat. De samenvattingen hierin zijn op rapportages gedeeld door drinkwaterbedrijven gebaseerd. Dit is dus geen werk van KWR.

## I.1 De Watergroep – Gegevens over falen op vlak van verbindingen en appendages (opgesteld door Filip Vancoillie, Griet De Winter)

In een beknopte rapport ontvangen van de Watergroep wordt er in een beknopte manier hun ervaring met verbindingen en appendages samenvat. De gegevens daarin zijn niet-kwantitatief en zijn gebaseerd op gesprekken met mensen uit het veld. Er wordt per materiaal beschreven.

### **Vezelcement**

Bij vezelcement leidingen worden volgende faalmechanismen gerapporteerd met betrekking tot verbindingen:

- Voor oudere leidingen gaat het nagenoeg altijd over falen van de moffen, of met name het falen van de dichtingen in de moffen. Zeker in de aanlegperiode tot ongeveer midden de jaren '60, toen er van natuurrubber dichtingen gebruik gemaakt werd. Deze zijn intussen allemaal sterk verouderd. Ook was er vroeger bij natuurrubber een grotere variatie in producteigenschappen omdat het een natuurlijk product betreft.
- Voor de simplexkoppelingen kon het ook voorvallen dat de rubberring niet op de juiste plaats zat bij aanleg of vervormd werd bij montage. Dit kan uiteraard na verloop van tijd ook resulteren in lekkende dichtingen en aangetaste moffen.
- Het uitloggen van de mof of van het spie-eind kan echter ook een oorzaak zijn van falen. Vaak is het op moment van falen moeilijk om vast te stellen welke problematiek eerst is opgetreden.
- Factoren die een rol kunnen spelen bij falen van verbindingen:
  - Grondzettingen, vb ten gevolge van werken in de buurt of lange periodes van droogte.
  - Na lekherstel: gevolgschade na lekherstel kan optreden vb omdat de dichting in een niet-vervangen mof zich gezet heeft bij wegvallen van de druk en daarna, bij het terug opbouwen van de druk, niet meer afdicht.
  - Beschadiging door derden, maar ook zware bovenlasten (vb opslag van bouw materiaal, zandophoping, zwaar transport daar waar dit er vroeger niet was,...)

### **Grijs gietijzer**

De meest geobserveerde problemen met gietijzer zijn eerder gelinkt aan drinkwaterkwaliteit en drukvalopbouw/beperking van de capaciteit van de leiding omwille van opbouw van corrosieproducten en andere afzetting op de binnenwand. Dit heeft weinig te maken met de verbindingen zelf en is hier m.i. niet echt relevant.

Het enige wat hier het vermelden waard lijkt, is het falen van loodvoegen. In welke mate dit soort verbinding in het verleden binnen De Watergroep werd toegepast is eigenlijk onbekend. We hebben daarover dus geen data.

Overige faalmechanismen zijn dwarsbreuken van de leiding zelf, daar waar de leiding verzwakt is door graffiteren of corrosie; in dit kader eveneens niet relevant.

### **Staal**

Dé oorzaak voor lekken bij stalen leidingen is uiteraard corrosie, in geval van ondermaatse of onderbroken kathodische bescherming of een beschadiging van de bekleding aan binnen- of buitenzijde. In de meeste gevallen

gaat het dan over putcorrosie in de staalwand. Er kan ook corrosie optreden aan de lasverbinding tussen de buisdelen, uiteraard. Binnen De Watergroep wordt dit zelden gemeld.

## PVC

Volgende faalmechanismen werden binnen De Watergroep gemeld voor wat betreft verbindingen van PVC leidingen:

- Gelijmde moffen uit de jaren '70, met verouderde lijmverbinding.
- Aanleg onder spanning: dit heeft voornamelijk gevolgen op termijn voor de leidingen zelf, maar kan ook leiden tot teveel spanning ter hoogte van de mof en dus lekken aan de mof.
- Grondzetting speelt bij PVC zeker ook een rol, opnieuw voornamelijk als oorzaak van spanningen in het materiaal. Maar indien er door grondzetting te veel hoekverdraaiing optreedt aan de verbinding, kan dat zeker ook lekken ter hoogte van de moffen tot gevolg hebben.

Twee cases van PVC appendages waar binnen De Watergroep problemen mee gemeld werden:

- De "witte raccords" (Figuur 27): een specifiek type koppeling in PVC, gebruikt op het aanboorzadel bij een aftakking, dat gemakkelijk afbreekt. Het gaat over dit type materiaal, dat naar verluidt eveneens uit de jaren '70 zou zijn:



Figuur 27: De "witte raccords"

- PVC aanboorzadels (Figuur 28 en Figuur 29): slechts in bepaalde gebieden binnen de Watergroep effectief geplaatst, periode eind jaren '60. Deze aanboorzadels hebben een scharnier aan 1 zijde en zijn vastgezet met een spie aan de andere zijde (zie foto's). Bij testen bleken deze aanboorzadels aan elke verbinding te lekken: zowel aan het aanboorzadel zelf, als aan de koppeling (messing) die in het aanboorzadel gedraaid zit, als daar waar de PE leiding in de koppeling gaat. Zie foto voor "dissectie" van het aanboorzadel. Alle dichtingen (rubberen O-ringen van aanboorzadel en in messing insteekkoppeling) bleken verstorven, alsook de schroefdraadafdichting van de messing koppeling in het aanboorzadel. Het gaat om heel kleine lekken. → algemene opmerking: dit is één voorbeeld van een lekkend type ABZ, maar mogelijk zijn er andere types waarmee ook problemen zijn qua afdichting. Aangezien het gaat om kleine lekken, zijn ze moeilijker te detecteren...



*Figuur 28: PVC aanboorzadels*



*Figuur 29: Een open gemaakte PVC aanboorzadel*

## PE

PE leidingen worden binnen De Watergroep voornamelijk aangelegd voor aftakkingen, dus enkel in kleine diameters (tot en met DN50). Het leidingmateriaal zelf levert weinig problemen op. Qua verbindingen gaat het over schroefklemkoppelingen (weinig tot geen meldingen van lekken) en push-fitkoppelingen. Bij deze laatste kunnen bij montage lekken ontstaan door de PE leiding onder te grote hoek in de push-fit koppeling te duwen (verschuiving / vervorming van de afdichting), maar dit wordt dan meteen vastgesteld en hersteld. Er is weinig gekend over lekken op termijn bij dergelijke verbindingen.

## Ductiel gietijzer

Er zijn weinig meldingen van lekken of falende ductiel gietijzeren leidingsystemen. Men kan veronderstellen dat ook hier de mof-spieverbinding en de bijhorende elastomeer afdichting kan falen bij slechte montage of bij ernstige grondzetting. Bij dat laatste speelt allicht ook een rol of het leidingsysteem trekvast werd aangelegd of niet.

In theorie is uiteraard ook mogelijk dat, bij beschadiging van de beschermende bekleding intern of extern, corrosie optreedt, maar wij beschikken niet over data van extreme corrosie bij ductiel gietijzer leidingsystemen die leiden tot lekken.

### **Siderocement of versterkt beton**

Binnen De Watergroep is niet zoveel siderocement of versterkt beton meer aanwezig: voor versterkt beton zou het nog om 14 km leiding gaan, voor siderocement over 51 km leiding (allemaal  $\geq$  DN500). Daar waar het wél aanwezig is, gaat het echter over grote diameters en dan heeft een lek natuurlijk meer impact. Hierover hebben we eveneens weinig data, maar we weten dat de gelaste verbinding bij de siderocement leidingen zeer star is en dus nauwelijks hoekverdraaiing toelaten (grondzetting). Bij de versterkte betonnen leidingen het ook over moffen (met “rolvoeg”), waarbij dezelfde fenomenen kunnen optreden als bij vezelcement (onjuist geplaatst, verschoven of vervormde dichtingen, verouderde dichtingen...). Gezien de geringe hoeveelheid van dit materiaal zijn er nagenoeg geen data over lekken of storings bij siderocement of versterkte betonnen leidingen.

### **Appendages**

Aangezien het hier gaat over falen van de appendage als onderdeel van het leidingsysteem, en niet van de appendage zelf, kunnen we volgende zaken identificeren:

- Flensverbindingen (voor afsluiters, brandkranen of hulpstukken): aangezien er heel wat factoren zijn die bepalen of een flensverbinding op de langere termijn lekvrij blijft, is het eigenlijk te verwachten dat hiermee wel degelijk problemen zijn. Als dit echter gaat over kleine lekken, blijft dit allicht vaak ongedetecteerd. Volgende factoren spelen een rol: vorm van de flens, bekleding van de flens, montage methode en gereedschap, materiaal van bouten, moeren en sluitringen, toepassing van glijmiddel, materiaal en vorm van de dichting, niet-ideale plaatsing omwille van imperfecte uitlijning. Ook hier kan grondzetting gevolgen met zich meebrengen als de flensverbinding slecht ondersteund is. Door het gewicht van de appendages, doorgaans in gietijzer, is een goede ondersteuning nodig om spanningen op de flensverbinding onder controle te houden.
- Aanboorzadels: zie boven voor PVC, maar er zijn in verhouding veel meer gietijzeren aanboorzadels geplaatst (met gietijzeren schelpen op kunststof leidingen of met RVS beugel op staal, vezelcement en gietijzer). Deze kunnen ook falen. Met name vermoeden wij volgende faalmechanismen, maar er zijn weinig gegevens:
  - Falen van de cassette of het afdekplaatje in geval van aanboorzadels met geïncorporeerde zitting voor de insteekschuif (voor aanboren onder druk).
  - Falen van de dichting van het aanboorzadel
  - Falen van de schroefdraadverbinding met de dienstkraan of de koppeling op het aanboorzadel
  - Falen van de aangelaste RVS beugel ten gevolge van corrosie.
- Veel van bovenstaande kan algemeen gecatalogeerd worden onder de noemer “dichtingen”. Historisch zijn er veel verschillende types en vormen van dichtingen gehanteerd en elke dichting is een potentieel lek, of het nu tussen een flens zit, in een mof, in een aanboorzadel, rond een afsluiterschuif of in een brandkraan...

## **I.II Vitens – onderzoek aan rubberen ring AC leiding DN 800 uitgevoerd door KIWA (opgesteld door Hans Naus, 2018)**





## Voorwoord

Vitens heeft in Arnhem een asbestcementleiding (AC leiding) DN 800 waarbij regelmatig lekkages optreden in de koppelingen tussen twee buissegmenten. In juni 2018 is een lekkende koppeling gedemonteerd. De koppeling bleek scheef te zitten. De rubberen ring vertoonde onvolkomenheden. Het omliggende asbestmateriaal was beschadigd. De AC leiding ligt in schoon zand boven het grondwaterpeil. De leiding is in 1957 aangelegd.



Foto 1. Ligging DN 800 AC leiding (foto Vitens)



Foto 2. Lekkende koppeling (foto Vitens)



Foto 3. Beschadigde AC leiding door uitspoel drinkwater (foto Vitens)

Vitens heeft Kiwa gevraagd de ring te onderzoeken en de mogelijke oorzaak van het falen van de afdichting te achterhalen en mogelijk te voorspellen wanneer het kritieke punt wordt bereikt.

Het Kiwa laboratorium in Apeldoorn heeft de door Vitens toegestuurde rubberen ring DN 800 op 17 oktober 2018 ontvangen.

Het monsternummer is LC 16372.



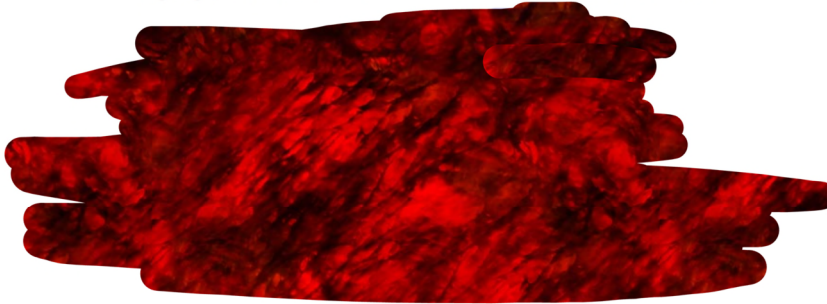
### 3 Conclusies

Op basis van de resultaten van het onderzoek aan de gefaalde rubberring kan het volgende worden geconcludeerd:

- De ring vertoont grote aantasting langs de rand aan de waterzijde in verschillende stadia;
- de aantasting is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van microbiologische activiteit;
- het falen van de ring is zeer waarschijnlijk het gevolg van deze aantasting in combinatie met het verschuiven van de koppeling;
- er dient rekening mee te worden gehouden dat meerdere ringen in deze en overeenkomstige AC leidingen zijn aangetast; er is waarschijnlijk een verhoogd risico voor nieuwe lekkages.

Rijswijk, december 2018

Kiwa Nederland B.V.



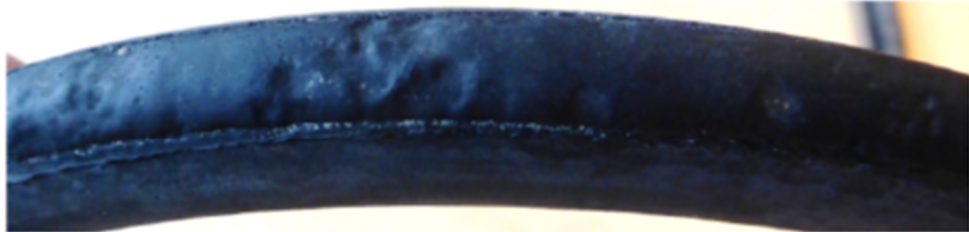


Foto 32. Positie tussen 0° en 60°. Geen scheurtjes in de rand aan de buitenzijde zichtbaar bij buigen van de ring



Foto 33. Positie in de buurt van 90°. Veel scheurtjes in radiale richting in de rand aan de buitenzijde

>



Foto 34. Positie in de buurt van 180°. Grote scheuren in radiale richting in de rand aan de buitenzijde zichtbaar bij buigen van de ring. Ook kleine gaatjes zichtbaar

### I.III Evides – Lek 160 mm PVC 1969 (opgesteld door Christian Kivit, 2021)

#### Context

De lekkage heeft geleid tot een ontgrondingskuil van circa 4x2 meter. De schade voor de omgeving was niet noemenswaardig groot. De lekkage viel samen met een dooiperiode na een periode van strenge vorst waardoor het aantal lekkages in regio Rijnmond gedurende een week enkele malen hoger lag dan normaal.

De spanning op de buisdelen aan weerszijde van de lekkage lijkt beperkt: na het doorzagen is er geen zichtbare verspringing van de buisdelen.

Op 9 maart is bij de AMI loods een buis aangetroffen. Aangezien het faalmechanisme past bij het lopende onderzoek naar zadellekkages zijn de aangeleverde objecten hieronder nader onderzocht.

Op 30 maart 2020 is in dezelfde straat een lekkage geweest. Het betrof een zadellekkage met beperkt uitstroomdebiet.



Figuur 30: Bron van lek

#### Beoordeling

Bij de AMI loods is een buis met een lengte van circa 3 meter met hierop 2 PVC aanboorzadels aangeleverd. De buis is doormidden gescheurd. Vanuit het eerste zadel loopt een lengte scheur met een lengte van circa 1,5 meter welke op circa 20 cm van het tweede zadel stopt. Beide aanboringen zitten aan de westzijde van de buis, waar de aansluitleiding de straat oversteekt naar huisnummers X en Y. Foto's die de beoordeling ondersteunen zijn in Figuur 30 en Figuur 31 te vinden.

De beoordeling van O&B: *“Na opgraven is geen puin of andere obstakel aangetroffen onder de buis. Waarschijnlijk zat er spanning op de buis.”*

De oorzaak is een falende afdichting tussen de buis en het zadel waardoor een initieel klein lekdebiet direct naast het zadel de buiswand heeft uitgeschuurd. De verminderde wanddikte vormde het initiatiepunt van de lengtescheur.

De gemeten wanddikte is circa 5,0 mm, wat 0,3 mm groter is dan de geregistreerde wanddikte.

Een aantal observaties vallen op:

- De rubberen ring is in redelijk goed staat; er is geen uitschuring of scheur zichtbaar
- De ruimte tussen de buis en zadel bedraagt 5-8 mm. Het is aannemelijk dat een deel van deze ruimte is ontstaan door de lengtescheur. De oorzaak van deze ruimte is onduidelijk.
- De twee aanboorzadels verschillen: 1 is van A en 1 van B. Het is waarschijnlijk dat het aanlegjaar niet gelijk is. Op deze locatie zijn aansluitingen met aanlegjaar onbekend, 1991 en 1993 aanwezig. Het zadel waar de lekkage plaatsvond betreft een zadel van B.

Hetzelfde faalmechanisme is geconstateerd bij de volgende lekkages:

- S1 (315PVC'81, B zadel op 1 juli 1987),
- S2 (160PVC'70, WD4,7 met B zadel op 13 juni 2019),
- S3 (160PVC'73 met B zadel op 25 juni 2019) en
- S4 (110PVC'68 WD2,7 type zadel onbekend op 3 januari 2020).

Samen met lekkage in de S0 liggen deze lekkages binnen een straal van 2,5 km.

Deze lekkages zijn onderzocht vanwege het grote effect op de omgeving. Het is echter waarschijnlijk dat dit faalmechanisme veel vaker voorkomt.



*Figuur 31: (Links) Uitschuring van de buiswand direct naast het zadel. Op één locatie is de hele buiswand weggescheurd en vormt het initiatiepunt van een lengtescheur. (Midden) Lengte scheur met als initiatiepunt de plek waar de buiswand is uitgescheurd. (Rechts) Binnenkant PVC aanboorzadel*

#### I.IV Evides – Analyse zadellekages (opgesteld door Patrick van den Ende, 2021)

##### Aanleiding

In 2019 waren er diverse zadellekages in Rotterdam met groot effect op de omgeving. Daarnaast blijkt er een groot verschil te zijn in aantallen zadellekages tussen Rijnmond en ZeeBraGO (Zeeland, Brabantse Wal en Goeree-Overflakkee). Deze zaken zijn aanleiding geweest om een data-analyse uit te voeren naar zadellekages. In de eerste plaats is het van belang om grip te krijgen op het fenomeen zadellekages: waar en hoe vaak komt het voor? Met deze informatie kan het handelingsperspectief worden geschetst: wat kunnen we doen aan de huidige problematiek en hoe kunnen we deze in de toekomst voorkomen?

In het onderzoek staat de volgende vraag centraal: “wat is de verklaring voor het verschil in aantal zadellekages tussen Rijnmond en ZeeBraGO?”

##### Aanpak

Voor dit onderzoek zijn alle lekkages in de periode 2017-2020 geanalyseerd. Het betreft de storingen op leidingen in zowel Rijnmond als ZeeBraGO. De focus ligt op storingen in het drinkwaternet.

##### Resultaten

In onderstaande paragrafen worden de resultaten van het onderzoek toegelicht. Hierbij is gewerkt van grof naar fijn:

- i. Aantal zadellekages
  - Per materiaal
  - Per gemeente
- ii. Zadellekages op PVC-leidingen
  - Drukklasse
  - Diameter
  - Aanlegjaar

In het tweede deel wordt naast de focus op PVC ook de focus op Rotterdam gelegd aangezien hier het zwaartepunt ligt van de zadellekkages op PVC-leidingen.

#### Aantal zadellekkages per materiaal en gemeente

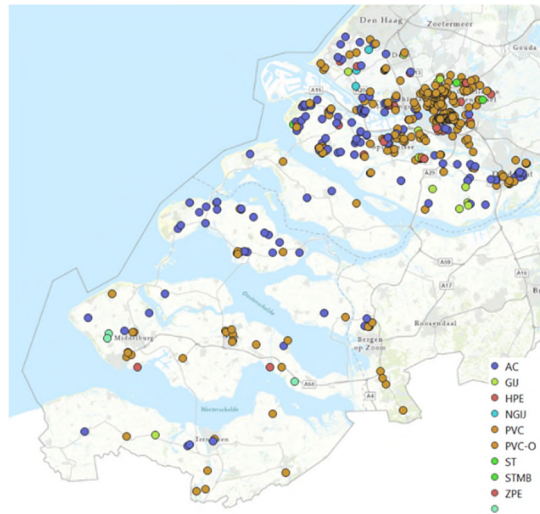
In onderstaande tabel (Tabel 9) is het aantal zadellekkages per materiaal weergegeven. Gezien de hoeveelheid leidinglengte van AC en PVC is het naar verwachting dat deze twee materialen de meeste lekkages hebben. De storingsfrequentie van zadellekkages op AC-leidingen is in Rijnmond 10x hoger dan in ZeeBraGO, voor PVC-leidingen is de storingsfrequentie in Rijnmond ruim 5x hoger dan in ZeeBraGO. Voor alle materialen geldt dat de storingsfrequentie in Rijnmond minimaal een factor 5 groter is dan in ZeeBraGO. Vanwege de potentiële grotere effecten wordt in volgende paragrafen ingezoomd op zadellekkages op PVC-leidingen. De geografische spreiding van zadellekkages is te vinden in Figuur 32.

In onderstaande grafiek (Figuur 33) is de storingsfrequentie weergegeven van zadellekkages per gemeente. Gemeente Rotterdam springt er zowel in absolute als in relatieve zin uit. Het overgrote deel van de zadellekkages in Rotterdam betreft lekkages op PVC-leidingen. In veel andere gemeenten is een gelijkmatiger spreiding te zien van zadellekkages over de verschillende materialen.

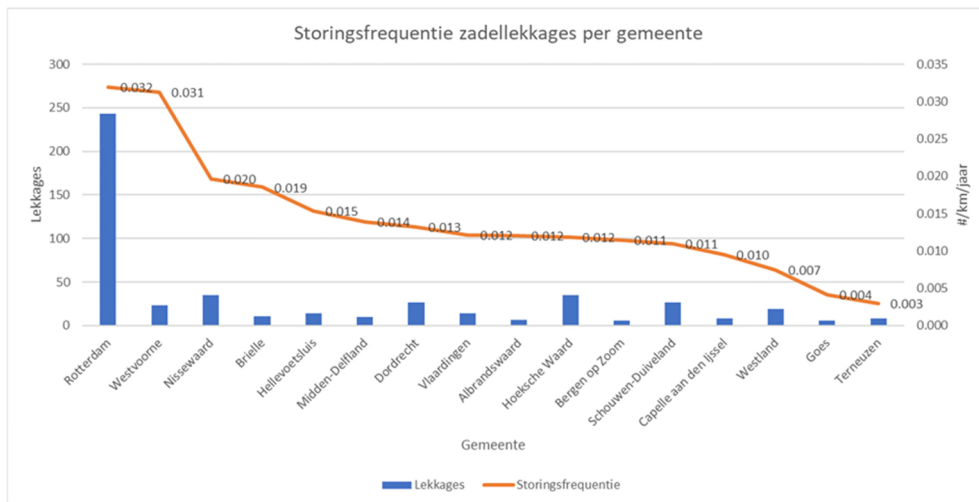
De storingsfrequentie wat betreft zadellekkages per gemeente is ook opgesplitst in de materialen AC (Figuur 34) en PVC (Figuur 35). Opvallend aan de grafiek van AC is dat de 'top 5' gemeenten bestaat uit de gemeente Rotterdam en alle gemeenten op Voorne-Putten. Voor de storingsfrequentie van zadellekkages op PVC-leidingen is duidelijk te zien dat de gemeente Rotterdam eruit springt. In de volgende paragrafen wordt ingezoomd op zadellekkages op AC- en PVC-leidingen. Hierbij ligt de focus op PVC-zadellekkages in Rotterdam.

Tabel 9: Aantal zadellekkages in 2017-2020 per materiaal

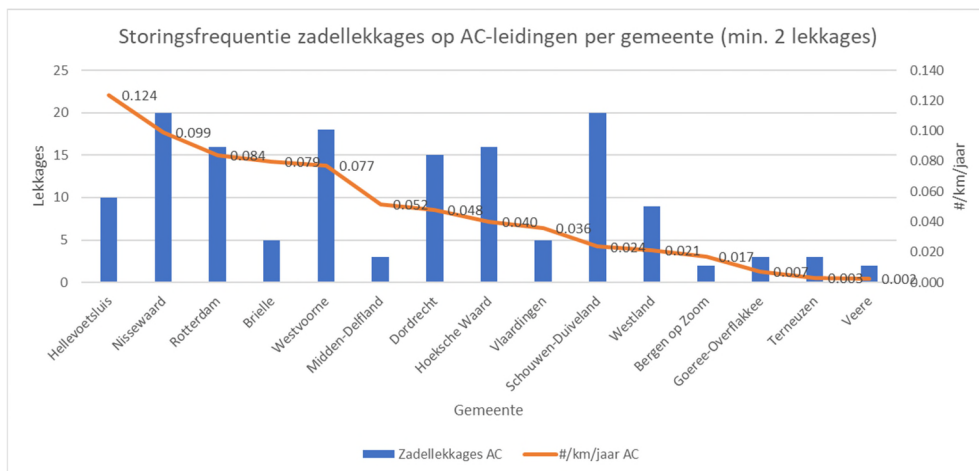
Materiaal	ZeeBraGO		Rijnmond	
	Aantal	Storingsfrequentie	Aantal	Storingsfrequentie
AC	35	0,005	119	0,048
GIJ	1	0,002	11	0,014
NGIJ	0	0,000	3	0,078
ONB	0	0,000	0	0,000
PE	2	0,001	26	0,008
PVC	42	0,003	300	0,018
ST	0	0,000	3	0,005
<b>Totaal</b>	<b>80</b>	<b>0,004</b>	<b>462</b>	<b>0,019</b>



Figuur 32: Geografische spreiding van zadellekkages

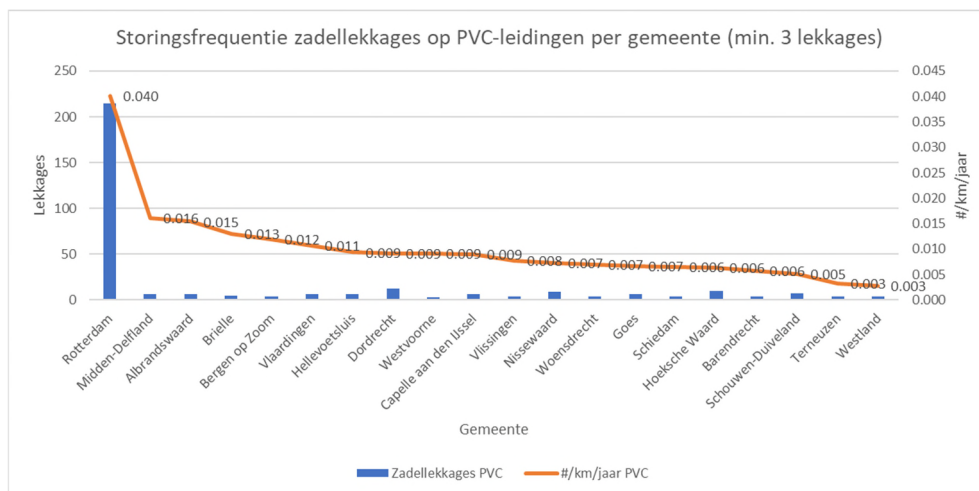


Figuur 33: Storingsfrequentie zadellekkages per gemeente. Alleen gemeenten met meer dan 5 zadellekkages worden weergegeven.



Figuur 34: Storingsfrequentie zadellekkages op AC-leidingen per gemeente. Alleen gemeenten met minimaal 2 lekkages worden weergegeven.



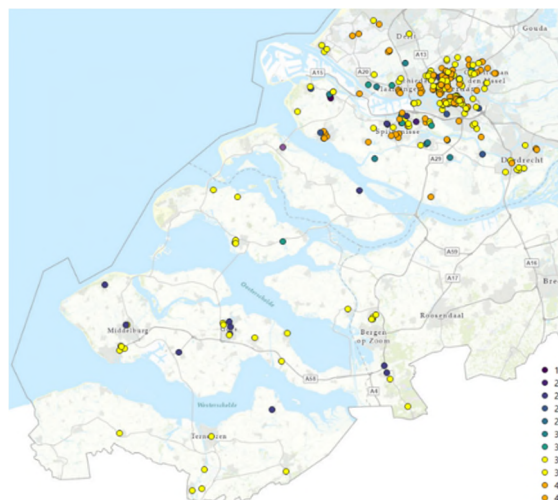


Figuur 35: Storingsfrequentie zadellekkages op PVC-leidingen per gemeente. Alleen gemeenten met minimaal 3 lekkages worden weergegeven.

### Zadellekkages en drukklasse PVC-leidingen

Een van de hypothesen om het verschil in aantal zadellekkages te verklaren tussen Rijnmond en ZeeBraGO betreft de drukklasse van de buis: in ZeeBraGO zijn altijd buizen gelegd met een minimale drukklasse van 0,75MPa (SDR33/34). In Rijnmond zijn daarentegen ook buizen gelegd van een lagere drukklasse, namelijk 0,63MPa (SDR40/41). In onderstaande afbeelding (Figuur 36) zijn de wanddikte-diameterverhoudingen (SDR) gevisualiseerd van buizen waarop zadellekkages hebben plaatsgevonden. Er is inderdaad te zien dat de drukklasse in ZeeBraGO minimaal 33/34 is. In Rijnmond hebben daarentegen zadellekkages plaatsgevonden op buizen in beide drukklassen: 33/34 en 40/41.

Om uit te zoeken of er verschil is in storingsfrequentie tussen beide drukklassen in Rijnmond is ingezoomd op een storingsgevoelige deelpopulatie in gemeente Rotterdam, namelijk op 160PVC uit de jaren '70. Deze deelpopulatie bevat buizen met een wanddikte van 3,9mm (SDR41) en 4,7mm (SDR34). Van deze buizen ligt respectievelijk 113km en 82km in Rotterdam. De storingsfrequentie van buizen met een wanddikte van 3,9mm ligt met 0,14 storings per kilometer per jaar iets hoger dan buizen met een wanddikte van 4,7mm (0,12 storings per kilometer per jaar). Hoewel de buizen met een dikkere wand beter presteren, is de storingsfrequentie nog steeds hoog en ligt op een vergelijkbaar niveau als de materiaalgroep AC (de materiaalgroep met de hoogste storingsfrequentie). Op basis van bovenstaande lijkt er geen duidelijke relatie te zijn tussen SDR-klasse en aantal zadellekkages op PVC-leidingen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat wanddiktes in GIS niet altijd overeenkomen met wanddiktes die in werkelijkheid worden gemeten.



Figuur 36: Zadellekkages op PVC-leidingen in 2017-2020. De kleur toont de SDR-klasse van de buis waarop de lekkage heeft plaatsgevonden.

Tabel 10: Storingsfrequenties van PVC verdeeld over verschillende diameters in Rotterdam.

Diameter PVC	Lengte (km)	Aantal storingen	#/km
63	106	4	0,009
110	432	14	0,008
160	510	153	0,075
200	5	0	0,000
250	141	20	0,035
315	94	19	0,051

#### Zadellekkages en diameters PVC-leidingen

Binnen de groep zadellekkages op PVC-leidingen is ook ingezoomd op de diameterklassen. In Figuur 37 is de geografische spreiding te zien van zadellekkages op PVC-leidingen per diameterklasse. Opvallend hierbij is onder andere het verschil tussen 110mm en 160mm: de lekkages op 110mm-leidingen zijn gelijkmatig verdeeld over het voorzieningsgebied en de lekkages op 160mm-leidingen zijn geconcentreerd in Rotterdam.

Ook is gekeken naar de storingsfrequenties van 110mm en 160mm PVC in Rotterdam zodat de absolute aantallen afgezet kunnen worden tegen de hoeveelheid leidinglengte. Hieruit blijkt dat de storingsfrequentie van 160mm PVC met 0,07 storingen per kilometer per jaar 9x hoger is dan de storingsfrequentie van 110mm PVC (0,008) in Rotterdam. Wat absolute lengtes betreft ligt er meer 160PVC (510km) dan 110PVC (432km). Zie ook Tabel 10 voor het uitgebreide overzicht.

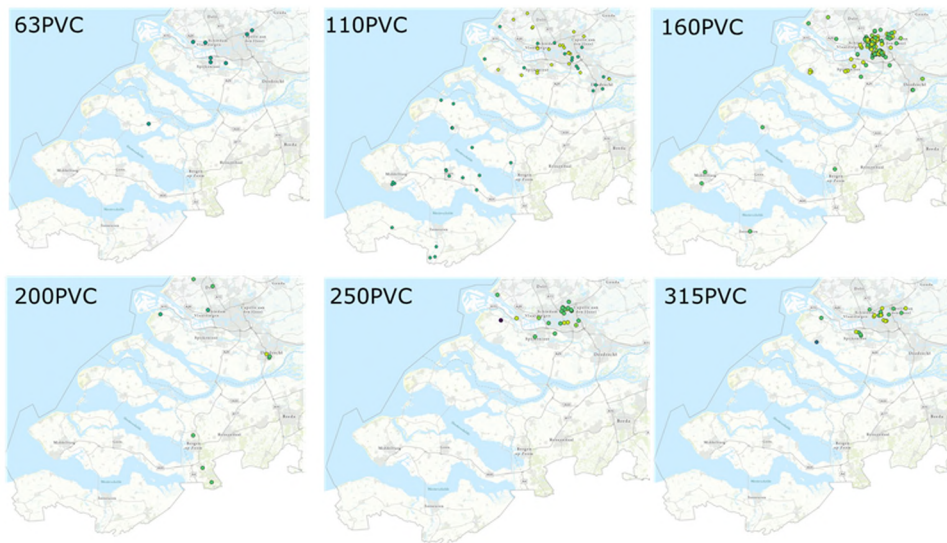
Een verklaring voor het grote verschil in storingsfrequentie tussen deze diameterklassen is niet gevonden.

#### Zadellekkages en aanlegjaren PVC-leidingen

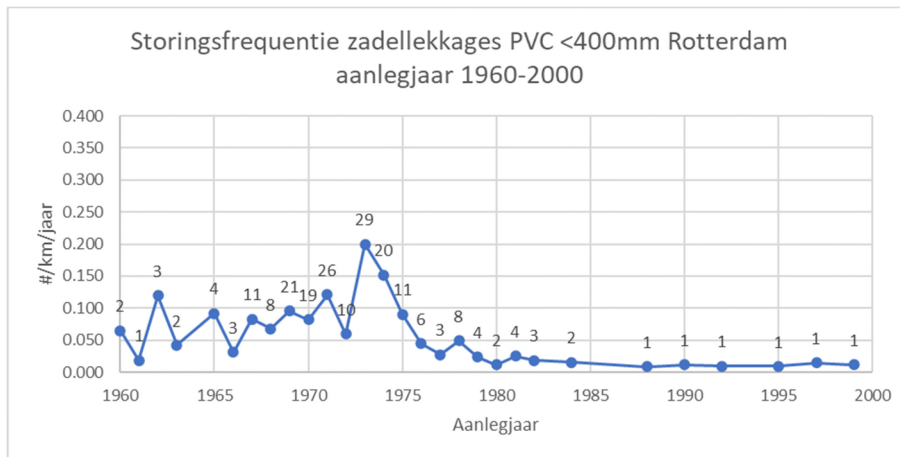
Binnen de groep zadellekkages van PVC-leidingen in Rotterdam is ook gekeken naar de storingsfrequenties van verschillende aanlegjaren. In onderstaande grafiek (Figuur 38) is de storingsfrequentie te zien van PVC-leidingen met een diameter kleiner dan 400mm die aangelegd zijn tussen 1960 en 2000. Als gekeken wordt naar de combinatie van het relatieve en absolute aantal storingen valt op dat de meest storingsgevoelige leidingen vallen binnen de groep met aanlegjaar 1967-1975.

Eenzelfde grafiek is ook gemaakt voor PVC-leidingen van 160mm in Rotterdam (zie Figuur 39). Ook hier is te zien dat de hoogste storingsfrequenties en storingsaantallen te vinden zijn in de aanlegjaren 1967-1975. Vanwege de hoeveelheid leidinglengte en storingen in de groep van 160mm leidingen heeft deze groep veel invloed op de storingsfrequentie van de gehele groep PVC-leidingen kleiner dan 400mm, zoals weergegeven in bovenstaande grafiek. Zie ook Tabel 11 voor het uitgebreide overzicht.

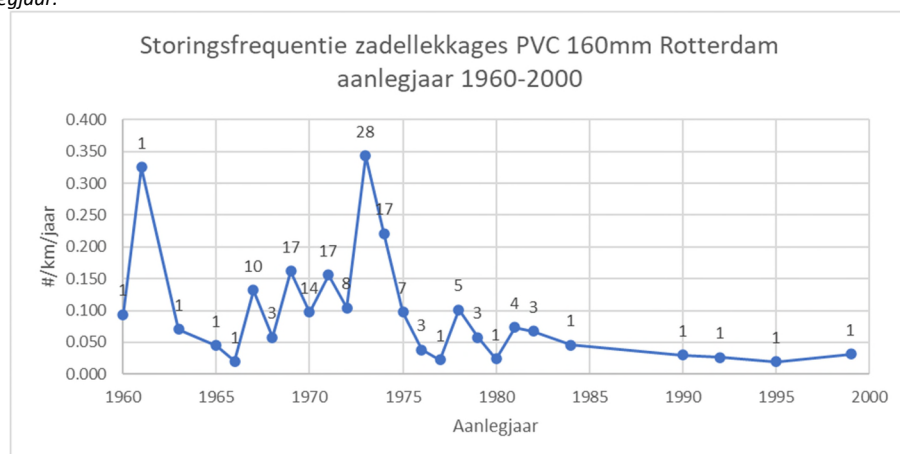
In de vorige paragraaf is onder andere het verschil in storingsfrequentie weergegeven van de groepen 110PVC en 160PVC in Rotterdam. In deze alinea wordt weergegeven of dit verschil over alle aanlegjaren aanwezig is. Zoals ook bleek uit voorgaande alinea's zijn binnen de groep 160PVC diverse aanlegjaren uit de jaren '60 (0,09/km/jaar) en jaren '70 (0,13/km/jaar) het meest storingsgevoelig. In de groep 110PVC in Rotterdam liggen de storingsfrequenties een stuk lager: 0,03/km/jaar voor de jaren '60 en 0,02 voor de jaren '70. De hogere storingsfrequenties van 160PVC ten opzichte van 110PVC gelden voor alle aanlegjaarklassen.



Figuur 37: Zadelkkes op PVC-leidingen voor een zestal diametergroepen.



Figuur 38: Storingsfrequentie van PVC-leidingen in Rotterdam (<400mm) op basis van zadelkkes uit de periode 2017-2020. Geselecteerd zijn alle leidinglengtes en storings van leidingen met een aanlegjaar tussen 1960 en 2000. De labels in de grafiek tonen het absolute aantal storings per aanlegjaar.



Figuur 39: Storingsfrequentie van PVC-leidingen in Rotterdam (160mm) op basis van zadelkkes uit de periode 2017-2020. Geselecteerd zijn alle leidinglengtes en storings van leidingen met een aanlegjaar tussen 1960 en 2000. De labels in de grafiek tonen het absolute aantal storings per aanlegjaar.

Tabel 11: Storingsfrequentie 110PVC en 160PVC in gemeente Rotterdam per gegroepeerd aanlegjaar.

Jaarklasse	110PVC - Rotterdam			160PVC - Rotterdam		
	Lengte - km	Aantal	#/km	Lengte - km	Aantal	#/km
Jaren60	41	5	0,031	93	35	0,094
Jaren70	88	6	0,017	196	103	0,132
Jaren80	147	3	0,005	78	9	0,029
Jaren90	87	0	0,000	82	4	0,012
Overig	69	0	0,000	61	2	0,008
Totaal	<b>432</b>	<b>14</b>	<b>0,008</b>	<b>510</b>	<b>153</b>	<b>0,075</b>

Uit twee recente exitbeoordelingen van buizen die gestoord hebben in Rotterdam (X en Y, beiden 160mm PVC uit respectievelijk 1969 en 1970) is gebleken dat een B-zadel de lekkage heeft veroorzaakt. Ditzelfde geldt voor de lekkages in 2019 in Rotterdam op PVC160 uit 1970 in de W en PVC160 uit 1973 in de Z. Opvallend is dat er bij de recente 2 lekkages ook een A-zadel op de buis zit. Dit kan een nieuwe aansluiting zijn of een zadel dat al eens eerder is vervangen.

Voor de lekkages op 160mm PVC-leidingen is het aandeel zadellekkages berekend ten opzichte van alle lekkages in deze groep. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen lekkages in Rotterdam en lekkages buiten Rotterdam. Over de periode 2017-2020 varieert het aandeel zadellekkages buiten gemeente Rotterdam tussen de 12% (abs. 2) en 41% (abs. 7). Binnen gemeente Rotterdam ligt deze verhouding tussen de 47% (abs. 23) en 78% (abs. 62). Hieruit blijkt dat veel lekkages van 160mm PVC-leidingen in Rotterdam bestaan uit zadellekkages.

#### Zadellekkages en zettingen

Een mogelijke verklaring voor het verhoogde aandeel zadellekkages in Rotterdam is grondzetting. Met behulp van zettingsdata van SkyGeo is dit onderzocht. Hieruit is gebleken dat de zadellekkages in gemeente Rotterdam voorkomen in gebieden met een relatief beperkte hoeveelheid zetting, namelijk zo'n 0,1-0,4cm grondzetting per jaar. Grondzetting lijkt hiermee niet een van de verklarende hoofdfactoren te zijn voor zadellekkages in Rotterdam. Hierbij is echter geen rekening gehouden met grondzetting na werkzaamheden wat mogelijk wel een rol speelt in de drukke ondergrond van Rotterdam.

#### Discussie

Op basis van de data-analyses is een aantal zaken naar voren gekomen, bijvoorbeeld de concentratie van PVC-zadellekkages in gemeente Rotterdam ten opzichte van andere gemeenten en het verschil in storingsfrequentie van 110PVC- en 160PVC-leidingen. Niet voor alle verschillen en bevindingen zijn duidelijke verklaringen gevonden in de data. Uit gesprekken met collega's van AMI en O&B is wel een mogelijke verklaring gevonden voor het verschil in aantal PVC-zadellekkages in gemeente Rotterdam ten opzichte van andere gemeenten. Dit houdt mogelijk verband met de wijze van aanboren: in diverse gemeenten, waaronder Rotterdam, worden hoofdbuizen vanaf de zijkant aangeboord, in tegenstelling tot andere gemeenten waar de hoofdbuis van de bovenkant wordt aangeboord. Voor AC-zadellekkages is dit beeld ook te zien: de hoogste storingsfrequenties zijn terug te zien in de gemeenten op Voorne-Putten en in Rotterdam. In deze gemeenten wordt in ieder geval vanaf de aanleg van AC-leidingen vanaf de zijkant aangeboord. Doordat in Rotterdam en andere oud-DWL gemeenten de dienstkraan en aansluitleiding aan de zijkant van de buis zitten, komen er andere krachten op de hoofdbuis te staan met meer lekkages tot gevolg. Daarnaast speelt in Rotterdam waarschijnlijk de 'grootstedelijke problematiek', denk hierbij aan: minder ruimte in de ondergrond om goede kwaliteit te leveren, veel grondroering en een hoge bebouwingsdichtheid met kortere aansluitleidingen met minder 'rek' om zettingen op te vangen.

Bovenstaande (combinaties van) factoren zijn echter hypothesen en moeten verder worden uitgezocht.

## Conclusies

Op basis van het onderzoek naar zadellekkages kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het verschil in (relatieve) aantal zadellekkages tussen Rijnmond en ZeeBraGO is terug te zien bij alle leidingmaterialen. Bij PVC valt op dat het voornamelijk een verschil is tussen Rotterdam en de overige gemeenten. Bij AC valt op dat er verschil is tussen Rotterdam en de gemeenten op Voorne-Putten ten opzichte van de andere gemeenten;
- Er is onderzoek gedaan naar diverse variabelen die mogelijk invloed hebben op het aantal zadellekkages. Hieruit is gebleken dat drukklasse en grondzetting geen significante relatie hebben met het aantal zadellekkages op PVC-leidingen;
- De piek van het aantal zadellekkages op PVC-leidingen in Rotterdam zit in de groep van 160mm-leidingen, met name de aanlegjaren 1967-1975. Er is geen verklaring voor het verschil in aantal zadellekkages tussen bijvoorbeeld de 110mm en 160mm-leidingen.
- Een mogelijke verklaring voor het verschil tussen Rotterdam en gemeenten op Voorne-Putten en de andere gemeenten is de wijze van aanboring in combinatie met factoren zoals 'grootstedelijke problematiek'. Dit moet echter verder worden uitgezocht.
- In 2019 is een aantal storingsgevoelige PVC-cohorten uitgelicht. Een van de storingsgevoelige cohorten is 160PVC uit de jaren '60 en '70. De hierboven beschreven inzichten over zadellekkages laten zien dat dit storingsgevoelige cohort voor een deel wordt bepaald door zadellekkages, met name in de gemeente Rotterdam. Dit is waardevolle informatie voor het bepalen en bijsturen van (vervangings)beleid.

## Aanbevelingen

Op basis van het onderzoek en de conclusies zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

- Onderzoek de relatie tussen wijze van aanboring en kans op zadellekkages. Hierbij is het van belang om te achterhalen of aanboring vanaf de zijkant een verhoogde storingskans geeft. Factoren die in dit onderzoek meegenomen kunnen worden zijn: diameter, verdichting van de bodem, drukklasse, diepteligging, etc.;
- Onderzoek het verschil in storingsfrequentie tussen verschillende diametergroepen, zoals de 110PVC en 160PVC. Dit kan mogelijk onderzocht worden in het FACTS-project "Vingers achter PVC";
- Focus op de storingsgevoelige aanlegjaren (van PVC-leidingen) en onderzoek of er een relatie is tussen de verhoogde storingsfrequentie en de toegepaste zadels en materialen.

# II Literatuurstudie

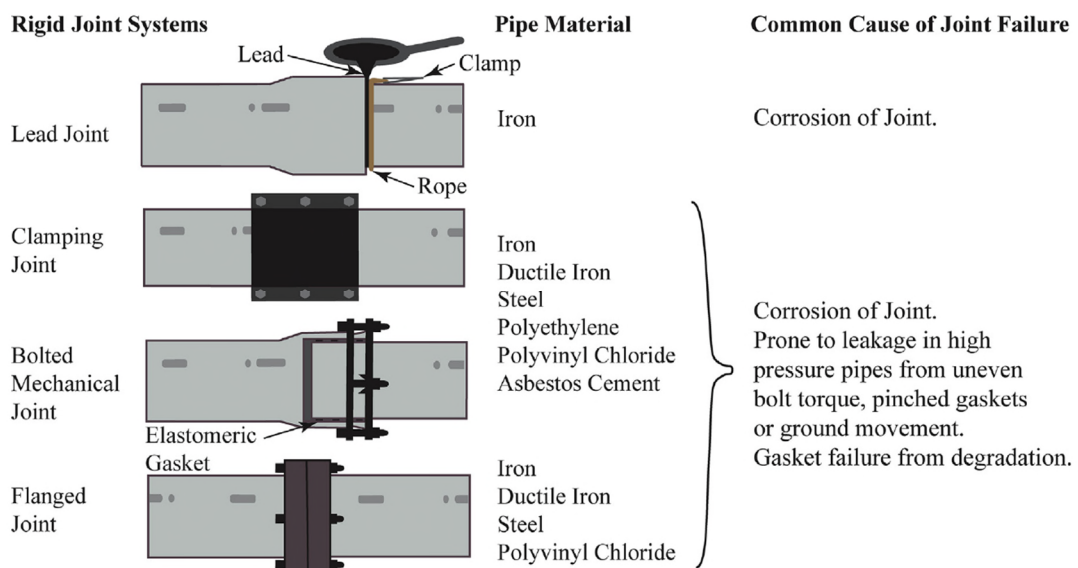
## II.I Algemene samenvatting

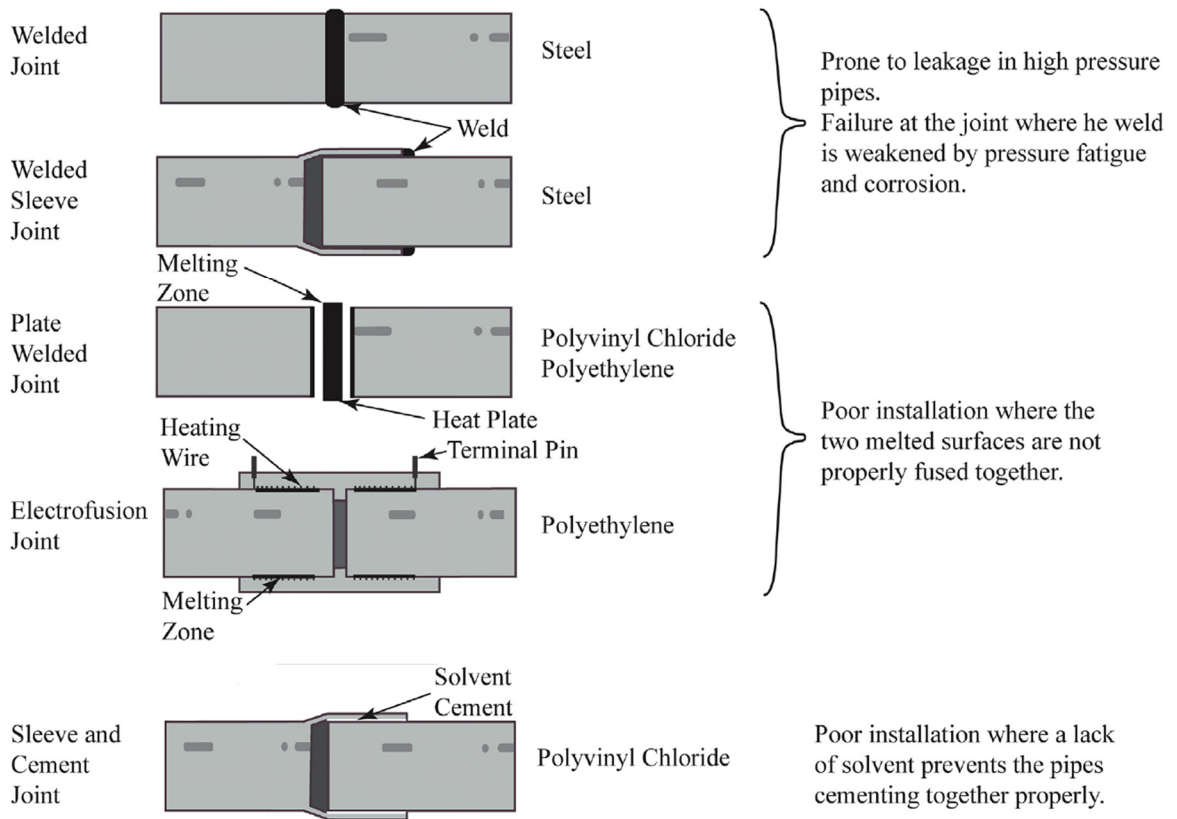
### Failure mechanisms and conditions

The joint and appendages of a drinking water distribution network are integral and have been historically considered to be synonymous with the pipe (Barton et al., 2005, Trew et al., 1995). Current research on water distribution failures is focused on material of pipes and predicating the condition and failure of the material. However, these pipes are joined with an substantial amount of joints (150-200 per km of pipe, about 25 million within the Netherlands). According to Dutch water companies at minimum 20% of network failures are caused by joints (Arsénio et al., 2010).

### Failure mechanisms of a joint

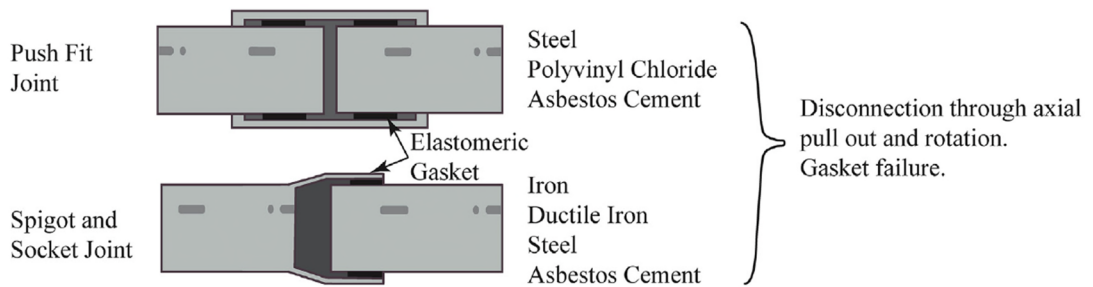
1. Coupling definitions
  - 1.1. Trekvaste koppeling- tensile coupling- allows for flexibility from internal pressure and pressure from outside.
  - 1.2. Steekkoppeling- OR Insteekkopeeling??- Plug in coupling or compressed air coupling. This is common pneumatic mounting, where a hose is pressed through a special o-ring.
2. Type of joint
  - 2.1. Rigid
    - 2.1.1. Bolted mechanical, Flanged, Butt welded
      - 2.1.1.1. Failure- poor installation, uneven bolt torque, pinched gaskets, thermal variation, corrosion of material. Very susceptible to fracture due to ground movement (Ruchti, 2017; Twort et al., 2001; Farrow et al., 2017).
  - 2.2. Flexible
    - 2.2.1. Push-fit joint (e.g. bell-and-spigot and push-on rubber gasket) flexible, prevent leakage, allowances for axial movement/rotation (3-4°) (Arsénio et al., 2010).
      - 2.2.1.1. Failure- age, movement reduction/limitation caused by soil, pressure fluctuations, long term exposure to working pressure and incompletely inserted socket (Arsénio et al., 2010).
3. Types of joint and the common cause of failures
  - 3.1. Rigid Joint systems (Barton et al., 2005)





3.2. Flexible joint systems (Barton et al., 2005)

**Flexible Joint Systems**



4. Failure mechanisms (Arsénio et al., 2010).

4.1. Angular deviation

4.1.1. Long-term main deflection due to ground settling and bed loss which causes the pipeline to buckle and the pipe rotate at the joint. The deformation caused is highly dependent on pipe material. Metal pipes can handle larger unsupported sections.

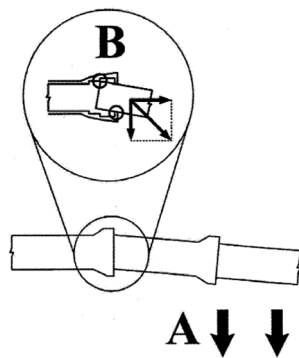


Figure 1. Scheme of long-term pipe deflection. Bedding loss (A) and angular deviation (B).

4.1.2.

4.2. Joint bending (Arsénio et al., 2010).

4.2.1. Usually occurs at places: where with curved pipe mains, where there is a concentrated load or selling clay backfill.

4.2.2. Differs from angular deviation as both sides of the joint (may) move. This causes the pipe and the joint to move together with slight axial movement called slippage.

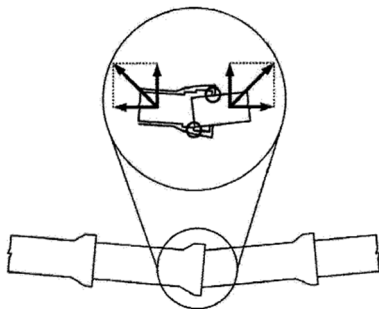


Figure 2. Joint bending.

4.2.3.

4.3. Axial displacement (Arsénio et al., 2010).

4.3.1. Longitudinal tensile stresses caused by temperature variation, ground shifting, and tensile influences can cause axial movement. Contraction and expansion of a pipe is not consistent. The centre of the pipe is more fixed then the pipe area near the joint. Axial displacement cand also be caused by the Poisson effect

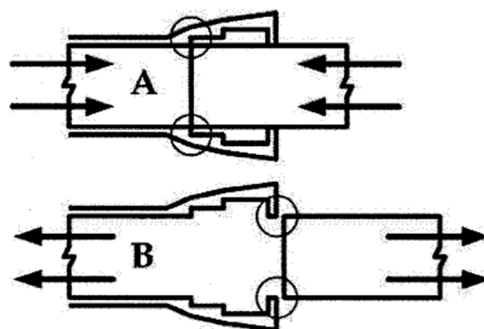


Figure 4. Pipe joint subjected to axial compression (A) and to axial pull-out (B). Adapted from Singhal (1984).

4.3.2.

4.4. Torsion by slight rotation/vibration (Vreeburg et al., 2010).

4.4.1. A prolonged rotation of the pipe during a torsional type collapse due to a failure done in the sand at the pipe and soil interface.

4.4.2. No information about the failure mechanism in joints within the Netherlands.

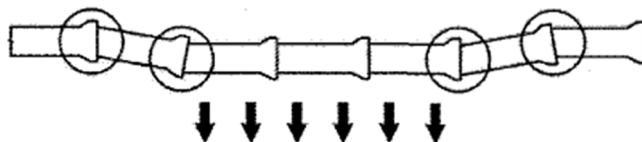


4.5. Vertical displacement (Vreeburg et al., 2010).

4.5.1. Failure caused by: weak/young soils (i.e., peat, alluvial soils) which are dominant in the Netherlands.

4.5.2. Vertical displacement is a composed failure mechanism since other joint failures are dependent on the magnitude of vertical displacement.

4.5.3. Vertical displacement is very easy to measure making it easy to distinguish.



**Figure 6. Scheme of vertical displacement.**

4.5.4.

4.6. Horizontal displacement- (Vreeburg et al., 2010).

4.6.1. Transverse movement of pipes due to outside influence. Similar to vertical displacement as it can be paired with other types of failure.

4.7. Vertical deflection (Vreeburg et al., 2010).

4.7.1. Predominate in flexible pipes where soil load on top causes a decrease in vertical diameter and an increase in horizontal diameter. This causes hoop stress especially during pressure surges causing longitudinal breaks in the pipes and joints.

4.8. Failure caused by material problems and poor workmanship(Vreeburg et al., 2010).

4.8.1. This failure is caused by rubber o-rings slips, biological/chemical degradation, flattened by pressure, corrosion of screws.

4.8.2. Poor workmanship: incomplete insertion and joint fusions, inadequate compaction of backfill during installation.

5. Joint Failure (Arsénio et al.,2013, Vreeburg et al., 2010).

5.1. Joint leaking

5.2. Joint fracture

5.3. Disconnection

5.4. Circular or longitudinal breakage

5.5. Leaking rubber gaskets

5.6. Partial breakage of pipe within the joint

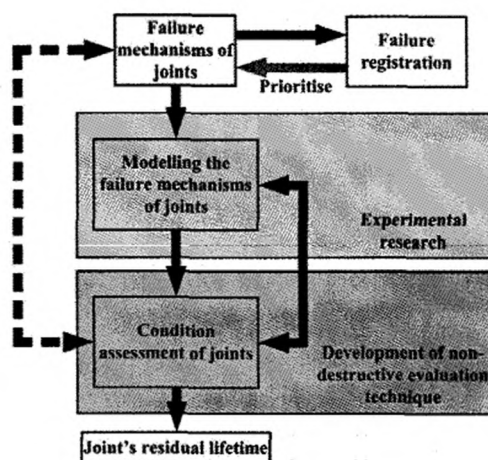
6. Summary of failure by material type (Barton et al., 2005)

The table below shows a list the materials commonly used for pipe construction and the environment and operations factors that lead to joint failure.

Material	Mechanism			Type of Failure Mode
	Pipe- Intrinsic	Environmental	Operational	
Iron	Pipe diameter	Cold temperatures	Cyclical pressure fatigue	Circumferential break
	Manufacturing defects	Frost	Transient pressure	Joint failure
Steel and Ductile Iron	Graphitization	Cold internal water temperature	Management operations	Longitudinal failure
	Pipe protection	Highly corrosive soils		Chemical attack
	Rigid joints			
	Construction and repair- accidental damage			
AC	Thin pipe wall	Highly corrosive soils	High pressure	Chemical attack
	Manufacturing defects		Cyclical pressure fatigue	Joint failure
PVC	Pipe protection			
	Rigid joints			
	Poor joint assemblage - solvent	Warm temperatures	High pressure	Joint failure
	Storage- UV light exposure	Low rainfall	Cyclical pressure fatigue	Longitudinal failure
PE	Manufacturing defects	Fluctuating soil moisture. Clay and peat soils- shrink swell fatigue potential		Chemical attack
	Loading - sensitivity to point loads	Sandy soils - wash out		Longitudinal failure
PE	Poor joint assemblage	-		Joint failure
				Longitudinal failure

7. Application of the failure mechanism overview

The study composed by Arsénio et al in 2013 established an overview of the failure mechanism of joints for both water companies and for scientific research purposed. The following figure outlines the necessary steps to take in order to have a complete understanding of joint failure, starting with the registration of joint failure mechanisms. With this data crucial information will feed the model about the materials and over related variables to the joint failure (Arsénio et al in 2013).



## II.II Overige interessante studies

Naast de literatuurstudie zijn nog een tweetal interessante rapporten en een workshopsamenvatting gevonden, die hier kort zullen worden beschreven.

### **Awwa research foundation rapport 91126: Potential Techniques for the Assessment of Joints in Water Distribution Pipelines (2006)**

In 2006 is vanuit Awwa research foundation een verslag over verbindingen in het water distributienet verschenen. Het vat de toenmalige state-of-the-art op gebied van verbindingen samen onder andere belangrijkste faalmechanismes, bestaande technieken voor de inspectie en toestandsbepaling van leidingen, methodes om verbindingen te repareren. Het onderzoek hierin is op verschillende manieren aangepakt.

In Hoofdstuk 2 is een overzicht van diverse type verbindingen voor het meest voorkomende materialen (metalen, op mineralen gebaseerd, kunststoffen) aangeboden. Het aantal kilometer leidingen en/of verbindingen voor de VK, de VS, en Europa is ook gerapporteerd. Er is geschat dat in een derde van het net in de VS er 118 miljoen verbindingen zijn, waarvan 50 miljoen van grijsgietijzer, 23 miljoen van AC en 11 miljoen van PVC zijn. Aan de hand van beperkte informatie uit Canadese steden in 1992-1993, zijn verbindingen de oorzaak voor 31% storingen in PVC (26 storingen) en 6% in AC (243 storingen). In de huidige analyse in Hoofdstuk 2 zijn het 35% en 23% voor PVC en AC respectievelijk.

In Hoofdstuk 3 (en bijlagen) zijn resultaten van een survey ingevuld door zeven drinkwaterbedrijven in de VS, Canada, en Europa samenvat. De gevraagde informatie bevatte indeling van leidingmateriaal en diameter, type verbindingen, type faalmechanismes, en rehabilitatiemethodes. Het aantal storingen bij verbindingen per materiaal, per diameterklasse is verzameld. Voor AC zijn storingsfrequenties van 0.015-0.03 storingen/km/jaar getroffen. Voor PVC zijn de cijfers < 0.01 storingen/km/jaar. In de huidige analyse in Hoofdstuk 2 zijn het 0.007 storingen/km/jaar en 0.015 storingen/km/jaar voor PVC en AC respectievelijk. Voor vele materialen inclusief AC en PVC was het falen van de afdichting een dominante oorzaak. Voor AC speelde het falen van bouten een beduidende rol terwijl voor PVC speelde het falen van “structural socket” een belangrijke rol. Voor AC en PVC is bodembeweging een primaire oorzaak achter het falen van verbindingen genoemd. Vier van de zeven bedrijven gaven hun ervaringen met inspectietechnieken ook op. Opendragen en visuele analyse is als het meest betrouwbare methode genoemd. Zowel actief lekkage opsporen als druk/debiet analyses zijn als effectief genoemd. Interne akoestische lekdetectie en ultrasone methodes zijn ook genoemd.

In Hoofdstuk 4 zijn factoren die tot achteruitgang van verbinding conditie leiden zijn opgeschreven. Per materiaal is er een poging gedaan tot het tabuleren van faalmechanismes en bijbehorende technieken om ze van binnen of buiten te kunnen karakteriseren. Daarnaast zijn aantal praktijkgevallen toegelicht waarin degradatie van de leidingconditie zichtbaar is. Daarnaast zijn er een aantal tests uitgevoerd, bijvoorbeeld door verbindingen open te zagen of de effectiviteit van afdichtingsring te proeven of door een buis door te buigen (rek metingen met het invloed van aanwezigheid van afdichtingsring, mate van insertie). Tenslotte zijn ook (cyclische) trekproeven en buigproeven uitgevoerd om het manier van falen van verbindingen en potentiële bijbehorende meetmethoden beschreven.

Hoofdstukken 5 t/m 8 gaan over het detecteren van verbindingen, toestandsbepaling, technieken voor het detecteren van (verwaarloosbare) lekkages en rehabilitatie daarvan. Hoofdstuk 9 biedt een ondersteunende stelsel tot besluitvorming rondom verbindingen. Figuur 9.4 en Figuur 9.5 van de rapport zijn hieronder (zonder vertaling) in Tabel 12 en Tabel 13 overgenomen. In Tabel 9.2 en Tabel 9.3 van die rapport zijn allerlei potentiële technieken bondig samenvat met een beschrijving, voordelen, nadelen, en conclusies.

Tabel 12: Technische kenmerken van potentiële verbindingstoestandsbepalingsmethoden. W = wordt in de watersector gebruikt; O = wordt in andere industrieën gebruikt (gas, olie, petrochem); S = wordt in riolering en afvalwaterleidingen gebruikt; R = onderwerp van onderzoek voor gebruik door watersector; P = potentiële systeem (nog niet toegepast in drinkwaterleidingen). Oranje en gele kleur wijzen technieken aan die al gebruikt worden en potentie hebben, respectievelijk.

Joint condition assessment technique	Status	Deployment			Pipe Material			Joint Type			
		Surface	On pipe	In pipe	Metallic	Plastic	Mineral based	Push fit	Bolted flange	Welded	PE EFC
<i>Acoustic loggers</i>	W		X		X	X	X	X	X	X	X
<i>Caliper pig</i>	P			X	X		X	X			
<i>CCTV</i>	W, O			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>DGPS</i>	P		X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Drilling samples</i>	P		X	X	X			X	X		
<i>Flow measurements</i>	W	X	X		X	X	X	X	X	X	X
<i>GPR</i>	P	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Guided wave</i>	P		X		X						
<i>Hall effect sensors</i>	P			X	X			X	X		
<i>Inertial mapping pig</i>	P			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Laser survey</i>	P	X	X		X	X	X	X	X	X	X
<i>Leak noise correlators</i>	W	X	X		X			X	X	X	X
<i>Leak pig</i>	W, O			X	X	X		X	X	X	X
<i>Listening sticks</i>	W		X		X	X	X	X	X	X	X
<i>Magic carpet</i>	W	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>MFL inspection pig</i>	O, P			X	X			X	X		
<i>RFEC inspection pig</i>	W, O			X	X			X		X	
<i>SAHARA</i>	W			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Satellite imagery</i>	W, O	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Soil properties</i>	W	X			X		X	X	X	X	
<i>Temperature probes</i>	W	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Thermography</i>	W, O	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Tracer gas injection</i>	W	X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Ultrasonic (butt weld)</i>	O, P		X		X	X				X	
<i>Ultrasonic (flanged joint)</i>	P		X		X				X		
<i>Ultrasonic (PE EFC)</i>	O, P		X			X					X
<i>Ultrasonic inspection pig</i>	P			X	X	X		X	X		X
<i>X-ray</i>	P		X	X	X			X	X	X	

Tabel 13: Parameters voor de beoordeling van de toestand van de verbindingen. Oranje en gele kleur wijzen technieken aan die al gebruikt worden en potentie hebben, respectievelijk.

Joint condition assessment technique	Joint deflection	Spigot pull out	Crack detection	Corrosion detection	Seal deterioration	Corrosive ground	Ground movement	Leak detection	Weld condition
<i>Acoustic loggers</i>								X	
<i>Caliper pig</i>	X	X							
<i>CCTV</i>	X	X	X						
<i>DGPS</i>	X						X		
<i>Drilling samples</i>					X				
<i>Flow measurements</i>								X	
<i>GPR</i>								X	
<i>Guided wave</i>				X					X
<i>Hall effect sensors</i>	X	X							
<i>Inertial mapping pig</i>	X								
<i>Laser survey</i>	X						X		
<i>Leak noise correlators</i>								X	
<i>Leak pig</i>								X	
<i>Listening sticks</i>								X	
<i>Magic carpet</i>								X	
<i>MFL inspection pig</i>	X			X					
<i>RFEC inspection pig</i>				X					
<i>SAHARA</i>								X	
<i>Satellite imagery</i>							X		
<i>Soil properties</i>						X			
<i>Temperature probes</i>								X	
<i>Thermography</i>								X	
<i>Tracer gas injection</i>								X	
<i>Ultrasonic (butt weld)</i>									X
<i>Ultrasonic (flanged joint)</i>				X	X				
<i>Ultrasonic (PE EFC)</i>				X					X
<i>Ultrasonic inspection pig</i>	X	X	X	X					X
<i>X-ray</i>	X	X	X	X					X

### **Kiwa rapport Aantasting van rubberringen (1961)**

In tegenstelling tot het rapport van AWWA die een uitgebreide inventarisatie over verbindingen is, is dit rapport van KIWA een onderzoeksrapport toegespitst op rubberringen en hun achteruitgang door aantasting. Dit rapport is aanleiding geweest voor de kentering in het opstellen van keuringseisen voor rubberringen: natuurrubber is her niet voor geschikt.

Het optreden van het eerste geval van aantasting van rubberringen heeft tot een gedegen twaalf-jaar onderzoek. Er is samengewerkt tussen KIWA, Rubberinstituut T.N.O te Delft, en de Technische Hogeschool te Delft. Er is georiënteerd onderzoek verricht tot het onderzoeken van de hypothese dat de aantasting biologisch van aard zou zijn (door micro-organismen in plaats van oxidatie). In 1955, is het gelukt om een microorganisme (van *Streptomyces* familie) te isoleren die in reïncultuur tot aantasting van ge vulcaniseerd rubber bleek te veroorzaken [5]. Dit resultaat heeft tot meerdere programma's als vervolg geleid onder andere een enquête naar alle drinkwaterbedrijven van toen, het instellen van microbiologisch onderzoek, en het samenstellen van resistente rubbermengsels voor water en gas leidingen.

Een enquête is opgesteld gericht op aantasting van rubberringen in Simplex-koppelingen voor asbestcementleidingen en de omstandigheden eromheen. De enquête is door 154 (van 196) bedrijven beantwoord. Bovendien, over een periode van 2,5 jaar zijn 651 ringen voor onderzoek geleverd. Er is gemerkt dat de mate van aantasting van ringen uit dezelfde leiding zeer sterk uiteenloopt en voor ringen uit leidingen van verschillende ouderdom, die door hetzelfde water worden doorstroomd, niet correleert met tijd. Aantasting vindt zowel aan de waterzijde alsook de grondzijde plaats, maar met mindere sterkte bij de grondzijde. De mate van aantasting aan de waterzijde is ook door de samenstelling van het water beïnvloed met duinwater de ernstigste veroorzaker en oppervlaktewater de minst ernstige veroorzaker. Verder, de ligging van de ring in de koppeling is ten aanzien van de mate van aantasting van geen betekenis is. Dit is allemaal in Hoofdstuk 2 gerapporteerd.

Nadat de rol van *Streptomyces* duidelijk in Hoofdstuk 3 is geworden, is in Hoofdstuk 4 verder in beproevingsbakken onderzocht hoe dit micro-organisme verschillende rubbersoorten aantast. Er is gezien dat alle 12 natuurrubbermengsels na 2 à 4 maanden aangetast zijn terwijl geen van de synthetische rubbers na 19 à 24 maanden aangetast leken te zijn. Ook het toevoegen van fungicides of synthetische rubber aan natuurrubber leek weinig invloed te hebben. In Hoofdstuk 5 zijn de eigenschappen van de diverse rubbers onderzocht.

In Hoofdstuk 6 is er verdiept in de vraag op welke eigenschappen van het rubber de afdichting in de verschillende type verbindingen berust en in hoeverre er verschillen bestaan ten aanzien van de monteerbaarheid, de kans op aantasting, indien een daarvoor gevoelige rubbersoort wordt gebruikt, en de invloed van een eventuele aantasting op de dichtheid van de koppeling. De conclusies van dit hoofdstuk zijn hieronder verbatim gereproduceerd.

*De rubberringverbindingen kunnen worden onderscheiden in 3 typen:*

- a. Verbindingen, waarbij de rubberringen alzijdig worden opgesloten;*
- b. Verbindingen, waarbij de rubberringen kunnen vervormen;*
- c. Zelfdichtende verbindingen.*

*De dichtung van de verbindingen van type a berust in hoofdzaak op de onsamendrukbaarheid van de rubber. Het gebruik van hardere ringen heeft ten gevolge, dat de koppeling sterker moet worden aangedraaid. Aantasting van de rubber doet de spanning in de ring theoretisch snel afnemen, hetgeen de kans op lekkage bevordert. Hiertegenover staat, dat slechts een klein gedeelte van de alzijdig opgesloten ring voor aantasting toegankelijk is. Aangezien in dit type koppeling de elasticiteit van de rubberring ook enige invloed bezit, behoeft bij de geringe aantasting welke mogelijk is nog niet voor lek worden van de koppeling te worden gevreesd.*

*De dichting van de verbindingen van type b berust op de elasticiteit van de rubber. Bij een gegeven hardheid moet de indrukking van de ring in de gemonteerde koppeling zodanig zijn, dat de kracht, die de ring op de koppeling en de buiswand uitoefent, altijd groot genoeg blijft om de dichtheid van de verbinding te verzekeren. Bij de montage van deze koppelingen worden de ringen op hun plaats gerold, waarbij de kans bestaat, dat zij plaatselijk gaan slippen. Onder ongunstige omstandigheden, met name indien belangrijke hoekverdraaiingen optreden, kan de ring uit de verbinding worden gebruikt. Indien de ring wordt aangetast neemt de spanning in het overblijvende gedeelte niet af. De ring wordt eerst uit de verbinding geperst indien het aanrakingsoppervlak van de ring met de buis en de koppeling zo ver is verkleind, dat de wrijvingsweerstand onvoldoende is geworden. Onder normale omstandigheden is dit in Simplexkoppelingen eerst het geval indien de ring voor de helft is verdwenen.*

*Tot het type b zijn ook gerekend de verbindingen, waarin de ring zich gedeeltelijk kan deformeren en gedeeltelijk is opgesloten. De toleranties in de maatvoering van spie-eind en koppeling zijn bij deze verbindingen slechts klein. Harde ringen zullen dit nog duidelijker doen uitkomen. De gevolgen van aantasting zullen ernstiger zijn dan bij de verbindingen, waarin de rubberringen zich geheel kunnen vervormen. Het aantastbare oppervlak van de ringen is echter betrekkelijk gering.*

*De dichting van de verbinding van type c geschiedt onder gebruikmaking van zowel de onsamendrukbaarheid als van de elasticiteit van de rubber. De begindruk van de ringen op de koppeling kan betrekkelijk gering zijn, maar moet toch groot genoeg zijn om bij lage drukken nog een volledige dichting te geven. Verhoging van de druk in de leiding doet de spanning in de ringen toenemen en werkt zodoende aan de dichting mede. De lage begindruk van de ringen maakt toepassing van hardere ringen mogelijk. De invloed van de aantasting is moeilijk te bepalen, daar hij sterk afhangt van het oppervlak van de ring, dat een aantasting blootstaat, zijn in dit opzicht van belang.*

### **Kiwa rapport “Conditiebepaling verbindingen – Mogelijkheden conditiebepaling en storingsregistratie verbindingen” (BTO 2001.205)**

In 2001 is er bij toenmalige Kiwa een workshop over conditiebepaling van verbindingen plaatsgevonden. Het doel van de workshop was een inventarisatie te maken van de voorkomende verbindingen en de conditiebepalende parameters en de faalmechanismen van de verbindingen vast te leggen. Tevens is in deze workshop bepaald welke zaken in een centraal systeem van storingsregistratie opgenomen moeten worden. Hoofdstukken 3 en 4 van het bijbehorende rapport zijn hieronder verbatim gereproduceerd.

## **3 Conditiebepalende parameters en faalmechanismen verbindingen**

### **3.1 Algemeen**

*Het faalmechanisme van de verbinding is afhankelijk van de uitvoering van de verbinding en het leidingsysteem. In de verschillende leidingsystemen komen veel onderling vergelijkbare verbindingen voor. Deze zullen ook dezelfde faalmechanismen kennen en worden dan ook per type verbinding behandeld. Tevens is een indeling gemaakt per conditiebepalende parameter van de verbinding.*

*Aanlegfouten zijn in alle systemen mogelijk en leiden tot falen gedurende de levenscyclus van de leiding, maar vooral in het begin van de levenscyclus.*

*In de volgende paragrafen worden de conditiebepalende parameters en de faalmechanismen gegeven. De opsommingen van de mogelijke oorzaak per faalmechanisme en per type verbinding zijn in bijlage II behandeld.*

### **3.2 Conditiebepalende parameters verbindingen**

*De conditie van een verbinding wordt bepaald door de mate waarin de functie van de verbinding gehandhaafd blijft gedurende de levensduur. De functies zijn:*

- *Waterdichte verbinding tussen twee leidingelementen;*
- *Een hoekverdraaiing tussen twee buisdelen;*
- *Overdracht van kracht bij een trekvast verbinding tussen twee buisdelen;*
- *Chemisch dichte verbinding (impermeabel) tussen twee leidingelementen;*
- *Transport van een bepaalde elektrische stroom tussen twee buisdelen;*
- *Een elektrische isolatie tussen twee buisdelen.*

*De parameters die de conditie van een verbinding bepalen volgen hieruit, dit zijn:*

- *Waterdichtheid;*
- *Flexibiliteit;*
- *Mogelijke rest trekvastheid;*
- *Mate van permeabiliteit;*
- *Elektrische geleiding van de verbinding;*
- *Elektrische weerstand van de verbinding.*

### **3.3 Faalmechanismen verbindingen**

#### **3.3.1 Waterdichtheid**

*Rubberafdichtingen: Natuurrubber kan bacteriologisch worden aangetast en op grote schaal leiden tot lekkages. Chemische aantasting is mogelijk van alle toegepaste rubbers in het drinkwaternet. Ook zijn rubberringverbindingen gevoelig voor wortelingroei van bomen.*

*Steekverbindingen: Als steekverbindingen op trek belast worden en in de constructie hier geen rekening mee gehouden is, gaat de verbinding schuiven en leidt dit tot lekkage.*

*Flensverbinding: De verbinding verliest de waterdichtheid als de druk op de pakking verloren gaat, dus als de bouten bezwijken bij overbelasting of door corrosie.*

*Knelfverbindingen: Bij corrosie (ontzinking, spanningscorrosie) verliezen de messing onderdelen van verbinding hun sterkte en zal de verbinding bezwijken.*

#### **3.3.2 Flexibiliteit**

*Indien een leiding in een zodanige grondslag of constructie ligt dat beweging van de leidingdelen onderling gewaarborgd moet zijn, worden de verbindingen flexibel uitgevoerd om de benodigde hoekverdraaiing mogelijk te maken. Deze verbindingen kunnen slechts een beperkte hoekverdraaiing opnemen. Op het moment dat de maximum hoekverdraaiing overschreden wordt, worden de leidingdelen en de verbinding overbelast waarbij beschadiging zal optreden.*

#### **3.3.3 Trekvastheid**

*Verbindingen in leidingen waarin trekspanningen optreden worden trekvast uitgevoerd. Bezwijken van deze verbindingen wordt veroorzaakt door het overschrijden van de maximum opneembare trekkrachten. Omdat de trekvastheid van de verschillende verbindingen op verschillende wijzen tot stand komt zijn ook de faalmechanismen verschillend.*

*Bij overbelasting van de trekvaste verbindingen bezwijken de aansluitende buisdelen en niet de verbindingen.*



### 3.3.4 Permeabiliteit

Een chemisch dichte verbinding (impermeabel) is noodzakelijk als de leidingen in vervuilde grond liggen of als er een grote kans bestaat dat de grond verontreinigd raakt met stoffen die door de verbinding kunnen dringen.

Voor alle verbindingen met rubber als afdichtingsmateriaal (natuurrubber en de klassieke kunstrubbers) geldt dat deze permeabel zijn. De mate waarin hangt af van de betreffende chemicaliën en de contactoppervlakken tussen het rubber en omringende grond en tussen het rubber en het drinkwater.

De lasverbindingen in PE leidingsystemen zijn permeabel vanuit het gebruik van PE als lasmateriaal. PE leidingsystemen moeten niet worden gebruikt in verontreinigde grond.

De lijmverbindingen in PVC en GVK komen voor de permeabiliteit overeen met de te verlijmen materialen en zijn niet of beperkt permeabel.

### 3.3.5 Elektrische geleiding

Bij metalen leidingen (staal en gietijzer) die op de een of ander wijze een elektrische stroom (kathodische bescherming, aarding, zwerfstromen) geleiden is het noodzakelijk dat de stroom op een gecontroleerde wijze de verbindingen passeert. Indien de stroom op een ongecontroleerde wijze de leidingdelen in- en uittreedt ontstaan er corrosiecellen in de metalen leiding die het leidingmateriaal aantasten.

Indien de elektrische geleiding in de verbinding niet gegarandeerd is vanuit het type verbinding maar wel gewenst, worden er maatregelen getroffen als overbruggingen die de benodigde geleiding mogelijk maakt.

### 3.3.6 Elektrische isolatie

Metalen leidingdelen waarin een elektrische stroom loopt moet gescheiden kunnen worden van metalen leidingdelen waarin deze stroom niet gewenst is, bijvoorbeeld op de overgang van een kathodisch beschermd stalen leidingdeel naar een niet kathodisch beschermde gietijzeren leiding.

De verbinding tussen deze leidingdelen dient een volledige elektrische isolatie te vormen om ongecontroleerde elektrische stromen uit te sluiten. Alleen verbindingen die speciaal voor dit doel aangepast zijn kunnen een isolatie garanderen.

Een zekere isolatie tussen leidingdelen ontstaat door de toepassing van isolatiestukken. Hierbij wordt een kort leidingdeel van een niet isolerend materiaal (kunststof) tussen de twee metalen leidingdelen geplaatst en met behulp van flensverbindingen aan de metalen leidingen verbonden.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Storingsregistratie

Het falen van een verbinding uit zich over het algemeen door lekkage. De andere faalmechanismen resulteren in een lek of worden niet opgemerkt (beperkte aarding wordt bijvoorbeeld alleen bij expliciet meten gevonden, hetgeen bijna niet gedaan wordt).

In een gezamenlijk overleg met een zestal bedrijven uit het aandachtsveld leidingnetconditie (zie bijlage I) zijn de volgende items naar voren gekomen die van belang zijn voor een nadere identificatie binnen een storingsregistratie. Bepaald is hiermee welke type verbindingen een structurele bijdrage leveren aan een verminderde conditie van het leidingnet. Andere typen verbinding zullen meer incidenteel falen.

Type verbinding:

- Loodmof
- Steekverbinding  
rubberrol afdichting inclusief soort rubber  
rubberglij afdichting inclusief soort rubber
- In situ gemaakte PVC lijm verbinding
- Flensverbinding

Falen:

- Oorzaak lek gelegen in de verbinding en beschrijf het faalmechanisme van de verbinding indien dit duidelijk is.
- Lekke verbinding veroorzaakt door:
  - Onjuiste montage;
  - Overbelasting als:
    - inwendige druk;
    - verkeerslast;
    - ophogingen;
    - zettingen;
  - Graafschade waarbij de leiding geraakt is.

Met deze registratie is voldoende informatie voorhanden om een uitspraak te doen over een kans op herhaling van de storing in verbindingen in de betreffende leiding.

Met name onjuiste montage blijkt naar voren te komen bij relatief nieuwe leidingsystemen. Dit is te wijten aan de lage vakbekwaamheid bij aanleg van deze systemen.

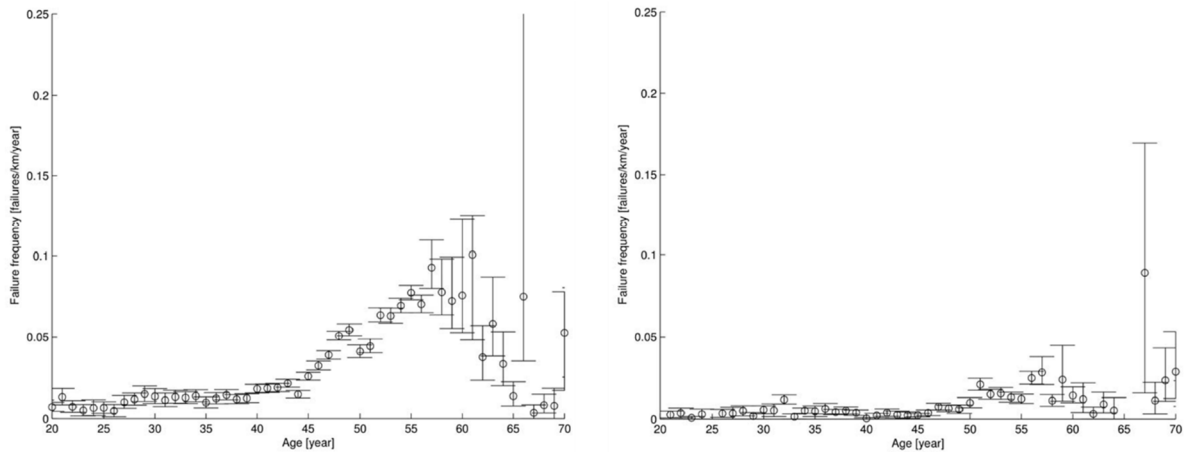
## 4.2 Conditiebepaling verbindingen

Uit de workshop komen de volgende relevante onderwerpen om de conditie van een verbinding vast te stellen:

- Aard van de gebruikte rubberringen: Als er natuurrubber ringen gebruikt zijn, kan de mate van aantasting bepaald worden. Door de aantasting te extrapoleren voor verbindingen die onder gelijke condities liggen is voor de betreffende leiding de conditie van de rest van de verbindingen vast te stellen.
- Ligging van de rubber ringen in rolverbindingen: Rolverbindingen zijn kwetsbaar voor het verschijnsel 'slipring'. Dit betekent dat de ring niet op de juiste plaats en in de juiste vorm in de verbinding aanwezig is. Dergelijke verbindingen hebben sterk verhoogde kans op lekken.
- Alle in situ gemaakte verbinding in PVC-leidingen: De in situ gemaakte steekverbinding is gemaakt door middel van verhitting optrompen van de mof. Hierbij kunnen ernstige structuurbeschadigingen van het PVC optreden. In de eerste periode van toepassing (jaren vijftig en zestig) van PVC-leidingen zijn deze toegepast. De aanwezigheid van dit soort verbindingen in een leidingnet is een gegeven dat de conditie van het betreffende leidingnet sterk bepaald
- Alle in situ gelijmde verbinding in PVC boven  $\varnothing$  50 mm: Voor dit type verbinding geldt als stelregel 'hoe groter de diameter, hoe onbetrouwbaarder de verbinding'. In hoeverre dit altijd opgaat is de vraag en kan worden onderzocht op basis van storingen en nader onderzoek.
- Flensverbindingen: Voor flensverbindingen geldt dat de bouten de conditiebepalende elementen zijn. De bouten zijn relatief eenvoudig te beoordelen en de staat van de verbinding is te extrapoleren voor verbindingen die onder gelijke condities liggen.

### Overige storingsanalyses over verbindingen bij KWR

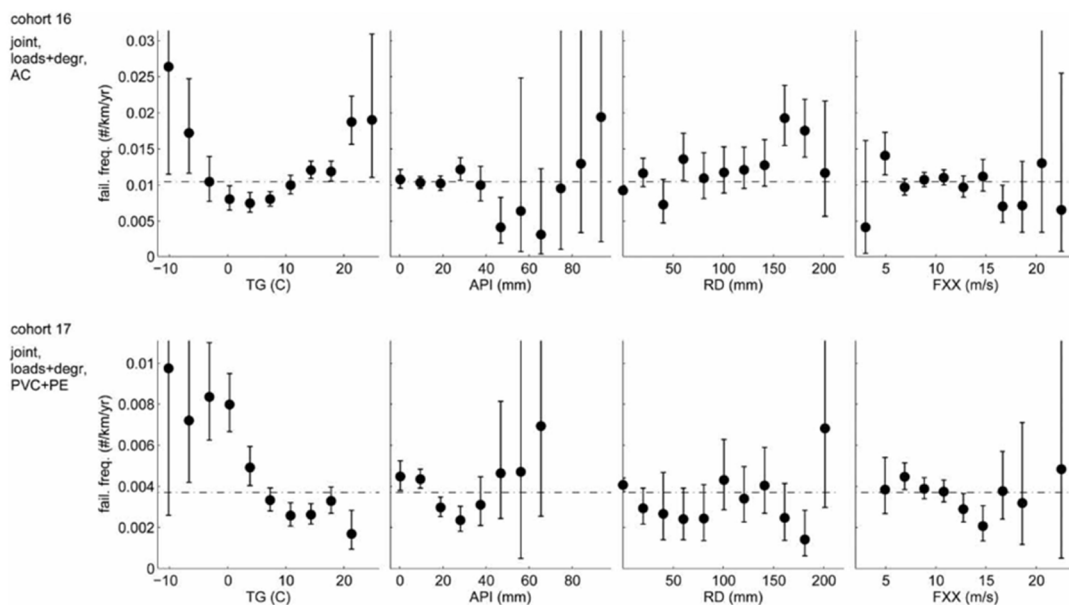
Er is gezien dat AC buizen gevoeliger voor veroudering zijn vergeleken met AC verbindingen, wegens uitloging [6]. Voor AC buizen is er een sterke toename in storingsfrequentie na een leeftijd van 45 jaar terwijl het iets meer constant voor verbindingen blijft. Er is toch een toename na een leeftijd van 50 jaar vermoedelijk door de degradatie van de natuurrubberingen. Van alle spontane storingen geschieden 20% bij de verbindingen. De resultaten hiervan zijn in Figuur 40 weergegeven.



Figuur 40: Storingsfrequentie van spontane storingen van AC buizen (links) en verbindingen (rechts) als functie van leeftijd [6].

Er is nog een uitgebreide studie over de invloed van weersomstandigheden op storingen geweest [7]. Een klein deel van het analyse spitst zich toe op verbindingen, de resultaten waarvan in Figuur 41 zijn getoond. Er is gezien dat er meer verbindingen falen bij lagere en hogere temperaturen (vooral voor AC). Voor de rest is er geen sterke relatie met de andere factoren aangetoond.

Nr.	Object	Cause	Mat.	D m	Year	Fail. #	Fail. freq. #/km/yr	Age Yr
16	Joint	Loads, degr	AC	All	All	727	0.0105	51
17	Joint	Loads, degr	PVC + PE	All	All	350	0.0037	27

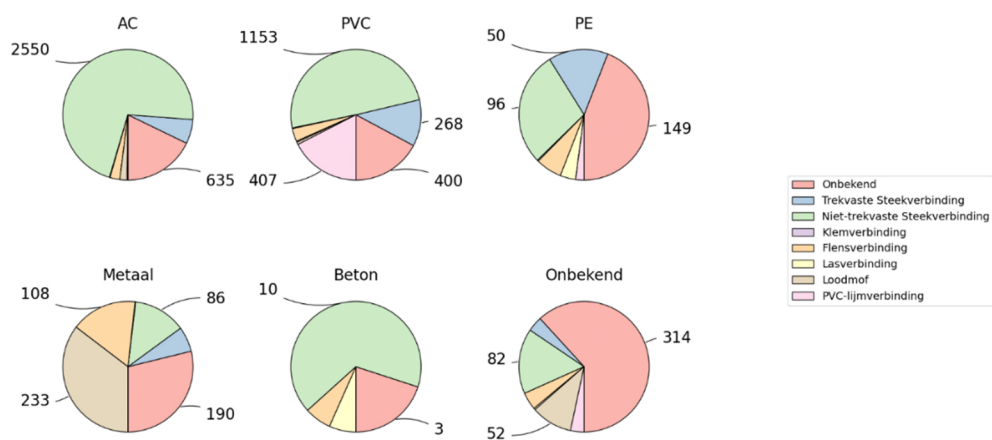


Figuur 41: Invloed van weersomstandigheden op verbindingen [7]. TG = Mean daily temperature, API = Antecedent precipitation index, RD = rain deficit, FXX = Maximum daily wind gust.

## III Overige USTORE analyses

### III.1 Storingen per materiaal per type verbinding

Een volgende stap kan zijn om te kijken naar het type verbinding dat faalt en de wijze waarop dit faalt. In absolute getallen is daar de database van USTORE goed voor te gebruiken, hoewel voor de minder vaak voorkomende verbindingen ook minder gegevens beschikbaar zullen zijn. Daarnaast is het nog niet mogelijk om hier een normalisatie uit te voeren ten opzichte van het totaal aantal van de desbetreffende verbinding. In Figuur 42 is een uitsplitsing gemaakt van de totale database.



Figuur 42: Distributie van type gefaalde type verbindingen per materiaal. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen van materiaal "X" (taart) en verbinding type "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.

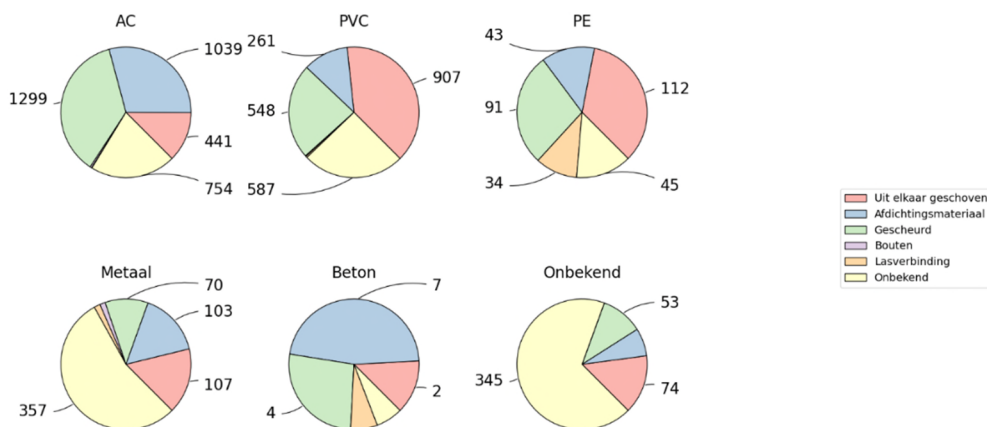
De volgende waarnemingen kunnen gemaakt worden:

- Bij onbekende of andere materialen, is ook het type gefaalde verbindingen grotendeels onbekend. Dit levert weinig informatie op.
- Bij asbest cement is bijna driekwart van de storingen toegeschreven aan niet-trekvast steekverbindingen.
- Voor PVC betreft ongeveer de helft van de storingen een niet-trekvast steekverbinding en een kwart de gelijmde mofverbindingen. Er is nog geen inzicht in het aantal gelijmde mofverbindingen, maar aannemelijk is dat er minder dan de kwart van de verbindingen in PVC gelijmd zijn [8]. Dit zou betekenen dat de gelijmde verbindingen kwetsbaarder zijn. Schatting is dat 90% van de verbindingen in PVC niet-trekvast zijn.
- Metalen zijn in één taart samenvat. Voor grijs gietijzer en staal ligt de meerderheid van aantal storingen aan loodmof verbindingen, gevolgd door flensverbindingen; dit is logisch gezien het type verbinding dat wordt toegepast in deze materialen (vooral loodmofverbindingen zijn oud). Voor nodulair gietijzer, dat voor wat betreft de verbindingen meer overeenkomst vertoont met de moderne materialen, is het aandeel storingen in trekvast verbindingen groter. Het is waarschijnlijk dat het aantal trekvast verbindingen in NG groter is dan in PVC en AC.

### III.II Storingen per materiaal per type verschijningsvorm

Op een soortgelijke manier kan er per materiaal naar de verschijningsvorm van het falen gekeken worden zoals in Figuur 43 is weergegeven. De volgende waarnemingen kunnen gemaakt worden.

- Bij onbekende materialen wordt de verschijningsvorm ook onbekend.
- Bij AC lijken scheuren van de verbinding en beschadiging van de afdichting de belangrijkste in het veld waargenomen faalmechanismes te zijn.
- Bij PVC lijken uitschuiven van leidingen en scheuren van de verbinding de belangrijkste in het veld waargenomen faalmechanismes te zijn.
- Bij metalen zijn de verschijningsvorm vaak onbekend.



*Figuur 43: Distributie van verschijningsvorm van falen per materiaal. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen van materiaal "X" (taart) en verbinding type "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.*

Deze onderverdeling laat geen duidelijke discussiepunten zien.

De materialen PVC en AC zijn hier, mede vanwege het aantal storingen en het dominante voorkomen, interessant. Bij AC valt op dat de afdichting en het scheuren van de verbinding het meest dominant lijkt te zijn. Het scheuren van de verbinding kan duiden op een materiaalachteruitgang, hetgeen meer in het algemeen een faaloorzaak is voor dit materiaal. Het zou er ook op kunnen duiden dat de hefboomwerking in de verbinding als gevolg van verzakking in AC optreedt, waar het starre materiaal AC extra gevoelig voor is. Opvallend is ook de oorzaak 'Afdichting' die bijna even vaak voor komt als het scheuren. Dit is in lijn met de kennis dat in oud AC veelal de voor aantasting gevoelige natuurrubber ringen voorkwam, maar cijfers zijn hier niet over bekend op het niveau van de storingsregistratie.

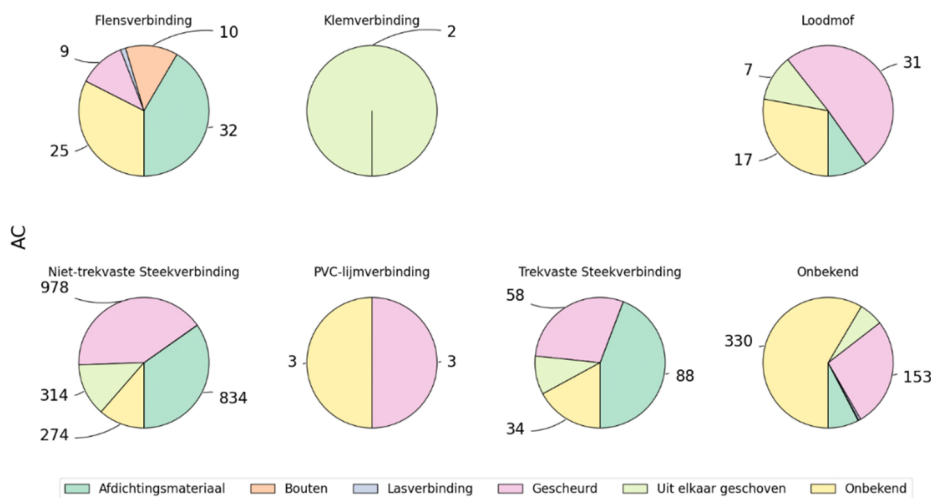
Er is een opvallend verschil in de verhoudingen 'afdichting' en 'schuif' tussen PVC en AC. Mogelijk dat hier een verband is met de temperatuurwerking: de langere buislengte van PVC kan resulteren in relatief groter effect in uitzetten en inkrimpen. Een bijna-kritisch gelegde verbinding kan daardoor in koude omstandigheden wel kritisch worden, wellicht verergerd in combinatie met grondzetting. Een andere mogelijkheid is dat uitschuiven voor PVC relatief belangrijker is omdat de andere faalwijzen voor PVC zeldzamer zijn ten opzichte van AC. PVC is bijvoorbeeld beter bestand tegen scheuren en hoekverdraaiing, en omdat het een jonger materiaal is kan het zijn dat er over het algemeen hoogwaardigere afdichtingen voorkomen in het PVC bestand.

Relatief gezien falen de verbindingen in PVC en AC ongeveer gelijk, maar gezien de verschillende verhoudingen in faalwijzen zijn de verhoudingen in de oorzaak wellicht anders.

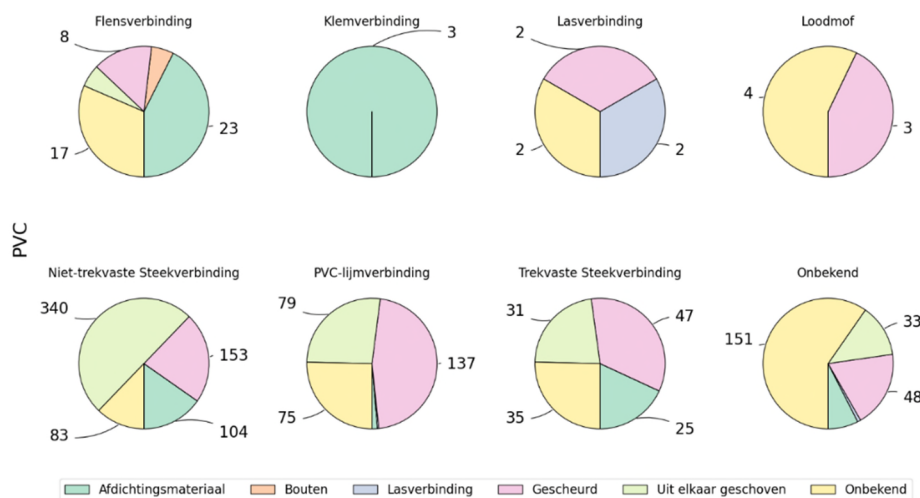
### III.III Storingen bij AC en PVC verbindingen per verschijningsvorm en verbindingstype

De volgende waarnemingen aan de hand van Figuur 44 en Figuur 45 zijn:

- Bij niet-trekvast AC steekverbindingen (de meerderheid van storingen) lijken scheuren van de verbinding en beschadiging van de afdichting de belangrijkste faalmechanismes te zijn.
- Bij niet-trekvast PVC steekverbindingen zijn meer dan de helft toegeschreven aan uitschuiven.
- Bij PVC-lijmverbindingen heeft de helft van de storingen de vorm van een scheur en nog een kwart schuiven van elkaar uit.
- Bij PVC flensverbindingen wordt bijna 40% van de storingen toegeschreven aan beschadiging van het afdichtingsmateriaal.



Figuur 44: Verdeling van verschijningsvorm per verbindingstype voor gestoorde verbindingen op AC leidingen. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen van type "X" (taart) en verschijningsvorm "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.



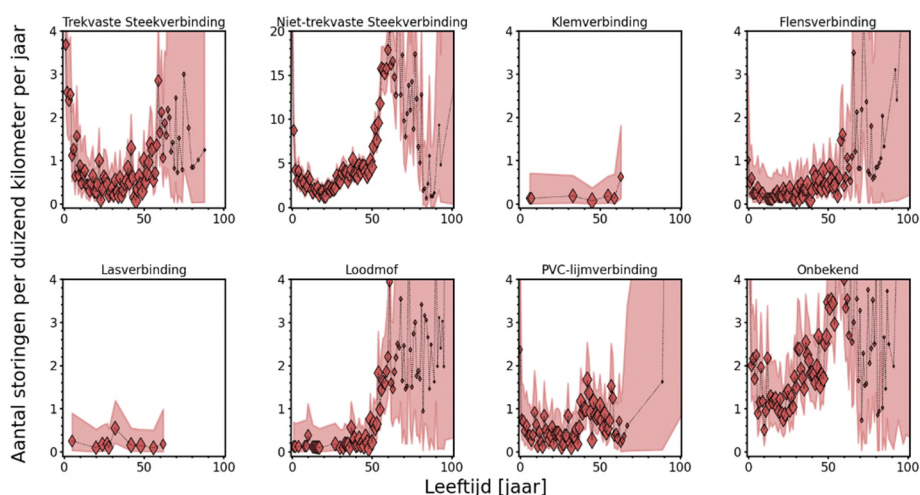
Figuur 45: Verdeling van verschijningsvorm per verbindingstype voor gestoorde verbindingen op PVC leidingen. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen van type "X" (taart) en verschijningsvorm "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.

### III.IV Storingen bij verbindingen per type en leeftijd

Er zijn verschillende analyses gemaakt van de storingen voor wat betreft faalmechanisme en leeftijd. Dit is nog niet nader geanalyseerd (bijvoorbeeld per materiaal), maar er zijn een aantal opmerkingen geplaatst bij de figuren die nader kunnen worden bediscussieerd en uitgewerkt.

Om het aantal storingen per verbinding type te normaliseren wordt er aangenomen dat het aantal verbindingen per type proportioneel is aan het aantal kilometer leiding. Bijvoorbeeld, als het bekend is dat het aantal kilometer leidingen met een leeftijd van 10 jaar, 25% van de gehele lengte bedraagt, wordt dit ook aangenomen voor de leeftijd van alle verbindingen met een leeftijd van 10 jaar. Dus de cijfers na normalisatie moeten als eerste orde schatting gezien worden. De belangrijkste waarnemingen voor normalisatie aan de hand van Figuur 46 zijn:

- Bij trekvaststeekverbindingen, niet-trekvaststeekverbindingen, en PVC-lijmverbindingen zijn relatief hogere storingen gemeld bij nieuw aangelegde verbindingen.
- Dit geldt niet bij loodmof of flensverbindingen, hetgeen voor de hand liggend is.
- Er is een heel sterke stijging bij het aantal storingen voor niet-trekvaststeekverbindingen na 50 jaar leeftijd.

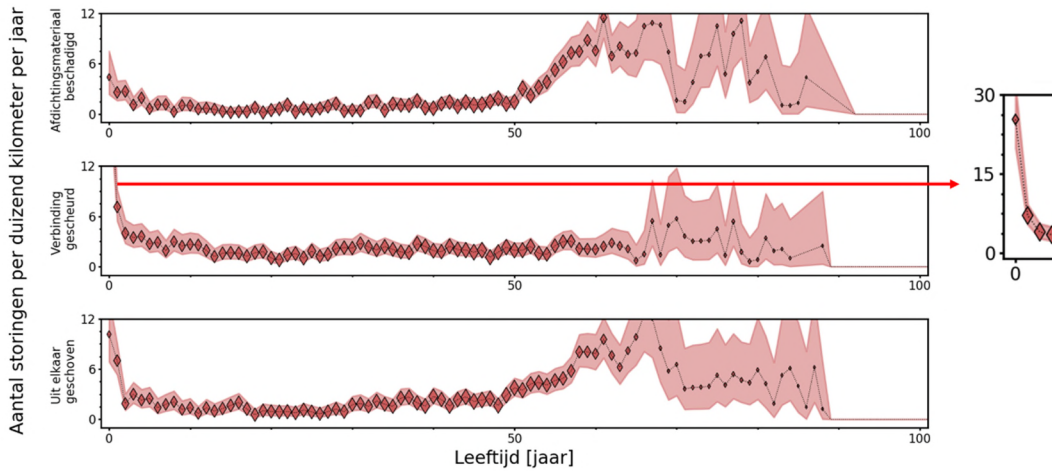


*Figuur 46: Genormaliseerde aantal storingen als functie van leeftijd per type verbinding. Grootte van marker is proportioneel aan aantal kilometer leiding. De gekleurde oppervlaktes vertegenwoordigen een onzekerheidsmarge van 95%. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen met type "X" (subplaatje) en leeftijd "Y" (horizontale as), zijn er "Z" storingen per duizend kilometer per jaar (verticale as) gemeld. Grootte van diamant is proportioneel aan kilometer leiding.*

### III.V Storingen bij verbinding per verschijningsvorm en leeftijd

Om het aantal storingen per verbinding type te normaliseren wordt er aangenomen dat het aantal verbindingen per type proportioneel is aan het aantal kilometer leiding. Dus de cijfers na normalisatie moeten als eerste orde schatting gezien worden. De belangrijkste waarnemingen voor normalisatie aan de hand van Figuur 47 zijn:

- Bij verschijningsvormen met scheur en uitschuiven van leidingen zijn het aantal storingen relatief hoog voor net aangelegde verbindingen.
- Er is een heel sterke stijging bij het aantal storingen door uit elkaar schuiven of beschadiging van afdichtingsmateriaal na 50 jaar leeftijd.
- Er lijkt geen kritische leeftijd voor het scheuren van de verbinding te zijn waarna er een flinke stijging in het aantal storingen gezien kan worden.

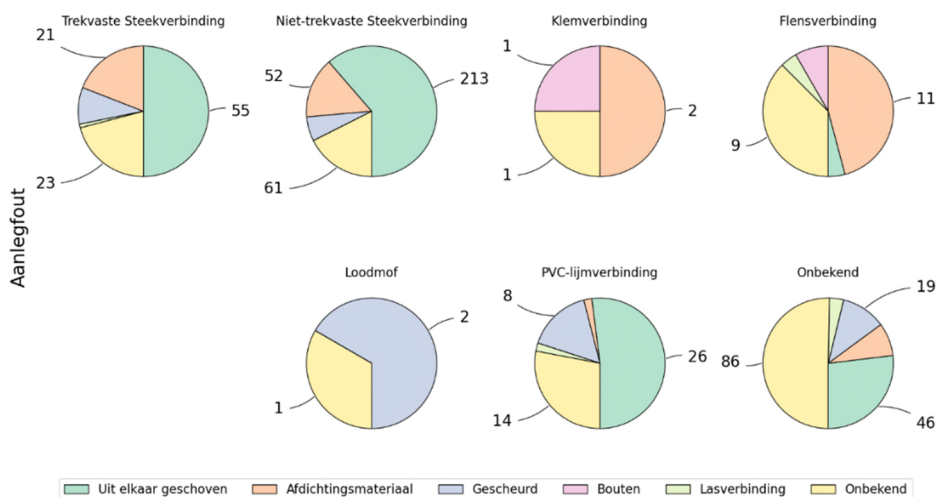


Figuur 47: Genormaliseerde aantal storingen als functie van leeftijd per type verschijningsvorm. Grootte van marker is proportioneel aan aantal kilometer leiding. De gekleurde oppervlaktes vertegenwoordigen een onzekerheidsmarge van 95%. Leeswijzer: Voor storingen bij verbindingen met verschijningsvorm "X" (subplaatje) en leeftijd "Y" (horizontale as), zijn er "Z" storingen (verticale as) gemeld. Grootte van diamant is proportioneel aan kilometer leiding.

### III.VI Storingen bij verbindingen per verbindingstype en verschijningsvorm toegeschreven aan aanlegfout / aantasting / uitwendige belasting

De volgende waarnemingen over storingen toegeschreven aan aanleg fouten kunnen op basis van Figuur 48 gemaakt worden:

- Bij trekvaste steekverbindingen, niet-trekvaste steekverbindingen, en PVC-lijmverbindingen leiden aanlegfouten in meer dan de helft van de gevallen tot uitschuiven van leidingen.
- Bij flensverbindingen wordt 40% van de storingen veroorzaakt door aanlegfouten die leiden tot beschadiging bij het afdichtingsmateriaal.



Figuur 48: Verdeling van verschijningsvorm per verbindingstype voor verbindingen waarvoor de storing aan aanlegfout toegeschreven zijn. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen toegeschreven aan aanlegfouten / aantasting / uitwendige belasting bij verbinding type "X" (taart) en verschijningsvorm "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.

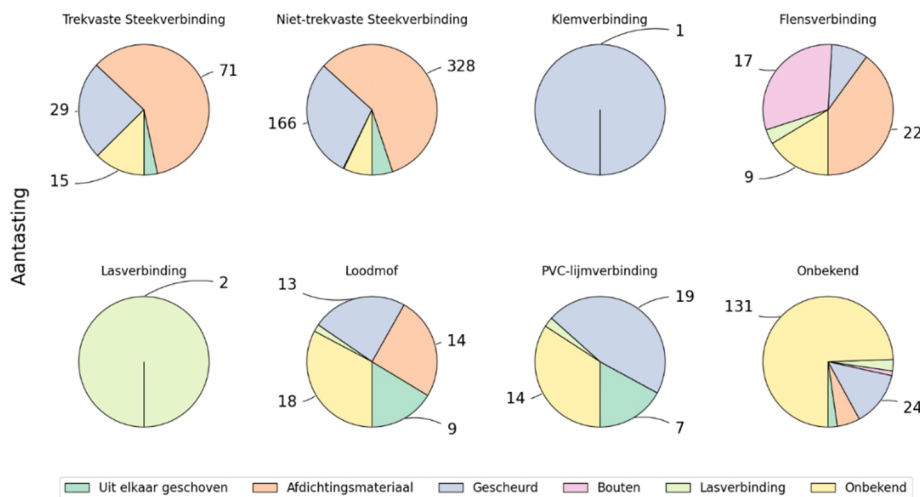
De volgende waarnemingen over storingen toegeschreven aan aantasting kunnen op basis van Figuur 49 gemaakt worden:



- Bij trekvaststeekverbindingen, niet-trekvaste steekverbindingen, en flensverbindingen leidt aantasting in de meerderheid van de gevallen tot beschadiging van de afdichting.
- Bij PVC-lijmverbindingen wordt ruim 40% van de storingen veroorzaakt door aantasting die leidt tot scheur op de verbinding.

De volgende waarnemingen over storingen toegeschreven aan uitwendige belasting kunnen op basis van Figuur 50 gemaakt worden:

- Bij trekvaststeekverbindingen en niet-trekvaste steekverbindingen is er een niet-eenduidige verdeling van verschijningsvormen.
- Bij PVC-lijmverbindingen wordt ruim helft van de storingen veroorzaakt door uitwendige belasting die tot scheur op de verbinding leidt.



Figuur 49: Distributie van verschijningsvorm per verbindingstype voor verbindingen waarvoor de storing aan aantasting toegeschreven zijn. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen toegeschreven aan aanlegfouten / aantasting / uitwendige belasting bij verbinding type "X" (taart) en verschijningsvorm "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.

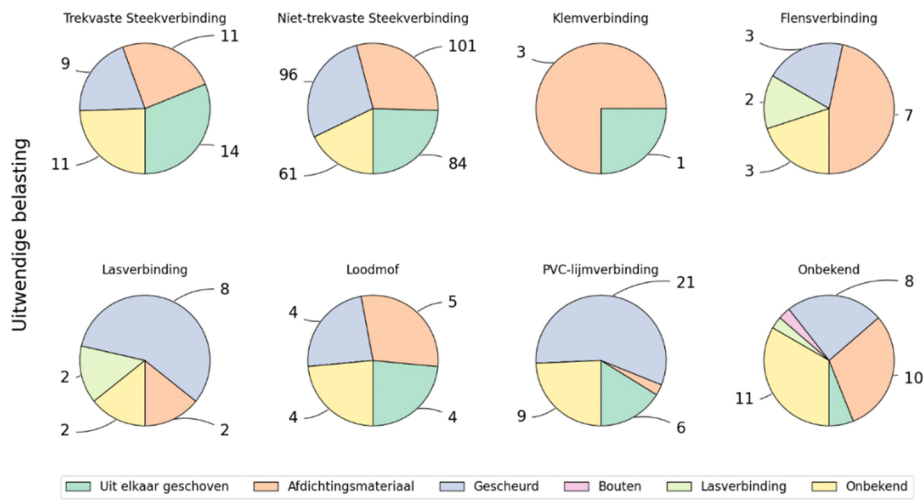
### III.VII Storingen bij verbindingen per maand (en per verschijningsvorm)

De volgende waarnemingen kunnen over de storingen op maandbasis op basis van Figuur 51 gemaakt worden:

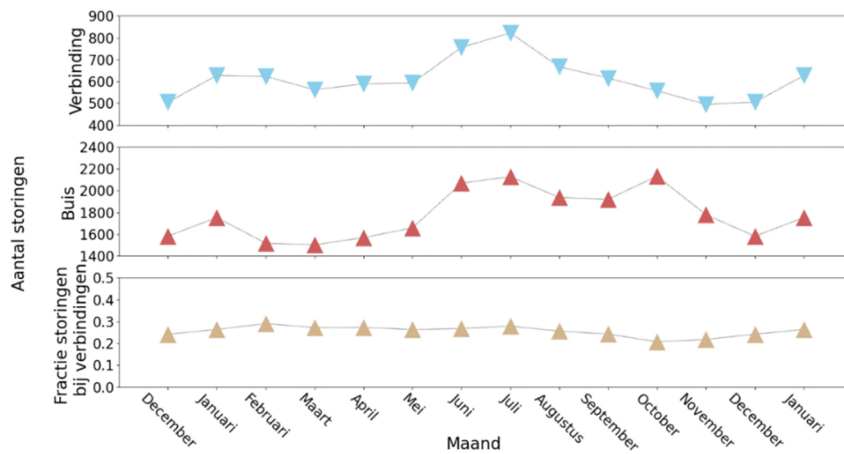
- Bij de buis zijn er meer storingen gemeld in de zomer/herfst maanden met relatief een lager aantal storingen in de lente.
- Bij de verbindingen zijn er meer storingen gemeld in de zomer met relatief een lager aantal storingen in de winter/lente.
- Er is weinig verschil in de fractie storingen bij verbindingen per maand.

De volgende waarnemingen kunnen over de storingen op maandbasis voor drie verschijningsvormen op basis van Figuur 52 gemaakt worden:

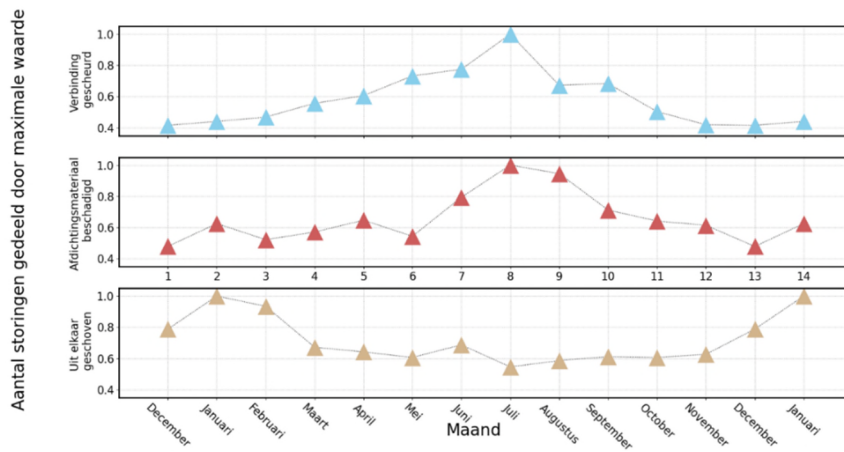
- De meeste scheur gerelateerde storingen vinden in Juli plaats met laagste gevallen in winter maanden.
- De meeste afdichtingsmateriaal gerelateerde storingen vinden in de zomer maanden plaats.
- De meeste uitschuiven gerelateerde storingen vinden in de winter maanden plaats met lagere gevallen in de rest van het jaar.



Figuur 50: Distributie van verschijningsvorm per verbindingstype voor verbindingen waarvoor de storing aan uitwendige belasting toegeschreven zijn. Cijfers zijn het aantal storingen. Cijfers zijn getoond mits ze hoger dan 10% van de storingen bijdragen. Leeswijzer: Voor storingen toegeschreven aan aanlegfouten / aantasting / uitwendige belasting bij verbinding type "X" (taart) en verschijningsvorm "Y" (kleur), zijn er "Z" storingen (taartpunt) gemeld.



Figuur 51: Storingen bij verbinding en buis door het jaar heen. Leeswijzer: In maand "X" (horizontale as) vinden er "Y" storingen (verticale as) plaats. Resultaten zijn voor alle materialen tezamen.



Figuur 52: Storingen bij verbinding als functie van verschijningsvorm door het jaar heen. Leeswijzer: In maand "X" (horizontale as) voor verschijningsvorm "Y" (subplaatje) vinden er "Z" storingen plaats ten opzichte van de maand met het meeste storingen (verticale as). Resultaten zijn voor alle materialen tezamen.