A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are distributed across the page, with some larger circles acting as hubs.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2023.050 | Juni 2023

Leidingfalen door dynamische belasting

Rapport

Leidingfalen door dynamische belasting

BTO 2023.050 | Juni 2023

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

Opdrachtnummer

402015-168

Projectmanager

Ina Vertommen

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

dr. ir. A. (Amistosh) Dash, dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, dr. B. (Bas) Wols

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. E.J.M (Mirjam) Blokker

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Leidingconditie, dynamische belastingen, waterslag, werkzaamheden, vermoeiing

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie

Karel van Laarhoven
T 030-6069697
E karel.van.laarhoven@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 2022 ©

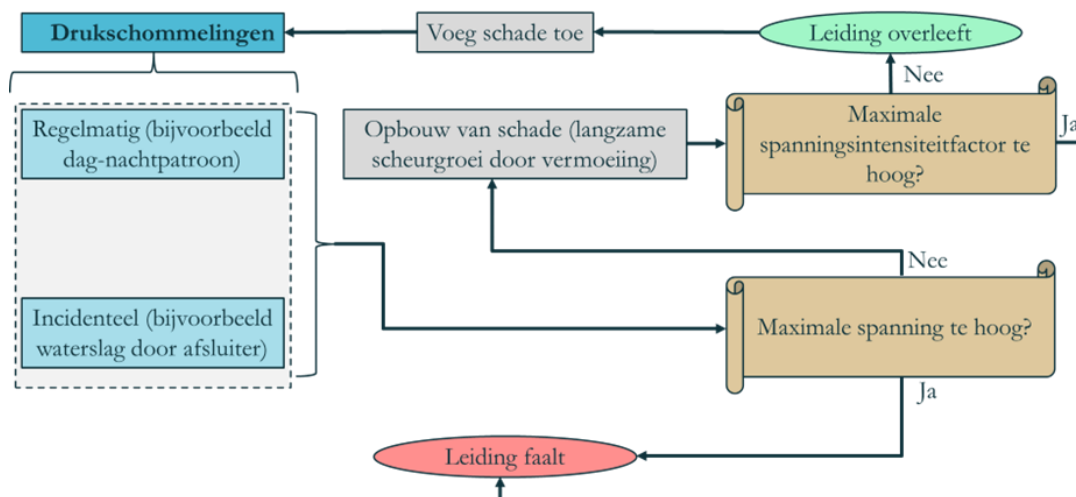
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Storingen die onopgemerkt worden veroorzaakt door werkzaamheden of drukschommelingen zijn moeilijk om te modelleren

Auteur(s) Amitosh Dash, Karel van Laarhoven en Bas Wols.

In een literatuuronderzoek is uitgezocht wat de mogelijkheden zijn om te rekenen aan de invloed van drukschommelingen in het leidingnet en van werkzaamheden bovengronds op de conditie van het leidingnet. In een aanvullende analyse van praktijkdata is vastgesteld dat de beschikbare rekenmodellen potentieel van nut zouden kunnen zijn om inzicht te krijgen in storingen die onopgemerkt door werkzaamheden worden veroorzaakt op een manier die nog niet kan worden verklaard met het huidige model Comsima. Om een dergelijk model op te kunnen stellen, is eerst meer inzicht nodig in de precieze faalwijzen en faalmechanismen die optreden bij deze storingen, en daarvoor zijn meer praktijkobservaties nodig.



Stroomschema voor het modelleren van de invloed van drukschommelingen op leidingconditie

Belang: Condiemodellen voor inzicht in specifieke situaties.

Drinkwaterbedrijven baseren beslissingen over het al dan niet vernieuwen van een leiding onder andere op het risico van storen. Drinkwaterbedrijven maken daarbij gebruik van uitgebreide beslissingsondersteuningssoftware (BOS) die informatie over leiding en omgeving aggregeren tot kans, effect en uiteindelijk risico.

Er is bij de drinkwaterbedrijven steeds meer de wens om de storingskansen te kunnen relateren aan de specifieke situatie van de leiding in kwestie. Dit zal extra relevant zijn in de aankomende

energietransitie, die zal leiden tot veel meer werkzaamheden in de buurt van het leidingnet. Dit maakt het voor drinkwaterbedrijven nog belangrijker om de effecten van die werkzaamheden – en de risico's van het wel of niet 'meegaan' met die werkzaamheden – in te kunnen schatten. Eén methode hiertoe is het gebruik van conditiemodellen. Dergelijke modellen kunnen op meerdere plaatsen bijdragen aan het beslissingsproces, zoals het vooraf inschatten van storingskansen, nadere analyse van een geprioriteerde leiding, of het ondersteunen van een analyse van storingsoorzaken achteraf.

Eén belangrijke set invloedsfactoren waar nog weinig modelleerervaring mee is in het BTO, zijn incidentele of terugkerende tijdelijke belastingen (zoals waterslag, of trillingen door werkzaamheden bovengronds). Het doel van het voorliggende onderzoek is om te verkennen wat de mogelijkheden zijn om vanuit een conditiemodel te rekenen aan twee belangrijke vormen van incidentele belasting: werkzaamheden en drukschommelingen.

Aanpak: Literatuuronderzoek en verkennende analyse van praktijkdata

Aan de hand van een literatuurstudie is geïnventariseerd wat voor uitgewerkte theorie er reeds voorhanden is aan de hand waarvan het BTO conditiemodel Comsima zou kunnen worden uitgebreid. Eerst is gekeken naar algemene theorie voor het beschrijven van dynamische belastingen en de effecten daarvan op conditie. Vervolgens is gezocht naar theorie waarmee beschreven kan worden welke dynamische belastingen ontstaan rond drukschommelingen en werkzaamheden. Tenslotte is er een verkennende analyse uitgevoerd waarin is gezocht naar verbanden tussen storingsdata, conditieberekeningen en observaties van werkzaamheden met behulp van satellietbeelden, om gevoel te krijgen welke meerwaarde het zou kunnen hebben om modellen voor werkzaamheden in te bouwen in Comsima.

Resultaten: overzicht van deelmodellen en benodigde data

Er zijn verschillende deelmodellen geïdentificeerd waarmee de invloed van drukschommelingen en werkzaamheden op drinkwaterleidingen zou kunnen worden gemodelleerd. Het meest ingewikkelde aspect van algemene dynamische belastingen om te modelleren is materiaalmoetheid. Bij het modelleren van de effecten van drukschommelingen is waterslag – verhoogde drukschommelingen bij extreem snelle veranderingen – het meest ingewikkeld om te modelleren in de context van een complexe leidingnetstructuur. Er kunnen ruwweg twee typen van effecten van werkzaamheden worden gemodelleerd: permanente vervorming(zetting) van bodem en leidingsysteem, en tijdelijke extra belasting vanwege trillingen in de bodem.

Hoewel modellen voor handen lijken, moet worden onderstreept dat er veel data nodig zal zijn om deze modellen te voeden. Voor zowel drukschommelingen als werkzaamheden geldt ten eerste dat er beschrijving van voorvallen in de tijd nodig is, gekoppeld aan relevante eigenschappen van de voorvallen, zoals specifieke details rond de uitvoering van werkzaamheden. Daarnaast zullen er empirisch nieuwe eigenschappen moeten worden bepaald van het leidingmateriaal, de bodem, en de omgeving.

Uit de analyse van storingen, conditiemodel en met satelliet geobserveerde werkzaamheden volgt dat werkzaamheden in het algemeen wel degelijk leiden tot een verhoogde kans op ‘spontane storingen’. Deze storingen kunnen echter niet worden verklaard met uit een conditiescore gebaseerd op reguliere belastingen: een leiding hoeft niet al overbelast te zijn om onopgemerkt te kunnen worden beïnvloed door werkzaamheden.

Toepassing: meer praktijkdata nodig voordat het zin heeft om te modelleren

Om te kunnen komen tot een toegespitst model voor de kans op na-ijl schade bij werkzaamheden van geval tot geval is het aan te bevelen om nader onderzoek te doen naar de precieze faalwijzen en faalmechanismen waarlangs ‘na-ijlschades’ door werkzaamheden verlopen. Hiervoor is het waarschijnlijk nodig om een tijd lang zorgvuldig de specifieke activiteiten tijdens werkzaamheden in het voorzieningsgebied nader te registreren en om zorgvuldige exitbeoordelingen uit te voeren bij ‘spontane’ storingen in de buurt van werkzaamheden.

Wat betreft de effecten van drukschommelingen is het aan te bevelen om vergelijkbare verkennende analyses van praktijkdata uit te voeren. De hoogfrequente drukmetingen die op het moment van schrijven door verschillende drinkwaterbedrijven worden verzameld op pilot-schaal vormen hier een goed startpunt voor.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Leidingfalen door dynamische belasting* (BTO-2023.050).

Inhoud

Managementsamenvatting	3
Inhoud	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond en doel	7
1.2 Aanpak en leeswijzer	8
2 Verkennende analyse van praktijkdata: Relaties tussen storingen, conditie en met satelliet geobserveerde werkzaamheden	9
2.1 Data en Analyse	9
2.2 Uitkomsten	11
2.3 Discussie	12
3 Algemene aanpak voor het modelleren van de effecten van dynamische belastingen op leidingconditie	14
3.1 Inleiding	14
3.2 Hoe ziet er een dynamische belasting eruit	14
3.3 Graduele achteruitgang van de toestand bij incidentele of cyclische belastingen: materiaalmoetheid	15
4 Het modelleren van bronnen van dynamische belastingen uit de drinkwaterpraktijk	20
4.1 Drukschommelingen	20
4.2 Graafwerkzaamheden	21
4.3 Andere invloeden van werkzaamheden op leidingconditie	24
4.4 Wegwijzer voor het incorporeren van werkzaamheden in COMSIMA	26
5 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen	27
5.1 Conclusies	27
5.2 Bedrijfsparagraaf	27
5.3 Aanbevelingen	28
6 Referenties	29
I Benodigde data	30

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel

Drinkwaterbedrijven baseren beslissingen over het al dan niet vernieuwen van een leiding onder andere op het risico van storen. Het risico wordt bepaald door zowel de kans dat de leiding stoort als het effect dat het storen van de leiding heeft. Drinkwaterbedrijven maken daarbij gebruik van uitgebreide beslissingsondersteuningssoftware (BOS) die informatie over leiding en omgeving aggregeren tot kans, effect en uiteindelijk risico.

In de huidige aanpak wordt de kans op het storen van een bepaalde leiding typisch afgeleid uit het collectieve storingsgedrag van vergelijkbare leidingen: cohorten. Er is bij de drinkwaterbedrijven echter steeds meer de wens om de storingskansen te kunnen relateren aan de specifieke situatie van de leiding in kwestie, onder andere in verband met de energietransitie, waarin naar verwachting veel vaker de vraag zal komen om wel of niet werkzaamheden te combineren met derden. Daarbij zal het belangrijk zijn om de effecten van werkzaamheden in de buurt van drinkwaterleidingen in te kunnen schatten, en om de risico's in te kunnen schatten van het wel of niet 'meegaan' met werkzaamheden (eigen leidingen ook vervangen of juist laten liggen). Eén methode hiertoe is het gebruik van conditiemodellen: fysische modellen die op basis van een parametrische beschrijving van leiding en omgeving de toestand van de leiding berekenen in relatie tot de technische grenzen die deze toestand mag bereiken. Een dergelijk model kan op meerdere plaatsen bijdragen aan het beslissingsproces, zoals het vooraf inschatten van storingskansen, nadere analyse van een geprioriteerde leiding, of het ondersteunen van een analyse van storingsoorzaken achteraf.

In het conditiemodel Comsima worden de inzichten uit BTO-onderzoek naar leidingconditie samengebracht. Comsima benadert de conditie van een leiding via spanningsberekeningen op basis van leidingspecificaties, geo-informatie en kennisregels voor veroudering (BTO 2015.082, BTO 2017.074, BTO 2020.001). Verschillende bedrijven werken op dit moment aan een eerste toepassing van Comsima in hun BOS door de berekende conditie te gebruiken als benadering voor storingskansen. In het recente BTO is onderzocht hoe dit model gecombineerd kan worden met onzekerheden in modelparameters om daadwerkelijke storingskansen en toekomstig storingsgedrag van groepen leidingen te modelleren (BTO 2017.045; BTO 2019.050). In opvolgend onderzoek werd tenslotte een probabilistisch raamwerk opgezet waarmee de conditiemodelresultaten voor een individuele leiding vertaald kunnen worden naar een voorspelling van het toekomstige storingsgedrag van die leiding. Daarbij werd duidelijk dat er op dit moment onvoldoende data is om dergelijke gedetailleerde modellen te voeden (BTO 2022.049).

Eén belangrijke set invloedsfactoren waar nog weinig modelleerervaring mee is in het BTO, zijn incidentele of terugkerende tijdelijke belastingen. Voorbeelden van dergelijke belastingen zijn: waterslag, reguliere drukschommelingen door bijvoorbeeld grootverbruik, werkzaamheden van derden, stormen en aardbevingen. Vanuit de praktijk is het belang van dergelijke belastingen op storingen al meermaals aangetoond. De invloed van variaties in het weer (bijvoorbeeld variaties in neerslag, temperatuur en wind) op storingen werd bevestigd in (BTO 2016.016). De invloed van werkzaamheden aan gasleidingen op 'spontane' storingen werd aangetoond in (BTO 2014.095), maar recent bijvoorbeeld ook in intern onderzoek van WML naar de storingsfrequenties in de buurt van leidingen waar het waterbedrijf niet 'mee ging' met werkzaamheden. Verschillende drinkwaterbedrijven hebben op het moment van schrijven (anekdotische) ervaring met storingen die voorafgegaan werden door drukstoten (vanuit bijvoorbeeld pompstations, afsluiters of brandkranen).

Het doel van het voorliggende onderzoek is om te verkennen wat de mogelijkheden zijn om vanuit een conditiemodel te rekenen aan twee belangrijke vormen van incidentele belasting: werkzaamheden en drukschommelingen.

1.2 Aanpak en leeswijzer

Ten eerste is er een verkennende analyse uitgevoerd waarin is gezocht naar verbanden tussen storingsdata, conditieberekeningen en observaties van werkzaamheden met behulp van satellietbeelden, om gevoel te krijgen welke meerwaarde het zou kunnen hebben om modellen voor werkzaamheden in te bouwen in Comsim. Dit is beschreven in hoofdstuk 2. Vervolgens is aan de hand van een literatuurstudie geïnventariseerd welke uitgewerkte theorie er voorhanden is aan de hand waarvan het conditiemodel Comsim zou kunnen worden uitgebreid. Eerst is gekeken naar algemene theorie voor het beschrijven van dynamische belastingen en de effecten daarvan op conditie, beschreven in hoofdstuk 3. Vervolgens is gezocht naar theorie waarmee beschreven kan worden welke dynamische belastingen ontstaan rond drukschommelingen en werkzaamheden, beschreven in hoofdstuk 4. De conclusies en aanbevelingen worden besproken in hoofdstuk 5.

2 Verkennende analyse van praktijkdata: Relaties tussen storingen, conditie en met satelliet geobserveerde werkzaamheden

Evides heeft samen met Orbital Eye in 2019-2020 een pilot uitgevoerd waarbij werkzaamheden werden geïdentificeerd aan de hand van satellietbeelden in combinatie met KLIC data. Analyse van de satellietbeelden maakt het mogelijk om relatief nauwkeurig (op schaal van meerdere meters) verhoogde activiteit op straat waar te nemen. Door die informatie te combineren met de KLIC polygonen (die zelf grover ingetekend zijn) kan de aard en/of relevantie van de werkzaamheden met meer zekerheid vastgesteld worden. Een van de uitkomsten van de pilot was dat een substantieel aandeel (~30%) van de spontane storingen in het leidingnet dicht bij deze waargenomen werkzaamheden lagen in zowel plaats en tijd, terwijl minder dan 30% van het totale leidingnet op die manier in de buurt van de werkzaamheden lag. Het percentage segmenten binnen een KLIC melding is ~16% over de periode van 2 jaar, en het percentage segmenten dicht bij werkzaamheden dicht bij satelliet, binnen een KLIC melding, is ~5%. Op basis hiervan werd gesteld dat deze verhoogde frequentie van spontane storingen in de buurt van werkzaamheden zou kunnen duiden op 'na-ijlschades'.

Eén van de vragen die na de pilot resteerde, is of de spontane storingen in de buurt van werkzaamheden ook deels verklaard kunnen worden door hun conditie: hebben de segmenten die storen vóór de werkzaamheden al een duidelijk slechtere conditie dan de overige segmenten die in de buurt van de werkzaamheden liggen? Als dit het geval blijkt te zijn, zouden conditieberekeningen handvatten kunnen geven om alerter te zijn op werkzaamheden met een verhoogd risico op schade. In de onderstaande analyse werd de data van Orbital Eye gecombineerd met Comsima berekeningen om een antwoord te vinden op deze vraag.

2.1 Data en Analyse

Satellietdata. De data van de case study is opgezet rond het Rijnmond leidingnet van Evides, opgedeeld in segmenten van ~10 m. Orbital eye heeft, voor elk kwartaal in de periode 2019-2020, onder andere de volgende parameters toegewezen aan leidingsegmenten waarop activiteit van werkzaamheden is waargenomen:

- `Stress_score_activity` = activiteit gemeten in nabijheid van KLIC en radar
- `Stress_score_radar_change` = activiteit gemeten in nabijheid van radar data, zonder te letten op KLIC
- `first_activity_date` en `latest_activity_date`, de periode aangegeven door de KLIC gegevens.

Daaruit is vervolgens nog afgeleid:

- `Periode_KLIC`: Periode in dagen tussen de eerste en laatste activiteit in KLIC.
- `Periode_activity`: De periode in nabijheid van radar-geregistreerde activiteit (in dagen), berekend uit de `periode_KLIC`, maar verkort voor de deelperiode waarin de segmenten een activiteit (`stress_score_radar_change`) van 0 hadden.

De kwartaaldata is vervolgens aan elkaar gekoppeld in een enkel bestand. Als er meerdere segmenten op verschillende kwartalen activiteit hadden, zijn de periodes bij elkaar opgeteld en voor de scores de maximum waarden genomen. Op deze manier is er voor elk segment een unieke waarde.

Storingsdata. Evides heeft voor het gebied over de periode 2019-2020 in totaal 888 storingen geregistreerd. Voor elke storing is bepaald of deze binnen een segment viel waarop activiteit gevonden is op basis van de orbital eye

data, en of dit binnen het tijdframe paste. Hier is onderscheid gemaakt tussen KLIC-activiteit ($stress_score_activity > 0$) of radaractiviteit ($stress_score_radar_change > 0$). N.B. de storingen die vallen binnen de radar activiteit vallen ook altijd binnen de KLIC activiteit. Daarnaast zijn storingen extra geannoteerd wanneer deze wel vielen binnen de segmenten waarop activiteiten zijn gevonden, maar buiten het tijdsbereik vielen.

Conditiecores. Op ieder segment van het leidingnet is een Comsima-berekening uitgevoerd. De details van deze berekening zijn nader beschreven in (BTO 2022.049, paragraaf 3.2). Voor ieder segment zijn de volgende zaken bijgehouden:

- Fail: segmenten die een storing hebben gehad krijgen een 1, anders een 0.
- Fail_KLIC: segmenten die gestoord hebben binnen een KLIC activiteit krijgen een 1, anders een 0.
- Fail_activity: segmenten die gestoord hebben binnen een KLIC activiteit en een radar activiteit krijgen een 1, anders een 0.
- Fail_out_of_range: segmenten die gestoord hebben binnen een KLIC activiteit maar buiten het tijdframe krijgen een 1, anders een 0.
- Period_KLIC: periode waarin een segment een KLIC activiteit heeft gehad.
- Period_activiy: periode waarin een segment een KLIC activiteit en radar activiteit heeft gehad.
- lx_segment: lengte van segment

De volgende parameters worden gebruikt om een gewogen gemiddelde te bepalen van de faalparameter van Comsima (mod_fail):

- Length_KLIC: zelfde als lengte van segment indien binnen KLIC melding, anders 0.
- Length_activity: zelfde als lengte van segment indien binnen KLIC melding en radar activiteit, anders 0.
- Length_fail: zelfde als lengte van segment indien segment heeft gefaald, anders 0.
- Length_nonfail: zelfde als lengte van segment indien segment niet heeft gefaald, anders 0.

Op deze manier is voor de verschillende groepen (wel falen, wel falen binnen KLIC, niet falen, etc.) de berekende Comsima parameter bepaald als gewogen gemiddelde, gewogen over de lengte van elk segment:

- Faalparameter voor alle segmenten (mod_fail).
- Faalparameter voor alle segmenten die geen storing hebben gehad gedurende de 2 jaar ($mod_nonfail$).
- Faalparameter voor segmenten die een KLIC melding hebben gehad (mod_fail_KLIC)
- Faalparameter voor segmenten die een KLIC melding hebben gehad en die een storing hebben gehad de afgelopen 2 jaar ($mod_fail_KLIC_storing$)
- Faalparameter voor segmenten die een radar melding hebben gehad ($mod_fail_activity$)
- Faalparameter voor segmenten die een radar melding hebben gehad en die een storing hebben gehad de afgelopen 2 jaar ($mod_fail_activity_storing$)

Storingsfrequenties. De storingsfrequenties van verschillende deelgroepen van het net (verdeeld op basis van materiaal en uitslag van KLIC en sateliet) zijn bepaald door de som van het aantal storingen (n_{stor}) op segmenten in de groep te delen door de som van de segmentlengtes ($L_{segment}$), vermenigvuldigd met de periode ($T_{segment}$) waarover het segment binnen een bepaalde subselectie viel (bijvoorbeeld KLIC-melding):

$$freq = \frac{\sum n_{stor}}{\sum T_{segment} * L_{segment}}$$

De storingsfrequenties zijn bepaald voor de volgende situaties:

- Storingen op alle segmenten
- Storingen op segmenten gedurende een KLIC-melding
- Storingen op segmenten gedurende radaractiviteit
- Storingen op segmenten waarop een KLIC-melding is geweest, maar die buiten de periode van de KLIC melding gebeurde.
- Storingen op segmenten waarop geen KLIC-melding is geweest.

Groepen. Bovenstaande analyses van storingsfrequenties en Comsima getallen zijn gedaan voor 12 groepen: uitgesplitst naar zowel leidingmateriaal als naar de veroorzakers ‘schade’ (als dit door Evides is aangemerkt als schade direct veroorzaakt door werkzaamheden) en ‘degradatie’ (als dit door Evides aangemerkt is als een spontane storing vanwege degradatie).

2.2 Uitkomsten

De resultaten voor de Comsima-berekeningen staan in Tabel 1.

- Omdat de meeste segmenten geen storing hebben gehad, zijn de scores van alle segmenten en de segmenten zonder storing nagenoeg gelijk.
- Er zit verschil in scores tussen de segmenten zonder storing en met storing. Opvallend is dat de trends voor de storingen met degradatie per leidingmateriaal anders zijn dan die met de storing veroorzaakt door schade. Bij AC en ST zien we een kleine afname in Comsima score bij segmenten met storing aangeduid als degradatie en juist een toename bij storingen aangeduid als schade. Bij PVC is de verandering in Comsima scores over de hele linie minimaal. Mogelijk speelt hier ook mee dat de populatie van leidingen (leeftijd, diameter, etc.) verschillend is voor de verschillende storingstypes.
- De conditiescores van de segmenten die zijn gestoord door ‘degradatie’ lijken niet danig anders te zijn als ze stoorden in nabijheid van werkzaamheden of niet.
- De conditiescores van de segmenten die zijn gestoord door ‘schade’ zijn onafhankelijk van de fijnmazigheid van de detectie (alles, filter op KLIC, of filter op satelliet). Dit is naar verwachting, omdat nagenoeg alle ‘schade’ ook in de buurt van radaractiviteit ligt.

Tabel 1 Comsima scores voor segmenten met en zonder storingen (degradatie en schade). Een hogere Comsima score duidt op een slechtere conditie.

Storing?→	Alle segmenten		Zonder storing	Segmenten met storing ‘degradatie’			Segmenten met storing ‘schade’		
	KLIC	Activiteit	Alle	Alle	KLIC	Activiteit	Alle	KLIC	Activiteit
AC	0.140	0.140	0.139	0.119	0.120	0.123	0.158	0.158	0.160
GGIJ	0.108	0.105	0.108	0.103	0.095	0.092	0.109	0.109	0.109
PE 100	0.316	0.302	0.303	0.242	0.250	0.235	0.286	0.290	0.282
PE 40	0.248	0.247	0.256	0.284	0.284	0.272	0.260	0.260	0.260
PVC	0.422	0.423	0.419	0.442	0.443	0.444	0.427	0.428	0.424
ST	0.218	0.214	0.225	0.126	0.131	0.156	0.341	0.341	0.458

Over het algemeen lijkt de Comsima-score weinig onderscheid te maken tussen de verschillende categorieën. Wellicht zijn de groepen hier te groot om met gemiddeldes te werken, en is er een analyse in meer detail nodig om onderscheid te kunnen maken. Dat suggereert dat dat onderscheid niet groot zal zijn. Een andere mogelijkheid is dat de reguliere belastingen op basis waarvan Comsima de conditie inschat (druk, bodembelasting, verkeer, zetting

en hoekverdraaiing) geen grote rol spelen bij deze ‘na-ijschades’ en dat het model dus niet compleet genoeg is deze te modelleren. De storingsfrequenties laten een duidelijker beeld zien van het effect van werkzaamheden (Tabel 2 voor ‘schade’ en Tabel 3 voor ‘degradatie’).

- Voor alle leidingmaterialen zien we een toename in de storingsfrequentie gedurende de periode dat een KLIC melding op een leiding is geweest.
- In sommige gevallen is de storingsfrequentie nog hoger als ook activiteit is waargenomen uit de satellietdata in het KLIC gebied. Een opmerkelijke uitzondering is dat ‘schade’ aan PVC een lagere frequentie heeft in de buurt van de waargenomen activiteiten dan elders in het KLIC gebied.
- Ook opmerkelijk is dat gietijzer geen gemelde ‘schade’ heeft, maar wel een substantieel hogere storingsfrequentie laat zien in de buurt van waargenomen activiteit.

Tabel 2 Faalfrequenties (#/km/yr) voor leidingen met storing aangeduid als schade die vallen binnen de verschillende gebieden waarop KLIC meldingen of activiteiten zijn geweest.

	Aantal storingen	Alle	Binnen KLIC	Binnen activiteit	Binnen KLIC gebied, buiten range	Buiten KLIC gebied
AC	43	0.029	0.062	0.090	0.021	0.003
PE 100	10	0.007	0.031	0.000	0.000	0.003
PE 40	4	0.010	0.016	0.068	0.009	0.000
PVC	156	0.018	0.064	0.040	0.009	0.001
ST	5	0.004	0.015	0.034	0.000	0.000

Tabel 3 Faalfrequenties (#/km/yr) voor leidingen met storing aangeduid als degradatie die vallen binnen de verschillende gebieden waarop KLIC meldingen of activiteiten zijn geweest.

	Aantal storingen	Alle	Binnen KLIC	Binnen activiteit	Binnen KLIC gebied, buiten range	Buiten KLIC gebied
AC	167	0.111	0.170	0.343	0.087	0.045
GGIJ	34	0.064	0.083	0.166	0.036	0.105
PE 100	26	0.019	0.028	0.020	0.013	0.014
PE 40	8	0.019	0.031	0.136	0.017	0.000
PVC	404	0.047	0.068	0.081	0.035	0.030
ST	15	0.011	0.006	0.000	0.009	0.013

2.3 Discussie

Aangezien Comsima-scores in het verleden correlaties hebben laten zien met storingsfrequenties van leidingen (BTO 2015.082, BTO 2017.074, BTO 2022.049), is het opmerkelijk dat er in deze analyse wel een relatie tussen KLIC en storingsfrequenties kan worden gevonden, maar niet met het conditiemodel. Het suggereert dat – ervan uitgaande dat Comsima wel degelijk enige verklarende waarde heeft – de verklarende factoren die gevangen zijn met Comsima niet noemenswaardig verschillen over de categorieën die hier zijn aangebracht: Comsima lijkt volledig ongevoelig voor de factoren die leiden tot schade door werkzaamheden. Aan de ene kant ligt dit in de lijn de verwachting, want de effecten van werkzaamheden worden niet expliciet gemodelleerd in Comsima.

Aan de andere kant betekent het ook dat de ‘reguliere conditie’ die Comsima modelleert (Tabel 1) – d.w.z. de conditie beschreven door de dagelijkse belastingen en lange-termijn degradatie van de leiding – geen verklarende waarde heeft met betrekking tot de verhoogde storingsfrequenties rond werkzaamheden (Tabel 2 en 3). Eventuele verhoogde of verlaagde kwetsbaarheid van leidingen kan dus niet worden bevestigd met conditieberekeningen.

Voor direct bevestigde schade door derden ligt dit in de lijn der verwachting: schade door derden gaat met grof geweld waarbij materiaalsterkte en -toestand nog maar een beperkte rol speelt. Minder voor de hand ligt echter dat deze invloed ook ontbreekt bij de 'na-ijlschades', de verhoogde frequentie van storingen nabij werkzaamheden die niet direct herkenbaar bleken en dus werden aangemerkt als 'degradatie'. Op basis van deze uitkomsten lijkt het weinig meerwaarde te hebben om aan te sturen op een gecombineerd model voor reguliere en dynamische belastingen; een apart model, toegespitst op de faalmechanismen bij werkzaamheden, lijkt logischer.

De precieze faalmechanismen waarlangs dergelijke 'na-ijlschades' zouden kunnen verlopen hebben een merkwaardige combinatie van eigenschappen: het trage verloop – waardoor de schade tijdens de werkzaamheden onopgemerkt blijft – suggereert een geleidelijk proces waarin de bezwijkspanning steeds dichter genaderd wordt, wat slecht te rijmen valt met de ogenschijnlijke ongevoeligheid van het mechanisme voor de reguliere toestand van de leiding. Om er achter te komen waarop moet worden gelet bij werkzaamheden om deze vermeende na-ijlschades te voorkomen, is gericht onderzoek naar deze faalmechanismen en de daaruit volgende faalwijzen nodig.

3 Algemene aanpak voor het modelleren van de effecten van dynamische belastingen op leidingconditie

3.1 Inleiding

Hoewel er waarschijnlijk veel specifieke bronnen van dynamische belastingen zijn waaraan een leiding zou kunnen worden blootgesteld, kunnen een aantal effecten van dynamische belastingen met algemene theorie worden beschreven. Ten eerste leidt iedere verandering in belasting van het systeem tot een nieuwe totaalspanning in de leiding, waardoor de faalspanning zou kunnen worden overschreden. Als de nieuwe (eventueel tijdelijke) belasting bekend is, kan dit effect redelijk gemakkelijk worden meegenomen met de reguliere spanningen om het effect op conditie te bepalen. Ingewikkelder zijn de effecten van kortstondige belastingen die niet voldoende zijn om de bezwijkspanning te overschrijden, maar die wel tot een blijvende verzwakking van het systeem leiden: 'materiaalmoetheid'. Moser en Folkman (2008) stellen dat vermoeiing een proces is dat onafhankelijk beschouwd kan worden van het proces dat optreedt als de bezwijkspanning kortstondig wordt overschreden. Ze wijzen daarbij ook op een derde onafhankelijk proces specifiek voor kunststof leidingen: het bezwijken onder langdurige blootstelling aan een statische belasting die lager is dan de bezwijkspanning (in de sector bekend als 'langzame scheurgroei', zie ook BTO 2018.009 of BTO 2020.001). In het promotiewerk van Visser (2008) wordt echter experimenteel vastgesteld dat er enige interacties tussen vermoeiing en langzame scheurgroei verwacht worden in hard PVC.

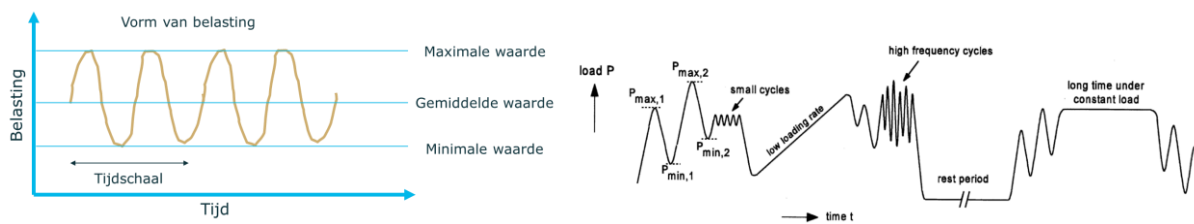
Aangezien kortstondige overschrijding van de bezwijkspanning relatief makkelijk te modelleren is (de grootste uitdaging is het verkrijgen van data rond de veranderende belasting) met modellen die eerder zijn ontwikkeld in het BTO (maar nog niet voor dat doel zijn ingezet), richt dit hoofdstuk zich met name op de materiaalmoetheid.

3.2 Hoe ziet er een dynamische belasting eruit

Met een dynamische belasting wordt een belasting bedoeld die in tijd varieert. Dynamische belastingen komen in verschillende vormen voor. De twee hoofdcomponenten van een dynamische belasting zijn:

- Cyclische belastingen – Deze zijn eenvoudig te definiëren in termen van een gemiddelde, maximale, en minimale waarde, een periode, en de vorm van het patroon. Zowel de amplitude – het verschil tussen de maximale en minimale waarde – en de verhouding tussen de minimale en maximale waarde zijn relevant.
- Incidentele veranderingen in belasting – Het kan ook voorkomen dat een belasting incidenteel verandert van niveau. De snelheid waarmee de verandering optreedt is van bijzonder belang in het geval van veranderingen in de druk, met het oog op waterslag.

Belastingspatronen zullen in de praktijk uit verschillende varianten van deze twee uitersten zijn opgebouwd, zoals geïllustreerd in Figuur 1. In het voorbeeld hieronder zijn verschillen in amplitudes, frequenties, en vormen van het belastingspatroon zichtbaar. Dit maakt het relatief ingewikkeld om de effecten van een realistisch belastingspatroon met behulp van theorie te bestuderen.



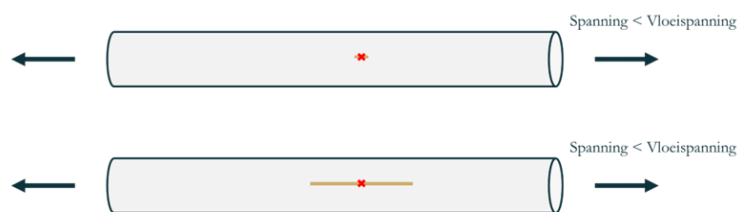
Figuur 1: Een paar voorbeelden van dynamische belastingen. Links: een perfect cyclische belasting. Rechts: Een realistischer patroon van dynamische belastingen, opgebouwd uit incidentele veranderingen en verschillende cyclische componenten. Overgenomen van (Schijve, 2009).

3.3 Graduele achteruitgang van de toestand bij incidentele of cyclische belastingen: materiaalmoeheid

Als een incidentele belasting niet leidt tot het overschrijden van de faalspanning en het bezwijken van het materiaal, is het nog steeds mogelijk dat het materiaal blijvend verzwakt wordt. Onder invloed van dynamische belasting zullen er eerder microscheurtjes in het materiaal ontstaan die vervolgens ook sneller zullen groeien via 'langzame scheurgroei'. De algemene term voor dit verschijnsel is materiaalmoeheid (*fatigue*). Onder constante belasting blijkt langzame scheurgroei reeds het dominante faalmechanisme voor kunststof leidingmaterialen in de praktijk, en dit mechanisme wordt versneld wanneer de belastingen niet constant zijn (Boersma en Breen, 2005, Visser 2007). Materiaalmoeheid treedt echter ook op in metalen en keramische materialen en kan met dezelfde theorie beschreven worden, dus materiaalmoeheid zou ook van belang kunnen zijn voor gietijzeren, stalen en cementhoudende leidingen.

3.3.1 Scheurgroei onder constante belasting

Vanwege het belang voor kunststof leidingmaterialen is scheurgroei in leidingen onder constante belasting al uitvoerig onderzocht. Het TNO onderzoek van Boersma en Breen (2005) is nog steeds een van de belangrijkste werken op dit vlak en een uitgebreid overzicht van literatuur wordt bijvoorbeeld gegeven door van Laarhoven (KWR 2022.041). Langzame scheurgroei onder constante belasting in PVC wordt geïllustreerd in Figuur 2: i. alle leidingen hebben defecten die onder voldoende belasting kunnen dienen als initiatiepunt voor scheur; ii. eenmaal geïnitieerd groeit een scheur langzaam in tijd; iii. zodra de scheur een kritische omvang bereikt, kan de scheur stabiliseren of instabiel worden en catastrofaal snel uitgroeien tot een lek.

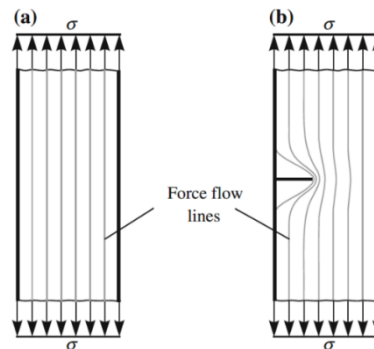


Figuur 2: Illustratief voorbeeld van langzame scheurgroei voor een leiding onder een constante belasting. Boven: ontstaan van scheur dichtbij een defect. Onder: langzame groei van een scheur.

De langzame scheurgroei leidt tot een graduele opbouw van schade. Dit proces kan met *linear elastic fracture mechanics* (LEFM) worden beschreven. Met vergelijking (1), bekend als de wet van Paris, kan de groei van een scheur met scheurgrootte, a , in tijd, t , onder constante materiaalspanning, σ , berekend worden. Hiervoor moet de geometrische factor van de spanningsconcentratie rond de scheur, Y , bekend zijn (Figuur 3). Ook moeten enkele materiaalspecifieke constanten, A , m , bekend zijn, die alleen empirisch voor een materiaal kunnen worden bepaald.

$$\frac{da}{dt} = A \cdot (\sigma\sqrt{aY})^m \quad (1)$$

Langzame scheurgroei onder constante belasting is al ingebed als verouderingsmodule in Comsima (van Laarhoven, 2020).



Figuur 3: Illustratie van spanningsconcentratie rond een scheur. Een materiaal staat onder spanning vanwege belastingen aan de boven- en onderzijde. Het voorbeeld aan de linkerkant heeft geen scheur, het voorbeeld aan de rechterkant wel. De spanningsvelden ten gevolge van de belastingen worden met de lijnen van de pijlen aangegeven. Als er geen scheur is, lopen deze lijnen rechtdoor en wordt het spanningsveld gelijkmatig over de breedte van het materiaal verdeeld. Als er wel een scheur is, wordt het spanningsveld lokaal afgebogen, waardoor de spanningen zich concentreren rond de tip van de scheur. Deze concentratie van spanningen leidt vervolgens tot steeds snellere scheurgroei. De precieze vorm waarmee het spanningsveld wordt afgebogen wordt beschreven door de geometrische factor, Y . Beeld overgenomen van (Richard & Sander, 2016).

3.3.2 Langzame scheurgroei onder cyclische belastingen

Langzame scheurgroei verloopt anders onder dynamische belasting (typisch sneller) dan onder constante belasting. Desalniettemin verloopt het proces op hoofdlijnen hetzelfde (initiatie, langzame groei, stabilisatie óf instabiel falen). Dit verloop is ook geïllustreerd aan de linkerkant van **Error! Reference source not found.** De langzame scheurgroei onder perfect cyclische belasting kan beschreven worden met vergelijking (2). Deze vergelijking lijkt qua vorm op vergelijking (1), maar er zijn belangrijke verschillen. Ten eerste, in plaats van tijd van belasting wordt het aantal cycli, N , maatgevend voor het verloop van de groei. Ten tweede is niet het absolute niveau van de heersende spanning, maar de amplitude van de variërende spanning, $\Delta\sigma$, belangrijk. Tenslotte zijn de materiaalspecifieke parameters die de scheurgroei-eigenschappen van het materiaal beschrijven, A_{cy} , m_{cy} , anders dan die die het gedrag onder constante belasting beschrijven.

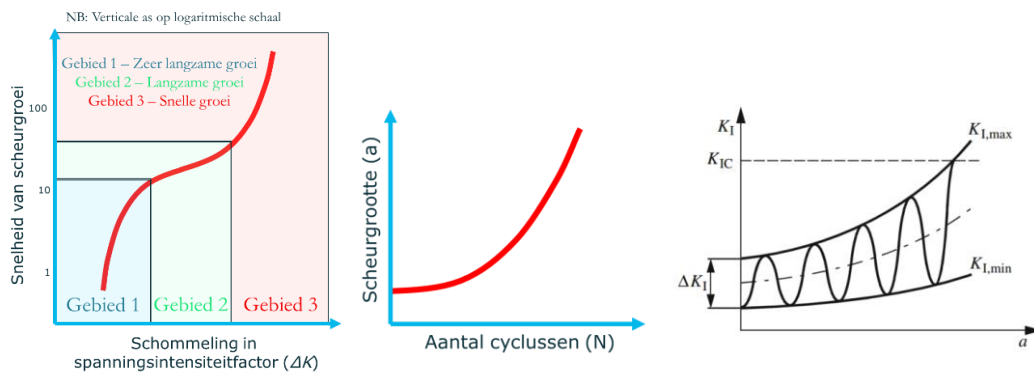
$$\frac{da}{dN} = A_{cy} \cdot (\Delta\sigma\sqrt{aY})^{m_{cy}} \quad (2)$$

Het midden van Figuur 4. illustreert de ontwikkeling van de scheurgroei die door vergelijking (2) wordt beschreven. Met behulp van deze vergelijking kan de levensduur in verschillende situaties geschat worden. Er zijn verfijndere modellen waarmee scheurgroei gedetailleerde beschreven kan worden. Een voorbeeld hiervan is de vergelijking van Forman-Mettu (NASA, 2000)¹. Deze gedetailleerdere modellen hebben veel informatie over materiaal en belastingssituatie nodig.

Het begrip van schommeling in de spanningsintensiteitsfactor (zie Figuur 3) wordt hier dus relevanter. Een schommeling in spanning leidt tot een schommeling in spanningsintensiteitsfactor. Dit wordt geschetst aan de rechterkant van Figuur 4, waarin de schommeling wordt omhuld door twee lijnen (één voor maximale spanningsintensiteitsfactor en één voor minimale spanningsintensiteitsfactor). Daartussen zijn de schommelingen te

¹ Er zijn meerde analytische programma's die scheurgroei door vermoeiing kunnen simuleren, zoals NASGRO, ESACRACK, AFGROW. Ze zijn vooral gericht op vliegtuigen.

vinden de amplitude waarvan met de scheurgroote groeit. Deze groei vindt plaats totdat een kritische waarde bereikt wordt wat ook het moment van falen wordt.



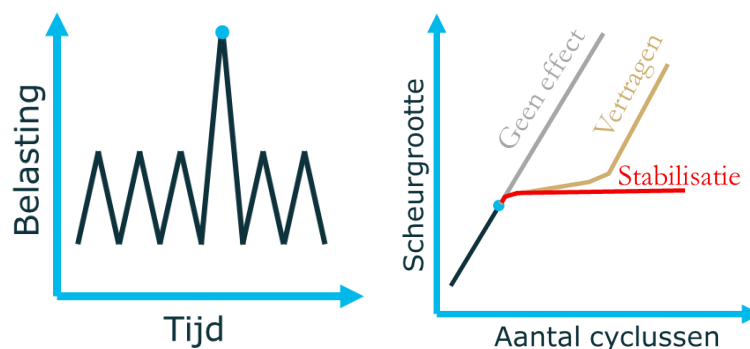
Figuur 4. Links: snelheid van scheurgroei onder belastingen van cyclische aard. Midden: scheurgroote als functie van aantal cyclussen in het gebied van langzame scheurgroei. Rechts: schommeling in spanningsintensiteitsfactor tot het falen van leiding. Rechterplaatje overgenomen van (Richard & Sander, 2016).

3.3.3 Langzame scheurgroei onder complexere belastingspatronen.

In de vorige paragraaf werd scheurgroei onder eenvoudige cyclische belastingspatronen beschreven. In deze paragraaf wordt gekeken naar een analyse van het effect van afwijkingen op een dergelijk eenvoudig patroon. Het voorbeeld is overgenomen van een lesboek in het vakgebied van lucht- en ruimtevaart waarin metalen de belangrijkste materialen zijn, dus de beschreven trends zouden anders kunnen zijn voor bijvoorbeeld PVC.

Eerst wordt er gekeken naar het effect van één overbelasting die een verder perfect cyclische belasting verstoort. Afhankelijk van de omvang van de verstoring gebeuren er verschillende dingen:

- Als de mate van overbelasting relatief klein is, dan heeft de overbelasting geen effect op scheurgroei (grijze lijn in Figuur 5). Dit betekent dus ook dat de effecten van licht verstoorde cyclische patronen met de theorie van perfect cyclische patronen kunnen worden beschreven.
- Is de verstoring groter, dan is één mogelijkheid dat er een vertraging in het groeiproces voorkomt: voor een aantal cycli van de reguliere cyclische belastingen groeit de scheur niet of minder (vertraging), maar scheurgroei gaat daarna wel weer verder (gele lijn in Figuur 5).
- Eén andere mogelijkheid bij een grotere verstoring is dat, na een overbelasting, de scheur stabiliseert en niet meer groeit (rode lijn in Figuur 5).

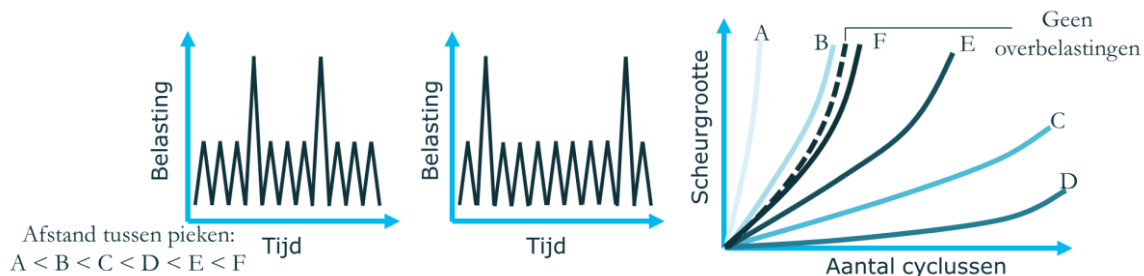


Figuur 5: Wanneer een cyclisch patroon wordt verstoord door één afwijking (links), Kan dit diverse effecten hebben op het verloop van de scheurgroei.

Vervolgens kan er gekeken worden naar het effect van een regelmatig terugkerende verstoring van het onderliggende belastingpatroon. Het betreft hier dus een optelling van twee patronen met ieder een eigen gemiddelde, vorm, amplitude en periode (Figuur 6, links). In het voorbeeld wordt het onderliggende signaal constant gehouden, en varieert in het verstorende signaal alleen de periode met zes gradaties. Van de kleinste periode (A, veel verstoringen) tot en met de grootste (F, sporadische verstoring) zijn de effecten aangegeven in de rechterfiguur in Figuur 6:

- A. het verstorende signaal versnelt scheurgroei sterk;
- B. het verstorende signaal heeft nauwelijks effect;
- C. het verstorende signaal vertraagt de scheurgroei sterk;
- D. het verstorende signaal vertraagt de scheurgroei maximaal;
- E. het verstorende signaal vertraagt scheurgroei sterk;
- F. het verstorende signaal heeft nauwelijks effect.

Bij korte periodes kan gesteld worden dat het verstorende signaal 'het overneemt van' het onderliggende signaal. Naarmate de periode groter wordt, wordt de versnelling vanwege de grotere amplitude teniet gedaan door de vermindering van het aantal cycli in de tijd. Uiteindelijk wordt de periode zo groot dat het effect van de verstoring meer overeenkomt met de vertragende werking van individuele verstoringen (Figuur 5). Met nog grotere perioden wordt het aantal verstoringen zo zeldzaam dat ze nauwelijks nog effect hebben ten opzichte van de cycli in het onderliggende signaal.



Figuur 6. Het effect van cyclische verstoring van een patroon van overbelastingen heeft veel mogelijke verschillende effecten op scheurgroei.

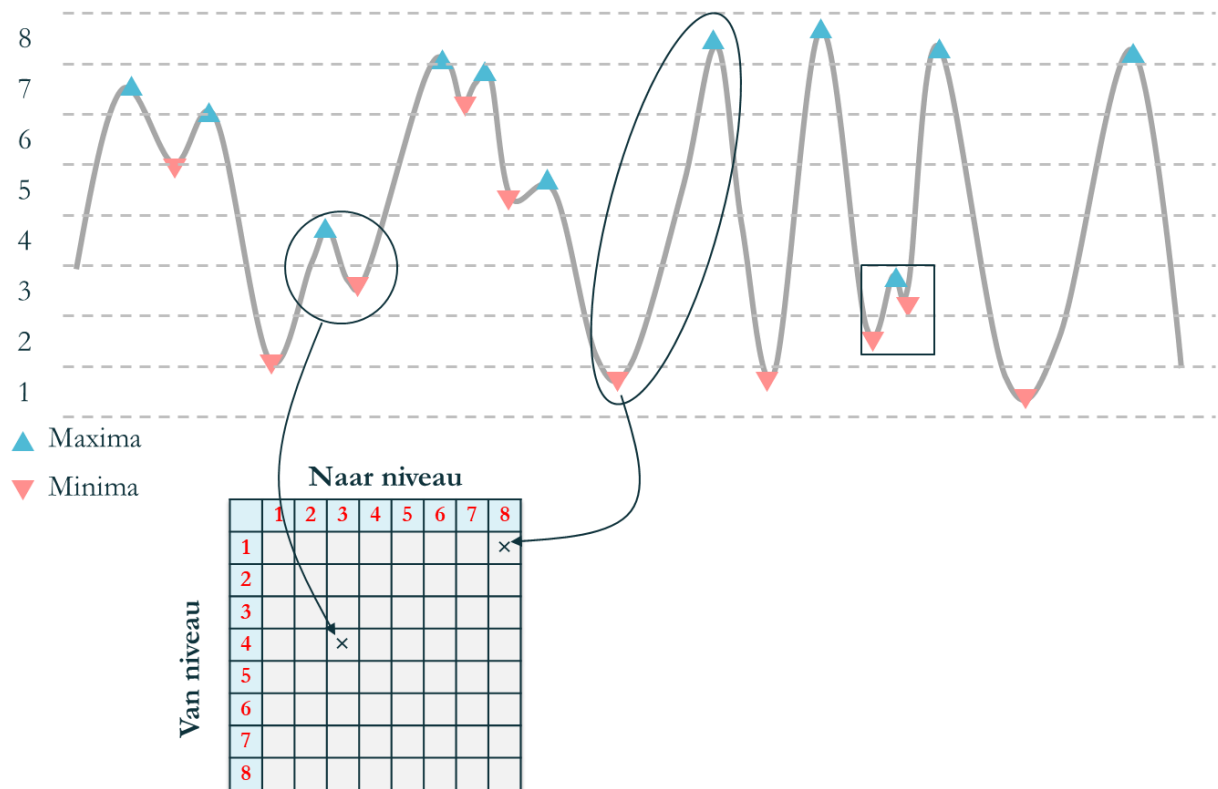
3.3.4 Belastingsspectrum

Samenvattend toont het voorbeeld in de voorgaande paragraaf hoe ingewikkeld het effect van complexere belastingpatronen is te voorspellen. Materiaalwetenschappers in lucht- en ruimtevaart hebben bijvoorbeeld veel kennis op dit gebied. Om inzicht te krijgen in de mogelijke respons van een materiaal op een veelvoud van mogelijke belastingpatronen kan worden gewerkt met een zogeheten belastingsspectrum.

Een voorbeeld van de constructie van een belastingsspectrum is weergegeven in Figuur 7. De grijze lijn daarin geeft een bepaald belastingpatroon dat optreedt in de praktijk. Zo'n tijdsreeks bevat een aantal maxima (blauwe driehoeken) en een aantal minima (rode driehoeken) die onregelmatig verspreid zijn. Via, onder andere, de Rainflow methode (NEN 2063:1988) kan hieruit een belastingsspectrum worden geconstrueerd. Een belangrijke stap hierin is het indelen van de pieken in de tijdsreeks in verschillende niveaus. In het voorbeeld worden de pieken ingedeeld in niveaus 1 tot en met 8. Hierna wordt er gekeken naar de sprongen tussen de maxima en minima. In de linker cirkel kan een sprong van niveau 4 naar 3 gezien worden terwijl in de rechter cirkel de sprong van niveau 1 naar 8 is. Met deze informatie wordt een tweedimensionaal histogram opgebouwd van de sprongen die voorkomen in het belastingpatroon: het belastingsspectrum.

De waarde van het belastingsspectrum zit in de mogelijkheid om met behulp van die informatie een materiaal te onderwerpen, toegespitst op een veelvoud van belastingpatronen die representatief zijn voor het signaal uit de

praktijk. Op die manier kunnen, met experimenten, inschattingen gemaakt worden van de scheurgroeiparameters en levensduur van het materiaal onder deze specifieke omstandigheden. In meerdere sectoren zijn er al bibliotheken met gestandaardiseerde belastingsspectra waar een materiaal/onderdeel dat in die sector wordt toegepast mee om zal moeten kunnen gaan. Voorbeelden zijn vleugels, turbines, auto's, en wielen, waarvoor het ervaren van dynamische belastingen normaal is. De aanwezigheid van deze bibliotheken helpt om allerlei modellen voor materiaalmoetheid te benchmarken. Het opbouwen van zo'n spectrum voor leidingssystemen zou vergelijkbare voordelen opleveren, maar is nog niet beschikbaar op het moment van schrijven, naar kennis van de auteurs.



Figuur 7: Voorbeeld van een belastingsspectrum.

4 Het modelleren van bronnen van dynamische belastingen uit de drinkwaterpraktijk

In het vorige hoofdstuk is besproken hoe het effect van een dynamische belasting op de toestand van de leiding kan worden gemodelleerd. Dit hoofdstuk richt zich op modellen die kunnen worden gebruikt om veranderingen in de druk en werkzaamheden te modelleren als bronnen van dynamische belastingen.

4.1 Drukschommelingen

Veranderingen in de druk kunnen op veel verschillende manieren worden veroorzaakt. Cyclische drukschommelingen worden bijvoorbeeld veroorzaakt door periodieke veranderingen in het verbruik, zoals het dagnachtpatroon of een specifiek afnamepatroon van een grootgebruiker. Kortstondige series van (uitdempende) cyclische drukschommelingen kunnen ontstaan wanneer een pompstation reageert op een verandering in de druk, of bij waterslag. Eénmalige/incidentele veranderingen volgen bijvoorbeeld wanneer de druk in een gebied verhoogd wordt, of bij afsluitermanipulatie.

De druk is veelal een directe invoerparameter in conditiemodellen zoals Comsima. In veel gevallen is het daarom vooral zaak om veranderingen in de druk te kennen/meten, op basis waarvan een conditiemodel gebruikt kan worden om die verandering in druk te vertalen naar een verandering in conditie. Eén aspect dat is het bijzonder van belang kan zijn, is de snelheid waarmee verandering in druk optreedt, omdat bij zeer plotselinge veranderingen drukgolven kunnen ontstaan waardoor kortstondig nog veel grotere drukverschillen kunnen optreden (waterslag). In deze sectie worden de fundamentele aspecten daarvan gerapporteerd. In Annex C van NEN3650-1 wordt waterslag ook uitgelegd.

Waterslag is een bijzondere vorm van drukschommeling die plotseling plaats kan vinden en tot enorme schade kan leiden door de hoge drukken die erdoor veroorzaakt wordt. Waterslag treedt op in een leiding wanneer het stromende water plotseling tot stilstand wordt gebracht, bijvoorbeeld door het sluiten van een afsluiter. De snelheid van het afsluiten is daarbij van belang. In het geval dat het afsluiten plotseling is kan de wet van Joukowsky (Joukowsky, 1900) toegepast worden. Het is vergelijking waarmee de mate van drukschommeling, ΔP , geschat kan worden. Dit is afhankelijk van de vloeistofdichtheid, ρ , de snelheid van de drukgolf, c , en de mate van snelheidsverandering, ΔV .

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V$$

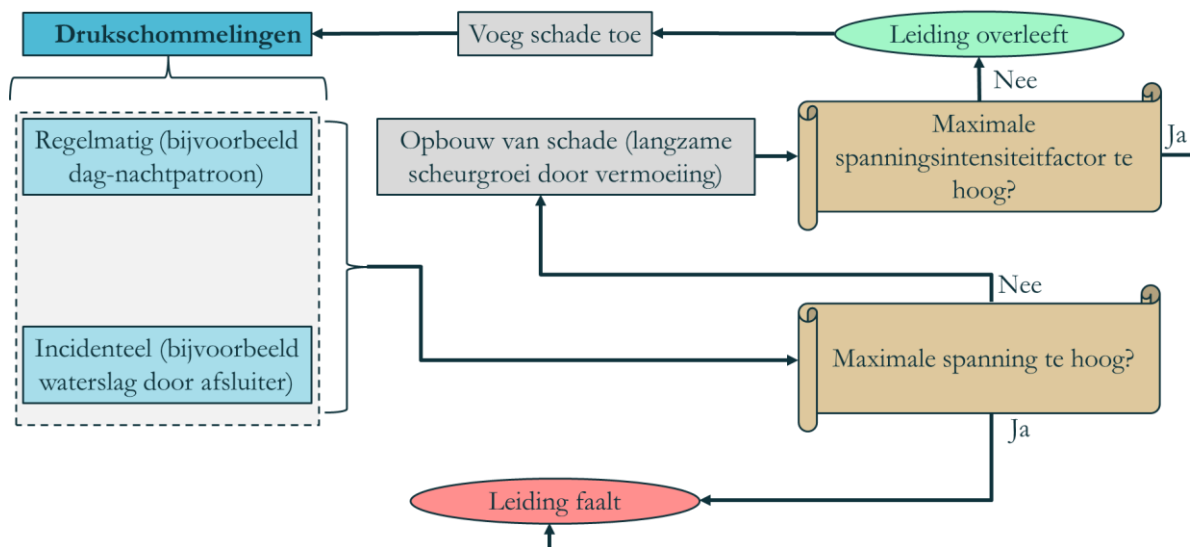
Om de wet van Joukowsky te kunnen toepassen is de volgende informatie nodig: sluittijd van klep/pomp, lengte / diameter / wanddikte van leiding, elasticiteitsmodulus van wandmateriaal, dichtheid / compressiemodulus van vloeistof, manier van verankeren, snelheidsverandering.

Alhoewel de wet van Joukowsky makkelijk is om de mate van drukschommelingen te bepalen, heeft het tekortkomingen. Bijvoorbeeld, als een klep sluit, worden er bovenstrooms aanvankelijk positieve drukstoten veroorzaakt en benedenstrooms negatieve drukstoten. Als de grootte van de negatieve drukstoten te hoog is kan de leiding instorten, en dat wordt niet met deze formule geaddressseerd. Hiernaast is er vanwege onderdruk ook een kans op het ontstaan van cavitatie. Cavitatie is het verschijnsel waarin water in dampbellen verandert. De implosie van deze dampbellen kan tot schade van het leidingmateriaal leiden. Dit wordt niet gevat in de formule.

Daarnaast zijn er een aantal eisen voor het toepassen van de wet. Eén eis is dat het wrijvingsverlies in de leiding veel kleiner is dan de inwendige druk. Voor drinkwaterleidingen die onder druk staan is dit een redelijke aanname. Daarnaast is de wet van Joukowski alleen in rechte leidingen toepasbaar, dat wil zeggen dat er geen aftakkingen of diameterovergangen aanwezig moeten zijn. Zulke overgangen kunnen tot gedeeltelijke reflectie van de drukgolf leiden. In een drinkwaterleidingnet zijn vaak takken en diameterovergangen aanwezig. Om zulke tekortkomingen te overkomen hebben een aantal instellingen hun eigen software gecreëerd om het effect van waterslag te bestuderen. Een samenvatting daarvan is beschikbaar in (Abdeldayem, Ferràs, van der Zwan, & Kennedy, 2021). Binnen Nederland heeft Deltares WANDA ontwikkeld dat binnen de Nederlandse drinkwaterbedrijven al bekend is².

4.1.1 Wegwijzer voor het incorporeren van drukschommelingen in COMSIMA

Figuur 8 toont een mogelijk wegwijzer voor het inbouwen van drukschommelingen in COMSIMA. Zoals eerder beschreven kunnen drukschommelingen voorkomen als regelmatige en als incidenteel. Afhankelijk van het precieze patroon kan in beide gevallen waterslag optreden, waarvoor kan worden gecorrigeerd in de maximale spanning. In beide gevallen kan er eerst bepaald worden of de maximale spanning in de leiding ten gevolge van de drukschommeling te hoog is (bijvoorbeeld ten opzichte van een vloeispanning). Zo ja, dan faalt de leiding. Anders wordt er gekeken naar de opbouw van schade door langzame scheurgroei. Bij langzame scheurgroei kan gekeken worden naar de maximale spanningsintensiteitsfactor. Als de waarde daarvan te hoog is³ dan faalt de leiding. Anders overleeft de leiding en schade wordt toegevoegd. Vervolgens gaat het algoritme verder met de volgende tijdstap. Een inschatting van de invoerdata die benodigd zou zijn om deze modelonderdelen te voeden is opgenomen in bijlage I.



Figuur 8: Mogelijke aanpak om drukschommelingen mee te nemen in COMSIMA

4.2 Graafwerkzaamheden

In het literatuuronderzoek werd naar meerdere vormen van werkzaamheden en hun invloed op leidingconditie gekeken. Van die diverse werkzaamheden zijn graafwerkzaamheden waarschijnlijk het meest belang. Vanwege de energietransitie en aanleg van warmtenetten zal er vaak gegraven worden. In een rapport uit 2013 (van Eijk & van Daal, 2013), werd er aangetoond dat graafwerkzaamheden een sterke correlatie hebben met storingen in

² Een ander voorbeeld is de gratis beschikbare Python library TSNNet, waarmee aan transiënten in een drinkwaterleiding net gerekend kan worden.

³ N.B.: omdat de spanningsintensiteitsfactor van de scheurgroote afhankelijk is, moeten er aannames gemaakt worden over initiële scheurgroottes.

waterleidingen. In Figuur 9 is zichtbaar dat meer dan een derde van de storingen een link heeft met graafwerkzaamheden (derden).

Oorzaak	Aantal storingen	Percentage
Uitwendige belasting	440	36 %
Uitwendige aantasting	158	13 %
Inwendige aantasting	24	2 %
Foute aanleg	74	6 %
Derden	435	35 %
Anders	28	2 %
Onbekend	79	6 %
Totaal	1238	100 %

Figuur 9: Geregistreerde primaire oorzaken bij een storing (Dunea + PWN, 2011 + 2012). Overgenomen van (van Eijk & van Daal, 2013).

4.2.1 Rekenen aan de invloed van de sleuf

Het werk van (Crofts, Menzies, & Tarzi, 1977) kan worden gebruikt om het effect van een sleuf naast een leiding te bestuderen. Kortweg worden vier mechanismen genoemd als bron van laterale beweging in de bodem:

- i. Verwijderen van niet ondersteunde verticale kant van de sleuf
- ii. Het in de sleuf aanbrengen van wandondersteunende structuren
- iii. Het vervormen van de wandondersteunende structuren tijdens de werkzaamheden
- iv. Consolidatie van de grondaanvulling na het opvullen van de sleuf

Volgens (Crofts, Menzies, & Tarzi, 1977) is een van de vaak optredende faalmechanismen het buigen van een buis door laterale beweging van de grond tijdens graafwerkzaamheden. De beweging van een buis in de richting van de begravingsplaats is samengesteld uit vier processen – waarvan drie te maken hebben met de constructie van de sleuf, dus op de korte termijn. De vierde vindt op de langere termijn plaats, lang nadat de sleuf weer is opgevuld. (Crofts, Menzies, & Tarzi, 1977) geven een voorbeeld van hoe de laterale beweging en vervolgens de spanning geschat kan worden.

De eerste bron van beweging van de buis komt door de niet-ondersteunde zijkant van de opgraving. De discussie hieronder geldt vooral voor opgravingen in een cohesieve grond die in een keer tot hun diepste punt ontgraven worden en ook voor de bovenste onderdelen van ontgravingen in cohesieve grond voordat er steunen aangebracht worden. De kritische diepte waarbij zonder steunen gegraven kan worden wordt met $2.6s_u/\gamma$ geschat, waar s_u de ongedraineerde afschuifsterkte en γ de gewichtseenheid van de bodem is. Na deze diepte stort de bodem in. Bolling vindt in zand of grint niet plaats. Terwijl de bodem niet ondersteund is en ook nog niet ingestort is zal de sleufwand. De bolling, x_b , kan geschat worden met de vergelijking hieronder. De 15 mm is de aangenomen beweging aan de bovenkant van de opgraving.

$$x_b = \frac{\text{diepte van opgraving}}{\text{kritische hoogte}} \times 15 \text{ mm}$$

De verplaatsing van de buis door de niet-ondersteunde zijkant van de opgraving kan geschat worden door de vergelijking hieronder. De waarden van α zijn afhankelijk van de verhouding tussen de afstand van opgraving, l , en de diepte van de opgraving, H . In Figuur 10 worden typische waarden van α gepresenteerd.

$$x_1 = \alpha x_b$$

Voor relatief kortere opgravingen, met lengte L minder dan $2H$, kan er een reductiefactor toegevoegd worden.

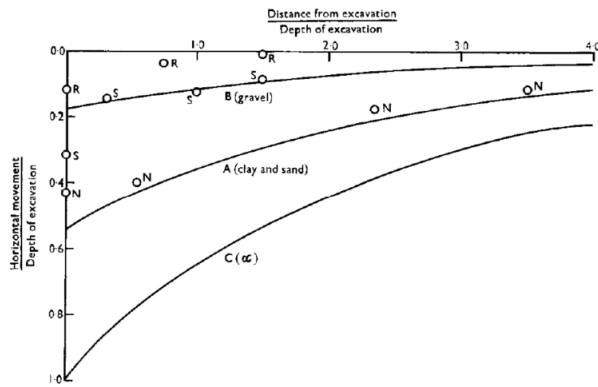
$$x_1 = \alpha \frac{L}{2H} x_b$$

Als ondersteuning geplaatst wordt in cohesieve grond nadat er gegraven is, dan moet eventuele horizontale beweging van de bodem in acht genomen worden. Deze verplaatsing kan met de vergelijking hieronder geschat worden. Een waarde tussen 2 en 18 mm moet gekozen worden op basis van de gebruikte sleufbekleding.

$$x_2 = \alpha [10 \text{ mm} + (\text{tussen 2 en 18 mm})]$$

Type of ground*	Depth of excavation	Bulging of the excavation face, x_b
very soft clay very soft sandy clay very soft gravelly clay	0-1.5 m Depths greater than 1.5 m should not be excavated in one stage	15 mm
soft clay soft sandy clay soft gravelly clay	0-2 m 2-4 m Depths greater than 4 m should not be excavated in one stage	7 mm 15 mm
firm clay firm sandy clay firm gravelly clay	0-2.5 m 2.5-5 m 5-7.5 m	5 mm 10 mm 15 mm
stiff clay stiff sandy clay stiff gravelly clay	0-3 m 3-6 m 6-10 m	5 mm 9 mm 15 mm

* For very stiff clays, dense sand or gravel or clean dry sand which will run, bulging does not apply



A: Horizontal movement x_1 in clay and sand as % of excavation depth, H
 B: Horizontal movement x_2 in gravel as % of excavation depth, H
 C: Reduction factor, α , to give pipe movement from trench face movement
 A and B were derived as follows: N—Neasden, R—Reading (BRE, St. John, 1976); S—Seattle (Peck, 1969).

Figuur 10. (Links) Omvang van bolling aan de opgegraven zijkant van de opgraving. (Rechts) Horizontale beweging van een leiding en zijn relatie met de afstand met de opgraving. Overgenomen van (Crofts, Menzies, & Tarzi, 1977).

Hierna moet de verplaatsing vanwege de bodemdruk op de ondersteuning geschat worden. De onderbouwing voor deze schatting gebeurt op basis van veldmetingen. Aan de rechterkant van Figuur 10 spelen de curves A en B een belangrijke rol in het schatten hiervan. De verticale as van deze grafiek is de verhouding tussen de horizontale beweging en de diepte van de begraving. De laterale verplaatsing van de leiding kan geschat worden met de vergelijking hieronder.

$$x_3 = \frac{\text{waarde vanuit Figuur 10}}{100} H \frac{L}{2H}$$

Nadat de opgraving weer met grond gevuld wordt, stelt de omliggende bodem een actieve gronddruk in tegen de de sleufvulling. De sleufvulling wordt samengedrukt totdat er de gronddruk van de omliggende bodem heerst. De beweging door dit verschijnsel kan met de vergelijking hieronder geschat worden. Hiervoor zijn de breedte van de opgraving, B , de compressibiliteit van de sleufvulling, $\frac{C_c}{1+e_0}$, de coëfficiënt van de actieve gronddruk voor de omliggende bodem, K_0 , en de coëfficiënt van evenwichtsgronddruk van de omliggende bodem, K_a , nodig. Als slechts één van de twee kanten een verbinding heeft met de bodem, kan B door 2 gedeeld worden.

$$x_4 = \alpha \frac{B}{2} \frac{C_c}{1+e_0} \log_{10} \frac{K_0}{K_a}$$

De totale beweging van de leiding door dit hele proces is de optelsom van alle vier, $x_{tot} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$.

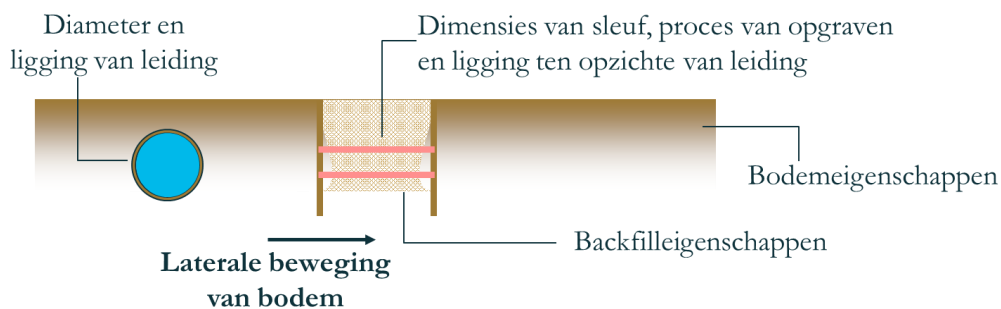
Om de strain (die later aan de spanning gerelateerd kan worden) vanwege de laterale verplaatsing van de leiding te schatten, zijn de buitendiameter van de leiding, D , en de bodem-structuur interactieparameter, λ , nodig. De bodem-structuur interactieparameter kan beschreven worden met behulp van de coëfficiënt van horizontale subgrade reaction van de onverstoorde bodem, k_u , de elasticiteitsmodulus, E , moment of inertie van de doorsnede, I .

$$\lambda = \left(\frac{k_u D}{2EI} \right)^{0.25}$$

De maximale strain op de korte en lange termijn kunnen beschreven worden met de vergelijkingen hieronder. Hiervoor zijn een paar piekwaarden gebruikt voor de korte (kt) en lange termijn (lt), $A_{kt} = 0.32$ en $A_{lt} = 0.16$. Met de elasticiteitsmodulus kan de maximale strain naar een spanning vertaald worden.

$$\varepsilon_{kt} = D\lambda^2(x_1 + x_2 + x_3)A_{kt}$$

$$\varepsilon_{lt} = D\lambda^2(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)A_{lt}$$



Figuur 11: Graafwerkzaamheden leidt tot een laterale beweging in de bodem die verder tot extra spanningen in de leiding leidt. Om het effect van een graafwerkzaamheid op een leiding te bepalen veel informatie is nodig wat ook aangetoond wordt.

De eerste drie componenten van de ontgraving leiding tot een verandering in spanning op zowel de korte als de lange termijn. De laatste speelt alleen in de lange termijn een rol. Alhoewel een graafwerkzaamheid tijdelijk is, blijft zijn effect wel permanent. In die zin leidt deze dynamische belasting niet zozeer tot een dynamische effect. Er moet wel onderstreept worden dat deze aanpak wel op empirische data steunt (dat wil zeggen informatie of metingen die ergens anders in een ander tijdstip uitgevoerd werden). Figuur 11 toont een samenvatting van de benodigde data om spanning in een leiding onder invloed van een sleuf ernaast te bepalen.

4.3 Andere invloeden van werkzaamheden op leidingconditie

Naast literatuur over graafwerkzaamheden is er literatuur beschikbaar over andere potentiële invloeden van werkzaamheden op leidingconditie. In de opvolgende paragrafen worden deze kort toegelicht.

4.3.1 Zware voertuigen

Tijdens werkzaamheden is het mogelijk dat zware voertuigen zoals hijskranen en/of graafmachines boven de leiding gereden worden. Dit leidt tot een extra belasting op de leiding en kan extra spanningen veroorzaken. Hieraan kan op dezelfde manier gerekend worden als aan verkeersbelasting (zie bijv. BTO 2015.082).

4.3.2 Tunnelbouw onder leiding

(Vorster, Klar, Soga, & Mair, 2005) hebben beschreven hoe tunnelbouw loodrecht onder een bestaande leiding tot spanningen kan leiden. Bovendien geeft de publicatie ook een methode waarmee een inschatting gemaakt kan

worden van de belasting. Het proces van tunnelbouw leidt tot een zetting in het bodemprofiel dat tot een buigend moment (dus spanning) en deformatie kan leiden in de leiding.

Voor het bepalen van de spanning in de leiding als gevolg van zetting van de bodem is de volgende informatie nodig: parameters voor een zettingsprofiel (maximale zetting, parameters voor breedte en vorm), fitting parameters om strain te bepalen, dimensies en ligging van leiding en tunnel, elasticiteitsmodulus van bodem, andere bodemeigenschappen (void ratio en dichtheid). Zo'n benadering levert één waarde voor de spanning. Deze vertaling van vervorming naar spanning is voor reguliere verschilzettingen in de bodem uitgewerkt in Comsima (BTO 2015.082).

4.3.3 In/uit trillen van damwanden dichtbij een leiding

Er zijn meerdere rapportages en publicaties (de Nijs, 2003), (Hergarden & van Tol, 2001), (Sijthoff, 2013) die specifiek kijken naar het effect van in- of uittrillen van damwanden op zakking in de grond. In die werken werd er niet expliciet gekeken naar de invloed op leidingconditie. Het intrillen van een damwand leidt tot zakking als gevolg van verdichting van de bodem. Daarentegen wordt zakking tijdens uittrillen vooral veroorzaakt door het opvullen van ontstane ruimte. De trillingsintensiteit wordt eerst bepaald om te constateren of verdichting überhaupt plaatsvindt, waarna zakkingen berekend kunnen worden.

Over het algemeen is voor het bepalen van de zakkingen de volgende informatie nodig: eigenschappen van de ondergrond (referentiesgolfnelheid, dempingsmaat, conusweerstand, verticale grondspanning, poriëngetal), afmetingen van de plank, energie/slagkracht om de plank op diepte te krijgen. Het vertalen van zakkingen naar spanningen zal waarschijnlijk op vergelijkbare wijze kunnen worden aangepakt als beschreven in BTO 2015.082.

4.3.4 Explosies in de grond

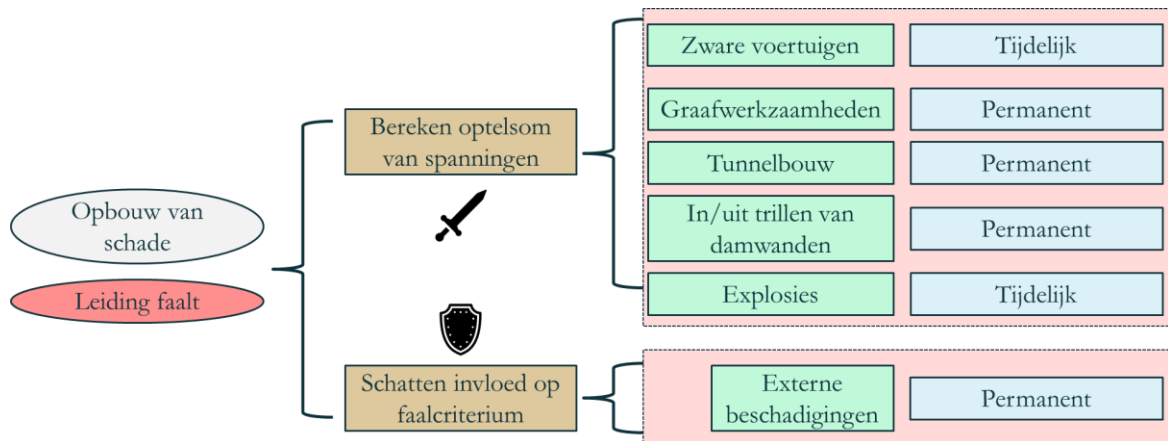
Als een extreem geval van werkzaamheden kan er gekeken worden naar ondergrondse explosies. In de jaren zeventig en tachtig werd er in de Verenigde Staten van Amerika onderzocht hoe een ondergrondse ontploffing tot hogere spanningen in een leiding kunnen leiden. De rapportage van (Westine, Esparza, & Wenzel, 1978) beschrijft vooral veldmetingen. Ondersteund door theoretische onderbouwing werd een empirische formule opgesteld om een relatie te leggen tussen explosie en leidingconditie. De theoretische aanpak werd opgebouwd uit twee stappen: het bepalen van beweging van gronddeeltjes door de explosie en het vertalen hiervan naar maximale spanningen in de leiding. De formule maakt gebruik van gemeten data en empirische constanten. Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen een enkelvoudige explosie en een reeks explosies die naast elkaar plaatsvinden. Om de maximale spanning in de leiding te bepalen moeten het materiaal en wanddikte van de leiding bekend zijn. Daarnaast moeten de kracht van de explosie en de locatie hiervan ten opzichte van de leiding bekend zijn.

4.3.5 Externe beschadigingen

De voorgaande werkzaamheden konden wiskundig gerelateerd worden aan leidingconditie in termen van de veroorzaakte materiaalspanning. Voor externe beschadigingen van een leiding is de aanpak iets anders. Externe beschadigingen zijn niet zomaar voorspelbaar en het effect ervan kan het best opgenomen worden in de verlaging van het criterium voor het falen van een leiding. Conceptueel gezien kan het proces er zo uitzien: een externe beschadiging leidt tot een defect in de leiding; zo'n defect zal gaan fungeren als een spanningsconcentrator die uiteindelijk tot verlaagde weerstand leidt (zie ook paragraaf 3.3.1). In de olie- en gassector werd er een handleiding samengesteld van de beste methoden om defecten te analyseren (Cosham & Hopkins, 2004). Daarin wordt onderscheid gemaakt tussen allerlei defecten en hun effect op de weerstand. Het optreden van externe beschadigingen kan het beste opgepakt worden door middel van een probabilistische aanpak, bijvoorbeeld ondersteund door beschrijvende statistiek die is toegepast op storingen door derden, of op observaties tijdens aanleg van leidingen.

4.4 Wegwijzer voor het incorporeren van werkzaamheden in COMSIMA

In Figuur 12 wordt een wegwijzer voor het inbouwen van (graaf)werkzaamheden in COMSIMA voorgesteld. De werkzaamheden kunnen tot of een permanente of een tijdelijke verhoging in de spanning leiden. Daarnaast is er ook een kans dat externe beschadigingen tot een verlaging van het faal criterium leiden. Dit kan als startpunt gebruikt worden om werkzaamheden in COMSIMA te bouwen. Een inschatting van de invoerdata die benodigd zou zijn om deze modelonderdelen te voeden is opgenomen in bijlage I.



Figuur 12: Mogelijk aanpak voor werkzaamheden om het in COMSIMA te bouwen. Permanent betekent dat het effect van de werkzaamheid blijft ook na einde werkzaamheid terwijl tijdelijk betekent dat het effect alleen tijdens werkzaamheid aanwezig is.

5 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit de analyse van storingen, conditiemodel en met satelliet geobserveerde werkzaamheden (Hoofdstuk 2) volgt dat werkzaamheden in het algemeen wel degelijk leiden tot een verhoogde kans op ‘spontane storingen’, maar er kan geen hogere of lagere kwetsbaarheid voor werkzaamheden worden afgeleid uit de conditiescore van Comsima (gebaseerd op reguliere belastingen).

Vervolgens is onderzocht welke verschillende deelmodellen bruikbaar zouden kunnen zijn om de invloed van drukschommelingen en werkzaamheden op drinkwaterleidingen beter te modelleren. Eén belangrijk effect van algemene dynamische belastingen dat nog niet met Comsima wordt gemodelleerd is materiaalmoetheid (Hoofdstuk 2). Bij het modelleren van de effecten van drukschommelingen is waterslag – verhoogde drukschommelingen bij extreem snelle veranderingen – het meest ingewikkelde om te modelleren in de context van een complexe leidingnetstructuur (Hoofdstuk 4.1). Er kunnen ruwweg twee typen van effecten van werkzaamheden worden gemodelleerd: permanente vervorming(zetting) van bodem en leidingsysteem, en tijdelijke extra belasting vanwege trillingen in de bodem (Hoofdstuk 4.2 en 4.3).

Hoewel modellen voor handen lijken, moet ook worden onderstreept dat er veel data nodig zal zijn om deze modellen te voeden (Bijlage I). Voor zowel drukschommelingen als werkzaamheden geldt ten eerste dat er beschrijving van voorvallen in de tijd nodig is, gekoppeld aan relevante eigenschappen van de voorvallen, zoals specifieke details rond de uitvoering van werkzaamheden. Daarnaast zullen er nieuwe, empirische materiaaleigenschappen moeten worden bepaald zoals lokale bodemeigenschappen, complexe belastingspectra die de lokale blootstelling aan trillingen goed kunnen samenvatten, en de respons van leidingmaterialen op deze belastingspectra.

5.2 Bedrijfsparagraaf

[Deze paragraaf komt van de hand van projectgroepleden die betrokken waren bij het voorliggende onderzoek. Namens de drinkwaterbedrijven reflecteren zij hier op de volgende vragen: welk belang kunnen de uitkomsten van het onderzoek dienen? Welke kennisvragen of twijfels staan implementatie nog in de weg? Welke praktische aspecten staan implementatie nog in de weg?]

Voor drinkwaterbedrijven is het van belang om de impact van werkzaamheden van derden inzichtelijk te hebben. Onder andere om een juiste afweging te maken om al dan niet werkzaamheden van derden te combineren met vervanging van waterleidingen. Uit het onderzoek is gebleken dat modellering met Comsima niet de inzichten geeft om een juiste afweging te maken. Het is van belang om verder onderzoek te doen naar de factoren die invloed hebben op een verhoogde storingsfrequentie van waterleidingen na werkzaamheden van derden. Hierbij is het wenselijk dat rekening wordt gehouden met een praktische kanttekening: in hoeverre is het mogelijk om deze factoren goed te kunnen meten om vervolgens voorafgaand aan werkzaamheden een goede inschatting te kunnen maken? Met andere woorden: het kunnen meten of detecteren van deze factoren (bijv. faalwijzen of faalmechanismen) heeft een directe invloed op het handelingsperspectief dat waterbedrijven hebben voorafgaand aan werkzaamheden van derden.

5.3 Aanbevelingen

Op basis van de uitkomsten lijkt het weinig meerwaarde te hebben om aan te sturen op een gecombineerd levensduurmodel voor reguliere belastingen en de belastingen die volgen uit werkzaamheden. Wat werkzaamheden betreft is het eerder aan te bevelen om een apart model op te stellen, toegespitst op de faalmechanismen bij werkzaamheden. Qua gebruik zou een dergelijk model zich niet, zoals Comsima, op lange-termijn levensduur moeten richten, maar in plaats daarvan op de kans op na-ijl schade bij werkzaamheden van geval tot geval. De theorie en referenties uit de voorgaande hoofdstukken bieden een startpunt voor een dergelijk model.

Het is aan te bevelen om nader onderzoek te doen naar de precieze faalwijzen en faalmechanismen waarlangs 'na-ijlschades' door werkzaamheden verlopen. Een eerste stap is om de bestaande storingsanalyses uit te breiden door met meer detail te kijken naar de faalwijzen van de vermeende na-ijlschades. Verder is het hiervoor waarschijnlijk nodig om een tijd lang zorgvuldig de specifieke activiteiten tijdens werkzaamheden in het voorzieningsgebied op voorhand te registreren en monitoren en om zorgvuldiger exitbeoordelingen uit te voeren bij 'spontane' storingen 'in de buurt' van deze werkzaamheden. Dat laatste kan bijvoorbeeld ingevuld worden door specialisten van het waterbedrijf of KWR mee te sturen met reparaties, met het expliciete doel om faalwijzen, faalmechanismen en oorzaken nader te achterhalen (en met de expliciete bereidheid om reparaties ten gunste daarvan wat te vertragen).

Wat betreft de effecten van drukschommelingen is het aan te bevelen om verkennende analyses van praktijkdata uit te voeren. De hoogfrequente drukmetingen die op het moment van schrijven door verschillende drinkwaterbedrijven worden verzameld op pilot-schaal vormen hier een goed startpunt voor. Eén mogelijke route van analyse is om te proberen storingen te koppelen aan opvallende voorvallen in de data. Een andere mogelijke route van analyse is om uit deze metingen belastingspectra (Paragraaf 3.3.4) af te leiden. Aan de hand daarvan kan worden bepaald welke delen van het leidingnet ernstige schommelingen ondergaan, en welke delen niet. Dit inzicht kan vervolgens in verband worden gebracht met recente en/of historische storingsdata, om uit te vinden of het leidingnet in de drukkere gebieden structureel verzwakt wordt door de drukschommelingen. Op het moment van schrijven worden in een opvolgend project ("*Invloed van interne factoren op storingen*") stappen gezet in de richting van beide routes.

6 Referenties

- Abdeldayem, O. M., Ferràs, D., van der Zwan, S., & Kennedy, M. (2021). Analysis of unsteady friction models used in engineering software for water hammer analysis: Implementation case in WANDA. *Water*, 13(4), 495.
- Cosham, A., & Hopkins, P. (2004). The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual. *International journal of pressure vessels and piping*, 127-139.
- Crofts, J. E., Menzies, B. K., & Tarzi, A. I. (1977). Lateral displacement of shallow buried pipelines due to adjacent deep trench excavations. *Géotechnique*, 161-179.
- de Nijs, R. (2003, 4). Het trillen van damwandplanken in granulaire bodem. *Geotechniek*, 46.
- Hergarden, R. H., & van Tol, A. F. (2001, Juli). Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden. *Geotechniek*.
- Joukowsky, N. (1900). *Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsrohren*.
- Moser, A., & Folkman, S. (2008). *Buried pipe design*. McGraw-Hill Education.
- NASA. (2000). *Fatigue crack growth computer program NASGRO - Reference Manual*.
- Richard, H. A., & Sander, M. (2016). *Fatigue crack growth*. Berlin: Springer.
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Science+Business Media, B.V.
- Sijthoff, M. (2013). *Onderzoek naar de invoering van trillingsmetingen in een monitoringsplan voor buisleidingen*. Dunea.
- van Eijk, R., & van Daal, K. (2013). *KWR DPW 2013.093 Storingen als gevolg van graafwerkzaamheden: Ruimtelijke analyse van USTORE gegevens*. KWR.
- van Laarhoven, K. (2020). *BTO 2020.001 Een model voor scheurgroei in PVCU buizen, geïmplementeerd in Comsima*. Nieuwegein: KWR.
- Vorster, T. E., Klar, A., Soga, K., & Mair, R. J. (2005). Estimating the effects of tunneling on existing pipelines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1399-1410.
- Westine, P. S., Esparza, E. D., & Wenzel, A. B. (1978). *Analysis and testing of pipe response to buried explosive detonations*. Pipeline Research Committee, American Gas Association.
- Wols, B. A., & van Thienen, P. (2014). Modelling the effect of climate change induced soil settling on drinking water distribution pipes. *Computers and Geotechnics*, 240-247.
- Wols, B. A., Moerman, A., & Vertommen, I. (2015). *BTO 2015.082 Comsima: model voor spanningen op ondergrondse leidingen*. KWR.
- Wols, B., & Moerman, A. (2017). *BTO 2017.074 Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in leidingen met COMSIMA*. Nieuwegein: KWR Watercycle Research Institute.

I Benodigde data

Tabel 4: Benodigde data om zowel waterslag te berekenen met wet van Joukouski als spanning in leiding ten gevolge van graafwerkzaamheden

Groetheid	Belang
Waterslag	
Sluittijd van klep/pomp	Bepalen of de wet van Joukouski toepasbaar is
Lengte van leiding	
Diameter van leiding	Bepalend voor drukgolfsnelheid
Wanddikte van leiding	
Elasticiteitsmodulus van wandmateriaal	
Dichtheid van vloeistof	
Compressiemodulus van vloeistof	
Manier van verankeren	Bepalend voor mate van drukschommeling
Snelheidsverandering	
Graafwerkzaamheden	
Type bodem (cohesief of niet?)	Bepaalt of bolling in bodem überhaupt plaatsvindt
Ongedraineerde afschuifsterkte	Bepalend voor kritische diepte waarboven bodem zal instorten; kritische diepte wordt bovendien gebruikt om schatten van bolling in de bodem
Gewichtseenheid van de bodem	
Diepte van opgraving	Bepaalt de mate van horizontale beweging ten opzichte van de diepte van opgraving
Afstand tussen leiding en opgraving	
Lengte van opgraving	Relevant voor korte sleuven
Manier van aanbrengen van steunstelsel in contact met een kant van de sleuf	Bepaalt horizontale verplaatsing voor tweede mechanisme (zie paragraaf 3.2.1)
Manier van aanbrengen van propstelsel	Bepaalt een reductiefactor voor derde mechanisme (zie paragraaf 3.2.1)

Breedte van opgraving	Bepaalt horizontale verplaatsing voor vierde mechanisme (zie paragraaf 3.2.1)
Compressibiliteit van backfill	
Coëfficiënt van de actieve aarddruk voor de begraven bodem	
Coëfficiënt van evenwichtigeaardruk van de begraven bodem	
Aantal kanten van de sleuf die contact heeft met de bodem (1 of 2)	Bepaalt reductiefactor voor vierde mechanisme (zie paragraaf 3.2.1)
Buitendiameter van leiding	Bepaalt bodem-structuur interactie parameter
Coëfficiënt van horizontale subgrade reaction van de onverstoorde bodem	
Elasticiteitsmodulus	
Moment van inertie van de doorsnede	
Empirische waardes voor berekeningen	Essentiele waardes van bodemeigenschappen die door veldmetingen bepaald moeten worden