

BTO 2016.016 | Mei 2016

BTO rapport

Fysieke kwetsbaarheid
leidingen voor
klimaatverandering

BTO

Fysieke kwetsbaarheid leidingen voor Klimaatverandering

BTO 2016.016 | Mei 2016

Opdrachtnummer

400554-077

Projectmanager

dr. E. Dorland

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Klimaatbestendige
watersector

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. M. Blokker

Auteur(s)

dr. ir. B. A. Wols, dr. J. van Summeren, ing. G. Mesman,
drs. B. Raterman

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

dr. ir. B.A. Wols
T 030 606 9604
E bas.wols@kwrwater.nl

Keywords

klimaatverandering; leidingen

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO 2016.016 | Mei 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

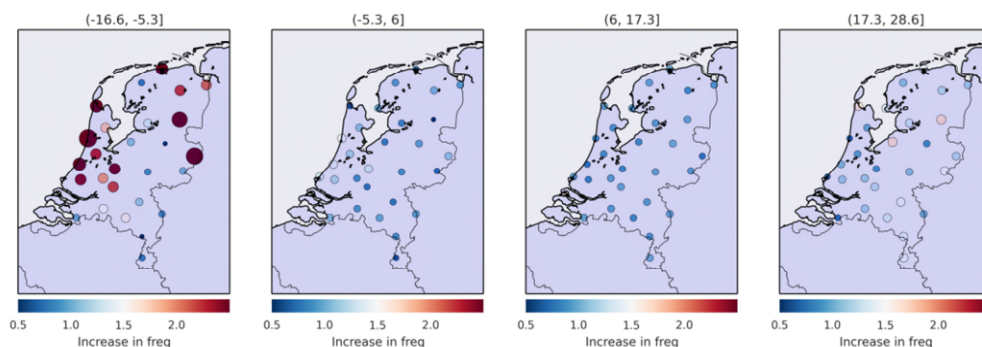
Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Invloed van klimaatverandering op falen van leidingen in kaart gebracht: wind, temperatuur en droogte hebben effect, afhankelijk van het leidingmateriaal

Auteur(s) dr. ir. Bas Wols, dr. Joost van Summeren, ing. George Mesman, drs. Bernard Raterman

Gebruikmakend van KNMI klimaatscenario's is een inschatting gemaakt van de gevolgen van temperatuurveranderingen voor het falen van leidingen. Met name AC leidingen – die het meest gevoelig zijn voor hoge temperatuur – zullen meer storingen gaan vertonen. Voor gietijzeren leidingen – vooral gevoelig voor lage temperatuur – zal het aantal storingen juist afnemen. Ook meer droge zomers kunnen leiden tot zettingen en daarmee tot leidingfalen. Zware stormen leiden tot leidingfalen, maar de verwachting is dat de verandering in windsnelheid door klimaatverandering klein is. Dit zijn resultaten uit onderzoek bedoeld om waterbedrijven te helpen klimaatbestendige saneringsbeslissingen te nemen voor het ondergrondse distributienet. Daarvoor hebben zij extra kennis nodig over oorzaken die ervoor kunnen zorgen dat leidingen van uiteenlopende materialen mogelijk bezwijken. Rekening houdend met de samenstelling van het leidingnet (materiaaltype, leeftijd en diameter) zijn de invloeden van zettingen, droogte, temperatuur, wind en drukvariaties op de integriteit van ondergrondse waterleidingen in beeld gebracht.



Verandering in storingen van leidingen bij verandering in temperaturen (van links naar rechts toenemende temperatuurklassen)

Belang: klimaatbestendige saneringsbeslissingen nemen

Falende leidingen leveren overlast en kosten op. Daarom proberen waterbedrijven het storen van leidingen in het distributienet zoveel mogelijk te voorkomen. Een mogelijke factor die leidingstoringen verergert is klimaatverandering. Om met klimaatbestendige saneringsbeslissingen hierop te kunnen anticiperen hebben waterbedrijven meer kennis nodig over de invloed van klimaatverandering op het falen van leidingen.

Aanpak: raadplegen van diverse bronnen voor onderzoek naar verbanden met weerparameters

Welke verbanden bestaan tussen het weer en leidingstoringen is onderzocht aan de hand van diverse bronnen: storingsgegevens (zowel Nederlandse als buitenlandse), leidingnetmodellsimulaties, satellietdata en weergegevens. Voor verschillende regio's in Nederland zijn de verbanden in kaart gebracht met behulp van statistiek. Leidingnetmodellering is gebruikt om op warme dagen met hoge piekverbruiken zicht te krijgen op de leidingdruk,

aangevuld met onderzoek naar de gevolgen hiervan voor het leidingnet. Satellietdata dienden om op lokaal niveau het verband tussen zettingen en storingen te achterhalen.

Resultaten: invloed van weerparameters op storingen in kaart gebracht

De volgende weerparameters hebben invloed op storen van leidingen: wind, temperatuur en droogte. Deze invloeden kunnen verschillen per leidingmateriaal.

Storingen door wind treden alleen op bij zeer zware stormen, waarbij massaal bomen omvallen en de mogelijkheid bestaat dat wortels de leidingen meetrokken. Alle leidingmaterialen ondervinden deze gevolgen van wind.

Temperatuur speelt voornamelijk een rol bij asbestcement (AC), gietijzer en staal met kleine diameters. Zowel bij hoge als bij lage temperaturen kunnen de storingen toenemen. Bij hoge temperaturen is er een flinke stijging in het piekverbruik, wat leidt tot andere drukken in de leidingen. Afhankelijk van de sturing van de drukken in het gebied treden grotere drukverschillen op. Dit leidt tot een relatief kleine toename in mechanische spanningen, met mogelijk een effect op verzwakte leidingen. Onafhankelijk van de temperatuur is een verband gevonden met storingen en de gemiddelde druk in de leiding gedurende het jaar. In leidingen waar hogere drukken heersen, treden meer storingen op. Dit effect is het sterkst bij PVC.

Er is ook een klein effect van droogte zichtbaar: in drogere perioden lijkt het aantal storingen te stijgen. Droogte kan leiden tot een toename in zettingen. Uit satellietgegevens blijkt dat gebieden met hogere zettingen of zettingsverschillen meer storingen vertonen.

Storingsgegevens uit het buitenland (Canada, Zuid-Afrika) laten ook een effect zien van temperatuur en droogte op storingen. In Canada treden bij lage temperaturen meer storingen op in de gietijzeren leidingen. In Zuid-Afrika zijn er vooral meer storingen gedurende natte perioden. Hoge temperaturen hebben weinig effect op storingen, zo blijkt uit de buitenlandse data.

Implementatie: inschatting klimaatverandering op het falen van leidingen

Aangezien in de komende decennia de temperatuurgevoelige AC leidingen zullen worden vervangen, is het vooruitzicht dat hiermee mogelijke effecten van klimaatverandering op het ondergrondse distributienet op de lange termijn klein zijn. Naar verwachting zijn specifieke klimaatmaatregelen om falen in het leidingnet te voorkomen dan ook niet nodig. Wel blijft de toename van drogere periodes en daarmee gepaard gaande zettingen een aandachtspunt.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Fysieke kwetsbaarheid leidingen voor klimaatverandering* (BTO-2016.016).

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

dr. ir. B.A. Wols
T 030 606 9604
E bas.wols@kwrwater.nl

Keywords

klimaatverandering; leidingen

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2016.016 | Mei 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, 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, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

Inhoud	3
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Doel	5
1.3 Leeswijzer	6
2 Klimaatbestendigheid van PVC, PE en nodulair gietijzer	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Aanwezige leidingmaterialen in het Nederlandse leidingnet	7
2.3 Verouderingsmechanismen	8
2.4 Faalmechanismen	9
2.5 Invloed weersomstandigheden op het leidingnet	12
3 Regionale en lokale invloed van klimaat op storingen	14
3.1 Inleiding	14
3.2 Regionale verschillen	14
3.3 Lokale zettingsverschillen a.h.v. Remote Sensing (RS)	31
4 Effect van verbruikspieken	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Invloed van het weer op totale watervraag en piekverbruik	35
4.3 Netwerkmodellering voor voorzieningsgebied Almere	36
4.4 Invloed van sturing op drukniveaus in het leidingnet	39
4.5 Grotere drukvariaties door hoger verbruik	40
4.6 Spanningsberekeningen	43
4.7 Grotere variatie in leidingsspanning door hogere verbruiken	43
4.8 Statistische analyse	46
5 Klimaatextremen	51
5.1 Inleiding	51
5.2 Effect van weer op storingen in Kaapstad	51
5.3 Effect van weer op storingen in Montreal	56
5.4 Discussie	61
6 Synthese	62
6.1 Inleiding	62
6.2 Verwachte klimaatverandering	62

6.3	Voorspellen van toekomstige storingen als gevolg van klimaatverandering	63
7	Conclusies en aanbevelingen	64
7.1	Conclusies	64
7.2	Aanbevelingen	65
	Referenties	67
	Bijlage I Regionale effect van klimaat op storingen	69
	Bijlage II Remote sensing technieken	73
	Bijlage III Effect van drukverschillen op storingen	76
	Bijlage IV Resultaten klimaatextremen	80

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Eerder onderzoek heeft aangetoond dat weersomstandigheden invloed kunnen hebben op het falen van ondergrondse waterleidingen (Wols en Van Thienen, 2014). Analyse van storingsdata in USTORE van de afgelopen 5 jaar met landelijke weergegevens (gegevens van weerstation De Bilt) laat zien dat bij hogere temperaturen het aantal leidingbreuken toeneemt voor AC en kleine stalen leidingen (Wols en Van Thienen, 2014). Bij gietijzeren leidingen gebeurt het omgekeerde: hier nemen het aantal leidingbreuken juist toe bij lage temperaturen. Mogelijke oorzaak voor deze stijging bij lage temperaturen is vorst en hierbij gepaard gaande grondzettingen. Mogelijke oorzaken voor de stijging in storingen voor AC en kleine stalen leidingen bij hoge temperaturen zijn de toename in waterverbruik en de toename van zettingen in droge en warme perioden. Deze zettingen leiden tot hogere uitwendige belastingen. Op basis van de klimaatscenario's van het KNMI is in de toekomst (2030, 2050 en 2085) zowel een toename van droogte als stijging van temperaturen te verwachten. Dit kan invloed hebben op het aantal storingen in leidingen. Voor PVC lijkt deze weersinvloed niet te gelden. Het PVC dat stoort is echter veel jonger (~30 jaar oud) dan het AC en staal dat stoort (~60 jaar oud). In de komende decennia zullen de leidingen meer en meer vervangen worden door PVC (de verwachting is dat het aandeel PVC toeneemt van 52% in 2013 naar 73% in 2050 bij het huidige vervangingsbeleid van 0.5% per jaar), waarmee PVC geschikt lijkt als klimaatadaptatiestrategie. Het is echter niet bekend wat er gebeurt als PVC langer in de grond ligt, of het dan nog steeds ongevoelig voor temperatuur is. Hetzelfde geldt voor PE, wat minder wordt toegepast dan PVC (7% in 2013 naar 10% in 2050) en waar minder over bekend is. De verwachte toename in periodes met droogte en hoge temperaturen kan mogelijk ook leiden tot hogere pieken in de watervraag, en daarmee tot veranderingen in interne drukken in de leiding. De invloed van de toename in piekvraag door klimaatverandering op de drukken en interne belastingen op de leiding zal hier onderzocht worden.

In 2014 zijn de nieuwe klimaatscenario's van het KNMI beschikbaar gekomen, waarin ook voorspellingen van klimaatverandering op regionaal niveau zijn opgenomen. Het is nu mogelijk om rekening te houden met regionale verschillen in klimaat en bodem (zettingen). In de huidige analyses zijn de correlaties met droogte en storingen zwak, omdat gebruik gemaakt is van weergegevens uit De Bilt, terwijl droogte en zetting per gebied en grondsoort verschillen (zetting treedt met name op in het westen en noorden van Nederland). Door gebruik te maken van gegevens van regionale weerstations kunnen mogelijk betere verbanden tussen weer en storing gevonden worden. Ook kan met behulp van satellietdata van zettingen (InSAR) of droogte (SMOS satelliet) een sterker verband gevonden worden tussen storingen en droogte/zetting. Doordat in de analyse van de storingsdata over de afgelopen 5 jaar weinig weersextremen zitten, kunnen belangrijke klimaateffecten over het hoofd gezien worden. Uitvoering van soortgelijke analyses voor andere langdurigere datasets (bijvoorbeeld uit het buitenland, waarin onze extremen wellicht meer de norm zijn of worden in 2050) moeten meer duidelijkheid scheppen.

1.2 Doel

Het doel van dit onderzoek is om het effect van klimaat op de integriteit van het leidingnet in kaart te brengen, en in te schatten in welke mate en welke onderdelen van het leidingnet

gevoelig zijn voor klimaatverandering. Hiervoor zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

- In hoeverre kan aan de hand van literatuurgegevens gezegd worden of de meer recente leidingmaterialen PVC, PE en nodulair gietijzer klimaatbestendig zijn, zeker naarmate de materialen ouder worden?
- Wat zijn de verbanden tussen storingen en weer (temperatuur, droogte, wind) als gebruik gemaakt wordt van regionale weergegevens? Wat zijn de verschillen tussen de regio's? En wat is de invloed van leidingkarakteristieken zoals leeftijd en diameter?
- In hoeverre veroorzaken zettingen als gevolg van droogte meer storingen in leidingen?
- Kan de waargenomen storingstoename bij hoge temperaturen verklaard worden door toenames in verbruik en interne drukken?
- Wat voor effect hebben extreme weersomstandigheden, zoals die kunnen optreden in andere klimaatregio's in het buitenland, op het storen van leidingen?

1.3 Leeswijzer

Op basis van literatuurgegevens is onderzocht hoe klimaatbestendig de meer recente leidingmaterialen (zoals PVC, PE en nodulair gietijzer) zijn (Hoofdstuk 2). Vervolgens is in Hoofdstuk 3 met behulp van statistische analyses op storingsdata en weergegevens onderzocht wat het effect van klimaat is op storingen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van regionale weergegevens en daarnaast is een analyse gedaan met behulp van lokale satellietgegevens. In Hoofdstuk 4 is specifiek onderzocht hoe veranderingen in verbruikspatronen als gevolg van (extreem) warm weer leiden tot variaties in druk en daarmee tot spanningen in de leidingen. Met behulp van storingsdata uit het buitenland is onderzocht in hoeverre het leidingnet gevoelig is voor meer extreme weersomstandigheden (Hoofdstuk 5). Tenslotte is in Hoofdstuk 6 een inschatting gemaakt of er veel veranderingen in storingen van het leidingnet zijn te verwachten als gevolg van klimaatverandering.

2 Klimaatbestendigheid van PVC, PE en nodulair gietijzer

2.1 Inleiding

Eerdere analyses van weergegevens met storingsdata lieten zien dat de materialen AC en staal (kleine leidingen) een sterke gevoeligheid voor hoge temperaturen lieten zien, terwijl de materialen PVC, PE en nodulair gietijzer dit niet lieten zien. Naast dat het faalmechanisme van deze materialen anders is, zijn deze materialen ook pas veel recenter op grote schaal toegepast en is de gemiddelde leeftijd van de materialen veel lager. De vraag is daarom of deze materialen helemaal niet gevoelig zijn voor weer of dat het leeftijdsaspect hier nog een rol speelt. In dit hoofdstuk wordt vanuit de theorie onderzocht wat er te verwachten valt, in hoofdstuk 3 zal het leeftijdsaspect ook m.b.v. statistische analyses onderzocht worden.

2.2 Aanwezige leidingmaterialen in het Nederlandse leidingnet

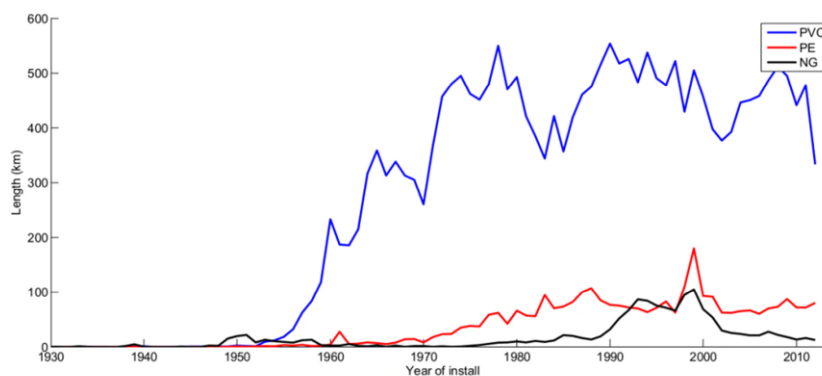
In het leidingnet in Nederland zijn verschillende leidingmaterialen aanwezig. Dit is veroorzaakt door de lange historie van het leidingnet en de ontwikkeling in verschillende materialen voor waterleidingen door de jaren heen. Op basis van de statistiek van het leidingnet in 2013 bestaat het leidingnet (exclusief aansluitleidingen) uit de materialen PVC (52 %), AC (28 %), lamellair (grijs) gietijzer (8 %), PE (7 %) en 7% ander materialen als nodulair gietijzer, staal, beton en GVK. De totale lengte van leidingnet bedraagt 118.945 km in 2013.

Binnen de gedefinieerde materiaalcategorieën bestaan verschillende subcategorieën die niet in de statistiek bijgehouden worden. Dit zijn binnen PVC het Unplastified PVC (UPVC) en het Biaxiaal verstrekt PVC (Moleculair Orientated PVC, MOPVC) en binnen PE zijn PE63, PE80, PE100 PE100CR, ZPE, MDPE en HDPE in de categorie aanwezig. Voor asbestcement bestaat onderscheid tussen Eternit buis en andere fabricaten als Toshi.

Binnen een "eenduidige" materiaalsoort als UPVC bestaan duidelijke kwaliteitsverschillen. Het materiaal is in gebruik vanaf het midden van de periode 1950-1960. In de loop van de tijd zijn veranderingen in de productiemethoden van de grondstof PVC en de buisfabricage doorgevoerd. Deze veranderingen zijn terug te vinden in de kwaliteit van het PVC. Dat is echter niet geregistreerd en alleen door materiaalonderzoek te bepalen.

In Nederland ontwikkelt het leidingnet zich langs twee sporen, enerzijds is daar de nieuwbouw van leidingnetten in uitbreidingswijken en anderzijds is er de sanering van oude leidingnetten. Over de laatste 20 jaar ontwikkelt het drinkwaternet zich hiermee met 1600 km/jaar nieuwe leidingen. De nieuwbouw van leidingnetten (1080 km/jaar over de laatste 20 jaar) wordt over het algemeen (2014) uitgevoerd in UPVC en PE voor de kleine diameters in de zelfreinigende vertakte structuren (tertiair) en MOPVC/UPVC in de secundaire structuren in de grotere diameters. De sanering van asbestcement en grijs gietijzer (275 + 250 km/jaar) wordt op een soortgelijke wijze ingevuld. Onder bijzondere belastingomstandigheden, hoge druk of hoge bovenbelasting wordt nodulair gietijzer gelegd. Er zijn inmiddels PE soorten op de markt met verbeterde microbiologische eigenschappen (lagere biofilmvormingspotentie). Hiermee kan een verschuiving plaatsvinden naar een grotere toepassing van PE. Nieuwe technieken voor het saneren van leidingen, zoals sprayen/of koustechieken, kunnen mogelijk een verschuiving geven naar langer gebruik van klimaatbestendige materialen.

In Figuur 2.1 is met behulp van USTORE gegevens een overzicht gegeven van de aanwezigheid van de materialen PVC, PE en NG in het huidige leidingnetwerk met daarin het jaar van aanleg. PVC is verreweg het meeste aangelegd van deze drie materialen. PVC is aangelegd vanaf de jaren '50. PE is aangelegd vanaf de jaren '70. En NG vanaf de jaren '80, met een piek tussen 1990–2000. In de laatste decennia is dit materiaal minder gebruikt. Er lijkt ook NG aangelegd te zijn in de jaren '50. Dit is een fout in de registratie.



Figuur 2.1 Aanwezigheid van de materialen PVC, PE en nodulair gietijzer (NG) in het huidige leidingnetwerk (2014) van de bedrijven die geregistreerd staan in USTORE. In de figuur is de lengte [km] per jaar uitgezet tegen het aanlegjaar.

2.3 Verouderingsmechanismen

Eigenschappen van leidingmaterialen veranderen over de tijd. Dit verschijnsel staat bekend onder het begrip “veroudering”. Veroudering wordt onderscheiden in mechanische, fysische en chemische veroudering. Veroudering is afhankelijk van beschadigingen, temperatuur en materiaalspanning.

Chemische veroudering

Gedurende de productie van PVC en PE buizen kan bij hoge temperaturen chemische veroudering optreden. Hierbij komen chlooratomen los uit het molecuul waarmee zoutzuur gevormd kan worden dat het materiaal aantast. Aan het materiaal wordt een stabilisator toegevoegd waarmee het zoutzuur wordt afgevangen. In PVC en PE leidingen is voldoende stabilisator aanwezig waardoor chemische veroudering niet optreedt. Voor nodulair gietijzer is bovengenoemde type chemische veroudering niet aan de orde, echter corrosie treedt wel op.

Fysische veroudering

Bij kunststoffen komt fysische veroudering (volumerelaxatie) voor. Deze vorm van veroudering leidt tot een verandering in materiaaleigenschappen. Dit resulteert voor PVC in kortere tijden tot brosse breuk. De snelheid waarmee fysische veroudering optreedt is afhankelijk van de gebruikstemperatuur. Bij de productie van de buizen (hoge temperatuur in de extruder) is het gedurende korte tijd sterk aanwezig. Bij temperaturen lager dan 25 °C onder de glastemperatuur (voor PVC van 75 – 80 °C) is de snelheid van fysische veroudering zeer laag. Fysische veroudering heeft in slecht geproduceerd materiaal een grote negatieve invloed op de opneembare spanning en scheurgroei.

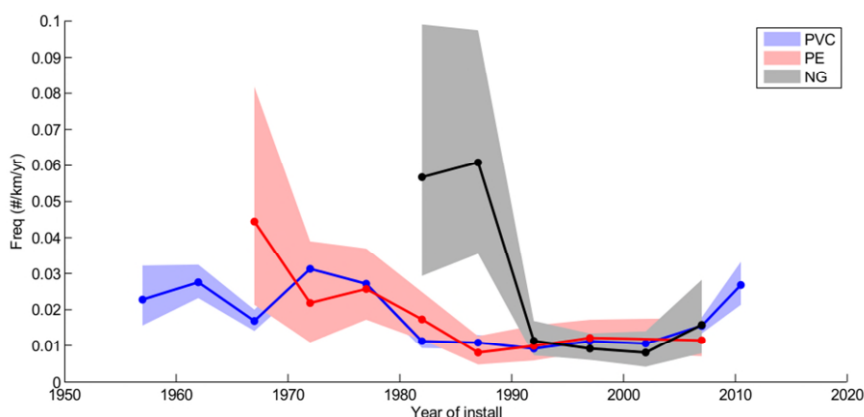
Mechanische veroudering

Onder mechanische degradatie in PVC buizen wordt slijtage, krassen en scheurgroei bij hoge spanning verstaan. Langzame scheurgroei komt voor in kunststoffen die onder spanning staan. Door lokale inhomogeniteiten loopt de spanning op tot waarden waarbij lokaal kleine scheurtjes ontstaan. Deze groeien door waarbij de lokale spanningen weer hoger worden. In kunststoffen kan dit aan de orde zijn rond kleine verontreinigingen in het buismateriaal. Dit kunnen deeltjes zijn van verschillende aard zoals kristallen, verglaasd PVC, verkoold materiaal, of deeltjes afkomstig uit de extruder. Het onderwerp is beschreven in Mesman (2015, BTO 2015.054)

In nodulair gietijzeren waterleidingen wordt het verschijnsel niet aangetroffen.

2.4 Faalmechanismen

Het falen van de leidingen wordt uitgedrukt in de storingsfrequentie: het aantal storingen per km leiding per jaar. Dit wordt veroorzaakt door verschillende faalmechanismen. De storingsfrequentie als functie van installatiejaar (Figuur 2.2) laat de welbekende 'badkuip'-curve zien voor alle materialen: een hogere storingsfrequentie net na installatie, vervolgens een stabiele lage frequentie die na verloop van tijd weer oploopt. Bij nodulair gietijzer is er een hoge storingsfrequentie waarneembaar voor materiaal dat aangelegd is in de jaren '80. Het is bekend dat nodulair gietijzeren leidingen uit de beginjaren (eind jaren '70) gevoeliger zijn voor corrosie. Bij PVC heeft het materiaal aangelegd tussen 1965 en 1980 een wat hogere storingsfrequentie. Dit heeft te maken met veranderingen in het productieproces, en daarmee gepaard gaande spreiding in kwaliteit. De verbeteringen in productieproces rond 1980 leidde tot een verlaging van de storingsfrequentie.



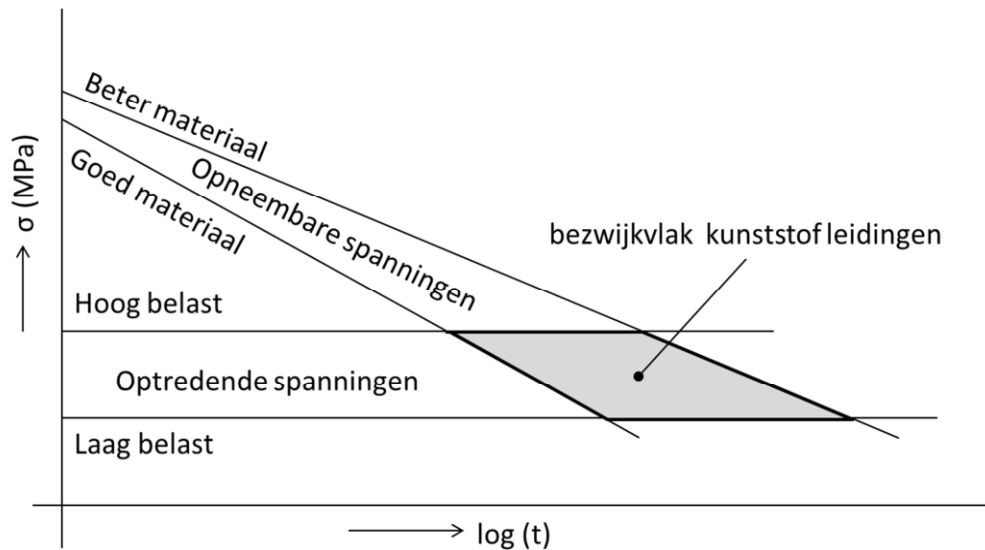
Figuur 2.2 Storingsfrequentie (gemiddelde lijn) en onzekerheid (vlak) als functie van aanlegjaar voor PVC, PE en nodulair gietijzer (NG).

Het storingsgedrag van leidingen kan worden onderscheiden in:

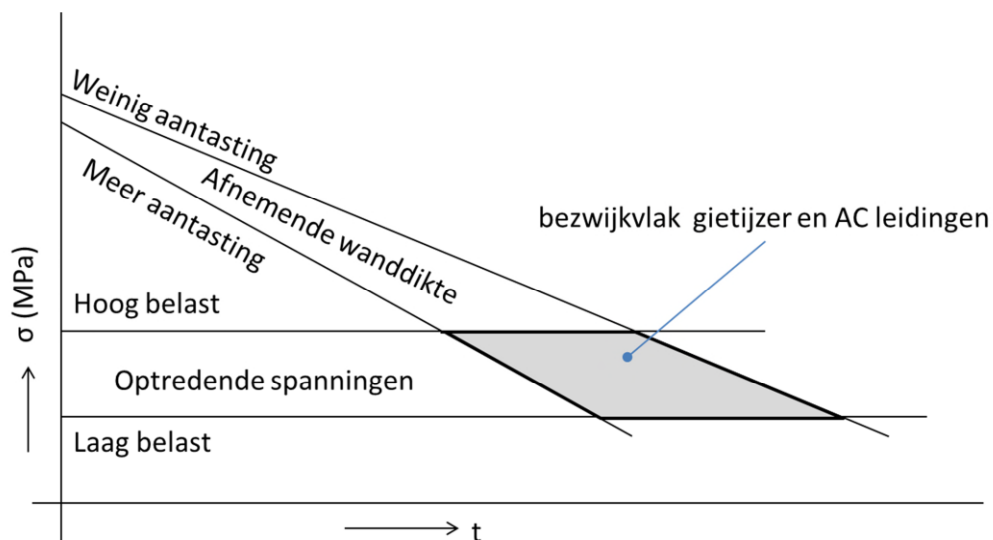
- Storings veroorzaakt door derden;
- Storings veroorzaakt door fouten in de aanleg;
- Storings veroorzaakt door overbelasting van de constructie, hierin kunnen worden onderscheiden: inwendige druk, bovenbelasting en eventuele zettingsverschillen.

Storings als gevolg van overbelasting van de constructie ontstaan als de optredende spanningen in het materiaal groter worden dan de opneembare spanningen (Figuur 2.3 en Figuur 2.4). De hoeveelheid spanning die opgenomen kan worden is afhankelijk van de ingaande kwaliteit van het materiaal en afname in kwaliteit over de tijd. Voor kunststof leidingen (Figuur 2.3) is de opneembare belasting afhankelijk van de duur van die belasting

en neemt lineair af met de logaritme van de tijd, terwijl voor gietijzeren en AC leidingen (Figuur 2.4) de opneembare belasting afneemt als gevolg van aantasting van het materiaal. Op basis hiervan kan een bezwijkvlak beschouwd worden, wat aangeeft wanneer een leiding zal gaan falen, afhankelijk van de tijd, optredende belastingen, ingaande materiaalkwaliteit en aantasting (voor GGIIJ en AC). Weersomstandigheden kunnen zowel effect hebben op de optredende belasting als de opneembare spanningen (zie 2.5.1 en 2.5.2).



Figuur 2.3 Bezwijkvlak voor kunststof leidingen. De tijd t is de tijd dat de spanning aanhoudt. Als de optredende spanningen hoger zijn dan de opneembare spanningen zal het materiaal bezwijken. De opneembare spanningen nemen af in de tijd. Deze afname is lineair met de logaritme van de tijd dat deze spanning duurt.



Figuur 2.4 Bezwijkvlak voor gietijzer en AC leidingen. De tijd t is de tijd dat de leiding in de grond ligt. Als de optredende spanningen hoger zijn dan de opneembare spanningen zal het materiaal bezwijken. De

opneembare spanningen nemen af in de tijd als gevolg van afnemende wanddikte door aantasting van het materiaal.

Een aantal belastingen wordt onderscheiden:

- Inwendige druk
- Bovenbelasting
- Belastingen veroorzaakt door zettingsverschillen

Inwendige druk

De druk in een leidingnet wordt bepaald door de locaties in het leidingnet waar de minimum druk door het waterleidingbedrijf gegarandeerd wordt, de drukval in het net en eventuele hoogteverschillen tussen afnamepunten. De inwendige druk kan variëren over de levensduur van een leiding. Op grotere tijdschaal kan dit veroorzaakt worden door bedrijfsmatige wijzigingen. Voorzieningsgebieden worden heringericht, transportassen kunnen verlegd worden. Deze wijzigingen kunnen een grote impact hebben op de inwendige druk in de leidingen. Op kleinere tijdschaal kan de inwendige druk variëren als gevolg van watervraag.

Bovenbelasting

De bovenbelasting bestaat uit belasting door de grond boven de leiding en een mogelijke verkeersbelasting.

Zettingsverschillen

Door zettingsverschillen ontstaan spanningen in de leidingen. De eigenschap waarin het ontstaan van hoge materiaalspanningen vastligt, is stijfheid en dit ligt vast in de E-modulus en de constructie (diameter en wanddikte). Hoe elastischer het materiaal, hoe beter een leiding de zetting kan volgen en hoe lager de optredende spanningen zijn. Hiernaast zal een kleine diameter leiding met een beperkte wanddikte de zettingen ook beter kunnen volgen. In tabel 2.1 zijn de relevante eigenschappen van de verschillende leidingmaterialen verzameld.

Tabel 2.1 Relevante materiaaleigenschappen in verband met zettingsverschillen

Materiaal	E-modulus	MRS*/treksterkte
	Lange duur** (MPa)	Lange duur** (MPa)
PE40	125	4
PE80	200	8
PE100	200	10
UPVC	1500	25
NGIJ	170.000	270

*Minimum Required Strength

** Lange duur is 50 jaar

Zoals uit de materiaaleigenschappen volgt is PE het materiaal waarin de laagste materiaalspanningen ontstaan bij zettingsverschillen in de ondergrond, dit wordt gevolgd door PVC. In NGIJ ontstaan hoge spanningen bij zettingsverschillen. Echter de toelaatbare spanningen zijn ook lager in PE, gevolgd door PVC en daarna NGIJ. Met behulp van

modellering (Comsima, Wols et al., 2015) kan een inschatting gemaakt worden van een verschilzetting

In hoeverre de maximum toelaatbare materiaalspanningen overschreden worden hangt sterk af van de optredende zettingsverschillen en de mogelijke mate van hoekverdraaiing in de koppelingen. Het leidingsysteem (combinatie van buisdelen en koppelingen) is hierbij ook van belang:

- PE leidingsystemen bestaan over het algemeen uit vaste verbindingen (electrolasmoffen of spiegellassen). In deze verbindingen is geen hoekverdraaiing mogelijk maar dat is gezien de lage E-modulus ook niet noodzakelijk. Een leiding kan voldoende vervorming over de lengte opnemen.
- PVC leidingsystemen in kleine diameters kunnen gelijmd worden, en in de grotere diameters worden ze uitgevoerd met steekmoffen. Als er axiale bewegingen worden verwacht kunnen de PVC verbindingen ook trekvast worden uitgevoerd. Gelijmde en trekvast verbindingen kunnen geen hoekverdraaiing opnemen en in deze leidingen zullen bij zettingsverschillen direct materiaalspanningen ontstaan. Steekmoffen kunnen aan het buisdeel vastzitten of als losse dubbelzijdige moffen uitgevoerd zijn. De toegestane hoekverdraaiing op een steekmof is 3° per zijde. Op een dubbele mof is een hoekverdraaiing van 6° mogelijk. Bij grotere hoekverdraaiingen ontstaan extra materiaalspanningen in de aansluitende buisdelen.
- NGIJ leidingsystemen zijn standaard uitgevoerd met een steekmof op elk buisdeel waarin de mogelijke hoekverdraaiing afhankelijk is van de diameter (5° tot en met 300 mm en 4° van 300 mm tot en met 600 mm). Bij grotere hoekverdraaiingen ontstaan extra materiaalspanningen in de aansluitende buisdelen.

2.5 Invloed weersomstandigheden op het leidingnet

2.5.1 Invloed van weer op belastingen

Inwendige druk

Bij een grotere watervraag als gevolg van extreme weersomstandigheden zal de maximum druk in het leidingnet stijgen bij een gelijke minimum druk (in de praktijk zal afhankelijk van de regeling de druk bij het pompstation toenemen en mogelijk in de periferie afnemen). Drukverschillen nemen toe met het kwadraat van de volumestroom en een 10% hogere volumestroom levert dus een drukverschil op dat 21% hoger is. Gezien de ontwerpgrondslagen die gehanteerd worden in het totale primaire, secundaire en tertiaire net zullen de volumestromen en drukken redelijk nauwkeurig te voorspellen zijn. In Hoofdstuk 4 zal hier verder op ingegaan worden.

Bovenbelasting

De invloed van weer op de bovenbelasting op een leiding is beperkt. Verlagen van grondwaterstanden kunnen de bovenbelasting verhogen maar dit effect is klein ten opzichte van de andere belastingen (inwendige drukken, zettingen, verkeersbelastingen).

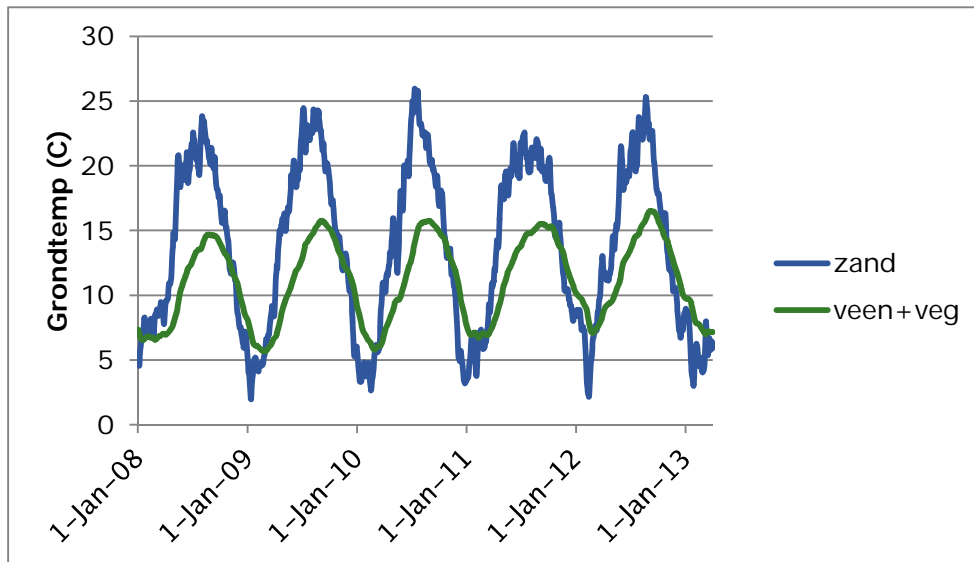
Zettingsverschillen

Bij klimaatveranderingen bestaat de mogelijkheid dat gronden verder uitdrogen. Dit gaat gepaard met krimp van bepaalde grondsoorten (klei en veenachtige gronden) waarbij zettingen in verhoogde mate kunnen voorkomen. Leidingen die in deze gronden liggen worden zwaarder belast in longitudinale richting dan radiale richting omdat de verschillen in zetting zich over de lengte van de leiding voordoen. Hieruit ontstaan materiaalspanningen in

de leiding die afhankelijk zijn van de eigenschappen van het betreffende materiaal, de mate van zettingsverschillen en de lengte van de leiding waarover deze zettingsverschillen zich voordoen. Meer informatie over spanningen in de leidingen ten gevolge van zettingen is te lezen in Wols en Van Thienen (2014b) en Van Daal en Wols (2012, BTO 2012.242(s)). In paragraaf 3.3 is met satellietdata het verband tussen zettingen en storingen onderzocht.

2.5.2 Invloed van temperatuur op toelaatbare spanningen

Voor de kunststoffen geldt dat bij hogere temperaturen de toelaatbare materiaalspanning gereduceerd moeten worden. Voor PVC wordt de grens gelegd op 25 °C. Hieronder kan men de volledige MRS (Minimum Required Strength) rekenen, daarboven is een reductie van 80% voorgeschreven. Voor PE wordt de MRS gereduceerd bij temperaturen boven 20 °C met een factor 0,9, boven de 25 °C wordt een reductiefactor toegepast van 0,81 en de 30 °C is deze factor 0,72. Boven 35 °C mag het materiaal niet voor drukleidingen worden toegepast. Omdat bij een warmer klimaat de bodemtemperaturen oplopen, bestaat de mogelijkheid dat het leidingmateriaal in de genoemde temperatuurrange terecht komt in de zomerperiode. Dit is te zien in Figuur 2.5, waar het temperatuursverloop in de bodem (op 1 m diepte) over de afgelopen jaren is weergegeven. Deze temperaturen zijn bepaald met behulp van het bodemtemperatuurmodel (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2012). Het temperatuursverloop in de bodem is bepaald voor zand, klei en veengronden met en zonder vegetatie. De grootste temperatuurverschillen zijn gevonden voor zandgronden zonder vegetatie en de kleinste temperatuurverschillen zijn gevonden voor veengronden met vegetatie. Hieruit blijkt dat in zandgronden temperaturen boven de 20 °C ieder jaar gedurende een vrij lange periode voorkomen en dat ook temperaturen boven de 25 °C kunnen voorkomen. Hierin is het effect van verstedelijking nog niet meegenomen, waardoor de temperaturen in steden nog hoger kunnen uitkomen (zie ook Agudelo-Vera et al., 2015).



Figuur 2.5 Gesimuleerde temperatuursverloop op 1 m diepte in de bodem over de afgelopen jaren, voor zandbodems (zand) en veenbodems met vegetatie (veen+veg).

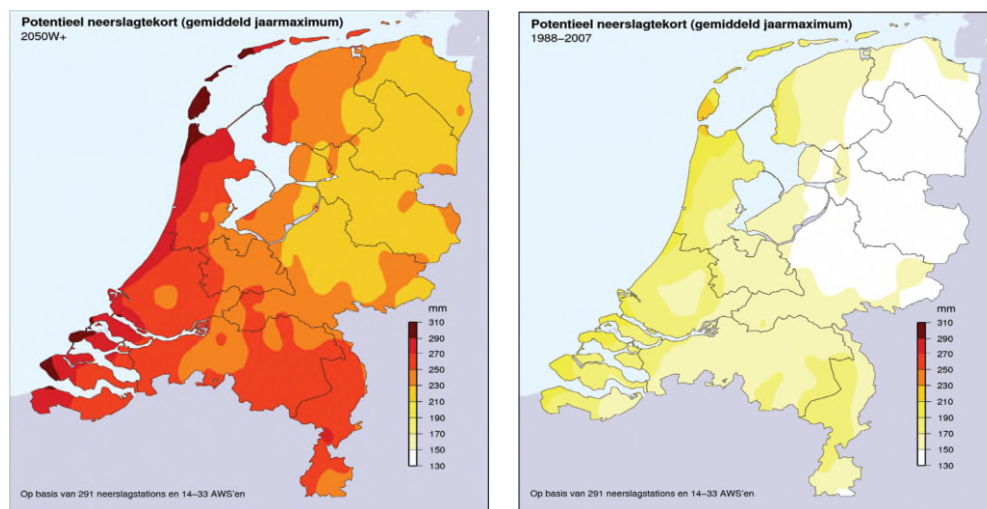
3 Regionale en lokale invloed van klimaat op storingen

3.1 Inleiding

Weerparameters, zoals temperatuur, droogte, wind, kunnen binnen Nederland regionaal verschillen (Figuur 3.1). Dit geldt in sterkere mate voor zettingen als gevolg van droogte, waar de regionale verschillen in grondopbouw en droogtetekort tot grote verschillen kunnen leiden.

In eerder onderzoek is met behulp van statistische analyses het verband tussen weerparameters en storingen onderzocht voor heel Nederland (Wols en Van Thienen, 2014). Hierbij zijn storingen uit USTORE gebruikt (van ongeveer de helft van Nederland) en weergegevens van KNMI station De Bilt. In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van alle KNMI stations verdeeld over Nederland, zodat de regionale verschillen in weerparameters meegenomen kunnen worden. Hiervoor worden alle storingen toegewezen aan een KNMI station.

Vervolgens is een statistische analyse uitgevoerd op lokaal niveau, waarbij ook gebruik gemaakt is van satellietdata om verbanden met zettingen en storingen te vinden.



Figuur 3.1 Regionale verschillen in droogtetekort: (links) voor 2050 (scenario W+), (rechts) de afgelopen 20 jaar (bron: KNMI)

3.2 Regionale verschillen

3.2.1 Weergegevens

De weergegevens van de KNMI stations (Figuur 3.2) zijn via de website van het KNMI binnengehaald. Door middel van een GIS bewerking zijn er Thiessen-polygonen rond ieder weerstation gemaakt, die representatief geacht worden te zijn voor het gebied waarin deze weerparameters optreden. Gebruikt zijn daggegevens (gemiddelde, minimum en maximum op een dag) over de periode 2008-2015. De volgende weerparameters zijn gebruikt:

- Etmaalgemiddelde temperatuur (TG)
- Maximum temperatuur (TX)
- Minimum temperatuur (TN)
- Hoogste uurgemiddelde windsnelheid (FHX)
- Hoogste windstoot (FXX)
- Etmaalsom van de neerslag (RH)
- Referentiegewasverdamping Makkink (EV24)

Met behulp van de neerslag en referentiegewasverdamping zijn twee droogteparameters berekend. Het neerslagtekort (RD) wordt berekend van 1 april t/m 30 september:

$$RD[n+1] = RD[n] + EV24 - RH$$

waarbij n een teller is voor het aantal dagen vanaf 1 april ($n=0$, $RD(0)=0$). Een positieve waarde geeft een tekort aan een negatieve waarde een overschot. Voor de periode 1 oktober-31 maart is het neerslagtekort gelijk aan nul.

Daarnaast is een andere droogteparameter bepaald die over het gehele jaar berekend kan worden. Het "antecedent precipitation index" (API) wordt berekend met (Gould et al., 2011):

$$API[n+1] = 0.85 * API[n] + RH$$

waarbij n het aantal dagen is. In droge periodes zal de API richting de nul gaan, in natte periodes zal de waarde toenemen.



Figuur 3.2 Ligging KNMI weerstations (bron: KNMI)

3.2.2 Storingsgegevens

De storingsgegevens zijn gekoppeld aan de weerstations. Hiervoor zijn de ruimtelijke coördinaten van de storingen en leidingen (LIS) gebruikt. Naast de ruimtelijke gegevens is de dag van de storing, leidingmateriaal, jaar van aanleg en diameter van belang. Dit is allemaal beschikbaar in USTORE voor 7 waterbedrijven. De storingsgegevens van USTORE zijn aangevuld met storingsgegevens van Vitens (2012-2014). De storingen en leidinggegevens zijn ingelezen in GIS en vervolgens is aan iedere leiding en storing een weerstation gekoppeld (de leiding en storing die binnen de polygoon van het weerstation valt). Mocht een leiding doorkruist worden door de grenzen van een polygoon, dan wordt deze leiding in twee delen geknipt en elk van de twee delen toegekend aan de afzonderlijke weerstations. Daarnaast zijn de storingen en leidinggegevens gekoppeld aan een grondsoort. Als basis hiervoor is de grondsoortenkaart gebruikt (Grondsoortenkaart 2006).

Alleen de storingen op leidingen en verbindingen zijn gebruikt. Dit komt neer op 16 082 storingen over de periode 2009-2014 (niet alle bedrijven hebben over de gehele periode storingen geregistreerd). Vervolgens zijn de storingen veroorzaakt door derden of tijdens de aanleg verwijderd en zijn alleen de materialen AC, GGJ, NG, PVC, PE en ST gebruikt. Hiermee komt het aantal storingen op 12 103. De totale leidinglengte waarvoor deze storingen zijn geregistreerd is 97 667 km (~80% van alle leidingen in Nederland).

De betrouwbaarheid van de analyseresultaten hangt af van de nauwkeurigheid van de storingsgegevens. Aangenomen is dat de gegevens uit USTORE met betrekking tot materiaalsoort, locatie en datum voldoende nauwkeurig zijn voor een betrouwbare analyse. Er loopt momenteel een project over de kwaliteitsborging van USTORE.

3.2.3 Statistische analyse

Voor de statistische analyse wordt een aantal cohorten gedefinieerd. Voor ieder cohort wordt onderzocht wat het effect van klimaat is op de storingsfrequentie. Daarvoor wordt de storingsfrequentie als functie van een weerparameter bepaald. Dit gebeurt door een weerparameter in te delen in een aantal klassen en per klasse de storingsfrequentie te bepalen.

De storingsfrequentie voor een cohort volgt uit het aantal storingen gedeeld door de periode maal de leidinglengte. Voor de bepaling van de storingsfrequentie moet rekening gehouden worden met de verschillende periodes waarover de verschillende bedrijven hebben geregistreerd, en de leidinglengte die relevant is voor elk type cohort. Als er cohorten worden gedefinieerd van een bepaalde weerklasse, wordt er gebruik gemaakt van het aantal storingen, dat optrad op de dagen dat het dat type weer was en als periode het aantal dagen waarop dat type weer optrad. Dit kan verschillen per weerstation. Daarom wordt er voor ieder weerstation bepaald hoeveel storingen (binnen die weerklasse) optraden, hoeveel leidinglengte binnen het gebied van dit weerstation valt en hoeveel dagen dat type weer optrad. Omdat de storingsregistratie per bedrijf kan verschillen, is dit per weerstation ook bepaald voor ieder bedrijf (sommige weerstations bevatten gegevens van meerdere bedrijven). Op basis van gewogen middeling van deze gegevens is de storingsfrequentie bepaald (weging op basis van lengte en aantal dagen). Daarnaast is een 80% onzekerheidsband op de storingsfrequenties bepaald, welke is berekend op basis van het aantal storingen (uitgaande van een Poisson proces, Van Thienen (2012)).

3.2.4 Resultaten

Om een eerste indruk te krijgen van de gebruikte storingsdata, is in Tabel 3.1 t/m Tabel 3.6 het aantal storingen en de storingsfrequentie weergegeven naar leidingmateriaal, aanlegjaar, diameter, weerstation en bodemsoort. De storingsfrequentie is hier berekend als het aantal

storingen per cohort gedeeld door de lengte maal de registratietijd gesommeerd over alle waterbedrijven.

Tabel 3.1 Aantal storingen en storingsfrequentie naar object

Object	Aantal storingen
Buis	12256
Verbinding	3826

Tabel 3.2 Aantal storingen en storingsfrequentie naar leidingmateriaal

Leidingmateriaal	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
AC	6797	0.057
PVC	2124	0.011
GGIJ	1646	0.047
ST	1181	0.136
PE	226	0.009
NG	129	0.008

Tabel 3.3 Aantal storingen en storingsfrequentie naar jaar van aanleg

Aanlegjaar	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
<1900	54	0.013
1900-1950	1391	0.063
1950-1960	3005	0.072
1960-1970	3238	0.039
1970-1980	1654	0.024
1980-2000	920	0.008
2000-2010	438	0.010
>2010	72	0.006
Niet bekend	1331	

Tabel 3.4 Aantal storingen en storingsfrequentie naar leidingdiameter

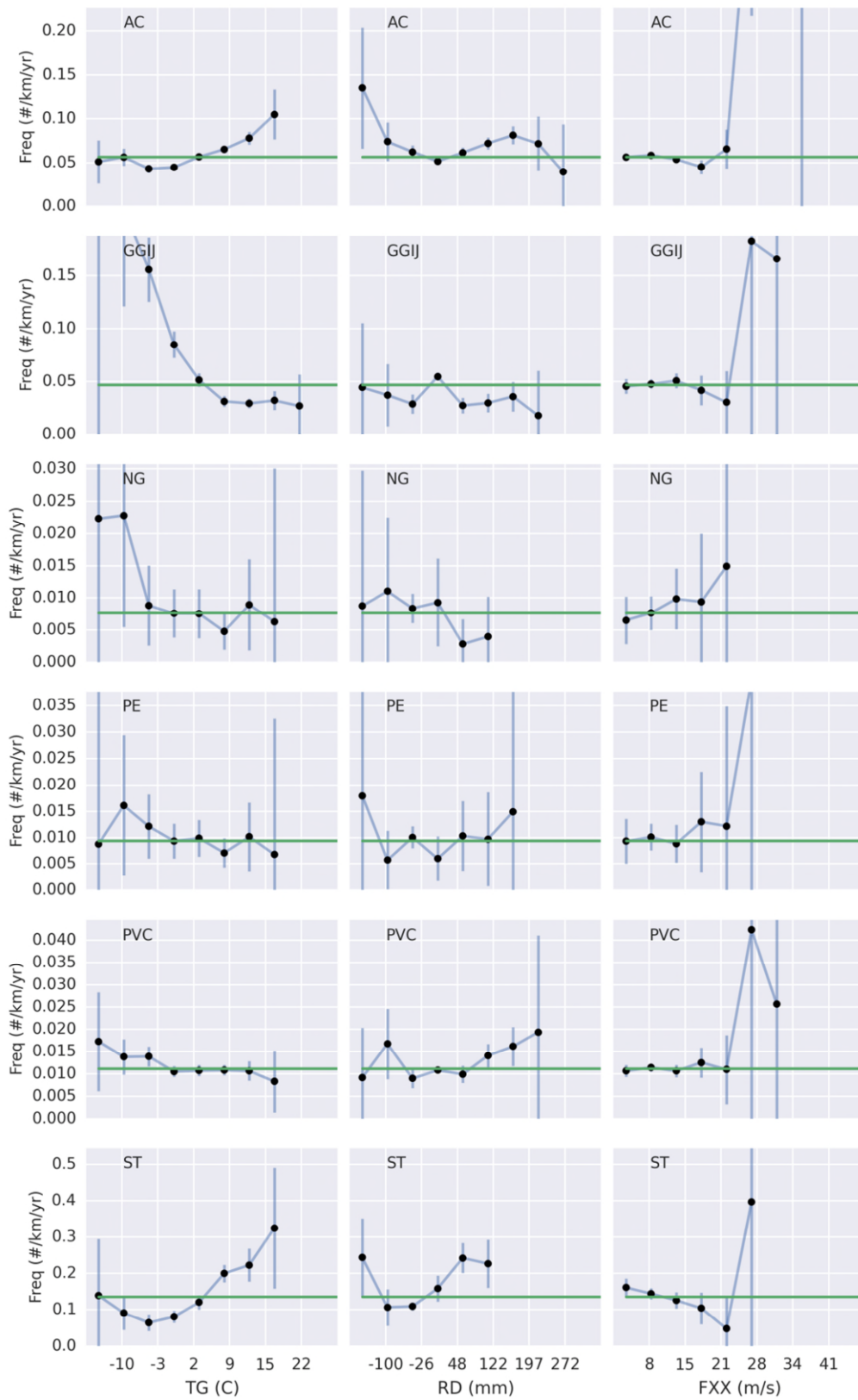
Diameter [mm]	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
0-50	706	0.016
50-80	846	0.022
80-100	5320	0.058
100-150	3194	0.026
150-300	1786	0.026
300-600	204	0.008
600-2000	11	0.002
Niet bekend	36	

Tabel 3.5 Aantal storingen en storingsfrequentie naar weerstation

Weerstation	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
210 (Valkenburg)	412	0.030
235 (De Kooy)	196	0.025
240 (Schiphol)	1102	0.049
242 (Vlieland)	16	0.037
249 (Berkhout)	557	0.032
251 (Hoorn, Terschelling)	5	0.007
257 (Wijk aan Zee)	360	0.025
260 (De Bilt)	506	0.025
267 (Stavoren)	67	0.017
269 (Lelystad)	78	0.009
270 (Leeuwarden)	182	0.019
273 (Marknesse)	301	0.027
275 (Deelen)	511	0.026
277 (Lauwersoog)	124	0.015
278 (Heino)	285	0.018
279 (Hoogeveen)	60	0.019
280 (Eelde)	438	0.022
283 (Hupsel)	328	0.025
286 (Nieuw Beerta)	322	0.028
290 (Twenthe)	163	0.015
330 (Hoek van Holland)	75	0.040
340 (Woensdrecht)	278	0.025
344 (Rotterdam)	238	0.034
348 (Cabauw)	100	0.028
350 (Gilze-Rijen)	569	0.025
356 (Herwijnen)	315	0.027
370 (Eindhoven)	770	0.032
375 (Volkel)	1032	0.039
377 (Eil)	623	0.035
380 (Maastricht)	1529	0.067
391 (Arcen)	561	0.039

Tabel 3.6 Aantal storingen en storingsfrequentie naar bodemsoort

Bodemsoort	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
Bebouwing, enz	6022	0.040
Leem	470	0.052
Lichte klei	399	0.021
Lichte zavel	568	0.025
Moerig op zand	71	0.023
Veen	477	0.037
Water	52	0.027
Zand	3063	0.023
Zware klei	410	0.024
Zware zavel	571	0.023



Figuur 3.3 Storingen voor de verschillende materialen: storingsfrequenties als functie van weerparameters (zwarte punten, blauwe verticale lijnen zijn de onzekerheidsmarges, groene lijn is de gemiddelde storingsfrequentie). Getallen op de x-as zijn afgerond op hele getallen.

De storingsfrequenties zijn uitgezet tegen de drie weerparameters: TG (gemiddelde temperatuur), RD (regentekort) en FXX (maximale windstoot). Dit is gedaan voor de verschillende materiaalsoorten (Figuur 3.3). Daarnaast zijn voor de materialen AC en PVC zijn voldoende storingen beschikbaar om de cohorten verder te specificeren naar diameter, aanlegjaar en bodemsoort. De diameter of het aanlegjaar verandert echter weinig aan het verband tussen weerparameter en storingsfrequentie (hoewel de gemiddelde storingsfrequentie wel verschilt). De resultaten zijn weergegeven in Bijlage I.

Temperatuur

Het effect van temperatuur op storen van leidingen verschilt sterk per leidingtype. Leidingen van AC laten hetzelfde gedrag zien als in eerdere studies (op basis van weergegevens uit alleen De Bilt, Wols en Van Thienen, 2014): toename in storingsfrequentie bij hoge temperaturen. Grijs gietijzeren leidingen laten een omgekeerd gedrag zien t.o.v. AC leidingen: een forse toename in storingsfrequentie bij lage temperaturen. Voor nodulair gietijzeren leidingen lijkt eenzelfde trend op te treden, als is de onzekerheid hier groter vanwege het kleine aantal storingen in dit materiaal. Het is niet goed bekend wat de oorzaak is van de toename in storingen bij lage temperaturen. Te denken valt aan: bevroren grond, ijslenzen, lekkende koppelingen. In de literatuur zien we ook toenames in storingen bij koude winters door vorst (Newport, 1981) en bij grote temperatuur-verschillen tussen winter en zomer (Rajani en Tesfamariam, 2004). Eenzelfde beeld volgt uit een analyse die gedaan is met storingsdata uit Canada (hoofdstuk 5). Storingen in de materialen PVC en PE lijken niet of nauwelijks beïnvloed te worden door temperatuur (een kleine toename bij lage temperaturen is mogelijk). De stalen leidingen laten ook een toename zien bij hoge temperaturen en in mindere mate bij lage temperaturen. Voor AC leidingen met kleine diameters lijkt het effect van hoge temperatuur iets sterker dan voor AC leidingen met grotere diameter (Bijlage I).

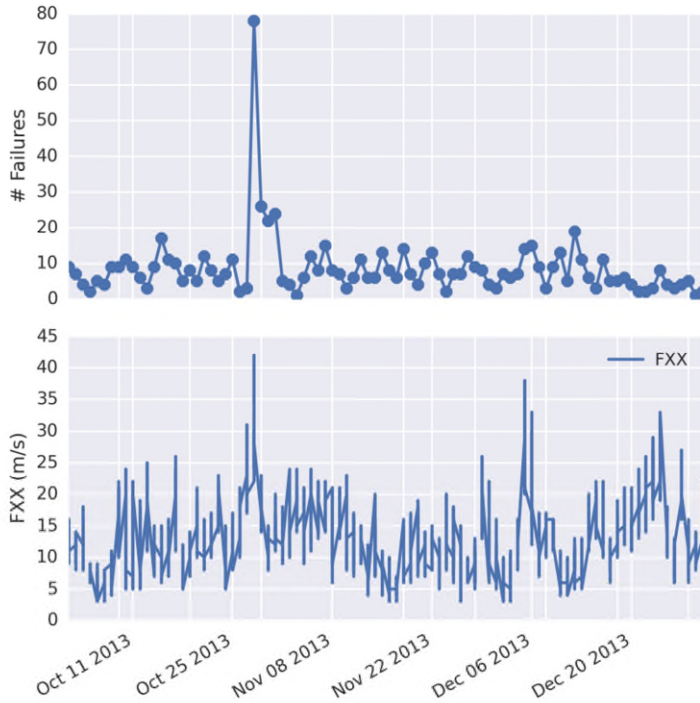
Wind

Wind heeft een duidelijk effect: alle materialen lijken bij de hoogste windsnelheden een veel hogere storingsfrequentie te hebben. Dit was eerder nog niet gevonden, omdat er in de periode (2009-2012) waarvoor de vorige analyse is uitgevoerd, weinig zware stormen waren. Bovendien kan de zwaarte van de storm regionaal verschillen. Met twee zware stormen (windkracht 10 of hoger) in 2013 (28 oktober, windkracht 11 en 5 december, windkracht 10) lijkt dit effect nu wel op te treden. De leidingen gaan waarschijnlijk kapot door omvallende bomen, waarvan de wortels de leiding meesleuren. Dit blijkt ook uit de registratie van de oorzaak in USTORE, want voor 90% van de storingen tijdens de storm van 28 oktober 2013 is als oorzaak bomen opgegeven, wat normaal 20% is. Voor het omvallen van bomen moet de storm zwaar genoeg zijn, wat verklaart waarom het effect van wind eerder niet gevonden is. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3.4, waar op de dag van de storm van 28 oktober er 80 storingen op een dag zijn (tegen een gemiddelde van zo'n 10 per dag), en ook de drie dagen erna er meer dan 20 storingen zijn. De storm van 5 december, die wat minder zwaar was, leidt echter niet tot een toename in storingen. Daarnaast viel deze storm later in het seizoen, waardoor er minder bladeren aan de bomen hingen en er mede daardoor minder bomen omgevallen zijn. De ruimtelijke verdelingen van de storingen tijdens de storm van 28 oktober 2013 is weergegeven in Figuur 3.5. De storingsfrequentie neemt op sommige plaatsen met meer dan een factor 20 toe. Met name in het noorden en het westen van het land is het aantal storingen sterk verhoogd, waar ook de hoogste windsnelheden voorkwamen. In het zuidoosten is de toename veel kleiner (een factor 2 tot 4).

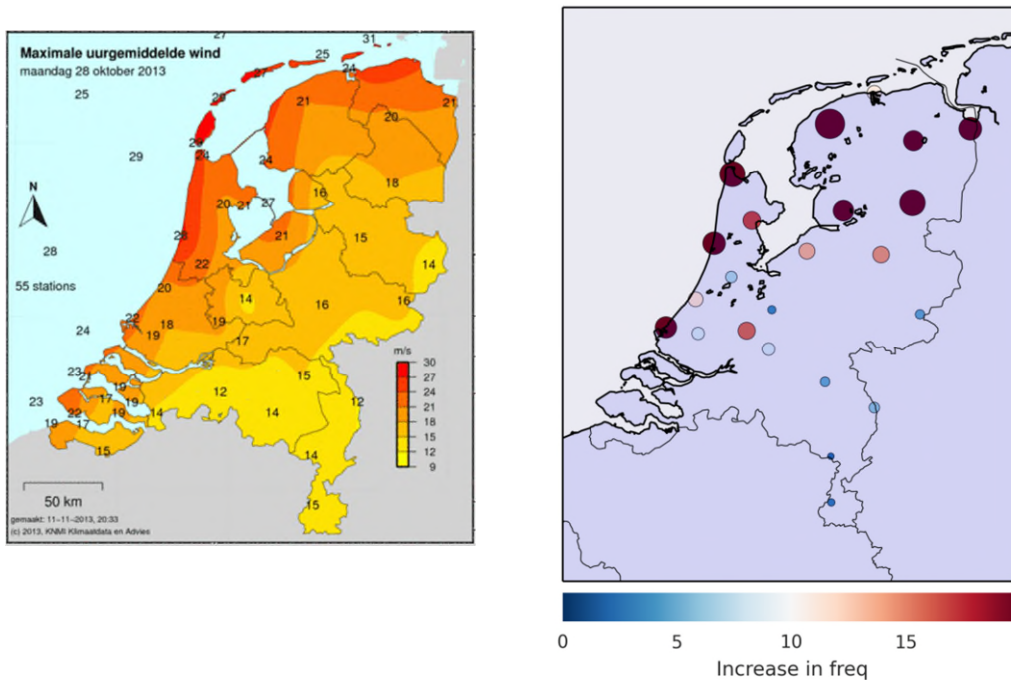
Droogte

Er lijkt ook een effect van droogte te zien, al is de onzekerheid wel groot: toename in storingen bij toename in regentekort, met name bij PVC en staal. Hier lijkt een effect te zijn

van bodemsoort op droogte: zowel voor AC als bij PVC (met grotere onzekerheid) leidingen neemt de storingsfrequentie toe bij toenemend regentekort in klei- en veenbodems (Bijlage I)

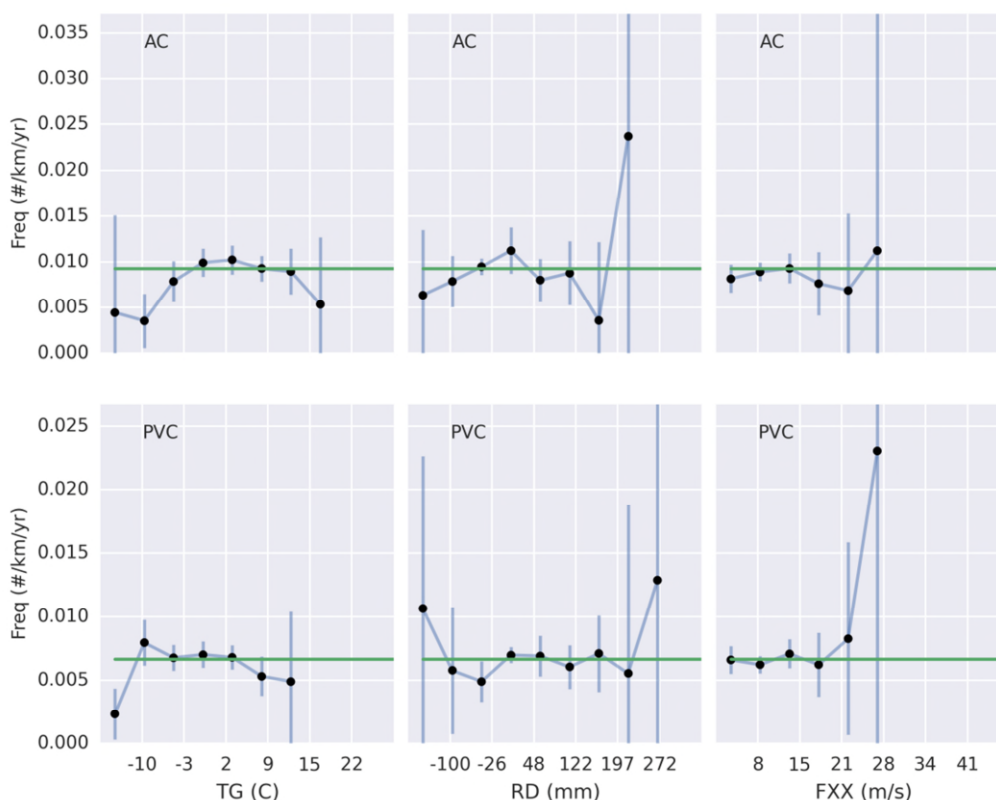


Figuur 3.4 Verloop van het aantal storings en maximale windsnelheid in het najaar van 2013. Op 28 oktober en 5 december kwamen twee zware stormen voor (respectievelijk windkracht 11 en 10).



Figuur 3.5 Gevolgen van de storm van 28 oktober 2013 op leidingbreuken. Links: windsnelheid (bron KNMI), rechts: toename in storingsfrequentie per weerstation op 28-30 oktober 2013.

Daarnaast is er een analyse uitgevoerd naar storingen veroorzaakt door derden. Dit zijn storingen die bijvoorbeeld optreden tijdens bouwwerkzaamheden, en door het waterbedrijf worden aangemerkt als oorzaak derden. Het aantal storingen door derden is vooral hoog bij PVC en PE (1/3 van alle storingen). Dit komt mede door de lage storingsfrequenties van deze materialen. Bij gietijzer (zowel nodulair als grijs) is dit relatief veel minder, waarschijnlijk omdat dit materiaal vanwege de hogere sterkte minder gevoelig is voor beschadigingen door derden. Bij AC treden er veel storingen op door derden (ongeveer 1/7 van het totaal aantal storingen) en is daarom een factor om rekening mee te houden. Daarom zijn voor AC en PVC de storingen van derden uitgezet tegen de weerparameters (Figuur 3.6). Hier lijken de storingsfrequenties juist iets af te nemen bij extreme temperatuur (vorst of hitte), waarschijnlijk omdat er dan minder werkzaamheden zijn. AC verbindingen zijn gevoelig voor groundbewegingen en daarmee voor graafschade. Voor de andere weerparameters (droogte, wind) zijn er een paar uitschieters, maar de onzekerheden zijn te groot om hier conclusies aan te verbinden.

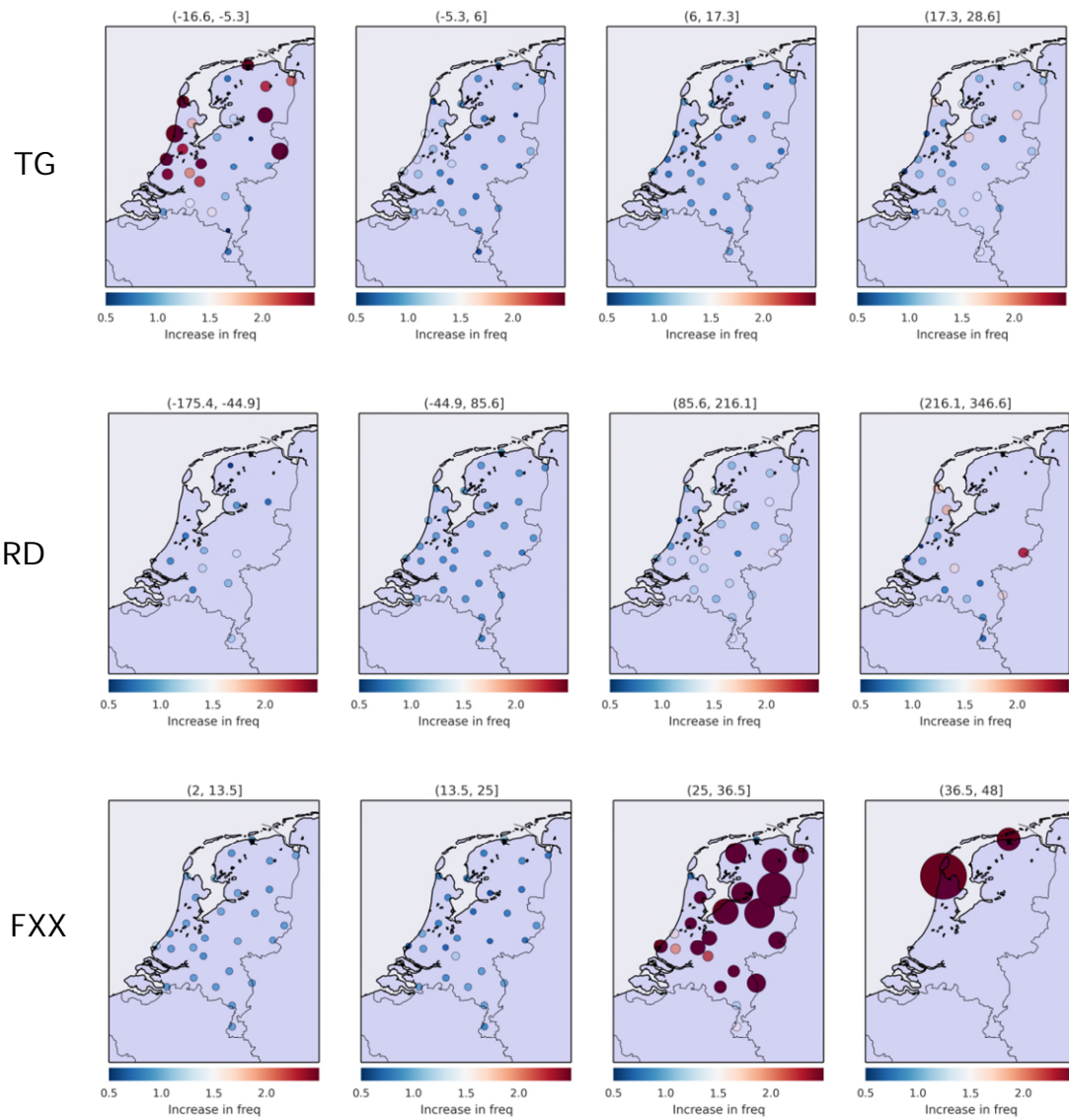


Figuur 3.6 Storingen veroorzaakt door derden: storingsfrequenties als functie van weerparameters voor AC en PVC leidingen (zwarte punten, blauwe verticale lijnen zijn de onzekerheidsmarges, groene lijn is de gemiddelde storingsfrequentie). Getallen op de x-as zijn afgerond op hele getallen.

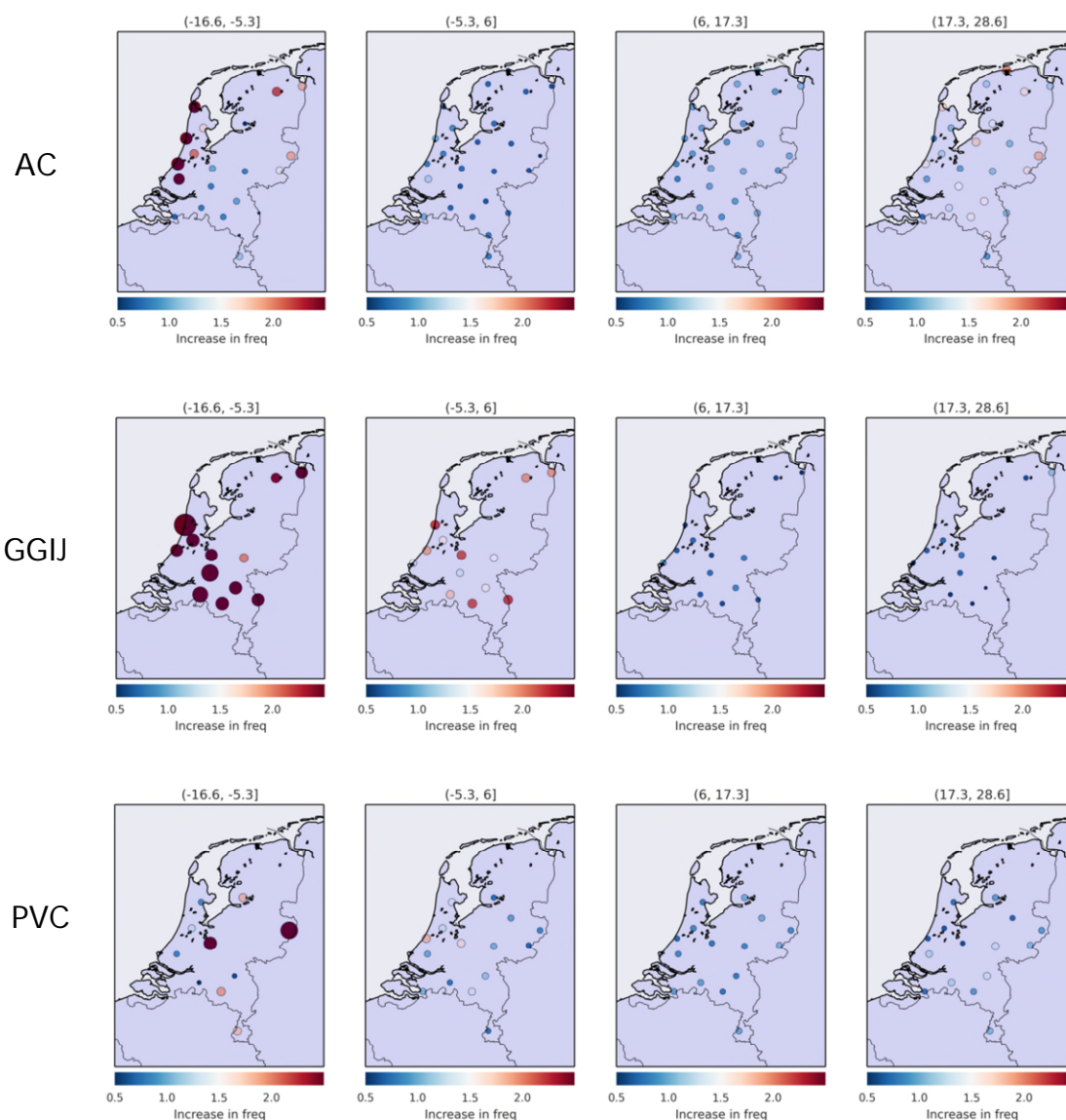
Een volgende stap in de analyse is om de ruimtelijke verschillen per weerparameter te onderzoeken. De ruimtelijke verdeling van de KNMI weerstations over Nederland is hierbij gevolgd. De drie weerparameters temperatuur, regentekort en windsnelheid zijn elk in 4 klassen onderverdeeld. Het aantal klassen is kleiner gekozen om meer storingen over te houden per weerstation. Met name bij de laagste en hoogste klassen is het aantal storingen

per weerstation relatief laag, omdat deze weersituatie niet zo vaak voorkomt. Enige voorzichtigheid is daarom geboden bij de interpretatie van deze resultaten. Maar deze situaties zijn juist interessant omdat deze een beeld geven wat er regionaal kan gebeuren bij meer extreme weersomstandigheden.

De regionale verschillen in storingsfrequentie bij verschillende weerstoestanden zijn weergegeven in Figuur 3.7. Voor ieder KNMI weerstation is per weerklasse een storingsfrequentie bepaald en de toename of afname ten opzichte van het gemiddelde berekend. Bij de lage en hoge temperaturen zijn er duidelijke ruimtelijke verschillen waarneembaar (het aantal dagen dat een temperatuurklasse optreedt kan verschillen per regio – hier is rekening mee gehouden in de bepaling van de storingsfrequentie per regio). De toename in storingsfrequentie bij lage temperaturen treedt met name op in het westen en noordoosten. Het noordoosten is te verklaren door de strengere winters die hier kunnen optreden. De toename in het westen is echter opvallend, dit heeft mogelijk te maken met de grondsoort of dat in het westen meer dooi-vries combinaties optreden. Bij de hogere temperaturen is overal een kleine toename van de storingsfrequentie waarneembaar. In het oosten lijken de verschillen wat groter, mogelijk omdat hier hogere temperaturen optreden. Droogte heeft ook een effect: bij het grootste regentekort is er op een aantal locaties een toename te zien van de storingsfrequentie. Dit heeft mogelijk te maken met zettingen van de grond bij droogte (Hoofdstuk 3.3) of een groter waterverbruik (Hoofdstuk 4). Het effect van wind komt hier ook duidelijk naar voren: een sterke toename in storingsfrequentie bij de hoge windsnelheden. Dit effect is sterker in het noorden van het land.

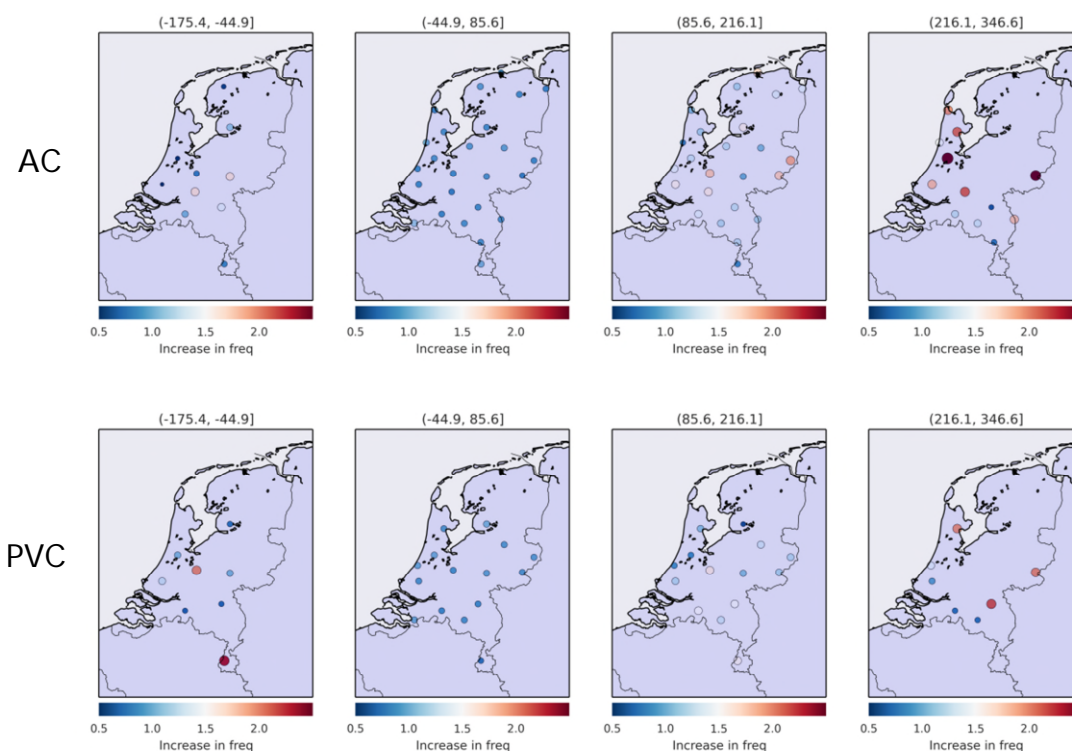


Figuur 3.7 Ruimtelijke verdeling van de toename in storingsfrequentie van alle leidingen en verbindingen als gevolg van temperaturen (boven), regentekort (midden) en max. windsnelheid (onder). De punten geven de toename in storingsfrequentie weer ten opzichte van de gemiddelde storingsfrequentie voor ieder KNMI weerstation. De grootte en de kleur van de punt geeft de toename in storingsfrequentie aan.



Figuur 3.8 Ruimtelijke weergave van de toename in storingsfrequentie bij verschillende temperaturen (gemiddelde dagtemperatuur in $\pm 7^{\circ}\text{C}$ voor de materialen AC (boven), GGJ (midden) en PVC (onder).

Vervolgens is een onderverdeling naar materiaaltype gemaakt. Voor de materialen AC, GGJ en PVC is per temperatuurklasse de toename in storingsfrequentie gegeven (Figuur 3.8). Opvallend is dat AC bij de lagere temperaturen wel meer storting in het westen van het land, terwijl gemiddeld over het hele land er geen hogere storingsfrequentie waarneembaar was voor AC bij lage temperaturen. Bij de hogere temperaturen laat AC verspreid over het land hogere storingsfrequenties zien. Voor grijs gietijzer is de hogere storingsfrequentie bij lagere temperaturen overal waarneembaar (niet op alle locaties zijn storings geregistreerd, omdat hier weinig grijs gietijzer ligt). Voor PVC zijn er op een aantal locaties meer storings waarneembaar bij lage temperaturen, met name in het oosten van het land.



Figuur 3.9 Ruimtelijke weergave van de toename in storingsfrequentie bij verschillende neerslagtekorten (mm) voor de materialen AC (boven) en PVC (onder).

Het effect van neerslagtekort op de storing is ruimtelijk weergegeven in Figuur 3.9. Voor zowel AC als PVC zijn er op een aantal locaties hogere storingsfrequenties waarneembaar bij een groot neerslagtekort. Dit treedt met name op in het midden en noordwesten van het land.

3.2.5 Multicriteria-analyse

In een multicriteria-analyse wordt de invloed op de storingsfrequentie van een aantal parameters gezamenlijk beschouwd. Hiervoor zijn de parameters materiaalsoort, diameter, aanlegjaar, bodemsoort en temperatuur meegenomen. Aan de hand van statistische modellen wordt de storingsfrequentie voorspeld met deze parameters. De weerparameter temperatuur is gekozen omdat deze de grootste invloed heeft. Parameters met geen numerieke waarde, zoals bodemsoort of materiaalsoort, hebben een waarde gekregen afhankelijk van hun soort (een zogenaamde categorische variabele: dit is een variabele die een discreet aantal waardes kan aannemen die corresponderen met een bepaalde categorie).

Alleen de storingen op de leidingen zijn meegenomen, omdat dit tot betere voorspellingen leidde dan een analyse met storingen op zowel leidingen als verbindingen. Elke parameter is onderverdeeld in een aantal klassen (indeling gekozen op een redelijk gelijkmatige verdeling van storingen, buiten de minimum en maximumwaarde van de klassen om): materiaal per materiaalsoort, diameterklassen van 0-40, 40-80, 80-150, 150-200, 200-300, 300-600, >600 mm, aanlegjaarclassen van <1900, 1900-1940, 1940-1960, 1960-1970, 1970-1980, 1980-2000, >2000, klassen van de grondsoorten veen, klei, zand en bebouwing, en 6 temperatuurklassen (evenredig verdeeld tussen de -3 en 22 graden C). Vervolgens zijn voor alle combinaties van deze klassen de storingsfrequenties bepaald. Dit resulteert in 735 klassen waarvoor totaal 7832 storingen zijn geregistreerd. Alleen de klassen met 4 of meer

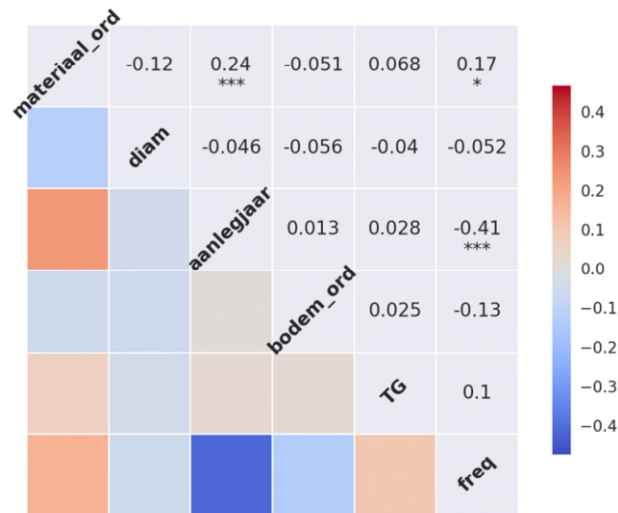
storingen zijn gebruikt, omdat anders de onzekerheid op de berekende storingsfrequentie per klasse erg groot wordt. Hiermee wordt het totaal aantal klassen gereduceerd tot 311 met in totaal 7123 storingen. Voor diameter, aanlegjaar en temperatuur is ook de gemiddelde waarde in iedere klasse berekend, welke meegenomen zijn als verklarende variabelen in de multicriteria-analyse. Vervolgens zijn deze klassen gesplitst in een trainingset en een validatieset (testset), zodat de voorspellende waarde van het model getest kan worden met een onafhankelijke dataset. De splitsing gebeurt willekeurig waarbij de validatieset 20% van de data bevat.

Een aantal lineaire en niet-lineaire statistische technieken is met elkaar vergeleken. Lineaire technieken zoeken naar een lineair verband tussen de storingsfrequentie en verklarende variabelen, terwijl de niet-lineaire technieken naar niet-lineaire verbanden zoeken. Als lineaire techniek is lineaire regressie (ols) gebruikt. Als niet-lineaire technieken zijn gebruikt: random forest (rf), ada boost regression (ada), extra trees regression (etr) en gradient booster regression (gbr). Deze technieken maken gebruik van beslisbomen om verbanden te zoeken tussen de verklarende variabelen en de storingsfrequentie.

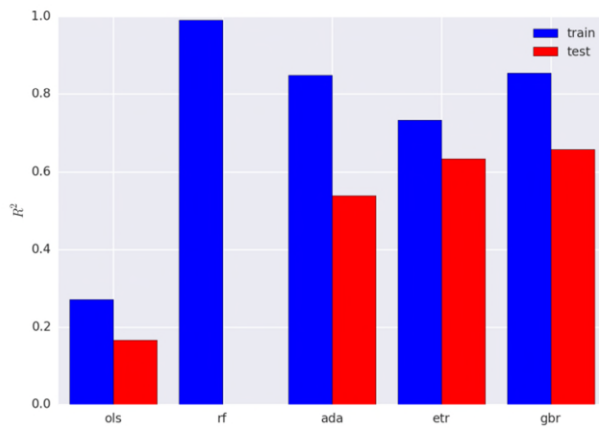
Omdat de prestaties van het statistisch model kunnen afhangen van de splitsing van de dataset is de training en validatie met elk statistisch model 100 keer herhaald, zodat een betrouwbaar beeld wordt gekregen van de prestatie van het model.

De onderlinge (lineaire) correlaties tussen de parameters zijn weergegeven in Figuur 3.10. Hier heeft met name het aanlegjaar een sterk verband met de storingsfrequentie. De prestaties van de verschillende statistische technieken zijn weergegeven in Figuur 3.11. De lineaire techniek kan de storingsdata niet goed verklaren en voorspellen. De niet-lineaire technieken doen het beter. De rf methode geeft een perfecte voorspelling van de trainingsdata. Echter, hier is sprake van "overfitting", want de validatiedata wordt niet goed voorspeld. De andere niet-lineaire technieken geven wel een goede voorspelling van de validatiedata ($R^2 > 0.6$). De gbr methode geeft de beste voorspelling, zodat de uitkomsten van deze techniek nader onderzocht zijn.

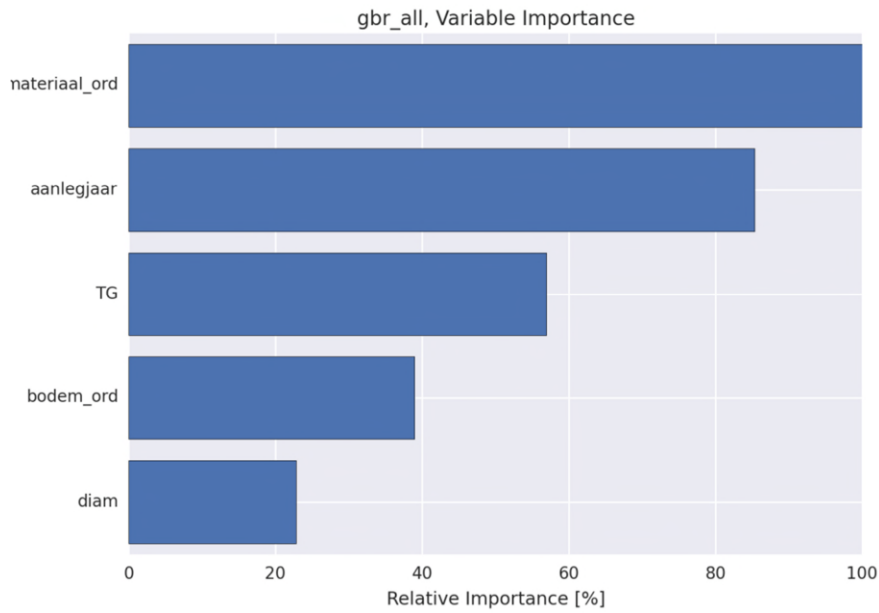
De invloed van elke variabele op de voorspelling van de storingsfrequentie voor de gbr techniek is weergegeven in Figuur 3.12. Hieruit blijkt dat materiaalsoort de grootste invloed heeft, gevolgd door aanlegjaar. Deze variabelen zijn niet onafhankelijk, maar hebben wel een andere invloed in het model. Temperatuur heeft ook een belangrijke invloed, belangrijker dan bodemsoort of diameter. Per variabele is vervolgens onderzocht hoe de waarden van deze variabele de storingsfrequentie beïnvloeden (Figuur 3.13). Voor het aanlegjaar is er duidelijk een toename te zien in storingsfrequentie bij leidingen met aanlegjaar voor 1950, en een lichte toename rond de jaren '80. Bij materiaalsoort geven de stalen leidingen een grotere storingsfrequentie, terwijl de kunststof en nodulair gietijzeren leidingen lage waarden geven. Bij temperatuur valt duidelijk de hogere frequentie bij vorst te zien en de toename bij hogere temperaturen. Qua grondsoort lijken de leidingen in klei en veen iets gevoeliger te zijn voor storingen.



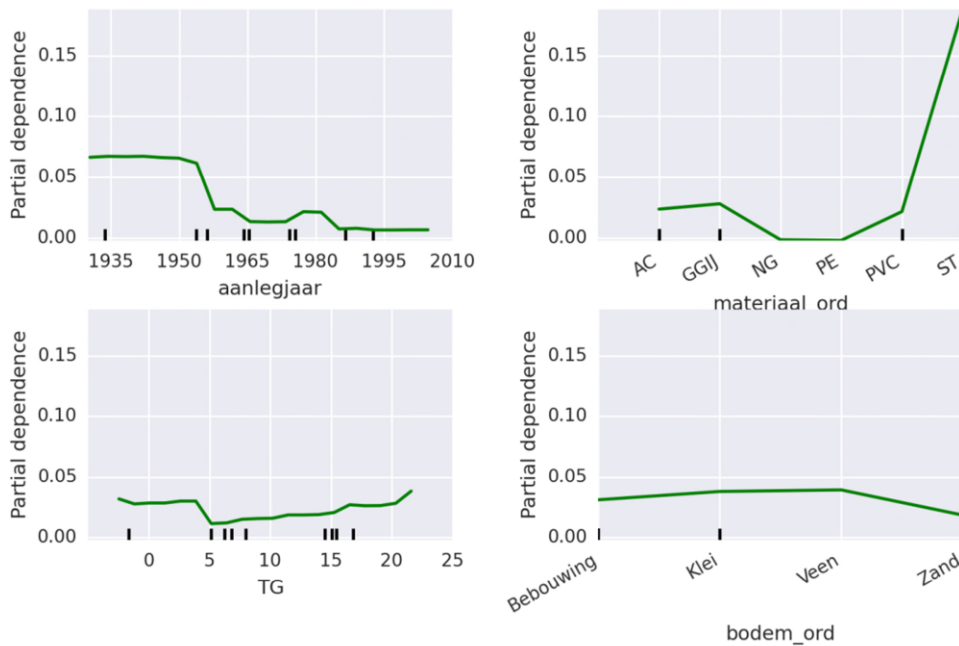
Figuur 3.10 Correlaties tussen de verschillende parameters: materiaal_ord = leidingmateriaal (numeriek), diam=diameter, bodem_ord = bodemsoort (numeriek), TG=gemiddelde dagtemperatuur, freq=storingsfrequentie.



Figuur 3.11 Overzicht van de “goodness-of-fit”, gemiddelde van 100 herhalingen, (R²) van verschillende datamining technieken om storingsfrequenties te voorspellen: ordinary least-squares (ols), random forest (rf), ada boost regression (ada), extra trees regression (etr) en gradient booster regression (gbr). De blauwe balken geven de resultaten van de training, de rode van een validatie (met andere data).



Figuur 3.12 Relatieve invloed van de verschillende parameters op de modelvoorspelling.



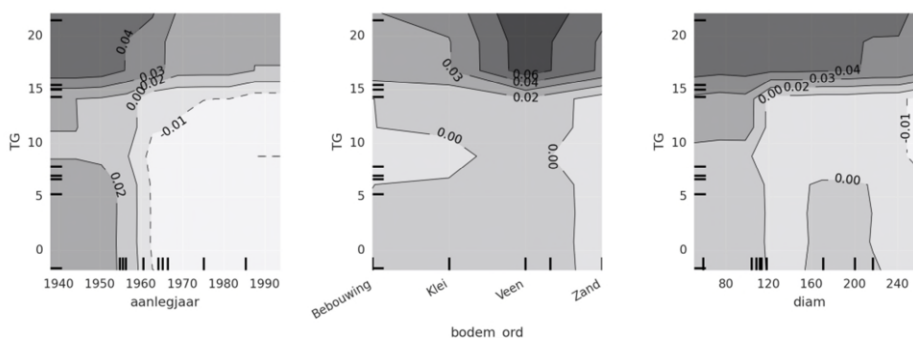
Figuur 3.13 Relatieve afhankelijkheid van iedere parameter op de storingsfrequentie.

Daarnaast is de regressieanalyse uitgevoerd voor alleen de AC buizen en alleen de PVC buizen. Voor de trainingset kunnen goede correlaties gehaald worden, de voorspellende waarde is hier echter klein (Tabel 3.7). De analyse kan wel inzicht geven in de verklarende factoren voor de storingen van deze buizen.

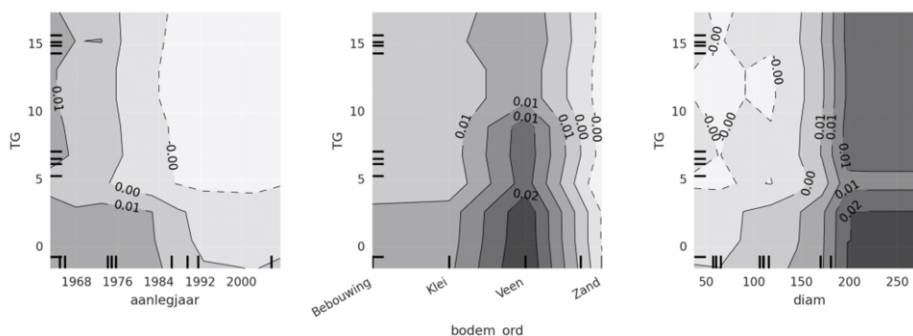
Tabel 3.7 Resultaten van de multicriteria-analyse (gbr methode) voor AC of PVC buizen.

	R2 (train)	R2 (test)
Alleen AC buizen	0.75	0.2
Alleen PVC buizen	0.7	0.1

De invloed van twee verklarende variabelen op de storingsfrequentie zijn weergegeven in Figuur 3.14 voor AC en Figuur 3.15 voor PVC. Hierin is de gemiddelde temperatuur (TG) gecombineerd met aanlegjaar, bodemtype of diameter. Als de grijs tint donkerder is, is de invloed en storingsfrequentie groter. Enige voorzichtigheid is wel geboden bij de interpretatie van deze resultaten, omdat het aantal storings per gebied in het figuur laag kan zijn en daarmee de onzekerheid groot. Toch zijn er wel enkele trends zichtbaar: zo valt te zien dat voor AC leidingen de oude leidingen met de hoogste temperaturen de meeste storings geven. Ook lijken bij AC de veengronden met hoge temperaturen gevoelig voor storings net zoals de kleine diameters. Bij PVC is de gevoeligheid voor temperatuur veel kleiner, zoals eerder al aangetoond was. In deze analyse is wel een lichte gevoeligheid bij lagere temperaturen waarneembaar, met name voor oudere leidingen, veengronden en de grotere diameters.



Figuur 3.14 Relatieve afhankelijkheid in 2D van twee parameters op de storingsfrequentie voor het materiaal AC.



Figuur 3.15 Relatieve afhankelijkheid in 2D van twee parameters op de storingsfrequentie voor het materiaal PVC.

3.3 Lokale zettingsverschillen a.h.v. Remote Sensing (RS)

Uit de statistische analyse van storingsdata volgt dat droogte een rol speelt. Als het neerslagtekort in de regio toeneemt, lijkt het aantal storingen ook toe te nemen. In de literatuur zijn verbanden gevonden met storingen en warme en droge zomers, gerelateerd aan zettingen (Newport, 1981; Kleiner en Rajani, 2002, Hu en Hubble, 2007, Gould et al. 2011). Deze effecten zijn sterker in meer expansieve bodems (Hu en Hubble, 2007, Gould et al., 2011). Het verband tussen zettingen en storingen is hier nader onderzocht voor een klein gebied, waarvoor zettingsdata beschikbaar is.

3.3.1 Overzicht bronnen RS satellietdata

Een aantal technologische en maatschappelijke ontwikkelingen leidt ertoe dat remote sensing (RS) beelden meer worden toegepast. Naast de meer 'standaard' afgeleide producten zoals Landgebruikskaarten (LGN) met een lage resolutie (30 meter) komen door een sterke toename van het aantal satellieten en beschikbare sensoren meer hoge-resolutie-toepassingen beschikbaar. Er bestaan zowel passieve sensoren voor zichtbaar licht en Infrarood, als actieve sensoren voor bijvoorbeeld radar en laser. Een ook voor waterbedrijven zeer veelbelovende toepassing betreft de radar-interferometrie (INSAR) die door SkyGEO wordt verwerkt tot kaarten met bodemzettingen en deformaties met een relatieve nauwkeurigheid van enkele mm in de verticale richting (Hanssen, 2001). Deze techniek wordt uitvoeriger beschreven in Bijlage II.

De overheid stimuleert sinds 2013 het ontwikkelen van toepassingen door het inkopen en vrijgeven van satellietdata (<http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportaal/>). Dit initiatief dient als voorbereiding op het Europese Sentinel programma waarbij vanaf 2016 meer en gedetailleerdere beelden vrijkomen, met een grondresolutie van ongeveer 10 tot 20 meter. De vrijgegeven beelden zijn meestal 'ruw' en dienen nog een aantal bewerkingsschappen door te maken voordat ze, bijvoorbeeld in een GIS, verder kunnen worden gebruikt. Het gaat daarbij om radiometrische, geometrische en atmosferische correcties. Een aantal beelden wordt al wel kant en klaar voor verwerking in GIS aangeboden. De verwachting is dat dit aanbod de komende jaren sterk zal toenemen, mede omdat gespecialiseerde bedrijven deze diensten op de markt gaan brengen.

Een actueel overzicht van satellieten wordt bijgehouden door het ITC/Universiteit Twente in Enschede (<https://www.itc.nl/research/products/sensordb/AllSatellites.aspx>). Momenteel zijn er 228 satellieten opgenomen in de ITC database, een aantal daarvan zijn niet meer functioneel. Ook kan in de database worden gezocht naar specifieke sensoren zoals radar of infrarood.

Naast satellieten en bemande vliegtuigen gaan onbemande vliegtuigen ook steeds meer gebruikt worden als platform voor sensoren en camera's. Dit wordt bijvoorbeeld in de civiele techniek al gebruikt voor inspecties van infrastructuur en installaties. Binnen enkele jaren worden ook toepassingsmogelijkheden voor de ondergrond verwacht. Meer details zijn te vinden in Bijlage II.

Het verkrijgen van gedetailleerde gegevens over bodem(vocht)condities is op het moment beperkt mogelijk via Remote Sensing. Zeker in stedelijk gebied geldt dat een hoge spatiale en temporele resolutie van beelden nodig is om tot bruikbare toepassingen te komen. Volgens het ITC is er in stedelijk gebied zeer veel heterogeniteit en ruis in de beelden waardoor er geen betrouwbare analyse mee mogelijk is (Prof. Jetten, pers. comm. april 2014). De snelle ontwikkelingen op het gebied van civiele drones (zie paragraaf 0) brengen

hier mogelijk verandering in, vooralsnog is het echter nog niet toegestaan deze in stedelijk gebied in te zetten. Deze gedetailleerde gegevens zullen dus via terrestrische metingen moeten worden verkregen, bijvoorbeeld uit gemeentelijke meetnetten van peilbuizen.

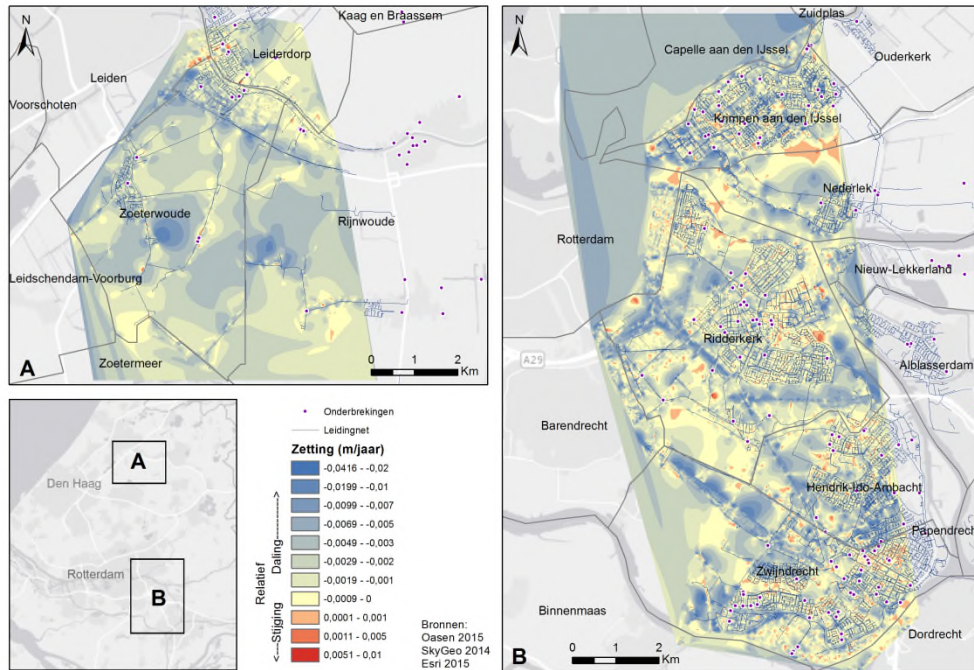
3.3.2 Resultaten zettingen InSAR data Oasen

Uit eerder onderzoek van Oasen en SkyGeo is gebleken dat er mogelijk een verband bestaat tussen zettingen en storingen (den Besten, 2014). Deze zettingsgegevens zijn in combinatie met storingsgegevens over een langere periode gebruikt om de correlaties tussen zettingen en storingen nader te onderzoeken.

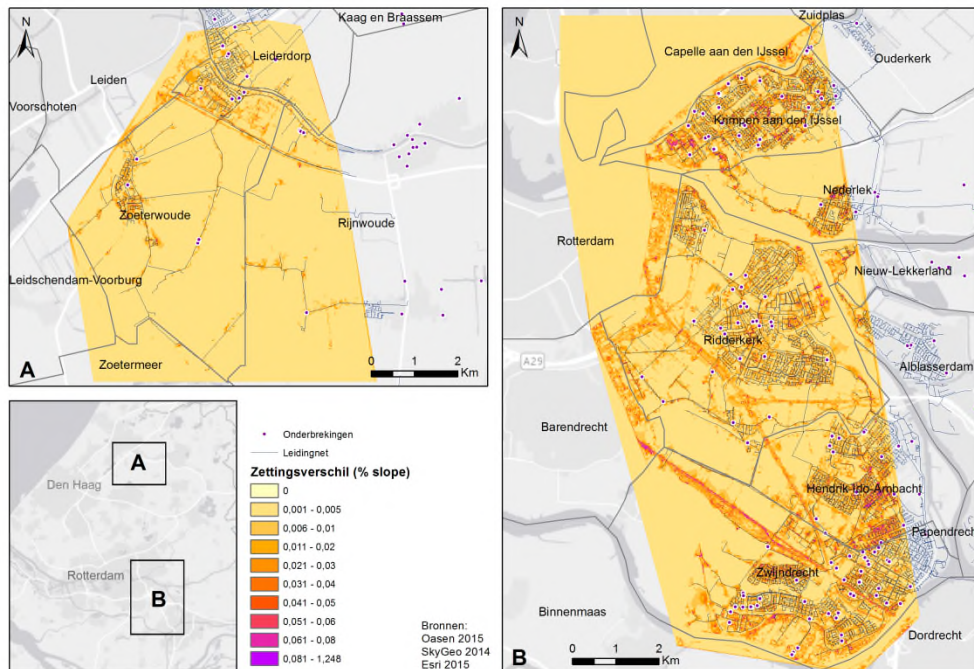
Voor een proefgebied zijn door Oasen en SkyGeo de volgende gegevens beschikbaar gesteld:

- Het leidingnet van Oasen. Hiervoor zijn de leidingen geselecteerd die binnen het gebied liggen, waarvoor de satellietdata beschikbaar is.
- Storingsgegevens (over de periode 2011-2015). Hier zijn de storingen geselecteerd die binnen 2m van een leiding uit het leidingnet liggen (in het gebied waarvoor satellietdata beschikbaar is), resulterend in 128 storingen.
- Zettingen (over de periode 2009-2014), voorbereid door SkyGeo en Oasen. Alleen de punten zijn gebruikt die op het maaiveld liggen. De vaste punten die op hoogte liggen (zoals gebouwen e.d.) zijn er met behulp van AHN2 (Actueel Hoogtebestand Nederland) uitgefilterd.

In ArcGIS 10.1 zijn de zettingen met behulp van de Natural Neighbor methode (zie ook paragraaf 0) geïnterpoleerd naar een gebiedsdekkend raster met een resolutie van 1x1 meter. Hiermee is op elk punt in het proefgebied een waarde voor de zetting (in m/jaar) te bepalen. Om de mogelijke relatie met leidingen en storingen te onderzoeken is het van belang vooral te kijken naar zettingsverschillen. Daarom is tevens bepaald wat de maximale helling is tussen de geïnterpoleerde waarden. Deze helling wordt uitgedrukt in een percentage. Een resultaat van 0,1% geeft aan dat er per strekkende meter 1 millimeter verschil is in zetting per jaar. Zie Figuur 3.16 en Figuur 3.17 voor het resultaat.



Figuur 3.16 Geïnterpoleerde zettingsdata (SkyGeo) gecombineerd met het leidingnet en onderbrekingen (data gebruikt van Oasen)



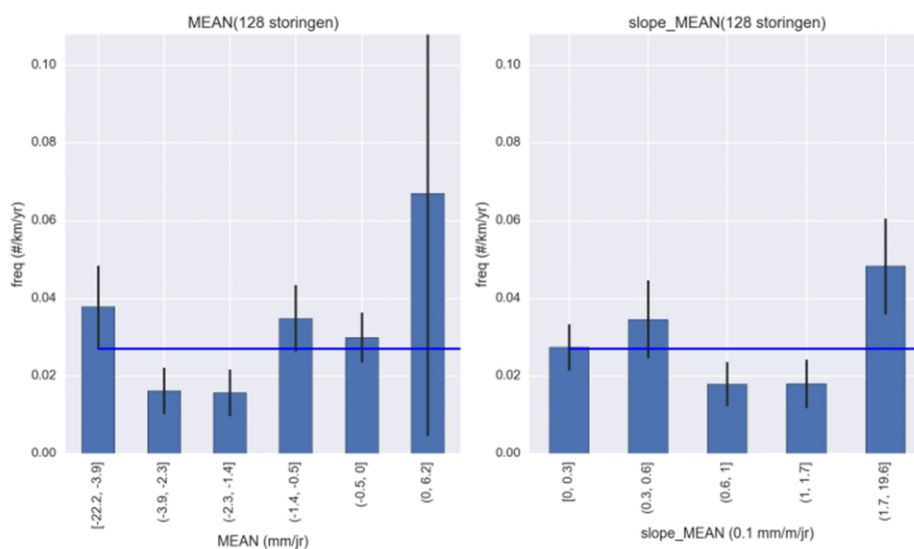
Figuur 3.17 Afgeleide zettingsverschillen (% helling) gecombineerd met het leidingnet en onderbrekingen (data gebruikt van Oasen)

De vlakdata met zettingen en zettingsverschillen is vervolgens gekoppeld aan de individuele leidingen. Hiervoor zijn twee zettingsparameters beschouwd:

- De gemiddelde waarde van de zetting langs de leiding (MEAN)
- De gemiddelde waarde van het zettingsverschil over de leiding (slope_MEAN)

Voor deze zettingsparameters is een aantal cohorten gedefinieerd. Voor ieder cohort is vervolgens de storingsfrequentie bepaald door het aantal storingen in het cohort te delen door het totaal aantal km leiding in het cohort en de periode van de storingsregistratie. De resultaten voor alle leidingen zijn weergegeven in Figuur 3.18. Hierin zijn een aantal verbanden met zettingen zichtbaar. Merk op dat voor de gemiddelde zetting een negatieve waarde duidt op zetting en een positieve waarde op een bodemstijging. Voor de gemiddelde zetting treedt bij de meest negatieve waarden (zakkingen) een hogere storingsfrequentie op, maar ook bij de positieve waarden (stijging), hoewel de onzekerheid hier groot is. Daarnaast lijken de storingsfrequenties bij lagere zettingswaarden iets hoger te zijn dan bij de iets hogere zettingswaarden. Dit heeft mogelijk te maken met het feit dat de zettingsdata relatief zijn. Wellicht dat het hele gebied een bepaalde zetting ondergaat. Kijkend naar zettingsverschillen, lijkt er een toename te zien bij de grootste zettingsverschillen.

Leidingmateriaal en leeftijd zullen ook een invloed hebben op het verband tussen zettingen en storingen, hiervoor was echter te weinig storingsdata beschikbaar voor een statistisch betrouwbare analyse.



Figuur 3.18 De storingsfrequentie voor verschillende cohorten op basis van gemiddelde zetting langs de leiding (MEAN) of gemiddelde zettingsverschil langs de leiding (slope_MEAN).

4 Effect van verbruikspieken

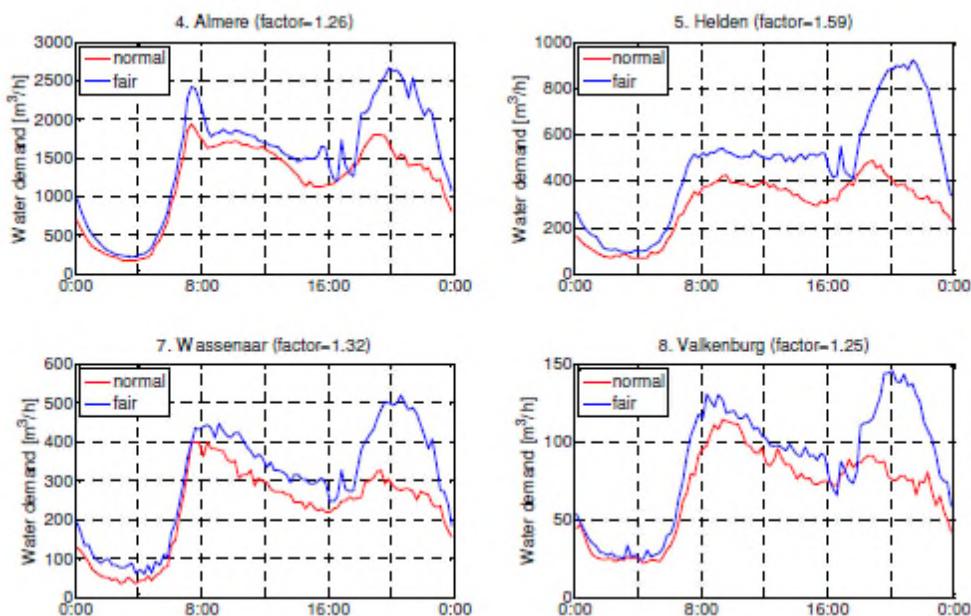
4.1 Inleiding

Uit de analyses van Hoofdstuk 3 blijkt dat bepaalde leidingmaterialen meer storen bij hogere temperaturen. Hier zit mogelijk een verband met verbruik: bij hoge temperaturen veranderen de verbruikspatronen en daarmee de drukken in het leidingnet. Deze verbruikspieken leiden zo mogelijk tot storingen. Door klimaatverandering kunnen deze verbruikspieken toenemen. Om dit te onderzoeken stellen we de volgende vragen:

- Hoe beïnvloedt het weer de watervraag en het piekverbruik?
- Wanneer op de dag zijn de verbruikstoenames veroorzaakt door het weer het grootst?
- Wat is de invloed van het voorzieningsgebied (stedelijk, landelijk, etc.) op het (piek)verbruik?
- Hoe beïnvloedt een verbruikstoename de druk en spanning in en mogelijk falen van leidingen?

4.2 Invloed van het weer op totale watervraag en piekverbruik

Op basis van regressietechnieken en verbruikssimulaties is te verwachten dat demografische en socio-economische ontwikkelingen het drinkwaterverbruik in grotere mate zullen beïnvloeden dan klimaatveranderingen (Murdock, 1991, Stoker, 2014). Echter, statistische relaties tussen meteorologische omstandigheden en (historisch) waterverbruik tonen dat ook de invloed van het weer van belang is, met name voor het piekverbruik in de middag en in mindere mate voor het totaalverbruik. Zo toont een empirische analyse van Herington (1996) dat het jaarlijks huishoudelijk verbruik in Engeland en Wales kan stijgen met 5% bij een gemiddelde temperatuurstijging van 1,1°C. De watervraag in warme perioden kan echter veel sterker (40%) stijgen. Tevens toont een compilatie van verbruiksgegevens van Nederlandse waterbedrijven dat het piekverbruik op een warme Nederlandse dag (maximumtemperatuur 26,8°C) t.o.v. een gemiddelde dag (maximumtemperatuur 12,4°C) in veel gevallen toeneemt met enkele tientallen procenten, tot ongeveer 100% (Bakker, 2012), zie ook Figuur 4.1. Gemiddeld over het temperatuursinterval komt dit overeen met een toename van 5% per °C.

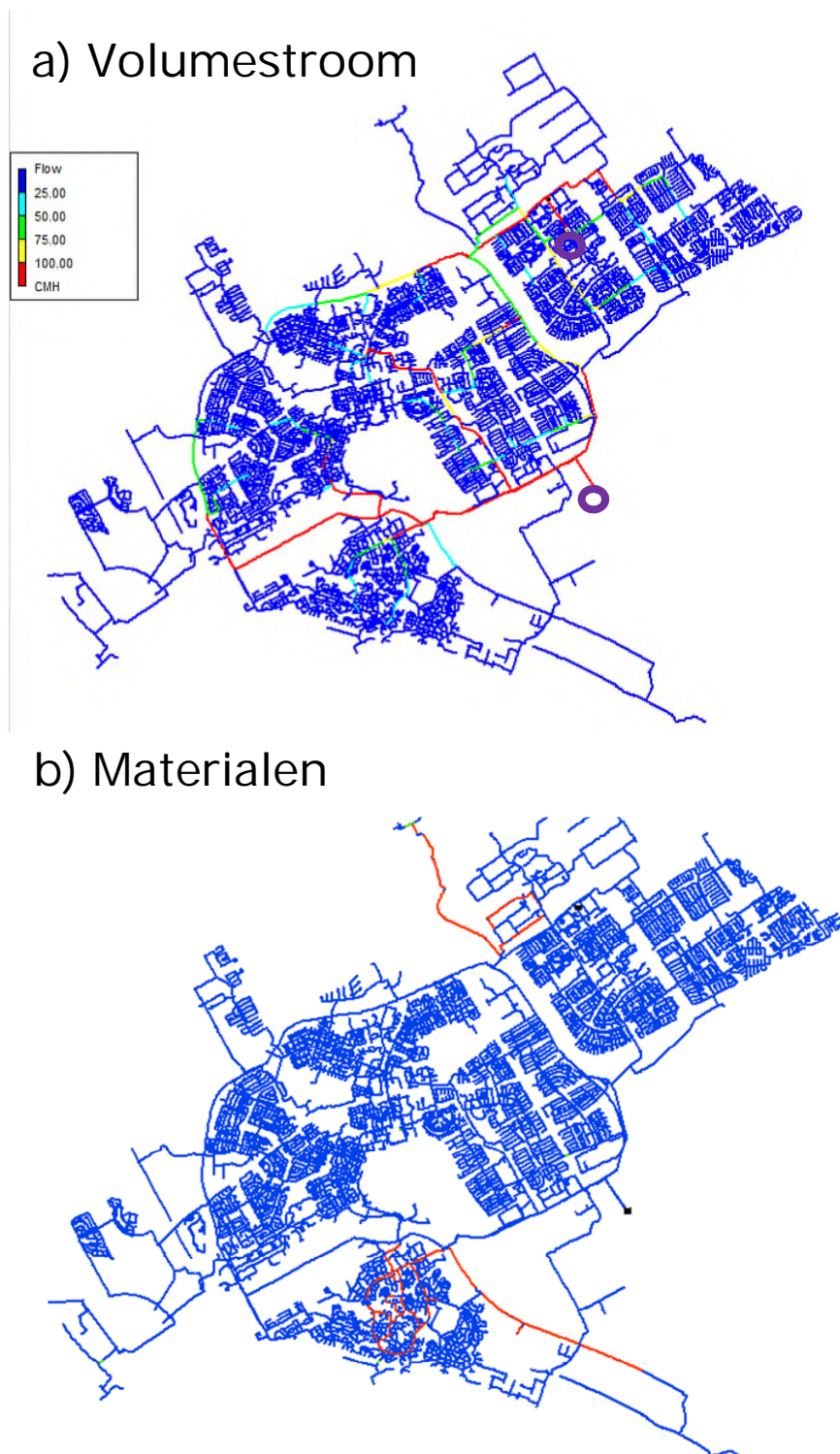


Figuur 4.1 Waterverbruik over de dag voor een normale dag (rode lijn) en een warme dag (blauwe lijn). De factor geeft de toename in dagverbruik weer.

Voor het gemiddelde dagverbruik zijn minder sterke klimaatinvloeden berekend. Zo is er een positief verband waargenomen tussen waterverbruik en (i) temperatuur (boven een drempelwaarde van 17°C), (ii) neerslagtekort (indien positief) en (iii) zonuren (boven 6 zonuren per dag) (Cirkel, 2007). Uit deze studie blijkt ook dat de afhankelijkheid van de temperatuur op het totaalverbruik verschilt per type gebied (landelijk/stedelijk). De sterkste gevoeligheid voor het landelijk gebied (Budel) is de temperatuur: voor de zomer van 2003 volgt dat het gemiddeld dagverbruik toeneemt met 1,8% per °C. De sterkste gevoeligheid voor het stedelijk gebied (Tilburg) is het potentieel neerslagtekort (stijging van 2,4% per mm neerslag per dag). Door deze uitkomsten te koppelen aan klimaatscenario's, is berekend dat in de zomermaanden het maximum dagverbruik kan toenemen met 6% (Budel), resp. 1,2% (Tilburg). Vanwege bovengenoemde drempelwaarden is er in koudere maanden een kleinere of geen toename, waardoor de procentuele toename van het jaarverbruik lager zal uitvallen.

4.3 Netwerkmodellering voor voorzieningsgebied Almere

Om de invloed van verbruik op leidingdruk en -spanning te onderzoeken, is gebruik gemaakt van het EPANET leidingnetmodel van Almere (Figuur 4.2). Het model bevat ruim 25.000 knooppunten, 2 voedingen, verbruikspatronen van 108 commerciële en 60 grootverbruikers en 10.903 huishoudelijke aansluitingen. Om realistische hydraulische variaties in het leidingnet te berekenen, zijn voor alle consument-aansluitingen unieke stochastische verbruikspatronen berekend met SIMDEUM. Hierbij zijn op basis van demografische gegevens verbruikspatronen toegekend aan afzonderlijke huishoudens, waarbij een realistische willekeur in verbruikstijden is gebruikt.



Figuur 4.2. Leidingnetmodel van voorzieningsgebied Almere. (a) Kleuren geven een karakteristiek patroon van volumestromen (m^3/h) weer om 18:00. Sterkere stromingen geven over het algemeen transportleidingen weer, zwakkere stromingen de distributieleidingen. De twee voedingen in dit gebied zijn aangegeven met paarse cirkels. (b) Type leidingmateriaal. Meest voorkomend is PVC (blauw) en in mindere mate AC (rood) en gietijzer (groen). Andere materiaalsoorten komen sporadisch voor, maar zijn niet weergegeven.

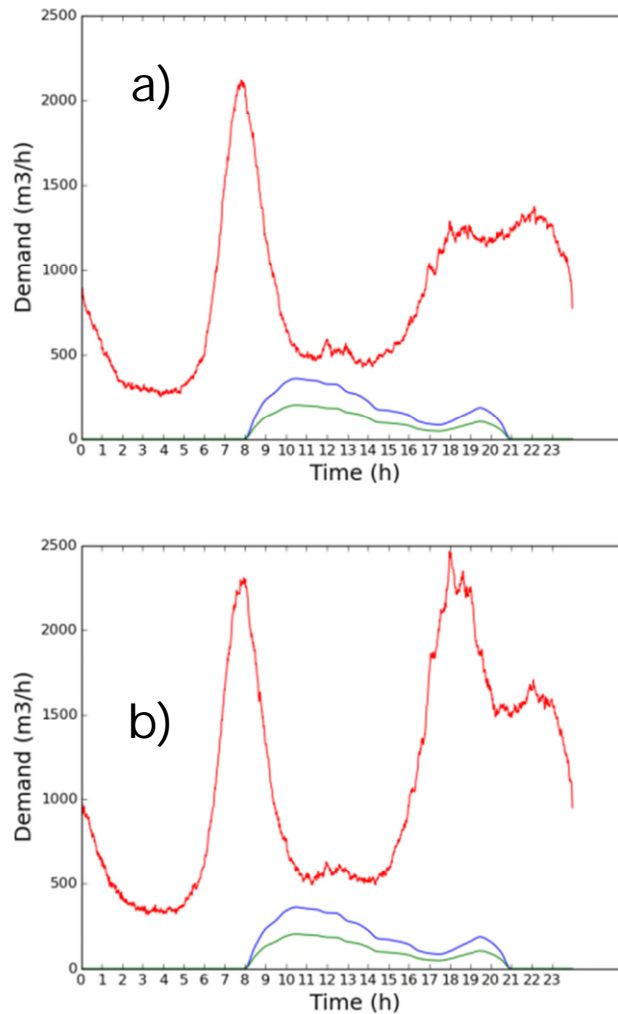
Om te onderzoeken wat de gevolgen zijn van een toegenomen middagpiekverbruik op een zomerse dag, beschouwen we twee scenario's waarvan de consument-verbruiken onderling verschillen (Figuur 4.3):

- "referentie-dag"
- "extreme dag" waarin de frequenties van 3 verbruiksgroepen toenemen
 - Douche (per persoon per dag) van 0.73 naar 0.95 (+30%)
 - Wasmachine van 0,29 naar 0.44 (+50%)
 - Buitenkraan van 0,22 naar 0,66 (+200%)

Er is gekozen voor deze gebruiksgroepen, omdat de verwachting is dat deze gebruiken flink zullen toenemen in warme periodes.

Zoals te zien in Figuur 4.3 vormt het consument-verbruik de bulk van het totale verbruik. Groot- en commerciële verbruikers vormen een klein aandeel en zijn in beide scenario's gelijk. Tijdens het piekverbruik in de middag (18:00 uur) neemt het verbruik van consumenten met 90,5% toe (extreme dag ten opzichte van referentie-dag). De toename van het *totale* verbruik (inclusief gelijkblijvend grootverbruik) is 80,5% (op het piekmoment). Gemiddeld over de gehele dag zijn de toenames 28,3% (alleen consumenten) en 23,5% (consumenten + grootverbruikers).

Corresponderend met inzichten uit de literatuur (paragraaf 4.2) is de verbruikstoename ten opzichte van het referentiescenario het grootst in de middag en avond (16:00-24:00 uur). Onder invloed van klimaatverandering wordt verwacht dat extreme situaties vaker voorkomen. Uitgaande van een toename in dagverbruik van 5% per °C (Herington, 1996), correspondeert een verbruikstoename van 23,5% met een temperatuurstijging van 4,2°C.



Figuur 4.3. Vergelijking van modelverbruiken door consumenten (rode curve), commercie (groen) en grootverbruikers (blauw) in voorzieningsgebied Almere. (a) Referentiesituatie, (b) situatie voor een warme dag.

4.4 Invloed van sturing op drukniveaus in het leidingnet

Ten gevolge van de hoge verbruiken in het extreme dag-scenario stijgt netwerkbreed het drukverschil ten opzichte van het referentieniveau (druk op voeding).

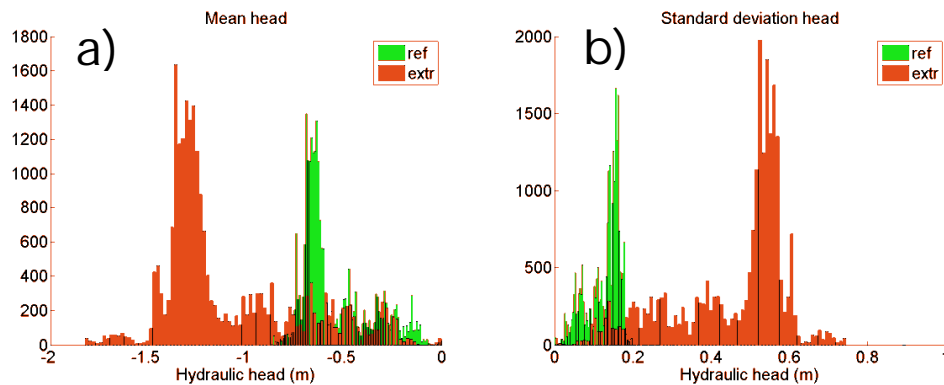
De consequenties voor de druk in het leidingnet hangen af van de manier waarop de druk in he distributienet gestuurd wordt:

- Constante voedingsdruk.
Druk op de voeding wordt constant gehouden. Dit wordt (in dit rapport) als referentiedruk gekozen. Afhankelijk van de verbruiken varieert de druk in het leidingnet. Hierbij is een lagere druk te verwachten als het verbruik toeneemt.
- Constante druk op een referentielocatie in het leidingnet.
Hierbij wordt getracht om op één of meerdere locaties in het leidingnet (bv. periferie of centrum) een constante (referentie)druk te handhaven door proactief de voedingsdruk aan te passen. Bij gelijkblijvende druk in de periferie en toenemende watervraag zal de druk dicht bij de voeding toenemen.

Voor het model Almere in EPANET geldt de situatie met constante druk op de twee voedingen (3 bar). Om de resultaten zo algemeen mogelijk te houden, presenteren we hieronder echter drukverschillen ten opzichte van een referentiedruk. In bovengenoemde sturingsscenario's zijn dit respectievelijk de voedingsdruk en de constante druk in het net. Netwerk-breed is in beide scenario's hetzelfde drukverschil ten opzichte van de referentiedruk te verwachten (bij gelijke verbruiken). Volgens het principe van Bernouilli geldt namelijk dat het drukverschil lineair afhangt van het kwadraat van de snelheid en, bij gelijkblijvende diameter, van het kwadraat van het verbruik ($\Delta P \propto Q^2$)¹.

4.5 Grotere drukvariëaties door hoger verbruik

Drukverschillen zijn berekend ten opzichte van de referentiedruk voor het extreme dag-scenario ten opzichte van het referentiescenario (Figuur 4.3). De resultaten tonen dat een verhoging van het verbruik (voor een gegeven locatie en tijdstip) in het algemeen resulteert in een drukverlaging volgens het principe van Bernouilli². De verschillen tussen beide scenario's zijn gekwantificeerd door voor elke knoop in het leidingnetmodel de druk te bepalen in de periode 16.00-24.00 uur (waar de grootste verschillen zitten tussen de referentiedag en warme dag). Het maximum drukverschil en de standaarddeviatie zijn duidelijk hoger in het extreme dag-scenario (Figuur 4.4).

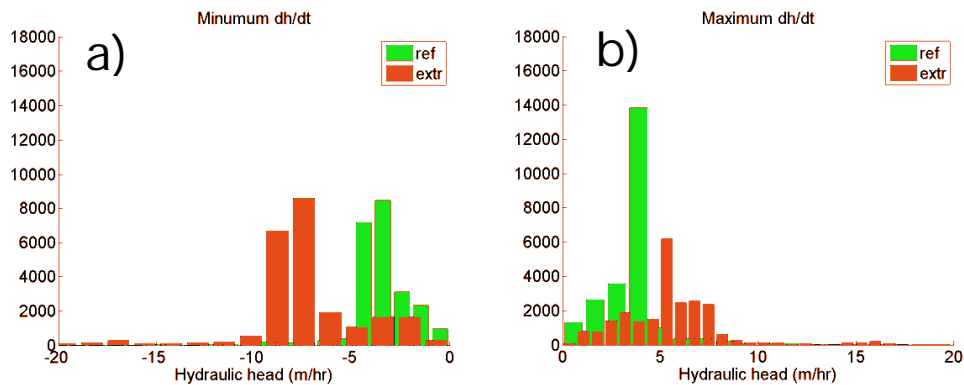


Figuur 4.4. Vergelijking van druk voor de scenario's "warm" (rood) en "referentie" ("groen"). (a) Maximum van drukval ten opzichte van de constante druk op de voedingsstations, (b) Standaarddeviatie in absolute druk. Beide maten zijn berekend voor ruim 25.000 knopen in het leidingnet en geven het gemiddelde en standaarddeviatie per knoop over de tijdsperiode 16.00-24.00 uur.

Om de invloed van *variëaties* in druk te onderzoeken zijn de afgeleiden van de druk naar de tijd berekend voor alle netwerkknooppunten en tijdstippen tussen 16.00 en 24.00 uur. De verdeling van minimum en maximum drukvariëaties (Figuur 4.5) toont dat berekende drukvariëaties voor het extreme dag-scenario groter zijn dan voor het referentie-scenario, in overeenstemming met de resultaten uit Figuur 4.4. De meer extreme variëaties in drukpatronen resulteren mogelijk in grotere spanningsvariëaties en beïnvloeden wellicht de leidingnetintegriteit. Deze mogelijkheid wordt onderzocht in de modelstudie in paragraaf 4.6.

¹ $v^2/2 + g z + P/\rho = \text{constant}$, met v de stroomsnelheid, g de zwaartekrachtsversnelling, z de hoogte, P de druk en ρ de dichtheid. Onder gelijkblijvende z , g , ρ volgt dan voor de drukval $\Delta P \propto v^2 \propto Q^2$.

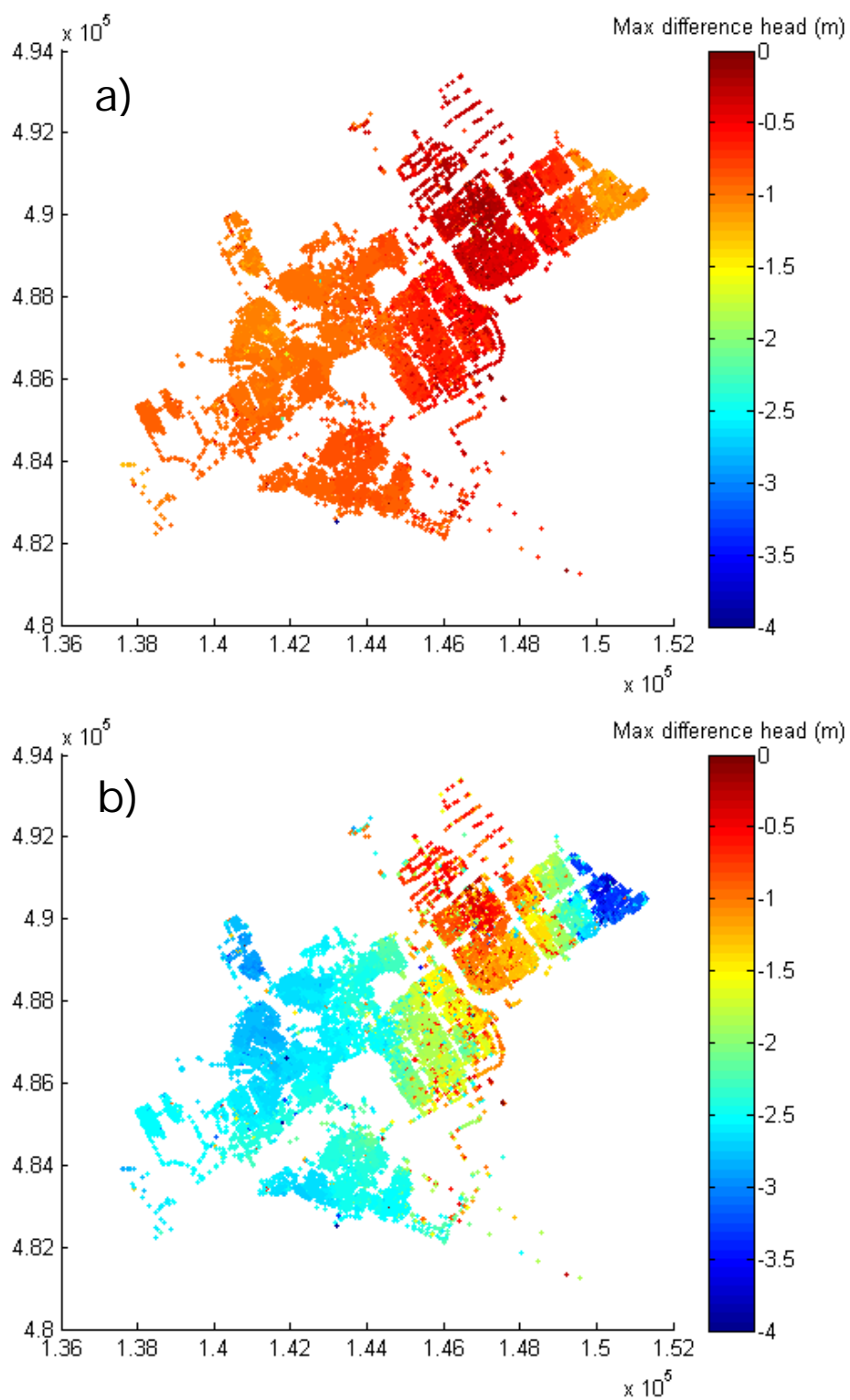
² Zo is om 20.00 uur het consumentenverbruik 40,5% hoger voor het extreme-dagscenario dan voor het referentiescenario. Het totale verbruik stijgt met 33,6% en het drukverschil met de voedingen 78% (lagere absolute druk).



Figuur 4.5. Minimum (a) en maximum (b) berekende drukvariatie in de periode 16:00-24:00 uur voor >25.000 locaties in het leidingnet voor het referentie (groen) en extreme dag scenario (rood).

Voor beide verbruiksscenario's is berekend waar in het leidingnet de grootste drukvariaties optreden. Figuur 4.7 toont geografisch de maximale verschillen ten opzichte van de referentiedruk in de periode 16:00-24:00 uur. Als gevolg van de hogere verbruiken in het extreme dag-scenario zijn de drukverschillen groter dan voor het referentie-scenario, in overeenstemming met Figuur 4.4 en Figuur 4.5. Voor beide verbruiksscenario's neemt het maximale drukverschil (negatief ten opzichte van de referentiedruk) toe met de hydraulische afstand tot de productielocaties (ruwweg naar het Noordoosten en Westen).

Op basis van het principe van Bernoulli is te verwachten dat voor beide sturingen het netwerk-brede, maximum verschildruk ongeveer even groot zal zijn. Echter, voor sturing met constante druk in (de periferie van) het net is te verwachten dat drukniveaus *toenemen* ten opzichte van de referentiedruk en dat dit effect het grootst is nabij voedingen. Dit contrasteert met sturing op constante voedingsdruk, waarbij drukniveaus *afnemen* ten opzichte van de referentiedruk en waarbij het effect juist toeneemt met toenemende afstand tot de voedingen.



Figuur 4.6. Maximum drukverschil ten opzichte van constante referentiewaarde (constante druk van 3 bar op beide productielocaties) berekend in de periode 16:00-24:00 uur op >25.000 netwerkknopen voor scenario's (a) "referentie" en (b) "extreem".

4.6 Spanningsberekeningen

Om de invloed van druk op spanningen in de leidingen te onderzoeken, is gebruik gemaakt van het spanningsmodel Comsima (Wols et al., 2015). De spanningen zijn berekend volgens de norm NEN 3650-1:2003. Spanningen in de omtrekriching (σ_1) en langsrichting (σ_2) als gevolg van interne druk zijn:

$$\sigma_1 = \frac{h(D-t)}{2t}$$

$$\sigma_2 = \nu\sigma_1$$

Hierin is h de actuele druk in Pa, ν de (materiaalafhankelijke) dwarscontractiecoëfficiënt of Poisson-constante, D de uitwendige leidingdiameter in m, en t de wanddikte in m (die afhangt van de diameter en leidingmateriaal (Wols et al., 2015)). De twee richtingen worden gecombineerd door de Von Mises spanning te bepalen

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

Om meer inzicht te krijgen in mogelijk leidingfalen, vergelijken we de Von Mises spanning met de toelaatbare spanning van het materiaal. Deze toelaatbare spanning stellen we gelijk aan de (materiaalafhankelijke) vloeï- of breukspanning (Tabel 4.1). Almere heeft een relatief jong leidingnet dat voornamelijk bestaat uit PVC en in mindere mate asbestcement en gietijzer (Figuur 4.2). Andere leidingmaterialen komen nog minder voor en zijn uitgesloten van de analyse.

Om de invloed van spanningen als gevolg van statische drukvariaties geïsoleerd te onderzoeken, zijn effecten van topografie, opwaartse kracht van grondwater, gewicht van leiding en inhoud, grondbelasting en verkeersbelasting buiten beschouwing gelaten. Ook het effect van dynamische variaties als gevolg van waterslag zijn buiten beschouwing gelaten: ondanks dat de onderdruk als gevolg van propagerende en reflecterende drukgolven in potentie een destructieve invloed hebben op het leidingstelsel (Collins 2012), is de bepaling van de temperatuurafhankelijkheid op deze drukgolven minder triviaal.

Tabel 4.1. Eigenschappen voor leidingmaterialen. Bron: Wols et al., 2015.

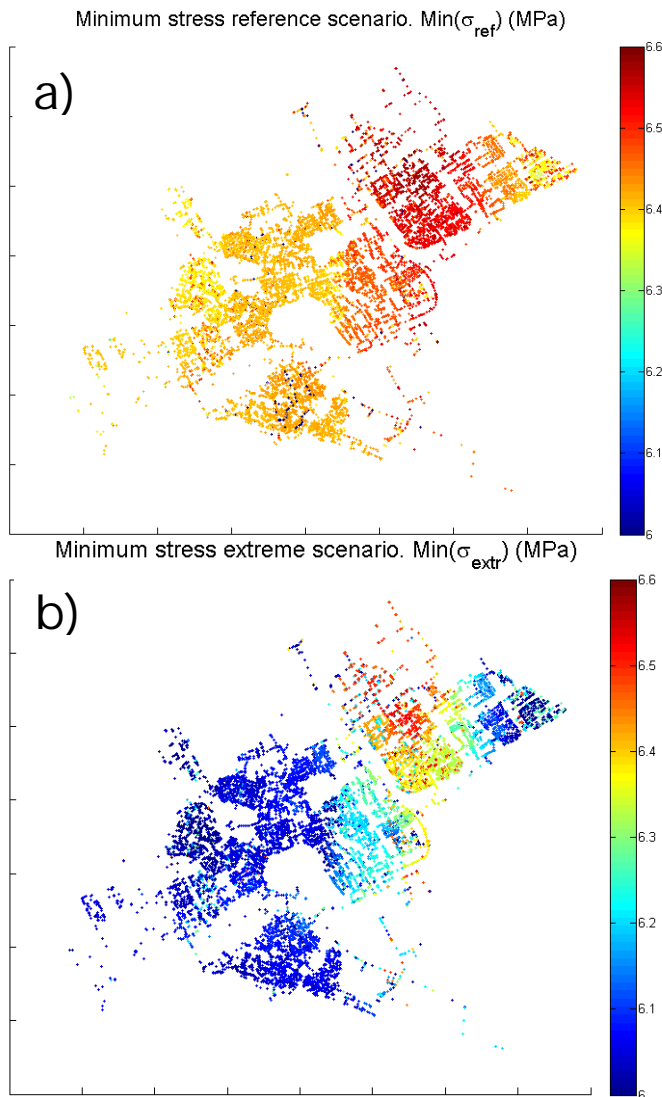
	PVC	AC	Grijs gietijzer
Toelaatbare spanning (σ_t [MPa])	25	50	100
Dwarscontractiecoëfficiënt (ν)	0.4	0.2	0.211

4.7 Grotere variatie in leidingspanning door hogere verbruiken

Met het hierboven beschreven model zijn spanningen berekend voor het leidingnet van Almere. Eerst berekenen we hoeveel de spanningen afwijken (afnemen) in het distributienet, door de maximum afwijking van de spanningen ten opzichte van de referentiespanning³ te berekenen in de periode 16:00-24:00 uur. We vergelijken vervolgens de "referentie"- en "extreme dag" scenario's (Figuur 4.7). Vanwege het hogere verbruik is de spanning in het algemeen lager voor het "extreme dag"-scenario (Figuur 4.7b) dan voor het "referentie"-

³ Opnieuw is het sturingsscenario van belang. Omdat we een model gebruiken waarin de voedingsdruk constant is, resulteert een toename in verbruik tot een *afname* in leidingdruk en -spanning (ten opzichte van de referentiewaarden op de voedingen). Er wordt daarom een minimum spanning berekend. Voor het sturingsscenario waarbij de druk in de periferie van het net constant wordt gehouden, is een *toename* te verwachten in druk- en spanningsniveaus ten opzichte van de referentie.

scenario (Figuur 4.7a). Voor AC en gietijzeren leidingen is de leidingspanning over het algemeen (een aantal malen) lager dan voor PVC leidingen. De lagere spanningen zijn een gevolg van de dikkere wanden van deze materialen ten opzichte van PVC. Hierbij is uitgegaan van de originele wanddikte en zijn verouderingseffecten niet meegenomen.

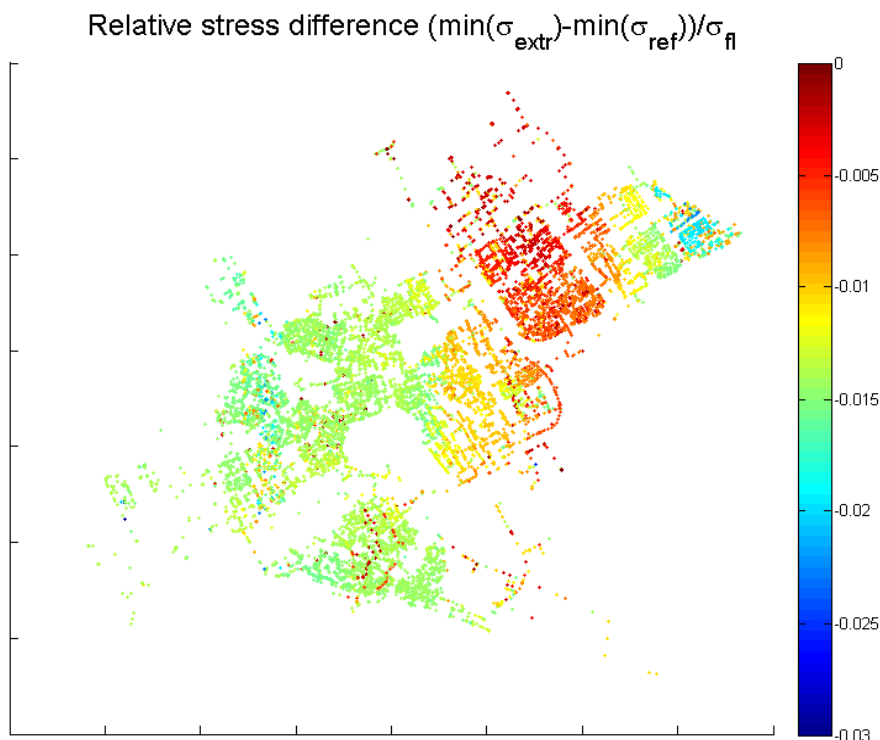


Figuur 4.7. Theoretische modelberekeningen van de minimum spanning in de periode 16:00-24:00 uur voor het (a) referentie en (b) extreme dag scenario. Getoonde locaties zijn geografische middelpunten van alle leidingen in het voedingsgebied Almere.

Om de invloed van spanningen op leidingnetintegriteit te onderzoeken, is het verschil in spanningen tussen de twee verbruiksscenario's berekend en genormaliseerd met de toelaatbare spanning. In het hele netwerk zijn de berekende relatieve spanningsverschillen voor PVC-leidingen lager dan 3% en nog lager voor AC en gietijzeren. Dit resultaat toont dat een grote verbruikstoename (ongeveer factor 2 in de middagpiek, en veel minder in de ochtendpiek) slechts een kleine invloed heeft op de optredende spanningen van een leiding.

Voor het berekende model van Almere is de sturing constant op de voedingen. Omdat spanningen afnemen bij toenemend verbruik in het net zijn de spanningsverschillen ten opzichte van de referentie (de voedingen) negatief en worden meer negatief met toenemende hydraulische afstand tot de voedingen. Het is niet te verwachten dat dit tot falen zal leiden.

De situatie is anders als met constante druk in het distributienet wordt gestuurd. Dan is te verwachten dat het spanningsverschil ten opzichte van de referentie (het net) positief is en toeneemt naarmate de leidingen dichter bij de voedingen liggen. Hoewel het effect beperkt is, is in deze situatie het volgende faalscenario mogelijk: Het piekverbruik bereikt als gevolg van klimaatverandering vaker een hoger maximum. Zonder verdere voorzorgsmaatregelen wordt bij de voedingen de druk verhoogd om de druk in het net op peil te houden. Door de toegenomen druk stijgt de spanning in de leidingen en daarmee het risico op leidingfalen. Het relatieve spanningseffect lijkt echter klein (<3%), en het is te verwachten dat in de praktijk de klimaatinvloed alleen merkbaar is voor sterk aangetaste leidingen: als de leidingsspanning al dicht bij de kritische leidingsterkte ligt door een combinatie met andere belastingen (zoals zetting) of veroudering.



Figuur 4.8. Verschil in leidingsspanning (als fractie: 0.01=1%) tussen het extreme en referentie-scenario relatief ten opzichte van de toelaatbare spanning. Getoonde locaties zijn geografische middelpunten van alle leidingen in het voedingsgebied Almere.

Voor PVC is dit relatieve effect sterker dan voor AC en gietijzer, vanwege de lagere toelaatbare spanning van PVC (dunnere buiswand). Uit de statistische analyses van storingsregistraties (Hoofdstuk 3) blijkt echter dat AC met name gevoelig is voor hogere temperaturen. Dit komt omdat PVC leidingen gemakkelijker tijdelijke spanningspieken kunnen opvangen (Figuur 2.3), terwijl AC (en gietijzeren) leidingen gevoeliger zijn voor spanningspieken. Bovendien zijn de AC en gietijzeren leidingen soms al gerepareerd of gesaneerd als gevolg van de spanningen bij de gemiddelde druk, en spelen verouderingsmechanismes zoals afnemende wanddikte en uitloging in agressieve milieus een rol (Figuur 2.4). De (beperkte) veranderingen in leidingspanningen vormen echter geen volledige verklaring voor het waargenomen positieve verband tussen temperatuur en falende leidingen.

4.8 Statistische analyse

Naast modellering van spanningen is ook het effect van drukken op geregistreerde storingen onderzocht met behulp van statistiek. Drukdata van WML en Brabant Water is beschikbaar gesteld voor analyse. Hier is gebruik gemaakt van gemodelleerde drukdata. Voordeel van gemodelleerde drukdata is dat deze beschikbaar is voor het gehele leidingnet, terwijl meetdata slechts beschikbaar is op een aantal punten in het leidingnet. Nadeel van de gemodelleerde drukdata is dat deze niet per dag beschikbaar is. De drukken zijn voor het gehele voorzieningsgebied van WML en Brabant gemodelleerd voor een scenario met circa gemiddeld verbruik (dagfactor=1.1). In de analyse zijn een aantal drukregimes onderscheiden op basis van de maximale druk op een gemiddelde dag: lage druk (0-43 m), gemiddelde druk (43-50m) en hoge druk (>50 m). Deze waarden zijn gekozen, zodat het aantal storingen (en niet het aantal km leiding) evenredig verdeeld is over de klassen (Tabel 4.4). Ook is er een klasse-indeling gemaakt op basis van maximale drukverschil op een locatie op een dag: laag drukverschil (0-4 m drukverschil), gemiddeld drukverschil (4-8 m drukverschil) en hoog drukverschil (8-20 m drukverschil). Op basis van deze indeling zijn extra cohorten gedefinieerd, waarbij een cohort een materiaal met een bepaalde druk of drukverschilklasse voorstelt. Voor ieder cohort is vervolgens het verband met de weerparameters onderzocht. Druk en drukverschil zijn onderling gecorreleerd, maar kunnen wel verschillen en voor de volledigheid zijn daarom beide resultaten weergegeven

Nadat de storingen veroorzaakt door derden en tijdens de aanleg zijn verwijderd, zijn er 5719 storingen in buizen en verbindingen beschikbaar voor de analyse (Tabel 4.2). Het grootste deel van de storingen zit in AC leidingen, gevolgd door PVC en ST (Tabel 4.3).

Tabel 4.2 Aantal storingen en storingsfrequentie naar object

Object	Aantal storingen
Buis	4849
Verbinding	870

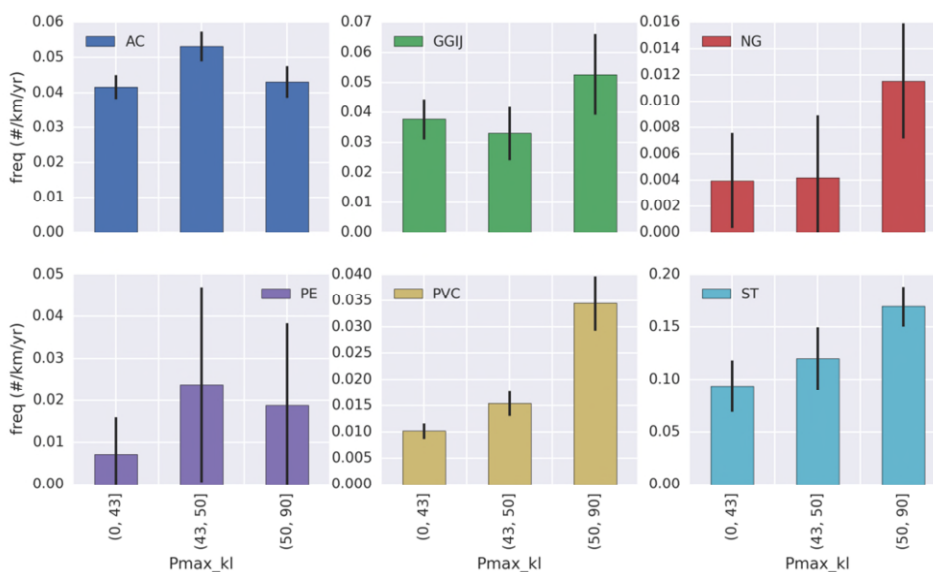
Tabel 4.3 Aantal storingen en storingsfrequentie naar leidingmateriaal voor de gebruikte data

Leidingmateriaal	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
AC	2985	0.048
PVC	1108	0.018
ST	1056	0.140
GGIJ	446	0.039
NG	99	0.009
PE	25	0.014

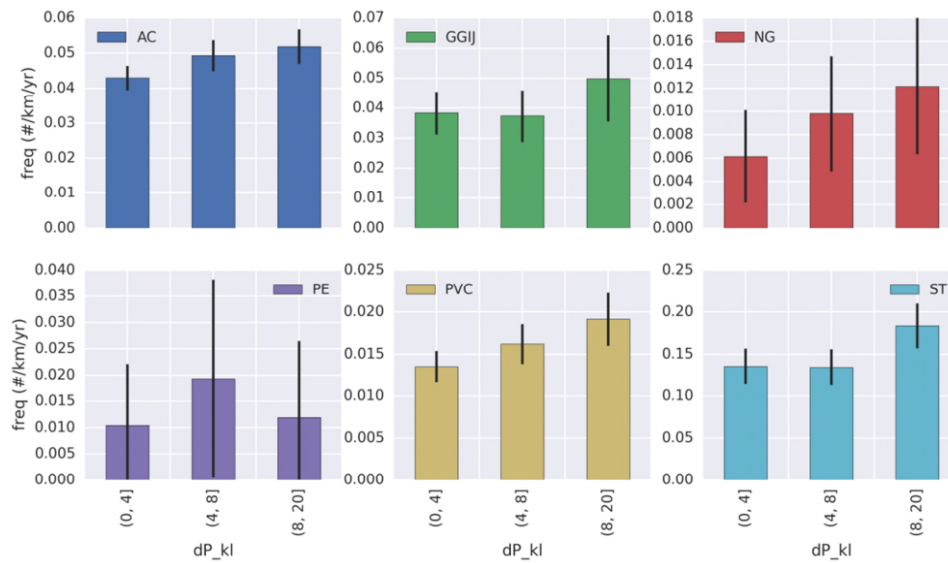
Tabel 4.4 Aantal storingen en storingsfrequentie naar leidingmateriaal voor de gebruikte data

Maximale druk(verschil) op een dag	Aantal storingen	Frequentie (#/km/jr)
0-43m maximale druk	1647	0.025
43-50m maximale druk	1599	0.035
50-90m maximale druk	1624	0.049
0-4m drukverschil	1882	0.031
4-8m drukverschil	1615	0.035
8-20m drukverschil	1473	0.042

Opvallend is dat de storingsfrequentie toeneemt bij een hogere maximale druk of drukverschil op een dag (Tabel 4.4). Deze toename verschilt per materiaaltype (Figuur 4.9 en Figuur 4.10): alle materialen laten een toename zien, maar bij AC en PE is de toename alleen zichtbaar in de middelste klasse. Bij PVC is er een sterke toename, met name bij de maximale druk op een dag. Dit past bij het beeld van PVC: hogere spanningen door hogere drukken, met name op wat het op de lange duur aankan (spanningspieken kan het materiaal makkelijk aan). Dit geldt ook voor PE, maar daar is het aantal storingen te laag om een uitspraak over te doen.



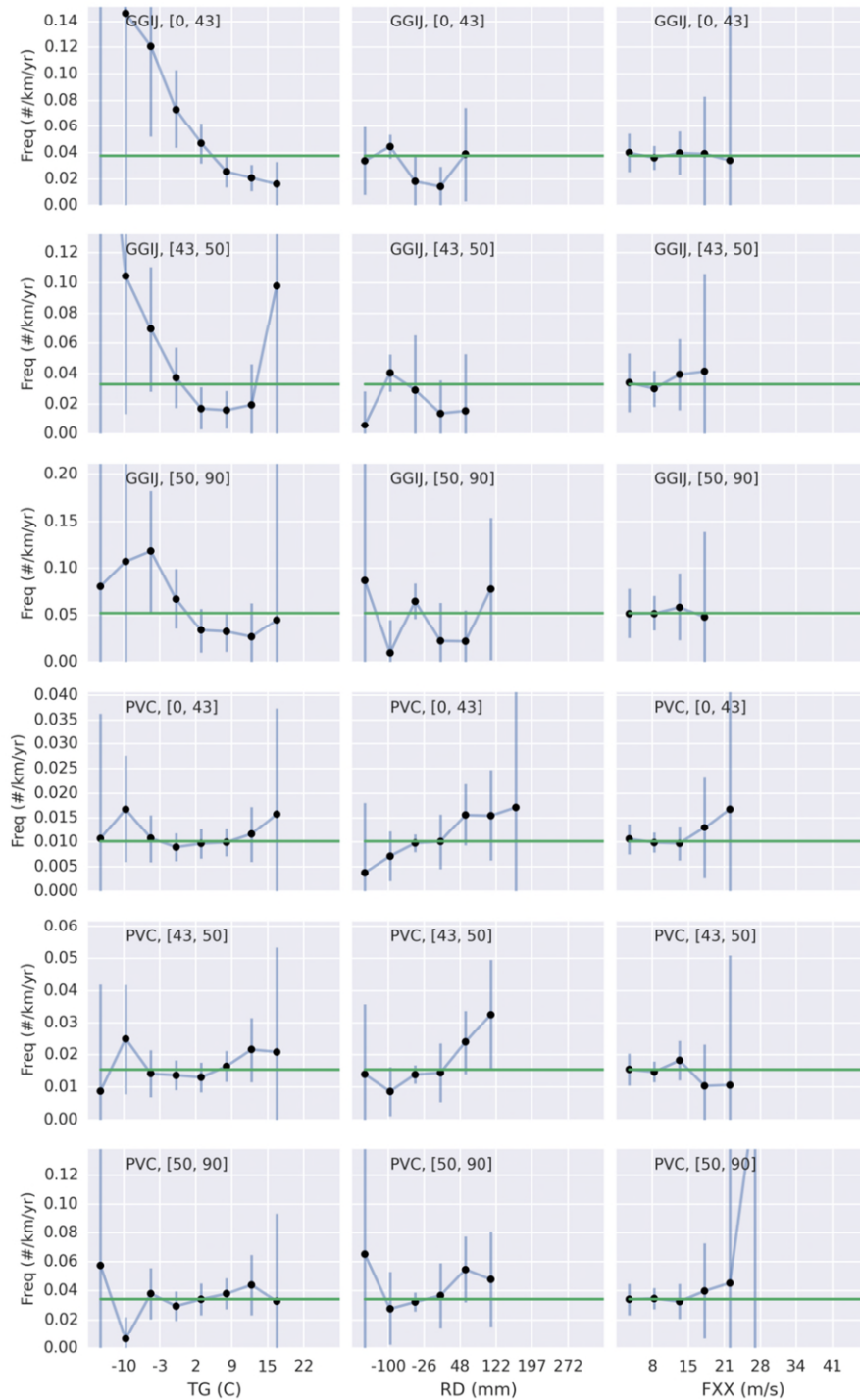
Figuur 4.9 Storingsfrequentie uitgezet tegen de maximale druk op een dag [in m waterkolom] voor verschillende leidingmaterialen.



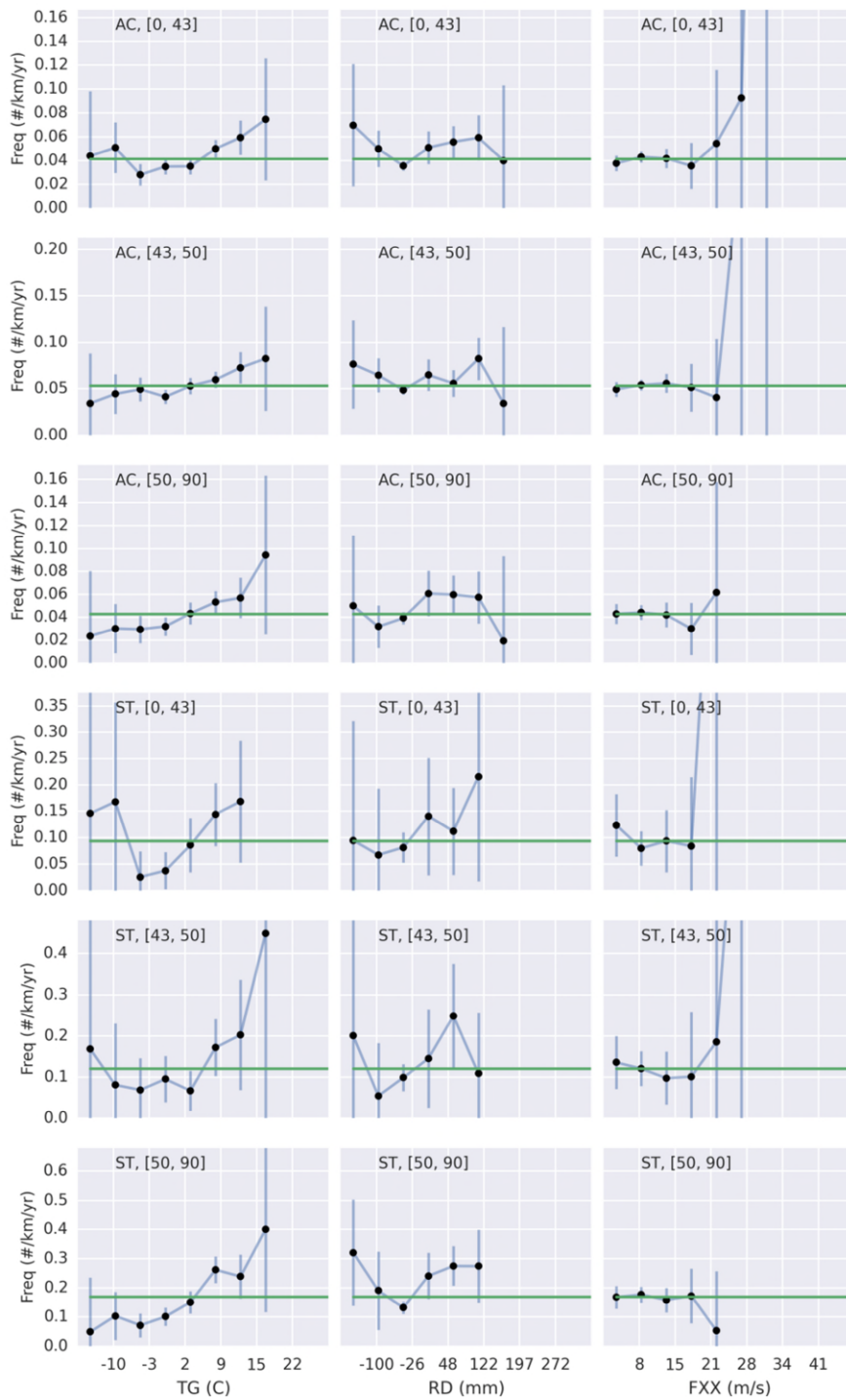
Figuur 4.10 Storingsfrequentie uitgezet tegen het maximale drukverschil op een dag [in m waterkolom] voor verschillende leidingmaterialen.

Vervolgens is het effect van de verschillende weerparameters beschouwd door de storingsfrequentie te bepalen voor de verschillende weerparameterklassen. Dit is zowel gedaan voor cohorten op basis van materiaal en maximale druk (op 1 dag) als voor maximale verschilddruk (op 1 dag). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.11-Figuur 4.12 en Bijlage II. Hier worden vergelijkbare verbanden gevonden met weerparameters als voor de landelijke data. De afhankelijkheid van temperatuur of droogte maakt weinig verschil voor de verschillende drukcohorten, zowel voor maximale druk als maximaal drukverschil. Een uitzondering hierop is grijs gietijzer, waar bij hoge druk een minder sterke toename in storingsfrequentie bij de lage temperaturen waarneembaar is. De onzekerheid hierop is echter groot.

Er is weliswaar geen verschil in de relatie weer en storingsfrequentie voor de verschillende druk(verschil) cohorten. Echter, omdat er gebruik gemaakt is van de druk of het drukverschil op een gemiddelde dag, is het met de gebruikte gegevens niet te zeggen of er wel of geen direct verband is tussen drukvariaties als gevolg van temperatuur en storingen.



Figuur 4.11 Effect van maximale druk: Storingsfrequentie als functie van weerparameter voor grijs gietijzeren en PVC leidingen bij drie maximale drukken (zwarte punten, blauwe verticale lijnen zijn de onzekerheidsmarges, groene lijn is de gemiddelde storingsfrequentie). Getallen op de x-as zijn afgerond op hele getallen.



Figuur 4.12 Effect van maximale druk: Storingsfrequentie als functie van weerparameter voor AC leidingen en stalen leidingen bij drie maximale drukken (zwarte punten, blauwe verticale lijnen zijn de onzekerheidsmarges, groene lijn is de gemiddelde storingsfrequentie). Getallen op de x-as zijn afgerond op hele getallen.

5 Klimaatextremen

5.1 Inleiding

De analyses met storingsdata uit Nederland laten zien dat, afhankelijk van het leidingmateriaal, de storingsfrequentie kan toenemen bij hoge of juist lage temperaturen. De vraag is vervolgens in hoeverre dit versterkt wordt als er meer extremen temperaturen zouden optreden. Daarom zijn storingsdata uit andere landen verzameld. Storingsdata uit Zuid-Afrika (Kaapstad) en Canada (Montreal) zijn verkregen die tezamen representatief zijn voor extremen in lage en hoge temperatuur. Er is onderzocht wat het effect van weer is op de storingsfrequentie.

5.2 Effect van weer op storingen in Kaapstad

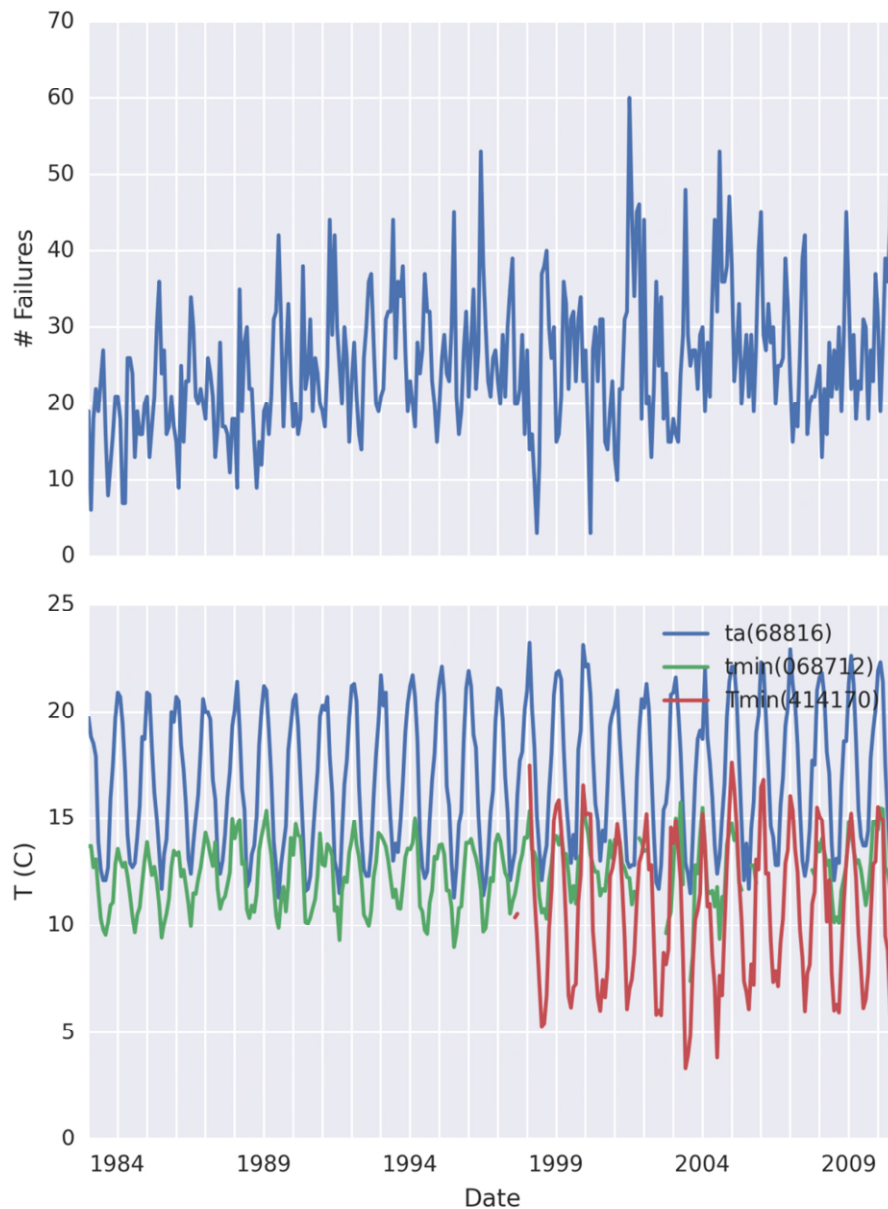
De storingsdata was aangeleverd door het stadsbestuur van Kaapstad. Dit betrof storingen over de periode 2008-2014 voor heel Kaapstad. Na analyse van deze data bleek dat er geen invloed van weer op storingen werd gevonden. Na overleg met de beheerder van de data is een tweede dataset aangeleverd van een kleiner gebied maar met een langere historie (28 jaar) en een betere datakwaliteit (attributen zoals diameter, materiaal en jaar van aanleg waren voor de meeste storingen bekend).

De weergegevens zijn verzameld via het KNMI (<http://climexp.knmi.nl/>). Dagelijkse gegevens van minimum temperatuur, maximum temperatuur en neerslag was verzameld voor het weerstation CAPE_COLUMBINE (SF000068712, WMO station 68712) en MALMESBURY (SF000414170, WMO station 68715). Daarnaast zijn maandelijkse gegevens van gemiddelde temperatuur verzameld voor weerstation CAPETOWN (WMO station 68816). Op basis van de neerslaggegevens is de Antecedent Precipitation Index [*Prec*] bepaald om het cumulatieve effect van de neerslag in te schatten (zie 3.2.1).

Een lage index representeert droge perioden en een hoge index natte perioden.

De faalfrequenties zijn berekend als aantallen storingen per jaar (#/yr), omdat de lengtes van het onderliggende leidingnetwerk niet gegeven zijn. Cohorten zijn gemaakt op basis van leidingmateriaal. Daarnaast zijn de weerparameters verdeeld in 10 klassen, waarvoor storingsfrequenties berekend zijn. Dit is gedaan door het aantal storingen binnen een bepaalde weerklasse te delen door de periode dat de weerconditie in deze klasse optrad.

Voor het weerstation CAPE_COLUMBINE (SF000068712, WMO station 68712), zijn er weergegevens beschikbaar voor de gehele periode van 28 jaar (met een paar hiaten), terwijl voor het weerstation MALMESBURY (SF000414170, WMO station 68715) dagelijkse weersdata beschikbaar is vanaf 1998. De maandelijkse weergegevens van weerstation CAPETOWN (WMO station 68816) is beschikbaar voor de gehele periode (Figuur 5.1).

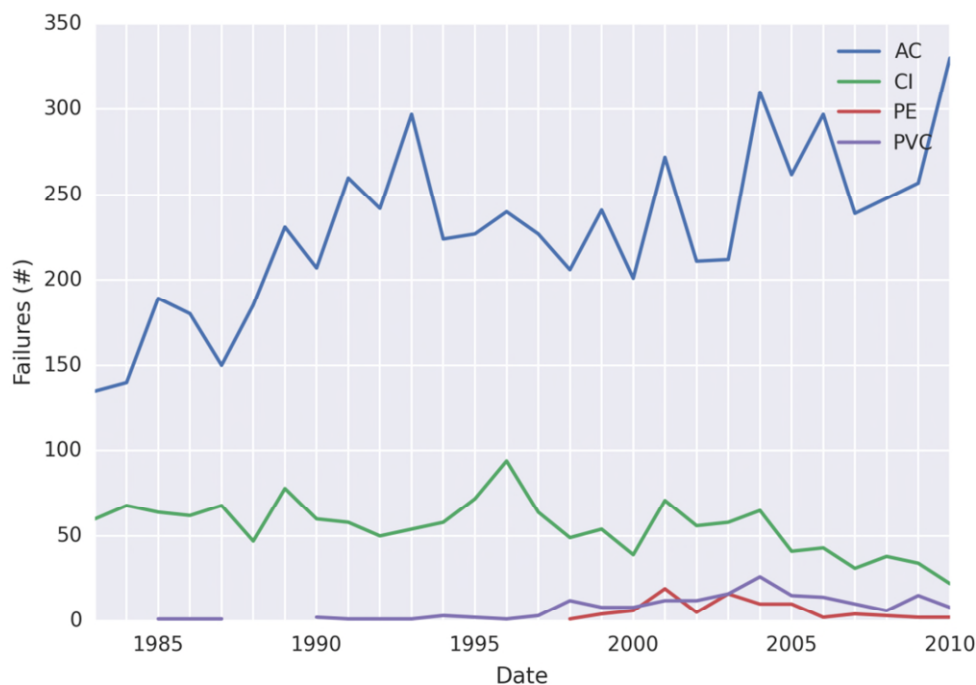


Figuur 5.1 Aantal storingen per maand (boven) en maandelijks gemiddelde temperatuur voor weerstation 68816 (blauw), dagelijkse minimumtemperaturen gemiddeld over de maand voor weerstation 068712 (groen) en 414170 (rood).

Het aantal storingen dat geregistreerd is voor de leidingmaterialen is weergegeven in Tabel 5.1. Daarnaast veranderde in de loop van de tijd het aantal storingen per materiaal (Figuur 5.2), bijvoorbeeld een afname in storingen in gietijzer leidingen en een toename in PVC en PE leidingen, omdat deze materialen vervangen dan wel geïnstalleerd zijn of omdat de storingsfrequentie van deze materialen veranderde.

Tabel 5.1 Aantal storingen voor de verschillende materialen.

Materiaal	Aantal storingen
AC (asbestos cement)/FC (fibre cement)	6420
CI (cast iron)	1558
PVC	181
PE	84
Onbekend, anders	198

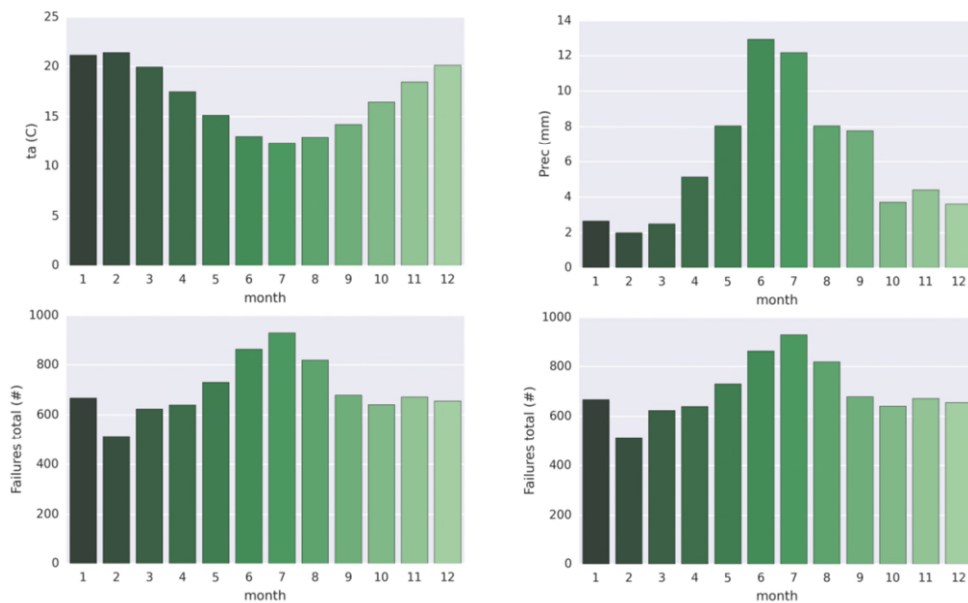


Figuur 5.2 Verloop van storingen in de tijd voor de verschillende leidingmaterialen.

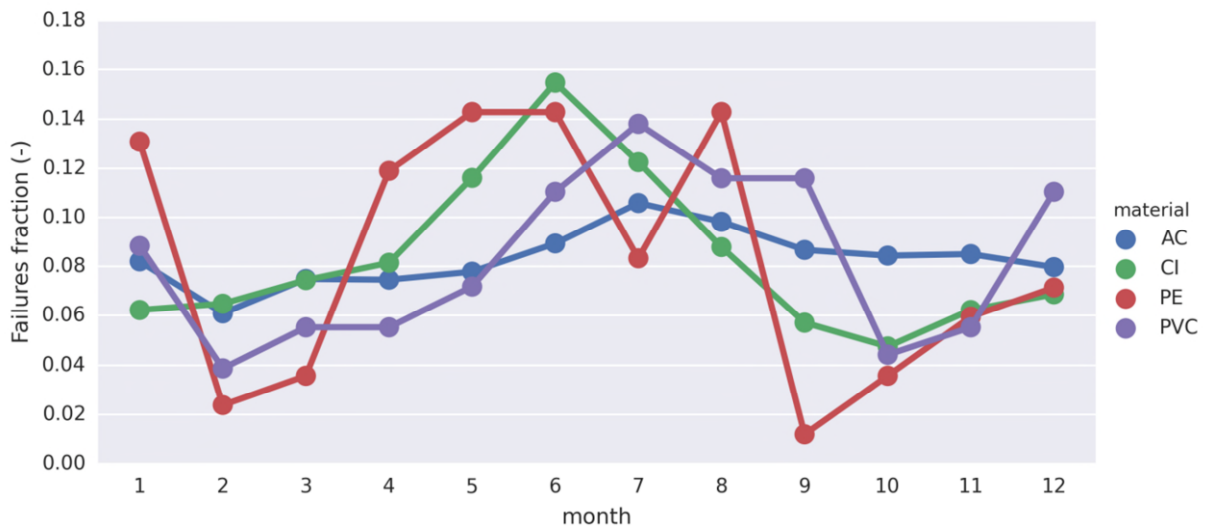
Het gemiddelde aantal storingen per maand gedurende de afgelopen 28 jaar is weergegeven in Figuur 5.3. Hier is de seizoensinvloed duidelijk te zien. In de wintermaanden in Zuid-Afrika zijn er duidelijk meer storingen. Dit is ook zichtbaar voor de individuele leidingmaterialen, waarin het aandeel van het totaal aantal storingen per maand is weergegeven in Figuur 5.4. De PE leidingen laten een grotere variatie zien, omdat hier relatief weinig storingen van zijn. De gietijzeren leidingen laten duidelijk de piek in de winter zien, net zoals PVC en in mindere mate AC leidingen (al lijkt de piek iets later in het seizoen te komen). In de wintermaanden zijn zowel de temperaturen laag als de neerslagindex hoog. De maandelijkse gemiddelde temperaturen en neerslagindices zijn uitgezet tegen de storingen per maand (Figuur 5.5). De AC, PVC en gietijzeren leidingen laten allen een toename in storingen zien bij een lagere temperatuur en een hogere neerslagindex. Er lijkt

geen grote toename te zijn bij hogere temperaturen. De relatie met neerslagindex lijkt sterker dan die met temperatuur.

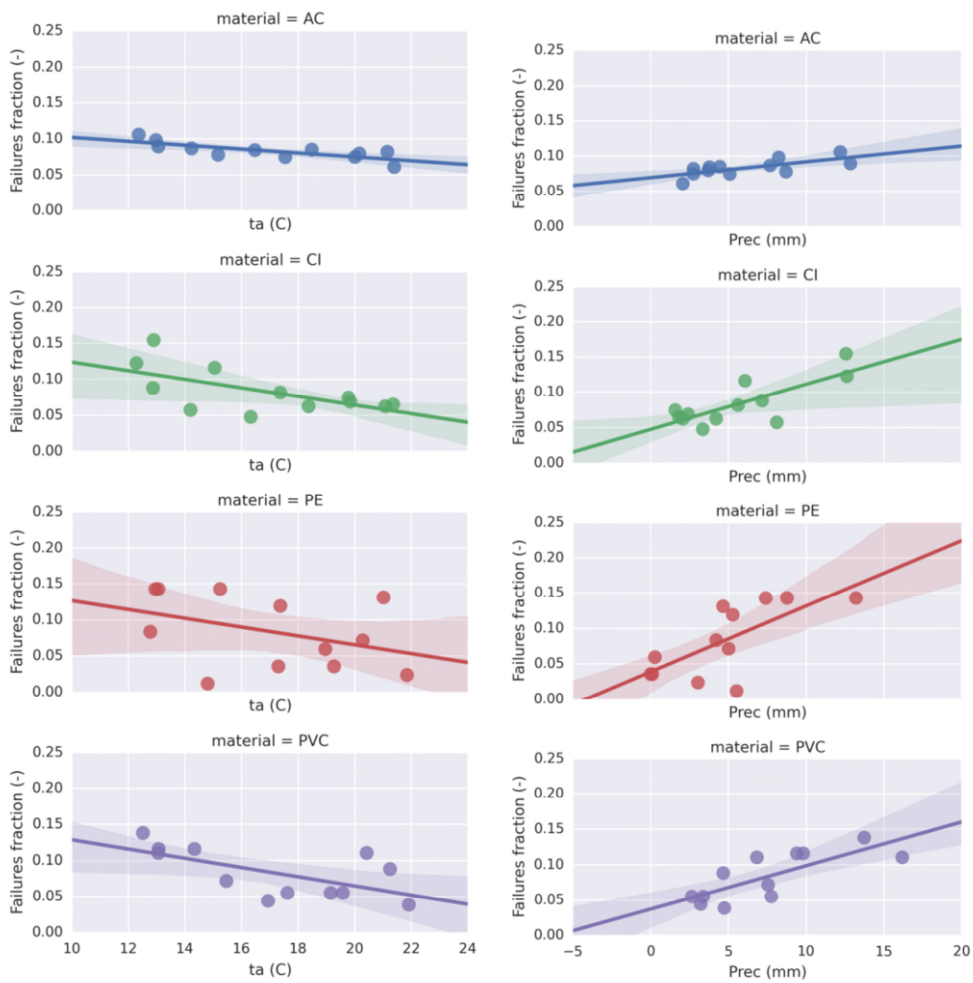
Deze analyse is gebaseerd op gemiddelde waarden per maand over de afgelopen 28 jaar. Daarnaast is er ook een analyse gedaan die gebruik maakt van de weergegevens op de dag van storen. Hiervoor zijn een aantal weerklassen gedefinieerd en is het aantal storingen per weerklassen opgeteld en gedeeld door het aantal dagen dat deze weerklassen optrad. Dit leverde vergelijkbare resultaten op als de maandelijkse analyses (zie Bijlage IV).



Figuur 5.3 Linksboven: Maandelijkse gemiddelde temperatuur (ta), rechtsboven: neerslagindex (Prec), onder: het totaal aantal storingen per maand.



Figuur 5.4 Aandeel van het totaal aantal storingen per maand per leidingmateriaal.



Figuur 5.5 Verdeling van de storingen per maand uitgezet tegen de weerparameters, temperatuur (links) en neerslagindex (rechts).

5.3 Effect van weer op storingen in Montreal

5.3.1 Verzamelde data

Storingsdata en een lijst met alle leidingen in het netwerk is door Montreal geleverd voor de periode januari 2010 t/m april 2015. Voor de storingsdata zijn de volgende attributen gegeven: storingsdatum, leidingmateriaal, diameter, en jaar van aanleg. En voor de lijst met alle leidingen zijn de attributen leidingmateriaal, diameter, jaar van aanleg, lengte en status gebruikt. Alleen de leidingen met de status 'bestaand' zijn gebruikt.

Weersdata is verzameld van de website van de Canadese overheid (<http://climate.weather.gc.ca/>). Daggemiddelde weergegevens zijn gebruikt van het weerstation MONTREAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL A. Daarnaast heeft Montreal data geleverd op een wekelijkse basis van vorstindringingsdiepte op verschillende locaties in de stad. Omdat er geen ruimtelijke analyse is uitgevoerd (ook omdat er geen ruimtelijke gegevens van leidingen en storingen zijn geleverd), zijn de waarden van de verschillende ruimtelijke locaties gemiddeld. Op het moment dat de bovenkant van de bodem aan het dooien raakt, maar de vorst nog steeds in de grond zit, is de waarde van de onderste vorstlaag gebruikt. De volgende weersparameters zijn gebruikt in de analyse: minimum dagelijkse temperatuur, gemiddelde dagelijkse temperatuur, sneeuwdek op de grond en vorstindringingsdiepte.

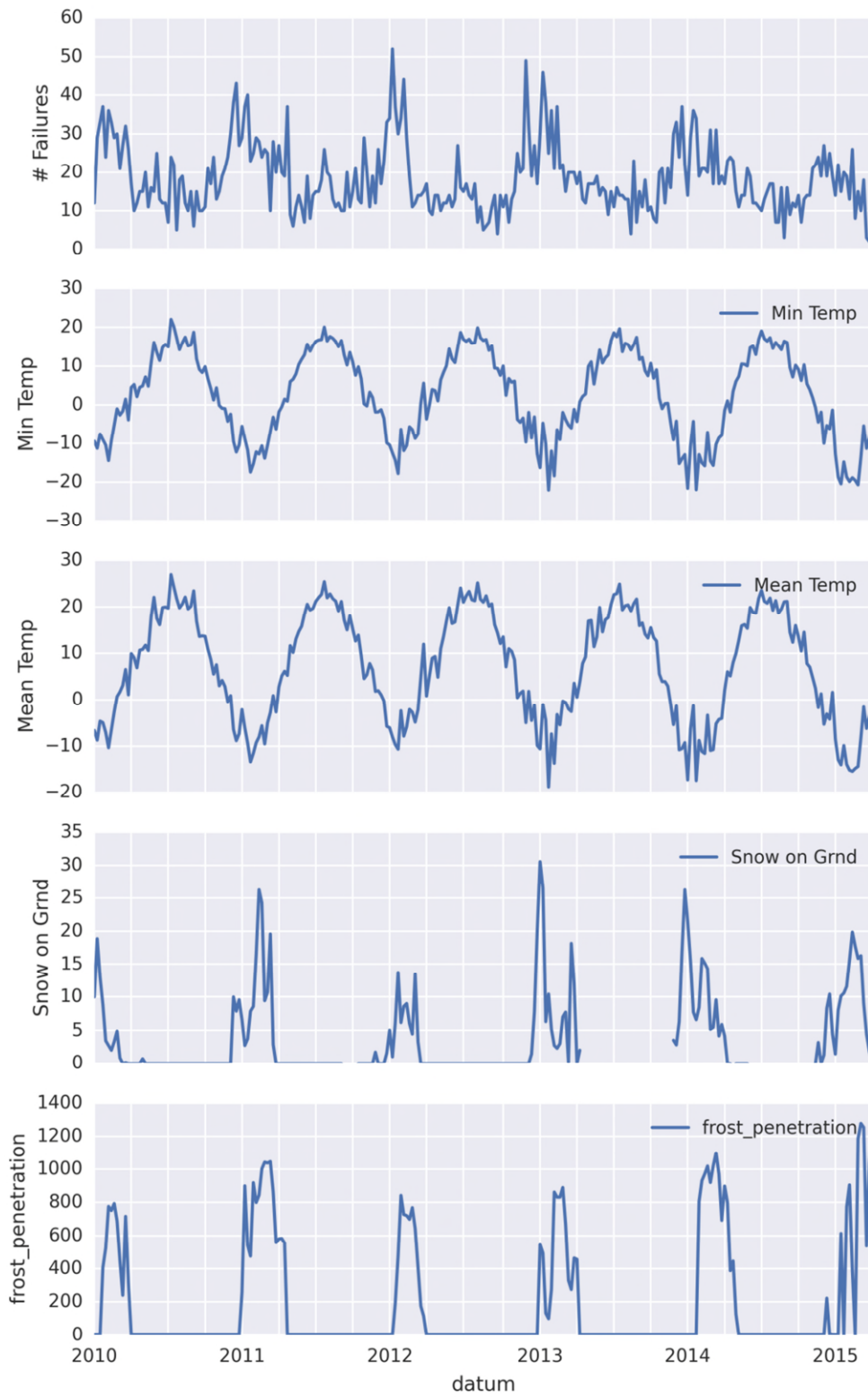
Faalfrequenties (#/km/yr) zijn berekend voor verschillende cohorten. De cohorten zijn gebaseerd op leidingmateriaal, leeftijd of diameter. Daarnaast zijn de weerparameters verdeeld in 10 klassen, waarvoor de faalfrequenties zijn berekend. Deze zijn berekend door alle storingen in een cohort en weerklasse bij elkaar op te tellen en te delen door de totale lengte van alle leidingen in dat cohort maal de periode dat deze specifieke weerconditie (in de klasse) optrad.

5.3.2 Resultaten

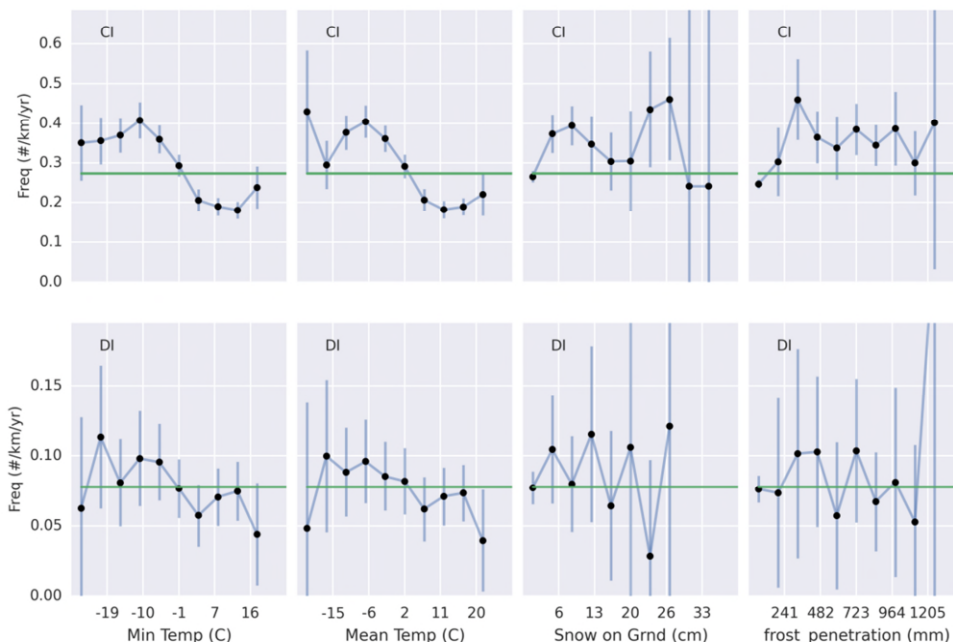
Gegevens over de storingen zijn weergegeven in Tabel 5.2 en in de Bijlage (Tabel IV.1 t/m Tabel IV.2). De meeste storingen komen voor in gietijzeren leidingen. Het leidingnet bestaat ook voor 82% uit gietijzeren leidingen. Daarnaast verschillen de storingsfrequenties ook sterk voor de verschillende cohorten van diameter en jaar van aanleg. De gietijzeren leidingen (grijs en nodulair) zijn gebruikt voor verdere analyse met weerparameters, omdat hierin voldoende storingen zitten om statistisch relevante conclusies te kunnen trekken.

Tabel 5.2 Aantal storingen en storingsfrequenties voor verschillende leidingmaterialen

Materiaal	Aantal storingen	Faalfrequentie (#/km/yr)
CI	4336	0.274
DI	577	0.078
Concrete	87	0.033
PVC	41	0.028
AC	16	0.053
ST	5	0.023
PE	2	0.021



Figuur 5.6 Wekelijkse tijdserie van storingen en de verschillende weerparameters.



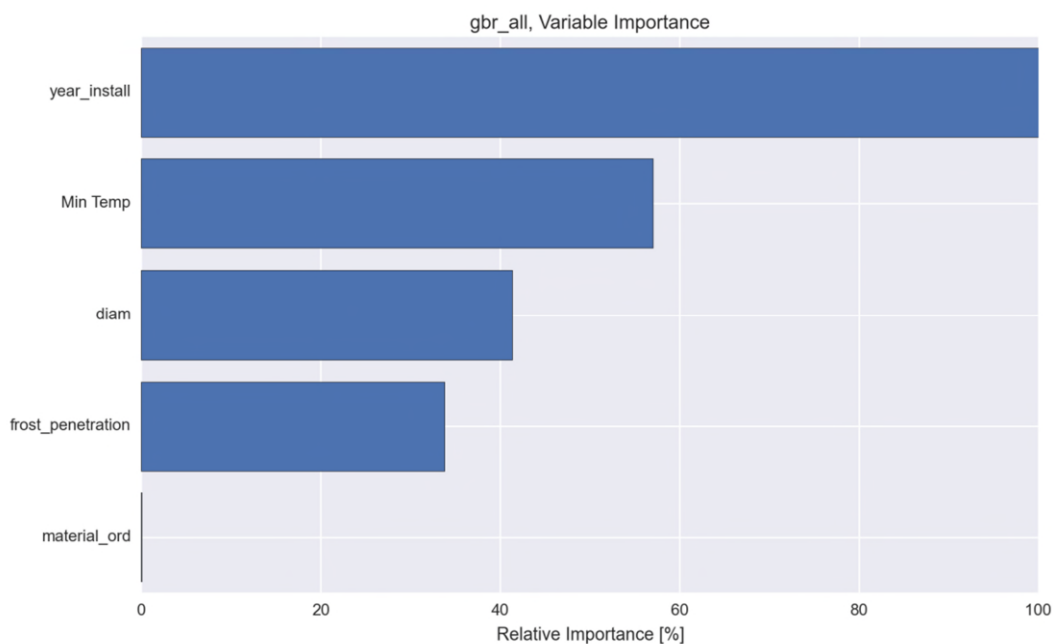
Figuur 5.7 Faalfrequentie als functie van de weerparameter voor grijs gietijzeren (CI) leidingen and nodulair gietijzeren (DI) leidingen. De verticale strepen laten de 80% onzekerheidsmarges zien.

Figuur 5.6 geeft een wekelijkse tijdserie weer van het aantal storingen en de vier weerparameters (gemiddeld over iedere week). De variatie per seizoen is duidelijk zichtbaar: de meeste storingen treden op in de winter. Door de weerparameters uit te zetten tegen de storingsfrequentie (Figuur 5.7) kan het effect van weer nauwkeuriger onderzocht worden. Voor de grijs gietijzeren (CI) leidingen zijn de onzekerheden het kleinst vanwege de grotere aantallen storingen en zijn de verbanden duidelijker dan bij de nodulair gietijzeren (DI) leidingen. Bij de CI leidingen is te zien dat hogere storingsfrequentie optreden als de temperaturen onder nul gaan. Er lijkt wel een afvlakking te zijn bij de laagste temperaturen. Bij de hoogste temperaturen lijkt ook een toename te zijn van de storingsfrequentie. De aanwezigheid van sneeuw en vorstindringingsdiepte laat wel een hogere frequentie zijn (dan bij geen sneeuwdek of vorst in de grond), maar deze neemt niet toe bij grotere waarde van het sneeuwdek of vorstindringing. Voor de nodulair gietijzeren leidingen lijken de storingsfrequenties wel iets hoger bij lage temperaturen, maar het effect lijkt niet significant (binnen de onzekerheidsmarges).

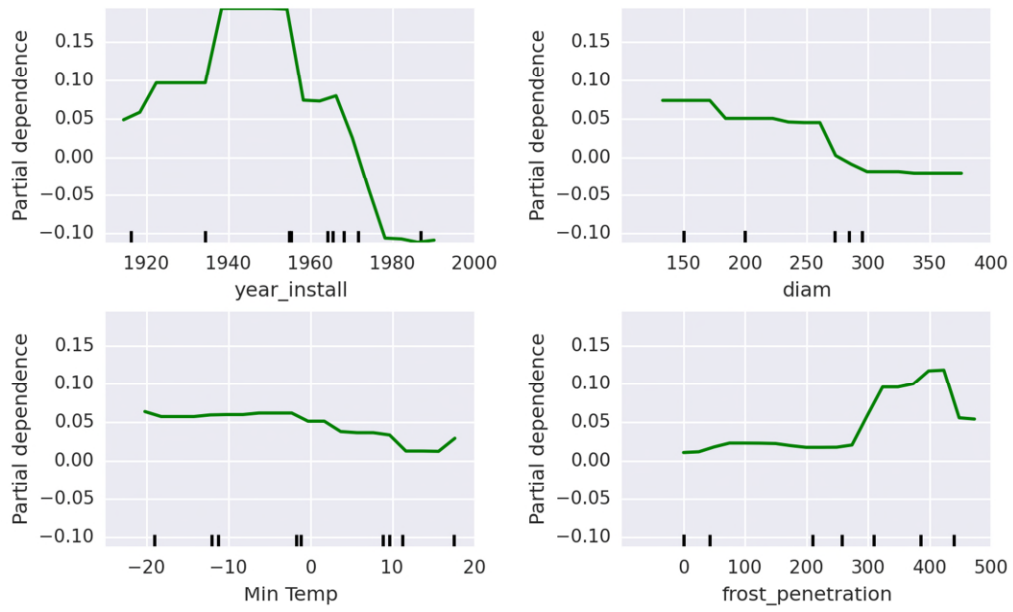
Vervolgens zijn van de grijs gietijzeren leidingen ook cohorten gemaakt op basis van diameter en jaar van aanleg (Bijlage IV). Hieruit volgen vergelijkbare relaties met temperatuur als bij alle grijs gietijzeren leidingen. De effecten lijken wel sterker te zijn bij de kleinere diameters en de leidingen van 30-70 jaar oud.

Vervolgens is een multicriteria-analyse uitgevoerd waarbij alle parameters (materiaal, diameter, leeftijd en weer) tegelijk zijn meegenomen om de faalfrequentie te kunnen verklaren. Hiervoor zijn cohorten geformuleerd met diameterklassen van 0,120,150,200,300 and 600 mm, jaar van aanleg klassen tussen 1850,1940,1960,1980 and 2010, leidingmaterialen grijs gietijzer (CI), nodulair gietijzer (DI), AC en PVC, en 6 temperatuurklassen. Dit leidde tot 143 cohorten waarin storingsen aanwezig zijn. De cohorten met minder dan 4 storingsen zijn eruit gefilterd, omdat de onzekerheid in de berekende frequentie dan te groot wordt, zodat er 92 cohorten overblijven. Faalfrequenties van deze cohorten zijn gecorreleerd met de parameters materiaal, diameter, leeftijd, temperatuur en vorstindringingsdiepte aan de hand van niet-lineaire statistische modellen. Hiervoor is het regressiemodel gbr (gradient boosting regression) gebruikt (zie paragraaf 3.2.5), welke een fit gaf met een R^2 van 0.8, wat aangeeft dat 80% van de variatie in de storingsfrequentie verklaard kan worden door de parameters.

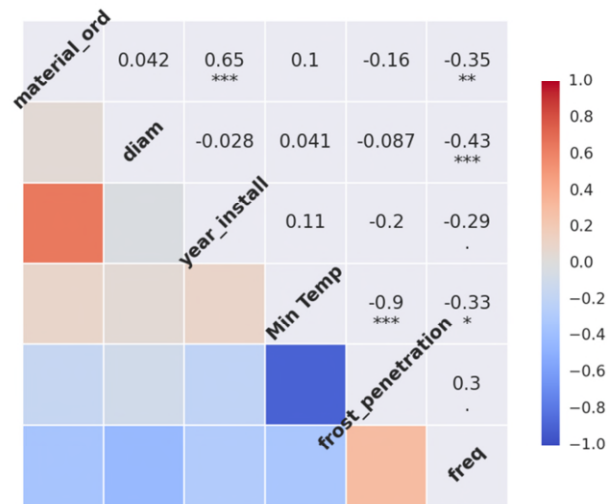
De relatieve invloed van iedere parameter op de faalfrequentie is weergegeven in Figuur 5.8. Jaar van aanleg is hierin de belangrijkste parameter, gevolgd door temperatuur, diameter en vorstindringing. De invloed van leidingmateriaal is klein, omdat de meeste leidingen uit gietijzer bestaan en er daarnaast een sterke correlatie is tussen leidingmateriaal en jaar van aanleg (Figuur 5.10), zodat het effect van leidingmateriaal ten dele al verklaard wordt door jaar van aanleg. De afhankelijkheid van iedere parameter om de storingsfrequentie te verklaren is weergegeven in Figuur 5.9. Dit kan als volgt geïnterpreteerd worden: een grotere afhankelijkheid betekent een hogere faalfrequentie. De hoogste faalfrequenties komen voor bij leidingen uit 1940-1960 en kleine diameters. De afhankelijkheid van temperatuur en vorstindringingsdiepte is vergelijkbaar met de eerder gevonden resultaten in Figuur 5.7.



Figuur 5.8 Relatieve invloed van iedere parameter op de faalfrequentie



Figuur 5.9 Afhankelijkheid van iedere parameter in het verklaren van de storingsfrequentie.



Figuur 5.10 Lineaire correlatie tussen de parameters gebruikt in de regressie.

5.4 Discussie

De resultaten een op een vergelijken met Nederland is lastig, omdat de omstandigheden verschillend zijn. Zo liggen de leidingen in Canada veel dieper in de grond. Wel zijn een aantal vergelijkbare trends waarneembaar. De resultaten uit Canada laten met name een effect van weer op storingen zien bij lage temperaturen. Dit is vergelijkbaar met wat we in Nederland zien bij de gietijzeren leidingen. De toename die we in Nederland zien bij hoge temperaturen is niet teruggevonden in de data van Canada en Zuid-Afrika. De diepere ligging van leidingen in Canada speelt hier mogelijk een rol.

Daarnaast laat de data van Zuid-Afrika ook meer storingen zien als het natter wordt. In Nederland zagen we eerder het omgekeerde: een kleine toename gedurende droge perioden. Mogelijk dat vanwege het drogere klimaat in Zuid-Afrika de natte periodes leiden tot opzwellen van de grond en daarmee extra belastingen op de leidingen, zoals in de literatuur wel bekend is (Gould et al. 2011)

6 Synthese

6.1 Inleiding

De belangrijkste klimaatfactoren voor het storen van het distributienet, die in de statistische analyses zijn gevonden, zijn temperatuur, wind en droogte en zetting. De vraag is hoe deze weerparameters gaan veranderen in de toekomst en welk effect dit heeft op het leidingnet.

6.2 Verwachte klimaatverandering

Klimaatveranderingen zijn moeilijk te voorspellen en daarom wordt vaak uitgegaan van een set van toekomstscenario's. Zo hanteert het KNMI 4 verschillende toekomstscenario's voor Nederland, gebaseerd op recente mondiale prognoses van het IPCC. Prognose W_H die uitgaat van de grootste wereldwijde temperatuurstijging (+2°C rond 2050 en +3,5°C rond 2085 ten opzichte van de referentieperiode 1981-2010) en grootste verandering in luchtstroombatroom heeft de grootste consequenties voor temperatuurveranderingen in Nederland.

Volgens de KNMI klimaatscenario's zijn de te verwachten veranderingen in de wind klein (Tabel 6.1). Dit is gebaseerd op de verwachte windpatronen in de winter. Wel neemt de kans op zware zomerse buien toe, en daarmee mogelijk lokaal hoge windsnelheden. Die zijn mogelijk relevant, omdat hier bomen kunnen omwaaien en daarmee leidingen beschadigen. Hiervoor zijn echter geen kwantitatieve voorspellingen gemaakt door het KNMI. De verwachte veranderingen in temperatuur zijn groot. Zowel de gemiddelde temperatuur in de winter als in de zomer gaat omhoog, en daarmee neemt ook het aantal koude dagen (vorstdagen en ijsdagen) sterk af, en het aantal zomerse dagen sterk toe. Ook de droogte (neerslagtekort) kan sterk toenemen (Tabel 6.1).

Tabel 6.1 Verandering in weerparameters voor de verschillende klimaatscenario's (KNMI '14 scenario's), KNMI (2014).

	2030	2050				2085			
		G_L	G_H	W_L	W_H	G_L	G_H	W_L	W_H
hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar (in de winter) (%)		-3	-1,4	-3	0,0	-2,0	-0,9	-1,8	+2,0
gemiddelde wintertemperatuur (°C)	+1,2	+1,1	+1,6	+2,1	+2,7	+1,3	+2,0	+3,2	+4,1
koudste winterdag per jaar (°C)		+2,0	+3,6	+3,9	+5,1	+2,7	+4,1	+5,6	+7,3
Verandering in aantal vorstdagen (min temp < 0°C) (%)		-30	-45	-50	-60	-35	-50	-70	-80
Verandering in aantal ijsdagen (max temp < 0°C) (%)		-50	-70	-70	-90	-60	-80	-90	<-90
gemiddelde zomertemperatuur (°C)	+0,9	+1,0	+1,4	+1,7	+2,3	+1,2	+1,7	+3,2	+3,7
dagmaximum zomertemperatuur (°C)		+0,9	+1,4	+1,5	+2,3	+1,0	+1,7	+3,0	+3,8
warmste zomerdag per jaar		+1,4	+1,9	+2,3	+3,3	+2,0	+2,6	+4,2	+4,9
UubhJ`nca YfgY`XU[Yb`fã Ul`Hya d` `` 25°C)		22	35	40	70	30	50	100	130
gemiddeld hoogste neerslagtekort (%)		+4,5	20	+0,7	30	+1,0	19	14	50

6.3 Voorspellen van toekomstige storingen als gevolg van klimaatverandering

Het regressiemodel (uit paragraaf 3.2.5) is gebruikt om een voorspelling te doen van het aantal storingen per jaar op de leidingen als de temperatuur gaat veranderen. Dit is gedaan voor de verschillende klimaatscenario's van het KNMI. Het aantal storingen is berekend op basis van ~91 000 km leidingnet (~75% van Nederland). Alleen de storingen op de leidingen zijn beschouwd, niet de storingen op de verbindingen. Voor de temperatuur is met behulp van het transformatieprogramma van het KNMI een tijdreeks gegenereerd van 30 jaar (http://www.klimaatscenario's.nl/toekomstig_weer/transformatie/index.html). Op basis van deze tijdreeks zijn 10 temperatuurklassen gemaakt en het gemiddeld aantal dagen per jaar berekend dat de temperatuur in deze klasse valt. Voor het regressiemodel zijn vervolgens cohorten gedefinieerd op basis van materiaal, diameter, aanlegjaar, grondsoort en temperatuur (zie paragraaf 3.2.5). Het regressiemodel geeft een voorspelling van de storingsfrequentie per cohort. Het aantal storingen per cohort is berekend door de frequentie te vermenigvuldigen met de leidinglengte per cohort en het aantal dagen per jaar dat de temperatuur binnen een bepaalde temperatuurklasse valt. In eerste instantie is een berekening uitgevoerd waarbij het leidingnet hetzelfde blijft, zodat alleen het effect van klimaatverandering duidelijk wordt. De resultaten zijn gesommeerd per leidingmateriaal (Tabel 6.2). Hierin valt te zien dat het aantal storingen bij AC en stalen leidingen wat toeneemt vanwege de hogere temperaturen, bij gietijzeren leidingen juist afneemt vanwege de mildere winters, en bij PVC en PE min of meer gelijk blijft. Netto is het effect op het totaal aantal storingen klein.

Daarnaast is een scenario doorgerekend waarbij al het AC vervangen is door PVC (

Tabel 6.3), waarbij de leeftijd en diameterklasse gelijk gehouden is. Dit leidt tot een lager aantal storingen, omdat PVC een lagere storingsfrequentie heeft dan AC. Daarnaast neemt het totaal aantal storingen iets af, omdat PVC niet gevoelig is voor temperatuur en bij gietijzeren leidingen het aantal storingen lager is door de hogere temperaturen.

Tabel 6.2 Verwachte aantal storingen per jaar (op de leidingen) als de temperatuur verandert volgens de klimaatscenario's van het KNMI en de samenstelling en leeftijd van het leidingnet gelijk blijft (totale lengte ~91 000 km).

	2014	2030	2050				2085			
			Ref	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L
AC	1144	1155	1161	1108	1161	1176	1116	1149	1189	1195
GGIJ	429	447	435	389	402	432	385	402	397	396
NG	47	45	45	43	45	45	44	45	44	44
PE	89	88	88	85	86	87	87	86	86	85
PVC	618	602	605	578	581	594	590	579	588	584
ST	252	268	268	260	280	279	264	277	280	277
Totaal	2579	2605	2602	2463	2555	2613	2486	2538	2584	2581

Tabel 6.3 Verwachte aantal storingen als de temperatuur verandert volgens de klimaatscenario's van het KNMI en al het AC vervangen is door PVC.

	2014	2030	2050				2085			
			Ref	G _L	G _H	W _L	W _H	G _L	G _H	W _L
GGIJ	429	447	435	389	402	432	385	402	397	396
NG	47	45	45	43	45	45	44	45	44	44
PE	89	88	88	85	86	87	87	86	86	85
PVC	1117	1104	1102	1060	1060	1095	1070	1056	1076	1074
ST	252	268	268	260	280	279	264	277	280	277
Totaal	1934	1952	1938	1837	1873	1938	1850	1866	1883	1876

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De fysieke kwetsbaarheid van ondergrondse leidingen voor klimaatverandering is onderzocht. Veranderingen in weerspatronen kunnen leiden tot veranderingen in belastingen op de leidingen en daarmee tot toename of afname van storingsfrequentie. Het waterverbruik van consumenten kan onder invloed van klimaatverandering veranderen en daarmee de interne druk in de leiding. Ook leidt een toename van grondzettingen door meer extreme periodes van droogte tot extra belastingen op de leiding. Daarnaast kunnen de materiaaleigenschappen veranderen als gevolg van veranderingen in bodemtemperatuur. Met behulp van statistische analyse op storingsgegevens is eerst onderzocht hoe de storingsfrequentie beïnvloed wordt door het weer op regionaal en lokaal niveau:

- Temperatuur heeft de grootste invloed op het falen van waterleidingen. Voor de materialen AC en (klein) staal neemt de storingsfrequentie toe bij toenemende temperatuur. Bij gietijzeren leidingen (zowel grijs als nodulair) neemt de storingsfrequentie sterk toe bij lage temperaturen. De materialen PE en PVC lijken ongevoelig voor temperatuurvariaties. De afhankelijkheid van temperatuur lijkt onafhankelijk te zijn van de leeftijd of diameter van de leiding. De temperatuurafhankelijkheid verschilt wel per regio: zo is de toename in storingsfrequentie bij lage temperaturen groter in het westen en noorden van het land (m.u.v. PVC), de toename in storingsfrequentie bij hoge temperaturen is sterker in het oosten van het land.
- Daarnaast is er een kleine afhankelijkheid van droogte. Bij een toenemend droogtetekort nemen de storingsfrequenties licht toe. Dit lijkt met name in klei en veengronden te gebeuren, zowel voor AC als PVC leidingen. Zettingen kunnen hier de oorzaak van zijn.
- Voor een lokaal gebied is onderzocht of er een verband is tussen zettingen en storingsfrequentie. Hier lijkt de storingsfrequentie groter te zijn voor leidingen die meer (verschil)zettingen ondergaan.
- Het effect van wind treedt pas op als de stormen zwaar genoeg zijn zodat er bomen omvallen. De wortels van omvallende bomen beschadigen dan de leidingen. Omdat de stormen zwaarder zijn in het westen en noorden zijn hier ook meer storingsfrequentie waargenomen bij zware stormen.
- Met een multicriteria-analyse is onderzocht hoe verschillende leidingparameters en weerparameters de storingsfrequentie verklaren. De parameters met de belangrijkste invloed op de storingsfrequentie zijn: materiaalsoort, gevolgd door aanlegjaar en daarna temperatuur.
- Uit analyse van buitenlandse storingsgegevens is geen sterke toename van de storingsfrequentie gevonden bij extreme hitte, wel een toename bij lage temperaturen (gietijzer) en gedurende natte periodes (in Zuid-Afrika met een relatief droog klimaat).

Ook is onderzocht hoe de druk verandert in periodes van warm weer en in hoeverre dit leidt tot een toename in spanningen op de leidingen. Hiervoor is gebruik gemaakt van leidingnetmodellering in het voorzieningsgebied Almere. Op basis van deze modelleringsresultaten wordt het volgende geconcludeerd:

- Een groter piekverbruik resulteert in een grotere drukverschillen en een groter spanningsverschil ten opzichte van een constante referentiedruk.
- De spanningsvariaties die samenhangen met deze drukveranderingen zijn klein (<3%) ten opzichte van de leidingsterkte (toelaatbare spanning van het materiaal). Het is daarom te verwachten dat spanningen als gevolg van mogelijke klimaatverandering alleen tot extra falen leiden voor kritische leidingen (aangetast of met hoge andere belastingen).
- Het is niet aannemelijk dat de (beperkte) veranderingen in leidingsspanningen een volledige verklaring vormen voor het waargenomen positieve verband tussen temperatuur en falende leidingen.
- De consequenties voor druk en spanning hangen samen met de manier waarop in een voedingsgebied de druk wordt gestuurd:
 - Als de druk constant wordt gehouden op de voeding(en) geldt dat de druk en spanning (ten opzichte van de voeding) afnemen met toenemende hydraulisch afstand tot de voeding(en). In dit geval is leidingfalen niet aannemelijk.
 - Als de druk constant wordt gehouden op een aantal referentiepunten in het leidingnet door de voedingsdruk aan te passen, is te verwachten dat de druk en spanning in het net toenemen met afnemende hydraulische afstand tot de voeding. In dit geval bestaat er een beperkte mogelijkheid voor leidingfalen als gevolg van toenemend (piek)verbruik als gevolg van mogelijke klimaatverandering.

Daarnaast is een analyse uitgevoerd waarin gemodelleerde drukgegevens (voor het gebied van Brabant Water en WML) gekoppeld zijn aan storingsgegevens. Hieruit volgt dat de storingsfrequenties toenemen bij leidingen met hogere drukken of drukverschillen over de dag, maar dat de leidingen met hogere drukken of drukverschillen geen sterke verband invloed laten zien van temperatuur.

Op basis van de statistische analyse is een inschatting gemaakt van het toekomstig aantal storingen voor verschillende klimaatscenario's van het KNMI. De verwachting is dat de toename in temperatuur tot weinig extra storingen zal leiden.

7.2 Aanbevelingen

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat het vervangen van AC een goede manier is om het leidingnet meer klimaatbestendig te maken. De weerparameter met de grootste invloed op storingen, namelijk temperatuur, wordt daarmee ondervangen. Gietijzeren leidingen zullen juist minder gaan storen bij de verwachte temperatuuroenames en zijn daarmee al klimaatbestendig. De verwachte toename in droogte en zettingen kunnen nog wel tot een toename in storingen leiden, maar dit zal per locatie sterk verschillen.

Daarnaast treden er meer storingen op bij zware stormen veroorzaakt door omvallende bomen. Het zwaarder worden van zomerstormen door klimaatverandering kan leiden tot extra storingen. Echter, klimaatadaptatiebeleid van gemeentes is vaak om meer bomen te plaatsen in steden. Aanbevolen wordt om hier als drinkwaterbedrijf rekening mee te houden (bijvoorbeeld in het contact met de gemeentes).

Op basis van de resultaten worden de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan:

- De invloed van het weer op storingen is duidelijk naar voren gekomen, echter de mechanismen hierachter zijn nog niet helder. Hiervoor is het nodig om meer omgevingsfactoren rond de buis mee te nemen in de analyses. Het verkrijgen van deze gegevens voor een groot gebied en met hoge nauwkeurigheid is echter een aandachtspunt.
- Onderzoek de invloed en mogelijke klimaatafhankelijkheid van drukgolven (waterslag). Daartoe kan het huidige spanningsmodel worden uitgebreid met dynamische spanningsberekeningen en de invloed worden vergeleken met de leidingsspanningen ten gevolge van de interne statische druk.
- Om de invloed van sturing te onderzoeken kan het leidingnetmodel worden uitgebreid met een sturingsscenario waarbij druk in een referentiepunt in het leidingnet constant wordt gehouden. De resultaten kunnen vervolgens worden vergeleken met het scenario voor constante druk op de voedingen (zoals berekend in de huidige studie). Om geografische afhankelijkheden beter te onderzoeken, kan de leidingnetmodelstudie worden uitgebreid met een model voor een landelijk gebied.
- Onderzoek de invloed van veroudering en aantasting van leidingen: Aangezien verouderingsprocessen materiaal-afhankelijk zijn, is het van belang de storingsgegevens hiervoor te corrigeren. Omdat klimaatinvloeden het meest merkbaar zijn voor kritische leidingen, is het van belang deze groep te identificeren, bijvoorbeeld op basis van materiaaltype, leeftijd en hydraulische situatie en omgevingsfactoren.
- Onderzoek het verband tussen zettingen en storingen uitgebreider. De huidige analyse is uitgevoerd over een relatief klein gebied met een beperkt aantal storingen. Als er over een groter gebied zettingsdata beschikbaar is, kunnen de verbanden tussen zettingen en storingen met meer nauwkeurigheid vastgesteld worden en kan daarnaast de invloed van leidingmateriaal en leeftijd meegenomen worden.
- De inschatting van het effect van klimaatverandering op storingen van leidingen is nu alleen gemaakt voor temperatuur. Het is ook aan te bevelen om voor droogte een inschatting te maken van de gevolgen op storingen voor toekomstige klimaatscenario's.
- Leidingen waarin (volgens de leidingnetmodellen) gemiddeld genomen een hogere druk) heerst lijken meer te storen. Nader onderzoek is nodig om dit te verifiëren, gebruik makend van gemodelleerde drukdata over een groter gebied en/of meetgegevens van drukken.

8 Referenties

- Agudelo-Vera, C. M., E. J. M. Blokker, P. W. J. J. van der Wielen and B. Raterman (2015). Drinking water temperature in future urban areas, KWR. BTO 2015.012, Nieuwegein, KWR Watercycle Research Institute.
- Bakker, M., Vreeburg, J. H. G., Rietveld, L. C., Blom, T., Van de Roer, M. (2012). The use of an adaptive water demand prediction model. 14th Water Distribution System Analysis Conference.
- den Besten, J., Maccabiani, J., Maljaars H., (2014) Correlatie tussen leidingbreuk en satellietmetingen van bodemdaling, H2O online, http://www.vakbladh2o.nl/index.php?option=com_easyblog&view=entry&id=166&Itemid=171
- Blokker, E. J. M. and E. J. Pieterse-Quirijns (2012). Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net. KWR 2012.017, Nieuwegein, KWR Watercycle Research Institute.
- Cirkel, G. (2007). Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector (Ch.3. Prognose inschatting watervraag).
- Collins, R. P., Boxall, J. B., Karney, B. W., Brunone, B., Meniconi, S. (2012). "How severe can transients be after a sudden depressurization?" Journal American Water Works Association: E243-E251.
- Van Daal en Wols (2012), Spanningsberekeningen voor leidingen als gevolg van grondleidinginteractie, BTO 2012.242(s)), Nieuwegein, KWR Watercycle Research Institute.
- Gould, S. J. F., F. A. Boulaire, S. Burn, X. L. Zhao and J. K. Kodikara (2011). "Seasonal factors influencing the failure of buried water reticulation pipes." Water Science and Technology 63(11): 2692-2699.
- Grondsoortenkaart (2006), Alterra WUR, <http://www.wageningenur.nl/nl/show/Grondsoortenkaart.htm>
- Hanssen, R. (2001), Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers.
- Hu, Y. and D. W. Hubble (2007). "Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains." Canadian Journal of Civil Engineering 34(5): 608-621.
- Kleiner, Y. and B. Rajani (2002). "Forecasting variations and trends in water-main breaks." Journal of Infrastructure Systems 8(4): 122-131.
- KNMI (2014): KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective; by Bart van den Hurk, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer

Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.climatescenarios.nl

KNMI '14 scenario's.

http://www.klimaatsscenarios.nl/brochures/images/Brochure_KNMI14_NL_2015.pdf

Mesman, G., (2015), Kennisregels PVC leidingen, KWR, BTO 2015.054, Nieuwegein, KWR Watercycle Research Institute.

Murdock, S. H., Albrecht, D. E., Hamm, R. R., Backman, K. (1991). "Role of sociodemographic characteristics in projections of water use." *Journal of Water Resources Planning and Management* 116(2).

Newport, R. (1981). "Factors influencing the occurrence of bursts in iron water mains." *Water Supply and Management* 3: 274-278.

Rajani, B. and S. Tesfamariam (2004). "Uncoupled axial, flexural, and circumferential pipe-soil interaction analyses of partially supported jointed water mains." *Canadian Geotechnical Journal* 41(6): 997-1010.

Stoker, P., Rothfielder, R. (2014). "Drivers of urban water usage." *Sustainable Cities and Society* 12: 1-8.

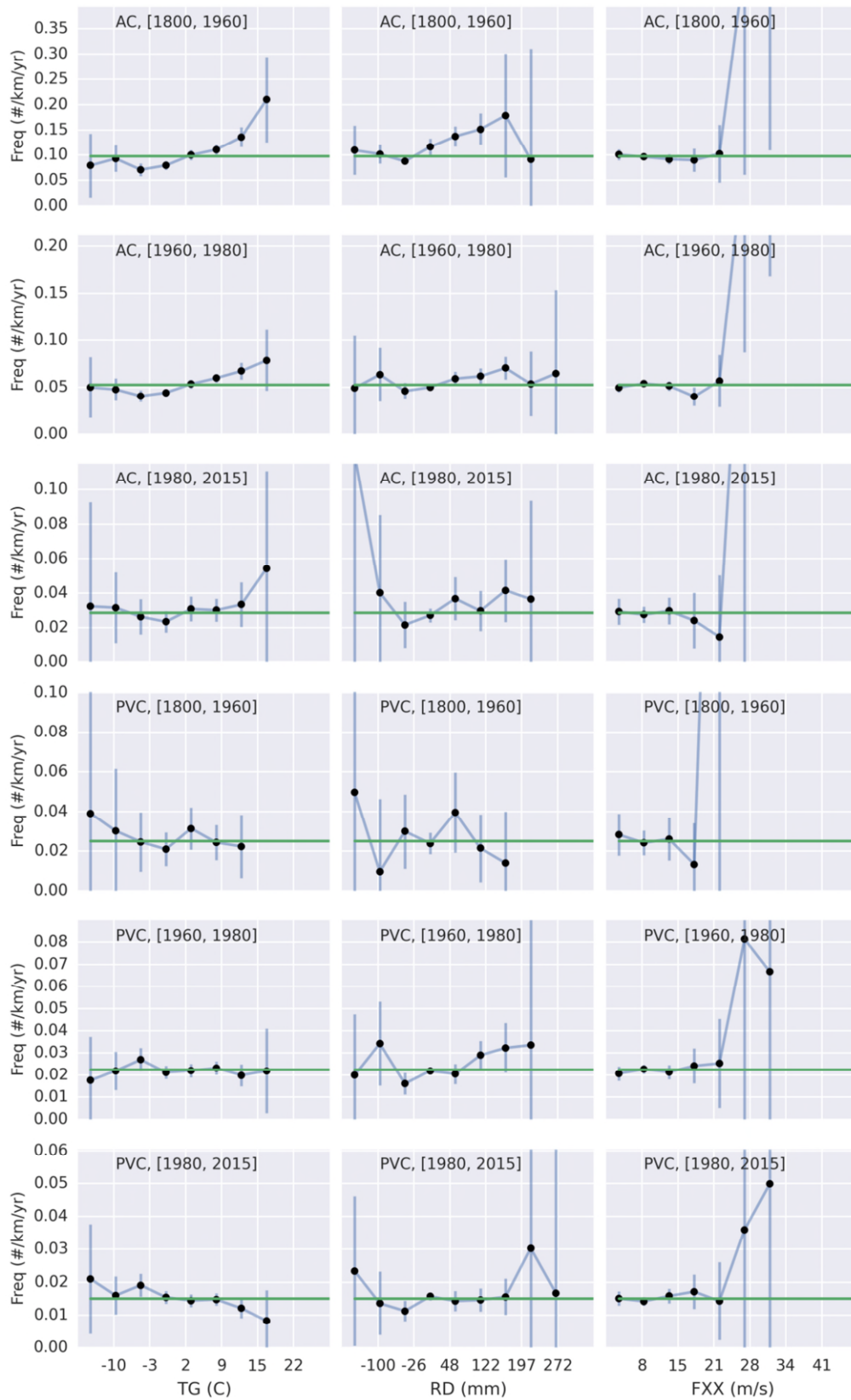
Van Thienen, P. (2012), Storingenregistratie en -analyse: Hoeveel storingen hebben we eigenlijk nodig?, memo op USTOREweb.

Wols, B. A. and P. Van Thienen (2014). "Impact of weather conditions on pipe failure: A statistical analysis." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 63(3): 212-223.

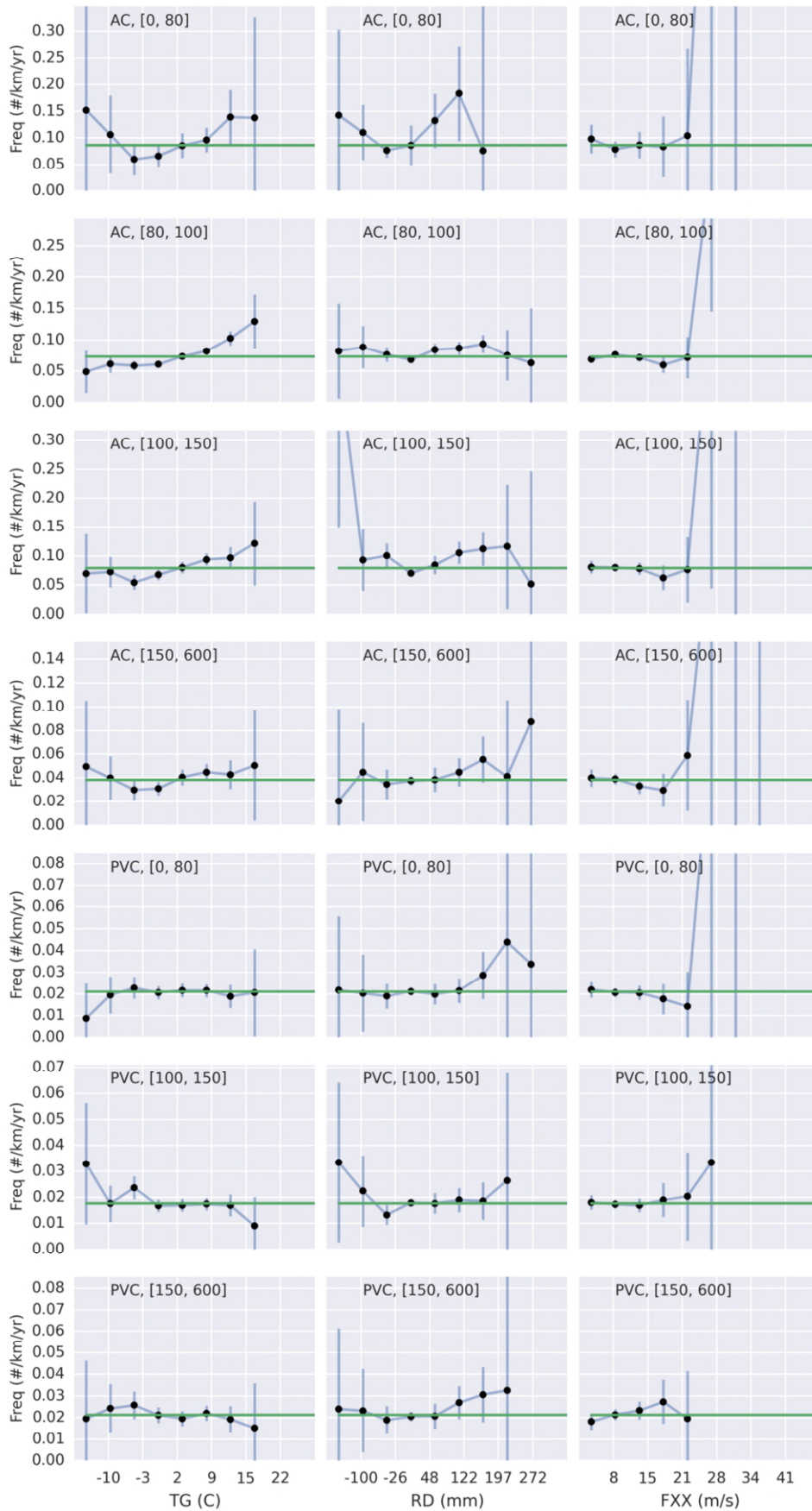
Wols, B. A. and P. Van Thienen (2014b). "Modelling the effect of climate change induced soil settling on drinking water distribution pipes." *Computers and Geotechnics* 55: 240-247.

Wols, B.A., Vertommen, I. and Moerman, A. (2015). Comsima: model voor spanningen op ondergrondse leidingen, KWR Watercycle Research Institute, BTO 2015.018.

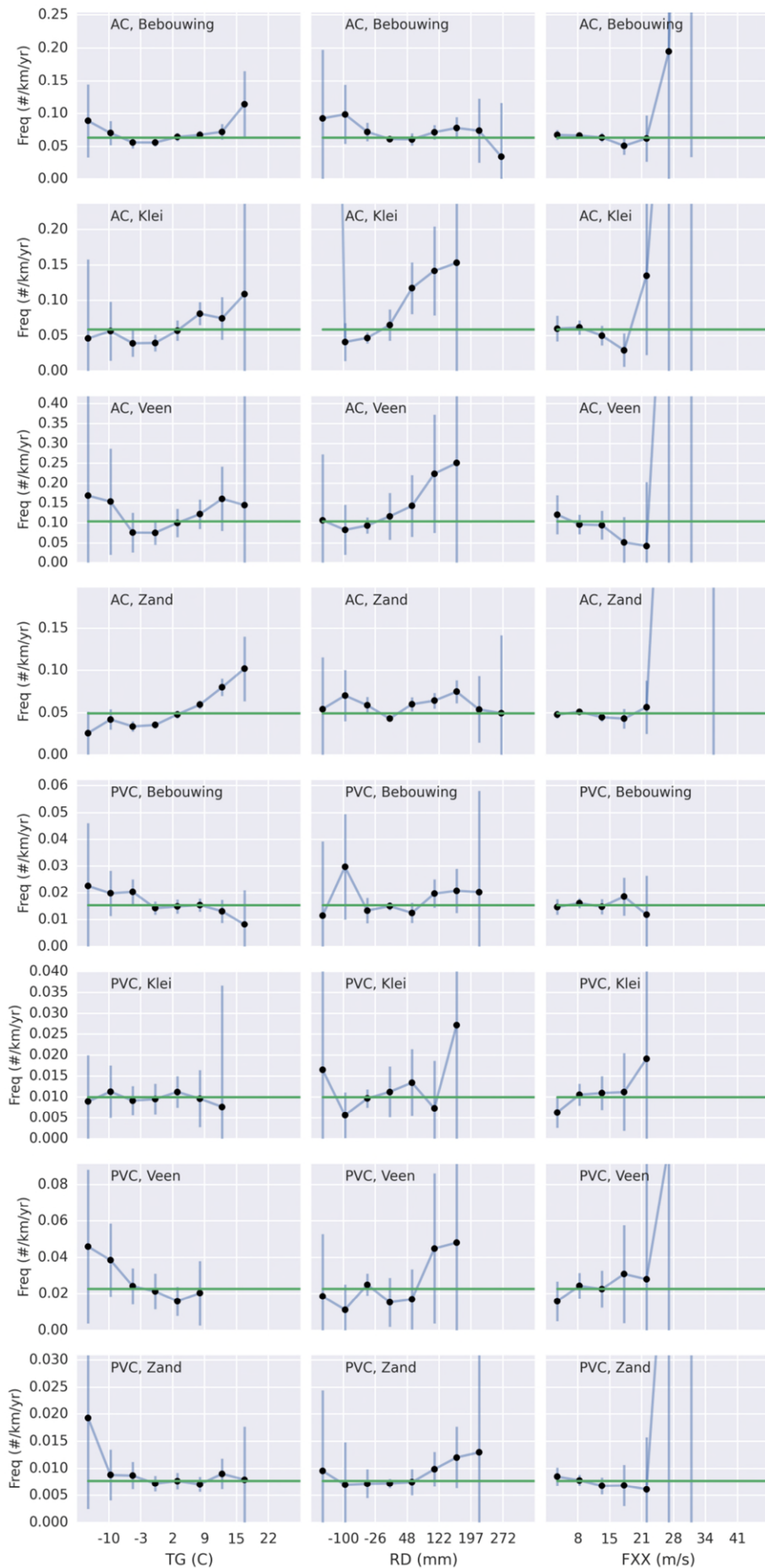
Bijlage I Regionale effect van klimaat op storingen



Figuur 1.1 Storingsfrequenties als functie van weerparameters: effect van aanlegjaar voor de materialen AC en PVC.



Figuur 1.2 Storingsfrequenties als functie van weerparameters: effect van leidingdiameter voor de materialen AC en PVC.

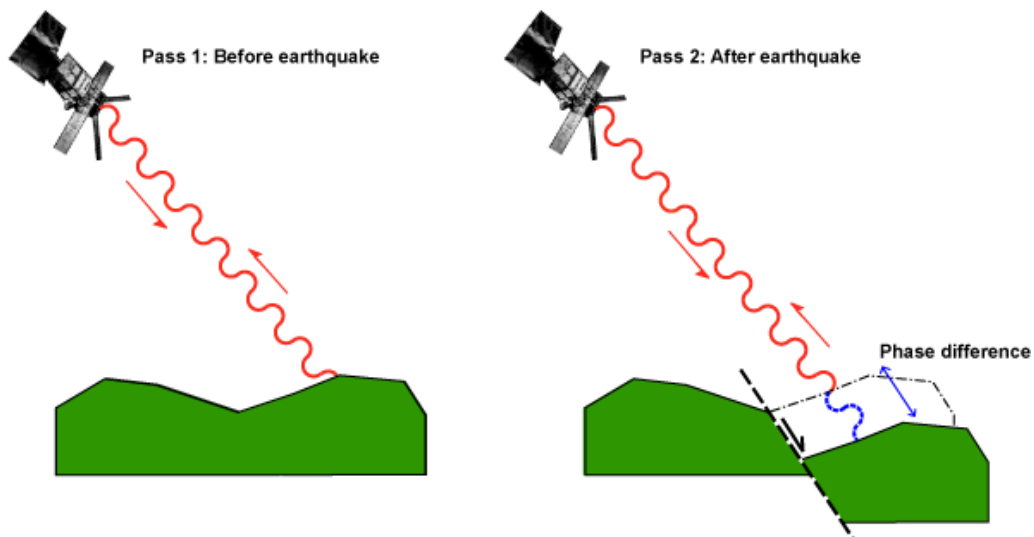


Figuur 1.3 Storingsfrequenties als functie van weersparameters: effect van bodemsoort voor de materialen AC en PVC

Bijlage II Remote sensing technieken

Gedetailleerde zettingsgegevens van SkyGeo

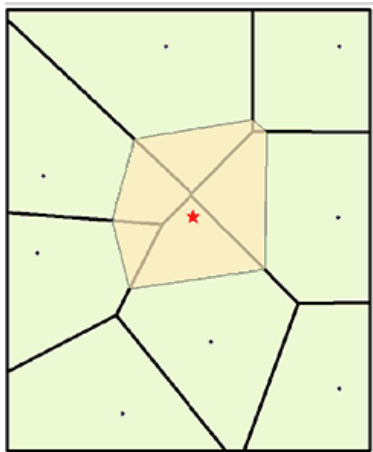
De informatie in deze paragraaf is mede samengesteld op basis van enkele gesprekken met medewerkers van het bedrijf SkyGeo (voorheen Hansje Brinker) uit Delft. SkyGeo is een spin-off vanuit de TU Delft. Het bedrijf verwerkt radarbeelden van satellieten (o.a. Envisat en Radarsat) met als doel om deformatie (zetting) in beeld te brengen. De gebruikte methode heet radarinterferometrie, hierbij wordt op basis van twee tijdstippen het verschil in afstand van de satelliet tot het aardoppervlak bepaald (Figuur II.4). Dit gebeurt door de faseverschillen in de gereflecteerde radargolven te analyseren. Hiervoor worden beelden gebruikt vanaf 1992 met een van de satelliet afhankelijke herhalingsperiode van 11 tot 35 dagen. Bruikbare reflecties kunnen komen van diverse objecten zoals lantaarnpalen, straatputdeksels etc. De precisie ligt in de orde van 1mm per jaar. De metingen zijn relatief. Dit betekent dat de reflectiepunten ten opzichte van elkaar moeten worden geïnterpreteerd. SkyGeo kiest binnen een bepaald gebied een aantal 'vaste' referentiepunten, zoals een goed onderhouden viaduct, waarvan de deformatie op 0 wordt gesteld. De punten waarvoor deformatiegegevens beschikbaar zijn, kunnen worden opgesplitst op basis van hoogte uit het AHN2. Hiermee kunnen grondpunten en gebouwpunten van elkaar worden onderscheiden. De ruimtelijke resolutie is met de Radarsatbeelden nog beperkt tot ca. 4x20 meter maar kan met de nieuwere satellieten tot 3x3 meter worden verfijnd.



Figuur II.4 Het meten van bodembewegingen op basis van fase verschillen in gereflecteerde radar golven (InSAR) Radarsatellieten sturen op verschillende tijdstippen golven naar hetzelfde punt op de grond. Als de bodem zich in de tussentijd heeft bewogen, zal het radarsignaal met een faseverschil terugkomen. Als de lengte van de golf van het radarsignaal bekend is, is het mogelijk om de precieze hoeveelheid bodembeweging te berekenen.

(Bron: <http://www.spaceoffice.nl/nl/Satelliettoepassingen/Technologie/RADAR/InSAR-en-SRTM/>).

SKyGeo levert punt data met deformatiegegevens. Voor een koppeling aan leidingen en storingsgegevens is het nodig om over vlakdata te kunnen beschikken. Er is geen eenduidige analysemethode bekend om deze puntdata op een goede wijze te interpreteren en te vertalen naar vlakdata. In het verkennend onderzoek "Methode-ontwikkeling voor gedetailleerde zettingskaarten" (B222001-020) zijn met behulp van ArcGIS vier geostatistische interpolatiemethoden uitgetest voor een geselecteerd proefgebied in Noord-Holland. De resultaten van de interpolaties vertonen een grote afhankelijkheid ten aanzien van de ruimtelijke verdeling van de punt data. In stedelijk gebied zijn er doorgaans meer bruikbare punten met reflecties beschikbaar dan in landelijk gebied. Van de onderzochte methoden bleek de "Natural Neighbor" methode (zie Figuur II.5) de voorkeur te hebben, vooral vanwege de eenvoud ten opzichte van alternatieve methoden.

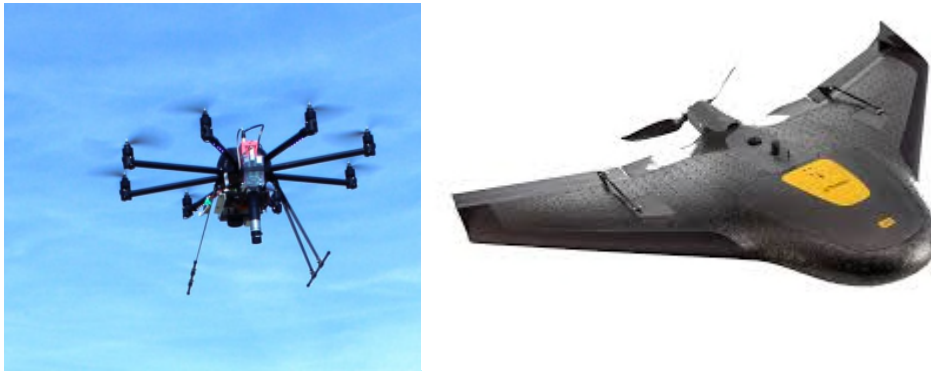


Figuur II.5 De Natural Neighbor interpolatie maakt gebruik van Thiessen polygonen om gewichtsfactoren te bepalen. Hoe meer overlap met de polygoon rond het te bepalen punt (rood), hoe meer gewicht de meting (zwart) krijgt (Bron: Esri ArcGIS10.1).

Bij het verkennend onderzoek bleek de ruimtelijke resolutie van de zettingsdata een beperkende factor te zijn bij het verder relateren van deze metingen aan leidingen en storingsgegevens. Recentelijk zijn echter meer gedetailleerde metingen beschikbaar gekomen. Deze zijn in het huidige onderzoek gebruikt. In dit project wordt voor een pilotgebied van Oasen gebruik gemaakt van de hoge resolutie radarbeelden (TerraSAR-X, 3x3 meter) die door SkyGeo zijn bewerkt. Ook hier moeten de puntdata naar vlakdata worden omgezet om een mogelijke relatie met storingsgegevens in het leidingnet te kunnen onderzoeken, zie verder paragraaf 3.3.2.

Toepassing van RPAS (drones)

Satellieten en bemande vliegtuigen vormen al meerdere decennia een zogenaamd 'platform' voor sensoren en camera's. De toepassing van een RPAS (Remotely Piloted Aircraft System, ook wel 'drone' genoemd) als platform is een belangrijke ontwikkeling die het inwinnen van zeer hoge resolutie (~2 cm) Remote Sensing beelden zeer flexibel en snel maakt. Er is een grote verscheidenheid in RPAS. Er zijn twee hoofdtypen; rotor based en fixed wing (zie Figuur II.6).



Figuur II.6 De octocopter van de WUR (links) en de Trimble UX5 fixed wing (rechts). Beiden hebben een spanwijdte van ca. 1 meter.

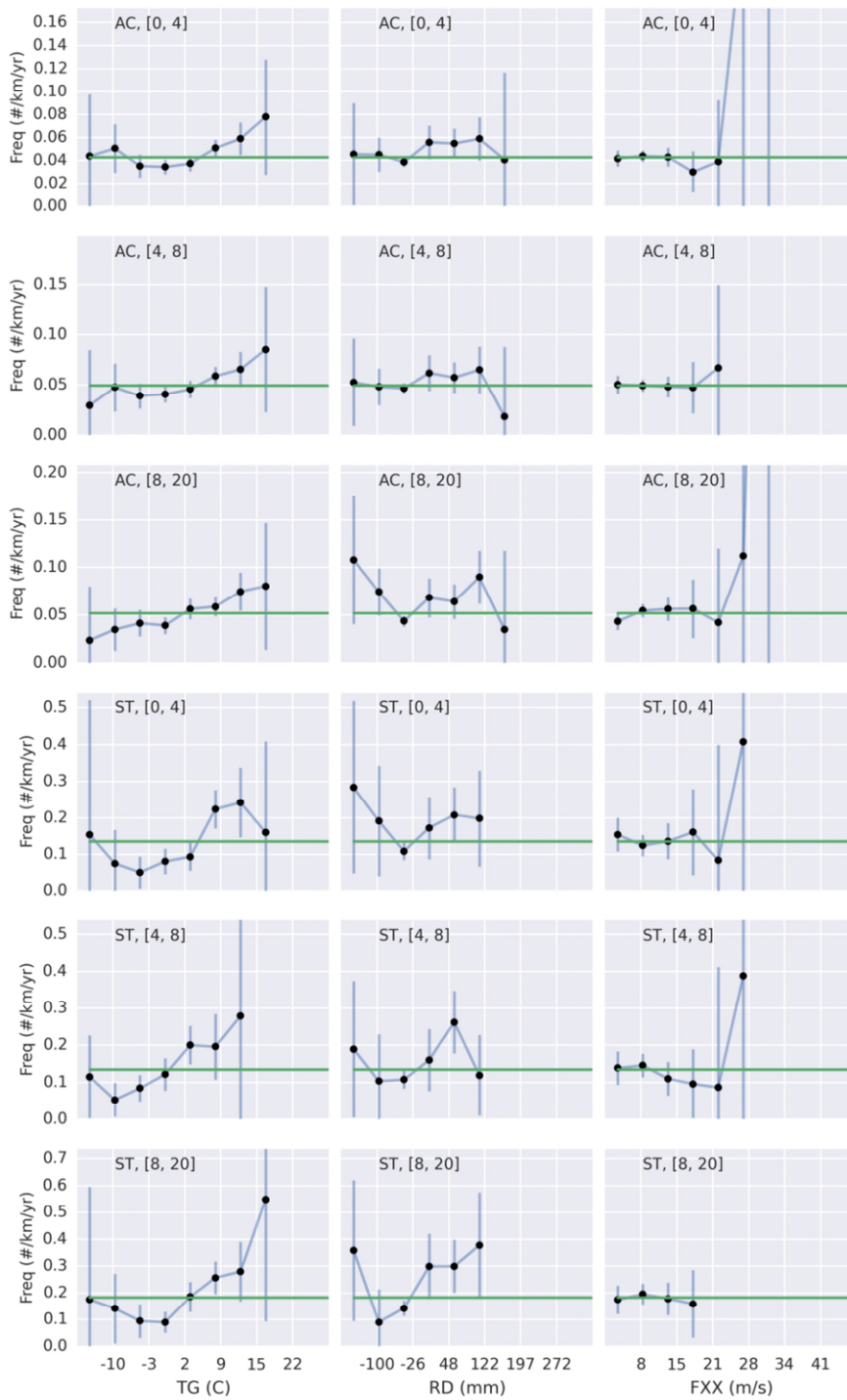
Binnen deze typen is de variatie in grootte, draagvermogen, vliegduur, kosten etc. enorm groot. Een fixed wing RPAS kan in één vlucht een groter gebied bestrijken maar is minder flexibel in de 'payload' (type sensoren) en besturing. Een rotor RPAS kan ook stil in de lucht hangen of rondom een installatie (bijv. een windmolen) vliegen.

De meest succesvolle commerciële toepassingen in Nederland op dit moment zijn te vinden binnen de civiele techniek en bij inspecties van infrastructuur en installaties. Enkele waterbedrijven gebruiken al een RPAS voor inspecties van gebouwen en terreinen. Bij deze inspecties wordt gebruik gemaakt van luchtfoto's of videobeelden die met een digitale camera worden gemaakt. Luchtfoto's kunnen met behulp van speciale software tot hoge resolutie 3D modellen worden omgerekend.

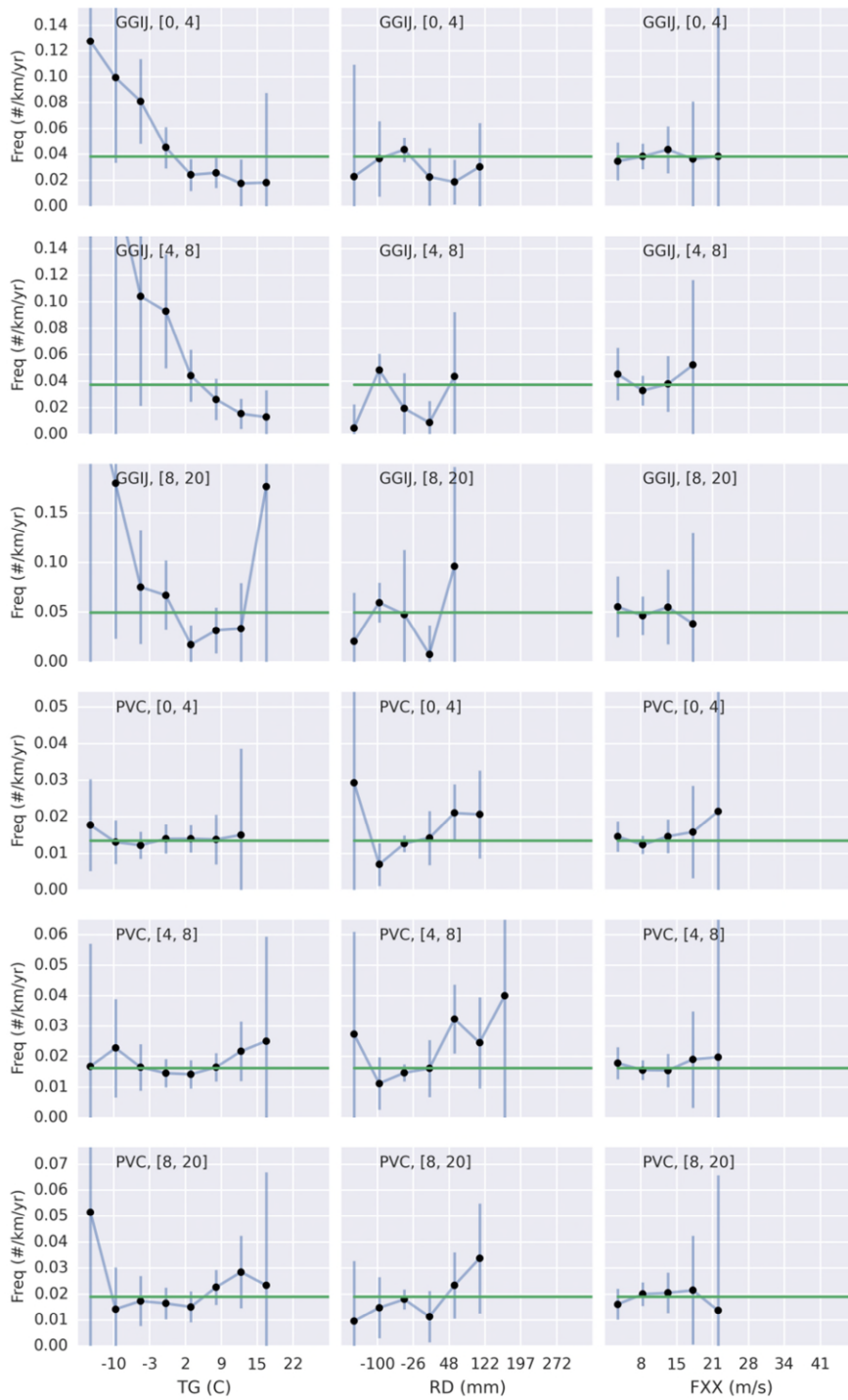
Met de ontwikkeling van steeds kleinere sensoren komen ook andere toepassingsgebieden binnen het bereik van het RPAS platform. Door een relatief eenvoudige camera-aanpassing kan naast het zichtbare licht (3 banden; rood, groen en blauw) ook het nabij infrarood (NIR) worden ingewonnen. Dit maakt het mogelijk om gewas- en vegetatieontwikkeling te volgen en plantenziektes op te sporen. Er zijn hoge verwachtingen als het gaat om toepassing van dit principe in de precisielandbouw. Er ontstaan dan ook veel kleine bedrijfjes die met een RPAS services aanbieden aan boeren. Mede door de (wijzigende) regelgeving is het moeilijk voor deze bedrijfjes om zich staande te houden.

In stedelijk gebied zijn de kansen voor inzet van RPAS door de watersector nog beperkt, afgezien van inspecties van bovengrondse infrastructuur. De verwachting is wel dat er binnen enkele jaren meer toepassingsmogelijkheden voor de ondergrond zijn. Door het inzetten van meerdere RPAS als een 'zwerm' kunnen mogelijk ook radargolven worden gebruikt waarmee op termijn zowel bodemzettingen als bodemvocht af te leiden zijn.

Bijlage III Effect van drukverschillen op storingen



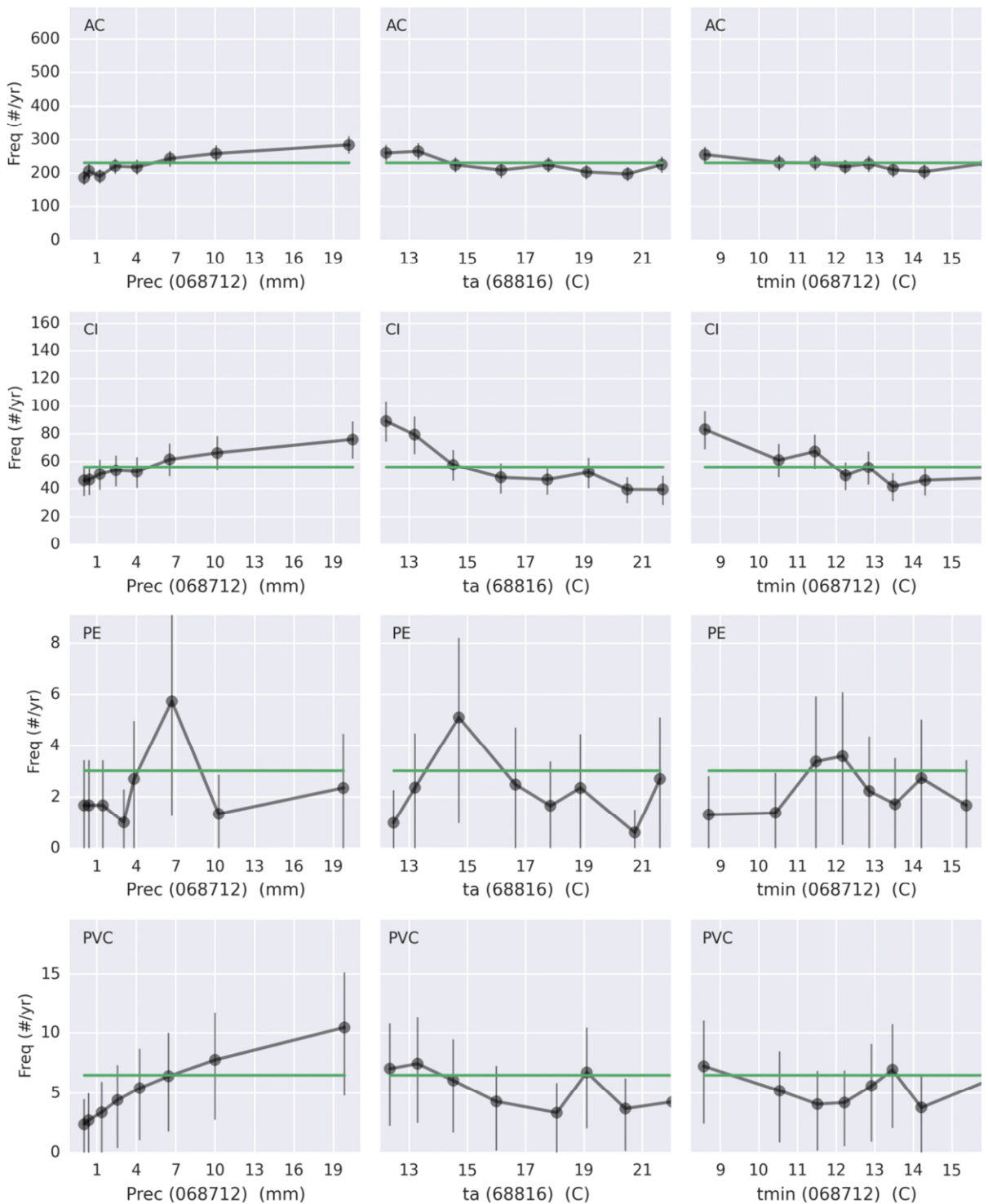
Figuur III.7 Effect van maximale drukverschil op een dag: Storingsfrequentie als functie van weerparameter voor AC leidingen en stalen leidingen bij drie maximale drukverschillen.



Figuur III.8 Effect van maximale drukverschil op een dag: Storingsfrequentie als functie van weerparameter voor grijs gietijzeren leidingen en PVC leidingen bij drie maximale druken.

Bijlage IV Resultaten klimaatextremen

Resultaten Zuid-Afrika (Kaapstad)



Figuur IV.9 Relatie tussen weer en storingen in Kaapstad (Prec: neerslagindex, ta: maandelijks gemiddelde temperatuur, tmin: dagelijkse minimumtemperatuur). Het weerstation is gegeven tussen haakjes.

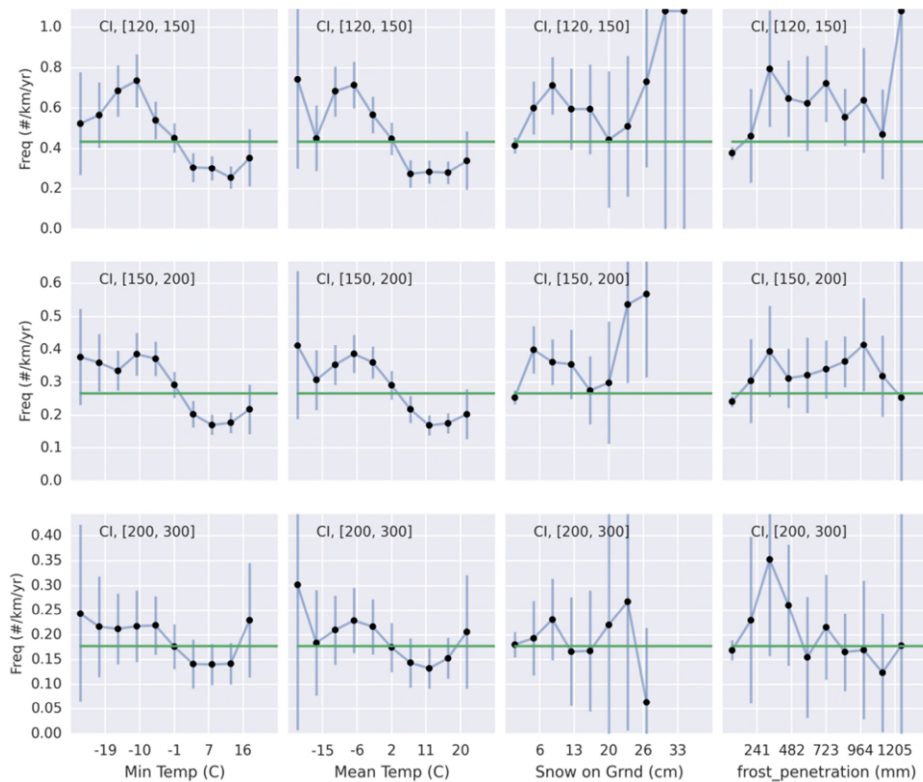
Resultaten Canada (Montreal)

Tabel IV.1 Aantal storingsen en storingsfrequenties voor verschillende diameters

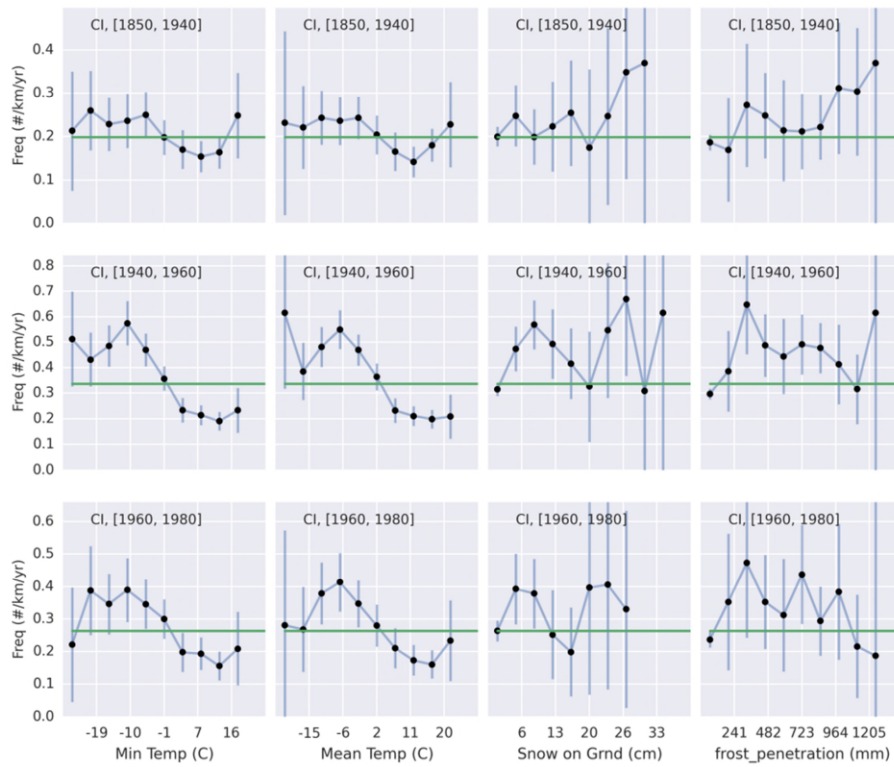
Diameter cohort [mm]	Aantal storingsen	Faalfrequentie (#/km/yr)
0, 120	69	0.240
120, 150	1718	0.290
150, 200	2288	0.206
200, 300	802	0.119
300, 600	143	0.053

Tabel IV.2 Aantal storingsen en storingsfrequenties voor verschillende jaren van aanleg

Diameter cohort [mm]	Aantal storingsen	Faalfrequentie (#/km/yr)
1850-1940	1038	0.188
1940-1960	2141	0.304
1960-1980	1335	0.162
1980-2010	231	0.038



Figuur IV.10 Storingsfrequentie als een functie van weerparameter voor verschillende gietijzeren leidingdiameters [mm] in Montreal.



Figuur IV.11 Storingsfrequentie als een functie van weerparameter voor verschillende jaren van aanleg van gietijzeren leidingen in Montreal.