

BTO 2016.031 | April 2016

## **BTO** rapport

**UKNOW**

Zicht op leidingdegradatie door samenhang in  
informatiesystemen



# BTO

**UKNOW; zicht op leidingdegradatie door  
samenhang in informatiesystemen**

**BTO 2016.031 | April 2016**

**Opdrachtnummer**

400554/072/002

**Projectmanager**

drs. P.G.G. (Nellie) Slaats

**Opdrachtgever**

BTO - Thematisch onderzoek - Assetmanagement

**Kwaliteitsborger(s)**

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

**Auteur(s)**

ir. A. (Andreas) Moerman, dr. ir. J. (Jojanneke) van  
Vossen, ir. R.H.S. (Ralph) Beuken

**Verzonden aan**

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is  
openbaar.

**Jaar van publicatie**  
2016

**Meer informatie**

ir. A. Moerman  
T +31 (0)30 6069 605  
E [andreas.moerman@kwrwater.nl](mailto:andreas.moerman@kwrwater.nl)

**Keywords**

Assetmanagement,  
beslissingsondersteuning,  
vervangingsbeleid

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](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



**BTO 2016.031 | April 2016 © KWR**

Alle rechten voorbehouden.

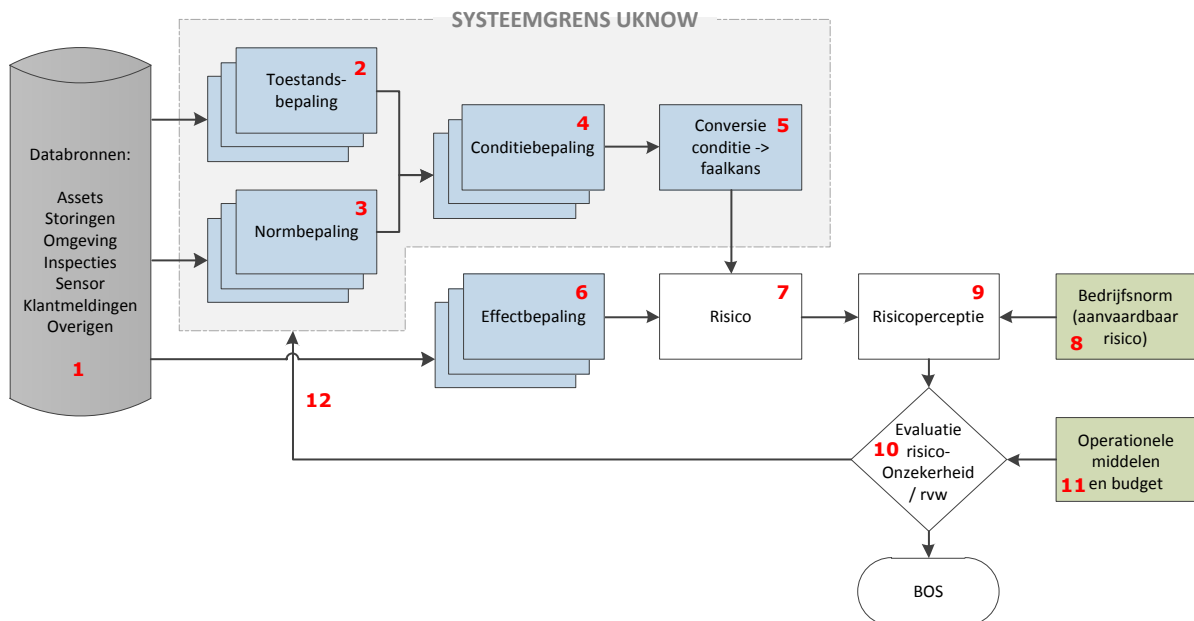
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# BTO Managementsamenvatting

## UKNOW: informatiearchitectuur om input voor beslissingsondersteunende software te verbeteren

**Auteurs** ir. A. (Andreas) Moerman, dr. ir. J. (Jojanneke) van Vossen, ir. R.H.S. (Ralph) Beuken

De beslissing welke leiding wanneer te vervangen is één van de belangrijkste vraagstukken voor assetmanagement van het leidingnet. Een leiding in goede conditie te vroeg vervangen is een vorm van kapitaalvernietiging, een leiding in slechte conditie te laat vervangen kan een forse kostenpost veroorzaken wanneer storingen optreden. Bij de planning van leidingvervanging gebruiken drinkwaterbedrijven beslissingsondersteunende software. Deze software heeft informatie nodig over het risico van falen. Binnen het project UKNOW is een informatiearchitectuur opgesteld die de samenhang weergeeft tussen verschillende databronnen over leidingconditie onderling en het analyseren van de data uit deze bronnen. Met deze informatiearchitectuur kunnen de drinkwaterbedrijven betere input voor beslissingsondersteunende softwarepakketten creëren, zodat beslissingen beter kunnen worden onderbouwd. In analogie met het project USTORE, waar de opslag van data centraal staat, noemen we deze architectuur UKNOW.



Architectuur voor UKNOW. Om tot een risicobepaling te komen wordt gebruik gemaakt van modellen voor de bepaling van (2) toestand, (3) norm, (4) conditie en (6) effect op basis van databronnen (1). Rvw = randvoorwaarden.

**Belang:** het nemen van de juiste vervangingsbeslissingen bespaart kosten

Bij beslissingen over welke leidingen wel en niet moeten worden vervangen gebruiken drinkwaterbedrijven beslissingsondersteunende software. De uitkomsten van deze modellen moeten ervoor zorgen dat de juiste leidingen

worden vervangen. Een leiding in goede conditie te vroeg vervangen is een vorm van kapitaalvernietiging, een leiding in slechte conditie te laat vervangen kan een forse en lastig te begroten kostenpost veroorzaken wanneer storingen optreden.

### Aanpak: risico-gestuurd & modelonzekerheid kwantificeren

De architectuur van UKNOW is opgezet als een kans-effect-risicoschema (Figuur 1). Daarmee sluit UKNOW aan bij het beleid en de risicomatrix van de drinkwaterbedrijven. Door het kwantificeren van modelonzekerheden tijdens de bepaling van faalkans (2-5) en effect van falen (6) ontstaat een beeld van de spreiding van uitkomsten van het risico (7). De beoordeling van dit risico (perceptie: 9) hangt af van de bedrijfsspecifieke normen (8). Op basis van het effect van falen ('in hoeverre heeft het falen van een leiding impact?') en de onzekerheid van het risico kan – al dan niet (8) – gekozen worden voor een vervolgtraject (12) van risicobepaling waarbij nauwkeurigere modellen worden ingezet (bijvoorbeeld met inspecties). De keuze voor een dergelijke aanvullende analyse is tevens afhankelijk van de operationele en financiële randvoorwaarden die volgen uit het bedrijfsbeleid (11).

### Resultaten: modellen voor toestand-, norm- en effectbepaling en modelonzekerheden

Om tot een risicogetal (7) te komen moet kennis beschikbaar zijn van zowel de kans op falen als het effect van falen. Bij de toepassing van fysische toestandsmodellen is een vertaalslag nodig tussen het conditiegetal – dat afhankelijk is van technische toestand en norm – naar de faalkans.

Er zijn verschillende modellen en methoden voor de bepaling van toestand ('wat is het huidige prestatieniveau van een (cohort) leiding(en)?'), technische norm ('wanneer bezwijkt een leiding?') en het effect ('wat zijn de gevolgen van leidingfalen'). Al deze modellen en methoden bevatten onzekerheden die leiden tot een spreiding in uitkomsten voor faalkans en effect. De belangrijkste typen modelonzekerheden zijn:

- a. meet- en registratiefouten;
- b. onvolledige datavoorziening op modelniveau;

- c. onbekende variatie van parameters onder modelniveau;
- d. (inherente) onzekerheid vanwege de modelopzet.

Op dit moment is niet duidelijk hoe groot de onzekerheid in de kennisregels is, en of daardoor wel de juiste vervangingsbeslissingen genomen worden. Daardoor kan het voorkomen dat er leidingen vervangen worden die mogelijk nog niet vervangen hoeven te worden. Om dit inzichtelijk te maken, is een kwantitatieve analyse van modelonzekerheden noodzakelijk.

### Implementatie: inzet van UKNOW leidt tot een meer rationeel vervangingsbeleid

Op dit moment worden sommige modelvarianten binnen het concept UKNOW al gebruikt als input voor saneringsmodellen, zoals het toepassen van faalkansen op basis van de USTORE registratie. Andere modellen – zoals het spanningsmodel Comsima – krijgen een steeds grotere rol in het besluitvormingsproces van drinkwaterbedrijven. De architectuur van UKNOW is bedoeld om de samenhang tussen modellen te verduidelijken, maar helpt tegelijkertijd ook om een overzicht te genereren van de samenhang van het onderzoek op het gebied van assetmanagement. Uit dit overzicht blijkt dat een aantal componenten uit UKNOW moeten worden ontwikkeld voor er gestart kan worden met een UKNOW pilot. Het belangrijkste voorbeeld van een dergelijke component is de relatie tussen toestand, conditie en faalkans. Na succesvolle uitvoering van een UKNOW pilot wordt daadwerkelijke implementatie van UKNOW mogelijk.

### Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Van leidingdata naar leidingkennis; een conceptarchitectuur voor UKNOW* (BTO-2016.031).

#### Meer informatie

ir. A. Moerman  
T +31 (0)30 6069 605  
E andreas.moerman@kwrwater.nl

#### KWR

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>2</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doel	3
1.3 Achtergrond en aanpak	4
1.4 Leeswijzer	5
<b>2 Beslissingsondersteuning: kaders, definities en onzekerheden</b>	<b>6</b>
2.1 Toestand, norm, conditie en degradatie	6
2.2 Risico, effect en kans	7
2.3 Modeltypen	9
2.4 Onzekerheid in modellen en data	14
2.5 Relatie tussen conditie en faalkans	16
2.6 Geografische analyses	16
2.7 Databronnen voor modellen	17
<b>3 Voorbeelden van modellen en hun onzekerheden</b>	<b>18</b>
3.1 Inleiding	18
3.2 Toestandsmodel KSLB 2.0	18
3.3 Toestandsmodel Comsima	23
3.4 Normbepaling	26
3.5 Effectbepaling	26
3.6 Discussie	28
<b>4 Architectuurconcept en aanbevelingen</b>	<b>29</b>
4.1 Beslissingsondersteunende systemen bij bedrijven	29
4.2 Architectuurconcept	30
<b>5 Functionele eisen en aanbevelingen</b>	<b>35</b>
5.1 Functionele eisen	35
5.2 Aanbevelingen	36
<b>Literatuur</b>	<b>38</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Welke leiding wanneer te vervangen is één van de belangrijkste vraagstukken voor de invulling van assetmanagement van het leidingnet. Het te vroeg vervangen van een leiding in goede conditie leidt tot kapitaalvernietiging. Het te laat vervangen van een leiding in slechte conditie leidt tot een hoger aantal spontaan optredende storingen en bijbehorende negatieve effecten voor klanten en het imago van het drinkwaterbedrijf. Om het moment van vervangen van leidingen (op basis van een verwachte restlevensduur) te bepalen, maken drinkwaterbedrijven gebruik van beslissingsondersteunende softwaremodellen. Deze software helpt de bedrijven om (1) te bepalen hoeveel leidinglengte er van een bepaald type leiding vervangen moet worden en (2) welke leidingen hierbinnen prioriteit verdienen. Voor deze analyse is het noodzakelijk om te kunnen voorspellen wanneer leidingen niet meer voldoen aan door de bedrijven gestelde criteria. Dit vraagt o.a. om inzicht in de conditie van de individuele assets in het drinkwaternet.

Uit een recent uitgevoerde evaluatie van de toepassingsmogelijkheden van beslissingsondersteunende software bij drinkwaterbedrijven bleek dat vooral de beschikbaarheid van goede en representatieve data over de conditie van leidingen het belangrijkste aandachtspunt is om te komen tot een betere inzet van dergelijke software (Beuken, 2013a).

Er zijn binnen het BTO door de drinkwaterbedrijven en KWR verschillende methoden en modellen ontwikkeld als hulpmiddel bij het bepalen van de conditie van een leiding en de kans op falen, zoals het Kennissysteem Levensduurbepaling (KSLB) (Beuken en Mesman, 2011) en het spanningsmodel Comsima (Wols et al., 2015). Naast deze modellen zijn ook verscheidene databronnen beschikbaar, zoals USTORE en de bedrijfseigen databases met inspectieresultaten van bijvoorbeeld metingen met thymolftaleïne. Componenten uit deze methoden en bronnen zijn tot nog toe afzonderlijk in verschillende onderzoeken beschouwd. Om tot een beter onderbouwd vervangingsbeleid te komen is er behoefte om methoden en databronnen in samenhang te beschouwen en daarbij aandacht te besteden aan onzekerheden. Daarnaast is er behoefte aan een duidelijk beeld van de onderlinge samenhang van deze modellen en is er behoefte aan het relateren van de toestand van een leiding aan het te verwachten aantal storingen.

## 1.2 Doel

Het doel van dit project is het beschouwen van een informatiearchitectuur die de samenhang tussen verschillende databronnen over de leidingconditie weergeeft, waarmee drinkwaterbedrijven kunnen komen tot betere input voor beslissingsondersteunende softwarepakketten en daarmee een beter onderbouwd saneringsbeleid. In analogie met USTORE, waar de opslag van data centraal staat, noemen we dit concept UKNOW. UKNOW dient drinkwaterbedrijven te helpen om:

- te bepalen hoe verschillende modellen (voor het bepalen van de conditie van leidingen en de kans op een leidingbreuk) zich tot elkaar verhouden en welke onzekerheden deze modellen bevatten;
- welke modellen het meest geschikt zijn om tot een gewenste uitkomst per situatie te komen;

- inzicht te krijgen welke modellen/componenten ontwikkeling verdienen.

**De eerste stap om te komen tot een concept voor UKNOW is het opstellen van een informatiearchitectuur. Deze architectuur is in dit project ontwikkeld.**

### 1.3 Achtergrond en aanpak

Beperkingen van de huidige besluitvormingsprocessen met betrekking tot het vervangen van leidingen zijn dat deze (Beuken, 2013b):

- uit veel componenten bestaan waarbij het niet altijd duidelijk is wat de samenhang is (complexiteit);
- schaars zijn aan data, veel data van ondergrondse infra met een lange levensduur is niet bekend;
- veel onzekerheden kennen: vanwege de dataschaarste en modelonzekerheden worden veel aannamen gedaan, zonder dat het effect hiervan op de uitkomsten gekwantificeerd is.

Het concept van UKNOW is bedoeld om bovengenoemde beperkingen zo veel mogelijk teniet te doen. Komen tot een betere besluitvorming door beter zicht op de fysische processen van leidingdegradatie en hun onderlinge samenhang is hierbij het uitgangspunt. Om dit mogelijk te maken worden de onderstaande oplossingsrichtingen onderscheiden:

#### A. Aanbrengen van samenhang in het besluitvormingsproces en de daarvoor

**benodigde input.** Als uitgangspunt voor de samenhang van het besluitvormingsproces wordt een risicobenadering gehanteerd. Deze keuze sluit aan bij de besluitvormingsprocessen van drinkwaterbedrijven over leidingsaneringen. De basis van een risicobenadering is gebaseerd op een zogenaamde ongewenste gebeurtenis. Een ongewenste gebeurtenis is te definiëren als een voorval dat negatieve gevolgen heeft of kan hebben op het behalen van de beoogde doelstellingen<sup>1</sup>. De ongewenste gebeurtenis die bij UKNOW centraal staat is een leidingbreuk die negatieve gevolgen kan hebben op het realiseren van de door het drinkwaterbedrijf gestelde doelen, zoals de onderbreking van de levering van kwalitatief goed drinkwater. Het risico is gedefinieerd als de kans op een ongewenste gebeurtenis maal het effect van de ongewenste gebeurtenis. Om een risico te kwantificeren is kwantitatieve informatie van enerzijds kans en anderzijds effect dus noodzakelijk. Wanneer er sprake is van een asset waarbij het *effect* van falen groot is en er veel onzekerheid is wat betreft de *kans* van falen kan mogelijk een alternatief model ingezet worden om de faalkans te bepalen met daarbij een kleinere onzekerheid. Binnen het concept UKNOW wordt de samenhang tussen verschillende modellen expliciet gemaakt.

Om te komen tot een concept voor UKNOW wordt gebruik gemaakt van modellen voor 'toestand', 'norm', 'conditie', 'kans', 'risico' en 'effect', deze begrippen worden verder uitgewerkt in Hoofdstuk 2. Deze sluiten enerzijds aan op de grootheden die de uitkomsten vormen van door KWR ontwikkelde modellen en anderzijds op de grootheden die de input vormen voor de risicobenadering van de drinkwaterbedrijven.

#### B. Verzamelen van meer data over de degradatie van leidingen.

In het BTO zijn verschillende projecten gaande die de oplossingsrichting 'verzamelen van meer data' verkennen. Hierbij kan worden gedacht aan USTORE, exitbeoordelingen, leidinginspecties en robots. Deze oplossingsrichting wordt in dit rapport niet verder uitgewerkt. Wel wordt aandacht besteed aan hoe de verschillende bronnen gezamenlijk ingezet kunnen worden.

<sup>1</sup> [www.risicomanagement.nl](http://www.risicomanagement.nl), laatst bezocht op 12 januari 2016



**C. Reduceren van onzekerheden van data en modellen.** In de prioritering van leidingsaneringen is er momenteel een grote onzekerheid over de toestand van leidingen, de normconditie en de effecten van falen. Deze onzekerheden leiden tot een onzekerheid in de uitkomst van het risico en daarmee ook tot een onzekerheid in de prioritering van leidingsaneringen. Het expliciet maken (en daarna - waar nodig - gericht reduceren) van deze onzekerheden is een van de uitgangspunten van UKNOW. Hiermee kan een verbeterd proces van prioritering en besluitvorming tot stand komen.

#### 1.4 Leeswijzer

Om te komen tot betere input voor beslissingsondersteunende softwarepakketten is het van belang om na te gaan: (1) waaruit die input bestaat, (2) wat de relevante kaders en definities zijn en (3) welke onzekerheden gedefinieerd kunnen worden. Deze aspecten worden beschreven in hoofdstuk 2.

Modellen geven een schematische weergave van de werkelijkheid en kunnen bedrijven ondersteunen om complexe besluitvormingsprocessen te ondersteunen. Momenteel is er een aantal meer specialistische modellen die de fysische processen beschrijven van leidingdegradatie en falen die in combinatie kunnen worden ingezet om beslissingen te ondersteunen. In hoofdstuk 3 worden deze modellen behandeld en wordt aangegeven wat de specifieke input en output is en aan welke onzekerheden deze modellen onderhevig zijn. Hierbij zijn modellen ingedeeld naar de bepaling van de toestand, norm en effect. Hoofdstuk 4 geeft een kwalitatieve beschrijving van het concept UKNOW en sluit af met aanbevelingen voor vervolg.

## 2 Beslissingsondersteuning: kaders, definities en onzekerheden

### 2.1 Toestand, norm, conditie en degradatie

Het begrip toestand duidt op de technische staat van een leiding. De toestand is een momentopname en wordt gekwantificeerd in absolute hoeveelheden (bijv. aantal mm effectieve restwanddikte bij een AC leiding). Om een einde levensduur van een asset te bepalen is er ook een norm nodig. Deze norm is een beleidsmatige keuze op basis van (een combinatie van) eenheden zoals toelaatbare materiaalspanning, storingsfrequentie, OLM of kosten. De norm bevat meestal ook een veiligheidsfactor die afhankelijk is van het bedrijfsbeleid. Om de toestand en norm van een asset te bepalen zijn modellen nodig die deze beschrijven. Het begrip model moet hier breed opgevat worden: modellen kunnen variëren van een beschrijving op basis van expertkennis tot numerieke modellen. Hierop wordt verder ingegaan in hoofdstuk 3.

De conditie is de actuele toestand ten opzichte van de gekozen norm (minimale toestand). De conditie is dus een afgeleide van toestand en norm. De leiding is in goede conditie wanneer de toestand boven de norm is, waarbij er sprake is van voldoende marge tussen de huidige toestand en de norm. De conditie kan veranderen door een verandering in toestand of een verandering in norm (Figuur 2.1). Wanneer de norm in de tijd verandert (norm 1 → norm 2), neemt dus ook de conditie af (conditie 1 → conditie 2). Een norm kan op korte termijn veranderen wanneer de ruimtelijke inrichting op het maaiveld verandert (bijv. het verbreden van een weg waardoor de verkeersstroom toeneemt). De toename van kosten of een veranderende klantperceptie kunnen mogelijk leiden tot een meer geleidelijke verandering van een norm. De toestand kan veranderen onder invloed van omstandigheden (bijvoorbeeld, een gietijzeren leiding kan corroderen waardoor de leidingwand dunner wordt (en de leiding dichtgroeit door corrosieproducten), de toestand zal dan verslechteren en bij gelijk blijvende norm ook de conditie).

De conditie van een asset kan uitgedrukt worden in een bepaalde grootte (conditiegetal). Deze grootte is een ratio (dimensieloos getal) waarbij de noemer een initiële waarde of oorspronkelijke toestand representeert (waarde van parameter bij productie of installatie van de leiding, bijvoorbeeld de oorspronkelijke wanddikte), de teller representeert de actuele toestand. Voorbeelden van conditiegetallen zijn relatieve (rest)wanddikte (voor AC of grijs gietijzeren leidingen), relatieve (rest)weerstand tegen langzame scheurgroei (voor PVC leidingen) of de theoretisch maximaal opneembare spanning (berekende theoretisch actuele spanning gedeeld door de bezwijkspanning (vloei- of breukspanning)).

Omdat de conditie een verhouding is tussen toestand en norm is het conditiegetal zelf een dimensieloos getal. In formulevorm kan het conditiegetal als volgt omschreven worden:

$$C = \frac{T_t - T_n}{T_0 - T_n}$$

waarin:

C = conditiegetal

$T_t$  = toestand op tijdstip t

$T_0$  = toestand op tijdstip 0

$T_n$  = norm toestand

Wanneer de conditie kleiner of gelijk is aan 0 betekent dit het einde van de levensduur van de leiding. Op dat moment is  $T_t$  gelijk aan  $T_n$  en is er geen marge meer tussen de actuele toestand en de minimale toestand (norm). Wanneer op een zeker moment de norm verhoogd wordt - vanwege nieuwe bedrijfsrichtlijnen of leidingomstandigheden - kan een negatieve conditie ontstaan wanneer  $T_n$  groter is dan  $T_t$ .

Degradatie van een leiding is het verloop (afgeleide) van de toestand van die leiding over de tijd. Degradatie kan dus gedefinieerd worden als de toestandsvanandering over de tijd. Deze grootheid is in Figuur 2.1 toegelicht met het symbool  $\alpha$ . Voor bijvoorbeeld AC kan de degradatie uitgedrukt worden in mm uitloging/jaar. In formulevorm kan de degradatie als volgt omschreven worden:

$$\alpha = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{t,2} - T_{t,1}}{t_2 - t_1}$$

Waarin:

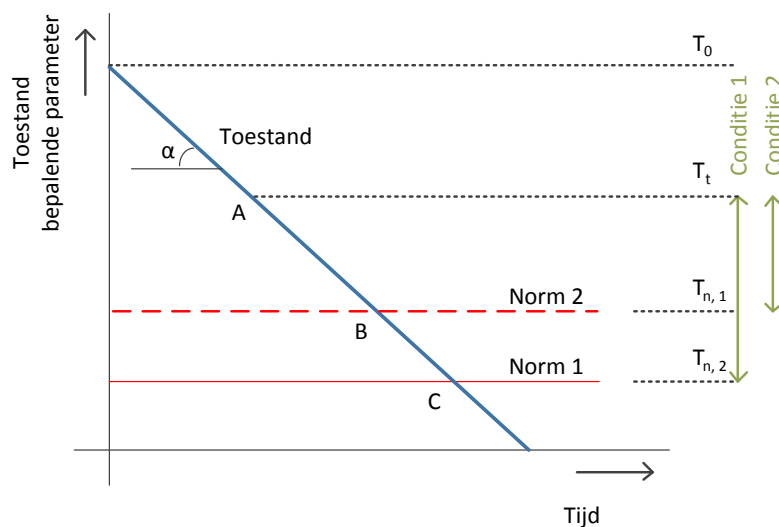
$\alpha$  = degradatie [afname toestand per tijdseenheid]

$T_{t,1}$  = toestand op tijdstip 1

$T_{t,2}$  = toestand op tijdstip 2

$t_1$  = tijd op tijdstip 1

$t_2$  = tijd op tijdstip 2



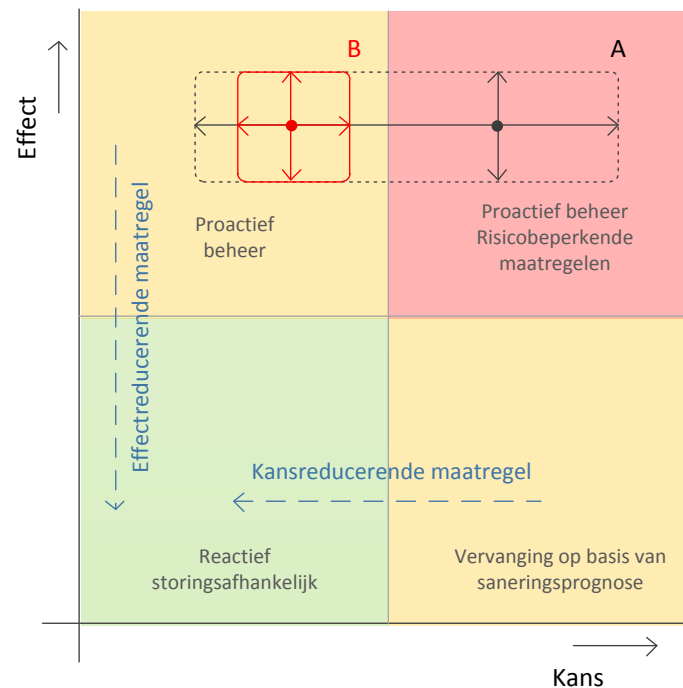
FIGUUR 2.1. THEORETISCH VOORBEELD WAARBIJ DE TOESTAND EN DEGRADATIE (HOEK ALFA) NIET VERANDERT, MAAR WAAR DOOR VERANDERENDE OMSTANDIGHEDEN (VERHOOGDE NORM) DE CONDITIE AFNEEMT.

## 2.2 Risico, effect en kans

Het risico dat verbonden is aan het falen van een leiding is uit te drukken als de kans op falen maal het effect hiervan. De kans op falen kan laag of hoog zijn en de gevolgen van het falen kunnen groot of klein zijn. Zodoende kunnen vier risicokwadranten beschreven worden (Figuur 2.2). Afhankelijk van het risico is een bepaald type beheer gewenst (de Kater et al., 2010).

Voor het bepalen van de kans op falen en het effect van falen worden modellen gebruikt. Deze modellen bevatten onzekerheden en aannamen omdat een model per definitie een vereenvoudiging van de werkelijkheid is. Ook de data die in deze modellen gebruikt wordt bevat onzekerheden. In paragraaf 2.4 wordt verder ingegaan op verschillende typen onzekerheden.

Gegeven deze onzekerheden is de positie van een asset in het kwadrantenschema geen punt maar een groep van punten (Figuur 2.2) waarvan de spreiding bepaald wordt door de onzekerheid in kans (horizontaal) en effect (verticaal).



FIGUUR 2.2 RISICOKWADRANTEN VAN DE RISICOMATRIX. GEBASEERD OP DE KATER ET AL. (2010).

Het expliciet maken van onzekerheden in modellen heeft twee voordelen:

- In plaats van het rekenen met één absolute modeluitkomst kan – na het expliciet maken van de spreiding van modelinput en het berekenen van de modeluitkomsten – bijvoorbeeld een minimum en maximum modeluitkomst gehanteerd worden. Dit geeft een beeld van de spreiding in uitkomsten en daarmee van de betrouwbaarheid van het model.
- Door kennis over de conditie van een asset te vergroten kan de onzekerheid van de faalkans mogelijk verminderd worden (Figuur 2.2; spreiding A → spreiding B). Het kan zijn dat hiervoor een alternatief model nodig is om de actuele toestand van de leiding nauwkeuriger te bepalen. In de hierna volgende tekst wordt hiervan een concreet voorbeeld gegeven.

Voor een bepaalde asset is de faalkans bepaald door analyses uit te voeren in USTORE. Hierbij hoort een bepaalde onzekerheid (Figuur 2.2; onzekerheid A). In USTORE worden faalfrequenties altijd over cohorten leidingen berekend. De initiële onzekerheid A is dus een uitkomst van toestandsbepaling (in dit geval een frequentieberekening met USTORE), of een toestandsbepaling die gebruik maakt van een faalfrequentie zoals het Kennissysteem Levensduurbepaling (KSLB). Ook is het effect van falen van de leiding bepaald. Omdat het

falen van de betreffende asset (vanwege bijv. ligging op een BEEL locatie) tot een hoog effect kan leiden en de onzekerheid van de faalkans groot is, is het zinvol om de onzekerheid van de faalkans te verkleinen. Dit wordt gedaan door het gebruik van een alternatieve toestandsbepaling; in dit geval een inspectie. Omdat met de inspectie een nauwkeuriger beeld van de individuele asset gevormd kan worden, geeft de tweede toestandsbepaling (inspectie) een nauwkeuriger beeld van de faalkans dan de initiële toestandsbepaling (USTORE). Nu blijkt ook dat de betreffende asset mogelijk niet in het kwadrant met het hoogste risico ligt, maar in het kwadrant links hiervan. Als gevolg hiervan hoeft de betreffende asset niet op korte termijn vervangen te worden. Dit voorbeeld laat ook zien dat alleen het expliciet maken van onzekerheden al waardevol kan zijn:

- Uit risicobepaling A zonder expliciete onzekerheid volgt dat de asset in het kwadrant met het hoogste risico ligt (rood). Op korte termijn is dan actie gewenst.
- Uit risicobepaling A met expliciet gemaakt onzekerheid volgt dat de asset mogelijk in een ander kwadrant ligt (rood of geel). Er kan dan overwogen worden om een nadere risicobepaling (B) uit te voeren om tot een kleinere risico-onzekerheid te komen.

## 2.3 Modeltypen

### 2.3.1 Inleiding

Een model is een schematische weergave van de werkelijkheid. In een wetenschappelijke context gaat het vaak om doorwerkingen van een mathematisch-logisch systeem. Een model kan formeel zijn (bijvoorbeeld een wiskundige vergelijking, een diagram of een tabel) of informeel (een beschrijving in woorden)<sup>2</sup>. In de context van dit onderzoek wordt met modellen in feite formele modellen bedoeld. Deze modellen zijn op verschillende manieren te classificeren. Een dergelijke classificatie zegt iets over de werking en uitkomst van een model en op welke manier een model gebruikt kan worden. We maken hier het onderscheid tussen deterministische en probabilistische modellen en tussen fysische en statistische modellen. Allereerst is er het onderscheid tussen deterministische en probabilistische modellen:

- Deterministisch betekent dat dezelfde input altijd dezelfde output oplevert, 1 plus 1 is altijd 2 en nooit 2,3 of 1,8. Er wordt geen rekening gehouden met onzekerheden in de input en ook in het model zijn geen onzekerheden meegenomen. Een deterministische wanddiktevoorspelling is bijvoorbeeld 10 mm na 70 jaar. Het KSLB 2.0 is hier een voorbeeld van.
- Probabilistisch betekent dat dezelfde input nooit helemaal dezelfde output oplevert. Dit is vergelijkbaar met een dobbelsteen; hoewel de kans op het gooien van een '4' gelijk is aan 1/6 is het niet zo dat er precies 1 op de 6 keer een '4' gegooid wordt. Een voorbeeld van een probabilistische wanddiktevoorspelling is '10 mm ±3 mm na 70 jaar'.

Een deterministisch model kan ook probabilistisch worden ingezet door meerdere berekeningen met realistische variaties in de input. De verschillen in de uitkomsten zijn dan een maat voor de invloed van de onzekerheden in de input<sup>3</sup>. Op vergelijkbare wijze kunnen de onzekerheden in modelparameters worden onderzocht. Dit is in feite een ensemble-benadering, vergelijkbaar met de "pluim"-berekening in weermodellen.

Aangezien modellen en data altijd onzekerheden met zich meebrengen zal er vaak een probabilistisch element in een analyse zitten. Er kan worden gesteld dat als één element in

<sup>2</sup> [https://nl.wikipedia.org/wiki/Model\\_\(wetenschap\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Model_(wetenschap)), laatst bezocht op 12 januari 2016.

<sup>3</sup> Zie ook [http://mod-est.tbm.tudelft.nl/wiki/index.php/Typologie\\_van\\_modellen](http://mod-est.tbm.tudelft.nl/wiki/index.php/Typologie_van_modellen), laatst bezocht op 13 november 2015.

een model probabilistisch is, het hele model probabilistisch is: de meegenomen onzekerheid in dat ene element weegt door in het eindresultaat.

Naast het verschil tussen deterministische en probabilistische modellen zijn er ook fysische en statistische modellen. Rajani en Kleiner definiëren deze in het kader van restlevensduurvoorspelling van leidingen als volgt (Kleiner en Rajani, 2001; Rajani en Kleiner, 2001):

- Statistische modellen maken gebruik van wiskundige patroonherkenning in historische storingsgegevens om voorspellingen te doen over het storingsgedrag van leidingen als functie van tijd.
- Fysische modellen beschrijven de structurele eigenschappen van een leiding op basis van fysische<sup>4</sup> en mechanische processen en geven daarmee een kwantificering van belastingen die optreden. Zodra een fysisch model aangeeft dat een leiding de optredende belasting niet aankan, is de verwachting dat een leiding faalt. Overigens kunnen ook fysische modellen (gedeeltelijk) met statistiek (bv. regressie) zijn bepaald, bijvoorbeeld de parameters in een fysische relatie voor een specifiek leidingtype.

### 2.3.2 Statistische modellen

In een statistisch model wordt een mathematisch model gefit aan waarnemingen. De uitkomst van een statistisch model is een voorspelling over de kans op een toekomstige waarneming in een leidingcohort dat is meegenomen in de analyse. Dit kan een enkele leiding zijn in welk geval de kans specifiek informatie geeft over de leiding in kwestie, maar ook een groep leidingen. De kans zegt dan iets over de groep als geheel en niet meer over de individuele leidingen waar de gegevens van afkomstig waren.

Veelgebruikte modellen om de faalkans van leidingen te voorspellen zijn (Kleiner en Rajani, 2001; Renaud et al., 2012):

- Lineaire regressie waarbij wordt aangenomen dat de faalkans lineair is en te fitten aan een set relevante factoren, zoals de leeftijd van een leiding, diameter, materiaal etc. Belangrijk is dat wordt aangenomen dat de storingsgegevens normaal verdeeld zijn.
- Niet-lineaire regressie, waarbij de aanname van de rechte lijn wordt losgelaten, een bekend alternatief is de aanname van een exponentiële relatie. Ook hier geldt de aanname dat de storingsgegevens normaal verdeeld zijn.
- Gegeneraliseerde lineaire regressie: hier wordt de aanname van de normaal verdeelde storingsgegevens losgelaten. De analyse wordt wel gelineariseerd door de aangenomen verdeling (bv. Poisson of Weibull) te koppelen aan de relevante factoren. In het geval van een Poisson-verdeling is het probleem te lineariseren door de logaritme te nemen van de storingsgegevens. Het voordeel van deze aanpak is dat gekozen kan worden voor een verdeling die beter aansluit bij de werkelijkheid van het optreden van storingsgegevens, bv. asymmetrisch i.p.v. symmetrisch rond een gemiddelde, alleen positieve data (er treedt nooit een storing op bij een leeftijd van -10 jaar).

Statistische modellen gaan meestal uit van cohorten leidingen op basis van gemeenschappelijke eigenschappen en/of omgevingskenmerken. Het bundelen van leidingen in homogene groepen (cohorten) heeft als voordeel dat betrouwbaardere resultaten gegenereerd kunnen worden. Bij het definiëren van cohorten doen zich twee vragen voor (Kleiner en Rajani, 1999):

---

<sup>4</sup> De aanduiding 'fysisch' wordt hier opgevat in brede zin, dat wil zeggen dat ook chemische en microbiologische processen hiervan deel uitmaken.

- A. Op basis van welke eigenschappen worden cohorten opgesteld?
- B. Tot welk detail wordt het leidingnet opgedeeld in cohorten? Meer cohorten leidt tot meer detail in de analyse maar ook tot minder data per cohort, waardoor de betrouwbaarheid van de statistische analyses over dit cohort afneemt. Minder cohorten leidt tot meer data per cohort, waardoor de betrouwbaarheid van statistische analyses toeneemt maar wel ten koste van de mate van detail.

Bij het definiëren van cohorten wordt gezocht naar een optimum tussen een zo specifiek mogelijk cohort om nauwkeurige uitspraken te kunnen doen en voldoende gegevens binnen dit cohort om betrouwbare uitspraken te kunnen doen.

Voor storingsgegevens kunnen de hierboven genoemde punten A en B bijvoorbeeld als volgt worden ingevuld:

- Punt (A) Bepaling van variabelen die van invloed zijn op het storingsgedrag van een groep leidingen, bijvoorbeeld door gebruik van (non-)lineaire regressietechnieken (statistisch model) of onderbouwing met fysische parameters (fysisch model).
- Punt (B) Het opstellen van een minimumeis voor de betrouwbaarheid van een analyse. Een voorbeeld van een dergelijke eis is een '95%-onzekerheidsmarge van 10%' (Van Thienen, 2012). Oftewel: we weten met 95% zeker dat de gemeten waarde (het aantal storingen in het cohort) minder dan 10% afwijkt van de werkelijke waarde.

Een andere manier om leidingen in te delen in cohorten is door gebruik te maken van geografische kenmerken. Hiervan is sprake wanneer groepen leidingen ingedeeld worden op basis van een gedeelde locatie/begrenzing (bijv. door afsluiters). Voorbeelden van dergelijke leidingcohorten (van fijn naar grof) zijn:

- enkele leiding;
- afsluitersectie;
- combinatie van afsluitersecties;
- wijk (bijvoorbeeld gedefinieerd door het CBS of een postcode-4-gebied).

De keuze voor één van deze niveaus beïnvloedt de mate van nauwkeurigheid voor een uitspraak over een cohort. Verder geldt dat wanneer het schaalniveau van een omgevingsparameter (bijv. grondsoort) kleiner<sup>5</sup> is dan bijvoorbeeld het niveau van een enkele leiding, het niet zinvol is om evaluaties uit te voeren op het niveau van een enkele leiding. Met andere woorden: het gekozen schaalniveau heeft niet de benodigde detaillering om een analyse op het niveau van een enkele leiding uit te voeren.

#### **Voordelen:**

Het is mogelijk om gegevens van individuele leidingen te gebruiken om voorspellingen te doen voor andere, vergelijkbare leidingen waar geen directe informatie over is. Specifieke data die nodig is om een fysisch model te gebruiken – en die mogelijk niet beschikbaar zijn of te kostbaar om te achterhalen – zijn niet nodig om een statistisch model te gebruiken.

#### **Nadelen:**

Er wordt een causale relatie aangenomen tussen de faalkansen en relevante factoren zonder dat daar a priori een fysische verklaring is ter onderbouwing. Dat suggereert dat er weinig

---

<sup>5</sup> Dat wil zeggen: minder gedetailleerd; bij een grote schaal wordt het af te beelden gebied groter weergegeven dan op een kleine schaal, zie ook <https://nl.wikipedia.org/wiki/Kaartschaal> (laatst geraadpleegd op 11 december 2015).

fysische kennis nodig is om werkbare resultaten te krijgen. Dit is om de volgende redenen niet het geval bij het storen van drinkwaterleidingen:

- Fysische kennis is nodig als onderbouwing om uit meerdere mogelijke oplossingen te kunnen redeneren wat relevant kan zijn. Wanneer deze onderbouwing uit de analyse volgt is er fysische kennis nodig om de resultaten correct te interpreteren. Bijvoorbeeld, om te bepalen welke factoren onafhankelijk zijn. Mogelijk volgt uit de analyse dat materiaal een relevante factor is, maar leeftijd niet verder bijdraagt of andersom. Het is dan belangrijk om te weten dat het gebruik van materialen gecorreleerd is aan specifieke tijdsperiodes en de factoren dus niet volledig onafhankelijk zijn.
- De waarde van de voorspellingen is erg afhankelijk van de keuze van de groep/samenstelling. Hierin zit een tegenstelling, er moeten namelijk voldoende waarnemingen in een groep zijn om een onderbouwde analyse te kunnen doen, maar de groep moet specifiek genoeg zijn om een homogene groep te vormen van daadwerkelijk vergelijkbare leidingen. Vaak zijn er zoveel potentieel relevante invloedsfactoren dat groepen erg klein zouden worden met te weinig data voor een goede analyse. Samenvoegen van een aantal parameters betekent een voorspelling met grotere onzekerheden (meer variabiliteit binnen de groep). Uitbreiden van het aantal groepen betekent dat er ook specifieke kennis moet zijn van de relevante parameters die die groep beschrijven. Zo is bij een onderverdeling naar bodemsoort kennis nodig over de specifieke eigenschappen van de bodem op de degradatie van leidingen.
- Statistische voorspellende modellen maken vaak gebruik van de tijd tussen optredende storingen van een asset. Een voorbeeld van een dergelijk model is het Non-Homogenous Poisson Process (NHPP). Dit model wordt in veel voorspellende modellen voor storingen van waterleidingen gebruikt (Kleiner en Rajani, 2010; Le Gat en Eisenbeis, 2000; Rogers, 2011). De afname van de tijd tussen storingen duidt op een afnemende conditie van de betreffende asset. Hierop kan een statistisch voorspellingsmodel gefit worden. Er zijn twee redenen waarom deze modellen in de Nederlandse situatie moeilijk toepasbaar zijn op het niveau van een enkele asset:
  - Er zijn niet voldoende storingen op een enkele asset om een voorspellend model te fitten. Voor de toepassing van het NHPP model zijn bijvoorbeeld minimaal 3 storingen nodig (Rogers (2011)).
  - In veel gevallen is het zo dat na een storing het storende buisdeel uitgenomen wordt en vervangen wordt door een nieuw buisdeel. Afhankelijk van de lengte van het uitgenomen buisdeel (ten opzichte van de lengte van de originele leiding) is het na reparatie niet meer correct om van één asset te spreken. Het gebruik van een voorspellend model wordt dan moeilijk omdat de storing heeft plaatsgevonden op een (deel van een) asset dat inmiddels verwijderd is. De mate waarin dit punt van toepassing is hangt af van het materiaal waarop de storing plaats vindt<sup>6</sup>.

De mate van betrouwbaarheid van uitkomsten van analyses over statistische gegevensbronnen (zoals USTORE) is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare data. Zo kunnen op dit moment (d.d. 11 november 2015) met USTORE – in termen van storingsfrequenties – meer betrouwbare uitspraken gedaan worden over de prestaties van AC-cohorten dan over de prestaties van PE cohorten omdat van de laatstgenoemden veel minder storingen beschikbaar zijn.

---

<sup>6</sup> De keuze voor een reparatievorm hangt af van het materiaal. Bij PVC worden meestal complete buisdelen vervangen terwijl metalen buizen zo mogelijk gerepareerd worden, bijv. middels een reparatieklem.



Een bijzondere vorm van statistische modellen betreft het zogenaamde Machine Learning. Deze term omvat een breed scala van technieken voor optimalisatie en regressie waarbij op verschillende wijzen statistische modellen gecreëerd worden die storingsgedrag verklaren aan de hand van ingevoerde verklarende variabelen (voor leidingfalen). De beschikbare dataset wordt daarbij (willekeurig) opgeknipt in twee delen: één om een statistisch model te 'trainen' en een andere set om het getrainde model te testen. Voorbeelden van dergelijke technieken zijn Artificial Neural Networks (Jafar et al., 2010; Vonk, 2014) en ensemble technieken zoals Random Forest en Gradient Boosting Regression (zie Moerman en Wols (2015) voor een voorbeeld van het gebruik van deze technieken). Zie Vonk en Vries (2016) voor een uitgebreid overzicht van Machine Learning (ML-) technieken. ML-technieken zijn toegepast voor het ontwikkelen van een conditiemodel voor AC-leidingen (Vonc en Mesman, 2015a; Vonk en Mesman, 2015b).

### 2.3.3 Fysische modellen

Fysische modellen beschrijven de structurele eigenschappen van een leiding op basis van fysische en mechanische processen en geven daarmee een kwantificering van belastingen (spanningen) die optreden als gevolg van belastingen die door de omgeving op de leiding uitgeoefend worden. Comsima (Wols et al., 2015) en het verouderingsmodel in het KSLB (Beuken en Mesman, 2011) zijn voorbeelden van fysische modellen. Rajani and Kleiner (2001) bespreken ook een groot aantal fysische modellen.

#### Voordelen

Fysische modellen geven de mogelijkheid tot voorspellingen gebaseerd op daadwerkelijke degradatie op basis van kenmerken van leidingen en omgeving. Een ander voordeel ten opzichte van statistische modellen is dat voor specifieke situaties een berekening kan worden uitgevoerd en daarmee dus ook per leiding een uitspraak wordt gedaan. Ook is het mogelijk om als-dan scenario's te berekenen, zoals de effecten van een drukverhoging op de wandspanning. Vervolgens kan ook op basis van de fysische relaties een analyse worden uitgevoerd van de gevoeligheden voor parameters.

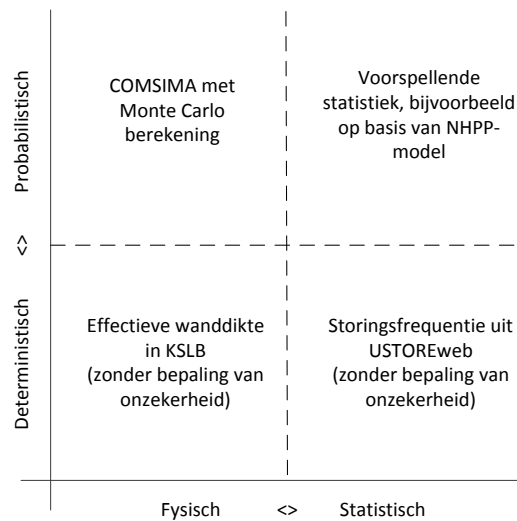
#### Nadelen

Per berekende leiding wordt veel gedetailleerde kennis gevraagd over leidingkenmerken en omgeving. Deze gegevens zijn er vaak niet op die kleine ruimtelijke schaal, waardoor toch aannames nodig zijn. Het model is zo goed als de kennis van de processen die zijn gemodelleerd. Als bijvoorbeeld het uitgangspunt van een model is dat vorst een grote rol speelt bij de belasting van een leiding, is dit model onbruikbaar in gebieden waar dit nooit het dominante proces is.

Tevens speelt een rol of de data daadwerkelijk beschikbaar is. Bijvoorbeeld in een stedelijke omgeving is beperkt inzicht in de samenstelling van de bodem. Hierdoor is het pas mogelijk om goede grondmechanische berekeningen te maken als er eerst een bodemonderzoek plaatsvindt. In dit geval is ontbrekende data te verkrijgen door aanvullend onderzoek. Andere informatie, zoals bijvoorbeeld gerelateerd aan de wijze van fabricage of aanleg is daarentegen niet meer beschikbaar. In dat laatste geval kan men hooguit door redeneren of door het verzamelen van historische informatie een goede inschatting maken.

### 2.3.4 Voorbeelden van modelclassificaties

Op basis van de hierboven genoemde modelklassen kunnen bestaande modellen ingedeeld worden volgens het schema deterministisch versus Probabilistisch en fysisch versus statistisch. Een uitwerking hiervan is gegeven in Figuur 2.3.

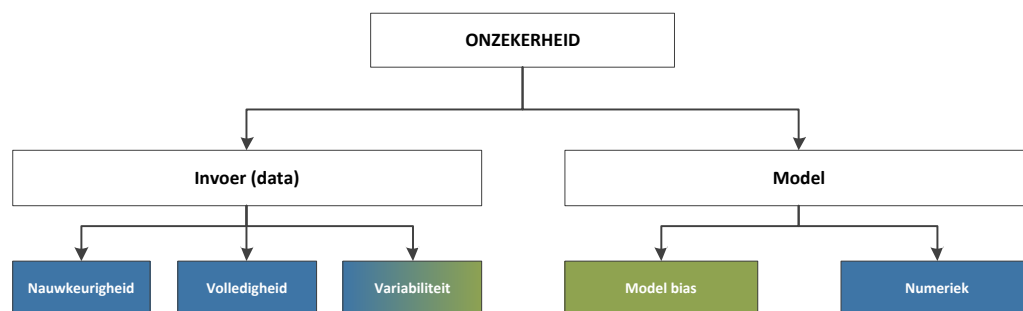


FIGUUR 2.3 KWADRANTEN VOOR MODELTYPOLOGIE MET VOORBEELDEN VAN BESTAANDE MODELLEN.

#### 2.4 Onzekerheid in modellen en data

In Paragraaf 2.3 zijn verschillende typen modellen benoemd. Een model is per definitie een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid en bevat om die reden onzekerheden. Ook de data waarmee een model gevoed wordt bevatten onzekerheden. Onzekerheden kunnen op hoofdlijnen ingedeeld worden in twee groepen: inherente en subjectieve onzekerheden:

- Inherente onzekerheden zijn onzekerheden die onvermijdelijk zijn en alleen op basis van aannamen of hypothesen kunnen worden bepaald. In deze categorie vallen bijvoorbeeld:
  - variatie in materiaaleigenschappen binnen een leiding (ruimtelijke variabiliteit);
  - variatie in waterkwaliteit, agressiviteit en dergelijke (temporele variabiliteit);
  - variatie in hydraulische omstandigheden (temporele variabiliteit);
  - variatie in externe belasting door de omgeving van de leiding over korte leidinglengtes (ruimtelijke variabiliteit);
- Subjectieve onzekerheden zijn onzekerheden die kleiner worden met meer gegevens, betere meetmethoden, meer kennisopbouw van processen en dergelijke.



FIGUUR 2.4 TYPOLOGIE ONZEKERHEDEN IN ANALYSES; DE BLAUWE ELEMENTEN BETREFFEN VOORNAMELIJK SUBJECTIEVE ONZEKERHEDEN, DE GROENE ELEMENTEN VOORNAMELIJK INHERENTE ONZEKERHEDEN.

Onzekerheden kunnen worden ingedeeld in een aantal oorzaken, waarvan een aantal inherent, een aantal subjectief en een aantal deels inherent en deels subjectief zijn. (Figuur 2.4). Onzekerheden kunnen ontstaan aan de invoerzijde van het model (data) of door het model zelf:

- Data:
  - Nauwkeurigheid: meetonauwkeurigheid, afrondingen, precisie van meetapparatuur en verschillen in interpretatie van uitkomsten van meetprocedures. Deze meetonzekerheden zijn te verkleinen door heldere protocollen en verbetering van meetapparatuur, maar meetonzekerheden zijn niet tot nul te reduceren.
  - Volledigheid: onzekerheden m.b.t. onvolledigheid worden veroorzaakt door een tekort aan data voor een analyse op het gewenste schaalniveau. Voor het bepalen van een storingsfrequentie in een cohort leidingen is bijvoorbeeld een minimum aantal storingsdata nodig voor een betrouwbare analyse. Als er maar een paar gegevens zijn, is de toegepaste statistiek niet toe te passen met een betrouwbaar resultaat (Van Thienen, 2012).
  - Variabiliteit: variaties in eigenschappen van de gegevens op een schaal kleiner dan de gewenste schaal. Bijvoorbeeld, een analyse op het niveau van een individuele leiding vraagt om kennis van de grondwaterstand bij die leiding. Grondwaterstanden zijn meestal op een beperkt aantal locaties bekend en grondwatermodellen worden op een schaal doorgerekend die veel groter is dan de individuele leiding. Het resultaat is dat de gebruikte grondwaterstand in de berekening niet de grondwaterstand ter plekke is, maar een interpolatie of een ruimtelijk of temporeel gemiddelde. Dit beïnvloedt de uitkomsten van de berekening. Een ander voorbeeld is variaties in de sterkte-eigenschappen tussen locaties met conditiemetingen in. Deze onzekerheden kunnen worden verkleind, maar zijn ook deels inherent.
- Model:
  - Model bias is het gebrek aan kennis in modellen. Deze kan deels worden verkleind door een beter begrip van processen, maar is deels inherent, omdat een model per definitie een versimpeling is van de werkelijkheid.
  - Numerieke onzekerheden komen voort uit de oplossingsmethodiek. Computermodellen zijn discreet, niet continu, wat een bepaalde nauwkeurigheid met zich meebrengt. Deze nauwkeurigheid is omgekeerd evenredig met de stapgrootte van het model. Sommige algoritmes zijn snel (grotere stapgrootte), maar minder nauwkeurig en vice versa.

Op basis van het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat modelonzekerheden verkleind kunnen worden, maar dat modellen altijd onzekerheden zullen bevatten. Het is van belang om allereerst de onzekerheid in een model te kwantificeren. Daarna kan er op basis van belang van de asset (effect van falen) bepaald worden of modelonzekerheden verkleind dienen te worden. Om modelonzekerheden te verkleinen kunnen onderstaande stappen worden doorlopen:

1. Kwantificeren van (i) risico en (ii) onzekerheid van het risico (door middel van gevoeligheidsanalyse).
2. Keuze maken om te werken met bandbreedte voor uitkomst (onzekerheid) of om desgewenst de onzekerheid te verkleinen (wanneer het risico dit vereist). Voor de laatste optie dienen de stappen 3 t/m 5 uitgevoerd te worden:
3. Bepalen welk type onzekerheid dominant is voor de onzekerheid in de uitkomst. Dit kan door het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse. Zijn er te weinig gegevens in tijd of ruimte, zijn de gegevens te onnauwkeurig, zijn de relevante processen voldoende in beeld?
4. Onzekerheden verkleinen tot op het niveau dat een type onzekerheid niet meer dominant is.

Deze stappen kunnen desgewenst gevolgd worden door een vijfde stap (opnieuw beginnen met stap 3) wanneer meerdere onzekerheden (op volgorde van grootte; stap 3) verkleind dienen te worden.

## 2.5 Relatie tussen conditie en faalkans

Om de conditie van een leiding samen met een potentieel effect te vertalen naar een risico moet de conditie eerst vertaald worden naar een faalkans. De relatie tussen conditie en faalkans vormt momenteel een belangrijke ontbrekende schakel. Vooral op het gebied van dataverzameling door inspecties ligt er op dit punt nog een aanzienlijk kennishiaat.

Inzicht in de relatie tussen conditie en faalkans is noodzakelijk om data uit inspecties en het spanningsmodel Comsima uit te kunnen drukken in een faalkans. Verschillende toestandsbepalingen (USTORE, exit-beoordelingen, Comsima) krijgen daarmee een resultante van dezelfde eenheid: aantal storingen per kilometer per jaar (st/km.jaar). In een pilotproject met Oasen is hier, wat betreft het spanningsmodel Comsima in 2015 een start gemaakt (Wols et al., 2015). Hierbij zijn aanwijzingen gevonden voor een relatie tussen leidingen met een wandspanning hoger dan de toelaatbare wandspanning (conditie <0) en opgetreden spontane storingen. Het is de verwachting dat door in Comsima de conditie afhankelijk van de leeftijd te bepalen het mogelijk is om te berekenen wat de toename van de wandspanning in de tijd is. Gezien de gevonden relatie tussen de wandspanning en de storingsfrequentie is het mogelijk een op deels fysische processen geënte toename van de storingsfrequentie te bepalen.

In het algemeen kan gesteld worden dat de uitkomst van een fysisch model een conditie is. Voorbeelden hiervan zijn de genormeerde spanning als conditiebepaling bij het toestand/normbepaling Comsima. Ook het KLSB geeft een conditie als resultaat, maar dan in de vorm van een geschatte restlevensduur op basis van expertkennis en de uitkomsten van drie onderliggende modellen. De uitkomst van een statistisch model kan zowel een conditie als een faalkans zijn. In het voorbeeld waarbij een statistisch model wordt gebruikt om een storingsfrequentie te bepalen met USTORE data is er geen sprake van een conditie als uitkomst, maar een faalkans. Bovenstaande laat zien dat met een relatie (vertaling) tussen conditie en faalkans de uitkomsten van zowel fysische als statistische modellen dezelfde grootheid (faalkans) en eenheid (bijvoorbeeld aantal storingen per jaar) kunnen hebben.

## 2.6 Geografische analyses

Geografische analyses (uitgevoerd middels een GIS) spelen een steeds belangrijkere rol in het assetmanagement, zowel voor het bepalen van cohorten als voor het bepalen van optredende effecten bij leidingbreuken (van Daal, 2012; van Daal et al., 2009). De aanduiding 'geografische analyse' wijst op het feit dat in een dergelijke analyse gebruik gemaakt wordt van geografische relaties tussen objecten. Om tot deze verbanden te komen wordt gebruik gemaakt van geografische projecties en coördinaatsystemen. Voorbeelden van geografische analyses zijn:

- Het koppelen van omgevingskenmerken aan leidingen, bijvoorbeeld als deelmodel van het spanningsmodel Comsima of voor het bepalen van cohorten leidingen met dezelfde omgevingseigenschappen (grondsoort, verkeersbelasting).
- Het uitvoeren van effectanalyses van bijvoorbeeld ontgrondingskuilen (van Daal et al., 2011) op de omgeving, het uitvoeren van BEEL (Beoordeling Externe Effecten Leidingfalen) analyses of het effect van volume gelekt water op omgeving (stroombaananalyses).

## 2.7 Databronnen voor modellen

De verschillende data voor modelinput die gebruikt worden om tot een saneringsbeslissing te komen worden in dit rapport als volgt ingedeeld. Voor beschrijving van deze bronnen wordt verwezen naar literatuur:

- assetdata;
- storingsdata (Moerman, 2016; Vloerbergh en van Thienen, 2010; Vloerbergh, 2008; Vloerbergh en van Thienen, 2011);
- omgevingskenmerken (Skornsek, 2011, 2015; van Daal en Raterman, 2010, 2011);
- inspectieresultaten (Beuken en Mesman, 2015; de Kater et al., 2010);
- sensorgegevens (Slaats et al., 2012; van Thienen, 2014);
- klantmeldingen (Vertommen, 2015; Vertommen en van Thienen, 2015);
- overige gegevensbronnen.

## 3 Voorbeelden van modellen en hun onzekerheden

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt middels voorbeelden van modellen voor het bepalen van toestand, norm en effect<sup>7</sup> een meer concrete invulling gegeven aan hoofdstuk 2. Daarbij wordt op twee toestandsmodellen uitgebreider ingegaan om de – in hoofdstuk 2 – beschreven modelonzekerheid toe te lichten. We beperken ons daarbij tot toestandsmodellen waarvan de uitkomsten een input vormen voor beslissingsondersteunende modellen zoals TRANSPARANT of WilCo. Deze toestandsmodellen zijn (1) de drie modellen uit het Kennissysteem Levensduurbepaling Versie Twee (KSLB V2) en (2) het spanningsmodel Comsima. Deze modellen zijn gekozen omdat in beide modellen (deels) uitgaan van een fysische benadering waarbij een toestandsbepaling plaats vindt. Naast deze modellen zijn er verschillende andere modellen op de markt (TRANSPARANT, WilCo, RASMARIANT) die geen fysische relatie beschrijven maar conclusies trekken op basis van storingsstatistiek (afleiding van degradatiecurves).

Voor het identificeren van onzekerheden in modellen wordt gebruik gemaakt van de indeling uit Figuur 2.4. Voor elk type onzekerheid wordt met een kleur aangegeven wat de gradatie van dit type onzekerheid is in het beschouwde model:

- rood: veel onzekerheid;
- oranje: matig tot veel onzekerheid;
- geel: beperkte onzekerheid ;
- groen: nauwelijks onzekerheid;
- grijs: type onzekerheid is niet relevant voor dit model.



De beoordeling van de onzekerheid is kwalitatief en daarmee slechts een indicatie voor de onzekerheid in de beschouwde modellen. Voor het kwantificeren van modelonzekerheden is aanvullend onderzoek nodig wat zich richt op een specifiek model.

### 3.2 Toestandsmodel KSLB 2.0

Het KSLB 2.0 bestaat uit een combinatie van drie modellen die de toestand van een leiding beschrijven:

1. Meetmodel: Dit is een fysisch-deterministisch model dat op basis van de waargenomen afname van de wanddikte van AC of grijs gietijzeren buizen bepaalt (degradatie) wat de afname over de tijd is.
2. Storingsanalyse: dit is een statistisch model dat een extrapolatie van storingsfrequenties gebruikt om tot een verwacht aantal storingen (toestand) in de toekomst te komen. Feitelijk is er bij het berekenen van een storingsfrequentie sprake van een deterministisch-statistische toestandsbepaling (zie ook Figuur 2.3).
3. Voorspelmodel op basis van kennisregels: dit is een fysisch model dat de begintoestand van de leiding koppelt aan agressiviteit van het leidingwater en de

<sup>7</sup> Op de conditiebepaling wordt hier niet verder ingegaan, omdat deze direct bepaald wordt door de toestand- en normbepaling.

omgeving. Met deze agressiviteit wordt een schatting gemaakt van de afname in effectieve wanddikte (dus niet met metingen).

In alle drie modellen zitten veel onzekerheden. Het KSLB is daarom opgesteld met een zo beperkt mogelijk aantal parameters en door gebruik te maken van conservatieve aannames. De met het KSLB voorspelde degradatie is daarmee een worst-case schatting. In praktijk willen drinkwaterbedrijven op tijd zijn met vervangen, maar niet dusdanig vroeg dat er sprake is van kapitaalvernietiging. Het is daarom interessant om de onzekerheden te verkleinen, zodat de worst-case schatting en de degradatie dichter bij elkaar komen te liggen.

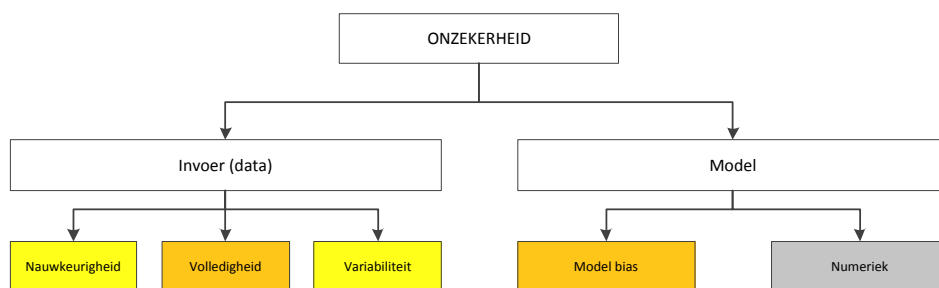
### 3.2.1 Metingen wanddikte

Het model voor de afname van effectieve wanddikte op basis van metingen bevat op de volgende punten onzekerheden:

- Data:
  - *Nauwkeurigheid:*
    - Deze vorm van onzekerheid wordt veroorzaakt door meetonzekerheden tijdens het uitvoeren van fenolftaleïne- en thymolftaleïne-testen op individuele buisdelen.
  - *Volledigheid:*
    - De inwendige aantasting wordt veroorzaakt door de waterkwaliteit en de variatie hiervan over de levensduur van de leiding, maar hoe is meestal onbekend. Daarom is het ook onbekend of een afname in wanddikte nog altijd doorgaat of wellicht in het verleden al is gestopt door een verandering in drinkwaterkwaliteit. De historische waterkwaliteit is in principe wel (gedeeltelijk) bekend (Mesman, 2010), maar vergt een inspanning om te achterhalen;
    - ook de – al dan niet – aanwezigheid van een coating (ter bescherming tegen uitwendige uitloging) zorgt voor een onzekerheid, wanneer niet bekend is welke leidingen gecoat zijn en welke niet.
  - *Variabiliteit:*
    - Variatie treedt op kleine schaal op (binnen de schaal van een buisdeel van meestal 5 meter). Binnen het BTO speerpuntonderzoek wordt deze variatie onderzocht (Beuken, In voorbereiding). Binnen een segment van 5 meter kunnen verschillende ringen zijn getest met andere uitkomsten, maar het is meestal onbekend waar precies in het segment welke ring vandaan komt, hoe de oriëntatie van de ring was in het segment en daarmee dus ook hoe de zwakke plekken in één ring relateren aan de zwakke plekken in een andere ring. De variabiliteit op één locatie kan achterhaald worden door van een leidingsegment achtereenvolgende ringen te testen met dezelfde oriëntatie;
    - ook bestaan er verschillen tussen buisdelen (van 5 meter) die veroorzaakt zijn door verschillen in de fabricage. Dit is inherente onzekerheid.
- Model:
  - *Model bias:*
    - Het model voor afname effectieve wanddikte in het KSLB bevat twee onzekerheden die onder model bias vallen:

- (1) de aanname dat de wanddikte (bij leidingen van grijs gietijzer en AC) lineair afneemt met de tijd en;
  - (2) de keuze voor een meetgetal bij het meten van de wanddikte over de doorsnede van het onderzochte buisdeel; binnen elk buisdeel varieert de aantastingdiepte. Er heerst onduidelijkheid wat de sterkte van een leiding bepaalt; de gemiddelde of de maximale aantasting.
- *Numeriek*: n.v.t.

Met gebruik van de hierboven genoemde onzekerheden kan voor het model voor afname van effectieve wanddikte uit het KSBL een kwalitatieve inschatting van onzekerheden gemaakt worden op basis van het overzicht uit Figuur 2.4:



FIGUUR 3.1 INSCHATTING ONZEKERHEID VOOR DETERMINISTISCH-FYSISCH MODEL VOOR AFNAME EFFECTIEVE WANDDIKTE VAN EEN AC-LEIDING OP BASIS VAN METINGEN.

### 3.2.2 Storingsfrequentiemodel op basis gegevens van storingen en leidingen.

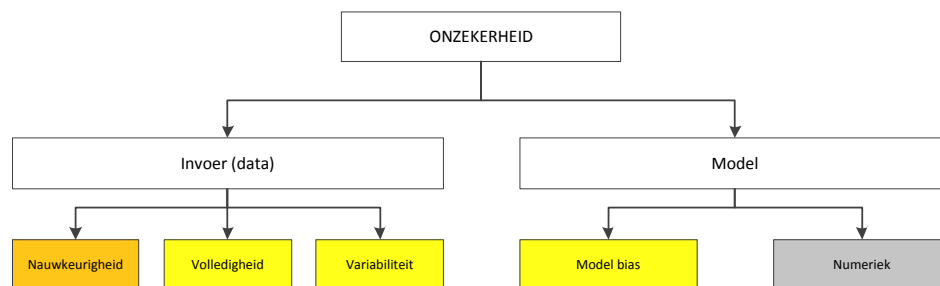
Het storingsfrequentiemodel bevat de op de volgende punten onzekerheden:

- Data:
  - *Nauwkeurigheid*:
    - Inputgegevens voor het storingsfrequentiemodel worden verzameld door middel van het registreren van storingen. De nauwkeurigheid van deze data is erg afhankelijk van de kwaliteit van de registratie. De kwaliteit van de registratie wordt voornamelijk bepaald door (i) de mate waarin vragen uit het registratieprotocol objectief zijn, (ii) de mate waarin monteurs opgeleid zijn om een registratie correct in te vullen, (iii) de inrichting van de werkprocessen die betrekking hebben op het registreren van storingen, (iv) de tijd die beschikbaar is om een registratie in te vullen en (v) de mate waarin gebruik gemaakt wordt van databronnen waardoor storingsmonteurs ontlast worden. Zie Beuken et al. (in voorbereiding) en Vloerbergh en Beuken (2013) voor meer informatie over de kwaliteit van registratie van storingen.
  - *Volledigheid*:
    - Bij het vormen van een cohort wordt een afweging gemaakt tussen nauwkeurigheid (zo veel mogelijk storingen; hoge statistische betrouwbaarheid) en een zo specifiek mogelijk cohort (kleine variabiliteit), zie ook paragraaf 2.3.2. Deze twee vormen van onzekerheid zijn omgekeerd evenredig.



- Wanneer niet alle storings geregistreerd worden of niet bekend is welke storings veroorzaakt zijn door derden ontstaat – mogelijk – geen duidelijk beeld van de degradatie van een cohort leidingen.
    - Op dit moment geven data uit USTORE een beperkt beeld van de veroudering van het leidingnet. Dit komt omdat er slechts (afhankelijk van het bedrijf) 2 tot 6 jaar storingsdata beschikbaar is.
    - Wat betreft volledigheid is het gebruik van USTORE te prefereren boven het gebruik van een bedrijfseigen database, omdat de toename van data per tijdseenheid binnen USTORE een stuk hoger is.
  - *Variabiliteit:*
    - In bepaalde gevallen kan het zo zijn dat dezelfde leidingcohorten bij verschillende bedrijven niet dezelfde degradatie vertonen. Dit kan komen door verschillen in de materiaalopbouw door variabiliteit in het productieproces. Het combineren van data van verschillende batches in één leidingcohort leidt tot een bepaalde onzekerheid die op een dieper niveau ligt dan de definitie van het leidingcohort zelf (nl. de definitie van een batch).
- **Model:**
  - *Model bias:*
    - Het feit dat een storingsfrequentie, die berekend is voor een cohort storings, toegepast wordt op een individuele leiding is een vorm van model bias. Ook de cohortindeling zelf is een vorm van model bias.
  - *Numeriek:* n.v.t.

Met gebruik van de hierboven genoemde onzekerheden kan voor het storingsfrequentiemodel uit het KSLB een kwalitatieve inschatting van onzekerheden gemaakt worden op basis van het overzicht uit Figuur 2.4:



FIGUUR 3.2 INSCHATTING ONZEKERHEID VOOR DETERMINISTISCH-STATISTISCH MODEL VOOR EEN FREQUENTIEBEREKENING MET USTORE DATA.

### 3.2.3 Voorspelmodel op basis van kennisregels

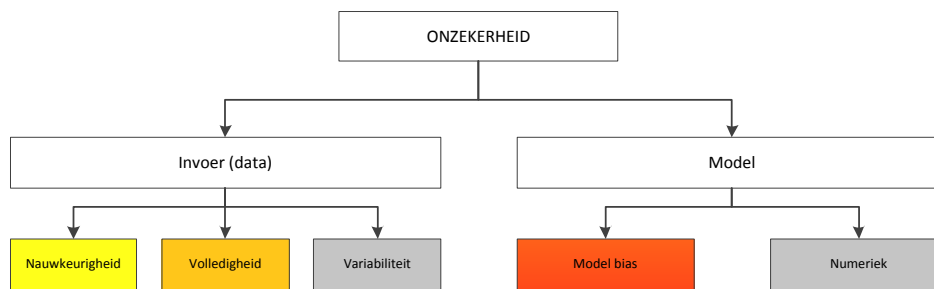
Het voorspelmodel op basis van kennisregels (zoals de saturatie index (SI) van het drinkwater of de pH van de omringende bodem) bevat op de volgende punten onzekerheden:

- **Data:**
  - *Nauwkeurigheid:*
    - De originele wanddikte en drukklasse zijn aan elkaar verwant, tenzij de omtrek van de leiding is gemeten is de wanddikte altijd een

cataloguswaarde en daarmee een minimum. De werkelijke originele wanddikte kan enkele millimeters meer bedragen. De afname in wanddikte wordt dan te zwaar ingeschat. Door meer metingen te doen (gebruik van model metingen uit KSLB) of door een betere indicatie van de oorspronkelijke wanddikte wordt deze onzekerheid verkleind.

- *Volledigheid:*
  - Het voorspelmodel gebruikt parameters voor de agressiviteit van het drinkwater (SI of saturatie index) en de agressiviteit van de omgeving om de afname van de effectieve wanddikte te voorspellen. Deze gegevens zullen in praktijk vaak niet beschikbaar zijn op het (grote) schaalniveau van een enkele leiding; de saturatie index wordt alleen op het pompstation gemeten en omgevingsparameters zijn voornamelijk beschikbaar via grondsoortenkaarten die feitelijk voor analyses op een kleinere schaal bedoeld zijn. Dit is – aan de kant van de data – voor dit model de belangrijkste onzekerheid.
- *Variabiliteit:* n.v.t.
- Model:
  - *Model bias:*
    - In dit model is gekozen voor een aantal indicatoren voor agressiviteit van drinkwater en invloed van de omgeving. Hoe deze indicatoren gerelateerd zijn aan de sterkte afname van een leiding is onzeker: de processen zijn deels nog onbekend en ook andere parameters kunnen invloed hebben, waardoor lokaal de condities sterk kunnen verschillen. Dit is een model bias. Dit heeft onder andere gevolgen voor de lengte van het cohort: het KSLB wordt uitgerekend voor een leidingdeel met vergelijkbare eigenschappen en belasting. Hierin komen een aantal onzekerheden samen. Als deze lengte te groot wordt gekozen, dan is er sprake van model bias, omdat er dan metingen aan elkaar worden gerelateerd die feitelijk niet bij elkaar horen. Als deze lengte te klein wordt gekozen, zijn er te weinig data om een analyse op te baseren en is er sprake van leemtes.
    - Een tweede onzekerheid in het voorspelmodel is de aanname dat de afname van wanddikte lineair verloopt in de tijd.
  - *Numeriek:* n.v.t.

Met gebruik van de hierboven genoemde onzekerheden kan voor het voorspelmodel op basis van kennisregels uit het KSLB een kwalitatieve inschatting van onzekerheden gemaakt worden op basis van het overzicht uit Figuur 2.4:



FIGUUR 3.3 INSCHATTING ONZEKERHEID VOOR HET DETERMINISTISCH-FYSISCH VOORSPELMODEL OP BASIS VAN KENNISREGELS.

### 3.3 Toestandmodel Comsima

Het bezwijken van drinkwaterleidingen in de ondergrond treedt op als ergens in de leiding de toelaatbare spanning wordt overschreden. Spanningen in de leiding worden veroorzaakt door een combinatie van belastingen. Comsima (Computation of stresses in mains) (Wols en Moerman, 2015; Wols et al., 2015) is ontwikkeld om de spanningen in de leiding te berekenen. Comsima maakt gebruik van gegevens van de leiding, grond, zettingen, verkeer- en bovenbelasting. Berekeningen kunnen zowel voor leidingen met starre verbindingen als leidingen met flexibele verbindingen worden uitgevoerd. Comsima berekent een spanning in de leiding alsmede een hoekverdraaiing van een verbinding. Falen treedt op als de toelaatbare spanning (in dit geval de vloeï- of breukspanning van het materiaal) of de toelaatbare hoekverdraaiing wordt overschreden. Comsima bestaat uit verschillende modelcomponenten, waarvan de belangrijkste het mechanisch model is waarin de grond-leidinginteractie gemodelleerd wordt. Het model berekent verschillende typen spanningen in langsricting en omtrekricting van de buis als gevolg van verschillende belastingen. Om Comsima te kunnen gebruiken moet alle (voor de berekening) relevante informatie verzameld worden in één bestandsformaat voor geografische informatie (shapefile). Hiervoor worden omgevingsbronnen (zoals grondsoort en de aanwezigheid van wegen) in een GIS gekoppeld aan leidingdata.

In de basis is Comsima een fysisch-deterministisch model. Dat wil zeggen dat er een berekening uitgevoerd wordt op basis van een fysische modellering (mechanisch model) waarbij een herhaling van de berekening hetzelfde resultaat oplevert. Comsima is oorspronkelijk ontwikkeld om spanningen in leidingen te berekenen als gevolg van alleen verschilzettingen. In 2015 is Comsima op verschillende aspecten uitgebreid. Deze uitbreiding heeft ook geleid tot een afname van de modelonzekerheid bij het bepalen van spanningen in leidingen. De twee uitbreidingen betreffen:

- Uitbreiding van het belastingschema met (i) verkeersbelastingen voor leidingen die onder of nabij een weg liggen, (ii) belastingen door interne druk, (iii) opwaartse belasting door grondwater en (iv) bovenbelasting door het grondpakket boven de leiding (Wols en Moerman, 2015).
- Het gebruik van nauwkeurige zettingsgegevens (gemiddelde zetting per jaar) voor een veelvoud aan reflectiepunten op basis van satellietgegevens van de TerraSAR-X satelliet. Na interpolatie van deze reflectiepunten kan een nauwkeurige zettingskaart geconstrueerd worden. Deze kaart is veel nauwkeuriger dan de zettingenkaart die eerder gebruikt is (Wols et al., 2015).

Een belangrijk deel van de onzekerheid in het deterministische Comsima model wordt veroorzaakt door variabiliteit van de data invoer. Zo kunnen eigenschappen van verschillende bodemsoorten variëren. Om dit te ondervangen is aan Comsima een Monte

Carlo module toegevoegd. Hiermee kunnen berekeningen uitgevoerd worden waarbij rekening gehouden wordt met de spreiding van verschillende invoergegevens. Hierbij wordt (voor elke leiding) elke numerieke invoerwaarde beschouwd als een variabele parameter met een kansdichtheidsfunctie. Om deze stap te kunnen zetten is inzicht in de spreiding van de gegevens nodig. Door het gebruik van de Monte Carlo berekening verandert Comsima in een probabilistisch model. Er moeten in het probabilistische Comsima model meerdere berekeningen uitgevoerd worden per leiding. Het eindresultaat bestaat uit één of meerdere statistische kentallen (gemiddelde, minimum, maximum spanning) over de verschillende uitkomsten.

In de probabilistische versie van Comsima wordt de modelonzekerheid voornamelijk bepaald door de volgende onzekerheden:

Data:

*Nauwkeurigheid:*

- Gekozen kansverdelingen voor verschillende fysische constanten en invoerparameters ('Hoe zijn de onzekerheden van de verschillende parameters (model input en fysische constanten) verdeeld?'). Vooral nog berust dit op expertkennis.

*Volledigheid:*

- Schaalverschillen tussen verschillende geografische bronnen ('niet alle omgevingsbronnen zijn beschikbaar op het niveau van een enkele leiding').
- Beperkte beschikbaarheid van nauwkeurige gegevens van verkeersbelasting ('wat is de daadwerkelijke / gemeten (dynamische) verkeersbelasting op de verschillende wegvakken?').
- Beperkt beeld van de historie van grondzetting ('welke grondzetting heeft plaatsgevonden voor het begin van de huidige zettingsmetingen? En tot welke initiële spanning heeft dit geleid?').
- Huidige wanddikte ('in hoeverre is de huidige wanddikte gelijk aan de oorspronkelijke wanddikte?').
- De werkelijke afstand tussen twee verbindingen (reële leidinglengte) waarover de spanningen optreden is onbekend, daarom worden voor verschillende materialen (op basis van praktijkkennis) aannamen gedaan over de gemiddelde afstand tussen twee verbindingen.

*Variabiliteit:*

- De data die door Comsima gebruikt worden bevatten allerlei lokale variaties die niet bekend zijn. Een voorbeeld hiervan is de variatie in verkeersbelasting of de ruimtelijke variatie van grondeigenschappen. Dit punt van onzekerheid kan deels ondervangen worden door het model probabilistisch te maken waarbij een aantal model parameters (constanten) beschouwd worden als stochasten met een bijbehorende kansverdeling. Ook de wijze van aanleg vormt een vorm van variabiliteit. Zo is niet altijd bekend op welke wijze een sleuf verdicht is.

Model:

*Model bias:*

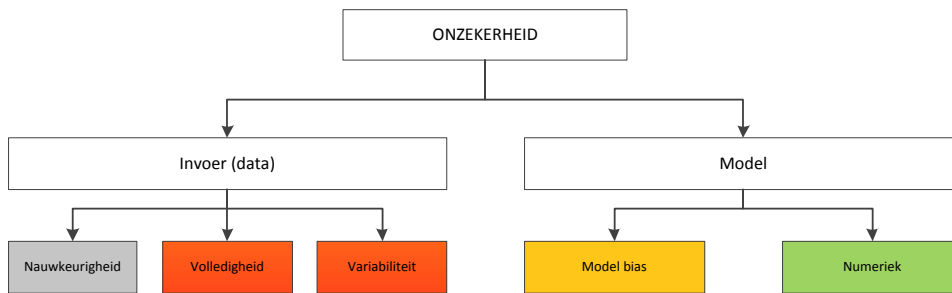
- Comsima maakt gebruik van leidinggegevens uit GIS. Het model is daarmee afhankelijk van de leidingindeling zoals deze in GIS ingetekend is. Dit is een eigenschap die inherent is aan het model en is daarmee een model bias.

*Numeriek:*

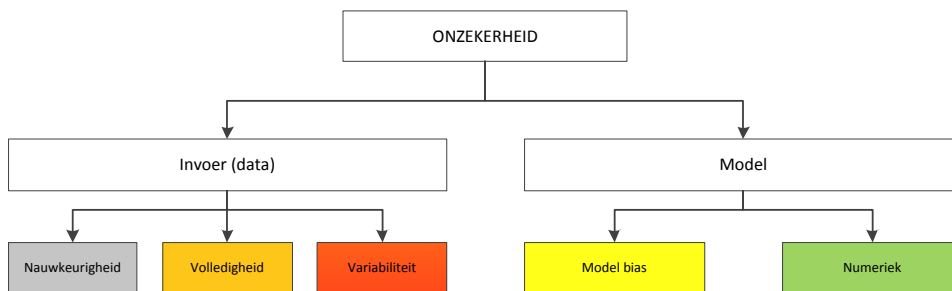
- Comsima is een continu model (niet numeriek). Daarmee ontstaat er geen modelonzekerheid vanwege een gekozen stapgrootte. Wel kunnen er onzekerheden zijn vanwege afrondingen, maar deze vorm van onzekerheid is ondergeschikt aan de andere onzekerheden.

Op basis van de hierboven genoemde punten kan kwaliteif een inschatting gemaakt worden van de onzekerheid. Deze inschatting is weergegeven in Figuur 3.4, Figuur 3.5 en Figuur 3.6. Voor Comsima is het mogelijk om ook kwantitatief een beeld te geven van de onzekerheid. Dit is in dit onderzoek niet gedaan.

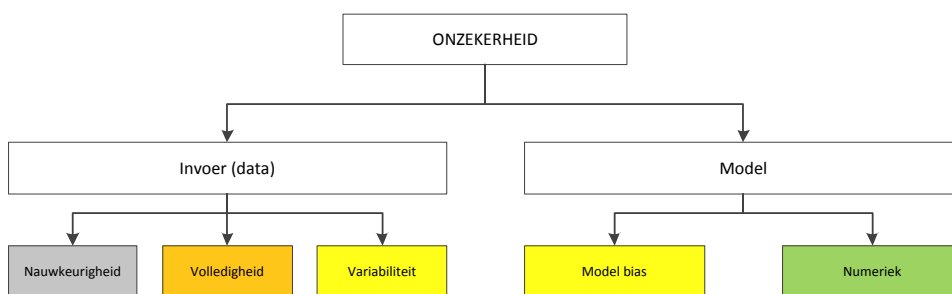
Figuur 3.4, Figuur 3.5 en Figuur 3.6 laten (kwalitatief) zien dat het uitbreiden van het Comsima model en het gebruik van de Monte Carlo module hebben geleid tot een kleinere modelonzekerheid.



FIGUUR 3.4 INSCHATTING ONZEKERHEDEN OORSPRONKELIJK *DETERMINISTISCH* SPANNINGSMODEL COMSIMA MET BELASTINGSCHEMA OP BASIS VAN ZETTINGSVERSCHILLEN.



FIGUUR 3.5 INSCHATTING ONZEKERHEDEN *DETERMINISTISCH* SPANNINGSMODEL COMSIMA NA UITBREIDING IN 2015.



FIGUUR 3.6 INSCHATTING ONZEKERHEDEN *PROBABILISTISCH* SPANNINGSMODEL COMSIMA NA UITBREIDING 2015.

### 3.4 Normbepaling

Normen (zoals gedefinieerd in paragraaf 2.1) kunnen in twee categorieën onderscheiden worden:

- bedrijfsnormen;
- technische normen.

#### 3.4.1 Bedrijfsnormen

Een bedrijfsnormbepaling omvat alle afwegingen om te komen tot een norm ter beoordeling van de toestand van de assets teneinde een conditie te kunnen vaststellen. Een bedrijfsnormbepaling is uiteindelijk altijd een keuze op basis van een expertbeoordeling (welke toestand is in de ogen van experts toelaatbaar?) en bevat meestal een veiligheidsfactor. Deze veiligheidsfactor is ervoor bedoeld om te zorgen dat het voorgestelde vervangingsjaar eerder valt dan het jaar waarin de (verwachte) minimale toestand (bijv. minimaal benodigde wanddikte of minimaal toegestane storingsfrequentie) optreedt. Een multicriteria-evaluatie (evt. ingevuld door verschillende experts waardoor een gemiddelde waarde ontstaat) kan helpen om tot een breder gewogen resultaat te komen. Omdat bedrijfsnormen (mede) tot stand komen op basis van expertbeoordelingen zijn deze subjectief.

Bronnen voor bedrijfsnormbepalingen bestaan uit bedrijfseigen randvoorwaarden wat betreft financiële en operationele middelen.

Binnen UKNOW wordt de aanname gedaan dat het effect van falen niet direct invloed uitoefent op de normbepaling. In de praktijk is dit op dit moment soms wel het geval. Het nadeel hiervan is dat er een dubbele veiligheidsfactor kan ontstaan: allereerst bij de normbepaling (op basis van de grootte van het effect) en vervolgens bij de risicobepaling, waarin ook het effect een rol speelt. Op deze manier ontstaat er geen zuivere afweging op basis van een risicoanalyse, die tot stand komt op basis van kans en effect. De bedrijfsnorm wordt binnen UKNOW gezien als input voor de risicoperceptie; de mate waarin men een bepaald risico aanvaardbaar vindt. Dit is afhankelijk van het bedrijfsbeleid.

#### 3.4.2 Technische normen

Dit zijn normen die iets zeggen over een grenswaarde tot waar een asset zijn functie kan vervullen zonder te bezwijken. Een voorbeeld hiervan is een vloeispanning voor metalen buizen. Een technische norm is minder subjectief dan een bedrijfsnorm omdat deze bepaald is op basis van metingen.

Bronnen voor technische normen zijn wetenschappelijke literatuur, rapportages van praktijkproeven, productspecificaties van fabrikanten en andere beoordelingen op basis van metingen (bijv. certificering).

### 3.5 Effectbepaling

Met een effectmodel wordt het effect van leidingfalen bepaald. Dit effect wordt meestal opgedeeld in minimaal 5 componenten (Agudelo-Vera en Moerman, in voorbereiding; Beuken, 2008):

- effect van leveringsonderbreking<sup>8</sup> ('welke klanten worden getroffen?' Uit te drukken in een representatief aantal aansluitingen (impact) of de hoeveelheid ondermaatse leveringsminuten (OLM);

---

<sup>8</sup> Dit kan betrekking hebben op zowel ondermaatse druk als volumestroom.

- effect op de veiligheid ('is er sprake van schade aan de omgeving zoals verkeersaders of waterkeringen waarbij de veiligheid in het geding is?' (uit te drukken in een effectklasse);
- effecten op de waterkwaliteit als gevolg van intrede van externe verontreinigen bij een leidingbreuk.
- effect vanwege mogelijke schade aan private (bijv. gebouwen, auto's) of publieke (bijv. gebouwen, monumenten, infrastructuur) eigendommen (uit te drukken in een geldbedrag).
- effect voor het bedrijfsimago (uit te drukken in een effectklasse).

Effectmodellen zijn erop gericht om tot een kwantitatieve bepaling te komen van gevolgen van falen zoals ontgronding, het meenemen van specifieke omgevingsaspecten (hoe erg is een zekere ontgronding in een bepaalde omgeving) en het beperken van effecten van falen, zoals de werking van afsluiters.

In dit rapport wordt niet diep ingegaan op effectmodellen omdat UKNOW vooral op de kanskant gericht is. Om het beeld compleet te maken dienen ze hier echter wel genoemd te worden omdat UKNOW werkt volgens een kans-effect-risico schema. Effectmodellen leiden samen met conditiebepalingen (zo nodig na vertaling tot faalkans, zie paragraaf 2.5) tot een risico. In de afweging om meerdere toestandsbepalingen toe te passen (zie hiervoor ook de toelichting in paragraaf 2.2) speelt het effect een belangrijke rol. Het is immers niet kostenefficiënt om veel moeite te steken in het verkleinen van de onzekerheid van falen bij leidingen met een beperkt effect van falen.

In dit rapport wordt – als het om onzekerheid van modellen gaat – vooral gefocust op de onzekerheid in modellen voor toestand en norm (en dus conditie). Effectmodellen bevatten echter ook onzekerheden, aangezien ze in de regel het effect beschrijven dat kan optreden. Zo kan het effect van een leidingfalen groot zijn wanneer deze bij een drukke verkeersader ligt. Als de leiding echter 's nachts breekt zal het effect kleiner veel kleiner zijn dan wanneer de leiding tijdens spitsuur breekt. Er is hierbij dus ook sprake van een zogenaamd 'kans op effect'. Dit is een vorm van onzekerheid in data (variabiliteit).

Enkele voorbeelden van effectmodellen zijn:

- beoordeling Externe Effecten Leidingfalen (BEEL) studies;
- bepaling aantal getroffen aansluitingen bij leidingfalen (bijvoorbeeld met een programma als CAVLAR<sup>9</sup>);
- beoordeling imagoschade na leidingbreuk.

Effectmodellen werken meestal in een GIS omgeving omdat hierin eenvoudig geografische relaties te leggen zijn tussen een leiding of ontgrondingskuil en de omgeving (Agudelo-Vera en Moerman, in voorbereiding; van Daal, 2012; van Daal et al., 2009).

Bronnen voor effectmodellen zijn enerzijds (verrijkte) assetdata (gegevens over leidingposities en ontgrondingskuilen) en anderzijds omgevingsdata (posities van kwetsbare afnemers, monumenten, waterkeringen, verkeersaders zoals snelwegen en spoorwegen, etc.). In geval van wateroverlast na een leidingbreuk spelen ook objecten die de afvoer van water reguleren, zoals drainagemiddelen (sloten, riolen, etc), en de ligging daarvan een rol.

---

<sup>9</sup> Overigens is CAVLAR op zichzelf geen effectmodel maar een risicomodel. CAVLAR combineert immers zowel kans (afsluiterbetrouwbaarheid, aantal verwachte incidenten per jaar in een afsluitersectie) en effect (aantal getroffen aansluitingen, reparatietijd). De uitkomst hiervan is het impactgetal, dan wel de OLM. CAVLAR is dus een risicomodel.

### 3.6 Discussie

Op basis van uiteenzetting van modellen voor de bepaling van toestand, norm en effect kan het volgende opgemerkt worden:

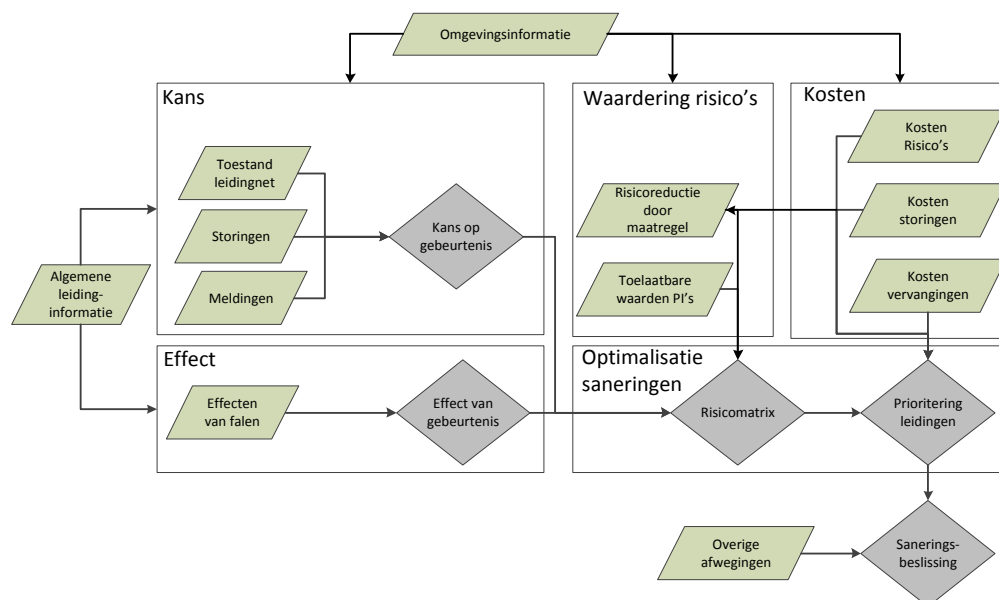
- Modellen voor het bepalen van de toestand van een leiding bevatten veel parameters die elk hun specifieke onzekerheid hebben.
- Dit rapport geeft alleen een indicatie van de onzekerheid in deze modellen. Het kwantificeren van deze onzekerheden geeft inzicht in de daadwerkelijke toegevoegde waarde van een model.
- Op basis van het risico van falen van een leiding kan – al dan niet – besloten worden tot het inzetten van een nauwkeuriger model (bijv. een inspectie) ten opzichte van een meer gebruikelijk model voor falen zoals een storingsfrequentieberekening.
- In dit hoofdstuk zijn twee voorbeelden gegeven van toestandsmodellen (KSLB V2, Comsima). Deze modellen kunnen elkaar op verschillende manieren aanvullen:
  - Kennis uit het KSLB meetmodel kan in Comsima gebruikt worden om veroudering te simuleren bij AC- of grijs gietijzeren leidingen.
  - Storingsfrequenties uit het frequentiemodel kunnen vergeleken worden met uitkomsten van Comsima (Wols et al., 2015). Deze combinatie genereert op twee manieren kennis:
    - De mate van correlatie tussen gemodelleerde spanning en gemeten storingsfrequentie geeft een beeld in hoeverre het falen van leidingen (in het onderzochte gebied) te modelleren is met Comsima.
    - De correlatie tussen gemodelleerde spanning en gemeten storingsfrequentie draagt bij aan meer begrip van de relatie tussen conditie (mate waarin kritische spanning bereikt is: Comsima) en faalkans (het daadwerkelijk bezwijken van leidingen).
- De keuze voor verschillende modellen vraagt om een modelarchitectuur waarin de samenhang tussen deze modellen duidelijk wordt. Een dergelijke architectuur draagt bij aan een meer rationeel vervangingsbeleid. Op deze architectuur wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 4.



## 4 Architectuurconcept en aanbevelingen

### 4.1 Beslissingsondersteunende systemen bij bedrijven

Bij de meeste drinkwaterbedrijven is assetmanagement gebaseerd op een risicobenadering. Dat wil zeggen dat van alle leidingen de risico's bij falen worden ingeschat, waarna een afweging volgt met welke prioritering leidingen vervangen moeten worden. Om tot een dergelijke prioritering te komen zijn in de literatuur verschillende methoden beschikbaar (Marlow et al., 2015; Moglia et al., 2006; Seo et al., 2015). Veel drinkwaterbedrijven gebruiken een vergelijkbare opbouw in hun assetmanagement als Figuur 4.1 (Beuken en Van Vossen, in voorbereiding).



FIGUUR 4.1 FUNCTIONELE WEERGAVE VAN BESLISSINGSONDERSTEUNENDE SYSTEMEN BIJ DRINKWATERBEDRIJVEN.

Risico's zijn een resultaat van kans en effect. Deze risico's worden vervolgens door de bedrijven gewaardeerd. Het uitgangspunt is bij de meeste bedrijven een risicomatrix waarin mogelijke ongewenste gebeurtenissen zijn gecategoriseerd. Aan deze gebeurtenissen kunnen kosten worden verbonden en/of prestatie-indicatoren (bijvoorbeeld voor imagoschade) die op hun beurt gewaardeerd worden in de vorm van een maximaal toelaatbare waarde. Hieraan kunnen de kosten voor storingen en vervangingen worden toegevoegd. Al deze gegevens worden bij elkaar gevoegd in een berekening waaruit een prioritering van leidingen voor sanering volgt. Dit is nog geen saneringsbeslissing, er kunnen naast de risicoanalyse nog andere argumenten voor wel of niet saneren zijn, zoals bijvoorbeeld:

- inspelen op externe ontwikkelingen, zoals ruimtelijke ontwikkelingen of meegaan met derden (kostenafweging);
- een analyse van de risicoreductie als gevolg van te nemen maatregelen;

- economische afwegingen, zoals maximum beschikbare budgetten;
- wettelijke maatregelen zoals het vervangen van loden leidingen;
- afwegingen met betrekking tot waterkwantiteit (te lage leveringszekerheid of druk);
- afwegingen met betrekking tot de waterkwaliteit (bijv. vanwege permeatie of excessieve biofilmvorming).

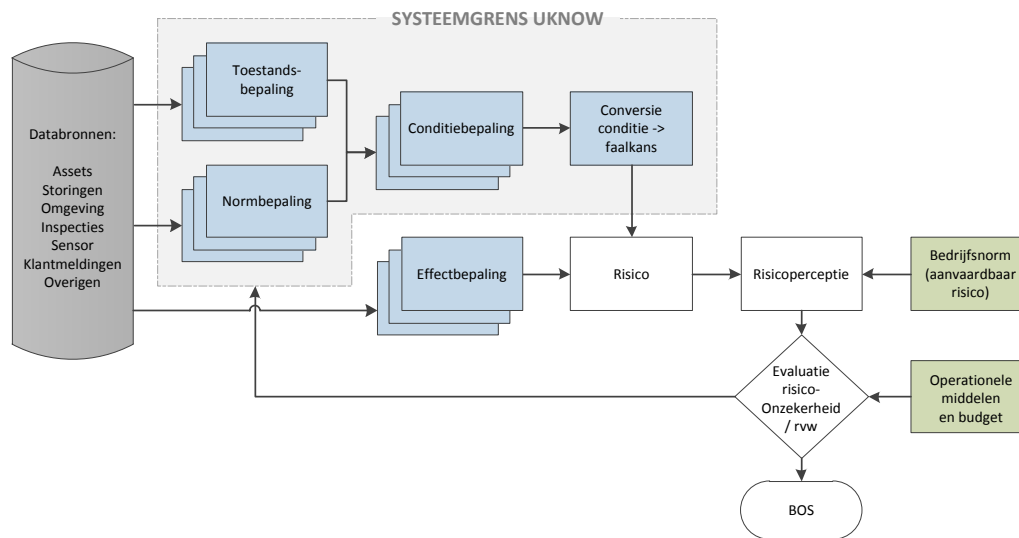
## 4.2 Architectuurconcept

### 4.2.1 Doel en systeemgrenzen

UKNOW is een concept waarmee verschillende modellen (modules) voor het bepalen van de leidingtoestand gecombineerd kunnen worden. Samen met de bepaling van het effect van falen (wat buiten UKNOW valt) kan tot een risicobepaling gekomen worden die gebruikt wordt als input voor beslissing ondersteunende software (BOS). Een BOS wordt in dit rapport beschouwd als een economisch model ter ondersteuning van het operationeel beheer. Dat wil zeggen dat een BOS zelf geen kwantitatieve risicoanalyse uitvoert maar dat deze alleen gebruikt wordt voor het inplannen van werkzaamheden op basis van beschikbare budgetten. Door expliciet de onzekerheden in modellen duidelijk te maken en deze te kwantificeren kan een afweging gemaakt worden of geïnvesteerd zou moeten worden in een model (of invoerdata) met minder onzekerheid. Verschillende modellen kunnen elkaar ook aanvullen. UKNOW maakt het mogelijk om deze modellen gezamenlijk in te zetten in plaats van deze modellen afzonderlijk te gebruiken. De verschillende modellen zijn modules van UKNOW. UKNOW moet in eerste instantie gericht zijn op de kansenkant van de risicomatrix. De effectbepaling valt vooralsnog dus buiten UKNOW. Dit hangt samen met het feit dat de effectenkant vooral gedreven wordt door het aanbod van data van externen en dat de kansenkant vooral onderzoeksgedreven is. In een later stadium kan eventueel besloten worden om de effectenkant ook deel uit te laten maken van UKNOW.

### 4.2.2 Componenten en onderlinge relaties

In hoofdstuk 2 is het kader en de terminologie voor UKNOW uitgewerkt. Daarna zijn in hoofdstuk 3 voorbeelden van componenten (modellen) voor UKNOW geïntroduceerd. De conceptarchitectuur voor UKNOW bestaat uit toestands-, norm-, conditie- en effectmodellen. De basale samenhang tussen deze modellen is weergegeven in Figuur 4.2.



FIGUUR 4.2 SAMENHANG TUSSEN COMPONENTEN UIT UKNOW. BOS STAAT VOOR 'BESLISSING ONDERSTEUNENDE SOFTWARE'.

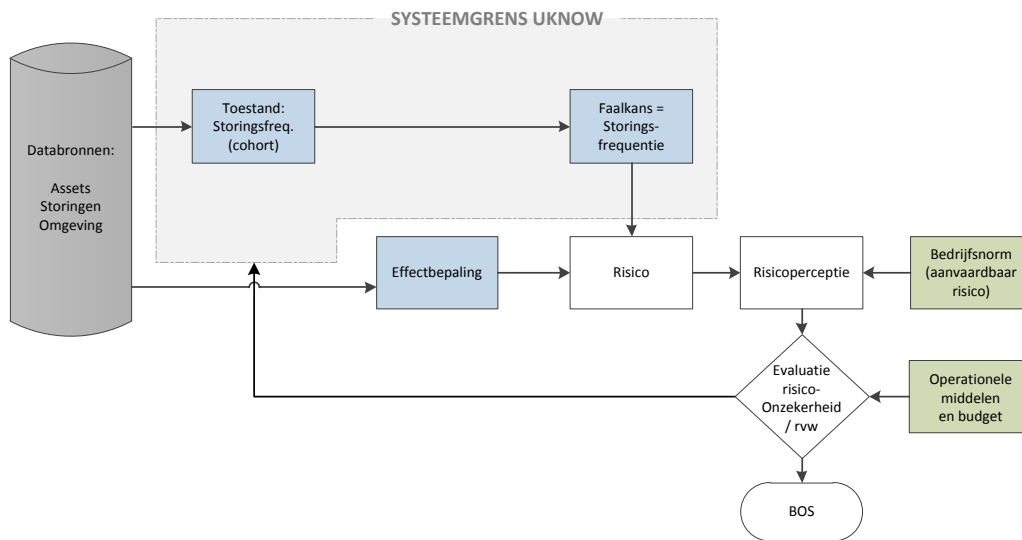
Een belangrijk onderdeel van het proces rondom UKNOW wordt gevormd door de terugkoppeling na evaluatie van de verhouding tussen risico, onzekerheid van risico en bedrijfseigen randvoorwaarden (beleid, kosten).

In praktijk zullen de afzonderlijke modellen voor bepaling van toestand en norm zich niet altijd in afzonderlijke software bevinden.

#### 4.2.3 UKNOW architectuur bij gebruik meerdere modellen voor bepaling toestand, norm en conditie

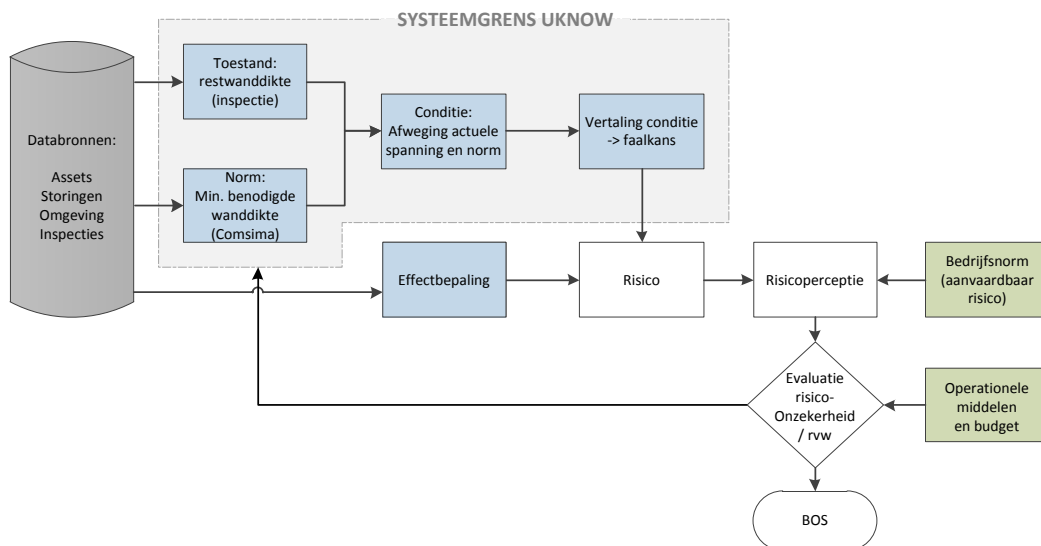
In deze paragraaf wordt de conceptarchitectuur van UKNOW toegelicht aan de hand van twee voorbeeldfiguren die ontleend zijn aan het voorbeeld uit paragraaf 2.2.

Op dit moment worden storingsfrequenties veel gebruikt om tot een saneringsbeslissing te komen. Als toestandsbepaling wordt dus de storingsfrequentie gehanteerd. Deze zegt iets over de toestand van een cohort leidingen. Dit deterministisch-statistische schema leidt tot de invulling van Figuur 4.2 (Figuur 4.3). Omdat de resultante van de storingsfrequentieberekening een faalkans is, is de vertaling van toestand of conditie naar faalkans in dit geval niet nodig.



FIGUUR 4.3 INVULLING VAN UKNOW BIJ GEBRUIK VAN STORINGSFREQUENTIE ALS TOESTANDBEPALING. BOS STAAT VOOR 'BESLISSING ONDERSTEUNENDE SOFTWARE'.

Wanneer na evaluatie van het risico en de onzekerheid daarin blijkt dat meer inzicht gewenst is kan gebruik gemaakt worden van een ander model voor toestandsbepaling. In het voorbeeld uit paragraaf 2.2 is dit het gebruik maken van inspecties waarmee een restwanddikte bepaald wordt. Het spanningsmodel Comsima wordt ingezet als normbepaling om de vraag te beantwoorden welke spanning in dit geval (gezien de omgeving) toelaatbaar is. Als conditiebepaling dient een genormaliseerde spanning die berekend is op basis van de norm uit Comsima en de inspectie van de leiding. Wanneer Figuur 4.2 ingevuld wordt op basis van die keuze komt men tot Figuur 4.4.

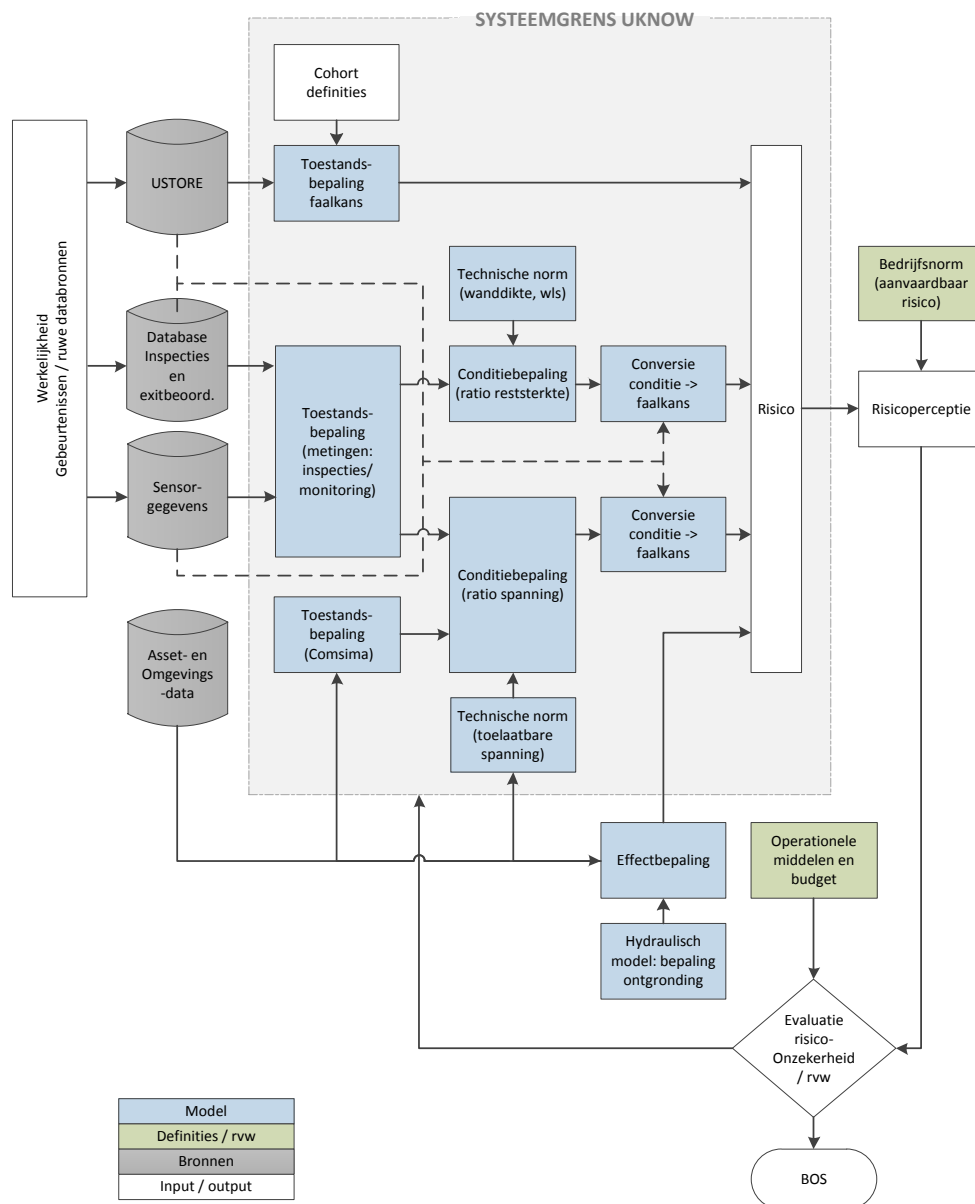


FIGUUR 4.4 INVULLING VAN UKNOW BIJ GEBRUIK VAN INSPECTIES ALS TOESTANDBEPALING. BOS STAAT VOOR 'BESLISSING ONDERSTEUNENDE SOFTWARE'.

De genormaliseerde spanning (conditie) is nog niet hetzelfde als een faalkans. Bij deze 'vertaling' van conditie naar faalkans kan gebruik gemaakt worden van de correlatie tussen berekende spanningen en storingsfrequenties (Wols et al., 2015).

Wanneer meerdere toestandsbepalingen gecombineerd worden in één (meer gedetailleerde) architectuur ontstaat het beeld uit Figuur 4.5. Deze figuur laat zien dat, afhankelijk van het belang van de asset (effect) meerdere databronnen en modellen parallel gebruikt kunnen worden om tot een beoordeling van het risico (en de onzekerheid van dit risico) te komen.

De onderbroken lijn in Figuur 4.5 representeert de datastroom die benodigd is om tot een conversie van conditie naar faalkans te komen.



FIGUUR 4.5 CONCEPT ARCHITECTUUR UKNOW GEDETAILLEERD INGEVULD BIJ TOEPASSING VAN DRIE VERSCHILLENDE METHODEN VOOR TOESTANDBEPALING (STORINGSFREQUENTIE VOOR COHORT, COMSIMA, BEPALING RESTSTERKTE MET METINGEN).

De evaluatie van uitkomsten van UKNOW vindt plaats op het niveau van de risicobepaling ('welk risico is aanvaardbaar?') en niet op het niveau van de conditiebepaling. Dit leidt ertoe dat bedrijfsnormen buiten de scope van UKNOW vallen omdat ze niet objectief zijn. Technische normen maken wel deel uit van UKNOW. Deze worden gebruikt om, in

combinatie met een toestandsmodel (bijv. Comsima), tot een objectieve conditiebepaling te komen.

De evaluatie van het risico (en de onzekerheid daarvan) leiden tot een terugkoppeling naar (o.a.) de keuze van een norm.

## 5 Functionele eisen en aanbevelingen

### 5.1 Functionele eisen

In hoofdstuk 4 is een concept architectuur voor UKNOW voorgesteld (Figuur 4.5). Deze architectuur beschrijft de samenhang tussen verschillende modules die deel uitmaken van UKNOW. UKNOW is een concept waarmee verschillende modellen (modules) voor het bepalen van de leidingtoestand gecombineerd kunnen worden. Om – in de toekomst – tot een concrete ontwikkeling van UKNOW te komen worden in dit hoofdstuk inhoudelijke stappen beschreven om tot een systeem voor UKNOW te komen. Daarnaast zijn functionele eisen beschreven waaraan een dergelijk systeem zou moeten voldoen.

Om te zorgen dat verschillende modules in UKNOW op elkaar aansluiten en resultaten van gelijke grootte/eenheid zijn worden randvoorwaarden aan in- en uitvoer gesteld waarmee stapsgewijs vooruitgewerkt wordt naar een resultaat. Dit betekent bijvoorbeeld dat een module bestaande uit een fysisch model voor conditiebepaling (op basis van toestand en norm) ook een bouwsteen moet bevatten waarmee de conditie geconverteerd kan worden naar een faalkans.

Een project ter realisatie van UKNOW bevat de volgende inhoudelijke stappen, waarbij nauwe samenwerking met de drinkwaterbedrijven vereist is:

- Definitie van modules die deel uitmaken van UKNOW.
- Vaststellen van een universeel uitwisselingsformaat (op basis van een tabel met geografische componenten) waarmee gegevens van verschillende modellen uitgewisseld en gecombineerd kunnen worden.
- Het definiëren van een systematiek om tot een vertaling van conditie naar faalkans te komen. Deze systematiek bestaat uit een statistische relatie tussen degradatie en faalkans. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van een combinatie van Comsima en USTORE of exitbeoordelingen (praktijkmetingen). Het koppelen van modules en genereren van uitvoer.
- Vaststellen hoe onzekerheden in modellen van de geselecteerde modules gekwantificeerd kunnen worden.
- Uitvoeren van een pilot.
- Inventarisatie van wensen en mogelijkheden met betrekking tot het aanbieden van webservices voor UKNOW modules zoals Comsima of CAVLAR.

Hieronder volgen een aantal generieke functionele eisen voor UKNOW. Voor specifieke modules die deel uit (gaan) maken van UKNOW kunnen aanvullende eisen nodig zijn.

- UKNOW dient modulair opgebouwd te zijn: de verschillende modules moeten afzonderlijk en gezamenlijk bruikbaar zijn. Bedrijven zijn daarmee vrij om te kiezen welke delen van UKNOW ze gebruiken. Verbeteringen en aanpassingen dienen doorgevoerd te kunnen worden zonder de uitwisselingsstructuur aan te passen.
- UKNOW dient zo opgesteld te zijn dat er modules aan toegevoegd kunnen worden (bijvoorbeeld als er nieuwe gegevensbronnen beschikbaar komen of nieuwe tools).

- Alle modules in UKNOW dienen dezelfde systematiek wat betreft opzet te gebruiken (documentatie, programmeerconventies voor o.a. leesbaarheid, invoer, uitvoer, interface). Voor alle modules dient expliciet te zijn:
  - welke kennisregels gehanteerd zijn;
  - welke aannamen gedaan zijn en;
  - welke modelonzekerheden van toepassing zijn.
- Output van databases en tools moet in verschillende dataformats verkrijgbaar zijn, waaronder tabelvorm (.csv) en als geografisch format (bijvoorbeeld shapefile).
- UKNOW tools en databases zijn beschikbaar via webservices. Rekenintensieve modules kunnen gekoppeld worden aan een rekenserver.
- Het uitgangspunt van gegevensbronnen is enkelvoudig beheer, meervoudig gebruik. Dat wil zeggen, één beheerder per gegevensbron en het aanroepen of gebruik van klonen bij gebruik in modules. Alleen de beheerder heeft het recht om gegevens aan te passen.
- Gegevens moeten voorzien zijn van documentatie die de volgende elementen beschrijft: definitie, schaal, volledigheid, betrouwbaarheid, nauwkeurigheid, verantwoordelijke beheerder, datum laatste wijziging, bron.
- Het is te verwachten dat de diverse onderdelen van UKNOW in verschillende omgevingen zullen functioneren. Om dit mogelijk te maken dienen (voor zover relevant) protocollen opgesteld te worden voor een beveiligde opslag en overdracht van data.

## 5.2 Aanbevelingen

In paragraaf 4.2.3 is de architectuur voor UKNOW weergegeven (Figuur 4.5) met als doel de samenhang tussen verschillende soorten modellen en databronnen te verduidelijken. Figuur 4.5 dient tevens om aan te geven waar zich de grootste witte vlekken bevinden en welke elementen van UKNOW om de meeste ontwikkeling vragen (Figuur 5.1).

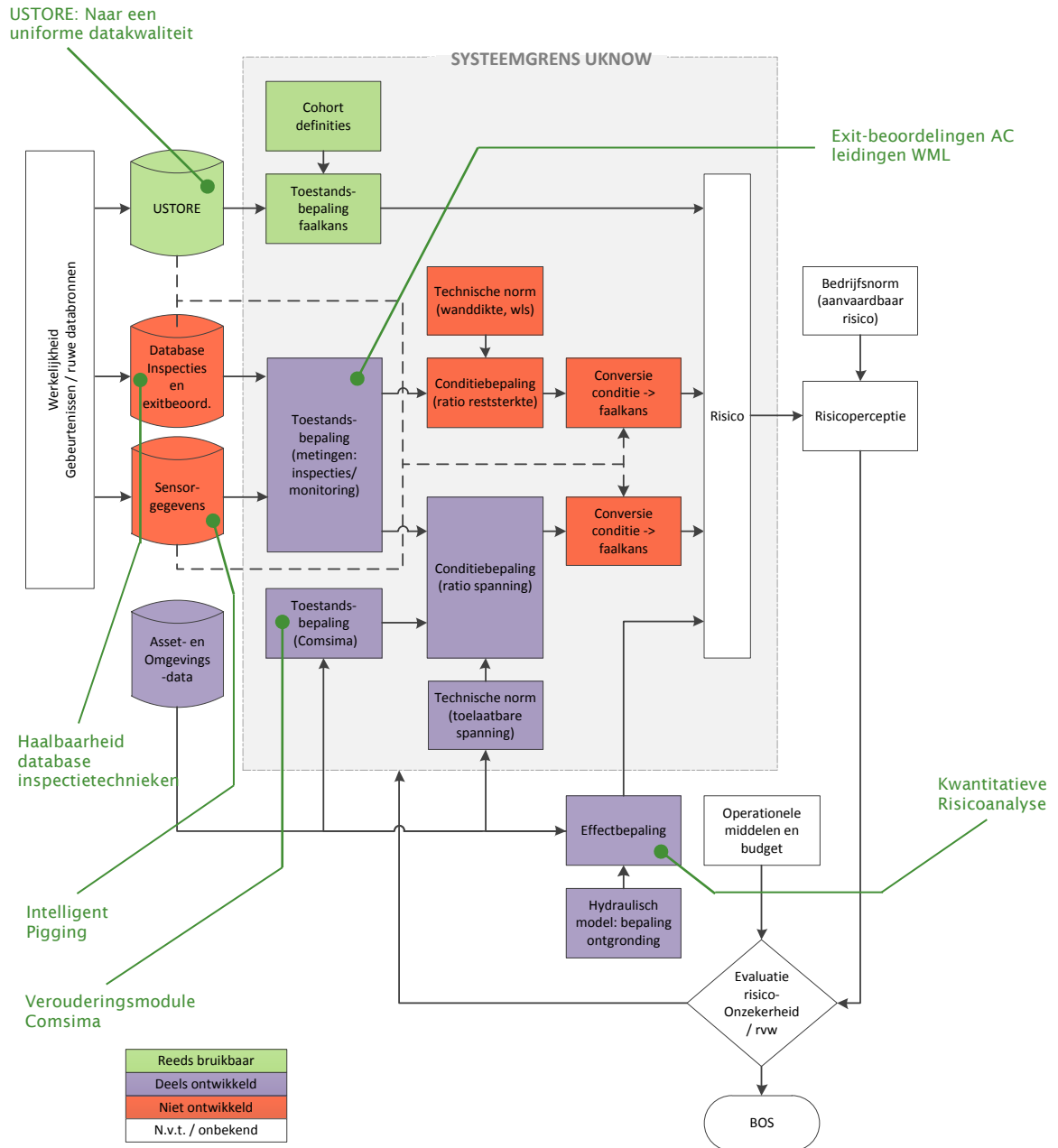
De voornaamste aanbevelingen om te komen tot een systeem voor de implementatie van UKNOW zijn:

1. Het definiëren van een systematiek om tot een vertaling van conditie naar faalkans te komen.
2. het verder specificeren van de functionele eisen van UKNOW aan de hand van de wensen van de drinkwaterbedrijven met betrekking tot de concrete invulling van UKNOW (zie ook punt 3 hieronder);
3. het uitwerken van een project ter realisatie van UKNOW volgens de gespecificeerde eisen uit Paragraaf 5.1.
4. het prioriteren van de ontwikkeling van verschillende modules voor UKNOW aan de hand van Figuur 4.5 (of een nadere invulling van deze figuur).

Naast de bovengenoemde aanbevelingen en functionele eisen zijn er aanbevelingen in aanvulling op bestaande initiatieven:

- Het opzetten van een database waarin resultaten van inspecties en exitbeoordelingen op uniforme wijze gedeeld worden zodat een onderbouwing van toestandsbepaling mogelijk is.
- Het uitvoeren van een pilot waarbij gegevens uit verschillende bronnen en modellen gecombineerd worden (bijvoorbeeld Comsima en USTORE; Wols et al. (2015)) om tot een beter begrip van leidingdegradatie te komen.
- Het onderzoeken in hoeverre het kwantificeren en implementeren van de onzekerheid in effectmodellen (zie paragraaf 3.5) kan leiden tot een meer gedifferentieerde risicoschatting, ten behoeve van een efficiënter vervangingsbeleid.





FIGUUR 5.1. INSCHATTING VAN DE MATE WAARIN COMPONENTEN IN UKNOW ONTWIKKELD ZIJN. LOPENDE PROJECTEN DIE RELEVANT ZIJN VOOR UKNOW ZIJN BENOEMD MIDDELS GROENE PIJLEN EN OMSCHRIJVING.

# Literatuur

- Agudelo-Vera, C. A., en Moerman, A., in voorbereiding, Kwantitatieve risico analyse voor het distributienet, KWR, Nieuwegein.
- Beuken, R., 2008, Risicoanalyse van leidingnetten, Rapport nr. BTO 2008.003, KWR, Nieuwegein, pp. 65.
- Beuken, R., 2013a, Beslissingsondersteunende softwaremodellen voor leidingsaneringen, Rapport nr. KWR 2013.051, KWR, Nieuwegein, pp. 43.
- Beuken, R., 2013b, Software voor beslissingsondersteuning bij leidingsaneringen, Rapport nr. BTO 2013.035, KWR, Nieuwegein, pp. 66.
- Beuken, R. H. S., In voorbereiding, Exitbeoordelingen AC-leidingen bij WML - Fase 2: nadere analyse, KWR, Nieuwegein.
- Beuken, R. H. S., en Mesman, G. A. M., 2011, Kennissysteem Levensduurbepaling Versie 2.0, Rapport nr. BTO 2011.113(s), KWR, Nieuwegein, pp. 40.
- Beuken, R. H. S., en Mesman, G. A. M., 2015, Workshop Inspectietechnieken voor het leidingnet, Rapport nr. BTO 2015.222(s), KWR, Nieuwegein.
- Beuken, R. H. S., Moerman, A., en Dilven, B., in voorbereiding, PCD Naar een uniforme kwaliteit van USTORE, KWR, Nieuwegein.
- Beuken, R. H. S., en Van Vossen, J., in voorbereiding, Kwantitatieve vergelijking van beslissingsondersteunende software voor leidingsaneringen, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- de Kater, H., Beuken, R., en Vogelaar, A., 2010, Inspectietechnieken voor rationeel saneringsbeleid van leidingnetten, Rapport nr. BTO 2010.013, KWR, Nieuwegein, pp. 77.
- Jafar, R., Shahrour, I., en Juran, I., 2010, Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains, *Mathematical and Computer Modelling* 51(9-10):1170-1180.
- Kleiner, Y., en Rajani, B., 1999, Using limited data to assess future needs, *American Water Works Association* 91(7):47-62.
- Kleiner, Y., en Rajani, B., 2001, Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models, *Urban Water* 3:131-150.
- Kleiner, Y., en Rajani, B., 2010, I-WARP: Individual Water mAin Renewal Planner, *Drink. Water Eng. Sci.* 3(1):71-77.
- Le Gat, Y., en Eisenbeis, P., 2000, Using maintenance records to forecast failures in water networks, *Urban Water* 2(3):173-181.
- Marlow, D., Gould, S., en Lane, B., 2015, An expert system for assessing the technical and economic risk of pipe rehabilitation options, *Expert Systems with Applications* 42(22):8658-8668.
- Mesman, G. A. M., 2010, Inventarisatie historische SI Brabant Water, Rapport nr. KWR 2010.081, KWR, Nieuwegein, pp. 27.
- Moerman, A., 2016, Storingen van aansluitleidingen, Rapport nr. KWR 2016.007, KWR, Nieuwegein.
- Moerman, A., en Wols, B., 2015, Verkennend Onderzoek Verkeersbelasting en Leidingfalen (notitie), Rapport nr. BTO 2015.004, KWR, Nieuwegein, pp. 46.
- Moglia, M., Burn, S., en Meddings, S., 2006, Decision support system for water pipeline renewal prioritisation, *ITcon* 11:237-256.
- Rajani, B., en Kleiner, Y., 2001, Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models, *Urban Water* 3(151-164).
- Renaud, E., Gat, Y. L., en Poulton, M., 2012, Using a break prediction model for drinking water networks asset management: from research to practice, *Water Science & Technology* 12(5):674-682.
- Rogers, P., 2011, Prioritizing Water Main Renewals: Case Study of the Denver Water System, *ASCE Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 2(3):73-81.

- Seo, J., Koo, M., Kim, K., en Koo, J., 2015, A Study on the Probability of Failure Model Based on the Safety Factor for Risk Assessment in a Water Supply Network, *Procedia Engineering* 119:206-215.
- Skornsek, J., 2011, Informatiebehoefte saneringsbeleid en GIS, Rapport nr. BTO 2011.055, KWR, Nieuwegein, pp. 65.
- Skornsek, J., 2015, Meerwaarde Geo-informatie voor Kennissysteem Levensduurbepaling Leidingen, Rapport nr. BTO 2015.083, KWR, Nieuwegein.
- Slaats, N., Arsenio, A., Wielinga, M., Blokker, E. J. M., Dignum, M., en Hekhuizen, E., 2012, Pilot sensoren – praktijkervaringen, Rapport nr. KWR 2012.012, KWR, Nieuwegein, pp. 45.
- van Daal, K., 2012, De meerwaarde van ruimtelijke analyses met USTORE gegevens, Rapport nr. BTO 2012.222(s), KWR, Nieuwegein, pp. 49.
- van Daal, K., Horst, P., en Beuken, R., 2009, Ondersteuning leidingnetbeheer met GIS, Rapport nr. KWR 09.037, KWR, Nieuwegein, pp. 81.
- van Daal, K., en Raterman, B., 2010, GIS bij waterleidingbedrijven; fase 1 Inventarisatie en visie, Rapport nr. BTO 2010.025, KWR, Nieuwegein, pp. 67.
- van Daal, K., en Raterman, B., 2011, Geoservices bij overheden en bedrijfsleven - BTO Geo-informatie fase 2, Rapport nr. BTO 2011.007(s), KWR, Nieuwegein, pp. 41.
- van Daal, K., Vogelaar, A. J., en Mesman, G. A. M., 2011, Inventarisatie risicovolle leidingen in een stedelijke omgeving - Koppeling rekenregels ontgrondingskuilen met GIS, Rapport nr. BTO 2011.016, KWR, Nieuwegein, pp. 48.
- Van Thienen, P., 2012, Storingenregistratie en -analyse: Hoeveel storingen hebben we eigenlijk nodig?, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van Thienen, P., 2014, Strategieën voor optimale plaatskeuze van waterkwaliteitssensoren in het distributienet, Rapport nr. BTO 2014.046, KWR, Nieuwegein, pp. 72.
- Vertommen, I., 2015, Klantmeldingen bij WML: een bron van informatie voor de detectie van waterkwaliteits-problemen, Rapport nr. KWR 2015.088, KWR, Nieuwegein.
- Vertommen, I., en van Thienen, P., 2015, De waarde van klantmeldingen - Alternatieve Indicatoren voor waterkwaliteitsproblemen, Rapport nr. BTO 2015.024, KWR, Nieuwegein, pp. 74.
- Vloerbergh, I., en van Thienen, P., 2010, Controlemethodiek afsluiters, Rapport nr. BTO 2010.020, KWR, Nieuwegein, pp. 49.
- Vloerbergh, I. N., 2008, U-STORE; Toelichting op en afspraken uniforme storingsregistratie, Rapport nr. BTO 2008.057, KWR, Nieuwegein, pp. 55.
- Vloerbergh, I. N., en Beuken, R., 2013, Naar een kwaliteitssysteem voor USTORE, Rapport nr. BTO 2013.225(s), KWR, Nieuwegein, pp. 57.
- Vloerbergh, I. N., en van Thienen, P., 2011, Registratie geeft storingen waarde. Implementatie en evaluatie van USTORE, Rapport nr. BTO 2011.058, KWR, Nieuwegein, pp. 50.
- Vonk, A. W., en Mesman, G. A. M., 2015a, Voorspellingsmodel conditiebepaling AC-leidingen, Rapport nr. BTO 2015.202(s), KWR, Nieuwegein.
- Vonk, E., 2014, Het voorspellen van inwendige uitloging van asbestcementleidingen met een kunstmatig neurale netwerk, Rapport nr. BTO 2014.211(s), KWR, Nieuwegein, pp. 16.
- Vonk, E., en Mesman, G. A. M., 2015b, Voorspellingsmodel conditiebepaling AC-leidingen - fase 2, Rapport nr. BTO 2015.008, KWR, Nieuwegein, pp. 28.
- Vonk, E., en Vries, D., 2016, Datamining voor assetmanagement – inventarisatie en voorbeelden uit de watersector, Rapport nr. BTO 2016.007, KWR, Nieuwegein, pp. 54.
- Wols, B. A., en Moerman, A., 2015, Comsima: model voor spanningen op ondergrondse leidingen, Rapport nr. BTO 2015.206(s), KWR, Nieuwegein, pp. 37.
- Wols, B. A., Moerman, A., en Vertommen, I., 2015, Comsima: model voor spanningen op ondergrondse leidingen, Rapport nr. BTO 2015.082, KWR, Nieuwegein.