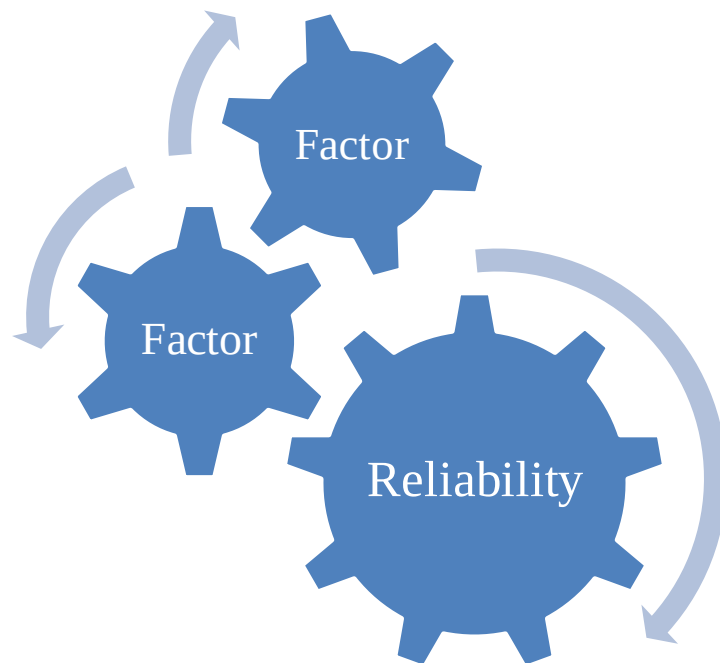


# Het verbeteren van het productontwikkelingsproces op een gestructureerde manier

*Het productontwikkelingsproces sturen op reliability als belangrijke driver voor totale levenscycluskosten*



READER

*Auteur: M. Houben*

*Deze reader is gefinancierd door het Nederlands ministerie van Economische Zaken. De auteur wil zijn erkentelijkheid betuigen aan het Nederlandse ministerie van Economische Zaken voor de steun aan zijn onderzoek via het IOP programma Integrale ProductCreatie en -Realisatie*

# Doel & Toelichting

---

## *Quote uit de praktijk*

‘Meestal hebben we een erg mechanistisch beeld van onze systemen en we zien daarom eigenschappen zoals reliability als een som van de eigenschappen van de individuele componenten. Toch merken we dat we dan onvoldoende grip hebben op bijvoorbeeld de reliability. Aan de ene kant verbeteren we bepaalde componenten terwijl aan de andere kant de reliability niet verbetert en soms zelfs minder wordt. Blijkbaar zijn er factoren in het spel naast de individuele componenten die van invloed zijn op de reliability. Die factoren willen we leren kennen en kunnen sturen tijdens het productontwikkelp proces. We willen van een mechanistische kijk op onze systemen naar een meer holistische kijk’

---

*Op dit moment is er nog geen manier om al vroeg in het ontwikkelproces, wanneer er nog weinig of geen data beschikbaar zijn, het productontwikkelp proces te sturen op een beoogd einddoel. Er zijn methoden die inzicht bieden in de manier waarop de prestaties van een product, bijv. reliability, beïnvloed worden tijdens het productontwikkelp proces. Echter, waar FMEAs inzichten bieden in de manier waarop factoren de prestaties van een product beïnvloeden, maken zij niet inzichtelijk op wat voor manier dit gebeurt, terwijl testen alleen mogelijk is als het product al ontwikkeld is. Verder is het managen van de prestaties van het systeem op basis van het functioneren van componenten en deelsystemen slechts mogelijk wanneer er al een uitontwikkeld product is! Daarom wordt er in deze reader een leidraad gegeven voor een tool die het mogelijk maakt om de prestaties van een product te managen, waarbij het zich richt op het sturen van de processen binnen het productontwikkelp proces.*

**Deze reader is slechts een introductie van de tool. De reader biedt geen generieke oplossingen.**

## **Deze reader richt zich op het informeren over en het gebruiken van een tool die:**

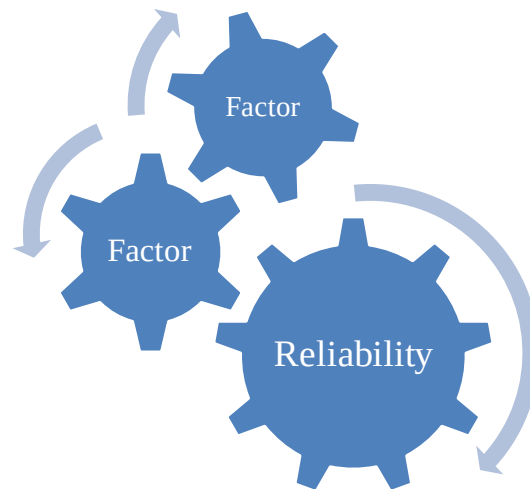
- Inzichten geeft in hoe het productontwikkelp proces product prestaties beïnvloedt, zowel kwalitatief als kwantitatief
- Handvatten geeft voor het managen van het productontwikkelp proces, om zo een bijdrage te leveren aan het “First Time Right” ontwikkelen van een product

## **Voor managers biedt dit boek:**

- Inzichten om verder te bepalen of de tool geschikt zou zijn.

## **Voor adviseurs en mensen die de tool willen implementeren biedt dit boek:**

- Handreikingen voor de implementatie van deze tool in de praktijk.



**De tool is gericht op het ondersteunen van beslissingen gedurende het productontwikkelingsproces die betrekking hebben op producteigenschappen**

Op deze manier kan er, in de loop van het productontwikkelingsproces, gestuurd worden op de prestatie van het eindproduct m.b.t. een karakteristiek (zoals bijvoorbeeld reliability, een belangrijke driver van de totale levenscycluskosten). De tool die wordt geïntroduceerd in deze reader is Bayesiaanse netwerken. Deze reader biedt meer informatie over de tool en hoe deze invulling kan geven aan beslissingsondersteuning. Ook geeft het een leidraad voor het toepassen van de tool door het uitwerken van een casus.

*NB: de casus die als leidraad wordt gebruikt beschrijft de toepassing van de tool, in de context van reliability management. Het is een van meerdere voorbeelden uit de praktijk die de mogelijkheden, de toepasbaarheid en de voordelen van deze tool aantonen, (zie bijvoorbeeld [www.agenarisk.co.uk](http://www.agenarisk.co.uk) voor praktische toepassingen en resultaten).*

De mogelijkheden die de tool biedt, worden op de volgende pagina besproken.

### ***De tool geeft inzicht in de relaties tussen productprestaties en het productontwikkelingsproces***

De tool verschaft inzicht in de relaties tussen verschillende factoren die een rol spelen in het productontwikkelingsproces, en de manier waarop deze factoren invloed hebben op de eigenschappen van het eindproduct. Zo wordt duidelijk hoe de factoren samenhangen, en kunnen interacties worden geïdentificeerd.

### ***De tool maakt deze inzichten kwantitatief***

De tool is gebaseerd op de techniek van Bayesiaanse netwerken. Deze modelleringstechniek biedt de mogelijkheid om de relaties tussen de factoren en hun invloed op het eindresultaat in de vorm van kansen te kwantificeren. Dit biedt de mogelijkheid prioriteiten te stellen bij keuzes in de verbetering van het productontwikkelingsproces. De omgeving van productontwikkeling en innovatie is van nature een wereld vol onzekerheden. Het is belangrijk om deze onzekerheden expliciet te maken, waarvoor Bayesiaanse netwerken bij uitstek voor geschikt zijn.

### ***De tool geeft handvatten voor het managen van het productontwikkelingsproces***

De tool geeft handvatten om de ontwikkeling van het product te managen, en zo bij te dragen aan het “***First Time Right***” ontwikkelen van een product. Hierbij gaat het niet alleen om technische aspecten, zoals componenten, maar ook om de niet-technische aspecten, zoals de manier waarop er tegen de eigenschappen van het product wordt aangekeken.

Deze reader biedt informatie over de tool en hoe deze gebruikt kan worden bij het nemen van beslissingen in het productontwikkelingsproces. Ook geeft het een leidraad voor het toepassen van de tool door het uitwerken van een casus.

# Inhoudsopgave

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Doel &amp; Toelichting .....</b>                                                        | <b>i</b>  |
| <b>Inhoudsopgave.....</b>                                                                  | <b>iv</b> |
| <b>Opzet van dit werk.....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| <b>1. Bayesiaanse netwerken: wat kun je ermee?.....</b>                                    | <b>3</b>  |
| Belangrijke voordelen van Bayesiaanse netwerken.....                                       | 5         |
| Randvoorwaarden .....                                                                      | 5         |
| Uitgangspunten .....                                                                       | 6         |
| <b>2. Bayesiaanse netwerken: hoe werken ze?.....</b>                                       | <b>7</b>  |
| Factoren modelleren.....                                                                   | 8         |
| Relaties modelleren.....                                                                   | 8         |
| Modellering van afhankelijkheden.....                                                      | 9         |
| Constructie van Bayesiaanse netwerken .....                                                | 11        |
| <b>3. Constructie van Bayesiaanse netwerken .....</b>                                      | <b>15</b> |
| Casus: constructie van een Bayesiaans netwerk voor reliability management .....            | 16        |
| Mogelijke andere kans elicitation methodes .....                                           | 18        |
| Mogelijke uitbreiding: kosten .....                                                        | 20        |
| <b>4. Evaluatie van Bayesiaanse netwerken.....</b>                                         | <b>23</b> |
| Casus: reliability management, model evaluatie.....                                        | 23        |
| <b>5. Gebruik van Bayesiaanse netwerken.....</b>                                           | <b>25</b> |
| Casus: reliability management, model gebruik.....                                          | 27        |
| <b>Referenties .....</b>                                                                   | <b>33</b> |
| <b>A. Software tools voor Bayesiaanse netwerken .....</b>                                  | <b>37</b> |
| Tools, gerefereerd door <a href="http://www.agenarisk.co.uk">www.agenarisk.co.uk</a> ..... | 37        |
| Verdere referenties en bruikbare links .....                                               | 37        |
| <b>B. Template voor brief en enquête .....</b>                                             | <b>39</b> |
| <b>C. Template voor training voor kans elicitation .....</b>                               | <b>43</b> |
| <b>D. Template voor kanselicitation .....</b>                                              | <b>49</b> |
| <b>E. Templates voor in te vullen conditionele kansstabellen .....</b>                     | <b>51</b> |
| <b>F. Voorbeeld van visuele feedback.....</b>                                              | <b>53</b> |
| <b>G. Stappenplan, gebaseerd op Gefundeerde Theorie .....</b>                              | <b>55</b> |
| <b>H. Voorbeeld van een “Main-effects diagram” .....</b>                                   | <b>57</b> |
| <b>I. Quick Start.....</b>                                                                 | <b>59</b> |







# Opzet van dit werk

**Dit is een boek dat richtlijnen geeft voor het construeren van zogenaamde Bayesiaanse netwerken (Bayesiaanse netwerken). Dit zijn modellen, die typisch geschikt zijn voor het oplossen en managen van complexe problemen.**

De complexiteit heeft hierbij betrekking op het niet meetbaar zijn van (elementen van) het probleem, en op het feit dat heel veel factoren van invloed zijn op het probleem. Een voorbeeld is het managen van de ontwikkeling van producten door het productontwikkelingsproces heen. Bij dit soort problemen in het bijzonder geven Bayesiaanse netwerken typisch een praktisch handvat voor management. Verschillende manieren waarop management kan worden ondersteund zijn te vinden in hoofdstuk 5.

*In de reader zijn een aantal indicatoren gebruikt om te wijzen op extra informatie, belangrijke aandachtspunten en voorbeelden:*



Deze indicator geeft weer wanneer er aanvullende informatie wordt gegeven, of wanneer er naar aanvullende informatie wordt verwezen



Deze indicator geeft weer wanneer er een belangrijke vraag wordt behandeld



Deze indicator geeft belangrijke opmerkingen en aandachtspunten aan



Deze indicator geeft aan dat er een voorbeeld (van een toepassing) wordt gegeven



Deze indicator geeft aan dat er verdere uitleg wordt gegeven over een bepaald concept

Bayesiaanse netwerken vormen een tool dat al vroeg in het productontwikkelingsproces gebruikt kan worden ter ondersteuning van het maken van beslissingen, en dat relevant blijft gedurende het totale productontwikkelingsproces. In eerste instantie richt het netwerk zich op het beantwoorden van de vraag:

***“Wat is de prestatie (m.b.t. één bepaalde karakteristiek, bijv. reliability) van het eindproduct, wanneer de beslissingen gedurende het productontwikkelingsproces worden genomen zoals ze gemodelleerd zijn?”***





De volgende elementen zijn van belang voor Bayesiaanse netwerken, en/of kunnen geadresseerd worden:

- Onzekerheid wordt meegenomen d.m.v. kansen
- Invloeden van ‘kwalitatieve (niet direct meetbare) factoren’ kunnen worden gemodelleerd
- Het model maakt gebruik van de ervaring van betrokkenen en brengt deze in kaart. Door deze expliciet te maken kan er worden gemodelleerd zonder verdere gegevens.

In het vervolg van de reader ligt de focus op het toepassen en construeren van Bayesiaanse netwerken. Onderstaande tabel geeft de inhoud van deze reader weer.

*Tabel 1: Inhoud van de reader*

| Hoofdstuk  | Inhoud                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | <b>De mogelijkheden van Bayesiaanse netwerken</b><br>De mogelijkheden die Bayesiaanse netwerken bieden                                                                                                                                                                                                                   |
| 2          | <b>Inzicht in Bayesiaanse netwerken</b><br>Een simplistische behandeling van de wiskundige werking van Bayesiaanse netwerken a.d.h.v. een simplistisch voorbeeld                                                                                                                                                         |
| 3          | <b>Structureren van Bayesiaanse netwerken</b><br>De manier waarop informatie kan worden verzameld, de structuur van het netwerk kan worden geïdentificeerd, en waarop de netwerk structuur kan worden gekwantificeerd. Een voorbeeld uit de praktijk wordt besproken en mogelijk worden alternatieve aanpakken besproken |
| 4          | <b>Evalueren van Bayesiaanse netwerken</b><br>De manier waarop Bayesiaanse netwerken kunnen worden geëvalueerd. Een voorbeeld uit de praktijk wordt besproken en mogelijk worden alternatieve aanpakken besproken.                                                                                                       |
| 5          | <b>Gebruik van Bayesiaanse netwerken</b><br>De manier waarop Bayesiaanse netwerken kunnen worden gebruikt voor ondersteuning van management van problemen en processen.                                                                                                                                                  |
| Appendices | Lijst met software m.b.t. het construeren van Bayesiaanse netwerken, verdere verwijzingen, nuttige voorbeelden, tools en templates.<br><i>Een stappenplan voor het bouwen van Bayesiaanse netwerken (appendix G)</i><br><i>Een quick start, met een voorbeeld van een werkend Bayesiaans netwerk (appendix I)</i>        |

Per hoofdstuk komen de volgende aspecten aan bod:

1. De vraag die centraal staat in het hoofdstuk
2. Aandachtspunten
3. Indien van toepassing: het voorbeeld uit de praktijk, dat gebruikt wordt als rode draad
4. Discussie over mogelijke uitbreidingen en alternatieven (**NB: deze discussie is niet uitputtend**)

# 1. Bayesiaanse netwerken: wat kun je ermee?

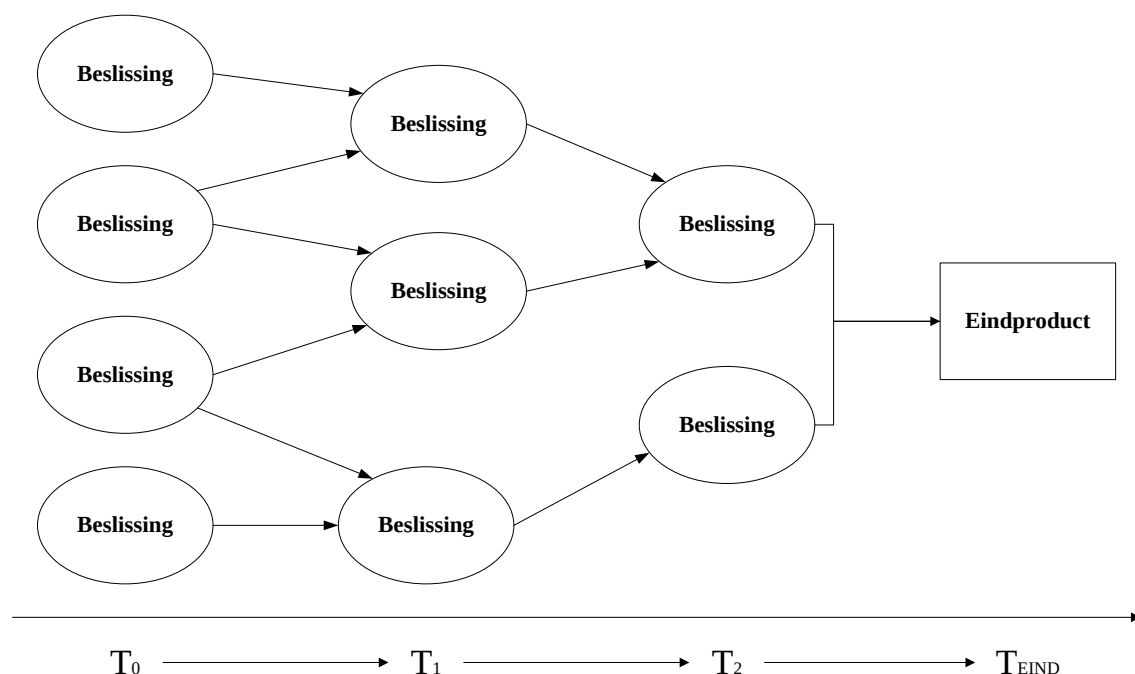
De vraag die centraal staat in dit hoofdstuk is:

*Wat kunnen we doen met Bayesiaanse netwerken?*



Bayesiaanse netwerken zijn netwerken tussen verschillende factoren die oorzaak gevolg relaties in kaart brengen. Op die manier kan wordt duidelijk hoe verschillende factoren invloed uitoefenen op elkaar en op reliability (of een andere eigenschap van het product). De relaties tussen verschillende variabelen worden vaak gebaseerd op inzichten en overtuigingen van mensen. Vaak worden de modellen dan ook gebaseerd op de input die verschillende betrokkenen geven; er wordt veel minder gebruik gemaakt van data om een dergelijk netwerk op te stellen. In deze reader worden Bayesiaanse netwerken besproken in de context van productontwikkeling. Zoals eerder aangegeven zijn ze in het algemeen bruikbaar voor complexe problemen.

Een Bayesiaans netwerk richt zich op een te ontwikkelen product, waarbij uitgegaan wordt van de situatie **op een bepaald tijdstip** (bijvoorbeeld vroeg in het ontwikkelingsproces,  $T_0$  in Figuur 1). Hierbij wordt geschat hoe de huidige beslissingen invloed hebben op de prestaties van het product aan het eind van het productontwikkelingsproces ( $T_{\text{eind}}$  in Figuur 1).



*Figuur 1: Beslissingen gedurende het productontwikkelingsproces die leiden tot een eindproduct*

De reliability wordt geformuleerd als een **doel**. Hierbij worden 3 mogelijke uitkomsten gedefinieerd:

- Aan het doel wordt niet voldaan
- Aan het doel wordt voldaan
- Het doel wordt voorbijgestreefd

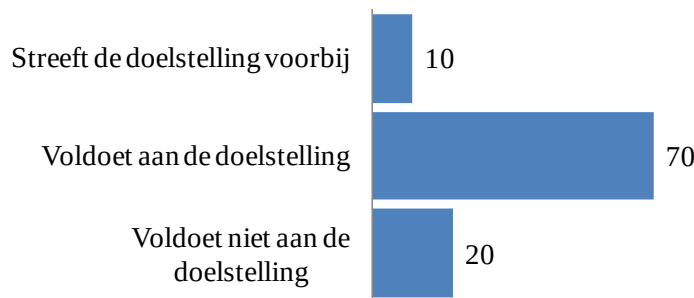


### BELANGRIJK

**De kwantificering van de prestatie van het product gebeurt door een kans toe te kennen aan het verkrijgen van elk van de mogelijke uitkomsten.**

#### Voorbeeld

Hierbij kan het volgende voorbeeld gegeven worden: er is een kans van 20% dat een product dat ontwikkeld wordt onder bepaalde omstandigheden, niet zal voldoen aan de doelstelling. Tegelijkertijd is er een kans van 10% dat het product de doelstelling voorbijstreeft (er is dus een kans van 70% dat het product wel aan de doelstelling voldoet); zie Figuur 2).



*Figuur 2: Voorbeeld van de kwantificering van de (ingeschatte) prestaties van een product*

Er zijn 3 algemene manieren waarop Bayesiaanse netwerken gebruikt kunnen worden in de context van productontwikkeling:

#### Uitleg

1. Beslissingen die genomen worden in het productontwikkelingsproces kunnen worden ondersteund met een kwantitatief model (gebaseerd op kansen), dat inzicht geeft in zowel de samenhang van beslissingen, als in de belangrijkheid van de beslissingen (in Figuur 1, van links naar rechts).
2. Wanneer het eindproduct op de markt wordt gebracht, kan worden gereflecteerd op het proces. Hierbij kan geleerd worden van de manier waarop het huidige resultaat bereikt is (in Figuur 1, van rechts naar links).
3. In het geval dat de overtuiging van bepaalde mensen afwijkt van de algemeen geldende overtuiging, kunnen meningen worden vergeleken en samengepakt, zodat de opbrengst van de verschillende perspectieven maximaal is.

### BELANGRIJK

Het is belangrijk op te merken dat er met Bayesiaanse netwerken slechts één karakteristiek van het product beschouwd wordt, in dit geval reliability. Het kan zo zijn, dat de beslissingen die ondersteund worden m.b.t. reliability, ook gevolgen hebben voor andere karakteristieken van het product, zoals **kosten**, **omzet**, of **tijd**. **Echter, dit wordt niet direct gemodelleerd in het Bayesiaans netwerk.**



Andere karakteristieken van het eindproduct van het productontwikkelingsproces (bijvoorbeeld **kosten**, **omzet**, of **tijd**) **kúnnen** wel meegenomen worden. Dit is o.a. mogelijk door de verschillende potentiële beslissingen uit te drukken in de eenheid van de karakteristiek (bijvoorbeeld door kosten uit te drukken in euro's). Op die manier kan dan een beslissing op een bepaald tijd worden gerelateerd aan kosten, waarbij zowel de kosten van de beslissing als de kosten van het eindresultaat kunnen worden meegenomen. Hiervan wordt in het volgende hoofdstuk een voorbeeld gegeven.

## Belangrijke voordelen van Bayesiaanse netwerken

Zeker in het begin van het productontwikkelingsproces zijn er weinig tot geen data beschikbaar over de prestaties van het product. De mensen die betrokken zijn bij de ontwikkeling hebben echter wel vaak ervaring en kennis, die ze gebruiken bij het maken van beslissingen en bij het uitvoeren van hun taken. Zowel ervaring als kennis is typisch informatie die kan worden weergegeven in een Bayesiaans netwerk.

Het eerste voordeel dat een Bayesiaans netwerk biedt is dat het verschillende relaties tussen variabelen en (in ons voorbeeld) reliability inzichtelijk maakt, en dat het de ervaring en kennis van de mensen modelleert. **Intuïtie wordt expliciet gemaakt**, en geeft zo expliciet **inzicht in verbanden tussen factoren onderling en tussen factoren en reliability**.



Een tweede voordeel is, dat de informatie van de betrokkenen ook kan worden gekwantificeerd m.b.v. kansrekening. Kansrekentechnieken kunnen vervolgens worden gebruikt om de gevolgen van veranderingen in verschillende factoren m.b.t. reliability door te rekenen. Op deze manier bieden Bayesiaanse netwerken ook een **kwantitatieve manier om beslissingen te ondersteunen**. Hierbij kun je denken aan scenario analyses en gevoeligheidsanalyses.



Zoals gezegd richten Bayesiaanse netwerken zich maar op 1 productkarakteristiek (in ons geval, reliability). Het is belangrijk om op te merken dat hierbij ook een kostenoverweging gemaakt kan worden. Echter, hiervoor moeten wel de kosten van eventuele beslissingen kunnen worden gekwantificeerd, als ook de kosten van het overtreffen, voldoen aan, of niet voldoen aan de reliability doelstellingen. Op het moment dat deze beschikbaar zijn, kan er ook een beslissing genomen worden op basis van (in dat geval) kosten.

### BELANGRIJK

Bij het **gebruik** van een Bayesiaans netwerk is het belangrijk op te merken dat beslissingsondersteuning d.m.v. Bayesiaanse netwerken gebeurt **op basis van de overtuiging (het beeld) van de mensen** die betrokken zijn bij het bouwen van het netwerk, **niet per definitie op basis van feiten**.



**Validatie van het netwerk gebeurt daarom ook op basis van de input van de betrokkenen.**

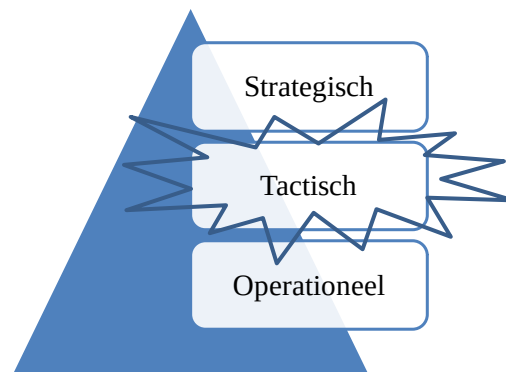
*Dit geldt zowel voor het kwalitatieve als voor het kwantitatieve deel van het netwerk.*

## Randvoorwaarden

Alleen wanneer het Bayesiaans netwerk als aannemelijk wordt beschouwd, kan het worden gebruikt voor beslissingsondersteuning. Het is dan ook belangrijk om veel mensen bij de bouw van het model te betrekken. In dat geval wordt het model breed gedragen in de organisatie, en worden de resultaten eerder geaccepteerd binnen de organisatie. Dit leidt ertoe dat het model daadwerkelijk gebruikt kan worden om beslissingen mee te ondersteunen. Het is de verwachting dat, wanneer alle partijen overtuigd zijn van het model, de effectiviteit groot zal zijn, terwijl wanneer niet alle partijen overtuigd zijn van het model, de verwachting is dat de effectiviteit niet groot zal zijn.

## Uitgangspunten

Bayesiaanse netwerken geven inzicht in de overtuiging die de mensen hebben m.b.t. het productontwikkelingsproces. Hierbij zijn Bayesiaanse netwerken geschikt voor gebruik in de context van tactische beslissingen, en minder voor de strategische en operationele beslissingen. Bayesiaanse netwerken zijn minder geschikt voor operationele beslissingen omdat het modelleren van dit soort beslissingen (de dagelijkse beslissingen) niet rendabel is vanwege hun korte tijdshorizon. Strategische beslissingen (de keuze voor de strategie van het bedrijf voor meerdere jaren) zijn minder geschikt juist vanwege de erg lange tijdshorizon over welke deze beslissingen spelen. De middenlange tijdshorizon waarover tactische beslissingen een rol spelen is uitermate geschikt voor het gebruik van Bayesiaanse netwerken ter ondersteuning van deze beslissingen.



*Figuur 3: Bayesiaanse netwerken zijn in het bijzonder geschikt voor tactisch beslissingen*

Het nut van Bayesiaanse netwerken in een specifieke context, hangt af van de behoefte aan management. **Bayesiaanse netwerken zijn in het bijzonder geschikt, wanneer een bedrijf op tactisch niveau een belangrijke prestatie maat van een product wil managen.** In dit geval komen Bayesiaanse netwerken in aanmerking als modelleertechniek ter ondersteuning.

## 2. Bayesiaanse netwerken: hoe werken ze?

De vraag die centraal staat in dit hoofdstuk is:

### *Hoe werken Bayesiaanse netwerken?*

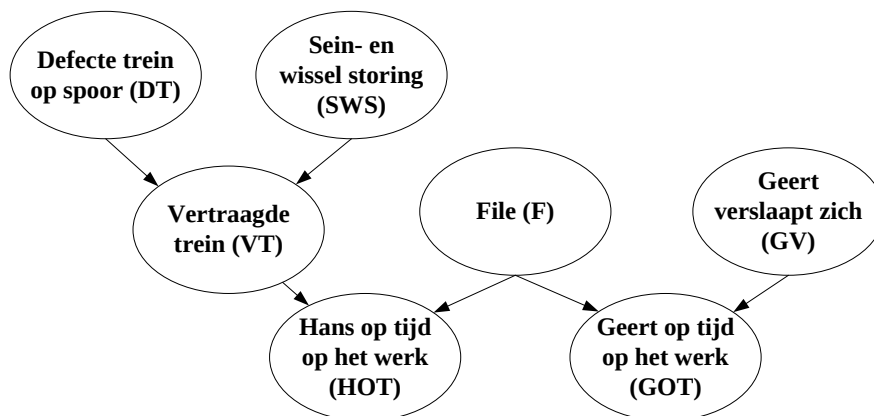


Om een beter beeld te krijgen van de manier waarop Bayesiaanse netwerken werken, bespreken we hier een stukje theorie van Bayesiaanse netwerken. De theorie wordt besproken aan de hand van een simplistisch voorbeeld:

*Hans en Geert zijn 2 werknemers, die bij hetzelfde bedrijf werken. Beiden reizen ze elke dag naar het werk. Aangezien Hans dicht bij het station woont, gaat hij soms met de trein, en soms met de auto naar het werk. Geert gaat altijd met de auto naar het werk. Als gevolg van hun manier van reizen ondervindt Hans hinder van sein- en wisselstoringen en van defecte treinen die op het spoor staan (als hij met de trein reist) en van files (als hij met de auto reist). Geert heeft alleen last van files. Echter, Geert verslaapt zich wel eens, waardoor hij later op het werk is.*

*Voorbeeld*

De beschrijving die hierboven is gegeven kan worden gemodelleerd d.m.v. een BN, waarbij kan worden gemodelleerd of Hans en Geert al dan niet op tijd zijn. Hierbij kan bijvoorbeeld ook inzicht worden verkregen in de vraag of de transportmodus van Hans (trein of auto) een duidelijke invloed heeft op zijn aankomst op het werk.



*Figuur 4: Omschrijving van het voorbeeld m.b.v. een Bayesiaans netwerk*

Het Bayesiaans netwerk dat hoort bij de situatie zoals die beschreven is, staat in Figuur 4 weergegeven. In de figuur is te zien dat de verschillende factoren die van invloed zijn op de tijd waarop Hans en Geert op hun werk arriveren, zijn weergegeven als ellipsen, waarbij de pijlen die de factoren verbinden, de oorzakelijke relaties aangeven (de pijlen wijzen van oorzaak naar gevolg). De factoren die in het model zijn opgenomen, worden gemodelleerd als stochastische variabelen. Factoren die aan het einde van een pijl staan, worden 'kinderen' genoemd; terwijl de factoren aan het begin van een pijl 'ouders' worden genoemd. De 'ouders' die zelf geen 'ouders' hebben, worden de 'wortels' genoemd; de

‘kinderen’ die geen ‘kinderen’ hebben, worden de ‘bladeren’ genoemd. Dit leidt tot de volgende benaming: DT: ouder, wortel; SWS: ouder, wortel; VT: ouder, kind; F: ouder, wortel; GV: ouder, wortel; HOT: kind, blad; GOT: kind, blad.

## Factoren modelleren

Elke variabele heeft een toestandruimte. D.w.z. dat elke variabele een bepaalde waarde kan aannemen. Zo heeft de variabele DT twee potentiële toestanden: ‘ja’ en ‘nee’. M.b.v. een Bayesiaans netwerk is het mogelijk om onzekerheid te modelleren. Dit wordt gedaan door gebruik te maken van kansen en ‘kanstabellen’. Wanneer de kans dat er een defecte trein op het spoor staat 10% is, wordt dat als volgt weergegeven in een kanstabel (Tabel 2):

Tabel 2: Kanstabel voor de wortel factor ‘DT’

| Defecte trein op het spoor (DT) |      |
|---------------------------------|------|
| Ja                              | Nee  |
| 0.10                            | 0.90 |

### BELANGRIJK



1. **Variabelen** moeten **helder, eenduidig gedefinieerd** worden
2. Met betrekking tot de **toestandruimte**: potentiële toestanden moeten **eenduidig gedefinieerd** worden, moeten **elkaar uitsluiten**, en moeten (gezamenlijk), de mogelijke toestanden van de variabelen **uitputtend beschrijven**

## Relaties modelleren

Relaties in een Bayesiaans netwerk worden gemodelleerd d.m.v. conditionele kanstabellen. Deze tabellen geven conditionele kansen weer, waarbij de getallen in de tabel samen de gekwantificeerde relaties weergeven. Als voorbeeld is de conditionele kanstabel voor de factor ‘VT’ weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Conditionele kanstabel voor de factor ‘VT’

| Sein- en wissel storing (SWS) | Defecte trein op spoor (DT) | Vertraagde trein (VT) |           |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
|                               |                             | Ja                    | Nee       |
| Ja (A1)                       | Ja (B1)                     | 0.95 (a1)             | 0.05 (a2) |
|                               | Nee (B2)                    | 0.60 (b1)             | 0.40 (b2) |
| Nee (A2)                      | Ja (B1)                     | 0.80 (c1)             | 0.20 (c2) |
|                               | Nee (B2)                    | 0.05 (d1)             | 0.95 (d2) |

Deze tabel kan als volgt worden geïnterpreteerd:

Onder de **condities** dat er **wel** een sein- en wissel storing is, maar er **geen** defecte trein op het spoor staat, is de kans dat de trein vertraging heeft **0.60**.

*uitleg*



## Modellering van afhankelijkheden

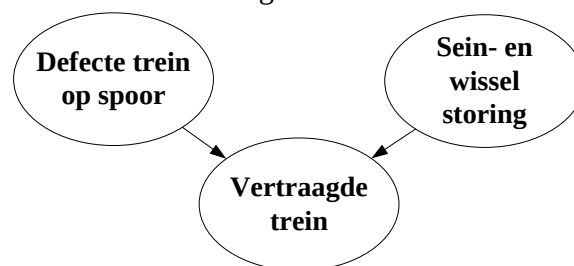
In Bayesiaanse netwerken zijn er drie types van afhankelijkheden:

- Convergerend
- Serieel
- Divergerend

In deze paragraaf worden voorbeelden van deze afhankelijkheden gegeven, als ook de manier waarop ze werken.

### Convergerend

Onderstaand voorbeeld is een voorbeeld van een convergerende afhankelijkheid, afkomstig uit het voorbeeld Bayesiaans netwerk in Figuur 4



*Figuur 5: Convergerende afhankelijkheid*

Door gebruik te maken van deze afhankelijkheid, kan de kansverdeling van de factor 'vertraagde trein' geüpdate worden:

Als bijvoorbeeld bekend wordt dat er geen sein- en wissel storing is, dan kan (gebruik makend van Tabel 3), worden gezegd dat de kans dat er geen vertraging optreedt, zal groeien. Uitgaande van het gegeven dat als we niet weten of er wel of geen defecte trein op het spoor staat (de kansverdeling wordt dan de 50-50 tussen 'Ja' en 'Nee'), dan zal de kans op geen vertraging 0.6 zijn. In het geval dat we niet weten of er wel of niet een sein- en wisselstoring is, dan is deze kans (op geen vertraging) 0.4:

$$A1*B1*a2 + A1*B2*b2 + A2*B1*c2 + A2*B2*d2 = 0.5*0.5*0.05 + 0.5*0.5*0.40 + 0.5*0.5*0.20 + 0.5*0.5*0.95 = 0.4.$$

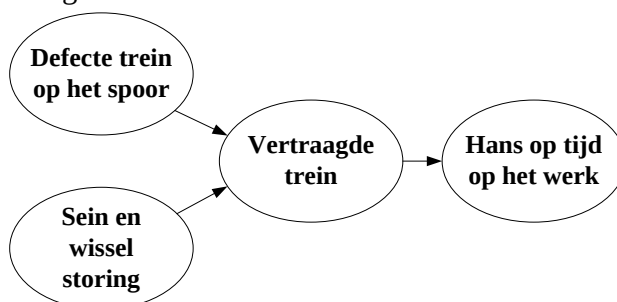
In het geval dat we weten dat er wel een sein- en wisselstoring is, dan is deze kans zelfs maar 0.2. Omdat de kans op A2 0 is (er is namelijk zeker een sein- en wisselstoring, wordt de kans namelijk:

$$A1*B1*a2 + A1*B2*b2 = 1*0.5*0.05 + 1*0.5*0.4 = 0.225.$$

Voorbeeld

## Serieel

Onderstaand voorbeeld is een voorbeeld van een seriële afhankelijkheid, afkomstig uit het Bayesiaans netwerk in Figuur 4.



Figuur 6: Seriële afhankelijkheid

Bij een seriële afhankelijkheid is de factor die aan het einde van de keten staat (in het geval van het voorbeeld ‘Hans op tijd op het werk’), serieel afhankelijk van de wortelfactoren ‘Defecte trein op spoor’ en ‘Sein en wissel storing’ (via ‘vertraagde trein’; vandaar “serieel” afhankelijk). Echter, **als** de toestand van ‘vertraagde trein’ bekend wordt, dan hebben eventuele waarnemingen m.b.t. ‘Defecte trein op spoor’ en ‘Sein en wissel storing’, geen invloed meer op de factor ‘Hans op tijd op het werk’. De laatstgenoemde factor is **conditioneel onafhankelijk** van de twee wortel factoren, **gegeven** de toestand van ‘vertraagde trein’.

### Voorbeeld

In het geval dat Hans **weet** dat er een defecte trein op het spoor staat, dan wordt de kans op een vertraagde trein 0.9. Op dat moment kan Hans besluiten om de auto te nemen naar het werk (alhoewel hij misschien niets over eventuele files weet). Op deze manier kan een Bayesiaans netwerk beslissingen ondersteunen. Echter, deze gevolgen kunnen niet door het model worden voorspeld. Dit is omdat het effect van deze beslissing (de gevolgen van het nemen van de auto voor de factor ‘Hans op tijd op het werk’) niet in het model is opgenomen.

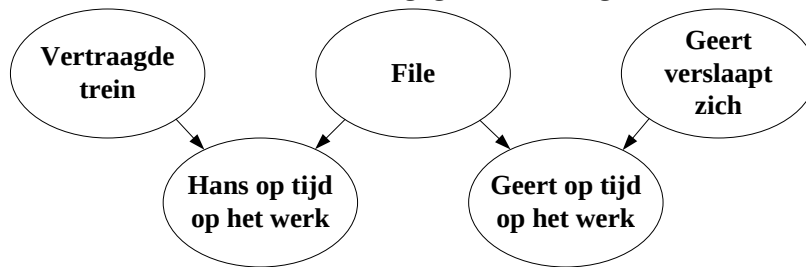
## BELANGRIJK



Het vaststellen van de gevolgen van beslissingen, kan alleen gedaan worden m.b.t. **gemodelleerde variabelen**. Wanneer een variabele **niet gemodelleerd** is, dan kunnen de gevolgen van veranderingen in die variabele ook **niet bepaald** worden **aan de hand van het Bayesiaans netwerk** (eventueel misschien wel op een andere manier)

## Divergerend

Onderstaand voorbeeld is een voorbeeld van een divergerende afhankelijkheid, afkomstig uit het Bayesiaans netwerk dat als voorbeeld gegeven is in Figuur 4



Figuur 7: Divergerende afhankelijkheid

In dit geval heeft de factor 'file' zowel een effect op 'Hans op tijd op het werk' als op 'Geert op tijd op het werk'. Tegelijkertijd is het zo, dat Bayesiaanse netwerken ons in staat stellen om implicaties van een eventuele waarneming bij een van deze twee laatstgenoemde factoren door te rekenen naar de andere factor.

*Zo kan er een situatie ontstaan, waarbij we graag willen weten of Hans op tijd op zijn werk zal zijn, terwijl we verder geen informatie hebben. Op het moment dat er dan informatie binnen komt over Geert (dat hij op tijd op zijn werk is), dan impliceert dit dat de kans op een file niet groot is (deze zal dan ook afnemen). Op zijn beurt betekent dit dan weer dat de kans dat Hans ook op tijd op zijn werk is zal toenemen, omdat hij, als hij met de auto komt, geen file heeft. Omdat we niet weten welk vervoersmiddel hij heeft gekozen, kunnen we dit niet zeker weten, maar we kunnen wel berekenen dat de kans toeneemt.*

Voorbeeld

Meer informatie over de manier waarop Bayesiaanse netwerken werken, en een uitgebreidere bespreking van de theorie die hoort bij Bayesiaanse netwerken, is te vinden op: <http://www.eecs.qmul.ac.uk/~norman/BBNs/BBNs.htm> (in het Engels)



## Constructie van Bayesiaanse netwerken

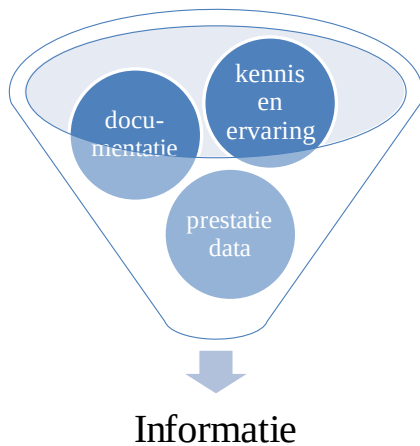
Constructie van Bayesiaanse netwerken bestaat uit twee belangrijke stappen (Sigurdsson, Walls & Quigley, 2001):

1. De probleemstructuur moet expliciet gemaakt worden
2. De structuur moet gekwantificeerd worden

Omdat de informatie die nodig is voor het construeren van een Bayesiaans netwerk uit de praktijk komt, is ook het verzamelen van informatie een belangrijk aspect van de constructie van Bayesiaanse netwerken. In dit hoofdstuk besteden we kort aandacht aan de drie aspecten van het constructieproces van Bayesiaanse netwerken:

- Informatie verzameling
- Probleemstructurering
- Kwantificatie

### Informatie verzameling



Voor het bouwen van een Bayesiaans netwerk is de informatie van belang die betrekking heeft op het tot stand komen van producten, en in het bijzonder de informatie die direct gerelateerd is aan de productkarakteristiek die bestudeerd wordt (in het geval van het praktijkvoorbeeld reliability).

Zoals aangegeven is de informatie die beschikbaar is voornamelijk beschikbaar in de vorm van kennis en ervaring van de mensen die betrokken zijn bij het ontwikkelingsproces. Het is dan ook belangrijk om deze ervaring en kennis op een goede manier boven tafel te krijgen.

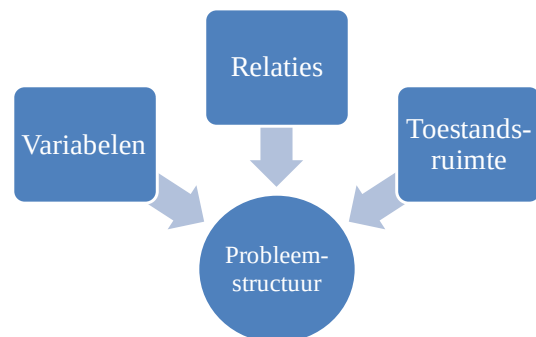
Een tweede bron van informatie vormt alle documentatie in het bedrijf die is gerelateerd aan het productontwikkelingsproces.

Tenslotte vormen alle gegevens die gerelateerd zijn aan de prestaties van producten een bron van informatie die gebruikt kan worden in de context van de constructie van Bayesiaanse netwerken.

### Probleemstructurering

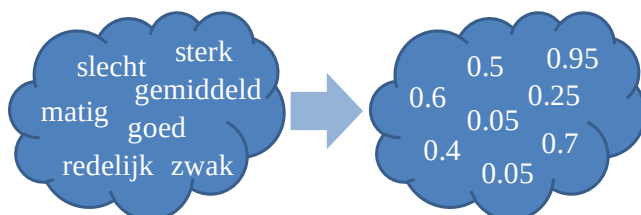
Bij het structureren van het probleem zijn een aantal elementen belangrijk (Sigurdsson, Walls & Quigley, 2001). Dit zijn:

- Het identificeren van de variabelen
- Het identificeren van de relaties
- Het definiëren van de variabelen als stochasten (d.w.z. het definiëren van de toestandruimte (mogelijke toestanden))



Naast deze elementen die deel uitmaken van de probleemstructurering, is het ook belangrijk om vast te stellen wat de probleemgrenzen zijn, d.w.z.: wat er wel, en wat er niet wordt meegenomen in het model.

### Kwantificering



Bij de kwantificering van het model worden de relaties gedefinieerd, en worden de waarden van de invloedsvariabelen vastgesteld. Hierbij kunnen gegevens gebruikt worden, maar hierbij kunnen ook experts

gevraagd worden om waarden in te schatten.

Zowel de waarden van de variabelen, als de waarden van de relaties kunnen worden geschat door de experts.

Een inschatting van de waarde van variabelen en relaties gebeurt door het schatten van kansen, en door deze inschattingen vervolgens in te vullen in (conditionele) kanstabellen.

Het hele proces van de constructie van Bayesiaanse netwerken, d.w.z. informatie verzameling, probleemstructurering, en kwantificering, wordt besproken in het komende hoofdstuk.

Concept

### 3. Constructie van Bayesiaanse netwerken

De vraag die centraal staat in dit hoofdstuk is:

***Welke stappen moeten we zetten om een Bayesiaans netwerk te bouwen en hoe kunnen we dat doen?***



Aangezien het model wordt ontwikkeld op basis van informatie uit interviews, en breed moet worden gedragen, is het belangrijk dat we veel mensen bij de modelontwikkeling betrekken. Het is ook belangrijk om veel verschillende disciplines betrekken in het proces, zodat er geen informatie verloren gaat. Omdat het model dat ontwikkeld wordt gebaseerd wordt op deze informatie, en omdat het model gebruikt moet worden voor management van één bepaalde productkarakteristiek (in het voorbeeld reliability), is het belangrijk om de belangrijkste factoren die van invloed zijn op de prestatiegraad van het product mee te nemen.

Bij probleemstructurering zijn er in hoofdlijnen 3 stappen:

1. *Het identificeren van de relevante variabelen*

Om beslissingen te ondersteunen die betrekking hebben op de prestaties van het product, moeten we eerst de factoren identificeren die van invloed zijn op de prestatiegraad van het product. Dit gebeurt in stap 1.

*Uitleg*

2. *Het identificeren van de relaties tussen de variabelen*

Wanneer factoren elkaar ook onderling beïnvloeden, is het belangrijk dat we dit vast stellen, en hier rekening mee houden met het modelleren (door een relatie tussen de twee factoren te modelleren).

*Uitleg*

3. *Het definiëren van de toestandruimte van de variabelen*

Om daadwerkelijk te kunnen modelleren, is het van belang om de toestandruimte van de variabelen te definiëren. Zo kunnen we ook vast stellen hoe de prestaties van het product veranderen, als de factoren van toestand veranderen.

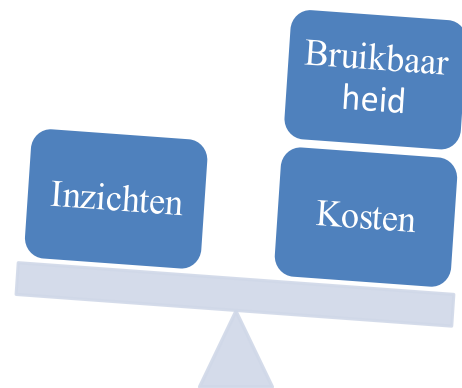
*Uitleg*

Deze 3 stappen moeten worden doorlopen om de structuur van het Bayesiaanse netwerk vast te stellen. Ook is het van belang om te bepalen wat we wel en wat we niet meenemen in het model.

### BELANGRIJK



Het is belangrijk om je te realiseren dat het bouwen van een Bayesiaans netwerk altijd een afweging is tussen de kosten van het bouwen van een netwerk, tegenover de inzichten die je ermee krijgt, en de bruikbaarheid van het model. Hierbij kan het zo zijn dat meer inzichten niet altijd de bruikbaarheid van het model ten goede komt. Door een overvloed aan inzichten, expliciet opgenomen in het model, kan het overzicht juist verdwijnen!



Om ook kwantitatieve inzichten te verkrijgen via een Bayesiaans netwerk, zullen we het netwerk eerst moeten kwantificeren. Hoewel dit mogelijk is via gegevens, is het vaak het geval dat er geen gegevens beschikbaar zijn over relaties tussen verschillende factoren. In dat geval moeten de mensen die betrokken zijn bij de bouw van het netwerk de relaties kwantitatief (met kansen) inschatten. Hiervoor zijn veel verschillende methodes beschikbaar, waarvan er een paar besproken worden, zowel in de casus als daarna. Ook besteden we in dit hoofdstuk aandacht aan mogelijke uitbreiding van Bayesiaanse netwerken door het opnemen van kosten in het model.

### BELANGRIJK



Kwantificatie gebeurt op basis van de inzichten van de betrokkenen. Houd er rekening mee dat **mensen** over het algemeen **moeite hebben met het inschatten van kansen**, zeker bij ‘ontastbare’ factoren. Dit is een belangrijk aandachtspunt, en **resultaten mogen niet zonder meer voor ‘waar’ aangenomen worden**. Een evaluatie achteraf met de betrokkenen is **belangrijk**.

### Casus: constructie van een Bayesiaans netwerk voor reliability management

*De probleemstructurering in het voorbeeld is gedaan aan de hand van Gefundeerde Theorie, een methode die veelal gebruikt wordt in de sociale wetenschappen. Eén van de belangrijkste kenmerken van Gefundeerde Theorie in deze context, is dat het een **inductieve** methode is. Dit wil zeggen dat de methode een veronderstelling opbouwt, i.p.v. dat het een bestaande veronderstelling toetst (**deductief**).*

*In het geval van reliability management in de vroege fases van het productontwikkelingsproces, bestaat er in eerste instantie geen algemeen model dat gebruikt kan worden. M.b.v. de inductieve methode Gefundeerde Theorie, is het echter wel mogelijk een dergelijk model op een gestructureerde manier te construeren.*

*De constructie van het Bayesiaans netwerk is verlopen volgens de onderstaande stappen (ook schematisch samengevat te vinden in appendix G:*

#### **Het verzamelen van informatie m.b.t. de manier waarop reliability wordt beïnvloed d.m.v. het uitvoeren van interviews**

Interviews leveren de informatie die nodig is om het probleem en haar grenzen te



definiëren. Om niet bij voorbaat zaken uit te sluiten, moet informatie verzameld worden op basis van diversiteit van informatiebronnen (in ons geval experts van verschillende disciplines in het veld). Wanneer het probleem duidelijk en strikt is afgebakend, dan kunnen de mensen die binnen dat gebied actief zijn natuurlijk worden betrokken.

### **Het identificeren van de factoren die reliability beïnvloeden, door de interviews te coderen en te analyseren**

Om de factoren te identificeren, kun je ‘open codering’ toepassen. Dit is een vorm van analyse van interviewteksten, waarbij terugkerende concepten worden ‘gecodeerd’. Deze concepten kunnen letterlijk worden genoemd, maar er kan ook indirect naar worden verwezen. Open codering leidt tot de identificatie van de relevante concepten, die factoren representeren.

### **Het identificeren van de verschillende mogelijke toestanden (de toestandsruimte) van de variabelen d.m.v. codering en directe gesprekken met de experts**

In het open coderingsproces worden de verschillende factoren geïdentificeerd. Door vervolgens de ‘theoretische gevoeligheid’ te verfijnen, kunnen de toestandsruimtes van de factoren worden gedefinieerd. Het kan zijn dat de interviewteksten op zich niet genoeg informatie bieden. Op dat moment kan additionele informatie verzameld worden, bijvoorbeeld door hierover gesprekken te voeren met experts.

### **Het karakteriseren van de relaties tussen verschillende factoren, m.b.v. de idiomen van Neil, Fenton en Nielson (2000), door het coderen van interviews**

Gedurende het tweede deel van open codering en gedurende axiale/selectieve codering worden relaties tussen de verschillende factoren in het netwerk geïdentificeerd. De relaties worden gerepresenteerd door gerichte pijlen in het Bayesiaanse netwerk, en zijn vooral causaal van aard (zie Neil, Fenton en Nielson (2000) voor overige relatietypes). Op deze manier kunnen we in kaart brengen hoe de verschillende factoren invloed uitoefenen op elkaar.

De factoren die geïdentificeerd zijn in stap 2 representeren, samen met de pijlen, de probleemstructuur.

### **Het beperken van het aantal conditionele kansen dat geëliciteerd moet worden**

Omdat het eliciteren van kansen zeer veel tijd en moeite kost, is het van belang om het aantal conditionele kansen dat geëliciteerd moet worden om het netwerk te kwantificeren, te beperken.. Het beperken van het aantal conditionele kansen kan mede gedaan worden door gebruik te maken van het definitie/synthese idioom (Neil, Fenton, Nielson, 2000), waarmee verschillende factoren samengepakt kunnen worden in één factor.

### **Het identificeren en definiëren van de conditionele kanstabellen die de relaties in Bayesiaanse netwerken definiëren**

De relaties van een Bayesiaans netwerk worden weergegeven als conditionele kanstabellen. Om de relaties te definiëren moeten deze kanstabellen worden ingevuld (geëliciteerd). De conditionele kanstabel voor een kind factor wordt als volgt opgebouwd:

- De meest rechtse kolommen representeren alle mogelijke toestanden van de kind

factor

- De meest linkse kolommen bevatten alle (directe) ouder factoren van de kind factor
- De rijen representeren alle mogelijke combinaties van toestanden van de ouder factoren

### **Het invullen van de conditionele kanstabellen, zodat de relaties in het Bayesiaanse netwerk ingevuld kunnen worden**

Om de conditionele kanstabellen in te vullen, wanneer er geen data beschikbaar is, moeten de kansen geëliciteerd worden. Dit betekent dat betrokken experts alle kansen die ingevuld moeten worden in alle conditionele kanstabellen moeten inschatten. Dit kan gedaan worden m.b.v. een kans elicitering proces, dat bestaat uit:

- Een training (een voorbeeld van een presentatie die hoort bij een training is te vinden in appendix C)
- Elicitering zelf, die bestaat uit:
  - o Documentatie met definities van de variabelen en hun toestandsruimtes
  - o Documentatie voor het invullen van de conditionele kanstabellen, die zichzelf wijst voor een voorbeeld van begeleidende documentatie, zie appendix D voor voorbeelden van verschillende kanstabellen, zie appendix E
- Visuele feedback in de vorm van histogrammen voor een voorbeeld van visuele feedback, zie appendix F

### **BELANGRIJK**

*In de casus, aangegeven met de rode lijn, (die zich richt op reliability management) is gekozen voor een directe benadering van het eliciteren van kansen. In de appendices is een voorbeeld gegeven van de manier waarop kansen zijn gevraagd in dit project. Hierbij is een document gebruikt dat voor zichzelf spreekt, zodat experts het individueel kunnen invullen. De aanwezigheid van de 'bouwer' van het Bayesiaanse netwerk is bij het elicitering proces gewenst, aangezien eventuele onduidelijkheden op deze manier opgehelderd kunnen worden. Waarschijnlijk kunnen de tabellen ook zonder de aanwezigheid van de bouwer ingevuld worden, omdat het document zichzelf wijst. Dit is echter niet helemaal zeker, aangezien dit niet is geprobeerd in de praktijk.*



De stappen die gevolgd worden in de casus staan schematisch weergegeven in appendix G.

### **BELANGRIJK**

Het beperken van het aantal conditionele kansen dat geëliciteerd moet worden m.b.v. het definitie/synthese idioom, kan **alleen** gedaan worden wanneer de factoren **onafhankelijk zijn van andere factoren** in het netwerk



### **Mogelijke andere kans elicitering methodes**

Er bestaan nog een aantal andere (vaak indirecte) elicitering methodes. Een mogelijke methode is gebaseerd op weddenschappen; die werken we hieronder uit. Verder is het ook mogelijk om verschillende optische hulpmiddelen te gebruiken. Ook daarvan geven we

hieronder een voorbeeld. Voor meer mogelijke methodes en hulpmiddelen, zijn de volgende bronnen te raadplegen (geen uitputtende lijst):

Spetzler & Staël Von Holstein, (1975); Cooke (1991); Morgan & Henrion (1990); Meyer & Booker (1991); Jenkinson (2005); Van der Gaag, Renooij, Witteman, Aleman, Taal (2002); Witteman & Renooij (2003); Renooij & Witteman (1999). Alle bronnen zijn in het Engels.



### Methode gebaseerd op weddenschappen

Bij het gebruiken van deze methode, wordt een weddenschap voorgesteld, die betrekking heeft op de te overwegen kans. Hierbij wordt de vraag gesteld hoeveel geld de respondent zou moeten krijgen voor een positieve uitkomst van de weddenschap, en hoeveel geld hij zou moeten krijgen voor een negatieve uitkomst van de weddenschap, zodanig, dat het voor de respondent niets zou uitmaken op welke uitkomst (positief danwel negatief) hij zou inzetten. De verhouding tussen het geld voor de positieve, respectievelijk negatieve uitkomst en de totale hoeveelheid geld wordt dan gelijk beschouwd aan de kans op een negatieve, respectievelijk positieve uitkomst.

### BELANGRIJK

De verhouding tussen opbrengst van de weddenschap bij een **negatieve** uitkomst en de totale hoeveelheid geld, geeft de kans weer op een **positieve** uitkomst, en vice versa.



Wanneer de kans moet worden ingeschat dat je 6 gooit met een gewone dobbelsteen, dan zou de weddenschap betrekking hebben op het gooien van 6 met een dobbelsteen. Hierbij zou de respondent kunnen zeggen dat hij, bij inzet van 1 euro, **1 euro extra** zou willen krijgen wanneer je **geen 6** gooit, en **5 euro extra**, wanneer je **wel 6** gooit, en dat dit voor hem een weddenschap zou zijn waarbij het niet uitmaakt of hij voor het een (6 gooien) of voor het ander (geen 6 gooien) zou kiezen, omdat beide weddenschappen hem (op de lange termijn) evenveel zouden opleveren. De bijbehorende kansen kunnen dan als volgt uitgerekend worden:

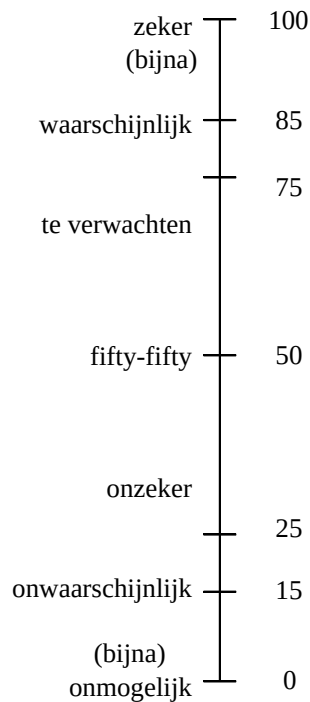


De kans dat er **geen 6** wordt gegooit, is  $5/6$  (**5 euro / (5+1 euro)**)

De kans dat er **wel 6** wordt gegooit, is  $1/6$  (**1 euro / (5+1 euro)**)

### Optische hulpmiddelen voor kans elicitation

Om een betere inschatting van een kans te maken en/of om dit makkelijker te maken, zijn er een aantal (optische) hulpmiddelen beschikbaar. Eén van die hulpmiddelen is de verbaal numerieke kans schaal, die kansen weergeeft, met daarnaast gerelateerde uitdrukkingen (zie Figuur 8).

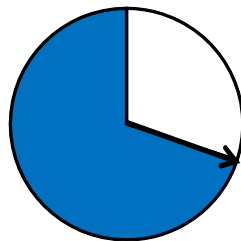


*Figuur 8: Verbaal numerieke kans schaal (overgenomen uit Renooij 2001)*

#### Uitleg

Met behulp van deze kansschaal kan een respondent verbale uitdrukkingen m.b.t. kansen koppelen aan numerieke uitdrukkingen m.b.t. kansen. Hierbij is het belangrijk op te merken dat de verbale uitdrukkingen en de numerieke uitdrukkingen niet één op één gekoppeld zijn (vandaar dat de verbale uitdrukkingen en numerieke uitdrukkingen niet op één lijn staan weergegeven in Figuur 8).

Een ander voorbeeld is het gebruik van een schijf met twee kleuren (zie Figuur 9).



*Figuur 9: Schijf met 2 kleuren*

#### Uitleg

Bij het gebruik van dit optisch hulpmiddel kan aan de respondent gevraagd worden om het gebied van de schijf dat gekleurd is, zo groot te kiezen, dat de oppervlakte die gekleurd is t.o.v. de hele cirkel even groot is, als de kans op een bepaalde gebeurtenis.

### Mogelijke uitbreiding: kosten

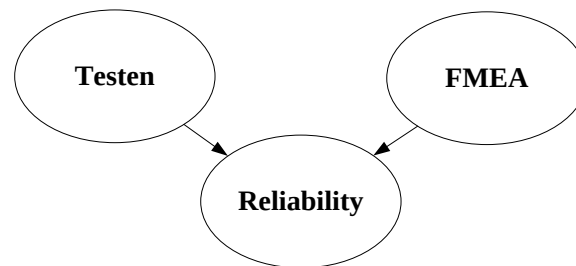


Met betrekking tot het verwerken van kosten in een Bayesiaans netwerk, kunnen we een suggestie geven (hoewel die niet is uitgewerkt in de aangehaalde casus). Wanneer het mogelijk is om kosten dan wel opbrengsten te verbinden aan de verschillende toestanden van een variabele, dan kunnen deze gebruikt worden, samen met de kansen op deze toestanden, om een totaalbeeld te creëren van de kosten en baten, zoals ze worden geschat

m.b.v. het Bayesiaans netwerk. Dit is uitgewerkt in het volgende (zeer simplistisch!) voorbeeld.

Gesteld dat de reliability (voldoet, voldoet niet, of doel wordt overtroffen) als eindproduct van het productontwikkelingsproces het resultaat is van 2 factoren, te weten: het wel of niet doen van testen, en het wel of niet doen van een FMEA. Dan kan daarbij het volgende Bayesiaans netwerk worden gepresenteerd (zie Figuur 10):

*Voorbeeld*



*Figuur 10: Sterk vereenvoudigd Bayesiaans netwerk voor reliability management*

Bij dit netwerk hoort de (fictieve) conditionele kanstabel die weergegeven is in Tabel 4, waarbij de getallen tussen haakjes de kosten (negatief) en opbrengsten (positief) weergeven, wat resulteert in het eindresultaat in de laatste kolom aan de rechterkant.

*Tabel 4: Fictieve conditionele kanstabel voor de factor 'Reliability', inclusief kostenraming*

| FMEA     | Testen   | Reliability         |               |                               | Totale opbrengst / kosten |
|----------|----------|---------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|
|          |          | Voldoet niet (-200) | Voldoet (100) | Overtreft verwachtingen (200) |                           |
| Ja (-30) | Ja (-20) | 0.10                | 0.60          | 0.30                          | 50                        |
|          | Nee (0)  | 0.20                | 0.60          | 0.20                          | 30                        |
| Nee (0)  | Ja (-20) | 0.30                | 0.55          | 0.15                          | 5                         |
|          | Nee (0)  | 0.75                | 0.20          | 0.05                          | -120                      |

Hierbij is duidelijk dat het beste scenario is om zowel FMEA's uit te voeren, als te testen. Echter, het is ook duidelijk – wanneer een keuze tussen deze twee gemaakt moet worden – dat het doen van FMEA's de voorkeur zou moeten hebben boven het doen van testen aangezien het uiteindelijk meer zal opleveren (**hoewel het doen van FMEA's duurder is dan het doen van testen!**)

Concept

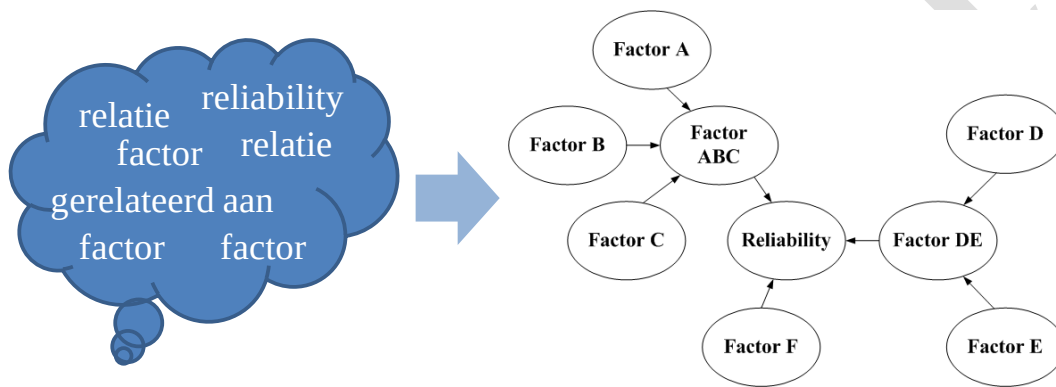
## 4. Evaluatie van Bayesiaanse netwerken

De vraag die centraal staat in dit hoofdstuk is:

*Hoe kunnen we een gebouwd Bayesiaans netwerk evalueren?*



Omdat het model gebouwd is op basis van de inzichten en kennis van de betrokkenen die bij de ontwikkeling van het model betrokken zijn, is het belangrijk om deze mensen ook te betrekken bij de evaluatie van het model. Bij de evaluatie is in het bijzonder de bruikbaarheid van het model (representeert het model het beeld van de betrokkenen voldoende?) van belang.



*Figuur 11: Omzetting van de visie van mensen in een Bayesiaans netwerk*

De bouw van het model gebaseerd kan worden op individuele inzichten, die later gecombineerd kunnen worden. Echter, omdat het uiteindelijke model een afspiegeling moet zijn van het gezamenlijke inzicht van de betrokkenen, is het belangrijk om de evaluatie van het model ook in een groep te doen. Hierbij kan het zijn dat, i.v.m. praktische overwegingen het niet mogelijk is om alle betrokkenen bij de modelbouw ook te betrekken bij de evaluatie van het model, maar dat een selectie van de experts betrokken wordt. De selectie van de experts kan gebaseerd worden op verschillende factoren, bijvoorbeeld op basis van de bijdrage van de experts aan het model. Het is ook mogelijk om juist experts te betrekken die niet direct betrokken zijn bij de modelbouw.

### BELANGRIJK

Omdat **meerdere experts** bij de **constructie** van het model betrokken zijn, is het belangrijk om de **evaluatie** van het model ook met **meerdere experts** te doen. Omdat het gaat om slechts één model dat gebruikt gaat worden, kan de evaluatie gebeuren met een **groep** experts (5-10 personen) op een bepaald tijdstip.



### Casus: reliability management, model evaluatie

De evaluatie in de praktijk werd gedaan in samenwerking met 5 experts. Hiervan waren er 3 betrokken bij de modelbouw, en 2 niet. De evaluatie werd gedaan in een presentatie van 90 minuten. Voordat het model daadwerkelijk werd gevalideerd, werd de status van het project

gepresenteerd en werd de werking van Bayesiaanse netwerken besproken (n.a.v. het voorbeeld in hoofdstuk 2). Hiervoor was 15 minuten ingeruimd.

Daarna werden de verschillende modellen geëvalueerd (zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk, bestond het ontwikkelde Bayesiaanse netwerk uit 4 modellen: 3 deelmodellen, en 1 overkoepelend model). Voor elk model werd 15 minuten gereserveerd voor evaluatie. Evaluatie vond op 2 verschillende manieren plaats:

- De factoren werden gerangschikt op basis van hun invloed op reliability (en t.o.v. elkaar). Hiervoor werd gebruikt gemaakt van zogenaamde “main-effects diagrams” (zie appendix H), die gebaseerd zijn op de resultaten van een ‘design of experiments’ analyse.
- De waardes van de factoren (verkregen via kans elicatie) en de invloed van de factoren op de waarde van reliability werd weergegeven in het model. Hierbij werd ook weergegeven hoe veranderingen in factoren een effect hadden op reliability.

Voor elk model moesten de deelnemers aan de evaluatie sessie aangeven in hoeverre het model een goed beeld gaf van hun visie op de totstandkoming van reliability gedurende het productontwikkelingsproces.

Tot slot was er tijd gereserveerd voor eventuele uitloop van de evaluatie sessie.



## 5. Gebruik van Bayesiaanse netwerken

De vraag die centraal staat in dit hoofdstuk is:

***Hoe kunnen we het besluitvormingsproces ondersteunen met een Bayesiaans netwerk?***



In het algemeen zijn er 2 manieren waarop Bayesiaanse netwerken gebruikt kunnen worden voor beslissingsondersteuning:

1. Door middel van scenario analyse
2. Door middel van gevoeligheidsanalyse

In de casus worden 3 types beslissingsondersteuning geïntroduceerd via scenario analyse, en 2 types via gevoeligheidsanalyse. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het model is gemodelleerd m.b.v. software, zodat berekeningen automatisch kunnen worden gedaan.

### **BELANGRIJK**

Omdat het model is gebaseerd op input van experts, moet beslissingsondersteuning ook vanuit het oogpunt van de betrokken experts gezien worden. Het is geen “objectieve waarheid”.



#### **Scenario analyse 1: prognose**

M.b.v. het Bayesiaanse netwerk, kunnen verschillende scenario's worden doorgerekend. Hierbij kan expliciet worden gemaakt wat het effect is op reliability van de gemodelleerde factoren/variabelen. Op deze manier kan reliability worden gestuurd op basis van de invloed die factoren hebben op reliability: voor alle factoren kan worden gekeken hoeveel invloed zij elk hebben op reliability, om vervolgens bijvoorbeeld de keuze te maken voor één van de factoren.

#### **Scenario analyse 2: diagnose**

In Bayesiaanse netwerken kan een ‘eindresultaat’ worden ingegeven, d.w.z.: er kan bijvoorbeeld worden ingegeven dat het eindproduct aan de reliability doelstelling moet voldoen (100% in de toestand ‘aan het doel wordt voldaan’). Daarna rekent het model uit, voor alle variabelen en voor al hun toestanden, hoe waarschijnlijk het is dat de variabele zich in die toestand bevindt. Dit betekent dat het model de verwachting weergeeft van de mensen die betrokken zijn bij de bouw van het model, m.b.t. de toestand waarin de verschillende factoren zich bevinden. Hieruit kan worden geconcludeerd in welke toestanden de verschillende factoren zich het meest waarschijnlijk bevinden, wanneer het ingegeven eindresultaat wordt behaald.

#### **Scenario analyse 3: combinatie van prognose en diagnose**

In de derde vorm van scenario analyse, kunnen de eerste twee vormen worden gecombineerd. Hierbij kunnen verschillende factoren worden gedefinieerd, en kan er

tegelijkertijd een ‘eindresultaat’ worden ingegeven. Ook in dit geval geeft het Bayesiaans netwerk weer in welke toestanden de verschillende factoren (*uitgezonderd de factoren die al gedefinieerd zijn*) zich het meest waarschijnlijk bevinden, wanneer het ingegeven eindresultaat wordt behaald.

### **Gevoeligheidsanalyse 1: op basis van extremen**

Bij gevoeligheidsanalyses, wordt er gekeken op welke manier de prestatie van het product verandert, wanneer een factor verandert. Op het moment dat er wordt gekeken naar een volledige omslag van de toestand waarin een variabele zich bevindt, dan is er sprake van gevoeligheidsanalyse op basis van extremen.

#### *uitleg*

In het geval dat een variabele de toestanden ‘goed’, ‘gemiddeld’ en ‘slecht’ heeft, dan richt gevoeligheidsanalyse op basis van extremen zich op de vraag hoe de prestatie van het product verandert wanneer de toestand van de variabele wordt veranderd van 100% goed naar 100% slecht of omgekeerd.

### **Gevoeligheidsanalyse 2: op basis van marginale verschillen**

Wanneer de er een analyse plaatsvindt van de manier waarop reliability verandert, wanneer veranderingen m.b.t. de toestand van een factor beperkt zijn, dan is er sprake van gevoeligheidsanalyse op basis van marginale verschillen.

#### *uitleg*

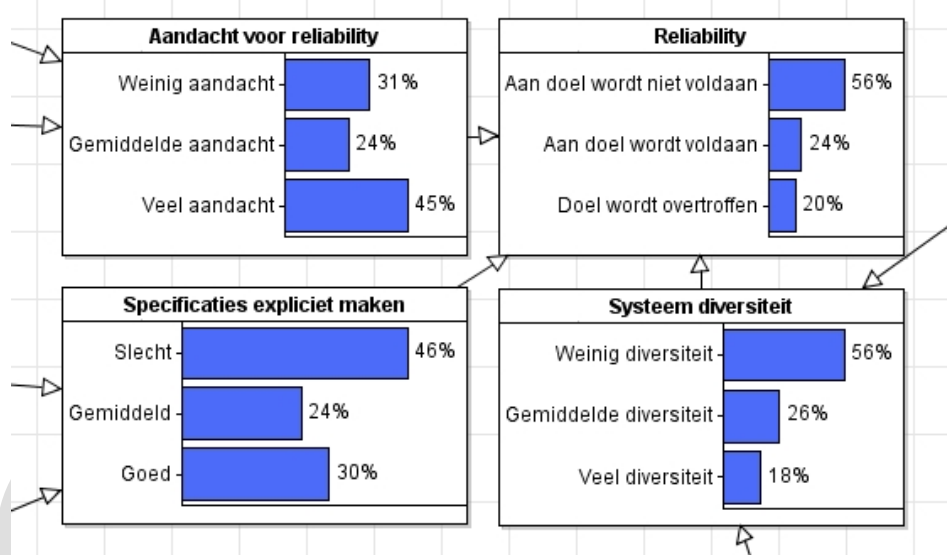
In het geval dat een variabele de toestanden ‘goed’, ‘gemiddeld’ en ‘slecht’ heeft, dan richt gevoeligheidsanalyse op basis van marginale verschillen zich op de vraag hoe de prestatie van het product verbetert/verslechtert wanneer de toestand van de variabele beperkt wordt veranderd, bijvoorbeeld van ‘0.25 – 0.35 – 0.40’ naar ‘0.20 – 0.30 – 0.50’ (‘goed – gemiddeld – slecht’).

## Casus: reliability management, model gebruik

### Scenario analyses voor beslissingsondersteuning

Om duidelijk te maken hoe scenario analyse het beslissingsproces kan steunen, zijn in Figuur 12 de uitgangssituatie, en in Figuur 13 een aantal scenario's weergegeven. (de figuren zijn verkregen m.b.v. het computerprogramma 'AgenaRisk' (Agena Ltd., 2009))

In Figuur 12 staat weergegeven wat de huidige ingeschatte waarde (kansverdeling over de toestandsruimte) is van de verschillende variabelen, en als resultaat daarvan, de ingeschatte waarde van reliability. In Figuur 13 staan, voor verschillende scenario's, de verdelingen over de toestandsruimte van de variabele 'Reliability' weergegeven voor het Bayesiaans netwerk uit Figuur 12. Uit Figuur 13 kan geconcludeerd worden dat het scenario 'Goede specificaties' (donkerblauw in Figuur 13) het beste resultaat oplevert in termen van de verwachte reliability. Dit inzicht kan gebruikt worden bij beslissingsondersteuning, bijvoorbeeld om gericht te investeren in het verbeteren van het opstellen van product specificaties.



Figuur 12: Scenario 1: waarde van reliability, op basis van inschattingen van experts

NB: vanwege het illustratieve karakter van dit hoofdstuk, van het gebruik van Bayesiaanse netwerken, wordt er in Figuur 12 – Figuur 15 slechts een deel van een Bayesiaans netwerk weergegeven. In dit voorbeeld gaat het om de volgende variabelen:

**Aandacht voor reliability:** de hoeveelheid aandacht er binnen een bedrijf is voor reliability (zowel vanuit management als op de werkvloer)

**Specificaties expliciet maken:** de mate waarin een bedrijf in staat is om de specificaties van componenten op te stellen alsmede de mate waarin het bedrijf op de hoogte zijn van klantenwensen en deze kunnen vertalen naar het niveau van systeem en subsysteem.

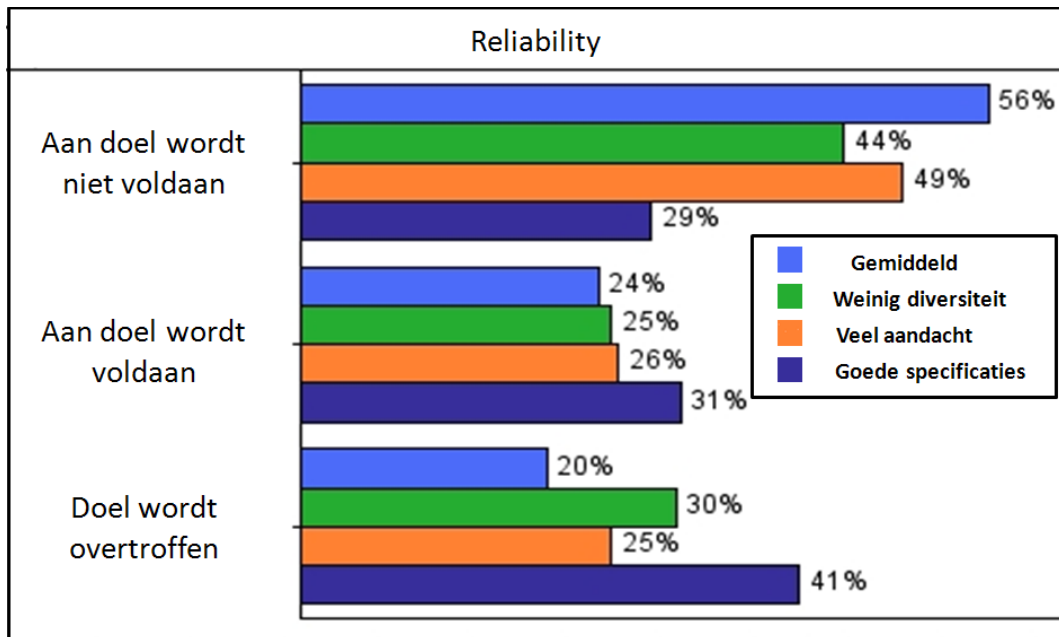
**Systeem diversiteit:** De mate waarin een nieuw systeem afwijkt van een oud systeem, hetzij m.b.t. functies, hetzij m.b.t. componenten.

Uitleg

Voorbeeld

Uitleg

Voorbeeld

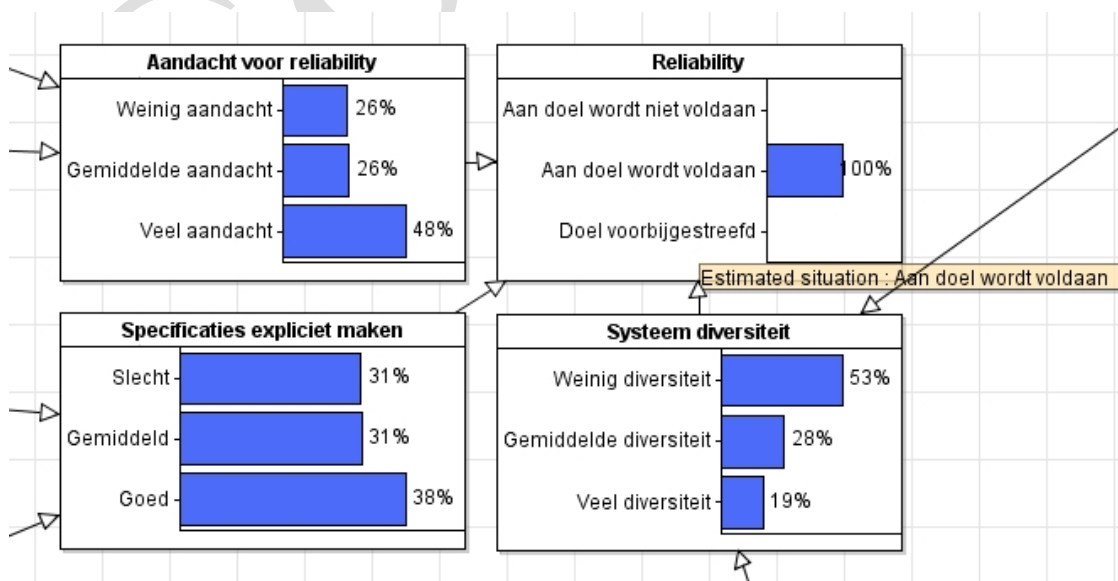


Figuur 13: Berekening van 3 scenario's: 'Systeem diversiteit' is 'Weinig diversiteit'; 'Aandacht voor reliability' is 'Veel aandacht'; en 'Specificaties expliciet maken' is 'goed'

Uitleg

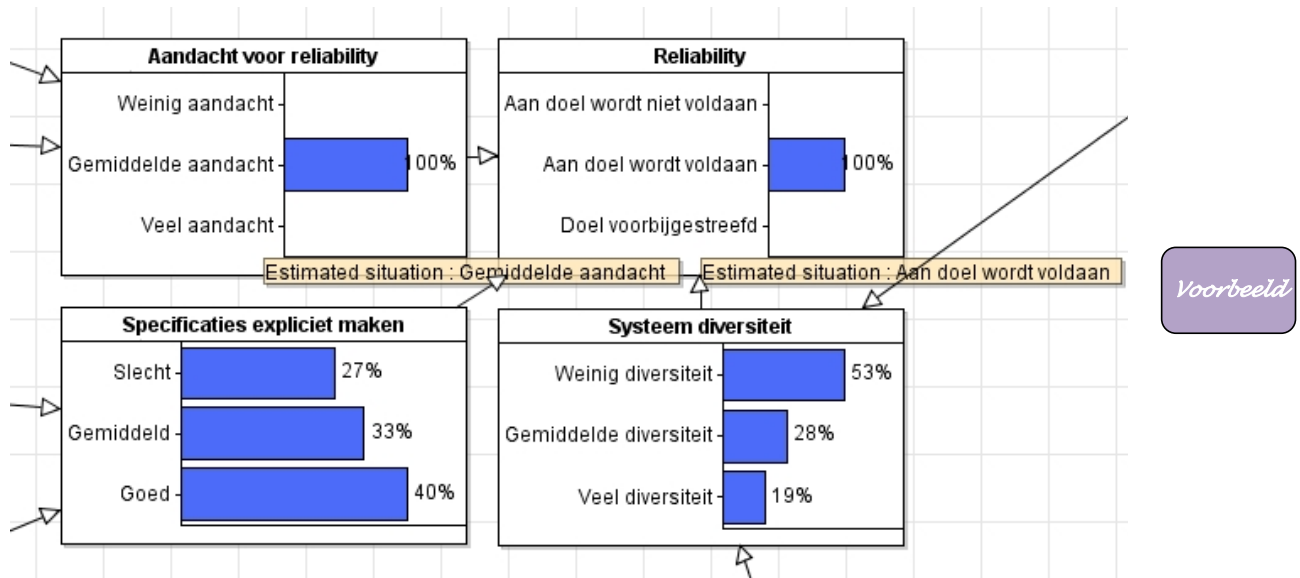
Een andere mogelijke toepassing van scenario analyse is gebaseerd op het invoeren van een gewenst eindresultaat. Hierbij is het van belang om te realiseren dat het invoeren van een gewenst eindresultaat **niet** als uitkomst geeft wat de instellingen zijn van de invloedsfactoren, maar dat dit een beeld geeft van de **meest waarschijnlijke toestanden** van de variabelen. Als voorbeeld kunnen we Figuur 14 aanhalen. In dit figuur wordt duidelijk gemaakt dat er waarschijnlijk veel aandacht voor reliability zal zijn, wanneer aan de reliability doelstelling wordt voldaan. Het is **niet** zo dat '0,26 – 0,26 – 0,48' de kansverdeling is van 'aandacht voor reliability'. Het geeft namelijk **de mening van de mensen** weer over wat de **meest waarschijnlijke toestand** van 'aandacht voor reliability' is (in dit geval 'veel aandacht').

Voorbeeld



Figuur 14: Diagnose, met als gewenste uitkomst: 'Aan doel wordt voldaan'

Prognose en diagnose kunnen ook worden gecombineerd, waarbij toestanden van input factoren kunnen worden vastgesteld (bijvoorbeeld wanneer er een waarneming is gedaan). Op dat moment rekt het Bayesiaans netwerk uit wat de meest waarschijnlijke toestand is van de overige input factoren. Voor een voorbeeld: zie Figuur 15.



Figuur 15: Diagnose, met als gewenste uitkomst: 'Aan doel wordt voldaan', waarbij er gemiddelde aandacht is voor reliability

### Gevoeligheidsanalyse voor beslissingsondersteuning

In de casus zijn 3 types gevoeligheidsanalyse weergegeven:

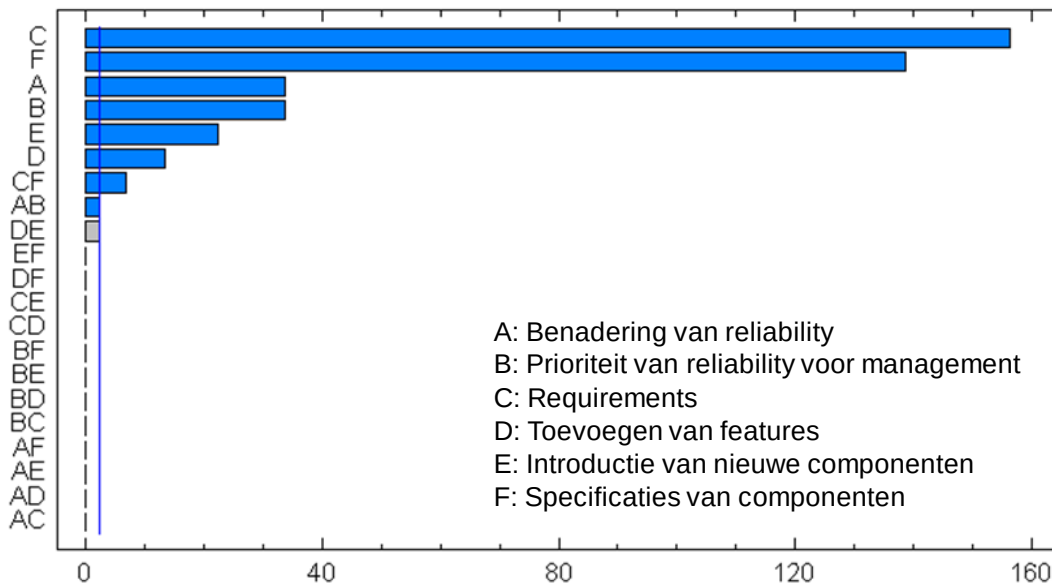
1. Pareto diagram
2. Tornado diagram
3. Main-effects diagram

### Gevoeligheidsanalyse voor beslissingsondersteuning: Pareto diagram

Om duidelijk te maken hoe gevoeligheidsanalyse het beslissingsproces kan steunen, is in Figuur 16 een Pareto diagram weergegeven. In het diagram is duidelijk te zien, wat de belangrijkste invloedsfactoren zijn m.b.t. het bereiken van de toestand 'Reliability voldoet niet'. Eenzelfde gevoeligheidsanalyse kan plaatsvinden voor alle toestanden van reliability. Op deze manier kan inzicht worden verkregen in de mate waarin factoren reliability beïnvloeden.

*Uitleg*

Pareto diagram: Marginale gevoeligheidsanalyse voor 'Reliability voldoet niet'



Figuur 16: Voorbeeld van een Pareto diagram, opgesteld met het software pakket Statgraphics®. Het diagram laat marginale gevoeligheidsanalyse zien op de toestand 'reliability voldoet niet', inclusief interactie-effecten van het eerste niveau.

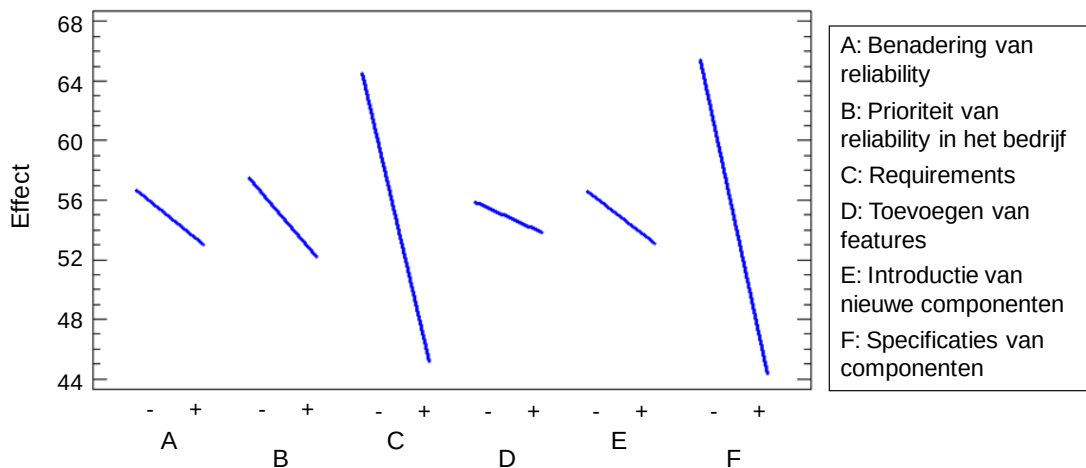
In een Pareto diagram zijn de variabelen gerangschikt naar rato van hun invloed op reliability (de variabele die bovenaan staat, heeft de meeste invloed op reliability). De mate van invloed wordt weergegeven door de lengte van de bijbehorende balk in het diagram.

### Gevoeligheidsanalyse voor beslissingsondersteuning: Main-effects diagram

Een andere manier waarop inzicht gekregen kan worden in de mate waarin reliability wordt beïnvloed, is d.m.v. een main-effects diagram via main-effects analyse. Dit is weergegeven in Figuur 17. In deze figuur is duidelijk in welke mate de verschillende variabelen invloed hebben op een gegeven toestand van reliability: de uiteinden van de lijnen geven de maximale invloed van een variabele weer, **waarbij het gemiddelde is genomen van de instellingen van alle andere variabelen.**

In een main effects diagram geeft de steilheid en lengte van een lijn de mate van invloed van de bijbehorende variabele weer

Main effects diagram: Gevoeligheidsanalyse in extremen m.b.t. 'Reliability voldoet niet'



Voorbeeld

Figuur 17: Main effects diagram, opgesteld met het software pakket Statgraphics®. De lijnen geven de effecten weer die de input variabelen hebben op de toestand 'Reliability voldoet niet'

Om gevoeligheidsanalyses te doen met Pareto diagrammen en main effects diagrammen, is een gestructureerde proefopzet nodig. Zo'n proefopzet geeft een effectieve manier van analyse, door de belangrijkste effecten in kaart te brengen, zonder dat alle mogelijke combinaties van toestanden van factoren worden uitgerekend. De proefopzet hangt af van:

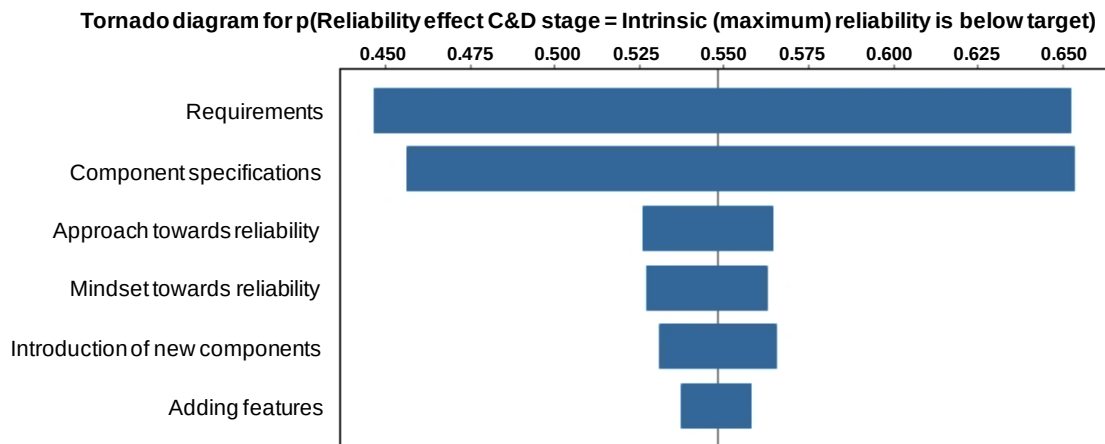
1. Het aantal variabelen dat meegenomen moet worden (is gelijk aan het aantal input variabelen van de proefopzet)
2. Het aantal toestanden dat wordt gedefinieerd voor reliability (is gelijk aan het aantal output variabelen van de proefopzet)

Er zijn computerprogramma's beschikbaar die proefopzetten kunnen genereren, waarbij het aantal input variabelen en output variabelen gedefinieerd moet worden. Een voorbeeld van zo'n programma is Statgraphics®. Voor meer informatie over proefopzetten (Engels: *design of experiments*), zie bijv. (Montgomery, 2009; in het Engels)



### Gevoeligheidsanalyse voor beslissingsondersteuning: Tornado diagram

Een derde type gevoeligheidsanalyse wordt gegeven door tornado diagrammen. In tornado diagrammen wordt zowel de huidige situatie aangegeven, als de mogelijke mate van verbetering of verslechtering. Een voorbeeld van een tornado diagram is gegeven in Figuur 18.



*Figuur 18: Tornado diagram, opgesteld met het software pakket AgenaRisk (Agena, ltd., 2009). De figuur laat gevoeligheidsanalyse op basis van extremen zien voor 'Reliability voldoet niet'*

In een tornado diagram is weergegeven wat de huidige situatie is, en hoe die kan worden beïnvloed door de variabelen (zowel in positieve als in negatieve zin)

Er bestaat een belangrijk verschil tussen de beslissingsondersteuning die kan worden geboden door gevoeligheidsanalyse op basis van extremen, en gevoeligheidsanalyse op basis van marginale verschillen. In grote lijnen komt het hierop neer:

Voor gevoeligheidsanalyse op basis van extremen zijn geen uitgangswaarden nodig. D.w.z. dat er geen inschattingen nodig zijn voor de huidige waarden van de factoren in het model. Als gevolg hiervan is gevoeligheidsanalyse op basis van extremen uitermate geschikt vroeg in het productontwikkelingsproces, wanneer er nog geen informatie is over de factoren. Op deze manier kunnen beslissingen grofweg worden ondersteund.

Voor gevoeligheidsanalyse op basis van marginale verschillen zijn wel uitgangswaarden nodig. Vanuit deze uitgangswaarden kan vervolgens beredeneerd worden wat op korte termijn (bij beperkte aanpassingen) het meeste resultaat geeft. Ook kunnen compromissen beter worden beredeneerd: er kan worden berekend wat de minste negatieve gevolgen heeft wanneer er bezuinigd moet worden, en wat het meest positieve effect heeft wanneer er extra middelen beschikbaar zijn.

#### Quote uit de praktijk

'We hebben nu een tool in handen dat meer inzicht geeft in de diverse factoren die reliability zouden kunnen beïnvloeden. We kunnen via diverse analyses nagaan waar we de meeste aandacht aan moeten geven om de uiteindelijk gerealiseerde reliability te optimaliseren. Verder laat de tool zich eenvoudig uitbreiden als de inzichten in de loop der tijd veranderen.'



## Referenties

- Agena Ltd., 2009. [www.AgenaRisk.co.uk](http://www.AgenaRisk.co.uk).
- Cooke, R.M. 1991. *Experts in uncertainty: opinions and subjective probability in science*, Oxford University Press, Oxford.
- Houben, M.J.H.A., 2010, Using Bayesian belief networks for reliability management: construction and evaluation: a step by step approach. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Jenkinson, D., 2005. *The Elicitation of Probabilities – A Review of the Statistical Literature*.  
Available online: <http://www.shef.ac.uk/content/1/c6/03/09/33/review3.pdf>. Visited: 30 June, 2009.
- Meyer, M.A., Booker, J.M., 1991. *Eliciting and Analyzing Expert Judgement – A Practical Guide*. Academic Press Limited, London.
- Montgomery, D.C. 2009. Design and analysis of experiments, 7<sup>th</sup> edition. Wiley, Hoboken.
- Morgan, M.G., Henrion, M., 1990. *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Neil, M., Fenton, N., Nielson, L. 2000. Building large-scale Bayesian networks, *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 15, No. 3, pp. 257-284.
- Renooij, S. 2001. Probability elicitation for belief networks: issues to consider, *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 16, No. 3, pp. 255-269.
- Renooij, S., Witteman, C., 1999. Talking probabilities: communicating probabilistic information with words and numbers, *International Journal of Approximate Reasoning* 22, pp. 169-194.
- W.H. Sigurdsson, L.A. Walls and J.L., Quigley, 2001. Bayesian Belief Nets for Managing Expert Judgment and Modelling Reliability, *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 17, pp. 181-190.
- Spetzler, C.S., Staël Von Holstein, C-A, S., 1975. Probability Encoding in Decision Analysis, *Management Science*, Vol. 22, No. 3, pp. 340-358.
- Van der Gaag, L.C., Renooij, S., Witteman, C.L.M., Aleman, B.M.P., Taal, B.G. 2002. Probabilities for a probabilistic network: a case study in oesophageal cancer, *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 25, pp. 123-148.
- Witteman, C., Renooij, S. 2003. Evaluation of a verbal-numerical probability scale, *Journal of Approximate Reasoning* 33, pp. 117-131.

Concept

# **Productmanagement Gedurende het Productontwikkelingsproces in een Complexe Omgeving**

*Sturen op de prestaties van het eindproduct  
met als voorbeeld: sturen op reliability als  
belangrijke driver voor totale levenscycluskosten*

**Appendices:**  
*voorbeelden en templates*

MAURITS HOUBEN

Concept

## A. Software tools voor Bayesiaanse netwerken

In het project waarop deze reader gebaseerd is, is gebruik gemaakt van de software “AgenaRisk”. Er is echter (veel) meer software beschikbaar, die het mogelijk maakt om Bayesiaanse netwerken te modelleren. Hieronder is dan ook een (niet uitputtende) lijst met software te vinden. Het is belangrijk om op te merken dat er geen ervaring is opgedaan met de andere software.

### Tools, gerefereerd door [www.agenarisk.co.uk](http://www.agenarisk.co.uk)

#### Commerciële tools (alfabetisch)

**Agenarisk:** From Agena (based in UK), [www.agenarisk.com](http://www.agenarisk.com)

**BayesLab:** From Bayesia (based in France), [www.bayesia.com](http://www.bayesia.com)

**Bayesware Discoverer:** From Bayesware (based in UK), [www.bayesware.com](http://www.bayesware.com)

**BNet:** From Charles River Analytics (based in USA), [www.cra.com/bnet](http://www.cra.com/bnet)

**Hugin:** From Hugin A/S (based in Denmark), [www.hugin.com](http://www.hugin.com)

**Netica:** From Norsys (based in Canada), [www.norsys.com](http://www.norsys.com)

**SIAM & Causeway:** From SAIC (based in USA), [www.inet.saic.com](http://www.inet.saic.com)

#### Gratis en open source tools (alfabetisch)

**GeNIe & SMILE:** <http://genie.sis.pitt.edu>

**Microsoft MSBNx Bayesian Network Editor and Tool Kit:**  
<http://research.microsoft.com/adapt/MSBNx/>

**OpenBayes:** [www.openbayes.org](http://www.openbayes.org)

**RISO:** <http://sourceforge.net/projects/riso/>

**SamIam:** <http://reasoning.cs.ucla.edu/samiam>

**Powersoft:** [www.cs.ualberta.ca/~jcheng/bnsoft.htm](http://www.cs.ualberta.ca/~jcheng/bnsoft.htm)

### Verdere referenties en bruikbare links

**Overzicht van (andere) software pakketten voor grafische modellen / Bayesiaanse netwerken:**

<http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnsoft.html>)

**Google's lijst met software voor Bayesiaanse netwerken:**

[http://directory.google.com/Top/Computers/Artificial\\_Intelligence/Belief\\_Networks/Software/](http://directory.google.com/Top/Computers/Artificial_Intelligence/Belief_Networks/Software/)

Concept

## B. Template voor brief en enquête

Beste mr./mevr.,

De laatste tijd zijn er een aantal interviews afgenomen bij u en uw collega's m.b.t. productontwikkeling, en met name m.b.t. de resulterende **[prestatiemaat X]** van het product. In dit onderzoek zijn een aantal factoren die **[prestatiemaat X]** beïnvloeden aan het licht gekomen. Dit is een enquête die is opgesteld om de bevindingen tot nu toe te valideren.

Deze enquête bevat een aantal vragen m.b.t. factoren die **[prestatiemaat X]** beïnvloeden, gedurende het productontwikkelingsproces, in de concept en definitie (C&D) fase, de design en ontwikkel (D&O) fase en de productie en installatie (P&I) fase. In de studie zijn zowel technische (aantal componenten) als non-technische factoren (prioriteit van reliability) opgenomen.

Het doel van deze enquête is het verkrijgen van uw mening over de mate waarin de verschillende factoren **[prestatiemaat X]** van het product beïnvloeden. Daarom willen we u vragen om de factoren in deze enquête te scoren in termen van hun invloed op reliability, waarbij geldt:

- Als u denkt dat een factor **zeer veel** invloed heeft op **[prestatiemaat X]**, vul dan a.u.b. "7" in.
- Als u denkt dat een factor **geen** invloed heeft op **[prestatiemaat X]**, vul dan a.u.b. "1" in.
- Als u **niet kunt inschatten** hoeveel invloed een factor heeft op **[prestatiemaat X]**, vul dan a.u.b. "0" in.

De enquête bestaat uit 3 secties: één voor elke fase in het productontwikkelingsproces (C&D fase; **xx** pagina's, D&O fase; **xx** pagina's, P&I fase; **xx** pagina's).

De factoren kunnen worden gescoord door op het vakje te klikken dat overeenkomt met uw mening. Een antwoord kan worden gecorrigeerd door nogmaals op het vakje te klikken (en het daarmee leeg te maken), en daarna op het juiste vakje te klikken.

Wanneer u de enquête handmatig invult, kunt u het vakje aankruisen dat overeenkomt met uw mening. Als u alle vragen heeft ingevuld, wil ik u vragen om het document op te slaan en de enquête op te sturen naar onderstaand e-mail adres (**[e-mail adres]**)

De resultaten van de enquête zullen vertrouwelijk worden behandeld. Er worden geen persoonlijke gegevens openbaar gemaakt.

Bij voorbaat hartelijk dank voor uw medewerking,

**[Naam]**

Tel. **[Telefoonnummer]**

E-mail:

**[e-mail**

**adres]**

| <b>Concept en Definitie (C&amp;D) fase: variabelen en hun invloed op [prestatiemaat X]</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Naam van de variabele</i>                                                               |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| <i>Omschrijving</i>                                                                        | <i>Geen invloed</i>        |                            |                            |                            |                            | <i>Zeer veel invloed</i>   |                            | <i>Geen mening</i>         |
| <i>Variabele A</i>                                                                         |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variabele A is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                               | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |
| <i>Variabele B</i>                                                                         |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variabele B is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                               | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |
| <i>Variabele C</i>                                                                         |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variabele C is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                               | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |



| Design en Ontwikkeling (D&O) fase: variabelen en hun invloed op [prestatie maat X] |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| Naam van de variabele                                                              | Geen invloed               |                            |                            |                            |                            |                            |                            | Zeer veel invloed          | Geen mening |
| Omschrijving                                                                       |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |             |
| <b>Variabele D</b>                                                                 |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |             |
| Variabele D is een variabele die [prestatie maat X] beïnvloed                      | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |             |
| <b>Variabele E</b>                                                                 |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |             |
| Variabele E is een variabele die [prestatie maat X] beïnvloed                      | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |             |
| <b>Variabele F</b>                                                                 |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |             |
| Variabele F is een variabele die [prestatie maat X] beïnvloed                      | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |             |

| <b>Productie en Installatie (P&amp;I) fase: variabelen en hun invloed op [prestatiemaat X]</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <i>Naam van de variabele</i>                                                                   | <i>Geen invloed</i>        |                            |                            |                            |                            |                            |                            | <i>Geen mening</i>         |
| <i>Omschrijving</i>                                                                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| <i>Variable G</i>                                                                              |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variable G is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                                    | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |
| <i>Variable H</i>                                                                              |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variable H is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                                    | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |
| <i>Variable I</i>                                                                              |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Variable I is een variabele die [prestatiemaat X] beïnvloed                                    | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | <input type="checkbox"/> 0 |

## C. Template voor training voor kans elicatie

### Training: Elicatie van conditionele kansen

*Box 1a: Presentatie voor kans elicatie training, sheet 1*

Deze eerste sheet geeft slechts de inleiding weer van de training. Bij deze sheet kan verteld worden dat de training uiteindelijk is bedoeld voor het invullen van tabellen, waarmee een tool kan worden ontwikkeld. Deze tool kan handvatten geven voor het sturen van een prestatie maat van een product.

## Introductie: conditionele kansen

### **Conditionele kans:**

*De kans dat een gebeurtenis plaatsvindt, gegeven dat (een) andere gebeurtenis(sen) al plaats hebben gevonden*

### **Interactie effect:**

*Het effect van een kansverdeling op een variabele beïnvloedt het effect op (een) andere variabele(n)*

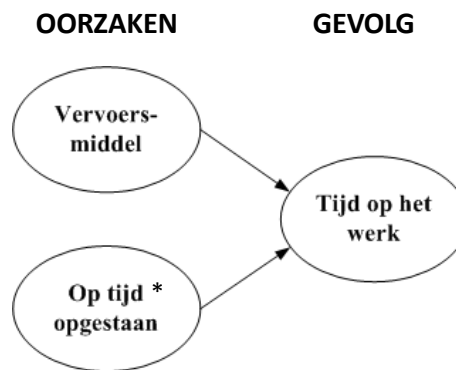
*Box 1b: Presentatie voor kans elicitatie training, sheet 2*

In de tweede sheet worden de begrippen conditionele kans en interactie effect kort uitgelegd (dit staat al weergegeven in de sheet).

## Voorbeeld: naar het werk gaan

Veranderingen in de tijd dat je op het werk arriveert, gegeven bepaalde oorzaken

| Op tijd *<br>opgestaan | Vervoers-<br>middel | Tijd op het werk |         |         |
|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
|                        |                     | Vroeg            | Op tijd | Te laat |
| Op tijd                | OV                  | 0.05             | 0.85    | 0.10    |
|                        | Auto                | 0.05             | 0.90    | 0.05    |
| Te laat                | OV                  | 0.02             | 0.08    | 0.90    |
|                        | Auto                | 0.01             | 0.05    | 0.94    |



\*: Op tijd: Eerder dan de wekker afgaat , of tegelijk  
 Te laat: Nadat de wekker al is afgegaan

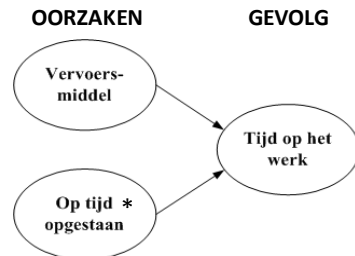
*Box 1c: Presentatie voor kans elicitation training, sheet 3*

In de derde sheet laten we zien hoe een Bayesiaans netwerk eruit ziet, en hoe tabellen hiermee samenhangen. In deze sheet is de tabel ingevuld, maar dit hoeft nog niet per sé. In de sheet is duidelijk weergegeven dat ‘Tijd op het werk’ afhankelijk is van ‘vervoersmiddel’ en ‘Op tijd opgestaan’.

## Voorbeeld: naar het werk gaan

Veranderingen in de tijd dat je op het werk arriveert, gegeven bepaalde oorzaken

| Op tijd *<br>opgestaan | Vervoers-<br>middel | Tijd op het werk |         |         |
|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
|                        |                     | Vroeg            | Op tijd | Te laat |
| Op tijd                | OV                  | 0.05             | 0.85    | 0.10    |
|                        | Auto                | 0.05             | 0.90    | 0.05    |
| Te laat                | OV                  | 0.02             | 0.08    | 0.90    |
|                        | Auto                | 0.01             | 0.05    | 0.94    |



- Op tijd in het OV, maar er is vertraging
- De aansluiting gemist, dus automatisch te laat
- Tegen de verwachtingen in zijn er geen files
- Hoewel je te laat bent opgestaan, haal je het toch nog, omdat alle stoplichten op groen staan

\*: Op tijd: Eerder dan de wekker afgaat, of tegelijk  
Te laat: Nadat de wekker al is afgegaan

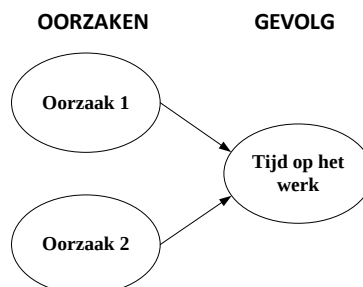
Box 1d: Presentatie voor kans elicatie training, sheet 4

In de vierde sheet moet de tabel ingevuld zijn. In deze sheet kan aan de hand van een aantal voorbeelden duidelijk gemaakt hoe tabellen de relaties kwantificeren. De voorbeelden zijn duidelijk met rood geaccentueerd; deze kunnen met animaties in beeld worden gebracht. Met name de opmerkelijke getallen kunnen er uit worden gelicht, zodat 'vreemde' kansen kunnen worden toegelicht

## Voorbeeld: naar het werk gaan

Veranderingen in de tijd dat je op het werk arriveert, gegeven  
bepaalde oorzaken

| Oorzaak 1 | Oorzaak 2 | Gevolg           |         |         |
|-----------|-----------|------------------|---------|---------|
|           |           | Tijd op het werk |         |         |
|           |           | Vroeg            | Op tijd | Te laat |
|           |           |                  |         |         |
|           |           |                  |         |         |
|           |           |                  |         |         |
|           |           |                  |         |         |



| Oorzaak 1  |            |
|------------|------------|
| Toestand 1 | Toestand 2 |
|            |            |

| Oorzaak 2  |            |
|------------|------------|
| Toestand 1 | Toestand 2 |
|            |            |

*Box 1e: Presentatie voor kans elicitation training, sheet 5*

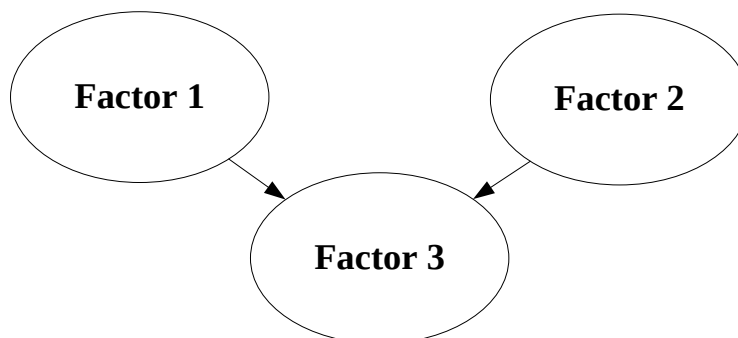
In deze laatste sheet wordt de trainee verzocht om zelf twee factoren te verzinnen – in zijn/haar situatie – die bepalen of hij/zij vroeg, op tijd, of te laat op het werk komt. Ook wordt de trainee gevraagd om de tabellen in te vullen. Hierbij moet je de trainee vragen om hierbij hardop te redeneren. Door de manier van redeneren te beoordelen, kan worden bepaald of de trainee het concept al dan niet voldoende begrijpt om ook de tabellen die horen bij het onderwerp in te vullen.





## D. Template voor kanselicitatie

We beschouwen het volgende deel van het Bayesiaans netwerk (voorbeeld):



*Figuur 19: Deel van een Bayesiaans netwerk (voorbeeld)*

Voorbeeld vraag:

Gegeven dat **factor 1** zich in **toestand 2** bevindt, en **factor 2** zich in **toestand 1** bevindt, wat is dan de kans dat **factor 3** zich bevindt in:

|            |      |                                                     |
|------------|------|-----------------------------------------------------|
| Toestand 1 | .... | } $\Sigma = 1$ , of in het geval van procenten 100% |
| Toestand 2 | .... |                                                     |
| Toestand 3 | .... |                                                     |

De bovenstaande voorbeeldvraag heeft betrekking op de gemarkeerde regel van de conditionele kanstabel (zie Tabel 5) kan gebruikt worden om de tabellen in te vullen.

NB: horizontaal moeten alle kansen opsommen tot 1, of in het geval van procenten, tot 100%

*Tabel 5: Conditionele kanstabel voor een kind, 3 toestanden met 2 ouders, 3 toestanden*

---

## Appendices

| <b>Factor 1</b>   | <b>Factor 2</b>   | <b>Factor 3</b>   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                   |                   | <i>Toestand 1</i> | <i>Toestand 2</i> | <i>Toestand 3</i> |
| <i>Toestand 1</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 2</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 3</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |

## E. Templates voor in te vullen conditionele kanstabellen

Tabel 6: Conditionele kanstabel voor een kind, 3 toestanden met 2 ouders, 3 toestanden

| <b>Factor 1</b>   | <b>Factor 2</b>   | <b>Factor 3</b>   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                   |                   | <i>Toestand 1</i> | <i>Toestand 2</i> | <i>Toestand 3</i> |
| <i>Toestand 1</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 2</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 3</i> | <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
|                   | <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |

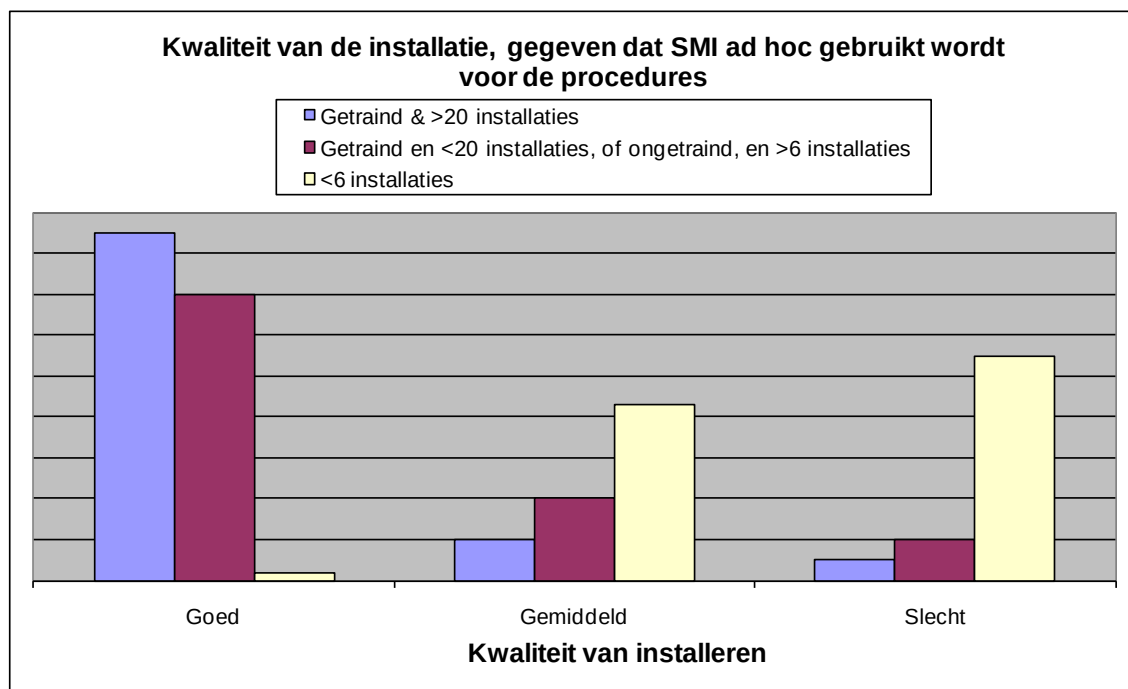
Tabel 7: Conditionele kanstabel voor een kind, 3 toestanden met 1 ouder, 3 toestanden

| <b>Factor 1</b>   | <b>Factor 2</b>   |                   |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                   | <i>Toestand 1</i> | <i>Toestand 2</i> | <i>Toestand 3</i> |
| <i>Toestand 1</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 2</i> |                   |                   |                   |
| <i>Toestand 3</i> |                   |                   |                   |

Tabel 8: Conditionele kanstabel voor een kind, 3 toestanden met 3 ouders, 3 toestanden

| Factor 1   | Factor 2   | Factor 3   | Factor 4   |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|            |            |            | Toestand 1 | Toestand 2 | Toestand 3 |
| Toestand 1 | Toestand 1 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 2 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 3 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
| Toestand 2 | Toestand 1 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 2 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 3 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
| Toestand 3 | Toestand 1 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 2 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |
|            | Toestand 3 | Toestand 1 |            |            |            |
|            |            | Toestand 2 |            |            |            |
|            |            | Toestand 3 |            |            |            |

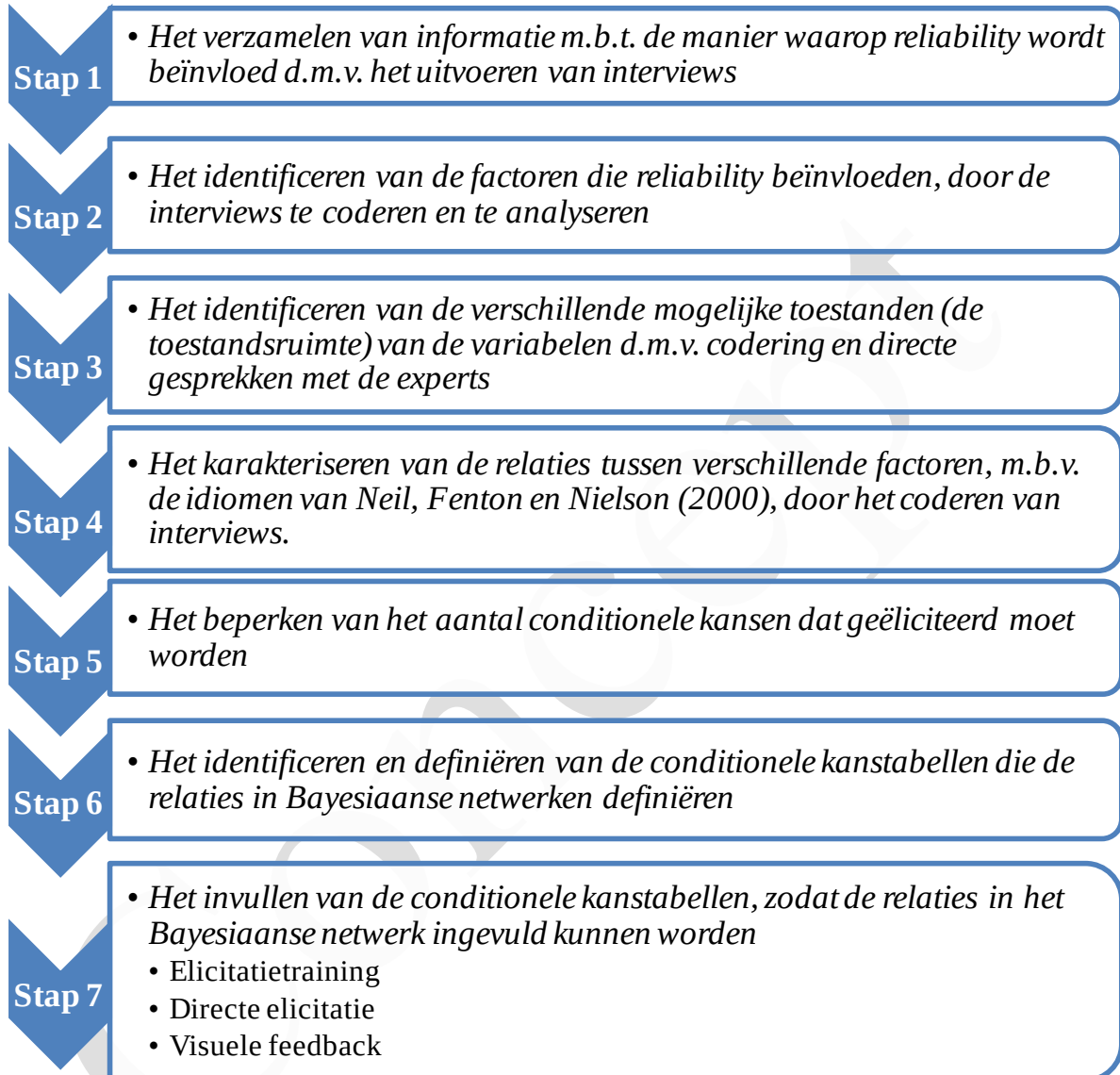
## F. Voorbeeld van visuele feedback



*Figuur 20: Voorbeeld van visuele feedback voor de elicatie van een conditionele kanstabel, zoals die gegeven kan worden met Microsoft Excel®.*



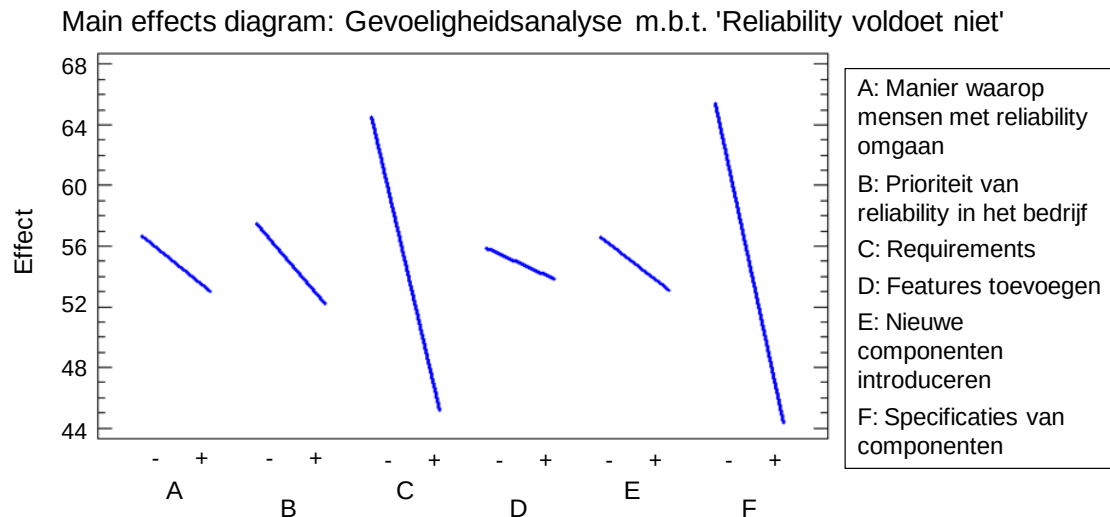
## G. Stappenplan, gebaseerd op Gefundeerde Theorie



Concept



## H. Voorbeeld van een “Main-effects diagram”



Figuur 21: Voorbeeld van een 'main effects diagram', gemaakt m.b.v. het computer programma Statgraphics®. De lijnen geven de effecten weer van de verschillende factoren (A – F) op de toestand 'Reliability voldoet niet'

Concept

## I. Quick Start

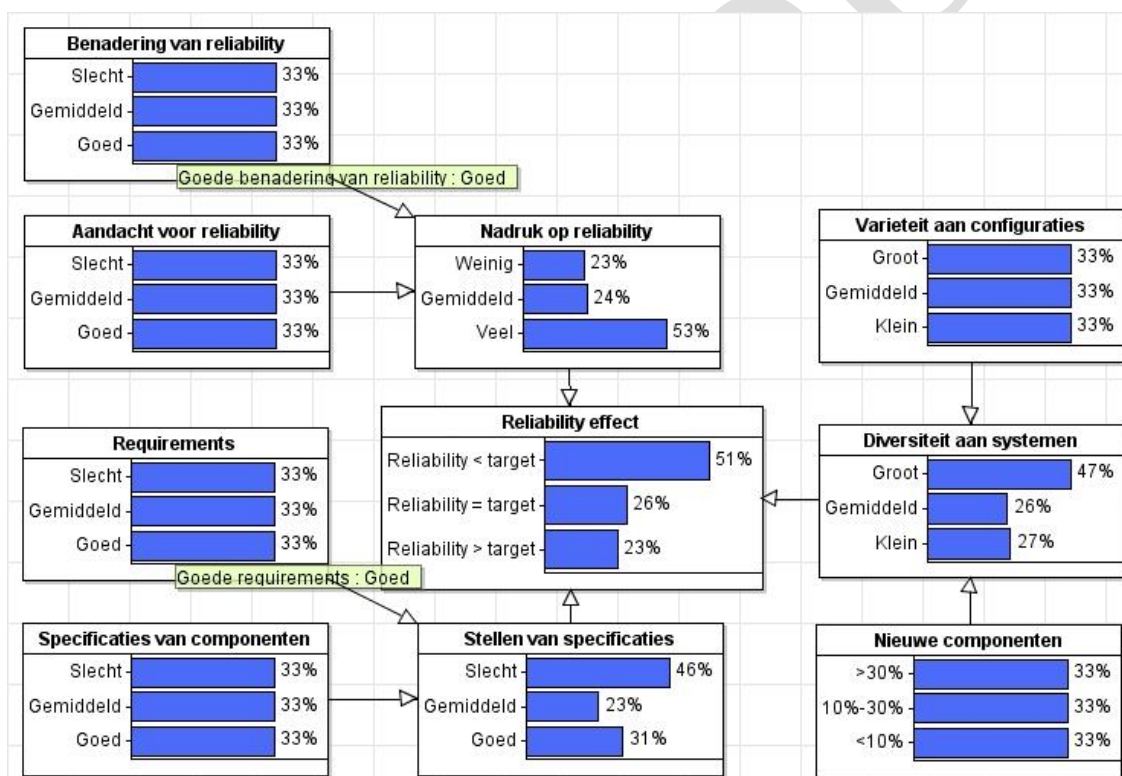
Bij deze reader is een file toegevoegd (Quickstart\_model.cmp) met een fictief scenario dat gebruikt zou kunnen worden voor reliability management. Deze file kan in het programma “AgenaRisk” gebruikt worden om inzichten te krijgen in de werking van het programma (Een 30-daagse “evaluatie-versie” van het programma “AgenaRisk” is te downloaden op de website [www.agenarisk.com](http://www.agenarisk.com) (site bezocht dd 31-10-2010))

Voorbeeld

NB: er is meer software beschikbaar voor Bayesiaanse netwerken: zie appendix A.

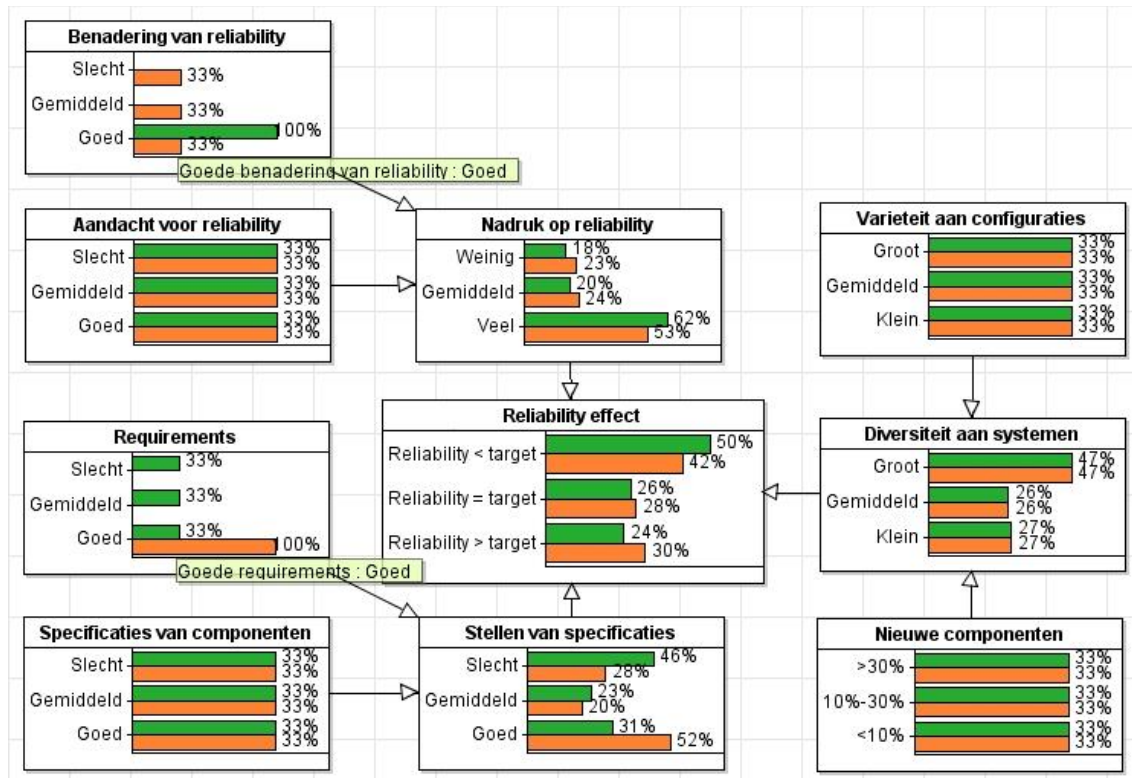


Hieronder zijn een tweetal scenario's weergegeven, die een beeld geven van mogelijkheden die het programma biedt. Het eerste voorbeeld geeft de ‘standaard’ situatie weer, waarbij er geen informatie is over de input variabelen (de buitenste variabelen van het model). Vandaar dat de verdeling over hun toestanden uniform is: op elke toestand is evenveel kans. Het is ook duidelijk wat het ingeschatte effect is op de reliability.



Figuur 22: Voorbeeld van een Bayesiaans netwerk zonder informatie over de waarden van de variabelen op voorhand

Een mogelijkheid die ‘AgenaRisk’ biedt, is het doorrekenen van verschillende scenario’s. Dit is weergegeven in Figuur 23, waarin de scenario’s “Requirements zijn goed” (blauw) en “Benadering van reliability is goed” (groen) staan weergegeven. In de figuur is duidelijk te zien dat goede requirements belangrijker zijn voor goede reliability dan een goede benadering van reliability (ten eerste is de kans op reliability boven target groter; 42% wordt 50% en ten tweede is de kans op reliability onder target kleiner; 30% wordt 24%).



Figuur 23: Voorbeeld van een Bayesiaans netwerk met 2 uitgewerkte scenario's: “Benadering van reliability is goed” (groen) en “Requirements zijn goed” (oranje)

Het programma biedt de mogelijkheid om meer scenario's in te voeren, en door te rekenen. Ook het aanpassen en/of toevoegen van variabelen en relaties is mogelijk. Hiervoor moet je de handleiding raadplegen die te vinden is in het programma (druk op F1 in het programma om de handleiding te openen). Meer informatie over de manier waarop relaties te definiëren zijn, is te vinden in hoofdstuk 2.

In de bijgevoegde file zijn de 3 scenario's die staan uitgewerkt in deze reader te vinden onder het drop-down menu ‘Risk Scenarios’ onder de namen:

- ‘Geen informatie’
- ‘Goede benadering van reliability’
- ‘Goede requirements’