

Beschikbaarheid & betrouwbaarheid

Praktijkgerichte analyses voor assets en assetsystemen



Martine van den Boomen

Beschikbaarheid & betrouwbaarheid

Praktijkgerichte analyses voor assets en assetsystemen

Martine van den Boomen

Beschikbaarheid & betrouwbaarheid - Praktijkgerichte analyses voor assets en assetsystemen

Copyright © 2022 Colibri Advies BV

Auteur: dr. ir. Martine van den Boomen MBA

3^e druk

NUR 175

ISBN 978-90-823214-1-8

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, door middel van druk, fotokopieën, geautomatiseerde gegevensbestanden of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De inhoud van dit boek is met zorg samengesteld. Colibri Advies BV en de auteur aanvaarden echter geen aansprakelijkheid bij gebruik/toepassing van deze tekst.

Voorwoord

Context

De ISO 55000 definieert assetmanagement als de gecoördineerde activiteiten om waarde te realiseren uit assets. Waarde betekent een gezonde balans tussen prestaties, risico's en levensduurkosten van bedrijfsmiddelen (assets en assetsystemen). Deze handleiding geeft handvatten voor het berekenen van de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van bedrijfsmiddelen. Deze vormen een onderdeel van het aspect prestaties en spelen een rol bij het bepalen van het risico van bedrijfsmiddelen. Risico is immers faalkans maal effect. Een onbetrouwbaar bedrijfsmiddel heeft een hoge faalkans en lagere beschikbaarheid. Rekenen aan de beschikbaarheid en betrouwbaarheid is onlosmakelijk verbonden met waarde-realiseratie.

Inhoud

In deze handleiding behandelen we een aantal praktische vraagstukken waar een assetmanager onderhoudsmanager en reliability engineer mee te maken hebben:

- Hoe bepaal ik de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van een asset? Bijvoorbeeld een gemaal, distributiepomp of een voorbezinktank.
- Hoe bereken ik de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van mijn assetsysteem? Bijvoorbeeld een (afval)waterzuiveringsinstallatie, gemalensysteem of watersysteem.
- Hoe kan ik de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van mijn assets en assetsystemen beïnvloeden met onderhoud en modificaties?
- Als ik het falen niet kan beïnvloeden, hoe kan ik dan de gevolgen beperken?
- Hoe voer ik een eenvoudige risico-optimalisatie voor de benodigde redundantie uit?

Met behulp van praktijkvoorbeelden en methoden zoals Reliability Block Diagrams en foutenboomanalyses, geven we een praktisch antwoord op bovenstaande vragen. Voor complexe situaties verwijzen we naar reliability software. Echter, veel praktijksituaties kunnen gewoon met een relatief eenvoudige berekening in Excel worden opgelost.

Inhoud

Voorwoord	2
1 Betrouwbaarheid en afgeleide grootheden	5
1.1 Betrouwbaarheid	5
1.2 Onbetrouwbaarheid of cumulatieve faalkansverdeling	6
1.3 Faalkansverdeling	6
1.4 Faaltempo, hazard rate of conditionele faalfrequentie	6
1.5 Storingsfrequentie	7
1.6 Mean Time To Failure (MTTF)	8
1.7 Mean Time Between Failure (MTBF)	9
1.8 Conditionele betrouwbaarheid	9
2 Faalkansverdelingen	11
2.1 De exponentiële verdeling	11
2.2 De normaalverdeling	16
2.3 De gamma-verdeling	20
2.4 De 2-parameter Weibull-verdeling	23
3 Beschikbaarheid van objecten	26
3.1 Beschikbaarheid (A) en niet-beschikbaarheid (NA) van een object	26
3.2 Mean Time Between Failure (MTBF) en storingsfrequentie (λ)	28
3.3 Downtime als gevolg van merkbaar falen of verborgen falen	29
3.4 Downtime als gevolg van onderhoud	30
3.5 Drie rekenvoorbeelden voor de beschikbaarheid van een object	30
4 Reliability Block Diagram methode	34
4.1 Beschikbaarheid van serieel en parallel geschakelde objecten	34
4.2 Doorrekenen van de systeembeschikbaarheid en -betrouwbaarheid	35
4.3 Active M out of N redundancy	40
4.4 Cold redundancy	43
5 Eenvoudige foutenboomanalyse	46
5.1 Opstellen van de foutenboom	46
5.2 Doorrekenen van de foutenboom met enkelvoudige basisgebeurtenissen	49
5.3 Vereenvoudiging met de rare event approximation	54

6	Foutenboomanalyse met basisgebeurtenissen die vaker voorkomen	57
6.1	Opzetten van de foutenboom	58
6.2	Booleaanse algebra	59
6.3	Foutenboom beschrijven met Booleaanse algebra	62
6.4	Berekening niet-beschikbaarheid van de componenten	64
6.5	Berekenen niet-beschikbaarheid systeem	69
7	Faaltijd en downtime van een repareerbaar systeem	74
7.1	Aanpak	74
7.2	Bereken de beschikbaarheid van de componenten en het systeem	75
7.3	Bereken de Birnbaum Importance Factor (BIF)	76
7.4	Bereken de niet-conditionele faalfrequenties van de componenten	77
7.5	Bereken de gemiddelde faaltijd van het systeem	77
7.6	Bereken de gemiddelde downtime van het systeem	78
8	Gebeurtenissenanalyse	79
8.1	Gebeurtenissenboom voor het redundantievraagstuk	79
8.2	Risico-optimalisatie van gebeurtenissen	81
8.3	Totale faalkans van gebeurtenissen	83
8.4	Risicokosten = faalkans x schade	83
9	Bowtie-analyse	85
9.1	Proactieve en reactieve barrières	85
9.2	Doorrekenen van een bowtie	87
9.3	Oorzaken	88
9.4	Effecten	89
10	Bronnen en verder lezen	91

1 Betrouwbaarheid en afgeleide grootheden

1.1 Betrouwbaarheid

Betrouwbaarheid $R(t)$ is de kans dat een component gedurende een bepaalde tijd blijft doen wat hij moet doen. Je kunt betrouwbaarheid zien als de overleving van een component of de overleving van een populatie van componenten in de tijd.

Stel dat we een populatie hebben van 200 componenten waarvan we weten dat er ieder jaar 20 zullen falen. Na 10 jaar zal de eerste generatie 'overleden' zijn. Het verloop van dit overlijden kunnen we uitzetten in de tijd. Zie hiervoor tabel 1.1. De betrouwbaarheid op een willekeurig tijdstip t is dan gedefinieerd als het aantal componenten dat op t nog in leven is, gedeeld door het totale aantal componenten waarmee we begonnen, in dit voorbeeld 200.

TABEL 1.1 FAALGEDRAG EN FUNCTIES

Tijd t	Overleving $N(t)$	Betrouwbaarheid $R(t)$		Onbetrouwbaarheid $F(t)$		Faalkansverdeling $f(t)$		Faaltempo $z(t)$
0	200	1	100%	0	0%	0,1	10%	0,100
1	180	0,9	90%	0,1	10%	0,1	10%	0,111
2	160	0,8	80%	0,2	20%	0,1	10%	0,125
3	140	0,7	70%	0,3	30%	0,1	10%	0,143
4	120	0,6	60%	0,4	40%	0,1	10%	0,167
5	100	0,5	50%	0,5	50%	0,1	10%	0,200
6	80	0,4	40%	0,6	60%	0,1	10%	0,250
7	60	0,3	30%	0,7	70%	0,1	10%	0,333
8	40	0,2	20%	0,8	80%	0,1	10%	0,500
9	20	0,1	10%	0,9	90%	0,1	10%	1,000
10	0	0	0%	1	100%	0,1	10%	-

Betrouwbaarheid is dus een functie in de tijd. In formulevorm:

$$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (1.1)$$

$N(t)$ is het aantal componenten dat nog in leven is op tijdstip t en $N(0)$ is het aantal componenten waarmee we begonnen op $t = 0$.

Op $t = 3$ is de betrouwbaarheid in dit voorbeeld gelijk aan 70%, namelijk $140/200 \times 100\%$. Dit betekent dat de kans dat een component op $t = 3$ nog leeft gelijk is aan 70%.

1.2 Onbetrouwbaarheid of cumulatieve faalkansverdeling

Als de kans dat een component op $t = 3$ nog leeft gelijk is aan 70% dan is er dus 30% kans dat de component ergens tussen $t = 0$ en $t = 3$ overlijdt. Dit laatste noemen we de onbetrouwbaarheid.

Onbetrouwbaarheid drukken we uit in $F(t)$ en is gelijk aan 1 minus $R(t)$. $F(t)$ noemen we ook wel de **cumulatieve faalkansverdeling** of **cumulatieve faalkansdistributie**. In formulevorm:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1.2)$$

De onbetrouwbaarheid $F(t)$ is een functie in de tijd en opgenomen in tabel 1.1.

1.3 Faalkansverdeling

De volgende afgeleide grootte is de faalkansverdeling. Het aantal componenten dat per tijdseenheid overlijdt ten opzichte van de oorspronkelijke populatie noemen we de faalkans. Ook de faalkans is een functie in de tijd en deze wordt aangeduid met **faalkansverdeling** of **faalkansdistributie**.

$$f(t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \quad (1.3)$$

In ons voorbeeld is de faalkans in ieder jaar gelijk. Ieder jaar overlijden 20 componenten van de oorspronkelijke 200 waar we mee begonnen. De kans dat in een willekeurig jaar een component overlijdt is gelijk aan $20/200 \times 100\% = 10\%$. Dit vinden we ook met formule (1.3). Bijvoorbeeld:

$$f(3) = \frac{F(3 + 1) - F(3)}{4 - 3} = \frac{0,4 - 0,3}{1} = 0,1 = 10\%$$

1.4 Faaltempo, hazard rate of conditionele faalfrequentie

Nu kunnen we ook nog kijken naar het aantal componenten dat overlijdt in een jaar (of tijdseenheid) ten opzichte van het aantal componenten dat aan het begin van dat jaar (of tijdseenheid) nog in leven was. Dit noemen we het faaltempo $z(t)$, ook wel hazard rate of conditionele faalfrequentie genoemd. Deze interpreteren we als volgt: als een aantal componenten de leeftijd bereikt van t jaar, dan is $z(t)$ het aandeel van deze overlevingsgroep dat het komende jaar ($t+1$) naar verwachting komt te overlijden. In formulevorm:

$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.4)$$

Merk op dat faaltempo $z(t)$ niet hetzelfde is als faalkans $f(t)$. Maar ze hebben wel een relatie. In ons voorbeeld is $f(t) = 0,1$ en constant omdat ieder jaar 20 componenten van de oorspronkelijke 200 overlijden. Het faaltempo is $z(t) = 0,1 / (1-F(t))$ en deze is niet constant. Voor een component die de leeftijd van 2 jaar bereikt, is het faaltempo tussen het 2e en 3e jaar gelijk aan $0,1 / (1-0,2) = 0,125$. Dit wil zeggen dat van de 160 componenten die bij het bereiken van jaar 2 nog in leven zijn, naar verwachting $0,125 \times 160 = 20$ zullen falen. Zo ook voor een component die een leeftijd van 8 jaar bereikt. Nu is het faaltempo tussen het 8e en 9e levensjaar gelijk aan $0,1 / (1-0,8) = 0,5$. Bij het bereiken van een leeftijd van 8 jaar waren 40 componenten nog in leven. Dus we verwachten op basis van faaltempo dat $40 \times 0,5 = 20$ componenten tussen jaar 8 en 9 uitvallen. Deze voorbeelden laten de relatie zien tussen faalkans $f(t)$ en faaltempo $z(t)$.

De conditie voor het faaltempo is dus dat een component op een bepaalde tijd nog in leven is, vandaar ook de naam conditionele faalfrequentie. Dit is goed te begrijpen door je te realiseren dat de kans op overlijden vaak (maar niet altijd) toeneemt als een component ouder wordt. Analoog aan een mensenleven: iemand van 80 jaar heeft meer kans om het volgende jaar te overlijden dan iemand van 20 jaar.

1.5 Storingsfrequentie

We gebruiken bij voorkeur het woord faaltempo en niet storingsfrequentie omdat storingsfrequentie gereserveerd is voor het aantal storingen per tijdseenheid en vaak, maar niet altijd, als een gemiddelde maat over de gehele levensduur van een component of voor een hele populatie wordt beschouwd. De storingsfrequentie duiden we aan met λ en wordt gegeven door:

$$\lambda = \frac{\text{aantalstoringen}}{\text{tijdseenheid}} = \frac{1}{MTTF} \quad (1.5)$$

waarbij MTTF staat voor Mean Time To Failure oftewel de gemiddelde tijd tot het overlijden van een component. We kunnen ook zeggen: de gemiddelde tijd tot de eerste storing.

Om λ te bepalen moeten we even scherp zijn. Een veel gemaakte fout is om in dit voorbeeld 200 storingen te delen door de 10 meetjaren wat uitkomt op 20 storingen per jaar. Dit is echter niet de storingsfrequentie omdat de tijdseenheid van alle 200 storingen geen 10 jaar is. De eerste 20 componenten overlijden al in het 1e levensjaar en de laatste 20 in het 10e levensjaar. In ons voorbeeld is de totale tijd tot alle storingen bij elkaar opgeteld geen 10 jaar maar 1000 jaar. λ is dan $200 / 1000 = 0,2$ storingen per jaar.

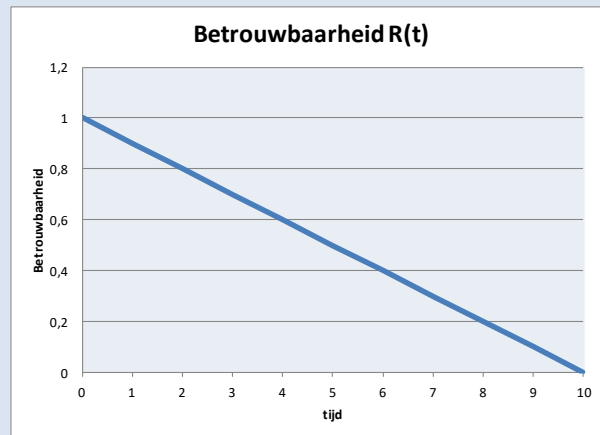
1.6 Mean Time To Failure (MTTF)

De Mean Time To Failure is de gemiddelde tijd tot de eerste en enige storing van een component. λ kunnen we ook vinden door eerst de MTTF te berekenen. De MTTF bepalen we door de oppervlakte onder de grafiek van $R(t)$ te nemen of door de som te nemen van de levensduren maal de faalkansen die horen bij die levensduren. In formulevorm drukken we dit uit met een integraal.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} t f(t)dt \quad (1.6)$$

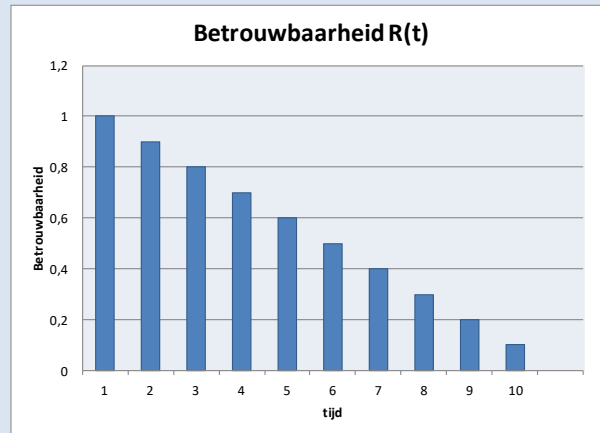
In figuur 1.1 hebben we de waarden $R(t)$ uit tabel 1.1 uitgezet in een grafiek. We zoeken nu de oppervlakte onder de blauwe lijn. Het is niet moeilijk om exact de oppervlakte van deze driehoek te bepalen. Deze bedraagt $0,5 \times 10 \times 1 = 5$. De MTTF of de gemiddelde levensduur bedraagt dan 5 jaar. Sommige componenten overlijden al in het 1e levensjaar, anderen pas in het 10e levensjaar, maar gemiddeld genomen worden de componenten 5 jaar oud. De storingsfrequentie $\lambda = 1 / MTTF = 1/5 = 0,2$ storingen per jaar.

FIGUUR 1.1 BETROUWBAARHEID $R(t)$ UIT HET VOORBEELD IN TABEL 1.1



Bij benadering kunnen we voor het bepalen van de MTTF ook de $R(t)$ waarden uit tabel 1 optellen of $\int_0^{10} f(t)dt$ uitrekenen wat we numeriek kunnen benaderen met: $1 \times f(1) + 2 \times f(2) + \dots + 10 \times f(10) = 5,5$. We nemen dan aan dat $R(t)$ geen continue functie is maar een discrete functie. Dit is grafisch weergegeven in figuur 1.2. Ook nu kunnen we de oppervlakte van de staafjes bepalen, wat neerkomt op het optellen van de $R(t)$ waarden uit tabel 1.1. Dit is minder exact dan precies de oppervlakte bepalen in figuur 1.1. Echter in veel situaties wel makkelijker en bij kleine tijdstapjes is de afwijking verwaarloosbaar.

FIGUUR 1.2 BETROUWBAARHEID $R(t)$ VAN HET VOORBEELD IN TABEL 1.1



1.7 Mean Time Between Failure (MTBF)

Naast de MTTF (Mean Time To Failure) bestaat er ook een MTBF (Mean Time Between Failure). Het verschil tussen beiden is dat de MTTF gebruikt wordt voor niet-repareerbare systemen en de MTBF voor repareerbare systemen. Niet-repareerbare componenten kennen maar één storing want daarna is de component overleden. Repareerbare systemen kenmerken zich door meerdere storingen en tussentijdse reparaties. Na een reparatie is de conditie niet noodzakelijkerwijs als nieuw. De gemiddelde tijd tussen reparaties in een bepaalde periode noemen we MTBF.

1.8 Conditionele betrouwbaarheid

Tot slot noemen we de conditionele betrouwbaarheid $R(T|t)$. Dit is de betrouwbaarheid van een component op een tijdstip T gegeven het feit dat deze component al een bepaalde tijd t heeft overleefd.

$$R(t + \Delta t|t) = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (1.7)$$

Stel bijvoorbeeld dat een component uit onze populatie op $t = 5$ nog leeft (de voorwaarde of conditie!). Wat is dan de kans dat deze component op $t = 6$ nog in leven is? Het antwoord is:

$$R(6|5) = \frac{R(6)}{R(5)} = \frac{0,4}{0,5} = 0,8 = 80\%$$

Merk op dat dit gelijk is aan 1 minus de hazard rate $z(t = 5)$. We kunnen de conditionele betrouwbaarheid ook over langer periodes bepalen. Stel bijvoorbeeld dat een component uit onze populatie op $t = 6$ nog leeft. Wat is dan de kans dat deze op $t = 9$ nog in leven is? Het antwoord is nu:

$$R(9|6) = \frac{R(9)}{R(6)} = \frac{0,1}{0,4} = 0,25 = 25\%$$

Met andere woorden: als de component op $t = 6$ nog in leven is, dan is de kans dat deze nog eens drie jaar overleeft gelijk aan 0,25 en de kans dat deze in deze drie jaar overlijdt gelijk aan 0,75.

2 Faalkansverdelingen

In het voorbeeld van Tabel 1.1 zijn we uitgegaan van een betrouwbaarheid $R(t)$ die in een constant tempo afneemt. In de praktijk verloopt dit meestal anders. Dit faalgedrag kunnen we meten, in een grafiek uitzetten en vervolgens beschrijven met een functie. Een aantal veel voorkomende functies is:

- de negatief exponentiële verdeling
- de normaalverdeling
- de gamma-verdeling
- de Weibull-verdeling

Deze functies helpen ons om het faalgedrag van componenten te beschrijven.

2.1 De exponentiële verdeling

Een veel voorkomende faalkansverdeling is de exponentiële verdeling. Een exponentiële verdeling heeft een constant faaltempo $z(t)$. Technische systemen die zijn opgebouwd uit veel componenten gaan zich vaak gedragen volgens een exponentiële verdeling. Andere voorbeelden zijn componenten waarbij geen sprake is van verbetering of verslechtering van de conditie en het faalgedrag. Dit zien we bij veel componenten in de midden-jaren van hun levensduur. De kans op een lekke band kan ook een voorbeeld zijn van een exponentiële faalkansverdeling, of meldingen die in een bepaalde tijd binnenkomen bij een callcenter.

De betrouwbaarheid van een exponentiële verdeling is als volgt gedefinieerd:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

De term λ is de storingsfrequentie en deze vinden we door $1/\text{de gemiddelde tijd tot storing (MTTF)}$ te nemen dus $\lambda = 1/\text{MTTF}$. Voor MTTF mag je ook MTBF invullen als het de tijd tussen storingen betreft (zie paragraaf 1.7).

De cumulatieve faalkans $F(t)$, de faalkansverdeling $f(t)$ en het faaltempo $z(t)$ kunnen we afleiden zoals in hoofdstuk 1 is uitgelegd. Dit kunnen we numeriek oplossen in Excel met de vergelijkingen (1.2), (1.3) en (1.4) mits we de tijdstippen voldoende klein nemen, bijvoorbeeld van 1 tot 100.

Wiskundig zijn de vergelijking voor een exponentiele verdeling al door anderen voor ons afgeleid.

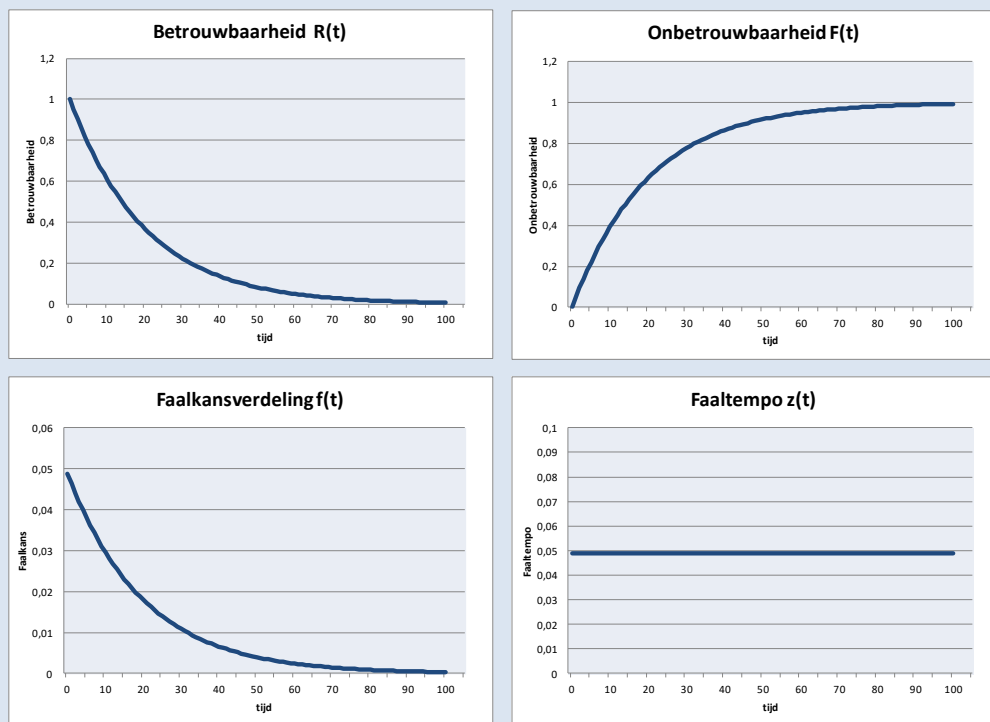
$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \lambda R(t) \quad (2.3)$$

$$z(t) = \lambda \quad (2.4)$$

Deze eigenschappen zijn grafisch weergegeven in figuur 2.1. Voor λ is 0,05 per jaar aangenomen. De MTTF is dan 20 jaar.

FIGUUR 2.1 EIGENSCHAPPEN VAN DE EXPONENTIËLE VERDELING MET $\lambda = 0,05$



Merkt op dat het faalt tempo $z(t)$ een constante is en gelijk aan λ . Dit is een speciale eigenschap van de exponentiële verdeling en een beetje contra-intuïtief. Het betekent dat het faalgedrag geen geheugen heeft. Er is geen sprake van veroudering en leeftijd speelt geen rol voor de conditionele faalkans. Als een component op een willekeurig tijdstip nog leeft, dan is deze op dat moment 'zo goed als nieuw'. De kans dat een component van 10 jaar oud het komend jaar faalt is net zo groot als de kans dat een component van 1 jaar oud het komend

jaar faalt. Daarom heeft preventief vervangen bij componenten die een exponentiële faalkansverdeling hebben, weinig zin. Het faalt tempo in een groep is constant maar het falen van individuele componenten is niet voorspelbaar op basis van leeftijd als een component nog leeft. We weten dat een aantal componenten uit de groep in een bepaald jaar zal falen maar weten niet welke.

Voorbeeld 2.1: Preventief vervangen heeft geen zin bij een negatief exponentiële verdeling

We hebben een component met een negatief exponentieel faalpatroon. De MTTF = 10 jaar en $\lambda = 0,1$. De betrouwbaarheid op $t = 5$ jaar bedraagt:

$$R(t = 5) = e^{-0,1 \cdot 5} = 0,6065$$

Stel dat we de betrouwbaarheid willen verhogen door deze component iedere 3 jaar te vervangen. De betrouwbaarheid op $t = 3$ is hoger dan op $t = 5$ want:

$$R(t = 3) = e^{-0,1 \cdot 3} = 0,7408$$

Dit lijkt een logische stap en daar zit het contra-intuïtieve in. Stel dat we de component op $t = 3$ vervangen door een nieuwe. Wat is dan de betrouwbaarheid op $t = 5$? Deze vinden we door $R(t = 3) \cdot R(t = 2)$ te nemen.

$$R(t = 5) = R(t = 3) \cdot R(t = 2) = e^{-0,1 \cdot 3} \cdot e^{-0,1 \cdot 2} = 0,7408 \cdot 0,8187 = 0,6065$$

Met andere woorden, we hadden deze component net zo goed niet kunnen vervangen. Het preventief vervangen heeft de betrouwbaarheid op $t = 5$ niet verhoogd.

Een andere manier om hier tegenaan te kijken is met de voorwaardelijk kans. Wat is de kans dat een component op $t = 5$ nog leeft gegeven het feit dat deze op $t = 3$ nog leeft? Hiervoor grijpen we terug naar formule (1.7).

$$R(t = 5 | t = 3) = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} = \frac{R(t = 5)}{R(t = 3)} = \frac{0,6065}{0,7408} = 0,8187 = R(t = 2)$$

Dit is gelijk aan het neerzetten van een nieuwe component op $t = 3$ die dan twee jaar later dezelfde betrouwbaarheid heeft. Kortom, het preventief vervangen van componenten met een negatief exponentieel faalpatroon heeft geen zin.

Wat wel zin heeft in deze situatie is toestandsafhankelijk onderhoud mits het faalproces meetbaar is en voldoende lang om te kunnen ingrijpen. Als het proces van falen meetbaar is vanaf een punt waarop het falen begint tot een punt waarbij er verlies van functie optreedt, kan met periodieke inspectie en preventief ingrijpen falen worden voorkomen.

Voorbeeld 2.2: Transformator

Een transformator heeft een negatief exponentieel faalpatroon. Volgens opgave van de fabrikant bedraagt de MTTF 10 jaar.

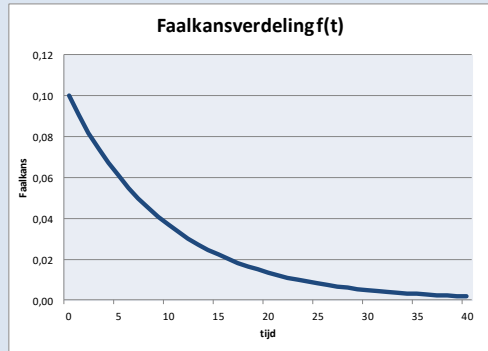
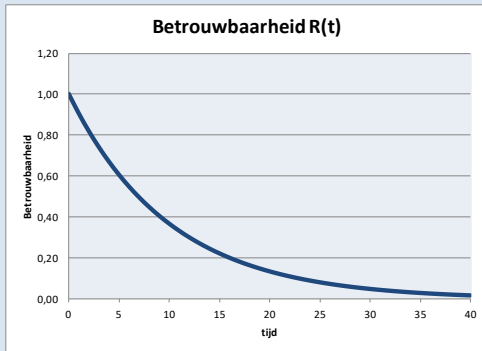
- Wat is de betrouwbaarheid van de transformator op $t = 5$ jaar?
- Wat is de faalkans op $t = 5$ jaar?
- We zijn 5 jaar verder. De transformator heeft nog niet gefaald. Wat is de verwachting dat de transformator het komende jaar faalt?

In Excel maken we eerst een overzicht van $R(t)$ en $f(t)$.

- $R(t)$ vinden we met de snel formule = $1 - \text{EXPON.VERD}(t, \lambda, \text{WAAR})$
- $f(t)$ vinden we met de snel formule = $\text{EXPON.VERD}(t, \lambda, \text{ONWAAR})$

λ vinden we door $1/\text{MTTF}$ te nemen. Je kunt natuurlijk ook formules (2.1) en (2.3) gebruiken.

Exponentiële verdeling					
MTTF = 10 jaar					
t	R(t)	f(t)	t	R(t)	f(t)
0	1,00	0,10	20	0,14	0,01
1	0,90	0,09	21	0,12	0,01
2	0,82	0,08	22	0,11	0,01
3	0,74	0,07	23	0,10	0,01
4	0,67	0,07	24	0,09	0,01
5	0,61	0,06	25	0,08	0,01
6	0,55	0,05	26	0,07	0,01
7	0,50	0,05	27	0,07	0,01
8	0,45	0,04	28	0,06	0,01
9	0,41	0,04	29	0,06	0,01
10	0,37	0,04	30	0,05	0,00
11	0,33	0,03	31	0,05	0,00
12	0,30	0,03	32	0,04	0,00
13	0,27	0,03	33	0,04	0,00
14	0,25	0,02	34	0,03	0,00
15	0,22	0,02	35	0,03	0,00
16	0,20	0,02	36	0,03	0,00
17	0,18	0,02	37	0,02	0,00
18	0,17	0,02	38	0,02	0,00
19	0,15	0,01	39	0,02	0,00



Antwoord a)

We lezen af in de tabel: de betrouwbaarheid $R(t)$ op $t = 5$ is 0,61 of 61%.

Alternatief: $R(t = 5) = e^{-0,1 \cdot 5} = 0,606 = 61\%$

Antwoord b)

We lezen af in de tabel: de faalkans $f(t)$ op $t = 5$ is 0,06 per jaar

Alternatief: $f(t = 5) = \lambda e^{-\lambda t} = 0,1 \cdot e^{-0,1 \cdot 5} = 0,0607$

Antwoord c)

De negatief exponentiële verdeling heeft geen geheugen. Dit betekent dat wanneer de transformator tot $t = 5$ niet gefaald heeft, deze op $t = 5$ zo goed als nieuw is. Het faaltempo $z(t)$ is gelijk aan de gemiddelde storingsfrequentie λ , dus $z(t = 5) = \lambda = 0,1$. Dit kunnen we ook herleiden uit: $z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda$ voor iedere t . De verwachte faaltijd in jaar 5 is dus nog steeds de MTTF van 10 jaar ($MTTF = 1/\lambda = 1/0,1 = 10$ jaar).

2.2 De normaalverdeling

De normaalverdeling is een faalpatroon dat van nature veel voorkomt. De slijtage van componenten of de levensduur van gloeilampen worden vaak met een normaalverdeling beschreven.

De wiskundige vergelijkingen zijn lastig maar ook hier kun je goed uit de voeten met de aanpak beschreven in hoofdstuk 1 en met gebruik van Excel.

Mathematisch:

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.5)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.6)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

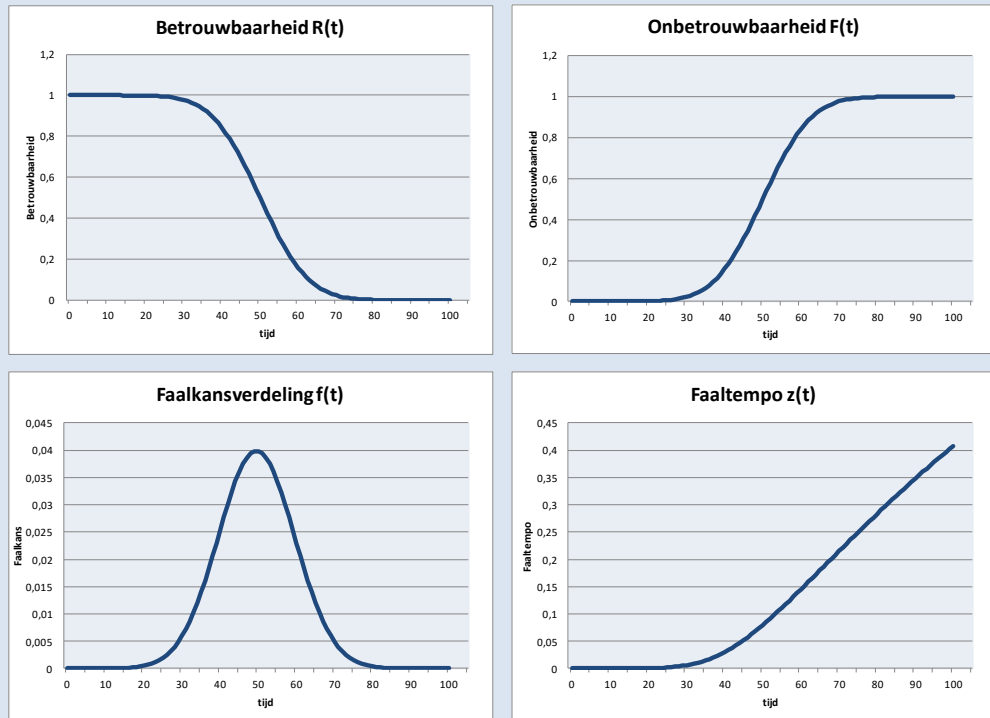
$$z(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt} \quad (2.8)$$

De parameter μ is het gemiddelde of de MTTF en de parameter σ is een maat voor de spreiding rond het gemiddelde. σ noemen we de standaardafwijking. Met σ kunnen we de vorm (de hoogte en breedte) van de faalkansverdeling $f(t)$ modelleren. Ongeveer 68% van alle faalgebeurtenissen valt binnen een tijd van $-\sigma$ en $+\sigma$ rond de MTTF. Als bijvoorbeeld de MTTF van een populatie lampjes 5 jaar is, en $\sigma = 2$ dan betekent dit dat tussen 3 en 7 jaar 68% van de lampjes zal falen.

De faalkansverdeling $f(t)$ in formule (2.7) kunnen we vrij eenvoudig wiskundig in Excel uitschrijven in de tijd. Als we $f(t)$ hebben kunnen we numeriek $R(t)$, $F(t)$ en $z(t)$ bepalen met de aanpak uit hoofdstuk 1 mits we voldoende kleine tijdstappen nemen. Excel heeft ook snelformules voor $F(t)$ en $f(t)$. Deze vinden we onder NORM.VERD(t , μ , σ , cumulatief). Als we bij cumulatief 'WAAR' invullen krijgen we $F(t)$, de cumulatieve faalkansverdeling. Als we bij cumulatief 'ONWAAR' invullen krijgen we $f(t)$, de faalkansverdeling.

Grafisch zijn de eigenschappen van de normaalverdeling weergegeven in figuur 2.2.

FIGUUR 2.2 EIGENSCHAPPEN VAN DE NORMAALVERDELING MET $\mu = 50$ EN $\sigma = 10$



Een eigenschap van de normaalverdeling is dat de faalkansverdeling $f(t)$ symmetrisch is. Verder zien we dat het faaltijds stijgt in de tijd. Dit wil zeggen dat er sprake is van veroudering. Een component die een leeftijd van bijvoorbeeld 50 jaar bereikt heeft een hogere kans van overlijden dan eenzelfde component van 10 jaar oud.

Voorbeeld 2.3: Toepassing normaalverdeling

Het faalpatroon van lantarenpalen volgt een normaalverdeling met een gemiddelde leeftijd μ van 10 jaar en een spreiding σ van 2 jaar. Dit laatste betekent dat ongeveer 68% van de lampen faalt tussen $t = 8$ jaar en $t = 12$ jaar.

- Wat is de betrouwbaarheid van een lamp op $t=10$ jaar?
- Laat zien dat circa 68% van de faalgebeurtenissen optreedt tussen $t=8$ en $t = 12$ jaar.
- Wat is de kans dat een lantarenpaal faalt voor de leeftijd van 5 jaar?
- Wat is de kans dat een lantarenpaal 15 jaar of langer functioneert?
- Als een lantarenpaal op $t = 10$ nog functioneert, wat is dan de kans dat deze op $t = 15$ jaar nog steeds functioneert?

In Excel maken we een tabel en grafiek van de normaalverdeling met de gegeven parameters μ en σ .

- $F(t)$ vinden we met =NORM.VERD(t , μ , σ , WAAR)
- $f(t)$ benaderen we numeriek met $F(t+1) - F(t)$ volgens formule (1.3)
Als we meer exact willen werken nemen we =NORM.VERD(t , μ , σ , ONWAAR)
- $R(t) = 1 - F(t)$
- $z(t)$ benaderen we numeriek met $f(t)/R(t)$; zie formule (1.4)

Normaalverdeling

μ	10	jaar		
σ	2	Jaar		
	R(t)	F(t)	f(t)	z(t)
0	1,000	0,000	0,000	0,000
1	1,000	0,000	0,000	0,000
2	1,000	0,000	0,000	0,000
3	1,000	0,000	0,001	0,001
4	0,999	0,001	0,005	0,005
5	0,994	0,006	0,017	0,017
6	0,977	0,023	0,044	0,045
7	0,933	0,067	0,092	0,098
8	0,841	0,159	0,150	0,178
9	0,691	0,309	0,191	0,277
10	0,500	0,500	0,191	0,383
11	0,309	0,691	0,150	0,486
12	0,159	0,841	0,092	0,579
13	0,067	0,933	0,044	0,659
14	0,023	0,977	0,017	0,727
15	0,006	0,994	0,005	0,783
16	0,001	0,999	0,001	0,828
17	0,000	1,000	0,000	0,864
18	0,000	1,000	0,000	0,893
19	0,000	1,000	0,000	0,916
20	0,000	1,000	-	-

Antwoord a)

De betrouwbaarheid van de lamp op $t=10$ lezen we af in de tabel. $R(t=10) = 0,5$.

Antwoord b)

We tellen de faalkansen $f(t)$ van $t = 8$ tot $t = 12$ bij elkaar op:

$$0,150 + 0,191 + 0,191 + 0,150 = 0,68.$$

Antwoord c)

De kans dat een lantaarnpaal faalt voor $t=5$ is $F(t=5) = 0,006$.

We vinden deze waarde ook door $f(t)$ van $t=0$ tot $t=5$ te nemen:

$$0 + 0 + 0 + 0,001 + 0,005 = 0,006.$$

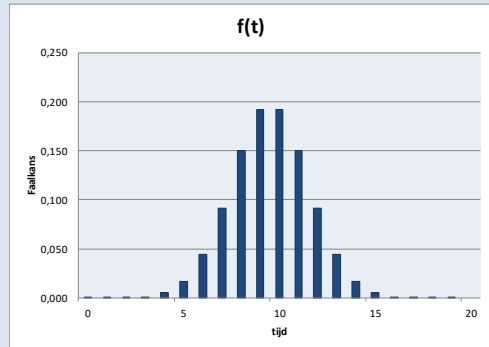
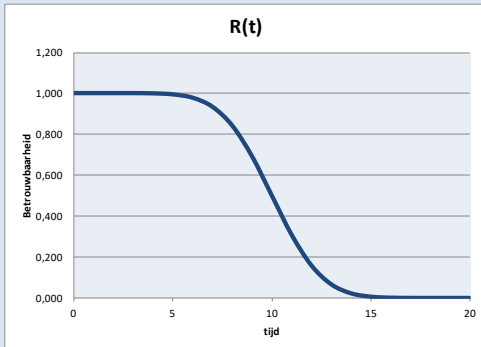
Antwoord d)

De kans dat een lantaarnpaal 15 jaar of langer functioneert is de som van de $f(t)$'s vanaf $t = 15$:

$$0,005 + 0,001 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0,006. \text{ Dit is gelijk aan } R(t=15) = 0,006.$$

Antwoord e)

De kans dat een lantaarnpaal op $t = 15$ nog functioneert als gegeven is dat deze op $t = 10$ nog niet heeft gefaald berekenen we volgens $R(t=15 | t=10) = R(t=15) / R(t=10) = 0,006 / 0,5 = 0,012$.



2.3 De gamma-verdeling

Voor de volledigheid beschrijven de gamma-verdeling. Deze verdeling heeft wiskundige eigenschappen die bij de vervangingstheorie van pas komen. Deze vervangingstheorie behandelen we niet in dit document.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.9)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = \int_0^t \frac{(\lambda t)^{k-1} \lambda e^{-\lambda t}}{\Gamma(k)} dt \quad (2.10)$$

λ is de locatieparameter, k is de vormparameter en $\Gamma(k)$ is een functie, de gamma-functie, die beschreven wordt door:

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty (\lambda t)^{k-1} \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.11)$$

Dit ziet er ingewikkelder uit dan het is. De integraal is goed numeriek op te lossen in Excel. Bovendien geldt dat wanneer k een geheel getal is en groter dan nul, dat $\Gamma(k) = (k - 1)!$. Het uitroepteken staat voor het wiskundige symbool faculteit. $5!$ is bijvoorbeeld $5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 120$.

De gemiddelde levensduur MTTF = k/λ . Als $k = 1$ dan wordt de MTTF gelijk aan $1/\lambda$ en de gamma-verdeling wordt een exponentiële verdeling.

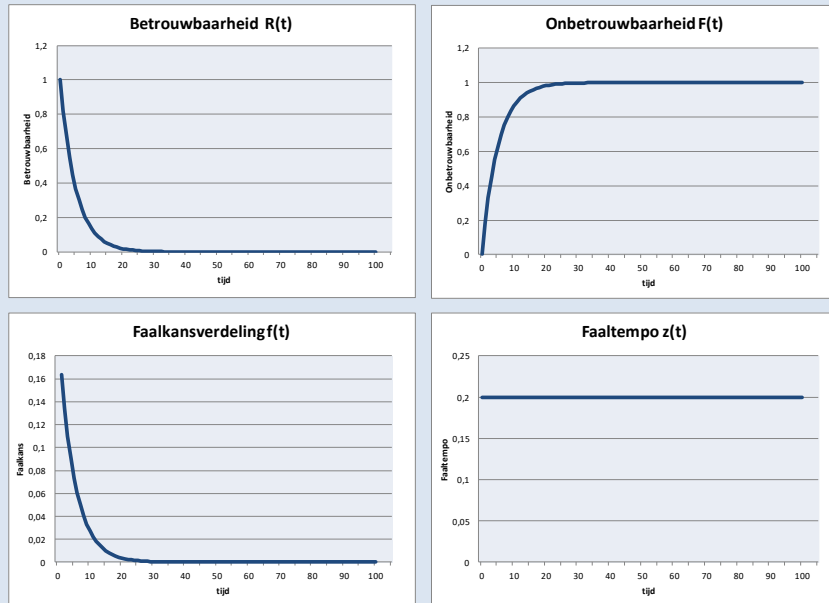
$$f(t) = \frac{(\lambda t)^{k-1} \lambda e^{-\lambda t}}{\Gamma(k)} \quad (2.12)$$

De hazard rate vinden we via:

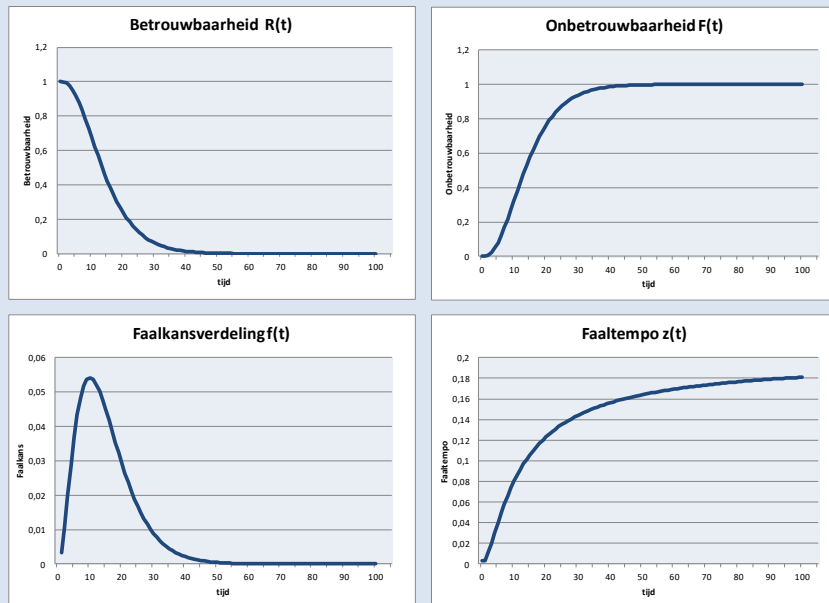
$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.4)$$

Excel heeft een snelfunctie voor de gamma-verdeling: GAMMA.VERD(x, alpha; bèta; cumulatief). Voor alfa vul je k in en voor bèta $1/\lambda$. Als je voor cumulatief 'waar' invult krijg je $F(t)$. Als je voor cumulatief 'onwaar' invult krijg je $f(t)$. Om geen vergissingen te maken adviseren we om ook de formule (2.12) in Excel toe te passen voor gehele getallen van k en uitkomsten te controleren. De eigenschappen van de gamma-verdeling zijn voor een aantal combinaties van k en λ weergegeven in figuren 2.3 t/m 2.6.

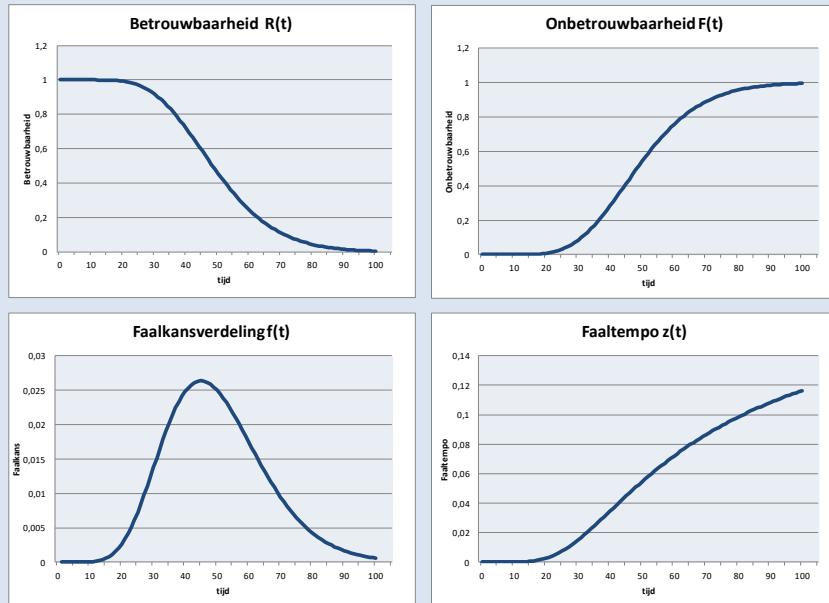
FIGUUR 2.3 EIGENSCHAPPEN VAN DE GAMMA-VERDELING MET $k = 1$ en $\lambda = 0,2$



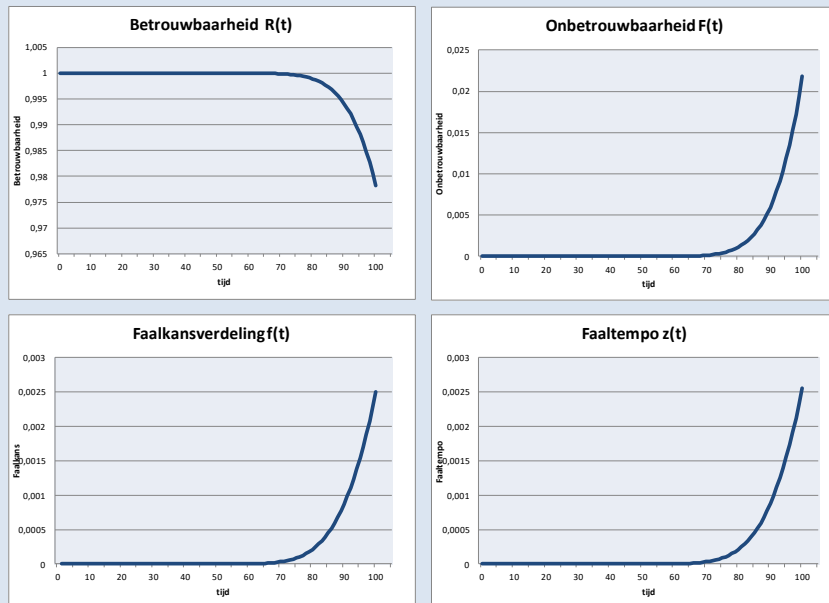
FIGUUR 2.4 EIGENSCHAPPEN VAN DE GAMMA-VERDELING MET $k = 3$ en $\lambda = 0,2$



FIGUUR 2.5 EIGENSCHAPPEN VAN DE GAMMA-VERDELING MET $k = 10$ en $\lambda = 0,2$



FIGUUR 2.6 EIGENSCHAPPEN VAN DE GAMMA-VERDELING MET $k = 30$ en $\lambda = 0,2$



2.4 De 2-parameter Weibull-verdeling

De 2-parameter Weibull-verdeling wordt ook vaak gebruikt om faalgedrag van componenten te beschrijven. De reden is dat de Weibull-verdeling erg flexibel is en handige wiskundige eigenschappen kent die in de vervangingstheorie van pas komen.

$$R(t) = e^{-bt^a} \quad (2.13)$$

b wordt de locatieparameter genoemd en a de vormparameter.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-bt^a} \quad (2.14)$$

$$f(t) = b \cdot a \cdot t^{a-1} \cdot e^{-bt^a} \quad (2.15)$$

De hazard rate vinden we via:

$$z(t) = b \cdot a \cdot t^{a-1} \quad (2.16)$$

De snelformule in Excel voor de Weibull-verdeling is: WEIBULL(x, α, β, cumulatief)
Voor α vullen we a in en voor β vullen we 1/b in. Als we voor cumulatief 'waar' invullen krijgen we F(t) en als we voor cumulatief 'onwaar' invullen krijgen we f(t). Ook hier geldt dat je je snel kunt vergissen in de parameters. Daarom adviseren we om in Excel enkele controles uit te voeren op basis van één van de formules (2.13) t/m (2.16). Merk op dat wanneer de vormparameter a gelijk is aan 1 dat de Weibull-verdeling dan gelijk is aan een exponentiële verdeling.

De gemiddelde levensduur van een Weibull-verdeling wordt gegeven door:

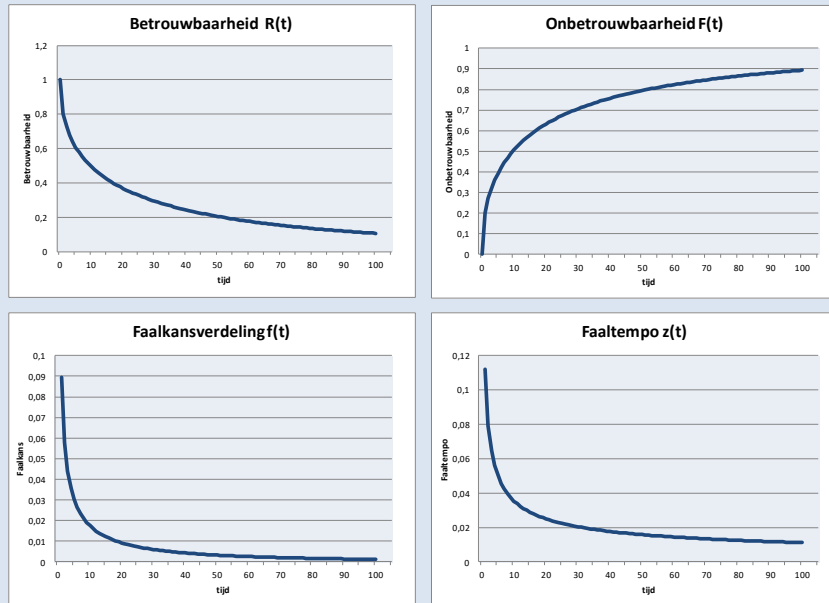
$$MTTF = \left(\frac{1}{b}\right)^{a-1} \Gamma\left(\frac{1}{a} + 1\right) \quad (2.17)$$

Het symbool Γ staat voor de gamma-functie (vergelijking 2.11). Voor a = 1 is de MTTF handmatig te bepalen. Met verwijzing naar figuur 2.8, met a = 1 en b = 0,05, geldt $\Gamma(2) = (2 - 1)!$ en dus:

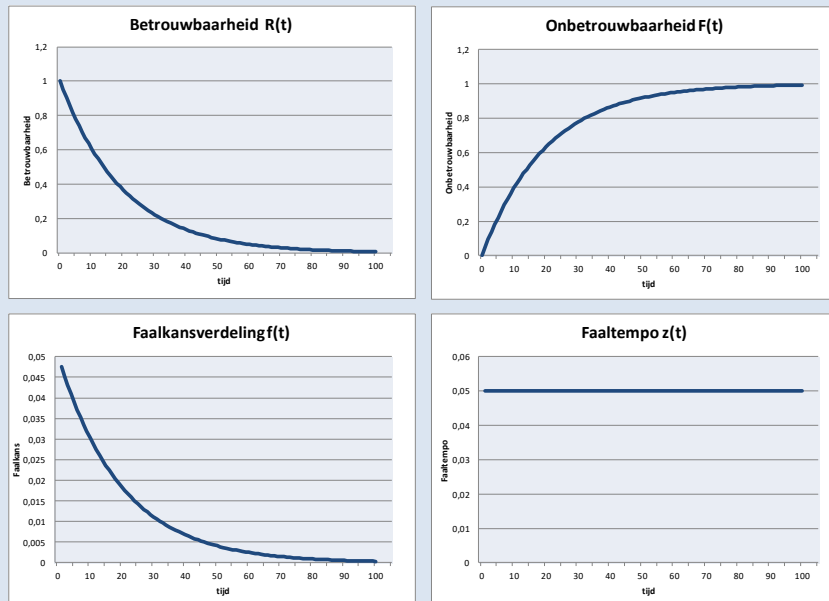
$$MTTF = \left(\frac{1}{0,05}\right)^{1-1} \Gamma\left(\frac{1}{1} + 1\right) = \left(\frac{1}{0,05}\right) \Gamma(2) = \left(\frac{1}{0,05}\right) \cdot (2 - 1)! = \frac{1}{0,05} = 20 \text{jaar}$$

z(t) is dan 1/20 = 0,05. Dit zien we in de grafiek z(t) van figuur 2.8.

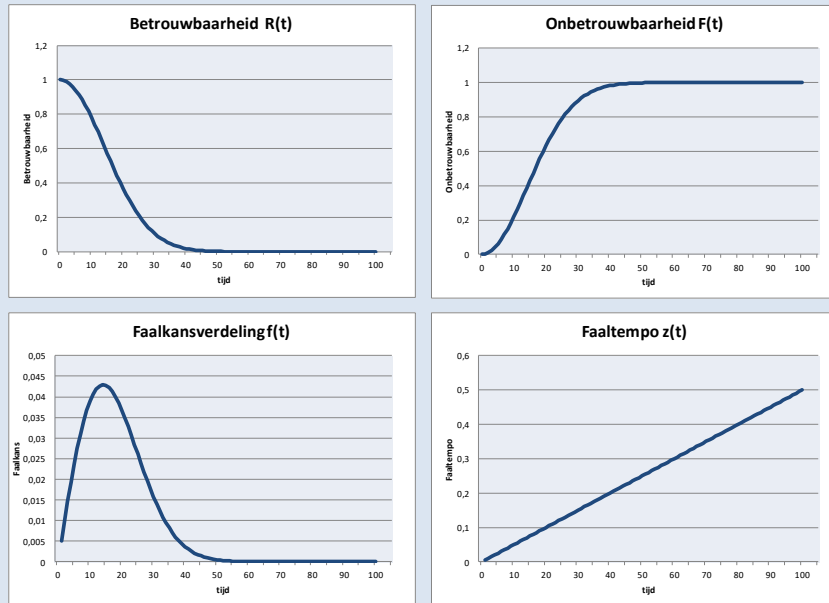
FIGUUR 2.7 EIGENSCHAPPEN VAN DE WEIBULL-VERDELING MET $a = 0,5$ en $b = 0,05$



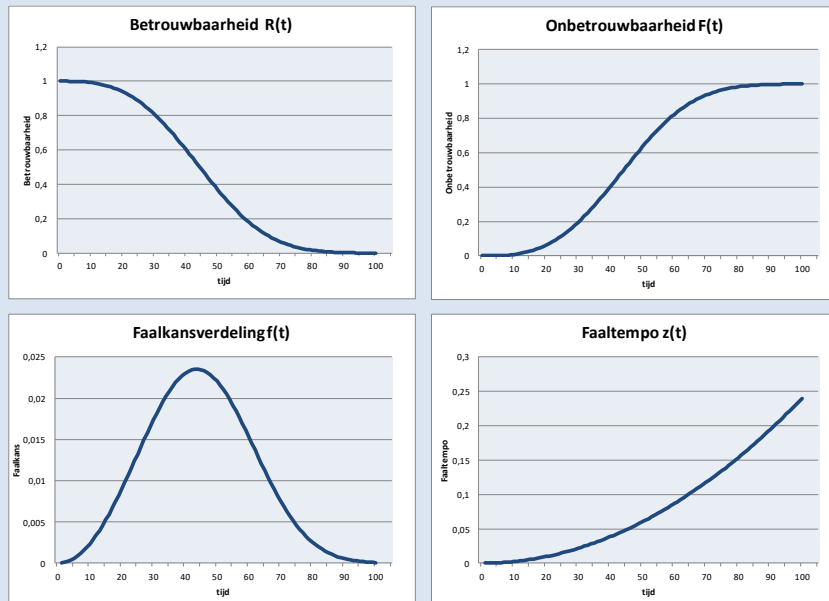
FIGUUR 2.8 EIGENSCHAPPEN VAN DE WEIBULL-VERDELING MET $a = 1$ en $b = 0,05$



FIGUUR 2.9 EIGENSCHAPPEN VAN DE WEIBULL-VERDELING MET $a = 2$ en $b = 0,05$



FIGUUR 2.10 EIGENSCHAPPEN VAN DE WEIBULL-VERDELING MET $a = 3$ en $b = 0,02$



3 Beschikbaarheid van objecten

In deze handleiding gaan we uit van technische bedrijfsmiddelen (assets en assetsystemen) die repareerbaar of vervangbaar zijn. Een assetmanager of onderhoudsmanager zal in de praktijk vaak meer geïnteresseerd zijn in de beschikbaarheid dan in de betrouwbaarheid van een bedrijfsmiddel. Een object of systeem doet het niet, maar we willen ook graag weten hoe lang het object of systeem het niet heeft gedaan en hoe snel het gerepareerd of vervangen is. Beschikbaarheid legt een relatie tussen (on)betrouwbaarheid en downtime van een bedrijfsmiddel. Op beide factoren wil je sturen.

We beperken ons tot de steady state beschikbaarheid en gaan uit van een constante storingsfrequentie of faaltijd. We bieden hier handvatten voor het rekenwerk die een onderhoudsmanager, assetmanager of reliability engineer met behulp van een rekenmachine of Excel kan uitvoeren. Voor specialistische berekeningen waarbij kansdichtheidsfuncties een rol spelen is software beschikbaar.

De beschikbaarheid van repareerbare objecten wordt in dit rapport (voor de eenvoud) vaak uitgedrukt in de inherente beschikbaarheid. Inherent wil zeggen dat we alleen kijken naar de niet-beschikbaarheid als gevolg van technisch falen. Voor de totale beschikbaarheid of niet-beschikbaarheid van een object of systeem moet ook stilstand als gevolg van het preventieve onderhoud, procesfalen en andere verliezen meegenomen worden. In Paragraaf 3.1 leggen we ook kort uit welke andere downtime een rol speelt.

3.1 Beschikbaarheid (A) en niet-beschikbaarheid (NA) van een object

Beschikbaarheid is het aandeel van de tijd waarin een object zijn werk doet. Als een distributiepomp 95% beschikbaar is, betekent dit dat deze pomp gemiddeld genomen in een jaar $0,95 \times 365 = 346,75$ dagen zijn functie kan vervullen en 18,25 dagen uit bedrijf is. Dit is weergegeven in Formules (3.1) en (3.2). Wat je moet weten om de beschikbaarheid uit te rekenen is hoe vaak een object in een bepaalde periode uitvalt (of uit bedrijf is voor onderhoud) en hoe lang het duurt voordat deze weer in bedrijf genomen is.

$$A = \text{uptime} / (\text{total time}) \quad (3.1)$$

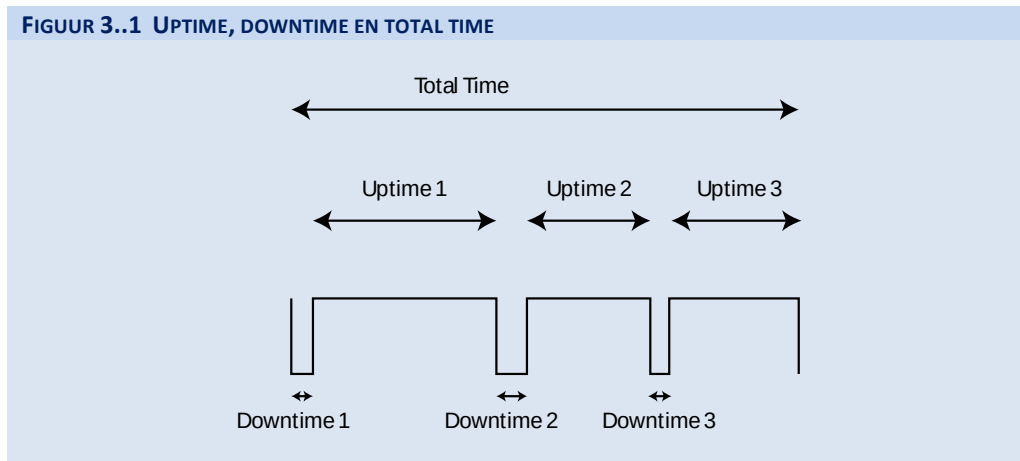
$$NA = \text{downtime} / (\text{total time}) \quad (3.2)$$

$$\text{total time} = \text{uptime} + \text{downtime} \quad (3.3)$$

Symbol	Eenheid	Beschrijving
A	aandeel/tijdseenheid	beschikbaarheid: het aandeel van de tijd dat een component zijn werk doet (operationeel is)
NA	aandeel/tijdseenheid	niet-beschikbaarheid: het aandeel van de tijd dat een component buiten bedrijf is als gevolg van falen of onderhoud
uptime	tijdseenheid	de tijd dat een component aan het werk is of operationeel is
downtime	tijdseenheid	de tijd dat een component buiten bedrijf is
total time	tijdseenheid	de uptime + de downtime

Uptime is gedefinieerd als operationele tijd en stand-by tijd. Dus de tijd waarin een bedrijfsmiddel zijn werk doet of zou kunnen doen. Een bedrijfsmiddel dat slecht 6 maanden per jaar beschikbaar hoeft te zijn, al dan niet stand-by, heeft een uptime van 6 maanden. Een noodstroomaggregaat dat in een jaar continu beschikbaar moet zijn heeft, als er geen storingen zijn, een uptime van 1 jaar, ook als er geen gebruik van wordt gemaakt.

FIGUUR 3..1 UPTIME, DOWNTIME EN TOTAL TIME



Bij downtime wordt een onderscheid gemaakt in:

- downtime als gevolg van correctieve acties: Mean Time To Repair (MTTR).
- downtime als gevolg van preventieve acties: Mean Preventive Maintenance Time (MPMT).

Samen worden deze Mean Maintenance Downtime (MMDT) genoemd.

Bij het bepalen van de beschikbaarheid is het belangrijk om duidelijk te zijn over wat je onder downtime verstaat. Wanneer de beschikbaarheid alleen technische storingen betreft spreken we over de **inherente beschikbaarheid**. Downtime is dan de tijd van het in storing treden tot in bedrijfname. Dit wordt Mean Time To Repair (MTTR) genoemd.

Als we spreken over de **operationele beschikbaarheid** refereren we aan de totale downtime, veroorzaakt door correctieve en preventieve acties. Downtime wordt dan Mean Maintenance Down Time (MDT) genoemd en omvat dus alle onderhoudsgerelateerde downtime. Naast correctieve en preventieve onderhoudsuren omvat MDT ook:

- diagnosetijd: Mean Time To Diagnose (MTD)
- wachten op reserveonderdelen: Logistics Delay Time (LDT)
- administratieve vertragingen: Administrative Delay Time (ADT)

Tot slot moet je er rekening mee houden dat ook procesfalen of werkzaamheden van derden de beschikbaarheid van objecten en systemen beïnvloeden.

In de volgende paragrafen gaan we dieper in op het berekenen van de beschikbaarheid. We beginnen met de berekening van de inherente beschikbaarheid. In Paragraaf 3.4 leggen we uit hoe je downtime als gevolg van preventief onderhoud meeneemt.

3.2 Mean Time Between Failure (MTBF) en storingsfrequentie (λ)

De Mean Time Between Failure (MTBF) is de gemiddelde tijd tussen falen. Nu wordt het even iets lastiger omdat de vakliteratuur net iets andere definities hanteert dan wij in de praktijk vaak doen.

$$MTBF = \text{mean uptime} = \frac{\text{operationele tijd}}{\text{aantal storingen}} \quad (3.4)$$

(en niet zoals wij gewend zijn: totale tijd/aantal storingen; de afwijking die hierdoor ontstaat is echter heel klein, als de Mean Time To Repair klein is)

De operationele tijd is de **total uptime** (uptime 1 + uptime 2 + uptime 3). In Figuur 3..1 is de MTBF gelijk aan $1/3 \times (\text{uptime 1} + \text{uptime 2} + \text{uptime 3})$, dus het gemiddelde van de operationele tijd tussen falen.

De storingsfrequentie λ (failure rate) is gelijk aan het aantal storingen in de operationele tijd van het object.

$$\lambda = \frac{\text{aantal storingen}}{\text{operationele tijd}} = \frac{\text{aantal storingen}}{\text{uptime}} \quad (3.5)$$

In Figuur 3..1 is de storingsfrequentie gelijk aan $3/(\text{uptime 1} + \text{uptime 2} + \text{uptime 3})$. Combineren van Formule (3.4) en Formule (3.5) geeft de relatie tussen de storingsfrequentie λ en de MTBF. Zij zijn elkaars inverse.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.6)$$

Met bovenstaande definities in het achterhoofd kan de inherente beschikbaarheid (inherent availability) ook als volgt worden beschreven (met MDT = Mean Down Time).

$$A = \frac{uptime}{total\ time} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (3.7)$$

En de inherente niet-beschikbaarheid (inherent non-availability) wordt:

$$NA = \frac{MDT}{MTBF + MDT} = 1 - A \quad (3.8)$$

3.3 Downtime als gevolg van merkbaar falen of verborgen falen

Downtime als gevolg van falen is de gemiddelde tijd dat een installatie door falen buiten gebruik is. Dus de gemiddelde tijd van het moment van falen tot het moment van in bedrijfname. We moeten hier een onderscheid maken in merkbaar falen en verborgen falen.

Merkbaar falen

Wanneer het falen direct wordt opgemerkt en direct met reparatie wordt begonnen is de gemiddelde downtime gelijk aan de gemiddelde reparatietijd: Mean Time To Repair (MTTR).

$$mean\ down\ time\ bij\ merkbaar\ falen = gemiddelde\ reparatietijd = MTTR \quad (3.9)$$

$$mean\ down\ time = MTTR = \frac{total\ down\ time}{aantal\ storingen} \quad (3.10)$$

Verborgen falen of niet-merkbaar falen

Dit is falen van een object waarbij het falen niet direct wordt opgemerkt. Bijvoorbeeld bij rookmelders, alarminstallaties, noodafsluiters, luchtkranen en noodstroomaggregaten. Dit soort objecten wordt periodiek getest om te kijken of er sprake is van verborgen falen. Op het moment dat falen door testen wordt opgemerkt kan het zijn dat het object direct na de voorgaande test is gefaald, of vlak voor de huidige test. Gemiddeld genomen gaat men er vanuit dat het object dan de helft van de tijd van het testinterval in storing heeft gestaan. Als een storing bij testen aan het licht komt, wordt het object direct gerepareerd of vervangen. De downtime per storing is dan gemiddeld genomen gelijk aan $1/2 \times \text{testinterval} + \text{de reparatietijd}$.

mean downtime bij verborgen falen =

$$\frac{1}{2} \cdot \text{testinterval} + \text{reparatietijd} = \frac{1}{2} \cdot T + MTTR \quad (3.11)$$

3.4 Downtime als gevolg van onderhoud

In de voorgaande paragrafen hebben we gekeken naar de niet-beschikbaarheid als gevolg van falen (de inherente niet-beschikbaarheid). Bedrijfsmiddelen zijn echter ook verminderd beschikbaar als gevolg van preventief onderhoud waaronder het testen zelf. Voor preventief onderhoud geldt een zelfde benadering. Preventief onderhoud heeft een gemiddelde onderhoudsfrequentie, een downtime en een gemiddelde tijd tussen de preventieve onderhoudstaken. Voor de eenvoud laten we dit verder achterwege, maar je begrijpt dat je ook voor preventief onderhoud de niet-beschikbaarheid kunt uitrekenen en dat de totale beschikbaarheid een optelsom is van de niet-beschikbaarheid als gevolg van correctieve en preventieve acties.

3.5 Drie rekenvoorbeelden voor de beschikbaarheid van een object

Voorbeeld 1: merkbaar falen

Een pomp is 10 jaar in bedrijf en faalt ongeveer 1 x per 2 jaar. Reparatie duurt gemiddeld genomen 24 uur per faalgebeurtenis. Wat is de beschikbaarheid van deze pomp?

- Totale tijd = 10 jaar = $10 \times 365 \times 24 = 87.600$ uur
- De pomp faalt $10/2 = 5$ keer in deze 10 jaar
- Totale downtime = $5 \times 24 = 120$ uur in 10 jaar
- Totale uptime = $87.600 - 120 = 87.480$ uur
- MTBF = totale uptime / aantal storingen = $87.480 / 5 = 17.496$ uur.
- λ = aantal storingen/totale uptime = $1/\text{MTBF} = 1/17.496 = 5,72 \cdot 10^{-5}$
- Mean downtime (is hier gelijk aan MTTR) = $120 / 5 = 24$ uur

$$A = \frac{\text{uptime}}{\text{total time}} = \frac{87.480}{87.600} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{mean downtime}} = \frac{17.496}{(17.496 + 24)} = 0,9986$$

De procentuele (inherente) beschikbaarheid van deze pomp is 99,86 %

Voorbeeld 2: verborgen falen

Een noodstroomaggregaat is 10 jaar in bedrijf. Iedere maand wordt het bedrijfsmiddel getest op functioneren. Dit testen duurt een uur. Tijdens het testen en binnen dit uur wordt wanneer nodig verzorgend onderhoud uitgevoerd. In 10 jaar tijd zijn bij het testen twee storingen opgemerkt. De reparatietijd van één storing bedraagt 24 uur. Wat is de beschikbaarheid van het noodstroomaggregaat?

Downtime wordt veroorzaakt door de testduur, gevonden storingen en reparaties. Testen duurt 1 uur x 12 maanden x 10 jaar = 120 uur per 10 jaar. Het testinterval bedraagt 1 maand. In 10 jaar zijn 2 storing gevonden. Gemiddeld genomen gaan we er dan vanuit dat het noodstroomaggregaat $2 \times 1/2$ maand = 1 maand ≈ 732 uur in storing is geweest gedurende deze 10 jaar. Reparatie van een storing duurt 24 uur dus 48 uur in 10 jaar.

Downtime = inspectietijd + storingstijd + reparatietijd = 120 + 732 + 48 = 900 uur per 10 jaar. Niet-beschikbaarheid is downtime/total time = $900 / (10 \times 365 \times 24) = 0,010 = 1\%$.

De beschikbaarheid is $1 - 0,0103 = 0,9897$ of 98,97%.

Voorbeeld 3: verborgen falen

30 identieke drukmelders worden 1 x per week getest. De testduur per drukmelder is verwaarloosbaar. In de afgelopen 5 jaar zijn er bij testen 8 defecte drukmelders gevonden. Er wordt dan direct met reparatie aangevangen. Reparatie van een drukmelder duurt gemiddeld 1 uur. Wat is de beschikbaarheid van de drukmelders? Bereken ook de verschillende parameters: MTBF, λ , mean downtime (MDT).

De totale service periode van de 30 drukmelders is $5 \times 30 = 150$ jaar en $150 \times 365 \times 24 = 1.314.000$ uur. Er zijn 8 defecte drukmelders gevonden bij een testinterval van 1 week (1 week = 168 uur). Reparatie duurt gemiddeld genomen 1 uur. Downtime van 1 kapotte drukmelder is $1/2 \times 168$ als gevolg van testen en 1 uur als gevolg van reparatie, samen is dit 85 uur per defecte drukmelder.

$$\begin{aligned} \text{Downtime per defecte drukmelder} &= \frac{1}{2} \cdot \text{testinterval} + \text{reparatietijd} \\ &= \frac{1}{2} \cdot 168 + 1 = 85 \text{ uur} \end{aligned}$$

De totale downtime van 8 drukmelders in deze 150 jaar is $8 \times (1/2 \times 168 + 1) = 680$ uur (is gelijk aan 8×85 uur).

Totale tijd = 150 jaar = 1.314.000 uur.

Totale downtime = 680 uur.

Totale uptime = $1.314.000 - 680 = 1.313.320$ uur.

MTBF = mean uptime = total uptime / aantal storingen = $1.313.320 / 8 = 164.165$ uur.

λ = aantal storingen/totale uptime = $1/\text{MTBF} = 1/164.165 = 6,09 \times 10^{-60}$.

Mean down time = $680 \text{ uur} / 8 = 85$ uur.

$$\begin{aligned} A = \frac{\text{uptime}}{\text{total time}} &= \frac{1.313.320}{1.314.000} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{mean downtime}} = \frac{164.165}{(164.165 + 85)} \\ &= \mathbf{0,9995} \end{aligned}$$

In procenten is de gemiddelde beschikbaarheid van een drukmelder 99,95%.

Wat kun je hiermee in de praktijk?

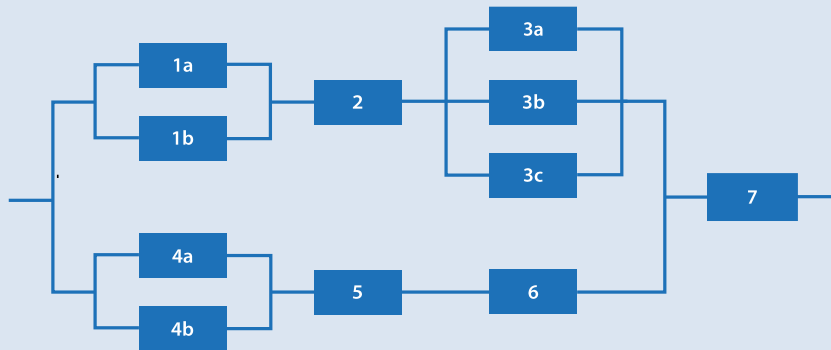
- De voorbeelden laten zien wat je moet meten en registreren om de feitelijke beschikbaarheid te kunnen bepalen, namelijk: aantal storingsen, storingsduur, reparatie- of hersteltijden, testduur en testintervallen.
- Beschikbaarheid heeft een relatie met de storingsfrequentie en de downtime. Dit zijn twee knoppen waar je aan kunt draaien. Je kunt de storingsfrequentie verlagen door oudere objecten te vervangen. Je kunt downtime verlagen door snellere hersteltijden of een goede balans te zoeken tussen testintervallen en testduur.
- Het tweede en derde voorbeeld leggen een verband tussen het inspectie-interval, testduur en de beschikbaarheid. Wanneer je een hogere of lagere beschikbaarheid wenst, kun je uitrekenen wat het inspectie-interval en testduur moeten zijn. Idem: als je meer of minder gaat inspecteren of testduren verkort, kun je uitrekenen wat dit betekent voor de beschikbaarheid.
- Het derde voorbeeld laat zien hoe je bij gebrek aan data over één component, data van soortgelijke componenten kunt gebruiken om toch tot zinnige MTBF's of λ 's te komen.

Als je de beschikbaarheid van de objecten kent, kun je de steady state beschikbaarheid van het systeem dat deze objecten samen vormen berekenen. Hiervoor bestaan een aantal gangbare methoden die we in de volgende hoofdstukken toelichten.

4 Reliability Block Diagram methode

In het voorgaande hoofdstuk hebben we laten zien hoe je de (inherente) beschikbaarheid en niet-beschikbaarheid van een object kunt bepalen. In hoofdstuk 4 t/m 7 gaan we naar het systeem kijken dat objecten samen vormen. We behandelen een aantal methoden om de systeembeschikbaarheid of systeembetrouwbaarheid te bepalen. We beginnen met de Reliability Block Diagram methode. Een systeem bestaat uit meerdere objecten. Een systeem ziet er bijvoorbeeld uit zoals in Figuur 4.1. Dit wordt een Reliability Block Diagram (RBD) genoemd.

FIGUUR 4.1 OPBOUW SYSTEEM DAT BESTAAT UIT VERSCHILLENDE OBJECTEN

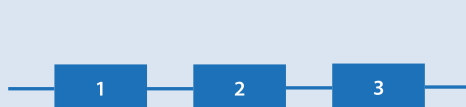


4.1 Beschikbaarheid van serieel en parallel geschakelde objecten

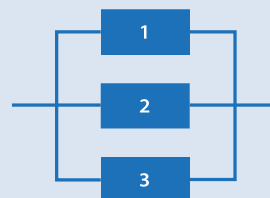
In de basis zijn er twee mogelijkheden voor de opbouw van systemen:

- serieel geschakelde objecten (Figuur 4.2a)
- parallel geschakelde objecten (Figuur 4.2b)

FIGUUR 4.2 SERIEEL EN PARALLEL GESCHAKELDE OBJECTEN



a) Serieel geschakelde objecten



b) Parallel geschakelde objecten

We gaan er in eerste instantie vanuit dat alle objecten in bedrijf zijn. Een systeem van serieel geschakelde objecten faalt als één van de objecten faalt. Een systeem van parallel geschakelde objecten faalt als alle objecten tegelijk falen. Dan zijn de formules voor de steady state availability [1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10]:

$$\text{serieel: } A_s = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \dots \quad (4.1)$$

$$\text{parallel: } A_s = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - A_3) \dots \quad (4.2)$$

Met A_s = systeembeschikbaarheid en A_1, A_2, A_3 = de beschikbaarheid van afzonderlijke componenten.

Voor de systeembetrouwbaarheid (reliability, R) van **niet-repareerbare systemen** gelden de zelfde relaties. Een niet-repareerbaar systeem is bijvoorbeeld een satelliet. Deze wordt zo redundant uitgevoerd dat tijdens de levensduur, componenten kunnen uitvallen zonder dat de satelliet uitvalt. Kenmerkend aan een niet-repareerbaar systeem is dat wanneer een component van dit systeem uitvalt, deze niet gerepareerd of vervangen wordt en in een gefaalde toestand blijft. In deze context kan de systeem-reliability vaak met de volgende seriële en parallelle vergelijkingen worden bepaald.

$$\text{serieel: } R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \dots \quad (4.3)$$

$$\text{parallel: } R_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots \quad (4.4)$$

Als een systeem wel repareerbaar is, rekenen we in eerste instantie met de Availability (Formules (4.1) en (4.2)) want Availability houdt rekening met reparatietijden. Toch kan het voorkomen dat we ook de gemiddelde faaltijd en downtime van een storing van een **repareerbaar systeem** willen weten. Availability zegt immers niets over hoe vaak en hoe lang iets faalt. De gemiddelde systeem-faaltijd en downtime van een repareerbaar systeem kunnen we afleiden uit de systeem-beschikbaarheid. Dit is een berekening die lastiger met de hand is uit te voeren en waar we meestal software voor gebruiken. In Hoofdstuk 7 is deze berekening opgenomen.

4.2 Doorrekenen van de systeembeschikbaarheid en -betrouwbaarheid

Voor de berekening van de systeembeschikbaarheid heb je de beschikbaarheid nodig van de afzonderlijke objecten. Deze volgt uit de gemiddelde downtime en het aantal storingen van ieder object in een bepaalde tijd (zie Hoofdstuk 3). In het volgende voorbeeld gaan we uit van

merkbaar falen van alle objecten. De MTBF, λ en hersteltijden halen we in het ideale geval uit het onderhoudbeheersysteem (OBS) of uit bibliotheken (leveranciers, NEN-normen, vakboeken). Vervolgens pas je Formules (4.1) en (4.2) toe voor de berekening van de systeembeschikbaarheid voor een repareerbaar systeem en Formules (4.3) en (4.4) voor de systeembetrouwbaarheid voor een niet-repareerbaar systeem.

De systeembeschikbaarheid van Figuur 4.1 is in Tabel 4.1 doorgerekend. Figuur 4.1 is een behoorlijk redundant systeem. Redundant betekent dat objecten zo zijn opgesteld (parallel) dat deze bij uitval elkaars functie kunnen overnemen.

Rekenen aan beschikbaarheid en betrouwbaarheid is rekenen ver achter de komma. Daar moet je niet van schrikken. Internationaal wordt over beschikbaarheid gesproken in termen van five nines of seven nines. In de literatuur liggen faalfrequenties van bedrijfsmiddelen in de orde van grootte van 10^{-3} tot 10^{-7} per uur. Dus 3 tot 7 cijfers achter de komma.

Als je een distributiepomp hebt die gemiddeld 2 dagen per jaar in storing is, dan is de beschikbaarheid $(1 - 2/365) = 0,9945 = 99,45\%$. Dat lijkt hoog, maar 2 dagen niet beschikbaar kan onacceptabel zijn. Daarom wordt zo'n pomp in een redundante opstelling geplaatst zodat de systeembeschikbaarheid nog hoger uitkomt.

Verder is het goed om te bedenken dat aanvullend stilstand voor onderhoud nodig is. Voor het voorbeeld in Tabel 4.1 zijn we uitgegaan van een overdreven redundant systeem, korte faaltijden (MTBF) en relatief lange reparatietijden van de objecten. Duidelijk is dat de beschikbaarheid toeneemt wanneer je componenten in een parallelle opstelling plaatst, en afneemt wanneer dit een seriële opstelling is.

TABEL 4.1 DOORREKENEN VAN DE BESCHIKBAARHEID VAN HET REPAREREBAAR SYSTEEM IN FIGUUR 4.1

Deze data komt uit het OBS of uit standaard tabellen				Deze data komt uit het OBS	A_object = MTBF/(MTBF+hersteltijd) A_serieel = A1xA2... A_parallel = 1 - (1-A1)(1-A2)...				
MTBF		MTBF	λ	Hersteltijd	Beschikbaarheid				
[jaar]	[uur]	[1/uur]	[uur]	objecten	subsystemen			systeem	
1a	0,08	701	1,43E-03	48	0,93589744	0,99774088	0,98692445	0,99939751	0,99395120
1b	0,10	876	1,14E-03	32	0,96475771				
2	0,50	4.380	2,28E-04	48	0,98915989	0,98915989			
3a	0,08	730	1,37E-03	48	0,93830334	0,99999918			
3b	1,00	8.760	1,14E-04	16	0,99817685				
3c	0,25	2.190	4,57E-04	16	0,99274705				
4a	0,40	3.504	2,85E-04	64	0,98206278	0,99975761			
4b	0,10	876	1,14E-03	12	0,98648649		0,95392216		
5	0,12	1.051	9,51E-04	48	0,95633188	0,95633188			
6	1,00	8.760	1,14E-04	20	0,99772210	0,99772210			
7	0,50	4.380	2,28E-04	24	0,99455041	0,99455041	0,99455041	0,99455041	

Toelichting bij Tabel 4.1

We lichten Tabel 4.1 toe met een handberekening en vier cijfers achter de komma. We adviseren echter om dit in Excel te doen zoals in Tabel 4.1 is gedaan. Excel heeft geen moeite met rekenen achter de komma.

De MTBF (gemiddelde tijd tussen falen) halen we uit het registratiesysteem. Object 1a heeft een MTBF van 0,08 jaar. Dat betekent dat er gemiddeld $0,08 \times 365 \times 24 = 700,8$ uur tussen de storings zit. De storingsfrequentie $= 1/\text{MTBF} = 1/700,8 = 1,43 \cdot 10^{-3} = 0,00143$ per uur. Uit het onderhoudbeheersysteem blijkt bovendien dat de reparatietijd van dit object 48 uur bedraagt.

De beschikbaarheid van de afzonderlijke objecten is bepaald volgens Formule (3.7).

$$A = \frac{\text{uptime}}{\text{total time}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{mean downtime}} \quad (3.7)$$

Voor component 1a vinden we:

$$A_{1a} = \frac{700,8}{700,8 + 48} = 0,9358$$

Voor component 1b vinden we:

$$A_{1b} = \frac{876}{876 + 32} = 0,9647$$

Daarna zijn component 1a en 1b samengenomen. Zij vormen een parallel subsysteem waarvan de beschikbaarheid bepaald wordt met Formule (4.2):

$$\begin{aligned} \text{parallel: } A_1 &= 1 - (1 - A_{1a})(1 - A_{1b}) = 1 - (1 - 0,9358)(1 - 0,9647) \\ &= 0,9977 \end{aligned}$$

Het zelfde hebben we gedaan voor 3a, 3b en 3c en 4a, 4b. Zij vormen ook parallelle subsystemen.

De beschikbaarheid subsysteem 3 is:

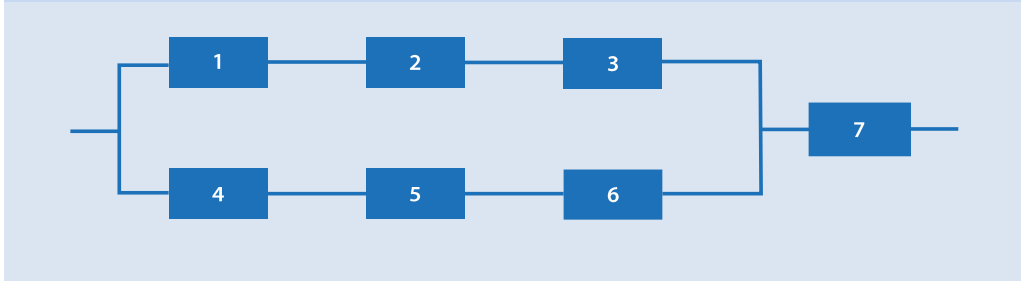
$$\begin{aligned} \text{parallel: } A_3 &= 1 - (1 - A_{3a})(1 - A_{3b})(1 - A_{3c}) = \\ &= 1 - (1 - 0,9383)(1 - 0,9982)(1 - 0,9927) = 0,9999... \end{aligned}$$

De beschikbaarheid van subsysteem 4 is:

$$\text{parallel: } A_4 = 1 - (1 - A_{4a})(1 - A_{4b}) = 1 - (1 - 0,9821)(1 - 0,9865) \\ = 0,9998$$

Het systeem is hiermee vereenvoudigd tot Figuur 4.3:

FIGUUR 4.3 EERSTE REDUCTIE VAN HET SYSTEEM



We nemen nu de serie 1, 2 en 3 samen en berekenen de beschikbaarheid van het seriële subsysteem met Formule (4.1). Dit doen we ook voor 4, 5, 6.

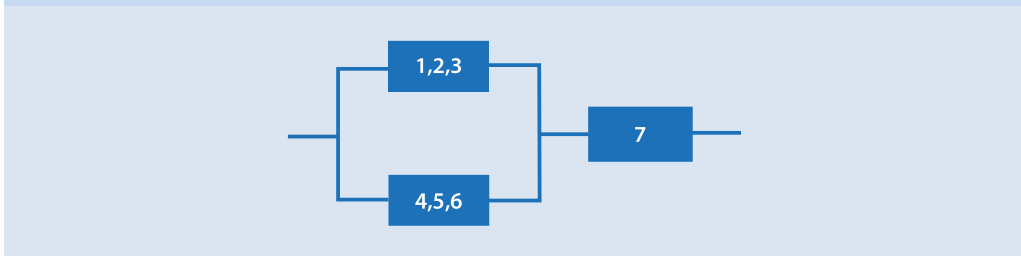
De beschikbaarheid van subsysteem 1,2,3 is:

$$\text{serieel: } A_{1,2,3} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = 0,9977 \cdot 0,9892 \cdot 0,9999 = 0,9869$$

De berekening van de beschikbaarheid van subsysteem 4,5,6 verloopt analoog.

Het systeem bestaat nu nog maar uit drie subsystemen: (1,2,3), (4,5,6) en 7.

FIGUUR 4.4 TWEEDE REDUCTIE VAN HET SYSTEEM



We nemen opnieuw (1,2,3) en (4,5,6) samen volgens de rekenregel voor een parallel systeem.

Hierna hebben we nog twee serieel geschakelde subsystemen over.

FIGUUR 4.5 DERDE REDUCTIE VAN HET SYSTEEM



De beschikbaarheid van het totale systeem komt hiermee op:

$$\text{serieel: } A_{\text{systeem}} = A_{1,2,3,4,5,6} \cdot A_7 = 0,9993 \cdot 0,9945 = 0,9939$$

Stel nu dat Figuur 1 een **niet-repareerbaar systeem** is. Dan kunnen we op soortgelijke wijze de systeembetrouwbaarheid doorrekenen met de rekenregels voor de systeembetrouwbaarheid (Formules (4.3) en (4.4)).

Voor het bepalen van de betrouwbaarheid op objectniveau nemen we een exponentiele verdeling aan en benaderen we Formule (2.1) uit Hoofdstuk 2 als $R(t) \approx 1 - \lambda t$. Dit mag voor kleine λ 's (reken dit zelf na). Voor bijvoorbeeld $t = 1$ is de betrouwbaarheid van object 1a dan $1 - \lambda = 1 - 1,43 \cdot 10^{-3} = 0,99857$ per uur. Zo rekenen we eerst de betrouwbaarheid van alle afzonderlijke objecten uit en daarna passen we de rekenregels voor betrouwbaarheid van parallelle en seriële systemen toe. Het resultaat is opgenomen in Tabel 4.2.

TABEL 4.2 DOORREKENEN VAN DE BETROUWBAARHEID VAN HET NIET-REPEREERBARE SYSTEEM FIGUUR 4.1

Deze data komt uit het OBS of uit standaard tabellen				$R_{\text{object}} = 1 - \lambda = (1 - 1/\text{MTBF})$ $R_{\text{serieel}} = R_1 \times R_2 \dots$ $R_{\text{parallel}} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots$				
	MTBF [jaar]	MTBF [uur]	λ [1/uur]	Betrouwbaarheid				
				objecten	subsystemen		systeem	
1a	0,08	701	1,43E-03	0,99857306	0,99999837	0,99977006	0,99999975	0,99977144
1b	0,10	876	1,14E-03	0,99885845				
2	0,50	4.380	2,28E-04	0,99977169				
3a	0,08	730	1,37E-03	0,99863014	1,00000000	0,99977006	0,99999975	0,99977144
3b	1,00	8.760	1,14E-04	0,99988584				
3c	0,25	2.190	4,57E-04	0,99954338				
4a	0,40	3.504	2,85E-04	0,99971461	0,99999967	0,99893433	0,99977169	0,99977169
4b	0,10	876	1,14E-03	0,99885845				
5	0,12	1.051	9,51E-04	0,99904871				
6	1,00	8.760	1,14E-04	0,99988584	0,99988584	0,99977169	0,99977169	0,99977169
7	0,50	4.380	2,28E-04	0,99977169	0,99977169			

Wat kun je hiermee in de praktijk?

Als je de beschikbaarheid van de afzonderlijke objecten weet, kun je de systeembeschikbaarheid bepalen van bijvoorbeeld een (afval)waterzuiveringslocatie, een gemalensysteem, een pompopstelling, een distributienetwerk of een wegennetwerk. Zo kun je beoordelen of bedrijfsmiddelen voldoende bijdragen aan de gestelde systeemeisen voor de beschikbaarheid.

Stel dat je uitkomt op een systeembeschikbaarheid die te laag is. Door te variëren met reparatietijden (en preventieve onderhoudstijden), faalfrequenties (en preventieve onderhoudsfrequenties) of extra parallelle schakelingen (modificaties) kun je op de systeembeschikbaarheid uitkomen die je wenst. Zo ook: stel dat je uitkomt op een systeembeschikbaarheid die wel heel erg hoog is. Dan kun je kijken wat het effect is van het uifasieren van bepaalde installaties op de systeembeschikbaarheid. Daar kun je ook weer besparingen aan hangen.

Je kunt twee kanten op rekenen: bottom-up of top down. Het voorbeeld is bottom-up maar je zou ook kunnen beginnen bij een gewenste systeembeschikbaarheid en vervolgens de benodigde beschikbaarheden toewijzen aan subsystemen en componenten. Dit is wel lastiger omdat je hierbij veel vrijheidsgraden hebt en keuzes moet maken.

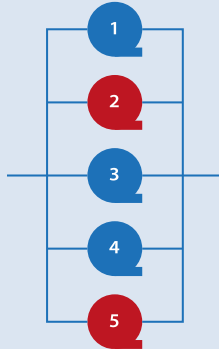
Tot slot merken we op dat er meerdere mogelijkheden zijn voor systeemopbouw dan serieel of parallel. Bijvoorbeeld een brugstructuur of een delta-ster equivalent. Vaak betreft het dan zeer complexe systemen die een extreem hoge betrouwbaarheid vereisen. Je zult deze in de dagelijkse praktijk niet zo vaak tegenkomen. Meer informatie over dit soort situaties en bijbehorende formules vind je in [5].

4.3 Active M out of N redundancy

Tot dusver hebben we gekeken naar seriële en parallelle systemen. Voor de parallelle systemen hebben we gezegd dat het systeem functioneert als tenminste één component het nog doet. Echter, een situatie die in de praktijk veel voorkomt is een aantal (=N) parallel geschakelde objecten, bijvoorbeeld pompen, waarvan niet één maar ten minste M pompen het moeten doen wil het systeem zijn functie nog kunnen vervullen. Dit wordt de M out of N redundancy genoemd. Als alle componenten dezelfde beschikbaarheid hebben kunnen we de volgende formule toepassen [7]:

$$A_s = \sum_{k=m}^n \frac{n!}{k! (n-k)!} (A_c)^k (1 - A_c)^{(n-k)} \quad (4.5)$$

FIGUUR 4.6 VIJF PARALLEL GESCHAKELDE POMPEN WAARVAN TENMINSTE DRIE HET MOETEN DOEN



Als we kijken naar Figuur 4.6 dan zien we dat tenminste drie pompen ($K=3$) moeten functioneren van 5 ($N = 5$) om het systeem beschikbaar te laten zijn. Maximaal twee pompen mogen falen zonder dat dit consequenties heeft voor het systeemfalen. Het systeem faalt als drie of meer pompen falen (niet-beschikbaar zijn). We gaan in dit voorbeeld uit van een beschikbaarheid van iedere pomp van 95%.

Formule (4.5) vullen we voor dit voorbeeld dan als volgt in:

$$A_s =$$

$$\frac{5!}{3!(5-3)!} (0,95)^3 (1 - 0,95)^{(5-3)} +$$

$$\frac{5!}{4!(5-4)!} (0,95)^4 (1 - 0,95)^{(5-4)} +$$

$$\frac{5!}{5!(5-5)!} (0,95)^5 (1 - 0,95)^{(5-5)} =$$

$$10 \cdot (0,95)^3 (0,05)^2 + 5 \cdot (0,95)^4 (0,05)^1 + (0,95)^5 = 0,9988 = 99,88\%$$

Het zelfde antwoord kunnen we vinden door alle mogelijke faalcombinaties uit te schrijven zoals in Figuur 4.7 is gedaan. We zijn er hierbij vanuit gegaan dat iedere pomp een beschikbaarheid heeft van 95% maar dit kun je naar wens aanpassen. In Hoofdstuk 8 gaan we dit zelfde vraagstukken oplossen met een gebeurtenissenboom-aanpak.

FIGUUR 4.7 DOORREKENEN VAN M OUT OF N REDUNDANCY

Invoer										
A ₁	=	0,95								
A ₂	=	0,95								
A ₃	=	0,95								
A ₄	=	0,95								
A ₅	=	0,95								
NA ₁	=	1-A ₁	=	0,05						
NA ₂	=	1-A ₂	=	0,05						
NA ₃	=	1-A ₃	=	0,05						
NA ₄	=	1-A ₄	=	0,05						
NA ₅	=	1-A ₅	=	0,05						

Systeem faalt als:											
Kans dat drie parallel geschakelde pompen het niet doen en twee wel											
NA ₁	NA ₂	NA ₃	A ₄	A ₅	0,05	0,05	0,05	0,95	0,95	0,00011281 = PROD	
NA ₁	NA ₂	A ₃	NA ₄	A ₅	0,05	0,05	0,95	0,05	0,95	0,00011281	
NA ₁	NA ₂	A ₃	A ₄	NA ₅	0,05	0,05	0,95	0,95	0,05	0,00011281	
NA ₁	A ₂	NA ₃	NA ₄	A ₅	0,05	0,95	0,05	0,05	0,95	0,00011281	
NA ₁	A ₂	NA ₃	A ₄	NA ₅	0,05	0,95	0,05	0,95	0,05	0,00011281	
NA ₁	A ₂	A ₃	NA ₄	NA ₅	0,05	0,95	0,95	0,05	0,05	0,00011281	
A ₁	NA ₂	NA ₃	NA ₄	A ₅	0,95	0,05	0,05	0,05	0,95	0,00011281	
A ₁	NA ₂	NA ₃	A ₄	NA ₅	0,95	0,05	0,05	0,95	0,05	0,00011281	
A ₁	NA ₂	A ₃	NA ₄	NA ₅	0,95	0,05	0,95	0,05	0,05	0,00011281	
A ₁	A ₂	NA ₃	NA ₄	NA ₅	0,95	0,95	0,05	0,05	0,05	0,00011281	
Kans dat vier parallel geschakelde pompen het niet doen en één wel											
NA ₁	NA ₂	NA ₃	NA ₄	A ₅	0,05	0,05	0,05	0,05	0,95	5,9375E-06	
NA ₁	NA ₂	NA ₃	A ₄	NA ₅	0,05	0,05	0,05	0,95	0,05	5,9375E-06	
NA ₁	NA ₂	A ₃	NA ₄	NA ₅	0,05	0,05	0,95	0,05	0,05	5,9375E-06	
NA ₁	A ₂	NA ₃	NA ₄	NA ₅	0,05	0,95	0,05	0,05	0,05	5,9375E-06	
A ₁	NA ₂	NA ₃	NA ₄	NA ₅	0,95	0,05	0,05	0,05	0,05	5,9375E-06	
Kans dat vijf parallel geschakelde pompen het niet doen											
NA ₁	NA ₂	NA ₃	NA ₄	NA ₅	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	3,125E-07	
									Niet-beschikbaarheid (NA)	0,00115813	= S
									Beschikbaarheid = 1 - NA	0,99884188	99%

De faalcombinaties van het systeem van vijf pompen waarvan 3 het moeten doen zijn:

1. drie parallel geschakelde pompen zijn niet-beschikbaar en twee wel.
2. vier parallel geschakelde pompen zijn niet-beschikbaar en één wel.
3. vijf parallel geschakelde pompen zijn niet-beschikbaar.

In Figuur 4.7 zijn alle achterliggende faalcombinaties uitgeschreven. Dit is gewoon een kwestie van zorgvuldig tellen. Het uitschrijven en sommeren van alle faalcombinaties leidt tot een systeembeschikbaarheid van 99,88%.

Stel nu dat het systeem zou werken als slechts één pomp het doet. Dan kunnen we hier Formule (4.2) toepassen (beschikbaarheid van parallelle systemen). De uitkomst is dan: $A_s = 1 - (1-0,95)(1-0,95)(1-0,95)(1-0,95)(1-0,95) = 1 - (0,05)^5 = 1 - 3,125 \cdot 10^{-7} = 0,999999678$.

Deze uitkomst kunnen we ook herleiden uit Figuur 4.7 bij de laatste regel van de faalcombinaties, waarbij 5 pompen het niet doen: $A_s = 1 - 3,125 \times 10^{-7} = 0,999999678$.

Deze uitkomst betekent: het systeem faalt (pas) als alle vijf parallel geschakelde pompen falen. In M-out-of-N redundancy termen is dit 1 van de 5 moet het doen om het systeem beschikbaar te laten zijn.

In ons rekenvoorbeeld gingen we er echter van uit dat tenminste 3 van de 5 pompen het moeten doen. In de tabel zien we dat de systeembeschikbaarheid daardoor ook lager uitkomt dan bij toepassing van Formule (4.2). Er zijn immers veel meer faalcombinaties die we in beschouwing moeten nemen.

Voor de volledigheid geven we ook de formule voor de M out of N betrouwbaarheid van niet-repareerbare systemen [5].

$$R_s(t) = \sum_{k=m}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} R_c(t)^k (1 - R_c(t))^{n-k} \quad (4.6)$$

Ook hier het advies om gewoon in Excel de faalcombinaties uit te schrijven omdat je dan ziet en begrijpt wat je doet.

4.4 Cold redundancy

Voor parallelle systemen zoals hiervoor beschreven wordt de term warm of active redundancy gebruikt. Dit betekent dat alle objecten continu in bedrijf zijn. Een andere vorm van redundantie is de zogenoemde cold redundancy of cold stand-by. Het redundante object staat tijdens normale bedrijfsvoering uit. Pas wanneer het hoofdobject faalt, schakelt deze bij.

Connor & Kleyner [1] geven formules voor twee cold stand-by situaties die vaker voorkomen. Het uitgangspunt is dat het om identieke objecten gaat.

Om de formules eenvoudiger op te schrijven wordt de MTTR (lees hier de gemiddelde downtime) omgeschreven naar een repair rate μ .

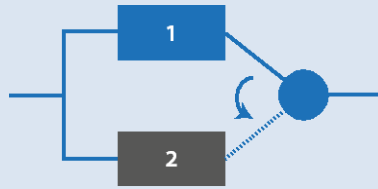
$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \text{repair rate} \quad (4.7)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{\text{aantal storingen}}{\text{uptime}} = \text{failure rate} \quad (3.6)$$

De *steady state* beschikbaarheid voor een parallelle schakeling van twee identieke objecten, waarvan er één cold stand-by staat wordt gegeven als:

$$A_s = \frac{\mu^2 + \lambda\mu}{\mu^2 + \lambda\mu + \lambda^2} \quad (4.8)$$

FIGUUR 4.8 TWEE IDENTIEKE OBJECTEN WAARVAN ER ÉÉN STANDBY STAAT



We nemen bijvoorbeeld twee pompen waarvan er één continu in bedrijf is, terwijl de ander koud standby staat om de functie van de eerste pomp over te nemen als deze faalt. Reparatie duurt 40 uur. De storingsfrequentie van pomp 1 en 2 bedragen $1 \cdot 10^{-4}$ per uur.

De repair rate μ is $1/40 = 0,025$ per uur. Als we Formule (4.8) invullen vinden we:

$$A_s = \frac{0,025^2 + (1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,025)}{0,025^2 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,025 + (1 \cdot 10^{-4})^2} = 0,999984064$$

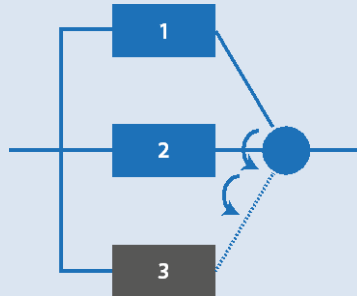
Voor de volledigheid en vergelijking passen we ook Formule (4.2) toe (warme redundantie). Daarvoor berekenen we eerst de beschikbaarheid van pomp 1 en 2. $MTBF = 1/10^{-4} = 10.000$ uur. $A_1 = A_2 = 10.000 / (10.000 + 40) = 0,996015936$. Invullen van Formule (4.2) leidt tot een systeembeschikbaarheid van 0,999984127.

Je ziet dat het verschil in deze situatie tussen warme en koude redundantie zeer gering is. Dus je komt in dit voorbeeld bij benadering ook weg met de standaard aanpak voor de warme redundantie (Formule 4.2). In Hoofdstuk 6 behandelen we nog een situatie waarbij de tweede component een faalkans per vraag heeft. Ook dan ligt in dit voorbeeld de berekende beschikbaarheid dicht bij die van warme redundantie. Met andere woorden, de basisformule voor warme redundantie is een goed gereedschap om gevoel te krijgen voor de orde van grootte van uitkomsten. Het is een goede manier om te controleren of je bij het invullen van standaardformules rekenfouten hebt gemaakt.

We eindigen met een formule voor de steady state beschikbaarheid voor een parallelle schakeling van drie identieke objecten, waarvan er één cold stand-by staat (koude redundantie) [1]:

$$A_s = \frac{\mu^3 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2}{\mu^3 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2 + \lambda^3} \quad (4.9)$$

FIGUUR 4.9 DRIE IDENTIEKE OBJECTEN WAARVAN ER ÉÉN STAND-BY STAAT

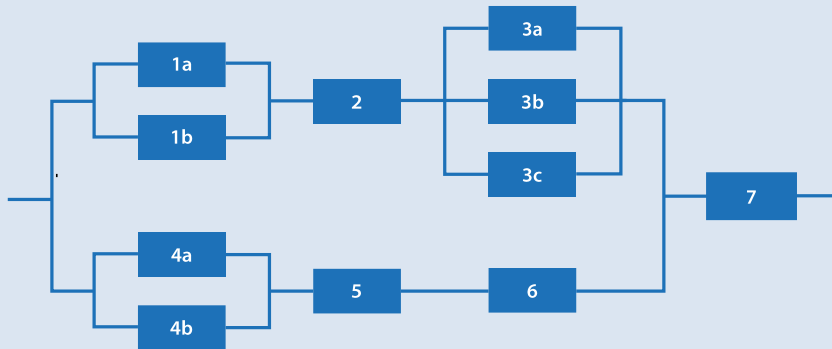


Als we voor de repair rate μ 0,025 invullen en voor de storingsfrequentie λ $1 \cdot 10^{-4}$ vinden we voor de systeembeschikbaarheid $A_s = 0,99999993676$.

5 Eenvoudige foutenboomanalyse

In Hoofdstuk 4 is de systeembeschikbaarheid bepaald met een visuele weergave die Reliability Block Diagram (RBD) wordt genoemd. Dezelfde analyse kunnen we ook weergeven met een foutenboom. We beperken ons tot een eenvoudige foutenboom die past bij de steady state aanname. Ons uitgangspunt is het RBD uit Hoofdstuk 4.

FIGUUR 5.1 OPBOUW SYSTEEM DAT BESTAAT UIT VERSCHILLENDE OBJECTEN



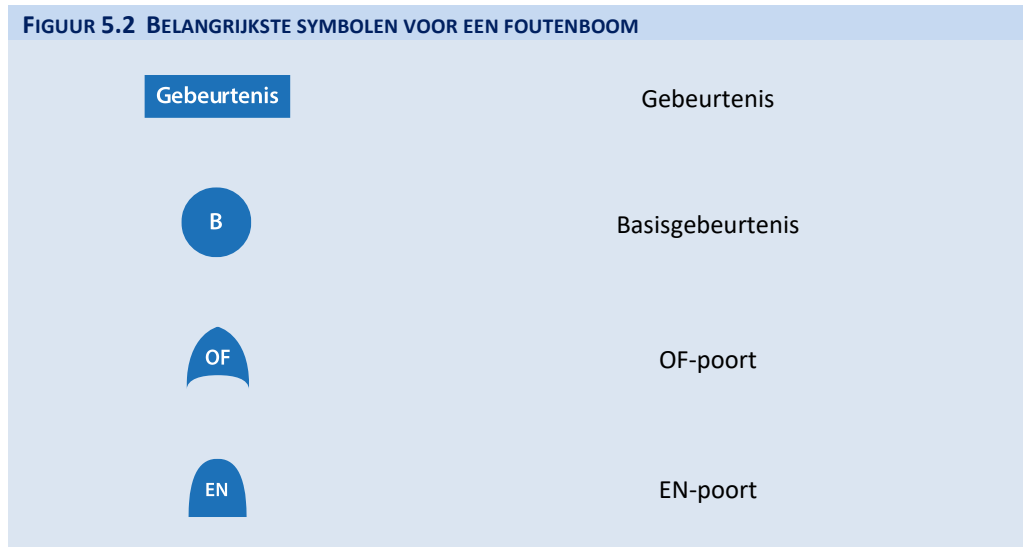
5.1 Opstellen van de foutenboom

Het opstellen van een foutenboom begint met een topgebeurtenis, in ons voorbeeld: het systeem faalt en is niet-beschikbaar. Vervolgens werken we systematisch alle achterliggende oorzaken door, die leiden tot deze topgebeurtenis.

Voor het opzetten van foutenboom gelden de volgende richtlijnen:

- Begin met de topgebeurtenis (één per boom).
- Werk naar beneden en ga tegen de stroom in (zoek de achterliggende oorzaken).
- Vergeet bij de oorzaken het eigen (inherente) falen niet.
- Eindig bij de basisoorzaken.
- Stop op tijd, ga niet te ver in detail.

Voor ons doel zijn de belangrijkste symbolen:

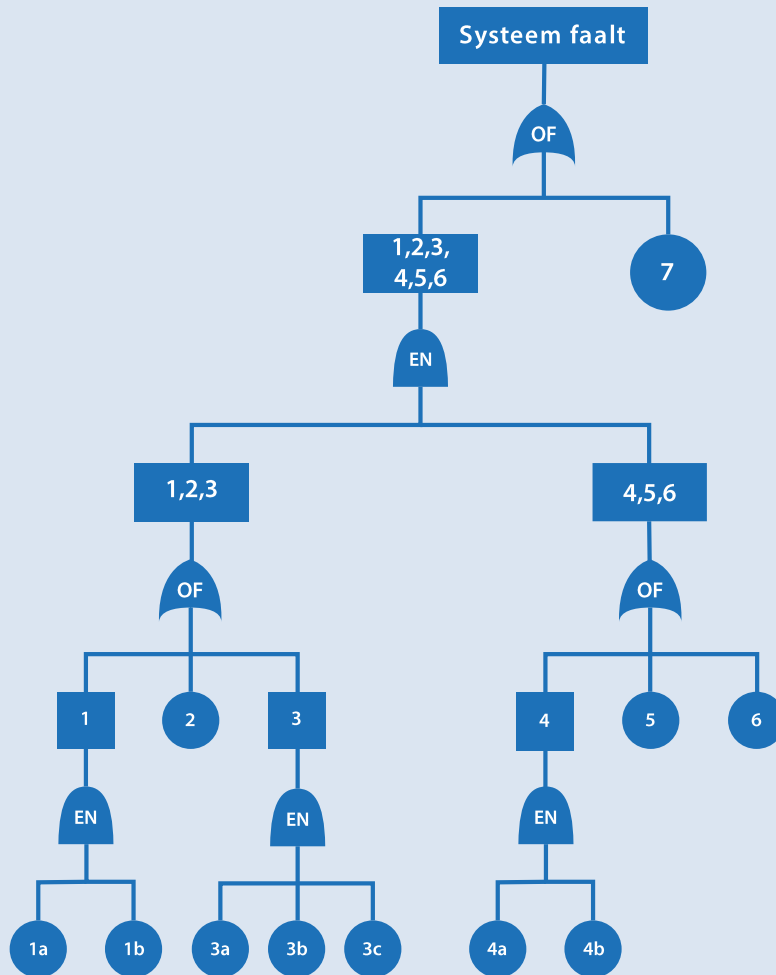


Het systeem in Figuur 5.1 zetten we om in een foutenboom. Deze is weergegeven Figuur 5.3.

Het systeem faalt als blok 7 OF het subsysteem van [1,2,3,4,5,6] faalt. Blok 7 kunnen we niet verder ontleden. Dit wordt een basisgebeurtenis genoemd. Het subsysteem van [1,2,3,4,5,6] faalt wanneer subsysteem [1,2,3] EN subsysteem [4,5,6] falen. Hier moet dus sprake zijn van gelijktijdig falen, wil het subsysteem van [1,2,3,4,5,6] falen. Substelsysteem [1,2,3] faalt wanneer subsysteem 1 OF blok 2 OF subsysteem 3 faalt. Zo werken we alles door.

Merk op dat de foutenboom in Figuur 5.3 is opgebouwd uit basisgebeurtenissen die maar één keer voorkomen. In Hoofdstuk 6 kijken we naar de situatie waarbij één basisgebeurtenis op meerdere plaatsen in een foutenboom voorkomt. De rekenregels in dit hoofdstuk gaan dan niet meer volledig op.

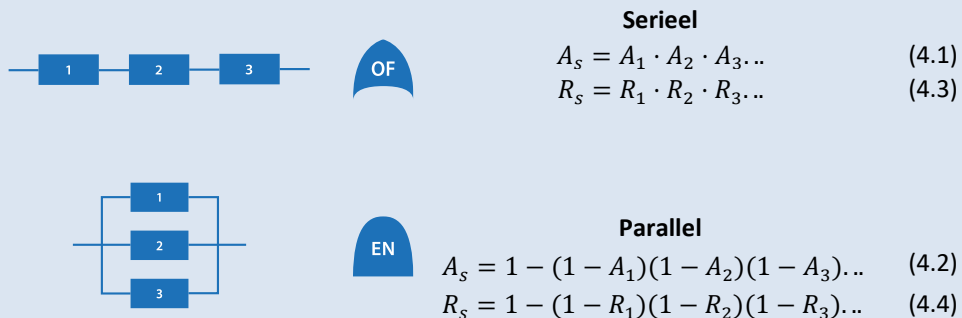
FIGUUR 5.3 FOUTENBOOM VAN SYSTEEM IN FIGUUR 5.1



5.2 Doorrekenen van de foutenboom met enkelvoudige basisgebeurtenissen

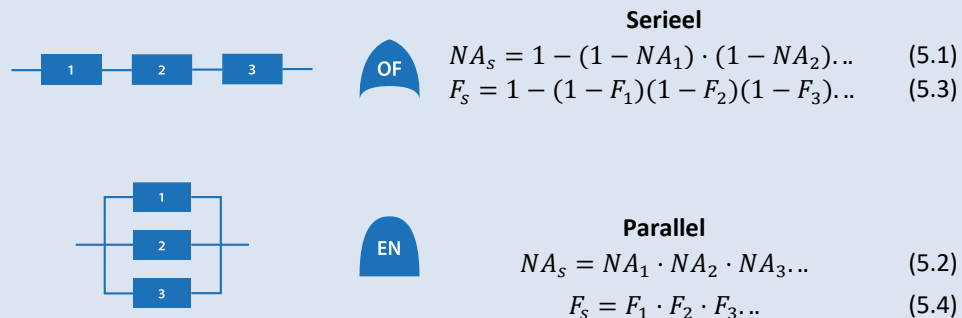
Een foutenboom met enkelvoudige basisgebeurtenissen kun je net als een reliability blok diagram doorrekenen op beschikbaarheid (repareerbaar systeem) en betrouwbaarheid (niet-repareerbaar systeem) met de Formules (4.1), (4.2), (4.3) en (4.4) die in het vorige hoofdstuk al zijn uitgelegd.

FIGUUR 5.4 RELATIES BESCHIKBAARHEID (REPAREREERBAAR) EN BETROUWBAARHEID (NIET-REPAREREERBAAR)



Foutenbomen kun je ook doorrekenen op de niet-beschikbaarheid (NA) en de onbetrouwbaarheid (F). Dit is meer gangbaar, want het heet niet voor niets een foutenboom. Dit is een kwestie van omschrijven van bovenstaande formules. $A = 1 - NA$ en $R = 1 - F$. Als we deze substitutie uitvoeren vinden we:

FIGUUR 5.5 RELATIES NIET-BESCHIKBAARHEID (REPAREREERBAAR) EN ONBETROUWBAARHEID (NIET-REPAREREERBAAR)



Toelichting omrekening serieel systeem (OF-poort):

$$A_s = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \dots$$

We substitueren $A = (1 - NA)$

$$(1 - NA_s) = (1 - NA_1) \cdot (1 - NA_2) \cdot (1 - NA_3) \dots$$

$$- NA_s = - 1 + (1 - NA_1) \cdot (1 - NA_2) \cdot (1 - NA_3) \dots$$

$$NA_s = 1 - (1 - NA_1) \cdot (1 - NA_2) \cdot (1 - NA_3) \dots$$

Toelichting omrekening parallel systeem (EN-poort):

$$A_s = 1 - (1 - A_1) \cdot (1 - A_2) \cdot (1 - A_3) \dots$$

We substitueren $A_s = 1 - NA_s$ en $(1 - A) = NA$

$$1 - NA_s = 1 - NA_1 \cdot NA_2 \cdot NA_3 \dots$$

We trekken aan beide kanten 1 af en houden over:

$$NA_s = NA_1 \cdot NA_2 \cdot NA_3 \dots$$

Het doorrekenen van de systeembeschikbaarheid verloopt volgens Tabel 5.1 met de formules uit Figuur 5.4. Dit is visueel weergegeven in Figuur 5.6. In het zwart zijn de beschikbaarheidsdata van de objecten weergegeven. Deze volgen uit het registratiesysteem. De berekende beschikbaarheid van de (sub)systemen is in het groen weergegeven.

Met de formules uit Figuur 5.5 rekenen we de niet-beschikbaarheid door. Dit is opgenomen in Tabel 5.2. De niet-beschikbaarheid is visueel weergegeven in Figuur 5.7. In het zwart is de niet-beschikbaarheid van de componenten weergegeven en in het rood de berekende niet-beschikbaarheid van de (deel)systemen.

Wat je natuurlijk ook kan doen is één boom doorrekenen en de relatie $NA_s = 1 - A_s$ gebruiken. Als controle: $NA_s = 1 - 0,99395120 = 0,0060480$.

Als je een dergelijk rekenmodel in Excel hebt opgezet, bijvoorbeeld voor een gemalensysteem, RWZI of productielocatie, dan kun je vrij makkelijk doorrekenen wat de gevolgen zijn voor de systeembeschikbaarheid van:

- Het vergroten of verkleinen van de hersteltijden van reparaties en/of preventief onderhoud.
- Het vervangen van objecten met een hogere of lagere storingsfrequentie of een hogere of lagere preventieve onderhoudsbehoefte.
- Het creëren van extra redundantie door meer parallelle subsystemen te maken of juist het weghalen van objecten uit parallelle subsystemen (minder redundantie).

De doorrekening van de betrouwbaarheid en onbetrouwbaarheid voor niet-repareerbare systemen verloopt analoog met de availability rekenregels voor parallelle en seriële systemen en Formules (4.3), (4.4), (5.3) en (5.4).

In de foutenboom kun je ook eenvoudige warme N out of M redundantie of koude redundantie meenemen. Bij de EN -poorten gebruik je dan de aanpak en formules zoals behandeld in Paragrafen 4.3 en 4.4.

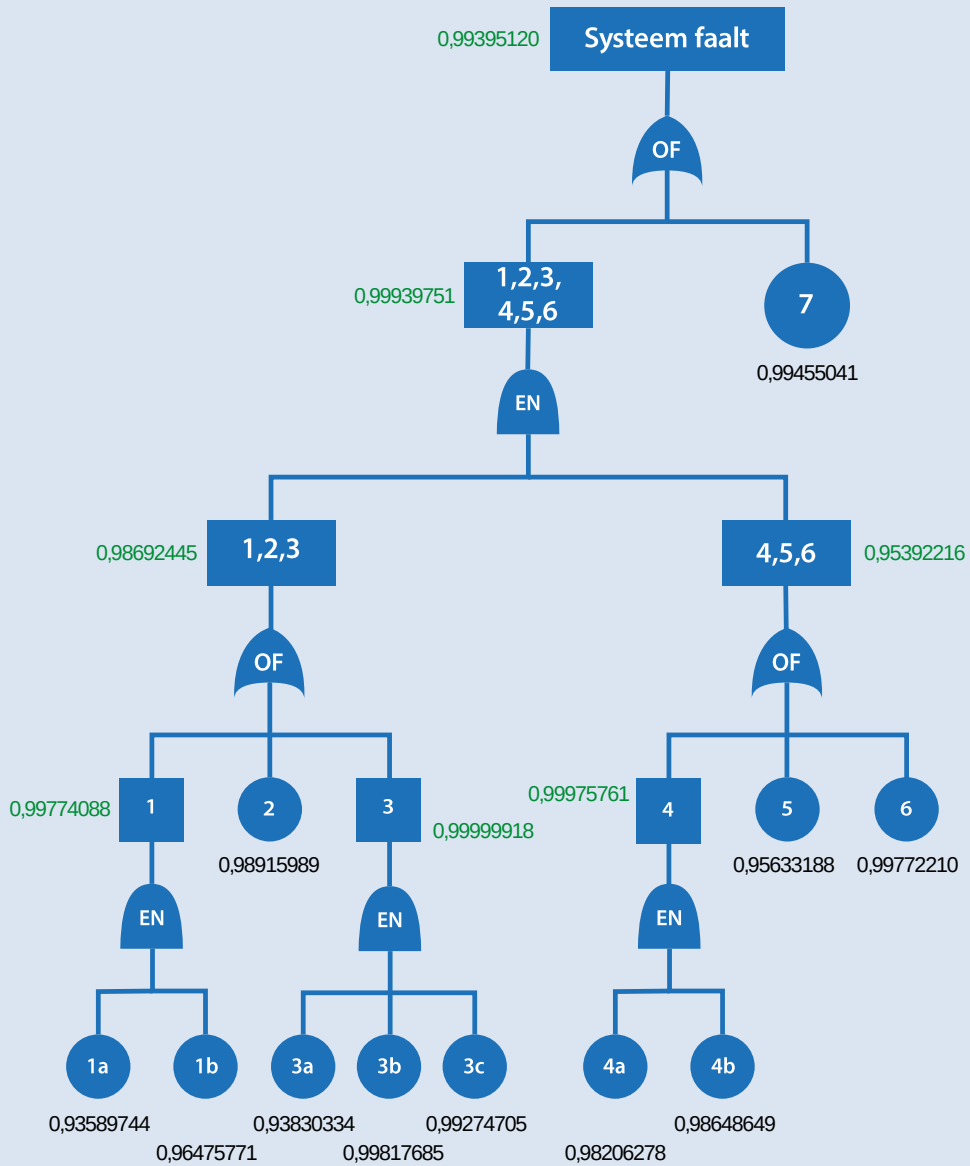
TABEL 5.1 DOORREKENEN VAN DE BESCHIKBAARHEID VAN HET REPAREREBARE SYSTEEM IN FIGUUR 5.1

	Deze data komt uit het OBS of uit standaard tabellen			Deze data komt uit het OBS	A_object = MTBF/(MTBF+hersteltijd) A_serieel = A1xA2... A_parallel = 1 - (1-A1)(1-A2)...				
	MTBF	MTBF	λ	Hersteltijd	Beschikbaarheid				
	[jaar]	[uur]	[1/uur]	[h]	objecten	subsystemen			systeem
1a	0,08	701	1,43E-03	48	0,93589744	0,99774088	0,98692445	0,99939751	0,99395120
1b	0,10	876	1,14E-03	32	0,96475771				
2	0,50	4.380	2,28E-04	48	0,98915989	0,98915989			
3a	0,08	730	1,37E-03	48	0,93830334	0,99999918			
3b	1,00	8.760	1,14E-04	16	0,99817685				
3c	0,25	2.190	4,57E-04	16	0,99274705				
4a	0,40	3.504	2,85E-04	64	0,98206278	0,99975761	0,95392216		
4b	0,10	876	1,14E-03	12	0,98648649				
5	0,12	1.051	9,51E-04	48	0,95633188	0,95633188			
6	1,00	8.760	1,14E-04	20	0,99772210	0,99772210			
7	0,50	4.380	2,28E-04	24	0,99455041	0,99455041	0,99455041	0,99455041	

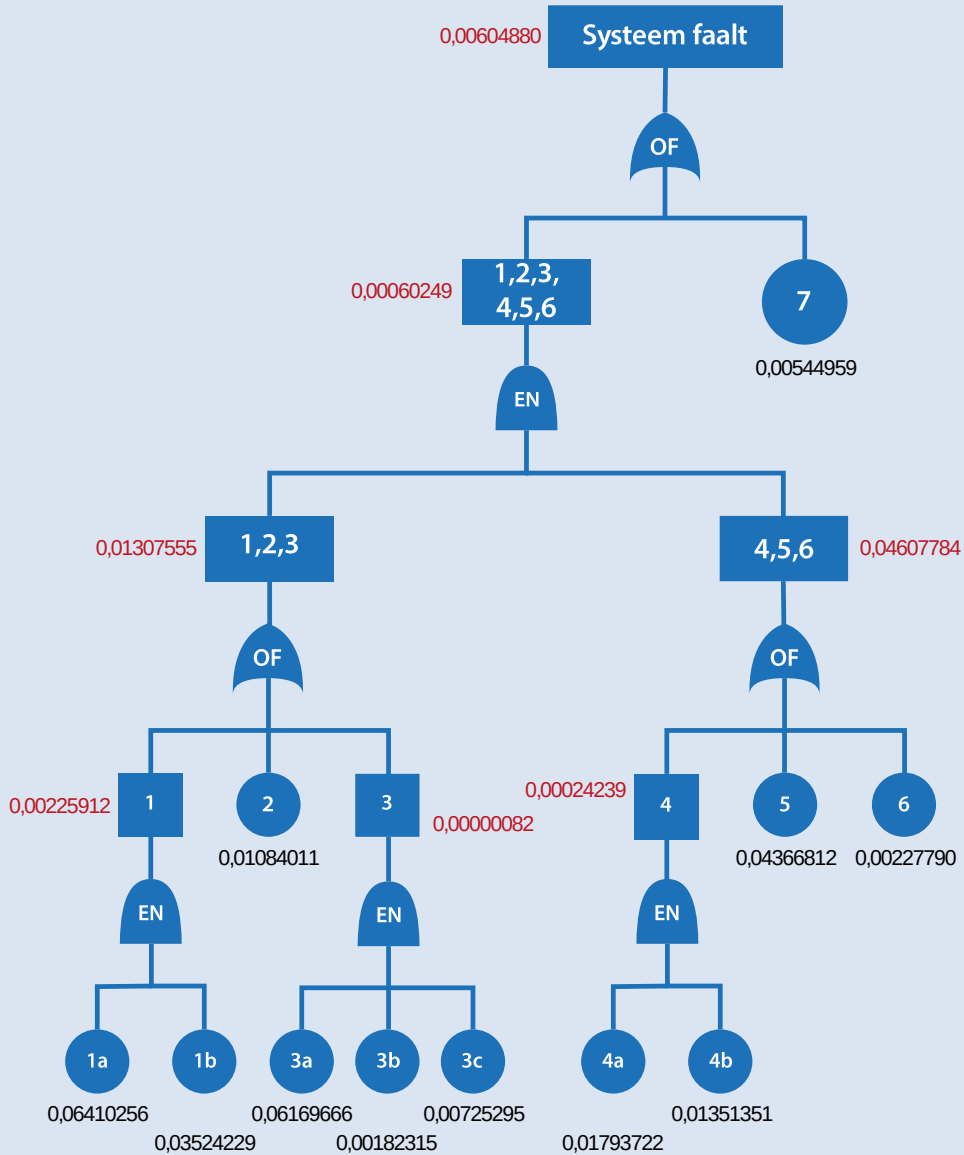
TABEL 5.2 DOORREKENEN VAN NIET-BESCHIKBAARHEID VAN HET REPAREREBARE SYSTEEM IN FIGUUR 5.1

Deze data komt uit het OBS of uit standaard tabellen				Deze data komt uit het OBS	NA_object = 1-[MTBF/(MTBF+hersteltijd)] NA_serieel = 1 - (1-NA1) x (1-NA2) ... NA_parallel = NA1 x NA2...				
MTBF	MTBF	λ	Hersteltijd	Niet-beschikbaarheid					
[jaar]	[uur]	[1/uur]	[h]	objecten	subsystemen			systeem	
1a	0,08	701	1,43E-03	48	0,06410256	0,00225912	0,01307555	0,00060249	0,00604880
1b	0,10	876	1,14E-03	32	0,03524229				
2	0,50	4.380	2,28E-04	48	0,01084011				
3a	0,08	730	1,37E-03	48	0,06169666	0,00000082			
3b	1,00	8.760	1,14E-04	16	0,00182315				
3c	0,25	2.190	4,57E-04	16	0,00725295				
4a	0,40	3.504	2,85E-04	64	0,01793722	0,00024239			
4b	0,10	876	1,14E-03	12	0,01351351				
5	0,12	1.051	9,51E-04	48	0,04366812				
6	1,00	8.760	1,14E-04	20	0,00227790	0,00227790			
7	0,50	4.380	2,28E-04	24	0,00544959	0,00544959			

FIGUUR 5.6 DOORREKENEN VAN DE BESCHIKBAARHEID IN DE FOUTENBOOM



FIGUUR 5.7 DOORREKENEN VAN DE NIET-BESCHIKBAARHEID IN DE FOUTENBOOM



5.3 Vereenvoudiging met de rare event approximation

De rare event approximation is een vereenvoudiging die je kunt toepassen bij lage niet-beschikbaarheden of faalkansen in seriële systemen (OF-poorten). De rare event approximation zegt dat je de formules voor de niet-beschikbaarheid en onbetrouwbaarheid bij een serieel systeem kunt vereenvoudigen tot de optelsom van de niet-beschikbaarheden en onbetrouwbaarheden van de afzonderlijke objecten. In spreektaal betekent dit dat je de niet-beschikbaarheden of faalkansen bij OF-poorten mag optellen. In formulevorm:

Repareerbaar systeem:

$$\begin{aligned} \text{OF - poort: } NA_s &= 1 - (1 - NA_1) \cdot (1 - NA_2) \cdot (1 - NA_3) \dots \\ &\approx NA_1 + NA_2 + NA_3 + \dots \end{aligned} \quad (5.5)$$

Niet-repareerbaar systeem:

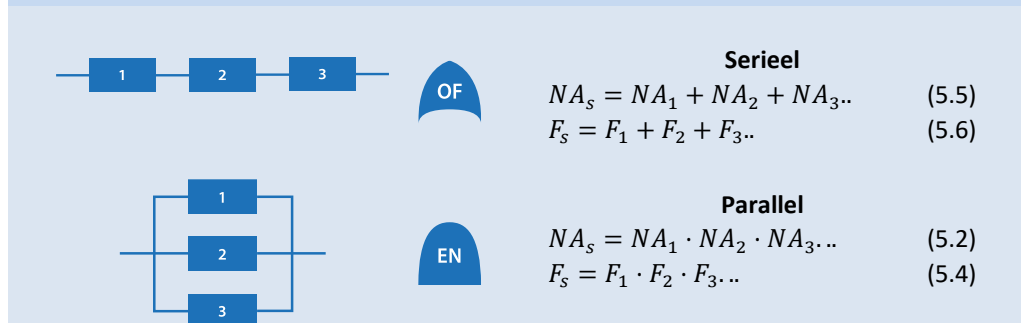
$$\begin{aligned} \text{OF - poort: } F_s &= (1 - R_s) = 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \cdot (1 - F_3) \dots \\ &\approx F_1 + F_2 + F_3 + \dots \end{aligned} \quad (5.6)$$

Vul bijvoorbeeld 0,01 (1%) voor de niet-beschikbaarheid van NA_1 , NA_2 en NA_3 . De exacte uitkomst van de niet-beschikbaarheid van het seriële systeem NA_s bedraagt 0,029701. De benadering met de rare event approximation is $0,01 + 0,01 + 0,01 = 0,03$. Een verwaarloosbaar verschil van 0,000299. Bovendien is de benaderde niet-beschikbaarheid ietsje hoger dan de exact berekende, dus je zit aan de veilige kant. Om precies te zijn heb je een overschatting van 1%.

Echter, als je 0,1 (10%) niet-beschikbaarheid invult in beide formules vind je als exacte uitkomst 0,271 en als benaderde uitkomst 0,30. Je hebt nu een overschatting van $0,30 - 0,271 = 0,029$. Nu zit je toch al 10,7% van je exacte uitkomst af.

Daarom mag je de rare event approximation alleen toepassen bij kleine niet-beschikbaarheden of onbetrouwbaarheden.

FIGUUR 5.8 NIET-BESCHIKBAARHEID (REPAREREBAAR) EN ONBETROUWBAARHEID (NIET-REPAREREBAAR) MET RARE EVENT APPROXIMATION



De rare event approximation maakt het leven makkelijker. Je kunt nu een foutenboom nog sneller doorrekenen op niet-beschikbaarheid of onbetrouwbaarheid door deze op te tellen bij OF-poorten en te vermenigvuldigen bij EN-poorten. In Figuur 5.9 en Figuur 5.10 hebben we de niet-beschikbaarheid van de foutenboom uit Figuur 5.7 doorgerekend maar nu met de rare event approximation.

FIGUUR 5.9 NIET-BESCHIKBAARHEID FOUTENBOOM MET RARE EVENT APPROXIMATION

$$NA_s = NA[1,2,3,4,5,6] + NA[7]$$

$$NA_s = [1,2,3] \cdot [4,5,6] + [7]$$

$$NA_s = [1 + 2 + 3] \cdot [4 + 5 + 6] + [7]$$

$$NA_s = [1a \cdot 1b + 2 + 3a \cdot 3b \cdot 3c] \cdot [4a \cdot 4b + 5 + 6] + [7]$$

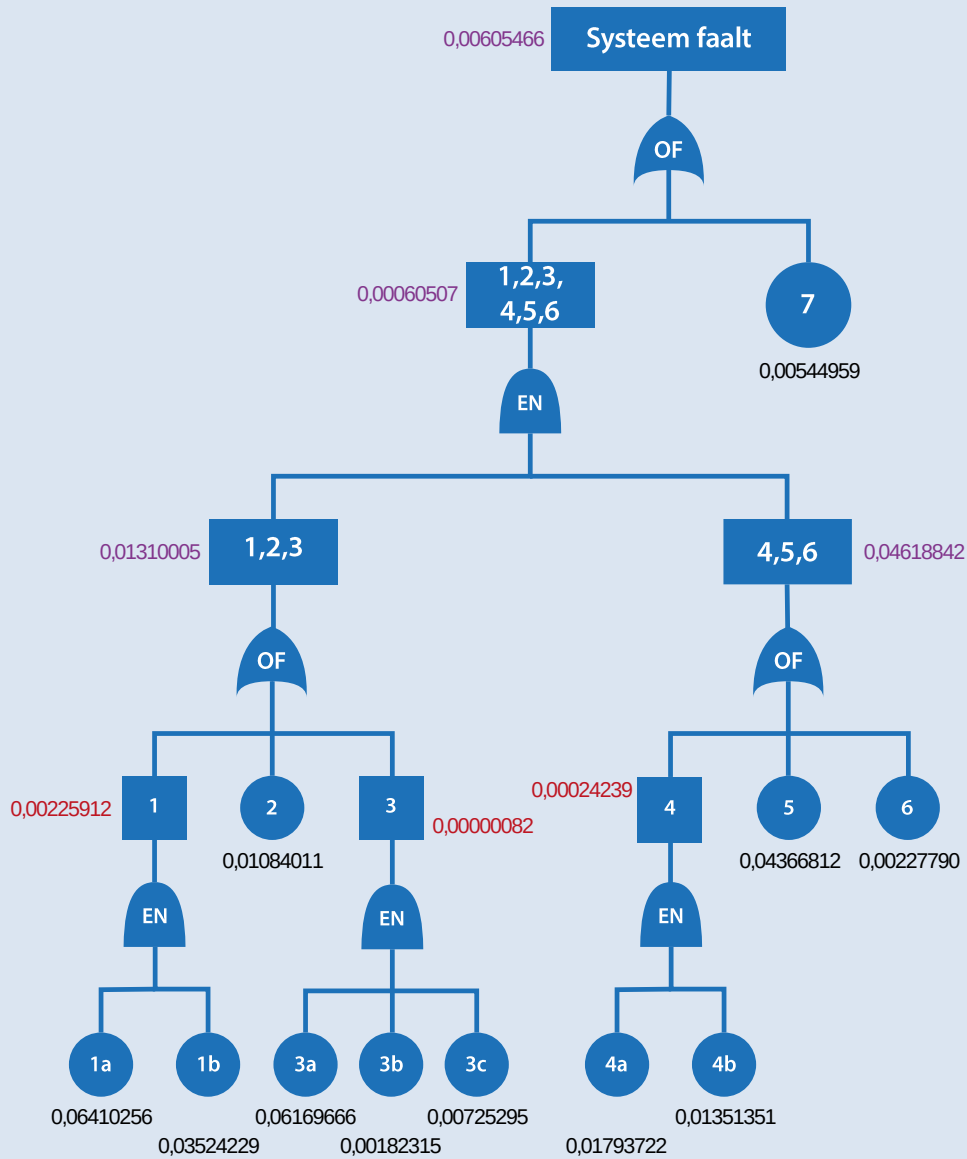
Invullen en uitrekenen geeft $NA_s = 0,00605466$ met de rare event approximation.

In Figuur 5.10 is dat wat wijzigt ten opzichte van Figuur 5.7 in paars weergegeven. De niet-beschikbaarheid van het systeem met de rare event approximation bedraagt 0,00605466. De niet-beschikbaarheid van het systeem met de exacte formules bedraagt 0,00604880. Het verschil is een overschatting van 0,00000586 en is verwaarloosbaar klein (0,1 % van de exacte uitkomst).

Samenvattend: als je de rare event approximation toepast op de niet-beschikbaarheid of onbetrouwbaarheid (faalkansen) kun je in een foutenboom de OF-poorten (serieel) optellen.

Het is niet gebruikelijk, maar mocht je liever de beschikbaarheid of betrouwbaarheid doorrekenen, in plaats van de niet-beschikbaarheid en onbetrouwbaarheid, dan kun je de rare event approximation toepassen op Formules (4.2) en (4.4) voor parallelle systemen. In dit geval draait het trucje om: optellen bij EN-poorten en vermenigvuldigen bij OF-poorten.

FIGUUR 5.10 DOORREKENEN NIET-BESCHIKBAARHEID MET RARE EVENT APPROXIMATION

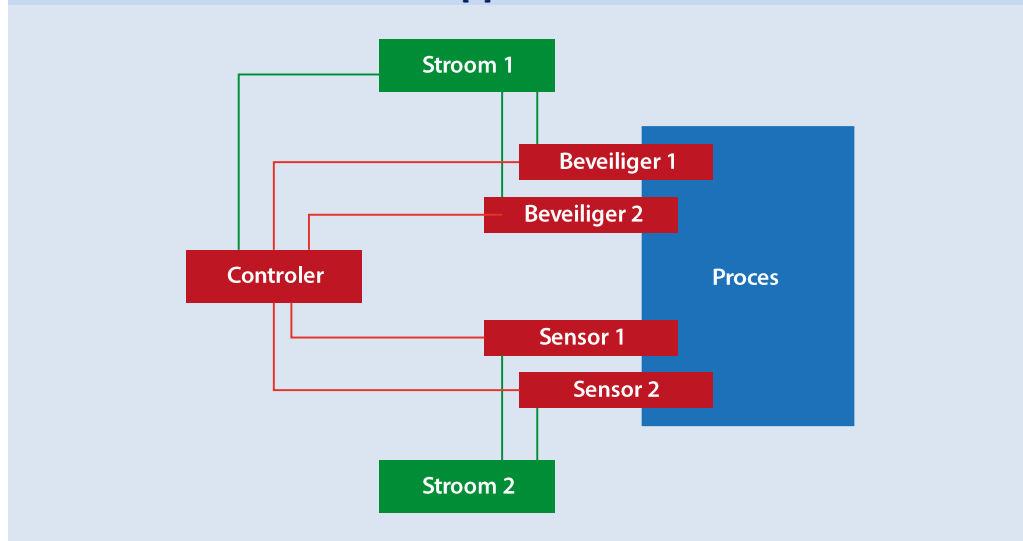


6 Foutenboomanalyse met basisgebeurtenissen die vaker voorkomen

In Hoofdstuk 5 hebben we een eenvoudige foutenboomaanpak beschreven met enkelvoudige basisgebeurtenissen. Hiermee bedoelen we dat een basisgebeurtenis maar op één plek in een boom voorkomt. Er zijn echter ook veel situaties waarbij één basisgebeurtenis op meerdere plaatsen in een foutenboom voorkomt en tot meerdere gevolgen leidt. Bijvoorbeeld een basisgebeurtenis stroomuitval kan er toe leiden dat meerdere objecten uitvallen. In dit hoofdstuk behandelen we een voorbeeld van een foutenboom waarbij dit aan de orde is. Ook presenteren we een aantal standaardformules uit de literatuur voor situaties die vaker voorkomen. Het voorbeeld dat we in dit hoofdstuk behandelen is ontleend aan [9]. Hier vind je ook de standaardformules en de afleiding ervan.

Het voorbeeld uit [9] betreft een proces dat op een bepaalde temperatuur moet blijven. Twee sensoren meten de temperatuur. Eén van de sensoren mag uitvallen. Beide sensoren worden onafhankelijke van elkaar gevoed. De controller leest het signaal van de sensoren en geeft wanneer nodig, een alarmsignaal door aan de twee beveiligers. Bij een alarmsignaal grijpen beveiliging 1 en 2 in. Om het proces stil te leggen is één keer ingrijpen van de beveiliging voldoende. De beveiligers en de controller worden gevoed door een separate stroomvoorziening.

FIGUUR 6.1 VOORBEELD PROCESSYSTEEM UIT [9]



In Tabel 6.1 zijn gegevens over storingen, testintervallen en reparaties opgenomen. Met een faalkans per vraag van $1 \cdot 10^{-4}$ voor de controller wordt bedoeld dat wanneer je 10.000 keer een beroep op de controller doet, deze 1 keer defect zal blijken.

TABEL 6.1 BASISDATA COMPONENTEN

Component	Storings- frequentie λ [per uur]	Faalkans per vraag	Testinterval T [uur]	Testduur τ [uur]	Reparatietijd θ [uur]
Beveiliger 1,2	10^{-5}		730	1	10
Sensor 1,2	10^{-5}		2190	5	2
Controler		10^{-4}	2190	0	1
Stroom 1, 2	10^{-6}		-	-	10

De vraag is: wat is de inherente beschikbaarheid van het proces?

De aanpak is als volgt. We beginnen met het opzetten van een foutenboom. Op basis daarvan beoordelen we of we met basisgebeurtenissen te maken hebben die op meerdere plaatsen in de foutenboom voorkomen. In dit voorbeeld zal blijken dat dit zo is. We kunnen dan niet meer de vergelijkingen uit Hoofdstuk 5 gebruiken. We gaan dit oplossen met Booleaanse algebra. Dit resulteert in een vergelijking die de niet-beschikbaarheid van het systeem beschrijft. Daarna gaan we de niet-beschikbaarheid van de basiscomponenten berekenen en invullen in die vergelijking. Hieruit volgt de niet-beschikbaarheid van het systeem. De beschikbaarheid van het systeem vinden we door $1 - NAs$.

6.1 Opzetten van de foutenboom

In Figuur 6.2 en Figuur 6.3 is de foutenboom geven voor de gebeurtenis: proces faalt (zie Figuur 6.1).

Het proces faalt als beveiligiger 1 en beveiligiger 2 allebei niet werken. Er zijn verschillende achterliggende oorzaken voor het niet werken van één van de beveiligers. De beveiligiger zelf kan defect zijn, een signaal van de controler kan ontbreken of er is sprake van stroomuitval bij voeding 1. De eerste en laatste zijn basisgebeurtenissen. Merk op dat die voor beide beveiligers het zelfde zijn. Geen signaal van de controler heeft ook achterliggende oorzaken: de controler zelf is defect, de sensoren geven geen signaal af of stroom van voeding 1 ontbreekt. Achterliggende oorzaken voor geen signaal van de sensoren zijn: geen signaal van sensor 1 en geen signaal van sensor 2. Geen signaal van sensor 1 of 2 kan als oorzaak hebben dat de sensor defect is of dat er geen stroom is van voeding 2.

Merk op dat in de foutenboom, tak A gelijk is aan tak B. Als bijvoorbeeld sensor 2 defect is, heeft dit invloed op de beschikbaarheid van beveiligiger 1 maar ook op die van beveiligiger 2. We kunnen dit falen van sensor 2 in twee takken van de boom niet zien als twee onafhankelijke gebeurtenissen. Als sensor 2 in tak A faalt, dan faalt sensor 2 ook in tak B. De systeembeschikbaarheid (proces faalt) moet daarom lager uitkomen dan bij de aanpak in Hoofdstuk 5. Om deze afhankelijkheidsrelatie door te rekenen maken we gebruik van Booleaanse algebra.

6.2 Booleaanse algebra

Booleaanse algebra is een logische en binaire taal. Iets is waar of niet waar. Booleaanse algebra helpt om een foutenboom met afhankelijke gebeurtenissen door te rekenen. In Figuur 6.4 staan de belangrijkste rekenregels. Meer rekenregels vind je in [9, 10].

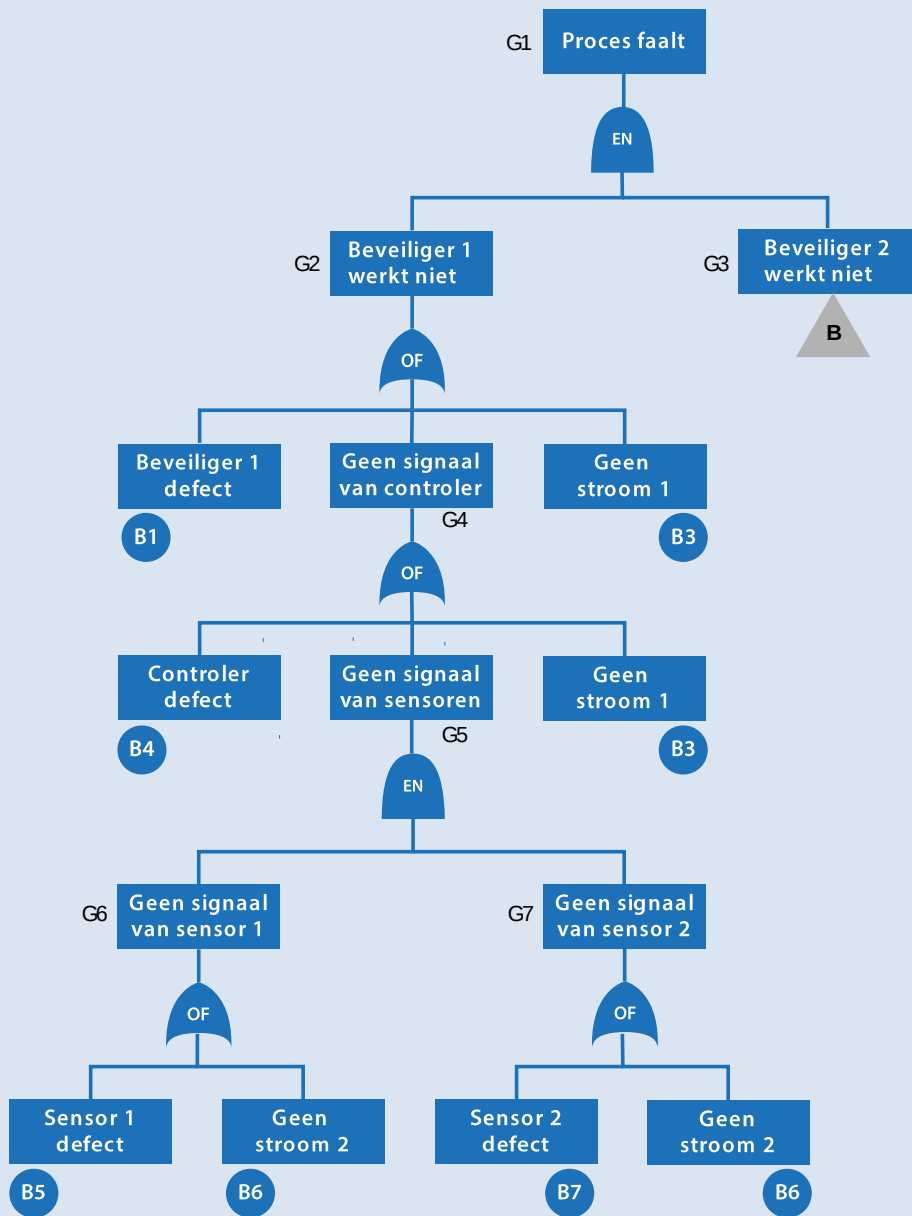
Neem bijvoorbeeld de rekenregel: $X \cdot X = X$. Hier staat: als gebeurtenis X optreedt en gebeurtenis X treedt op, dan is dit gelijk aan het optreden van gebeurtenis X. Vergelijk dit met het falen van sensor 2. Als sensor 2 faalt in tak A dan faalt sensor 2 ook in tak B omdat het dezelfde sensor is. Omdat sensor 2 maar één keer op dat moment kan falen zegt Booleaanse algebra dat de kans van het falen van (sensor 2) $\cdot$ (sensor2) niets anders is dan de kans van het falen van sensor 2. Dus: als de kans van het falen van sensor 2 10% is, dan is de kans van het falen van (sensor 2) $\cdot$ (sensor2) niet $10\% \cdot 10\% = 1\%$, maar nog steeds 10%.

Zo ook $X + X = X$. Als de stroom van voeding 1 uitvalt, of de stroom van voeding 1 uitvalt dan is dit gelijk aan het uitvallen van de stroom van voeding 1. Stroom kan maar één keer op het zelfde moment uitvallen. Dan nemen we $X + X \cdot Y = X$. Als de stroom van voeding 1 (X) uitvalt of de stroom van voeding 1 valt gelijktijdig uit met het falen van beveiliging 1 (Y) dan doet het falen van beveiliging 1 er niet meer toe (tenzij de reparatie van beveiliging 1 langer duurt dan het herstel van de elektriciteitsvoeding). Klinkt logisch, is logisch. Voor de rest volgt de Booleaanse algebra de regels die we eerder al hebben toegepast. De + en de $\cdot$ zijn operatoren voor respectievelijk OF en EN-poorten bij het doorrekenen van de niet-beschikbaarheid of onbetrouwbaarheid.

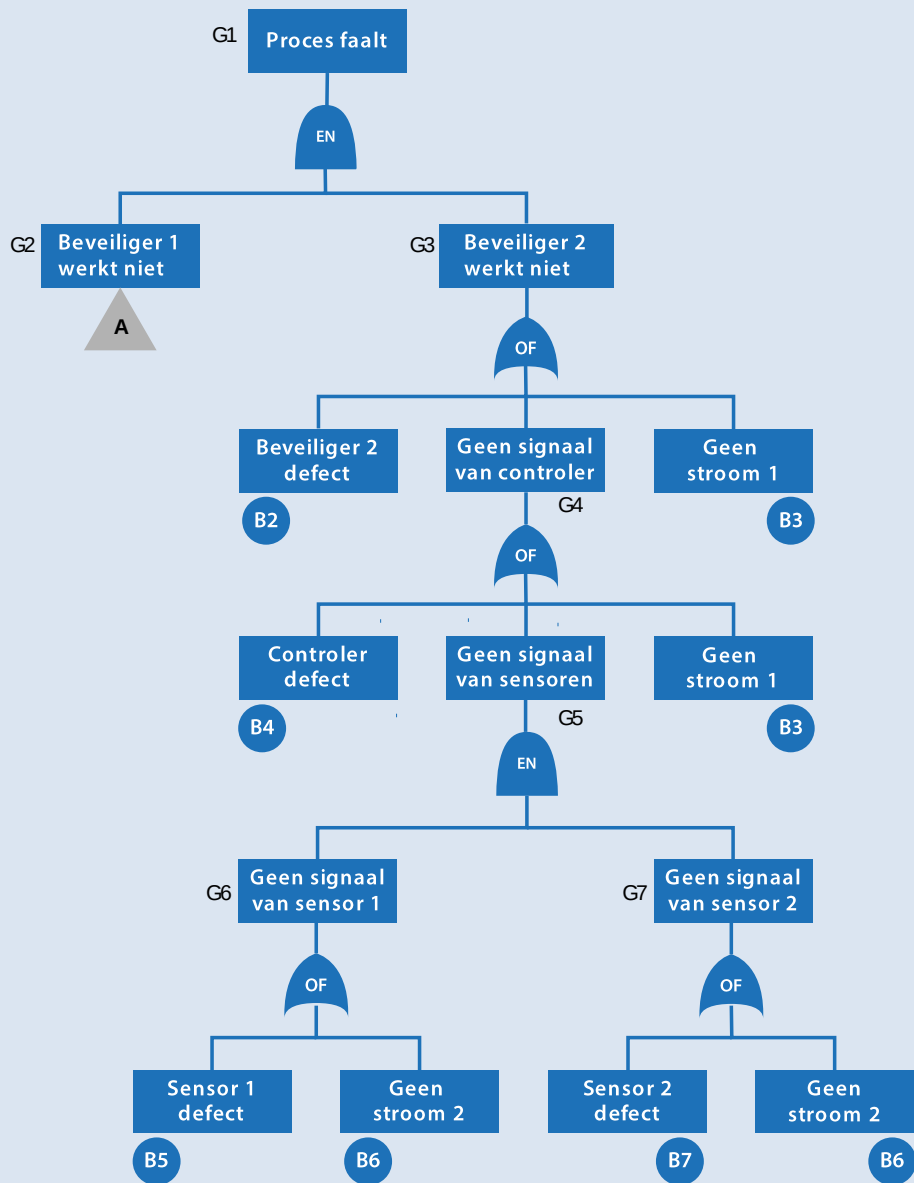
FIGUUR 6.4 BELANGRIJKSTE REKENREGELS BOOLEAANSE ALGEBRA

1)	$X + X = X$	Als gebeurtenis X optreedt of gebeurtenis X optreedt, dan is dit gelijk aan het optreden van gebeurtenis X.
2)	$X \cdot X = X$	Als gebeurtenis X optreedt en gebeurtenis X optreedt, dan is dit gelijk aan het optreden van gebeurtenis X.
3)	$X + X \cdot Y = X$	Als gebeurtenis X optreedt of gebeurtenis X en Y samen optreden, dan is dit gelijk aan gebeurtenis X. (als X optreedt of X en Y treden samen op dan doet het er niet meer toe dat Y optreedt)
4)	$X (X + Y) = X$	Als gebeurtenis X of Y optreedt en gebeurtenis X dan is dit gelijk aan gebeurtenis X. ($X \cdot X + X \cdot Y$ reduceert tot $X + X \cdot Y$ en reduceert tot X)

FIGUUR 6.2 VOORBEELD FOUTENBOOM PROCESSYSTEEM UIT [9]



FIGUUR 6.3 VOORBEELD FOUTENBOOM PROCESSYSTEEM UIT [9]



De Booleaanse algebra gaat nog een stapje verder. Derde orde gebeurtenissen en hoger, zoals $X \cdot Y \cdot Z$ worden als verwaarloosbaar beschouwd ten opzichte van eerste orde (X) en tweede orde ($X \cdot Y$) gebeurtenissen.

Toepassen van de rekenregels leidt er toe dat je de foutenboom kunt beschrijven in zogenoemde minimale cut sets (minimale deelverzamelingen).

6.3 Foutenboom beschrijven met Booleaanse algebra

We gaan de Booleaanse algebra toepassen op de foutenboom in Figuur 6.2 en Figuur 6.3. We gaan net zolang door met vereenvoudiging en substitutie totdat we alleen basisgebeurtenissen overhouden. Dit doen we met elementaire wiskunde. Als een foutenboom erg ingewikkeld is kun je deze in delen uitwerken.

FIGUUR 6.5 FOUTENBOOM UITGEWERKT MET BOOLEAANSE ALGEBRA

$$\text{Proces faalt} = G2 \cdot G3$$

$$G2 = B1 + G4 + B3$$

$$G3 = B2 + G4 + B3$$

$$\text{Proces faalt} = (B1 + G4 + B3) \cdot (B2 + G4 + B3)$$

Gebeurtenis G4 werken we verder uit:

$$G4 = B4 + G5 + B3$$

$$G5 = G6 \cdot G7$$

$$G6 = B5 + B6$$

$$G7 = B7 + B6$$

$$G5 = (B5 + B6) \cdot (B7 + B6)$$

$$G5 = B5 \cdot B7 + B5 \cdot B6 + B6 \cdot B7 + B6 \cdot B6$$

Toepassen van rekenregel 2 op $B6 \cdot B6$ geeft $B6$

$$G5 = B5 \cdot B7 + B5 \cdot B6 + B6 \cdot B7 + B6$$

Toepassen van rekenregel 3 op $B6 + B6 \cdot B7$ geeft $B6$

Toepassen van rekenregel 3 op $B6 + B5 \cdot B6$ geeft $B6$

$$G5 = B5 \cdot B7 + B6$$

$$G4 = B4 + B5 \cdot B7 + B6 + B3$$

We gaan nu 'proces faalt' verder uitwerken

$$\text{Proces faalt} = (B1 + G4 + B3) \cdot (B2 + G4 + B3)$$

$$\text{Proces faalt} = B1 \cdot B2 + B1 \cdot G4 + B1 \cdot B3 + G4 \cdot B2 + G4 \cdot G4 + G4 \cdot B3 + B3 \cdot B2 + B3 \cdot G4 + B3 \cdot B3$$

Toepassen van rekenregel 2 op $G4 \cdot G4 = G4$ en $B3 \cdot B3 = B3$ reduceert de vergelijking tot:
 Proces faalt = $B1 \cdot B2 + B1 \cdot G4 + B1 \cdot B3 + G4 \cdot B2 + G4 + G4 \cdot B3 + B3 \cdot B2 + B3 \cdot G4 + B3$

Toepassen van rekenregel 1 op $(G4 \cdot B3) + (B3 \cdot G4)$ leidt tot $(B3 \cdot G4)$:

Proces faalt = $B1 \cdot B2 + B1 \cdot G4 + B1 \cdot B3 + G4 \cdot B2 + G4 + G4 \cdot B3 + B3 \cdot B2 + B3$

Toepassen van rekenregel 3 op $B3 + B3 \cdot B2$ leidt tot $B3$

Toepassen van rekenregel 3 op $B3 + B3 \cdot B4$ leidt tot $B3$

Toepassen van rekenregel 3 op $B3 + B1 \cdot B3$ leidt tot $B3$

Toepassen van rekenregel 3 op $G4 + B1 \cdot G4 = G4$

Toepassen van rekenregel 3 op $G4 + G4 \cdot B2 = G4$

Toepassen van rekenregel 3 op $G4 + G4 \cdot B3 = G4$

Proces faalt = $B1 \cdot B2 + \cancel{B1 \cdot G4} + \cancel{B1 \cdot B3} + \cancel{G4 \cdot B2} + G4 + \cancel{G4 \cdot B3} + \cancel{B3 \cdot B2} + B3$

Proces faalt = $B1 \cdot B2 + G4 + B3$

We substitueren nu $G4 = B4 + B5 \cdot B7 + B6 + B3$

Proces faalt = $B1 \cdot B2 + B4 + B5 \cdot B7 + B6 + B3 + B3$

Toepassen van rekenregel 1 geeft $B3 + B3 = B3$

En na rangschikken houden we over:

Proces faalt = $B3 + B4 + B6 + B1 \cdot B2 + B5 \cdot B7$

Voor het doorrekenen van de vergelijking proces faalt passen we de rare event approximation toe. Dit wil zeggen dat we de niet-beschikbaarheid kunnen uitrekenen door:

$$NA_s = NA_{B3} + NA_{B4} + NA_{B6} + (NA_{B1} \cdot NA_{B2}) + (NA_{B5} \cdot NA_{B7})$$

Met andere woorden: in de 'proces faalt' vergelijking vullen we gewoon de niet-beschikbaarheden in. Hier zit wel een impliciete aanname achter die ervan uitgaat dat ieder opgemerkt defect van een component, in de bedrijfsvoering of bij testen, direct en desnoods gelijktijdig wordt gerepareerd. In de praktijk worden componenten vaak na elkaar gerepareerd. Voor deze situatie biedt de literatuur een aantal standaardformules voor 2^e orde situaties die we verderop behandelen.

Als je meer exact wilt rekenen laat je de rare event approximation achterwege en pas je Formule (5.1) toe voor de OF-poorten (+ operator) en Formule (5.2) voor de EN-poorten (· operator). Dit resulteert in:

$$NA_s = 1 - (1 - NA_{B3})(1 - NA_{B4})(1 - NA_{B6})(1 - NA_{B1} \cdot NA_{B2})(1 - NA_{B5} \cdot NA_{B7})$$

Voor de onbetrouwbaarheid (F) zijn deze formules op analoge wijze van toepassing.

Om de berekening af te maken hebben we de niet-beschikbaarheid van de basisgebeurtenissen nodig. Deze berekenen we in de volgende paragraaf.

6.4 Berekening niet-beschikbaarheid van de componenten

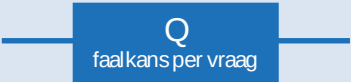
De niet-beschikbaarheid gaan we op twee manieren berekenen. Volgens de rekenregels uit Hoofdstuk 3 (exact) en volgens standaardformules die de literatuur biedt (benadering). Deze standaardformules zijn opgenomen Figuur 6.6. Het verschil zit in de totale tijd waarmee gerekend wordt. De standaardformules benaderen de totale tijd met de MTBF. Helemaal correct is om de totale tijd als MTBF + storingsduur te zien. Maar de afwijking is klein, zoals in Hoofdstuk 3 is uitgelegd. Kies wat voor jou het prettigst werkt. We rekenen beide aanpakken voor.

TABEL 6.1 BASISDATA COMPONENTEN

	Component	Storings- frequentie λ [per uur]	Faalkans per vraag	Testinterval T [uur]	Testduur τ [uur]	Reparatietijd θ [uur]
B1, B2	Beveiliger 1,2	10^{-5}		730	1	10
B5, B7	Sensor 1,2	10^{-5}		2190	5	2
B4	Controler		10^{-4}	2190	0	1
B3, B6	Stroom 1, 2	10^{-6}		-	-	10

FIGUUR 6.6 STANDAARDFORMULES NIET-BESCHIKBAARHEID COMPONENTEN UIT [9]

λ	Storingsfrequentie	[storingen/tijdseenheid]
Q	Faalkans per vraag	[storingen/vraag]
T	Testinterval	[tijd tussen testen]
τ	Testduur	[tijdsduur van een test]
θ	Reparatietijd	[tijdsduur functieherstel]

Niet-beschikbaarheid			
Component	Falen	Testen	Repareren
	$\frac{1}{2}\lambda T$	$\frac{\tau}{T}$	$\lambda\theta$
	-	-	$\lambda\theta$
	Q	$\frac{\tau}{T}$	$\frac{Q\theta}{T}$

Berekening niet-beschikbaarheid beveiligers 1 of 2 (B1, B2)

De niet-beschikbaarheid rekenen we uit conform de uitleg in Hoofdstuk 3.

$$NA = \frac{\text{downtime}}{\text{total time}}$$

Merk op dat we ook een testduur gaan meenemen in de downtime.

De storingsfrequentie van de beveiligers is $1 \cdot 10^{-5}$. De tijd tussen storingen (MTBF) is dan $1/10^{-5} = 100.000$ uur.

We hebben hier te maken met een verborgen faalvorm. We merken falen pas op bij een periodieke test. De duur van een storing is dan gemiddeld $1/2 \times$ inspectie-interval + de reparatietijd = $1/2 \times 730$ uur + 10 uur = 375 uur.

De totale tijd bedraagt de gemiddelde tijd tussen twee storingen + de storingstijd = $100.000 + 375 = 100.375$ uur.

Voor de downtime moeten we ook de testtijd meenemen. In 100.000 uur is $100.000/730 = 137$ keer getest en dit testen duurde een uur. De totale testtijd komt hiermee uit op 137 uur.

Nu hebben alle gegevens om de niet beschikbaarheid van de beveiligers uit te rekenen:

$$NA = (375 + 137) / 100.375 = 0,005100$$

Bij het toepassen van de benaderingsformule voor niet-merkbaar falen in Figuur 6.6 komen we voor de beveiligers uit op een beschikbaarheid van 0,005120. Dit vinden we ook door:

$$NA = (375 + 137) / 100.000 \text{ (hier benaderen we de totale tijd met de MTBF).}$$

$$\begin{aligned} NA_{B1} &= \frac{1}{2} \lambda T + \frac{\tau}{T} + \lambda \theta = \\ \frac{1}{2} \cdot 10^{-5} \cdot 730 + \frac{1}{730} + 10^{-5} \cdot 10 &= \\ 3,65 \cdot 10^{-3} + 1,37 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-4} &= 5,12 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Berekening niet-beschikbaarheid sensor 1 of 2 (B5, B7)

Deze berekenen we analoog aan het voorbeeld van de beveiligers.

De storingsfrequentie is $1 \cdot 10^{-5}$ per uur De gemiddelde tijd tussen twee storingen bedraagt dan 100.000 uur.

Storingsduur: $1/2 \times \text{testinterval} + \text{reparatietijd} = 1/2 \times 2190 + 2 = 1.097$ uur.

Downtime als gevolg van testen: $100.000 / 2190 \times \text{testduur} = 45,66 \times 5 = 228,31$ uur.

Totale tijd is tijd tussen storingen + storingsduur = $100.000 + 1.097 = 101.097$ uur.

Niet beschikbaarheid = $(1.097 + 228,31)/101.097 = 0,01311$

Met de benaderingsformule uit Figuur 6.6 komen we uit op 0,01325

Berekening niet-beschikbaarheid stroom (B3, B6)

Hier hebben we te maken met merkbaar falen. Er wordt niet getest. Stroomuitval wordt direct opgemerkt.

De storingsfrequentie is $1 \cdot 10^{-6}$ per uur De gemiddelde tijd tussen twee storingen bedraagt dan 1.000.000 uur.

Storingsduur = reparatietijd of hersteltijd = 10 uur.

Totale tijd is tijd tussen storingen + storingsduur = $1.000.000 + 10 = 1.000.010$ uur.

Niet beschikbaarheid = $10/100.010 = 9,9999 \cdot 10^{-6}$

Met de benaderingsformule uit Figuur 6.6 komen we uit op $10^{-6} \times 10 = 10^{-5}$

$$NA_{B3} = \lambda \theta = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1 \cdot 10^{-5}$$

Berekening niet-beschikbaarheid controler (B4)

Hier hebben we te maken met een faalkans per vraag van $1 \cdot 10^{-4}$. Dit wil zeggen dat wanneer 10.000 keer een beroep op de controler wordt gedaan, deze 1 keer defect zal zijn.

Er wordt een beroep gedaan op de controler bij het testen en incidenteel bij falen van het proces. De controler stuurt dan een alarmsignaal naar de beveiligers. Verreweg de meeste vragen komen van het testen van de controler. De faalkans per vraag is dan ook afgeleid van testresultaten. We hebben 10.000 keer getest en 1 keer een defect gevonden. De eerder gevolgde veronderstelling dat de controler dan $1/2 \times$ testinterval in storing is geweest gaat hier niet op. De controler werkt niet continu maar alleen als er een vraag is. We veronderstellen een maximum van 1 vraag per testperiode. De niet-beschikbaarheid als gevolg van falen is dan gegeven door de kans op falen per vraag (per testperiode). Deze is $1 \cdot 10^{-4}$.

Dan hebben we nog de niet-beschikbaarheid als gevolg van reparatie. Als we 10.000 keer testen vinden we gemiddeld 1 defect. Het testinterval bedraagt 2190 uur. De MTBF berekenen we op $10^4 \times 2190 = 2,190 \cdot 10^7$ uur. De downtime als gevolg van reparatie is 1 uur. De totale tijd is $2,190 \cdot 10^7 + 1 \approx 2,190 \cdot 10^7$. De niet-beschikbaarheid als gevolg van reparatie bedraagt:

$$1 \text{ uur} / 2,190 \cdot 10^7 = 4,566 \cdot 10^{-8}.$$

De totale niet-beschikbaarheid komt nu uit op $1 \cdot 10^{-4} + 4,566 \cdot 10^{-8} \approx 1 \cdot 10^{-4}$. Dit vinden we ook als we de formule uit Figuur 6.6 invullen:

$$NA_{B4} = Q + \frac{\tau}{T} + \frac{Q\theta}{T} = 1 \cdot 10^{-4} + \frac{0}{2190} + \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot 1}{2190} = 1 \cdot 10^{-4} + 0 + 4,566 \cdot 10^{-8} \\ = 1 \cdot 10^{-4}$$

Merk op dat bij een faalkans per vraag de niet-beschikbaarheid als gevolg van reparatie of testen verwaarloosbaar is. Voor de niet-beschikbaarheid bij een faalkans per vraag kun je in de meeste gevallen uitgaan van de opgegeven faalkans. Voor de afleiding van deze stelling en de formule verwijzen we naar [9].

TABEL 6.2 BEREKENDE BESCHIKBAARHEID VAN DE COMPONENTEN

	Component	Niet-beschikbaarheid berekend volgens aanpak Hoofdstuk 3	Niet-beschikbaarheid berekend met benaderingsformules in Figuur 6.6 uit [9]
B1, B2	Beveiligers 1,2	0,005100	0,005120
B5, B7	Sensor 1,2	0,01311	0,01325
B4	Controler	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
B3, B6	Stroom 1,2	$9,9999 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

6.5 Berekenen niet-beschikbaarheid systeem

We gaan nu terug naar de basisvergelijking in Paragraaf 6.3 en de standaard aanpak:

$$\text{Proces faalt} = B3 + B4 + B6 + B1 \cdot B2 + B5 \cdot B7$$

Als we uitgaan van de rare event approximation en de aanname dat een opgemerkt defect direct en desnoods gelijktijdig wordt gerepareerd, kunnen we nu de niet-beschikbaarheden invullen.

$$NA_s = NA_{B3} + NA_{B4} + NA_{B6} + (NA_{B1} \cdot NA_{B2}) + (NA_{B5} \cdot NA_{B7})$$

$$NA_s = (9,9999 \cdot 10^{-6}) + (1 \cdot 10^{-4}) + (9,9999 \cdot 10^{-6}) + (0,005100)(0,005100) + (0,01311)(0,01311) = 3,1788 \cdot 10^{-4}.$$

De systeembeschikbaarheid is dan $1 - 3,178 \cdot 10^{-4} \times 100 = 99,969\%$.

Met de benaderingsformules voor de beschikbaarheid van componenten uit Figuur 6.6 komen we met rare event approximation uit op: $NA_s = (1 \cdot 10^{-5}) + (1 \cdot 10^{-4}) + (1 \cdot 10^{-5}) + (0,005120)^2 + (0,01325)^2 = 3,218 \cdot 10^{-4}$. De systeembeschikbaarheid is dan 99,968%.

Nagenoeg twee identieke waarden. Kortom, als je liever met de benaderingsformules uit Figuur 6.6 werkt is dat ook prima.

Als je meer exact wilt rekenen laat je de rare event approximation achterwege:

$$NA_s = 1 - (1 - NA_{B3})(1 - NA_{B4})(1 - NA_{B6})(1 - NA_{B1} \cdot NA_{B2})(1 - NA_{B5} \cdot NA_{B7})$$

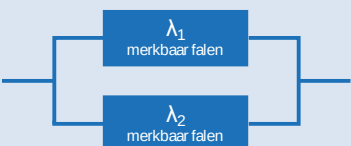
Als we deze formule invullen met de exact berekende niet-beschikbaarheden van de componenten vinden we $NA_s = 3,1785 \cdot 10^{-4}$. Je ziet dat in deze situatie tot acht cijfers achter de komma geen verschil is in de toepassing van de rare event approximation in vergelijking met de nauwkeurigere berekening. Dit komt omdat we te maken hebben met kleine niet-beschikbaarheden van de componenten.

Aanscherping met standaardformules voor hogere orde verzamelingen

Hierboven is impliciet aangenomen dat ieder opgemerkt defect direct en desnoods gelijktijdig wordt gerepareerd. In de praktijk zal het testen en repareren van parallel geschakelde componenten bij gelijktijdig falen na elkaar worden uitgevoerd. De literatuur biedt een aantal standaardformules voor het berekenen van de niet-beschikbaarheid van dit soort 2^e orde situaties waarbij hiermee rekening wordt gehouden. Deze standaardformules zijn opgenomen in Figuur 6.7.

FIGUUR 6.7 STANDAARDFORMULES VOOR 2^E ORDE NIET-BESCHIKBAARHEID UIT [9]

λ	Storingsfrequentie	[storingen/tijdseenheid]
Q	Faalkans per vraag	[storingen/vraag]
T	Testinterval	[tijd tussen testen]
τ	Testduur	[tijdsduur van een test]
θ	Reparatietijd	[tijdsduur functieherstel]

Niet-beschikbaarheid			
Component	Falen	Testen	Repareren
	$\frac{1}{3} \lambda_1 \lambda_2 T^2$	$\lambda_2 \tau_1$	$\lambda_1 \lambda_2 \theta_1 T$
	-	$\frac{\lambda_1 \tau_2^2}{2T}$	$\frac{1}{2} \lambda_1 \lambda_2 \theta_1 T$
	-	-	$\lambda_1 \lambda_2 \theta_A (\theta_A + \theta_B)$ $\theta_A = \min(\theta_1, \theta_2)$ $\theta_B = \max(\theta_1, \theta_2)$

Twee parallel geschakelde componenten die niet-merkbaar falen.

Eerst wordt de ene component getest. Als deze defect blijkt wordt deze gerepareerd. Daarna wordt de andere component getest en gerepareerd indien nodig. Als beide componenten defect zijn is de niet-beschikbaarheid van de tweede component groter omdat deze moet wachten op het testen en repareren van de eerste component. De beschikbaarheid van subsysteem B1·B2 en B5·B7 neemt daardoor af ten opzichte van wat we eerder hebben berekend ($NA_{B1} \cdot NA_{B2}$).

FIGUUR 6.7 VERVOLG STANDAARDFORMULES VOOR 2^E ORDE NIET-BESCHIKBAARHEID UIT [9]

λ	Storingsfrequentie	[storingen/tijdseenheid]
Q	Faalkans per vraag	[storingen/vraag]
T	Testinterval	[tijd tussen testen]
τ	Testduur	[tijdsduur van een test]
θ	Reparatietijd	[tijdsduur functieherstel]

Niet-beschikbaarheid			
Component	Falen	Testen	Repareren
	$\frac{1}{2} \lambda_1 T Q_2$	$\frac{\tau_1 Q_2 + \frac{1}{2} \lambda_1 \tau_2^2}{T}$	$\lambda_1 \theta_1 Q_2$
	-	$\frac{\lambda_1 \tau_2^2}{2T}$	$\lambda_1 \theta_1 Q_2$
	$Q_1 Q_2$	$\frac{\tau_1 Q_2 + \tau_2 Q_1}{T}$	$\frac{Q_1 Q_2 (\theta_1 + \theta_2)}{T}$

Twee parallel geschakelde componenten die merkbaar falen.

Dit subsysteem is niet-beschikbaar wanneer beide componenten falen. Dan geldt volgens Formule (5.2): $NA_{1,2} = NA_1 \cdot NA_2 = \lambda_1 \cdot \theta_1 \cdot \lambda_2 \cdot \theta_2$, met θ_1 als reparatietijd van component 1, en θ_2 als reparatietijd van component 2. Echter, hier veronderstellen we dat component 1 en 2 gelijktijdig gerepareerd worden. Dat is vaak niet zo. Reparatie van component 2 moet wachten op component 1 er van uitgaand dat de reparatietijd van component 1 kleiner of gelijk is aan die van component 2. De totale reparatietijd van component 2 wordt dan $\theta_1 + \theta_2$ en de niet-beschikbaarheid komt uit op de formule die we in Figuur 6.7 zien staan: $NA_{1,2} = \lambda_1 \cdot \theta_1 \cdot \lambda_2 \cdot (\theta_1 + \theta_2)$.

Als je met dit soort zaken rekening houdt kom je tot de formules zoals opgenomen in Figuur 6.7. De afleiding van deze formules vind je in [9].

We gaan de formules uit Figuur 6.7 toepassen op B1·B2 en B5·B7.

Berekening beschikbaarheid subsysteem beveiliging 1 en 2 (B1·B2)

B1·B2 betreft het falen van beveiliging 1 en 2. Dit betrof niet-merkbaar falen van beide componenten. Falen wordt pas duidelijk bij een test. Eerst wordt B1 getest en gerepareerd wanneer nodig, vervolgens wordt B2 getest en gerepareerd wanneer nodig.

De niet-beschikbaarheid van B1·B2 volgt uit de formule in Figuur 6.7:

$$NA_{B1 \cdot B2} = \frac{1}{3} \lambda_{B1} \lambda_{B2} T^2 + \lambda_{B2} \tau_{B1} + \lambda_{B1} \lambda_{B2} \theta_{B1} T$$

De invoerdata volgen uit Tabel 6.1:

$$\lambda_{B1} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\lambda_{B2} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$T = 730 \text{ uur}$$

$$\tau_{B1} = 1 \text{ uur}$$

$$\theta_{B1} = 10 \text{ uur}$$

Invullen geeft: $NA_{B1 \cdot B2} = 2,85 \cdot 10^{-5}$.

Met de standaard aanpak komt de niet-beschikbaarheid van B1·B2 uit op:

$$NA_{B1} \cdot NA_{B2} = 0,005120 \cdot 0,005120 = 2,62 \cdot 10^{-5}.$$

Merk op dat de standaardformules uit Figuur 6.7 op een hogere niet-beschikbaarheid (en dus een lagere subsysteem beschikbaarheid) uitkomen. Dit komt om de eerder vermelde reden: bij gelijktijdig falen moet testen en repareren van de tweede component wachten op het testen en repareren van de eerste component.

Berekening beschikbaarheid subsysteem sensoren 1 en 2 (B5·B7)

B5·B7 betreft de sensoren 1 en 2. Ook hier hebben we te maken met niet-merkbaar falen van twee parallelle componenten. Falen wordt opgemerkt bij testen. Eerst wordt sensor 1 getest en gerepareerd wanneer nodig, daarna sensor 2.

De niet-beschikbaarheid van B5·B7 volgt uit Figuur 6.7 en is eveneens:

$$NA_{B5 \cdot B7} = \frac{1}{3} \lambda_{B5} \lambda_{B7} T^2 + \lambda_{B7} \tau_{B5} + \lambda_{B5} \lambda_{B7} \theta_{B5} T$$

$$\lambda_{B5} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\lambda_{B7} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$T = 2190 \text{ uur}$$

$$\tau_{B5} = 5 \text{ uur}$$

$\theta_{B5} = 2$ uur

Invullen geeft $NA_{B5 \cdot B7} = 1,6 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-5} + 4,4 \cdot 10^{-7} = 2,10 \cdot 10^{-4}$

Met de standaard aanpak komt de niet-beschikbaarheid van B5·B7 uit op:

$NA_{B5} \cdot NA_{B7} = 0,01325 \cdot 0,01325 = 1,8 \cdot 10^{-4}$.

Merk op dat met name de middelste term $\lambda_{B7} \cdot \tau_{B5} = 5 \cdot 10^{-5}$ (storingsfrequentie van B7 maal het testinterval van B5) de extra niet-beschikbaarheid veroorzaakt ten opzichte van het vermenigvuldigen van de individueel berekende beschikbaarheden van B5·B7 = $1,8 \cdot 10^{-4}$. Omdat de testduur τ hier groter is dan in het vorige voorbeeld B1 · B2, is ook de afwijking groter.

Nu kunnen we de niet-beschikbaar van het systeem **(B3 + B4 + B6 + B1·B2 + B5·B7)** opnieuw bepalen met de rare event approximation maar voor **B1·B2 en B5·B7** vullen we de beschikbaarheden in die we met de standaardformules uit Figuur 6.7 hebben berekend. Voor de individuele beschikbaarheden gaan we uit van wat we met de benaderingsformules uit Figuur 6.6 hadden bepaald.

$$NA_s = NA_{B3} + NA_{B4} + NA_{B6} + (NA_{B1} \cdot NA_{B2}) + (NA_{B5} \cdot NA_{B7})$$

$$NA_s = (1 \cdot 10^{-5}) + (1 \cdot 10^{-4}) + (1 \cdot 10^{-5}) + (2,85 \cdot 10^{-5}) + (2,10 \cdot 10^{-4}) = 3,6 \cdot 10^{-4}.$$

Dit is een beschikbaarheid A_s van 99,964%.

Zonder gebruik van deze speciaal afgeleide tweede orde formules kwamen we uit op een niet-beschikbaarheid van het proces van $3,2 \cdot 10^{-4}$ en een beschikbaarheid van 99,968%. In veel situaties leiden beide methoden tot een vergelijkbare uitkomst. Afwijkingen ontstaan vooral door:

- hogere storingsfrequenties (korte faaltijden)
- lange testduren
- lange reparatietijden

Als dit aan de orde is, is het advies om de standaardformules uit Figuur 6.7 toe te passen. In veel andere situaties kun je goed uit de voeten met de basisformules voor niet-beschikbaarheid en onbetrouwbaarheid.

7 Faaltijd en downtime van een repareerbaar systeem

In de vorige hoofdstukken hebben we consequent gerekend met availability (beschikbaarheid) voor repareerbare systemen en reliability (betrouwbaarheid) voor niet-repareerbare systemen. Vaak willen mensen ook de faaltijd en downtime van een repareerbaar systeem weten. Een veel gemaakte vergissing is dat de reliability-aanpak voor niet-repareerbare systemen uit Hoofdstuk 4, op repareerbare systemen wordt toegepast. Men vergeet dan dat componenten die uitvallen niet in een gefaalde toestand blijven maar gerepareerd worden en weer teruggeplaatst in het systeem. In dit hoofdstuk leggen we uit hoe je de gemiddelde faaltijd en downtime van een repareerbaar systeem kunt bepalen. De theorie en rekenwijze staat beschreven in de Europese standaard IEC 61078: 2016 [11].

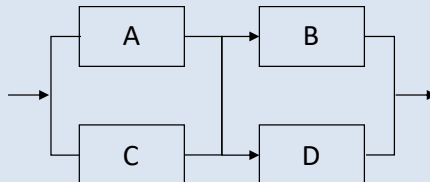
7.1 Aanpak

Voor het bepalen van de gemiddelde faaltijd (MTBF) en downtime van een **repareerbaar systeem** zijn de volgende stappen nodig:

1. Bereken de beschikbaarheid van de componenten en het systeem
2. Bereken de Birnbaum Importance Factor (BIF) voor iedere component
3. Bereken de niet-conditionele faalfrequenties van de componenten
4. Bereken de niet-conditionele faalfrequentie van het systeem
5. Bereken de gemiddelde faaltijd van het systeem
6. Bereken de gemiddelde downtime van het systeem

Deze stappen worden in de volgende paragrafen aan de hand van een rekenvoorbeeld toegelicht. Daarvoor gebruiken we het systeem uit Figuur 7.1 dat uit vier repareerbare componenten (A, B, C, D) bestaat. De gemiddelde faaltijden en reparatietijden van de componenten zijn opgenomen in Tabel 7.1.

FIGUUR 7.1 VOORBEELD VAN EEN REPAREREBAAR SYSTEEM



TABEL 7.1 BASISGEGEVENS

	Blok			
	A	B	C	D
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760
MDT (uur)	24	48	32	12

7.2 Bereken de beschikbaarheid van de componenten en het systeem

Om de beschikbaarheid van de componenten te berekenen gebruiken we de theorie uit Hoofdstuk 3. Als voorbeeld nemen we blok A. De beschikbaarheid is volgens Formule (3.7):

$$A_A = \frac{MTBF_A}{MTBF_A + MDT_A} = \frac{26280}{26280 + 24} = 0,999088$$

Dezelfde berekening voeren we uit voor blokken B, C en D. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 7.2.

De systeem-beschikbaarheid van het systeem (A_S) in Figuur 7.1 volgt uit het toepassen van de parallelle en seriële rekenregels uit Hoofdstuk 4 en Formules (4.1) en (4.2):

$$A_S = (1 - (1 - A_A)(1 - A_C))(1 - (1 - A_B)(1 - A_D)) = 0,999995$$

De resultaten van de systeemberekening zijn opgenomen in de laatste kolom van Tabel 7.2.

TABEL 7.2 BESCHIKBAARHEIDSBEREKENINGEN

	Blok				Systeem
	A	B	C	D	
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	0,999088	0,998632	0,999995

7.3 Bereken de Birnbaum Importance Factor (BIF)

De Birnbaum Importance Factor (BIF) is een maat voor de relatieve bijdrage van componenten aan de systeembeschikbaarheid. De BIF wordt voor een component i als volgt berekend:

1. Bereken de systeembeschikbaarheid onder de aanname dat component i altijd werkt, dus $A_i = 1$
2. Bereken de systeembeschikbaarheid onder de aanname dat component i nooit werkt, dus $A_i = 0$
3. Trek beide systeembeschikbaarheden van elkaar af (werkt – gefaald) om de BIF van component i te vinden, dus:

$$BIF_i = A_{S|A_i=1} - A_{S|A_i=0} \quad (7.1)$$

Daarna zet je de beschikbaarheid van component i weer terug op de feitelijke waarde zoals berekend in Paragraaf 7.2 op basis van de MTBF en MDT. Deze stappen herhalen we voor iedere component in het systeem. De berekeningen zijn uitgevoerd in Tabel 7.3 en de BIF's van de componenten staan in de rechterkolom. Deze vinden we door de systeembeschikbaarheid van de linker en rechter tabel van elkaar af te trekken.

TABEL 7.3 BEREKENING VAN DE BIRNBAUM IMPORTANCE FACTORS

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	1	0,997268	0,999088	0,998632	0,999996

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	1	0,999088	0,998632	0,999999

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	1	0,998632	0,999996

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	0,999088	1	0,999999

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0	0,997268	0,999088	0,998632	0,999084

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0	0,999088	0,998632	0,998631

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	0	0,998632	0,999084

Blok					Systeem
A	B	C	D		
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	0,999088	0	0,997267

BIF(A)	0,000912
BIF(B)	0,001368
BIF(C)	0,000912
BIF(D)	0,002732

De BIF-waarden vertellen dat component D de grootste bijdrage heeft aan de systeembeschikbaarheid, gevolgd door component B. Als we het systeem zouden willen verbeteren kijken we dus het eerste naar component D en B omdat deze het meest kritisch zijn.

Wij hebben de BIF hier echter nodig om een systeem-faaltijd en downtime te berekenen. Daarvoor zijn nog een paar stappen essentieel.

7.4 Bereken de niet-conditionele faalfrequenties van de componenten

Voor de berekening hebben we naast de BIF, ook de niet-conditionele faalfrequentie van iedere component nodig die gedefinieerd is als [11]:

$$\omega_i = \frac{A_i}{MTBF_i} \quad (7.2)$$

Met component A als voorbeeld wordt de niet-conditionele faalfrequentie ω als volgt berekend:

$$\omega_A = \frac{A_A}{MTBF_A} = \frac{0.999088}{26280} = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ per uur}$$

De niet-conditionele faalfrequenties zijn voor alle vier componenten op deze wijze bepaald en opgenomen in Tabel 7.4.

TABEL 7.4 BEREKENING VAN DE NIET-CONDITIONELE FAALFREQUENTIES

	Blok				Systeem
	A	B	C	D	
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	
MDT (uur)	24	48	32	12	
A_i	0,999088	0,997268	0,999088	0,998632	0,999995
BIF	9,12E-04	0,001368	0,000912	0,002732	
ω (per uur)	3,80E-05	5,69E-05	2,85E-05	1,14E-04	

7.5 Bereken de gemiddelde faaltijd van het systeem

De niet-conditionele faalfrequenties ω uit de vorige stap kunnen nu samen met de BIF's gebruikt worden om de niet-conditionele faalfrequentie van het systeem uit te rekenen. Dit doen we door voor iedere component i de ω_i te vermenigvuldigen met de BIF_i en deze waarden voor alle componenten bij elkaar op te tellen:

$$\omega_s = \sum_i BIF_i \cdot \omega_i \quad (7.3)$$

Voor ons voorbeeld rekenen we daarom uit:

$$\omega_s = BIF_A \cdot \omega_A + BIF_B \cdot \omega_B + BIF_C \cdot \omega_C + BIF_D \cdot \omega_D = 4,50E-07 \text{ per uur}$$

De gemiddelde system MTBF volgt nu uit: $MTBF_s = \frac{1}{\omega_s} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-7}} = 2,22 \cdot 10^6 \text{ uur} = 254 \text{ jaar}$

7.6 Bereken de gemiddelde downtime van het systeem

Om tenslotte de gemiddelde downtime te berekenen lossen we de standaard steady state availability vergelijking $A_s = MTBF_s / (MTBF_s + MDT_s)$ op voor MDT. Dit kunnen we herschikken als:

$$MDT = \frac{MTBF_s(1-A_s)}{A_s} = \frac{2,2 \cdot 10^6 (1-0,999995)}{0,999995} = 10,15 \text{ uur}$$

We hebben nu alle informatie die we willen weten:

- Systeem-beschikbaarheid A_s
- Systeem-faaltijd $MTBF_s$
- Systeem-downtime MDT_s

Tabel 7.5 presenteert alle resultaten.

TABEL 7.5 ALLE RESULTATEN VAN DE BEREKENING

	Blok				Systeem
	A	B	C	D	
MTBF (uur)	26280	17520	35040	8760	2,22E+06
MDT (uur)	24	48	32	12	10,15
A_i	0,999088	0,997268	0,999088	0,998632	0,999995
BIF	9,12E-04	0,001368	0,000912	0,002732	
ω	3,80E-05	5,69E-05	2,85E-05	1,14E-04	
$BIF \cdot \omega$	3,47E-08	7,79E-08	2,60E-08	3,11E-07	

8 Gebeurtenissenanalyse

Foutenbomen (Fault Tree) zoals behandeld in de Hoofdstukken 5 en 6, geven de oorzaken aan die leiden tot een gebeurtenis. Bij een foutenboom werk je van boven naar beneden. Iedere keer stel je de vraag: wat veroorzaakt...? Gebeurtenissenbomen (Event Tree) werken andersom en laten zien tot welke effect een reeks van gebeurtenissen leidt. Je begint bij een startgebeurtenis (initiating event). Het rangschikken van gebeurtenissen volgt de binaire logica. Dat wil zeggen, een gebeurtenis treedt op of niet op. Dit geldt ook weer voor de volgende gebeurtenissen.

Ook met een gebeurtenissenboom kun je beschikbaarheid en betrouwbaarheid doorrekenen. We laten dit zien aan de hand van twee voorbeelden.

8.1 Gebeurtenissenboom voor het redundantievraagstuk

Bij het opstellen van een gebeurtenissenboom beginnen we met het benoemen van de gebeurtenissen die kunnen optreden. Voor iedere gebeurtenis bestaan twee opties:

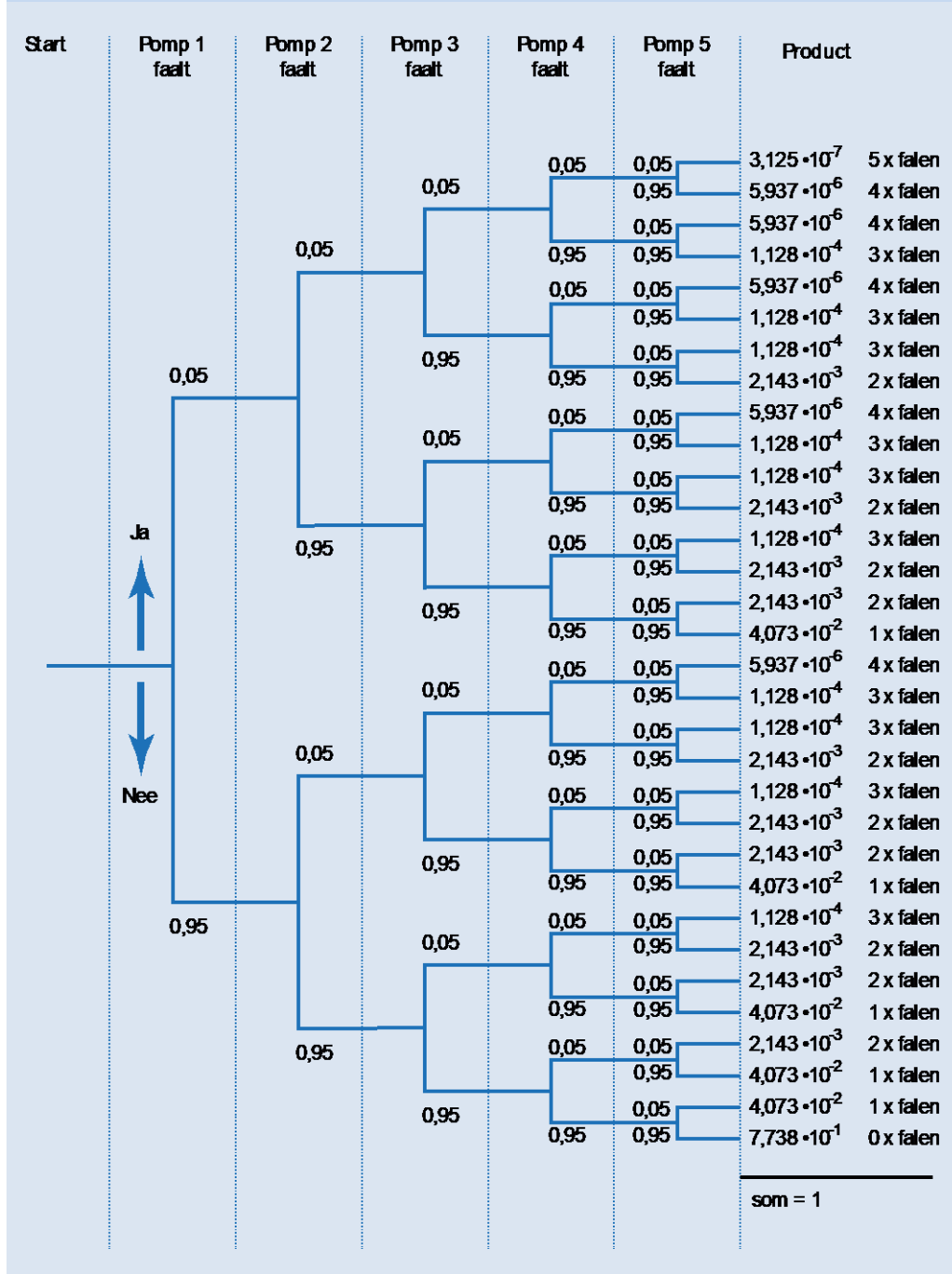
1. de gebeurtenis treedt op
2. de gebeurtenis treedt niet op

Dit werk je systematisch door zoals in Figuur 8.1 is aangegeven. Als voorbeeld nemen we het redundantievraagstuk van de vijf pompen in Paragraaf 4.3. Hier hadden we alle faalcombinaties uitgeschreven in een Exceltabel. Het gevaar van een dergelijke tabel is dat je combinaties vergeet of over het hoofd ziet. Het voordeel van de gebeurtenisboomaanpak is dat je niets mist. Het nadeel is dat je snel grote bomen krijgt die je (handmatig) moet doorrekenen. Op de markt is software verkrijgbaar waarin de computer het werk van het opstellen en doorrekenen van een gebeurtenissenboom van je overneemt.

Het redundantievraagstuk betrof 5 pompen waarvan tenminste 3 het moeten doen om het systeem te laten functioneren. Wat is de systeembeschikbaarheid bij een individuele beschikbaarheid van 95% per pomp? Onze oplossing ligt in de range van de combinaties van de gebeurtenissen:

- pomp 1 faalt
- pomp 2 faalt
- pomp 3 faalt
- pomp 4 faalt
- pomp 5 faalt
- geen pomp faalt

FIGUUR 8.1 GEBEURTENISSENBOOM VOOR DE OPSTELLING VAN 5 POMPEN



Alle mogelijke gebeurtenissen hebben we uitgewerkt in de gebeurtenissenboom in Figuur 8.1. Achter iedere combinatie van gebeurtenissen is de beschikbaarheid vermeld. Dit had ook de betrouwbaarheid kunnen zijn. De som van alle combinaties is 1. Dat rekenen we na volgens:

- 1 x de combinatie 5 x falen = $1 \times (0,05)^5 = 3,125 \cdot 10^{-7}$
- 5 x de combinatie 4 x falen = $5 \times (0,05)^4 \times (0,95)^1 = 2,96875 \cdot 10^{-5}$
- 10 x de combinatie 3 x falen = $10 \times (0,05)^3 \times (0,95)^2 = 1,128125 \cdot 10^{-4}$
- 10 x de combinatie 2 x falen = $10 \times (0,05)^2 \times (0,95)^3 = 0,021434375$
- 5 x de combinatie 1 x falen = $5 \times (0,05)^1 \times (0,95)^4 = 0,203626562$
- 1 x de combinatie 0 x falen = $1 \times (0,95)^5 = 0,773780937$

De som hiervan is 1. Dit bevestigt dat we geen rekenfouten maken en dat alle combinaties in beeld zijn.

Voor ons redundantievraagstuk moeten ten minste drie pompen het doen om het systeem te laten functioneren. Dus maximaal twee pompen mogen falen. Hiervoor selecteren we de volgende combinaties:

- 10 x de combinatie 2 x falen = $10 \times (0,05)^2 \times (0,95)^3 = 0,021434375$
- 5 x de combinatie 1 x falen = $5 \times (0,05)^1 \times (0,95)^4 = 0,203626562$
- 1 x de combinatie 0 x falen = $1 \times (0,95)^5 = 0,773780937$

De som hiervan is 0,9988 (99,88 %) en dit is gelijk aan de uitkomst voor de systeembeschikbaarheid die we in Paragraaf 4.3 hebben berekend.

8.2 Risico-optimalisatie van gebeurtenissen

We demonstreren een tweede gebeurtenissenboom aan de hand van een voorbeeld voor risico-optimalisatie. Met de in Hoofdstukken 3 en 4 behandelde formules voor de betrouwbaarheid en beschikbaarheid van parallelle en seriële systemen is ook de basis voor een eenvoudige risico-optimalisatie gelegd. We behandelen hier het vraagstuk voor het aantal aan te schaffen inbraakmelders. De inbraakmelders vormen een parallel systeem. Slechts één hoeft te werken (betrouwbaar te zijn) om het alarm af te laten gaan. Het systeem faalt pas als alle inbraakmelders tegelijk falen. De onbetrouwbaarheid (systeemfalen) wordt beschreven door:

$$F_s = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \dots \quad (5.4)$$

En de betrouwbaarheid van het systeem van inbraakmelders is:

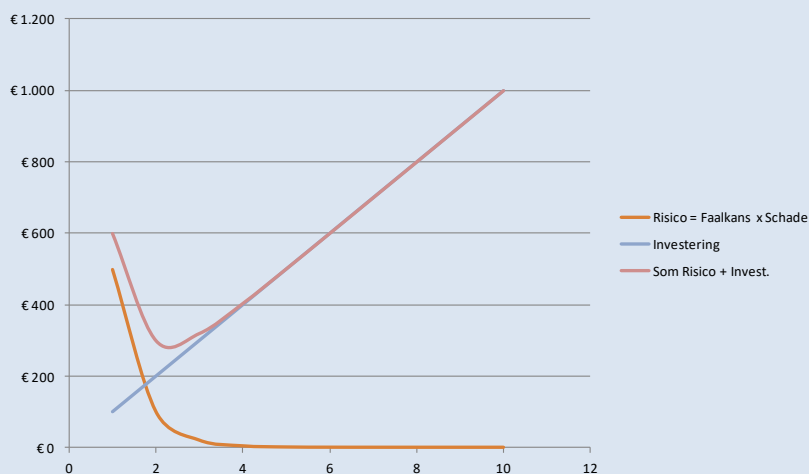
$$R_s = 1 - F_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots \quad (4.4)$$

FIGUUR 8.2 RISICO-OPTIMALISATIE VAN HET AANTAL AAN TE SCHAFFEN INBRAAKMELDERS

Voorbeeld risico-optimalisatie / benodigde redundantie

Een inbraakmelder heeft een betrouwbaarheid van 80% en kost € 100. De kans op een inbraak is 5% (1 x per 20 jaar). Als er wordt ingebroken is de schade naar verwachting € 50.000. Hoeveel inbraakmelders schaf je aan?

Inbraakmelder	Reliability	0,8					
	Failure	0,2					
Een inbraakmelder kost		€ 100					
De kans op een inbraak is		0,05					
Een inbraak kost		€ 50.000					
Er is sprake van falen wanneer alle inbraakmelders gelijktijdig falen bij een inbraak							
$R_s = 1 - (1 - R_A)^n$							
Hoeveel inbraakmelders heb ik nodig?							
Aantal alarminstallaties	Systeem Reliability	Systeem Falen	Totale faalkans	Risico = Faalkans x Schade	Investering	Som Risico + Inv	
1	0,8	0,2	0,01	€ 500	€ 100	€	
2	0,96	0,04	0,002	€ 100	€ 200	€	
3	0,992	0,008	0,0004	€ 20	€ 300	€	
4	0,9984	0,0016	0,00008	€ 4	€ 400	€	
5	0,99968	0,00032	0,000016	€ 1	€ 500	€	
6	0,999936	0,000064	0,0000032	€ 0	€ 600	€	
7	0,9999872	0,0000128	0,00000064	€ 0	€ 700	€	
8	0,99999744	0,00000256	0,000000128	€ 0	€ 800	€	
9	0,999999488	0,000000512	0,0000000256	€ 0	€ 900	€	
10	0,9999998976	0,0000001024	0,00000000512	€ 0	€ 1.000	€ 1.	



In Figuur 8.2 is de betrouwbaarheid van de inbraakmelders weergegeven. We zien we in de derde kolom de systeembetrouwbaarheid staan van 1 tot en met 10 inbraakmelders. Systeemfalen ($F_s = R_s - 1 = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot \dots$) is opgenomen in de vierde kolom.

8.3 Totale faalkans van gebeurtenissen

Voor de totale faalkans moeten we ook de kans op inbraak meenemen. We hebben pas schade als alle inbraakmelders falen op het moment dat er ingebroken wordt. De totale faalkans is de kans op inbraak maal de kans dat de inbraakmelders falen. Dit staat in de vijfde kolom en we leggen dit uit met behulp van een gebeurtenissenboom.

Als voorbeeld nemen we het systeem met 2 inbraakmelders. De gebeurtenissen (events) die moeten optreden voor schade zijn:

1. er wordt ingebroken en
2. melder 1 faalt en
3. melder 2 faalt.

Figuur 8.3 laat de gebeurtenissenboom zien. Merk op dat er telkens twee beslismogelijkheden zijn: ja (pijl omhoog) en nee (pijl omlaag). Dit helpt om alle mogelijke combinaties van deze drie gebeurtenissen systematisch door te werken. Je kunt dit natuurlijk ook oplossen met de aanpak zoals in Tabel 2.2 (M out of N redundancy). Alleen dan kun je combinaties van gebeurtenissen vergeten. Door de systematiek van een gebeurtenissenboom toe te passen, ondervang je dat. We rekenen de gebeurtenissenboom systematisch door en zien dat de kans op inbraak en het gelijktijdig falen van twee inbraakmelders 0,002 is.

8.4 Risicokosten = faalkans x schade

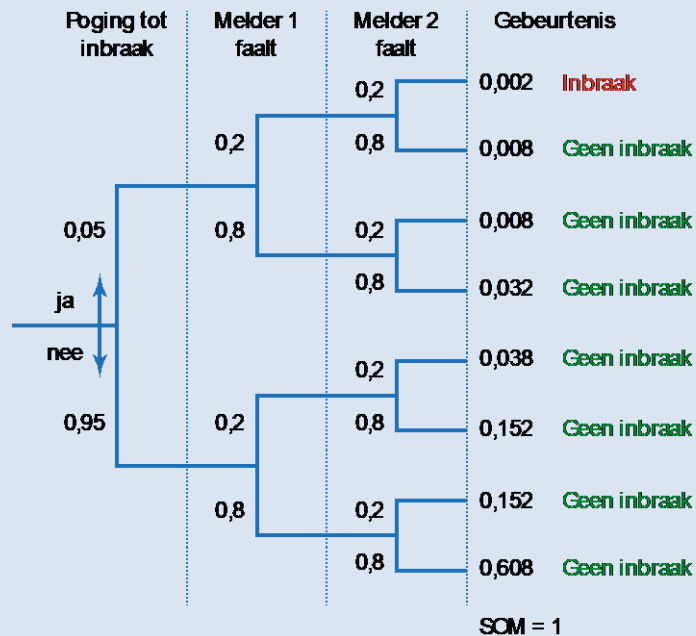
In de zevende kolom van Figuur 8.2 staan de risicokosten. Er is schade als er wordt ingebroken terwijl de inbraakmelders falen. De risicokosten zijn dan de kosten van inbraak vermenigvuldigd met de totale faalkans.

De investeringskosten van de inbraakmelders staan in kolom 8.

De negende kolom geeft de totale kosten weer. Dit zijn de investeringskosten voor de aanschaf van de inbraakmelders plus de risicokosten van inbraak. Het laagste bedrag in deze kolom geeft het aantal inbraakmelders dat vanuit een risicobenadering zou moeten worden aangeschaft.

De risicokosten, investeringskosten en totale kosten zijn in de grafiek geplot in relatie tot het aantal inbraakmelders. Het antwoord luidt: we schaffen twee inbraakmelders aan.

FIGUUR 8.3 GEBEURTENISSENBOM VOOR TWEE INBRAAKMELDERS EN INBRAAK



Als je wat meer risicomijdend bent zou je bijvoorbeeld kunnen veronderstellen dat de kans op inbraak 1 is. In dat geval ligt het optimum bij de aanschaf van 4 inbraakmelders en de totale risico- en investeringskosten bedragen dan € 480. Reken dit zelf na.

Deze som kun je ook maken voor bijvoorbeeld brandmelders, drukmeters, afsluiters en pompen in een parallelle opstelling.

9 Bowtie-analyse

We sluiten af met een bowtie-analyse. De bowtie-analyse is een techniek die een eenvoudige foutenboom en gebeurtenisboom combineert. Centraal staat een ongewenste gebeurtenis. Links hiervan benoem je de oorzaken (bedreigingen) die tot deze ongewenste gebeurtenis leiden. Rechts van de centrale gebeurtenis benoem je de gevolgen waartoe deze ongewenste gebeurtenis leidt. Zo ontstaat een vlinderstrik, die de naam bowtie verklaart.

Bij een traditionele bowtie wordt maar met één niveau van oorzaken en gevolgen gewerkt en deze worden als OF-poort gepresenteerd. Alle oorzaken leiden bij optreden tot de ongewenste gebeurtenis. EN-poorten zoals we hebben gezien bij de foutenboomanalyse worden niet gebruikt. Ook het uitwerken van effecten zul je niet snel tegenkomen. De ongewenste gebeurtenis leidt tot een aantal effecten. Dat die effecten weer tot andere effecten leiden wordt achterwege gelaten.

Om deze redenen is de bowtie minder geschikt voor het analyseren en doorrekenen van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid zoals met de methoden in de Hoofdstukken 3 t/m 5 is gedaan. De bowtie is een instrument dat bedoeld is om oorzaken en gevolgen te visualiseren en maatregelen te kwantificeren om oorzaken en gevolgen te verminderen. Je bent natuurlijk vrij om je eigen bowtie ingewikkelder te maken en wel met meer niveaudifferentiatie te werken maar meer gebruikelijk is om de bowtie te zien als een samenvatting en follow-up van je eerdere analyses.

In de volgende paragrafen lichten we een eenvoudige bowtie-aanpak met doorrekening toe. Voor meer complexe bowties is software op de markt beschikbaar.

9.1 Proactieve en reactieve barrières

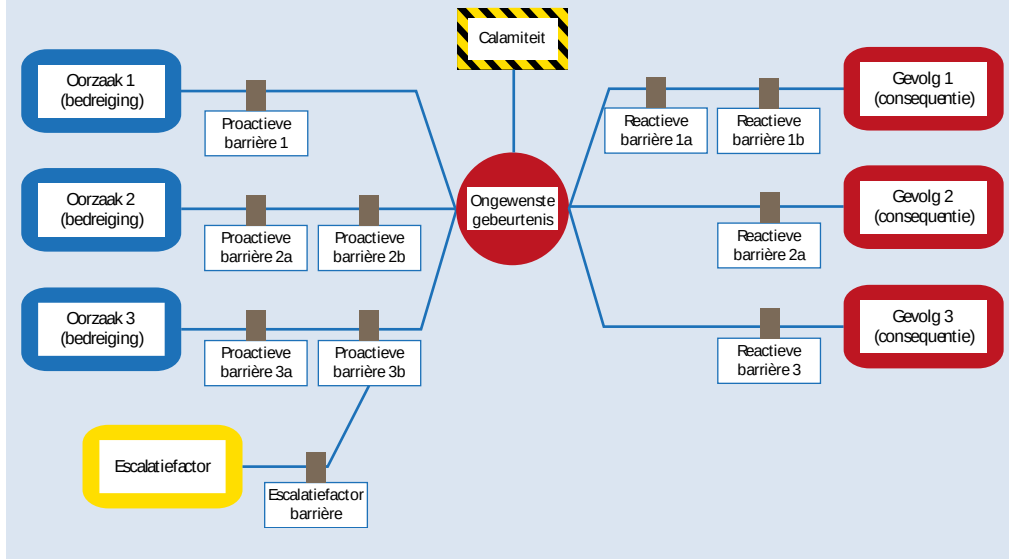
De kracht van de bowtie zit in de visualisatie van proactieve en reactieve barrières. Een proactieve barrière reduceert de kans van het optreden van een oorzaak. Onderhoud is bijvoorbeeld een proactieve barrière. Een reactieve barrière reduceert de kans op het optreden van een effect nadat de ongewenste gebeurtenis is opgetreden. Een calamiteitenmaatregel is een voorbeeld van een reactieve barrière.

Bij een bowtie gaat het niet zozeer om de vergaande analyse van oorzaken en gevolgen maar om de analyse met welke preventieve en reactieve maatregelen je de kans op een ongewenste gebeurtenis en de gevolgen ervan kunt beperken.

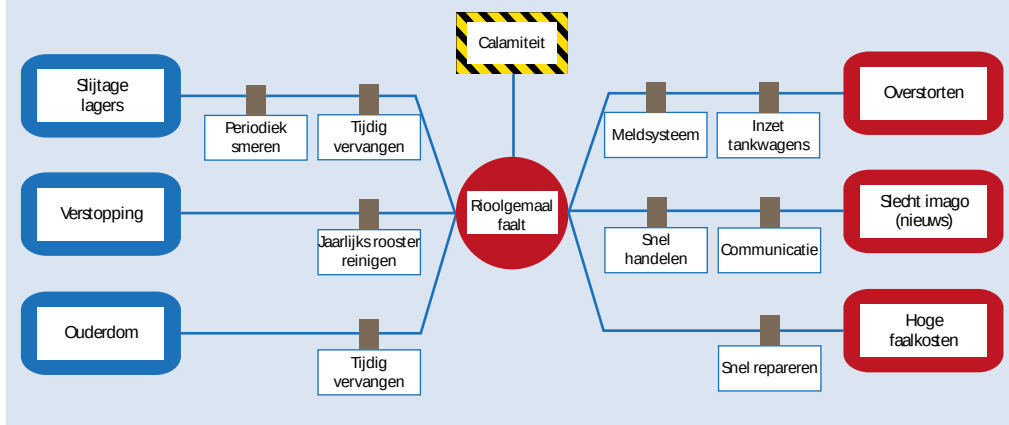
Dit is schematisch weergegeven in Figuur 9.1. Een escalatiefactor vertegenwoordigt een gebeurtenis waardoor een proactieve of reactieve barrière niet werkt of minder effectief is. Een escalatiefactor voor een proactieve barrière is bijvoorbeeld dat een test niet goed is

uitgevoerd. Een escalatie(factor)barrière kan dan een verificatie zijn van de test. Een escalatiefactor voor een reactieve barrière is bijvoorbeeld dat het calamiteitenplan niet tussen de oren van de mensen zit. De escalatiebarrière is dan opleiding en oefening.

FIGUUR 9.1 BOWTIE-WEERGAVE



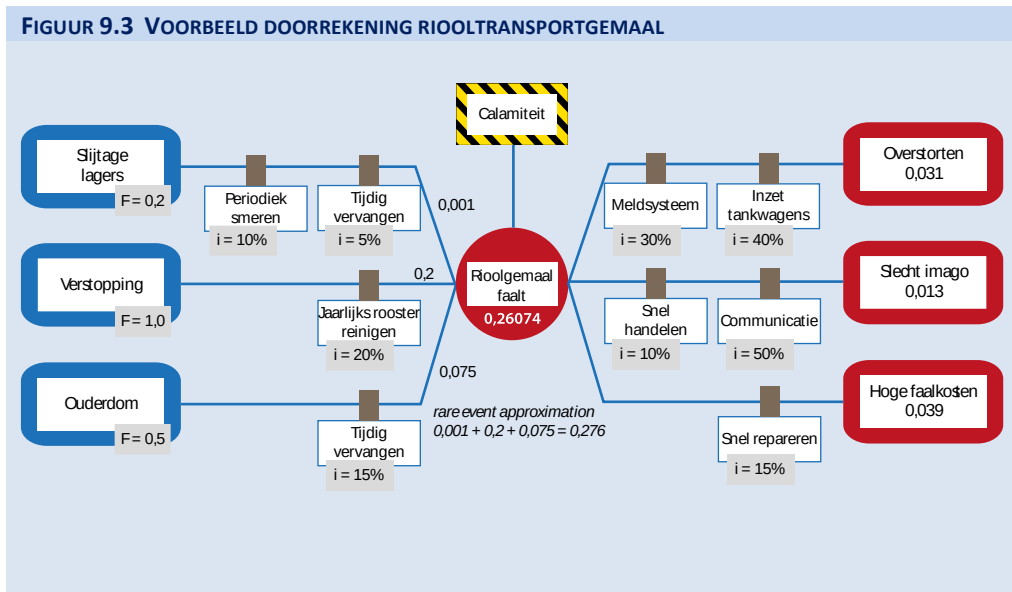
FIGUUR 9.2 VOORBEELD BOWTIE VAN HET FALEN VAN EEN RIOOLTRANSPORTGEMAAL



In Figuur 9.2 is een vereenvoudigd voorbeeld opgenomen van het falen van een riooltransportgemaal. Escalatiefactoren hebben we voor de eenvoud achterwege gelaten. De doorrekening ervan verloopt analoog.

Voor het voorbeeld van het rioolgemaal zijn drie faaloorzaken en drie effecten benoemd. In de praktijk is de lijst met faaloorzaken en effecten langer. Je zou bijvoorbeeld als faaloorzaken kunnen toevoegen: verkeerde afstelling, waaier beschadigd, afdichting pomp-as versleten, elektromotor defect, verzakking, overbelasting, stroomuitval, enz.

In het voorbeeld hebben we een aantal proactieve en reactieve beheersmaatregelen benoemd. De proactieve beheersmaatregelen hebben tot doel om te voorkomen dat het rioolgemaal faalt. De reactieve beheersmaatregelen hebben tot doel om de gevolgen bij falen te beperken. Ook hier geldt dat je in de praktijk meer reactieve beheersmaatregelen kunt benoemen.



9.2 Doorrekenen van een bowtie

Bij een bowtie ga je er vanuit dat iedere benoemde oorzaak, als deze optreedt, tot de ongewenste gebeurtenis leidt. In de eerder besproken Reliability Block Diagram aanpak en foutenboomaanpak is dit vergelijkbaar met een seriële opstelling of een OF-poort. Het rioolgemaal faalt als de lagers versleten zijn, er sprake is van verstopping of storingen optreden als gevolg van ouderdom. Iedere oorzaak heeft een kans van optreden. Zonder barrières zou de faalkans van de ongewenste gebeurtenis in het midden van de bowtie volgen uit Formule 5.3.

$$F_s = (1 - R_s) = 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \cdot (1 - F_3) \dots \quad (5.3)$$

We hebben eerder gezien dat we bij kleine faalkansen de rare event approximation mogen toepassen. Daarmee vereenvoudigt Formule (5.3) tot Formule (5.6). Doe dit alleen bij kleine faalkansen.

$$F_s = F_1 + F_2 + F_3 \dots \quad (5.6)$$

9.3 Oorzaken

We beginnen met het toekennen van faalkansen aan de oorzaken: in dit geval slijtage lagers, verstopping en ouderdom. In het ideale geval haal je de storingsfrequentie uit het storingsregistratiesysteem. Als je terugvalt op expert judgement, stelt je jezelf de vraag: "als ik niets doe, binnen welke tijd kan ik falen als gevolg van deze oorzaak verwachten?" Het antwoord op deze vraag geeft je de MTBF. Een schatting voor de faalkans is dan $1/\text{MTBF}$ per tijdseenheid (jaar, maand, uur). Bij niets doen verwachten we dat de lagers over 5 jaar versleten zijn. De faalkans is dan ongeveer $1/5 = 0,2$ per jaar.

De faalkans van oorzaken neemt af door preventieve barrières. Daarom gaan we percentages toekennen aan de preventieve barrières. Hier stel je jezelf de vraag hoeveel bescherming deze barrière biedt. In andere woorden, in hoeverre kun je de faalkans van een oorzaak terugdringen met deze barrière en hoeveel houdt je nog over van je oorspronkelijke faalkans? Als bijvoorbeeld periodiek smeren de faalkans van slijtage van de lagers met 90% reduceert dan krijgt de barrière periodiek smeren een impactfactor van 0,1.

In Figuur 9.3 zijn de faalkansen van oorzaken en de impactfactoren van de barrières toegevoegd. Nu kunnen we gaan rekenen.

Het falen van de gebeurtenis in het midden van de bowtie wordt berekend door eerst iedere faalkans van een oorzaak te vermenigvuldigen met de impactfactoren van de bijbehorende barrières. Voor de oorzaak slijtage lagers wordt de faalkans na toepassing van de impactfactoren $0,2 \times 0,1 \times 0,05 = 0,001$. Dit doen we ook voor de overige twee oorzaken en barrières. Op het resultaat van iedere tak passen we Formule (5.3) toe.

$$F_s = (1 - R_s) = 1 - (1 - 0,001) \cdot (1 - 0,2) \cdot (1 - 0,075) = 0,26074$$

De kans dat het rioolgemaal faalt, gegeven de reducerende barrières, is 0,26074. Uitgedrukt in MTBF: $1/0,26074 = 3,8$ jaar. Met de rare event approximation (Formule 5.6) komen we uit op een faalkans van:

$$F_s = 0,001 + 0,2 + 0,075 = 0,276$$

Hier hoort een MTBF van $1/0,276 = 3,6$ jaar. Je ziet dat de uitkomsten bij elkaar in de buurt liggen.

We zien in Figuur 9.3 onmiddellijk dat de grootste bijdrage aan de faalkans van het rioolgemaal, de oorzaak verstopping is. Als we de faalkans van het rioolgemaal willen reduceren dan kunnen we bijvoorbeeld het rooster of filter vaker reinigen. We kunnen dan de bijbehorende impactfactor verlagen, bijvoorbeeld naar 10%. Dit reduceert dan ook de faalkans van de ongewenste gebeurtenis in het midden.

9.4 Effecten

Nu gaan we naar de effectkant van de bowtie. We hebben in dit voorbeeld drie effecten benoemd die optreden als het rioolgemaal faalt. Ten eerste zullen overstorten ontstaan. In de tweede plaats zal het falen van het rioolgemaal niet onopgemerkt blijven voor de pers. Dit incident tast het imago aan. Ten derde zijn de faalkosten hoog, niet zozeer vanwege de reparatie, maar vooral door de maatregelen om de impact van de overstorten te beperken zoals de inzet van tankauto's voor het transport van rioolwater.

Bij ieder effect dat optreedt hebben we een paar effect reducerende maatregelen benoemd. Het aantal overstorten kunnen we beperken door snel in te grijpen dankzij een meldsysteem en door inzet van tankauto's. Imagoschade kunnen we beperken door snel te handelen (calamiteitenplan ligt klaar) en goed te communiceren wat we doen. De hoge faalkosten kunnen we reduceren door er voor te zorgen dat het rioolgemaal zo snel mogelijk zijn functie weer vervult.

De reactieve barrières verlagen de kans van optreden van de effecten. De mate waarin (reductiefactor) schatten we zelf in. Deze percentages hebben we in Figuur 9.3 toegevoegd.

Om de kansen van optreden van de effecten te berekenen vermenigvuldigen we de berekende faalkans van het rioolgemaal (want dit is ook de faalkans van een effect zonder effect reducerende barrières) met de effect reducerende factoren.

De kans op overstorten volgt nu uit $0,26074 \times 0,3 \times 0,4 = 0,031$.

De kans dat het rioolgemaal faalt hebben we berekend op 0,26074. Echter, de kans dat dit met de gegeven effect reducerende maatregelen leidt tot overstorten is nog maar 0,031 of eens in de 32 jaar.

Je kunt zoveel effect reducerende maatregelen toevoegen als je wilt. Je kunt ook de in Figuur 9.1 genoemde escalatiefactoren en escalatiebarrières toevoegen. Een escalatiefactor zou de beperkte beschikbaarheid van tankauto's bij een calamiteit kunnen zijn. Met een escalatiefactor van 1,5 neemt de impact van de barrière inzet tankauto's toe tot $1,5 \times 40\% =$

60%. De kans op overstorten wordt nu: $0,26074 \times 0,3 \times 0,6 = 0,047$ of eens in de 21 jaar. Je ziet dat de kans op overstorten toeneemt met deze escalatie. De escalatiefactor kunnen we reduceren met een escalatiefactorbarrière. We kunnen bijvoorbeeld afspraken maken met collega-beheerders en verhuurbedrijven over de beschikbaarheid van tankauto's.

Wel een waarschuwing om niet te veel met escalatiefactoren en -barrières te werken. De kracht van een bowtie zit in de eenvoud en in de visuele weergave waarin je proactieve en reactieve barrières kunt toevoegen of weghalen. In één oog opslag zie je welke bijdrage deze hebben. Je kunt maatregelen onderling prioriteren. Dit ondersteunt de besluitvorming en de effectieve inzet van middelen.

10 Bronnen en verder lezen

[1] O, Connor, P.T.D, Kleyner, A. Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons, Ltd 2012. ISBN 978-0-470-97981-5

[2] Blanchard, B.S., Fabrycky, W.J. Systems Engineering and Analysis. Pearson 2011. ISBN 978-0-13-714843-1

[3] Applied R&M Manual for Defence Systems - Part D. Probabilistic R&M Parameters and Redundancy Calculations

[4] Zaal, T. Profit-Driven Maintenance For Physical Assets - Bijlage A4-2.2. Maj Engineering Publishing 2011. ISBN 978 90 79182 107

[5] Klaassen, K.B., Van Peppen, J.C.L., Bossche, A. Bedrijfszekerheid, theorie en techniek. Delftse Uitgevers Maatschappij 1988. ISBN 97 89 040 71 2593 / ISBN 90-6562-073-7

[6] Moubray, J. Reliability Centered Maintenance II. Chapter 8.3 Failure-finding Task Intervals. Industrial Press 1979. ISBN 9780-08311-3146-2

[7] Technical Manual TM 5-98-1. Reliability/Availability of Electrical & Mechanical Systems for Command Control, Communications, Computer Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Facilities. Headquarters, Department of the Army, USA, 2007.

[8] Faulin, J. et al. Simulation Methods for Reliability and Availability for Complex Systems. Opm: voor gevorderden. Springer 2010. ISBN 978-1-84882-212-2

[9] J.C.H. Schüller, et al, (1997) Methods for determining and processing probabilities. CPR 12E. NRG Arnhem.

[10] Vesely, W.E., Goldberg, F.F., Roberts, N.H., Haasl, D.F. (1981). Fault Tree Handbook. NUREG-0492

[11] IEC 61078:2016. Reliability block diagrams. European Committee for Electrotechnical Standardization

Beschikbaarheid & betrouwbaarheid

Praktijkgerichte analyses voor assets en assetsystemen

Deze handleiding is geschreven voor de assetmanager, maintenance manager en reliability engineer. In dit beknopte naslagwerk staat het berekenen van de steady state beschikbaarheid en betrouwbaarheid van technische bedrijfsmiddelen en systemen centraal. Het geeft een overzicht van gangbare analyses die handmatig en met Excel uit te voeren zijn. Aan de hand van rekenvoorbeelden worden deze analyses toegelicht.



Aan de orde komen: systeembeschikbaarheid, redundantie, reliability block diagram analyses, foutenboomanalyses, gebeurtenissenanalyses, risico-optimalisatie en bowtie-analyses. We houden rekening met factoren zoals verborgen en open faalvormen, testintervallen, reparatietijden, actieve en koude redundantie. Dergelijke analyses geven een stuur in handen voor het beheersen van de betrouwbaarheid en beschikbaarheid op systeem- en objectniveau. Dit beheersen gebeurt met ontwerp- en onderhoudsmaatregelen. De analyses ondersteunen bovendien de inzet van (kostbare) reliability software voor complexe situaties.

Dr. ir. Martine van den Boomen MBA is adviseur assetmanagement bij Colibri Advies BV. Ze ondersteunt organisaties in de publieke sector bij de implementatie van assetmanagement. Tevens is Martine lector Assetmanagement bij Hogeschool Rotterdam en docent-onderzoeker bij TU Delft.