

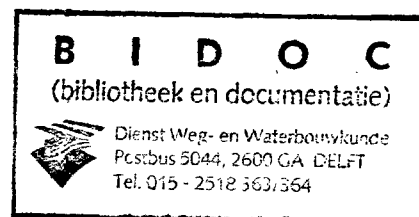
Onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van beweegbare waterkeringen

**Daniëlle Klaassen
Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde**

In opdracht van Dienst Weg en Waterbouwkunde

Delft, September 1995

11 JUL 2005



Begeleiders

Prof.drs.ir. J.K. Vrijling	Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
Ing.K.G. Bezuijen	Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
Dr.ir.W. Heins	Vakgroep Techniek, Bedrijf en Bestuur, Faculteit Wijsbegeerte en Technische Maatschappijwetenschappen, Technische Universiteit Delft.
Ir.R.E. Jorissen	Dienst Weg en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat.
Prof.ir.A.C.W.M.Vrouwenvelder	Vakgroep Mechanica en Constructies, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

'De grootste fout die een mens kan maken is te veronderstellen dat hij nooit een fout zal maken.'

D. Klaassen

Voorwoord

Ter afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft heb ik gedurende 8 maanden onderzoek gedaan bij de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat. Van dit onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van beweegbare waterkeringen breng ik verslag uit in dit rapport. In mijn onderzoek staat het in kaart brengen van menselijk falen centraal. 'Waar gewerkt wordt vallen spaanders', maar mijn nieuwsgierigheid naar de achtergronden hiervan is aanleiding geweest te kiezen voor dit onderwerp.

De zoektocht naar theoretische kennis omtrent achtergronden van menselijk falen heeft mij ook naar andere faculteiten geleid. Dhr. W.A. Wagenaar, verbonden aan de faculteit voor Psychologie in Leiden heeft mij inzichten gegeven over de 'basics' van menselijk handelen. Bij de vakgroep Mens- en Machine systemen van de faculteit Werktuigbouwkunde aan de Universiteit in Delft werd mij duidelijk hoe de psychologische kennis wordt toegepast op technische vraagstukken. Via de Faculteit Wijsbegeerte en Technische Maatschappijwetenschappen heb ik verschillende mensen gesproken die zich met veiligheidsstudies en voorschriften bezighouden. De kennis van R.M. Cooke van de faculteit Wiskunde heb ik gebruikt voor het toepassen van een methode om met behulp van expert meningen kansschattingen te maken.

Het schrijven van dit rapport biedt mij de mogelijkheid de personen te bedanken die mij met mijn onderzoek begeleid hebben.

Speciale dank gaat uit naar mijn begeleider dhr W. Heins die mij tijdens het hele onderzoek met veel enthousiasme en nieuwe ideeën mij begeleid heeft. De begeleiders van Civiele Techniek Professor J.K. Vrijling, Professor A.C.W.M. Vrouwenvelder en Dhr K.G. Bezuijen wil ik bedanken voor de inzet tijdens alle besprekingen.

Dhr. B. Rigter van de Dienst Weg en Waterbouwkunde dank ik voor de hulp bij het opstarten van het onderzoek en de introductie bij de dienst.

Dhr R.E. Jorissen, mijn begeleider van de Dienst Weg en Waterbouwkunde dank ik hartelijk voor zijn enthousiasme en zijn gezelschap als kamergenoot.

De medewerkers en studenten van de vakgroep Mens- en Machine systemen van de faculteit Werktuigbouwkunde, met name dhr P. Wieringa, wil ik graag bedanken voor de vele gesprekken die ik met hen heb gehad tijdens mijn onderzoek.

Mijn 'experts', de heren Neef, Koster en Nieuwjaar van de kering in Den Oever, de heren Talma en Retel van de afdeling Waterhuishouding Rotterdam en de heer Poortvliet en mevrouw Ras van de kering in de Oosterschelde, wil ik graag bedanken voor het invullen van de enquête. Zonder deze experts zou 'mijn' methode met expert meningen uiteraard niet mogelijk zijn geweest.

Tot slot wil ik alle medewerkers van de Dienst Weg en Waterbouwkunde, met name Yvonne, Ingrid, Astrid, Arie en Jan Dirk, bedanken voor hun getoonde interesse en voor hun gezelligheid als werk- en lunchgenoot.

Delft, september 1995

Daniëlle Klaassen

Samenvatting

Inleiding

Door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen wordt gewerkt aan het opstellen van een algemene benadering voor de veiligheidsbeoordeling van waterkeringen (bepaling van inundatierisico).

Voor beweegbare waterkeringen moet, naast de kans op overslag van water over de kering of het bezwijken van de constructie, ook de kans dat de kering niet of niet op tijd gesloten is worden meegenomen. Het falen van het sluitingsproces van een beweegbare waterkering kan enerzijds veroorzaakt worden door het falen van het bewegingswerk of anderzijds door menselijk falen. In dit onderzoek is onderzocht hoe voor een willekeurige beweegbare waterkering de betrouwbaarheid van het sluitingsproces kwantitatief bepaald kan worden.

Door de weinig frequente sluiting van veel waterkeringen is er geen permanente bemanning aanwezig. Het oproepen en in paraatheid brengen van alle betrokkenen veroorzaakt een relatief groot aandeel in kans op falen van het sluitingsproces. Bij de watersnoodramp in 1953 is achteraf gebleken dat relatief veel waterkeringen niet op tijd gesloten waren, onder meer doordat de sleutel kwijt was of doordat men niet op de hoogte was van komend hoogwater [Slager, 1992].

In dit onderzoek zijn verschillende methoden gezocht om de betrouwbaarheid van verschillende factoren in het sluitingsproces te kwantificeren. De resultaten van dit onderzoek worden gebruikt om het TAW model te verbeteren. Met name is onderzocht hoe menselijk falen gekwantificeerd kan worden.

Sluitingsprocedure

In de literatuur is weinig geschreven over de bijdrage van menselijk falen ten opzichte van technisch falen het proces van waterkeren. Het proces van waterkeren is vergeleken met industriële processen zoals nucleaire, chemische of luchtvaart industrie, waarbij al veel onderzocht is omtrent probabilistische veiligheids-analyses. Het grote verschil tussen de genoemde processen en het sluitingsproces van een waterkering zit hem in de continuïteit van de processen.

Onderzoek

Allereerst is een algemene sluitingsprocedure geanalyseerd. De verschillende communicatie lijnen tussen bemanning, functionaris en ontvanger zijn vastgelegd. Van deze algemene sluitingsprocedure is een foutenboom opgezet. Onderaan deze foutenboom staan alle basisgebeurtenissen die kunnen bijdragen aan het niet (tijdig) sluiten van de waterkering. In de foutenboom is iedere keer onderscheid gemaakt tussen menselijk falen en technisch falen.

Om van alle gebeurtenissen in de foutenboom kwantitatief de bijdrage aan het falen van de kering te bepalen zijn twee methoden toegepast.

-Expert meningen.

Omdat de experts, die meerdere keren een sluitingsprocedure hebben doorlopen, het best inzicht hebben in het verloop van een sluitingsprocedure is de methode m.b.v expert meningen toegepast.

Experts is gevraagd voor iedere afsplitsing in de foutenboom de percentuele bijdrage van de afgesplitste takken te schatten. Ook de betrouwbaarheid omtrent ieder gegeven antwoord moest gegeven worden. De kans op de topgebeurtenis, het niet (tijdig) gesloten zijn van de waterkering, is exact gevraagd. Voor afhankelijke gebeurtenissen is de mate van afhankelijkheid gevraagd.

De experts waren de bemanning en functionaris van verschillende soorten waterkeringen, van een eenvoudige coupure in Noord Holland, tot de stormvloedkering in de Oosterschelde.

Aan de hand van deze enquête kan voor iedere ondervraagde kering kwantitatief de bijdrage van de verschillende basisgebeurtenissen aan het falen van de kering bepaald worden.

De gevraagde onzekerheid over de gegeven antwoorden is gebruikt om de antwoorden van experts van een kering gewogen te middelen.

Door ook de gevraagde kans op de topgebeurtenis in de berekeningen mee te nemen kan voor iedere basisgebeurtenis de kans op falen worden bepaald. De onzekerheids marges geven minimum en maximum kansen.

-Kwantificatie m.b.v. THERP

Ter vergelijking van de methode met expert meningen is ook de bekende THERP methode toegepast. Voor alle basisgebeurtenissen die te maken hebben met menselijk handelen is de faalkans bepaald met behulp van het THERP handboek (HEP waarden) [Swain and Guttman, 1983]. In dit handboek, gebruikt voor nucleaire processen, worden voor verschillende handelingen de faalkansen gegeven met een error factor. Voor technische basisgebeurtenissen zijn andere bronnen gebruikt [TAW, 1992].

Resultaten

De resultaten van de methode met expert meningen zijn vergeleken met de resultaten van de THERP methode en de resultaten van de al eerder uitgevoerde betrouwbaarheidsanalyses [TAW, 1993] van keringen.

Met behulp van de methode met expert meningen wordt een goed overzicht verkregen van de verhoudingen tussen menselijk falen en technisch falen.

Voor verschillende menselijke handelingen, met name het nemen van beslissingen, worden door de experts faalkansen geschat die niet verwaarloosbaar zijn. Terwijl in andere betrouwbaarheidsanalyses voor deze menselijke handelingen geen faalkansen wordt gerekend.

De faalkansen geschat met de THERP methode zijn voor vrijwel alle handelingen een stuk groter dan volgens andere schattingen (experts).

De resultaten van dit onderzoek kunnen gebruikt worden om het TAW model aan te passen.

Het blijkt dat tussen verschillende analyses de bepaalde faalkansen voor verschillende gebeurtenissen onderling afwijken.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	7
Samenvatting	9
Gebruikte afkortingen	15
H1 Inleiding	17
1.1 Algemeen	17
1.1.1 Voornaamste begrippen	20
1.2 Formulering betrouwbaarheidseis	21
1.3 TAW model	23
1.4 Doelstelling	23
1.5 Opbouw rapport	24
H2 Beschrijving sluitingsproces beweegbare waterkering	25
2.1 Inleiding	25
2.2 Fasering sluitingsprocedure	25
2.3 Handelingen en beslissingen	29
2.4 Opmerkingen t.a.v. procedure	31
H3 Vergelijking sluitingsproces met andere processen	33
3.1 Beschrijving betrouwbaarheidsfactoren verschillende processen	33
3.2 Vergelijking processen	38
H4 Menselijk gedrag en menselijke betrouwbaarheid	39
4.1 Inleiding	39
4.2 Veiligheid en Risico	41
4.2.1 Bepaling van veiligheid en risico	42
4.3 Menselijk gedrag en menselijk falen	43
4.4 Psychologische factoren	47
4.5 Oorzaken en vermindering van menselijke fouten	51
4.6 Kwantificering van de waarschijnlijkheid van fouten	55
4.7 Gegevens	56
4.8 Probabilistic Safety Assessment	56
4.9 Bespreking van de belangrijkste HRA methoden	58
4.9.1 Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)	58
4.9.2 Success Likelihood Index Method (SLIM)	61
4.9.3 Human Cognitive Reliability (HCR)	62
4.10 Beperkingen van HRA	63
4.11 Huidige ontwikkelingen in HRA	63
H5 Onderzoek betrouwbaarheid sluitingsproces	65
5.1 Inleiding	65
5.2 Foutenboom	66
5.3 Definities	74
5.4 Expert meningen	81
5.5 THERP methode	85
5.6 Beschrijving systemen onderzochte keringen	86

H6 Expert meningen	91
6.1 Expert meningen algemeen	91
6.2 Opzet enquête	92
6.3 Sociaal verslag	93
6.3.1 Voorbereiding en afname enquête	93
6.3.2 Verwerking enquêtes	93
6.3.3 Onzekerheidsmarges	94
6.4 Uitslagen	96
6.5 Bespreking resultaten	98
6.5.1 Algemeen	98
6.5.2 Persoonlijke basisgebeurtenissen	98
6.5.3 Technische basisgebeurtenissen	101
6.5.4 Afhankelijkheden	102
6.5.5 Bepaling onzekerheid geschatte kans	103
6.6 Conclusies en evaluatie	104
H7 Bepaling van de faalkansen mbv de THERP methode	107
7.1 Achtergronden THERP methode	107
7.2 Bepaling faalkansen	108
7.2.1 Algemeen	108
7.2.2 Faalkans bepaling per basisgebeurtenis	110
7.4 Resultaten	121
7.5 Ervaring met de THERP methode	124
7.6 Conclusies	125
H8 Vergelijking betrouwbaarheidsanalyses	127
8.1 Vergelijking tussen de methode met expert meningen en de THERP methode	127
8.2 Vergelijking technische en persoonlijke gebeurtenissen	130
8.3 Vergelijking tussen verschillende betrouwbaarheidsanalyses	132
8.3.1 Toepassing TAW ² model op kering in Den Oever	135
8.3.2 Toepassing TAW-analyse op kering in Den Oever	137
8.4 Vergelijking tussen de verschillende betrouwbaarheidsanalyses voor de Oosterschelde kering	139
8.4.1 Toepassing TAW model Oosterschelde kering	140
8.5 Conclusies naar aanleiding van de vergelijkingen van de onderzoeken	142
H9 Conclusies en aanbevelingen	143
Literatuur	147

De bijbehorende bijlagen zijn apart gebundeld.

Bijlage A	Een beschrijving van het TAW model.
Bijlage B	Schattingsboom welke is gebruikt voor de methode met expert meningen en de THERP methode. Beschrijving basisgebeurtenissen, schematische weergave van de afhankelijke basisgebeurtenissen.
Bijlage C	Enquête
Bijlage D	Uitslagen enquête
Bijlage E	Grafische resultaten enquête
Bijlage F	Resultaten THERP methode

Gebruikte afkortingen

HCR	Human Cognitive Reliability
HEP	Human Error Probability
HRA	Human Reliability Analysis
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PSF	Performance Shaping Factor
SLIM	Success Likelihood Index Method
SVSD	Stormvloedwaarschuwingdienst
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction

H1 Inleiding

Dit hoofdstuk begint met een introductie van de risico analyse van het sluitingsproces van een waterkering. Vervolgens wordt het doel en het kader van dit onderzoek besproken, waarna de indeling van dit rapport volgt.

1.1 Algemeen

In, op en nabij waterkeringen is een grote verscheidenheid aan waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies aanwezig. De kunstwerken (coupures, sluizen etc) zijn nodig om bepaalde utilitaire kruisingen (met (water)wegen) mogelijk te maken onder behoud van de waterkering. De bijzondere constructies (kademuren, keermuren, kleppenkeringen) zijn nodig om de waterkering in bijzondere omstandigheden voldoende veiligheid te garanderen.

Waterkerende kunstwerken en bijzondere waterkerende constructies kunnen ook ingezet worden om waterkeringen zodanig te versterken dat tegemoet gekomen wordt aan de wens om landschap, natuur en cultuur volwaardig mee te wegen. Een kleppenkering kan bijvoorbeeld een deel van de dijk vervangen, waardoor een historisch stadsgezicht bewaard blijft.

De kunstwerken en bijzondere constructies zijn soms zelf ook waardevol uit oogpunt van cultuurhistorie, natuur of landschap.

Beweegbare waterkeringen kunnen worden onderverdeeld in vier hoofdtypen.

Te weten:

- * Altijd gesloten
In alle gevallen is er sprake van een gesloten afsluitmiddel. Dit betreft schutsluizen, waarbij de voor het schutproces gebruikte afsluitmiddelen voldoende hoogwaterkerend zijn.
- * Te openen op aanvraag
De afsluitmiddelen zijn in beginsel gesloten, en worden uitsluitend op aanvraag geopend. Dit betreft onder andere spuisluisen, inlaatsluizen en sommige keersluizen.
- * Te sluiten bij hoogwater
De afsluitmiddelen staan in beginsel open, en worden uitsluitend bij hoogwater gesloten. Dit betreft onder andere kleppenkeringen, stormvloedkeringen, de meeste keersluizen, coupures, afsluitbare duikers en schutsluizen met aparte hoogwaterdeuren. De voor het schutproces gebruikte afsluitmiddelen zijn niet (voldoende) hoogwaterkerend.
- * Te sluiten bij calamiteit
De afsluitmiddelen zijn in beginsel ook bij hoogwater open, en worden uitsluitend in het geval van een calamiteit gesloten. Dit betreft onder andere pijpleidingkruisingen en tunnels.

Dit onderzoek beperkt zich tot het derde type: 'te sluiten bij hoogwater'. Bij de overige typen is de betrouwbaarheid van het afsluitmiddel van minder belang voor het waterkerend vermogen van het kunstwerk.

De kunstwerken dienen bij ontwerp, beheer en onderhoud te voldoen aan de veiligheidseisen van de waterkering. Om na te gaan of een constructie (bestaand, in ontwerp of in uitvoering) aan de primaire eis, het bieden van voldoende veiligheid van het achterland, voldoet, kan men een betrouwbaarheidsanalyse uitvoeren waarbij rekening gehouden wordt met alle situaties die zich gedurende de vastgestelde referentieperiode kunnen voordoen. Men dient zich hierbij een beeld te vormen van alle belastingen en bedreigingen, faalmechanismen en grenstoestanden die een rol kunnen spelen. Dit geldt voor alle onderdelen.

Een faalmechanisme is de opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot een grenstoestand.

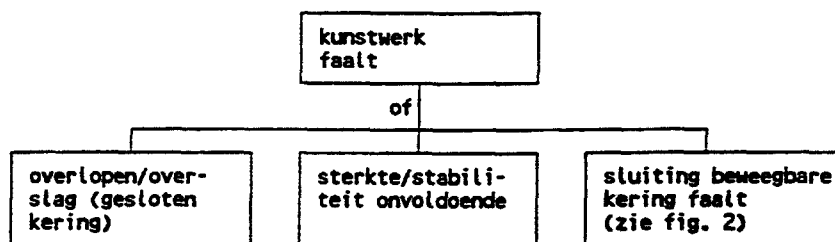
Een grenstoestand is de situatie op de grens tussen aanvaardbaar en onaanvaardbaar. Overschrijding van een grenstoestand houdt in principe falen in. In het geval van waterkerende constructies heeft falen de inundatie van het achterliggende gebied tot gevolg.

Een belangrijk hulpmiddel bij het uitvoeren van een betrouwbaarheidsanalyse is de foutenboom. Dit is een schematische weergave van oorzaken die aanleiding kunnen geven tot falen van een bepaald systeem. De topgebeurtenis van de foutenboom is 'een bepaalde ongewenste situatie', bijvoorbeeld 'inundatie van het achterland'. In de takken van de boom wordt aangegeven via welke ketens van gebeurtenissen de betreffende topgebeurtenis kan ontstaan. Hiermee worden de diverse onderdelen van het systeem met hun (deel)mechanismen op systematische wijze in kaart gebracht [TAW, aug 1994].

Als men de betrouwbaarheid van een dijkkring wil weten, om het inundatierisico van het omsloten gebied te kunnen bepalen, dient de betrouwbaarheid van alle afzonderlijke onderdelen van de dijkkring bekend te zijn. Zo ook van een beweegbaar kunstwerk.

In de hoofdfoutenboom van een kunstwerk onderscheidt men drie hoofd-faalmechanismen (Figuur 1.1).

- Overlopen/overslag bij gesloten kering;
- Sterkte/stabiliteit onvoldoende;
- sluiting beweegbare kering faalt.



Figuur 1.1 Hoofdfoutenboom kunstwerk

In deze studie wordt uitsluitend ingegaan op het hoofdfaalmechanisme 'beweegbare kering faalt'. De foutenboom van het 'hoofdfaalmechanisme beweegbare kering faalt' ziet er als volgt uit.

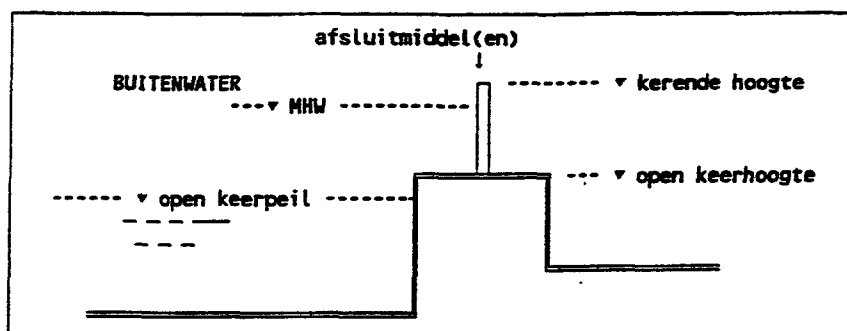


Figuur 1.2 Foutenboom voor 'sluiting beweegbare kering faalt'

De beweegbare waterkering faalt indien de buitenwaterstand plus waakhoogte hoger is dan de drempelhoogte en indien het afsluitmiddel niet gesloten is. De drempelhoogte is gedefinieerd als de kerende hoogte bij geopend afsluitmiddel.

1.1.1 Voornaamste begrippen

In figuur 1.3 zijn de voornaamste hoogtematen in een figuur weergegeven [TAW, aug 1994].



Figuur 1.3 Dwarsdoorsnede over de kering met de voornaamste hoogtematen

De voornaamste begrippen uit figuur 1.3 worden hieronder kort toegelicht

Buitenwaterstand

De buitenwaterstand is de waterstand die door het kunstwerk, zijnde een onderdeel van de primaire waterkering, moet worden gekeerd.

Dijktafelhoogte

Met de dijktafelhoogte wordt de benodigde kerende hoogte van het gesloten kunstwerk bedoeld, in verband met het mechanisme 'overlopen/overslag'. In de ontwerppraktijk wordt de dijktafelhoogte berekend als het Maatgevend Hoogwater, vermeerderd met de benodigde waakhoogte.

Drempelhoogte

De drempelhoogte is gedefinieerd als de kerende hoogte bij geopend afsluitmiddel. De kerende hoogte bij geopend afsluitmiddel hoeft niet in alle gevallen gelijk te zijn aan de drempelhoogte van het te beschouwen kunstwerk zelf. Om een voorbeeld te noemen: in het geval van een keersluis met een achterliggende binnenhaven, kan de kadehoogte van de binnenhaven als de drempelhoogte worden aangehouden.

Faalpeil

Het faalpeil is de buitenwaterstand waarbij, met geopende kering, juist wel falen van de waterkering optreedt.

Falen

Onder falen van het kunstwerk wordt verstaan: overschrijding van het toelaatbare overloop-overslag debiet. In deze studie wordt alleen het falen van het sluitingsproces bestudeerd: te omschrijven als het niet of te laat gesloten zijn van de kering bij hoogwater.

Normfrequentie

De normfrequentie is de overschrijdingsfrequentie van Maatgevend Hoogwater. Deze is per dijkkring vastgelegd in de Wet op de Waterkering.

Openingspeil

Bij een actuele waterstandsonderschrijding van het openingspeil wordt de kering geopend.

Waakhoogte

Onder de waakhoogte wordt in deze studie verstaan: 'de minimaal vereiste waakhoogte plus een overhoogte in verband met de relatieve zeespiegelrijzing' (voor zover niet verwerkt in de buitenwaterstand).

Voorts wordt er een onderscheid gemaakt tussen de waakhoogte bij geopende kering en de waakhoogte bij gesloten kering:

- De benodigde waakhoogte bij geopende kering is samen met de drempelhoogte bepalend voor het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten. Bij de vaststelling van deze waakhoogte zal een afweging gemaakt moeten worden tussen enerzijds de gevolgschade bij en geopende kering en anderzijds de consequenties van een hogere drempel.
- De kruinhoogte die behoort bij de minimaal benodigde waakhoogte bij gesloten kering wordt aangeduid als dijktafelhoogte.

De foutenboom wordt verder uitgebreid in hoofdstuk 5.

1.2 Formulering betrouwbaarheidseis

De actuele faalkans van een beweegbare kering wordt enerzijds bepaald door het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten en anderzijds door de kans op het niet tijdig gesloten zijn van de afsluitmiddelen, per vraag:

$$P_{fa} = n_j \cdot P_{ns} \quad (1.1)$$

Met:

- P_{fa} = actuele faalkans kunstwerk t.g.v. een falend afsluitmiddel (faalkans/jaar)
 n_j = het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten (vragen/jaar)
 P_{ns} = kans op niet sluiten, gegeven noodzaak (faalkans/vraag)

Het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten is gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van de buitenwaterstand die, vermeerderd met de waakhoogte juist gelijk is aan de drempelhoogte. In formulevorm is deze frequentie bepaald door:

$$n_j = N(h_{dr} \leq h + w \leq h_{dk}) \quad [\text{vragen/jaar}] \quad (1.2)$$

met

- n_j = aantal vragen per jaar (-)
 N = overschrijdingsfrequentie van de buitenwaterstand
 h = buitenwaterstand (m t.o.v. NAP)
 w = waakhoogte (m)
 h_{dr} = drempelhoogte bij geopend afsluitmiddel (m t.o.v. NAP)

h_{dk} = dijktafelhoogte bij gesloten afsluitmiddel (m t.o.v. NAP)

De waakhoogte is afhankelijk van de buitenwaterstand evenals van de geometrie van het kunstwerk en bij geopend afsluitmiddel in voorkomende gevallen ook van het achterliggende waterkeringsysteem.

De kans op het niet tijdig sluiten van de afsluitmiddelen P_{ns} volgt uit een betrouwbaarheidsanalyse van het sluitingsproces van een waterkering.

De actuele faalkans P_{fa} moet kleiner of gelijk zijn aan de toelaatbare faalkans. De voorwaarde luidt:

$$P_{fa} \leq \xi_{ns} \cdot f_{norm} \quad (1.3)$$

met

P_{fa}	actuele faalkans kunstwerk t.g.v. een falend afsluitmiddel (faalkans/jaar)
ξ_{ns}	= faalruimte-factor voor sluiting
f_{norm}	= normfrequentie [1/jaar]

De waakhoogte is, evenals de waterstand, een stochastische variabele. Omdat de variaties in de waakhoogte klein zijn wordt deze vervangen door de deterministische waarden bij het faalpeil en bij MHW (Maatgeven Hoogwater) [TAW, 1995].

In deze studie wordt nader ingegaan op de bepaling van de kans op niet sluiten van de waterkering P_{ns} .

1.3 TAW model

Door projectgroep TAW-D6 wordt een leidraad samengesteld 'waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies'. Bij het opstellen van deze leidraad zijn studies gedaan naar constructieve en probabilistische aspecten van kunstwerken en objecten in, op en nabij waterkeringen. In bijlage 3 van deze leidraad [TAW, 1995] staat een standaard beoordelingsmethode aangegeven voor de betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie P_{ns} (zie hiervoor bijlage A).

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) adviseert, gevraagd en ongevraagd, het Ministerie van Verkeer en Waterstaat over alle technisch-wetenschappelijke aspecten van constructie en onderhoud van waterkeringen evenals over de veiligheid van door waterkeringen beschermde gebieden.

Bij de sluitingsoperatie van waterkerende constructies is de invloed van menselijk handelen meestal zeer groot. Het is de mens die beslist aan de hand van hoogwatervoorspellingen of een kering moet sluiten. De sluitingsoperatie zelf wordt ook door de mens ingezet.

Het is dus van groot belang voor de juistheid van het TAW model dat er goed inzicht is in menselijk handelen en menselijk falen. Tot nu toe is binnen de Civiele Techniek nog weinig aandacht besteed aan het aspect van menselijk falen.

Er is in het TAW model niet uitgegaan van een model voor een specifieke kering. Het TAW model is opgezet als algemeen model. Bij het onderzoek wordt hier ook van uitgegaan. Dit houdt in dat het model niet alleen toepasbaar moet zijn voor het ver geautomatiseerde sluitingsproces van de Waterkering in de Nieuwe Waterweg, maar ook voor bijv. een coupure die standaard met schotbalken gedicht moet worden evenals voor gemaalsluizen.

1.4 Doelstelling

Doel van dit onderzoek is om meer inzicht te verkrijgen in menselijk falen en in de bijdrage van het menselijk handelen op de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van een beweegbare waterkering.

Hiernaast is het de bedoeling om de betrouwbaarheid van het sluitingsproces verder te analyseren en te vergelijken met bestaande betrouwbaarheidsanalyses en met het TAW model. De resultaten van het onderzoek kunnen gebruikt worden om het TAW model te verbeteren.

Het onderzoek richt zich, zoals al eerder gesteld, op alle soorten beweegbare waterkeringen.

1.5 Opbouw rapport

Het rapport is in drie delen opgedeeld.

Inleidende gedeelte

De inleiding, hoofdstuk 1, waarin het kader van het onderzoek en de doelstelling naar voren komen.

Een beschrijving van het sluitingsproces van een beweegbare waterkering volgt in hoofdstuk 2. Hierin staan beschreven de verschillende fasen in het sluitingsproces, de betrokken personen en de waterpeilen.

Hoofdstuk 3 beschrijft industriële processen in vergelijking tot het sluitingsproces van een waterkering. Er is onderzocht bij welke processen veel aandacht wordt besteed aan betrouwbaarheid van het proces en aan menselijk falen. Deze processen zijn vergeleken met het sluitingsproces van een waterkering.

In hoofdstuk 4 wordt verslag gedaan van een literatuurstudie naar menselijk gedrag en menselijk falen. Gekeken is naar wat er in andere vakgebieden bekend is over menselijk gedrag en de kwantificering van menselijke falen.

Onderzoeksgedeelte

De opzet van het uitgevoerde onderzoek volgt in hoofdstuk 5. De foutenboom voor het falen van de sluitingsprocedure, deze in paragraaf 1.2 weergegeven, is verder uitgewerkt. De gebruikte methoden om de gebeurtenissen in de foutenboom te kwantificeren worden uitgelegd.

In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de eerste methode 'de methode met behulp van expert meningen' en de uitslagen van de uitgevoerde methode en de resultaten.

In hoofdstuk 7 wordt de tweede methode 'de THERP methode' besproken.

Afsluitend gedeelte

In hoofdstuk 8 zijn de resultaten van de twee methoden vergeleken. Deze resultaten zijn ook vergeleken met de resultaten van toepassing van het TAW model en de resultaten van enkele eerder uitgevoerde betrouwbaarheidsanalyses.

Het rapport besluit in hoofdstuk 9 met conclusies en aanbevelingen. Aan de hand van de in hoofdstuk 8 beschreven vergelijking met andere analyses worden aanbevelingen gedaan.

Aan het begin van het hoofdrapport bevindt zich een lijst met veel gebruikte afkortingen, achter in dit hoofdrapport een lijst met referenties.

H2 Beschrijving sluitingsproces beweegbare waterkering

In dit hoofdstuk wordt het sluitingsproces van een beweegbare waterkering beschreven. Hierin komen de verschillende fasen in het sluitingsproces aan de orde. Tevens wordt er ingegaan op de taken van de betrokken personen. De sluitingsprocessen voor de verschillende soorten keringen vertonen globaal beschouwd overeenkomsten. In detail zijn er overal veel verschillen te onderscheiden.

2.1 Inleiding

In dit onderzoek wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van een keersluis. Het moge duidelijk zijn dat, gezien de grote variëteit aan keersluizen in deze studie, niet alle sluitingsprocessen hetzelfde zijn. Alhoewel er altijd overeenkomstige kenmerken zijn in de sluitingsprocessen, kunnen zich ook grote verschillen tussen de verschillende processen voordoen. Voor de behandeling van dit sluitingsproces is gebruikt gemaakt van de aanbevelingen voor sluitingsprocedures zoals deze gegeven zijn in het basisrapport van de TAW aangaande dit onderzoek (TAW, juni 1994).

Onder beweegbare waterkeringen wordt verstaan:

- permanent bemande waterkeringen,
- niet permanent bemande waterkeringen die indien onbemand voldoende waterkerend zijn,
- permanent bemande waterkeringen die onbemand onvoldoende waterkerend zijn.

2.2 Fasering sluitingsprocedure

In sluitingsprocedures zijn vaak drie fasen te onderscheiden:

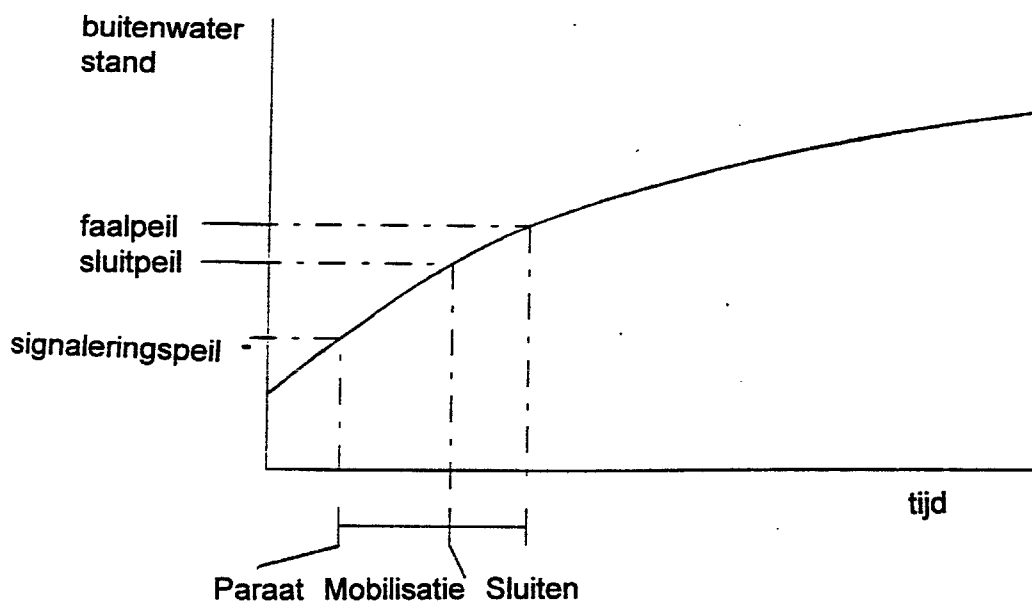
- waarschuwingfase,
- mobilisatiefase,
- sluitingsfase.

Tussen de waarschuwingfase en de mobilisatiefase komt in sommige gevallen apart nog de paraatheidsfase voor. In andere gevallen is deze fase onderdeel van de waarschuwing- en (of) mobilisatiefase.

Beslissingen omtrent het starten van de procedure en het overgaan naar een volgende fase zijn gerelateerd aan verwachte of actuele overschrijdingen van vooraf vastgestelde buitenwaterstanden. Hiervoor worden verschillende peilen gehanteerd:

- het signaleringspeil,
- het sluitpeil,
- het faalpeil.

In figuur 2.1 zijn deze peilen nader toegelicht.



Figuur 2.1 Waterstandsverlooptlijn met de voornaamste peilen [TAW, juni 1994]

Het signaleringspeil is een gedefinieerde stand van verhoogd water die ter plaatse van een beweegbare waterkering wordt gemeten of daar kan worden verwacht. Het signaleringspeil heeft in eerste instantie een waarschuwende functie voor de bedieners van de beweegbare waterkering. Bij een overschrijding van het signaleringspeil gaat de mobilisatiefase in en wordt het bedienend en beslissend personeel in staat van paraatheid gebracht.

Het sluitpeil is een gedefinieerde stand van verhoogd water die ter plaatse van een beweegbare kering wordt gemeten. Wanneer de waterstand het sluitpeil heeft bereikt wordt de waterkering door de bedieners gesloten. Voordat het sluitpeil wordt bereikt dient de waterkering te zijn bemand.

Het faalpeil is een gedefinieerde stand van verhoogd water die ter plaatse van een beweegbare kering wordt gemeten en die in het geval van een geopende kering zou leiden tot overschrijding van het toelaatbare overslag debiet over de kering. De waterkering dient te zijn gesloten voordat het faalpeil wordt overschreden.

De keuze van het signaleringspeil en het sluitpeil is enerzijds afhankelijk van het faalpeil en de verwachte stijgsnelheid van het buitenwater, anderzijds van de tijdsduur die gemoeid is met het doorlopen van de verschillende fasen in de sluitingsprocedure. Deze tijdsduur is sterk afhankelijk van het aantal en de typen beweegbare waterkeringen, de bereikbaarheid van de waterkering en andere omstandigheden (die van geval tot geval zeer uiteenlopend kunnen zijn).

In de sluitingsprocedure van een kering moet het voor die bepaalde kering geldend signaleringspeil, sluitpeil en faalpeil aangegeven worden. Met name bij niet permanent bemande keringen die onbemand niet voldoende waterkerend zijn is het van belang een tijdige paraatheid van de bemanning te bewerkstelligen in geval van komend hoogwater.

Een (bij voorkeur) continu bezette meld-regelkamer dient de waarschuwing met betrekking tot de verwachte hoogwaterstanden te bewerkstelligen.

In figuur 2.2 is schematisch een sluitingsprocedure weergegeven.
Deze procedure onderscheidt de volgende betrokken partijen:

- Ontvanger,
- Bemanning Waterkering,
- Functionaris Centrale Post,
- Centrale Post,
- Instantie en derden,
- Storingsdienst.

De Ontvanger is een instantie die 24 uur per dag, elke dag in de week, operationeel is. Hij ontvangt de actuele of verwachte waterstand, en start de fase van paraatheid indien het signaleringspeil bij een beweegbare waterkering wordt overschreden. De ontvanger dient altijd bereikbaar te zijn.

Een dergelijke instantie treft men bijvoorbeeld aan in een continu bezette meld-regelkamer van een waterschap of gemeente en een alarmcentrale van de politie of brandweer.

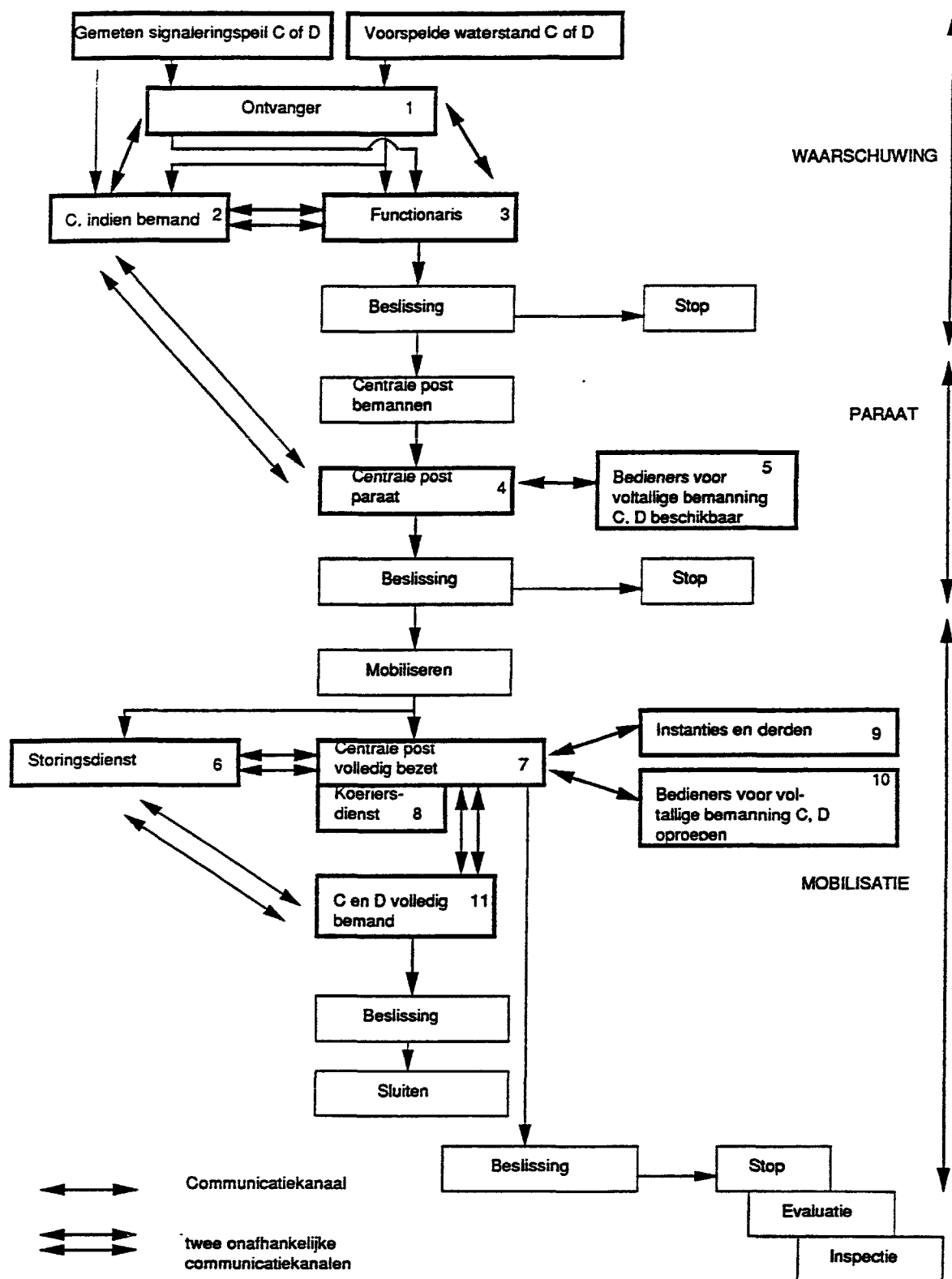
De Bemanning Waterkering is verantwoordelijk voor de waterstandssignalering ter plaatse van de waterkering, evenals voor het uitvoeren van de sluiting van de waterkering.

Bij onbemande waterkeringen dient de bemanning te worden opgeroepen. Bij bemande waterkering zal in sommige gevallen een tweede bediener moeten worden opgeroepen.

De Functionaris Centrale Post is een werknemer, bevoegd om de waterkering door de Bemanning Waterkering te laten sluiten. Hij kan tevens de waarschuwingsfase in het organisatie-schema sluitprocedure beëindigen zonder verder actie te hebben ondernomen. Functionaris is bijvoorbeeld het hoofd van een waterschapsdistrict of de chef van een technische dienst bij een waterschap of gemeente.

De Centrale Post is verantwoordelijk voor en coördineert de sluitingsoperatie vanaf het ingaan van de fase van paraatheid. Alleen de Centrale Post heeft de bevoegdheid de fase van mobilisering te beëindigen. Na afloop evalueert de Centrale Post de mobilisatiefase en laat de waterkeringen inspecteren. De Centrale Post wordt bemand door personen met functies vergelijkbaar met die van dijkgraaf, havenmeester, en chef van technische diensten in waterschap of gemeente. Als lokatie van de Centrale post kan men denken aan een districtskantoor van een waterschap of een centrale meldkamer van een waterschap of gemeente. Instanties en derden kunnen een burgemeester, de politie, een hulpdienst of een particulier aannemingsbedrijf zijn waarmee een contract is afgesloten voor de situatie van mobilisatie.

De Storingsdienst kan maatregelen treffen om eventuele storingen te verhelpen. De Storingsdienst is, naast de Centrale Post, ook bereikbaar voor de Bemanning Waterkering.



Figuur 2.2 Sluitingsprocedure beweegbare kering [Heins en Baaijens, 1992]

2.3 Handelingen en beslissingen

De beslissingen en handelingen zoals zij in figuur 2.2 zijn weergegeven worden hieronder kort beschreven [TAW, juni 1994].

1. Gemeten signaleringspeil door Bemanning Waterkering (indien aanwezig).
Indien de waterkering permanent bediend wordt, of als de waterkering, bij afwezigheid van bedienend personeel, gesloten en voldoende hoogwaterkerend is, kan het signaleringspeil ter plaatse worden gemeten door de Bemanning Waterkering.
2. Waarschuwing Ontvanger door Bemanning Waterkering (indien aanwezig).
De Bemanning Waterkering geeft de ontvanger direct na meting van het signaleringspeil de hoogte hiervan door.
3. Gemeten/voorspeld signaleringspeil bij de Ontvanger.
Wanneer de waterpeilmeter ter plaatse van de waterkering het signaleringspeil meet wordt een automatische melding daarvan naar de Ontvanger gestuurd (bevestiging dat de voorspelde waterstand het signaleringspeil heeft bereikt).
Dit gebeurt bijvoorbeeld door middel van een signaallamp of een alarmbel in een meldkamer van de Ontvanger.
4. Waarschuwing Bemanning Waterkering door de Ontvanger.
De Bemanning Waterkering (indien aanwezig) wordt onmiddellijk na ontvangst van het signaleringspeil daarvan op de hoogte gebracht door de Ontvanger, ofwel krijgt een signaal via de waterpeilmeter ter plaatse wanneer de werkelijke waterstand het signaleringspeil zal heeft bereikt.
5. Waarschuwing Functionaris Centrale Post door de Ontvanger en de Bemanning Waterkering (indien aanwezig).
Een Functionaris van de Centrale post of zijn plaatsvervanger wordt onmiddellijk na ontvangst van het signaleringspeil op de hoogte gebracht door de Ontvanger. De Bemanning Waterkering meldt, wanneer zij op de waterkering aanwezig zijn, aan de Functionaris de ontvangst van de verwachte waterstand, afkomstig van Ontvanger. Wanneer de melding uitblijft neemt de Functionaris contact op met de Bemanning Waterkering. In de communicatie tussen de Bemanning Waterkering en de Functionaris wordt de laatstgenoemde op de hoogte gehouden van het verloop van de werkelijke waterstand.
6. Signaleringspeil wordt overschreden (Functionaris Centrale Post).
Indien het signaleringspeil wordt overschreden, kan de Functionaris beslissen om de centrale Post in paraatheid te brengen door bepaalde personen op te roepen om zich naar de Centrale Post te begeven. De verantwoordelijkheid voor de verdere sluitingsoperatie gaat in dat geval van de Functionaris naar de Centrale Post.
Indien de Functionaris beslist om de waarschuwingsfase te beëindigen, stelt hij de Ontvanger en de Bemanning Waterkering (indien aanwezig) hiervan op de hoogte.
7. Bemannen Centrale Post, door oproep van Functionaris Centrale Post.

De Centrale Post wordt volledig bemand. Aanbevolen wordt om in deze fase de communicatiekanalen tussen de Centrale Post en de Bemanning Waterkering te testen, en eventuele storingen hierin te verhelpen.

8. **Waarschuwen Bemanning Waterkering door Centrale Post.**
De aanwezige bemanning op de waterkeringen krijgt van de Centrale Post inlichtingen omtrent het ingaan van de fase van paraatheid. Voorzover aanvullende bediening noodzakelijk is voor de sluiting van de waterkering, wordt deze door de Centrale Post gewaarschuwd zich beschikbaar te houden voor een eventuele voltallige bemanning van de waterkering.
9. **Overschrijding sluitpeil verwacht (Centrale Post).**
Op de Centrale post beraadt men zich op eventuele verdere actie. De criteria die hierbij een rol spelen zijn behalve de voorspelde en gemeten waterstanden, het waargenomen verloop van het water en andere lokale (weers)omstandigheden. De Centrale post kan besluiten tot beëindiging van de fase van paraatheid, waarvan elke bemande waterkering op de hoogte wordt gesteld. Wanneer de Centrale Post besluit de organisatie te mobiliseren worden de waterkeringen (indien bemand) ingelicht.
10. **Volledig bemannen waterkering, oproep Centrale Post.**
Voorzover noodzakelijk voor de sluiting, wordt de waterkering volledig bemand. Reeds aanwezige bemanning wordt van de mobilisatie op de hoogte gesteld door de Centrale post.
Het is denkbaar dat aan de oproep in de praktijk niet kan worden voldaan, bijvoorbeeld in geval van een coupure in een woning. In dit geval kan het nodig zijn dat de Centrale post uit eigen gelederen het personeel levert dat de coupure tijdig en veilig kan sluiten.
11. **Terugmelding Bemanning Waterkering naar Centrale Post.**
De groepen bedieners melden hun aankomst op de waterkering aan de Centrale Post.
12. **Vorbereiding sluiting door Bemanning Waterkering.**
De Bemanning Waterkering treft de voorbereiding voor een veilige sluiting van de waterkering. Hieronder verstaat men o.a.: het ontsteken van de mechanisch en handmatige bedieningsinstallaties en het testen van bedieningsinstallaties op hun bruikbaarheid.
13. **Waarschuwen Instanties/Derden en Storingsdienst door Centrale Post.**
Door de Centrale Post worden de bij een eventuele sluiting betrokken instanties en derden gewaarschuwd. Tevens wordt de Storingsdienst gemeld dat zij zich beschikbaar moet houden.
14. **Overschrijding sluitpeil (Centrale Post en Bemanning Waterkering).**
Wanneer de waterstand het lokale sluitpeil van de waterkering bereikt, wordt de kering in ieder geval gesloten of dient deze reeds gesloten te zijn. In alle andere gevallen kan de waterkering alleen worden gesloten in overleg tussen de Centrale post en de bedieners van de waterkering.
15. **Sluiten van de waterkering door Bemanning Waterkering.**
De Bemanning Waterkering sluit de kering.

16. **Controle sluiting door Bemanning Waterkering en/of Centrale Post**
Aanbevolen wordt om direct na overschrijding van het sluitpeil te controleren of de kering daadwerkelijke gesloten is. Dit kan bijvoorbeeld door een terugmelding van de Bemanning Waterkering naar de Centrale Post, of door inspectie door de Centrale Post. De sluitingsfase dient te zijn beëindigd voordat het faalpeil wordt overschreden.

2.4 Opmerkingen t.a.v. procedure

Voor iedere keersluis dient een procedure te zijn opgemaakt, die procedureel vastgelegd is. Een procedure moet zodanig zijn dat deze snel en duidelijk het te verlopen proces weergeeft. Alle mogelijke situaties dienen hierin beschreven te zijn.

Bij bestudering van de sluitingsprocessen van keersluizen tijdens de watersnoodramp van 1953 is gebleken dat deze niet allemaal juist zijn verlopen, gezien het grote aantal keersluizen dat niet gesloten was [Slager, 1992]. Ook toen waren er reeds procedures opgezet. Maar door afwezigheid van de bevoegde personen, de sleutels of door onwetendheid zijn niet alle keringen gesloten. Het blijkt moeilijk een procedure zodanig op te zetten dat deze, indien noodzakelijk, gegarandeerd tot sluiting leidt.

Aangezien bepaalde (nood)situaties onder omstandigheden van hoogwater zelden voorkomen verdient het aanbeveling zulke situaties te oefenen. Daarvoor zijn scenario's nodig en voldoende deelneming vanuit de organisatie voor het operationele beheer en de bediening van de waterkeringen.

Bij een dergelijke simulatie oefening kunnen eventuele organisatorische en procedurele tekortkomingen door ondervinding aan het licht worden gebracht. Hierdoor is het mogelijk de procedure aan te passen aan de bevindingen van de operators.

Een nadeel van simulatiespelen is dat zij omslachtig en tijdrovend zijn, veel voorbereiding vereisen, en alleen onder leiding van een gespecialiseerd team goed kunnen worden uitgevoerd.

Een andere negatieve kant is de weinig frequente noodzakelijke sluiting van de waterkering. Hierdoor zal de noodzaak tot training door de operators relatief onbelangrijk worden geacht. Het besef dat het noodzakelijk is om te trainen om duidelijkheid omtrent de verantwoordelijkheid van de diverse betrokkenen dient bij deze personen voldoende aandacht te krijgen.

De informatievoorziening door middel van communicatiemiddelen op of bij de beweegbare waterkering behoeft speciale aandacht. Een telefoonverbinding alleen is niet voldoende.

Waterstanden van de Stormvloedwaarschuwingdienst en lokaal gemeten waterstanden dienen te worden ontvangen door een continu bezette meld-regelkamer.

Het aantal te waarschuwen instanties en personen door (de centrale post van) een gemobiliseerde organisatie tijdens verwacht hoogwater is bij voorkeur zo beperkt mogelijk. Terugmelding aan de organisatie dat de waarschuwingen zijn verzonden en ontvangen is gewenst [Heins en Baaijens, 1992].

Voor iedere kering is de invulling door de genoemde betrokken partijen verschillend. Ook de hoeveelheid tijd, benodigd voor sluiting en de tijdsduur tussen het signalerings- en sluitpeil, verschilt per kering. De handelingen, die verricht moeten worden voor de daadwerkelijke sluiting, hangen direct af van het soort waterkering (automatisch, handmatig, deuren, schotbalken etc.) In

de procedure dient duidelijk vermeld te worden waar alle voor de sluiting benodigde onderdelen zich bevinden en wie deze beheert.

H3 Vergelijking sluitingsproces met andere processen

Om de betrouwbaarheid van het functioneren van de sluitingsprocedure van een keersluis te kunnen bepalen is allereerst gekeken naar andere industriële processen waarbij al veel onderzoek gedaan is naar de betrouwbaarheid en veiligheid van het proces. Vervolgens is gekeken in hoeverre deze processen vergelijkbaar zijn met het sluitingsproces van een keersluis. Veiligheidsberekeningen worden op steeds meer gebieden gedaan om de risico's te kunnen bepalen. In de inleiding zijn al genoemd de vliegprocessen en de nucleaire processen. Ook op andere gebieden wordt gekeken naar betrouwbaarheid van de procesbediener.

3.1 Beschrijving betrouwbaarheidsfactoren verschillende processen

verkeersprocessen

Er zijn verschillende verkeersprocessen zoals autorijden, varen, vliegen.

Al deze processen hebben met elkaar gemeen dat de veiligheid van het verkeersproces in meer of mindere mate afhankelijk is van de betrouwbaarheid van de andere weg-, water- of luchtgebruikers.

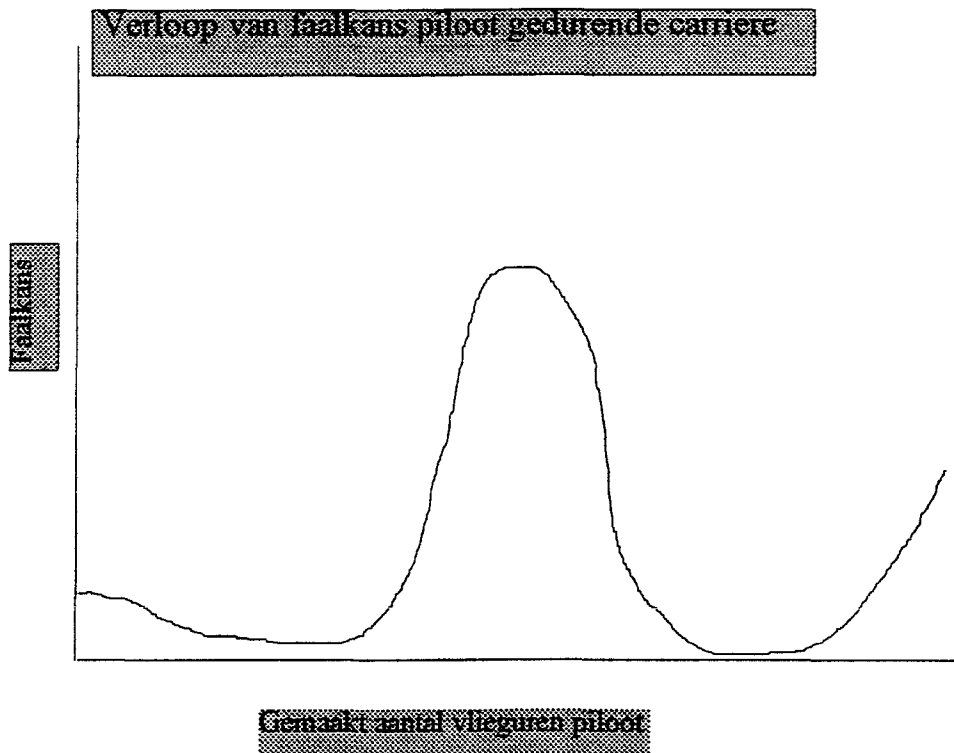
Het systeem, boot, auto of vliegtuig verplaatst zich in een ruimte waarbinnen nog andere soortgelijke systemen zich verplaatsen.

Om de betrouwbaarheid van één van deze processen te bepalen moet zowel de veiligheid van het systeem zelf (vervoermiddel en bestuurder) als de betrouwbaarheid van de omringende systemen die zich in de buurt van het systeem bevinden bestudeerd worden.

De verminderde veiligheid van een proces als gevolg van omringende bewegende systemen wordt als een externe betrouwbaarheids verminderende factor beschouwd. Allereerst wordt dus de veiligheid van één systeem (vervoermiddel en bestuurder) bepaald. Vervolgens moet, om de veiligheid van het systeem bij vervoer tussen de omringende systemen, de veiligheid met een factor verlaagd worden. De factor is voornamelijk afhankelijk van de hoeveelheid omringende systemen.

De betrouwbaarheid van de bestuurder is grotendeels afhankelijk van de ervaring van de bestuurder. In de luchtvaartindustrie is onderzoek gedaan naar het verloop van de betrouwbaarheid van een piloot gedurende zijn carrière.

In figuur (3.1) is het verloop van de betrouwbaarheid van een piloot uitgezet tegen het aantal vliegingen dat hij gemaakt heeft.



Figuur 3.1 Verloop betrouwbaarheid piloot gedurende zijn carrière

Een piloot begint met zijn carrière na een opleiding. Na verloop van tijd heeft hij meer vliegen gemaakt en wordt hij steeds betrouwbaarder. Een aantal jaren later wordt het 'macho' gedrag en misschien ook de verveling van de piloot steeds groter. De betrouwbaarheid van de piloot neemt af. Tot op gegeven moment de piloot een grote (bijna) fout maakt, met soms grote gevolgen. De betrouwbaarheid van de piloot is nu groter dan ooit.

Aan het eind van de carrière begint de ouderdom van de piloot een rol te spelen en neemt de betrouwbaarheid af.

De meeste vliegtuigongelukken vallen binnen de grote piek van onbetrouwbaarder vlieggedrag door 'macho gedrag'.

Exacte gegevens omtrent dit onderzoek worden niet gepubliceerd daar dit het vertrouwen in de vliegtuigindustrie schade kan berokkenen [Stassen, 1995]. Het gedrag van een piloot zal ook van toepassing zijn op bestuurders van andere voertuigen. Op het vliegproces en het loodsproces wordt hieronder nader ingegaan.

Vliegproces

Piloten genieten in de huidige maatschappij hoog aanzien. Ze worden verantwoordelijk geacht voor het veilige verloop van een vliegreis. De techniek is inmiddels zover dat met behulp van een automatische piloot de aanwezigheid van een piloot overbodig gemaakt kan worden in een vliegtuig. Daar velen dit onveilig achten, en verwacht wordt dat men dan niet meer in een vliegtuig durft te stappen, wordt dit niet gedaan.

Het vliegproces kan gezien worden als een heel geautomatiseerd proces.

Een piloot geniet tijdens zijn opleiding veel training. Ook na zijn opleiding wordt hij geacht een minimaal aantal vluchten (T per tijdseenheid) zelf uit te voeren. De overige vluchten gebeuren met de automatische piloot, echter wel onder aanwezigheid van een piloot.

De proces frequentie voor een piloot is een paar maal per week.

De acties van een piloot kunnen als skill-based en rule-based worden gezien.

Communicatie gebeurt, gezien het internationale karakter, gestandaardiseerd. Vaste zinnen, die herhaald moeten worden, geven weer welke acties ondernomen gaan worden.

Aan de veiligheid van het vliegproces wordt veel aandacht geschonken. Zeker na ongelukken die in de media uitvoerig besproken zijn. Ongelukken veroorzaken in de meeste gevallen ook veel slachtoffers. Hierdoor is het verantwoordelijkheidsgevoel van een piloot groot. Hij weet dat hij verantwoordelijk is voor alle personen die in het vliegtuig zitten.

Volgens Wagenaar worden systemen zodanig ontworpen dat menselijke fouten onoverkomelijk zijn. 'Waar ik bezwaar tegen heb is dat als mensen iets fout doen, ze de schuld krijgen, terwijl je van tevoren weet dat ze nu eenmaal één op de duizend keer een fout maken. Als daar alles van afhangt, weet je dus dat er een keer een groot ongeluk gebeurt. En de reden dat het gebeurt is niet dat die mens zo slecht is en dus gestraft moet worden, maar dat als je mensen als essentiële veiligheidscomponent in een systeem opneemt, je dat risico van een ramp hebt ingebouwd. De planners, de ontwerpers van zulke systemen zijn de 'oorzaak' van de ongelukken.' [Wagenaar, 1994]

De grootste ramp uit de luchtvaart op 27 maart 1977 bevestigt de stelling van Wagenaar. Op die datum botste op het vliegveld Los Rodeos van het Spaanse eiland Tenerife in mistig weer een startende KLM-jumbo op een over de startbaan taxiënde PanAm-jumbo. Wagenaar: 'Je mag in de luchtvaartcommunicatie één vraag tegelijk stellen, zodat je weet dat het antwoord alleen op die vraag kan slaan.' Daar ging het fout. De eerste officier (co-piloot) van het KLM-vliegtuig zei tegen de verkeersleiding dat de KLM-jumbo klaar was om te starten en vroeg -tegen de regel in- tegelijk om een uitvliegprocedure. De verkeersleiding gaf de KLM clearance voor de uitvliegprocedure, maar niet voor het opstijgen zelf. De KLM-vlieger las even later de uitvliegprocedure ter bevestiging voor aan de verkeersleidingen en sloot af met de mededeling dat de start nu was begonnen. De verkeersleiding begon terug te spreken met 'OK..' maar de rest van die zin ging verloren doordat PanAm er doorheen praatte -hetgeen ook tegen de regels is.

Wagenaar wijst op wat hij noemt de 'kwetsbaarheid van het logisch redeneren.' De KLM-gezagvoerder wist weliswaar dat behalve zijn eigen vliegtuig ook een PanAm-jumbo over dezelfde startbaan moest taxiën, maar de verkeersleiding had al geruime tijd geleden aan PanAm opgedragen de startbaan via 'de derde afslag' te verlaten. Onder normale omstandigheden zou dat ook allang zijn gebeurd. Het PanAm-vliegtuig reed echter de bedoelde afslag voorbij omdat de bocht te scherp was voor zo'n groot vliegtuig. De bemanning was bovendien pas gaan tellen bij de tweede afslag, omdat de eerste door geparkeerde vliegtuigen was geblokkeerd. Door de mist was dat vanuit de verkeerstoren niet te zien. Ook de PanAm bemanning paste een 'logische redenering' toe die onjuist bleek te zijn.

Dat dit kon gebeuren heeft de KLM-gezagvoerder, al logisch redenerend, niet kunnen voorzien.

PanAm interrumpeerde de dialoog tussen de verkeerstoren en het KLM-vliegtuig, omdat het in de mist de afslag van de startbaan niet kon vinden. Wagenaar: 'De KLM-gezagvoerder leidde uit het 'OK' ten onrechte af dat hij voor beide acties, de uitvliegprocedure en de start zelf, toestemming had. Dat is de kern van de zaak.' Was die KLM-gezagvoerder dus slecht opgeleid? Nee. 'Als het overtreden van communicatievoorschrift tot zo'n grote ramp kan leiden, moet je naleving ervan niet van mensen laten afhangen [Wagenaar, 1994]

Dit voorbeeld geeft aan dat in de luchtvaart, ondanks de procedures en de vele training, fouten onvermijdelijk zijn. Volgens Wagenaar zijn menselijk fouten wel te voorkomen, door de techniek het werk te laten doen.

Het is de vraag of dit altijd mogelijk is, en tegen welke prijs.

Loodsproces

In de loodswereld, speelt ervaring een heel belangrijke rol. Een loods wordt opgeleid door veel ervaring op te doen (minimaal 12 jaar). Na jaren lang als matroos en stuurman ervaring opgedaan te hebben, kan in vier praktijkjaren het loodsvak aangeleerd worden.

Een loods communiceert direct met de stuurman aan boord van een schip. Vanaf de kant wordt, zeker bij slecht zicht, informatie gegeven over naderende schepen etc.

De kunst van een loods is commando's te geven aan de stuurman op het schip, zonder daarbij enige onzekerheid te tonen. Bij hartslagmetingen is wel degelijk stress op te merken bij gevaarlijke manoeuvres, maar dit mag niet merkbaar zijn voor de stuurman.

Door de vele ervaring moet de loodsman in vrij korte tijd (gemiddeld loodst hij in zo'n 3 uur een schip een haven binnen) de eigenschappen (motorkracht, stuurvermogen) van een schip te weten komen en op 'gevoel' het schip de haven in loodsen.

De risico's bij aanvaringen zijn niet alleen materieel. Gezien de aard van de inhoud kan ook schade aan het milieu en kunnen ook menselijke slachtoffers mogelijk zijn.

De korte tijd om een schip de haven binnen te loodsen, de beperkte ruimte en de moeilijke manoeuvreerbaarheid van de schepen gecombineerd met de grote risico's geven een loodsman veel werkdruk.

Het loodsgedrag is skill based, gezien de vele ervaring, maar zeker ook knowledge based.

Nucleaire processen

In de nucleaire wereld is veel geautomatiseerd. Alhoewel niet in alle landen evenveel aandacht wordt besteed aan veiligheid is men er inmiddels wel van doordrongen dat veiligheid veel aandacht vergt. Recente rampen, zoals in Tsjernobyl, Three Mile Island, geven aan dat er wel degelijk een kans is op grootschalige gevolgen veroorzaakt door fouten in (de uitvoering van) nucleaire processen.

De moeilijkheid bij deze processen is dat het voor een operator moeilijk blijft continu inzicht te behouden in het proces. Aan de hand van signalen, die de operator ontvangt via zijn monitor en andere indicatoren, moet hij vaak binnen beperkte tijd bepalen of het een loos alarm is ofwel dat er actie ondernomen dient te worden. Het nut van goede procedures is bij deze processen groot. Het is de kunst procedures zodanig te maken dat ze volledig zijn, en alle mogelijke situaties omvatten, en dat ze gebruiksvriendelijk zijn. Wie kent niet het probleem van een nieuw huishoudelijk apparaat, waarbij de gebruiksmogelijkheden zo omvangrijk zijn en ook zo onduidelijk beschreven zijn in de gebruikershandleiding (procedure) dat de mogelijkheden van het apparaat al snel niet volledig benut kunnen worden. Denk aan instelbare videorecorders, magnetrons etc.

Operators zijn dagelijks, vaak in shifts aanwezig, en voeren dus ook dagelijks handelingen uit. Hun gedrag is enerzijds skill-based, met het bekende gevaar van het indrukken of vergeten in te drukken van een knop. Anderzijds is hun gedrag rule-based. Bij bepaalde signalen behoren bepaalde handelingen uitgevoerd te worden, die in procedures beschreven staan. Ook het knowledge-based gedrag kan hier aan de orde zijn in weinig voorkomende situaties, wanneer een situatie eerst onderkend moet worden en vervolgens de nodige acties 'bedacht' moeten worden.

Problemen die bij nucleaire processen spelen zijn die van de behandeling van loze alarmen. Een teveel aan loze alarmen leidt tot onachtzaamheid. Getracht wordt om valse alarmen zo weinig mogelijk te doen voorkomen, echter dit mag niet (teveel) leiden tot het niet detecteren van een echt alarm.

Sluitingsproces beweegbare waterkering

Het sluiten van een keersluis komt slechts sporadisch voor. Frequenties variëren van 5 X per jaar tot 0.1 X per jaar. Het probleem dat hierbij optreedt is dat ervaring vaak moeilijk te verkrijgen is. Training gebeurt vaak frequenter (gemiddeld 1 à 2 x per jaar), maar het probleem is dat oefening niet altijd serieus genomen wordt, gezien de kleine kans op de werkelijke noodzaak tot sluiten.

Het sluitproces bestaat voornamelijk uit het nemen van beslissingen communiceren. De uiteindelijke sluitingsverrichting neemt maar een heel klein deel van het sluitingsproces in beslag. Communicatie is zeker niet standaard, gezien de weinig frequente uitvoering van de sluitingsprocedure. Het probleem dat hierbij ontstaat is dat van het risico op onduidelijke communicatie, onduidelijk begrepen informatie etc.

Een groot aantal keersluizen is niet permanent bemand. De keersluiswachter moet na het krijgen van een waarschuwing naar zijn post om zich gereed te maken voor eventuele sluiting. In Slager [Slager, 1992] is te lezen dat hierbij ook de nodige problemen op kunnen treden met betrekking tot de toegang tot de keersluis (sleutels die weg zijn, schotbalken die niet te vinden zijn etc.) Het zou getuigen van naïviteit om te denken dat dit nooit meer voor zou komen.

Het gedrag waarbinnen de beslissing tot sluiten genomen wordt zou rule-based moeten zijn; aan de hand van gegeven voorspellingen wordt de beslissing tot wel of niet sluiten genomen. Ookwel is hier sprake van knowledge-based gedrag, waarbij zelf voorspellingen gedaan worden. De uiteindelijke sluitingshandeling is rule-based, volgens de procedures, en gedeeltelijk skill-based.

De verantwoordelijkheid voor de gehele sluitingsprocedure is voor iedere keersluis anders geregeld. De verantwoordelijkheid voor het sluiten zelf ligt bij de bemanning van de keersluis. De verantwoordelijkheid voor de sluitingsprocedure, de beslissing tot sluiting ligt bij de daarvoor aangestelde functionaris. Een juiste afstemming in de sluitingsprocedure moet de juiste communicatie tussen de verschillende verantwoordelijken waarborgen. Daar er vele soorten keersluizen zijn met grotere en kleinere belangen, met grote en kleine afmetingen, met veel of weinig automatisering is het niet mogelijk in het algemeen een oordeel te geven over de verantwoordelijkheid van de verschillende betrokkenen in het kader van deze betrouwbaarheidsstudie.

Met de sluiting van een waterkering gaan vaak belangen-tegenstellingen gemoeid. Het Havenbedrijf Rotterdam, welke voor bepaalde keersluizen (Leuvekeersluis, Boerengatsluis [Heins en Baaijens, 1992]) de verantwoordelijkheid heeft over de bediening, heeft ook te maken met scheepvaartbelangen. Bij sluiting moet de scheepvaart worden stil gelegd, wat uiteraard nadelig is voor de transportwereld. Bij de Waterkering Nieuwe Waterweg heeft de stremming van de scheepvaart bij sluiting grote gevolgen voor deze doorgaans belangrijke vaarroute.

Bij de verschillende soorten keersluizen en procedures is ook de betrokkenheid van de verantwoordelijken niet overal gelijk. Zeker ook gezien de verschillende soorten bemanning (permanent of niet-permanente bemanning).

Ook bij het sluitingsproces van een waterkering is het bij verkeersprocessen beschreven effect van omringende systemen van toepassing. Het juist sluiten van een kering is afhankelijk van het gedrag van de passerende schepen. Een aanvaring van een schip of een vastgelopen schip ter plaatse van de kering heeft tot gevolg dat de kering überhaupt niet kan sluiten.

3.2 Vergelijking processen

Belangrijke factoren voor de verschillende besproken processen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Proces Factoren	Vliegproces	Nucleaire proces	Loodsproces	Keersluisproces
Frequentie	Dagelijks	Dagelijkse handelingen	Dagelijks	Jaarlijks
Communicatie	Standaard vast- gelegd	Standaard	Ervaring	Onervaren; niet standaard (zeker bij niet permanente bemanning)
Stress niveau	In nood geval- len hoog	In nood geval- len hoog	Hoog	??
Verantwoordelijk- heidsgevoel	Groot	Groot	Groot	??
Automatisering	Veel	Veel	Matig	Veelal weinig
Training/ erva- ring	Veel	Veel	Veel	Veelal weinig

Zoals in bovenstaande tabel beschreven wijkt het sluitings-proces van een keersluis in vele opzichten af van de andere genoemde processen. Het grote verschil zit in de frequentie van voorkomen en de weinige ervaring die dit met zich meebrengt. Het aantal noodsituaties in een jaar kan voor een kering gelijk gesteld worden aan het aantal sluitingen per jaar. Voor de andere processen is het heel goed mogelijk dat het aantal noodsituaties veel kleiner is dan het aantal noodsituaties bij waterkeringen. Wat het aantal noodsituaties betreft hoeft de frequentie van voorkomen voor een kering helemaal niet lager te zijn dan voor andere processen.

Ook het verschil in automatisering is van belang. Voor een groot aantal keringen verloopt de sluitingsprocedure weinig geautomatiseerd.

De kennis die opgedaan is bij onderzoek naar de betrouwbaarheid van nucleaire- en vliegprocessen is niet zonder enige vorm van aanpassing te gebruiken voor het sluitingsproces van een keersluis. Bij toepassing van de kennis van betrouwbaarheid van systemen op het sluitingsproces van een waterkering zal het grote verschil in frequentie van voorkomen en ervaring een belangrijke verandering in de betrouwbaarheidsbepaling opleveren.

H4 Menselijk gedrag en menselijke betrouwbaarheid

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op menselijk gedrag en menselijk falen, waar veel onderzoek naar gedaan is. Ik heb contact gelegd met dhr W.A. Wagenaar, verbonden aan de vakgroep functieleer van de faculteit voor Psychologie in Leiden. Met de kennis, opgedaan uit de psychologie, heb ik voor verschillende industrieën bekeken wat er bekend is over de invloed van menselijk gedrag op de betrouwbaarheid van de uitgevoerde processen, waar bij een aantal industrieën al onderzoek naar gedaan is. Hieruit zijn verschillende methoden ontwikkeld om menselijke betrouwbaarheid voor verschillende soorten handelingen te kwantificeren.

4.1 Inleiding

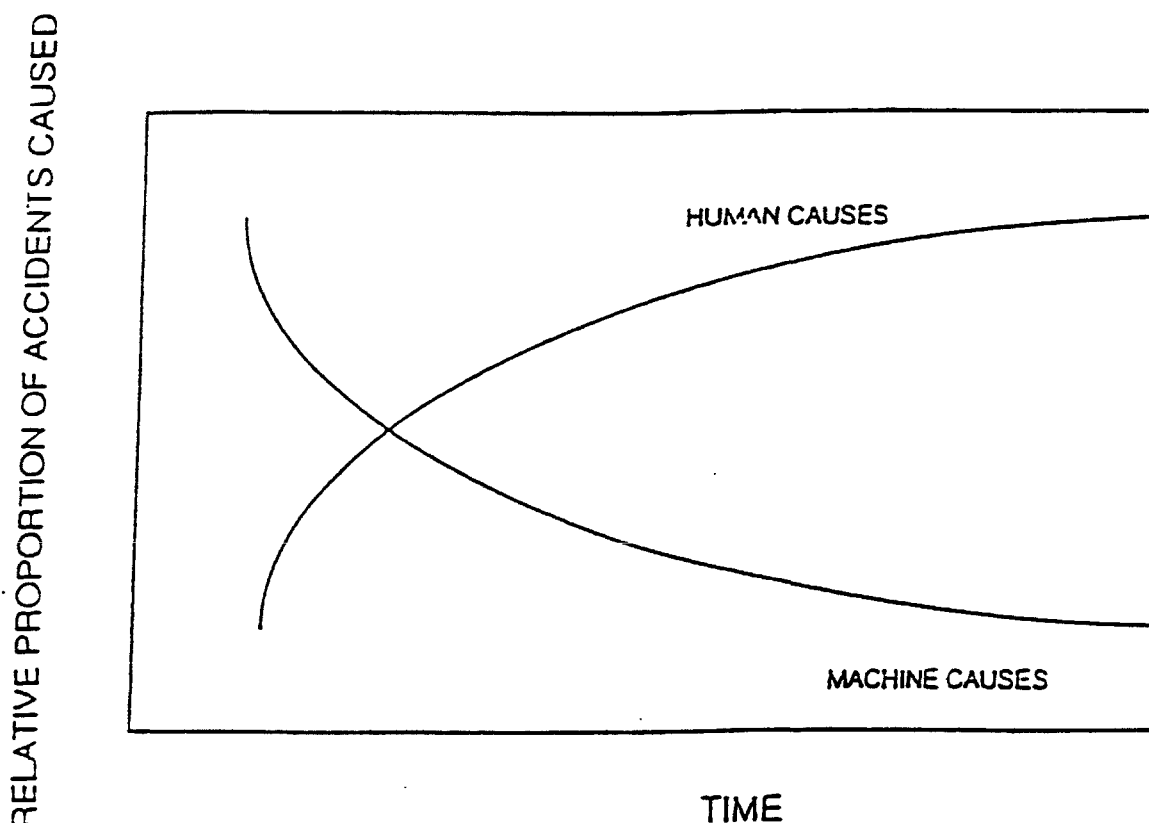
In de huidige maatschappij blijkt de mens in staat zeer ingewikkelde systemen te maken. Zo zijn er kerncentrales gebouwd die in energiebehoefte voorzien en vliegtuigen gemaakt die honderden mensen de wereld over brengen. Deze systemen brengen de maatschappij op een hoger welvaarts-niveau.

Echter, deze systemen dragen ook grote risico's met zich mee. Als er iets fout gaat in het systeem, kunnen de gevolgen zeer ernstig zijn. De laatste decennia zijn er verschillende ongelukken gebeurd, die aangeven dat de risico's die grote systemen met zich mee brengen niet verwaarloosd mogen worden. Recente voorbeelden van ongelukken zijn het vliegtuigongeluk op Tenerife (1977), het ongeluk bij de Three Mile Island kerncentrale (1979), de explosie van een chemische plant bij Bhopal in India (1984), de explosie van de kerncentrale bij Tsjernobyl (1986) en de Herald of Free Enterprise die bij Zeebrugge is gezonken (1987). Deze 'rampen' zijn allemaal voorbeelden van grote systemen waarbij een klein foutje grote gevolgen met zich meebrengt.

Het ongeluk bij Three Mile Island (1979) is wel aangeduid als de aanleiding tot onderzoek naar menselijk falen binnen processen.

Door de technologische ontwikkeling en de verregaande automatisering van de maatschappij, heeft het handelen van de mens in een bedrijf een heel ander belang gekregen. Het werk is meestal veranderd in indirect werk, waarbij de mens de machine opdrachten geeft. Het gaat hierbij om de interactie tussen mens en machine. De mens staat steeds verder van het 'productie' proces af doordat de machine een steeds grotere taak op zich neemt.

In figuur 4.1 is te zien dat de mens relatief gezien steeds vaker een ongeluk veroorzaakt. Deze stijging heeft twee oorzaken. Ten eerste doordat de staat van de automatisering is verbeterd. Ten tweede, als gevolg van de eerste oorzaak, doordat complexe systemen een overdaad aan hardware hebben. Hierdoor is de hardware betrouwbaarder geworden en is het aantal ongelukken door de mens veroorzaakt relatief groter.



Figuur 4.1 Ontwikkeling in veroorzakers van ongelukken [Peek, 1994]

Het voordeel van de machine boven de mens is dat hij sneller en effectiever werkt en bovendien ook minder fouten maakt. Een machine is programmeerbaar. Alhoewel men mensen probeert te trainen handelingen standaard uit te voeren, is de kans altijd aanwezig dat zij op een belangrijk moment verzuimen te handelen of onjuist handelen.

Het grote voordeel van de mens is echter dat hij kan denken en improviseren. Een machine heeft deze mogelijkheden niet.

Veiligheid is een veel besproken onderwerp geworden. Zeker in de nucleaire en vliegtuigindustrie. Maar ook in de civiele techniek, waar het gaat om risico's bij hoog water.

Het probleem dat ontstaat bij het ontwerpen van (risicovolle) industriële processen is dat het moeilijk blijkt menselijke betrouwbaarheid te bepalen. De kennis van de menselijke betrouwbaarheid is van belang voor het bepalen van de betrouwbaarheid van een systeem.

Dit hoofdstuk geeft inzicht in de aspecten die bij menselijk handelen van invloed zijn. Onderzocht is wat de mogelijkheden zijn om de kwalitatieve gegevens over menselijk handelen te 'vertalen' naar kwantitatieve gegevens. Verschillende technieken die gebruikt kunnen worden om menselijke betrouwbaarheid (kwantitatief) te bepalen zullen besproken worden.

Een lijst met veel voorkomende afkortingen behorende bij dit hoofdstuk is weergegeven aan het begin van dit rapport.

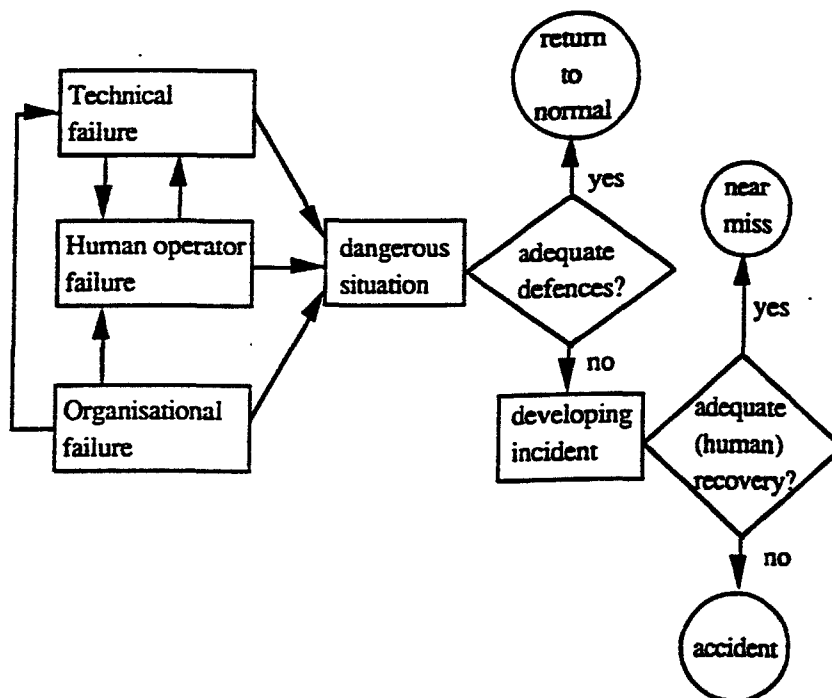
4.2 Veiligheid en Risico

Veiligheid en risico zijn twee belangrijke begrippen binnen betrouwbaarheidsstudies. *Risico* is gedefinieerd als 'waarschijnlijkheid x consequenties'. Het risico bij een kerncentrale is groot. De kans op een ongeluk (probability) is erg laag, maar de gevolgen zijn enorm.

Veiligheid is de tegenhanger van risico. Een definitie hiervan is moeilijk te geven. Volgens het woordenboek is veiligheid 'de vrijheid van risico of gevaar' [The Oxford minidictionary, 1981]. In de techniek wordt veiligheid meestal gebruikt als de getolereerde hoeveelheid risico.

Betrouwbaarheid wordt in deze studie gezien als 'het karakter van een systeem, of een onderdeel hiervan, uitgedrukt in de waarschijnlijkheid dat het een vereiste functie onder bepaalde omstandigheden uitvoert in een bepaald tijdsinterval.'

In figuur 4.2 is een schema weergegeven waarin duidelijk wordt wanneer er sprake is van bijna ongelukken (near misses).



Figuur 4.2 Een simpel model over het veroorzaken van ongelukken. [Schaaf, 1992]

In figuur 4.2 is duidelijk het onderscheid weergegeven tussen accident, incident en near miss.

Een incident wordt, afhankelijk van het wel of niet slagen van een (menselijke) herstel poging, een near miss (bijna ongeluk) of een accident (ongeluk).

Een *ongeluk* (accident) is gedefinieerd als een ongewilde gebeurtenis of opeenvolging van ongewilde gebeurtenissen, die leiden tot dood, verwondingen, ziekte, schade aan of verlies van eigendom. Indien een gebeurtenis of opeenvolging van gebeurtenissen geen ernstige gevolgen heeft is er sprake van een incident of *bijna ongeluk* (near miss).

Een ongeluk (accident) heeft wel gevolgen. Bij een bijna ongeluk zijn er geen gevolgen.

Voor de veiligheidsanalyses worden near misses, of bijna ongelukken ook geanalyseerd, daar deze meer informatie geven over de zwakke plekken in een systeem waar (echte) ongelukken kunnen optreden.

4.2.1 Bepaling van veiligheid en risico

In de waarschijnlijkheidsrekening kan men een objectieve en een subjectieve kansrekening onderscheiden. Volgens de objectivistische school is kans een zuiver wiskundig begrip, dat axiomatisch is gedefinieerd, of wordt gezien als de frequentie die een mogelijke uitkomst van een gebeurtenis kan hebben, wanneer het optreden van die gebeurtenis een groot aantal keren kan worden waargenomen. Een frequentistische kans is met andere woorden een maat voor de onzekerheid over hoe een toekomstige gebeurtenis of experiment zal uitkomen (state of matter). Deze onzekerheid kan alleen worden opgevat als een eigenschap van gebeurtenissen of experimenten in de wereld van de waarnemer. Men spreekt in dit verband dan ook van onzekere gebeurtenissen.

Volgens de subjectivistische school is onzekerheid geen eigenschap die men toekent aan gebeurtenissen in de wereld van de waarnemer. Onzekerheid is hier een gevolg van de onvolledigheid van de informatie die de waarnemer van gebeurtenissen heeft. Volgens deze zienswijze is de subjectieve kans een maat voor de onzekerheid die een individu zegt te willen verbinden van een mogelijke uitkomst van een toekomstige gebeurtenis (state of mind). Een individu kan zijn opinie over de uitkomsten van een gebeurtenis eventueel baseren en bijstellen naar aanleiding van beschikbare informatie uit het verleden, bijvoorbeeld in de vorm van kans als frequentie. In dit geval kan het individu, afhankelijk van de kwaliteit van de informatie, zijn subjectieve kansschatting wel of niet gelijk nemen aan de frequenties waarmee de uitkomsten van een herhaalde gebeurtenis in het verleden zijn opgetreden. Dat individuele kansschattingen in het licht van historische reeksen gebeurtenissen kunnen worden bijgesteld is in de subjectieve kansrekening het uitgangspunt om expert meningen te kalibreren [R.M. Cooke, 1989].

In berekeningen is de herkomst van kansen niet meer belangrijk, aangezien dezelfde rekenregels gelden voor zowel objectief als subjectief verkregen kanswaarden. Hierdoor is het mogelijk een risicoanalyse door te rekenen waarin beide soorten kansen worden gebruikt, bijvoorbeeld met behulp van de stelling van Bayes. In een Bayesiaanse risicoanalyse worden subjectieve kansschattingen voor uitkomsten van een gebeurtenis, de zogenaamde a priori kansen, herzien tot a posteriori kansen wanneer men over additionele informatie beschikt over de mogelijke uitkomsten. Dat wil zeggen dat men de frequentistische kans moet weten, de zogenaamde aannemelijkheidsfunctie, dat in het verleden de bedoelde informatie een juiste voorspelling van de uitkomsten heeft opgeleverd. De stelling van Bayes combineert de subjectieve a priori kans en de frequentistische aannemelijkheidsfunctie om de verbeterde a posteriori kans uit te rekenen.

Volgens Wickens [Wickens, 1992] wordt de beleving van risico door de mens beïnvloed door het aantal voorbeelden van risico gebeurtenissen die in het lange termijn geheugen wordt gevonden. Dit aantal gebeurtenissen wordt bepaald door de hoeveelheid publiciteit die de verschillende gebeurtenissen in de media krijgen, en door de persoonlijke ervaring. Iemand die veel vliegt en hierbij nog nooit gevaar heeft ondervonden zal vliegen een veilige manier van reizen vinden. Iemand die net die ene keer dat hij in een vliegtuig zat een vliegtuigongeluk meemaakte zal vliegen geen erg veilige manier van reizen vinden [Peek, 1994]. Sinds de watersnood van december 1993 en februari 1995 zullen vele Limburgers het Nederlandse rivieren gebied niet erg veilig meer vinden. Terwijl het gebied nog even veilig is als voor deze watersnoden.

4.3 Menselijk gedrag en menselijk falen

Het handelen van de mens in de verschillende dagelijks situaties kan volgens Rasmussen onderscheiden worden in drie *performance levels* [Rasmussen, 1974].

-*Skill-based level*, menselijk handelen wordt bepaald door opgeslagen patronen en voorgeprogrammeerde instructies. Fouten op dit niveau zijn gerelateerd aan de intrinsieke verscheidenheid aan mogelijkheden en tijdscoördinatie. Skill-based gedrag is routinematig en snel.

Voorbeelden van skill-based gedrag zijn: het openen van een deur, tanden poetsen, of autorijden.

-*Rule-based level*, menselijk handelen wordt bepaald door het oplossen van problemen welke aan regels is gebonden, van het type als (staat) dan (diagnoses). Veel skill-based gedrag was oorspronkelijk rule-based gedrag. Autorijden begint bij het bewust leren toepassen van procedures (rule based).

Na verloop van tijd wordt het schakelen, remmen en starten automatisch en dus skill-based gedrag. De regels hoeven niet altijd merkbaar toegepast te worden. De regels moeten goed werken en ze moeten onder de juiste omstandigheden worden toegepast. Aan autorijden zijn regels verbonden die willekeurig gekozen zijn (zoals rechts rijden), maar het is wel van groot belang dat iedereen zich gedraagt volgens dezelfde regels.

Fouten op rule-based niveau komen door foute classificatie van situaties welke leiden tot de toepassing van de verkeerde regels of de verkeerde procedures.

-*Knowledge-based level*, niveau waarop gehandeld wordt in situaties waarin de acties gepland moeten worden, hierbij wordt het bewustzijn en de kennis gebruikt. Fouten op dit niveau komen voor indien de verkeerde of te weinig kennis gebruikt wordt. Knowledge-based gedrag is de langzaamste van de drie genoemde gedragstypen. Het uitvoeren van handelingen op dit niveau vergt de meeste tijd. Knowledge-based gedrag is echter ook de meeste flexibele gedragsvorm, omdat hiermee zowel oplossingen uit bestaande principes gevonden kunnen worden als wel nieuwe plannen bedacht kunnen worden die weer ander problemen met zich mee brengen.

Een menselijke fout is een algemene term, bedoeld om alle gevallen aan te geven waarin voorgenomen activiteiten van mentale of fysieke aard niet leiden tot het beoogde resultaat. Deze fouten dienen niet te zijn veroorzaakt door tussenkomst van een verandering van doel [Reason, 1990]. Belangrijke begrippen in deze definitie zijn 'niet bereiken van het beoogde resultaat' en 'juiste omstandigheden'.

Door Swain en Moray wordt een tijdsbeperking, verbonden aan het slagen van een actie, toegevoegd. Het slagen van een actie is meestal gebonden aan het tijdbestek waarbinnen de actie moet hebben plaatsgevonden.

De volgende karakteristieken worden gebruikt voor het bepalen van menselijke fouten bij menselijke betrouwbaarheid:

- Ongewild resultaat
- Gegeven omstandigheden
- Binnen een bepaald tijdsbestek
- Taak of systeem valt buiten de geaccepteerde grens van capaciteit.

Reason, een door technici die zich bezig houden met menselijk handelen veel gelezen psycholoog, onderscheidt twee basis typen fouten [Reason, 1990]:

-*slips en lapses* zijn fouten die ontstaan door fouten in de uitvoering, ongeacht of het uitgevoerde plan tot het benodigde resultaat zal leiden. De acties worden niet volgens plan uitgevoerd. Een slip treedt op als een specifiek onderdeel van een gedragspatroon of vergeten wordt of in verwarring wordt gebracht door een ander gedragspatroon. Een knop van stand-by naar uit zetten in plaats van naar aan is een slip; vergeten een knop in te drukken in een hele serie van acties wordt een lapse genoemd. De intentie bij een slip is wel correct maar de uitvoering hiervan niet. Zulke fouten komen meestal voor als gevolg van gebrek aan specifieke aandacht aan belangrijke stappen in een actie. Slips worden vaak snel ontdekt omdat er verschil is tussen de verwachting van het resultaat van een actie en het werkelijke resultaat van deze actie.

-*Mistakes* zijn fouten in het besluitvormings- en/of beslisproces. Deze fouten komen voor in processen die de wijze waarop het doel bereikt moet worden bepalen. Het plan zelf leidt niet tot het bereiken van het doel. Bij mistakes is, in tegenstelling tot bij slips, de intentie niet juist. Deze fouten kunnen niet ontdekt worden door naar de onderdelen van het gedragspatroon te kijken.

Mistakes zijn vaak moeilijker te ontdekken, complexer en minder goed begrepen dan slips en lapses. Bij mistakes wordt onderscheid gemaakt tussen *rule-based mistakes* en *knowledge-based mistakes*.

Mistakes zijn fouten die gemaakt worden door fouten bij rule-based gedrag of bij knowledge-based gedrag. Slips en lapses zijn fouten die gemaakt worden bij skill-based gedrag.

Er zijn veel cognitieve modellen gemaakt om menselijk falen in een industrieel proces weer te geven. Het model dat Rasmussen gemaakt heeft (ladder) is een van de meest geaccepteerde cognitieve modellen onder analisten van menselijke betrouwbaarheid.

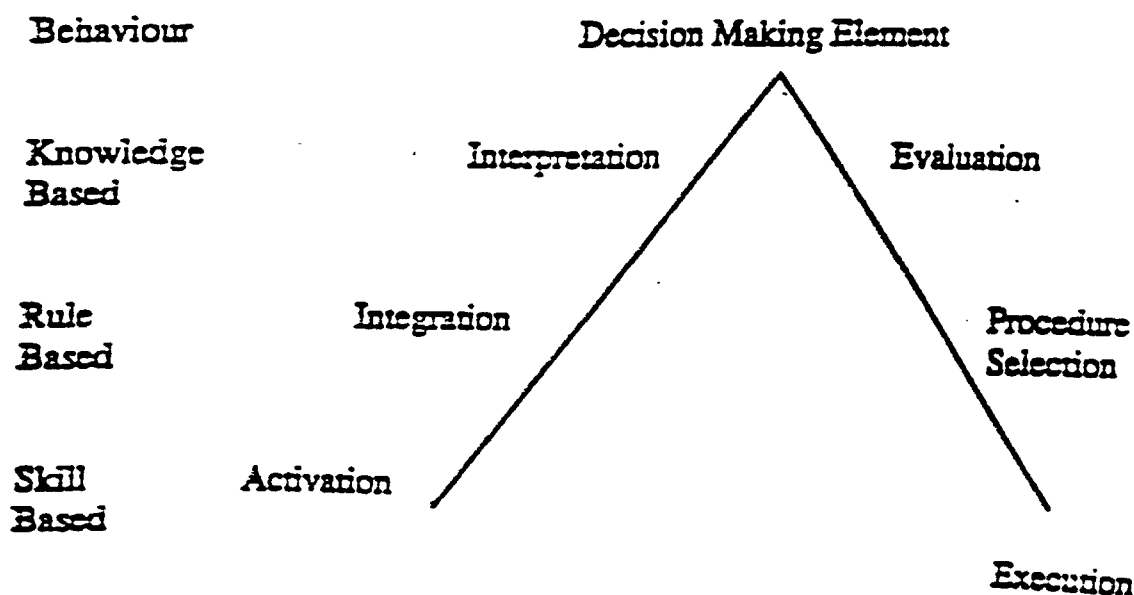
In het activerings stadium wordt de operator door middel van een patroon van symptomen (lampjes etc.) gewaarschuwd dat actie benodigd is. In de meeste gevallen, indien er sprake is van een ervaren operator, zullen deze signalen herkend worden als een bekend patroon welke door een bekend actiepatroon van de operator gevolgd wordt. De operator zal dus direct de acties, welke bij deze symptomen horen, uitvoeren. Deze actie is op skill-based niveau, om zijn bekende en geoefende karakter.

Als, zoals in sommige gevallen gebeurt, de symptomen niet onmiddellijk bekend worden verondersteld volgt er een proces van informatie verzamelen en de situatie overzien. Hierna wordt de te volgen procedure gekozen, ofwel met behulp van een procedure ofwel met het working memory van de operator. Deze fase wordt wel de integratie fase genoemd. Deze procedure wordt uitgevoerd om het gewenste resultaat te bereiken. Dit gedrag wordt Rule-based genoemd, daar het volgens een patroon van vastgestelde regels verloopt.

Indien, nadat de informatie vergaard is tijdens de integratie fase, geen diagnose gesteld kan worden en dus ook geen te volgen procedure gekozen kan worden volgens de regels, volgt er een knowledge-based gedrag. De operator kan niet meer op ervaring werken, maar moet een hypothese formuleren die voornamelijk gebaseerd is op basis van principes van de techniek, waarbij de meetwaarden van aanwezige apparatuur voor informatie moeten zorgen. Als uiteindelijk een interpretatie van de situatie gemaakt is, en een goede strategie is gemaakt om het gewenste doel te bereiken (bijv. een stabiele toestand) moet een procedure gekozen worden om dit doel te bereiken. Hierbij kunnen bestaande procedures gekozen worden of ook nieuwe procedures toegepast worden. Uiteindelijk zullen de procedures uitgevoerd worden, d.m.v. concrete acties.

De ladder volgens Rasmussen bestaat uit stappen, die al naar gelang de onbekendheid van de situatie allemaal gevolgd moeten worden. In de meeste gevallen zullen 'short cuts' gemaakt worden. Meestal zijn deze juist, maar ze kunnen in sommige situaties ook fouten veroorzaken.

In figuur 4.3 is de ladder volgens Rasmussen weergegeven.



Figuur 4.3 Ladder volgens Rasmussen, geeft het verband tussen de drie niveaus van probleem oplossend gedrag van mensen [Humphreys, 1988]

Door Reason [Reason, 1990] worden in navolging op Rasmussen fouten als volgt geclassificeerd (zie ook figuur 4.4):

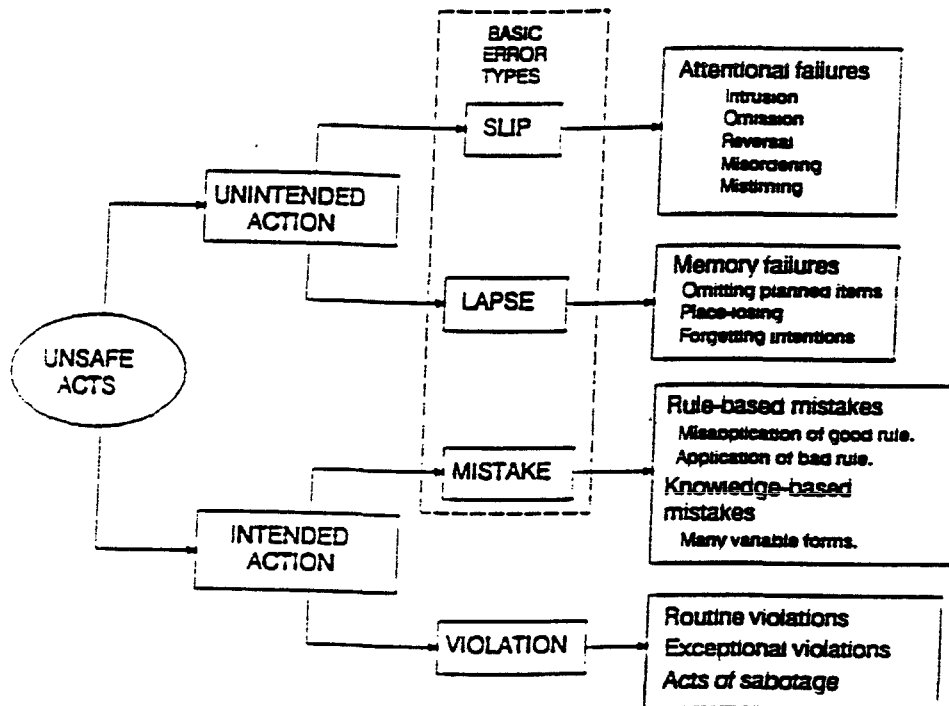
Een slip is een actie die niet wordt uitgevoerd volgens de intentie van de operator; het resultaat van een goed plan maar een onjuiste uitvoering hiervan.

Een lapse is het vergeten van een (onderdeel van) actie.

Een mistake is een fout in het besluitvormings proces.

Een violation is geen fout. Een violation is het opzettelijk (overdacht) afwijken van een procedure of geregelde uitvoering.

In maart 1994 verongelukte een Aeroflot vliegtuig als gevolg van een violation. Doordat de piloten tegen de regels in het vliegtuig door kinderen en passagiers lieten besturen. Violations hoeven niet altijd een slechte afloop te hebben. Harder dan 120 km per uur autorijden is ook een opzettelijke overtreding van de regels, maar het hoeft niet altijd tot ongelukken te leiden [Peek, 1994].



Figuur 4.4 De indeling in onveilige acties [Reason, 1991]

4.4 Psychologische factoren

Er is veel onderzoek gedaan naar de factoren die van invloed zijn op menselijk gedrag en menselijke fouten.

De operator die de verkeerde knop indrukt, kan beïnvloed zijn door veel factoren. Dit kan het aandachtsniveau van de operator zijn voor het indrukken van de knop, het welbehagen van de operator, wat de operator denkt dat de consequenties van deze operatie zijn, etc. Al deze factoren beïnvloeden de kans op het optreden van een menselijke fout (hier het indrukken van de verkeerde knop). Al deze factoren zouden ook beschouwd moeten worden bij het bepalen van de waarschijnlijkheid op het verkeerd indrukken van een knop.

In de literatuur worden deze factoren *Performance Shaping Factors* (PSF) of *Performance Influencing Factors* genoemd. Hier zal later nog op terug gekomen worden. De belangrijkste factoren zullen hieronder besproken worden.

Ervaring.

Er is onderzoek gedaan naar de relatie tussen het trainingsniveau (ervaring), uitgedrukt in het aantal keer dat een operator in aanraking is gebracht met een probleem, en de belasting van een taak, uitgedrukt in het aantal handelingen per tijdseenheid. Gekeken werd of training het aantal fouten onder verschillende omstandigheden verminderde. Tevens werd het verband onderzocht tussen ervaring en het handelen van een operator onder verschillende belastingen. Verwacht werd dat het totaal aantal opgetreden menselijke fouten lineair gerelateerd zou zijn aan de belasting alsmede aan de ervaring. Het bleek inderdaad dat het aantal opgetreden fouten door menselijk handelen hoger wordt bij toenemende belasting en lager wordt bij meer ervaring. Het effect door ervaring bleek echter vrij laag.

Team-training.

Onderzoek naar het effect van team-training bij variatie in complexiteit van de procedure, organisatie van de taak en verandering van behendighedsniveau (skill based level) van een teamlid moet inzicht geven in het nut van team-training. De individuele behendigheid is bij team training van groot belang. Indien een belangrijke samenwerking tussen teamleden vereist is en de taak complex, is gebleken dat een vervanging van een teamlid wel degelijk van invloed is op de uitvoering van de taak. Het blijkt dat training van belang is voor het goed uitvoeren van een procedure. Zeker in het geval van vervanging van een teamlid is de procedure-organisatie van groot belang. Bewezen is dat een procedure veel beter wordt uitgevoerd indien de operators elkaar niet in de gaten hoeven te houden en niet communiceren tijdens de uitvoering dan wanneer de operators elkaars uitvoering in de gaten houden en waar nodig elkaar assistentie verlenen.

Procedures.

Slecht beschreven procedures en taken leiden tot onzekerheden en fouten.

Onderstaand fragment is afkomstig uit recente veiligheidsvoorschriften van een grote industriële onderneming.

Bij storing c.q. reparaties die meer tijd vergen dan voor een eenvoudige niet tijdrovende handeling is vereist, moet in overleg met de verantwoordelijke toezichthouder een reparatie-plaats voor de desbetreffende kraan worden bepaald. Nadat de kraan op de daarvoor bestemde plaats is aangekomen, zal nadat de benodigde handelingen vermeld in punt 7.8.1. zijn verricht, aan die zijde waar andere kranen werkzaam zijn op 10 meter afstand van de in reparatie zijnde kraan een bouwlint worden gespannen. Indien noodzakelijk zal een veiligheidsman worden geplaatst in de belendende kranen.

Met een tijdrovende handeling wordt bedoeld, de werkzaamheden welke binnen een tijdsbestek van circa 20 minuten kunnen worden gerealiseerd.¹

Het taalgebruik van deze veiligheidsvoorschriften is ingewikkeld, bijna juridisch, hoewel de tekst wordt uitgereikt aan kraandrijvers met een lagere technische opleiding. Er wordt een aantal handelingen voorgeschreven, maar het is niet eenvoudig die er snel uit te halen. Ten eerste correspondeert de volgorde van de instructies in de tekst niet met de volgorde van de noodzakelijke handelingen. Immers, de verantwoordelijke werknemer moet uiteraard eerst bepalen of hij te maken heeft met een 'niet tijdrovend' karwei. In de tekst vindt hij de omschrijving van dat begrip pas aan het eind [Elling, 1991].

Voorbeelden als bovenstaande zijn geen uitzondering. Veiligheidsvoorschriften en ook procedures worden vaak opgesteld op een niet-gebruiksvriendelijke manier. Evaluatie met de gebruikers zou een aanmerkelijke verbetering van de voorschriften en procedures opleveren.

Te constateren valt dat dergelijke voorschriften weinig gebruikt worden. Volgen SWAIN en Guttmann [Swain en Guttmann, 1983] is het niet (correct) gebruiken van geschreven veiligheidsprocedures vaak te wijten aan het feit dat ze slecht geschreven zijn. Uit onderzoeken rond verschillende typen instructieve teksten blijkt echter ook dat 'perfecte' teksten weinig gebruikt worden zelfs als mensen geregeld fouten maken die ze hadden kunnen voorkomen door de tekst te raadplegen [Kern, 1985].

Een Amerikaanse onderzoekscommissie, ingesteld naar aanleiding van het ongeluk met de kerncentrale van Three Mile Island, toonde aan dat van de 15 geschreven procedures die van belang waren er slechts 7 adequaat waren [Malone et al., 1980; Swain and Guttmann, 1983]. In het algemeen vertonen geschreven procedures in kerncentrales, volgens hetzelfde onderzoek, de volgende gebreken:

- ernstige tekortkomingen in inhoud en presentatie
 - weinig consistentie tussen terminologie in de procedures en die op apparatuur
 - ontbrekende aanduiding van de systeemresponsie bij instructies voor controle-acties
 - hoge eisen aan het korte-termijngeheugen
 - diagrammen en grafieken niet geïntegreerd in de tekst
 - onduidelijkheid welke procedures op welke situaties van toepassing zijn
 - geen formele methode om de visie van operators te verwerken bij veranderingen
 - geringe steun van de instructies bij diagnose van eventuele problemen
- [Elling, 1991]

Volgens Swain en Guttmann [Swain en Guttmann, 1983] blijken de typisch geschreven procedures zoals ze voorkomen in kerncentrales niet in overeenstemming te zijn met de capaciteiten, beperkingen en behoeften van degenen die de procedures gebruiken. De waarschijnlijkheid van menselijke fouten gerelateerd aan geschreven procedures kan volgens hen afnemen met een factor 3 tot 10, als die procedures geen tekortkomingen vertonen.

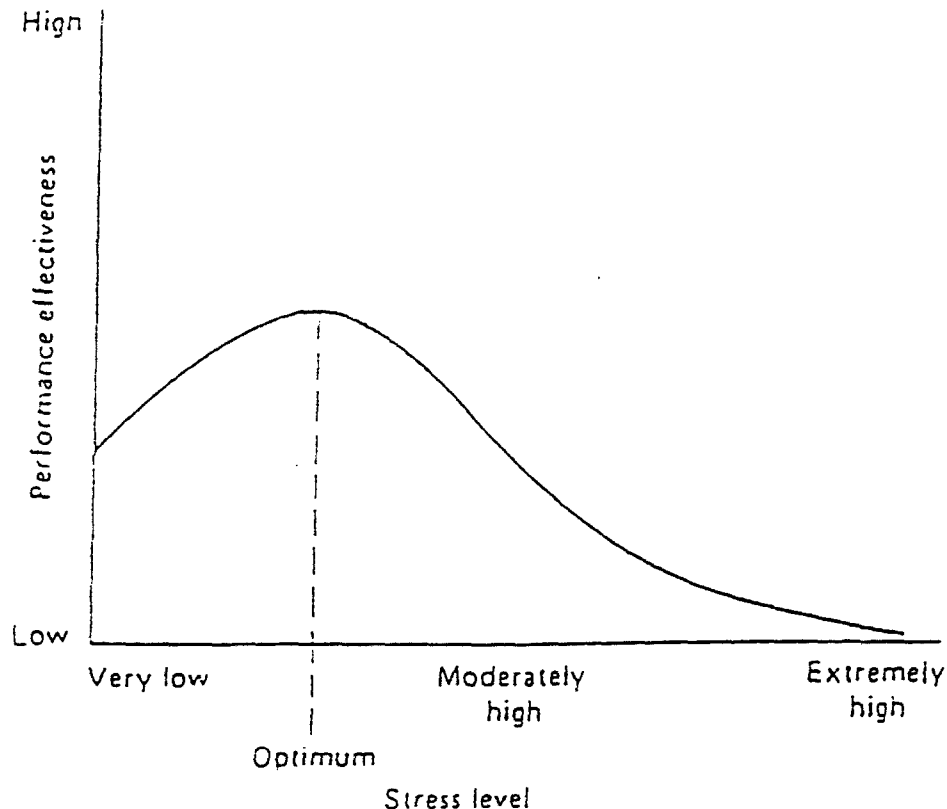
Hoewel de problematiek rond veiligheidsvoorschriften relatief het beste is onderzocht met betrekking tot kerncentrales, is er geen reden te veronderstellen dat de problemen zich tot dit domein beperken [Elling, 1991]

¹

Veiligheidsvoorschriften Oxystaalfabriek 1. Herziene uitgave april 1987, Hoogovens IJmuiden.

Stress.

Stress wordt veroorzaakt door een ongunstige verhouding tussen capaciteit en de vereisten van een taak en omgevingscondities. Stress kan worden beïnvloed door training, omgevingscondities en sociale en fysieke omstandigheden. In figuur 4.5 is het verband weergegeven tussen het uitvoeren van een taak en het stress niveau.



Figuur 4.5 Hypothetische relatie tussen psychologische stress en de effectiviteit van de uitvoering van een proces. [Peek, 1994; Henley & Kumamoto, 1981]

In de figuur is te zien dat bij een gemiddeld stress niveau de uitvoering van een taak het best verloopt. De invloed van stress op een groep is afhankelijk van de samenstelling en taakverdeling van deze groep. Het eenvoudigweg toevoegen van een operator aan een groep hoeft zeker niet te leiden tot een beter optreden van deze groep. Het optreden van een groep is sterk afhankelijk van zowel een evenwichtige samenstelling van de groep als ook van een goede taakverdeling.

In tabel 4.1 is de invloed van stress weergegeven op de faalkans. HEP staat voor *Human Error Probability* (Zie par. 4.6) en geeft de kans op een fout weer, gegeven het uitvoeren van een bepaalde taak [Henley en Kumamoto, 1981].

Zeer Laag Stress Level is omschreven als : Gebrek aan stimulatie, weinig werkdruk. Er hoeven geen beslissingen genomen te worden.

Optimaal Stress Level: redelijke werkdruk. Lezen, besturing en besluitvorming kan niet op een comfortabele plaats gedaan worden.

Gematigd Hoog Stress Level: de werkdruk vergt vaak snelle activering. Slechte beslissingen kunnen materiële schade of noodtoestanden aan het systeem veroorzaken.

Extreem Hoog Stress Level: dreigend levensgevaar door gebrek aan voorzorgsmaatregelen bij ongelukken.

Stress Level	Toename in kans op fout	
	Ervaren operator	Onervaren operator
Erg laag	2 X HEP	2 X HEP
Optimaal	1 X HEP	1 X HEP
Gematigd hoog	2 X HEP	4 X HEP
Extreem hoog	5 X HEP	10 X HEP

Tabel 4.1 kans op fouten voor ervaren en onervaren personeel [Henley en Kumamoto, 1981] (HEP = Human Error Probability)

Een probleem bij veel mens-machine systemen is het behandelen van valse alarmen. Veel van zulke alarmen geven aanvankelijk stress. Doch na verloop van tijd wordt een alarm vanzelfsprekend als vals alarm verondersteld. Het stress niveau wordt hierdoor wel aanmerkelijk lager, doch een echt alarm wordt nu ook als vals alarm gezien. Een proces kan niet zodanig ingesteld worden dat alleen echte alarmen gerapporteerd worden, er is immers een overlap van de kansen op valse en echte alarmen. De kunst is deze overlap in een proces zo klein mogelijk te maken.

Onderzoeken met vliegsimulators hebben uitgewezen dat tegen het einde van een vlucht de piloot geneigd is weinig of geen aandacht te besteden aan instrumenten die van minder belang zijn voor de uitvoering van het vliegproces en zich slechts beperkt tot die instrumenten die veelvuldig gebruikt worden.

Slechte supervisie.

Indien operators slecht ingewerkt worden, te weinig achtergrond informatie over hun taken krijgen, zijn ze zich niet bewust van de fouten die ze kunnen maken en de fouten die ze eventueel kunnen herstellen. Slechte supervisie kan leiden tot slecht gemotiveerd personeel of overwerkt personeel door een te zwaar werkschema.

Tijdsbestek.

Het maken van een diagnose kost tijd. Het tijdsbestek nodig voor het maken van een diagnose is afhankelijk van de complexiteit van het systeem en het trainingsniveau van de operator. Indien de tijd gelimiteerd is, wordt de kans op foute diagnoses veel groter. Swain heeft een model gemaakt dat het verband weergeeft tussen de kans op een foute diagnose en het tijdsbestek om de diagnose te maken [Salvendy, 1987]. De Error Factor die hierbij gegeven wordt is echter hoog (30).

De bovengenoemde factoren worden ook wel *External Performance Shaping Factors* genoemd. Externe PSF's zijn verantwoordelijk voor de invloed van de omgeving en de invloed van het systeem op het handelen van de operator. Ook zijn er *Internal Performance Shaping Factors*. Hieronder worden psychologische factoren en fysische factoren verstaan, zoals persoonlijkheid, motivatie en tevredenheid. Met goede externe PSF's, zoals goede training, goede werkomstandigheden etc. zijn de interne PSF's (motivatie etc.) vaak ook beter.

Performance shaping factoren zijn wel te bepalen maar de belangrijkheid van de factoren kan individueel verschillen.

4.5 Oorzaken en vermindering van menselijke fouten

Ongelukken kunnen vele oorzaken hebben, omdat er altijd een opeenvolging van ongewilde gebeurtenissen moet zijn die tot een ongeluk leiden. Vele moderne 'high tech' systemen opereren onder gevaarlijke omstandigheden en de veiligheid van deze systemen vergt dan ook een hoop aandacht. Het risico wordt laag gehouden, door zowel de kans op een fout te minimaliseren en consequenties van een systeem-fout zo klein mogelijk te maken. De oorzaken van fouten van grote systemen zijn meestal van organisatorische aard.

Bij het ongeluk met de Herald of Free Enterprise (1987) werd de oorzaak voornamelijk toegeschreven aan het niet op zijn post zijn van degene die ervoor moest zorgen dat de deur gesloten was. Door een organisatorische fout kon deze persoon er eigenlijk weinig aan doen dat hij niet op zijn post was. Zijn taak was immers aanwezig te zijn indien dit nodig was en indien er niets te doen is te slapen. Zie figuur 4.6 voor een beschrijving van dit ongeluk. Hier is sprake van een *Double Bind* fout. De persoon kan als hij slaapt niet bepalen of hij iets moet doen. En als hij maar heel weinig kan slapen omdat er veel bezigheden zijn, mag men niet meer verwachten dat hij al zijn taken naar behoren uitvoert. De oorzaak ligt hier meer in organisatorische en management factoren.

Reason maakt onderscheidt in *latente* en *actieve* fouten [Reason, 1990]. Zie figuur 4.7.

Actieve fouten zijn fouten waarvan het effect vrijwel meteen merkbaar is. Latente fouten zijn fouten die langzaam in het systeem geslopen zijn en dan in het systeem verborgen zitten. Latente fouten komen alleen aan het licht indien zij in combinatie met andere factoren het systeem verstoren. Een actieve fout wordt geassocieerd met het optreden van de 'front-line' operator van een complex systeem (bijv. piloten). De fout is het gevolg van een onveilige actie van de operator op een kritiek punt in het systeem. Deze fout geeft eigenlijk aan dat het systeem zodanig is dat er makkelijk fouten gemaakt kunnen worden in dit systeem. Het feit dat er een kritiek punt in een systeem zit wordt veroorzaakt door latente fouten. Deze fout is vaak al ontstaan tijdens de organisatie of opzet van het systeem en komt pas veel later bij de uitvoering van het systeem aan het licht. Reason beweert dat veel aanvankelijk actieve fouten terug te brengen zijn tot latente fouten. M.a.w. veel fouten zijn het gevolg van een slechte organisatie van een proces en hadden bij adequaat management gereduceerd of voorkomen kunnen worden.

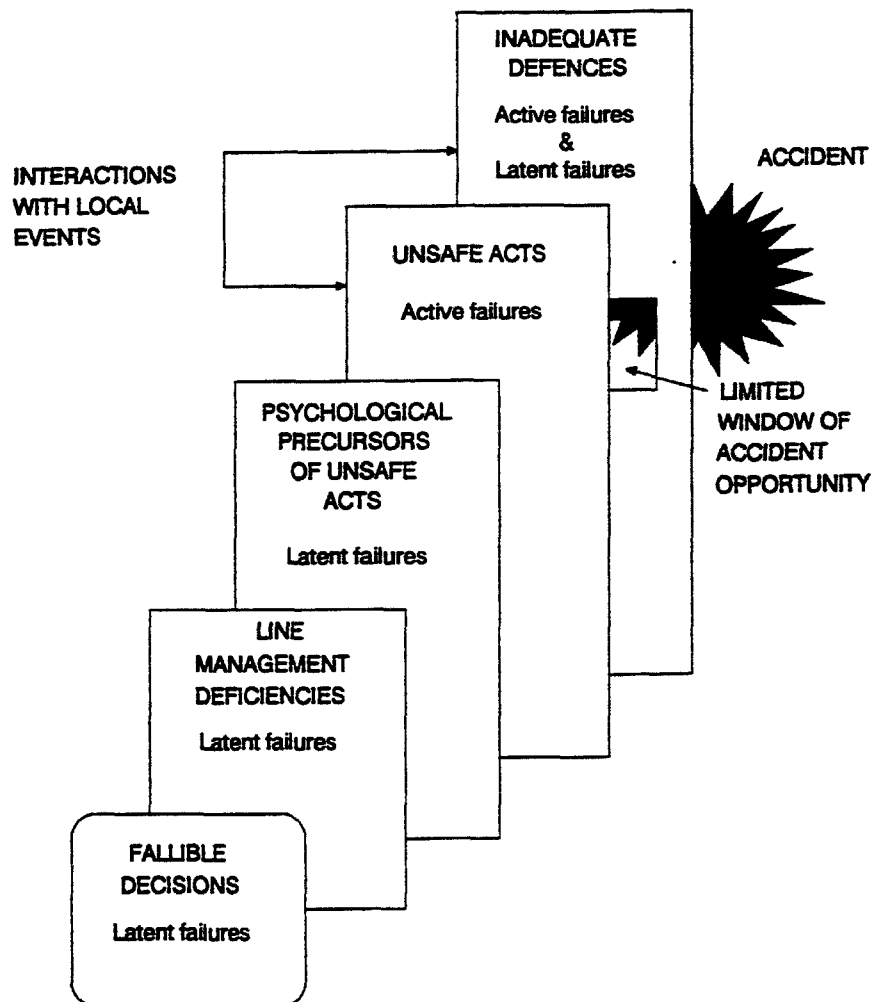
Vaak wordt bij industriële processen de last bij de operator gelegd en bij zijn of haar onoplettendheid. Vanuit het oogpunt van menselijk handelen moet een systeem gebouwd worden voor de gebruiker en niet andersom. Soms is er sprake van een '*error likely*' situatie, waarbij het systeem zo slecht is dat fouten te verwachten zijn. Bij een '*accident prone*' situatie is het proces zelfs zodanig dat fouten onoverkomelijk zijn en van dien aard dat hierbij vaak ook persoonlijke of materiële schade optreedt [Salvendy, 1987].

Een poging tot vermindering van fouten kan pas plaatsvinden als de fouten of oorzaken zijn gedetecteerd. Een manier van detecteren is kijken naar de zwakke plekken in een systeem. Later in dit hoofdstuk wordt hierop terug gekomen.

Case Study No. 5: Herald of Free Enterprise

Chain of events and active failures	Contributing conditions and latent failures
Herald is docked at No. 12 berth in Zeebrugge's inner harbour and is loading passengers and vehicles before making the crossing to Dover.	This berth is not capable of loading both car decks (E and G) at the same time, having only a single ramp. Due to high water spring tides, the ramp could not be elevated sufficiently to reach E deck. To achieve this, it was necessary to trim the ship nosedown by filling trim ballast tanks Nos. 14 and 3. Normal practice was to start filling No. 14 tank 2 hours before arrival. <i>(System failure)</i>
At 1805 on 6 March 1987, the Herald goes astern from the berth, turns to starboard, and proceeds to sea with both her inner and outer bow doors fully open.	The most immediate cause is that the assistant bosun (whose job it was to close the doors) was asleep in his cabin, having just been relieved from maintenance and cleaning duties. <i>(Supervisory failure and unsuitable rostering)</i> The bosun, his immediate superior, was the last man to leave G deck. He noticed that the bow doors were still open, but did not close them, since he did not see that as part of his duties. <i>(Management failure)</i>
Chief officer checks that there are no passengers on G deck, and thinks he sees assistant bosun going to close doors (though testimony is confused on this point).	The chief officer, responsible for ensuring door closure, was also required (by company orders) to be on the bridge 15 minutes before sailing time. <i>(Management failure)</i> Because of delays at Dover, there was great pressure on crews to sail early. Memo from operations manager: "put pressure on your first officer if you don't think he's moving fast enough...sailing late out of Zeebrugge isn't on. It's 15 minutes early for us." <i>(Management failure)</i> Company standing orders (ambiguously worded) appear to call for "negative reporting" only. If not told otherwise, the master should assume that all is well. Chief officer did not make a report, nor did the master ask him for one. <i>(Management failure)</i>
On leaving harbour, master increases speed. Water enters open bow doors and floods into G deck. At around 1827, Herald capsizes to port.	Despite repeated requests from the masters to the management, no bow door indicators were available on the bridge, and the master was unaware that he had sailed with bow doors open. Estimated cost of indicators was £400 – 600. <i>(Management failure)</i> Ship had chronic list to port. <i>(Management and technical failure)</i> Scuppers inadequate to void water from flooded G deck. <i>(Design and maintenance failure)</i> Top-heavy design of the Herald and other "ro ro" ships in its class was inherently unsafe. <i>(Design failure)</i>

Figuur 4.6 Case study van het ongeluk met de Herald of Free Enterprise [Reason, 1990]



Figuur 4.7 Latente en actieve fouten [Reason, 1990]

Er zijn drie manieren om menselijk falen en de consequenties van menselijk falen te verminderen.

-Voorkoming van fouten

In de ontwerpfase kunnen zoveel mogelijk maatregelen genomen worden om menselijke fouten te voorkomen. Veel fouten in de luchtvaartindustrie zijn veroorzaakt doordat meetinstrumenten in de cockpit moeilijk af te lezen waren. Vergroting van de afleesbaarheid van deze meters vergroot tevens de veiligheid van het vliegen. Bij computerprogramma's wordt ten behoeve van eigen 'veiligheid' ook gevraagd te bevestigen voordat een file gewist mag worden, teneinde vergissingen te voorkomen.

-De mogelijkheid creëren dat fouten gedetecteerd worden.

Het is bekend dat mensen fouten maken, en uit ervaring is ook het soort fout bekend. Een systeem kan zodanig worden ontworpen dat het fouten detecteert en de operator waarschuwt. In een vliegtuig is bijvoorbeeld een 'Ground Warning Proximity System' geïnstalleerd dat de piloot waarschuwt indien het vliegtuig te dicht bij de grond komt.

-Minimaliseren van de consequenties van fouten door systemen zodanig te ontwerpen dat bij bepaalde fouten het systeem corrigeert of niet reageert.

Een systeem kan soms zodanig ontworpen worden dat sommige fouten geen consequenties hebben. Een vliegtuig is zo ontworpen dat het wegvliegen pas kan indien alle deuren dicht zijn. Probeert men toch weg te vliegen dan zal het systeem niet in werking treden.

Het verminderen van opzettelijke fouten, 'violations', vraagt een hele andere aanpak. Hierbij moet gekeken worden naar de organisatorische structuur. Normen, waarden, de moraal en de veiligheidsbelangen zijn hierbij de factoren die de aandacht dienen te hebben.

4.6 Kwantificering van de waarschijnlijkheid van fouten

In de vorige paragrafen is kwalitatief ingegaan op menselijk falen. Steeds vaker wordt voor systemen de betrouwbaarheid kwantitatief bepaald. Om de betrouwbaarheid van een systeem kwantitatief te kunnen bepalen is het noodzakelijk ook de betrouwbaarheid van de menselijke handelingen in dit systeem te kunnen bepalen.

Human Reliability Analysis (HRA) is een methode waarmee de menselijke betrouwbaarheid wordt geschat. De basis vergelijking waarmee bij HRA gewerkt wordt is de *Human Error Probability* (HEP). Dit is de waarschijnlijkheid dat, gegeven het feit dat een taak wordt uitgevoerd, een fout optreedt. De HEP wordt berekend als de verhouding tussen het aantal begane fouten en het aantal mogelijkheden dat een fout had kunnen optreden.

In formule vorm:

$$\text{HEP} = \frac{\text{number of errors}}{\text{number of opportunities for the error}}$$

Het schatten van het aantal opgetreden fouten geeft vaak al problemen. Het schatten van het aantal mogelijke fouten is vaak niet mogelijk, omdat dit aantal vaak onvoldoende in kaart is te brengen.

Er zijn verschillende technieken ontwikkeld om een betrouwbare schatting te maken van de kans op menselijk falen in een systeem. Hierbij speelt de bepaling van de *Performance Shaping Factors* een zeer belangrijke rol.

Het moge duidelijk zijn dat een precieze schatting van de menselijke betrouwbaarheid niet te maken is. Bij het bepalen van de menselijke betrouwbaarheid spelen veel onbekende variabelen een rol. Het kwantificeren van stress niveau, het bepalen van het behagelijksgevoel, het aantal mogelijke fouten etc. berust altijd op schattingen. Dit impliceert het gebruik van waarschijnlijkheidsverdelingen bij het gebruik van schattingen. Verschillende verdelingen worden gebruikt in HRA. Meest gebruikt zijn de normale, de lognormale en de Weibull verdeling. Niet alle methodes voor HRA maken gebruik van waarschijnlijkheidsverdelingen. Bij de THERP methode, die hierna besproken zal worden, wordt een minimale en maximale waarde voor de waarschijnlijkheid weergegeven. Het verschil tussen de minimale en maximale waarde kan soms een factor 100 zijn.

4.7 Gegevens ter bepaling van menselijke betrouwbaarheid

Het verkrijgen van gegevens voor het toepassen van menselijke betrouwbaarheidsanalyses geeft nogal wat problemen. Veel grote industrieën hebben geen data-registratie die specifiek het menselijk gedrag registreert. Indien er wel data-registratie van menselijk gedrag is, gebeurt dit vaak op basis van wat er gebeurt, en niet waarom een actie heeft plaatsgevonden.

Fouten van cognitief hoger niveau, zoals beslissingsfouten, zijn helemaal moeilijk te registreren, daar ze ook heel moeilijk te onderkennen zijn. Veel simpele handmatige fouten zijn moeilijk te ontdekken omdat vaak enige tijd verloren gaat voordat een veelvuldig aantal fouten is gemaakt, en worden dus ook niet geregistreerd. Ondanks de moeilijke fouten-registratie zijn er toch een aantal bronnen die gegevens over menselijk gedrag registreren.

De belangrijkste bronnen zijn:

- Experimentele gegevens
- Simulaties
- Operationele ervaring

Het probleem dat zich voordoet bij het bepalen van menselijke betrouwbaarheid in een bepaald geval is dat de handelingen die bekeken moeten worden vaak moeilijk te vergelijken zijn met de handelingen die in de bronnen voorkomen. De registraties zijn niet uitgebreid genoeg om hiermee menselijke betrouwbaarheid te kunnen bepalen. Registratie-systemen (en de operators die deze gebruiken) zouden ook gedetailleerde achtergrond-informatie die bij een incident hoort moeten weergeven. Ook bijna-fouten zouden uitgebreid en met achtergrond-informatie geregistreerd moeten worden. In de praktijk gebeurt dit weinig.

4.8 Probabilistic Safety Assessment

Zoals reeds besproken in dit hoofdstuk, is de aandacht voor veiligheid bij complexe systemen deze eeuw sterk toegenomen, door de complexiteit van deze systemen en het gevaar dat zij met zich meedragen. Dit heeft ertoe geleid dat er veel *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) methoden zijn ontwikkeld. Het doel van PSA is tweeledig [Reason, 1990]:

- Identificeren van de zwakke plekken in een systeem. Aangeven hoe verbeteringen moeten worden bewerkstelligd.
- Kwantificeren van het algehele risico van een systeem.

PSA methoden worden gebruikt om aan te geven of een bepaald systeem (vliegtuig, kerncentrale) veilig in gebruik is zonder onverantwoord groot gevaar voor de omgeving. Vaak worden PSA gebruikt om verbeteringen in een systeem aan te brengen om zodoende de veiligheid te vergroten. Ook in het ontwerp proces kunnen d.m.v PSA methoden vergelijkingen worden gemaakt tussen alternatieven.

PSA methoden werken met gebeurtenissen-bomen of foutenbomen.

Sinds de jaren zeventig is men er zich van bewust dat PSA methoden zich niet kunnen beperken tot het bepalen van de betrouwbaarheid van een machine. Ook de interactie tussen mens en machine en de menselijke betrouwbaarheid zijn van invloed op de betrouwbaarheid van een systeem. Zeker na de ongelukken bij Three Mile Island, Tsjernobyl en Bhopal, waarbij de oorzaak op menselijk falen bleek te berusten, groeit de aandacht voor het modelleren van menselijk handelen in een systeem en het bepalen van de betrouwbaarheid van dit menselijk handelen. Zo ontstond een speciaal gebied binnen *Probabilistic Safety Assessment* wat zich bezig houdt met de interactie tussen mens en machine, *Human Reliability Analysis* (HRA).

Het doel van een HRA is:

- Ontdekken waar een operator een fout kan maken
- Bepalen waardoor deze fout veroorzaakt wordt
- Bepalen wat de kansen zijn dat zo'n fout gemaakt wordt
- Bepalen van de consequenties van zo'n fout.

In de volgende paragrafen zullen de voor deze studie belangrijkste HRA methoden worden besproken.

De HRA methoden kunnen gecategoriseerd worden in verschillende modellen m.b.t. aanpak. Hierin zijn drie groepen te onderscheiden:

Ten eerste de groep die gebruik maakt van subjectieve beoordelingen. Deze methoden beperken zich tot schattingen van HEP waarden. De taken die een operator moet uitvoeren worden meestal als één geheel gekwantificeerd.

Ten tweede zijn er de methoden die een ontleedde benadering toepassen. De taak van de operator is onderverdeeld in subtaken. Voor deze subtaken wordt een HEP toegekend. De HEP voor de gehele taak volgt uit de sommatie van HEP's van de subtaken.

Ten slotte zijn er methoden die de tijds-betrouwbaarheid correlatie meenemen bij de bepaling van de betrouwbaarheid. Deze correlaties geven de kans op een juiste uitvoering van een taak met de tijd als variabele parameter.

De meest gebruikt HRA methoden zoals THERP, SLIM en HCR behoren tot deze drie gecategoriseerde groepen [Groen, 1994]. In de hiernavolgende paragraaf zullen de HRA methodes THERP, SLIM en HCR achtereenvolgens kort besproken worden.

4.9 Bespreking van de belangrijkste HRA methoden

4.9.1 Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)

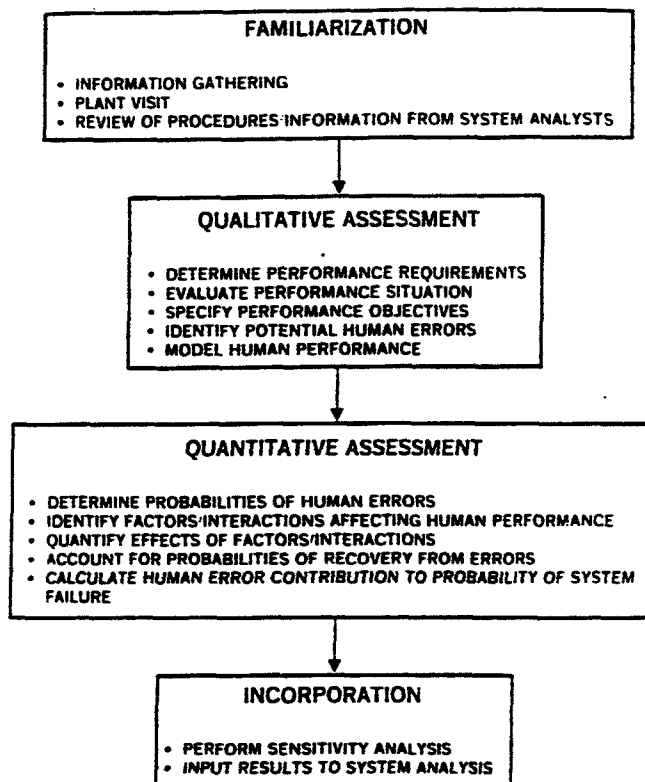
De THERP techniek is ontwikkeld door Swain en Guttman. Het is een van de oudste technieken. De eerste ontwikkelingen van THERP dateren uit 1960. Waarschijnlijk door de veelvuldige toepassing van THERP, is het een van de meest bekritiseerde HRA methoden. Echter THERP wordt als beste techniek die momenteel verkrijgbaar is voor HRA beschouwd [Reason, 1990]. De procedure van THERP bestaat uit de volgende vier stadia:

- Identificeren van de functies van het systeem die beïnvloed kunnen worden door menselijk falen.
- Weergeven en analyseren van de betrokken menselijke handelingen (i.e. een gedetailleerde taak analyse maken).
- Schatten van relevante kansen op fouten, door gebruik te maken van expert meningen en verkrijgbare gegevens van HEP's.
- Schatten van de effecten van menselijke fouten op het falen van het systeem. Deze stap omvat eigenlijk de integratie van HRA met PSA. Door ontwerpers wordt deze stap vaak iteratief uitgevoerd. Gekeken wordt wat het effect van een verandering van het systeem is op de uiteindelijke faalkans.

In figuur 4.8 zijn de stappen verder uitgewerkt.

Bij THERP wordt gebruikt gemaakt van een ontleedde benadering. Door de gebruiker moet een boomstructuur ontwikkeld worden, met een succes-tak en een faal-tak voor iedere taak. Deze structuur is vergelijkbaar met de gebeurtenissenbomen structuur zoals die in PSA gebruikt wordt. De hoofdtaak van de operator wordt onderverdeeld in subtaken, waarvoor de faalkansen gemakkelijker bepaald kunnen worden.

Een van de grote problemen in het modelleren van een taak in een opvolging van gedragingen is het bepalen van het effect dat het slagen of falen van de ene taak heeft op het slagen of falen van de andere taak. Een van de voordelen van THERP is dat het de mogelijkheid geeft afhankelijke modellen te gebruiken.



Figuur 4.8 De vier fasen van THERP [Salvendy, 1987]

Twee gebeurtenissen zijn onafhankelijk indien de conditionele kans van de ene gebeurtenis gelijk blijft ongeacht of de andere gebeurtenis wel of niet optreedt. In figuur 4.9 is dit

$$b = b \mid a = b \mid A$$

$$B = B \mid A = B \mid a$$

Hierin is

a :kans op het succesvol uitvoeren van de eerste taak.

A :kans op het niet succesvol uitvoeren van de eerste taak.

b :kans op het succesvol uitvoeren van de tweede taak.

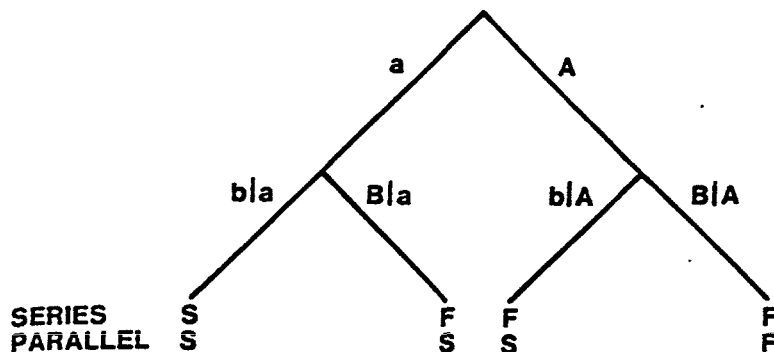
B :kans op het niet succesvol uitvoeren van de tweede taak.

Het succesvol uitoefenen van de tweede taak is dus indifferent aan het succesvol uitoefenen van de eerste taak.

Indien gebeurtenissen elkaar wel beïnvloeden, zijn ze niet onafhankelijk, maar afhankelijk.

Foutief aannemen van gebeurtenissen als afhankelijk leidt tot te optimistische kansschattingen van fouten, wat niet wenselijk is. De meest veilige schatting is dus die van totale onafhankelijkheid van gebeurtenissen.

De ontleding kan in meer of mindere mate worden uitgevoerd, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid van de te bepalen betrouwbaarheid en de hoeveelheid tijd die beschikbaar is.



TASK "A" = THE FIRST TASK

TASK "B" = THE SECOND TASK

a = PROBABILITY OF SUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "A"

A = PROBABILITY OF UNSUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "A"

b|a = PROBABILITY OF SUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "B" GIVEN a

B|a = PROBABILITY OF UNSUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "B" GIVEN a

b|A = PROBABILITY OF SUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "B" GIVEN A

B|A = PROBABILITY OF UNSUCCESSFUL PERFORMANCE OF TASK "B" GIVEN A

FOR THE SERIES SYSTEM:

$$\Pr[S] = a(b|a)$$

$$\Pr[F] = 1 - a(b|a) = a(B|a) + A(b|A) + A(B|A)$$

FOR THE PARALLEL SYSTEM:

$$\Pr[S] = 1 - A(B|A) = a(b|a) + a(B|a) + A(b|A)$$

$$\Pr[F] = A(B|A)$$

Figuur 4.9 Human Reliability Analysis Gebeurtenissen boom [Salvendy, 1987]

Veel gegevens uit het THERP handboek geven voorspellingen van HEP's die niet alleen bruikbaar zijn voor nucleaire systemen, maar ook voor andere industriële processen. Wanneer de waarden zijn bepaald of geschat voor bepaalde taken, worden zij nominale HEP waarden genoemd in THERP. Deze geven de waarschijnlijkheid van menselijk falen weer zonder invloed van *Performance Shaping Factors* (PSF). Indien de PSF's hierna in beschouwing zijn genomen, worden de basic HEP waarden bepaald, welke de waarschijnlijkheid van menselijk falen weergeven voor een specifieke taak. Een conditionele HEP is een aanpassing van de basic HEP als gevolg van invloeden van andere taken of gebeurtenissen, zoals bijvoorbeeld het aantal mensen dat betrokken is bij het uitvoeren van de taak.

Het voordeel van THERP is dat het gemakkelijk geïntegreerd kan worden in PSA. Een ander voordeel is de gedetailleerdheid van het THERP handboek, dat een groot databestand omvat van HEP's.

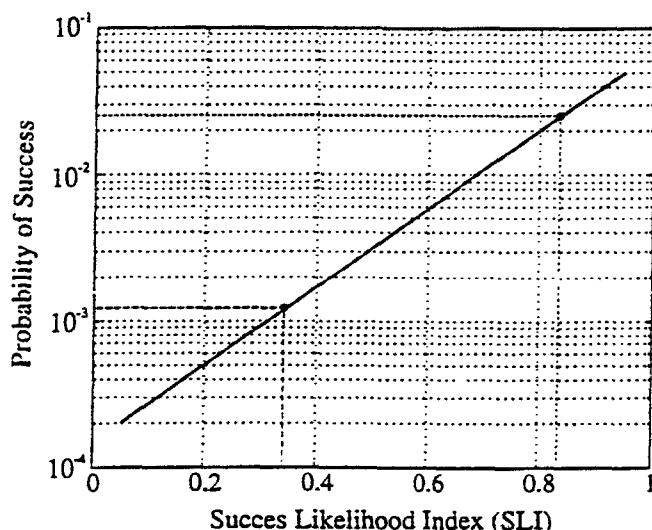
4.9.2 Success Likelihood Index Method (SLIM)

De SLIM methode is de meest gebruikte HRA techniek in de categorie van de subjectieve beoordelingsmethoden. De grondgedachte van SLIM is dat de waarschijnlijkheid van menselijk falen afhankelijk is van een combinatie van de *Performance Shaping Factors* (PSF). De relevante PSF's dienen allereerst bepaald te worden. Vervolgens wordt voor alle taken de belangrijkheid van de PSF bepaald. Dit gebeurt door expertmeningen. Zo wordt voor iedere taak een *Success Likelihood Index* verkregen.

Deze index moet vertaald worden in een HEP waarde. De relatie tussen een SLI en een HEP is gegeven als

$$\log(\text{prob. of success}) = a \cdot \text{SLI} + b$$

In figuur 4.10 is de verhouding weergegeven tussen de kans op succes en de index.



Figuur 4.10 De logaritmische relatie tussen SLI en kans op succes [Peek, 1994]

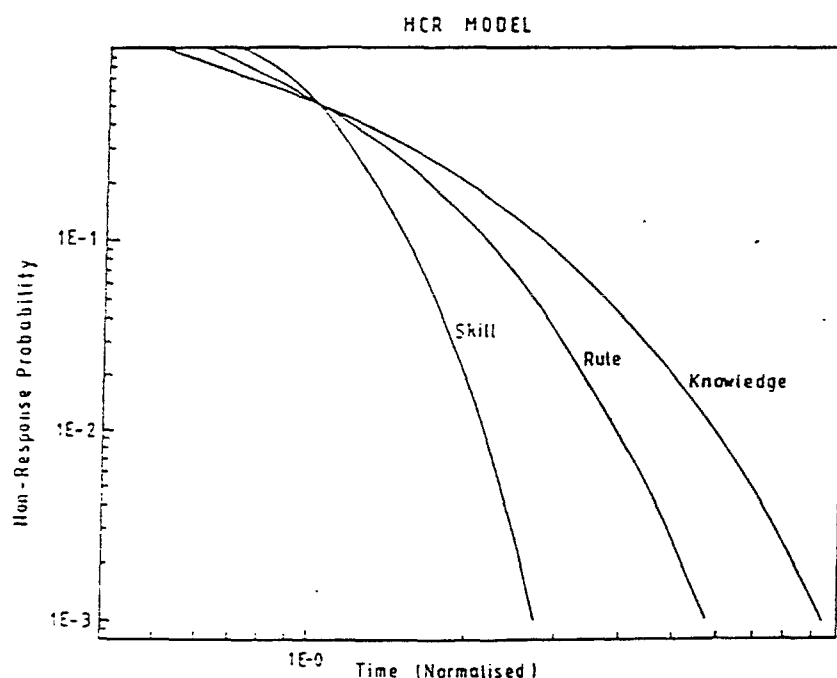
Twee overeenkomstige taken, met bekende index- en succeswaarde zijn nodig om de a en b waarde te kunnen bepalen.

De SLIM methode berust op aannames.

Indien het systeem eenmaal is opgezet, kan toepassing van SLIM snel voor resultaten zorgen, omdat er in deze methode geen taak-ontleding hoeft plaats te vinden.

4.9.3 Human Cognitive Reliability (HCR)

De HCR methode behoort tot de categorie HRA methoden die de relatie Tijd-betrouwbaarheid in de betrouwbaarheidsbepaling meenemen. Voor de drie gedragsniveaus: Skill, Rule en Knowledge based, zijn de kansen op 'Non-response' weergegeven tegen de tijd die de operator in een situatie heeft om zijn taak uit te voeren. Zie figuur (4.11)



Figuur 4.11 Non-Response kansen uitgezet tegen het tijdsbestek van de opgedragen actie voor de verschillende gedragsniveaus [Peek, 1994]

Voor iedere actie moet het gedragsniveau bepaald worden, moet gekeken worden wat de PSF's zijn en moet de gemiddelde reactie tijd bepaald worden. Vervolgens moet de tijd die de operator heeft om de taak uit te voeren worden bepaald. De kans op Non-Response kan bepaald worden uit de grafiek.

Het nadeel van HCR is dat het niet uitgebreid genoeg is. Alleen een beperkt aantal situaties kunnen worden toegepast. Er kan slechts een beperkt aantal PSF worden geïmplementeerd, zodat de weergave niet compleet is. HCR methoden worden vaak beschouwd als te eenvoudig om de taken van een operator helemaal weer te geven.

4.10 Beperkingen van HRA

De grootste beperking van *Human Reliability Analysis* is dat er geen fundamenteel model bestaat van het menselijk gedrag. Dit in tegenstelling tot machine-systemen waarvan het gedrag te voorspellen is. De technieken die gebruikt worden in HRA zijn te gebruiken als raamwerk. De betrouwbaarheid van een operator wordt bepaald door vergelijking van situaties, het gebruik van *Performance Shaping Factors*, tabellen en gegevensbestanden.

De HRA methoden kijken alleen naar de kans op een fout en niet naar de verschillen in consequenties. Het indrukken van de verkeerde knop kan tot een totaal andere situatie leiden dan een foute diagnose. Terwijl beiden op een bepaald moment kunnen voorkomen. Opzettelijke fouten, welke van grote invloed zijn op de veiligheid van een systeem, zijn helemaal moeilijk weer te geven in een model.

De interactie tussen mens en machine is bijna niet terug te vinden in HRA-methoden. Het statische van de HRA modellen, de manier met fouten- en gebeurtenissen bomen, geeft de dynamische interactie tussen mens en machine niet weer.

Ondanks de vele beperkingen van HRA methoden, worden zij toch als nuttig ervaren. Ondanks de beperkte nauwkeurigheid, geven HRA methoden de mogelijkheid het menselijk gedrag te modelleren. HRA geeft alles wat er bekend is over menselijk gedrag weer en geeft mogelijkheden voor bepalen van menselijke betrouwbaarheid in *Probabilistic Safety Assessment*.

4.11 Huidige ontwikkelingen in HRA

De beperkingen van de 'eerste generatie' HRA methoden zijn in de vorige paragraaf weergegeven.

Op verschillende gebieden is uitbreiding nodig:

- Een beter model dat de cognitieve aspecten van een operator weergeeft.
- Een betere omschrijving van de interactie tussen mens en machine.
- Een systematische classificering die onder alle omstandigheden bruikbaar is.
- Het inbrengen van organisatorische factoren in HRA methoden.

De 'tweede generatie' HRA methoden zou beperkingen van de eerste generatie moeten verminderen. HITLINE en DYNAM zijn methoden die meer dynamische factoren weergeven [Zie hiervoor Macwan en Molesh, 1993].

H5 Onderzoek betrouwbaarheid sluitingsproces

In dit hoofdstuk worden de twee methoden beschreven, die in dit onderzoek toegepast zijn om de faalkansen van de verschillende onderdelen van de sluitingsprocedure te bepalen. Ten eerste de 'methode met expert meningen', waarbij het personeel van de waterkeringen gevraagd is aan te geven wat de zwakkere en sterkere schakels in de sluitingsprocedure zijn. Ten tweede de 'THERP methode', in paragraaf 4.9.1 reeds aan de orde gekomen bij de bespreking van methoden ter kwantificatie van de betrouwbaarheid van menselijk gedrag.

Aan het eind van het hoofdstuk zijn de constructie en de sluitingsprocedure van de drie onderzochte keringen beschreven.

5.1 Inleiding

Om tot een kwantitatief oordeel te kunnen komen over de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van een keersluis zijn in deze studie twee verschillende methoden toegepast.

Doel van het onderzoek is om van alle acties en componenten van het sluitingsproces de betrouwbaarheid te bepalen. Zo wordt veel inzicht verkregen in de 'belangrijkheid' van de verschillende componenten.

De twee methoden zijn de volgende:

- Met behulp van expert meningen zijn de verhoudingen tussen de verschillende factoren zoals zij voorkomen in het sluitingsproces vastgesteld. Aan de hand hiervan zijn de faalkansen voor de verschillende factoren in het sluitingsproces bepaald.

De 'methode met behulp van expert meningen' is een juiste methode om het oordeel van experts te laten gelden bij de bepaling van de faalkansen van een systeem. De bemanning en functionarissen, die met het sluitingsproces te maken hebben, weten het meest over de zwakke en sterke plekken in het sluitingsproces. Met behulp van de methode is het mogelijk de informatie om te zetten in kwantitatieve gegevens.

- Met behulp van de door THERP voorgeschreven waarden is de betrouwbaarheid van het sluitingsproces voor een kering bepaald. De betrouwbaarheid van de technische factoren zijn (o.a.) door de KEMA voorgeschreven.

De 'THERP methode' is toegepast om als vergelijking van de methode met expert meningen te dienen, en om een indicatie te verkrijgen van de toepasbaarheid van deze methode in de civiele techniek.

Deze beide methoden zijn toegepast voor een drietal keringen.

Deze keringen zijn zo verschillend mogelijk gekozen om zoveel mogelijk spreiding in soorten keringen te onderzoeken.

Onderzocht zijn:

- De coupure in Den Oever. De reden hiervoor is dat hier recentelijk een betrouwbaarheidsanalyse van gemaakt is [TAW, 1993], zodat vergelijking mogelijk is. Bovendien is dit een eenvoudige waterkering.
- Experts van Gemeentewerken Rotterdam. De Gemeentewerken Rotterdam beheert een aantal keringen, waarover de experts in één keer zijn ondervraagd.

- De stormvloedkering in de Oosterschelde. Deze is gekozen vanwege de complexiteit. Voor deze kering is bij de opzet van de procedure en automatisering veel aandacht besteed aan de betrouwbaarheid van de sluitingsprocedure.
Voor deze kering is veel onderzoek gedaan naar de betrouwbaarheid van de sluitingsprocedure.

In paragraaf (5.6) volgt een systeembeschrijving van deze keringen.

Voor de opzet van het onderzoek is gebruik gemaakt van het stroomschema van Heins en Baaijens. Het stroomschema is bedoeld voor een algemene waterkering waar men gebruikt maakt van zowel een gemeten signaleringspeil als van een voorspeld signaleringspeil. Het schema geeft een enigszins vereenvoudigde voorstelling weer van een aanbevolen organisatie in het rapport van Heins en Baaijens [Heins en Baaijens, 1992].

Allereerst is er aan de hand van het stroomschema een foutenboom opgezet voor het falen van de sluitingsprocedure.

Bij vergelijking tussen het stroomschema en de stroomschema's van de onderzochte keringen blijkt dat deze nagenoeg overeenstemmen. Waar dit nodig was zijn aanpassingen aangebracht.

Om een toepassing van de methoden tot stand te brengen is de foutenboom omgezet in een schattingsboom. Alle EN-poorten zijn eruit gehaald en alle poorten zijn OF-poorten.

Voor beide methoden (expert meningen en THERP methode) zal gebruik gemaakt worden van dezelfde boom.

Alle factoren die van invloed zijn op het sluitingsproces, zitten onder in de boom (basisgebeurtenissen). Door de schattingsboom te gebruiken voor beide methoden is het maken van een vergelijking mogelijk.

Van alle basisgebeurtenissen worden de faalkansen bepaald. Sommatie van deze faalkansen minus de doorsneden levert de kans op de topgebeurtenis. Deze topgebeurtenis is gecorrigeerd voor het weglaten van de EN-poorten.

In hoofdstuk 6 wordt uitgebreider op deze berekening ingegaan.

5.2 Foutenboom

De foutenboom is opgezet aan de hand van het stroomschema van Heins en Baaijens.

In de foutenboom is de aandacht gericht op de mogelijkheid dat werknemers falen tijdens de uitoefening van hun taken en het eventueel falen van de technische hulpmiddelen bij de taakuitoefening.

Op deze manier krijgt men een beter overzicht van de verhouding tussen de technische en persoonlijke oorzaken, m.b.t. de bijdrage die zij leveren aan de betrouwbaarheid.

Dit laatste geldt vooral voor de methode met expert meningen. Voor de THERP methode komen de gegevens voor persoonlijke oorzaken uit een andere bron (THERP handboek) dan de gegevens voor de technische oorzaken (voornamelijk KEMA). Vergelijking tussen de technische en persoonlijke bijdrage aan de betrouwbaarheid is slechts mogelijk na vergelijking van de betrouwbaarheid van de gebruikte bronnen.

Op de navolgende pagina's is de foutenboom voor het sluitingsproces van een waterkering weergegeven. De schattingsboom is afgebeeld in Bijlage B.

Topgebeurtenis

Waterkering faalt of faalt bijna

Functionaris faalt
of faalt bijna

Bemannings waterkering faalt
of faalt bijna

Functionaris niet paraat

Functionaris neemt
foute beslissing

Bemannings niet paraat

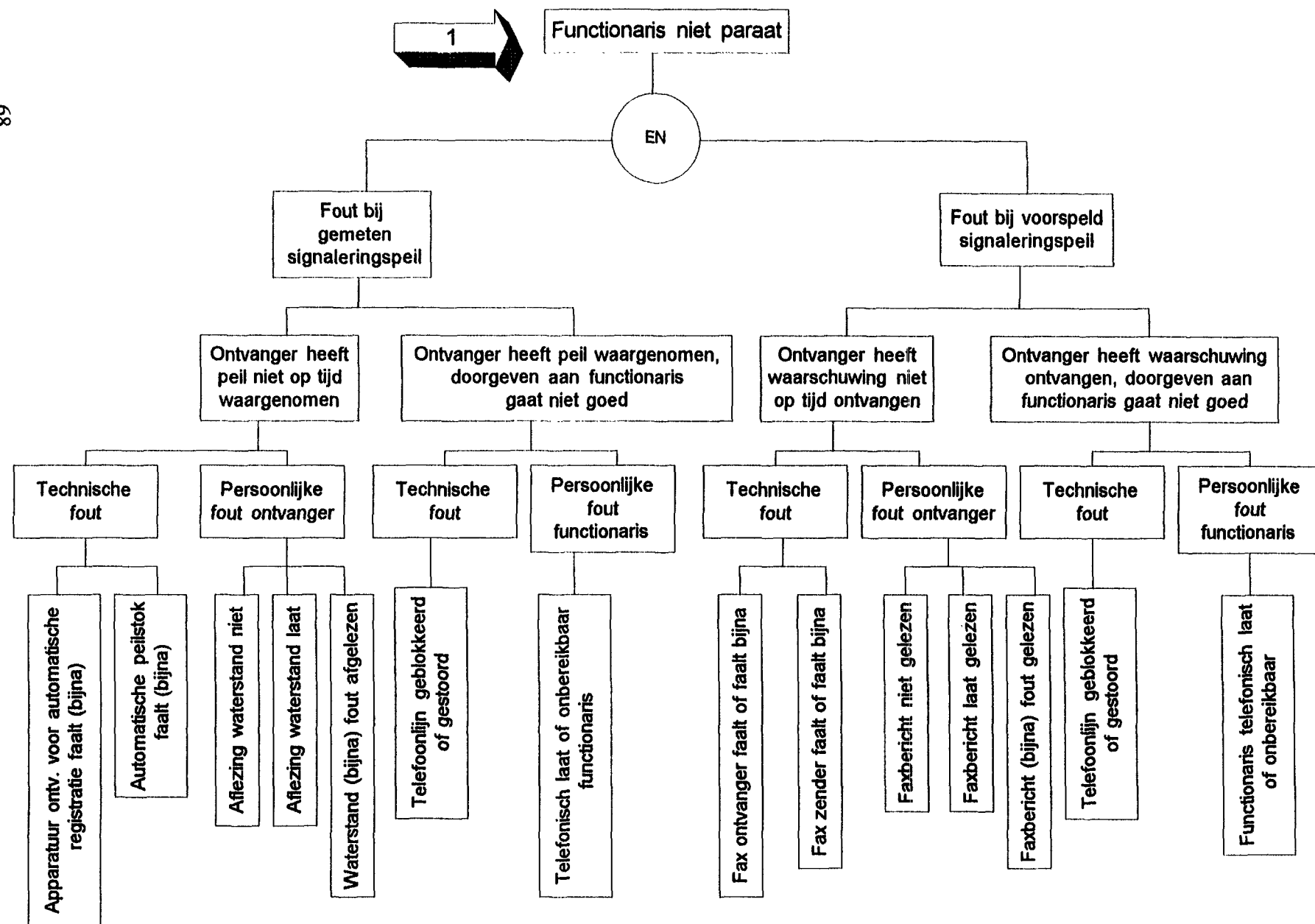
Foute sluitingsactie
door bemanning

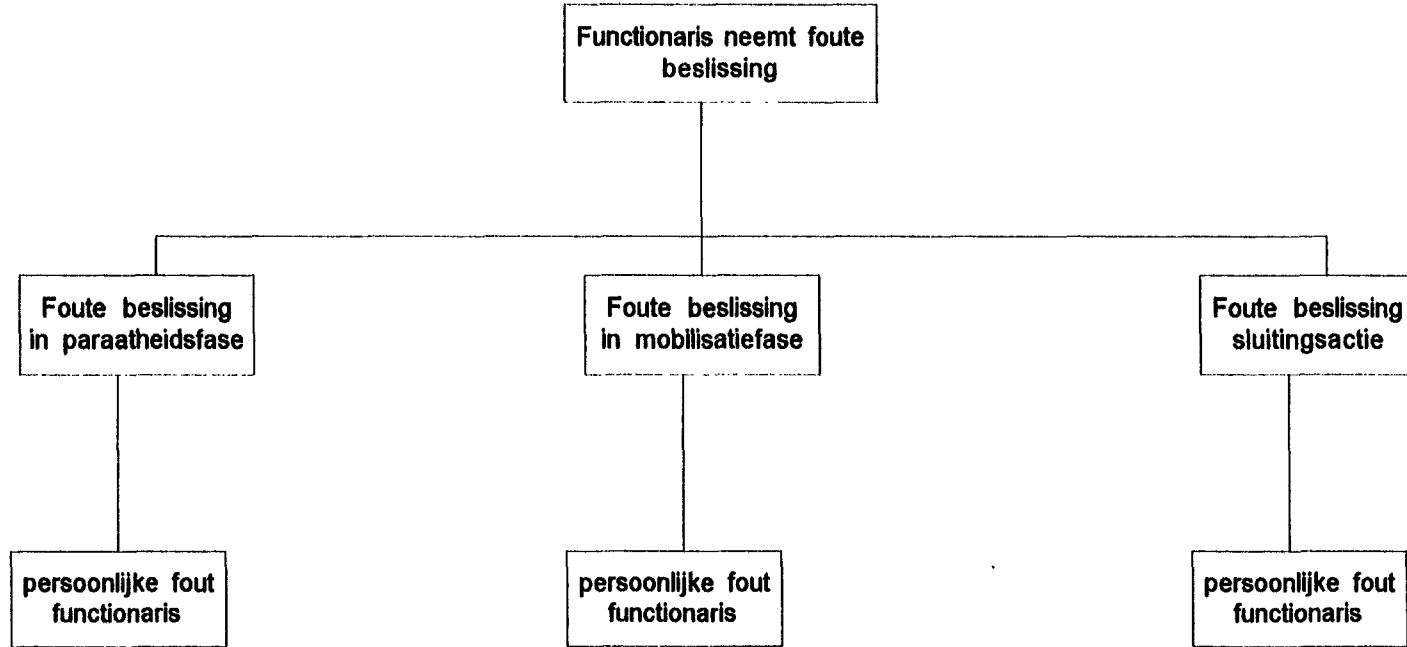
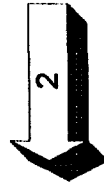
1

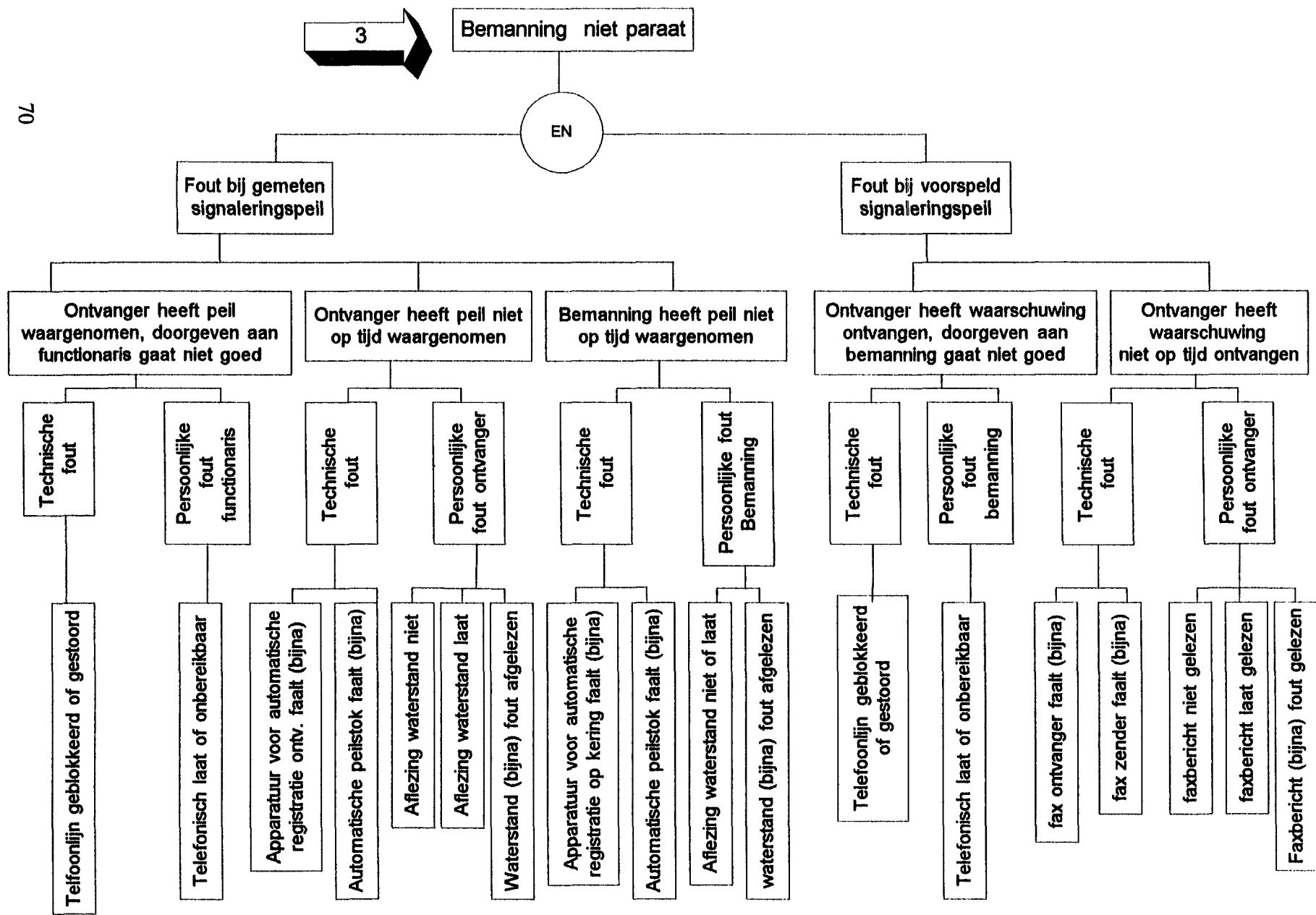
2

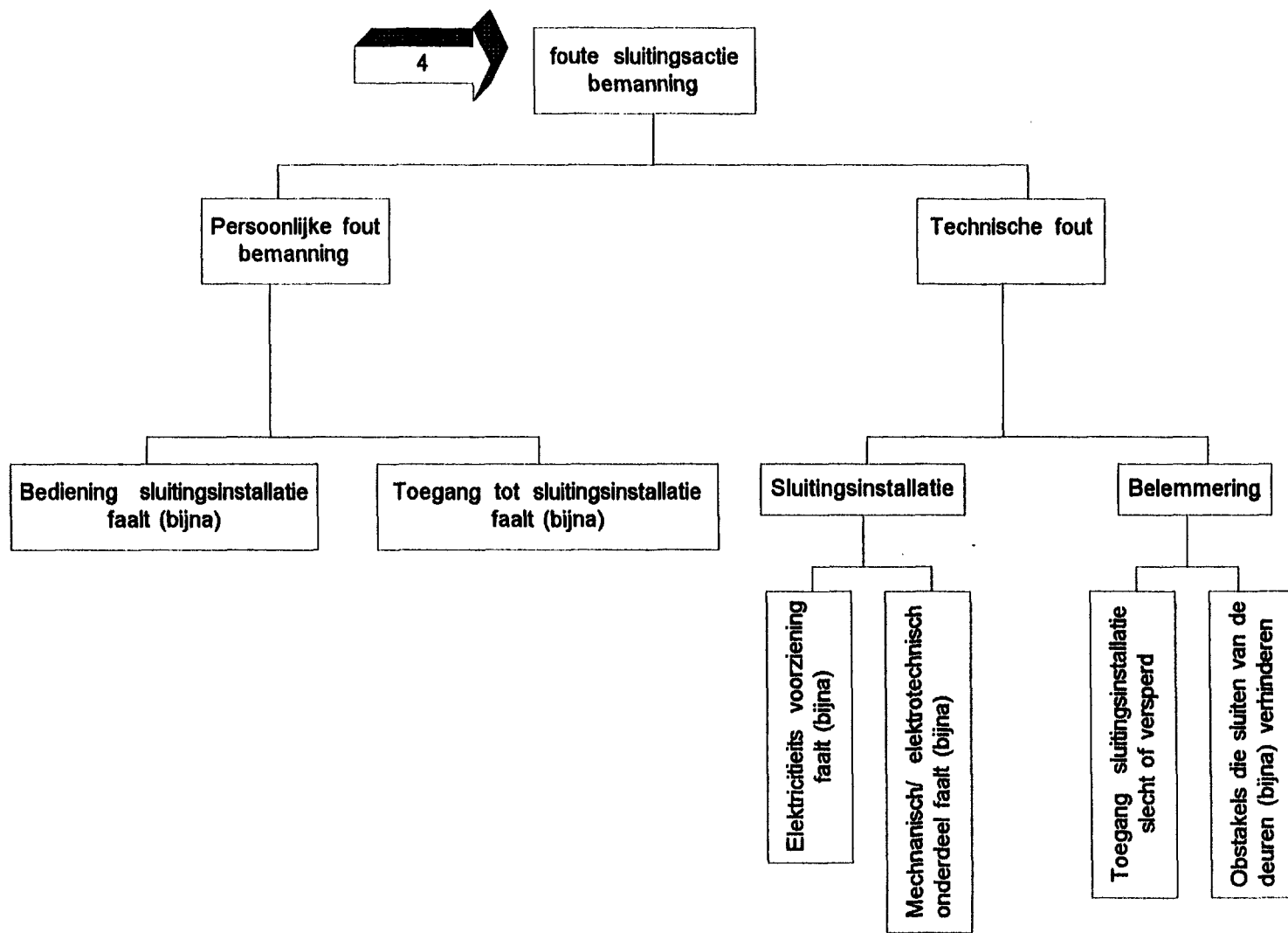
3

4









De boom is opgesteld op basis van de hieronder genoemde veronderstellingen m.b.t. de volgende onderdelen van de foutenboom.

Wanneer in het stormseizoen de veiligheid door hoogwater wordt bedreigd is er een organisatie nodig voor het veilig sluiten van de waterkering. De verantwoordelijkheid voor zo'n organisatie ligt bij de instantie die de waterkering in beheer heeft. Dit kan RWS zijn, maar ook een Waterschap of Gemeente.

Het signaleringspeil is een gedefinieerde lokale waterstand. Als dit peil bereikt wordt gaat de waarschuwingfase in: het oproepen van de organisatie bij verwacht hoogwater. Een voorspeld signaleringspeil kan afkomstig zijn van de Stormvloedwaarschuwingdienst (SVSD) van RWS, een lokaal gebruikt voorspellingssysteem of ook van een particuliere instantie op meteorologisch gebied. Een gemeten signaleringspeil is een lokale waterstand die verkregen wordt met een automatische waterstandsmeter (automatische peilstok).

Ontvanger is een persoon die 24 uur per dag en iedere dag van de week in staat is het gemeten en voorspeld signaleringspeil te ontvangen. Voor de lokatie van de ontvanger kan men in de praktijk denken aan een permanent bezette meld- en regelkamer van een gemeente of waterschap, een post van de politie of brandweer. Een voorspeld signaleringspeil geeft de ontvanger alleen door aan de functionaris. De bemanning op de waterkering kan dit peil namelijk rechtstreeks ontvangen.

Een functionaris is een persoon die hoort bij de instantie die de waterkering beheert en die bevoegd is de kering te laten sluiten in geval van nood. Een dergelijke functionaris treft men in de praktijk aan in de persoon van een dijkgraaf bij een waterschap, een hoofd van een afdeling waterhuishouding bij een waterschap, gemeente of district. De gewaarschuwde functionaris begeeft zich doorgaans naar de centrale post. Hij beslist op basis van de beschikbare informatie (het verwachte verloop van waterstanden, wind enzovoorts) of de centrale post in paraatheid dient te worden gebracht. Indien dit het geval is worden bepaalde personen opgeroepen naar de centrale post te komen.

Indien de waterkering niet volledig is bemand, worden de afwezige bedieners van de kering opgeroepen zich beschikbaar te houden om als dit nodig mocht blijken direct naar de kering te kunnen gaan. Wanneer de ontwikkeling van waterstanden en het weer aanleiding geven om de centrale post volledig te bezetten, gebeurt dit op initiatief van de mensen die zich al op de centrale post bevinden. Met de volledige bezetting van de centrale post worden ook de overige onderdelen van de organisatie gemobiliseerd. Hierbij kan men denken aan het oproepen van een storingsdienst, koeriers, de ontbrekende bemanning van de waterkering of aan een aannemersbedrijf. Deze laatste heeft zich contractueel verplicht werkzaamheden te verrichten aan dijken en waterkeringen wanneer die dreigen te bezwijken. In de mobilisatiefase van de organisatie dienen ook instanties en personen te worden ingelicht over de verwachte noodsituatie, zoals politie, brandweer, burgemeester en bedreigde groepen van de bevolking.

In het stroomschema is aangegeven dat de centrale post de communicatie onderhoudt met de bemanning op de waterkering. In overleg met de bemanning kan het besluit genomen worden de kering te sluiten.

Functionaris niet paraat. (Tak 1)

In deze subboom zijn de mogelijke gebeurtenissen vermeld waardoor de functionaris niet in paraatheid is bij komend hoogwater. Deze gebeurtenissen zijn te onderscheiden in technische fouten van de gebruikte middelen en persoonlijke fouten van ontvanger en functionaris. Onder technische fouten worden fouten in het primaire technische middel verstaan. In de foutenboom worden back-ups van technische middelen buiten beschouwing gelaten. Een technisch middel heeft bijna gefaald indien er storingen van technische aard zijn die in een relatief korte tijd kunnen worden verholpen. Dat wil zeggen dat de tijd die nodig is om storingen op te heffen kort is in verhouding tot de tijd dat het technische middel niet noodzakelijk in gebruik moet worden genomen. Men dient de categorie persoonlijke fouten in de foutenboom zo goed mogelijk te definiëren. In de foutenboom verstaat men onder een dergelijke fout: 'een niet herstelde, verkeerde handeling van een persoon in de bediening of bij gebruik van een goed werkend technisch middel. Een persoon faalt bijna in zijn of haar taakuitoefening wanneer een verkeerde handelwijze met een goed werkend technisch middel tijdig wordt hersteld.

Functionaris neemt foute beslissing. (Tak 2)

Deze subboom heeft betrekking op de beslissingen van de gewaarschuwde functionaris in de periode dat de centrale post in paraatheid is gebracht en vervolgens volledig is bemand. Uit de toelichting op het stroomschema mag blijken dat de zogenaamde 'functionaris' in werkelijkheid een groep mensen is, die uiteenlopende beslissingen nemen, onder andere voor het oproepen van reserve bemanning voor de waterkering. Communicatie met de bemanning en anderen is een belangrijke taak van de groep beslissers (functionaris), naast het volgen van waterstanden en het weer. In de foutenboom zijn de verschillende beslissingen in overleg situaties niet gedetailleerd weergegeven.

In de foutenboom zijn de mogelijke faalwijzen van technische middelen, voor oproep en bereikbaarheid van mensen vanuit de centrale post, niet opgenomen.

In de praktijk blijkt namelijk dat de centrale post, wanneer die eenmaal is bemand, zoveel verschillende mogelijkheden (back-ups) heeft om mensen tijdig te bereiken, dat faalwijzen in dit verband kunnen worden verwaarloosd. Dezelfde overweging geldt voor de beschikbaarheid van alle informatie op de centrale post die relevant is voor de beslissing om de waterkering te sluiten.

Bemanning niet paraat. (Tak 3)

Zie bij Functionaris niet paraat.

Hier is ook verondersteld dat de bemanning op de kering de voltallige bemanning is, omdat eventueel reserve bemanning, opgeroepen door de centrale post, met een te verwaarlozen faalkans tijdig op de kering moet kunnen zijn.

Foute sluitingsactie bemanning (Tak 4)

Deze subboom heeft betrekking op de daadwerkelijke sluitingsactie door de bemanning. Het niet kunnen sluiten van de kering kan ofwel veroorzaakt worden door een technische fout, in de sluitingsinstallatie of door een belemmering ofwel door een persoonlijke fout in de bediening of in de toegang tot de bedieningsruimte van de sluitingsinstallatie.

5.3 Definities

Een taak uitgevoerd door een persoon houdt verband met het gebruikmaken of het bedienen van technische middelen (telefoon, apparatuur, de sluitingsinstallatie van een waterkering etc.), en het gebruikmaken van informatie (voorspelling van waterstand en het weer, voorschriften en handleiding voor het gebruik van apparatuur etc.). In de foutenboom is sprake van technische of persoonlijke fouten (falen).

Technisch

- * Onder technische fouten worden fouten gerekend van het primaire technische middel waardoor bij het gebruik van het middel iemands taakuitoefening onmogelijk is. Back-ups van technische middelen worden buiten beschouwing gelaten.
- * Een primair technisch middel faalt bijna wanneer er storingen van technische aard zijn die zo snel zijn verholpen, dat het gebruik van het middel geen ernstige belemmering is voor iemands taakuitoefening.

Persoonlijk

- * Een persoonlijke fout is een verkeerde handeling van een persoon in de bediening of in het gebruik van een goed werkend technische middel, d.w.z. een middel dat niet faalt of bijna faalt tijdens de bediening of het gebruik.
- * Een persoon maakt bijna een fout wanneer een verkeerde handeling wordt hersteld tijdens de bediening of het gebruik van een goed werkend technisch middel.

Beslissen

- * Een foute beslissing is een verkeerde beslissing die een persoon neemt op grond van voldoende beschikbare en juiste informatie.
- * Een bijna foute beslissing is een foute beslissing die hersteld wordt zonder dat er additionele en juiste informatie voor nodig is.

In bovenstaande definities van (bijna) persoonlijke fouten en (bijna) verkeerde beslissingen is dus altijd verondersteld dat zulke (bijna) missers alleen worden beschouwd in relatie tot goed werkende technische middelen respectievelijk voldoende en juiste informatievoorziening.

Hiervan uitgaande zijn de basisgebeurtenissen in de foutenboom als volgt gedefinieerd.

In bijlage B zijn de codes van de basisgebeurtenissen in de boom aangegeven.

Definities van de basisgebeurtenissen in de fouten boom.

- x_1 Telefoonlijn Ontvanger-Functionaris geblokkeerd of gestoord.
(Telefoonverbinding Ontvanger-Functionaris faalt (bijna) door storingen, blokkering in PTT centrale of lokale centrale van Ontvanger)
- x_2 Telefoonlijn Ontvanger-Functionaris niet geblokkeerd of gestoord door technische oorzaak maar Funct. is telefonisch niet of laat bereikbaar voor Ontv. (allerlei persoonlijke situaties denkbaar waardoor Funct. wel of niet terecht de telefoon laat of zelfs helemaal niet opneemt)

- x₃ Apparatuur voor automatische registratie van ontvanger faalt (bijna) door een technische oorzaak.
(Registratie van waterstanden en het weer. Allerlei technische oorzaken van falen denkbaar)
- x₄ Automatische peilstok verbonden met de apparatuur voor automatische registratie van zowel Ontv. als Bem. faalt (bijna).
(Registratie van waterstanden en het weer. Peilstok ergens voor de kust. Allerlei technische oorzaken van falen denkbaar)
- x₅ Apparatuur van Ontv. en de automatische peilstok werken technisch goed
(niet falen, niet bijna falen) maar Ontv. leest de geregistreerde waterstanden en het weer niet.
- x₆ Apparatuur van Ontv. en de automatische peilstok werken technische goed
(niet falen, niet bijna falen) maar Ontv. leest de geregistreerde waterstand en het weer laat.
(Allerlei persoonlijke situaties denkbaar waardoor Ontv. terecht of niet terecht faalt in deze taakuitoefening)
- x₇ Apparatuur van Ontv. en de automatische peilstok werken technische goed
(niet falen, niet bijna falen) maar Ontv. leest de geregistreerde waterstand en het weer (bijna) fout.
- x₈ Apparatuur voor automatische registratie van waterstand en weer van de bemanning op de kering faalt (bijna) door een technische oorzaak.
(Allerlei technische oorzaken en storingen denkbaar voor falen en bijna falen)
- x₉ Apparatuur van de bemanning op de kering en de automatische peilstok werken technisch goed (niet falen, niet bijna falen) maar de bemanning op de kering leest de geregistreerde waterstanden en het weer niet.
(Allerlei persoonlijke situaties denkbaar waardoor de bemanning terecht of niet terecht faalt in deze taakuitoefening)
- x₁₀ Apparatuur van Bem. en de automatische peilstok werken technisch goed (niet falen, niet bijna falen) maar de bemanning op de kering leest de geregistreerde waterstanden laat.
- x₁₁ Apparatuur van de bemanning op de kering en de automatische peilstok werken technisch goed (niet falen en niet bijna falen) maar de bemanning leest de geregistreerde waterstand en het weer (bijna) fout.
- x₁₂ Telefoonlijn tussen ontvanger en bemanning geblokkeerd of verstoord.
(Telefoonverbinding tussen ontvanger en bemanning faalt (bijna) door storing, blokkering in PTT centrale of lokale centrale van de bemanning)
- x₁₃ Telefoonlijn tussen ontvanger en bemanning niet geblokkeerd of gestoord door een technische oorzaak, maar de bemanning is telefonisch niet of laat bereikbaar voor de ontvanger.
(Allerlei persoonlijke situaties denkbaar waardoor de bemanning terecht of onterecht faalt in deze taakuitoefening)
- x₁₄ Fax van de ontvanger voor ontvangst voorspeld signaleringspeil faalt (bijna) door een technische oorzaak.
(Allerlei technische oorzaken van storingen en mankementen denkbaar)
- x₁₅ Fax zender voorspeld signaleringspeil faalt (bijna) door een technische oorzaak.
- x₁₆ Fax van ontvanger en fax van zender voorspeld signaleringspeil werken technische goed (niet falen, niet bijna falen) maar de ontvanger leest het voorspeld signaleringspeil niet.
- x₁₇ Fax van ontvanger en fax van zender voorspeld signaleringspeil werken technische goed (niet falen, niet bijna falen) maar de ontvanger leest het voorspeld signaleringspeil laat.

- X₁₈ Fax van ontvanger en fax zender voorspeld signaleringspeil werken technisch goed (niet falen, niet (bijna) falen) maar ontvanger leest het voorspeld signaleringspeil (bijna) fout.
- X₁₉ Een (bijna) foute beslissing in waarschuwingsfase betekent, dat de functionaris tijdig is gewaarschuwd door ontvanger. Funct. heeft de nodige en juiste informatie over waterstand en weer, maar Funct. neemt (bijna) te laat de beslissing om de centrale post in paraatheid te brengen.
(Twijfel over juiste interpretatie van waarschuwingspeil en weer, overleg tussen functionaris en andere personen van de centrale post)
- X₂₀ Een (bijna) foute beslissing in paraatheidsfase betekent, dat de functionaris de centrale post in paraatheid heeft gebracht, de centrale post heeft de nodige en juiste informatie over waterstanden en het weer, maar de functionaris neemt (bijna) te laat de beslissing om de extra bemanning van de waterkering zich klaar te laten maken om naar de waterkering te gaan.
(De taak die de centrale post heeft om contact met de kering te onderhouden in de paraatheidsfase is buiten beschouwing gelaten)
- X₂₁ Een (bijna) foute beslissing in mobilisatie fase betekent, dat de functionaris de centrale post voltallig heeft laten bemannen. De centrale post heeft de nodige en juiste informatie over waterstanden en het weer, maar de functionaris neemt (bijna) te laat de beslissing om de waterkering te laten sluiten.
(Andere taken van de centrale post tijdens mobilisatie zijn buiten beschouwing gelaten. Zulke taken zijn: oproepen van aannemingsbedrijf, politie, brandweer, en derden als burgemeester, bevolking etc.)
- X₂₂ Bediening sluitsysteem faalt (bijna) wil zeggen dat het sluitsysteem technisch goed werkt, dat de voltallige bemanning op de kering aanwezig en paraat is, maar dat de bemanning maakt (bijna) een fout met de bediening van het sluitsysteem.
(Omdat de bemanning in de praktijk de kering eventueel op eigen initiatief, zonder opdracht van de centrale post zal sluiten, is X₂₂ onafhankelijk van X₂₁. Handmatig sluiten van de kering is een back-up en blijft buiten beschouwing)
- X₂₃ Toegang tot sluitsysteem faalt (bijna) wil zeggen dat de bediening van het sluitsysteem door menselijk gedrag niet of laat uitvoerbaar is gemaakt.
(Allerlei situaties denkbaar, zoals sleutel bedieningsruimte is zoek, niet vervangen kapotte lampen, gladde vloer door gemorste olie etc.)
(X₂₂ en X₂₃ zijn onafhankelijk)
- X₂₄ Elektriciteitsvoorziening faalt (bijna) betekent dat het geleverde elektrisch vermogen uit het GEB-net (bijna) faalt.
(Eigen elektriciteitsopwekking als back-up buiten beschouwing gelaten)
- X₂₅ Mechanisch / elektrotechnisch onderdeel van het sluitsysteem faalt (bijna).
(Storing en niet werkende onderdelen van het sluitsysteem)
- X₂₆ Toegang sluitsysteem slecht of versperd.
(Klemmende deur, vaste voorwerpen, nauwe trappen, slechte verlichting, die de toegang tot het sluitsysteem belemmeren of versperren)
- X₂₇ Obstakels die het sluiten van de deuren (bijna) verhinderen.
(Grote en zware voorwerpen in het water of op de oever in de omgeving van de deuren)

Van alle basisgebeurtenissen kunnen de factoren bepaald worden die van invloed zijn op het falen.

Deze factoren zijn voor:

X ₁	regelmatige inspectie, onderhoud
X ₂	ervaring, training, procedure, stress
X ₃	onderhoud
X ₄	onderhoud
X ₅	ervaring, training, procedure, stress (veel taken)
X ₆	ervaring, training, procedure, stress (veel taken)
X ₇	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk)
X ₈	onderhoud
X ₉	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk, veel taken)
X ₁₀	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk, veel taken)
X ₁₁	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk, veel taken)
X ₁₂	onderhoud
X ₁₃	ervaring, training, procedure, stress (veel taken)
X ₁₄	onderhoud
X ₁₅	onderhoud
X ₁₆	ervaring, training, procedure, stress (veel taken)
X ₁₇	ervaring, training, procedure, stress (veel taken)
X ₁₈	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk)
X ₁₉	ervaring, training
X ₂₀	ervaring, training, stress (tijdsdruk)
X ₂₁	ervaring, training, stress (tijdsdruk)
X ₂₂	ervaring, training, procedure, stress (tijdsdruk)
X ₂₃	voorschriften
X ₂₄	deze basisgebeurtenis wordt extern veroorzaakt
X ₂₅	onderhoud
X ₂₆	onderhoud van gebouwen
X ₂₇	voorschriften, onderhoud, inspectie

De volgende afhankelijke basisgebeurtenissen moeten worden geschat

- | | | |
|-----|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) | $P(x_6 \text{ en } x_7) = P(x_7 \mid x_6) P(x_6)$ | Ontvanger leest waterstand laat en ontvanger leest waterstand (bijna) fout. |
| (2) | $P(x_{10} \text{ en } x_{11}) = P(x_{11} \mid x_{10}) P(x_{10})$ | Bemanning leest waterstand laat en bemanning leest waterstand (bijna) fout. |
| (3) | $P(x_1 \text{ en } x_{12}) = P(x_{12} \mid x_1) P(x_1)$ | Telefoonlijn ontv-funct geblokkeerd/ verstoord en telefoonlijn ontv-bemanning geblokkeerd/ verstoord. |
| (4) | $P(x_{17} \text{ en } x_{18}) = P(x_{18} \mid x_{17}) P(x_{17})$ | Ontvanger leest faxbericht laat en ontvanger leest faxbericht (bijna) fout. |
| (5) | $P(x_{19} \text{ en } x_{20}) = P(x_{20} \mid x_{19}) P(x_{19})$ | Functionaris beslist (bijna) fout in waarschuwingsfase en functionaris beslist (bijna) fout in paraatheidsfase. |
| (6) | $P(x_{20} \text{ en } x_{21}) = P(x_{21} \mid x_{20}) P(x_{20})$ | Functionaris beslist (bijna) fout in paraatheidsfase (oproepen extra bemanning) en functionaris beslist (bijna) fout in mobilisatiefase (sluiten kering). |

Elkaar wederzijds uitsluitende basisgebeurtenissen.

- 1) $P(x_1 \text{ en } x_2) = 0$ Telefoonlijn ontv-funct geblokkeerd/ gestoord en funct. is niet/ laat telefonisch bereikbaar voor ontvanger.
- 2) $P(x_3 \text{ en } x_5) = 0$ App. ontv. faalt (bijna) en ontv. leest waterstand niet.
- 3) $P(x_3 \text{ en } x_6) = 0$ App. ontv. faalt (bijna) en ontv. leest waterstand laat.
- 4) $P(x_3 \text{ en } x_7) = 0$ App. ontv. faalt (bijna) en ontv. leest waterstand (bijna) fout.
- 5) $P(x_4 \text{ en } x_5) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en ontv. leest waterstand niet.
- 6) $P(x_4 \text{ en } x_6) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en ontv. leest waterstand laat.
- 7) $P(x_4 \text{ en } x_7) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en ontv. leest waterstand bijna fout.
- 8) $P(x_4 \text{ en } x_9) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en bemanning leest waterstand niet.
- 9) $P(x_4 \text{ en } x_{10}) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en bemanning leest waterstand laat.
- 10) $P(x_4 \text{ en } x_{10}) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en bemanning leest waterstand (bijna) fout.
- 11) $P(x_{12} \text{ en } x_{13}) = 0$ Telefoonlijn ontv.-beman. geblokkeerd/ gestoord en beman. is niet/ laat bereikbaar voor ontv.
- 12) $P(x_{14} \text{ en } x_{16}) = 0$ Fax ontv. faalt (bijna) en ontv. leest fax niet.
- 13) $P(x_{14} \text{ en } x_{17}) = 0$ Fax ontv. faalt (bijna) en ontv. leest fax laat.
- 14) $P(x_{14} \text{ en } x_{18}) = 0$ Fax ontv. faalt (bijna) en ontv. leest fax (bijna) fout.
- 15) $P(x_{15} \text{ en } x_{16}) = 0$ Fax zender faalt (bijna) en ontv leest fax niet.
- 16) $P(x_{15} \text{ en } x_{17}) = 0$ Fax zender faalt (bijna) en ontv leest fax laat.
- 17) $P(x_{15} \text{ en } x_{18}) = 0$ Fax zender faalt (bijna) en ontv leest fax (bijna) fout.
- 18) $P(x_1 \text{ en } x_{19}) = 0$ Telefoonlijn ontv.-funct. geblokkeerd/ en gestoord en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 19) $P(x_2 \text{ en } x_{19}) = 0$ Func. is telefonisch niet/ laat bereikbaar voor ontv. en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 20) $P(x_3 \text{ en } x_{19}) = 0$ Apparatuur ontv. faalt (bijna) en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 21) $P(x_4 \text{ en } x_{19}) = 0$ Peilstok faalt (bijna) en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.

- 22) $P(x_5 \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest waterstand niet en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 23) $P(x_6 \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest waterstand laat en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 24) $P(x_7 \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest waterstand (bijna) fout en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarsch. fase.
- 25) $P(x_{14} \text{ en } x_{19}) = 0$ Fax ontv. faalt (bijna) en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarschuwingfase.
- 26) $P(x_{15} \text{ en } x_{19}) = 0$ Fax zender faalt (bijna) en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarschuwingfase.
- 27) $P(x_{16} \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest fax niet en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarschuwingfase.
- 28) $P(x_{17} \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest fax laat en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarschuwingfase.
- 29) $P(x_{18} \text{ en } x_{19}) = 0$ Ontv. leest fax (bijna) fout en tijdig gewaarschuwde funct. neemt (bijna) foute beslissing in waarschuwingfase.
- 30) $P(x_j \text{ en } x_{20}) = 0$ $x_j = 1,2...7, 14,15,...,18$, $x_{20} =$ (bijna) foute beslissing, paraatheidsfase.
- 31) $P(x_j \text{ en } x_{21}) = 0$ $x_j = 1,2...7, 14,15,...,18$, $x_{21} =$ (bijna) foute beslissing, mobilisatiefase.
- 32) $P(x_{22} \text{ en } x_{24}) = 0$ (Bijna) bedieningsfout en niet goed werkend sluitsysteem doordat elektriciteitsvoorziening faalt (bijna).
- 33) $P(x_{22} \text{ en } x_{25}) = 0$ Bemanning maakt (bijna) bedieningsfout en niet goed werkend sluitsysteem doordat mechanisch/ elektrotechnisch onderdeel van het systeem faalt (bijna).
- 34) $P(x_{22} \text{ en } x_{26}) = 0$ Bemanning maakt (bijna) bedieningsfout en niet goed werkend sluitsysteem doordat toegang sluitingsinstallatie slecht of versperd door technische oorzaak.
- 35) $P(x_8 \text{ en } x_9) = 0$ Apparatuur van Bem. faalt (bijna) en Bemanning leest waterstand/ weer niet.
- 36) $P(x_8 \text{ en } x_{10}) = 0$ Apparatuur van Bem. faalt (bijna) en Bemanning leest waterstand/ weer laat.
- 37) $P(x_8 \text{ en } x_{11}) = 0$ Apparatuur van Bem. faalt (bijna) en Bemanning leest waterstand/ weer (bijna) fout.

In Bijlage B zijn de afhankelijke, onafhankelijke en elkaar uitsluitende gebeurtenissen in een tabel weergegeven.

5.4 Expert meningen

Allereerst is met behulp van expert meningen voor iedere component de bijdrage aan de betrouwbaarheid bepaald. Aan de hand van de foutenboom is een enquête opgesteld die aan sluiswachters en functionarissen voorgelegd is (7 experts).

Getracht is de sluiswachter en functionarissen zodanig te kiezen dat gegevens verkregen worden van zoveel mogelijk soorten keringen. Hiermee wordt bedoeld dat zowel hele geautomatiseerde als eenvoudige handmatig te sluiten keringen in de enquête meegenomen zijn.

In de enquête is voor iedere afsplitsing in de boom gevraagd 100 punten te verdelen over de afgesplitste takken. De takken geven de oorzaak weer van het falen van een onderdeel. De meeste punten dienen te worden gegeven aan die oorzaak die het meest bijdraagt aan het falen van het onderdeel.

Tevens dienen de ondervraagden hun onzekerheid over hun gegeven antwoord aan te geven door de bandbreedte aan te geven waartussen de 'score' van een oorzaak ligt.

Voor afhankelijke oorzaken zijn de correlaties gevraagd.

De schattingsmethode met experts

Om kwantitatief de betrouwbaarheid te bepalen met behulp van experts wordt de volgende methode toegepast.

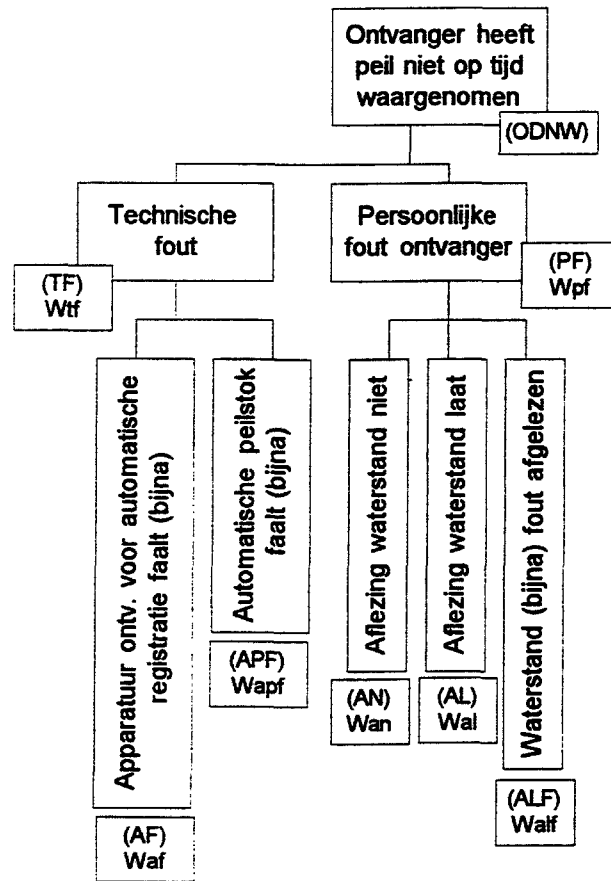
- 1 Maak een analyse van de organisatie en de taken.
- 2 Stel de foutenboom op.
- 3 Definieer de basisgebeurtenissen van de foutenboom. Het is met name van belang de basisgebeurtenissen te identificeren die onderling stochastisch afhankelijk zijn of die elkaar paarsgewijs wederzijds uitsluiten.
- 4 Stel de schattingsboom op. Deze wordt verkregen door in de foutenboom iedere poort indien nodig te vervangen door een of-poort. De schattingsboom bevat dezelfde basisgebeurtenissen, met dezelfde stochastische eigenschappen, als de foutenboom.
- 5 Gebruik de schattingsboom voor het inwinnen van expertmeningen. Stel een vragenlijst op voor de kwantificering van de individuele schattingen van de geïnterviewde experts.

Toelichting op het gebruik van de schattingsboom.

- a De in de foutenboom geïdentificeerde afhankelijke basisgebeurtenissen geven aanleiding tot voorwaardelijke kansen die met experts direct worden geschat.
- b De experts schatten ook direct de a priori kans dat de topgebeurtenis van de schattingsboom optreedt. (Deze topgebeurtenis is dezelfde als die in de foutenboom, maar heeft een andere relatie met de basisgebeurtenissen)
- c Voor de berekening van de primaire kansen op de basisgebeurtenissen is het nodig dat, naast de onder a en b genoemde kansen, de voorwaardelijke kansen in de schattingsboom worden bepaald. Dit gebeurt d.m.v. een punten- verdeling van de expert voor elke afsplitsing in de schattingsboom.

Het volgende voorbeeld illustreert de werkwijze.

Schatten van Functionaris niet paraat



Figuur 5.1 Een onderdeel van TAK 1 van de fouten boom, Functionaris (bijna) niet paraat.

$$P(OPNW) = P(TF \text{ of } PF) = P(TF) + P(PF) - P(TF \text{ en } PF) \quad (5.1)$$

$$P(TF) = P(AF \text{ of } APF) = P(AF) + P(APF) - P(AF \text{ en } APF)$$

$$P(TF) = P(AF) + P(APF) - P(AF)P(APF) \quad (5.2)$$

$$P(PF) = P(AN \text{ of } AL \text{ of } ALF) = P(AN) + P(AL) + P(ALF) - P(AN \text{ en } AL)$$

$$- P(AN \text{ en } ALF) - P(AL \text{ en } ALF) + P(AN \text{ en } AL \text{ en } ALF)$$

Met $P(AN \text{ en } AL) = 0$

$$P(AN \text{ en } ALF) = 0$$

$$P(\text{AN en AL en ALF}) = 0$$

$P(\text{AL en ALF})$ is niet 0

$$P(\text{PF}) = P(\text{AN}) + P(\text{AL}) + P(\text{ALF}) - P(\text{AL en ALF}) \quad (5.3)$$

In (1) is verder

$$\begin{aligned} P(\text{TF en PF}) &= P[(\text{AF of APF}) \text{ en } (\text{AN of AL of ALF})] = \\ &= P[\{\text{AF en } (\text{AN of AL of ALF})\} \text{ of } \{\text{APF en } (\text{AN of AL of ALF})\}] = \\ &= P[\{\text{AF en AN}\} \text{ of } \{\text{AF en AL}\} \text{ of } \{\text{AF en ALF}\}] \text{ of } \{\text{APF en AN}\} \text{ of} \\ &\quad \text{of } \{\text{APF en AL}\} \text{ of } \{\text{APF en ALF}\}] \end{aligned}$$

Met (AF en AN), (AF en AL), (AF en ALF), (APF en AN), (APF en AL), (APF en ALF) = leeg volgt,

$$P(\text{TF en PF}) = 0 \quad (5.4)$$

dus (1) wordt met (2), (3) en (4),

$$P(\text{OPNW}) = P(\text{AF}) + P(\text{APF}) + P(\text{AN}) + P(\text{AL}) + P(\text{ALF}) - P(\text{AF}) P(\text{PF}) - P(\text{AL en ALF}) \quad (5.5)$$

Uit (2) volgt,

$$P(\text{TF} \mid \text{TF}) = 1 = P(\text{AF} \mid \text{TF}) + P(\text{APF} \mid \text{TF}) - P(\text{AF} \mid \text{TF}) P(\text{APF} \mid \text{TF}) \quad (5.6)$$

Voor de toegekende punten aan W_{af} en w_{apf} geldt

$$1 = w_{af} + w_{apf}$$

benader $P(\text{AF} \mid \text{TF}) = w_{af}$ en $P(\text{APF} \mid \text{TF}) = w_{apf}$

Dat wil zeggen in (6) is de term $P(\text{AF} \mid \text{TF}) P(\text{APF} \mid \text{TF})$ verwaarloosd. Hiervoor kan steeds worden gecorrigeerd als alle kansen van de basisgebeurtenissen zijn uitgerekend.

Uit (3) volgt,

$$P(PF | PF) = 1 = P(AN | PF) + P(AL | PF) + P(ALF | PF) - P[(AL \text{ en } ALF) | PF]$$

$$1 = P(AN | PF) + P(AL | PF) + P(ALF | PF) - P[ALF | (AL \text{ en } PF)]P(PF) \quad (5.7)$$

Voor de toegekende punten aan w_{an} , w_{al} , w_{alf} geldt,

$$1 = w_{an} + w_{al} + w_{alf}$$

Verwaarloos $P[ALF | (AL \text{ en } PF)]P(PF)$ in (7) en neem als eerst benadering

$$P(AN | PF) = w_{an}, P(AL | PF) = w_{al}, P(ALF | PF) = w_{alf}$$

Uit (1) , (4) volgt

$$P(OPNW | OPNW) = 1 = P(TF | OPNW) + P(PF | OPNW) \quad (5.8)$$

Voor de toegekende punten aan w_{tf} en w_{pf} volgt

$$1 = w_{tf} + w_{pf}$$

$$\text{Zodat } P(TF | OPNW) = w_{tf}, P(PF | OPNW) = w_{pf}$$

Op deze manier worden de kansen op de basisgebeurtenissen uitgerekend m.b.v. de (benaderde) voorwaardelijke kansen op elk niveau van de schattingsboom en met de geschatte a priori kans op de topgebeurtenis van de boom.

Daarna worden de voorwaardelijke kansen zodanig gecorrigeerd, dat zij op elk niveau van de schattingsboom voldoen aan de vergelijkingen die volgens de kansrekening moeten gelden (zie (6), (7), (8))

Met de gecorrigeerde voorwaardelijke kansen worden tenslotte de kansen op de basisgebeurtenissen bijgesteld.

5.5 THERP methode

Vervolgens zullen met behulp van de THERP gegevens ook de betrouwbaarheid van de verschillende factoren bepaald worden.

In de enquête is reeds voor iedere fase gevraagd het stress niveau weer te geven voor de bemanning en de functionaris. Dit stress niveau is een factor die in de THERP methode bepalend is voor de kwantificering.

5.6 Beschrijving systemen onderzochte keringen

COUPURE DEN OEVER

Den Oever ligt aan de rand van de Wieringen (NH), net achter de dijk die het dorp en achterland beschermt tegen de Waddenzee. De dijk maakt deel uit van de zeeweringen in Noord-Holland, en wel van het gedeelte van het Noordzeekanaal tot aan de Afsluitdijk. Juist ten zuiden van het dorp sluit de Afsluitdijk aan op het vasteland. Wieringen en de Wieringermeer vormen in Noord-Holland ten noorden van het Noordzeekanaal, een aparte dijkkring met een vereiste veiligheid tegen waterstanden met een frequentie van $2.5E-04$ ofwel $1/4000$ per jaar.

De noordwestzijde van het dorp grenst direct aan het wad, terwijl de noordoostzijde van het dorp van het wad wordt gescheiden door de Noorderhaven met vissershaven en de Buitenhaven. De Buitenhaven geeft toegang tot de Noorderhaven en de Stevinsluizen. De vissershaven is een afgeschermd gedeelte in de Noorderhaven. Aan de Noorderhaven ligt buitendijs een haventerrein, dat bereikbaar is via twee dijkovergangen, één aan de zuidzijde van het dorp en één in het dorp zelf. Ter hoogte van de visafslag en de vissershaven is dit haventerrein vanuit de Zeestraat bereikbaar via de afsluitbare coupure in de Zuidoeverdijk tussen dijkpaal 25.7 en 25.8.

De coupure vervult daarmee een uiterst belangrijke sociale functie als doorgang van het dorpscentrum naar de haven. Het is een typisch ontmoetingspunt in het dorp met bankjes, een viskraam, winkels en aanliggende en vertrekkende boten.

De drempel (NAP +2.47 m) en de zool (NAP +1.35m) liggen ruim onder het maatgevend hoogwater (NAP +4.80m) en ook onder de tot nu toe hoogst gemeten waterstand in 1953 van NAP +3.70m.

Het Rijk heeft het beheer van de coupure onlangs overgedragen aan het Hoogheemraadschap Noordhollands Noorderkwartier. De zeewering ligt geheel op deltahoogte (NAP +6.00).

Constructie

De coupure is 4.00 m breed en word gesloten door een enkel stel puntdeuren aan de waterzijde en dubbele schotbalken aan de dorpszijde. Puntdeuren en schotbalken reiken tot aan de hoogte van de dijk kruin op 6.00⁺.

Sluitingsprocedure en bediening van de coupure

- De telefonische melding van de SVSD over de te verwachten overschrijding van het waarschuwingspeil NAP +1.90m, in de sector Den Helder wordt ontvangen door het districtshoofd Kust of diens plaatsvervanger.
- Het districtshoofd Kust informeert bij de SVSD naar het verwachte tijdstip en de verwachte maximale waterstand te Den Helder.
- Het districtshoofd Kust geeft de ontvangen melding door aan het regionaal alarmcentrum Kop van Noord-Holland en aan de opzichter in Den Oever.
- Het districtshoofd Kust pleegt overleg met de opzichter Den Oever over de te verwachte waterstand te Den Oever. Als vuistregel geldt: w.s Den Oever = w.s Den Helder +0.30m à 0.35m.
- De opzichter Den Oever volgt de ontwikkeling van de waterstand te Den Oever via het Monitoring Systeem Waterhoogte (MSW) en/of via teletekst.
- Als uit het MSW of uit Teletekst blijkt dat de actuele waterstand te den Oever NAP + 2.00 m bedraagt, roept de opzichter Den Oever assistentie op. Samen begeven zij zich via het magazijn te Den Oever naar de coupure in de waterkering.

- Indien na aankomst te Den Oever, uit aflezing van de in de haven aanwezige peilschaal, blijkt dat de waterstand nog steeds stijgt, wordt bij een waterstand van NAP + 2.20 m tot sluiting overgegaan. De sluiting wordt door de opzichter Den Oever meegedeeld aan het districtshoofd Kust.
- Het districtshoofd Kust meldt het sluiten van de coupure in de eerste waterkering aan het Rijks alarmcentrum (RAC) Kop van Noord-Holland.
- Indien de waterstand te Den Helder afneemt tot onder NAP +1.90 en een verder daling wordt verwacht, geeft het districtshoofd Kust opdracht om de genomen maatregelen op te heffen.

Niet functioneren van de coupure

Bij niet functioneren van de coupure zal eerst het dorp Den Oever onderlopen en daarna een landelijk gebied van 9 à 10 km². Dit zou als volgt gaan. De coupure dient te worden gesloten bij stijgend water. Indien sluiting om een of andere reden achterwege blijft zal bij doorgaande stijging het water over de drempel het dorp instromen. Langs de dijk is het polderniveau het hoogst ($\pm 2.30^+$), verderop in het dorp ligt het maaiveld op NAP +1.00 à 2.00 m. Het niveau in de Gesterkoog ofwel de Gester en Oeverpolder achter Den Oever varieert van NAP tot 1.00 m⁺. Vanuit de Gesterkoog zou de overstroming zich kunnen voortzetten als de hoeveelheid instromend water voldoende groot is. Het land ligt in die engte op ongeveer NAP+1.60 m. Het water zou tussen het hooggelegen plaatsje Oosterland (NAP +2.50 tot 7.30 m) en de Oostlanderdijk (NAP +2.20 m) doorstromen, verder de 'Aangedijkte Landen' van het eiland Wieringen op.

Voordat dit gebeurt zal het door de coupure binnenstromende water zich ophopen in de Gester en Oeverpolder. Het volume binnenstromend water gedurende een storm is voldoende om in deze polders van ongeveer 1.5 km² een inundatiediepte van ongeveer 40 cm tot 1.5 meter te veroorzaken [Tonnejck en Koster, 1993].

KERINGEN ROTTERDAM

De Gemeentewerken Rotterdam afdeling Waterhuishouding, waar de experts voor de enquête in Rotterdam vandaan komen, beheren onder andere de Centrale Meld- en Regelkamer van de afdeling Waterhuishouding. Deze dienst houdt zich voornamelijk bezig met ontwatering van Rotterdam.

In zoverre hebben zij met het sluitingsproces van beweegbare waterkeringen te maken dat zij de hoogwaterpeilen in het gebied bewaken. Gemeentewerken bewaakt het hoogwaterpeil langs het Nieuwe Maas/ Oude Maas-Nieuwe Waterwegtracee. Naast expertise, beschikt Gemeentewerken ook over peil-waarnemingsstations langs het tracé. Gemeentewerken waarschuwt gemeentelijk instellingen en openbare bedrijven binnen de gemeente, die daarom verzoeken, indien de hoogwaterstand een peil bereikt, dat bedreigend is voor de bedrijfsvoering.

In geval van hoogwater zorgt de afdeling Waterhuishouding ook voor het afsluiten van een aantal open verbindingen (spuisluizen, riolering etc.).

Het onderzoek in Rotterdam is dus niet verricht voor één specifieke kering, maar voor het algemene waarschuwingsproces.

Procedure

De hoogwaterpeilbewaking geschiedt op de Centrale Meld- en Regelkamer van de afdeling Waterhuishouding.

Zodra een waarschuwing wordt ontvangen van de Stormvloedwaarschuwingdienst (SVSD) van Rijkswaterstaat worden, ongeacht het peil, achtereenvolgens de onderstaande punten afgewikkeld.

- Indien het zich laat aanzien, dat te Hoek van Holland het peil van 1.80 m+ NAP, overschreden kan worden, dan waarschuwt de operator van de wacht de Chef Hoogwaterpeilbewaking of zijn plaatsvervanger. Deze beoordeelt de situatie, betreft indien nodig de Centrale Post, gevestigd op de Meldkamer of op de Noodpost en neemt daarvan de leiding op zich.
- Indien te Hoek van Holland het peil van 1.80 m +NAP is bereikt en het zich laat aanzien, dat in Rotterdam het peil van 2.20 m +NAP zal worden overschreden dan waarschuwt de Chef Hoogwaterpeilbewaking de wacht- en waakdienst-ambtenaar van de organisatie voor Rampen en Civiele verdediging.
- Elke 15 minuten wordt de actuele waterstand aan deze ambtenaar meegedeeld.

Indien te Hoek van Holland de 1.80 m+NAP is bereikt en het zich laat aanzien, dat daar, en ook te Rotterdam het peil van 2.40 +NAP zal kunnen worden overschreden, laat de Chef Hoogwaterpeilbewaking de Chef Dijkbewaking waarschuwen, die zo spoedig mogelijk de Centrale Post betreft.

Verder gaat een voorwaarschuwing uit naar de coördinatoren/adviseurs van verschillende posten of hun plaatsvervangers, met het verzoek om bij waarschuwing de posten te betrekken.

Indien te Hoek van Holland het peil van 2.40 m+NAP wordt bereikt of overschreden worden de adviseurs/coördinatoren gewaarschuwd, hun post daadwerkelijk te bezetten.

Indien te Rotterdam het peil van 2.20m +NAP wordt bereikt, neemt de Chef Hoogwaterpeilbewaking contact op met de sluiswachter van de Boerengatsluis, en waarschuwt hij de afdeling Onderhoud Kunstwerken [Geense, 1994].

OOSTERSCHELDE KERING

De Oosterschelde werken, in Zeeland, zijn onderdeel van de Delta werken. Oorspronkelijk was de Oosterschelde kering gepland als permanent gesloten dam. Door protest vanuit milieu overwegingen is besloten de kering beweegbaar te maken. Alleen bij hoogwater wordt de kering gesloten. De kering sluit drie getijgeulen af, de Hammen (1800 m breed), de Schaar (1200 m breed) en de Roompot (2500 m breed).

De constructie bestaat uit 65 kolommen waartussen stalen schuiven naar beneden gelaten kunnen worden. De stalen schuiven (62 stuks) zijn 43 meter lang en 5.40 meter dik.

Na voltooiing van het Delta Plan (alle dijken en dammen tezamen) is er nog steeds een kans dat Zeeland overstroomt. Deze kans is echter gereduceerd tot 1/4000 jaar.

Sinds 1986 is de Oosterschelde kering operabel.

Bij een voorspeld signaleringspeil van 3.00 m+ NAP wordt de kering gesloten.

Het sluiten gebeurt vanuit de bedieningsruimte op de kering. Vanaf hier kan gecontroleerd worden of de schuiven daadwerkelijk naar beneden gaan. Indien, één of meer schuiven niet sluiten kan ter plaatse van de schuif de schuif apart bediend worden.

In geval dat er niet gesloten wordt is er een alarmsysteem dat, na bereiken van een bepaald peil, automatisch de schuiven laat zakken.

Voor de elektriciteitsvoorziening zijn eigen generatoren aanwezig, met een back-up systeem.

H6 Expert meningen

Dit hoofdstuk doet verslag van het beproeven van methoden voor kwantificering van de betrouwbaarheid van de onderdelen die van invloed zijn op de sluitingsprocedure.

Experts hebben in een enquête hun ervaring met de betrouwbaarheid van de verschillende factoren in het sluitingsproces kwantitatief weergegeven.

Achtereenvolgens zullen de methode in het algemeen en zoals deze in dit onderzoek is toegepast worden besproken, om te besluiten met een bespreking van de resultaten.

6.1 Expert meningen algemeen

Het gebruik van expert meningen voor veiligheidsstudies is niet nieuw. Uiteenlopende sectoren maken al geruime tijd gebruik van gegevens en meningen die afkomstig zijn van deskundigen. Ook het kwantificeren van onzekerheid door experts is niet nieuw. Sinds een aantal jaren wordt bij risico-analyses gebruik gemaakt van expertmeningen voor het kwantificeren van onzekerheid in het algemeen en meer in het bijzonder voor het schatten van component faalkansen.

Bij het gebruik van expert meningen komen verschillende problemen aan de orde. Het grootste probleem is de enorme spreiding die kansschattingen kunnen vertonen. Het geven van puntschattingen is onvoldoende om de onzekerheid van de variabele weer te geven.

Een ander probleem is het kiezen van de experts en het combineren van de verkregen expert meningen indien verschillende experts zijn geraadpleegd [Van Steen en Oortman Gerlings, 1988].

R.M. Cooke [Cooke, 1991] geeft een methode om experts te kalibreren. Door in de vragenlijst een vraag te stellen naar de betrouwbaarheid van een component, waarvan de betrouwbaarheid reeds bekend is, kan de expert gekalibreerd worden. Hieruit blijkt in welke mate de expert van het juiste antwoord afwijkt.

Deze methode is in dit onderzoek niet toegepast, omdat het niet altijd een voldoende betrouwbare methode is. Het hangt erg van de expert af of hij in staat is over de gevraagde component de juiste betrouwbaarheid in te schatten.

6.2 Opzet enquête

Gezien de algemene opzet van de enquête en het grote aantal vragen die bij invulling van de enquête kan opkomen is de enquête zoveel mogelijk persoonlijk afgenomen. Door de inleidingen goed te lezen moet het ook mogelijk zijn de enquête schriftelijk in te vullen.

Na een algemene inleiding met een paar voorbeeld vragen wordt voor iedere afsplitsing in de foutenboom gevraagd punten te verdelen. Voor het falen van een onderdeel worden twee of drie oorzaken gegeven. De expert wordt gevraagd 100 punten te verdelen over deze twee oorzaken, waarbij men de meeste punten dient te geven aan die oorzaak die het meest bijdraagt aan het falen van het onderdeel.

Tevens wordt gevraagd om de onzekerheid omtrent het gegeven antwoord aan te geven. Voor iedere oorzaak dient men het maximaal toe te kennen aantal punten en het minimaal toe te kennen aantal punten aan te geven. Op basis van deze onzekerheidsgrenzen is de onzekerheid van de geschatte kansen te bepalen. De onzekerheidsgrenzen zullen ook gebruikt worden als relatieve maat voor de onderlinge weging van de expertmeningen. De onzekerheid zal gebruikt worden als maat voor de weegfactor van de expert. Uiteindelijk zullen de antwoorden gewogen gemiddeld worden. Een expert met minder onzekerheidsmarges telt daarbij zwaarder mee dan een expert met grote onzekerheidsmarges.

Bij de enquête is de foutenboom gegeven, zodat de expert een beter beeld krijgt van de inhoud van de vragen.

Per kering zijn twee of drie experts ondervraagd. Deze experts hadden verschillende functies van bemanning of functionaris.

In bijlage C is de enquête gevoegd.

6.3 Sociaal verslag

6.3.1 Voorbereiding en afname enquête

De toezeggingen van de verschillende experts verliep zonder moeite. Bij Den Oever en Rotterdam is de enquête ook daadwerkelijk persoonlijk afgenomen. Bij de Oosterschelde is dit schriftelijk gebeurd.

Vooraf bij het persoonlijk afnemen is een beeld gekregen van de opvattingen van de experts over dit onderzoek.

Zowel in Rotterdam als in Den Oever was men van mening dat de enquête wel heel gedetailleerd opgezet is. De beantwoording werd door de experts ook subjectief genoemd.

De experts in Rotterdam waren minder sceptisch dan de experts in Den Oever. Deze laatsten hebben eerst heel wat vragen moeten stellen voordat ze enigszins overtuigd waren van het nut van hun bijdrage. De kering in Den Oever is heel eenvoudig met een eenvoudig sluitingsprocedure. Dit gegeven leidde tot de nodige scepsis. 'Het zou beter zijn als een 'complexere' kering onder de loep genomen zou worden waarbij veel meer mis zou kunnen gaan.'

Het feit dat bij Den Oever ook experts van de bemanning aanwezig waren heeft ook veel bijgedragen aan de scepsis.

De werkelijke enquête heeft ruim een uur in beslag genomen. Bij Den Oever werd dit vooraf gegaan door een inleiding van een uur, terwijl deze in Rotterdam een half uur in beslag nam.

De experts van de Oosterschelde kering hebben de enquête schriftelijk ingevuld. Dit lijkt zonder problemen gegaan te zijn.

Het blijkt toch moeilijk, gezien de scepsis van de experts, vragen te beantwoorden over situaties die in de praktijk nauwelijks voorkomen. Dit lag in de lijn der verwachtingen.

Uit de antwoorden van de experts kunnen echter wel gegevens gehaald worden omtrent faalkansen van de verschillende basisgebeurtenissen.

6.3.2 Verwerking enquêtes

Voor een aantal experts was het bij een paar vragen niet mogelijk antwoord te geven.

In tabel 6.1 is weergegeven voor welke vragen een expert niet kon antwoorden.

Expert	Exp. 1 Den Oever	Exp. 2 Den Oever	Exp. 3 Den Oever	Exp. 4 Rotter- dam	Exp. 5 Rotter- dam	Exp. 6 Ooster- schelde	Exp. 7 Ooster- schelde
Onbeant- woorde vragen	-	3.7	2.1 4.1	3.5, 3.6, 3.7	-	3.5, 3.6, 3.7	-

Tabel 6.1 Weergave van de niet beantwoorde vragen uit de enquête

Er is geen vraag die nooit beantwoord is. Zo kan voor ieder vraag het gemiddelde genomen worden uit de wel beantwoorde vragen.

Het niet beantwoorden van de vragen 3.5, 3.6 en 3.7 door de experts 4 en 6 komt doordat deze experts vonden dat deze vragen niet van toepassing waren op hun procedure. Omdat de bemanning zelf geen signaleringspeil waarneemt, maar alleen de ontvanger dit doet, kan de bemanning hier ook geen fouten in maken. De andere experts van dezelfde kering hebben deze vragen wel beantwoord.

Vraag 4.1 is door expert 3 niet beantwoord omdat hij van mening was dat bij de coupure in Den Oever geen elektriciteitsvoorziening nodig was. Het falen van het mechanisch/ elektrotechnische onderdeel, wat ook in deze vraag aan de orde kwam heeft hij niet opgemerkt. Zonder een duidelijke reden heeft expert 3 ook vraag 2.1 niet beantwoord.

6.3.3 Onzekerheidsmarges

Gekeken is hoe het verloop van de bandbreedte, het verschil per vraag tussen de minimum en maximum gevraagde schatting, per expert verandert gedurende de beantwoording van de vragen. Het verloop van de gemiddelde bandbreedte voor ieder expert kan een indicatie zijn voor een verandering van nauwkeurigheid in het verloop van de afname van de enquête. Tevens kan een verandering in bandbreedte hoger in de boom verwacht worden, doordat de vragen daar minder concreet zijn.

De schattingsboom is ingedeeld in niveau 0 tot en met niveau 5.

- Niveau 0 zijn alle schattingen op de basisgebeurtenissen onderaan de boom.
(De vragen 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.7, 2.1, 3.1, 3.2, 3.3, 3.5, 3.6, 4.1, 4.2, 4.4)
- Niveau 1 zijn de schattingen één stap hoger in de boom, waarin bijna altijd onderscheid gemaakt wordt tussen persoonlijke fouten en technische fouten.
(De vragen 1.3, 1.8, 1.9, 3.4, 3.7, 4.3)
- Niveau 2 zijn die schattingen één stap hoger.
(De vragen 1.5, 1.10, 3.8)
- Niveau 3 zijn de bovenste afschattingen in de subbomen 1 en 3.
(De vragen 1.11, 4.5)
- Niveau 4 zijn de onderste afschattingen in de hoofdboom, tussen niet paraat of foute beslissing/ foute sluitingsactie.
(De vragen 5.1, 5.2)
- Niveau 5 is de hoogste schatting in de hoofdboom, waarin een schatting gevraagd wordt tussen functionaris faalt of bemanning faalt.
(Vraag 5.3)

In onderstaande tabel zijn de gegeven bandbreedten van de experts voor ieder niveau weergegeven.

Niveau schattings- boom	Aantal schat- tingen	Gemiddelde bandbreedte van de schattingen						
		Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5	Exp.6	Exp.7
0	14	17	40	24	28	55	37	39
1	6	20	27	31	26	48	28	37
2	3	19	36	33	32	49	36	32
3	2	20	12	50	31	35	30	40
4	2	18	50	38	30	53	55	60
5	1	15	50	30	30	65	50	80

Tabel 6.2 Onzekerheidsmarges van de verschillende experts voor de verschillende niveaus

Alleen bij expert 6 en 7 is een tendens te zien van een grotere onzekerheidsmarge bij een hoger niveau.

Bij expert 2 is te zien dat hij bij niveau 0 een hogere onzekerheids marge heeft, deze is gedeeltelijk toe te schrijven aan de vele niveau 0 vragen aan het begin van de enquête, toen er bij hem veel scepsis omtrent het nut van de enquête was. Bij de niveaus 1, 2 en 3 worden normalere onzekerheidsmarges gegeven. Bij hogere niveaus (4 en 5) worden de onzekerheidsmarges weer wat groter.

De experts 1, 3, 4 en 5 vertonen geen eigenaardigheden in het verloop van de onzekerheidsmarges.

6.4 Uitslagen

Een uitgebreide weergave van de uitslagen is te vinden in bijlage D.

Hier wordt volstaan met een korte weergave van de uitgevoerde berekeningen.

In Bijlage B zijn alle basisgebeurtenissen beschreven en weergegeven in de schattingsboom.

De berekeningen zijn per kering uitgevoerd.

Achtereenvolgens zijn de volgende stappen gevolgd:

- Bepaling van de weegfactoren van de experts.
Voor iedere expert is de som van het verschil tussen minimum en maximum per vraag over de hele enquête opgeteld. De weegfactor van de experts is omgekeerd evenredig genomen met de hoogte van de som van de onzekerheden. Een onzekere expert weegt minder zwaar mee dan een zekere expert met gemiddeld weinig verschil tussen minimum en maximum.
- Voor iedere kering is nu met behulp van de weegfactoren een gewogen antwoord over alle vragen verkregen. (Bijlage D1)
- Voor iedere kering worden voor alle schattingen (minima, puntschattingen, maxima) de antwoorden uitgezet in de schattingsboom. Bovenaan wordt de door de expert geschatte kans op de topgebeurtenis gezet, ook gewogen gemiddeld per kering $W(WF)$.
- De 'primaire' kansen op de basisgebeurtenissen voor iedere schatting (min, punt, max) onderaan de boom zijn bepaald door naar beneden te vermenigvuldigen met de gegeven procentuele verdelingen uit de enquête. (Bijlage D2)
- De primaire kansen op de basisgebeurtenissen zijn ingevoerd in een rekenprogramma waarmee aan de hand van deze kansen de kansen op de topgebeurtenis berekend worden. (Bijlage D3, voor het rekenprogramma)
- De kans op de topgebeurtenis is nu $P^1(WF)$.
- De kansen op de basisgebeurtenissen worden vermenigvuldigd met een correctiefactor

$$\frac{W(WF)}{P^1(WF)}$$

Waarin:

$P^1(WF)$ = de eerst bepaalde kans op de topgebeurtenis

$W(WF)$ = de geschatte kans op de topgebeurtenis

Deze correctie is nodig omdat in de eerst bepaalde kans op de top gerekend is met de voorwaardelijke kansen op de gebeurtenissen in de schattingsboom, welke niet zijn aangepast doordat er samen optredende gebeurtenissen kunnen voorkomen.

Er geldt :

$$P^2(WF) = P^1(WF) * \frac{W(WF)}{P^1(WF)}$$

$P^2(WF)$ = de uiteindelijke kans op de topgebeurtenis berekend uit de enquête, die gelijk is aan de door de experts opgegeven kans op de topgebeurtenis $W(WF)$.

- Opnieuw wordt de kans op de topgebeurtenis berekend. (Bijlage D4)

- De verkregen kans op de topgebeurtenis moet gecorrigeerd worden voor EN-poorten in de foutenboom in subboom 1 en subboom 3. Zie Bijlage D5.
- In Bijlage D6 is een gevoeligheidsanalyse van de in de enquête gevraagde afhankelijkheden uitgevoerd voor de Oosterschelde. De minima zijn volkomen afhankelijk gemaakt, d.w.z. dat de ene gebeurtenis de andere impliceert. De maxima zijn volkomen onafhankelijk gemaakt. De faalkansen van de basisgebeurtenissen zijn gecorrigeerd, zodanig dat voor de puntschattingen met gegeven af- of onafhankelijkheid de kans op de top (H3) 0.01 is.
- In Bijlage D7 zijn de resultaten weergegeven voor verder bepaling van minima en maxima voor de kering in Den Oever. Voor Den Oever variëren de kansschattingen op de topgebeurtenis van 1‰ tot 5‰. Met gebruik van deze kansschattingen kunnen de onzekerheidsmarges nog beter bepaald worden.
Bij bepaling van de topgebeurtenis met $W(WF) = 1‰$ voor de minimum schatting en $W(WF) = 5‰$ voor de maximum schatting wordt de bepaalde onzekerheidsmarge voor de topgebeurtenis nog groter.

Voor de kering in Rotterdam en de Oosterscheldekering zijn de schattingen van de experts voor een kering niet afwijkend. Onderzocht kan worden of dit toeval is of dat de experts voorkennis hebben van de veiligheidseisen voor de kering.

6.5 Bespreking resultaten

6.5.1 Algemeen

Alle grafisch uitgezette resultaten zijn te vinden in Bijlage E. Bij een grafische weergave zijn duidelijk de verschillen tussen minimum-, punt-, en maximum schattingen te onderscheiden voor de verschillende basisgebeurtenissen.

De Figuren in Bijlage E representeren de grafisch weergaven van de berekeningen van de kansschattingen van de basisgebeurtenissen zoals deze in bijlage D zijn berekend.

In deze paragraaf zullen slechts de belangrijkste figuren getoond worden.

De basisgebeurtenissen zijn het best te vergelijken indien alle persoonlijke basisgebeurtenissen gescheiden zijn van de technische basisgebeurtenissen.

In Figuur 6.1 zijn faalkansen van de persoonlijke basisgebeurtenissen uitgezet op logaritmische schaal, om ook de heel kleine schattingen weer te kunnen geven. Voor alle keringen zijn de kansen weergegeven bij een schatting van de kans op de top $W(WF) = 10\%$. Door voor alle keringen de kans op de top hetzelfde te nemen zijn de uitkomsten beter te vergelijken.

In figuur 6.2 zijn de faalkansen van de technische basisgebeurtenissen uitgezet. Ook hierbij is de kans op de topgebeurtenis voor iedere kering 10% genomen. De kansen op de basisgebeurtenissen zijn hierop aangepast.

Bij bestudering van de figuren 6.1 en 6.2 is een aantal opvallende schattingen te zien.

De schattingen van de technische basisgebeurtenissen liggen veel minder gespreid dan de schattingen van de persoonlijke basisgebeurtenissen.

6.5.2 Persoonlijke basisgebeurtenissen

De schattingen van de faalkansen voor de persoonlijke basisgebeurtenissen ligt tussen de 0 en $1.0E-02$. De puntschattingen liggen tussen de $1.0E-05$ en $3.0E-03$. Voor bijna alle basisgebeurtenissen zijn de schattingen voor alle keringen van dezelfde orde van grootte.

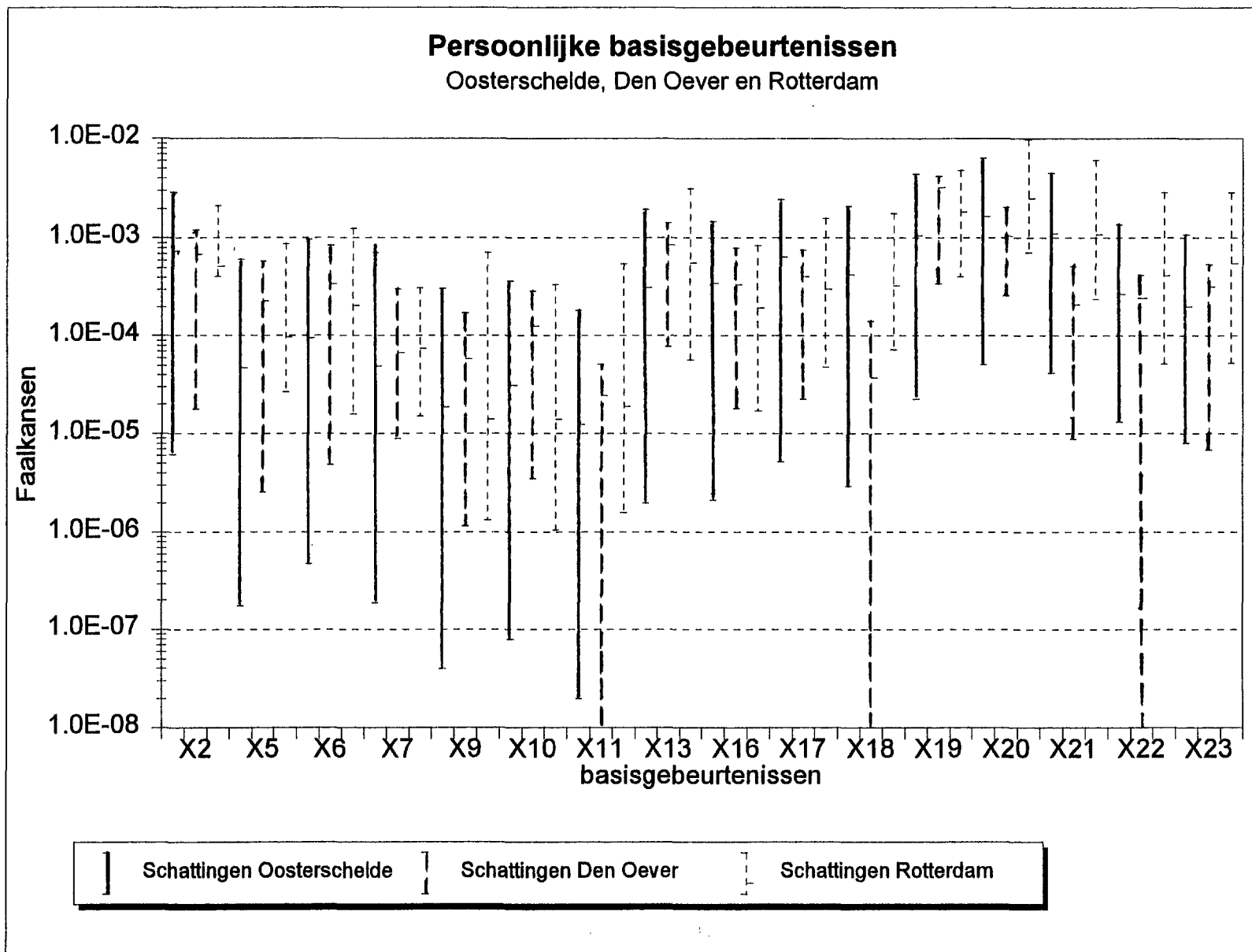
Alleen voor de basisgebeurtenissen X_5 , X_{10} , X_{18} en X_{21} wijken de puntschattingen nogal af. Voor X_5 en X_{10} , welke beide over de aflezing van de waterstand gaan, is de schatting voor de Oosterschelde kering een factor 10 lager dan de schatting voor de kering in Den Oever. De schatting voor X_5 en X_{10} in Rotterdam is nagenoeg gelijk aan die in Den Oever.

Bij X_{18} , het (bijna) fout aflezen van het signaleringspeil van de fax door de ontvanger, is de schatting voor de kering in Den Oever een factor 10 lager dan de schattingen voor Rotterdam en de Oosterschelde.

Bij X_{21} , een (bijna) foute beslissing in de mobilisatiefase is de puntschatting voor de kering in Den Oever een factor 10 lager dan de schattingen voor de Oosterscheldekering en Rotterdam. Dit is te wijten aan het feit dat voor de kering in Den Oever, deze fase niet van heel groot belang is, daar de sluitingsprocedure niet zo uitgebreid is. De beslissing tot sluiting wordt volgens de experts 'automatisch' genomen bij overschrijding van een peil.

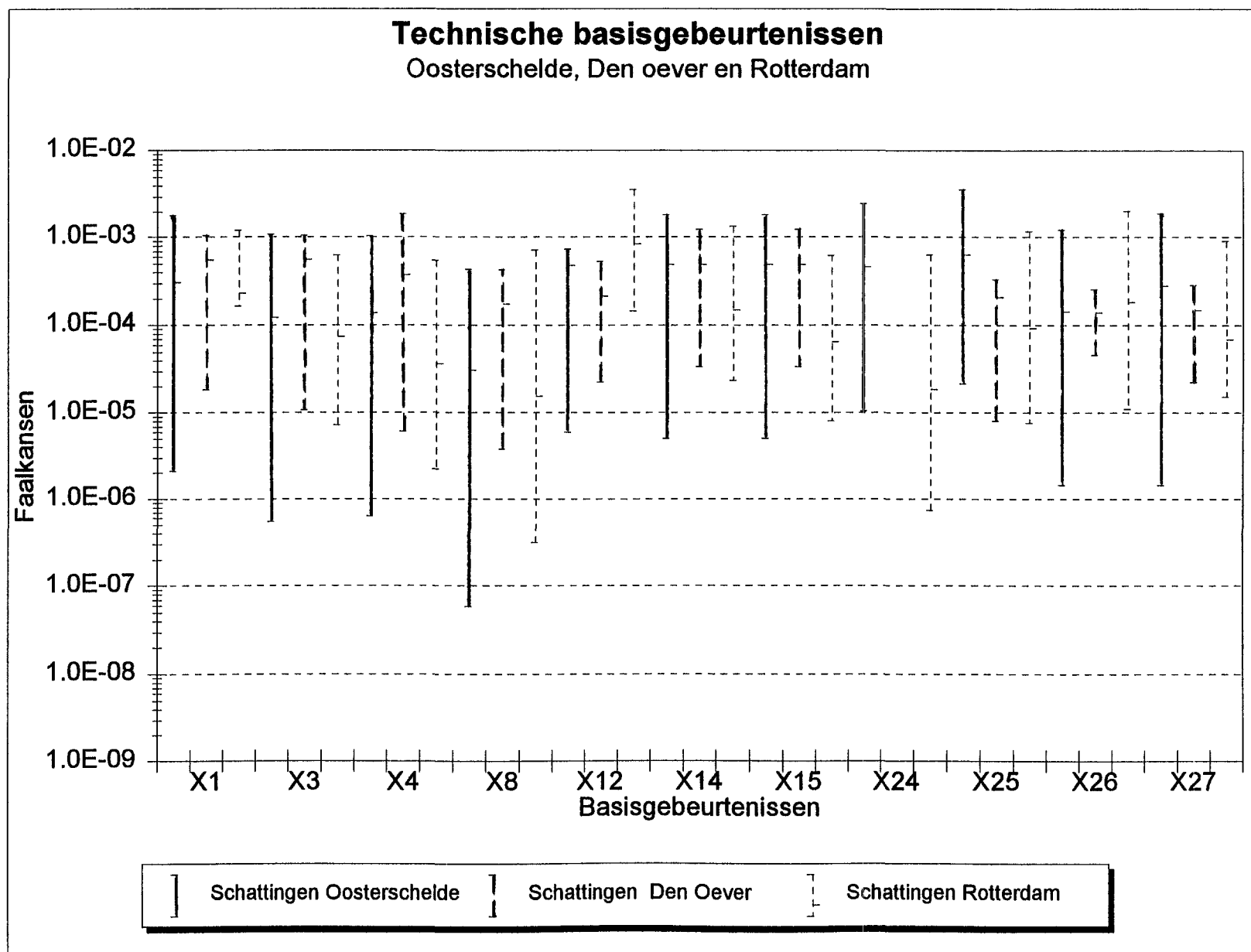
Lagere faalkansen (puntschattingen) zijn te vinden voor de basisgebeurtenissen X_9 , X_{10} en X_{11} ($1.5E-05$ tot $3.0E-05$). Het respectievelijk niet, te laat of fout aflezen van de geregistreerde waterstanden door de bemanning op de kering. De schattingen voor de kering in Den Oever vallen hoger uit ($3.0E-05$ tot $1.5E-04$).

Figuur 6.1 Schattingen faalkansen basisgebeurtenissen voor verschillende keringen



De kans op de topgebeurtenis is voor ieder kering 10 %

Figuur 6.2 Schattingen faalkansen basisgebeurtenissen voor verschillende keringen



De kans op de topgebeurtenis is voor iedere kering 10 ‰

Hogere faalkansen zijn te vinden voor de basisgebeurtenissen X_{19} , X_{20} en X_{21} ($1.0E-03$ tot $3.5E-02$). Een (bijna) foute beslissing door de functionaris in respectievelijk de waarschuwingsfase, paraatheidsfase en mobilisatiefase. Deze gebeurtenissen zitten heel hoog in de schattingsboom en zijn dus direct van invloed op het falen van de waterkering. De schattingen voor de kering in Den Oever zijn bij X_{21} lager ($3E-04$) hetgeen in overeenstemming is met de eenvoudige sluitingsprocedure in Den Oever.

Bij de minima zijn er een aantal uitschieters naar beneden (hele kleine faalkansen). Met name voor Den Oever zijn voor X_{11} en X_{18} de faalkansen 0 geschat, daar deze niet van toepassing zijn voor deze kering.

Uitschieters naar boven zijn van groter belang, daar deze aangeven dat de faalkans groter kan zijn dan de puntschatting. Met name voor de schattingen in Rotterdam zijn de maxima veelvuldig heel hoog. Deze maxima moeten bij de interpretatie en vertaling in het TAW model mee worden genomen.

6.5.3 Technische basisgebeurtenissen

Voor de technische basisgebeurtenissen liggen de minima en maxima schattingen van de faalkansen voor de basisgebeurtenissen tussen de $5.9E-08$ en $3.6E-03$. De puntschattingen van de faalkansen liggen tussen de $1.5E-05$ (X_8) en de $8.4E-04$ (X_{12}).

Voor een enkele basisgebeurtenis hebben de puntschattingen van de verschillende keringen dezelfde grootte. Dit in tegenstelling tot de eerder besproken persoonlijke basisgebeurtenissen. Daar de persoonlijke basisgebeurtenissen door mensen veroorzaakt worden, die in het hele land nagenoeg hetzelfde zijn. De technische onderdelen zijn echter niet voor iedere kering gelijk, en vertonen dus niet overal gelijke faalkansen.

Voor X_1 , het geblokkeerd of gestoord zijn van de telefoonlijn tussen de ontvanger en de functionaris is de geschatte faalkans nagenoeg gelijk. Men kan ervan uitgaan dat overal in Nederland de faalkans voor een telefoonlijn gelijk is.

Voor X_{12} , het geblokkeerd of verstoord zijn van de telefoonlijn tussen de ontvanger en de bemanning worden echter niet precies dezelfde schattingen gegeven.

Voor X_{14} , het falen van de fax van de ontvanger voor ontvangst van het voorspeld signaleringspeil en X_{15} , het falen van de fax van de zender van het voorspeld signaleringspeil worden ongeveer dezelfde faalkansen gegeven. Voor de Oosterscheldekering en Den Oever zijn de schattingen voor X_{14} en X_{15} gelijk. Voor Rotterdam is X_{14} een factor 2 groter dan X_{15} .

Voor X_{26} , toegang tot sluitsysteem slecht of versperd, worden voor alle drie de keringen dezelfde puntschatting gegeven.

De puntschattingen voor de Oosterschelde kering vallen voor bijna alle technische basisgebeurtenissen lager uit dan de schattingen van Den Oever en Rotterdam. Bij de persoonlijke basisgebeurtenissen is dit niet het geval.

De puntschattingen voor X_3 , X_4 en X_8 , het falen van een onderdeel van de apparatuur voor automatische registratie, zijn voor alle drie de keringen verschillend. De schattingen voor Den Oever zijn altijd de hoogste, en van Rotterdam zijn de schattingen altijd de laagste. De schattingen verschillen telkens een factor 10.

De puntschattingen voor Den Oever voor de technische basisgebeurtenissen zijn vaak het grootst. Behalve voor X_{24} , het falen van de elektriciteitsvoorziening. In Den Oever wordt deze kans 0 geschat, daar dit helemaal niet van toepassing is op de sluiting van de kering. De deuren van de coupure in Den Oever worden op handkracht gesloten.

De uitschieters naar beneden voor de minimumschattingen bij de technische basisgebeurtenissen blijken voornamelijk veroorzaakt door de schattingen van de Oosterscheldekering.

Veel belangrijker zijn de uitschieters van de maximum schattingen. De meeste maxima bedragen ongeveer $1.0E-03$.

De hoogst geschatte maximum faalkans is $3.6 \cdot 10^{-3}$ voor X_{12} en X_{25} , respectievelijk het falen van de telefoonlijn tussen ontvanger en bemanning en het falen van een mechanisch/ elektrotechnisch onderdeel van het sluitsysteem.

In hoofdstuk 8 worden de verhoudingen tussen technische en persoonlijke faalkansen nader bekeken.

6.5.4 Afhankelijkheden

Door verandering van aan de experts gevraagde afhankelijkheden (bijlage D6) kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden.

Totale afhankelijkheid blijkt van veel invloed op de faalkansen van de basisgebeurtenissen. Totale onafhankelijkheid blijkt van veel minder invloed op de faalkansen. De uiteindelijke kans op de topgebeurtenis (H3) blijkt niet erg gevoelig voor verandering van afhankelijkheden.

6.5.5 Bepaling onzekerheid geschatte kans

Voor iedere bepaalde kansschatting van een gebeurtenis (basis-, sub- of topgebeurtenis) kan de onzekerheid van de geschatte kans bepaald worden.

Voor de topgebeurtenis van de Oosterschelde kering H3 nieuw wordt deze als volgt bepaald.

$$H3 \text{ nieuw} = 0.0051255$$

$$H3 \text{ min nieuw} = 0.000157$$

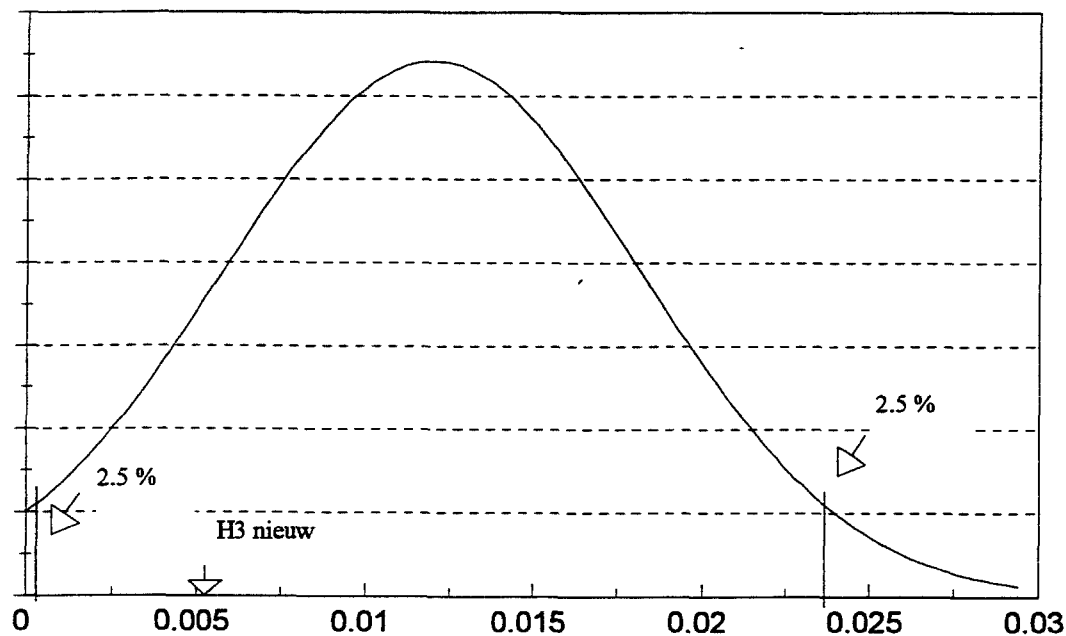
$$H3 \text{ max nieuw} = 0.024188$$

Voor de onzekerheid over H3 nieuw is een normale verdeling $N(\mu, \sigma)$ gekozen.

$$\mu = \frac{1}{2} (\text{max} - \text{min})$$

2.5% van de kansverdeling is groter dan max = 0.024188 en 2.5% is kleiner dan min = 0.000157.

De onzekerheid van de geschatte faalkans van de kering kan nu bepaald worden.



$$P(H3 \leq A) = P\left(U \leq \frac{A - \mu}{\sigma}\right)$$

$$U \sim N(0,1)$$

$$\sigma = 0.006218$$

$$P(H3 > H3 \text{ nieuw}) = 0.8554$$

$$\frac{0.024188 - 0.0120016}{\sigma} = 1.96$$

6.6 Conclusies en evaluatie

De methode van expert judgement blijkt een goede methode om faalkansen voor onderdelen van het sluitingsproces van een waterkering te bepalen.

Opvallende resultaten zijn onder andere:

- De faalkansen voor persoonlijke basisgebeurtenissen zijn voor alle keringen nagenoeg gelijk. De faalkansen voor technische basisgebeurtenissen verschillen sterker, doordat keringen over verschillende soorten technisch materieel beschikken.
- De kans op het maken van beslisfouten wordt door experts heel hoog ingeschat 1E-02. Dit in tegenstelling tot veel betrouwbaarheidsanalyses waarin deze kans heel laag of zelfs niet eens wordt onderkend
(orde 1E-04) Zie hiervoor bijvoorbeeld [Ris, 1992] [Tonneijck en Koster, 1993].

De methode die is toegepast om de experts te middelen is van de mogelijkheden. Het principe dat een zeker overkomende expert met een kleine onzekerheidsmarge zwaarder weegt bij middeling dan een onzekere expert is zeker niet de enige juiste methode.

Er zijn argumenten om de weging juist tegengesteld uit te voeren: een zekere expert weegt minder zwaar mee dan een onzekere expert. Immers bij een zeker overkomende expert is de kans groot dat de werkelijke uitkomst buiten de door hem aangegeven marge ligt. Bij een onzekere overkomende expert, die een heel ruime marge aangeeft is de kans veel kleiner dat de werkelijke uitkomst buiten de door hem aangegeven marge ligt.

De methode die door Cooke wordt beschreven voor kalibratie van experts zou ook toegepast kunnen worden [Cooke, 1991]. Bij deze methode krijgen de experts een aantal vragen voorgeschooteld waarvan het antwoord bekend is. De experts worden hoger gekalibreerd naar gelang hun antwoorden meer overeenkomen met het reeds bekende antwoord.

De aan de expert gevraagde schatting voor de topgebeurtenis is afhankelijk van het type waterkering. Voor de kering in Den Oever wordt gemiddeld 2.8 ‰ geschat en voor de kering in Rotterdam wordt gemiddeld 50 ‰ geschat. Om toch een goede vergelijking te kunnen maken tussen de persoonlijke fouten en de technische fouten zijn de resultaten vergeleken bij een zelfde kans op de top van 10 ‰, overeenkomstig de schatting door de experts van de Oosterschelde kering. Een dergelijk vergelijking is toegestaan omdat de verhouding tussen menselijke en technische fouten onafhankelijk is van de geschatte kans op de topgebeurtenis.

De bepaling van de minimum en maximum schattingen zoals in dit onderzoek gedaan is één van de mogelijke bepalingen voor de onzekerheidsmarges. Zuiver gezien klopt de berekening niet. De experts worden gevraagd de maxima schattingen voor een gebeurtenis te doen, gegeven dat de ander gebeurtenis niet ook maximaal is. Bij de berekening worden telkens voor beide gebeurtenissen de maximum schattingen bij elkaar genomen. Hetzelfde geldt voor de minima schattingen.

Deze methode is echter wel een goede methode om beter inzicht te krijgen in de onzekerheidsmarges. Met de onzekerheidsmarges wordt uitgedrukt met welke onzekerheidsmarge de geschatte kansen moeten worden geïnterpreteerd.

Een betere bepaling van de onzekerheidsgrenzen zou gedaan kunnen worden met behulp van de Monte Carlo simulatie. Door een groot aantal keren de foutenboom door te rekenen met een

aangenomen onzekerheidsverdeling voor de geschatte kansen, kan de onzekerheid van de geschatte kans op de topgebeurtenis worden weergegeven door een kansverdeling.

Hoe groter het aantal berekeningen, hoe nauwkeuriger de bepaling van de verdeling voor de topgebeurtenis.

Uit de literatuur is verder bekend dat het resultaat voor de topgebeurtenis ongevoelig is voor de aangenomen onzekerheidsverdelingen van de basisgebeurtenissen, waarvoor men meestal een normale of lognormale verdeling kiest.

H7 Bepaling van de faalkansen mbv de THERP methode

In dit hoofdstuk wordt de THERP methode, die in paragraaf 4.9 is besproken, gebruikt om faalkansen van de persoonlijk basisgebeurtenissen uit de schattingsboom te bepalen.

Voor de verschillende persoonlijke basisgebeurtenissen in de schattingsboom zijn met behulp van de THERP methode de faalkansen bepaald [Swain and Guttmann, 1983]. Voor de bepaling van de faalkansen van de technische faalkansen zijn andere bronnen gebruikt, voornamelijk de TAW leidraad [TAW, 1992].

In dit onderzoek wordt gesproken over de THERP methode, hiermee wordt bedoeld dat de schattingen voor zover mogelijk uit het THERP handboek worden gehaald. Voor met name de technische basisgebeurtenissen geeft het THERP handboek geen faalkansen, en wordt voornamelijk de TAW leidraad gebruikt. Eigenlijk moet de THERP methode de 'THERP/ TAW' methode worden genoemd, dit kan echter verwarring veroorzaken omdat er al meerdere TAW methoden besproken worden.

De onderlinge afhankelijkheden zijn in dit onderzoek niet bepaald. De methode is toegepast om de door de experts bepaalde faalkansen voor de basisgebeurtenissen te vergelijken met andere methoden. Het bepalen van de afhankelijkheden, wat heel subjectief is, wordt daarom niet gedaan.

Allereerst zullen voor alle basisgebeurtenissen de bepaling van de faalkans worden weergegeven, waarna verslag volgt van mijn ervaring met de THERP methode en de ervaring van anderen met de THERP methode.

In hoofdstuk 8 zal een vergelijking gemaakt worden tussen de resultaten van de THERP methode en de methode met expert meningen.

7.1 Achtergronden THERP methode

Uit empirische verdelingen van menselijk handelen blijkt dat de lognormale, beta, gamma en Weibull verdeling meestal goed fitten. De lognormale verdeling is algemeen genomen om menselijk handelen weer te geven omdat deze goed fit in de empirische resultaten en deze makkelijk toepasbaar is.

In het THERP handboek worden voor verschillende handelingen in tabellen de nominale HEP waarden (Human Error Probability) gegeven. Een nominale HEP is de kansschatting voor een gegeven menselijke fout waarbij de effecten van de aan het werk gerelateerde Performance Shaping Factors (PSF) buiten beschouwing blijven. Deze nominale HEP waarden zijn puntschattingen en geven de mediaan van de lognormale verdeling aan.

De mediaan van de lognormale verdeling is een goede kansschatting indien onbekend is wie de taak uitvoert en wat de motivatie, capaciteit en andere interne PSF's van die persoon zijn.

De error factor die bij de nominale HEP waarde wordt gegeven kan men gebruiken om de onzekerheidsgrenzen te bepalen. Aangenomen wordt dat de onzekerheidsmarges van de verdeling symmetrisch verdeeld zijn bij een logaritmische schaalverdeling. De error factor is gelijk aan de wortel van het quotiënt van boven en ondergrens. Voor de boven en ondergrens wordt meestal het 5 procent en 95 procent punt van de verdeling aangehouden.

Vermenigvuldiging of deling van de nominale HEP waarde leidt tot respectievelijk het 95 procent punt en 5 procent punt van de kans verdeling.

In het algemeen liggen HEP's tussen 0.001 en 0.01 voor routinematige handelingen (rule-based behaviour). HEP waarden boven 0.01 zijn ongewoon en komen alleen voor bij taken die onder

omstandigheden worden uitgevoerd waarin fouten snel gemaakt kunnen worden (hoog stress niveau etc).

De bepaling van de onzekerheid voor de geschatte kans op de topgebeurtenis kan door middel van de Monte Carlo procedure gedaan worden.

Een andere manier om de onzekerheidsmarges voor de kansschatting van de topgebeurtenis te bepalen is door de grootste error factor van de individuele HEP te gebruiken voor de topgebeurtenis. De aanname die hierbij gedaan is, is dat de onzekerheid voor de totale betrouwbaarheidsanalyse niet groter is dan de grootste onzekerheid van een element van de analyse [Swain en Guttman, 1983].

7.2 Bepaling faalkansen

7.2.1 Algemeen

Voor veel technische basisgebeurtenissen is het geven van een algemeen antwoord voor iedere kering moeilijk. Er volgt een nadere specificatie voor de verschillende soorten keringen. Deze verschillen worden het best weergegeven voor de kering in de Oosterschelde en in Den Oever.

De totale niet beschikbaarheid van een technische onderdeel wordt bepaald door [TAW, 1992]

$$U = Q + \frac{1}{2} \lambda T + \lambda \theta$$

Hierin is:

Q = kans op spontaan falen per vraag

T = lengte van het testinterval

λ = faalkans per tijdseenheid

θ = gemiddelde reparatieduur.

Een beschrijving van de basisgebeurtenissen is weergegeven in bijlage B

Voor kwantificatie van de faalkansen van de persoonlijke basisgebeurtenissen is in de enquête aan de experts gevraagd het stressniveau van de verschillende betrokkenen bij verschillende fasen in het sluitingsproces weer te geven.

In tabel 7.1 zijn de door de experts geschatte stressniveaus weergegeven.

Maximale stress = niveau 10

Minimale stress = niveau 0.

Expert	1	2	3	4	5	6	7	Mini- mum*	Gemid- delde	Gem. zonder E3	Maxi- mum
Par. fase funct.	6	6	0	4	2	2	1	1	3	3,5	6
Par. fase bem.	1	6	0	0	4	2	1	1	2	2,3	6
Mob. fase funct.	6	5	0	7	5	1	3	1	3,9	4,5	7
Mob. fase bem.	4	6	0	8	5	1	3	1	3,9	4,5	8
Sluitingsac- tie funct.	2	2	0	5	8	2	6	2	3,6	4,2	8
Sluitingsac- tie bem.	6	3	0	6	7	2	6	2	4,3	5	7
* Bij de bepaling van de minimum waarde telt expert 3 niet mee.											

Tabel 7.1 Resultaten geschatte stressniveaus door experts.

Bij een verdeling in stress niveaus zoals bij de THERP methode toegepast (hoog, gemiddeld en laag stress niveau) vallen alle fasen binnen het gemiddelde stress niveau. (behalve de paraatheids-fase voor de bemanning).

7.2.2 Faalkans bepaling per basisgebeurtenis

Voor de basisgebeurtenissen volgt een weergave van de bepaling van de faalkansen met onder en bovengrenzen. Voor de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering is aangegeven wat de gekozen faalkans is voor de basisgebeurtenissen.

$X_1 + X_2$ TELEFOONLIJN ONTVANGER-FUNCTIONARIS GEBLOKKEERD OF GESTOORD

Bron: PTT Telecom.

De kans op het niet slagen van een telefoongesprek is 0.3 tot 0.35. Dit is de kans op 'in gesprek' of 'niet thuis' inclusief een kans van 0.05 door overbelasting van het telefoonnet.

De kans op technisch uitvallen is 0.005.

Dit is de kans dat een telefoongesprek niet in één keer slaagt. Echter er dient te worden gekeken naar de kans dat er geen verbinding mogelijk is binnen een bepaalde tijd tussen de meting en de laatst mogelijke tijd om paraat te zijn.

De kans op $(X_1 + X_2)$ moet in gunstige gevallen verminderd worden gezien het feit dat een functionaris in geval van naderend hoogwater dit vaak zelf al verwacht en dus zorgt dat hij bereikbaar is voor een telefonisch bericht.

De kans op X_1 , telefoonlijn geblokkeerd of gestoord, is 0.055

De ondergrens wordt bepaald op 0.0055

De kans op X_2 , functionaris telefonisch laat of onbereikbaar, is 0.25-0.3

De ondergrens wordt bepaald op 0.025

Gezien boven vermelde opmerkingen worden voor de faalkansen bij Den Oever $1/3 \times$ de aangegeven waarde genomen.

Voor de Oosterschelde, wordt de ondergrens genomen.

Den Oever	$X_1 = 0.0183$
	$X_2 = 0.083$
Oosterschelde	$X_1 = 0.0055$
	$X_2 = 0.025$

X₃ APPARATUUR VOOR AUTOMATISCHE REGISTRATIE FAALT (BIJNA)

Faalkans is 1.E-05 (niet beschikbaar gedurende 3 uur voor sluiten)
voor de Oosterschelde kering [KEMA, 1986].

Kans op X₃ 1.5E-05

Den Oever X₃ = 1.5E-05
Oosterschelde X₃ = 1.5E-05

X₄ AUTOMATISCHE PEILSTOK FAALT (BIJNA)

Volgens [TAW, 1992] geldt voor NBD 4012 Vlotter Systeem een kans op falen van
 $\lambda = 1.9 \text{ E-05 /h}$. Grenzen 7.2E-07 - 7.2E-05

Testinterval $\theta =$ maandelijks = 720hr. [Aanname]

Reparatietijd T = 4 hr [Aanname]

Faalkans $= \lambda * \theta / 2 + \lambda * \theta$
 $= 1.9\text{E-05} * 720 / 2 + 1.9\text{E-05} * 4 = 6.9\text{E-03}$

Kans op X₄ 6.9E-03

Grenzen 2.62E-04 - 2.6E-02

Voor een NBD 4012 Borrelbuis systeem geldt

$\lambda = 2.4\text{e-05 [h]}$ Grenzen 9.1E-07 - 9.1E-05

Testinterval $\theta = 720\text{hr}$ [Aanname]

Reparatietijd T = 4 hr [Aanname]

Faalkans $= \lambda * \theta / 2 + \lambda * \theta$
 $= 2.4\text{E-05} * 720 / 2 + 2.4\text{E-05} * 4 = 8.74\text{E-03}$

Grenzen 3.3E-04 - 3.3E-02

Kans op X₄ = 8.74E-03

Grenzen 3.3E-04 - 3.3E-02

Den Oever X₄ = 0.0069
Oosterschelde X₄ = 0.0069

X₅ NIET AFLEZEN WATERSTAND DOOR ONTVANGER

Tabel 11-6 THERP handboek.

Estimated HEPs related to failure of administrative control.

Item (2) HEP 0.001 (EF 3).

Stress hoeft hier niet meegenomen te worden.

Kans op X₅ = 1E-03

Grenzen 3.3E-04 - 3E-03

Den Oever X₅ = 0.001
Oosterschelde X₅ = 0.001

X₆ LAAT AFLEZEN VAN DE WATERSTAND DOOR DE ONTVANGER

De kans op laat aflezen is de kans op niet aflezen, waarna de ontvanger zich herstelt en wel afleest. Hiervoor wordt de bovengrens van X₅ genomen.

Kans op X₆ = 3E-03

Ondergrens 1E-03

Den Oever X₆ = 0.003

Oosterschelde X₆ = 0.003

X₇ FOUT AFLEZEN VAN DE WATERSTAND DOOR DE ONTVANGER

Estimated probabilities of errors in selecting unannunciated displays for quantitative or qualitative readings

Tabel 11-2 THERP handboek

Selection of wrong display, Item (1)

When it is dissimilar to adjacent displays; negligible

Tabel 11-3 THERP handboek

Item (3) Chart recorder HEP 0.006 (EF=3)

Indien een tweede ontvanger aanwezig is die ook de waterstand afleest.

Aangenomen wordt dat deze als teamleden samenwerken (P 11-14)

Tabel 10-3 THERP Handboek, High Dependence, Item (1)

Kans op falen is 0.63

Tabel 20-16 Stress Moderately High, Step-by-Step task, Skilled

HEP x 2

HEP waarden	Eén ontvanger	Twee ontvangers
Automatische aflezing	0.006x2 = 0.012	0.006x2x0.63 = 0.00756

Den Oever X₇ = 0.012

Oosterschelde X₇ = 0.00756

X₈ APPARATUUR VOOR AUTOMATISCHE REGISTRATIE OP KERING FAALT (BIJNA)

Faalkans is 1.E-05 (niet beschikbaar gedurende 3 uur voor sluiten)
voor de Oosterschelde kering.
[KEMA, 1986]

Den Oever $X_8 = 1E-05$
Oosterschelde $X_8 = 1E-05$

X₉ AFLEZING WATERSTAND DOOR BEMANNING NIET

De kans op het niet aflezen van de waterstand door de bemanning is (zie X_5)
0.001 (EF 3).

De vraag of de bemanning juist meer of minder faalt, door de waterstand niet af te lezen kan op verschillende manieren beantwoord worden.

Enerzijds, bij permanent aanwezige bemanning, kan verondersteld worden dat de bemanning minder bijtaken heeft dan een ontvanger, dus minder kans heeft de waterstand niet af te lezen. Anderzijds is het is ook in te denken, dat de ontvanger juist meer op de hoogte is van actuele waterstanden en daardoor veel alerter is bij komend hoogwater.

Bij niet permanent bemande keringen is de kans op niet aflezen van de waterstand door de bemanning wat kleiner, daar de betrokkenheid bij de kering dan wat minder zal zijn.

Algemeen kan worden aangenomen:

Permanent bemande keringen kans op $X_9 = 1E-03$

Grenzen 3.3E-04 - 3E-03

Niet permanent bemande keringen kans op $X_9 = 3E-03$

Grenzen 1E-03 - 9E-03

Den Oever $X_9 = 0.003$
Oosterschelde $X_9 = 0.001$

X₁₀ AFLEZING WATERSTAND DOOR BEMANNING LAAT

Hiervoor wordt in navolging van X_6 genomen:

Kans op $x_{10} = 3E-03$

Grenzen 1E-03 - 9E-03

Voor niet permanent bemande keringen kan overwogen worden deze weer een factor 3 groter te maken.

Den Oever $X_{10} = 0.009$
Oosterschelde $X_{10} = 0.003$

X₁₁ AFLEZING WATERSTAND DOOR BEMANNING FOUT

Deze wordt hetzelfde genomen als X₇

HEP waarden	Eén bemannings- lid	Twee bemanningsleden
Automatische aflezing	$0.006 \times 2 = 0.012$	$0.006 \times 2 \times 0.63 = 0.00756$

Den Oever X₁₁ = 0.012
Oosterschelde X₁₁ = 0.00756

X₁₂ + X₁₃ TELEFOONLIJN ONTVANGER-BEMANNING GEBLOKKEERD OF GESTOORD EN BEMANNING NIET OF LAAT AANWEZIG

Zie X₁ + X₂

Echter:

- De kans op (X₁ + X₂) zal voor permanent bemande keringen sterk verminderd moeten worden omdat daarbij de kans op 'niet thuis' verwaarloosbaar hoort te zijn.
- Voor onbemande keringen moet de kans op (X₁ + X₂) ook verminderd worden gezien het feit dat een sluiswachter of functionaris in geval van naderend hoogwater dit vaak zelf al verwacht en dus zorgt dat hij bereikbaar is voor een telefoongesprek.

De kans op X₁₂, telefoonlijn geblokkeerd of gestoord, is 0.055

De ondergrens wordt bepaald op 0.0055.

De kans op X₁₃, functionaris telefonisch laat of onbereikbaar, is 0.25-0.3

De ondergrens wordt bepaald op 0.025.

Voor Den Oever wordt 1/3 x de aangegeven waarde genomen.

Voor de Oosterschelde kering wordt de ondergrens genomen.

Den Oever X₁₂ = 0.01833
X₁₃ = 0.0833
Oosterschelde X₁₂ = 0.0055
X₁₃ = 0.025

X₁₄ FAX ONTVANGER FAALT OF FAALT BIJNA

Bron: PTT Telecom.

De kans op 'niet thuis' of 'in gesprek' (Zie X₁+X₂) is bij een fax heel klein.

De kans op het falen van de verbinding door overbelasting van het net is 0.05.

De kans op technisch falen van de fax is 0.005.

Anders dan bij de telefoon zou door niet geoefendheid met de faxapparatuur door de gebruiker de kans op persoonlijk falen wel aanwezig zijn. Men kan er vanuit gaan dat de bediener wel weet hoe hij zijn werkmaterieel moet bedienen.

Kans op X₁₄ falen van de fax is dan 0.05 + 0.005 = 0.055

De ondergrens wordt bepaald op 0.0055.

Den Oever X₁₄ = 0.01833
Oosterschelde X₁₄ = 0.01833

X₁₅ FAX ZENDER FAALT OF FAALT BIJNA

Zie X₁₄.

Kans op falen van de fax is dan 0.05 + 0.005 = 0.055

De ondergrens wordt bepaald op 0.0055.

Den Oever X₁₅ = 0.01833
Oosterschelde X₁₅ = 0.01833

X₁₆ FAXBERICHT NIET GELEZEN DOOR ONTVANGER

Voor het niet lezen van de fax door de ontvanger wordt dezelfde waarde aangenomen als voor het niet lezen van de waterstand door de ontvanger.

Kans op X₁₆ = 1E-03

Grenzen 3.3E-04 - 3E-03

Den Oever X₁₆ = 0.001
Oosterschelde X₁₆ = 0.001

X₁₇ FAXBERICHT LAAT GELEZEN DOOR ONTVANGER

In navolging van X₆ wordt hiervoor 3 x X₁₆ genomen.

Kans op X₁₇ = 3E-03

Grenzen 1E-03 en 9E-03

Den Oever X₁₇ = 0.003
Oosterschelde X₁₇ = 0.003

X₁₈ FAXBERICHT (BIJNA) FOUT GELEZEN DOOR ONTVANGER

Errors of commission in reading and recording quantitative information from unannounced displays. Tabel 20-10 THERP, Item (2) digitale readout.
HEP = 0.001 (EF = 3)

Invloed Stress: tabel 20-16 THERP Handbook, Step-by-Step task Skilled
HEP x2

Kans op fout lezen fax door ontvanger = 0.001 x 2 = 2E-03
Grenzen 6.7E-04 - 6E-03

Den Oever X₁₈ = 0.002
Oosterschelde X₁₈ = 0.002

X₁₉ FOUTE BESLISSING FUNCTIONARIS IN DE WAARSCHUWINGSFASE

Bij de bepaling van de kans op een foute beslissing, wordt niet gekeken naar een foute beslissing waardoor ten onrechte wel actie wordt ondernomen.
Alleen foute beslissingen waardoor juist geen actie wordt ondernomen worden aangerekend.

De kans op een foute beslissing is in de risico analyses nog nauwelijks gekwantificeerd. Alleen met behulp van expert meningen zijn kwantitatieve waarden voor deze kans verkregen. Het THERP handboek, gaat niet in op beslissingsfouten.

In gesprek met Westrenen [Westrenen] is besloten de kans op een foute beslissing als volgt te bepalen.

Stel dat een persoon in zijn loopbaan als 'beslisser' van het in werking stellen van de paraatheid, mobilisatie of sluiting, éénmaal een fout maakt.

Dan neemt hij in zijn loopbaan van ± 30 jaar éénmaal een foute beslissing. De kans op herstel van zijn beslissing is vrij groot, stel $2/3$. De kans op een foute beslissing wordt dan 1E-02.

Gesteld kan worden dat de kans op herstel in de waarschuwingsfase groter is dan in de paraatheidsfase, en dat de kans op herstel in de paraatheidsfase groter is dan in de mobilisatiefase.

Hier zijn de kansen gelijk genomen.

Kans op X₁₉ = 1E-02

In [van Otterloo, 1993] wordt de faalkans van diagnose en beslisvorming als volgt gekwantificeerd:

THERP, figuur 12.4 (blz 12.20), 1.5 uur diagnose tijd : faalkans (EF 30): 7E-05

Invloed stress: tabel 20.16

Moderate stress, step by step task, skilled: faktor 2, geeft faalkans $2 * 7E-05 = 1.4E-04$

In het geval dat er een tweede 'beslisser' aanwezig is :

THERP tabel 20.22 item (2). Faalkans checker 0.2 (EF 5):

$0.2 * 1.4E-04 = 2.8E-05$.

Dit scheelt aanzienlijk, met de 1E-02 die hierboven is aangegeven.

Maximaal volgt uit de methode Van Otterloo

$$2.8E-05 * (EF) 5 * (EF) 30 = 4.2 E-03$$

Dit scheelt een faktor 5 met de in dit onderzoek gedane schatting.

$$\text{Den Oever } X_{19} = 0.01$$

$$\text{Oosterschelde } X_{19} = 0.01$$

X₂₀ FOUTE BESLISSING FUNCTIONARIS IN DE PARAATHEIDSFASE

$$\text{Kans op } X_{20} = 1E-02$$

$$\text{Den Oever } X_{19} = 0.01$$

$$\text{Oosterschelde } X_{19} = 0.01$$

X₂₁ FOUT BESLISSING FUNCTIONARIS IN DE MOBILISATIEFASE

$$\text{Kans op } X_{21} = 1E-02$$

$$\text{Den Oever } X_{21} = 0.01$$

$$\text{Oosterschelde } X_{21} = 0.01$$

X₂₂ BEDIENING SLUITINGSINSTALLATIE FAALT (BIJNA)

De bediening van de sluitingsinstallatie is per kering heel verschillend.

Voor een op afstand bedienbare kering geldt:

THERP tabel 13.3 Estimated probabilities of errors of commission in operating manual controls: Item (3) arranged in well delineated functional groups:

Faalkans 0.001 (EF 3)

Invloed stress: moderate stress: faktor 2

$$\text{Kans op } X_{22} = 0.002.$$

$$\text{Grenzen } 6.6E-04 - 6E-03$$

Voor een ter plekke handmatig te sluiten kering blijkt niet het doen van de verkeerde handeling als wel het fysiek falen van de bedienaar van toepassing. Vaak is er echter een tweede bedienaar aanwezig, die als 'reserve' kan inspringen.

In het THERP handboek wordt hier niet op ingegaan.

$$\text{Den Oever } X_{22} = 0.002$$

$$\text{Oosterschelde } X_{22} = 0.002$$

X₂₃ TOEGANG TOT SLUITINGSINSTALLATIE FAALT (BLJNA)

In het THERP handboek wordt hier niet op ingegaan.
Het maken van een schatting hiervoor is natte vinger werk.

Door vergelijking met ander THERP schattingen en de schattingen door experts is de kans op X₂₃ bepaald op 2E-03

Kans toegang tot sluitingsinstallatie faalt is 2E-03

De grenzen die hierbij aangenomen kunnen worden zijn groot.

Grenzen: 2E-02 - 2E-04

Den Oever X₂₃ = 0.002
Oosterschelde X₂₃ = 0.0002

X₂₄ ELEKTRICITEITSVOORZIENING FAALT (BLJNA)

Hier wordt een standaard situatie aangenomen. Aansluiting op GEB net, 5 km kabel onder de grond.

De faalkansen zijn per uur genomen (h). Aangenomen kan worden dat voor de meeste keringen een sluitingstijd van een uur voldoende is.

Volgens (TAW, 1992) geldt:

Falen energievoorziening GEB

Faalsnelheid $\lambda = 4E-05$ Grenzen 1E-05 - 1E-04

Gebruiksduur $T = 3$ hr [Aanname]

Reparatieduur $R = 4$ hr [Aanname]

Faalkans $= \lambda * (T+R) = 2.8E-04$

Grenzen 7E-05 - 7E-04

Indien noodaggregaat aanwezig faalkans is 1.4E-03 [Ris, 1992]

Lokale energiedistributie, van energie van GEB aansluiting of noodaggregaat naar bewegingswerk.

Faalmechanismen zijn o.a. kabel breuk of doorbranden zekering.

Kabel

Faalsnelheid $\lambda = 1.0E-06$ [/km/h] Grenzen 7E-07 - 1.4E-06

Gebruiksduur $T = 3$ hr [Aanname]

Reparatieduur $R = 3$ hr [Aanname]

Lengte kabel $= 3$ km [Aanname]

Faalkans $= \lambda * (T+R) / 2 * L$
 $= 1.0E-06 * 6/2 * 3 = 9.0E-06$

Grenzen 6.3E-06 - 1.26E-05

Veiligheid

Faalsnelheid λ = $1.0E-05$ { /hr}

Gebruiksduur θ = 1 hr [Aanname]

Aantal n = 10 [Aanname]

Faalkans = $\lambda * \theta / 2 * n$

= $1.0E-05 * 1/2 * 10 = 5E-05$ [Ris, 1992]

Totale betrouwbaarheid energiedistributie = $3.4E-04$

Grenzen $1.3E-04$ - $7.6E-04$

Indien noodaggregaat aanwezig is wordt de betrouwbaarheid noodaggregaat $1.46E-03$

Grenzen $1.45E-04$ - $1.46E-03$

Betrouwbaarheid energiedistributie met noodaggregaat = $5.0E-07$

Grenzen $1.9E-08$ - $1.1E-06$

Den Oever $X_{24} = 0$

Oosterschelde $X_{24} = 5E-07$

X₂₅ MECHANISCH/ ELEKTROTECHNISCH ONDERDEEL FAALT (BLNA)

Volgens [TAW, 1992], gegevens per vraag.

Weigeren bewegingswerk

Sluisdeur $1E-04$

Schuifdeur $3E-05$ - $3E-03$

Niet kunnen plaatsen van schotbalken in de droge 0.01

Niet kunnen plaatsen van schotbalken in de natte 0.1

Niet kunnen plaatsen schotbalken in de natte, gegeven falen deuren/ schuiven $3E-01$

Weigeren tweede stel deuren gegeven falen eerste stel 0.1

Voor de Oosterschelde kering geldt: kans op falen hydraulische eenheid $1E-03$

Voor de 63 schuiven wordt dit voor het gehele systeem $6E-02$ [Horst, 1979].

Voor de kering in den Oever is voor het falen van de deuren $1E-04$ bepaald [Tonneijck en Koster, 1993].

Den Oever $X_{25} = 0.0001$

Oosterschelde $X_{25} = 0.06$

X₂₆ TOEGANG SLUITINGSINSTALLATIE SLECHT OF VERSPERD

Hier is weinig informatie over bekend. De kans dat een sleutel kwijt is, lampen kapot zijn etc. is moeilijk in te schatten.

Uit de grafiek wordt na vergelijking tussen de andere schattingen en de schattingen door experts de kans op falen van X₂₆ 1E-04 geschat.

Kans toegang sluitingsinstallatie slecht of versperd 1E-04
Grenzen 1E-03 - 1E-05

Indien de bemanning niet permanent aanwezig is moet hier ook de weg naar de kering in mee worden genomen.

Ongeluk personeel bij transport 1E-05 /persoon/km

Het aantal personen waar mee moet worden gerekend is het minimum aantal personen dat nodig is om de kering te kunnen sluiten.

Den Oever X₂₆ = 0.0001
Oosterschelde X₂₆ = 0.0001

X₂₇ OBSTAKELS DIE SLUITEN VAN DE DEUREN (BIJNA) VERHINDEREN

Volgens [TAW, 1992]

Obstakel op de bodem	$\lambda = 1E-04 /y$
Zand/ vuil op de bodem	$\lambda = 0.01 /y$
Ernstige ijsvorming	$Q = 1 E-09/demand$

Totaal kans op obstakel	$0.5 * 1.01E-04 * testtijd + Q$
Bij testtijd 3 maanden	$0.5 * 1.01E-04 * 0.25 + 1E-09 = 1.3E-05$

Kans op obstakel = 1.3E-05

Den Oever X₂₇ = 1.3E-05¹
Oosterschelde X₂₇ = 1.3E-05

¹ Voor Den Oever wordt de kans op een obstakel gevormd door de kans dat een obstakel (auto) voor de deuren geparkeerd staat.

7.4 Resultaten

Bijlage F1 (kolom 2) zijn de resultaten doorgerekend om de kans op de topgebeurtenis te bepalen. De THERP methode geeft ook mogelijkheden tot bepaling van afhankelijkheden. Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk al vermeld zijn in deze studie de afhankelijkheden niet bepaald m.b.v de THERP methode.

Om toch de kans op topgebeurtenis te kunnen bepalen zijn de afhankelijkheden zoals geschat door de experts van de Oosterschelde kering gebruikt. Om de invloed van de afhankelijkheden te onderzoeken is de topgebeurtenis ook berekend met totaal afhankelijke en totaal onafhankelijke basisgebeurtenissen (Bijlage F1 kolom 1 en 3).

In figuur 7.1 en 7.2 zijn de met behulp van de THERP methode geschatte kansen op de basisgebeurtenissen uitgezet tegen de door de experts geschatte kansen voor respectievelijk de persoonlijke basisgebeurtenissen en de technische basisgebeurtenissen.

Voor alle persoonlijke basisgebeurtenissen valt de schatting volgens de THERP methode een stuk hoger uit dan de schattingen volgens de expert meningen methode. Voor een aantal basisgebeurtenissen (X_2 , X_{13}) zijn de schattingen zo hoog dat ze niet meer binnen de grafiek passen.

De minimum schattingen zijn bij de persoonlijke basisgebeurtenissen bepaald door de oorspronkelijke HEP waarde te delen door de gegeven error factor ($EF = 3$).

Ook de minimum schattingen vallen vaak hoger uit dan de door experts gedane schattingen.

Voor de technische basisgebeurtenissen komen een aantal schattingen redelijk overeen met de door de experts gedane schattingen (X_4 , X_{24} , X_{25} , X_{26}). Echter een aantal schattingen schelen bijna een faktor 100 met de door de experts gedane schattingen (X_1 , X_{12} , X_{14} , X_{15}).

De tabel met Error factor (Bijlage F1 kolom 4) geeft alle minimum kansen (onder onzekerheids-grens) aan. Voor de persoonlijke basisgebeurtenissen zijn de oorspronkelijke HEP waarden gedeeld door de Error Factor ($EF = 3$). Op deze manier worden de 5 % en 95 % punten van de verdeling bepaald [Swain en Guttman, 1983].

Voor de technische basisgebeurtenissen is indien mogelijk de minimum waarde van de grenzen toegepast.

Bij toepassing van alle minimum schattingen wordt de kans op de topgebeurtenis H3 nieuw = 0.013. Dit is een verkleining van de kans met een faktor 9 ten opzichte van de bepaalde H3 nieuw = 0.12 voor de oorspronkelijk bepaalde HEP waarden.

Bij verandering van de afhankelijkheden van de basisgebeurtenissen verandert de kans op de topgebeurtenis met maximaal 33 % ten opzichte van de oorspronkelijk bepaalde afhankelijkheden voor de Oosterschelde kering.

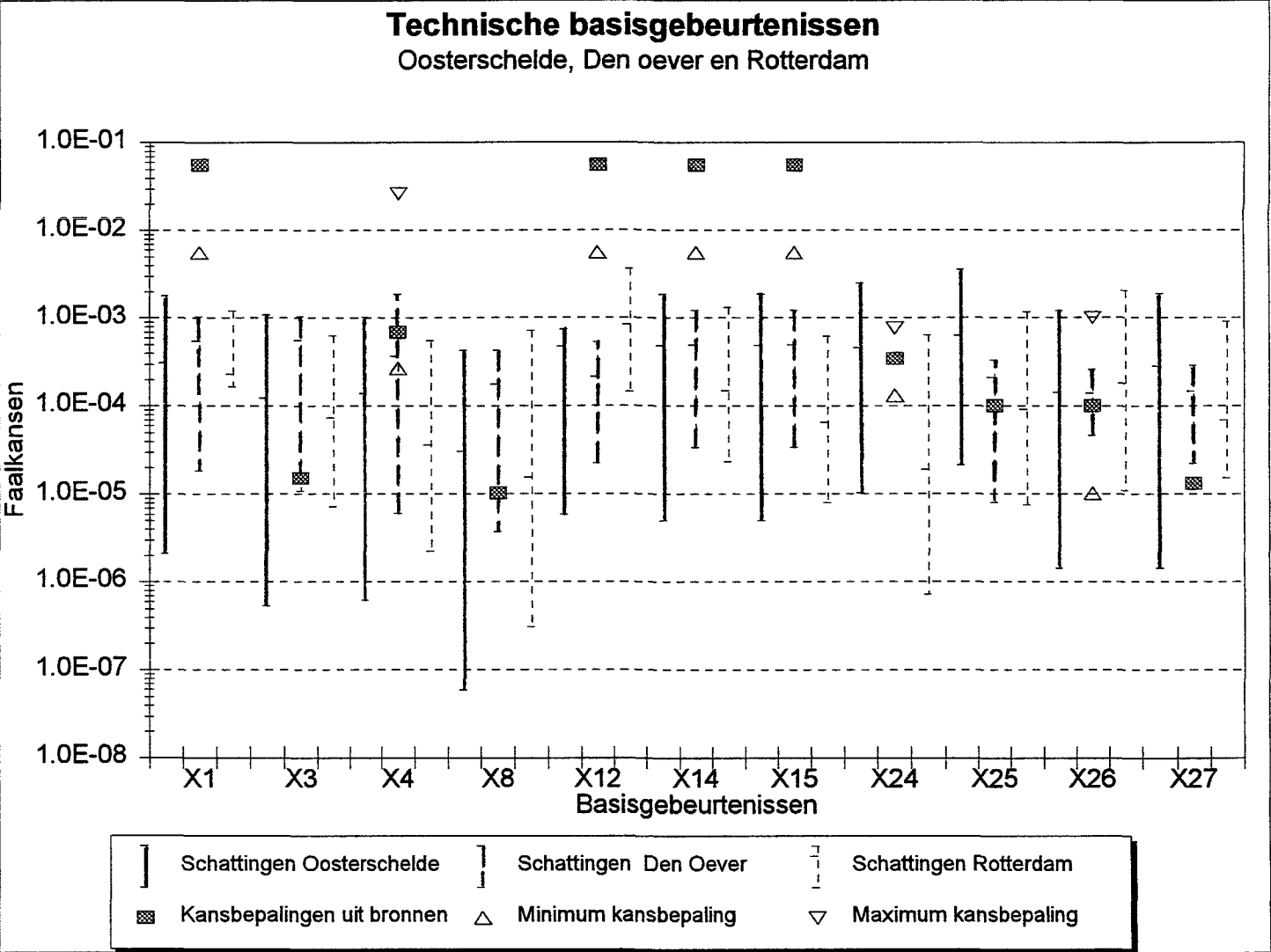
Het blijkt dat de verandering van kansschattingen tussen de grenzen voor de basisgebeurtenis van meer invloed is op de bepaling van de kans op de topgebeurtenis dan een verandering van afhankelijkheden tussen de grenzen die voor afhankelijkheden gelden.

De kansbepaling voor de topgebeurtenis is dus gevoeliger voor verandering in kansschattingen van de basisgebeurtenissen dan voor verandering in afhankelijkheden tussen de basisgebeurtenissen.

Voor verder onderzoek zal allereerst uitvoeriger naar de kansschattingen gekeken moeten worden alvorens de afhankelijkheden nauwkeurig worden bepaald.

In Bijlage F2 zijn de resultaten weergegeven van toepassingen van de THERP methode op de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering. In hoofdstuk 8 worden deze resultaten vergeleken met andere betrouwbaarheidsanalyses voor deze keringen.

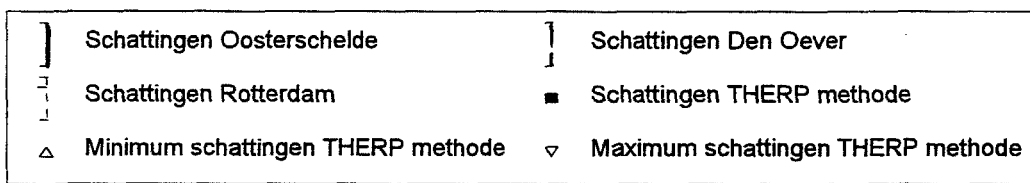
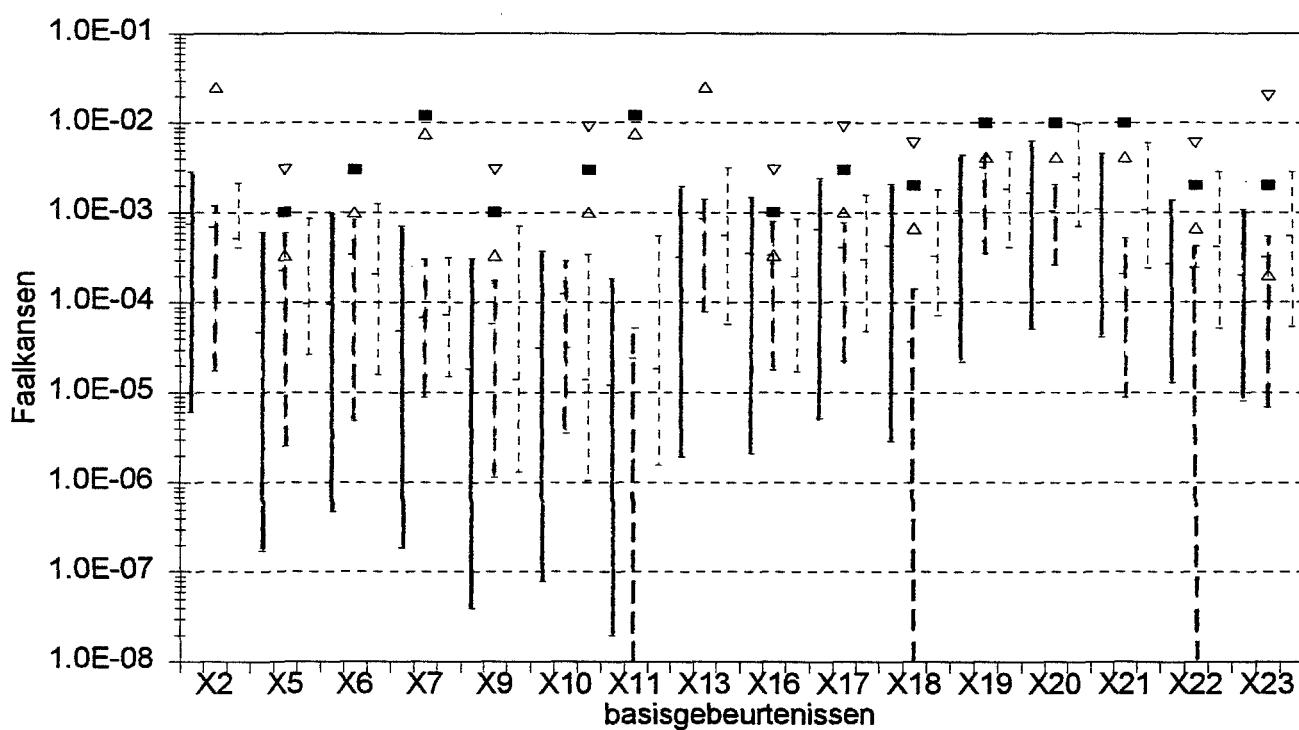
Figuur 7.1 Vergelijking schattingen m.b.v. expert meningen en schattingen uit data bestanden



De THERP waarden zijn uitgezet voor de kering in Rotterdam, in H 8 is THERP toegepast voor Den Oever en de Oost

Figuur 7.2 Vergelijking schatting THERP met de expert meningen schattiingen

Persoonlijke basisgebeurtenissen Oosterschelde, Den Oever en Rotterdam



De schattingen voor X1 en X13 (0.25) vallen buiten het bereik van de grafiek

7.5 Ervaring met de THERP methode

De THERP methode heb ik als een zeer subjectieve methode ervaren. Voor een groot deel is dit te wijten aan het feit dat de THERP methode voor en vanuit de analyse van nucleaire processen is geschreven. Hierdoor zijn de gegeven HEP waarden voor menselijke handelingen niet altijd toe te passen op de handelingen passend bij het sluiten van een waterkering.

Echter de methode lijkt ook subjectief doordat het handboek moeizaam te doorgronden is. De uiteindelijke HEP waarde voor een handeling wordt gevormd door vermenigvuldiging van de HEP waarden met verschillende factoren. Doordat in het handboek de tabellen niet op een logische volgorde zijn aangebracht is het goed mogelijk dat niet altijd alle benodigde factoren zijn gebruikt in de berekening.

In de literatuur wordt de THERP methode vaak besproken. Humphreys

[Humphreys, 1933] bespreekt een aantal voor en nadelen van de THERP methode.

Als belangrijkste nadeel wordt genoemd dat de THERP methode niet erg bruikbaar is bij onderzoek naar fouten bij het maken van diagnoses of het nemen van beslissingen. Een ander nadeel is dat een uitgebreide analyse met de THERP methode een hoop werk met zich meebrengt.

Als voordelen van de THERP methode gelden o.a. het gemakkelijke gebruik van de THERP methode voor ontwerp doeleinden en de gemakkelijke integratie van de THERP methode in een gehele risico analyse.

7.6 Conclusies

De toepassing van de THERP methode is mogelijk voor andere dan nucleaire processen. Door het grote verschil tussen een nucleair proces en het sluitings proces van een waterkering wordt de THERP methode wel als subjectief ervaren.

De bepaalde HEP waarden voor de basisgebeurtenissen vallen een stuk hoger uit dan de faalkansen berekend met behulp van expert meningen. Dit geldt zowel voor de persoonlijke basisgebeurtenissen, bepaald met de THERP methode, als voor een groot deel van de technische basisgebeurtenissen.

De kans op de topgebeurtenis is 0.12. Dit is veel te hoog, zo voldoet geen enkele kering aan de eis gesteld voor de betrouwbaarheid van de sluitingsprocedure.

Bij verandering van afhankelijkheden verandert de kans op de topgebeurtenis maximaal met een factor 1.33.

Bepaling van de kans op de topgebeurtenis met de minimum schattingen blijkt een verlaging van de kans op de topgebeurtenis met een faktor 9 op te leveren. Dit strookt niet helemaal met de opmerkingen gemaakt in hoofdstuk 3 omtrent vergelijking met andere industriële processen. Bij vergelijking met de nucleaire processen, waar de gegevens uit het THERP Handboek vandaan komen, zijn de performance shaping factors (PSF) bij het sluitingsproces van een waterkering juist minder goed.

Echter doordat het sluitingsproces soms frequenter voorkomt dan een noodsituatie bij nucleaire processen is bij het sluitingsproces de ervaring meer en de stress wat minder. Dit is moeilijk kwantitatief af te wegen.

Het is moeilijk in te schatten in hoeverre het nemen van minimale HEP waarden of ondergrenzen juist is in vergelijking met de nucleaire processen.

Voor de bepaling van de faalkansen van zowel de persoonlijke als de technische gebeurtenissen zijn veel aannames gedaan. Ook bij de bepaling van de faalkansen voor de kering in Den Oever of de Oosterschelde kering. Om een betere schatting te kunnen maken of om zekerder te zijn over de in dit onderzoek gedane schattingen is het nuttig nogmaals en nog nauwkeurigere kansschattingen te laten doen. In dit onderzoek heb ik mij beperkt tot een grove eerste kansschatting.

H8 Vergelijking betrouwbaarheidsanalyses

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de methode met expert meningen en de THERP methode onderling vergeleken. Voor de kering in Den Oever is eerder een betrouwbaarheidsanalyses uitgevoerd, deze wordt vergeleken met de analyses uit dit onderzoek. Tevens zullen de betrouwbaarheden, zoals die met behulp van de TAW methode worden berekend, voor de kering in Den Oever en voor de Oosterschelde kering worden bekeken.

8.1 Vergelijking tussen de methode met expert meningen en de THERP methode

In deze paragraaf worden de faalkansen voor de basisgebeurtenissen, die bepaald zijn met de THERP methode, vergeleken met de methode voor expert meningen.

In bijlage F2 zijn de faalkansen voor de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering berekend met de THERP methode weergegeven.

In figuur 8.1 en 8.2 zijn de faalkansen voor de basisgebeurtenissen van de THERP methode en de methode met expert meningen vergeleken voor respectievelijk de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering.

De faalkansen bepaald met de THERP methode zijn voor bijna alle basisgebeurtenissen groter dan de schattingen van de methode met expert meningen.

In vergelijking met de schattingen van de experts met een Ptop van 10 ‰ zijn de THERP schattingen een factor 10 tot 100 groter.

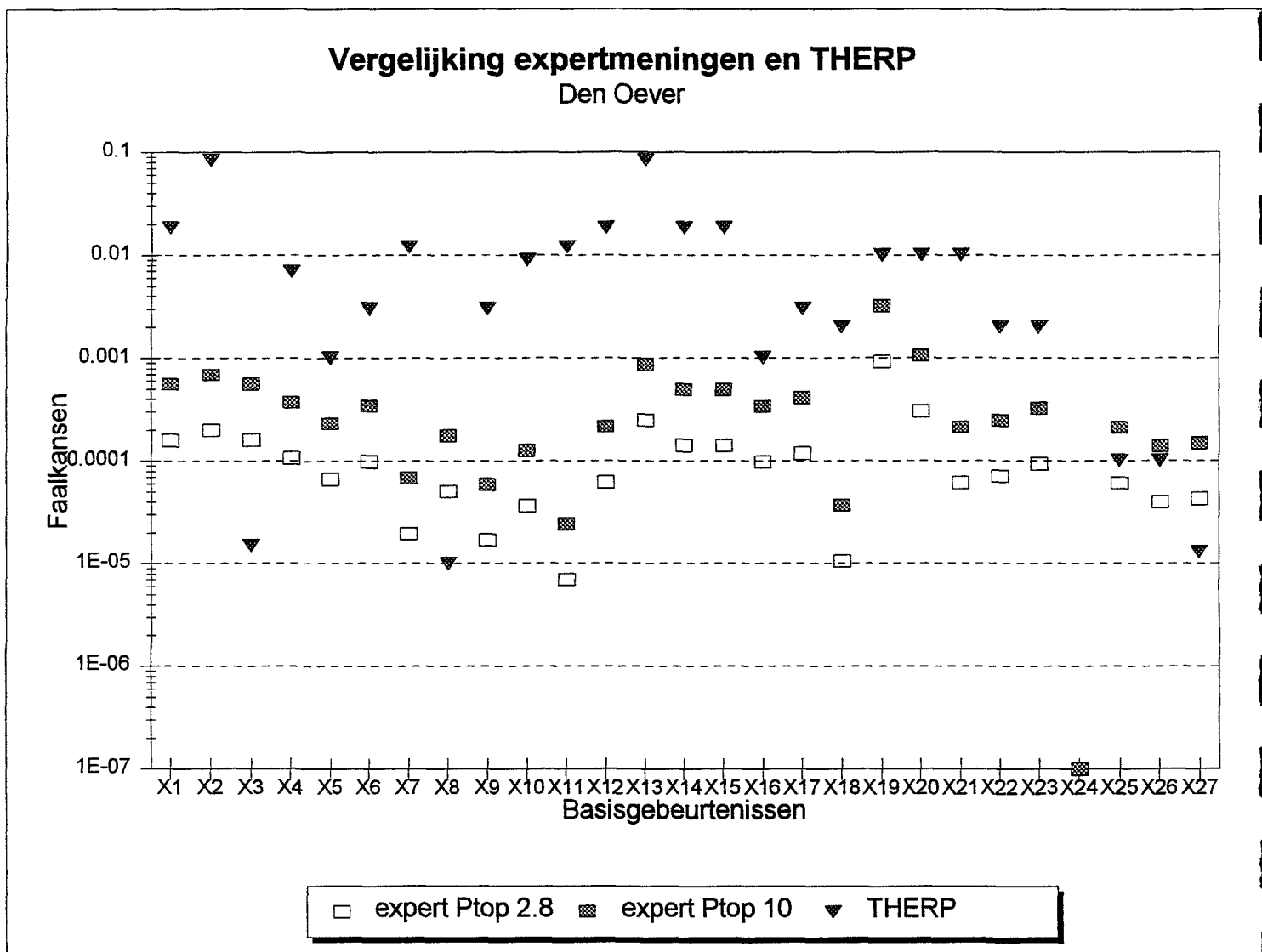
Voor X_3 en X_8 ; het technisch falen van de apparatuur voor automatische registratie, is de THERP schatting (eigenlijk de KEMA schatting), voor beide keringen een stuk kleiner dan de schatting met expert meningen.

De TAW bepaling voor X_{24} , de kans op het falen van de elektriciteitsvoorziening, is voor de kering in de Oosterschelde, een stuk lager dan de schatting door de experts.

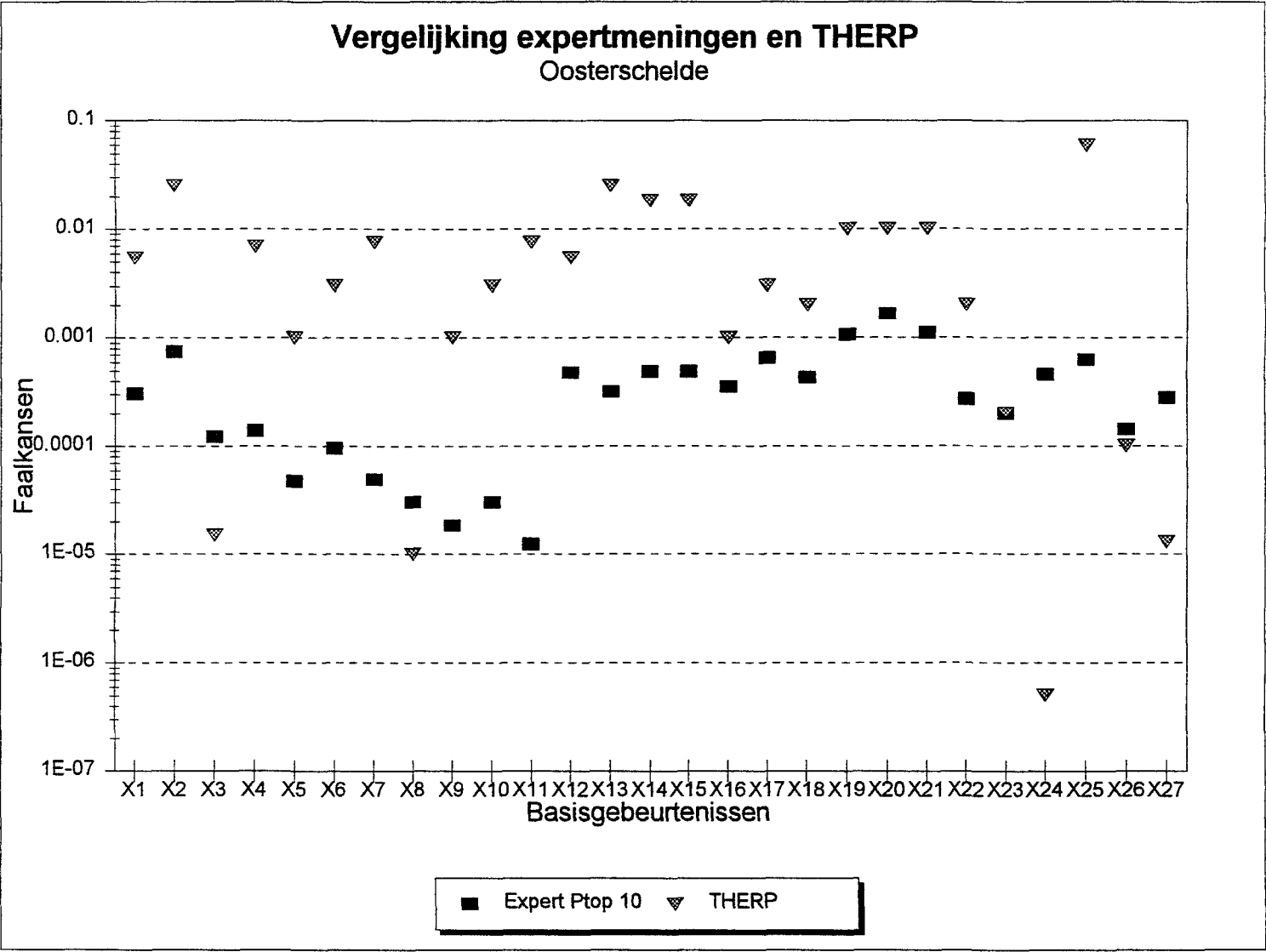
De kans op X_{27} , een obstakel, is bij de TAW schatting een stuk lager dan bij de schatting door de experts.

In bijlage F2 zijn ook de kansen op de topgebeurtenis voor de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering bepaald. Ook de kans op de topgebeurtenis is bij toepassing van de THERP methode groter dan volgens de schatting door de experts. In hoofdstuk 8 worden de kansen voor falen van de subgebeurtenissen vergeleken.

Figuur 8.1 Vergelijking tussen de faalkansen voor de basisgebeurtenissen



Figuur 8.2 Vergelijking tussen de faalkansen voor de basisgebeurtenissen



8.2 Vergelijking technische en persoonlijke gebeurtenissen

In tabel 8.1 zijn de kansen op technische fouten berekend volgens de methoden met experts en THERP, in verhouding tot de kansen op persoonlijke fouten bepaald.

In de foutenboom is op verschillende niveaus onderscheid gemaakt tussen technische en persoonlijke gebeurtenissen (Vragen E3, E4, E8, D4, D7, D9, D12, V5 van de schattingsboom). Voor zowel de methode met expert meningen als de THERP methode zijn verhoudingen tussen technische en persoonlijke gebeurtenissen vergeleken voor de verschillende keringen. De in de eerste kolom aangegeven codes behoren bij de vraag. De in kolom 3 en 4 (7 en 8) aangegeven codes behoren bij de technische respectievelijk persoonlijke gebeurtenis.

In de 'volksmond' wordt vaak gesteld 'de kans op technisch falen is een factor 10 kleiner dan de kans op menselijk falen'. Dit is echter in de tabel niet terug te vinden.

De verhouding tussen technisch en menselijk falen ligt in de meeste gevallen tussen $\text{techn/pers} = 0.2$ en $\text{techn/pers} = 2$.

Voor Den Oever en de Oosterschelde komen de verhoudingen, berekend volgens de methode met experts, redelijk goed overeen met uitzondering van D9 (telefonisch contact) en V5 (foute sluitingsactie bemanning). Volgens de THERP methode zijn de gevonden verhoudingen hetzelfde, behalve voor V5.

De verhoudingen zijn voor de expert meningen en de THERP methode voor de gebeurtenissen niet hetzelfde. Voor de THERP methode liggen de meeste verhoudingen tussen 0.2 en 0.6. Voor de methode met expert meningen liggen alle verhouding wat meer verspreid: tussen 0.2 en 2.7.

Voor de foute sluitingsactie (V5) is er een opvallend verschil in de verhouding technisch/persoonlijk falen voor de verschillende keringen.

Bij de kering in Den Oever is, zowel voor de methode met experts als de THERP methode, de kans op fouten door een technische oorzaak groter dan door een persoonlijke oorzaak.

Voor de Oosterschelde kering geldt het omgekeerde; de kans op een foute sluitingsactie is veel groter door persoonlijke oorzaken dan door technische oorzaken.

In Den Oever is de invloed van persoonlijk falen bij de sluitingsactie niet zo groot. De bemanning, die paraat is, moet fysiek de deur sluiten. Hij kan bij dit sluiten weinig fout doen of vergeten.

Bij de Oosterschelde kering wordt het handelen bij de sluitingsactie meer op afstand gedaan. Hier kunnen gemakkelijker onderdelen worden vergeten of fout gaan.

Tabel 8.1 Vergelijking tussen de technische en persoonlijke faalkansen van de expertmeningen en de THERP methode

		Expert meningen					THERP methode		
Gebeurtenissen		Technisch	Persoonlijk	Verhouding			Technisch	Persoonlijk	Verhouding
		E1	E2	Tech/Pers			E1	E2	Tech/Pers
(E3) Ontvanger heeft peil	Den Oever	2.67E-04	1.75E-04	1.53	Den Oever		6.92E-03	1.58E-02	0.44
niet op tijd waargenomen	Rotterdam	5.40E-04	1.80E-03	0.30					
(waterstand aflezing)	Oosterschelde	2.60E-04	1.90E-04	1.37	Oosterschelde		6.92E-03	1.16E-02	0.60
		X1	X2				X1	X2	
(E4) Doorgeven peil aan	Den Oever	1.60E-04	1.90E-04	0.84	Den Oever		1.83E-02	8.33E-02	0.22
functionaris gaat niet goed	Rotterdam	1.15E-03	2.57E-03	0.45					
(telefonisch contact)	Oosterschelde	3.03E-04	7.43E-04	0.41	Oosterschelde		5.50E-03	2.50E-02	0.22
		E6	E7				E6	E7	
(E8) Ontvanger heeft waarschu-	Den Oever	2.80E-04	2.13E-04	1.31	Den Oever		3.63E-02	5.70E-03	6.37
wing niet op tijd ontvangen	Rotterdam	1.06E-03	4.01E-03	0.26					
(faxbericht)	Oosterschelde	9.60E-04	1.42E-03	0.68	Oosterschelde		3.63E-02	5.70E-03	6.37
		D2	D3				D2	D3	
(D4) Ontvanger heeft peil	Den Oever	2.67E-04	1.75E-04	1.53	Den Oever		6.92E-03	1.58E-02	0.44
niet op tijd waargenomen	Rotterdam	5.42E-04	1.77E-03	0.31					
(waterstand aflezing)	Oosterschelde	2.58E-04	1.90E-04	1.36	Oosterschelde		6.90E-03	1.16E-02	0.59
		D5	D6				D5	D6	
(D7) Bemanning heeft peil	Den Oever	1.56E-04	5.63E-05	2.77	Den Oever		6.91E-03	2.31E-02	0.30
niet op tijd waargenomen	Rotterdam	2.55E-04	2.21E-04	1.15					
(Aflezing waterstand)	Oosterschelde	1.67E-04	6.10E-05	2.74	Oosterschelde		6.91E-03	1.15E-02	0.60
		X12	X13				X12	X13	
(D9) Doorgeven waterstand	Den Oever	6.14E-05	2.46E-04	0.25	Den Oever		1.83E-02	8.33E-02	0.22
aan bemanning faalt	Rotterdam	4.20E-03	2.80E-03	1.50					
(Telefonisch contact)	Oosterschelde	4.72E-04	3.15E-04	1.50	Oosterschelde		5.50E-03	2.50E-02	0.22
		D10	D11				D10	D11	
(D12) Ontvanger heeft waar-	Den Oever	2.80E-04	2.36E-04	1.19	Den Oever		3.63E-02	6.30E-03	5.77
schuwning niet tijdig ontvangen	Rotterdam	1.06E-03	4.20E-03	0.25					
(Fax bericht)	Oosterschelde	9.60E-04	1.42E-03	0.68	Oosterschelde		3.63E-02	6.00E-03	6.06
		V4	V3				V4	V3	
(V5) Foute sluitingsactie	Den Oever	1.63E-04	1.40E-04	1.16	Den Oever		4.00E-03	2.13E-04	18.78
bemanning	Rotterdam	4.86E-03	1.80E-03	2.70					
	Oosterschelde	4.69E-04	1.50E-03	0.31	Oosterschelde		2.20E-03	6.01E-02	0.04

8.3 Vergelijking tussen verschillende betrouwbaarheidsanalyses voor Den Oever

Een directe vergelijking van de bepaalde betrouwbaarheden bij de verschillende uitgevoerde analyses is moeilijk. Alleen de kans op de topgebeurtenis, het niet sluiten van de kering gegeven noodzaak, is voor iedere analyse gelijk. De bepaalde subgebeurtenissen en basisgebeurtenissen zijn niet bij iedere analyse gelijk genomen. Het zou jammer zijn de vergelijking tussen de uitgevoerde analyses alleen over de topgebeurtenis uit te voeren. Een vergelijking van de subgebeurtenissen levert juist meer informatie over de oorzaak van de grote verschillen in de faalkans van de topgebeurtenissen.

De THERP methode en de methode met expert meningen kunnen wel vergeleken worden voor alle basisgebeurtenissen.

Voor een vergelijking met andere betrouwbaarheidsanalyses worden achtereenvolgens de volgende subgebeurtenissen met elkaar vergeleken.

- Functionaris niet paraat,
- Foute beslissing functionaris,
- Bemanning niet paraat,
- Foute sluitingsactie bemanning.

Voor de kering in Den Oever worden de volgende analyses vergeleken:

- Methode expert meningen met geschatte kans op top 2.8 ‰ (zie bijlage F2),
- Methode expert meningen met geschatte kans op top 10 ‰ (zie bijlage F2),
- THERP methode aangepast aan de kering (zie bijlage F2),
- Analyse specifiek voor de kering [Tonneijck en Koster, 1993],
- TAW model ingevuld voor de kering in Den Oever,
(De uitwerking hiervan staat in paragraaf 8.3.1)
- Toepassing methode uit [TAW, december 1992].
(De uitwerking hiervan staat in paragraaf 8.3.2)

Het TAW model uit 1994/ 1995, dat in Bijlage A staat beschreven, is een concept model wat gemaakt is als verbetering van de oude concept methode uit 1992.

Den Oever	W(WF) = 2.8‰	W(WF) = 10‰	THERP	Analyse ¹	TAW ²	TAW ³
Funct.paraat(E11)	3.6E-4	1.23E-3	9.6E-2	8E-3	1E-3	1E-3
Beslisfout (T1)	7.5E-4	2.6E-3	2E-2	0	0	1E-3
Bem. paraat(D14)	6.6E-6	2.7E-5	1.42E-2	1E-3	1E-3	1E-4
Sluitingsactie bemanning (V5)	3.05E-4	1.06E-3	4.21E-3	1E-2	6.32E-4	5.5E-4
Ptop [‰] (H3)	1.06E-3	3.68E-3	3.8E-2	1.9E-2	1E-3	2.65E-3

¹ [Tonneijck en Koster, 1993]

² Volgens het TAW model [TAW, 1994] in deze berekening wordt de faalkans bepaald door de zwakste schakel in het systeem.

³ Volgens de methode aangegeven in de TAW concept leidraad [TAW, dec 1992]

Alleen vergelijking tussen de faalkansen onderling is mogelijk daar niet bekend is wat de 'goede' faalkansen zijn.

Voor de methode met expert meningen en de THERP methode wordt de kans op de topgebeurtenis bepaald voor de vereniging van de vier subgebeurtenissen minus de doorsneden van de subgebeurtenissen.

Voor de analyse van Tonneijck en Koster wordt de kans op de topgebeurtenis eveneens bepaald voor de vereniging van de subgebeurtenissen, waarbij wordt aangenomen dat er geen doorsneden zijn.

Bij het TAW² model bepaalt de zwakste schakel in het systeem de betrouwbaarheid van het sluitingsproces.

Het systeem bestaat daarbij uit vier 'schakels' of subgebeurtenissen te weten:

- Falen hoogwateralarmeringssysteem (Functionaris niet paraat)
- Falen mobilisatie (Bemanning niet paraat)
- Het maken van een bedieningsfout (Foute sluitingsactie bemanning)
- Falen door een technische storing (Technisch falen sluitingsactie)

Bij de TAW³ toepassing, in de laatste kolom van de tabel, wordt de kans op de topgebeurtenis bepaald door sommatie van de 4 subgebeurtenissen.

Opvallend is dat voor de subgebeurtenis 'foute beslissing functionaris' bij zowel de analyse door Tonneijck als in het TAW² model geen faalkans wordt bepaald. Terwijl juist, zowel uit de methode met expert meningen als uit de THERP methode blijkt dat de faalkans van deze subgebeurtenis zeker niet verwaarloosbaar is.

Wanneer de THERP methode met de andere methoden wordt vergeleken, vallen de faalkansen voor de subgebeurtenissen bij de THERP methode voor alle subgebeurtenissen een stuk hoger uit, behalve 'foute sluitingsactie'.

De in hoofdstuk 7 besproken verlaging van de faalkansen door deze te delen door de Error Factor zou de grote verschillen aanzienlijk verkleinen. Echter gezien het feit dat de THERP methode juist ontstaan is uit een industrie waar routinematig gewerkt wordt en het in dit onderzoek moeilijk te bepalen is in hoeverre de THERP faalkansen te vertalen zijn naar het sluitingsproces, is het niet duidelijk of deling door de Error Factor juist is.

De kans op de topgebeurtenis bij $W(WF) = 10\%$, het TAW² model en de TAW³ methode komen het best overeen.

Het TAW² model is het vergelijken beter te doen, indien niet met de zwakste schakel wordt gerekend, maar de kans op de topgebeurtenis wordt bepaald door sommatie over alle subgebeurtenissen uit te voeren.

De kans op de topgebeurtenis valt dan hoger uit ($8.32E-03$) dan de TAW³ methode en de expert meningen methode. Gezien het feit dat het TAW² model gebruikt wordt als eerste controle middel voor de betrouwbaarheidsbepaling van een kering zou een hogere eerste schatting beter zijn.

Indien de $W(WF) 10 \%$ analyse, de TAW³ methode en het TAW² model nader worden vergeleken, kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden.

Voor het TAW² model wordt er vanuit gegaan dat de Ptop bepaald wordt door sommatie van de vier bovengenoemde subgebeurtenissen.

- Voor functionaris niet paraat en foute sluitingsactie komen de faalkansen van het TAW² model goed overeen met de andere methoden.
- Voor een beslissen wordt bij het TAW² model geen faalkans berekend. De kans op een foute beslissing is bij ieder sluitingsproces en iedere kering aanwezig en moet dus wel worden meegenomen.
- De kans op bemanning niet paraat is bij het TAW² model wel erg groot (1E-3). Voor de W(WF)= 10‰ is deze 2.75E-5 en voor de TAW³ methode is deze 1E-4.
Belangrijkste oorzaak is hierbij waarschijnlijk dat in de enquête, voor Den Oever, waar de W(WF)= 10‰ schattingen vandaan komen, door de experts wordt meegerekend dat waarschuwing door de bevolking ook mogelijk is. In de TAW³ methode wordt waarschuwing door de bevolking ook meegenomen in de betrouwbaarheidsbepaling. In het TAW² model wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheid van waarschuwing door de bevolking.

Als de volgende veranderingen voor het TAW² model worden ingevoerd:

- Voor de beslisfout, in navolging van de TAW³ methode en de expert meningen methode een kans van 1E-03 tot 2.6E-03 wordt genomen.
- Voor de kans op bemanning niet paraat in navolging van de TAW³ methode en de methode met expert meningen een factor 10 wordt verkleind door de waarschuwing van de bevolking.
- De kans op de top wordt bepaald door sommatie van de kansen op de subgebeurtenissen.
(Hierbij is het voorkomen van eventuele doorsneden bij de subgebeurtenissen verwaarloosd)

Is de kans op de topgebeurtenis:

$$E11 + T1 + D14 + V5 = 1E-3 + 1E-3 + 1E-3 + 6.32E-4 = 3.6E-3.$$

Dit komt goed overeen met de methode met expert meningen en met de TAW³ methode.

- De THERP methode valt voor alle subgebeurtenissen een factor 10 hoger uit.
Er moet ofwel nader bestudeerd worden hoe de THERP methode op het sluitingsproces kan worden toegepast of moet gekeken worden hoe, door vergelijking met andere betrouwbaarheidsanalyses voor het sluitingsproces, kan worden verklaard dat de schattingen volgens de THERP methode een factor 10 te hoog uitvallen. Dit laatste moet ook voor meerdere keringen onderzocht worden.
- De Analyse van Tonneijck en Koster wijkt het meest af voor de kans op een foute sluitingsactie. Gezien het feit dat voor de andere methoden voor de kans op een foute sluitingsactie vrij consistente waarden worden gegeven, mag er aan de schatting voor het falen van de sluitingsactie door Tonneijck en Koster worden getwijfeld.

8.3.1 Toepassing TAW² model op kering in Den Oever

Achtereenvolgens worden de antwoorden op de vragen gegeven, zoals die in het TAW² model (Zie bijlage A) zijn gesteld.

Hoogwateralarmeringssysteem

- | | | |
|----|------|-------------------------------------------------------------------------|
| a1 | a=3 | Het alarm wordt verzorgd door de SVSD |
| a2 | a=3 | alleen bij hoogwater |
| a3 | a=3 | geen back-up |
| b1 | b=2 | er moeten diverse mensen worden gewaarschuwd |
| b2 | b=3 | er is een procedure |
| b3 | b=4 | er is gemiddeld twee maal per jaar een sluiting |
| b4 | b=2 | 2 schakels $n=2$; geen terugmelding |
| c | c=2 | tussenscore $c = \min(a;b) = \min(3;2) = 2$ |
| d | d=0 | er is één systeem |
| e | e=0 | idem |
| f | f=0 | tussenscore tweede systeem |
| g | g=1 | waarschijnlijk redelijk op tijd; puntdeuren kunnen snel worden gesloten |
| h | E1=3 | eindscore: $E1 = c+f+g = 2+0+1 = 3$ |

Mobilisatie

- | | | |
|----|-------|-------------------------------------------------|
| a1 | a=1 | er is één opzichter op 10 km afstand |
| a2 | a=2 | er is een mobilisatieprocedure |
| a3 | a=2 | er is geen voorwaarschuwingssysteem |
| a4 | a=2.5 | er is telefonisch contact dus 'ja' |
| a5 | a=3 | de coupure wordt gemiddeld 2 keer/jaar gesloten |
| b1 | b=0 | nee, althans niet bekend |
| b2 | | niet van toepassing |
| c | c=3 | tussenscore $c = a+b$ |
| d1 | d=1 | Er is geen permanente bemanning |
| d2 | d=4 | Zeer goed bereikbaar, zolang op tijd |
| e | E2=3 | Eindscore; $E2 = \min(c;d) = \min(3;4) = 3$ |

Bediening

- | | | |
|----|--------|-----------------------------------------------------------------|
| a1 | a=2 | Er is een schriftelijke sluitingsprocedure |
| a2 | a=2.5 | Er is een terugmeldingsplicht |
| a3 | a=3 | De procedure is bij iedere betrokkene bekend |
| a4 | a=3.5 | De sluitingsprocedure gebeurt ongeveer 2x per jaar |
| b | b=1 | ja |
| c1 | c=1 | er is een openbare straatverlichting |
| c2 | c=2 | er zijn geen sleutels |
| c3 | c=2.5 | onbekend maar niet nodig |
| d | d=1 | ja |
| e | E3=3.5 | eindscore bediening: $E3 = \min(a+b;c+d) = \min(4.5;3.5) = 3.5$ |

Technisch falen

eerste keermiddel (puntdeuren)

- a1 a=2 de deuren zijn permanent aanwezig
a2 a=3 waarschijnlijk
a3 a=3 de deuren zijn goed beschermd
b1 b=3 bediening met handkracht
c c=3 tussenscore $c = \min(a;b) = \min(3;3) = 3$
d niet van toepassing
e e=2 geen bijzondere belemmering
f f=0.5 ja
g g=2.5 tussenscore: $g = \min(c+d;e+f) = \min(3+1;2+0.5) = 2.5$

tweede keermiddel (schotbalken)

- a1 a=1 schotbalken zijn geen permanent middel
a2 a=2 waarschijnlijk
a3 a=2 nee
b b=2 ja met een vrachtwagen met kraan
c c=2 tussenscore $c = \min(a;b) = \min(2;2) = 2$
d d=0 geen reserve
e e=2 geen bijzondere belemmeringen
h h=1 tussenscore: $h = \min(c;e)-1 = \min(2;2)-1 = 1$

totaal systeem

- i $E4=3.5$ eindscore: $E4 = g + h = 2.5 + 1 = 3.5$

Faalkans per vraag

Hoogwater alarmeringssysteem	$E1 = 3.0$
Mobilisatie	$E2 = 3.0$
Sluitings; bedieningsfout	$E3 = 3.5$
Sluiting; technisch falen	$E4 = 3.5$

Voor het geheel $E = \min Ei = 3.0$

Daarmee komt de kans op niet falen bij een gegeven vraag: $P_{ns} = 1E-03$

Verdeeld over de verschillende subgebeurtenissen wordt dit:

Functionaris niet paraat	$1E-03$
Foute beslissing functionaris	0
Bemannig niet paraat	$1E-03$
Foute sluitingsactie	$6.32E-04^1$
Falen sluitingsprocedure	$1E-03$

¹ $2 \times 1E-3.5 = 6.32 E-04$

8.3.2 Toepassing TAW-analyse op kering in Den Oever

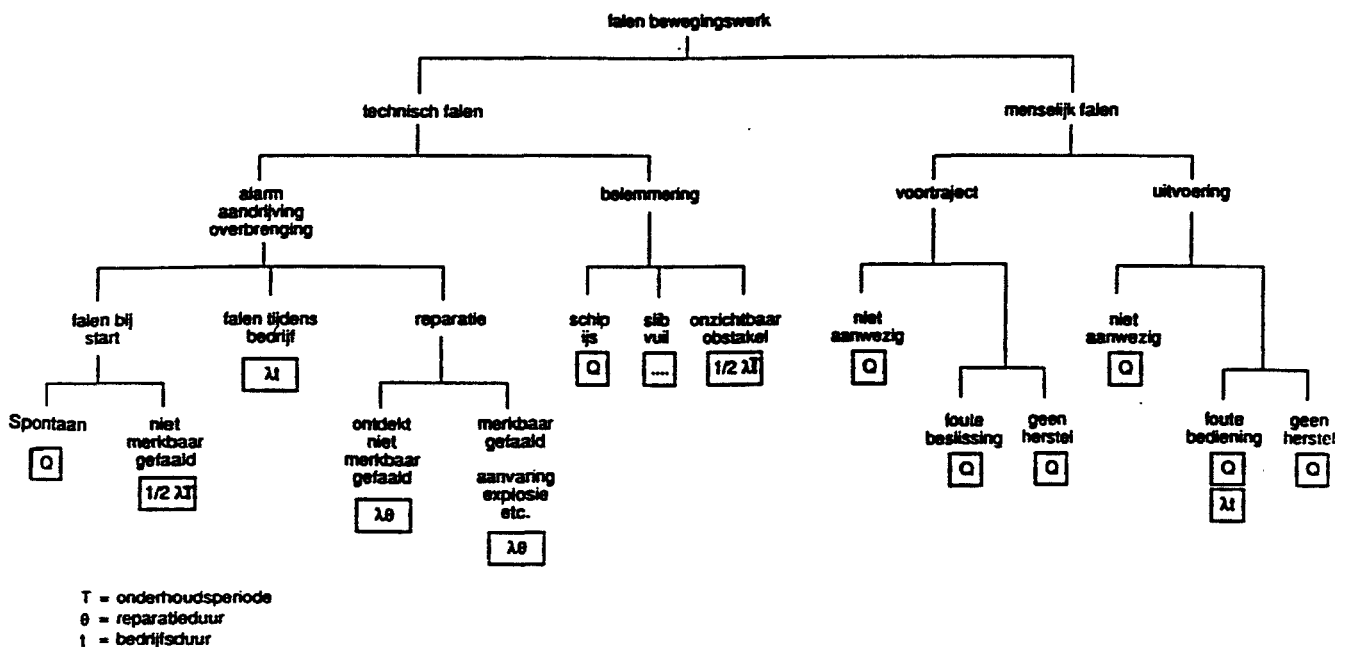
De TAW-analyse [TAW, december 1992], welke bij de THERP methode voor de technische componenten ook is gebruikt is toegepast.

In deze concept leidraad staat een foutenboom voor het falen van het bewegingswerk.

Falen van het kunstwerk kan veroorzaakt worden door overloop/overslag, bezwijken of falen van het bewegingswerk.

Het laatste onderdeel komt overeen met het falen van de sluitingsprocedure zoals dat in dit onderzoek genoemd wordt.

Voor het falen van het bewegingswerk wordt de volgende foutenboom gegeven



Figuur 8.1 Foutenboom falen bewegingswerk [TAW, dec 1992]

Het invullen van alle basisgebeurtenissen voor de kering in Den Oever levert de volgende faalkansen (van links naar rechts).

AANDRIJVING OVERBRENGING

Falen bij start

Niet van toepassing voor Den Oever (handmatige sluiting zonder elektrische aandrijving)

Falen tijdens bedrijf

Niet van toepassing voor Den Oever (handmatige sluiting zonder elektrische aandrijving)

Reparatie

Stel $\lambda = 1E-04$

Reparatieduur $\theta = 4$ uur

$\lambda \theta = 4E-04$

BELEMMERING

Schip, ijs

Een schip is niet van toepassing, een auto echter wel.

Ijsvorming: $Q = 1E-09 [d]^1$

Slib, vuil

Niet van toepassing.

Obstakel

Een obstakel kan een geparkeerde auto zijn.

$\lambda = 1E-04$

Onderhoudsperiode is moeilijk in te schatten, het is natuurlijk te allen tijde mogelijk dat er een auto geparkeerd wordt voor de deuren. Een onderhoudsperiode heeft hier weinig effect op. Aanname $T = 1$

$\frac{1}{2} \lambda T = 0.5E-04$

MENSELIJK FALEN IN VOORTRAJECT

Niet aanwezig

De kans dat de aangewezen functionaris niet aanwezig is

$Q = 1E-03 [1/d]$

Foute beslissing en geen herstel

Voor de kans op een foute beslissing worden geen waarden gegeven.

Aanname $1E-02$ (Volgens de THERP methode)

Kans op geen herstel $1E-01 [1/d]$

Kans op foute beslissing en geen herstel = $1E-02 \times 1E-01 = 1E-03$

MENSELIJK FALEN IN UITVOERING

Niet aanwezig

De kans dat de bemanning niet aanwezig is en er geen bevolking op tijd aanwezig is

= $1E-03 \times 1E-01 = 1E-04 [1/d]$

Foute bediening en geen herstel

Kans op foute bediening is $1E-03 [1/d]$ (Verzuimfout met checklist)

Kans op geen herstel $1E-01 [1/d]$

Kans op foute bediening en geen herstel = $1E-04 [1/d]$

De totale faalkans van het bewegingswerk is de sommatie van alle faalkansen voor de subgebeurtenissen = $2.65 E-03$

Verdeeld over de verschillende subgebeurtenissen wordt dit:

Functionaris niet paraat	$1E-03$
Foute beslissing functionaris	$1E-03$
Bemanning niet paraat	$1E-04$
Foute sluitingsactie	$5.5E-04$

¹ d = demand

8.4 Vergelijking tussen de verschillende betrouwbaarheidsanalyses voor de Oosterschelde kering

Voor de Oosterschelde kering worden in navolging van de kering in Den Oever de volgende analyses vergeleken.

- Methode expert meningen met geschatte kans op top 10 ‰
- THERP methode aangepast aan de kering
- TAW² model ingevuld voor de kering.

Oosterschelde	W(WF) = 10‰	THERP	TAW ² model
Funct.paraat(E11)	1.04E-03	2.94E-02	1E-08
Beslisfout (T1)	3.38E-04	2.46E-02	0
Bem.paraat (D14)	7.77E-06	2.6E-03	1E-04
Sluitingsactie (V5)	1.97E-03	6.23E-02	3.47E-03
P top (H3)	5.35E-03	9.05E-02	3.16E-03

Ook hier is het moeilijk te analyses te vergelijken, daar voor het TAW model de kans op de topgebeurtenis wordt bepaald door de zwakste schakel. Bij het vergelijken van de analyses wordt ervan uitgegaan dat voor het TAW model de topgebeurtenis wordt bepaald door sommatie van de faalkansen voor de vier subgebeurtenissen. (Dit maakt overigens niet zoveel uit)

De schattingen met de THERP methode is in vergelijking met de ander analyses minstens een factor 10 groter. Voor de beslisfout van de functionaris is de schatting, net als bij de kering in Den Oever, de THERP methode veel hoger (factor 100).

Indien de faalkansen van het TAW model wordt vergeleken met de methode met expert meningen zijn er grote verschillen tussen de faalkansen op te merken:

- Voor de kans op functionaris niet paraat is de schatting het TAW model wel heel klein.
- De kans op een beslisfout wordt in het TAW model niet meegenomen.
- De kans dat de bemanning niet op tijd paraat is, is in het TAW model groter dan bij de schatting door de experts
- De schattingen voor de kans op een foute sluitingsactie zijn vrijwel gelijk bij beide methoden.

8.4.1 Toepassing TAW model Oosterschelde kering

Hoewel het TAW model niet gemaakt is voor toetsing van een kering als de Oosterschelde kering, is voor deze studie het TAW model wel toegepast op de Oosterschelde kering. Zo is er wel een vergelijking mogelijk tussen de resultaten van de methode met expert meningen en de THERP methode en de toepassing van het TAW model op de kering.

Achtereenvolgend worden de antwoorden op de vragen gegeven zoals in het TAW model gevraagd (Zie bijlage A).

Hoogwateralarmeringssysteem

- | | | |
|----|------|----------------------------------------------------------------|
| a1 | a=3 | automatische niveaumeting, met minimaal een controle per maand |
| a2 | a=4 | ja |
| a3 | a=5 | back up |
| b1 | b=5 | de waarnemer kan zelf mobiliseren |
| c | c=4 | tussenscore $c = \min(a;b) = \min(5;3) = 4$ |
| d | d=5 | tweede systeem, a1 a=3; a2 a=4; a3 a=5 |
| e | e=5 | b=5 |
| f | f=4 | $\min(d;e)-1 = \min(5;5)-1 = 5-1 = 4$ |
| g | g=0 | bevolking kan niet op tijd waarschuwen |
| h | E1=8 | $c+f+g=8$ |

Mobilisatie

- | | | |
|----|-------|-------------------------------------------|
| a1 | a=4 | Bemanning is permanent aanwezig |
| b1 | b=1 | ja |
| b2 | b=1.5 | ja, voorwaarschuwingssysteem is stand-by |
| c | c=5.5 | tussenscore $c=a+b$ |
| d1 | d=4 | volledige bemanning is permanent aanwezig |
| e | E2=4 | eindscore $E2 = \min(c;d) = \min(5.5;4)$ |

Bedieningsfout

- | | | |
|----|--------|----------------------------------------------------------------|
| a1 | a=2 | sluitingsprocedure is aanwezig |
| a2 | a=2.5 | Er is een terugmeldingsplicht |
| a3 | a=3 | Procedure is bekend bij betrokken personen |
| a4 | a=3.5 | Sluitingsprocedure wordt minstens éénmaal per jaar uitgeoefend |
| b | b=1 | ja |
| c1 | c=1 | ja, volop verlichting aanwezig |
| c2 | c=2 | ja |
| c3 | c=2.5 | communicatie-middelen aanwezig |
| d | d=1 | |
| e | E3=3.5 | $E3 = \min(a+b;c+d) = \min(4.5;3.5) = 3.5$ |

Technische storing

a1	a=2	de schuiven zijn permanent aanwezig
a2	a=3	ja
a3	a=3	geen aanvaringsrisico
b	b=4	GEB voorziening m met noodaggregaat
c	c=3	$c = \min(a;b) = \min(3;4) = 3$
d	d=1	onafhankelijk reserve aandrijvingssysteem
e	e=2	geen bijzondere belemmeringen
f	f=0.5	ingrijpen mogelijk
g	g=2.5	$g = \min(c+d;e+f) = \min(4;2.5) = 2.5$
h	h=0	geen tweede keermiddel
i	E4=2.5	$E4 = g+h = 2.5$

Faalkans per vraag

Hoogwater alarmeringssysteem	E1 = 8
Mobilisatie	E2 = 4
sluitings; bedieningsfout	E3 = 3.5
Sluiting; technisch falen	E4 = 2.5

Voor het geheel $E = \min E_i = 2.5$

Daarmee komt de kans op niet falen bij een gegeven vraag: $P_{ns} = 1E-2.5$

Verdeeld over de verschillende subgebeurtenissen wordt dit

Functionaris niet paraat	1E-08
Foute beslissing functionaris	0
Bemanning niet paraat	1E-04
Foute sluitingsactie	3.47E-03 ¹
Falen sluitingsprocedure	3.16E-03

¹ $1E-3.5 + 1E-2.5 = 3.47E-03$

8.5 Conclusies naar aanleiding van de vergelijkingen van de onderzoeken

Na vergelijking van de verschillende uitgevoerde betrouwbaarheidsanalyses voor de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden.

- De schattingsmethode met behulp van expert meningen lijkt een goede methode. In vergelijking met andere methoden wijkt deze weinig af van schattingen met een andere methode.
- De THERP methode geeft kansschattingen die een zeker factor 10 hoger zijn dan de kansschattingen voor andere methoden.
- De kans op een foute beslissing, zoals die geschat is bij de THERP methode opvallend hoog. De schatting van 1E-02 die gedaan is, is niet bepaald met de THERP methode, maar verondersteld. De THERP methode geeft schattingen voor foute beslissingen (diagnoses) maar hierbij moet een Error Factor van ± 30 worden genomen.
- De 'oude TAW' methode geeft in vergelijking met de kansschattingen uit de andere analyses goede kansschattingen.
- Het TAW model is moeilijk te vergelijken met de andere analyses. Dit komt door kansbepaling volgens het 'zwakste schakel' principe.
- Bij vergelijking van het TAW model met de schattingen door experts en de schattingen volgens de 'oude' TAW methode zijn er grote verschillen op te merken.
Vooral de kansschatting op een beslisfout, die niet wordt meegenomen, en de kans dat de bemanning niet paraat is wijkt bij het TAW model veel af van de andere twee analyses.

H9 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek besproken. De conclusies worden weergegeven en er worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek. Voor het TAW model zijn enkele aanbevelingen gedaan, deze zullen in vervolg onderzoek uitgebreid moeten worden. Voor verschillende onderwerpen worden achtereenvolgens conclusies en aanbevelingen gegeven.

METHODE MET EXPERT MENINGEN

De methode met expert meningen zoals in dit onderzoek toegepast blijkt in vergelijking met ander methoden een goede methode voor het doen van kansschattingen voor verschillende gebeurtenissen.

Conclusies

- Het voordeel van de methode met expert meningen is dat zowel voor persoonlijke als voor technische fouten voorwaardelijke kansschattingen gedaan worden. Aangenomen mag worden dat de afwijking in kansschatting voor zowel menselijke als technische fouten even groot is. Met deze methode worden ook de faalkansen voor menselijk handelen gekwantificeerd.
- De methode met experts is een flexibele manier om de kennis en ervaring van experts te benutten bij de kwantificering van faalkansen.
- Het is opvallend dat zowel in Rotterdam als voor de Oosterschelde kering de experts onafhankelijk van elkaar voor dezelfde kering exact dezelfde kansschatting doen voor de topgebeurtenis. Het is mogelijk dat deze experts op de hoogte zijn van de geschatte faalkans voor de kering, en dat ze hun eigen mening daarop hebben gebaseerd.

Aanbevelingen

- Om betere schattingen te doen voor een kering zouden minimaal vijf experts per kering ondervraagd moeten worden. Met meerdere experts wordt een betere schatting gedaan voor de topgebeurtenis en is de kans kleiner dat alle experts dezelfde kans op de topgebeurtenis schatten.
- Om een beter beeld te krijgen van de kansschattingen voor de verschillende basisgebeurtenissen zouden meerdere keringen onderzocht moeten worden.
- Het verdient aanbeveling de enquête persoonlijk af te nemen, daar er tijdens invulling door de experts veel vragen rijzen.

THERP METHODE

Conclusies

- Het toepassen van de THERP methode om kansschattingen te doen voor menselijk falen is als nuttig ervaren. Hoewel de met de THERP methode gedane schattingen veel hoger uitvallen en de THERP methode als erg subjectief ervaren is. Door toepassing van de THERP methode wordt toch een beeld verkregen waar de grootste kans op menselijk falen op kan treden.

Aanbevelingen

- De THERP methode is door mij als subjectief ervaren. Het verdient aanbeveling door meer mensen een THERP analyse te laten uitvoeren en te evalueren.

- De THERP methode is één van de weinige methoden met een groot gegevens bestand, die gebruikt kan worden om op eenvoudige wijze kansen op menselijk falen te bepalen.
- Toepassing van de THERP methode is mogelijk voor andere dan nucleaire industrieën, als vergelijking met andere betrouwbaarheidsanalyses.
In dit onderzoek zijn de kansschattingen volgens de THERP methode bij vergelijking met ander betrouwbaarheidsanalyses veel hoger dan volgens andere analyses.

FAALKANSEN VOOR VERSCHILLENDE GEBEURTENISSEN N.A.V. HET ONDERZOEK

Conclusies

- De verhouding tussen technische en persoonlijke fouten ligt over het algemeen tussen $\text{techn/pers} = 0.2$ en $\text{techn/pers} = 2$. De THERP methode geeft een verhouding technische /menselijk falen die meestal kleiner is dan 1.
- Het fout aflezen van apparatuur, en fout doorgeven van signalen wordt vaak niet meegenomen in betrouwbaarheidsanalyses. Uit de THERP methode en uit de methode met expert meningen blijkt dat kansen voor fout aflezen en fout doorgeven van signalen (waterstanden) niet verwaarloosbaar zijn.
- Het 'niet bereikbaar zijn voor telefoon' is orde grootte $1E-03$. Ook hier moet in betrouwbaarheidsanalyses meer rekening mee worden gehouden.
- De kans op een foute beslissing die in veel analyses verwaarloosd wordt, is volgens de THERP methode zeker niet verwaarloosbaar. Bij de THERP methode is de schatting volgens Van Otterloo maximaal $4E-03$, volgens mijn onderzoek is de kans op een foute beslissing $1E-02$.

Aanbeveling

- Volgens de kansschattingen door experts ligt kans op foute beslissingen tussen $5E-3$ en $5E-4$. Het verdient zeker aanbeveling, niet alleen voor het onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces, om meer onderzoek te doen naar faalkansen voor beslissingen.

TAW MODEL

Conclusies

Het TAW model is subjectief, en geeft een grove schatting van de betrouwbaarheid van het sluitingsproces. Het kan goed gebruikt worden om een indicatie te verkrijgen van de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van een kering.

- Uit een gevoeligheidsanalyse van het TAW model [Klaassen, 1995] blijkt dat een heleboel factoren in het sluitingsproces niet (of nooit) meetellen in de uiteindelijke betrouwbaarheidsbepaling van het sluitingsproces omdat het TAW model uitgaat van een 'worst case' benadering.
- Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt tevens dat de beantwoording van de vragen vaak subjectief is. Op enkele vragen is het moeilijk eenduidig antwoord te geven (bijv MOB vraag d2, BED vragen b en d).
- Bij vergelijking van de kansschattingen voor de subgebeurtenissen blijkt dat foute beslissingen niet voorkomen in het TAW model en dat de kansschatting voor het niet paraat zijn van de bemanning te hoog is.
- De kansschattingen voor 'functionaris paraat' en 'sluitingsactie' komen goed overeen met de bepaling van de kansschattingen voor deze subgebeurtenissen door experts en uit de oude TAW methode.

- Het TAW model wordt gebruikt om een eerste indicatie weer te geven van de betrouwbaarheid van een kering. Indien de kering, volgens de betrouwbaarheidsbepaling van het TAW model, niet aan de gestelde eisen van veiligheid voldoet wordt een nadere betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd. De faalkans van het sluitingsproces volgens het TAW model is echter, voor de kering in Den Oever en de Oosterschelde kering, kleiner dan volgens de andere analyses (zie §8.3 en §8.4). Indien het TAW model wordt gebruikt als eerste grove benadering moet de bepaalde faalkans juist groter zijn dan voor andere analyses.

Aanbevelingen

- Het verdient aanbeveling, om een betere vergelijking met andere analyses mogelijk te maken, de kansschattingen voor de topgebeurtenis te doen door sommatie van de kansschattingen voor de subgebeurtenissen.
- In het TAW model wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheid van waarschuwing/sluiting door de bevolking. Voor bijvoorbeeld de kering in Den Oever is er invloed van de bevolking op de betrouwbaarheid van het sluitingsproces.
- Om het TAW model te verbeteren zal meer onderzoek gedaan moeten worden. De opmerkingen die in deze conclusies gemaakt zijn over het model moeten nader onderzocht worden. Het TAW model zal voor verschillende keringen toegepast moeten worden en de resultaten moeten vergeleken worden met andere betrouwbaarheidsanalyses van de keringen.

TENSLOTTE...

- Het kwantificeren van de kansen op menselijk falen blijft een hiaat. Uit de kansschattingen door experts blijkt wel dat menselijk falen zeker niet verwaarloosd mag worden.
- Het onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces is zeker niet af. Ik heb twee methoden gebruikt waarmee kansschattingen voor basisgebeurtenissen gedaan zijn. Vooral de methode met experts levert goede resultaten.
In het rapport zijn verschillende hiaten aangegeven.
Voor de methode met experts kan nog verder gekeken worden naar bijvoorbeeld:
 - een Monte Carlo analyse om de onzekerheidsverdeling voor de kans op de topgebeurtenis te bepalen.
 - meerdere soorten keringen.
 - de invloed van back-ups. In dit onderzoek is hier geen rekening mee gehouden. Back-ups, die bij veel keringen wel aanwezig zijn, zijn van veel invloed op de betrouwbaarheid van het sluitingsproces.
- De resultaten van verder onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces kunnen gebruikt worden voor verbetering van het TAW model.
- Persoonlijk ben ik van mening, na gesprekken met verschillende sluiswachters, dat de betrouwbaarheid van het sluitingsproces al aanzienlijk verbeterd zou worden indien sluiswachters zich meer bewust waren van de verschillende mogelijkheden van falen van het sluitingsproces.
Misschien is het mogelijk het boek van Kees Slager [Slager, 1992] op een verplichte leeslijst voor sluiswachters te zetten?

Literatuur

Cooke, R.M. Experts in uncertainty. Opinion and Subjective probability in science.
Oxford University press, 1991

Elling, M.G.M. Veiligheids voorschriften in de industrie.
Proefschrift, Universiteit Twente
ISBN 90-365-0450-3
FEBO-druk, Enschede, 1991

Geense C.W.A. Organisatie van de dijkbewaking van de dienst van gemeentewerken en het gemeentelijk havenbedrijf Rotterdam.
Afd. Waterhuishouding.
Oktober 1994

Groen, F.J. An introduction for Human Reliability Analysis for Nucleair power plant
T.U. Delft, 1994

Heins, W. en Baaijens, R.C.M.S. i.s.m. Goossens, L.H.J., Menselijke en organisatorische factoren bij het beheer van beweegbare keringen.
T.U.Delft, sept, 1992

Henley, J.E., Kumamoto, H., Reliability Engineering and Risk assessment
New jersey, 1981

Horst, J. van der. Faalkansanalyse van het bewegingsstelsel voor de schuiven van de stormvloedkering in de Oosterschelde.
TNO Ref nr 78-04891, Dossier 8713-7118, maart 1979

Humphreys, P., Human Reliability assessors guide
U.K. Atomic Energy Authority, 1988

KEMA rapport. Een betrouwbaarheidsanalyse van het noodsluit systeem van de Stormvloedkering Oosterschelde.
WSK/60585-1, 1986

Kern, R.P. Modeling users and their use of technical manuals'
In: T.M. Duffy and R.H.Waller (eds): Designing usable texts.
New York, 1985
Kirwan, B. A guide to practical human reliability assessment
Taylor & Francis, 1994

Klaassen, D.C.M. Tussen rapportage afstudeerrapport.
April 1995.

Macwan. A. and Molesh A. Methodoligy for analysis of operator errors of commission during nuclear power plant accidents with application to probabilistic risk assessment.
University of Maryland, 1993

- Malone, T.B. Kirkpatrick, M. Mallory, K. Eike, D. Johnson, J.H. Walker, R. W.
Human factors evaluation of control room design and operator performance at Three Mile Island-2,
Vols, 1, 2, 3 Essex Corp,
NUREG/CR-1270, Washington DC, january 1980
- Otterloo, R.W. van. De toetsing van BOS aan een faalcriterium m.b.t menselijk falen.
40106-NUC 93-4175
KEMA Technologie & services, apr. 1993
- Peek, F.M. Human reliability analysis in civil aviation. A literature review
T.U. Delft, 1994
- Rasmussen ,J. and Jensen, A. Mental procedures in real-life tasks; A case study of electronic troubleshooting.
Ergonomics, 1974, 17, 293-307
- Reason,J. Human Error
Cambridge University press 1990
- Ris, A.H. Faalkansanalyse Hartelkering, kering sluit niet.
Projectbureau Europoortkering met open Beerdam
Rotterdam, oktober 1992
- Salvendy, G. Handbook of human factors
Purdue University, John Wiley & sons, 1987
- Schaaf, T.W., Near miss reporting in the chemical process industry
ISBN 90-386-0181-6, 1992
- Slager, K. De ramp, een reconstructie. 200 ooggetuigen over de watersnood van 1953.
De koperen tuin, 1992
- Stassen, H.G. Mondelinge informatie.
1995
- Steen, J.F.J. en Oortman Gerlings P.D Het gebruik van expertmeningen in veiligheidsstudies.
Deelrapport 1: literatuuronderzoek.
TU Delft, 1988.
- Swain, A.D. and Guttmann H.E. Handbook of Human Reliability Analysis With Emphasis on Nuclear Power Plant Applications.
NUREG/ CR-1278, SAND 80-0200, 1983 *THERP Handbook*
- TAW, Leidraad kunstwerken en objecten, in op en nabij waterkeringen.
2e volledige conceptversie. P. van Gestel, H.E. Nieboer, A. Vrouwenfelder en A. Wubs.
B-92-1047 December 1992.

TAW, Concept toelichtende bijlage 3 bij de TAW leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies. Standaard beoordelingsmethode betrouwbaarheid sluitingsoperatie, 1995

TAW, Betrouwbaarheids beoordeling van de sluiting van beweegbare keringen.
Van der Meer, Gruyters, Vrouwenvelder en Schelfhout. Opdrachtnummer M-0185,
RWS-DWW, aug 1994

TAW, Basisrapport bij de leidraad waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies,
Redacteur, van der Meer, M.T. Opdrachtnr. M-0109, juni 1994

Tonneijck, M.R. Koster, M.J. Veiligheidsbeoordeling coupure den Oever.
Rapportnr. W-DWW-93270 november 1993

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en Vrijling, J.K. Probabilistisch ontwerpen (dictaat B3)
TU Delft, 1984

Vrijling, J.K. Probabilistisch ontwerpen in de waterbouwkunde (dictaat f30)
TU Delft, 1994

Wagenaar, W.A. Helaas controleert de mens de machine.
Techniek moet rekening houden met menselijke feilbaarheid.
De ingenieur, nr 13, 23 aug 1994

Wickens, C. Engineering psychology and human performance.
New York: Harper Collins, 1992.

Westrenen F. Mondelinge informatie.
1995

