

Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
van der Burghweg 1
2628 CS Delft



februari 1996

***Onzekerheidsanalyse
van
Beweegbare Waterkeringen***

Peter Blanker
Vlinderveen 530
3205 EN Spijkenisse
0181 - 635035

Inhoudsopgave

Korte samenvatting	3
Inleiding	4
1. Veiligheid tegen overstromen	6
2. Bestuurlijke organisatie	8
Gescheiden verantwoordelijkheden	9
Veiligheid van waterkeringen	9
3. Sluitprocedure beweegbare waterkeringen	11
Het rapport ' <i>Menselijke en organisatorische factoren</i> '	11
Algemene sluitprocedure van de TAW	12
Vereenvoudigingen in het procedureschema	13
De standaard beoordelingsmethode	14
Aanmerkingen bij de standaard beoordelingsmethode	15
4. Het model	16
Definities	16
Alternatieve paden	16
Algemeen diagram	17
Toestandsdiagram voor het sluitproces	18
Het diagram tot aan het sluiten	18
De sluitfase	19
5. De herkomst van de data	22
Onzekerheidsverdelingen	24
De SVSD	25
Stormtypen	25
De maximale beschikbare tijd	28
De tijd tussen de SVSD en de ontvanger	28
Elicitatie	28
Seed-variabelen	29
6. Implementatie in Unicorn	30
Het algemene script voor een onbemande waterkering	32
Het algemene model voor een bemande waterkering	33
Bepaling van de faalkans voor de waterkering	33
De gebruikte variabelen	34
De invoerparameters	36
Interpretatie van de uitkomsten	36
7. Case study 1: De Coupure in Den Oever	40
Sluitprocedure	40
De simulatie in Unicorn	40
Conclusies	41

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

8. Case study 2: De Buitensluis in Schiedam	42
De simulatie in Unicorn	43
Resultaten onbemande sluis	43
Resultaten bemande sluis	45
Conclusies	45
9. Case study 3: De Parksluizen in Rotterdam	46
De simulatie in Unicorn	47
Resultaten	48
Conclusies	48
10. Vergelijking van de faalkansen	49
11. Conclusies & Aanbevelingen	51
Literatuurlijst	53
Bijlage A: Unicorn	
Bijlage B: Onzekerheidsanalyse Coupure Den Oever	
Bijlage C: De Modellen en de Elicitatie	
Bijlage D: De Organisaties betrokken bij het waterkeren	

Lijst van afbeeldingen

Afbeelding 1: SVK Oosterschelde	10
Afbeelding 2: sluitprocedure beweegbare waterkeringen	12
Afbeelding 3: foutenboom 'sluiting faalt'	14
Afbeelding 4: voorbeeld toestandsdiagram	18
Afbeelding 5: het toestandsdiagram -1	20
Afbeelding 6: het toestandsdiagram -2	21
Afbeelding 7: grafische weergave van het onderzoek	23
Afbeelding 8: de aannames en de hoogwateroverschrijdingslijn (Hoek van Holland)	27
Afbeelding 9: de Parksluizen in Rotterdam	46

Lijst van formules

formule (1): faalkans standaard beoordelingsmethode	15
formule (2): definitie faalkans	34
formule (3): beslisfout	38
formule (4): vragen per jaar	49

Korte samenvatting

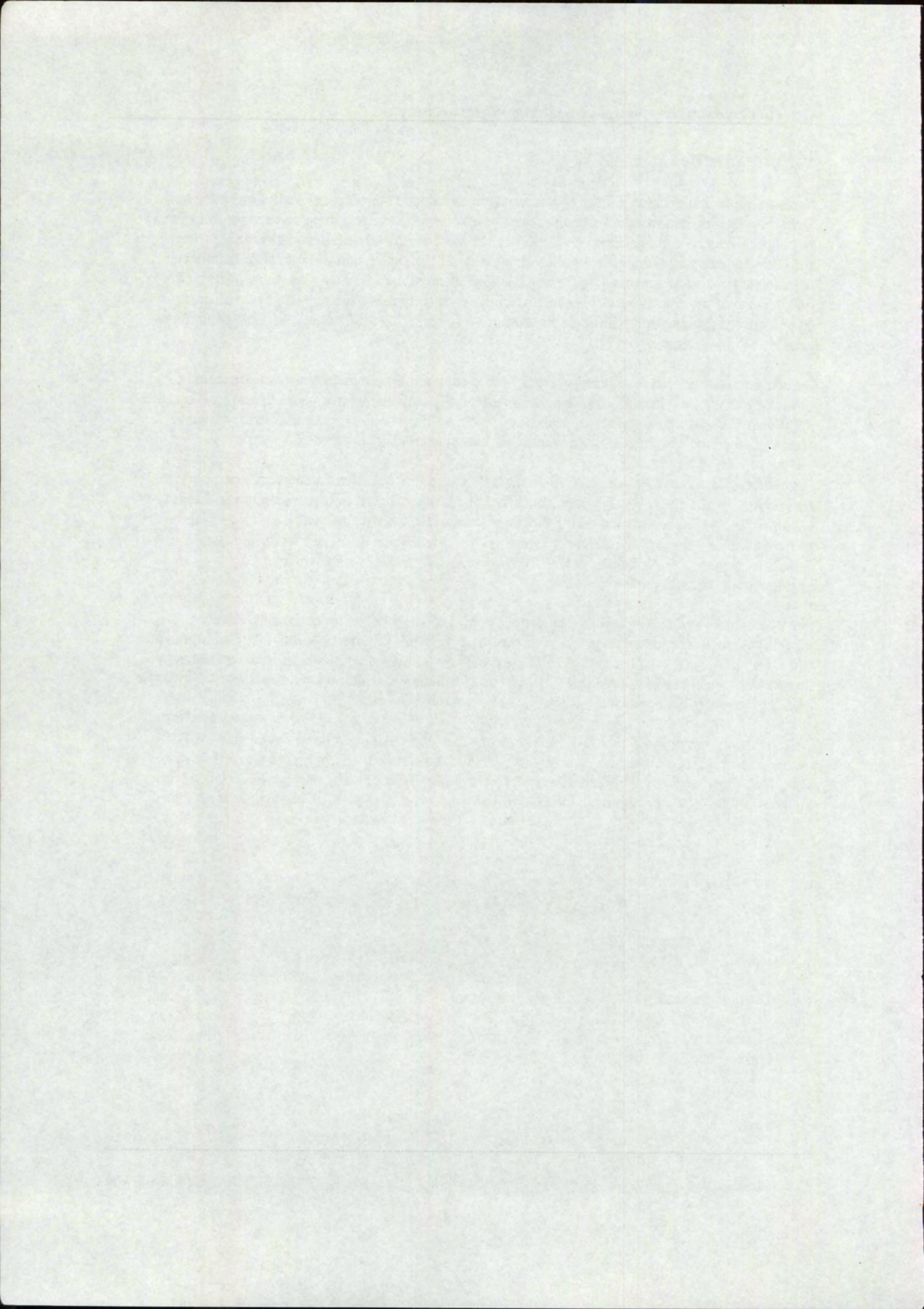
Om Nederland te beschermen tegen overstromingen, is het land opgedeeld in 53 dijkkringgebieden. Deze dijkkringgebieden worden beschermd door primaire waterkeringen, die moeten voldoen aan een wettelijk opgelegde veiligheidseis. Onderdeel van de waterkering kunnen **beweegbare waterkeringen** zijn. Beweegbare waterkeringen vervullen in tegenstelling tot dijken hun waterkerende functie niet permanent. Bij hoogwater worden schuiven, kleppen, deuren of andere waterkerende afsluitmiddelen gesloten, zodat het dijkkringgebied beschermd blijft. Voor de toetsing van de veiligheid van deze bijzondere constructies zijn richtlijnen en leidraden opgesteld door de **Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW)**.

De betrouwbaarheid van de sluitingsoperatie is cruciaal voor de veiligheid. Falen van de sluiting kan vrijwel direct tot overstromingen leiden. In de **leidraad voor beweegbare waterkeringen** zijn richtlijnen voor sluitingsoperaties opgenomen. Deze richtlijnen hebben betrekking op het falen van (deel)systemen; voorbeelden zijn weigerende afsluitmiddelen en foutieve beslissingen.

Dit onderzoek richt zich vooral op de rol van het tijdsaspect bij het falen van beweegbare waterkeringen. Hiertoe is de **algemene sluitprocedure** gemodelleerd en is met behulp van **Monte Carlo simulatie** een benadering voor de faalkans gemaakt. De benodigde data is gevonden bij de **Stormvloed Seindienst (SVSD)** en door interviews te houden met de bij de sluitingsprocedure betrokken personen, zoals havenmeesters en sluiswachters. De data voeren we in als **onzekerheidsverdelingen**.

Een uitspraak over de veiligheid van het proces wordt gedaan door een groot aantal keer een vergelijking te maken tussen twee tijden: de **totale procestijd (TPT)** en de **maximale beschikbare tijd (MBT)**. De TPT is de tijd die het hele sluitproces duurt, dus vanaf de waarschuwing van de SVSD tot aan het sluiten van de waterkering. De MBT is de tijd die verstrijkt tussen de waarschuwing van de SVSD en wanneer het hoogwater de beweegbare waterkering bereikt.

De conclusie is onder meer dat het tijdsaspect toch zeker een nadere beschouwing waard is. Bij de meeste analyses en ook in de leidraad van de TAW wordt het accent vooral gelegd op het falen van systemen. Uit dit onderzoek blijkt dat, wanneer we te maken hebben met menselijk handelen, de faalkans als gevolg van **tijdgebrek** tot 25% van de totale faalkans kan bedragen.



Inleiding

Nederland kan men opdelen in de zogenaamde hoge gronden en de gebieden die bij hoogwater bedreigd worden door **overstroming**. Deze dreiging komt zowel van stormen op de Noordzee als van hoogwater op de rivieren. Om te voorkomen dat een groot deel van Nederland onderloopt, is het laaggelegen land opgedeeld in 53 **dijkringgebieden**. Een dijkkringgebied is een gebied dat, door een stelsel van waterkeringen en/of hoge gronden, beveiligd moet zijn tegen overstroming. Bij waterkeringen maken we nog een onderscheid in duinen, dijken en **beweegbare waterkeringen**, zoals sluizen, coupures en stormvloedkeringen.

Bij hoog water zal de waterkerende functie van de waterkeringen gewaarborgd moeten worden. Hiervoor zijn voor ontwerp, aanleg en beheer van waterkeringen richtlijnen opgesteld. Deze richtlijnen worden opgesteld door de **Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW)**. Het werkorgaan van de TAW is ondergebracht bij de **Dienst Weg- en Waterbouwkunde** van de Rijkswaterstaat. Er zijn richtlijnen voor rivierdijken, duinen, zee- en meerdijken en bijzondere waterkerende constructies. Indien er zich in het dijkkringgebied beweegbare waterkeringen bevinden, is niet alleen het risico van het falen of bezwijken van de constructie van belang, ook het niet tijdig kunnen sluiten van de waterkering kan leiden tot wateroverlast in het achterland.

Dit onderzoek richt zich vooral op de vraag in hoeverre het tijdsaspect relevant is bij de sluitingsoperatie van beweegbare waterkeringen in vergelijking met andere faalmogelijkheden, zoals bijvoorbeeld het weigeren van het bewegingswerk van de waterkering. De algemene sluitprocedure van TAW is gemodelleerd in het computerprogramma Unicorn. De benodigde data is enerzijds gevonden in verslagen van de Stormvloed Waarschuwingsdienst (SVSD) en anderzijds verkregen door interviews met de bij de sluitprocedure betrokken personen, zoals sluiswachters en havenmeesters. In vergelijking met andere analyses geeft dit onderzoek vooral inzicht in het totaalbeeld van de procedure. Ook het tijdsaspect wordt in andere studies vaak niet meegenomen.

Met behulp van **Monte Carlo-simulatie** en **onzekerheidsverdelingen** is het mogelijk om een groot aantal keer de hele sluitprocedure 'na te spelen'. Vervolgens kunnen we een uitspraak doen over de betrouwbaarheid van de sluitprocedure. De simulatie begint met een voorspelling dat een bepaalde maximale hoogwaterstand (MHW) bereikt zal worden. Tussen de voorspelling en het optreden van de MHW bij de waterkering zit een bepaalde tijd, de maximaal beschikbare tijd (MBT). Omdat de weersgesteldheid niet deterministisch te bepalen is, zal er een bepaalde mate van onzekerheid in de MBT zitten.

Wanneer de SVSD een voorspelling laat uitgaan, dat het sluitpeil van de beweegbare waterkering overschreden zal worden, treedt de sluitprocedure in werking. Dit houdt onder andere in dat de voorspelling doorgegeven moet worden, de waterkering eventueel bemand moet worden en de kering uiteindelijk gesloten moet worden. Al deze handelingen kosten een bepaalde tijd, waar ook weer een onzekerheid in zit, aangezien deze tijden afhankelijk zijn van bijvoorbeeld de handelende persoon, het weerbeeld en het tijdstip.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Uiteindelijk worden al deze tijden bij elkaar opgeteld, rekening houdend met dingen als **redundante systemen en onjuiste beslissingen**. Deze totale procestijd (TPT) wordt vervolgens vergeleken met de MBT. Het model benadert het sluitproces, de simulatie is een middel om uitspraken te kunnen doen over de procedure.

1. Veiligheid tegen overstromen

Veiligheid kan vanuit verschillende oogpunten bekeken worden. Veiligheid is enerzijds een beleving, een gevoel. Wanneer zware stormen of hoge rivierafvoeren jaren achtereen moeiteloos opgevangen worden door dijken, leidt dat tot een geruststellend gevoel van bijna absolute veiligheid. Vanuit dat gevoel van veiligheid is er soms de bereidheid om ten aanzien van de veiligheid concessies te doen, wanneer andere belangen, zoals de bescherming van landschaps- en natuurwaarden, daar om vragen. Veiligheid lijkt dan te kunnen worden afgewogen tegen de landschaps-, natuur- en cultuurhistorische waarden.

Wanneer het water de huizen binnendringt of wanneer een dijkvak zwaar op de proef wordt gesteld, verandert het gevoel van veiligheid in een gevoel van onveiligheid. De maatschappelijke reactie op de gebeurtenissen rondom de hoogwater-periode van 1995 vereiste dat de gewenste veiligheid op bijzonder korte termijn werd gerealiseerd. Hierbij was het zaak te voorkomen dat andere belangen in de knel kwamen.

Anderzijds is veiligheid uit te drukken in getallen: de kans op een hoogwater, de kans op een overstroming. Deze kansen zijn met een beperkte nauwkeurigheid te berekenen. Technische inzichten wijzigen en door het optreden van meerdere hoogwaterperiodes in korte tijd verandert ook de verwachting voor de toekomst. Mogelijke effecten van klimaatsverandering dragen aan deze onzekerheid bij.

In deze omgeving wil Rijkswaterstaat *op rationele wijze vorm geven aan het waterkeringbeleid*. Dat beleid is bepalend voor de manier waarop de waterkeringbeheerders - meestal de waterschappen - de dijken en duinen beheren en aanpassen aan nieuwe inzichten. Hoe veilig een gebied moet zijn is een kwestie van afweging. Grote risico's in termen van schade en slachtoffers leiden in principe tot strengere veiligheidseisen.

De grootste overstromingsdreiging komt vanuit zee. Een storm heeft een korte waarschuwingstijd. Wanneer een zeedijk breekt of een duin wordt overspoeld, stroomt tweemaal per dag zout water in vernietigende hoeveelheden het achterland in en uit. Stroomgeulen worden daarbij diep uitgeschuurd en zijn moeilijk te dichten.

De **kustgebieden** kennen dan ook de hoogste veiligheidseisen. Na de ramp van 1953 is de waterkering op veel plaatsen op deltaveiligheid gebracht. Op dit ogenblik zijn de laatste werken in uitvoering. De stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg zal in 1997 in gebruik worden genomen.

Vergeleken met het kustgebied wordt in het **rivierengebied** van een minder hoog veiligheidsniveau uitgegaan. De gevolgen van een dijkdoorbraak zijn - hoewel nog steeds enorm - toch minder groot. Hoge rivierafvoeren melden zich tijdig, zodat preventieve maatregelen kunnen worden genomen, zoals ook de situatie in 1995 heeft aangetoond. Een overstroming met zoet water leidt tot minder schade dan een overstroming met zout water. Om Nederland zo goed mogelijk tegen wateroverlast te beschermen, zijn er een aantal instanties die betrokken zijn bij deze taak. Dit kan een adviserende, een construerende of een toetsende rol zijn. In Bijlage D staat een uitgebreid overzicht van de betrokken instanties.

Hier vermelden we slechts dat de **waterschappen** de zorg hebben voor een goede waterkering. Zij dienen dan ook de noodzakelijke stappen te ondernemen wanneer de veiligheid in het geding komt. De diverse adviesdiensten van de **Rijkswaterstaat** helpen de waterschappen in de vorm van advisering en toetsing.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) is primair een adviesorgaan. Zij stelt Leidraden op voor het beheer, onderhoud en toetsing van de waterkeringen. Daarnaast zorgt zij voor voldoende kennis en ervaring op het gebied van water keren. De **Dienst Weg- en Waterbouwkunde** van de Rijkswaterstaat fungeert (onder andere) als het werkorgaan van de TAW.

2. Bestuurlijke organisatie

De geschiedenis van Nederland is nauw verweven met de voortdurende strijd tegen het water. Dit komt ook in de bestuurlijke organisatie tot uiting. Al meer dan 1000 jaar vormen principes als "wie het water deert, die het water keert" en "wie niet wil dijken, moet wijken" het uitgangspunt voor de bescherming tegen overstromingen. De zorg voor de dijken en de controle op de waterstanden werden eerst vooral lokaal geregeld, later regionaal. Vanaf de 13e eeuw zijn de waterschappen belast met de zorg voor de dijken en de waterstanden. Deze waterschappen zijn feitelijk de oudste democratische instellingen in Nederland. De bijdrage die ieder aan de waterschappen moest betalen was -en is- afhankelijk van de grootte van zijn bezittingen. De waterschappen zorgen ook voor de regulatie van de waterstanden in de polders. Het aantal polders in Nederland nam in de loop van de tijd drastisch toe en het aantal waterschappen eveneens. In de eerste helft van de 20e eeuw waren er meer dan 2500 waterschappen.

Ook nu nog vormen de waterschappen de basis van het Nederlandse bestuurlijk bestel voor wat betreft water keren en water beheren. Ze zijn belast met verschillende taken met betrekking tot het waterbeheer: waterkwaliteit, waterkwantiteit en de waterkeringen. Iedere Nederlander betaalt belasting aan zijn waterschap en kan deelnemen in de verkiezingen van het bestuur van zijn waterschap. De voorzitter van het waterschap wordt benoemd door de Kroon.

Een kleine 200 jaar geleden, in 1798, werd de Rijkswaterstaat opgericht om op landelijke schaal invulling te geven aan het waterbeheer. Sommige aspecten van het waterbeheer, zoals bijvoorbeeld het rivierbeheer, konden beter op nationale schaal worden aangepakt. Rijkswaterstaat (tegenwoordig met circa 9.500 werknemers) vormt nu de uitvoeringsorganisatie van het ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Ondanks de 'machtige' Rijkswaterstaat hebben de waterschappen altijd hun belangrijke rol in de bestuurlijke organisatie behouden. Het waterbeheer en het beheer van de waterkeringen zijn in Nederland verregaand gedecentraliseerd. Waterschappen zijn verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van de keringen en de kwaliteit en kwantiteit van de lokale en regionale wateren. De provincies zijn toezichthouders en het rijk (middels Rijkswaterstaat) heeft de supervisie. De minister van Verkeer en Waterstaat is verantwoording verschuldigd aan het parlement over alle aspecten van water keren en water beheren.

De twaalf provincies vormen de bestuurlijke middenlaag in Nederland. Zij vormen de link tussen de rijksoverheid en de lokale overheden (waterschappen en gemeenten), met onder meer een belangrijke taak op het gebied van de ruimtelijke ordening en de regionale invulling van nationale plannen op het gebied van milieu, verkeer en vervoer en integraal waterbeheer. In de loop van de laatste decennia is het aantal waterschappen en gemeenten sterk afgenomen. Momenteel telt Nederland zo'n 120 waterschappen en ongeveer 600 gemeenten. Een verdere afname ligt in de rede omdat gestreefd wordt naar krachtige, "all-in" besturen op lokale schaal.

Gescheiden verantwoordelijkheden

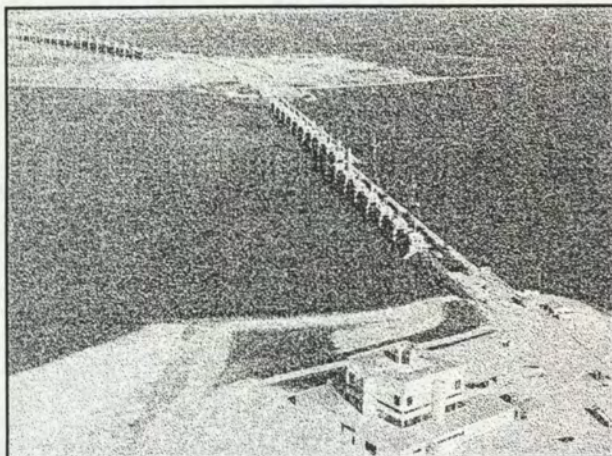
De verschillende rollen en verantwoordelijkheden van rijk, provincies en waterschappen komen duidelijk tot uiting bij de rivierdijkversterkingen. De norm voor de bescherming tegen overstroming die de keringen moeten bieden wordt door het parlement vastgesteld. De plannen voor de versterkingen worden door de waterschappen opgesteld. De provincies moeten de plannen goedkeuren, rekening houdend met andere belangen waaronder ruimtelijke ordening, natuur, landschap en cultuurhistorie. Vervolgens voeren de waterschappen de directie over de uitvoering van de versterkingswerken. De rol van het rijk is beperkt tot de supervisie en de specialistische ondersteuning, indien gewenst. Daarnaast beheert het rijk nog enkele waterkeringen, met name keringen met relatief hoge onderhoudslasten.

Ook bij hoge waterstanden blijken de bestuurlijke verhoudingen: waar mogelijk wordt de verantwoording bij de lokale overheden gelegd: waterschappen beoordelen de sterkte van de keringen, gemeenten dragen zorg voor de veiligheid van de burgers en verschaffen informatie. Indien noodzakelijk wordt de regionale coördinatie door de provincie verzorgd. Slechts in zeer bijzondere situaties wordt overgegaan op coördinatie op nationale schaal.

Tijdens het hoogwater van 1995 zijn de besluiten tot preventieve evacuatie van enkele polders door de regionale crisisteamen (waarin de betrokken gemeenten en waterschappen participeerden) genomen. Later heeft het ministerie van Binnenlandse Zaken een landelijk crisisteam ingesteld dat onder meer de coördinatie van de terugkeer van de evacués heeft verzorgd.

Veiligheid van waterkeringen

Het is belangrijk te constateren dat de beleidsterreinen water beheren en water keren in Nederland lange tijd sterk sectoraal zijn benaderd. In een land als Nederland, waar bescherming tegen overstroming een bestaansvoorwaarde is, is dat ook niet verwonderlijk. Keerpunt vormde de afsluiting van de Oosterschelde, als laatste onderdeel van de Deltawerken in zuidwest Nederland. Waar eerst was besloten voor een afsluitdam, koos het parlement in de zeventiger jaren uiteindelijk voor een stormvloedkering. Met deze keuze werd rekening gehouden met de ecologische waarden van het Oosterschelde estuarium en de belangen van de visserij-sector. De stormvloedkering is in 1986 voltooid.



Afbeelding 1: SVK Oosterschelde

Onder andere de toegenomen waardering voor het unieke milieu in de Oosterschelde heeft geleid tot een heroverweging van de geplande afsluiting van dit estuarium.

De afsluitbare stormvloedkering biedt de vereiste bescherming tegen overstroming en laat tegelijkertijd het zoutwater-milieu vrijwel ongemoeid.

Medio tachtiger jaren heeft het concept Integraal Waterbeheer zijn intree gedaan. In de Derde Nota Waterhuishouding [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1989] zijn waterkwaliteit en waterkwantiteit geïntegreerd en worden streefbeelden geschetst voor het watermilieu. Water keren vormt nog geen uitgewerkt onderdeel van deze rijksnota. Feitelijk is water keren zeer lang vereenzelvigd geweest met het bouwen en onderhouden van dijken en dammen. In de vierde nota waterhuishouding, die voor 1997 is voorzien, zal bescherming tegen water als integraal onderdeel van het waterbeheer worden ingebracht.

3. Sluitprocedure beweegbare waterkeringen

Dit onderzoek richt zich op de sluitprocedure van beweegbare waterkeringen. De algemene begrippen met betrekking tot waterkeringen zijn in bijlage D te vinden. We zullen nu eerst kijken hoe de sluitprocedure eruit ziet en hoe deze tot op heden gebruikt is voor de toetsing. De algemene sluitprocedure is tot stand gekomen op basis van het rapport **Menselijke en organisatorische factoren bij het beheer van beweegbare waterkeringen** [Hei & Baa 92]. Hieronder volgt eerst een korte beschrijving van dit rapport.

Het rapport '*Menselijke en organisatorische factoren*'

In dit rapport staan beschrijvingen van negen waterkerende kunstwerken in de regio Rotterdam-Gouda en één in Den Oever. Een kunstwerk is een constructie, gemaakt van hoofdzakelijk andere materialen dan grond, zoals stuwen, sluizen, kademuren en tunnels. Per kunstwerk is een overzicht gegeven van hoe de sluitprocedure luidt en worden er aanbevelingen gedaan hoe deze procedure te verbeteren valt. Tot slot wordt er een algemene procedure voorgesteld om de kunstwerken veilig waterkerend te maken. Met veilig waterkerend wordt hier bedoeld dat het kunstwerk in staat is het maximale hoog waterpeil te keren.

Binnen het kader van dit onderzoek zijn vooral de beschrijvingen van de Buitensluis in Schiedam en de Parksluizen in Rotterdam van belang.

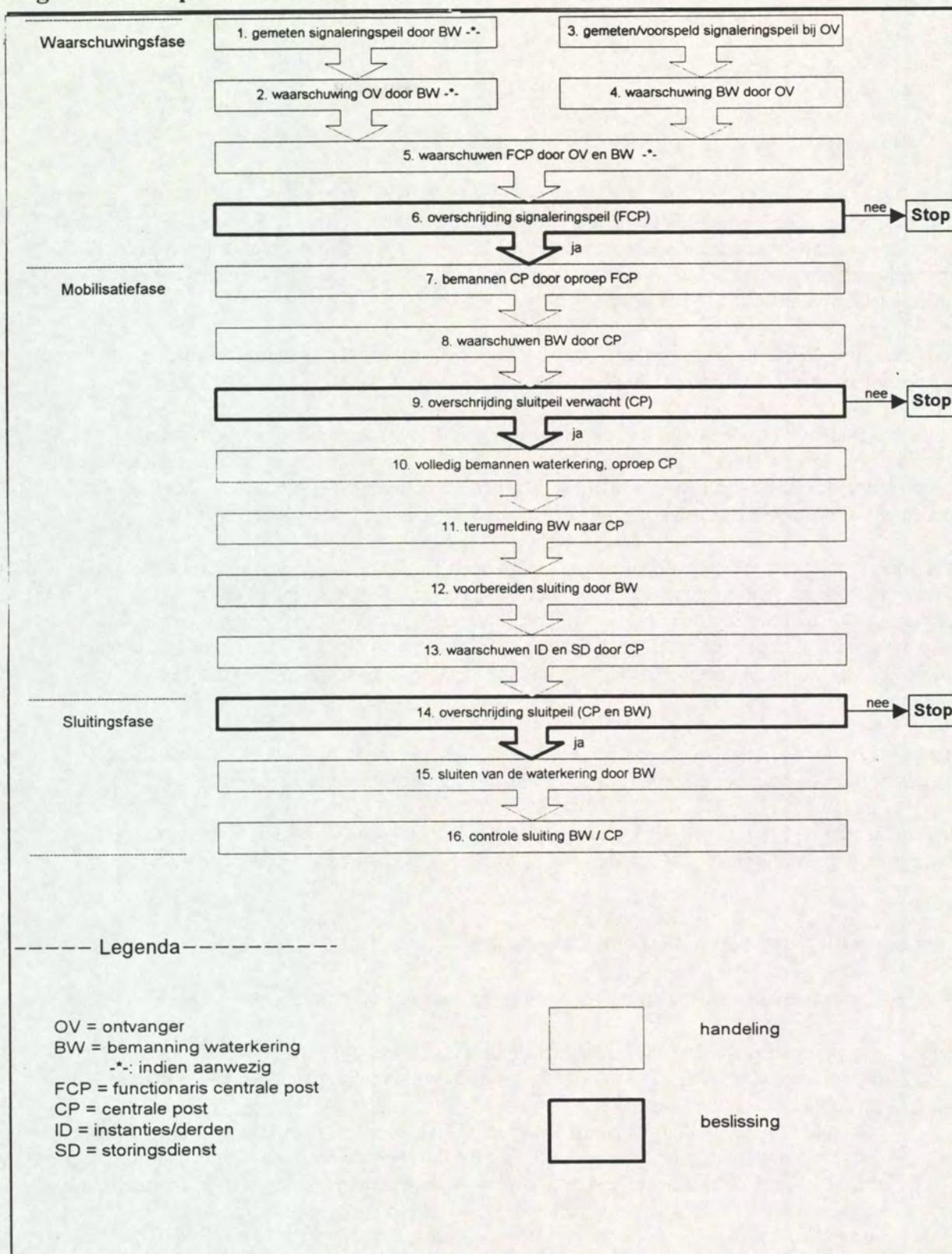
In het rapport [Hei & Baa 92] heeft men de waterkeringen in een aantal klassen opgedeeld:

<i>Klasse A:</i>	De beweegbare waterkering is permanent bemand en in gesloten toestand altijd veilig waterkerend.
<i>Klasse B:</i>	De beweegbare waterkering is niet permanent bemand en in gesloten toestand altijd veilig waterkerend, ook wanneer de bemanning afwezig is.
<i>Klasse C:</i>	De beweegbare waterkering is niet permanent bemand en in gesloten toestand niet veilig waterkerend wanneer de bemanning afwezig is.
<i>Klasse D:</i>	De beweegbare waterkering is onbemand en moet bij hoogwater door bedieners worden gesloten.
<i>Klasse E:</i>	De beweegbare waterkering is onbemand en wordt bij hoogwater automatisch gesloten.

Klasse E wordt verder niet beschouwd, aangezien daar voor het sluiten geen menselijk handelen benodigd is. De nu in aanbouw zijnde stormvloedkering in de Nieuwe Waterkering kunnen we ook in klasse E plaatsen.

Het blijkt dat het enige verschil in de sluitprocedure van de verschillende waterkeringen in de waarschuwingsfase zit. Men kan namelijk gewaarschuwd worden door een voorspelling van de maximale hoogwaterstand, een gemeten peil, of door beide. De TAW heeft op basis hiervan een algemene sluitprocedure opgesteld voor beweegbare waterkeringen.

Algemene sluitprocedure van de TAW



Afbeelding 2: sluitprocedure beweegbare waterkeringen

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

De volgende betrokken partijen worden onderscheiden:

- Ontvanger;
- Bemanning Waterkering;
- Functionaris Centrale Post;
- Centrale Post;
- Instanties en derden;
- Storingsdienst.

Ontvanger is een instantie die 24 uur per dag, elke dag in de week, operationeel is. Hier ontvangt men de actuele of verwachte waterstand en wordt de fase van paraatheid gestart, indien het signaleringspeil bij een beweegbare waterkering wordt overschreden. De Ontvanger is altijd bereikbaar, denk bij voorbeeld aan een continu bezette meld/regelkamer van een waterschap of gemeente, of een alarmcentrale van de politie of brandweer.

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

De **Functionaris Centrale Post** is iemand die bevoegd is de waterkering door de Bemanning Waterkering te laten sluiten. Hij is eveneens bevoegd de waarschuwingsfase in het organisatieschema sluitprocedure te beëindigen zonder verdere actie te hebben ondernomen. Functionaris is bij voorbeeld hoofd van een waterschapsdistrict of chef van een technische dienst bij een waterschap of gemeente.

De **Centrale Post** is verantwoordelijk voor en coördineert de sluitprocedure vanaf het ingaan van de fase van paraatheid. Alleen de Centrale Post heeft de bevoegdheid de fase van mobilisering te beëindigen. De Centrale Post wordt bezet door personen die functies hebben vergelijkbaar met die van dijkgraven, havenmeesters en chefs 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 gemeente.

Instanties en derden kunnen zijn een burgemeester, de politie, een hulpdienst of een particulier aannemingsbedrijf waarmee een contract is afgesloten voor de situatie van mobilisatie.

De **Storingsdienst** kan maatregelen treffen om eventuele storingen te verhelpen. Behalve vanuit de Centrale Post is de Storingsdienst ook direct bereikbaar voor de Bemanning Waterkering.

Vereenvoudigingen in het procedureschema

De volgende aannames zijn gemaakt om tot een vereenvoudigd procedureschema te komen:

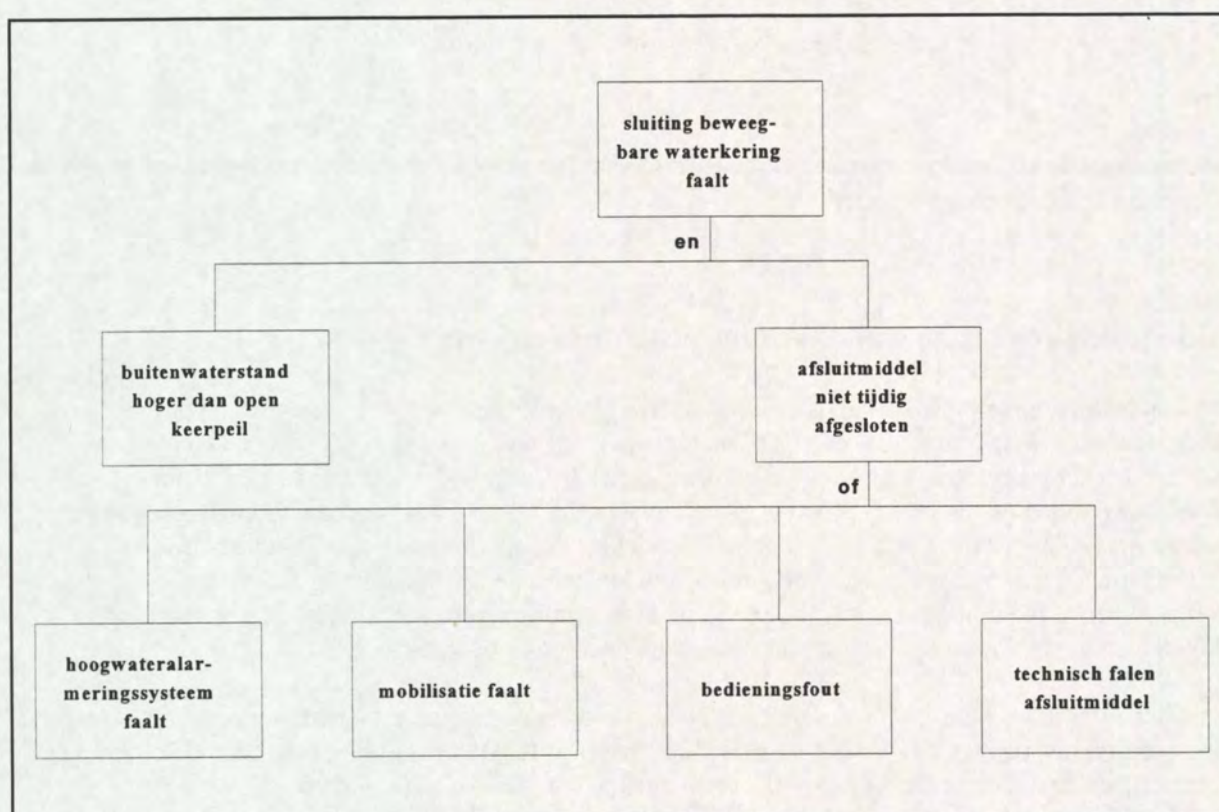
- De oproep van de Centrale Post aan instanties en derden zijn buiten beschouwing gelaten, dit is niet van belang voor het op tijd sluiten van de waterkering. Eventueel kan men deze taak overlaten aan de Ontvanger.
De faalkans van de sluitprocedure, zoals deze berekent zal worden, kan door deze aanname iets kleiner worden, aangezien de Centrale Post nu meer tijd heeft om zich te concentreren op het coördineren van het sluitproces. De taak van de Ontvanger eindigt op het moment dat hij de waarschuwing doorgegeven heeft en hij heeft dus tijd genoeg om anderen te waarschuwen.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

- De Storingsdienst is hier alleen in een ondersteunende vorm gebruikt. Wanneer de Storingsdienst niet paraat is, zal er slechts inundatie (is onderlopen van het achterliggende gebied) volgen, indien de waterkering daadwerkelijk stuk is. Dit is een vereenvoudiging, aangezien het in het oorspronkelijke model [Hei & Baa 92] mogelijk is dat opgemerkt wordt door de Storingsdienst dat er geen bediening op de waterkering aanwezig is. Dit meldt de Storingsdienst dan aan de Centrale Post, waarna deze weer de bemanning van de waterkering zal oproepen. Er is dus een vorm van redundantie uit het systeem gehaald.

De standaard beoordelingsmethode

De huidige TAW-leidraad **waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies** [TAW 95] geeft een standaard beoordelingsmethode om de betrouwbaarheid van de beweegbare waterkering te bepalen. Dit model bestaat uit een vragenlijst met een indicatie van de orde van de faalkans.



Afbeelding 3: foutenboom 'sluiting faalt'

De actuele faalkans van de kering wordt bepaald door: $P_{fa} = n_j \cdot P_{ns}$. Hierin is P_{fa} de actuele faalkans van het kunstwerk ten gevolge van een falend afsluitmiddel, n_j is het aantal keer per jaar dat de kering moet worden gesloten en P_{ns} is de kans op niet sluiten, gegeven de noodzaak tot sluiting.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

De kans op niet sluiten, gegeven de noodzaak (overschrijding sluitpeil), volgt uit de analyse van de vier subsystemen voor de gebeurtenis **kering niet gesloten**. Deze vier subsystemen zijn:

- 1) falen hoogwateralarmeringssysteem (HAS)
- 2) falen van de mobilisatie (MOB)
- 3) het maken van een bedieningsfout (BED)
- 4) falen door een technische storing (STO)

Via beantwoording van de vragen en het bijhouden van de daarmee samenhangende score, wordt een maat voor de betrouwbaarheid van dat onderdeel van de sluitprocedure voor de kering gekregen. Op basis van de vier eindscores E_i wordt de kans geschat dat het afsluitmiddel niet gesloten is als dat nodig is. Deze kansschatting wordt gegeven door:

E_i = eindscore volgend uit de beantwoording van de vragenlijst voor subsysteem i

E = de laagste waarde van E_i ($i=1...4$)

P_{ns} = kans op niet sluiten, gegeven noodzaak tot sluiting

$$P_{ns} = 10^{-E}$$

formule (1): faalkans standaard
beoordelingsmethode

Aanmerkingen bij de standaard beoordelingsmethode

De standaardbeoordelingsmethode is een eenvoudig instrument om snel tot een schatting van de faalkans van de waterkering te komen. De vragen zijn zo opgesteld dat in principe iedereen die een beetje thuis is op het terrein van het water keren, deze kan beantwoorden. Nadelen zijn echter dat de gebruikte getallen (de ordes van de verschillende faalkansen) geen duidelijke onderbouwing hebben. Verder geven de opstellers zelf al aan dat de uiteindelijke benadering een benadering aan de niet-conservatieve kant is, met andere woorden men kan faalkansen verkrijgen die lager zijn dan in werkelijkheid. Dit komt omdat de EN-poorten in de foutenboom corresponderen met een optelling in de scoretabel en OF-poorten corresponderen met een minimum-operator.

Ten slotte wordt het hele aspect van tijdsgebrek niet meegenomen in deze beoordelingsmethode. Het zou voor kunnen komen, dat de sluiting werkelijk perfect gaat, dat alle mechanische onderdelen prima functioneren en dat de verbindingen perfect zijn, maar dat er toch overstroming plaats vindt. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat de storm zich veel sneller ontwikkelt dan verwacht, zodat het onmogelijk is om iedereen op tijd op z'n post te laten zijn. Ook wanneer bepaalde reparaties langer duren dan verwacht is er sprake van **tijdsgebrek**. Daarnaast wordt het hele aspect van afhankelijkheid niet meegenomen. Wanneer één persoon meerdere handelingen moet uitvoeren is dit al een voorbeeld van afhankelijkheid.

Om bovenstaande aspecten wel mee te kunnen nemen is een toestandendiagram gemaakt van het sluitproces en dit is vervolgens gekwantificeerd. Ten slotte wordt gekeken naar de bijdrage van het tijdsgebrek aan de totale faalkans ten opzichte van andere faalkansen, zoals verkeerde beslissingen en falende verbindingen.

4. Het model

Gezien de punten van kritiek op de tot nu gebruikte standaardbeoordelingsmethode, proberen we een nieuwe beoordelingsmethode te vinden. Daarvoor maken we een **toestandsdiagram** van de sluitprocedure. Een toestandsdiagram geeft op grafische wijze een inzicht in hoe verschillende gebeurtenissen elkaar chronologisch opvolgen. Vervolgens worden door middel van interviews met sluiswachters en havenmeesters en de database **Donar** van het Rijkinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) onzekerheidsverdelingen over de verschillende toestanden in dit diagram opgesteld.

Definities

In het toestandsdiagram definiëren we *toestanden*, *paden* en *tijdsduren* met daarbij de *totale procestijd* (TPT).

Een **toestand** definiëren we als de staat waarin het proces kan zijn, na een zekere tijdsduur. Het is mogelijk dat er meerdere dingen tegelijk gebeuren in de sluitprocedure. De toestand, waar het hele proces mee begint, noemen we de **begintoestand**. De overige toestanden zijn in het algemeen overgangstoestanden, dit wil zeggen dat wanneer het proces na een bepaalde tijd in die toestand terecht komt, het proces daar vervolgens ook weer uit gaat. Wanneer het proces niet meer in een volgende toestand terecht kan komen, noemen we deze toestand een **eindtoestand**. Er zijn meerdere eindtoestanden mogelijk.

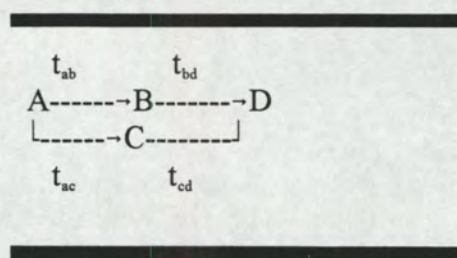
Een **tijdsduur** definiëren we als de tijd die er verstrijkt tussen twee opvolgende toestanden. De tijd die verstreken is vanaf de begintoestand tot aan één van de eindtoestanden noemen we de **totale procestijd**.

Ten slotte definiëren we een **pad** als een mogelijke combinatie van opvolgende toestanden die beginnen met de begintoestand en eindigen in één van de mogelijke eindtoestanden. Een **subpad** van toestand 1 naar toestand 2 wordt gegeven door de combinatie van opvolgende toestanden die begint in toestand 1 en eindigt in toestand 2. De **lengte van het (sub)pad** wordt gegeven door de som van alle tijdsduren in het (sub)pad.

Alternatieve paden

Wanneer er alternatieve paden in het toestanden-diagram zijn, kunnen deze op twee manieren ontstaan zijn:

- ① Een 'echt' alternatief pad, er zijn dus twee (of meer) subpaden die leiden van één toestand naar de daaropvolgende. Bekijk onderstaand plaatje:



A, B, C en D zijn de verschillende toestanden, t zijn de tijdsduren tussen de verschillende toestanden.

Hier zijn twee mogelijke, verschillende, subpaden om van A naar D te komen, namelijk A-B-D en A-C-D. De paden ABD en ACD noemen we dan ook 'echte' alternatieve subpaden. De lengtes van de subpaden hoeven niet gelijk te zijn. De lengte van het pad A-D wordt gegeven door het minimum van de subpaden.

- ② Er is sprake van een bepaalde keuze tussen de mogelijke alternatieve paden, de paden kunnen niet allebei voorkomen. Een mogelijkheid is dat de alternatieve paden elkaar uitsluitende gebeurtenissen zijn.

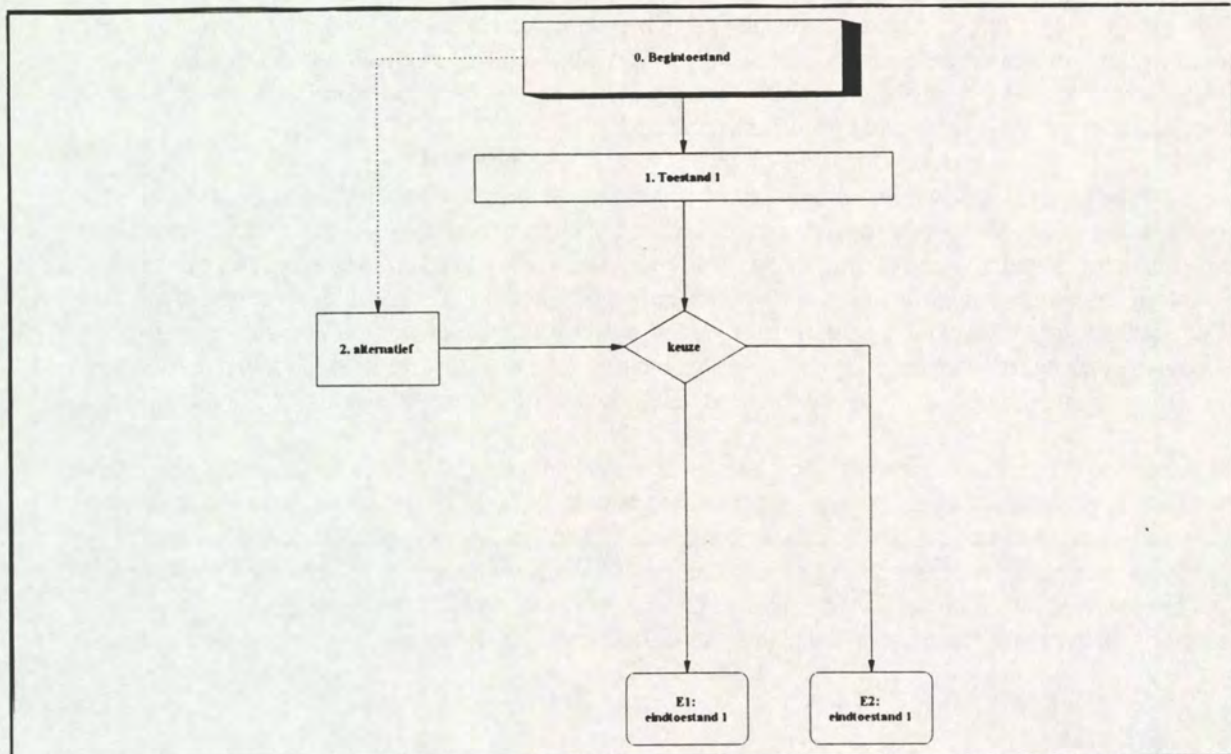
Algemeen diagram

Het toestandsdiagram geeft een overzicht van de volgorde van de toestanden. Een voorbeeld van zo'n toestandsdiagram is bijgevoegd aan het eind van deze paragraaf.

Een toestand geven we aan met een rechthoek, pijlen geven een tijdsduurverdeling aan. Een stippellijn geeft een echt alternatief pad aan. Wanneer we een ruit in het diagram tegenkomen, betekent dit dat er een keuze gemaakt moet worden welk pad gevolgd gaat worden.

We starten in de begintoestand en volgen daarna de pijlen naar de volgende toestand. Zo lopen we het hele diagram door, onderweg keuzes makend welk pad gevolgd wordt, tot we in een eindtoestand terecht komen.

We zullen nu eerst het bovenstaande wat verduidelijken door een voorbeeld te geven van een toestandsdiagram:



Afbeelding 4: voorbeeld toestandsdiagram

Toestandsdiagram voor het sluitproces

Wanneer we het sluitproces willen modelleren, zullen we de verschillende gebeurtenissen in kaart moeten brengen en kijken in welke volgorde deze gebeurtenissen optreden. Het begin en einde van het model zijn natuurlijk duidelijk. Het proces begint met het doen uitgaan van een waarschuwing voor een verhoogde waterstand en het eind van het proces is of "de waterkering is veilig waterkerend", of "de waterkering is niet veilig waterkerend".

We definiëren verder nog de *Maximaal Beschikbare Tijd* (MBT). Dit is een speciale tijdsduur, namelijk de tijd die verstrijkt tussen de begintoestand en het hoogwaterpeil bij de waterkering.

Het diagram tot aan het sluiten

De waarschuwing wordt gegeven door de Stormvloed Waarschuwingdienst (SVSD, naar de vroegere naam Stormvloed Seindienst). De waarschuwing wordt vervolgens doorgegeven aan de Ontvanger. Indien de Ontvanger de waarschuwing niet of erg laat ontvangt, is er de mogelijkheid dat een op de waterkering aanwezige bediening zelf actie onderneemt. De Ontvanger geeft de waarschuwing door aan de bediening van de waterkering, wanneer deze aanwezig is, en aan de Functionaris. Er ontstaan nu twee mogelijke ketens van gebeurtenissen.

Ten eerste is er de mogelijkheid dat de aanwezige bediening de waterkering zal sluiten op het moment dat het sluitpeil van de waterkering bereikt wordt. Het sluitpeil is een bepaalde waterstand bij de waterkering, waarop de beweegbare waterkering gesloten moet worden. Het diagram gaat dan verder met de sluitfase. Er is dan verder geen beslissing nodig.

In het tweede geval zal de Functionaris een beslissing moeten nemen om de Centrale Post te mobiliseren of om te stoppen met de procedure. Deze beslissing neemt hij op basis van zijn ervaring en zijn verwachting van de stijging van het waterpeil. We hebben ervoor gekozen om na een beslissing tot stoppen geen redundantie in het systeem te hebben. In de praktijk is het uiteraard mogelijk dat de Functionaris ziet dat zijn beslissing tot stoppen onterecht was: het water stijgt nog steeds. Hij kan dan alsnog de procedure weer op gang brengen. De keuze in dit model levert uiteindelijk een conservatieve schatting op, met andere woorden de faalkans zal in de praktijk kleiner kunnen zijn.

Wanneer de Functionaris besloten heeft om de Centrale Post op te roepen, is de volgende gebeurtenis dat deze post voldoende bezet is om verder te gaan met de procedure. Op dat moment wordt er weer een beslissing genomen om al dan niet verder te gaan. Deze beslissing wordt op dezelfde wijze gemodelleerd als de beslissing van de Functionaris. Indien de mensen van de Centrale Post verwachten dat het sluitpeil overschreden wordt, zal men de bediening van de waterkering op gaan roepen. De laatste gebeurtenis in deze keten is dan ook dat de bediening op de waterkering aanwezig is.

De sluitfase

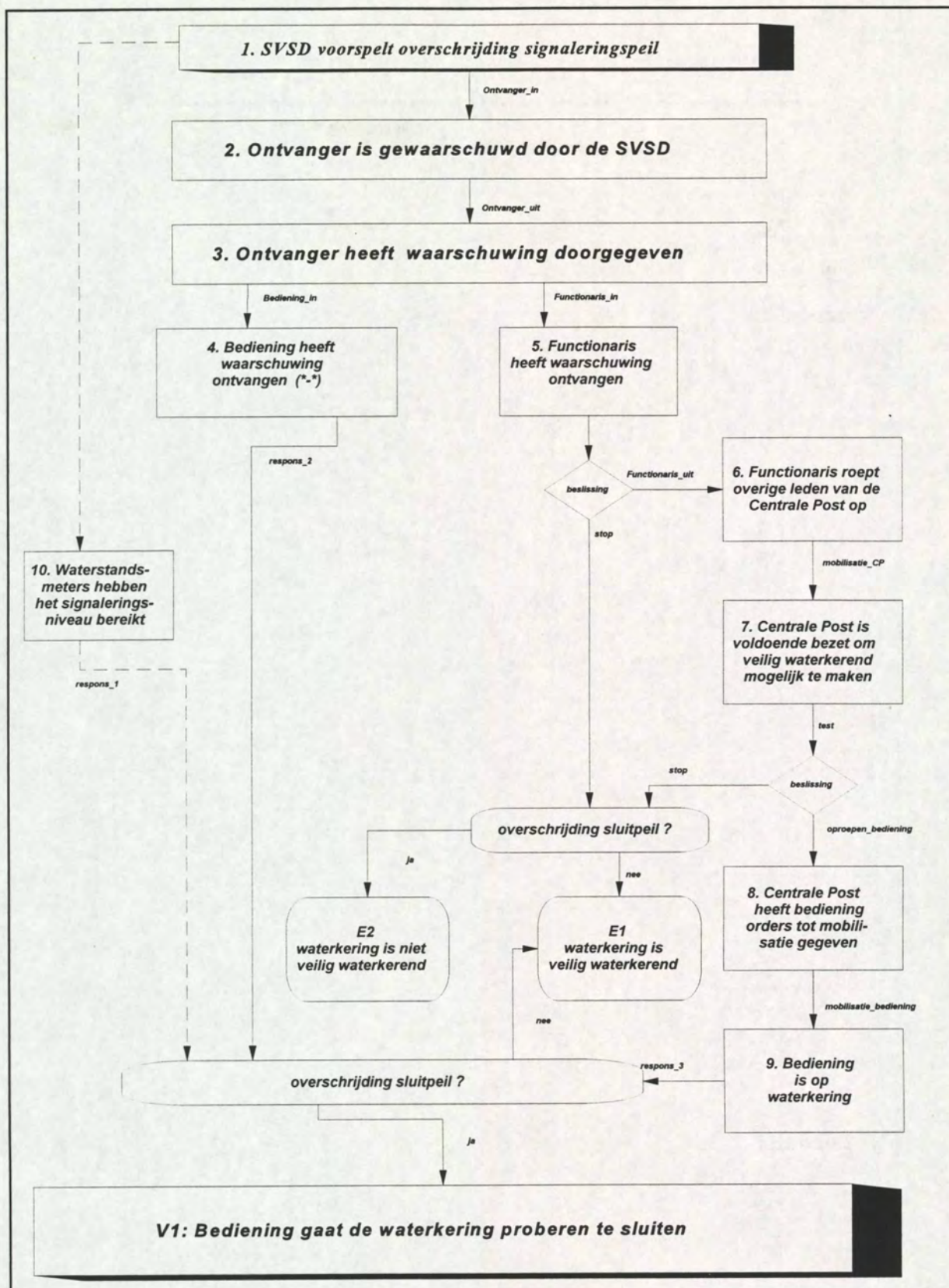
We zijn nu beland in een toestand dat er een bediening aanwezig is op de beweegbare waterkering en dat deze zich ook bewust is van een naderend hoog water. Er wordt dan eerst gekeken of het sluitpeil inderdaad overschreden wordt, is dit niet het geval dan stopt de procedure en is de waterkering zeker veilig waterkerend. De mogelijkheid dat de bediening op de waterkering ten onrechte besluit om niet te sluiten, hebben we niet meegenomen. We mogen veronderstellen dat de sluiswachters hun werk goed doen en het waterstandsverloop in de gaten houden. Bij twijfel zullen ze overgaan tot sluiting.

Indien het sluitpeil wel overschreden wordt, dan zal de bediening de waterkering gaan sluiten. Hiervoor zijn in het algemeen een aantal verschillende mogelijkheden. Er zal in ieder geval altijd een hoofdsluitingssysteem zijn, hetgeen we elektrisch sluiten genoemd hebben. Denk bij dit sluitsysteem bijvoorbeeld aan een hydraulische trek/duwpers of een kabelsysteem voor het sluiten van een roldeur. Dit is uiteraard het eerste wat de bediening zal gebruiken om de kering te sluiten.

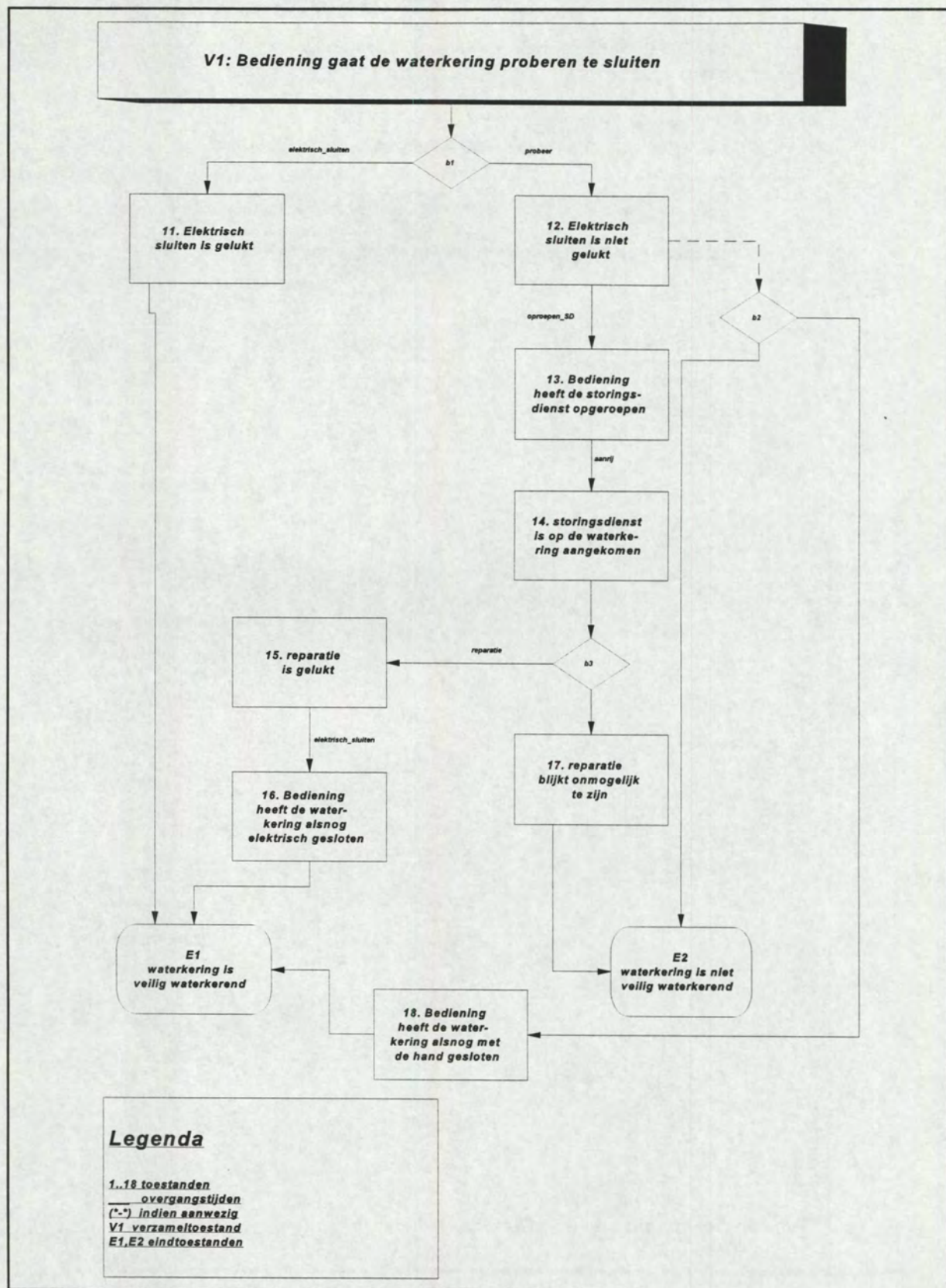
Het is mogelijk dat dit systeem niet werkt. Na een tijdje proberen zal de bediening dan andere mogelijkheden zoeken om de waterkering te sluiten. In ieder geval zal men de Storingsdienst laten komen. Deze komt naar de waterkering en voert een reparatie uit. Het lukken van de reparatie leidt vervolgens tot het alsnog elektrisch sluiten van de waterkering.

Parallel aan het oproepen van de Storingsdienst kan de bediening besluiten om het reserve-systeem te gebruiken, indien dit er is. Meestal is dit het handmatig sluiten van de waterkering. Het model beschouwt beide mogelijkheden.

Het volledige toestandsdiagram voor de algemene sluitprocedure ziet er dan als volgt uit:



Afbeelding 5: het toestandsdiagram -1



Afbeelding 6: het toestandsdiagram -2

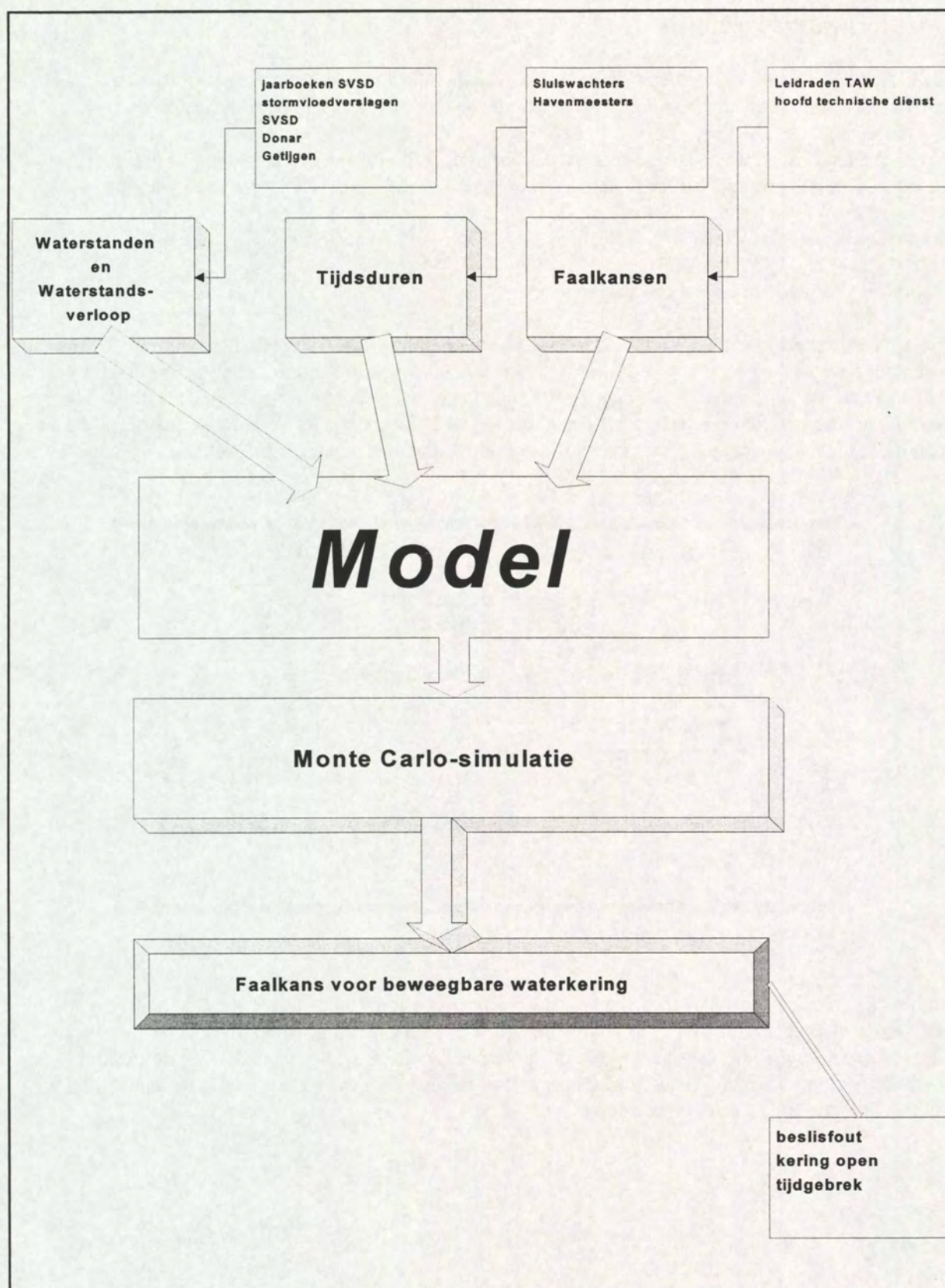
5. De herkomst van de data

Het in het vorige hoofdstuk beschreven model kunnen we in het computerprogramma **Unicorn** verwerken. Een uitvoerige beschrijving van dit programma is te vinden in bijlage A. De benodigde gegevens voeren we in de vorm van **onzekerheidsverdelingen** in. Een overzicht van de gebruikte variabelen is te vinden op bladzijde 34. We willen een alternatief aandragen voor de standaard beoordelingsmethode en hebben dus een model gemaakt. Vervolgens moeten we:

- aan gegevens komen voor de verschillende tijden,
- deze gegevens omwerken naar onzekerheidsverdelingen,
- de faalkans benaderen met behulp van **Monte Carlo-simulatie**.

In het nu volgende schema hebben we aangegeven welke gegevens we nodig hebben. Ook kunnen we hier op eenvoudige wijze zien, waar de gegevens vandaan komen (bronnen) en wat we er mee doen. Uiteindelijk kunnen we de totale faalkans van de beweegbare waterkering uitsplitsen in drie delen: de faalkansbijdrage als gevolg van een foute beslissing, de faalkansbijdrage als gevolg van het niet kunnen sluiten van de waterkering en de faalkansbijdrage als gevolg van tijdsgebrek.

Het model is het hiervoor beschreven alternatief voor de standaard beoordelingsmethode.



Afbeelding 7: grafische weergave van het onderzoek

Onzekerheidsverdelingen

Aangezien we geen kennis hebben over de lengtes van de tijdsduren, vragen we deze tijden aan experts. Het stellen van de vragen noemen we **eliciteren** en de experts zijn de sluiswachters en havenmeesters.

De onzekerheid willen we aangeven door het zogenaamde 5%-, 50%- en 95%-kwantiel aan een expert te vragen. Het $x\%$ -kwantiel heeft de naam q_x en geeft de waarde van de verdeling weer, waarbij precies $x\%$ van de kansmassa voor q_x ligt. De ligging van deze kwantielen geeft een indicatie van de onzekerheid in het antwoord.

Laat ons dit verduidelijken met een voorbeeldje:

Stel dat we de sluit tijd van de Stormvloedkering Oosterschelde willen eliciteren. Dan kunnen we dit doen door de expert naar z'n 5%-, 50%- en 95%-kwantiel te vragen. Om deze termijn wat sprekender te maken voor de expert, vragen we hem 20 sluit tijden in te schatten. We veronderstellen dat het 5%-kwantiel gegeven wordt door de kleinste waarde en het 95%-kwantiel door de grootste waarde. Verder geeft de mediaan van deze 20 waarden het 50%-kwantiel. Een plaatje van de onzekerheidsverdeling zou er dan zo uit kunnen zien.

De kansmassa in relatie tot de kwantielen

#####	#####		
#####	#####		
# 45%#	# 45% #		
#####	#####	#####	#####
## 5% ##	#####	#####	# 5% #
#####	#####	#####	#####
$q_{5\%}$	$q_{50\%}$	$q_{95\%}$	kwantiel
1 uur	2 uur	3 uur	tijdsduur

voorbeeld van een onzekerheidsverdeling

Dit betekent dat de expert met een kans van 5% verwacht dat wanneer de Oosterscheldedekering nu gesloten moet worden, de tijd die hiervoor benodigd is één uur of korter bedraagt. Met een kans van 45% ligt de sluitingstijd ergens tussen de één en twee uur en met een kans van 45% ligt de sluit tijd tussen de twee en drie uur. Ten slotte geeft nevenstaande verdeling aan dat met een kans van 5% de sluitingsoperatie langer dan drie uur duurt.

De SVSD

De gegevens over de stormvloeden van de afgelopen jaren worden bijgehouden door de SVSD. Deze dienst is een onderdeel van Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Momenteel is daar het informatiesysteem Donar operationeel, waar werkelijk alle gegevens over water in op te vragen zijn. Voor dit onderzoek waren vooral de waterstanden van belang.

Tevens geeft de SVSD na iedere storm een rapport uit, met daarin gegevens over de weersgesteldheid, de benodigde tijd om iedereen te waarschuwen en classificatie van de storm. Om in het model de hoogte van het waterpeil te simuleren hebben we gebruik gemaakt van de classificatie van de SVSD.

Stormtypen

Er zijn verschillende soorten stormen. De SVSD onderscheidt er zes, gebaseerd op de optredende maximale waterstand bij de basisstations. Deze basisstations leveren de voorspellingen voor het omliggende gebied. De basisstations bevinden zich in Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Wij houden ons aan deze classificatie van de SVSD, waarbij de laatste, de extreme stormvloeden, buiten beschouwing worden gelaten, simpelweg omdat hier geen bovengrens is aangegeven van de maximale waterstand en omdat de kans van optreden 0.00002 is. De kansen op optreden van de verschillende vloeden zijn respectievelijk 90%, 8%, 1.8%, 0.18% en 0.02%. De kansen zijn berekend naar ratio van hun frequentie per jaar.

We maken dus per basisstation vijf variabelen: *vloed1* t/m *vloed5*. We nemen aan dat deze variabelen normaal verdeeld zijn. Dan worden deze volledig geparametriseerd door de onderstaande kwantielen:

Basisstation	Vlissingen		H.v.Holland		Den Helder		Harlingen		Delfzijl	
kwantiel (cm +NAP)	Q _{5%}	Q _{95%}	Q _{5%}	Q _{95%}	Q _{5%}	Q _{95%}	Q _{5%}	Q _{95%}	Q _{5%}	Q _{95%}
hoge vloed	295	340	195	225	155	220	215	290	250	340
lage storm- vloed	340	375	225	300	220	275	290	350	340	410
middelbare stormvloed	375	430	300	360	275	360	350	435	410	500
hoge storm- vloed	430	495	360	430	360	435	435	510	500	575
buitenge- woon hoge stormvloed	495	565	430	500	435	505	510	580	575	640

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

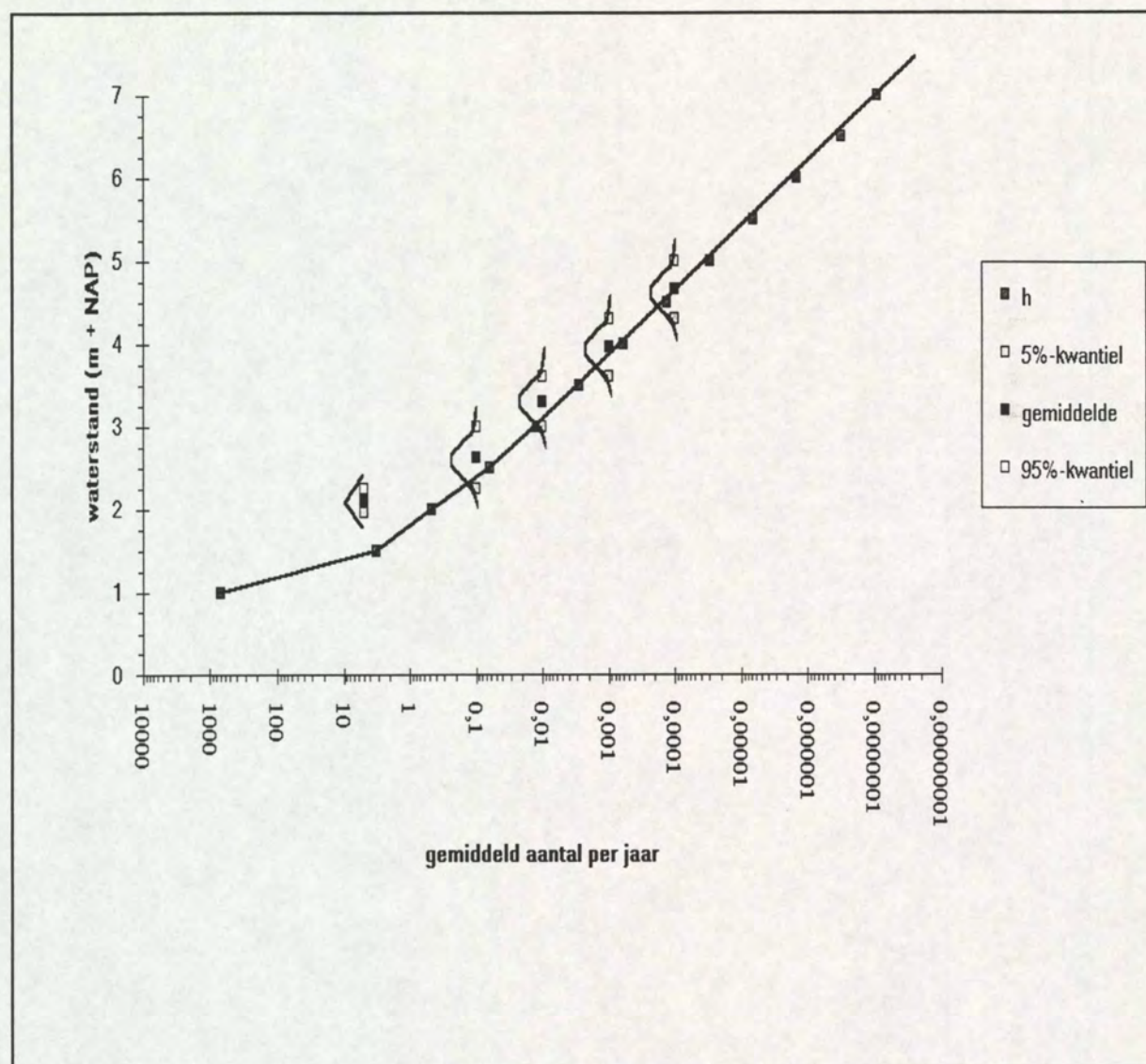
We hebben nu de verschillende vloed en gemodelleerd en tevens de mogelijkheid gecreëerd, dat een storm van een bepaald type toch buiten zijn klasse valt. Daarom hebben we per basisstation de 5% en 95% kwantielen van de verschillende stormtypen laten aansluiten, in plaats van de minimum en maximum waarden. Hierdoor zullen de normaal verdelingen elkaar overlappen. In de praktijk zal het namelijk mogelijk zijn, dat het water toch een stuk hoger (of lager) komt dan dat men verwacht heeft.

De Dienst Weg- en Waterbouwkunde gebruikt meestal de hoogwater overschrijdingslijn. Dit is een grafiek, die het verband weergeeft tussen de frequentie en hoogte van de waterstand. Wij hebben gekozen voor een modellering aan de hand van de verschillende typen storm. We zullen nu eerst kijken of deze aanname redelijkerwijs in overeenstemming is met de hoogwater overschrijdingslijn.

We kunnen de aannamen en de hoogwateroverschrijdingslijn in één grafiek zetten. We zetten de $^{10}\log$ van het gemiddeld aantal keer dat een bepaalde waterstand per jaar optreedt uit tegen de waterstand. Voor de waterstand hebben we vier waarden:

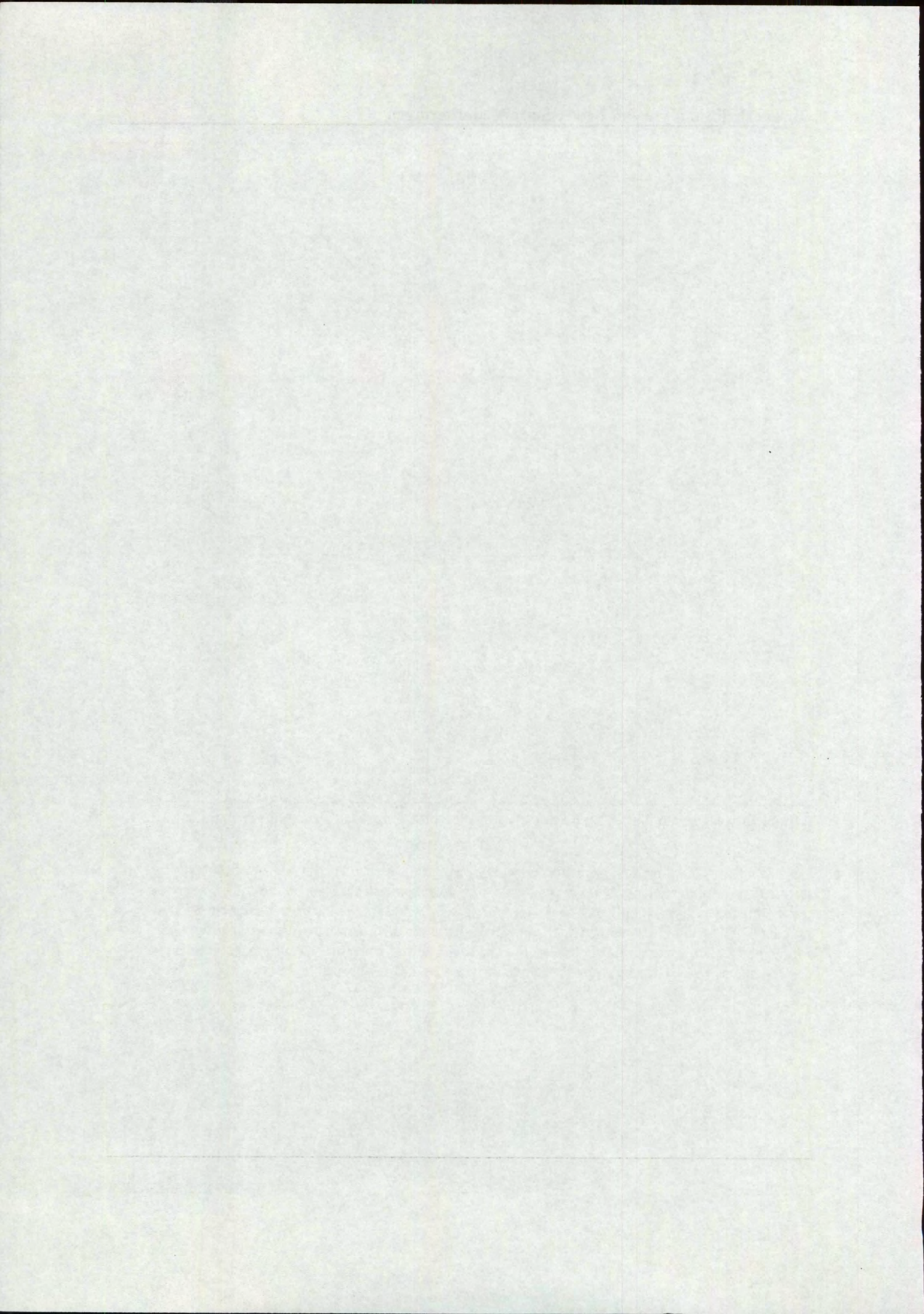
- de waarde van de hoogwateroverschrijdingslijn (h)
- het 5%-kwantiel van de aangenomen normaal verdeling
- het 50%-kwantiel van de aangenomen normaal verdeling
- het 95%-kwantiel van de aangenomen normaal verdeling.

Dit levert het volgende plaatje op:



Afbeelding 8: de aannames en de hoogwateroverschrijdingslijn (Hoek van Holland)

We zien dat er, vooral bij de hogere stormvloeden, geen grote verschillen zijn. De verschillen bij lage stormen zijn niet van belang. Met bovenstaande grafiek willen we laten zien, dat de gedane aanname te verdedigen is in vergelijking met de hoogwateroverschrijdingslijn. Een andere manier om te laten zien dat beide methodes elkaar niet veel ontlopen zou zijn om de hoogwateroverschrijdingskansen te vergelijken met de gezamenlijke kansverdeling, bestaande uit de som van de kansen van optreden van de verschillende vloeden vermenigvuldigd met de daarbij gekozen normaalverdeling.



De maximale beschikbare tijd

De eerste gedachte is dat de MBT afhankelijk zal zijn van de type storm. Een hoge stormvloed zou zich bij voorbeeld sneller kunnen ontwikkelen dan een lage stormvloed, zodat de MBT van de hoge stormvloed significant kleiner moet zijn dan die van de lage stormvloed. Verder zal er ook een verschil kunnen zijn per sector.

De MBT is nu gegeven bij het basisstation, we moeten nog kijken of deze tijd ook representatief kan zijn voor de waterkeringen. Het zou kunnen dat het maximale hoogwater bij de kering nog uren op zich laat wachten, terwijl het bij het basisstation al lang geweest is. Dit lijkt ons echter onwaarschijnlijk. Uit het boek [Gem 94] blijkt bij vergelijking van de krommen voor Hoek van Holland en Vlaardingen een tijdsverschil van vijf kwartier te zitten. We nemen de MBT voor het basisstation, om zo een conservatieve benadering te maken van de faalkans. Daarna rekenen we hetzelfde model nog eens door, maar dan met een MBT van een uur langer. Dit volgt ook uit het computerprogramma **Getijgen**, dat de getijkrommen van twee meetpunten weergeeft.

We hebben genoeg data om per basisstation de MBT te kunnen vaststellen, maar voor de uitsplitsing naar stormtype ontbreken er ten eerste gegevens over de typen **hoge stormvloed**, **buitengewoon hoge stormvloed** en **extreme stormvloed**. Daarnaast zijn de gegevens die we dan per sector en per station overhouden niet voldoende om een betrouwbare schatting voor de onzekerheidsfuncties te kunnen maken.

Met deze gegevens zijn voor alle sectorstations de volgende distributie-files voor **Unicorn** gemaakt:

Delfzijl	:	MBT_DELF.dis
Den Helder	:	MBT_DENH.dis
Vlissingen	:	MBT_SCHE.dis
Hoek van Holland	:	MBT_WHOL.dis
Harlingen	:	MBT_HARL.dis

De tijd tussen de SVSD en de ontvanger

In eerste instantie hadden we aangenomen dat deze tijd in bovengenoemde rapporten was gegeven, maar een nadere bestudering deed ons vermoeden dat dit de tijd was die men op een basisstation nodig heeft om een beslissing te nemen. Mede naar aanleiding van een telefoongesprek met een Ontvanger, hebben we daarom gekozen om deze onzekerheidsverdeling te simuleren door een trekking uit een uniform verdeelde tijdsduur. Hierdoor zal de O_{in} tussen de vijf en vijftien minuten duren.

Elicitatie

Aangezien er nog geen gegevens zijn over hoe lang een sluiswachter er over doet om zijn sluis dicht te doen en deze gegevens ook per waterkering zullen verschillen, is er besloten om deze gegevens te eliciteren. Bij deze elicatie wordt er aan de expert gevraagd wat zijn (of haar) onzekerheidsverdeling is over een bepaalde gebeurtenis. Hiertoe is een algemeen toepasbare vragenlijst opgesteld, die vervolgens persoonlijk voorgelegd is aan de experts in kwestie. De groep experts bestond uit vier sluiswachters, één havenmeester en één hoofd afdeling beheer Bruggen en Gemalen.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Door het kleine aantal experts geeft deze onzekerheidsanalyse slechts een zeer grove benadering voor het algemene proces, wanneer we de resultaten landelijk willen beschouwen. Daarentegen is de representativiteit voor de bezochte waterkeringen zelf een stuk groter, aangezien er bij het beheer van de meeste waterkeringen slechts een klein aantal mensen betrokken is. De resultaten geven dus een indicatie voor verder onderzoek en zullen dus in geen geval als maatgevend moeten worden beschouwd. Wel is de gevolgde aanpak zodanig, dat het model algemeen toepasbaar is, waarbij de parameters per beweegbare waterkering zullen verschillen.

Seed-variabelen

Om de antwoorden te kunnen omwerken naar een onzekerheidsverdeling gebruiken we het computerprogramma **Excalibr**. Dit programma genereert onder andere een discrete verdelingsfunctie door de inschattingen van de experts op bekende gegevens te vergelijken met de werkelijke waarden. Deze gegevens noemen we **seed-variabelen**. De beste seed-variabelen zijn gegevens die wel op het kennisgebied van de expert liggen, maar waar de expert geen exact antwoord van weet. Verder dienen de verschillende seed-variabelen onafhankelijk te zijn. In bijlage C wordt de gevolgde elicitatie beschreven.

6. Implementatie in Unicorn

Bij de implementatie van het model in **Unicorn** zijn er een aantal zaken die we eerst wat nader zullen beschouwen.

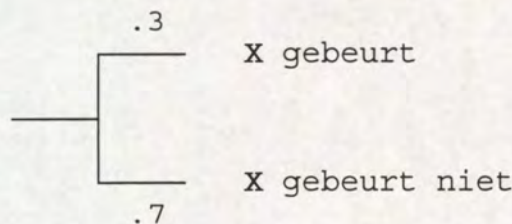
Ten eerste is het voldoende om alleen de tijdsduren te modelleren, de toestanden geven slechts begin en eind van een tijdsduur aan en voegen geen informatie toe. Er zal dus beschreven moeten worden hoe de tijdsduren in het model passen.

Ten tweede moeten we sommige (sommen van) tijdsduren vergelijken met andere tijdsduren en hiervan het minimum nemen, de echte alternatieve (sub)paden. We hebben dus een **MINIMUM**-operator functie nodig.

Ten derde moeten we de elkaar uitsluitende paden kunnen modelleren. Hiertoe definiëren we een drietal beslissingsvariabelen $b1$, $b2$ en $b3$, die alle drie Uniform(0,1) verdeeld zijn. Dit betekent dat deze variabelen een willekeurige waarde tussen 0 en 1 aannemen, waarbij de kans op elke waarde gelijk is.

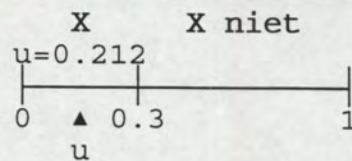
We kunnen dan een willekeurige keuze tussen de verschillende alternatieve paden maken, door de realisatie van deze beslissingsvariabele te vergelijken met de kans op optreden van het pad. De kans op optreden van het pad met de toestand X *faalt* is gelijk aan de faalkans van de betreffende gebeurtenis X . De faalkansen van mechanische componenten halen we uit [Taw 92]. Het volgen van het pad komt dan neer op het vergelijken van de waarde van de realisatie van de beslissingsvariabele met de faalkans. Is de realisatie kleiner dan de faalkans, dan volgen we het pad X *faalt*, anders het pad X *faalt niet*.

Beschouw de volgende situatie:



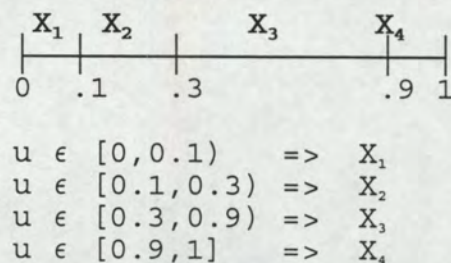
Hier moet een keuze gesimuleerd worden tussen de twee paden X *gebeurt* en X *gebeurt niet*. De kans van optreden van de paden zijn respectievelijk 0.3 en 0.7. We splitsen nu het interval $[0,1]$ op in de deelintervalletjes $[0,0.3]$ en $[0.3,1]$ en doen een trekking uit een uniform(0,1) verdeelde stochast. Wanneer de waarde van deze realisatie kleiner is dan 0.3 dan kiezen we het pad X *gebeurt*, anders het pad X *gebeurt niet*.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen



De variabele u is een realisatie uit een uniform(0,1)-verdeling en heeft in dit voorbeeld de waarde 0.212. Er volgt dus dat deze realisatie leidt tot een keuze van het pad **X** gebeurt.

Wanneer er meerdere alternatieven zijn, dan bepalen we eerst voor elk alternatief pad de kans van optreden. Vervolgens delen we het interval $[0,1]$ op in net zoveel deelintervalletjes als er paden zijn. Elke deelintervalletje i krijgt dan als lengte de kans van optreden van alternatief i . Ten slotte kijken we dan van welk intervalletje de realisatie van de beslissingsvariabele een element is en kiezen dan het bij dat intervalletje horende pad.



vak 8: meerdere intervals

Een uitgewerkt voorbeeld in **Unicorn** is het simuleren van een bepaalde maximale waterhoogte. We gaan uit van de kwantilen voor de stormtypen in Hoek van Holland (zie bladzijde 24). De **Unicorn** formule om een keuze te maken voor een bepaald stormtype, wordt nu:

```
storm:      s1+s2+s3+s4+s5
s1   :      il{0.1,v1,1}*vloed1
s2   :      il{0.02,v1,0.1}*vloed2
s3   :      il{0.002,v1,0.02}*vloed3
s4   :      il{0.0002,v1,0.002}*vloed4
s5   :      il{0,v1,0.0002}*vloed5
```

Hierbij is $v1$ een Uniform(0,1) verdeelde stochast. De formule $il\{a,x,b\}$ geeft de waarde 1 wanneer geldt $a \leq x \leq b$ en 0 in alle overige gevallen. Het teken $<<$ is de Unicorn representatie van $-\infty$ en $>>$ is de representatie voor $+\infty$. We zien dus dat de waarde van $v1$ bepaalt met welk stormtype we te maken hebben.

Ten vierde moeten we bekijken hoe we de bemande en onbemande toestand van de waterkering kunnen modelleren. We kiezen ervoor om deze twee toestanden apart te modelleren.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Een andere mogelijkheid zou zijn om te kijken naar het aantal uren per dag dat de waterkering bemand is. We kunnen dan een beslissingsvariabele invoeren om per realisatie een keuze te maken tussen een bemande en een onbemande toestand.

Het vijfde punt is de implementatie van de eindtoestanden.

Wanneer de sluis inderdaad gesloten is, zijn we automatisch in toestand E1 terecht gekomen en kunnen we de padlengte bepalen. Indien de sluis niet veilig waterkerend is (bijvoorbeeld door falende reparatie) weten we dat de padlengte zeker groter zal zijn dan de Maximaal Beschikbare Tijd. Een manier om dit te modelleren is door de tijdsduren die leiden naar E2 een oneindige tijdsduur te geven. Hiermee bereiken we dat de padlengte in dat geval zeker langer zal zijn dan de MBT.

Het algemene script voor een onbemande waterkering

```
onb:   il{<<,tpt,mbt}

storm:  il{0.1,v1,1}*vloel+il{0.02,v1,0.1}*vloel2+il{0.002,v1,0.02}*
        » vloel3+il{0.0002,v1,0.002}*vloel4+il{0,v1,0.0002}*vloel5
tpt:    o_in+o_uit+f_in+besl+il{0,storm,sltpl}*slt
besl:    il{0,u1,bslft}*ovsl+(1-il{0,u1,bslft})*(f_uit+mo_cp+test+cpbs)
cpbs:    il{0,u2,bslft}*ovsl+(1-il{0,u2,bslft})*(op_be+mo_be+res3)
ovsl:    il{0,storm,sltpl}*<<+il{0,sltpl,storm}*>>
slt:     (1-il{0,b1,flsl})*elek+il{0,b1,flsl}*(prob+min{hand,sd})
hand:    il{0,b2,flha}*>>>+(1-il{0,b2,flha})*2*hasl
sd:      op_sd+ry_sd+>>>*il{0,b3,flrep}+(1-il{0,b3,flrep})*(rept+elek)
```

De formule **onb** vergelijkt de totale procestijd met de MBT en geeft een 1 als de waterkering inderdaad veilig waterkerend is voordat de Maximaal Beschikbare Tijd verstreken is.

Storm geeft, op de in hoofdstuk 5 beschreven manier, een bepaalde hoogwaterstand.

Tpt geeft de Totale Procestijd weer. Deze is opgebouwd uit de tijdsduren voor de Ontvanger en de Functionaris, samen met de beslissing om al of niet door te gaan met de sluitprocedure.

Besl bepaalt, door vergelijking van een uit een uniform(0,1)-verdeling getrokken realisatie met de beslisfout, of de procedure wel of niet stopgezet wordt door de Functionaris.

Cpbs doet hetzelfde voor de Centrale Post.

Ovsl geeft aan of de genomen beslissing om te stoppen met de sluitprocedure terecht is geweest.

Wanneer de waterhoogte boven het sluitpeil uitstijgt (**storm** > **sltpl**), dan levert dit een oneindige procestijd op. Was de beslissing om te stoppen terecht, dan zorgt een procestijd van $-\infty$ ervoor dat de **onb** zeker één zal zijn.

Sl geeft de sluitfase weer; de bemanning is aangekomen op de waterkering en probeert de kering te sluiten. Wanneer het mechanisch sluiten niet lukt, wordt het minimum van de back-up systemen **hand** en **sd** genomen.

Hand geeft de tijd weer, die men nodig heeft om de waterkering handmatig te sluiten, **sd** geeft de benodigde tijd voor de storingsdienst weer.

Het algemene model voor een bemande waterkering

```
bem:  il{<<,tpt,mbt}

storm:  il{0.1,v1,1}*vloel+il{0.02,v1,0.1}*vloel2+il{0.002,v1,0.02}*
        » vloel3+il{0.0002,v1,0.002}*vloel4+il{0,v1,0.0002}*vloel5
tpt:    min{alm+res1+slui,o_in+o_uit+min{be_in+res2+slui,f_in+besl}}
besl:   il{0,u1,bslft}*ovsl+(1-il{0,u1,bslft})*(f_uit+mo_cp+test+cpbs)
cpbs:   il{0,u2,bslft}*ovsl+(1-il{0,u2,bslft})*(op_be+res3)
ovsl:   il{0,storm,sltpl}*<<+il{0,sltpl,storm}*>>
slui:   (1-il{0,b1,flsl})*elek+il{0,b1,flsl}*(prob+min{hand,sd})
hand:   il{0,b2,flha}*>>+(1-il{0,b2,flha})*2*hasl
sd:     op_sd+ry_sd*>>*il{0,b3,flrep}+(1-il{0,b3,flrep})*(rept+elek)
```

De formule **bem** vergelijkt de **totale procestijd** met de **MBT** en geeft een 1 als de waterkering inderdaad veilig waterkerend is voordat de Maximaal Beschikbare Tijd verstreken is.

Storm geeft, op de in hoofdstuk 5 beschreven manier, een bepaalde hoogwaterstand.

Tpt geeft de Totale Procestijd weer. Deze is opgebouwd uit het minimum van een drietal alternatieve paden, namelijk het pad rechtstreeks naar de Bediening en het pad via de Ontvanger, dat zich splitst in de alternatieve paden via de Bediening en via de Functionaris. Voor de analyse is het van belang dat de waarschuwing zo snel mogelijk bij de juiste personen terecht komt, vandaar dat we gekozen hebben voor het minimum.

Besl bepaalt, door vergelijking van een uit een uniform(0,1)-verdeling getrokken realisatie met de beslisfout, of de procedure wel of niet stopgezet wordt door de Functionaris.

Cpbs doet hetzelfde voor de Centrale Post.

Ovsl geeft aan of de genomen beslissing om te stoppen met de sluitprocedure terecht is geweest.

Wanneer de waterhoogte boven het sluitpeil uitstijgt (**storm** > **sltpl**), dan levert dit een oneindige procestijd op. Was de beslissing om te stoppen terecht, dan zorgt een procestijd van $-\infty$ ervoor dat de **onb** zeker één zal zijn.

Sl geeft de sluitfase weer; de bemanning is aangekomen op de waterkering en probeert de kering te sluiten. Wanneer het mechanisch sluiten niet lukt, wordt het minimum van de back-up systemen **hand** en **sd** genomen.

Hand geeft de tijd weer, die men nodig heeft om de waterkering handmatig te sluiten, **sd** geeft de benodigde tijd voor de storingsdienst weer.

De namen van de formules zijn dus in beide scripts hetzelfde, dit vereenvoudigt de vergelijking.

Bepaling van de faalkans voor de waterkering

We krijgen een indicatie van de faalkans van de waterkering door een groot aantal keren het procedure schema te simuleren, met behulp van **Monte-Carlo simulatie**. De tijd die verstreken is vanaf de begintoestand tot aan één van de eindtoestanden noemen we de **totale procestijd**. Daarnaast moeten we een realisatie genereren uit de Maximaal Beschikbare Tijd.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Verder hebben we de binaire variabelen **bem** en **onb**. De waarde van deze variabelen geeft dan aan of de waterkering veilig waterkerend is, indien dit zo is dan heeft deze variabele de waarde één. Een waarde van nul geeft aan dat voor deze realisatie van het proces de waterkering niet veilig waterkerend is.

Nadat we een groot aantal keren het toestandsdiagram doorgerekend hebben kunnen we de faalkans schatten. Stel dat we **n** realisaties van het toestandsdiagram hebben, dan hebben we dus een **n**-vector met de waarden 0 of 1. We kunnen nu de faalkans benaderen door het aantal keren dat de waterkering niet veilig waterkerend bleek te zijn, te delen door het totaal aantal keren dat we het diagram doorgerekend hebben.

De faalkans van de waterkering P_f wordt dan benaderd door:

$$\begin{aligned} P(\text{bemane waterkering niet tijdig waterkerend}) &= P_f^{(bem)} = \frac{1}{n} \cdot |(\text{bem} = 0)| \\ &= (\max_{0 \leq x \leq 1} (x | q_x = 0)) \\ P(\text{onbemande waterkering niet tijdig waterkerend}) &= P_f^{(onb)} = \frac{1}{n} \cdot |(\text{onb} = 0)| \\ &= (\max_{0 \leq x \leq 1} (x | q_x = 0)) \end{aligned}$$

formule (2): definitie faalkans

Hierbij geeft q_x het $x\%$ kwantiel van de door **Unicorn** gegenereerde verdeling voor **bem** respectievelijk **onb**.

De gebruikte variabelen

- | | | |
|--------------|---|---|
| MBT | : | de maximaal beschikbare tijd, dus de tijd vanaf het moment van waarschuwen van de SVSD tot aan het moment dat het hoogwater bij de kering is. |
| vloe1 | : | <i>hoge vloed</i> ; normaal verdeeld met 5%-kwantiel en 95%-kwantiel volgens de tabel op bladzijde 24. |
| vloe2 | : | <i>lage stormvloed</i> ; normaal verdeeld met 5%-kwantiel en 95%-kwantiel volgens de tabel op bladzijde 24. |
| vloe3 | : | <i>middelbare stormvloed</i> ; normaal verdeeld met 5%-kwantiel en 95%-kwantiel volgens de tabel op bladzijde 24. |
| vloe4 | : | <i>hoge stormvloed</i> ; normaal verdeeld met 5%-kwantiel en 95%-kwantiel volgens de tabel op bladzijde 24. |
| vloe5 | : | <i>buitengewoon hoge stormvloed</i> ; normaal verdeeld met 5%-kwantiel en 95%-kwantiel volgens de tabel op bladzijde 24. |

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

O_in	:	tijd die verstrijkt tussen het doorgeven van de waarschuwing door de SVSD aan de Ontvanger.
O_uit	:	tijd die verstrijkt voordat de Ontvanger de waarschuwing heeft doorgegeven.
Be_in	:	tijd die verstrijkt tussen het doorgeven van de waarschuwing door de Ontvanger aan de op de sluis aanwezige bediening.
F_in	:	tijd die verstrijkt tussen het doorgeven van de waarschuwing door de Ontvanger aan de Functionaris.
F_uit	:	tijd die er voorbij gaat voordat de Functionaris besluit om de overige leden van de Centrale Post op te roepen.
Mo_cp	:	tijd die het kost om de volledige Centrale Post te mobiliseren.
Test	:	tijd om bijvoorbeeld de verbindingen te testen.
Op_be	:	tijd die er voorbij gaat voordat de Centrale Post besluit om de bediening van de waterkering op te roepen.
Mo_be	:	tijd die het de bediening kost om op de waterkering te komen na een mobilisatiebevel.
res1,2,3	:	tijd die het de bediening kost om alle noodzakelijke voorbereidingen te treffen, lichten aandoen en zo.
elek	:	tijd die het kost om de waterkering elektrisch te sluiten.
prob	:	tijd die verstrijkt voordat de bediening de waterkering op een andere manier probeert te sluiten, als het elektrisch sluiten niet wil lukken.
hasl	:	tijd die het kost om de waterkering handmatig te sluiten.
Op_SD	:	tijd die het kost om de Storingsdienst te zeggen dat ze naar de waterkering moeten komen.
Ry_SD	:	tijd die het de monteurs van de Storingsdienst kost om op de waterkering te komen.
rept	:	de reparatietijd.
v1	:	Uniform op het interval [0,1] verdeelde stochast om een bepaald type storm te kunnen simuleren.
u1,u2	:	Uniform op het interval [0,1] verdeelde stochasten om een keuze tussen een beslissing om te stoppen of door te gaan te simuleren.
b1,b2,b3	:	Uniform op het interval [0,1] verdeelde stochasten om een keuze tussen een falen of juist werken van een systeem te simuleren.

De invoerparameters

De volgende parameters zorgen ervoor dat het algemene model toepasbaar is op elke willekeurige beweegbare waterkering.

- bslft* : de kans dat de Functionaris (of Centrale Post) een beslissing tot stoppen neemt, gegeven dat er een waarschuwing van de SVSD is geweest.
aangenomen waarde: 0.01, op basis van [Kla 95]
- fl_{el}* : faalkans van de elektrische bediening van de waterkering.
aangenomen waarde: 0.0001, op basis van [TAW 92]
- fl_{ha}* : faalkans van de handbediening van de waterkering.
aangenomen waarde: 0.0001, op basis van [TAW 92]
- fl_{rep}* : kans dat een reparatie niet mogelijk blijkt te zijn.
aangenomen waarde: 0.3, op basis van gesprek met hoofd Dienst Beheer Bruggen en Gemalen
- sl_{tpl}* : de waterstand waarop de kering in kwestie gesloten dient te worden.
aangenomen waarde: deze verschilt per beweegbare waterkering.

Interpretatie van de uitkomsten

De uitvoer van het computerprogramma bestaat uit een rapport van de gedane simulatie en een onzekerheidsverdeling voor elke formule die we gemaakt hebben. Op basis van beide gegevens kunnen we uitspraken doen over de verschillende faalkansen.

De totale faalkans, dus de kans dat de waterkering niet veilig waterkerend is bij een overschrijding van het sluitpeil, noemen we P_f . Aangezien de waterkering in twee toestanden kan zijn, schrijven we $P_{f,o}$ voor de onbemande sluis en $P_{f,b}$ voor de bemande sluis.

P_f kunnen we op twee verschillende manieren benaderen. Ten eerste geeft het gemiddelde van de van de onzekerheidsverdeling **bem** of **onb** een indicatie. Het resultaat van de simulaties bestaat namelijk uit een vector met alleen nullen en enen (booleaanse vector), het gemiddelde van de vector-waarden is dus gelijk aan het percentage enen in de vector. Aangezien een één in de vector betekent dat de waterkering veilig waterkerend is, geeft één min het gemiddelde een benadering van P_f .

Indien we denken dat bovenstaande procedure de faalkans niet nauwkeurig genoeg berekent, kunnen we nog een tweede manier gebruiken. Deze manier houdt in dat we de kwantiel-verdeling nader gaan bekijken. Wanneer we op basis van de eerste methode een indicatie hebben gekregen van de grootte van P_f , kunnen we een nieuwe simulatie uitvoeren en vragen naar de kwantielen rond deze waarden.

Voorbeeld:

Na de eerste uitvoer gaf **Unicorn** aan dat het gemiddelde van **onbsluis** 0.99 is. De booleaanse vector gaf bij percentiel 0.01 een nul en bij percentiel 0.02 een één te zien (perc. 0.01: 0.000 E+00, perc. 0.02: 1.000 E+00). Als eerste benadering voor de faalkans hebben we dus 0.01. Om een betere benadering te krijgen doen we een nieuwe simulatie, waarin we **User Defined Quantiles** vragen tussen de percentielen 0.01 en 0.02, neem bij voorbeeld percentielen 0.011, 0.013, 0.015, 0.017 en 0.019. De nieuwe uitvoer geeft dan bij voorbeeld tot en met percentielen 0.015 een 0 en vanaf percentiel 0.017 een één. De nieuwe, nauwkeurigere benadering voor P_f wordt dan 0.015. Uiteraard kunnen we deze werkwijze een aantal malen uitvoeren om zo een steeds nauwkeurigere benadering te krijgen.

Het niet veilig waterkerend zijn van de kering kan door vier verschillende oorzaken gekomen zijn.

- 1) De Centrale Post heeft de beslissing genomen om te stoppen. De kans hierop kunnen we benaderen door te kijken naar de onzekerheidsverdeling **CPbs**. De percentielen kunnen drie 'soorten' waarden aannemen: min oneindig ($-\infty$), plus oneindig ($+\infty$) en alle eindige waarden daar tussenin.

Min oneindig geeft aan dat de Centrale Post besloten heeft om te stoppen met de procedure en dat het water vervolgens inderdaad het sluitpeil niet heeft overschreden. Er is dus sprake van een terechte beslissing van de Centrale Post.

Plus oneindig geeft aan dat de Centrale Post besloten heeft om te stoppen met de procedure maar dat het water vervolgens het sluitpeil wel heeft overschreden. Er is dus sprake van een onterechte beslissing van de Centrale Post.

Alle **niet-oneindige waarden** geven weer dat de beslissing genomen is om door te gaan met de procedure. De waarden zelf geven de tijdsverdeling vanaf dat beslissingsmoment totdat de procedure in een van de eindtoestanden gekomen is.¹

We kunnen de kans op een foute beslissing benaderen door te kijken naar het percentage kwantielen in **Cpbs** met de waarde $+\infty$ (in **Unicorn** 1.7e38). Een nauwkeurigere schatting krijgen we weer door de **User Defined Quantiles** op te vragen.

De kans op een terechte beslissing wordt natuurlijk gegeven door het percentage in de onzekerheidsverdeling met de waarde $-\infty$.

- 2) De Functionaris heeft de beslissing genomen om te stoppen. De kans hierop kunnen we benaderen door te kijken naar de onzekerheidsverdeling **Besl**. De percentielen kunnen drie 'soorten' waarden aannemen: min oneindig ($-\infty$), plus oneindig ($+\infty$) en alle eindige waarden daar tussenin.

Min oneindig geeft aan dat de Functionaris of de Centrale Post besloten heeft om te stoppen met de procedure en dat het water vervolgens inderdaad het sluitpeil niet heeft overschreden. Er is dus sprake van een terechte beslissing.

Plus oneindig geeft aan dat de Functionaris of de Centrale Post besloten heeft om te stoppen met de procedure maar dat het water vervolgens het sluitpeil wel heeft overschreden. Er is dus sprake van een onterechte beslissing.

¹

De onzekerheidsverdeling **CPbsl** is dus een aggregatie van alle mogelijke paden met hun tijdsverdelingen.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Alle *niet-oneindige waarden* geven weer dat de beslissing genomen is om door te gaan met de procedure. De waarden zelf geven de tijdsverdeling vanaf dat beslissingsmoment totdat de procedure in een van de eindtoestanden gekomen is.

We kunnen de kans op een foute beslissing van de Centrale Post benaderen door te kijken naar het percentage kwantielen in **Besl** met de waarde $+\infty$ (in **Unicorn** 1.7e38). We weten al de faalkans voor een onterechte beslissing van de Centrale Post. De onzekerheidsverdeling **Besl** geeft de waarde $+\infty$ indien de Centrale Post of de Functionaris een onterechte beslissing genomen heeft. Verder weten we ook dat deze twee gebeurtenissen niet allebei kunnen optreden: als de Centrale Post een beslissing tot stoppen heeft genomen, kan dit alleen indien de Functionaris besloten heeft de Centrale Post te mobiliseren.

Dit houdt in dat de kans op een onterechte beslissing geschreven kan worden als:

$$P_{\text{beslissfout}} = P_{\text{beslissfout Functionaris}} + P_{\text{beslissfout Centrale Post}}$$

formule (3): beslissfout

Twee van de drie gegevens hebben we:

$$\begin{aligned} P_{\text{beslissfout}} &= \text{percentage } +\infty \text{ in } \mathbf{Besl}, \\ P_{\text{beslissfout Centrale Post}} &= \text{percentage } +\infty \text{ in } \mathbf{Cpbs}, \end{aligned}$$

zodat $P_{\text{beslissfout Functionaris}}$ gemakkelijk berekend kan worden.

- 3) Het is onmogelijk gebleken om de sluis elektrisch te sluiten, vervolgens was ook de handbediening niet bruikbaar en tot overmaat van ramp heeft de Storingsdienst geen reparatie uit kunnen voeren. Een indicatie van deze faalkans krijgen we door naar het percentage $+\infty$ in de onzekerheidsverdeling **slui** te kijken. Deze faalkans kan uiteraard weer gesplitst worden naar de sub-faalkansen elektrische bediening faalt (EBF), handbediening faalt (HBF) en reparatie faalt (REF).

De onzekerheidsverdelingen die we nodig hebben om aan deze sub-faalkansen komen zijn **hand**, **sd** en **slui**. Het percentage $+\infty$ in **hand** geeft direct de faalkans voor de handbediening. Evenzo geeft **sd** direct de faalkans van de reparatie. Wanneer we echter de faalkans van de elektrische bediening willen weten, zullen we meer moeite moeten doen.

De faalkans kunnen we weer schrijven als:

$$P_{\text{kering open}} = \mathbf{HBF} \cap \mathbf{REF} \cap \mathbf{EBF}$$

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

De onzekerheidsverdeling **slui** geeft op de inmiddels bekende manier $P_{\text{kering open}}$ (alle mogelijke sluitingsmanieren falen) en we weten de faalkansen voor **HBF** en **REF**. Wanneer we verder nog bedenken dat een waarde van $+\infty$ in **sluit** alleen kan voorkomen wanneer in ieder geval de elektrische bediening faalt, kunnen we een ondergrens voor de **EBF** geven. Het kan zo zijn dat de elektrische bediening gefaald heeft, maar dat het redundante systeem wel gewerkt heeft. In dat geval heeft **slui** dus een niet-oneindige waarde.

- 4) Er was simpelweg niet voldoende tijd om de kering te sluiten. Alle stappen worden goed doorlopen, beslissingen worden terecht genomen, maar de storm slaat toe voordat alle stappen doorlopen zijn. De kans hierop is natuurlijk groter bij een onbemande kering.

Of de procedure faalt als gevolg van tijdgebrek wordt alleen in de formule **bem** of **onb** bepaald. Wanneer we de bijdrage van tijdgebrek aan P_f willen weten, hoeven we dus alleen bovenstaande faalkansen van P_f af te trekken. Een waarde van $+\infty$ in de formule **bem** of **onb** geeft namelijk één van de vier mogelijke faalwijzen aan, er kunnen nooit meerdere faalwijzen tegelijk voorkomen.

$$P_{\text{tijdgebrek}} = P_f - P_{\text{beslisfout}} - P_{\text{kering open}}$$

7. Case study 1: De Coupure in Den Oever

Het Hoogheemraadschap Noorhollands Noorderkwartier voert het beheer over de Coupure in de Zuideroeverdijk te Den Oever. Den Oever ligt aan de rand van Wieringen net achter de dijk die het dorp en achterland beschermt tegen de Waddenzee. De dijk maakt deel uit van de zeeweringen in Noord-Holland. 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 die een frequentie van 1/4000 per jaar hebben.

Aan de Noorderhaven in Den Oever ligt buitendijks een haventerrein, dat bereikbaar is via twee dijkdoorgangen, 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 Zuideroeverdijk. De coupure vervult daarmee een uiterst belangrijke sociale functie als doorgang van het dorpscentrum naar de haven.

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

Sluitprocedure

Onder normale omstandigheden, dat wil zeggen bij waterstanden lager dan 1m90 boven NAP bij Den Helder, is de coupure in Den Oever geopend. Het gemiddeld hoogwater in Den Oever bedraagt 0m67 boven NAP. Indien de SVSD een **verwachte** overschrijding van het waarschuwingspeil meldt, geeft het districtshoofd dit door aan het Regionaal Alarmcentrum. Indiende **actuele** waterstand in Den Oever 1m90 boven NAP bedraagt, dient het districtshoofd van Den Helder de aangewezen opzichter naar de Coupure in Den Oever te sturen. Bij een verwachte overschrijding van de drempelhoogte (2m47 boven NAP) wordt de politie verzocht om assistentie bij het ontruimen van het buitendijkse havengebied.

Wanneer de buitenwaterstand 2m20 boven NAP bedraagt gaat de opzichter over tot sluiting van de coupure. De beslissing tot sluiten ligt ten alle tijden bij de opzichter. De sluiting van de deuren gebeurt met de hand. De schotbalken liggen een honderdtal meters verderop binnendijks opgeslagen, maar worden in het algemeen niet geplaatst. Dit zou moeten gebeuren met behulp van een vrachtwagen met kraan. Opgemerkt dient te worden dat men bezig is om de sluitingsprocedure te veranderen als gevolg van het feit dat de Stevinsluizen onbemand worden.

De simulatie in Unicorn

Om het programma **Unicorn** te leren kennen, is ervoor gekozen om uit te gaan van bestaande gegevens en deze vervolgens uit te breiden. De gegevens zijn afkomstig uit **Veiligheidsbeoordeling Coupure Den Oever** [Ton & Kos 93]. Een uitgebreide beschrijving van de gevolgde aanpak is te vinden in Bijlage B, hier zullen we alleen de gemaakte aannames en resultaten bespreken.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Als eerste stap hebben we de gegeven gebeurtenisboom vertaald naar een model in **Unicorn**. Aan de resultaten is te zien dat dit goed gelukt is. De in [Ton & Kos 93] berekende faalkans is $1.5 \text{ E-}02$, terwijl **Unicorn** een faalkans van $1.52 \text{ E-}02$ gaf.

Vervolgens hebben we ervoor gekozen om de gegeven faalkansen te vervangen door **onzekerheidsverdelingen**. Uitgangspunten bij de gemaakte aannames voor deze verdelingen is het handboek van Swain en Guttman [Swa & Gut 83]. De resultaten laten zien dat de mediaan van de faalkansverdeling iets groter is geworden, $1.80 \text{ E-}02$, en dat zo'n 90% van de verdeling zal liggen tussen 0.005 en 0.08.

Om te kijken hoe **Unicorn** afhankelijkheden verwerkt, hebben we vervolgens de aanname gemaakt dat alle schattingen uit één bron komen en er dus een afhankelijkheid in zit. Dit leidt tot een mediaan van de faalkansverdeling van $1.72 \text{ E-}02$, met zo'n 90% van de kansmassa tussen 0.004 en 0.087.

Als laatste hebben we een afhankelijkheidsboom opgesteld met verschillende latente variabelen, om afhankelijkheid van technische faalwijzen, menselijke faalwijzen en tijdsdruk te modelleren. Hier laten de resultaten van de faalkansverdeling een mediaan zien van $1.85 \text{ E-}02$ en een 90%-interval tussen de 0.004 en 0.078.

Conclusies

Het blijkt zeer wel mogelijk om op basis van een gebeurtenisboom of een of ander rapport op een zinvolle wijze een model te beschrijven. Dit model leent zich uitstekend voor een analyse met behulp van het computerprogramma **Unicorn**. Verder blijkt uit de gevonden resultaten dat het kunnen modelleren van afhankelijkheden tussen de verschillende gebeurtenissen zeker invloed heeft op de grootte van de faalkans, de orde verandert er zeer waarschijnlijk niet door. Wel blijkt dus dat de aanname van onafhankelijke gebeurtenissen een niet-conservatieve is, met andere woorden: *wanneer we de gebeurtenissen als onafhankelijk beschouwen, is het zeer wel mogelijk dat we een te lage schatting voor de faalkans krijgen !* Dit fenomeen kunnen we wellicht begrijpen, wanneer we bedenken dat er slechts één persoon de handelingen verricht. Een sluiswachter die de benodigde handelingen met een relatief hoge kans op falen uitvoert, zal dus bij alle handelingen een verhoogde faalkans hebben. De aanname van onafhankelijkheid zorgt ervoor dat we in principe steeds een andere sluiswachter hebben, die een handeling uitvoert. Een meer uitgebreide beschrijving van deze analyse is te vinden in bijlage B.

8. Case study 2: De Buitensluis in Schiedam

De Buitensluis in Schiedam bevindt zich aan de Havendijk, tussen de Voorhaven en de Buitenhaven. De sluis wordt gebruikt om scheepvaart van de Voorhaven naar de Buitenhaven te schutten, en vice versa. Hiervoor heeft de sluis buitendeuren en een dubbel stel onafhankelijk werkende binnendeuren. Bij normaal gebruik van de sluis wordt slechts één stel binnendeuren gebruikt, maar wanneer de sluis als primair waterkerend element gebruikt moet worden, is het noodzakelijk dat beide binnendeuren gesloten zijn. Daarnaast moet dan nog tussen de deuren een trapje gezet worden, dat dient om de druk op de deuren te verkleinen.

De sluis is bezet van 's ochtends half acht tot 's middags half zes, van maandag tot en met vrijdag. Tussen twaalf en één uur 's middags is de sluis gesloten. Op zaterdag wordt alleen 's ochtends gesloten. In het vaarseizoen, van 15 april tot en met 15 oktober, wordt ook voor de pleziervaart op bepaalde tijden op vrijdagavond en op zondag gesloten. Tijdens openingstijden zijn twee mensen aanwezig, die ook verantwoordelijk zijn voor de bediening van een aantal niet bij de sluis gelegen bruggen in Schiedam. Dit betekent dus dat, wanneer er buiten de openingsuren een noodsituatie optreedt (dreigend hoog water), er een bediening opgeroepen moet worden, wil de sluis veilig waterkerend gemaakt kunnen worden.

De sluis zelf bestaat uit de sluisolk van 80 meter lengte en bijna 9 meter breed, hierdoor kunnen de standaardschepen ruim passeren. Verder zijn er twee stel binnendeuren en één paar buitendeuren. De binnendeuren vormen een deel van hoofdwaterkering, vandaar dat deze deuren hoger zijn dan de buitendeuren! De elektrische bediening van de sluisdeuren bevindt zich geheel in de bedieningsruimte. In deze ruimte is een plattegrond van de sluis en haar directe omgeving aangebracht, met daarop de bedieningsschakelaars.

Het schutten werkt als volgt (van Schiedam naar zee):

Een schip nadert de sluis, de slagbomen worden vanuit de bedieningsruimte neergelaten en de brug wordt opgehaald. Dan krijgt het schip groen licht en vaart de sluisolk in, de brug wordt weer gesloten en ook de binnendeuren worden gesloten. Vervolgens begint het spuien totdat het niveau in de kolk gelijk is aan dat van de zee. Daarna worden de buitendeuren geopend en vervolgt het schip haar weg.

Het schutten van zee naar Schiedam gaat analoog. Dat de brug geopend moet worden, heeft geen invloed op het veilig waterkerend zijn van de sluis. De bediening van de brug is onafhankelijk van die van de sluisdeuren en ook bij een weigerende brug kunnen de sluisdeuren gewoon nog gesloten worden. Het schutten is dan echter onmogelijk.

Alle bedieningsfuncties zitten centraal op één bedieningspaneel. Wanneer de sluisdeuren gesloten moeten worden, gebeurt dit door (per stel deuren) één knop in te drukken.

De waterstand is af te lezen op vier waterstandsmeters. Deze geven de waterstand aan de kant van Schiedam weer, twee maal de waterstand in de kolk en de waterstand aan de zee kant. Er is dus aan beide zijden van de sluisolk een waterstandsmeter in de kolk en één daarvoor. Als extra voorzorgsmaatregel is er de mogelijkheid het trapje te zetten.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Een trapje zetten houdt in dat men de ruimte tussen de beide binnendeuren geheel vult met water, hierdoor worden de twee binnendeuren en de ruimte daartussen als het ware één dikke sluisdeur. De term trapje slaat dan op het feit dat het verschil tussen de waterniveaus dan een trapvorm heeft. Voordeel hiervan is dat er op die manier grotere krachten op de sluisdeuren opgevangen kunnen worden.

De waarschuwing voor hoog water komt binnen via de telefoon. De procedure zoals beschreven in **Menselijke en organisatorische bij het beheer van beweegbare waterkeringen** is volgens het personeel nog ongewijzigd.

De simulatie in Unicorn

We gebruiken twee modellen in **Unicorn**: het algemene model voor de onbemande waterkering en het algemene model voor de bemande waterkering. Het enige wat we hier aan toe moeten voegen, zijn de keringsafhankelijke parameters **sluitpeil**, **faalkans elektrische bediening**, **faalkans handbediening** en de **faalkans reparatie mislukt**. Verder zijn de **onzekerheidsverdelingen** nodig.

Het sluitpeil is de waterstand waarop de kering gesloten moet zijn. In Schiedam is dit peil 250 centimeter boven Normaal Amsterdams Peil. De onzekerheidsverdelingen hebben we gekregen door elicitering van twee sluiswachters en de havenmeester in Schiedam. De elicitering wordt beschreven in bijlage C.

Daarnaast hebben we door raadpleging van de database **DONAR** van het RIKZ een onzekerheidsverdeling voor de maximaal beschikbare tijd kunnen opstellen. We zullen nu de resultaten per toestand van de sluis presenteren.

De gegevens voor de Ontvanger hebben we gekregen door een telefoongesprek met de brandweer in Schiedam. De faalkans voor de reparatie is in overleg met het Hoofd afdeling Beheer bruggen en gemalen op 0.3 vastgesteld.

Resultaten onbemande sluis

We zijn begonnen met onafhankelijke BSE's en een onzekerheidsverdeling voor de Maximaal Beschikbare Tijd in Hoek van Holland. De gegevens, die we hebben over deze tijd, hebben namelijk betrekking op de basisstations. Op basis van de simulaties hebben we de volgende faalkansen berekend:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{onbl}} &= 0.99 \\ \max(\text{besl}) &< \infty \\ \max(\text{Cpbs}) &< \infty \\ \max(\text{slui}) &< \infty\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_f^{(\text{onbl})} &= 0.01 \\ P_{\text{besl} \text{ fout}} &= 0.0 \\ P_{\text{besl} \text{ fout CP}} &= 0.0 \\ P_{\text{kering open}} &= 0.0\end{aligned}$$

$$P_{\text{tijdgebrek}} = 0.01 - 0.0 - 0.0 = 0.01$$

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Uit deze resultaten blijkt ten eerste dat we geen nauwkeurige waarden kunnen geven voor de beslisfout en de kans op een open kering. Het stochastische aspect houdt namelijk ook in dat er een kans is, dat bij geen van de simulaties deze onderdelen fout gaan. We kunnen dan alleen zeggen dat de kans op een dergelijk falen ongeveer nul is. Daarnaast zien we dat het tijdgebrek zeer zeker een grote bijdrage levert aan de totale faalkans.

We doen nu een tweede simulatie waarbij we een uur bij de Maximaal Beschikbare Tijd hebben opgeteld. De overige aannames zijn gelijk gebleven. We zouden kunnen zeggen dat de sluis verplaatst is van Hoek van Holland naar Schiedam.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{onb}} &= 0.996 \\ \max(\text{besl}) &= \infty \\ \max(\text{Cpbs}) &= \infty \\ \max(\text{slui}) &< \infty\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_f^{(\text{onb})} &= 0.004 \\ P_{\text{beslisfout}} &= 0.003 \\ P_{\text{beslisfout CP}} &= 0.003 \\ P_{\text{kering open}} &= 0.0\end{aligned}$$

$$P_{\text{tijdgebrek}} = 0.004 - 0.003 - 0.0 = 0.001$$

Hier zien we dat de totale faalkans afgenomen is, hetgeen logisch lijkt omdat men meer tijd heeft gekregen om de waterkering te sluiten. Verder zien we ook dat een onjuiste beslissing van de Functionaris en/of Centrale Post een grote invloed heeft op de totale faalkans. Het tijdgebrek levert een aandeel van 25% in de totale faalkans.

Als derde simulatie hebben we de handelingen die uitgevoerd moeten worden door dezelfde persoon of groep van personen met elkaar gecorrelleerd. Dit levert het volgende op:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{onb}} &= 0.996 \\ \max(\text{besl}) &= \infty \\ \max(\text{Cpbs}) &< \infty \\ \max(\text{slui}) &< \infty\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_f^{(\text{onb})} &= 0.004 \\ P_{\text{beslisfout}} &= 0.003 \\ P_{\text{beslisfout CP}} &= 0.0 \\ P_{\text{kering open}} &= 0.0\end{aligned}$$

$$P_{\text{tijdgebrek}} = 0.004 - 0.003 - 0.0 = 0.001$$

Er is weinig verschil met de voorgaande simulatie, wel zien we dat de beslisfout nu bijna totaal voor rekening komt van de Functionaris. Ook hier is het aandeel van tijdgebrek 25% van de totale faalkans.

De vierde en laatste simulatie geeft voor iedere databron (de **sluiswachters** en de **havenmeester**) afhankelijkheden tussen de variabelen. Schattingen die zij hebben gemaakt zijn elk met een latente variabele verbonden. Deze latente variabele gebruiken we om de onderlinge correlatie te kunnen modelleren.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

$$\begin{aligned}\mu_{\text{onb}} &= 0.998 \\ \max(\text{besl}) &= \infty \\ \max(\text{Cpbs}) &= \infty \\ \max(\text{slui}) &< \infty\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_f^{(\text{onb})} &= 0.002 \\ P_{\text{beslisfout}} &= 0.0 \\ P_{\text{beslisfout CP}} &= 0.001 \\ P_{\text{kering open}} &= 0.0\end{aligned}$$

$$P_{\text{tijdgebrek}} = 0.002 - 0.001 - 0.0 = 0.001$$

We zien hier dat de totale faalkans gehalveerd wordt, maar dat de faalkans ten gevolge van tijdgebrek gelijk blijft. Dit houdt in dat de bijdrage van het tijdsgebrek 50% wordt. De inschatting van afhankelijkheid heeft dus een grote invloed op de resultaten.

Resultaten bemande sluis

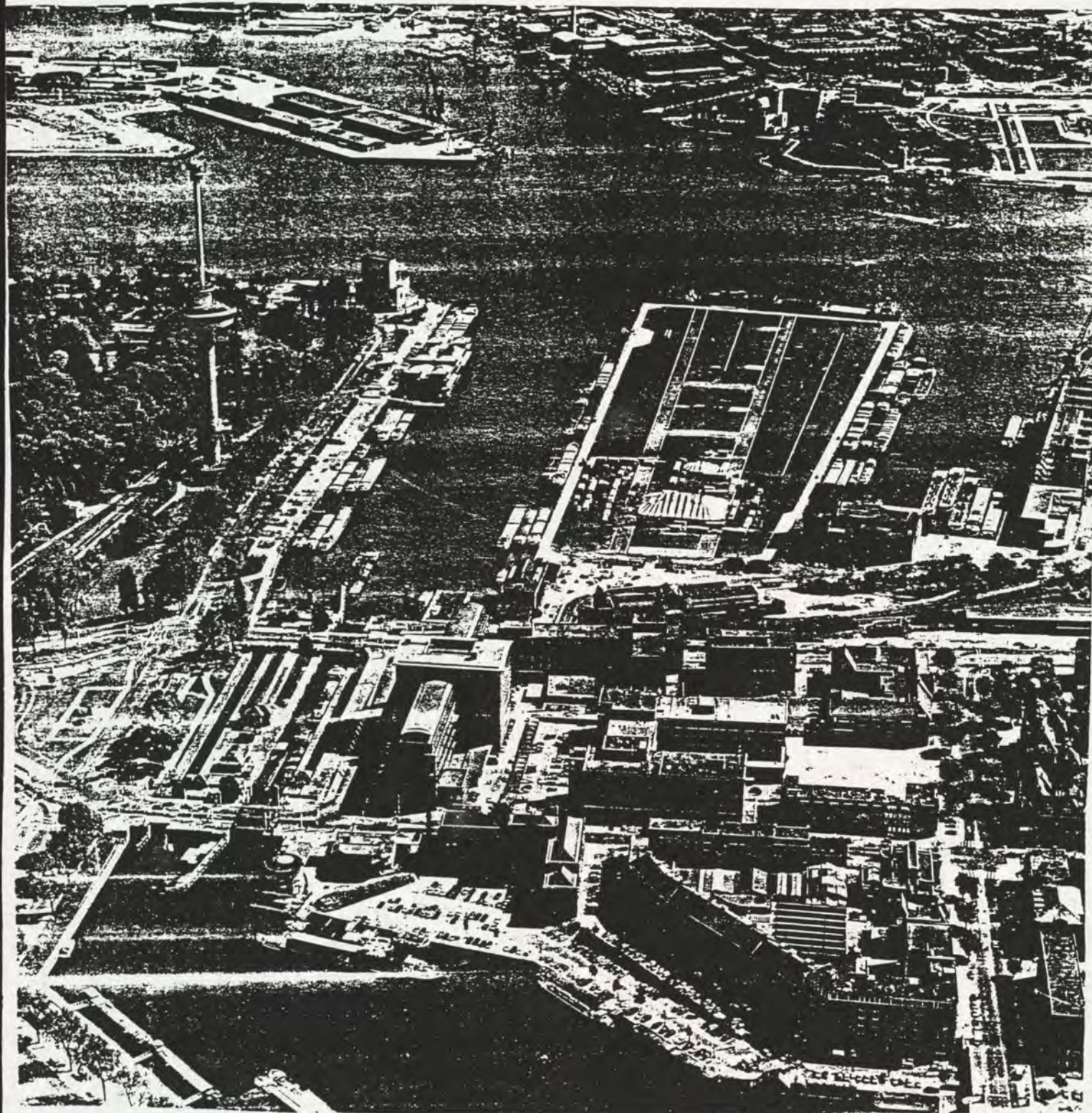
Hier hebben we achtereenvolgens dezelfde aannames gemaakt als bij de onbemande sluis. Het bleek dat in het geval van een bemande kering er genoeg tijd is om de waterkering te sluiten voordat het hoogwater bij de kering is. Er worden wel degelijk beslisfouten gemaakt, zo blijkt uit de simulatie, maar er zijn voldoende back-ups om deze fouten niet doorslaggevend te laten zijn. In vergelijking met de praktijk lijkt dit ook een zeer realistische uitkomst: wanneer er iemand op de sluis aanwezig is, zal deze tijdig kunnen waarnemen dat er actie ondernomen moet worden. Verder blijkt uit de analyse dat er altijd wel een systeem zal werken om de kering dicht te krijgen, in ieder geval ligt de orde van falen van het totale sluitsysteem een stuk lager dan de orde van de totale faalkans.

Conclusies

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat de schakels, die tussen de stormwaarschuwing van de SVSD en de uiteindelijke sluiting van de waterkering een zeer grote rol spelen in de veiligheid van de waterkering. Hoe minder schakels, hoe kleiner de kans op vertragingen en fouten en dus hoe groter de veiligheid van de waterkering. Wanneer we een grotere betrouwbaarheid voor de Buitensluis willen realiseren, zullen we deze dus òf langer van een bediening moeten voorzien, òf het aantal schakels in de waarschuwingsketen terug moeten brengen. In het bemande geval is er geen reden tot bezorgheid.

Er blijkt overduidelijk uit bovenstaande voorbeelden dat er ooit een keer voor zal kunnen komen, dat de opgeroepen bediening te laat bij de Buitensluis aanwezig is. Dit hoeft niet te komen doordat iemand te lang aarzelt met een beslissing, maar kan al komen doordat de verbindingen lang op zich laten wachten. In de stormomstandigheden, waarover we hier praten, is het maar al te waarschijnlijk dat de communicatie uit kan vallen. Men dient daar wel rekening mee te houden. Verder zal handbediening van de sluis in dit noodweer niet prettig zijn, afgevraagd moet dan ook worden wat de praktische betekenis hiervan is. Ook de aanrijtijd van de storingsdienst kan zeer lang worden wanneer hun weg naar de sluis bijvoorbeeld geblokkeerd is door omgevallen bomen.

9. Case study 3: De Parksluizen in Rotterdam



Afbeelding 9: de Parksluizen in Rotterdam

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

De Parksluizen in Rotterdam liggen vlak bij de Euromast en vormen de verbinding tussen de Parkhaven en de Coolhaven. De Parksluizen bestaan uit twee, naast elkaar gelegen, sluizen: Een grote schutsluis en een kleinere spuisluis. De schutsluis bestaat uit een sluiskolk van ongeveer 140 meter lang en 13 meter breed. Twee roldeuren sluiten de kolk af. Het verkeer wordt over twee bruggen geleid. Falen van deze bruggen heeft geen gevolgen voor een goede waterkerende functie.

De spuisluis speelt verder geen rol voor de toetsing van de waterkerende werking. De parksluizen zijn bijna altijd bemand door twee personen. Alleen op zondag is er geen bediening aanwezig, de sluis is dan wel in gesloten toestand achtergelaten.

De simulatie in Unicorn

Aangezien de Parksluizen alleen in bemande toestand zijn, gebruiken we alleen het bemande model. Handbediening is niet mogelijk volgens de sluiswachters. Wel is er de mogelijkheid dat de storingsdienst de roldeuren handmatig sluit. We hebben derhalve het model zo opgesteld dat er geen handbediening is en dat het dichttrekken van de deuren door de storingsdienst een onderdeel van de reparatie is.

Het model wordt dan:

```
bem:    il{<<,tpt,mbt}
storm: il{0.1,v1,1}*vloel+il{0.02,v1,0.1}*vloel2+il{0.002,v1,0.02}*
        » vloel3+il{0.0002,v1,0.002}*vloel4+il{0,v1,0.0002}*vloel5
tpt:    res3+slui+min{alrm,o_in+o_uit+be_in}
slui:    (1-il{0,b1,flsl})*elek+il{0,b1,flsl}*(prob+min{hand,sd})
hand:    il{0,b2,flha}*>>+(1-il{0,b2,flha})*2*hasl
sd:      op_sd+ry_sd+>>*il{0,b3,flrep}+(1-il{0,b3,flrep})*(rept+elek)
```

Na het interview met de sluiswachters hebben we besloten om de tak van de Centale Post uit het model te halen. Er is hier dus de beschikking over een waarschuwingsketen van SVSD via Ontvanger naar de Bediening of een actie van de Bediening op grond van het feit dat zij ziet dat het signaleringspeil overschreden is (bij de waterkering). De onzekerheidsverdelingen hebben we gekregen door elicitering van twee sluiswachters, de MBT is gelijk aan die in Schiedam. Aangezien er geen handbediening aanwezig is, zal de faalkans **flha** op één gezet worden.

Voor de gegevens met betrekking tot de reparatie gaven de experts aan dat er niet veel reparaties gedaan werden, en ook dat er de ene maand heel veel reparaties nodig konden zijn en de volgende helemaal geen. Uit het logboek van het afgelopen jaar maakten we de volgende schatting voor de faalkans:

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

In een week wordt er 6 dagen lang, 24 uur per dag geschut. Een schutting duurt ongeveer een kwartier, maar uiteraard zal er 's nachts minder geschut worden. Laten we zeggen gemiddeld is er één schutting per half uur. Dus per week wordt er $6 \times 24 \times 2 = 288$ keer geschut. Bij 52 weken per jaar levert dit 14.976 schuttingen op in één jaar. Uit het logboek van het afgelopen jaar zijn ongeveer 10 gebeurtenissen geteld, waarbij de storingsdienst opgeroepen werd.

Dit leidt dus tot een flit van $10/14.000 \approx 7e-4$.

De faalkans, gegeven in de Leidraad van de TAW [TAW 92], voor het weigeren van het bewegingswerk ligt tussen de $3e-5$ en $3e-3$, dus geeft bovenstaande waarde geen aanleiding om een andere faalkans aan te houden.

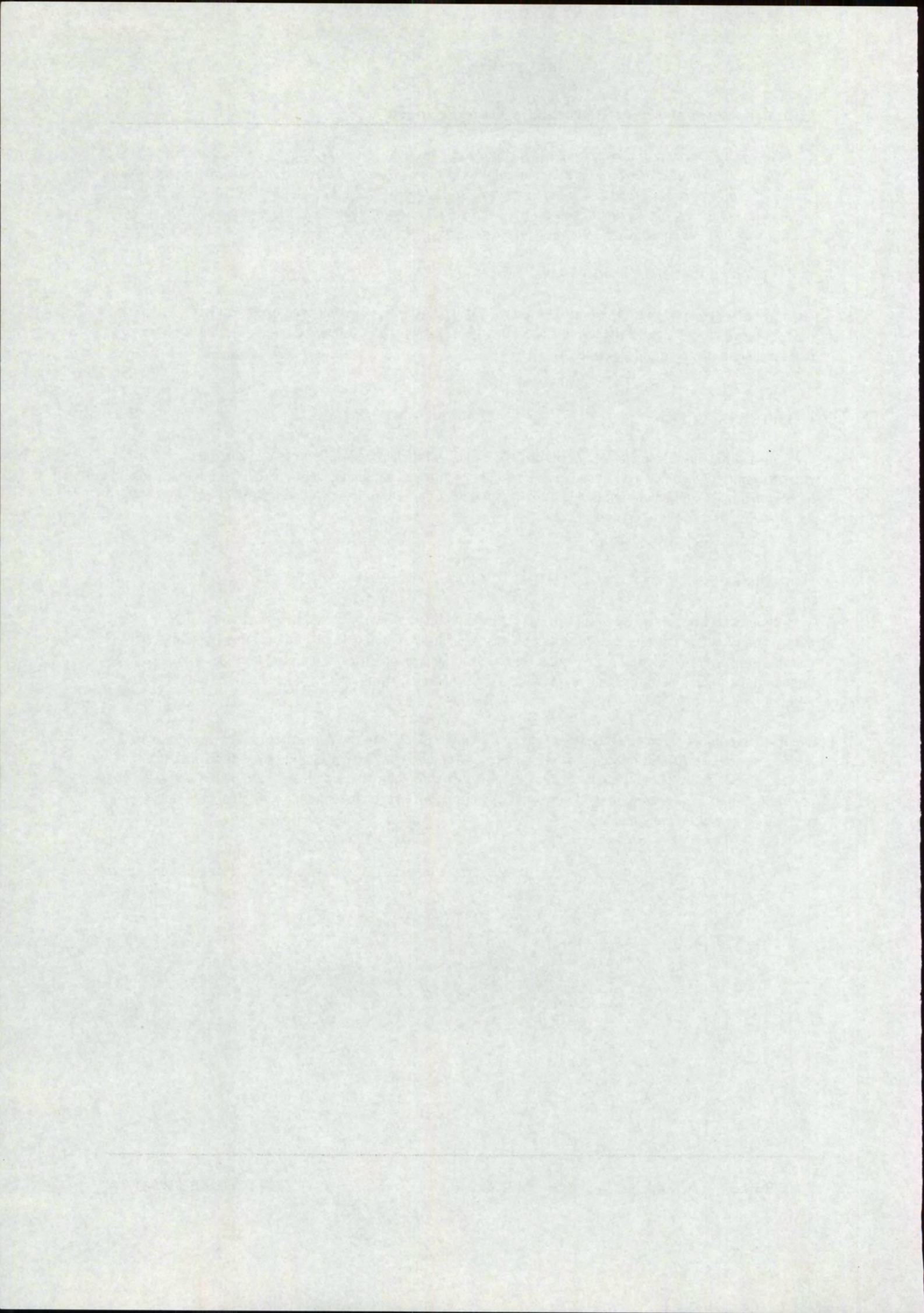
Resultaten

Over de resultaten kunnen we zeer kort zijn, alle vier de uitgevoerde simulaties gaven aan dat de sluitprocedure vlekkeloos verlopen is. Deze simulaties zijn qua aannames gelijk aan de simulaties voor de Buitensluis in Schiedam. Dit betekent in het bijzonder dat er blijkbaar voldoende tijd is om alle eventuele reparaties uit te voeren.

Conclusies

Veel conclusies kunnen we op basis van deze resultaten niet trekken, wel kunnen we stellen dat de betrouwbaarheid van de sluitprocedure zeer hoog is, wanneer er een permanente bemanning is, iets wat nauwelijks verwondering zal wekken. De flexibiliteit van het Unicorn script is zeer groot, we kunnen inderdaad door simpelweg de faalkans van de handbediening op één te zetten, deze buiten beschouwing laten.

We hadden ook het algemene model kunnen gebruiken in plaats van een aangepast model, in dat geval hadden we res1 en res2 dezelfde invoerfile moeten geven als res3. Verder hadden we dan de beslisfout op één moeten zetten. Dit leidt dan tot een oneindige waarde voor besl. Eventueel kan dit een min oneindige waarde opleveren, maar dan wordt het sluitpeil niet overschreden en in dit geval is er dus geen bijdrage aan de faalkans.



10. Vergelijking van de faalkansen

In dit afstudeerverslag is berekend wat de faalkans is van de algemene sluitprocedure van de TAW voor de Buitensluis in Schiedam en voor de Parksluizen in Rotterdam. We zullen nu een vergelijking maken met de faalkansen, die met behulp van de standaard beoordelingsmethode gemaakt zijn. Deze standaard beoordelingsmethode bepaalt de kans op het niet tijdig gesloten zijn van de beweegbare waterkering (P_{ns}). Voor de uitwerking van de standaard beoordelingsmethode verwijzen we naar bijlage C.

Dit zijn de scores voor de Buitensluis in Schiedam:

$$E_1 = 5\frac{1}{2}$$

$$E_2 = 3$$

$$E_3 = 2$$

$$E_4 = 2\frac{1}{2}$$

$$E = \min\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$$

$$P_{ns} = 10^{-E} = 10^{-2}$$

En dit zijn de scores voor de Parksluizen in Rotterdam:

$$E_1 = 4$$

$$E_2 = 5$$

$$E_3 = 2$$

$$E_4 = 2$$

$$E = \min\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$$

$$P_{ns} = 10^{-E} = 10^{-2}$$

De faalkans van de beweegbare waterkering wordt verder nog bepaald door het aantal keren per jaar dat de kering moet worden gesloten, als gevolg van een overschrijding van het sluitpeil (n_j).

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. Dit benaderen we door:

$$n_j = \text{aantal vragen per jaar (aantal/jaar)}$$

$$h = \text{buitenwaterstand (m)}$$

$$h_f = \text{faalpeil (m)}$$

$$f_{norm} = \text{normfrequentie (aantal/jaar)}$$

$$n_j \approx N(h > h_f) \cdot f_{norm}$$

formule (4): vragen per jaar

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Het faalpeil is voor de Buitensluis 2m20 NAP⁺ en voor de Parksluizen 2m55 NAP⁺. De overschrijdingsfrequenties zijn respectievelijk eens per vier jaar en eens per tien jaar. De normfrequenties zijn wettelijk bepaald en zijn voor beide waterkeringen 1/10.000 per jaar. Dit levert in totaal de volgende faalkansen op:

Kering	P_{ns}	n_i	P_{fa}
Buitensluis	0.01	0.2499	2.5 E-03
Parksluizen	0.01	0.0999	1.0 E-04

In dit verslag wordt steeds een bepaalde waterstand gesimuleerd. Deze waterstanden bereiken globaal waarden van 1m95 NAP⁺ tot 5m00 NAP⁺. Door de gekozen kansverdeling over de stormen kunnen we een vergelijking maken met de frequentie van optreden van de soort storm. Een hoge vloed heeft in het model een kans van optreden van 0.9 en dit komt precies overeen met een frequentie van vijf per jaar.

We benaderen met de gekozen modellering dus zeer goed het waterverloop gedurende een jaar. De P_f die benaderd wordt door de simulatie in Unicorn, kunnen we dus rechtstreeks vergelijken met de P_{fa} die de TAW hanteert.

De met behulp van Unicorn gevonden resultaten voor de onbemande Buitensluis geven een faalkansorde van -3 ($P_{fo} = 10^{-3}$). De resultaten voor de bemande Buitensluis en de Parksluizen geven aan dat de faalkans verwaarloosbaar is ($P_{fb} = 0.0$). Hieruit volgt dus dat de resultaten van het hier beschreven model zeker vergelijkbaar zijn met die van de standaard beoordelingsmethode. De invloed van het tijdsgebrek is echter niet zichtbaar in de standaard beoordelingsmethode, terwijl deze faalkans zeker dezelfde orde heeft (-3).

Totale faalkans Kering	standaard beoordelingsmethode	simulatie 1	simulatie 2	simulatie 3	simulatie 4
Buitensluis -onbemand	2.5 E-03	1.0 E-02	4.0 E-03	4.0 E-03	2.0 E-03
Buitensluis -bemand	2.5 E-03	0.0	0.0	0.0	0.0
Parksluizen	1.0 E-04	0.0	0.0	0.0	0.0

11. Conclusies & Aanbevelingen

In dit verslag hebben we een alternatief model gepresenteerd voor de standaard beoordelingsmethode van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Deze standaard beoordelingsmethode geeft op een eenvoudige wijze de faalkans van de beweegbare waterkering weer. Het in dit verslag beschreven alternatieve model geeft voor de bezochte waterkeringen een zelfde orde van fout. We kunnen de beide modellen dus met elkaar vergelijken.

Het alternatieve model is opgezet aan de hand van de **algemene sluitprocedure** van de TAW. Het alternatieve model is bewust zo algemeen mogelijk gehouden, zodat dit model voor elke beweegbare waterkering toegepast kan worden. Men kan volstaan met het invoeren van enkele keringsafhankelijke parameters, zoals het sluitpeil van de te toetsen waterkering en de aanwezigheid van een redundant sluitsysteem. De onzekerheidsverdelingen moet men verkrijgen door interviews met de bediening van de waterkering. Uit de resultaten blijkt dat het alternatieve model flexibel genoeg is: twee sluizen in de regio Rotterdam zijn beschouwd en de parameters voor deze waterkeringen bleken snel en gemakkelijk in het model ingevoerd te kunnen worden.

Het standaard beoordelingsmodel houdt geen rekening met het tijdsaspect. Hiermee bedoelen we de vraag of er wel voldoende tijd beschikbaar is om alle handelingen uit te voeren. Dit was de belangrijkste reden om een alternatief model op te stellen. Doel was te bepalen in hoe verre het tijdsaspect van belang is bij de sluitprocedure. Uit de berekeningen met het alternatieve model blijkt dat het tijdsaspect zeker niet verwaarloosd mag worden. Het falen als gevolg van tijdgebrek levert een aandeel aan de totale faalkans van zo'n 25%.

Hoewel het moeilijk is om op een even simpele manier het tijdsaspect in de standaard beoordelingsmethode te verwerken, willen we toch een aanbeveling in die richting doen. De standaard beoordelingsmethode heeft als definitie van falen **'buitenwaterstand hoger dan open keerpeil en afsluitmiddel niet tijdig afgesloten'**. Vervolgens wordt het faalmechanisme **afsluitmiddel niet tijdig afgesloten** verder uitgesplitst in vier sub-faalmechanismen (zie bijlage C). De vragenlijst geeft per sub-faalmechanisme een benadering voor de orde van de faalkans. Het tijdsaspect wordt hier niet meer teruggevonden. Grootste punt van kritiek op de standaard beoordelingsmethode blijft dat de gebruikte waarden (de faalkansorden) niet (goed) onderbouwd zijn.

Uit de berekeningen volgt dat een waarschuwing voor een verhoogd waterpeil ongeveer zes uur voor het echte hoogwater gegeven wordt. Het is dus redelijk om te stellen, dat wanneer de totale sluitprocedure langer dan zes uur duurt, de totale faalkans toeneemt met zo'n 25%. Het lijkt ons zinnig om een vijfde sub-faalmechanisme in te voeren voor het tijdsaspect. We zouden dan een vragenlijstje kunnen maken met de volgende scores:

Is de waterkering permanent bemand ?

indien ja: $a:=5$, einde scoretabel

indien nee: $a:=3$

Duurt het doorgeven van de waarschuwing voor verhoogd water aan de Functionaris:

- | | | |
|----|----------------------------|--------------|
| 1) | korter dan 15 minuten | $a:=a - 0.5$ |
| 2) | tussen de 15 en 60 minuten | $a:=a - 1$ |
| 3) | langer dan 60 minuten | $a:=a - 1.5$ |

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

Duurt het oproepen van de Centrale Post en de Bediening samen:

- | | | |
|----|----------------------------|--------------|
| 1) | korter dan 15 minuten | $a:=a - 0.5$ |
| 2) | tussen de 15 en 60 minuten | $a:=a - 1$ |
| 3) | langer dan 60 minuten | $a:=a - 1.5$ |

NB. De hier voorgestelde scores zijn subjectief en alleen gebruikt om op eenvoudige wijze in het standaard beoordelingsmodel te kunnen inpassen. Voor goede scores zal er beter naar de onderbouwing van deze oordes gekeken moeten worden.

De berekening van de totale faalkans blijft gelijk, alleen nemen we nu het minimum over vijf sub-systemen. Door bovenstaande getallen hebben we ervoor gezorgd dat een bemande waterkering een zeer kleine faalkans voor tijdgebrek heeft (orde -5). Een onbemande waterkering heeft in principe een faalkans als gevolg van tijdgebrek van min drie, maar wanneer de verbindingen slecht zijn kan, deze orde teruggebracht worden. Het is mogelijk om uit bovenstaande vragenlijstje een orde van nul te krijgen, wanneer beide tijden langer dan een uur duren. Het lijkt ons echter dat wanneer men in de praktijk merkt dat de waarschuwing al lang onderweg is, men meer haast heeft met de rest van de procedure.

Uit de verschillende gesprekken met de sluiswachters bleek overduidelijk dat de vaste bediening zeer goed wist wat er gebeuren moet in het geval van dreigend hoogwater. Het probleem ligt meestal in het feit dat reserve-personeel meestal niet zo goed op de hoogte is. Procedures zijn nog steeds niet in voldoende mate aanwezig op de waterkeringen. Iedereen heeft het gevoel dat de situatie wel mee zal vallen. Het is zeer wel mogelijk dat de kwestie tijdgebrek op een gegeven moment leidt tot het falen van de beweegbare waterkering. Het is ook denkbaar dat men te veel vertrouwd op de 'grote' stormvloedkeringen. "Zo lang de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg nog niet dicht is, zal het hier ook nog niet zo'n vaart lopen." Dit kan een vals gevoel van veiligheid creëren, er zijn waterpeilen waarbij de sluizen in Rotterdam en Schiedam wel dicht moeten, maar de SVK Nieuwe Waterweg nog niet.

Aanbeveling is om de bediening nogmaals bewust te maken van de taak zij hebben en duidelijke procedures op de waterkeringen op te hangen. Het moet zeer goed mogelijk zijn om als rampenoefening een scenario te bedenken, waarbij vrij laat gewaarschuwd wordt voor een extreme stormvloed en dat vervolgens ook bij de mobilisatie allerlei dingen mis gaan. Het is algemeen bekend dat men van de fouten het meest leert, laten we alleen zorgen dat deze fouten aan het licht komen tijdens oefeningen en niet tijdens noodsituaties.

Een bemande waterkering is een stuk veiliger dan een onbemande waterkering. Uiteraard blijft het risico van inundatie, maar een al op de kering aanwezige bediening kan direct inspringen bij noodsituaties en zo een aanzienlijke bijdrage aan de veiligheid leveren. In dit licht moet de huidige tendens om steeds meer waterkeringen te automatiseren (dus onbemand te maken) zeker zorgvuldig worden beschouwd. Wanneer een machine faalt, doet deze echt niets meer, wanneer een mens faalt zal hij zeker proberen om de fout te herstellen.

Ten slotte willen we nogmaals het belang van het tijdsaspect onderstrepen. In de algemene sluitprocedure hebben we bij iedere stap te maken met dit tijdsaspect: de tijd voordat de waarschuwing op de juiste plek is, de tijd voor een reparatie, enzovoorts. Het huidige beoordelingsmodel houdt onvoldoende rekening met dit aspect.

Literatuurlijst

- [a84A 95]: **Collegedictaat Risk Analysis**, Roger Cooke, TU Delft TWI-SSOR, maart 1995.
- [Gem 94]: **Gemiddelde Getijkromme 1991.0**, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, afdeling Informatiesystemen, Den Haag 1994.
- [Hei & Baa 92]: **Menselijke en organisatorische factoren bij het beheer van beweegbare waterkeringen**, W. Heins, R.C.M.S. Baaijens, in samenwerking met L.H.J. Goossens, TU Delft WTM-TBB, september 1992.
- [Kla 95]: **Onderzoek naar de betrouwbaarheid van het sluitingsproces van beweegbare waterkeringen**, Daniëlle Klaassen, TU Delft, faculteit Civiele Techniek vakgroep Waterbouwkunde, Delft, september 1995.
- [Lam 93]: **Stormvloeden en menselijk falen**, lezing van H. Lambooy, PM 93-61, 27 september 1993.
- [Mee &... 94]: **Betrouwbaarheidsbeoordeling van de sluiting van beweegbare waterkeringen**, ir. M.T. van der Meer, ir. S.H.L.L. Gruyters, prof.ir. A.C.W.M. Vrouwenfelder, ing. H. Schelfhout, PM 94-50, 30 augustus 1994.
- [Rap 94]: **Rapport Risico-analyse**, TNO 94-CON-RO120, PM 94-05, januari 1994.
- [RWS 67]: **Gedenkboek twee eeuwen Waterstaatswerken**, Rijkswaterstaat, Muller's drukkerij Amsterdam, 1967.
- [RWS 95]: **Jaarbericht Rijkswaterstaat 1994**, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, mei 1995.
- [SR 61..72]: **Verslag van de stormvloed van**, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; het betreft hier de rapporten SR61, SR62, SR64, SR65, SR67, SR68, SR69, SR70, SR71 en SR72 (periode 14 februari 1989 tot en met 14 maart 1994).
- [SVSD 90]: **Algemene beschrijving SVSD (interim)**, rijkswaterstaat dienst getijdewateren, februari 1990.
- [Swa & Gut 83]: **Handbook of Human Reliability Analysis with emphasis on Nuclear Power Plant Applications - Final Report**, A.D. Swain en H. E. Guttmann, NUREG/CR -1278, augustus 1983.
- [TAW 92]: **TAW Leidraad Kunstwerken en objecten in, op en nabij waterkeringen**, P. van Gestel, H. E. Nieboer, A. Vrouwenfelder en A. Wubs, B-92-1047, 2^e volledige conceptversie, december 1992.

Onzekerheidsanalyse van Beweegbare Waterkeringen

- [TAW 95]: **TAW: jaarverslag 1994**, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1995.
- [TNO 93]: **De voordelen van een probabilistische benadering**, TNO: Memorandum 93-CON-M126/VRA/MNL, PM 93-77, 26 augustus 1993.
- [Ton & Kos 93]: **Veiligheidsbeoordeling Coupure Den Oever**, *ir. M.R. Tonneijck en ir. M.J. Koster*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, rapport W-DWW-93270, 12 november 1993.
- [Uni 92]: **Unicorn user's manual**, TU Delft TWI-SSOR, februari 1992.
- [vak 91]: **Veiligheidsbenadering Waterkeringen**, *vakgroep Risico-Analyse*, Rijkswaterstaat Bouwdienst en Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Utrecht, januari 1991.
- [Ver & Boc 94]: **Kan rampbestrijding een rol spelen in het dijkverbeteringsprogramma ?**, *F.J. Verheij en P. Bockholts*, PM 94-57, 9 september 1994.

Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
van der Burghweg 1
2628 CS Delft

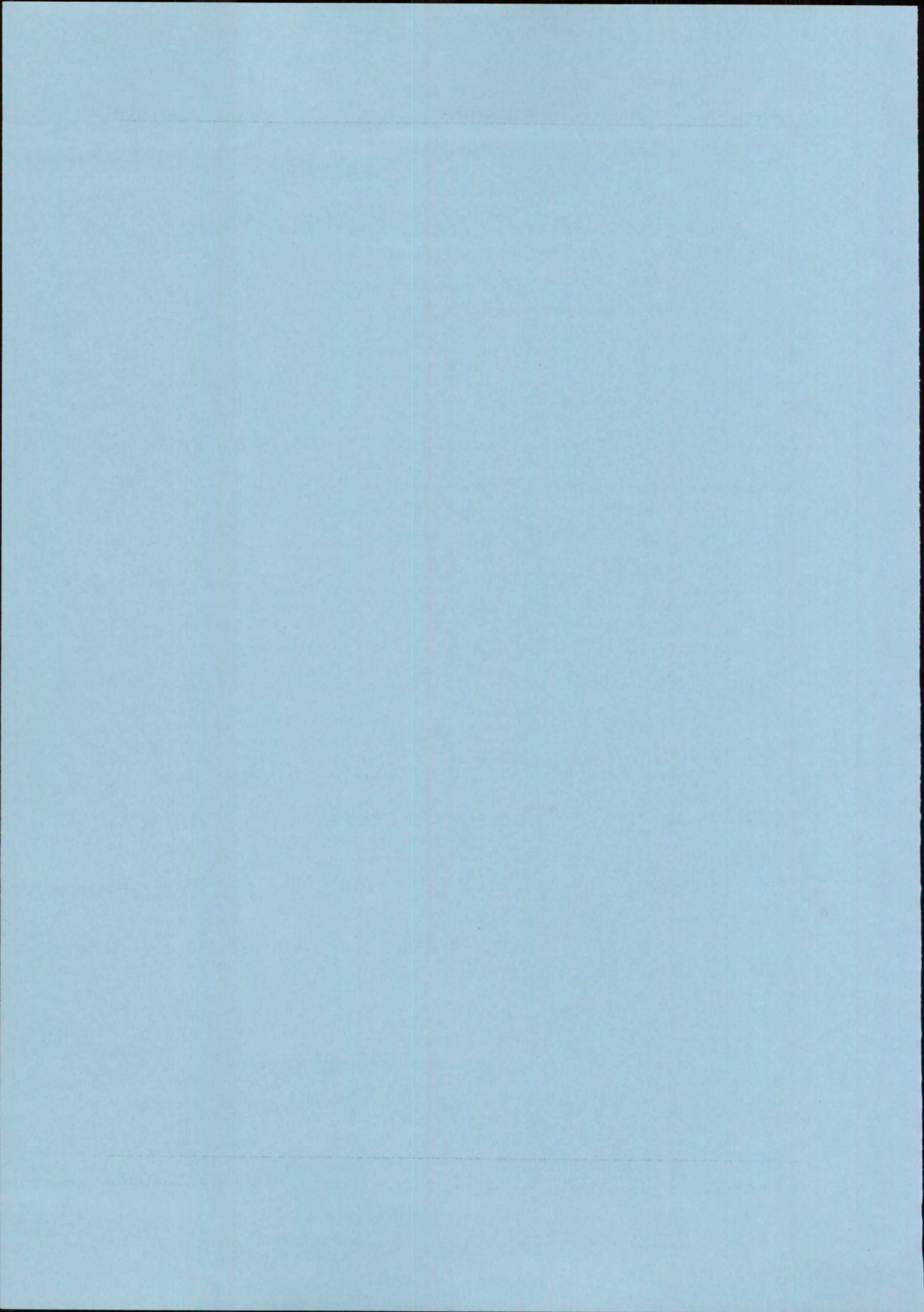


februari 1996

***Onzekerheidsanalyse
van
Beweegbare Waterkeringen***

(Bijlage A: Unicorn)

Peter Blanker
Vlinderveen 530
3205 EN Spijkenisse
0181 - 635035

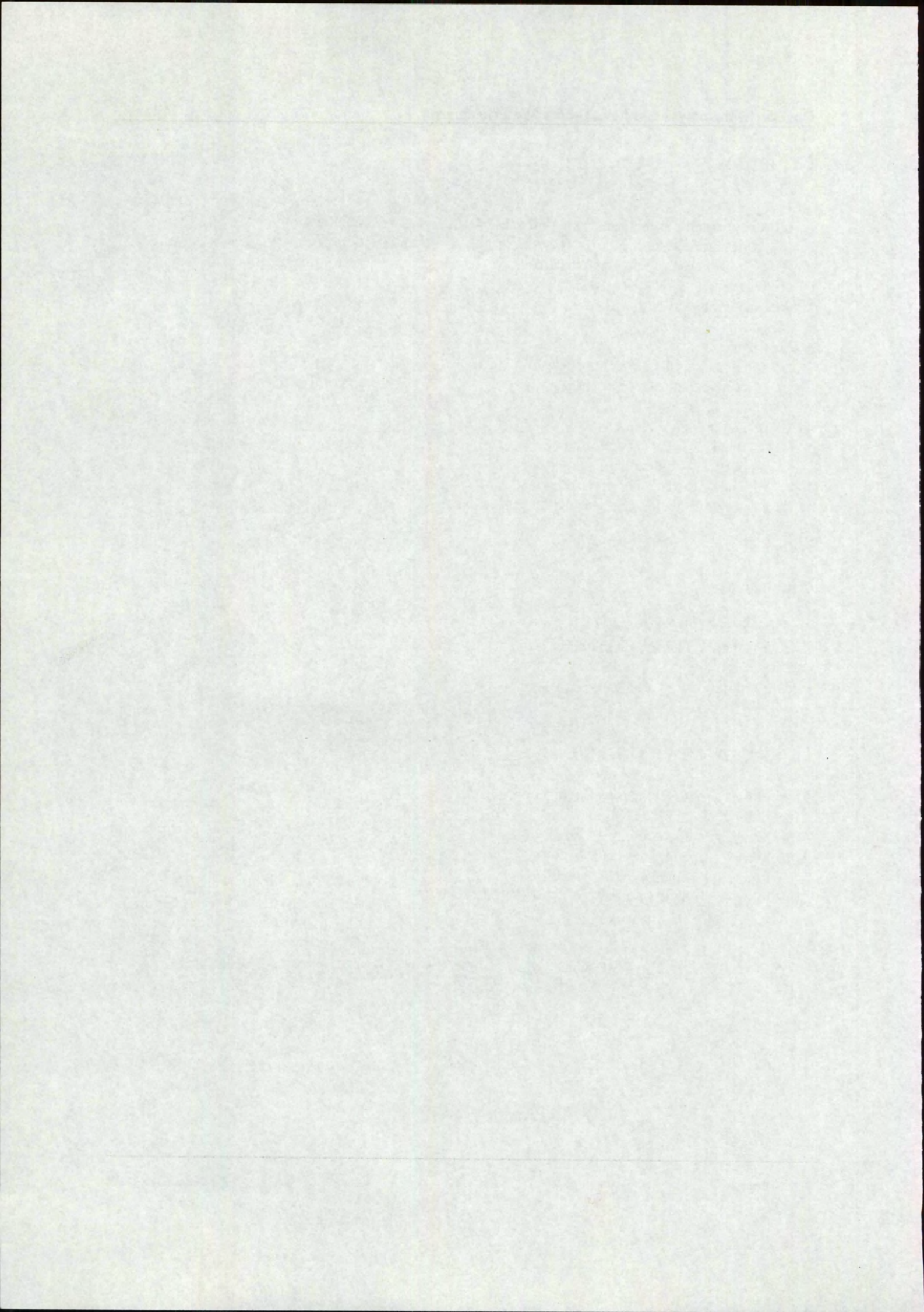


Bijlage A: Unicorn

1. Achtergrond en beschrijving van Unicorn	2
Onzekerheid	2
Globale beschrijving van Unicorn	2
2. Foutenbomen	4
3. Formules	7
Constantes en speciale functies	7
Het invoeren van een script	9
4. Afhankelijkheden	12
Afhankelijkheidsbomen	13
Voorbeeld Foutenboom - experts	15
Enkele waarden voor afhankelijkheid	15
Nauwkeurigheid van de resultaten	16
5. Simulatie	18
6. Rapportage	20
7. Sluitproces TAW/DWW in Unicorn	21
Het door Unicorn gegenereerde rapport	23
Literatuurlijst	33

Lijst van afbeeldingen

Afbeelding 1: voorbeeld van een foutenboom	4
Afbeelding 2: sluitpeil	8
Afbeelding 3: graaf en afhankelijkheidsboom	13
Afbeelding 4: dependence tree	15
Afbeelding 5: de afhankelijkheidsgetallen	15
Afbeelding 6: algemeen sluitproces TAW/DWW	21



1. Achtergrond en beschrijving van Unicorn

De naam **Unicorn** is een acroniem van *UNcertainty analysIs with CORrelationNs*, hetgeen we kunnen vertalen door het analyseren van onzekerheden, rekening houdend met afhankelijkheden. Dit computerprogramma is ontwikkeld door de faculteit Wiskunde en Informatica van de Technische Universiteit Delft. Het doel van Unicorn is om een inzicht te geven in de onzekerheid van de modeluitvoer, veroorzaakt door de onzekerheid in de data. Deze bijlage laat zien hoe **Unicorn** gebruikt is bij de onzekerheidsanalyse van beweegbare waterkeringen en heeft de vorm van een stap-voor-stap handleiding.

Onzekerheid

Wanneer we willen weten hoe lang een postbode over zijn bestellersronde doet (de bestellerstijd), kunnen we deze tijd uiteraard opmeten. We kijken dan hoe laat hij bij het voorsorteercentrum wegfietst en ook hoe laat hij weer terugkomt. De verstreken tijd geeft dan het gezochte antwoord. Toch zijn er een aantal kanttekeningen te plaatsen bij deze benadering. Er zijn namelijk een aantal gebeurtenissen, die invloed hebben op de bestellerstijd en die per meting kunnen verschillen. De hoeveelheid post kan van dag tot dag verschillen, zodat de postbode meer of minder huizen langs moet gaan. Het weer kan slecht zijn, zodat de postbode besluit om een tijdje te schuilen.

Indien we bovenstaande invloeden willen meenemen, dan moeten we het begrip **onzekerheid** introduceren. We kunnen schrijven:

meting = waarde + onzekerheid

ofwel: $Y = X + \epsilon$

De grootte van de onzekerheid geeft dan aan in hoeverre afwijkingen van de representatieve waarde kunnen optreden. Zo zal een ϵ gelijk aan 0 aangeven dat er geen meetfout is gemaakt, U bent er zeker van dat de meting de gezochte waarde is. Om deze onzekerheid te kunnen modelleren, gebruiken we de subjectieve kansrekening.

Toegepast op het voorbeeld van de postbode, kunnen we zeggen dat de bestellerstijd een waarde heeft van 75 minuten en een onzekerheid van 15 minuten. Wanneer we dit vertalen, betekent dit, dat we inschatten dat bovenstaande postbode ruwweg tussen één en anderhalf uur over zijn bestellersronde doet.

Globale beschrijving van Unicorn

Het computerprogramma **Unicorn** is te koop bij AEA Technology. Het bestaat uit een shell, waaruit verschillende applicaties opgestart kunnen worden. Om Unicorn op te starten, moet in de directory **Unicorn Unicorn** ingetypt worden en de ENTER-toets ingedrukt worden.

De toetsen die men in **Unicorn** moet gebruiken zijn:

- | | | |
|----------------|---|---|
| Cursor-toetsen | : | ←, →, ↑, ↓ om de oplichtende balk (zwart en rood) tussen de menu-opties te bewegen. |
| ENTER | : | heeft het effect van "de opgelichte knop indrukken" en zorgt voor het uitvoeren van de gekozen optie. |
| ESC | : | heeft het effect van "de opgelichte knop uitdrukken" en doet het programma terugkeren naar de vorige optie. |

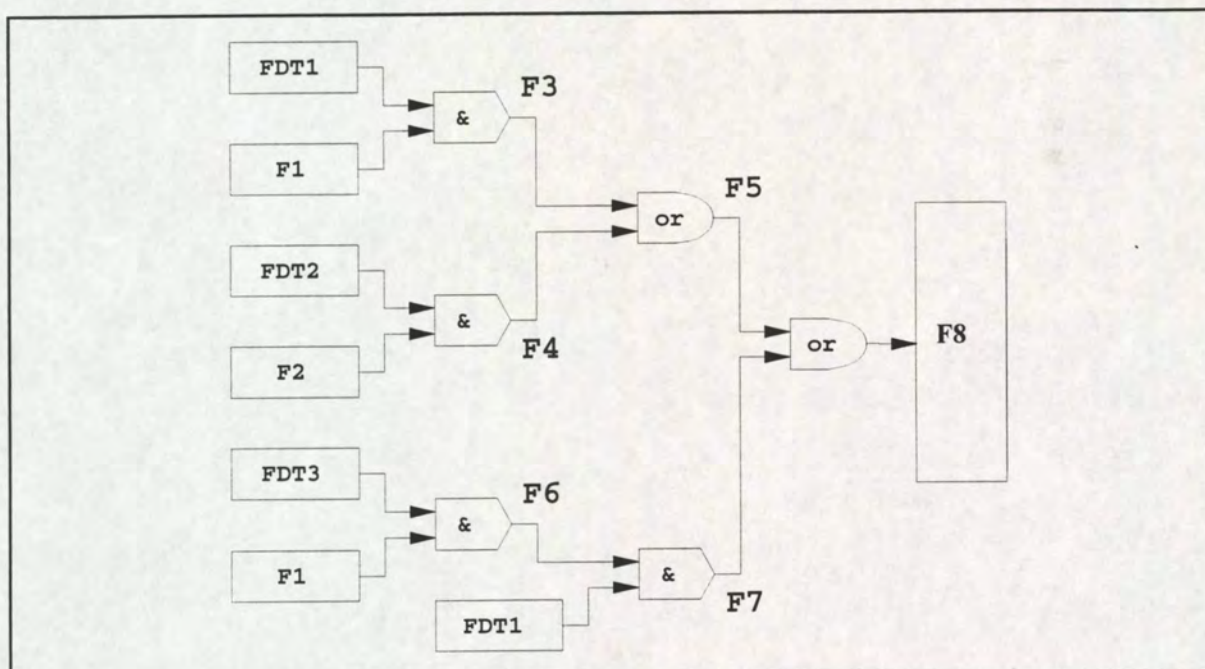
Binnen **Unicorn** zijn de volgende opties beschikbaar:

- | | | |
|--------------------|---|---|
| Fault trees | : | het opstellen van foutenbomen, met behulp van AND- en OR-poorten. |
| Formulas | : | het opstellen van formules, waar mogelijkheden zijn voor speciale bewerkingen, zoals MINIMUM, MAXIMUM, goniometrische functies, enzovoorts. |
| Dependency | : | het modelleren van afhankelijkheden tussen verschillende gebeurtenissen. |
| Process | : | het menu waarin de eigenlijke simulatie uitgevoerd wordt. |
| Report | : | het maken van een verslag van de resultaten. |

2. Foutenbomen

Ga met de cursortoetsen naar 'model', druk op ENTER. Vervolgens naar 'Fault tree' en weer ENTER. U ziet nu een menu met onder andere de onderdelen 'Input Basic Event' en 'Input Fault Tree'.

Aan de hand van een voorbeeld zullen we de optie **Fault trees** bespreken. Beschouw hiervoor de volgende foutenboom:



Afbeelding 1: voorbeeld van een foutenboom

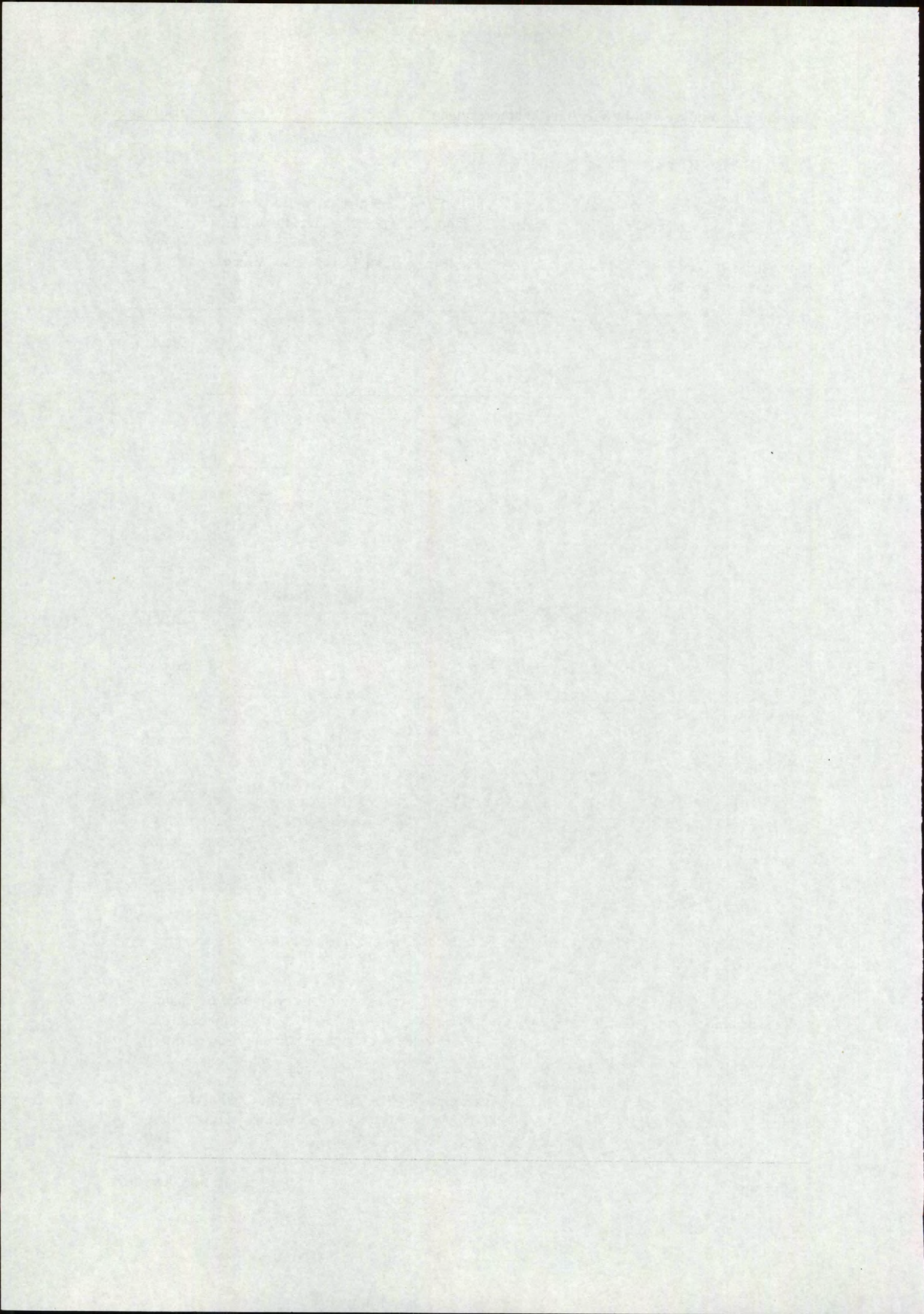
In Booleaanse notatie:

$$\begin{aligned}
 F3 &= F1 \bullet FDT1 \\
 F4 &= F2 \bullet FDT2 \\
 F5 &= F3 + F4 \\
 F6 &= F1 \bullet FDT3 \\
 F7 &= FDT1 \bullet F6 \\
 F8 &= F5 + F7
 \end{aligned}$$

Hierbij geeft een ' \bullet ' een AND-poort aan en een '+' een OR-poort. De **basic events** (BSE's) zijn hier F1, F2, FDT1, FDT2 en FDT3.

We moeten nu eerst de BSE's van een onzekerheidsverdeling voorzien. In Unicorn kiezen we nu het onderdeel 'Input Basic Events'. We krijgen nu de keuze tussen 'Make a new file' en 'Change an old file'. Aangezien we nog geen andere files hebben, kiezen we de eerste optie. Unicorn vraagt nu om een naam in te tikken, tik dus in: **tree** en ENTER.

Vervolgens krijgen we een lijstje in beeld met bewerkingen op BSE's. We kiezen nu 'Add basic events'. Unicorn kan 50 BSE's verwerken. In het voorbeeld hebben we vijf verschillende BSE's, dus



drukken we vijf keer op ENTER. We zien rechts op het beeldscherm BSE1, BSE2, ..., BSE5 verschijnen. Vervolgens kunnen we deze BSE's gaan bewerken met behulp van 'edit basic event'.

We hebben de volgende data over de BSE's:

Basic Event	Beschrijving	Info Type	Informatiebron	Type	Kwantitatieve parameter	Onzekerheidsverdeling
F1	Component 1 faalt	Single Expert A	J.Jansen	demand	frequency	uniform (84,88)
F2	Component 2 faalt	Single Expert B	P.Pietersen	demand	frequency	uniform (50,55)
FDT1	Component 3 faalt	Single expert A	J.Jansen	protection	probability	Normal (0.3,0.02)
FDT2	Component 4 faalt	Single Expert B	P.Pietersen	protection	probability	Normal (0.4,0.02)
FDT3	Component 5 faalt	identiek aan FDT1

We zien dat we hier te maken hebben met twee experts: de heer **Jansen** en de heer **Pietersen**. In de praktijk is het ook nog mogelijk dat de data afkomstig is van **handboeken**, **statistische testen** of van **een groep van experts**. Bij het type zien we twee verschillende klassen: **demand** en **protection**.

De basic events zijn of van het type demand of van het type protection. Demand events zijn continue tijd stochastische processen met de toestanden 'optredend' en 'niet-optredend'. Protection events zijn Booleaanse variabelen met waarden corresponderend met 'werkend' en 'niet-werkend'. Verder is er een onderscheid in **frequency** en **probability**.

Frequency gebruiken we wanneer we aan willen geven hoe vaak een component gedurende een bepaalde tijd faalt en **probability** gebruiken we wanneer we de kans dat het systeem faalt op een bepaald tijdstip willen weten.

Hier is het van belang dat we kunnen kiezen hoe de onzekerheidsverdeling gemodelleerd wordt. In **Unicorn** zitten standaard een aantal verdelingen, zoals de constante verdeling, de normale verdeling en de uniforme verdeling.

De verdeling kan verder gespecificeerd worden door of parameters in te geven (μ en σ^2 voor de normale verdeling), of de 5%- en 95%-kwantielen in te geven. Ook is het mogelijk om een op diskette staande verdeling in te lezen.

Wanneer alle gegevens van de BSE's ingevuld zijn, keren we terug (met ESC) naar het menu 'model' en starten de optie 'Input Fault Tree'. Hier moeten we eerst weer de filenaam intikken (tree) en vervolgens kunnen we de foutenboom opbouwen. **In Unicorn moeten we de boom 'van onder naar boven' opbouwen !** Dit betekent dat we moeten beginnen met de basic events en pas daarna meerdere poorten bij elkaar kunnen voegen. Het uiteindelijke resultaat zal er uitzien als de Booleaanse notatie hierboven.

De volgende stap is het maken van een **minimale snede verzameling**. Deze wordt gemaakt door het indrukken van 'Minimal Cut sets'. Een minimale snede is een verzameling van basic events. Deze optie vraagt vervolgens naar de **diepte** van de minimale snede verzameling, hiermee wordt het maximum aantal basic events in een snede bedoeld. Men kan dikwijls volstaan met een diepte van 3 à 4, aangezien snede verzamelingen met meer basic events nauwelijks meer een bijdrage leveren aan de faalkans.

Na het toevoegen van eventuele afhankelijkheden kunnen we vervolgens een simulatie uitvoeren. Deze stappen worden verder toegelicht in hoofdstuk vier en vijf.

3. Formules

Wanneer we meer willen doen, dan alleen werken met OF- en EN-poorten kunnen we de formule-editor van Unicorn gebruiken. Zoek in het menu 'models' de optie 'Formulas' op en druk op ENTER. We zullen een nieuw voorbeeld gebruiken om deze formule-editor te beschrijven.

$$\begin{aligned}
 Y1 &= \min \{ X1, X2, X3, X4 \} \\
 Y2 &= \min \{ X1, X2, X3, X5 \} \\
 Y3 &= \min \{ X1, X2, X4, X5 \} \\
 Y4 &= \min \{ X1, X3, X4, X5 \} \\
 Y5 &= \min \{ X2, X3, X4, X5 \} \\
 Z &= \max \{ Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 \}
 \end{aligned}$$

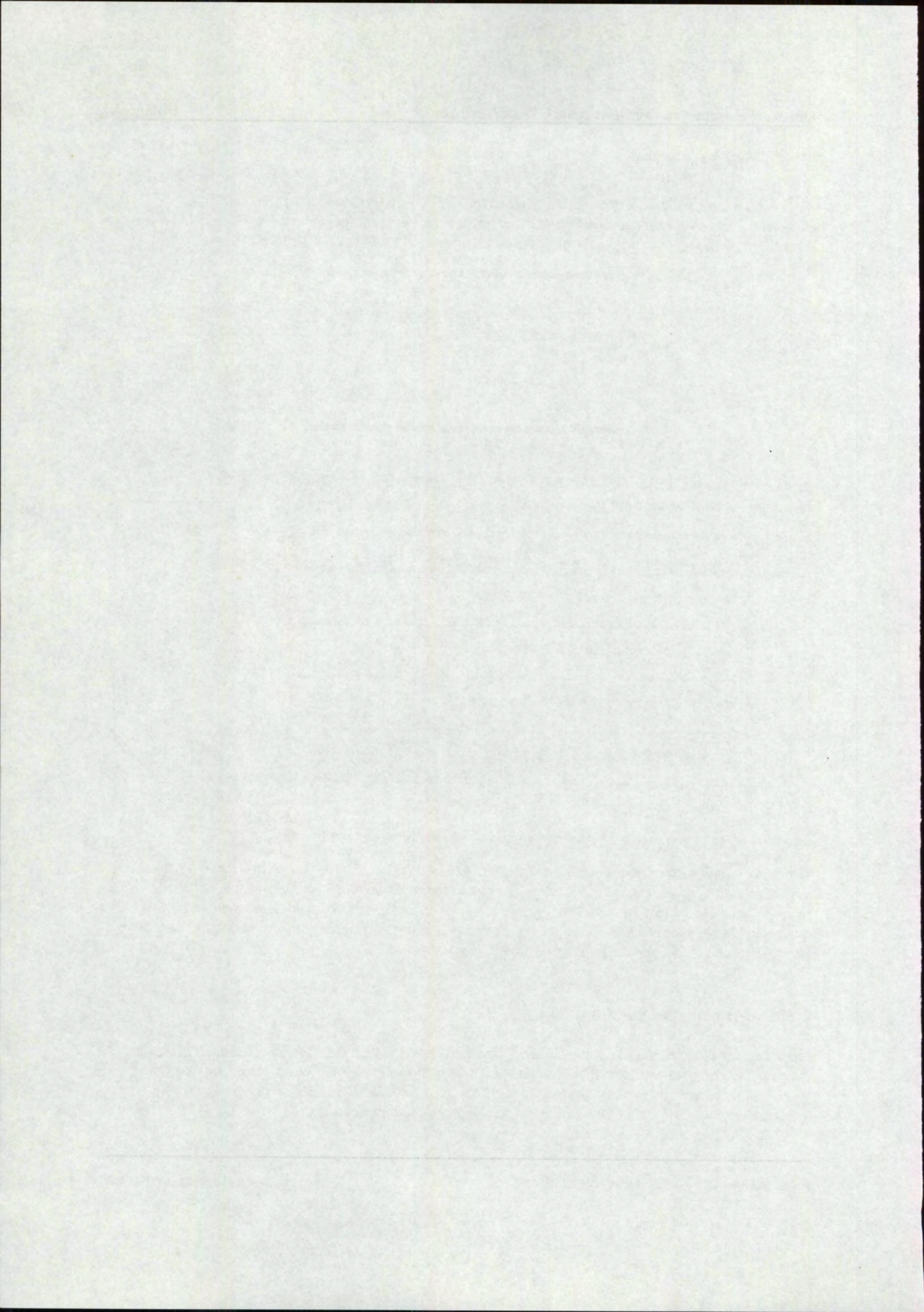
De naam die we aan dit voorbeeld geven is **formula**. Op analoge wijze als de invoer bij de Fault trees, voeren we nu eerst de **random variables** (RV) in.

R.V.	Omschrijving	Onzekerheidsverdeling
X1	levensduur component 1	Weibull: schaal 2 vorm 2
X2	levensduur component 2	Weibull schaal 2 vorm 2
X3	levensduur component 3	Lognormaal mediaan 2 errorfactor 2
X4	levensduur component 4	Lognormaal mediaan 2 errorfactor 2
X5	levensduur component 5	Lognormaal mediaan 2 errorfactor 2

Wanneer we nu de optie 'add random variables' vijf keer gebruiken krijgen we een lijst met V1 t/m V5. Deze voorzien we vervolgens weer van een onzekerheidsverdeling met behulp van de optie 'edit random variables'. Nadat deze RV's weggeschreven zijn onder de naam **formula.ran** gaan we naar het onderdeel 'formula input'. Hier tikken we nu bovenstaande formules in, let er op dat eerst alle random variables verwerkt worden, voordat de formule Z wordt ingetikt.

Constantes en speciale functies

Op het scherm is te zien welke RV's U kunt gebruiken. Ook is te zien dat er enkele speciale symbolen gebruikt kunnen worden. Zo is 'PI' het teken dat Unicorn de waarde 3.141592.. moet gebruiken. Het teken '<<' betekent min oneindig ($-\infty$) en '>>' betekent plus oneindig ($+\infty$). Deze wordt vertaald naar de grootste, respectievelijk kleinste, waarde die de computer kan representeren.



De namen van de functies spreken eigenlijk voor zich, zo staat SQ voor kwadrateren (square), SQT voor worteltrekken (square root). Het zelfde geldt voor MAX en MIN, deze functies met meerdere argumenten gebruiken echter accolades in plaats van haakjes.

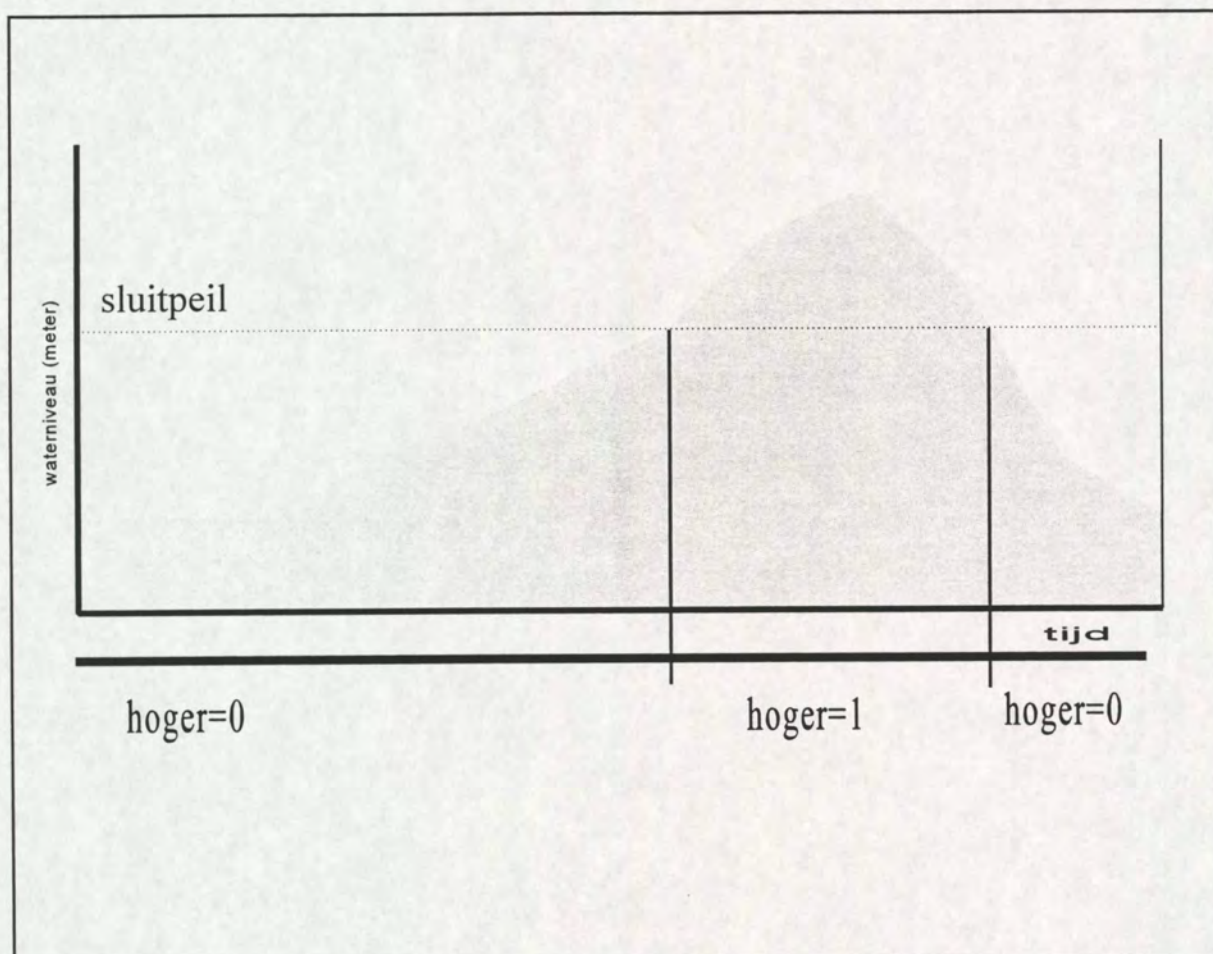
Een speciale functie is de volgende:

$$ik\{A, X_1, \dots, X_n, B\}$$

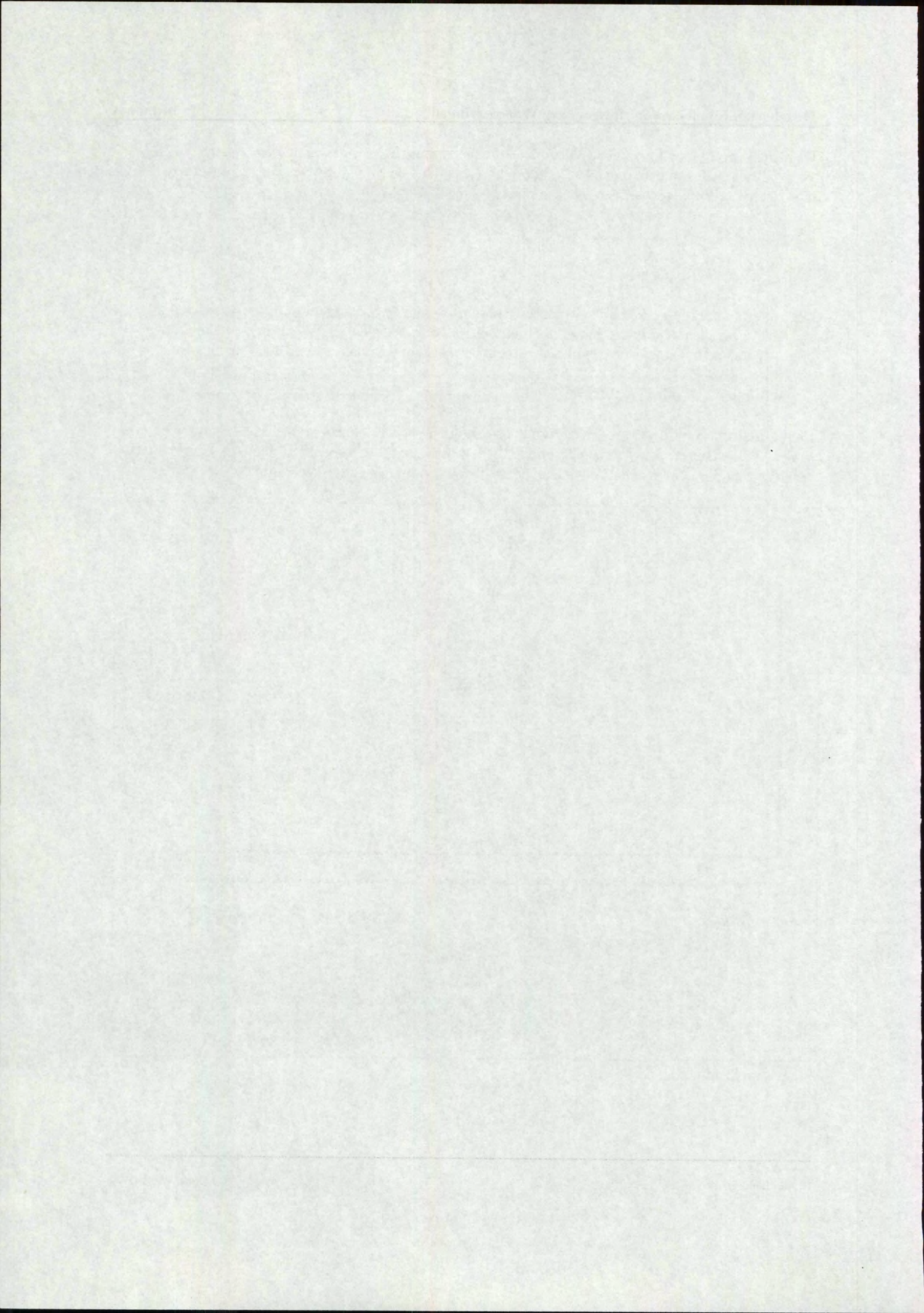
Deze uitdrukking heeft de waarde 1 wanneer 'ten minste k van de X-en tussen A en B liggen' en 0 in alle andere gevallen. Hierbij mogen A en B zelf ook random variables zijn. Wanneer we willen weten of de waterstand hoger is dan het sluitpeil van een beweegbare waterkering, dan doen we dit door:

$$\text{hoger} := il\{sltpl, \text{Water}, >>\}$$

Hierbij is **sltpl** gedefinieerd als een constante verdeling, bijvoorbeeld met parameter 250 (cm boven NAP). **Water** is geeft het waterstandsverloop bij de waterkering aan (ook in centimeters). Een waarde van 1 voor **hoger** geeft aan dat de waterstand op dat moment hoger is dan het sluitpeil.



Afbeelding 2: sluitpeil



Het invoeren van een script

Een **script** is eigenlijk niets anders dan een (klein) computerprogramma. In **Unicorn** is het een stelsel van formules, met als uitkomst de gezochte onzekerheidsverdeling van de topgebeurtenis. We zullen stapsgewijs de formule voor **hoger** invoeren.

Eerst hebben we wat basisgegevens nodig. We willen een formule maken, die bepaalt wat de kans is dat een zeker sluitpeil overschreden wordt. De **parameters** die we daarvoor nodig hebben, zijn dus in ieder geval een parameter **waterpeil** (wp) en een parameter **sluitpeil** (sp). Verder zullen we de uitkomst een naam moeten geven, laten we deze **hoger** noemen.

Het sluitpeil is een vaste, gegeven hoogte. We kunnen dus in de formule rechtstreeks een getal invoeren. Met het oog op een eventuele wijziging van het sluitpeil kiezen we er echter voor om het sluitpeil als een parameter in te voeren. Als onzekerheidsverdeling kiezen we natuurlijk de constante verdeling: we zijn zeker van de waarde van het sluitpeil.

Het waterpeil verandert onder invloed van de getijdebeweging en zal daarom niet gemodelleerd kunnen worden met een constante verdeling. We kiezen voor een normale verdeling. De naam waaronder we alle gegevens opslaan is **script** en we slaan deze gegevens op op de a:-schijf.

Het programma is waarschijnlijk al opgestart, zorg in dat geval, door een aantal keren op ESCAPE te drukken, dat het hoofdmenu weer verschijnt. In het andere geval moeten we dus eerst het programma **Unicorn** opstarten. Dit doen we door in de directory waar Unicorn in is geïnstalleerd de naam Unicorn in te tikken. Nu verschijnt het titelscherm op de monitor.

We kunnen nu verder. Druk op de spatiebalk en ga met de cursortoetsen naar het menu '**Setup**'. Bevestig de keuze met een druk op ENTER. Er verschijnt nu een sub-menu, kies daarin '**Modify model type**' en vervolgens '**Formula**'. In het dan verschijnende menu gaan we met de cursortoetsen naar de optie '**Files directory**' en na een druk op ENTER tikken we hier in a:\ (eventuele letters die er nog staan weghalen met behulp van DELETE of de spatiebalk). Na drie keer op de ESCAPE-toets gedrukt te hebben, zien we het hoofdmenu weer.

Ga met de cursortoetsen naar het menu '**model**', druk op ENTER. Van het dan verschijnende sub-menu kiezen we '**formula**'. Wederom krijgen we, na een druk op ENTER, een sub-menu. Kies hier eerst '**Random Variables Input**'.

Het beeld zal nu veranderen: een nieuw hoofdmenu verschijnt, kies hier '**Make a new file**'. Vervolgens wordt er gevraagd om de naam in te tikken, we tikken dus **script** en RETURN. Wederom verspringt het beeld en krijgen we een menu over **Random Variables**.

We willen twee parameters invoeren en daarom zullen we twee keer de optie '**Add random variables**' gebruiken. Dus met de cursortoetsen naar '**Add random variables**' en op ENTER drukken. We kunnen nu een naam kiezen voor de variabele, maar dit doen we nog niet. De standaard-naam in Unicorn is V1. Na het nog een drukken op ENTER zien we in het rechtergedeelte van het scherm V1 verschijnen. Wanneer we nu weer op ENTER drukken krijgen we V2, enzovoorts. Wij hebben maar twee variabelen nodig, dus na de tweede keer drukken we op ESCAPE. We komen dan weer in het menu van de random variables.

Vervolgens kiezen we hier de optie '**Edit random variables**'. We komen nu terecht in het rechterdeel van het scherm, de lijst met de aanwezige random variables. Kies de eerste, **V1**, en druk weer op

ENTER. Er verschijnt nu een menu, waarmee we de variabele kunnen wijzigen. Als eerste zullen we de naam veranderen. Kies de optie '**Variable name**' en geeft de nieuwe naam op: **wp**. Na het drukken op ENTER kiezen we de optie '**Distribution type**' en vervolgens '**Normal**'. Na ENTER komt er een vinkje (✓) achter de gekozen optie te staan. We keren weer terug met een druk op ESCAPE.

De volgende stap is het kiezen van '**Distribution parameters**'. We zien nu de kansdichtheidsfunctie van de gekozen verdeling en hebben de keuze om de parameters (μ en σ) of de 5%- en 95%-kwantielen in te voeren. We kiezen nu voor de optie '**Main quantiles**'. We voeren in '+100', ENTER, '+300'. Het intikken van de '+' is noodzakelijk, aangezien Unicorn anders het 5%-kwantiel negatief neemt. Met ESCAPE komen we weer terug in het random variable-menu. We kunnen nu nog een beschrijving toevoegen met de laatste optie '**Description**'. Wij kiezen ervoor om dit niet te doen. Druk op ESCAPE om V2 te kunnen bewerken. We veranderen eerst weer de naam, ditmaal in **sp**. De onzekerheidsverdeling nemen we als '**Constant**' en voor de bijbehorende parameter kiezen we **225**.

Met ESCAPE kunnen we de gegevens bewaren en verder bewerken. Het programma vraagt om een bevestiging, eventueel kunnen we nu een andere naam ingeven. We drukken nu gewoon op ENTER, daarna op ESCAPE en keren daarmee terug naar het menu Formula.

Het is nu tijd om de formule op te stellen. Kies daarom '**Formula input**' en '**Make a new formula**'. De computer toont nu (onder andere) de file **script.ran**. Hierin staan de random variables, die we gebruiken in de formule. Druk weer op ENTER.

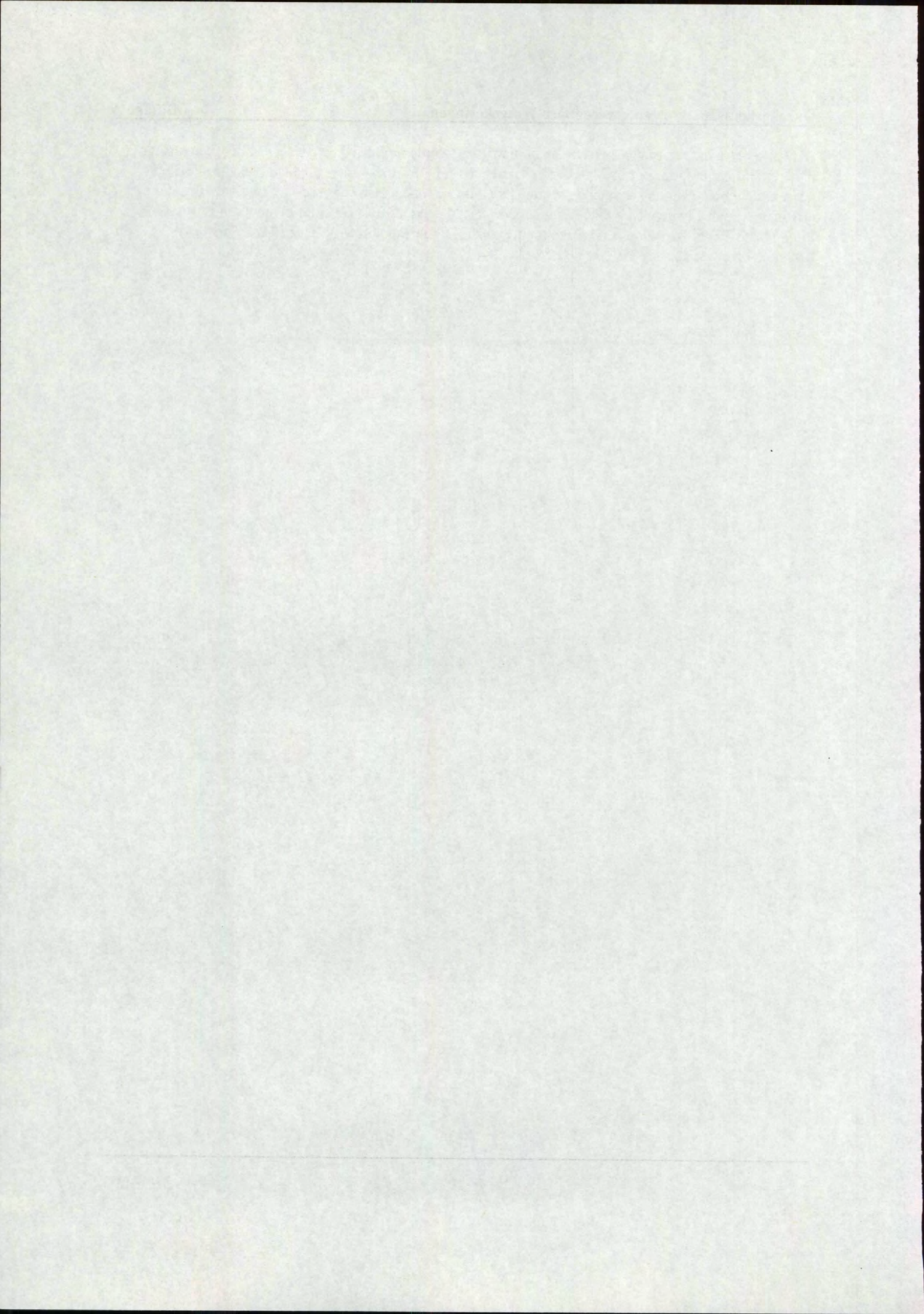
Er verschijnt nu een scherm, met daarin de namen van de beschikbare parameters (**wp** en **sp**) en de beschikbare functies. Druk nu op F6 (naam) en type **hoger**, gevolgd door ENTER. Hierdoor hebben we de formule een naam gegeven. Tik nu in: **il{sp,wp,>>}**. Letterlijk hebben we nu de naam **hoger** gelijk gesteld aan een functie, die de waarde één oplevert wanneer het waterpeil (**wp**) tussen het sluitpeil (**sp**) en oneindig (>>) ligt.

Met een druk op F10 schrijven we de formule weg, Unicorn geeft eerst nog even aan of deze syntactisch correct is. Druk vervolgens op de spatiebalk en geeft als antwoord '**Y**', we willen de file bewaren als **script**. Na drie keer op ESCAPE gedrukt te hebben, zitten we weer in het hoofdmenu. Hier kiezen we nu '**Process**'. Unicorn vraagt om door te gaan met **script**, antwoord door op ENTER te drukken (of '**Y**' in te tikken). Aangezien we de resultaten willen kunnen zien, moeten we eerst de uitvoer-optie bewerken.

We kiezen dus '**Output Options**' en veranderen eerst '**Save Samples**'. Door twee keer op ENTER te drukken veranderen we de opties (zie het rechterdeel van het scherm). Twee keer ESCAPE en vervolgens '**Start Simulation**'. Hier begint dan eindelijk het echte werk.

Eerst wordt gevraagd hoeveel keer Unicorn een simulatie-run moet uitvoeren. Eén run is 100 simulaties. We kiezen hier voor 500 simulaties, dus tikken we 5 in. Vervolgens wordt de seed-variabele gevraagd. We willen de simulatie kunnen herhalen, dus kiezen we voor 'default', we tikken dus een 1 in. Na de volgende ENTER begint de simulatie.

Als het scherm met de gegevens over de simulatie weer verdwijnt, drukken we op ESCAPE en kiezen in het hoofdmenu optie '**Report**' en daarna '**Generate New Report**'. Na een tweetal keer op ENTER gedrukt te hebben, kunnen we met de spatiebalk en de cursor-toetsen aangeven wat we wel en wat we niet in het rapport willen. Nu willen we alle gegevens, dus direct ENTER. Met behulp van de toetsen **Page Up** en **Page Down** kunnen we het rapport lezen. Na lezing kunnen we het rapport opslaan. Afsluiten doen we door op ESCAPE te drukken.



4. Afhankelijkheden

In Unicorn bestaat de mogelijkheid om afhankelijkheden tussen de variabelen aan te geven. De standaard instelling binnen Unicorn is dat alle variabelen onafhankelijk zijn. Afhankelijkheden worden gemodelleerd met behulp van de **rangcorrelatie**.

We zullen eerst enkele definities geven.

Definitie 1: *De produkt moment correlatie coëfficiënt $\rho(X,Y)$ van de stochastische variabelen X en Y wordt gedefiniëerd als:*

$$\rho(X,Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \cdot \text{var}(Y)}}$$

De correlatie waarde van twee stochastische variabelen geeft de mate van lineaire relatie tussen X en Y . Wanneer X en Y onafhankelijk zijn, dan is $\rho(X,Y) = 0$. Anderzijds is Y een lineaire functie van X , dan en slechts dan als $\rho(X,Y) = \pm 1$. De correlatie is niet invariant onder niet-affiene transformaties van X en/of Y . Een maat van afhankelijkheid die invariant is onder strikt stijgende of strikt dalende transformaties van X en/of Y is de zogenaamde rang correlatie. We schrijven F_X voor de verdelingsfunctie van X en idem F_Y .

Definitie 2: *De rang correlatie $\tau(X,Y)$ van de stochastische variabelen X en Y is $\rho(F_X(X), F_Y(Y))$.*

Aangezien de variantie van een uniform $(0,1)$ verdeelde stochast $1/12$ is, is de rang correlatie ook gelijk aan $12 \cdot \text{cov}(F_X(X), F_Y(Y))$. De rang correlatie meet de mate van monotone relatie tussen X en Y . We gebruiken de rang correlatie als maat van afhankelijkheid tussen stochasten om zijn simpele definitie en omdat het een maat van afhankelijkheid is, die niet afhangt van een bepaalde verdeling.

Definitie 3: *De copula van twee stochastische variabelen X en Y is de gezamenlijke verdelingsfunctie van $(F_X(X), F_Y(Y))$.*

Aangzien $F_X(X)$ en $F_Y(Y)$ uniforme verdelingsfuncties hebben, heeft een copula altijd uniforme marginalen. De gezamenlijke verdelingsfunctie van (X,Y) wordt volledig bepaald door de copula en de marginalen F_X en F_Y . Het is dus gemakkelijk om verschillende afhankelijkheidsstructuren tussen X en Y te modelleren, door simpelweg de copula te veranderen.

We zullen vervolgens enkele definities geven met betrekking tot **entropie en informatie**. Zij X een discrete stochastische variabele met waarden in $\{x_1, \dots, x_n\}$, $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, met een verdeling gegeven door $P(X=x_i) = p_i > 0$, ($i=1, 2, \dots, n$).

Definitie 4: *De entropie $H_n(P)$ van de discrete verdelingsfunctie P is:*

$$H_n(P) = -\sum_{i=1}^n p_i \log(p_i)$$

De entropie $H_n(\cdot)$ is niet-negatief voor elke P en strikt concaaf. In de definitie stellen we $0\log(0) = 0$. $H_n(P)$ is maximaal wanneer P de uniforme verdeling is, dat wil zeggen $p_i = 1/n$. Het is minimaal wanneer alle kansmassa in één punt ligt. Intuïtief kunnen we zeggen dat meer entropie overeenkomt met een hogere mate van spreiding.

Entropie vergelijkt de verdelingsfunctie P met de uniforme verdeling. Relatieve informatie stelt ons in staat om twee discrete verdelingen te vergelijken. Laat Y een andere discrete stochastische variabele zijn met kansen $Q(Y=x_i)=q_i > 0$ ($i=1,2,\dots,n$).

Definitie 5: *De relatieve informatie $I_n(Q/P)$ van Q ten opzichte van P is:*

$$I_n(Q|P) = \sum_{i=1}^n q_i \log\left(\frac{q_i}{p_i}\right)$$

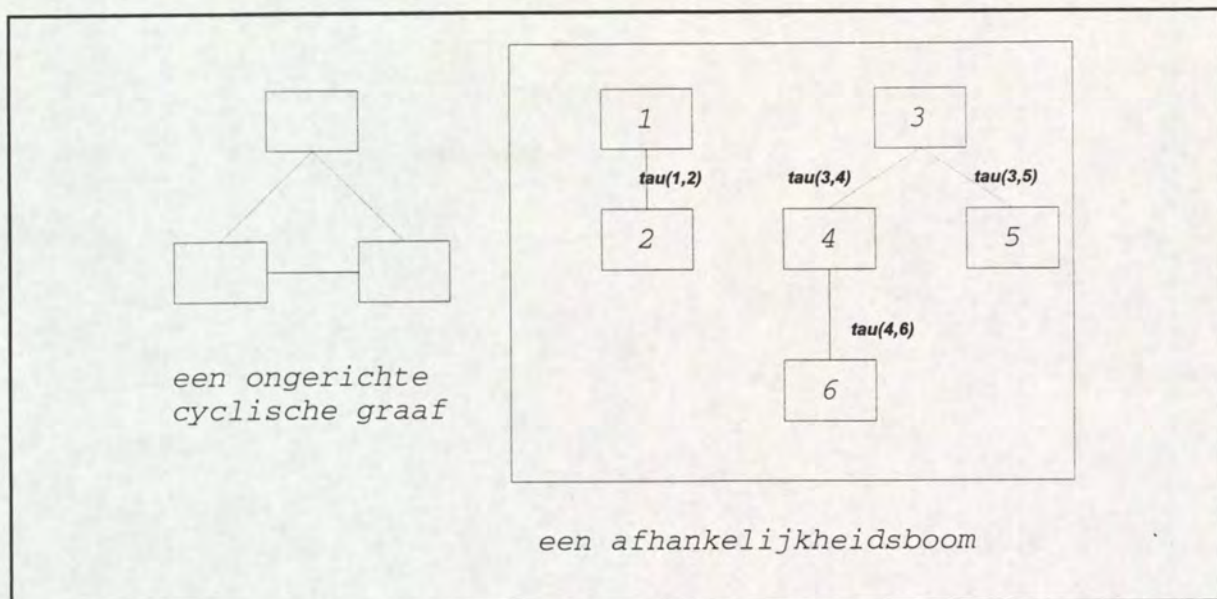
Deze definitie kunnen we zonder meer uitbreiden naar elk willekeurig paar verdelingsfuncties P en Q , met $Q \ll P$ op een maatruimte (M, B) :

$$I(Q|P) = \int_M \frac{dQ}{dP} \log\left(\frac{dQ}{dP}\right) dP$$

De verdelingsfunctie die minimale informatie heeft ten opzichte van een gegeven 'achtergrond' kansverdeling, is in zekere zin de meest gladde verdelingsfunctie. Het toevoegen van informatie geeft in deze context een verdeling met een hogere relatieve informatie. Een verdeling die niet de minimale informatie verdelingsfunctie heeft, kent dus altijd nog een paar extra beperkingen.

Afhankelijkheidsbomen

Een graaf is simpelweg een tekening, bestaande uit knopen en lijnen. De lijnen verbinden de knopen met elkaar. Een **tree** is een ongerichte acyclische graaf. Een **rank correlation dependence tree** (afhankelijkheidsboom) voor de stochasten X_1, \dots, X_n is een ongerichte acyclische graaf met maximaal n knopen, waarin op de lijnen tussen de knopen X_i en X_j een getal τ_{ij} is geplaatst.



Afbeelding 3: graaf en afhankelijkheidsboom

In bovenstaand voorbeeld van de afhankelijkheidsboom is geen lijn getrokken tussen knoop 1 en knoop 3, deze knopen zijn onafhankelijk. Wanneer we deze knopen wel willen verbinden, moeten we τ_{13} de waarde nul geven.

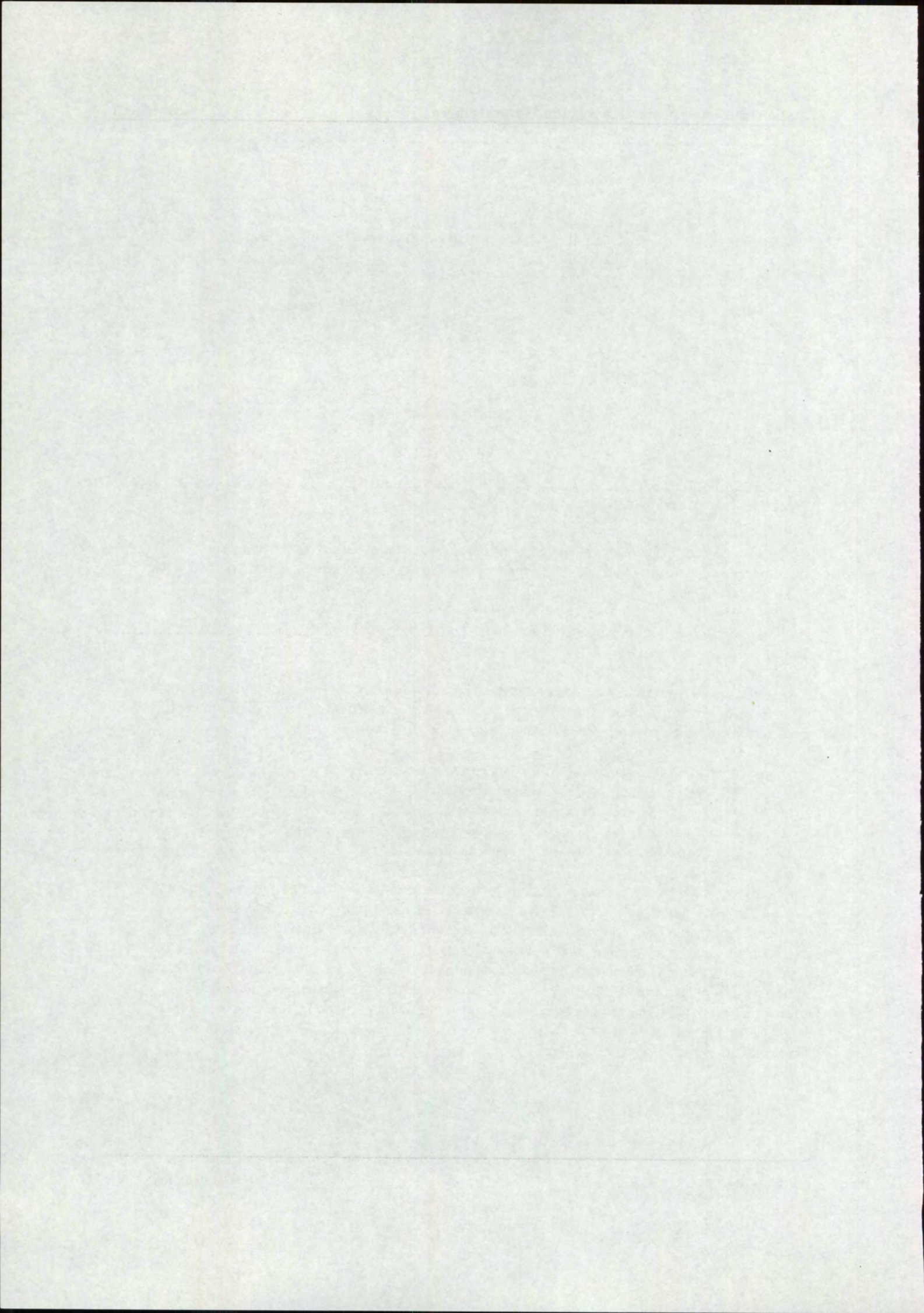
Een **pad** in een tree is een rij knopen, die verbonden zijn door lijnen. In bovenstaand figuur is (3,4,6) een pad.

De gebruiker geeft informatie over de gezamenlijke kansdichtheid en vervolgens wordt door **Unicorn** een unieke verdelingsfunctie gevonden door de gezamenlijke verdeling met minimale informatie te bepalen (ten opzichte van de onafhankelijke gezamenlijke verdeling).

Een **rang correlatie boomstructuur** voor n stochasten is een specificatie van:

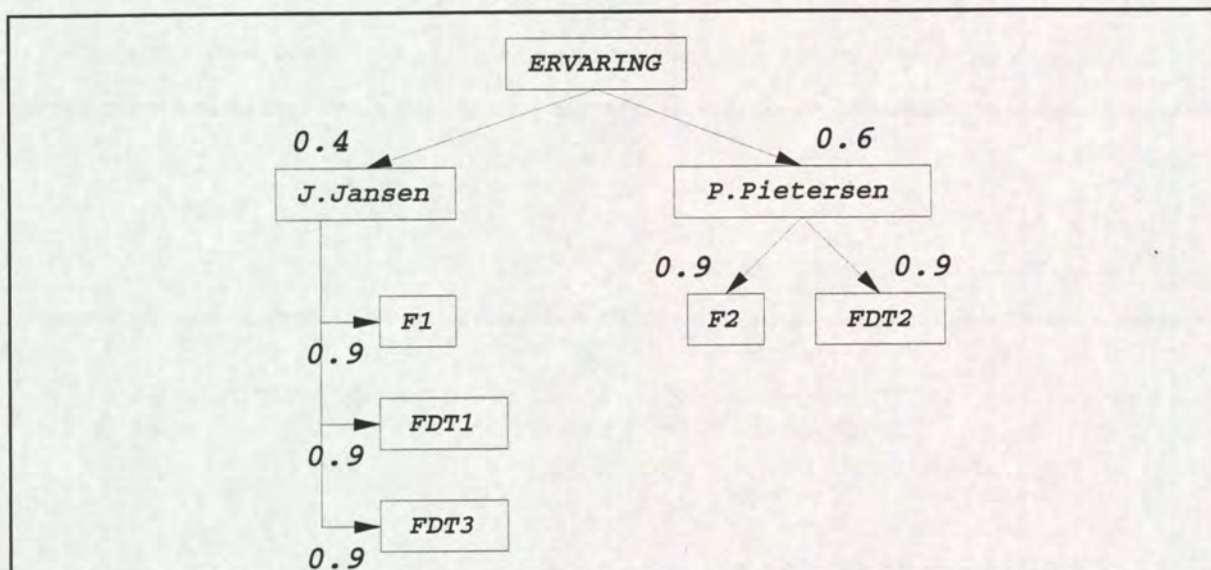
1. een marginale verdelingsfunctie voor elk van de n stochasten,
2. een boom van afhankelijkheidsrelaties,
3. waarden in $[-1,1]$ voor elke tak in de boom, dit getal specificeert de rang correlatie tussen de stochasten die verbonden zijn door die tak..

Wanneer twee stochastische variabelen niet rechtstreeks door een tak verbonden zijn, maar wel door een pad van twee of meer taken, dan worden zij gemodelleerd als **conditioneel onafhankelijk**. Is er geen enkel pad tussen deze variabelen, dan zijn zij **onafhankelijk**. Het is aangetoond dat het bovenstaande precies een gezamenlijke verdelingsfunctie specificeert tussen alle n variabelen. Het is dus onmogelijk om een rang correlatie boomstructuur op te stellen, die inconsistent is. Daarnaast is de op deze wijze opgebouwde gezamenlijke dichtheidsfunctie de dichtheidsfunctie met minimale informatie ten opzichte van de onafhankelijke gezamenlijke dichtheidsfunctie. Met andere woorden: de in **Unicorn** gebruikte afhankelijkheidsbomen voegen zo min mogelijk informatie toe aan de door de gebruiker gespecificeerde verdelingen.



Voorbeeld Foutenboom - experts

Wanneer we het voorbeeld van de foutenboom weer aanhalen, weten we dat we met twee experts te maken hebben. Globaal kunnen we twee verschillende soorten experts onderscheiden: een expert die gewoonlijk te hoge schattingen maakt en een expert die gewoonlijk te lage schattingen maakt. De schattingen die één expert maakt zullen dus zeker gecorreleerd zijn. Beschouw de volgende afhankelijkheidsboom:



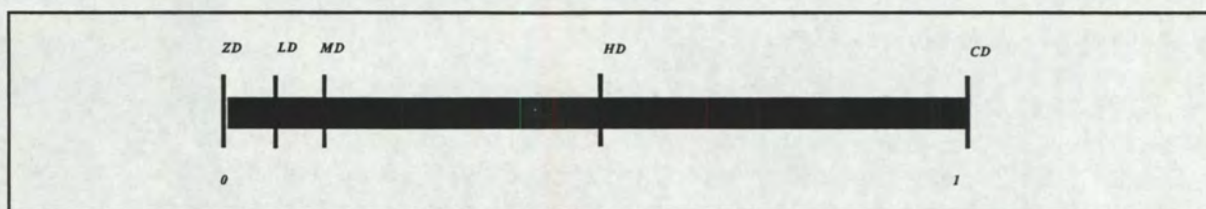
Afbeelding 4: dependence tree

Deze boom geeft aan dat we een correlatie van 0.9 aangenomen hebben tussen de expert en zijn schattingen, een hoge waarde voor F1 zal samengaan met een hoge waarde voor FDT1 en FDT3. Verder hebben we met ERVARING aangegeven dat beide experts gecorreleerd kunnen worden, aangezien zij op hetzelfde vakgebied werkzaam zijn.

Een andere mogelijkheid voor het gebruik van afhankelijkheidsbomen is het simuleren van **elkaar uitsluitende gebeurtenissen**. In bijlage B hebben we te maken met dit verschijnsel. Elkaar uitsluitende gebeurtenissen zijn bijvoorbeeld de gebeurtenis "deur wordt gesloten" en "deur wordt niet gesloten". Het optreden van de ene gebeurtenis zorgt ervoor dat de tweede nooit meer kan gebeuren. In dat geval hebben de kansen op de twee gebeurtenissen een rangcorrelatie van min één (zie ook bijlage B).

Enkele waarden voor afhankelijkheid

Het **Handbook of Human Reliability Analysis with emphasis on Nuclear Power Plant Applications** van A.D. Swain en H.E. Guttman [Swa & Gut 83] geeft een beschrijving van hoe mensen beslissingen nemen en welke factoren er toe bijdragen dat er soms verkeerde of geen beslissingen genomen worden. Ook onderscheiden zij verschillende gradaties van afhankelijkheid, die vertaald zijn naar numerieke waarden.



Afbeelding 5: de afhankelijkheidsgetallen

Een getalsmatige benadering, door de afstanden tussen de uitgezette punten op te meten, levert op:

ZD = 0	(zero dependency, dus onafhankelijk)
LD ≈ 0.05	(low dependency, dus weinig afhankelijkheid)
MD ≈ 0.15	(medium dependency, dus gemiddelde afhankelijkheid)
HD ≈ 0.5	(high dependency, dus hoge mate van afhankelijkheid)
CD = 1	(complete dependency, dus volledige afhankelijkheid)

Dit zijn getallen die gelden voor een positieve correlatie. Uiteraard zijn negatieve correlaties ook mogelijk: hiervoor gelden dezelfde getallen, alleen dan met een min-teken ervoor. Verder hebben we zekere waarden voor ZD en CD, die volgen uit de definities.

Nauwkeurigheid van de resultaten

De Centrale Limiet stelling luidt:

Zij X_1, X_2, \dots een rij van onafhankelijke identiek verdeelde stochasten met eindige verwachting μ en eindige niet-negatieve variantie σ^2 en zij $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$. Dan:

$$\frac{S_n - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}} \xrightarrow{d} N(0,1) \quad (\text{in verdeling})$$

Uiteraard geldt ook:

$$\frac{S_n - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}} = \frac{n(\frac{1}{n}S_n - \mu)}{\sqrt{n\sigma^2}} = \frac{\frac{1}{n}S_n - \mu}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}}$$

We gebruiken bij de simulatie in **Unicorn** 500 trekkingen ($n=500$) en benaderen de faalkans van de sluitprocedure door het steekproefgemiddelde, dus krijgen we:

$$\frac{1}{500}S_{500} = \bar{X}_{500} \xrightarrow{d} N(\mu, \frac{\sigma^2}{500}) \quad (\text{in verdeling})$$

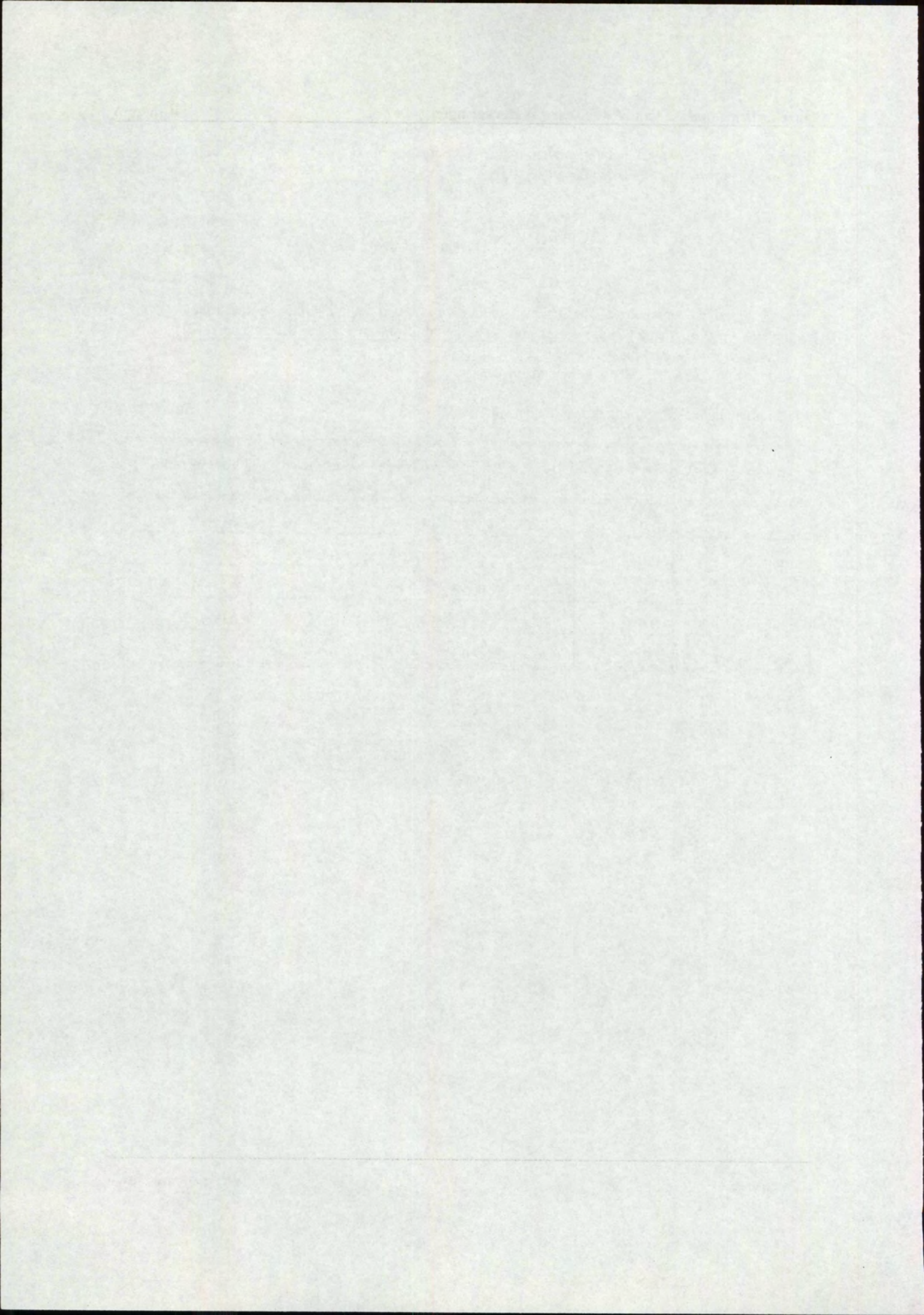
Wanneer we een 95%-betrouwbaarheidsinterval willen construeren voor de faalkans van sluitprocedu-
re, dan kunnen we dit interval dus benaderen door:

$$P_f \approx \bar{X}_n \in \left[\mu - \frac{1.96\sigma^2}{\sqrt{500}}, \mu + \frac{1.96\sigma^2}{\sqrt{500}} \right]$$

In het geval van de bemande sluis in Schiedam en in het geval van de Parksluizen in Rotterdam hebben we een gemiddelde van één en een standaard deviatie van 0.0. Dit kan betekenen dat het aantal trekkingen van 500 niet groot genoeg is. Een nieuwe simulatie met 800 trekkingen gaf echter dezelfde resultaten, dus $n=500$ is voldoende groot.

Bij de onbemande sluis in Schiedam zijn de resultaten:

rapport	$1-\mu$	σ	$1.96\sigma/\sqrt{(500)}$	onder- grens	bovengrens
onb1	0.01	0.0996	8.73E-03	0.0013	0.0189
onb2	0.004	0.0632	5.54E-03	0.0	0.0095
onb3	0.004	0.0632	5.54E-03	0.0	0.0095
onb4a	0.002	0.0447	3.92E-03	0.0	0.0059
onb4b	0.002	0.0447	3.92E-03	0.0	0.0059



5. Simulatie

Wanneer al het voorgaande ingevoerd is, komen we tot de eigenlijke simulatie. Het model dat we beschouwen kan verschillende vormen hebben, maar moet altijd geschreven kunnen worden als een wiskundige functie van n variabelen. Deze argumenten X_1, \dots, X_n hebben een bepaalde onzekerheid, weergegeven door de gezamenlijke verdelingsfunctie van X_1, \dots, X_n . In de onzekerheidsanalyse willen we nu deze gezamenlijke verdelingsfunctie 'door het model heen rekenen' om een uitspraak te kunnen doen over de onzekerheid van de model-uitvoer.

In een klein aantal gevallen kunnen we deze laatste onzekerheid analytisch uitrekenen. Wanneer bij voorbeeld (X_1, X_2) gezamenlijk normaal verdeeld zijn, dan is het model $M = X_1 + X_2$ ook normaal verdeeld. In de meeste gevallen is het echter onbegonnen werk om langs analytische weg een oplossing te vinden. Voor die gevallen is simulatie uitstekend geschikt.

De simulatie komt er ruwweg op neer, dat we een aantal trekkingen verrichten (**sampling**) voor de vector (x_1, \dots, x_n) en steeds $M(x_1, \dots, x_n)$ berekenen. Zo kunnen we een empirische verdelingsfunctie voor M bepalen. Unicorn doet eerst een trekking uit een uniforme $[0, 1]$ verdeling, via een transformatie krijgen we vervolgens de gezochte waarde van de stochast.

We definiëren nu de **inverse verdelingsfunctie** van een stochast X :

$$F^{-1}(U) = \inf\{x | F(x) \geq u\}$$

In de **copula-ruimte** kunnen we nu gemakkelijk een trekking doen. Eerst doen we een trekking uit de uniforme $(0, 1)$ verdeling.

Wanneer een gezamenlijke verdeling gesampled wordt, beginnen we onderaan de afhankelijkheidsboom met een wortel (X_1). Vervolgens trekken we de volgende stochast (X_2) conditioneel op deze wortel, wanneer deze twee verbonden zijn. Op deze manier zijn de trekkingen realisaties van de gezamenlijke verdelingsfunctie van (X_1, X_2) . Zo kunnen we uiteindelijk de gevraagde verdelingsfunctie van het model benaderen [Dor 91]. De trekkings-procedure staat hieronder (in Pseudo-Pascal).

De bivariate verdeling U_{\dots} is een combinatie van copula (hier de diagonale band verdelingen). $S[\dots]$ is de verzameling van voorgaande knopen. $R(V, A)$ is de verzameling wortels van de afhankelijkheidsboom (V, A) .


```

procedure Sample_successors_of( $v_1$ : node);
begin
  for all  $v_j \in S[v_1]$  do
  begin
    determine  $U_{F_{v_1}, F_{v_j}}(u \mid F_{v_1} = s_{F_{v_1}})$ ;
    Sample  $s_{F_{v_j}}$  from  $U_{F_{v_1}, F_{v_j}}(u \mid F_{v_1} = s_{F_{v_1}})$ ;
    Sample_successors_of( $v_j$ );
    Calculate  $s_{v_j}$  with  $F_{v_j}^{-1}$ ;
  end;
end;

program Main
begin
  For  $i:=1$  to  $n$  do
  begin
    if  $v_1 \in R(V, A)$  then
    begin
      sample  $s_{F_{v_1}}$  from uniform distribution on  $[0,1]$ ;
      Sample_successors_of( $v_1$ );
      Calculate  $s_{v_1}$  with  $F_{v_1}^{-1}$ ;
    end;
  end;
end;

```

Om een rapport te kunnen maken, moeten we in Unicon de optie 'saving samples' aan zetten. Verder kunnen we naast de standaard kwantielen 0.01, 0.02, ..., 0.98, 0.99 maximaal negen andere kwantielen kiezen, met behulp van de optie 'User Defined Quantiles'.

De optie 'Start simulation' heeft tot gevolg dat Unicorn vraagt naar het aantal simulaties (in 100-vouden) en of er een vaste random seed-variabele of een clock-based random seed-variabele gekozen moet worden. Voordeel van de eerste is dat de simulaties herhaalbaar zijn, het is dan mogelijk om bij voorbeeld verschillende onzekerheidsverdelingen te kiezen en deze steeds met dezelfde seed-variabele door te rekenen.

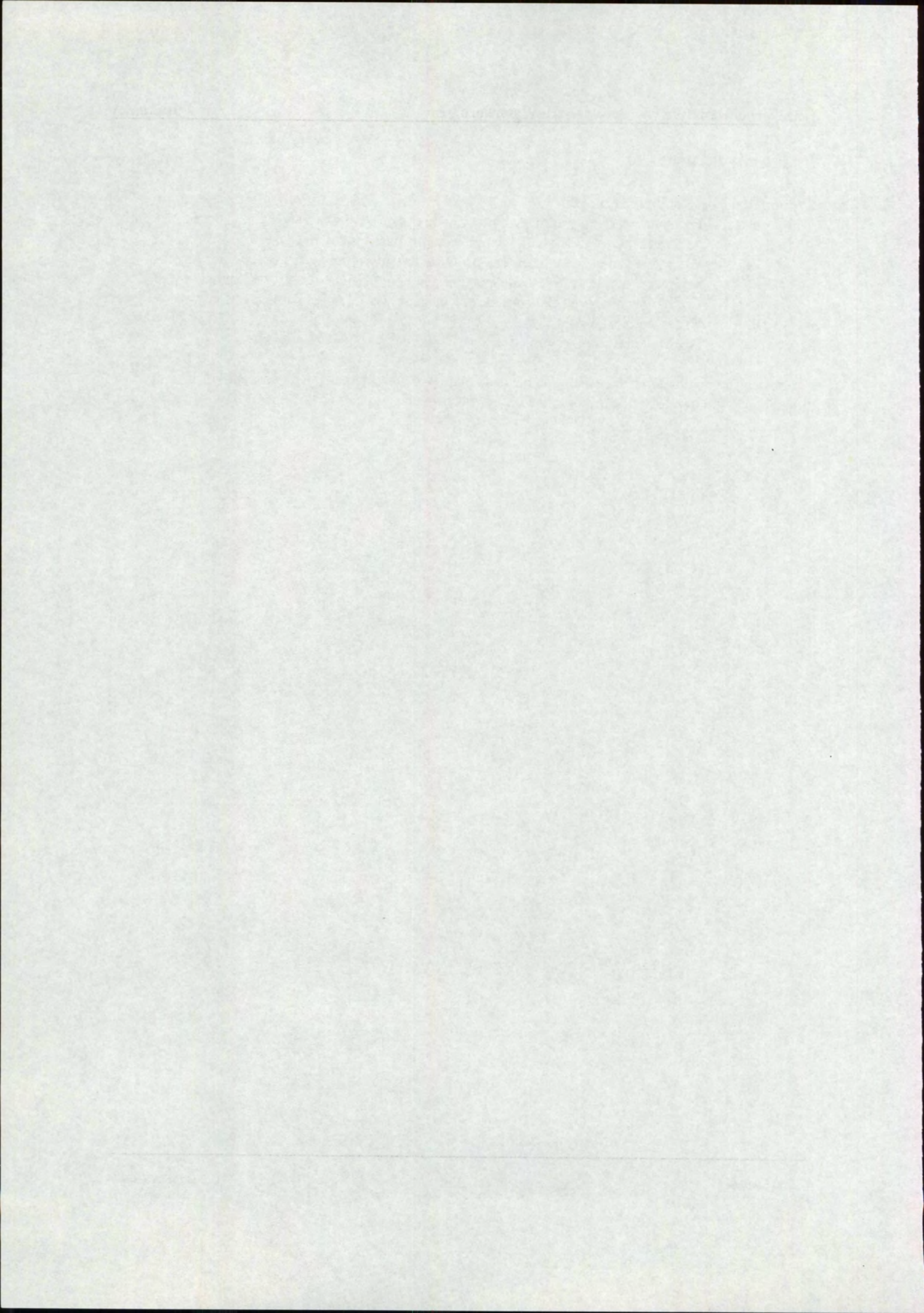
De optie 'Start post-processing' gebruiken we wanneer we bijvoorbeeld alsnog User Defined Quantiles willen hebben (wel eerst 'aanzetten'!) of andere kwantielen willen bekijken.

6. Rapportage

De rapportage bestaat uit (naar keuze)

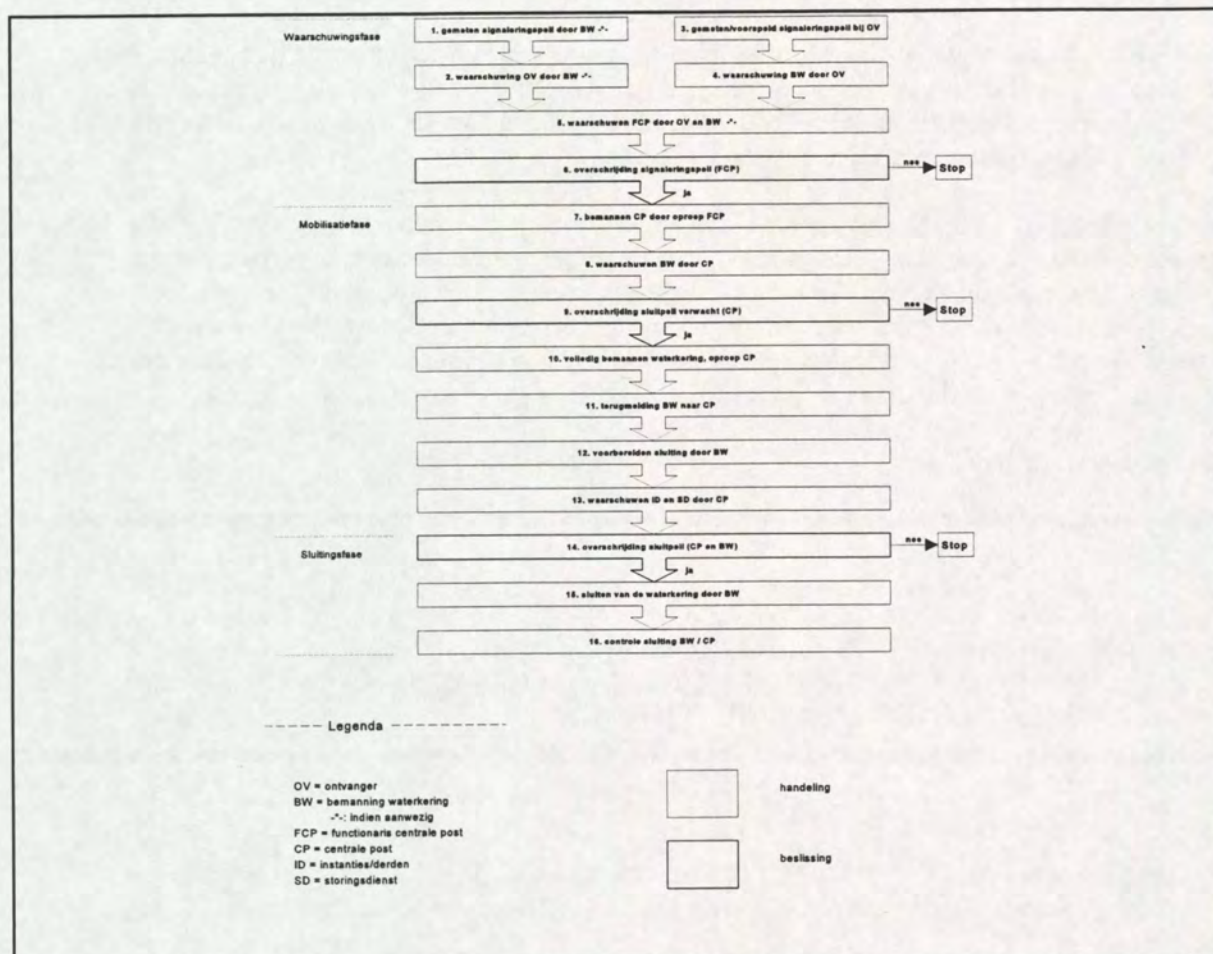
- ① Een samenvatting, waarin de naam van de gebruikte files staat en enkele waarden van de onzekerheidsverdelingen (gemiddelde, mediaan, enzo).
- ② Weergave van de kwantielen van de onzekerheidsverdelingen worden weergegeven, beginnend met het 5%-kwantiel en oplopend per 5% naar het 95%-kwantiel.
- ③ Een beschrijving van elke variabele, dus naam, verdeling en parameters.
- ④ Het eigenlijke model.
- ⑤ De resultaten van de simulatie.

Het opvragen van de rapporten gaat op de bekende manier. Na het opmaken van het rapport is er de mogelijkheid om deze onder een aparte naam weg te schrijven.



7. Sluitproces TAW/DWW in Unicorn

Als voorbeeld zullen we nu het algemene sluitproces van Rijkswaterstaat in Unicorn modelleren. Dit sluitproces ziet er als volgt uit:



Afbeelding 6: algemeen sluitproces TAW/DWW

Ieder hokje stelt een handeling voor, we nemen aan dat deze met een bepaalde kans kan mislukken. Het mislukken van een handeling leidt tot falen van het proces. Verder worden er bepaalde beslissingen genomen. We zullen aannemen dat alle beslissingen terecht genomen worden, met andere woorden: **indien de beslissing genomen wordt om te stoppen, dan zal er ook geen noodzaak zijn om de kering te sluiten.** Uiteraard is dit een zeer drastische vereenvoudiging.

In dit voorbeeld willen we een uitspraak doen over de faalkans van het proces, waarbij geen bemanning aanwezig op de waterkering. Uit het bovenstaande blijkt dat het proces alleen faalt indien er een (willekeurige) handeling mislukt. Een benadering van de faalkans krijgen we dan door het percentage mislukkingen te bepalen van het totaal aantal simulaties.

We zullen nu binnen **Unicorn** de volgende parameters definiëren:

- *) **p** dit is de faalkans van een willekeurige handeling,
- *) **b** dit is het percentage beslissingen om te stoppen; men verwacht dat het water het sluitpeil niet zal overschrijden.
- *) **u1 t/m u16** hiermee kunnen we besluiten of een handeling cq. beslissing goed is.

Het volstaat nu om de variabelen **u1** tot en met **u16** te voorzien van een uniforme $[0,1]$ verdeling en de realisatie steeds te vergelijken met de faalkans (**p**) of beslissingsvariabele (**b**). De faalkans stellen we voor iedere handeling voor de eenvoud voor iedere handeling op een vaste waarde van 0.01. Een beslissing tot stoppen nemen we in 1 op de 10 gevallen.

Vervolgens zullen we het model moeten opstellen. Dit kunnen we eenvoudig doen door van alle handelingen te kijken of deze goed gaan. We kunnen per handeling de realisatie vergelijken met de faalkans. Is de realisatie kleiner dan is de handeling dus mislukt. In dat geval hogen we de formule **faal** op met één. Wanneer er een beslissing genomen moet worden, is de rest van de procedure natuurlijk conditioneel op die beslissing. Een handeling, die in de procedure na een beslissing staat, kan niet meer falen als de beslissing tot stoppen genomen is.

De formule wordt dan dus:

$$\text{faal} := \text{han3} + \text{na1}$$

$$\begin{aligned} \text{han3} &:= i1\{0, u3, p\} + i1\{0, u4, p\} + i1\{0, u5, p\} \\ \text{na1} &:= (1 - i1\{0, u6, b\}) * (i1\{0, u7, p\} + i1\{0, u8, p\} + i1\{0, u8, p\} + \text{na2}) \\ \text{na2} &:= (1 - i1\{0, u9, b\}) * (i1\{0, u10, p\} + i1\{0, u11, p\} + i1\{0, u12, p\} + i1\{0, u13, p\} + \text{na3}) \\ \text{na3} &:= (1 - i1\{0, u14, b\}) * (i1\{0, u15, p\} + i1\{0, u16, p\}) \end{aligned}$$

Het percentage nullen in de formule **faal** geeft nu dus een indicatie van het percentage gevallen waarin de procedure goed doorlopen is. Verder kunnen we direct zien hoeveel schakels gefaald hebben.

De faalkans van de procedure, bij deze aannames!, wordt nu gegeven door één min het percentage nullen in de onzekerheidsverdeling voor **faal**. Dit is dus 0.94: in 94% zal er dus één of meer handelingen falen. Natuurlijk kunnen we nu simpel andere waarden voor **p** en **b** invoeren en het effect daarvan bekijken. Dit valt echter buiten het kader van dit voorbeeld.

Hieronder volgt het rapport van **Unicorn**.

Het door Unicorn gegenereerde rapport

-- Page 1 -- Report: RWS_PR

Report : RWS_PR
Model : FORMULA
Date : Monday January 15, 1996
Time : 2:03 PM

***** CONTENTS *****

1. Summary Report
2. Random Variable Descriptions
3. Formula & User Defined Functions
4. Additional Simulation Data & Results
 - 4.1. Dependency structure
 - 4.3. Output percentiles

***** 1. Summary Report *****

The results below have been generated using data from the following files:

Random variable file : RWS_PR.RAN
Formula file : RWS_PR.FML
Dependency structure file: RWS_PR.220

Number of Samples used = 1000, Total number of Samples produced = 1000
Random_seed = 1875
Bivariate distribution type :
 Diagonal Band Distribution

Main quantiles of the distribution: faal

5%-quantile: 0.00 E+00
50%-quantile: 3.00 E+00
95%-quantile: 6.00 E+00

Location estimates of the distribution: faal

Mean : 2.84 E+00
Median : 3.00 E+00

Estimates of spread of the distribution: faal

Standard deviation: 1.60 E+00
Error factor : 2.00 E+00

Main quantiles of the distribution: na2

5%-quantile: 0.00 E+00

50%-quantile: 1.00 E+00

95%-quantile: 3.00 E+00

Location estimates of the distribution: na2

Mean : 1.51 E+00

Median : 1.00 E+00

Estimates of spread of the distribution:na2

Standard deviation: 1.14 E+00

Error factor : 3.00 E+00

Main quantiles of the distribution: na3

5%-quantile: 0.00 E+00

50%-quantile: 0.00 E+00

95%-quantile: 2.00 E+00

Location estimates of the distribution: na3

Mean : 5.33 E-01

Median : 0.00 E+00

Estimates of spread of the distribution:na3

Standard deviation: 6.35 E-01

Error factor : none (zero divisor) 2.00 E+00

Main quantiles of the distribution: na1

5%-quantile: 0.00 E+00

50%-quantile: 2.00 E+00

95%-quantile: 4.00 E+00

Location estimates of the distribution: na1

Mean : 1.93 E+00

Median : 2.00 E+00

Estimates of spread of the distribution:na1

Standard deviation: 1.37 E+00

Error factor : 2.00 E+00

Main quantiles of the distribution: han3

5%-quantile: 0.00 E+00

50%-quantile: 1.00 E+00

95%-quantile: 2.00 E+00

Location estimates of the distribution: han3

Mean : 9.18 E-01

Median : 1.00 E+00

Estimates of spread of the distribution:han3

Standard deviation: 7.85 E-01

Error factor : 2.00 E+00

***** 2. Random Variable Descriptions *****

number: 1

Random_variable : U3

Distribution type : UNIFORM

Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00

B (=Upperbound): 1.000 E+00

Description : ...

number: 2

Random_variable : U4

Distribution type : UNIFORM

Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00

B (=Upperbound): 1.000 E+00

Description : ...

number: 3

Random_variable : U5

Distribution type : UNIFORM

Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00

B (=Upperbound): 1.000 E+00

Description : ...

number: 4

Random_variable : U6

Distribution type : UNIFORM

Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00

B (=Upperbound): 1.000 E+00

Description : ...

number: 5

Random_variable : U7
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 6

Random_variable : U8
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 7

Random_variable : U9
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 8

Random_variable : U10
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 9

Random_variable : U11
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 10

Random_variable : U12
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 11

Random_variable : U13
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 12

Random_variable : U14
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 13

Random_variable : U15
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 14

Random_variable : U16
Distribution type : UNIFORM
Parameters : A (=Lowerbound): 0.000 E+00
 B (=Upperbound): 1.000 E+00
Description : ...

number: 15

Random_variable : P
Distribution type : CONSTANT
Parameters : CONSTANT: 3.000 E-01

Description : ...

number: 16

Random_variable : B
Distribution type : CONSTANT
Parameters : CONSTANT: 1.000 E-01

Description : ...

***** 3. Formula & User Defined Functions *****

```

faal: han3+na1
na2: (1-il{0,u9,b})*(il{0,u10,p}+il{0,u11,p}+il{0,u12,p}+il{0,u13,p}+
    » na3)
na3: (1-il{0,u14,b})*(il{0,u15,p}+il{0,u16,p})
na1: (1-il{0,u6,b})*(il{0,u7,p}+il{0,u8,p}+na2)
han3: il{0,u3,p}+il{0,u4,p}+il{0,u5,p}

```

***** 4. Additional Simulation Data & Results *****

***** Joint Distribution data *****

***** 4.1. Dependency structure: RWS_PR *****

Random variable names that can be
selected in dependency structure:

U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13,
U14, U15, U16, P, B

No dependency graphs are made
yet with random variables above

***** 4.3. Output percentiles *****

***** Output Distribution Variable : faal *****

MINIMUM SAMPLE VALUE: 0.000 E+00

MAXIMUM SAMPLE VALUE: 7.000 E+00

perc. 0.01: 0.000 E+00	perc. 0.34: 2.000 E+00	perc. 0.67: 3.000 E+00
perc. 0.02: 0.000 E+00	perc. 0.35: 2.000 E+00	perc. 0.68: 4.000 E+00
perc. 0.03: 0.000 E+00	perc. 0.36: 2.000 E+00	perc. 0.69: 4.000 E+00
perc. 0.04: 0.000 E+00	perc. 0.37: 2.000 E+00	perc. 0.70: 4.000 E+00
perc. 0.05: 0.000 E+00	perc. 0.38: 2.000 E+00	perc. 0.71: 4.000 E+00
perc. 0.06: 0.000 E+00	perc. 0.39: 2.000 E+00	perc. 0.72: 4.000 E+00
perc. 0.07: 1.000 E+00	perc. 0.40: 2.000 E+00	perc. 0.73: 4.000 E+00
perc. 0.08: 1.000 E+00	perc. 0.41: 2.000 E+00	perc. 0.74: 4.000 E+00
perc. 0.09: 1.000 E+00	perc. 0.42: 2.000 E+00	perc. 0.75: 4.000 E+00
perc. 0.10: 1.000 E+00	perc. 0.43: 3.000 E+00	perc. 0.76: 4.000 E+00
perc. 0.11: 1.000 E+00	perc. 0.44: 3.000 E+00	perc. 0.77: 4.000 E+00
perc. 0.12: 1.000 E+00	perc. 0.45: 3.000 E+00	perc. 0.78: 4.000 E+00
perc. 0.13: 1.000 E+00	perc. 0.46: 3.000 E+00	perc. 0.79: 4.000 E+00
perc. 0.14: 1.000 E+00	perc. 0.47: 3.000 E+00	perc. 0.80: 4.000 E+00
perc. 0.15: 1.000 E+00	perc. 0.48: 3.000 E+00	perc. 0.81: 4.000 E+00
perc. 0.16: 1.000 E+00	perc. 0.49: 3.000 E+00	perc. 0.82: 4.000 E+00
perc. 0.17: 1.000 E+00	perc. 0.50: 3.000 E+00	perc. 0.83: 4.000 E+00
perc. 0.18: 1.000 E+00	perc. 0.51: 3.000 E+00	perc. 0.84: 4.000 E+00
perc. 0.19: 1.000 E+00	perc. 0.52: 3.000 E+00	perc. 0.85: 5.000 E+00
perc. 0.20: 1.000 E+00	perc. 0.53: 3.000 E+00	perc. 0.86: 5.000 E+00
perc. 0.21: 1.000 E+00	perc. 0.54: 3.000 E+00	perc. 0.87: 5.000 E+00

perc. 0.22: 2.000 E+00	perc. 0.55: 3.000 E+00	perc. 0.88: 5.000 E+00
perc. 0.23: 2.000 E+00	perc. 0.56: 3.000 E+00	perc. 0.89: 5.000 E+00
perc. 0.24: 2.000 E+00	perc. 0.57: 3.000 E+00	perc. 0.90: 5.000 E+00
perc. 0.25: 2.000 E+00	perc. 0.58: 3.000 E+00	perc. 0.91: 5.000 E+00
perc. 0.26: 2.000 E+00	perc. 0.59: 3.000 E+00	perc. 0.92: 5.000 E+00
perc. 0.27: 2.000 E+00	perc. 0.60: 3.000 E+00	perc. 0.93: 5.000 E+00
perc. 0.28: 2.000 E+00	perc. 0.61: 3.000 E+00	perc. 0.94: 5.000 E+00
perc. 0.29: 2.000 E+00	perc. 0.62: 3.000 E+00	perc. 0.95: 6.000 E+00
perc. 0.30: 2.000 E+00	perc. 0.63: 3.000 E+00	perc. 0.96: 6.000 E+00
perc. 0.31: 2.000 E+00	perc. 0.64: 3.000 E+00	perc. 0.97: 6.000 E+00
perc. 0.32: 2.000 E+00	perc. 0.65: 3.000 E+00	perc. 0.98: 6.000 E+00
perc. 0.33: 2.000 E+00	perc. 0.66: 3.000 E+00	perc. 0.99: 7.000 E+00

***** Output Distribution Variable : na2 *****

MINIMUM SAMPLE VALUE: 0.000 E+00
 MAXIMUM SAMPLE VALUE: 5.000 E+00

perc. 0.01: 0.000 E+00	perc. 0.34: 1.000 E+00	perc. 0.67: 2.000 E+00
perc. 0.02: 0.000 E+00	perc. 0.35: 1.000 E+00	perc. 0.68: 2.000 E+00
perc. 0.03: 0.000 E+00	perc. 0.36: 1.000 E+00	perc. 0.69: 2.000 E+00
perc. 0.04: 0.000 E+00	perc. 0.37: 1.000 E+00	perc. 0.70: 2.000 E+00
perc. 0.05: 0.000 E+00	perc. 0.38: 1.000 E+00	perc. 0.71: 2.000 E+00
perc. 0.06: 0.000 E+00	perc. 0.39: 1.000 E+00	perc. 0.72: 2.000 E+00
perc. 0.07: 0.000 E+00	perc. 0.40: 1.000 E+00	perc. 0.73: 2.000 E+00
perc. 0.08: 0.000 E+00	perc. 0.41: 1.000 E+00	perc. 0.74: 2.000 E+00
perc. 0.09: 0.000 E+00	perc. 0.42: 1.000 E+00	perc. 0.75: 2.000 E+00
perc. 0.10: 0.000 E+00	perc. 0.43: 1.000 E+00	perc. 0.76: 2.000 E+00
perc. 0.11: 0.000 E+00	perc. 0.44: 1.000 E+00	perc. 0.77: 2.000 E+00
perc. 0.12: 0.000 E+00	perc. 0.45: 1.000 E+00	perc. 0.78: 2.000 E+00
perc. 0.13: 0.000 E+00	perc. 0.46: 1.000 E+00	perc. 0.79: 2.000 E+00
perc. 0.14: 0.000 E+00	perc. 0.47: 1.000 E+00	perc. 0.80: 2.000 E+00
perc. 0.15: 0.000 E+00	perc. 0.48: 1.000 E+00	perc. 0.81: 3.000 E+00
perc. 0.16: 0.000 E+00	perc. 0.49: 1.000 E+00	perc. 0.82: 3.000 E+00
perc. 0.17: 0.000 E+00	perc. 0.50: 1.000 E+00	perc. 0.83: 3.000 E+00
perc. 0.18: 0.000 E+00	perc. 0.51: 1.000 E+00	perc. 0.84: 3.000 E+00
perc. 0.19: 0.000 E+00	perc. 0.52: 1.000 E+00	perc. 0.85: 3.000 E+00
perc. 0.20: 0.000 E+00	perc. 0.53: 2.000 E+00	perc. 0.86: 3.000 E+00
perc. 0.21: 0.000 E+00	perc. 0.54: 2.000 E+00	perc. 0.87: 3.000 E+00
perc. 0.22: 1.000 E+00	perc. 0.55: 2.000 E+00	perc. 0.88: 3.000 E+00
perc. 0.23: 1.000 E+00	perc. 0.56: 2.000 E+00	perc. 0.89: 3.000 E+00
perc. 0.24: 1.000 E+00	perc. 0.57: 2.000 E+00	perc. 0.90: 3.000 E+00
perc. 0.25: 1.000 E+00	perc. 0.58: 2.000 E+00	perc. 0.91: 3.000 E+00
perc. 0.26: 1.000 E+00	perc. 0.59: 2.000 E+00	perc. 0.92: 3.000 E+00
perc. 0.27: 1.000 E+00	perc. 0.60: 2.000 E+00	perc. 0.93: 3.000 E+00
perc. 0.28: 1.000 E+00	perc. 0.61: 2.000 E+00	perc. 0.94: 3.000 E+00
perc. 0.29: 1.000 E+00	perc. 0.62: 2.000 E+00	perc. 0.95: 3.000 E+00
perc. 0.30: 1.000 E+00	perc. 0.63: 2.000 E+00	perc. 0.96: 4.000 E+00
perc. 0.31: 1.000 E+00	perc. 0.64: 2.000 E+00	perc. 0.97: 4.000 E+00

perc. 0.32: 1.000 E+00 perc. 0.65: 2.000 E+00 perc. 0.98: 4.000 E+00
 perc. 0.33: 1.000 E+00 perc. 0.66: 2.000 E+00 perc. 0.99: 4.000 E+00

***** Output Distribution Variable : na3 *****

MINIMUM SAMPLE VALUE: 0.000 E+00
 MAXIMUM SAMPLE VALUE: 2.000 E+00

perc. 0.01: 0.000 E+00	perc. 0.34: 0.000 E+00	perc. 0.67: 1.000 E+00
perc. 0.02: 0.000 E+00	perc. 0.35: 0.000 E+00	perc. 0.68: 1.000 E+00
perc. 0.03: 0.000 E+00	perc. 0.36: 0.000 E+00	perc. 0.69: 1.000 E+00
perc. 0.04: 0.000 E+00	perc. 0.37: 0.000 E+00	perc. 0.70: 1.000 E+00
perc. 0.05: 0.000 E+00	perc. 0.38: 0.000 E+00	perc. 0.71: 1.000 E+00
perc. 0.06: 0.000 E+00	perc. 0.39: 0.000 E+00	perc. 0.72: 1.000 E+00
perc. 0.07: 0.000 E+00	perc. 0.40: 0.000 E+00	perc. 0.73: 1.000 E+00
perc. 0.08: 0.000 E+00	perc. 0.41: 0.000 E+00	perc. 0.74: 1.000 E+00
perc. 0.09: 0.000 E+00	perc. 0.42: 0.000 E+00	perc. 0.75: 1.000 E+00
perc. 0.10: 0.000 E+00	perc. 0.43: 0.000 E+00	perc. 0.76: 1.000 E+00
perc. 0.11: 0.000 E+00	perc. 0.44: 0.000 E+00	perc. 0.77: 1.000 E+00
perc. 0.12: 0.000 E+00	perc. 0.45: 0.000 E+00	perc. 0.78: 1.000 E+00
perc. 0.13: 0.000 E+00	perc. 0.46: 0.000 E+00	perc. 0.79: 1.000 E+00
perc. 0.14: 0.000 E+00	perc. 0.47: 0.000 E+00	perc. 0.80: 1.000 E+00
perc. 0.15: 0.000 E+00	perc. 0.48: 0.000 E+00	perc. 0.81: 1.000 E+00
perc. 0.16: 0.000 E+00	perc. 0.49: 0.000 E+00	perc. 0.82: 1.000 E+00
perc. 0.17: 0.000 E+00	perc. 0.50: 0.000 E+00	perc. 0.83: 1.000 E+00
perc. 0.18: 0.000 E+00	perc. 0.51: 0.000 E+00	perc. 0.84: 1.000 E+00
perc. 0.19: 0.000 E+00	perc. 0.52: 0.000 E+00	perc. 0.85: 1.000 E+00
perc. 0.20: 0.000 E+00	perc. 0.53: 0.000 E+00	perc. 0.86: 1.000 E+00
perc. 0.21: 0.000 E+00	perc. 0.54: 0.000 E+00	perc. 0.87: 1.000 E+00
perc. 0.22: 0.000 E+00	perc. 0.55: 1.000 E+00	perc. 0.88: 1.000 E+00
perc. 0.23: 0.000 E+00	perc. 0.56: 1.000 E+00	perc. 0.89: 1.000 E+00
perc. 0.24: 0.000 E+00	perc. 0.57: 1.000 E+00	perc. 0.90: 1.000 E+00
perc. 0.25: 0.000 E+00	perc. 0.58: 1.000 E+00	perc. 0.91: 1.000 E+00
perc. 0.26: 0.000 E+00	perc. 0.59: 1.000 E+00	perc. 0.92: 1.000 E+00
perc. 0.27: 0.000 E+00	perc. 0.60: 1.000 E+00	perc. 0.93: 2.000 E+00
perc. 0.28: 0.000 E+00	perc. 0.61: 1.000 E+00	perc. 0.94: 2.000 E+00
perc. 0.29: 0.000 E+00	perc. 0.62: 1.000 E+00	perc. 0.95: 2.000 E+00
perc. 0.30: 0.000 E+00	perc. 0.63: 1.000 E+00	perc. 0.96: 2.000 E+00
perc. 0.31: 0.000 E+00	perc. 0.64: 1.000 E+00	perc. 0.97: 2.000 E+00
perc. 0.32: 0.000 E+00	perc. 0.65: 1.000 E+00	perc. 0.98: 2.000 E+00
perc. 0.33: 0.000 E+00	perc. 0.66: 1.000 E+00	perc. 0.99: 2.000 E+00

***** Output Distribution Variable : na1 *****

MINIMUM SAMPLE VALUE: 0.000 E+00
 MAXIMUM SAMPLE VALUE: 6.000 E+00

perc. 0.01: 0.000 E+00 perc. 0.34: 1.000 E+00 perc. 0.67: 3.000 E+00

perc. 0.02: 0.000 E+00	perc. 0.35: 1.000 E+00	perc. 0.68: 3.000 E+00
perc. 0.03: 0.000 E+00	perc. 0.36: 1.000 E+00	perc. 0.69: 3.000 E+00
perc. 0.04: 0.000 E+00	perc. 0.37: 1.000 E+00	perc. 0.70: 3.000 E+00
perc. 0.05: 0.000 E+00	perc. 0.38: 1.000 E+00	perc. 0.71: 3.000 E+00
perc. 0.06: 0.000 E+00	perc. 0.39: 1.000 E+00	perc. 0.72: 3.000 E+00
perc. 0.07: 0.000 E+00	perc. 0.40: 1.000 E+00	perc. 0.73: 3.000 E+00
perc. 0.08: 0.000 E+00	perc. 0.41: 2.000 E+00	perc. 0.74: 3.000 E+00
perc. 0.09: 0.000 E+00	perc. 0.42: 2.000 E+00	perc. 0.75: 3.000 E+00
perc. 0.10: 0.000 E+00	perc. 0.43: 2.000 E+00	perc. 0.76: 3.000 E+00
perc. 0.11: 0.000 E+00	perc. 0.44: 2.000 E+00	perc. 0.77: 3.000 E+00
perc. 0.12: 0.000 E+00	perc. 0.45: 2.000 E+00	perc. 0.78: 3.000 E+00
perc. 0.13: 0.000 E+00	perc. 0.46: 2.000 E+00	perc. 0.79: 3.000 E+00
perc. 0.14: 0.000 E+00	perc. 0.47: 2.000 E+00	perc. 0.80: 3.000 E+00
perc. 0.15: 0.000 E+00	perc. 0.48: 2.000 E+00	perc. 0.81: 3.000 E+00
perc. 0.16: 0.000 E+00	perc. 0.49: 2.000 E+00	perc. 0.82: 3.000 E+00
perc. 0.17: 0.000 E+00	perc. 0.50: 2.000 E+00	perc. 0.83: 3.000 E+00
perc. 0.18: 0.000 E+00	perc. 0.51: 2.000 E+00	perc. 0.84: 3.000 E+00
perc. 0.19: 1.000 E+00	perc. 0.52: 2.000 E+00	perc. 0.85: 3.000 E+00
perc. 0.20: 1.000 E+00	perc. 0.53: 2.000 E+00	perc. 0.86: 3.000 E+00
perc. 0.21: 1.000 E+00	perc. 0.54: 2.000 E+00	perc. 0.87: 3.000 E+00
perc. 0.22: 1.000 E+00	perc. 0.55: 2.000 E+00	perc. 0.88: 4.000 E+00
perc. 0.23: 1.000 E+00	perc. 0.56: 2.000 E+00	perc. 0.89: 4.000 E+00
perc. 0.24: 1.000 E+00	perc. 0.57: 2.000 E+00	perc. 0.90: 4.000 E+00
perc. 0.25: 1.000 E+00	perc. 0.58: 2.000 E+00	perc. 0.91: 4.000 E+00
perc. 0.26: 1.000 E+00	perc. 0.59: 2.000 E+00	perc. 0.92: 4.000 E+00
perc. 0.27: 1.000 E+00	perc. 0.60: 2.000 E+00	perc. 0.93: 4.000 E+00
perc. 0.28: 1.000 E+00	perc. 0.61: 2.000 E+00	perc. 0.94: 4.000 E+00
perc. 0.29: 1.000 E+00	perc. 0.62: 2.000 E+00	perc. 0.95: 4.000 E+00
perc. 0.30: 1.000 E+00	perc. 0.63: 2.000 E+00	perc. 0.96: 4.000 E+00
perc. 0.31: 1.000 E+00	perc. 0.64: 2.000 E+00	perc. 0.97: 5.000 E+00
perc. 0.32: 1.000 E+00	perc. 0.65: 2.000 E+00	perc. 0.98: 5.000 E+00
perc. 0.33: 1.000 E+00	perc. 0.66: 3.000 E+00	perc. 0.99: 5.000 E+00

***** Output Distribution Variable : han3 *****

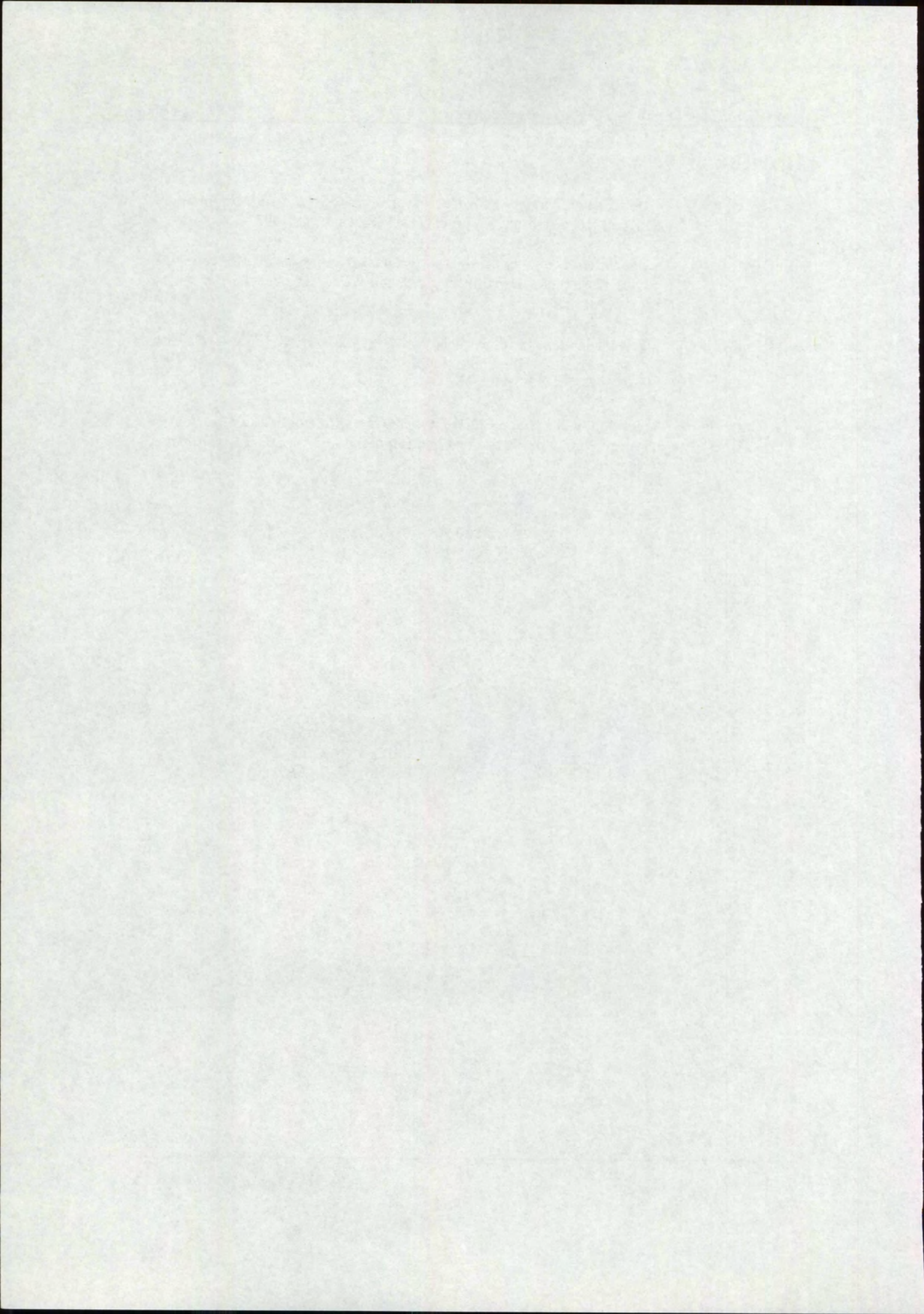
MINIMUM SAMPLE VALUE: 0.000 E+00
 MAXIMUM SAMPLE VALUE: 3.000 E+00

perc. 0.01: 0.000 E+00	perc. 0.34: 1.000 E+00	perc. 0.67: 1.000 E+00
perc. 0.02: 0.000 E+00	perc. 0.35: 1.000 E+00	perc. 0.68: 1.000 E+00
perc. 0.03: 0.000 E+00	perc. 0.36: 1.000 E+00	perc. 0.69: 1.000 E+00
perc. 0.04: 0.000 E+00	perc. 0.37: 1.000 E+00	perc. 0.70: 1.000 E+00
perc. 0.05: 0.000 E+00	perc. 0.38: 1.000 E+00	perc. 0.71: 1.000 E+00
perc. 0.06: 0.000 E+00	perc. 0.39: 1.000 E+00	perc. 0.72: 1.000 E+00
perc. 0.07: 0.000 E+00	perc. 0.40: 1.000 E+00	perc. 0.73: 1.000 E+00
perc. 0.08: 0.000 E+00	perc. 0.41: 1.000 E+00	perc. 0.74: 1.000 E+00
perc. 0.09: 0.000 E+00	perc. 0.42: 1.000 E+00	perc. 0.75: 1.000 E+00
perc. 0.10: 0.000 E+00	perc. 0.43: 1.000 E+00	perc. 0.76: 1.000 E+00
perc. 0.11: 0.000 E+00	perc. 0.44: 1.000 E+00	perc. 0.77: 1.000 E+00

perc. 0.12: 0.000 E+00	perc. 0.45: 1.000 E+00	perc. 0.78: 1.000 E+00
perc. 0.13: 0.000 E+00	perc. 0.46: 1.000 E+00	perc. 0.79: 2.000 E+00
perc. 0.14: 0.000 E+00	perc. 0.47: 1.000 E+00	perc. 0.80: 2.000 E+00
perc. 0.15: 0.000 E+00	perc. 0.48: 1.000 E+00	perc. 0.81: 2.000 E+00
perc. 0.16: 0.000 E+00	perc. 0.49: 1.000 E+00	perc. 0.82: 2.000 E+00
perc. 0.17: 0.000 E+00	perc. 0.50: 1.000 E+00	perc. 0.83: 2.000 E+00
perc. 0.18: 0.000 E+00	perc. 0.51: 1.000 E+00	perc. 0.84: 2.000 E+00
perc. 0.19: 0.000 E+00	perc. 0.52: 1.000 E+00	perc. 0.85: 2.000 E+00
perc. 0.20: 0.000 E+00	perc. 0.53: 1.000 E+00	perc. 0.86: 2.000 E+00
perc. 0.21: 0.000 E+00	perc. 0.54: 1.000 E+00	perc. 0.87: 2.000 E+00
perc. 0.22: 0.000 E+00	perc. 0.55: 1.000 E+00	perc. 0.88: 2.000 E+00
perc. 0.23: 0.000 E+00	perc. 0.56: 1.000 E+00	perc. 0.89: 2.000 E+00
perc. 0.24: 0.000 E+00	perc. 0.57: 1.000 E+00	perc. 0.90: 2.000 E+00
perc. 0.25: 0.000 E+00	perc. 0.58: 1.000 E+00	perc. 0.91: 2.000 E+00
perc. 0.26: 0.000 E+00	perc. 0.59: 1.000 E+00	perc. 0.92: 2.000 E+00
perc. 0.27: 0.000 E+00	perc. 0.60: 1.000 E+00	perc. 0.93: 2.000 E+00
perc. 0.28: 0.000 E+00	perc. 0.61: 1.000 E+00	perc. 0.94: 2.000 E+00
perc. 0.29: 0.000 E+00	perc. 0.62: 1.000 E+00	perc. 0.95: 2.000 E+00
perc. 0.30: 0.000 E+00	perc. 0.63: 1.000 E+00	perc. 0.96: 2.000 E+00
perc. 0.31: 0.000 E+00	perc. 0.64: 1.000 E+00	perc. 0.97: 2.000 E+00
perc. 0.32: 0.000 E+00	perc. 0.65: 1.000 E+00	perc. 0.98: 3.000 E+00
perc. 0.33: 1.000 E+00	perc. 0.66: 1.000 E+00	perc. 0.99: 3.000 E+00

Literatuurlijst

- [Dor 91]: **Dependence Modeling for Uncertainty Analysis**, *R. van Dorp*, promotie rapport technologisch ontwerper, TU Delft, december 1991.
- [Mee 93]: **Dependent random variables in uncertainty analysis**, *A. Meeuwissen*, Ph.D. dissertation, Department of Mathematics, Delft University of Technology, Delft, 1993.
- [Mee & Coo 94]: **Tree dependent random variables**, *A. Meeuwissen & R. Cooke*, Department of Mathematics, Delft University of Technology, Report 94-28, Delft, 1994.
- [Swa & Gut 83]: **Handbook of Human Reliability Analysis with emphasis on Nuclear Power Plant Applications - Final Report**, *A.D. Swain & H.E. Guttmann*, Nureg/Cr-1278, augustus 1983.



Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
van der Burghweg 1
2628 CS Delft

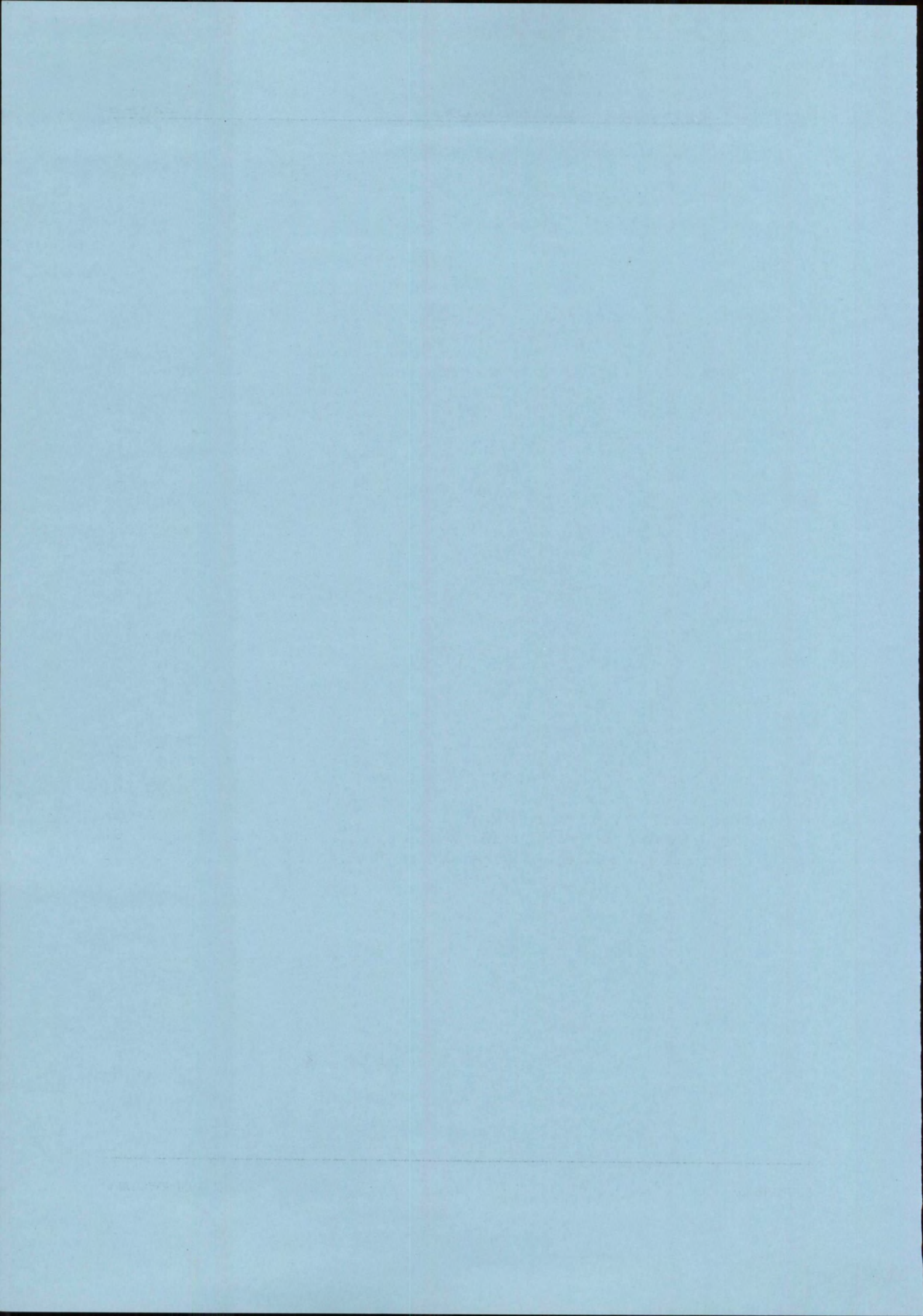


februari 1996

***Onzekerheidsanalyse
van
Beweegbare Waterkeringen***

(Bijlage B: Onzekerheidsanalyse Coupure Den Oever)

Peter Blanker
Vlinderveen 530
3205 EN Spijkenisse
0181 - 635035



Bijlage B: Onzekerheidsanalyse Coupure Den Oever

Inhoudsopgave

1. Kunstwerken in en rond Den Oever	2
Gegevens over de kunstwerken	2
2. Onzekerheidsanalyse Coupure Den Oever	4
Doelstelling	4
Het rapport als model in Unicorn	4
Het toevoegen van onzekerheidsverdelingen	10
Invloed van één informatiebron	16
Verdere rangcorrelaties als gevolg van common-cause	18
3. Vergelijking van de resultaten	20
Wiskundige appendix: Mutually Exclusive Basic Events	27
Literatuurlijst	28
copie van de foutenboom uit [Ton & Kos 93]	
tabel 7-2 uit [Swa & Gut 83]	

Lijst met afbeeldingen

Afbeelding 1: de Coupure in Den oever	2
Afbeelding 2: een boxplot	20
Afbeelding 3: boxplots voor de verschillende aannames	21
Afbeelding 4: histogram van de onzekerheidsverdeling 'onz.dis'	23
Afbeelding 5: histogram voor de onzekerheidsverdeling 'l1at.dis'	23
Afbeelding 6: histogram voor de onzekerheidsverdeling 'mlat.dis'	24
Afbeelding 7: scatterplots, paarsgewijze vergelijking van de aannames	26

