

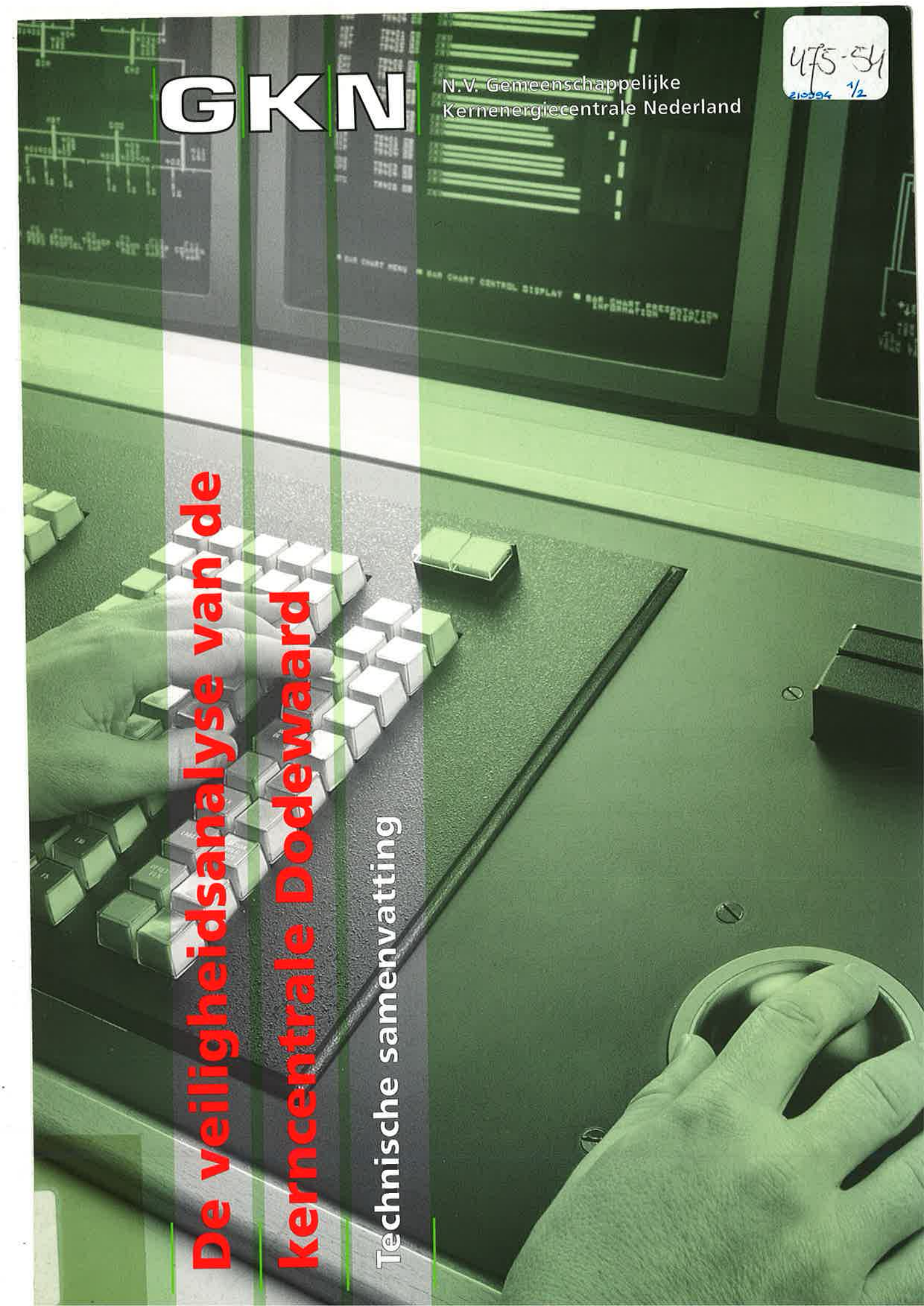
GKN

N.V. Gemeenschappelijke
Kernenergiecentrale Nederland

475-51
210094 1/2

De veiligheidsanalyse van de kerncentrale Dodewaard

Technische samenvatting



CIP-GEGEVENS KONINLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Veiligheidsanalyse

De veiligheidsanalyse van de kerncentrale Dodewaard :
technische samenvatting. - Dodewaard : Gemeenschappelijke
Kernenergiecentrale Nederland. - Ill.

ISBN 90-74977-05-7

Trefw. : kernenergiecentrales ; Dodewaard ; veiligheid.

© 1994 N.V. GKN

Tekst uit deze brochure mag worden overgenomen onder de
uitdrukkelijke voorwaarde dat de bron correct en volledig
wordt vermeld.

N.V. GKN

Waalbandijk 112^a

6669 MG Dodewaard

De veiligheidsanalyse (PSA) van de kerncentrale Dodewaard

Technische samenvatting

Inhoud:

• Voorwoord	3
• Inleiding	5
• Analyse op niveau 1	7
• Analyse op niveau 2	11
• Analyse op niveau 3	16
• Eindconclusies	26

De probabilistische veiligheidsanalyse (PSA) van de kerncentrale Dodewaard

Voorwoord

In opdracht van N.V. Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland (GKN) is een probabilistische veiligheidsanalyse (probabilistic safety analysis: PSA) uitgevoerd voor de Kernenergiecentrale Dodewaard (KCD). Dit gebeurde op verzoek van de Kernfysische Dienst (KFD). In 1989 vroeg de KFD om een studie naar mogelijke verbeteringen van de installatie, met als doel: de verdere verhoging van de veiligheid. Resultaten van een deel van deze studie werden op 9 juni 1992 door de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid aan de Tweede Kamer gepresenteerd.

De primaire doelstelling van de analyse was om - via een systematische berekening van alle mogelijke risico's - na te gaan welke verbeteringen in de veiligheidssystemen en in de operationele en onderhoudsprocedures het veiligheidsniveau zouden kunnen verhogen. Naast dit primaire doel wordt de PSA gebruikt voor:

- het schatten van de kans op beschadiging van de kern;
- het vaststellen van de dominante ongevalsverlopen;
- het nagaan in hoeverre het insluitsysteem kan verhinderen dat radioactieve stoffen die bij kernbeschadiging vrijkomen, doordringen tot buiten het reactorgebouw;
- het bepalen van de individuele en groepsrisico's als gevolg van het bedrijven van de centrale.

De analyse is uitgevoerd op drie niveaus:

- **niveau 1: systeemanalyse;**
- **niveau 2: procesanalyse;**
- **niveau 3: omgevingsanalyse.**

In deze samenvatting worden de meest specifieke uitvoeringsaspecten van deze analyse toegelicht, alsmede de belangrijkste resultaten.





Inleiding

In 1975 verscheen de eerste uitgebreide PSA voor commerciële kerncentrales. De analyse werd bekend onder de benamingen 'Reactor safety study', 'WASH-1400' en 'Rasmussen report'. Sindsdien is het algemeen geaccepteerd om een relatie te leggen tussen het risico van het bedrijven van kerncentrales en de kans dat zich ongewenste gebeurtenissen voordoen. Hierbij denkt men aan risico's als:

- kernbeschadiging;
- het (mogelijk) als gevolg daarvan vrijkomen van radioactieve stoffen;
- de daaruit voortvloeiende ongewenste gevolgen voor de omgeving.

In de afgelopen jaren is de PSA verder ontwikkeld. De analyse kan nu worden gedefinieerd als een systematisch onderzoek naar alle ongevalsverlopen die leiden tot de hiervoor genoemde gevolgen. Omdat er slechts een uiterst geringe kans bestaat dat deze ongevallen zich voordoen, wordt de installatie hier niet voor ontworpen. Deze ongevallen worden dan ook 'buiten-ontwerpongevallen' genoemd, in tegenstelling tot de 'ontwerpongevallen', waartegen de installatie bestand is.

Niveaus binnen een PSA

Bij de uitvoering van een PSA worden drie niveaus onderscheiden: niveau 1 is een systeem-analyse, niveau 2 een procesanalyse en niveau 3 een omgevingsanalyse. In essentie komen deze drie niveaus overeen met, respectievelijk:

1. **het bepalen van de omstandigheden of ongevallen die leiden tot kernbeschadiging, alsmede de kans daarop;**
2. **het bepalen van de omstandigheden die - na een kernbeschadiging en het vrijkomen van radioactieve stoffen binnen het insluitsysteem - leiden tot het falen van de barrièrefunctie van dit insluitsysteem, alsmede de lozingen van radioactieve stoffen (zogenoeten 'brontermen') die van dit falen het gevolg zijn, plus de kans daarop;**
3. **de consequenties van deze lozingen van radioactieve stoffen voor de omgeving.**

In de systeemanalyse (niveau 1) worden alle mogelijke procesverstoringen (zogenoeten 'begingebuurtenissen') bepaald die kunnen leiden tot kernbeschadiging. Een dergelijke beschadiging kan zich alleen voordoen als één of meer veiligheidssystemen niet afdoende functioneren. Bij deze analyse spelen een belangrijke rol: de begingebuurtenissen, het falen van veiligheidssystemen, het menselijk falen en het afhankelijk falen (het falen van diverse onderdelen van systemen als gevolg van een gelijke oorzaak).

Het resultaat van zo'n systeemanalyse is een opsomming van alle combinaties van gebeurtenissen (zogenoeten 'ongevalsverlopen') die kunnen leiden tot kernbeschadiging, met de bijbehorende kans van optreden. Optelling van alle kansen geeft de totale kans op kernbeschadiging.

Bij de procesanalyse (niveau 2) worden de chemische en fysische processen beschouwd die bij de ongevalsverlopen optreden. De procesanalyse is bedoeld om te bepalen wat de belasting van het insluitsysteem is en wanneer dit zijn functie verliest.

Voor de ongevalsverlopen waarbij het insluitsysteem niet goed functioneert en er radioactieve stoffen vrijkomen in de atmosfeer, worden de hoeveelheid en aard van de lozingen van deze stoffen (zogenoeten 'brontermen') bepaald, plus de bijbehorende kans van optreden. Optelling van alle kansen geeft de totale kans op lozing van radioactieve stoffen.

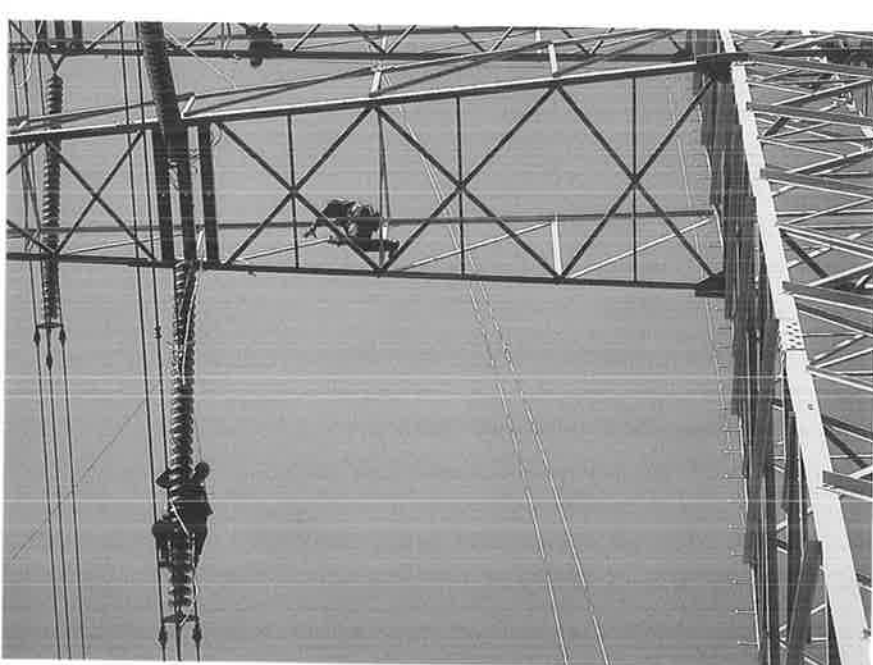
Bij de omgevingsanalyse (niveau 3) worden - uitgaande van de in de procesanalyse bepaalde brontermen - de radiologische gevolgen voor mens en milieu bepaald. Dit gebeurt aan de hand van de verspreiding van de radioactieve stoffen in de omgeving. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen 'acute' en 'late' effecten. Gegevens met betrekking tot meteorologie, demografie en grondgebruik zijn hierbij belangrijke parameters.

Beoordeling van de PSA

In opdracht van de overheid hebben onafhankelijke deskundigen op verschillende momenten een controle uitgevoerd van de methodieken die bij de PSA zijn gehanteerd. Deze taak werd, voor niveau 1 en niveau 2 van de studie, verricht door de International Peer Review Service (IPERS), een verificatieteam van het International Atomic Energy Agency (IAEA). In totaal brachten verschillende van deze IPERS-teams vier bezoeken aan Nederland.

Volgens deze IPERS-teams is de PSA een goed uitgevoerde studie, die gebruik maakt van de modernste, internationaal geaccepteerde analysemethoden. Kanttekeningen die door het IPERS-team werden gemaakt met betrekking tot de methodiek en uitvoering, zijn of worden in het vervolg van de analyse meegenomen.

Op verzoek van het ministerie van VROM zal door deskundigen van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) een controle worden uitgevoerd voor niveau 3 van de PSA.



De analyse op niveau 1

Kernenergiecentrales zijn zodanig ontworpen dat zij beschikken over diverse, meervoudig uitgevoerde, veiligheidssystemen. Deze systemen bieden op verschillende niveaus bescherming tegen gebeurtenissen die kunnen leiden tot het vrijkomen van radioactieve stoffen als gevolg van kernbeschadiging. Daarom zal als regel een complex ongevalsverloop moeten plaatsvinden voordat kernbeschadiging optreedt. Om deze ongevalsverlopen te kunnen beschrijven, is een gedetailleerde kennis van de installatie en de optredende processen vereist. Op basis van deze kennis kunnen de begingebourtenissen worden geëvalueerd die tot kernbeschadiging kunnen leiden.

Uiteindelijk levert deze analyse een aantal ongevalssituaties op van de centrale, met de daarbij behorende kans van optreden.

Begingebourtenissen

Voor wat betreft de toestand van de reactor maakt de systeemanalyse onderscheid tussen de situatie waarin de centrale in bedrijf is (vermogensbedrijf) en de situatie waarin dit niet het geval is (niet-vermogensbedrijf). Hierbinnen wordt voor beide situaties weer onderscheid gemaakt tussen interne en externe begingebourtenissen.

Onder interne begingebourtenissen verstaat men procesverstoringen die veroorzaakt worden door een defect in een van de systemen van de centrale, of door het foutief handelen van personeel, en die uiteindelijk zouden kunnen leiden tot beschadiging van de kern als verdere acties achterwege zouden blijven.

Onder externe begingebourtenissen verstaat men alle begingebourtenissen die binnen en buiten het reactorgebouw kunnen optreden (bijv. brand of overstroming) en die eveneens tot kernbeschadiging zouden kunnen leiden, maar die niet vallen onder de interne begingebourtenissen.

Bij de analyse op niveau 1 worden alle begin-gebeurtenissen geïntariseerd die - in combinatie met daarop volgende processen - kunnen leiden tot kernbeschadiging. Deze begin-gebeurtenissen worden deels bepaald op basis van bestaande literatuur, deels op basis van ervaringen met de installatie. Ze berusten op analyses van daadwerkelijk opgetreden en voorstelbare storingen in de centrale.

Modellen

Het modelleren van ongevalsverlopen vindt plaats door analyse van de manier waarop de diverse systemen en het bedienend personeel reageren op een begingebourtenis. Daarbij worden zogeheten 'gebeurtenissenbomen' opgesteld. Die geven het verband aan tussen een reeks van opeenvolgende gebeurtenissen vanaf de begingebourtenis tot aan kernbeschadiging. Ook beschrijven ze het verloop van die gebeurtenissen. Elke uitsplitsing (tak van de boom) toont het al dan niet falen van veiligheidssystemen of het bedienend personeel. Met dit model wordt dus niet alleen bepaald hoe kernbeschadiging kan optreden, maar ook op welke wijze de kans hierop kan worden geminimaliseerd.

De bedrijfs- en veiligheidssystemen die in de gebeurtenissenbomen aan de orde komen, worden gemodelleerd door middel van zogeheten 'foutenbomen'. In zo'n foutenboom worden de oorzaken voor het falen van een systeem op een logische en geordende wijze geïdentificeerd, namelijk aan de hand van het falen van systeemcomponenten (bijv. pompen die weigeren te starten). Het verzamelen van gegevens over dergelijke faalkansen is een belangrijk onderdeel van de PSA. Hiervoor worden niet alleen algemene gegevens van andere centrales en industrieën gebruikt, maar ook bedrijfsspecifieke gegevens.

In de foutenbomen zijn bovendien foutieve menselijke handelingen opgenomen (bijv. het foutief instellen van systemen), evenals fouten die het bedienend personeel kan maken na het optreden van een procesverstoring. Een voorbeeld van zo'n mogelijke fout is het niet in werking stellen van een systeem omdat alarmsignalen onjuist worden geïnterpreteerd. Voor de KCD is, ten behoeve van de analyse van menselijk falen, gebruik gemaakt van een bestaande analysetechniek en van een model dat speciaal voor deze veiligheidsevaluatie is ontwikkeld.

Alle gebeurtenissenbomen en foutenbomen worden geïntegreerd tot één model. Met behulp van computergegevens over faalkansen bepaalt dit model alle mogelijke combinaties van begingebourtenissen en falen (van systemen en/of bedienend personeel) die kunnen leiden tot kernbeschadiging. Voor elk van deze mogelijke ongevalsverlopen wordt met dit model de kans van optreden bepaald.

De kwantitatieve resultaten van deze werkwijze mogen niet als absolute waarden worden beschouwd. Ze vormen (gefundeerde) schattingen - binnen bepaalde marges - van de kans van optreden van kernbeschadiging. In een gevoeligheidsanalyse wordt daarom bepaald welke gebeurtenissen (falen van een component, begingebourtenis, enz.) het meest van invloed zijn op het resultaat van de systeemanalyse.

De systeemanalyse van de KCD

De systeemanalyse van interne begingebourtenissen voor de KCD is uitgevoerd in overeenstemming met de desbetreffende voorschriften van het IAEA, zoals verwoord in IAEA Safety Series No. 50-P-4, en tevens conform de eisen van de U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), zoals vastgelegd in het rapport NUREG/CR-2300.

De interne begingebourtenissen bij zowel vermogens- als niet-vermogensbedrijf zijn

onderverdeeld in ongevallen met koelmiddelverlies (ook buiten het insluitsysteem) en procesverstoringen (zowel met als zonder automatische afschakeling van de reactor).

Voor externe begingebourtenissen in de vermogenssituatie is de systeemanalyse in hoofdzaak uitgevoerd volgens de eisen van de USNRC die zijn vastgelegd in het rapport NUREG-1407. Van de grote lijst van externe begingebourtenissen in dit rapport zijn er enkele buiten beschouwing gelaten. Het gaat hierbij om gebeurtenissen die voor de situatie ter plaatse van de KCD als extreem onwaarschijnlijk moeten worden beschouwd (bijvoorbeeld een sneeuwlavine), of die in ernst en omvang vergelijkbaar zijn met gebeurtenissen waarmee bij het ontwerp van de centrale al rekening is gehouden. Evenmin is aandacht besteed aan de gebeurtenissen die zijn afgedekt door een andere begingebourtenis. De overblijvende externe begingebourtenissen zijn wel allemaal geanalyseerd. Ook is hun kans op optreden bepaald. Deze gebeurtenissen kunnen worden onderverdeeld in de volgende categorieën:

1 binnen de centrale:

- a overstroming t.g.v. lekkage;
- b stoomlekkage;
- c brand;
- d door de turbine/generator weggeslingerde afgebroken onderdelen.

2 buiten de centrale:

- a aardbeving;
- b overstroming t.g.v. een hoge waterstand van de Waal;
- c inslag van vliegtuigen;
- d scheepvaartongevallen op de Waal;
- e extreme windbelastingen.

Voor de gebeurtenissen 1d en 2b t/m 2e kan - op basis van historische gegevens voor de locatie van de KCD - het volgende worden vastgesteld. De kans op uit deze gebeurtenissen voortvloeiende kernbeschadiging is kleiner dan

10^{-6} per jaar (eens in de miljoen jaar). Voor deze begingebourtenissen is de analyse daarom voornamelijk kwalitatief uitgewerkt.

Resultaten van de systeemanalyse van de KCD

Tabel 1 geeft voor de KCD de kans per jaar aan op kernbeschadiging, enerzijds onderverdeeld naar vermogensbedrijf en niet-vermogensbedrijf en anderzijds naar de verschillende begingebourtenissen.

De analyses die hebben geleid tot getallen die in de tabel zijn aangegeven als 'kleiner

dan ...' berusten op conservatieve schattingen (schattingen op basis van ongunstige aannames). Een verdere kwantitatieve analyse van deze begingebourtenissen is, op grond van hun lage bijdrage aan de kans op kernbeschadiging, niet uitgevoerd. In de verdere analyses zijn deze bijdragen buiten beschouwing gelaten.

Uit de tabel blijkt dat de totale kans op kernbeschadiging ca. 6×10^{-5} per jaar (gemiddeld eens in de 17.000 jaar) bedraagt. Hiermee wordt de IAEA-norm voor bestaande centrales (10^{-4} per jaar = gemiddeld eens in de 10.000 jaar) ruimschoots gehaald.

Tabel 1: resultaten van de systeemanalyse

aard van het ongeval

kans op kernbeschadiging
(10^{-6} per jaar)

bij vermogensbedrijf

- **ongevallen met koelmiddelverlies**

- groot verlies van koelmiddel	0,2
- gering verlies van koelmiddel	1,4
- zeer gering verlies van koelmiddel	0,09
- lekkages van systemen buiten het insluitsysteem	0,005

- **procesverstoringen**

- verstoringen met automatische afschakeling van de reactor	7,0
- verstoringen zonder automatische afschakeling van de reactor	3,9
- reactiviteitsverstoringen	< 0,001

- **externe begingebourtenissen in de centrale**

- interne brand	31
- interne overstrooming	1,4
- stoomlekkage	5,5
- door de turbine/generator weggeslingerde afgebroken onderdelen	< 1

- **externe begingebourtenissen van buiten de centrale**

- externe overstrooming	< 1
- aardbevingen	4,3
- extreme windbelastingen	< 1
- inslag van vliegtuigen	< 1
- scheepvaartongevallen op de Waal	< 1

bij niet-vermogensbedrijf

• alle interne begingebourtenissen samen	5,6
-------------------------------------------------	-----

totale kans op kernbeschadiging (afgerond)

60



De analyse op niveau 2

De analyse op niveau 2 van een PSA (proces-analyse) omvat:

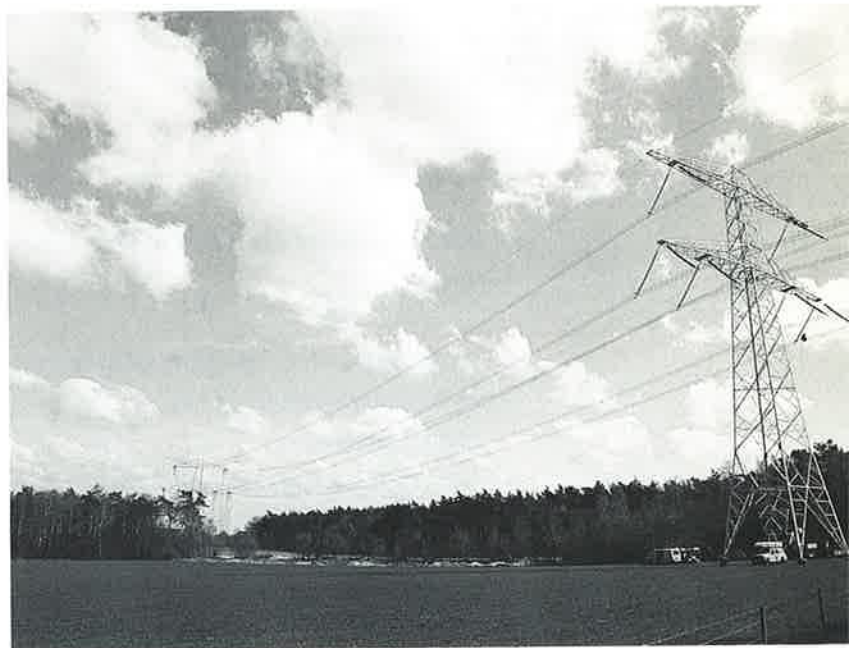
- het bepalen van de ongevalsverlopen;
- het bepalen van het gedrag van de barrières in ernstige ongevalssituaties;
- het bepalen van de lozing van radioactieve stoffen naar de omgeving.

Aard en omvang (de bronterm) van de lozing kunnen worden aangegeven door karakteristieken zoals grootte, samenstelling en tijdsduur van de lozing. Tezamen met de frequenties van optreden vormen deze gegevens de uitgangspunten voor de analyse op niveau 3. Voor het bepalen van de brontermen wordt het ongevalsverloop - vanaf het moment van kernbeschadiging tot aan het vrijkomen van radioactieve stoffen naar de omgeving - geanalyseerd.

Er zijn vijf belangrijke barrières die moeten verhinderen dat radioactieve stoffen (in het bijzonder de splijtingsprodukten) naar de omgeving ontsnappen:

- de eerste barrière wordt gevormd door de splijtstof zelf, waarin zich de splijtingsprodukten bevinden;
- de splijtstofomhulling (splijtstofstaven) vormt de tweede barrière;
- de splijtstofstaven maken deel uit van de reactorkern, die zich binnen de derde barrière bevindt: het reactorvat;
- dit vat is omsloten door een veiligheidsomhulling (hier 'insluitsysteem' genoemd): de vierde barrière;
- de vijfde en laatste barrière is het reactorgebouw.

Een kernbeschadiging, die kan leiden tot het vrijkomen van splijtingsprodukten buiten het reactorgebouw, kan optreden doordat de reactorkern - ook in afgeschakelde toestand - nog langere tijd warmte blijft produceren (de zogeheten 'rest- of vervalwarmte'). De kern moet daarom ook na afschakeling nog worden gekoeld. Stagneert de toevoer van koelwater door een storing of door combinaties van storingen, dan zal de temperatuur van de kern gaan stijgen. Als deze situatie te lang duurt, kan de kern defect raken en uiteindelijk zelfs smelten. Bij het smelten van de splijtstofstaven komen de gasvormige (radioactieve) splijtingsprodukten vrij in het reactorvat. Gesmolten splijtstof zal zich gedeeltelijk verplaatsen naar de onderkant van dit vat, waardoor de bodem eventueel kan bezwijken. Het insluitsysteem en het reactorgebouw moeten dan uiteindelijk de verspreiding van radioactieve stoffen naar de omgeving verhinderen of zoveel mogelijk beperken.



De belangrijkste processen bij kernbeschadiging

Een reactorongeval bestaat uit een aaneenschakeling van storingen en ongewenste processen. In de eerste plaats kan de kern door onvoldoende koeling worden beschadigd. Hierbij komen splijtingsprodukten vrij binnen het reactorvat en het insluitsysteem. Daarna kunnen diverse vervolprocessen plaatsvinden, zoals:

- het smelten van de kern;
- uitstroming van gesmolten kernmateriaal uit het reactorvat;
- interactie met water (stoomvorming, maar ook koeling);
- interactie van gesmolten kernmateriaal met beton.

Deze en tal van andere processen kunnen de druk en/of de temperatuur binnen het insluitsysteem en/of het reactorgebouw zodanig doen toenemen dat deze barrières bezwijken. Mede daardoor zijn deze processen in hoge mate van invloed op de omvang van de mogelijke lozing. Uiteraard zijn de sterkte en de lekdichtheid van deze barrières mede bepalend voor het naar buiten treden van radioactieve splijtingsprodukten.

De procesanalyse van de KCD

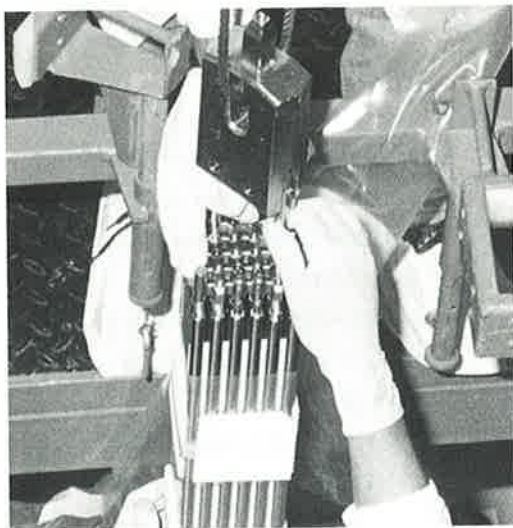
De analyse op niveau 2 had de volgende doelstellingen:

- het bepalen van de mogelijke belastingen op het insluitsysteem en het reactorgebouw;
- het bepalen van de kansen op falen daarvan;
- het bepalen van de resulterende brontermen met hun frequentie.

Met deze doelstellingen zijn de ongevalsverlopen geanalyseerd vanaf de aanvang van een storing tot aan het eventueel vrijkomen van radioactieve stoffen. Daarbij is rekening gehouden met alle relevante processen. Belangrijke stappen in de analyse omvatten:

- **evaluatie van de resultaten van de systeemanalyse en - naar aanleiding daarvan - samenvoeging van vergelijkbare ongevalsverlopen tot ongeveer 40 verschillende uitgangssituaties; deze situaties worden bepaald door de status van een aantal systemen;**
- **bepaling van de eigenschappen van het insluitsysteem voor zover die een rol kunnen spelen bij ongevalsverlopen, zoals:**
 - **de faalmechanismen van het insluitsysteem bij hoge druk en verhoogde temperaturen;**
 - **lekkages;**
 - **het doorsmelten van de bodem van de reactorkamer;**
 - **het gedrag van de insluitsysteemgrenzen ten gevolge van dynamische belastingen zoals stoomexplosies;**
 - **het falen van het insluitsysteem als gevolg van gebroken leidingen;**
- **ontwikkeling van een probabilistisch logisch model dat alle denkbare wegen omvat waarlangs een ernstig ongeluk zich kan ontwikkelen, uitgaande van de begingebourtenissen;**
- **analyses van het verloop van een groot aantal ernstige ongevallen teneinde na te gaan hoe temperaturen, drukken en massastromen verlopen in het reactorvat, het insluitsysteem en het reactorgebouw.**

Alle beschouwde ongevalsverlopen zijn ingedeeld in 10 groepen. Binnen elke groep zullen de ongevalsverlopen ongeveer gelijke gevolgen voor de omgeving veroorzaken. De groepen zijn onderscheiden op basis van de grootte van de lozing en aan de hand van andere kenmerken. Zoals: het tijdstip en de duur van de lozing en de hoogte van het lozingspunt. Per groep is de bronterm met behulp van een karakteristiek scenario bepaald.



Resultaten van de procesanalyse van de KCD

In Tabel 2 worden enkele belangrijke gegevens van de 10 onderscheiden brontermen vermeld. De in de tabel genoemde begintijd is de tijdsduur tussen het afschakelen van de reactor en het eerste moment van een merkbare lozing. De aangegeven fracties hebben betrekking op de hoeveelheid geloosde stoffen ten opzichte van de totale aanwezige hoeveelheden in de kern op het einde van een reactorcyclus (de periode tussen twee wisselingen van de splijtstof). Omdat dan de meeste splijtstofproducten in de reactorkern aanwezig zijn, representeert dit moment de meest ongunstige situatie.

Tabel 2: karakteristieken van de diverse brontermen

bronterm	begintijd lozing [uur]	tijdsduur duur lozing [uur]	totaal geloosde percentage			
			edelgassen	Cs (CsOH)	I (CsI)	Te
1	0,0	5,3	83	1,6	2,0	1,4
2	90	21	80	3,1	4,2	3,8
3	11,7	25,3	97	13,2	16,8	11,0
4	90	21	80	1,0	1,4	1,3
5	0,3	11,5	76	0,6	1,0	0,8
6	33,3	2,8	57	0,15	0,50	32
7	11,1	25,8	97	0,003	0,003	0,002
8	54,2	29,2	91	0,078	0,015	0,068
9	3,2	120	11	6×10^{-9}	6×10^{-9}	3×10^{-9}
10	—	—	geen	geen	geen	geen

Wanneer er snel na het begin van een ongeval een hoeveelheid radioactiviteit uit het insluitsysteem vrijkomt, dan spreekt men van een 'vroeg lozing'; dit is het geval bij de oneven brontermen van Tabel 2. De brontermen met even nummers vertegenwoordigen ongevalsverlopen met een relatief late lozing van radioactieve stoffen.

Of er sprake is van een vroeg of een late lozing, hangt nauw samen met het gedrag van het insluitsysteem. Het eventuele falen hiervan is als volgt te karakteriseren:

- **bij kernbeschadiging ten gevolge van interne gebeurtenissen:**
 - in 10% van de gevallen geen falen;
 - in 64% van de gevallen vroeg falen, waarbij:
 - in 32% van de gevallen als gevolg van het (deels) smelten van de kern door de bodem van de reactorkamer;
 - in 29% van de gevallen als gevolg van overdruk, voordat kernbeschadiging optreedt;
 - in 3% van de gevallen als gevolg van overdruk, nadat reeds kernbeschadiging heeft plaatsgevonden;
- **bij kernbeschadiging ten gevolge van externe gebeurtenissen:**
 - in 12% van de gevallen door lekkage vanuit op het insluitsysteem aangesloten systemen;
 - in 44% van de gevallen vroeg falen, waarbij:
 - in 34% van de gevallen als gevolg van het (deels) smelten van de kern door de bodem van de reactorkamer;
 - in 10% van de gevallen als gevolg van overdruk;
 - in 35% van de gevallen afblazen van het insluitsysteem via de daarvoor bestemde filters;
 - in 9% van de gevallen laat falen, nadat reeds kernbeschadiging heeft plaatsgevonden.



Tabel 3: kansen op optreden (per jaar) van de diverse brontermen (bij vermogensbedrijf)

bronterm	bijdrage ($\times 10^{-6}$) als gevolg van interne gebeurtenissen	bijdrage ($\times 10^{-6}$) als gevolg van externe gebeurtenissen	frequentie [10^{-6} /jaar] totaal
1	0,2	5,0	5,2
2	1,8	1,7	3,6
3	2,7	5,1	7,8
4	1,6	13,8	15,4
5	0,1	0,1	0,3
6	0,3	0,2	0,6
7	0,1	0,4	0,5
8	0,2	0,3	0,4
9	1,4	4,9	6,3
10	4,1	11,0	15,1

In Tabel 3 worden de kansen van optreden vermeld van de diverse brontermen voor de vermogenssituatie. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de kansen ten gevolge van interne en die ten gevolge van externe gebeurtenissen.

N.B.: de waarden in Tabel 3 zijn afgeronde uitkomsten van de berekeningen; door het afronden is de som van de getallen in kolom 2 en 3 niet altijd exact gelijk aan de in kolom 4 genoemde totaalwaarde.

De in Tabellen 2 en 3 opgenomen resultaten vormen belangrijke invoergegevens (brontermen) voor de analyse op niveau 3 van de PSA.



De analyse op niveau 3

Voor de analyse op niveau 3 (omgevingsanalyse) zijn de gevolgen van de lozing van de onderscheiden brontermen geanalyseerd. Achtereenvolgens zijn voor elk van deze brontermen verspreidings-, dosis- en risicoberekeningen uitgevoerd. Daarbij is rekening gehouden met de volgende basisgegevens:

- **het tijdsverloop van de lozing, d.w.z. het tijdsbestek tussen het afschakelen van de reactor en het begin van de lozing;**
- **de duur van de lozing;**
- **de hoeveelheid geloosde radionucliden;**
- **het spectrum van de geloosde radionucliden;**
- **de chemische en fysische samenstelling van de lozing;**
- **de energie-inhoud van de lozing;**
- **de hoogte waarop de lozing plaatsvindt (lozing via de ventilatieschacht of vanuit het reactorgebouw);**
- **de kans van optreden;**
- **de verschillende belastingspaden waarlangs mensen een dosis kunnen oplopen.**

De gevolgen zijn geanalyseerd op probabilistische basis. Dit houdt in dat rekening is gehouden met het feit dat in principe een ongeval op elk moment van de dag en op elke dag van het jaar kan plaatsvinden. De weersomstandigheden, die bepalen hoe de verspreiding van de atmosferische lozing en hoe de depositie van de radionucliden op het aardoppervlak plaatsvinden, zijn echter in hoge mate variabel. Daarbij spelen bepaalde seizoensafhankelijke tendensen een rol. Bij de berekeningen is daarom rekening gehouden met de mate van waarschijnlijkheid van een bepaald weertype.

Na het bepalen van de resulterende stralingsdoses zijn de daaruit voortvloeiende risico's berekend, zowel voor wat betreft de

deterministische als voor wat betreft de stochastische gezondheidseffecten. De thans beschikbare technieken maken het mogelijk ook een groot aantal andere zaken in kaart te brengen, zoals de landbouwkundige en economische gevolgen van een nucleair ongeval. Ook kan het effect van tegenmaatregelen, ter beperking van de gevolgen, worden beschreven.

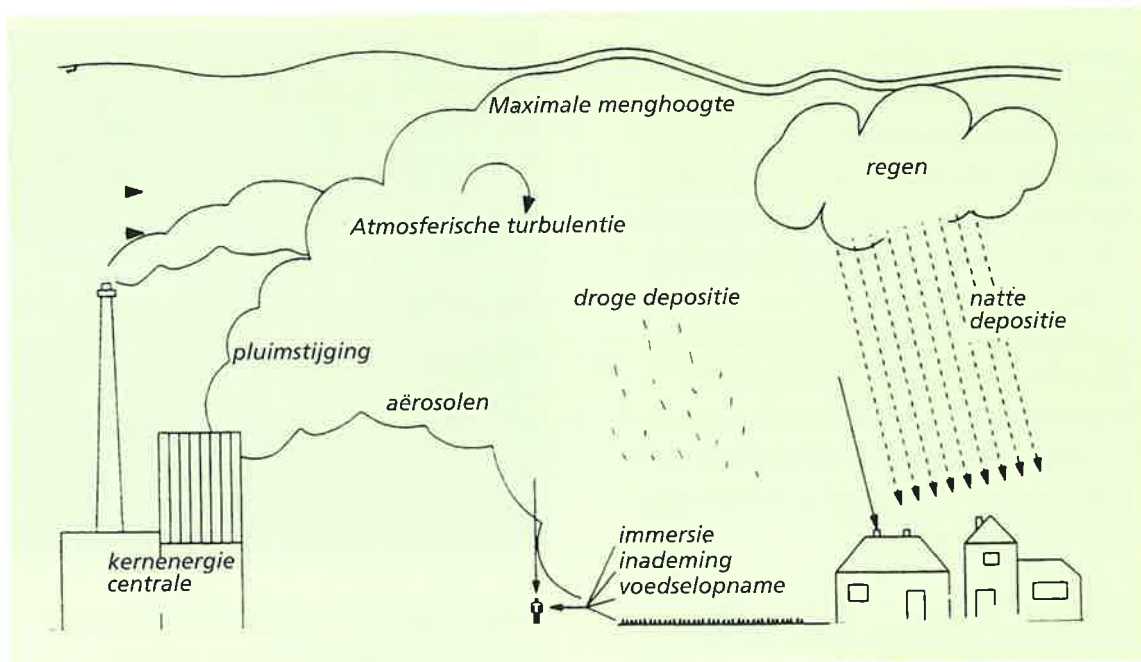
Belangrijke processen

De in de atmosfeer geloosde radioactieve materialen worden als een fijn aërosol of als een gas door de wind meegevoerd in de vorm van een pluim. Tegelijkertijd vindt verdunning plaats door wervelingen (turbulenties) in de atmosfeer. Daarnaast verdwijnt materiaal uit deze wolk door droge en natte depositie. Behalve door deze mechanismen nemen de concentraties in de pluim en op de grond ook af door radioactief verval.

Depositie van radionucliden leidt tot besmetting van het grondoppervlak. De mate van droge depositie hangt onder meer af van de deeltjesgrootteverdeling van het aërosol en van de chemische eigenschappen van de deeltjes. Natte depositie is het resultaat van interactie van de deeltjes met neerslag (regen, sneeuw, etc.).

De dispersie- en depositieprocessen zijn afhankelijk van de actuele weerscondities, zoals stabiliteit van de luchtlagen, windrichting, windsnelheid en regenintensiteit. Omdat de weerscondities continu veranderen, houden de modellen die deze processen beschrijven daar rekening mee.

De verspreide en gedeponeerde radionucliden bestralen de mens via verschillende belastingspaden, namelijk door uitwendige bestraling, door inhalatie (inademing) van radioactiviteit of door ingestie (nuttigen) van besmet voedsel. Deze belastingspaden kunnen leiden tot stralingsdoses die zelfs lang na de eigenlijke lozing worden ontvangen. De bepaling van de lucht- en grondbesmetting op



Figuur 1: mogelijke belastingspaden.

een bepaalde plaats maakt het mogelijk de stralingsdosis te berekenen die de mens ter plaatse oploopt. De belangrijkste belastingspaden waarlangs mensen een dosis oplopen, zijn (zie ook Figuur 1):

- externe bestraling door de radioactieve materialen in de passerende wolk (pluimstraling);
- externe bestraling door de radioactieve materialen die op de grond zijn gedeponerd (grondstraling);
- externe bestraling door radioactieve materialen die op de huid en kleding zijn gedeponerd (besmetting, contaminatie);
- interne bestraling door ingeademde materialen vanuit de passerende wolk (inhalatie);
- interne bestraling door radioactieve materialen die worden geïnhaleerd na het opwaaien van gedeponerde materialen (resuspensie);
- interne bestraling door het nuttigen van gecontamineerd voedsel (ingestie).

Het is duidelijk dat sommige belastingspaden leiden tot bestralingen van relatief korte duur (bijv. pluimstraling), terwijl via andere belastingspaden de blootstellingsduur zich over vele jaren na het ongeval zal uitstreken. De bestraling kan zelfs levenslang voortduren (bijv. via ingestie).

Hoge doses, opgelopen in korte tijd, veroorzaken deterministische gezondheidseffecten (ook 'vroeg effecten' genoemd), die zich voornamelijk binnen enkele weken of maanden na de blootstelling openbaren. Lage doses kunnen aanleiding geven tot stochastische gezondheidseffecten ('late effecten') zoals kanker, die zich ook vele jaren na bestraling nog kunnen openbaren. De gehanteerde dosis/effectmodellen houden rekening met deze verschillende effecten. Het individuele overlijdensrisico bestaat uit de som van het risico van vroeg sterfte en het risico van later overlijden aan kanker als gevolg van de stralingsbelasting.

De dosisberekeningen worden in het algemeen uitgevoerd door de individuele doses te bepalen als een functie van de afstand tot het lozingspunt. Het is echter ook mogelijk collectieve doses te berekenen door de individuele doses in een zeker gebied te vermenig-

vuldigen met het aantal inwoners in dat gebied en de uitkomst vervolgens op te tellen bij de overeenkomstige resultaten uit alle andere gebieden. De collectieve dosis van de bevolking kan op die manier worden beschouwd als een maat voor de ernst van de gevolgen van het ongeval.

Naast het individuele risico is ook het groepsrisico bepaald, d.w.z. de kans dat bepaalde aantallen mensen kort na de lozing overlijden ten gevolge van blootstelling aan de geloosde radionucliden. Het gaat bij dit risico altijd om vroege effecten.

De situatie met betrekking tot de centrale Dodewaard

De omgevingsanalyse voor Dodewaard is uitgevoerd overeenkomstig de Nederlandse richtlijn voor niveau 3 PSA en in overeenstemming met de Nederlandse handleiding beleidsstandpunten (VROM) ten aanzien van stralenbescherming. Dit betekent dat de parameterwaarden voor de berekeningen zodanig zijn gekozen dat aan de specifieke vereisten van



het Nederlandse risicobeleid is voldaan. Hierna worden de belangrijkste gegevens nader gespecificeerd.

Het is praktisch onuitvoerbaar om volledige omgevingsanalyses uit te voeren voor alle mogelijke weerscondities in de omgeving van Dodewaard. Daarom werd voor deze berekeningen een representatieve selectie gemaakt van de weersomstandigheden op basis van historisch bekende gegevens. Deze selectie is



zodanig uitgevoerd dat de berekeningen hebben geleid tot het hele scala van mogelijke gevolgen, met de bijbehorende kansen dat deze weertypen in een jaar zullen optreden. Bij deze berekeningen komt het probabilistische karakter dus naar voren in de gehanteerde rekenwijze.

Omdat gedetailleerde weersgegevens voor de omgeving van Dodewaard in onvoldoende mate beschikbaar waren, zijn voor de berekeningen de weersgegevens van een ander weerstation gebruikt. Gehanteerd zijn de gegevens van Schiphol over de jaren 1982 en 1983. Deze zijn representatief en komen voor het doel van de berekeningen in voldoende mate overeen met de gegevens van Dodewaard.

De bevolkingsgegevens rond de centrale Dodewaard zijn vastgelegd in een raster van 500 bij 500 meter, tot op 25 km afstand van de centrale in zowel de noord-zuid als de oost-west richting. Het aantal inwoners in elke sector van dit raster is bepaald aan de hand van bevolkingsgegevens van de desbetreffende gemeenten (gegevens uit 1991).

De bevolkingsgegevens voor buiten dit gebied, inclusief de rest van Europa, zijn ingevoerd op basis van een raster van 5 bij 5 km.

De atmosferische verspreiding van de geloosde radionucliden is vastgesteld door de luchtconcentratie en de depositie van de geloosde radionucliden voor elk rasterpunt te berekenen. Voor de verspreidingsberekeningen op de korte afstand - dat wil zeggen binnen enige tientallen kilometers van de centrale - is gebruik gemaakt van een zogeheten 'gesegmenteerd gaussisch pluimtraject-model'. In dit model wordt het traject van de pluim elk uur aangepast aan de actuele weersomstandigheden.

Voor de grotere afstanden, tot 3000 km, is een model gekozen dat gebruik maakt van een gegevensbestand van meteorologische condities dat geheel Europa bestrijkt. Dit model



beschouwt de lozing als een serie van pluimen, geloosd met een tussenpoos van drie uur. Het traject van deze pluimen wordt berekend met behulp van atmosferische windvelden.

De dosisberekeningen voor de korte termijn (ten behoeve van berekeningen van de vroege effecten) zijn uitgevoerd voor verschillende organen in het menselijk lichaam. Voor de lange termijn (ten behoeve van berekeningen van de late effecten) zijn de effectieve doses berekend. De dosisberekeningen zijn uitgevoerd onder de aanname dat na een ongeval met de KCD geen tegenmaatregelen (schuilen, evacuatie, jodiumprofylaxe) worden getroffen. Bij de berekening is ook de relatieve bijdrage van de diverse nucliden en belastingspaden aan de totale dosis aangegeven.

Voor het berekenen van de blootstelling ten gevolge van ingestie van besmet voedsel zijn de voedselproducten gegroepeerd in negen categorieën. De gehanteerde consumptiegetallen per voedselcategorie zijn in overeenstemming met de gegevens in de Nederlandse beleidsstandpunten. In de berekeningen wordt rekening gehouden met vertragingstijden tussen het oogsten en de consumptie en met vermindering van activiteit door voedselbereiding.

Volgens het overheidsbeleid wordt voedsel uit de handel genomen indien de besmettingsniveaus uitstijgen boven de normen (interventiewaarden), zoals vastgesteld door de Europese Unie. Verondersteld wordt dat alle producten in een categorie uit de handel worden genomen

indien minstens één produkt uit die categorie besmet is boven de interventiewaarde.

In overeenstemming met de Nederlandse richtlijnen zijn de doses ter evaluatie van het individueel risico berekend voor de meest kwetsbare groep (1-jarige kinderen), voor een blootstellingsperiode van 70 jaar na het gepostuleerde ongeval.

Het risico van deterministische (vroeg) gezondheidseffecten is een functie van de dosis. Het speelt pas een rol boven een zekere drempelwaarde. Bij de modellering is er daarom van uitgegaan dat een acute stralingsdosis onder de drempel niet bijdraagt aan het

risico op vroege effecten, maar wel aan het risico op late effecten.

De stochastische (late) effecten die worden beschouwd, betreffen verschillende soorten kanker en genetische effecten. Het aantal gezondheidseffecten is berekend met behulp van een lineaire dosis/effect-relatie, zonder drempeldosis. Dit betekent dat de kans op het effect evenredig toeneemt met de opgelopen dosis en dat elke dosis - hoe klein ook - bijdraagt aan die kans.

Het totale individuele risico bestaat uit de som van het overlijdensrisico ten gevolge van deterministische effecten en het resterende overlijdensrisico als gevolg van stochastische effecten.

Om inzicht te krijgen in het effect van eventuele tegenmaatregelen op het individuele en het groepsrisico zijn vervolgens ook berekeningen uitgevoerd waarin dergelijke maatregelen wel zijn verdisconteerd. Daarbij is de eerder berekende situatie (geen tegenmaatregelen) vergeleken met de situatie dat optimaal gebruik wordt gemaakt van het tijdsverloop van het ongeval om beschermende maatregelen tegen de gevolgen van het ongeval te treffen.

De tegenmaatregelen zijn gemodelleerd in overeenstemming met de interventieniveaus van het Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding (NPK). Ze omvatten: schuilen, jodiumprofylaxe en evacuatie.

Een belangrijk onderdeel van de analyse van de gevolgen van een ongeval is het schatten van de onzekerheid in elk verkregen resultaat. Eén van de grootste onzekerheden van de consequentie-analyse is het weer gedurende en in de periode na een ongeval. Door alle mogelijke weerscondities te beschouwen, is een reeks van uitkomsten verkregen met elk een zekere waarschijnlijkheid. Dit staat dus los van de onzekerheden in de modellen en de in die modellen gebruikte parameters.



Veel van die gehanteerde parameters hebben een aanzienlijke inherente onzekerheid. Ook de modellen en aannames vormen een bron van onzekerheid. Zo wordt de dispersie van de radionucliden in de atmosfeer met toenemende afstand tot de bron steeds onzekerder, onder meer vanwege de beperkingen van de dispersiemodellen. Op zeer korte afstand (minder dan 1 km) is er nog een andere onzekerheid: de nog slecht begrepen en moeilijk te modelleren invloed van gebouwen en andere obstakels. Om deze reden worden de consequenties van een nucleaire lozing (internationaal) gewoonlijk pas geëvalueerd vanaf 1 km van het lozingspunt. In deze studie vindt de evaluatie evenwel plaats voor effecten op een afstand van minimaal 200 meter vanaf de ventilatieschacht.

Resultaten van de omgevingsanalyse van de KCD

De hier gepresenteerde resultaten van de analyse op niveau 3 gaan uit van de bestaande situatie van de centrale (februari 1994). Deze resultaten betreffen het aantal vroege slachtoffers en het maximale individuele risico (zowel met als zonder tegenmaatregelen).

De resultaten van de berekeningen van het aantal vroege slachtoffers worden gepresenteerd in de vorm van een curve (een zogeheten complementaire cumulatieve frequentiedistributie). Daarin kan de kans worden afgelezen dat het daarbij behorende effect (in dit geval het aantal slachtoffers) wordt overschreden.

Voor de presentatie van de berekeningen van het maximale individuele risico wordt gebruik gemaakt van de maximale verwachtingswaarde over alle sectoren van de windroos. De maximale verwachtingswaarde is het gewogen gemiddelde over alle weerssituaties, uitgedrukt als functie van de afstand tot het lozingspunt.

Het groepsrisico

Voor het bepalen van het groepsrisico is de omgeving van de centrale ingedeeld in segmenten. Een segment bestaat uit een grondstuk binnen een windroossector van 5°, begrensd door bepaalde afstanden (bijvoorbeeld 200 en 500 meter) tot de bron.

Voor alle segmenten is het overlijdensrisico als gevolg van vroege effecten bepaald. Dit is gebeurd bij elk van de 10 brontermen voor een groot aantal representatieve weerssituaties. Door de overlijdenskans per segment te vermenigvuldigen met het aantal mensen binnen dit segment wordt het aantal korte-termijn-overlijdensgevallen verkregen per bronterm en per segment bij een bepaalde weerssituatie.

Op basis van de uitgevoerde omgevingsanalyse mag worden verwacht dat er maximaal één persoon zal overlijden als gevolg van



vroege effecten na een ongeval. De kans hierop bedraagt 2×10^{-8} per jaar (één overlijdensgeval per 50.000.000 jaar). Aangezien de richtlijn voor het bepalen van het groepsrisico tien of meer dodelijke slachtoffers veronderstelt, voldoet de KCD aan het door de overheid gestelde criterium.

Het hierboven genoemde getal heeft betrekking op een situatie waarin geen tegenmaatregelen worden getroffen. Worden die maatregelen wel (en tijdig) genomen - overeenkomstig het Nationaal Plan voor Kernongevallenbestrijding - dan kunnen dodelijke slachtoffers als gevolg van vroege

effecten geheel worden voorkomen. Uiteraard voldoet de KCD ook dan aan het door de overheid gestelde criterium.

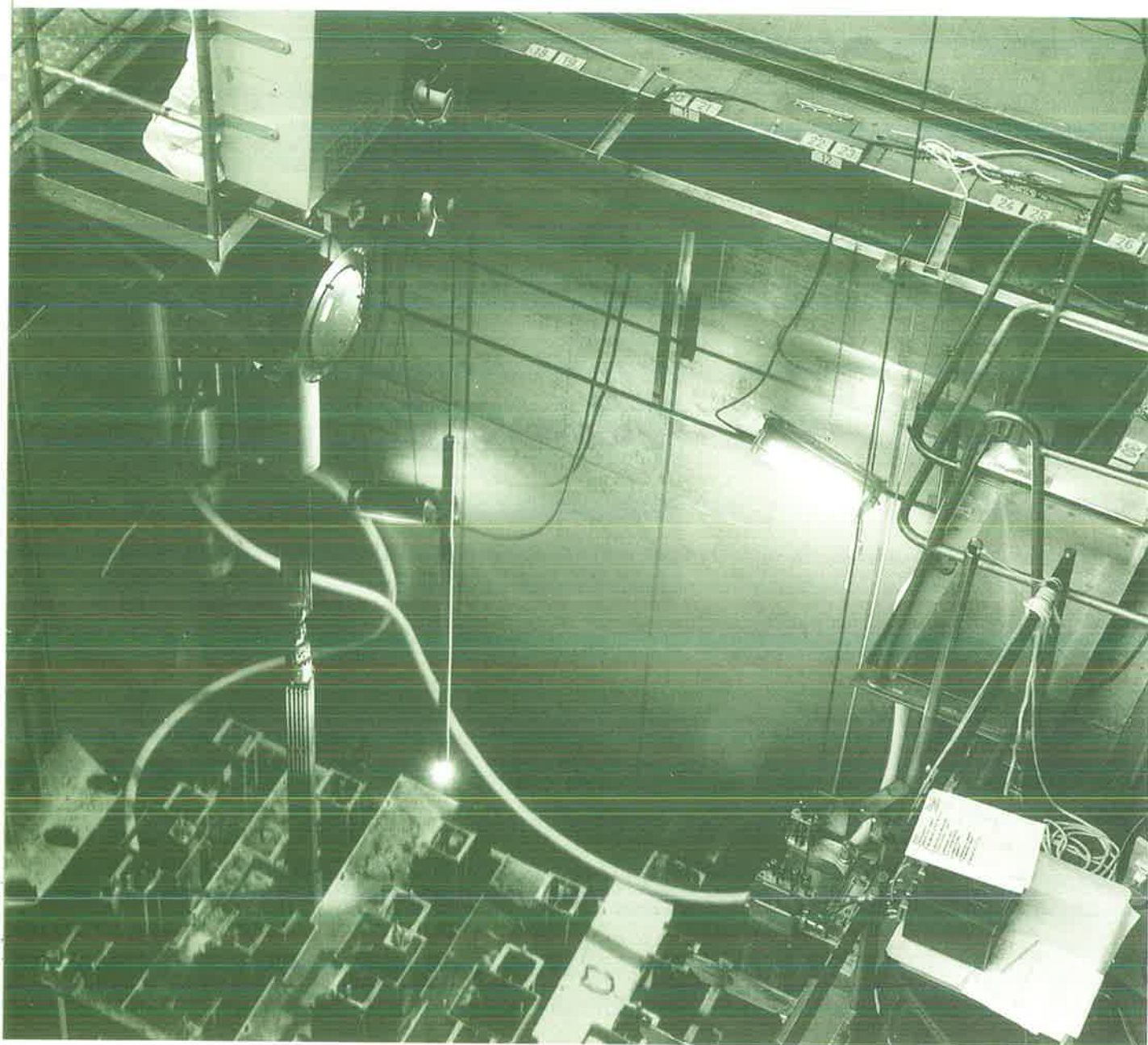
Individueel risico

Het individuele risico wordt berekend door het overlijdensrisico ten gevolge van korte-termijneffecten op te tellen bij het resterende lange-termijnrisico. Het individuele risico is bepaald als functie van de afstand tot de lozingsbron. Hierbij wordt het maximum van de gemiddelde waarden over alle segmenten per afstand

gepresenteerd, rekening houdend met de frequentie van de diverse weersomstandigheden.

De analyses zijn uitgevoerd voor het gebied buiten de terreingrens, vanaf 200 meter van het lozingspunt. Uit deze analyses blijkt dat het individuele risico afneemt naarmate de afstand tot het lozingspunt toeneemt.

De afzonderlijke bijdragen van de diverse belastingspaden aan het lange-termijnrisico is voor de 9 relevante brontermen (bronterm 10 geeft geen lozing) aangegeven in Tabel 4.



In Figuur 2 wordt het totale maximale individuele risico per jaar voor de meest kwetsbare groep (1-jarige kinderen) gepresenteerd als functie van de afstand (doorgetrokken lijn);

Tabel 4: procentuele bijdragen van de diverse belastingspaden aan het lange-termijnrisico voor de 9 relevante brontermen, op 200 meter afstand van het lozingspunt

bronterm	pluimstraling	grondstraling	inhalatie	ingestie	re-suspensie
1	2,3	51	47	0,02	0,5
2	0,06	68	31	0,05	0,5
3	0,08	58	41	0,01	0,5
4	0,2	97	1,7	0,3	0,9
5	8,1	42	50	0,1	0,6
6	0,1	38	61	0,2	0,7
7	3,6	3,8	93	0,006	0,08
8	0,4	53	46	0,3	0,4
9	74	1	25	0,02	0,02

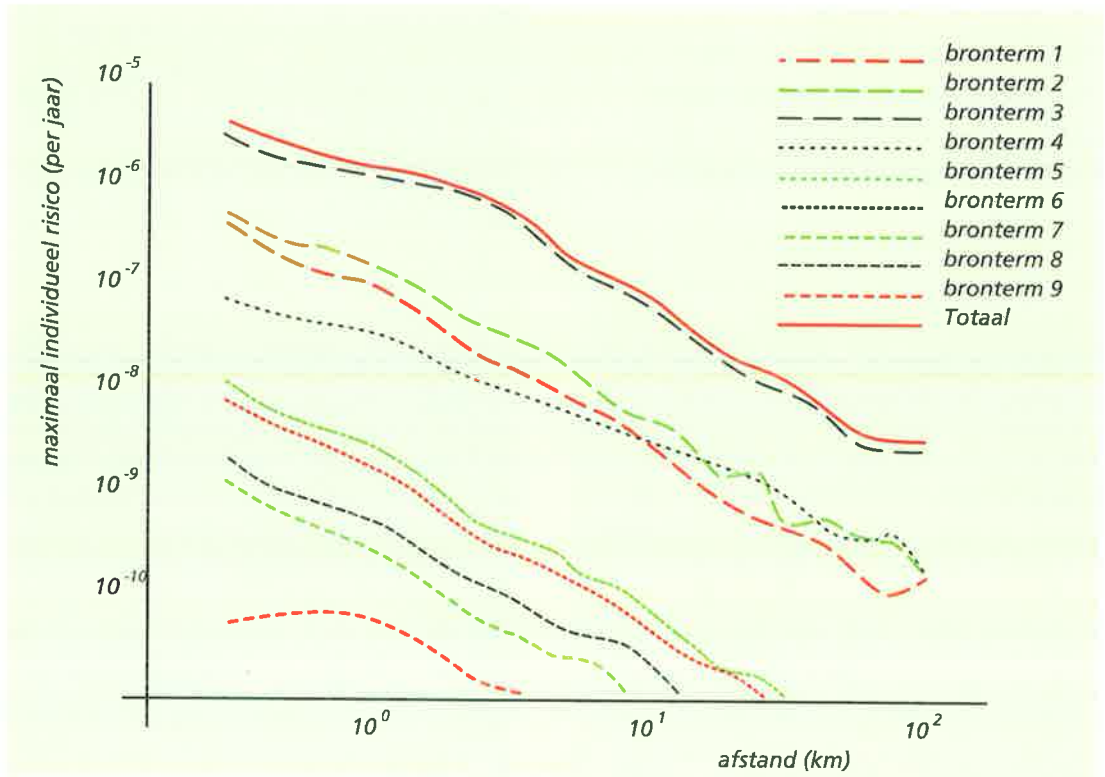
Ook het individuele risico als gevolg van de afzonderlijke brontermen wordt aangegeven. Het maximale individuele risico op 200 meter afstand (als gevolg van zowel vroege als late gezondheidseffecten en voor alle brontermen tezamen) blijkt 4×10^{-6} per jaar te zijn. Voor alle andere segmenten en grotere afstanden is het risico lager.

Bronterm 3 overheerst, voor wat betreft de gevolgen, de andere brontermen. Dit wordt, behalve door de berekende kans van optreden, ook veroorzaakt door de bij deze bronterm optredende grote lozingen van caesium (13% van de kerninhoud) en jodium (17% van de kerninhoud). Deze lozingen zijn ongeveer een factor 5 hoger dan bij de op één na belangrijkste bronterm (2) het geval is. Voor bronterm 3 zijn de belangrijkste radioactieve stoffen die bijdragen aan het inhalatiepad: jodium (74%) en tellurium (17%). De belasting ten gevolge

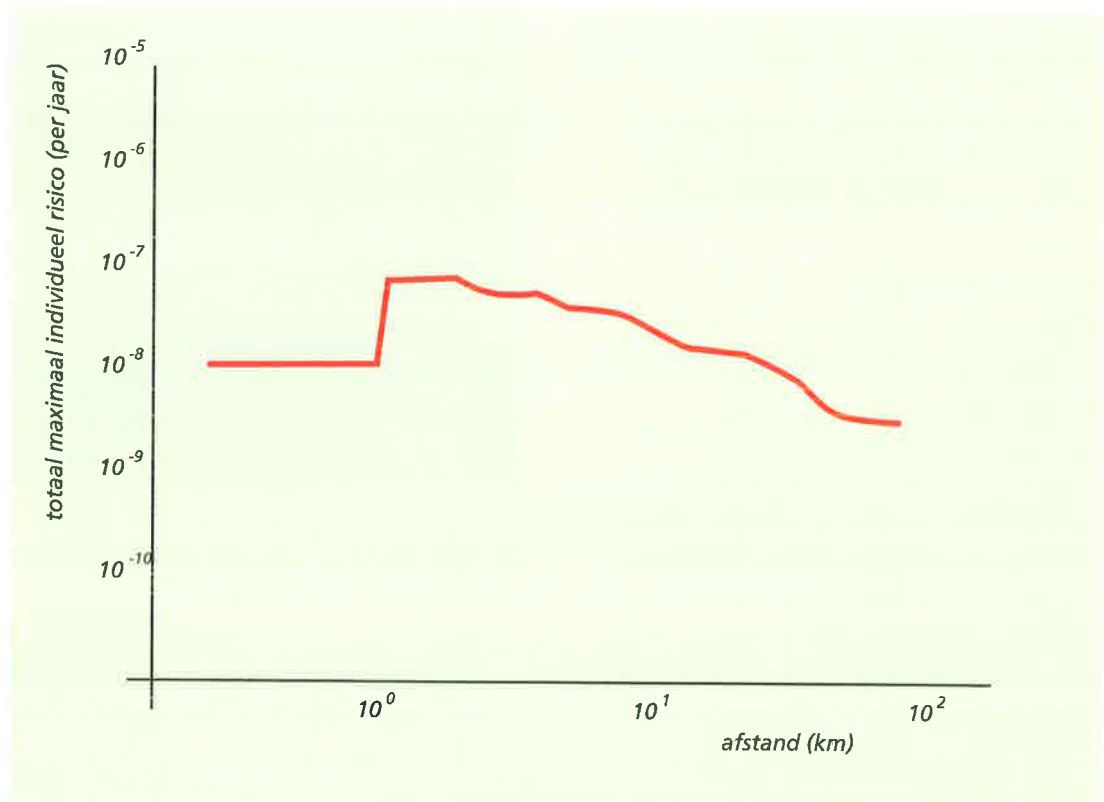


van grondstraling wordt voor 95% bepaald door caesium.

De toepassing van tegenmaatregelen binnen een straal van 1 km leidt tot een sterke reductie van het risico. In Figuur 3 wordt dit getoond. Het totale maximale individuele risico op 200 meter afstand bedraagt in dat geval circa 10^{-8} per jaar.



Figuur 2: totaal maximaal individueel risico per jaar (geen tegenmaatregelen).



Figuur 3: totaal maximaal individueel risico per jaar bij toepassing van tegenmaatregelen.



Eindconclusies

Uit de probabilistische veiligheidsanalyse kunnen de volgende eindconclusies worden getrokken.

- De frequentie van kernbeschadiging bedraagt 6×10^{-5} per jaar (gemiddeld eens per 17.000 jaar), wat ruim ligt onder de waarde van 1×10^{-4} per jaar (gemiddeld eens per 10.000 jaar) die de norm is van het IAEA voor bestaande centrales.
- Het groepsrisico bedraagt maximaal één dodelijk slachtoffer, met een kans van 2×10^{-8} per jaar (eens per 50 miljoen jaar). Omdat de richtlijn voor het groepsrisico tien of meer directe slachtoffers veronderstelt, voldoet de KCD aan het door de overheid gestelde criterium.
- Het individuele risico voor de meest kwetsbare groep (1-jarige kinderen) bedraagt voor de vroege en late effecten samen 4×10^{-6} per jaar (kans op overlijden van 1:250.000 per jaar) op een afstand van 200 meter van het lozingspunt; met toenemende afstand neemt dit risico verder af.
- Door het nemen van tegenmaatregelen neemt het individuele risico voor de meest kwetsbare groep af tot minder dan 10^{-7} per jaar (een op de 10 miljoen jaar).

De uitgevoerde PSA heeft bovendien informatie verschaft over de mogelijkheden om verbeteringen in de centrale en de procedures aan te brengen die het risico kunnen verlagen. Tezamen met de resultaten van studies die zijn uitgevoerd in het kader van de tienjaarlijkse herevaluatie van de nucleaire veiligheid en stralenbescherming, is een pakket modificatievoorstellen samengesteld dat het veiligheidsniveau van de centrale nog verder zal verhogen en dat de risico's in overeenstemming zal brengen met het risicobeleid van de overheid.