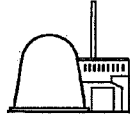


**Reactor Instituut Delft
TU Delft**



Hoger Onderwijs Reactor

**Rapportage 'Stresstest-2011 HOR-RID'
Veiligheidsevaluatie in het licht van het Fukushima ongeval**

Versie 1

Technische Universiteit Delft
Faculteit Technische Natuurwetenschappen
Reactor Instituut Delft

versie	Datum	Omschrijving
0.x	Start: 14 juni 2011	Werkdocument
1	Due: 31 oktober 2011	Voortgangs- /tussenrapport
2	Due: 16 februari 2012	Eindrapport ter instemming
3	Due: 30 juni 2012	Eindrapport afgerond

Auteur:	Beoordeeld:
Kenmerk: HOR/2011/Stresstest2011HOR	Goedgekeurd:

Inhoudsopgave

1	Introductie	5
1.1	RID in het IAEA ongevals kader.....	6
1.2	RID in het nationaal ongevals kader.....	7
2	Algemene beschrijving.....	9
2.1	Omgevingsaspecten	9
2.2	Installatie aspecten	11
2.3	Ontwerp basis ongevallen (DBA)	14
2.4	Buiten ontwerp basis ongeval	17
2.5	Kans op smelten van de kern.....	18
2.6	Maximale gevolgen HOR.....	20
3	Aardbevingen.....	23
3.1	Ontwerpbasis	24
3.1.1	Aardbeving waartegen de installatie is ontworpen.....	25
3.1.2	Voorzieningen in kader van DBE	25
3.1.3	Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis	26
3.2	Evaluatie van de marges.....	26
3.2.1	Aanwezige informatie	26
3.2.2	Specificatie, gebaseerd op aanwezige informatie maximale aardbeving waartegen de installatie bestand is	27
3.3	Aardbeving boven DBE.....	27
4	Overstromingen.....	29
4.1	Ontwerpbasis	29
4.1.1	Overstroming waartegen de installatie is ontworpen.....	29
4.1.2	Voorzieningen in kader van DBF	29
4.1.3	Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis	30
4.2	Evaluatie van de marges.....	30
4.2.1	Aanwezige informatie	30
4.3	Overstroming boven DBF.....	31
5	Referenties.....	33

1 Introductie

- Uitleg van de aanpak voor de HOR

Het ongeval met de kerncentrales in Fukushima op 11 maart 2011 heeft op Europees niveau geleid tot de beslissing om alle Europese kerncentrales te onderwerpen aan een veiligheidsherevaluatie met de bedoeling om te leren van de gebeurtenissen als in Japan, die boven de oorspronkelijke ontwerp-omstandigheden uitgaan, zodat een dergelijk ongeval met ernstige gevolgen in Europa kan worden uitgesloten. Deze herevaluatie wordt in het politiek-publiekelijk debat aangeduid als 'stresstest' [1].

In Nederland hecht het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) eraan om niet alleen de kerncentrale Borssele aan deze stresstest te onderwerpen, maar worden ook de Nederlandse onderzoeksreactoren en overige nucleaire installaties uitgenodigd om op vrijwillige basis deze extra evaluatie uit te voeren.

De stresstest moet leiden tot het besef in hoeverre bij een installatie ernstige nucleaire ongevallen voorkomen kunnen worden, terwijl de voorziene noodmaatregelen als gevolg van (toenemende) extreme externe situaties wegvallen. Als resultaat zal de stresstest inzicht geven in de reactie van de installatie en het managementsysteem op situaties die het ontwerp ontstijgen, eventuele zwakke plekken hierin onderkennen en aangeven hoe zwakke plekken verbeterd kunnen worden.

In Europees verband is afgesproken dat de stresstest, gezien de afgesproken korte evaluatieperiode, door de vergunninghouders zal worden uitgevoerd op basis van de beschikbare veiligheids- en ontwerpstudies. Hierbij is aangetekend dat het denkbaar is dat door het korte tijdsbestek sommige berekeningen niet beschikbaar zullen zijn voor scenario's die niet in het huidige ontwerp zijn opgenomen.

Omdat – in tegenstelling tot reactoren met hogere vermogens – de feitelijke gevaarzetting van een reactor als de HOR in Delft zeer beperkt is, zal de analyse zich eerst richten op de maximaal mogelijke consequentie op grond van de totale radiologische inventaris van de HOR ten opzichte van nationale en internationale ongevalkwalificering. Het meest verstrekkende scenario is een vliegtuigongeval op de HOR, waarbij de kern smelt en de inventaris via de lucht naar het milieu wordt verspreid.

Een conclusie is dat de maximale potentiële dosis voor leden van de bevolking zelfs voor dat extreme ongeval onder de waarde blijft die volgens de Nederlandse wetgeving (NPK) 'ingrijpen in de persoonlijke levenssfeer' rechtvaardigen.

Het is voor het RID dan ook niet zinvol om de analyse te betrekken op een stapsgewijze vergroting boven de ontwerpwaarde van bijvoorbeeld een aardbeving of overstroming, daar ook in de ernstigste uitvoering daarvan geen sprake is van ernstige ongevalcondities voor de bevolking. Om aan de doelstelling 'het onderkennen van zwakke punten en hoe deze verbeterd kunnen worden' te voldoen, zal de analyse echter wel alle 'actoren' volgens de

ASN en ENSREG aanbevelingen met de maximale gevolgen op de HOR installatie behandelen.

De analyse zal zich dus, voor wat betreft de ongevalsituatie, strekken tot de gevolgen van het volledig falen van noodmaatregelen. En vervolgens zal door middel van alle externe omstandigheden eventuele zwakke plekken worden geïdentificeerd.

1.1 RID in het IAEA ongevals kader

In internationaal kader ontstond ten gevolge van enige nucleaire ongevallen in de 80-er jaren van de twintigste eeuw de noodzaak om de ernst van deze gebeurtenissen in verhouding tot elkaar en tot de veiligheidsrisico's te duiden en in een juist perspectief te kunnen communiceren naar het publiek. Hiertoe is in 1990 de 'International Nuclear and Radiological Event Scale' (INES) ontwikkeld door internationale experts, onder initiatief van de IAEA en de OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). In eerste instantie was deze schaal bedoeld om gebeurtenissen bij kerncentrales te classificeren, maar inmiddels is zij verder geëvolueerd en toegesneden om de betekenis van alle gebeurtenissen met radioactief materiaal in het transport, de opslag en het gebruik ervan te kunnen communiceren.

Op de schaal worden de gebeurtenissen aangegeven in zeven geclassificeerde niveaus. Elke stap hoger op de schaal komt overeen met een toename in ernst van een gebeurtenis met een factor 10, zodat de schaal logaritmisch van aard is.

Aan elk niveau is een frase toegekend, bedoeld om de ernst juist te kunnen communiceren.

In oplopende ernst zijn deze:

- Niveau 1: 'anomaly',
- Niveau 2: 'incident'
 - Exposure of a member of the public in excess of 10 mSv.',
- Niveau 3: 'serious incident'
 - Exposure in excess of ten times the statutory annual limit for workers.'
- Niveau 4: 'accident with local consequences'
 - Minor release of radioactive material unlikely to result in implementation of planned counter measures other than local food controls.',
- Niveau 5: 'accident with wider consequences'
 - Limited release of radioactive material likely to require implementation of some planned counter measures.',

- Niveau 6: 'serious accident
 - Significant release of radioactive material likely to require implementation of planned counter measures.'
- Niveau 7: 'major accident
 - Major release of radioactive material with widespread health and environmental effects requiring implementation of planned and extended counter measures.'

Als ijkpunt werd het ongeval in Chernobyl in 1986 geclassificeerd op INES niveau 7.

Voor onderzoekreactoren met een vermogen tot de orde van 1 MW wordt vastgesteld dat de totale radioactieve inventaris zodanig laag is, dat de inschaling van de maximale potentiële consequentie nooit hoger kan zijn dan niveau 4, zelfs als alle veiligheidsvoorzieningen falen (ref. INES User's manual2008, page 106).

1.2 RID in het nationaal ongevals kader

In Nederland is de afhandeling van ongevallen met nucleaire- en stralingsobjecten geregeld via de kernenergiewet (KEW) in het Nationaal Plan Kernongevallen (NPK), dat na de ramp in Chernobyl gestalte heeft gekregen. Hierin werden de verschillende stralingsongevallen op grond van de potentiële maximale risico's ingedeeld in A- en B-objecten, waarna voor deze objecten 'rampen afhandelingsprotocollen' werden opgesteld. A-objecten met een grotere impact zouden op landelijk (ministerieel) niveau worden afgehandeld, terwijl B-object ongevallen met een geringere impact op gemeentelijk niveau (burgemeester) behandeld zouden worden.

Te nemen maatregelen werden geïndiceerd op grond van een vergelijking van de te verwachte stralingsdosis voor de bevolking met interventieniveaus in dit NPK. Onder het laagste interventieniveau van 50 mSv werd 'ingrijpen in de persoonlijke levenssfeer' als niet te rechtvaardigen bestempeld.

Het RID was op grond van haar beperkte risico ingedeeld als B-object zodat afhandeling van een ongeval met gemeentelijke coördinatie zou plaatsvinden. Hiertoe is destijds het gemeentelijke rampenbestrijdingsplan RID door de burgemeester van Delft opgesteld, waarbij werd uitgegaan van "maatgevende scenario's" voor ongevallen en de daaruit volgende dosisverwachtingscontouren. Als maatgevend scenario bij het RID is destijds gekozen voor het meest ingrijpende ongeval uit de veiligheidsanalyse, het zogenaamde overkoepelende ongeval met een HEU/LEU combinatie (zie § 2.2) in de kern. Destijds werd de reactorkern namelijk geconverteerd van een HEU- naar een LEU kern. Omdat bij het RID de contour van 50 mSv binnen de terreingrens viel (consistent met de internationale IAEA verwachting dat kleine onderzoeksreactoren slechts tot een site-emergency ongeval kunnen leiden), is er om toch tot een zonering in het rampenbestrijdingsplan te kunnen

komen, gekozen voor een afgeleid interventieniveau van 1 mSv. Deze waarde is de jaarlimiet voor leden van de bevolking onder normale omstandigheden, dus in de niet-ongevulsituatie. Bij het RID zou dit niveau bij het maatgevende scenario bereikt kunnen worden door gedurende de eerste 48 uur na het ongeval binnen een gebied van 300 meter ten opzichte van de reactorcoepel te verblijven.

Inmiddels is het NPK omgevormd tot een Ministeriële Regeling waarbij, vanwege bestuurstechnische redenen, *alle* nucleaire inrichtingen als A-object worden aangewezen. Tegenwoordig is het RID dus een A-object, hoewel haar fysische potentiële risico niet is vergroot ten opzichte van toen het in de eerste aanpak als B-object geïdentificeerd werd. Door de voltooiing van de conversie van de kern waardoor er zich nog alleen laag verrijkt uranium als splijtstof in de kern bevindt, geeft de 'oude' analyse een overschatting van de dosisverwachting van ongeveer 40%; in de huidige analyse ligt de '48 uren contour' voor 10 mSv op 75 meter van de reactorkern. Deze afstand komt overeen met de kleinste afstand van de kern tot de openbare weg (mekelweg, ter hoogte van de kern).

In dit huidige NPK is echter de zonering van 300 meter uit het gemeentelijke rampenbestrijdingsplan voorlopig overgenomen als maatregelzone voor schuilen met de opmerking dat deze afstand nog wordt herzien.

In het NPK is het laagste interventieniveau verlaagd tot 10 mSv in de eerste 48 uur, met als maatregel schuilen. Vroege evacuatie wordt overwogen bij een dosisverwachting van 200 mSv in de eerste 48 uur, terwijl 'terugkeer' geadviseerd wordt voor dosisverwachtingen lager dan 50 tot 250 mSv over een periode van 50 jaar. Alle andere interventieniveaus, zoals het niveau met als maatregel jodiumprofylaxe, zijn hoger dan de waarde van 50 mSv.

Bij het overkoepelende ongevalsscenario voor het RID wordt in 'bewoonde gebieden' rond het instituutsterrein geen enkel interventieniveau overschreden.

2 Algemene beschrijving

- Locatie
- Aantal eenheden
- Operator

Het Reactor Instituut Delft (RID) is onderdeel van de faculteit Technische Natuurwetenschappen (TNW) van de Technische Universiteit Delft (TU Delft). Het RID bedrijft één onderzoeksreactor: de Hoger Onderwijs Reactor (HOR). De HOR valt direct onder het College van Bestuur van de TU Delft, dat de TU Delft vertegenwoordigt als vergunninghouder conform de Kernenergiewet vereisten.

De HOR wordt gefaciliteerd door verschillende gebouwen. Figuur 1 geeft een overzicht van het RID terrein. Het RID terrein ligt aan de zuidzijde van de campus van de TU Delft, dat bij de gemeente Delft hoort.

2.1 Omgevingsaspecten

- Industriële omgeving en ev. gevaarstelling daarvan

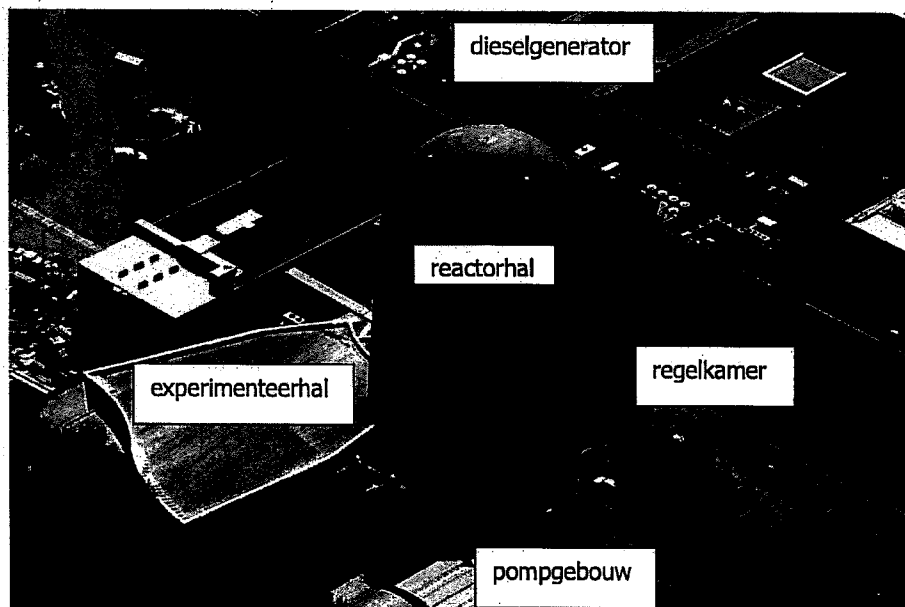
In de directe omgeving, binnen een straal van 300 m, van de HOR bevinden zich een beperkt aantal gebouwen van de TU. Een overzicht wordt gegeven in tabel 1.

Tabel 1 Gebouwen in de omgeving van de HOR

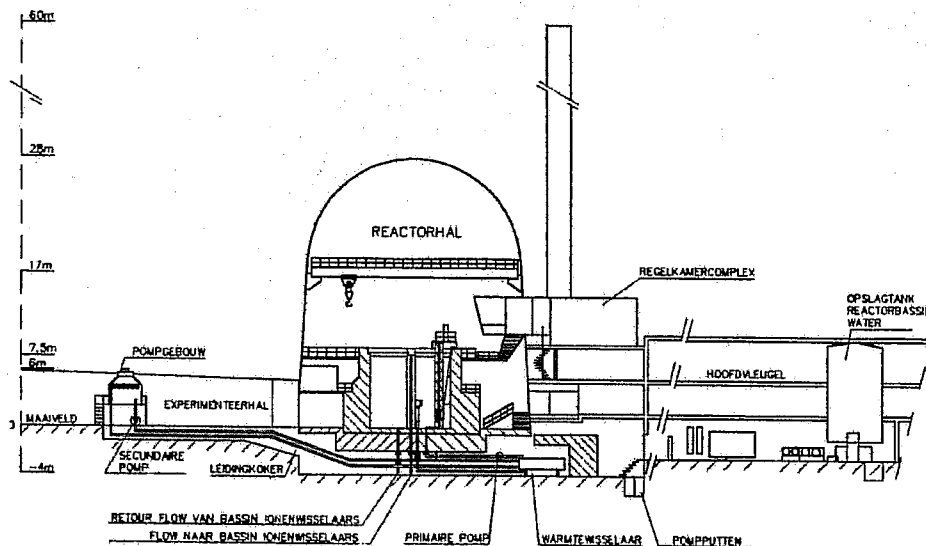
Gebouw	Afstand
Logistiek & Milieu (TU Delft)	200 m
The Fellowship (TU Delft)	300 m
FMVG (TU Delft)	300 m

De snelweg A13, een zeer drukke autosnelweg in de verbinding Rotterdam – Amsterdam bevindt zich op een afstand van 600 m van de HOR. Daarnaast is de op de A13 aansluitende Kruithuisweg van belang die op een afstand van 400 m van de HOR loopt. Op 800 m van de HOR loopt de Delftse Schie, een kanaal in de verbinding Rotterdam – Den Haag. De spoorweg die Rotterdam en Den Haag verbindt loopt op 1,1 km van de HOR. Verder ligt op 6 km afstand de luchthaven Rotterdam The Hague Airport, dat over één landings- en startbaan beschikt. De HOR ligt op ongeveer 15 km afstand van de Noordzee en op 12 km van de Nieuwe Waterweg.

De bovenkant van de afgewerkte vloer van de reactorhal wordt de hoogte van het maaiveld genoemd (zie figuur 2). Het maaiveld bevindt zich volgens het Actueel Hoogtebestand Nederland op ongeveer -1,2 m NAP [2].



Figuur 1: Overzicht van het RID terrein.



Figuur 2: Zijaanzicht van de HOR

2.2 Installatie aspecten

- Reactortype (radiologische inventaris, type brandstof, moderator en koeling en de karakteristieken en toestand van het containment)
- Thermisch vermogen
- Datum in bedrijfname
- Opslag nieuwe en verbruikte splijtstofelementen

De HOR is een lichtwater gemodereerde en gekoelde onderzoeksreactor van het bassin- of zwembad type met een nominaal vermogen van 2 MW. De huidige HOR is voortgekomen uit een demonstratiereactor van AMF Atomic Inc. de A-57. Deze reactor is in de jaren 50 aangekocht door de Staat der Nederlanden. Op 24 april 1963 werd de reactor voor het eerst kritisch. In het najaar van 1963 werd een vermogen bereikt van 100 kW. Halverwege 1967 is men gestart met de ombouw naar een vermogen van 2 MW. De HOR draait vanaf 1 juni 1968 met een vermogen van 2 MW.

In de HOR reactorkern worden MTR-type splijtstofelementen toegepast. Vanaf januari 2005 worden alleen LEU-elementen (Low Enriched Uranium) gebruikt. De splijtstof in de LEU-elementen is uraniumsilicide (U_3Si_2), dat tot minder dan 20 % is verrijkt in de isotoop U^{235} . Er worden twee typen elementen toegepast: standaardelementen en regelementen. Een standaard HOR LEU kern bevat 16 standaardelementen en 4 regelementen. Daarnaast zijn in een standaard LEU kern 21 beryllium reflectorelementen aanwezig.

Onbestraalde splijstofelementen worden opgeslagen in de daarvoor bestemde splijstofkluis (droge opslag) Bestraalde splijstofelementen mogen uitsluitend opgeslagen worden in de daarvoor bestemde opslagrekken in het reactorbassin (natte opslag).

De k-effectief van de opgeslagen onbestraalde splijstof in de kluis en bestraalde splijstof in het bassin mag de waarde van 0,95 niet overschrijden ook niet bij een overstroming waarbij de splijstofkluis onder water komt te staan. Kriticietsanalyses tonen aan dat alle opslagfaciliteiten (opslagkluis en opslagrekken in bassin) aan de specificatie voldoet [3].

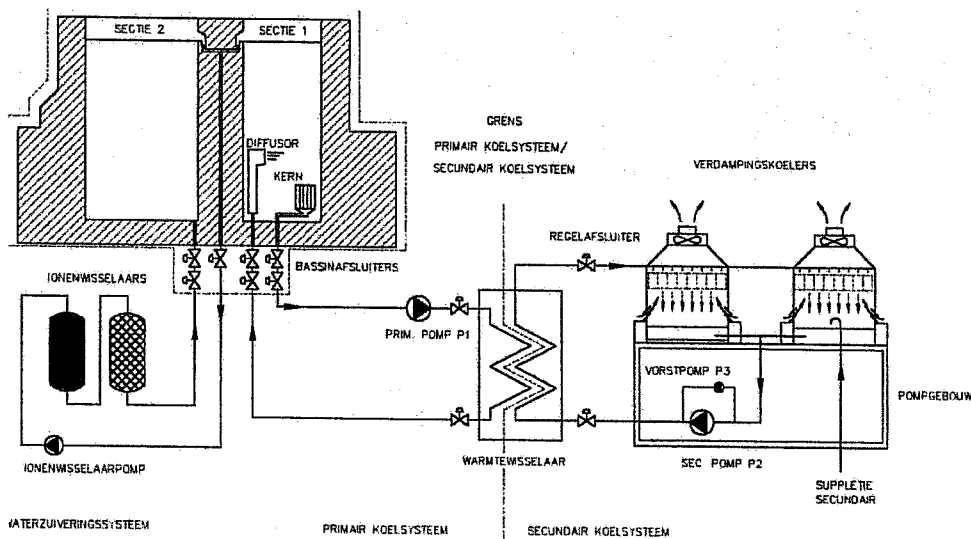
Naast splijstofelementen in de reactorkern en in opslag bevindt zich radioactief materiaal in de volgende systemen en componenten:

- Water in het primair koel- en zuiveringssysteem evenals in daarmee verbonden opslag tanks;
- Preparaten in de bij de reactor behorende bestralingsfaciliteiten;
- Bepaalde systeemdelen die (licht) geactiveerd kunnen worden.

In verhouding tot de splijtingsproductinventaris van een langdurig, recent bestraald splijstofelementen in de kern is bovenstaande activiteitsinhoud zeer gering.

Bij regulier bedrijf op 2 MW wordt gebruikgemaakt van geforceerde koeling met een primair en secundair gedeelte (figuur3).

Het primaire systeem bestaat uit het (open) reactorbassin, de kern en de bassinafsluiters. Dit systeem bevindt zich geheel in het reactorinluitsysteem.



Figuur 3: Schematische weergave reactorkoelsysteem

Het primaire water wordt continu gezuiverd met behulp van ionenwisselaars. Wanneer de reactor is afgeschakeld vindt uitsluitend koeling plaats door middel van natuurlijke convectie. De inhoud van het bassin (ongeveer 250 m³) is ruim voldoende om de geproduceerde nawarmte af te voeren [4].

Het secundaire koelsysteem bevat geen radioactieve bestanddelen en bestaat uit de warmtewisselaar, de secundaire pomp, de afsluiters, de regelafsluiters en de verdampingskoelers. Alle componenten behalve de warmtewisselaar bevinden zich in het pompgebouw.

Het reactorinluitsysteem (containment) vervult een belangrijke insluitfunctie om het vrijkomen van radioactief materiaal in geval van een ernstige bedrijfsstoring te voorkomen en wordt gevormd door de reactorhal en de luchtbehandeling (figuur 4).

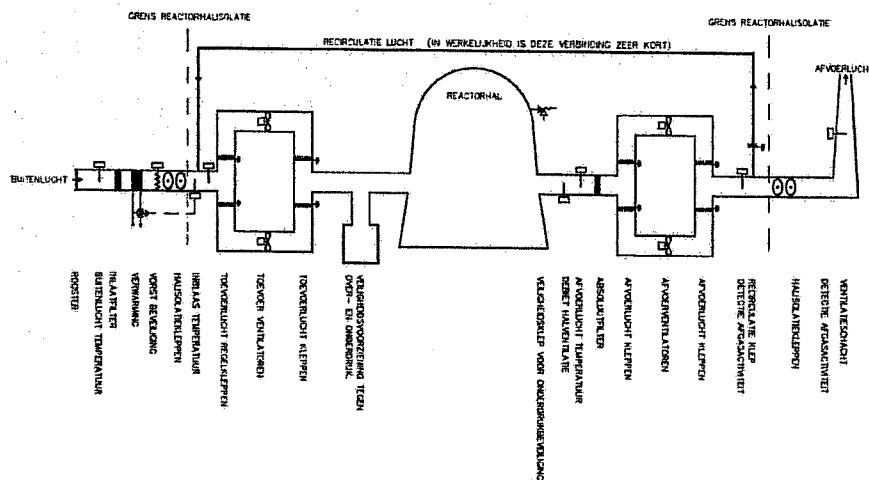
De reactorhal heeft de vorm van een afgeknotte kegel met daarop een bolsegment. De basis van de constructie wordt gevormd door aan elkaar gelaste staalplaten. De vloer is van gewapend beton met een toplaag van staal om eventuele lekkages op te vangen. Aan de voet heeft de hal een diameter van 25 meter; bij de overgang van kegel naar halve bol, op 17 meter boven de halvloer, bedraagt de diameter 23 meter. Het hoogste punt van de hal ligt ruim 28 meter boven de halvloer. De reactorhal is toegankelijk via de vrachtwagendeur en twee personensluizen. De vrachtwagendeur wordt gebruikt voor het verplaatsten van grote installatiedelen en de afvoer van splijtstof. De personensluizen bevinden zich op de begane grond en op 10,5 meter boven de halvloer.

Het luchtbehandelingsysteem heeft de volgende functies:

- het verversen van de lucht in de reactorhal
- het creëren en handhaven van een onderdruk
- het gecontroleerd afvoeren van luchtgedragen radioactiviteit
- het filteren van de inkomende en uitgaande lucht
- het tijdens het stookseizoen verwarmen van de inkomende luchtstroom

Om de reactorhal te beveiligen tegen een te grote overdruk of onderdruk van de reactorhal is een waterslot opgesteld in de zijbeuk van de leidingtunnel die in verbinding staat met het toevoerkanaal van de reactorhal.

Vanwege de veiligheidsfunctie van het containment zijn de isolatiekleppen dubbel (redundant) uitgevoerd. Bij een reactorhalisolatie (RIS) sluiten de gasdichte isolatiekleppen aan de in- en uitlaat van het ventilatiesysteem.



Figuur 4: Het reactorinluitsysteem

2.3 Ontwerp basis ongevallen (DBA)

- Beschrijving / Opsomming ongevallen

Ontwerpbasis-ongevallen hebben betrekking op ongevalscondities waartegen de installatie is ontworpen overeenkomstig vastgelegde ontwerpcriteria. Onder ongevalscondities wordt verstaan: Afwijkingen van de normale bedrijfsvoering of te verwachten bedrijfsstoringen waarbij het vrijkomen van radioactief materiaal binnen aanvaardbare grenzen wordt gehouden door middel van passende ontwerpeigenschappen. In dit kader zijn er zowel passieve als actieve veiligheidsvoorzieningen aanwezig, waarbij de principes van redundantie (meervoudig uitgevoerde, onderling gescheiden systemen) en diversiteit worden toegepast.

Voor de HOR zijn in het veiligheidsrapport de volgende ongevallen in het ontwerp betrokken en van preventieve maatregelen voorzien, dat zij geen ernstige gevolgen kunnen induceren:

- Ongewenste reactiviteitsaddities
 - Ongecontroleerd uitlopen van regelstaven
 - Reactiviteitsaddities door experimenten
 - Kriticiiteit tijdens laadprocedures
 - Toevoer van koud bassinwater
 - Regelstaven in niet-uniform uitgetrokken positie
- Verlies van bassinwater
 - Lek in warmtewisselaar
 - Lek in bassinbekleding
 - Lek in bundelbuis
 - Lek in de primaire koelwaterleiding

- Lek in het ionenwisselaarsysteem
 - Lek in de hulpsystemen
- Vermindering van de warmte-afvoer door het reactorkoelsysteem
 - Uitval van de primaire pomp
 - Ongewenst sluiten van de bassinisolatiekleppen
 - Niet-uniform uitgetrokken regelstaven
 - Koelmiddel-kortsluitstroming van de reactorkern
 - Uitval van de secundaire koelmiddelstroom
 - Uitval van de verdampingskoelers
- Vrijkomen van radioactiviteit bij het falen van (sub)systemen en componenten
 - Val splijtstofcontainer
 - Primaire koelwateractiviteit
 - Bestraalde preparaten
 - Systeemdelen met activeerbare inhoud
- Bijzondere interne gebeurtenissen
 - Brand en explosie
 - Inwendige overstroming
 - Breuk hanger
 - Bevriezing secundair koelsysteem
 - Menselijke fouten
- Externe gebeurtenissen (De gebeurtenissen in deze categorie worden in de volgende hoofdstukken behandeld als onderwerp van deze stresstest-evaluatie)
 - Aardbeving
 - Overstroming
 - Storm met orkaankracht
 - Uitval netvoeding
 - Brand en explosie

Bij de HOR is het meest ernstige ontwerpbasisongeval het volledig leeglopen van het bassin, een zogenaamd 'Loss of Coolant Accident' (LOCA) door bijv. een breuk in de primaire koelleiding of bundelbuis waarbij alle splijtstofelementen in de kern geheel of gedeeltelijk droog komen te staan. Hierbij is het meest ongunstige LOCA ongeval het verlies van bassinwater via één van de onderste bundelbuizen met uitwendige diameter aan de bassinzijde van 195 mm. Bij een volledige guillotinebreuk zou het bassinwaterniveau na circa 35 minuten het laagste niveau bereiken. De splijtstofelementen staan dan nog voor circa 5 cm in het water, waardoor een luchtstroming niet op gang kan komen en de warmteafvoer door geleiding naar het resterende bassinwater moet plaatsvinden via de roosterplaat en elementvoeten.

Het Idaho National Laboratory (INL) heeft de RELAP5 code ontwikkeld voor het analyseren van dergelijke ongevallen in watergekoelde kernreactoren. Deze code wordt tevens veelvuldig gebruikt voor veiligheidsanalyses van onderzoeksreactoren [8]. Hamidouche et al. hebben de RELAP5 code toegepast voor het simuleren van een LOCA ongeval met de IAEA 10 MW

prototype onderzoeksreactor [9, 10]. In de studie werd een guillotinebreuk van de primaire koelleiding beschouwd terwijl de reactor op maximaal vermogen in bedrijf was. In deze situatie zal het bassin binnen 30 minuten geheel leeglopen. Beneden een vermogen van 4 MW werd een maximum temperatuur van de splijtstofbekleding berekend onder 500 °C. Luchtcirculatie door de splijtstofplaten zorgt voor koeling en voorkomt het verder stijgen van de temperatuur waardoor het smeltpunt van de splijtstofbekleding niet bereikt wordt. (Voor LEU splijtstofelementen is het smeltpunt van de splijtstofbekleding 590 °C. De splijtstof zelf smelt bij 1600 °C [4]).

Hedayat et al. vonden gelijksoortige resultaten bij simuleren van een LOCA ongeval met een 5 MW onderzoeksreactor van het zwembadtype [11]. Beide berekeningen zijn in overeenstemming met de bevindingen in IAEA Tecdoc 643, namelijk dat bij onderzoeksreactoren met een maximaal vermogen van 5 MW kernsmelting niet zal optreden na een LOCA [10].

Op grond van deze analyses en experimenteel onderzoek aan droogvallende splijtstofelementen bij reactoren elders kan worden geconcludeerd dat het vermogen voldoende gedaald is voordat de reactorkern gedeeltelijk droogvalt, zodat smelten van splijtstofplaten niet optreedt.

Bij verlies van bassinwater door lekkage zijn er echter nog verschillende backup verdedigingslinies aanwezig. De eerste verdedigingslinie is de waterdichte scheiding van beide bassinsecties met behulp van de bassin deur. De consequenties van een lek in een van de beide secties kunnen daardoor worden beheerst of verminderd door het indien nodig overbrengen van de reactorkern naar de nog intact zijnde bassinsectie en het sluiten van de bassin deur.

Een tweede mogelijkheid is extra watersuppletie door water vanuit de opslagtank naar het bassin te verpompen. Deze opslagtank kan, op zijn beurt weer direct worden bijgevuld uit het brandweerleidingnet via een speciale voorziening.

2.4 Buiten ontwerp basis ongeval

- Conclusiematrix uit rampenbestrijdingsplan

De ongevallen zoals besproken in hoofdstuk 2.3 (DBA's) worden door het ontwerp van de veiligheidsvoorzieningen in de installatie dermate gecontroleerd dat zij niet tot ernstige gevolgen zullen leiden. De werking van de veiligheidsvoorzieningen wordt hierbij gezekerd door het aanbrengen van voldoende redundantie.

Om echter tot toereikende plannen voor ongevalsbeheersing te kunnen komen met een conservatieve, pessimistische afschatting van het radiologisch risico is er voor de HOR een buitenontwerpbasis ongeval gepostuleerd. In dit ongeval (in het veiligheidsrapport wordt dit het overkoepelende ongeval genoemd) wordt propagatie van stromingsinstabiliteit gekoppeld aan het falen van alle veiligheidsvoorzieningen zodat het systeem hierop niet op tijd ingrijpt. De analyse van dit scenario leidt onder conservatieve aannamen als een maximaal thermisch vermogen van 3,15 MW en maximale kans op falen van de voorzieningen tot een eindsituatie waarin 9 splijtstofplaten voor 40% zijn gesmolten. Deze eindsituatie is op passieffysische gronden gebaseerd zoals beschreven in het veiligheidsrapport. Zij leidt tot een situatie waarin splijttingsproducten zich vrij in het bassin en de reactorcoepel bevinden en in zekere mate naar het milieu kunnen lekken.

Dit hypothetische ongeval heeft met een HEU/LEU overgangskern model gestaan als basis voor het gemeentelijk rampenbestrijdingsplan RID.

Voor een volledige LEU-kern (de actuele situatie sinds 2005) ziet de integrale effectieve dosisverwachting in de omgeving van het RID er uit als weergegeven in tabel 1. Hierin is geen rekening gehouden met de afscherpende werking van de reactorhalconstructie en andere gebouwen op het RID terrein. In de analyse zijn de 70 jarige gevolgen door besmetting betrokken van ± 30 splijttingsproducten. Tevens is rekening gehouden met:

- Externe bestraling door reactorhal
 - " " " passerende wolk
 - " " " gronddepositie
 - " " " huid en kleding depositie
- Interne bestraling door inhalatie passerende wolk
 - " " " " opwervende gronddepositie
 - " " " " opname van direct besmet voedsel
 - " " " " opname van indirect besmet voedsel

Tabel 1 Dosiswaarden in mSv van de HOR na het overkoepelende ongeval

Totale eff. Dosis LEU [mSv]	53 m	75m (mekel weg)	100 m	237 m	300 m	350 m (kruithuis weg)	550 m
Tijd [uur]							
0 – 1	2,7	1,3	0,75	0,13	0,083	0,06	0,025
0 – 3	7,1	3,6	2	0,36	0,22	0,16	0,065
0 – 6	11	5,7	3,2	0,58	0,36	0,26	0,11
0 – 12	16	8,2	4,6	0,82	0,51	0,38	0,15
0 – 24	19	9,6	5,4	0,97	0,61	0,44	0,18
0 – 48	20	10	5,6	1	0,62	0,46	0,18
0 - ∞	20	10	5,6	1	0,62	0,46	0,18

Uit de tabel blijkt dat bij het overkoepelende ongevalsscenario voor het RID het laagste interventieniveau uit het NPK (10 mSv gedurende de eerste 48 uur voor schuilen) niet wordt overschreden buiten het instituutsterrein. Immers ligt de 10 mSv contour op een afstand van 75 meter, hetgeen overeenkomt met de kleinste afstand van de reactor tot de openbare weg.

2.5 Kans op smelten van de kern

De Reactorkern van de HOR is opgebouwd uit splijtstof- en regelementen. Een splijtstofelement bevat één sectie met 19 splijtstofplaten, terwijl een regelement twee secties met in elke sectie 5 splijtstofplaten bevat. Een splijtstofplaat bestaat uit een splijtstofmatrix (U_3Si_2-Al) met daaromheen een bekleding van aluminium. Hierin is het uraniumsilicide (U_3Si_2) de splijtstof dat tot minder dan 20 % is verrijkt in de isotoop ^{235}U (LEU).

De aluminium bekleding begint te smelten bij een temperatuur van circa $590^{\circ}C$, terwijl de splijtstof zelf smelt bij temperaturen rond de $1600^{\circ}C$. Als het getroffen gebied van de splijtstofbekleding voldoende groot is, kan propagatie via stromingsinstabiliteit optreden naar andere splijtstofplaten. Op fysische gronden (thermohydraulische ontkoppeling) kan zo'n propagatie zich niet voortzetten naar aangrenzende splijtstof- of regelementen. Bij regelementen zijn de beide splijtstofsecties eveneens thermohydraulisch ontkoppeld.

Wanneer en of de laagste smeltemperatuur bereikt wordt hangt van vele plaatselijke factoren binnen de kern af zoals vermogensdichtheid, compactheid/geometrie, koelmedium water of lucht, evt. stoomvorming, stralingseffect bij hogere temperaturen (4de macht). Vóóordat smelten begint is vervorming van de platen en verlies van integriteit niet uit te sluiten. Vanaf ongeveer 450 °C wordt de bekleding week. Hierbij kunnen blisters optreden waarbij vluchtige splijtingsproducten vrijkomen uit de matrix.

Bij het bedrijven van de reactor op 2 MW is geforceerde koeling door water noodzakelijk om de energie af te voeren. Tot een vermogen van 750 kW is vrije convectiestroming van water door de kern afdoende en is reactorbedrijf in deze modus in de vergunning toegestaan. Op het moment van shutdown is er nog zo'n 6% (conservatief wordt hier vaak 10% voor aangenomen) aan vervalwarmte in de kern aanwezig dat aanvankelijk met een halfwaardetijd van ongeveer 50 s afneemt. Direct na shutdown is vrije convectiestroming dus al ruim voldoende om de kern te koelen. Bij de HOR wordt hier gebruik van gemaakt door de overgang van geforceerde (neerwaartse) koeling naar convectie (opwaartse) koeling met een passief systeem onder invloed van de zwaartekracht uit te voeren. Zodra de geforceerde koeling wegvalt, ontkoppelt de kern zich van de primaire koelleiding en komt de convectiestroming op gang. Er zijn vele redundante systemen aanwezig die elk voor prompte afschakeling van de reactor zorgen in het geval dat de geforceerde koelstroom wegvalt of te veel afneemt.

Bij de behandeling van het ontwerpbasisongeval LOCA (§ 2.3) is al duidelijk geworden dat simulaties aantonen dat na ongeveer 30 minuten na het invallen van de regelstaven de kern gedeeltelijk droog kan vallen zonder dat schade door te hoge temperaturen daarna zal optreden. De resterende vervalwarmte wordt in dat geval afdoende door geleiding naar het water afgevoerd en na het droogvallen door lucht. Echter validatie van de uitkomsten uit dergelijke simulaties is niet duidelijk.

Daarboven is er echter nog een andere, zeer ongunstige situatie denkbaar:

De meest ongunstige situatie voor restwarmteafvoer ontstaat als het waterniveau juist tot onder de roosterplaat is gedaald. Afvoer van warmte door geleiding naar het water is dan minimaal, terwijl de afvoer door circulerende lucht tussen de platen nog niet tot stand kan komen. Door Interatom is voor de HOR zo'n situatie zeer conservatief afgeschat door zich te baseren op o.a. een vermogen in de kern van 3,42 MW, wat leidt tot een plaatselijke vermogensdichtheid die een factor 2,8 hoger is dan gebruikelijk. Ook wordt hierbij aangenomen dat de situatie waarbij de top van de elementen niet door lucht- of waterstroming gekoeld worden, instantaan na het afschakelen van de reactor optreedt.

Hieruit volgt dan dat de warmteproductie in de kern na ongeveer 300 uur voldoende is afgenomen zodat de elementen in lucht geen smeltemperatuur meer kunnen bereiken.

Conservatief leidt dit tot de conclusie dat de kern ongeveer 14 dagen nat gehouden moet worden, waarna de vervalwarmte in de elementen voldoende is gedaald zodat zij in lucht geen smeltemperatuur meer zal bereiken.

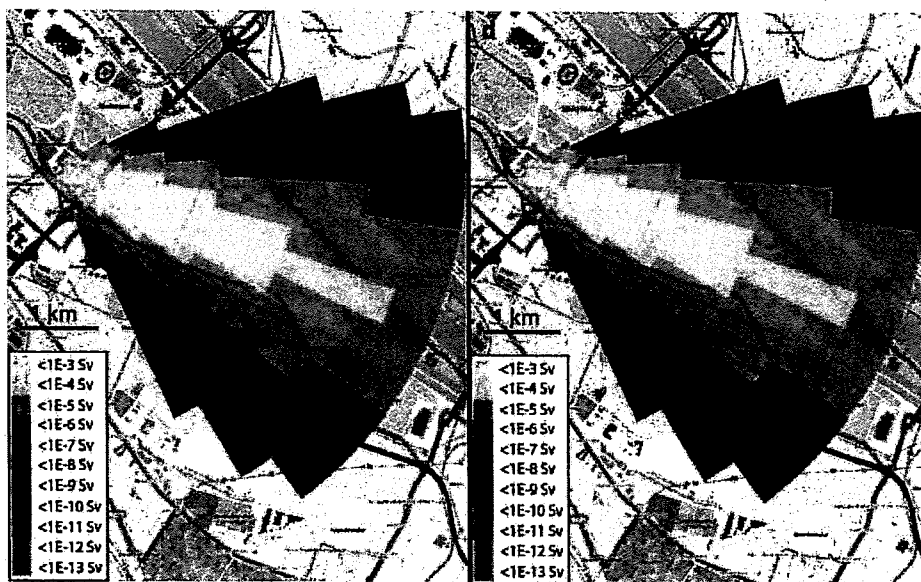
2.6 Maximale gevolgen HOR

- Beschrijving en primaire gevolgen vliegtuig inslag met smelten kern in buitenlucht
- I-131 equivalent schaling tegen Berlijn
- Conclusies

Voor het ongeval met maximale gevolgen door de HOR wordt het meest ongunstige scenario beschouwd, namelijk het neerstorten van een vliegtuig op de reactorhal met als gevolg dat het reactorbassin instantaan wordt weggeslagen en de kerninhoud wordt verspreid terwijl de reactorhal geheel is verwoest. Zowel voor de TRIGA Mark II (een onderzoeksreactor van het zwembadtype met een maximaal vermogen van 250 kW) als voor de BER-II onderzoeksreactor (eveneens een onderzoeksreactor van het zwembadtype met een bedrijfsvermogen van 10 MW) zijn berekeningen uitgevoerd naar de gevolgen van het neerstorten van een vliegtuig zoals de verspreiding van vrijkomende splijtingsproducten in de omgeving. Beide analyses zijn met het computerprogramma COSYMA [13-15] uitgevoerd.

Voor de TRIGA reactor is de effectieve dosis in een straal van 5 km rondom de reactor berekend (zie figuur 5).

De berekeningsresultaten van de BER-II geven een beenmergdosis na een week blootstelling (indicatief voor de mogelijkheid vroege, deterministische effecten) en van de effectieve 50-jaarsdosis (indicatief voor de kans op late, stochastische effecten). De berekende doses worden gegeven op verschillende afstanden van de reactor en zijn berekend zowel zonder als met



Figuur 5: Maximale effectieve dosis in een gebied van 5 km rondom de TRIGA Mark II reactor in Wenen na het neerstorten van een vliegtuig. Links de maximale dosis na 1 dag en rechts de maximale dosis na 50 jaar [14].

maatregelen zoals schuilen in gebouwen, evacuatie en beperkingen ten aanzien van voedingsmiddelen.

Om de dosiswaarden te transponeren naar de HOR is rekening gehouden met het verschil in bedrijfsvermogen. De TRIGA resultaten zijn hiervoor vermenigvuldigd met een factor 10 en de BER-II resultaten (bij een volledige LEU kern) zijn vermenigvuldigd met een factor 0,3. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2 Dosiswaarden in Sv van de HOR na een vliegtuigongeval gebaseerd op berekeningen van de TRIGA en BER-II reactoren [14, 15]

	TRIGA	BER-II	HOR
Maximale effectieve dosis (ICRP -60) na 1 dag	$3.72 \cdot 10^{-4}$		$3.72 \cdot 10^{-3}$
Maximale effectieve dosis na 50 jaar op 600 m	$<1 \cdot 10^{-4}$		$<1 \cdot 10^{-3}$
Maximale effectieve dosis na 50 jaar op 4.38 km	$<1 \cdot 10^{-5}$		$<1 \cdot 10^{-4}$
Beenmergdosis na 7 dagen op 750 m zonder maatregelen		$9.04 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$
Beenmergdosis na 7 dagen op 750 meter met maatregelen		$6.98 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$
Effectieve dosis na 50 jaar op 750 m zonder maatregelen		$1.99 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Effectieve dosis na 50 jaar op 750 m met maatregelen		$1.26 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$

Uit tabel 1 blijkt dat:

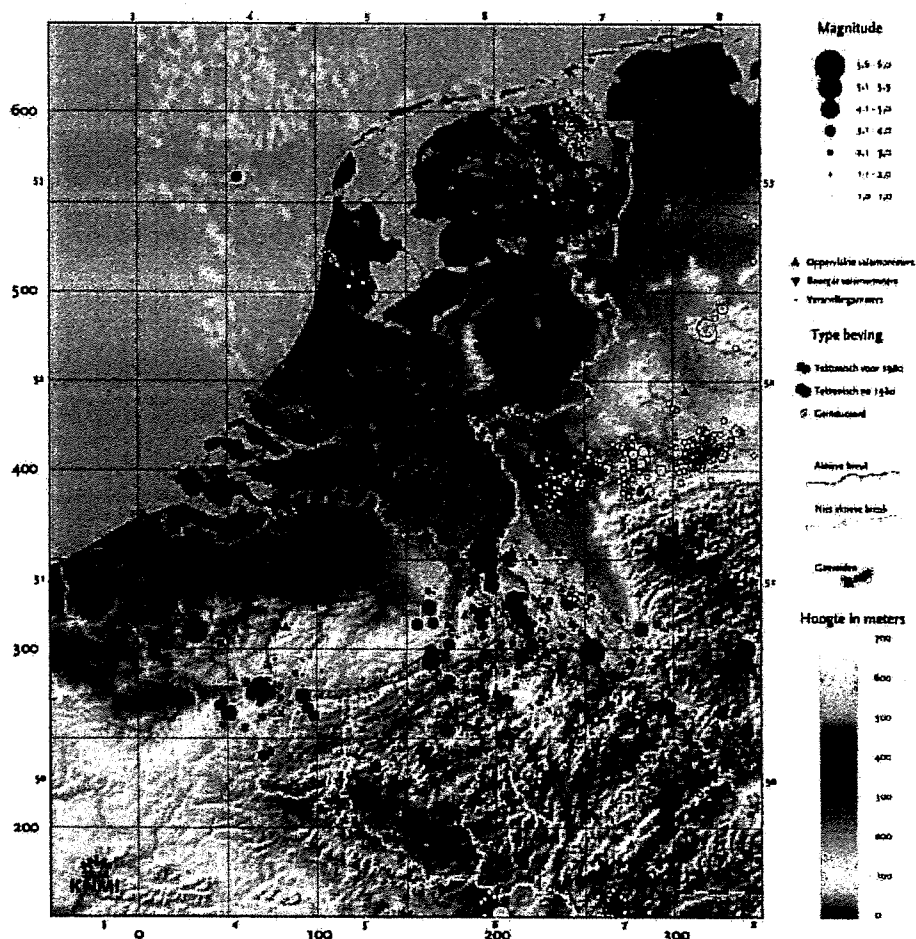
- de maximale effectieve dosis na 1 dag berekend op basis van de TRIGA resultaten en de beenmergdosis na 7 dagen (zonder maatregelen) op basis van de BER-II resultaten van dezelfde orde grootte zijn. Beide liggen ver beneden de drempelwaarde voor sterfte als gevolg van deterministische effecten (beenmergsyndroom, drempeldosis 1-2 Sv).
- De effectieve dosiswaarden na 50 jaar liggen beneden de laagste interventiewaarde uit het NPK (10 mSv) ervan uitgaande dat er intussen maatregelen worden getroffen.

Geconcludeerd kan worden dat door de beperkte omvang van de HOR zelfs in het allerergst denkbare buiten ontwerpbasis ongeval de gevolgen voor de omgeving van de HOR beperkt zullen blijven en er van ernstige ongevallen voor leden van de bevolking geen sprake is.

3 Aardbevingen

- Methodologie om DBE te evalueren - > algemene intro?
- KNMI data over aardbevingen in omgeving Delft.

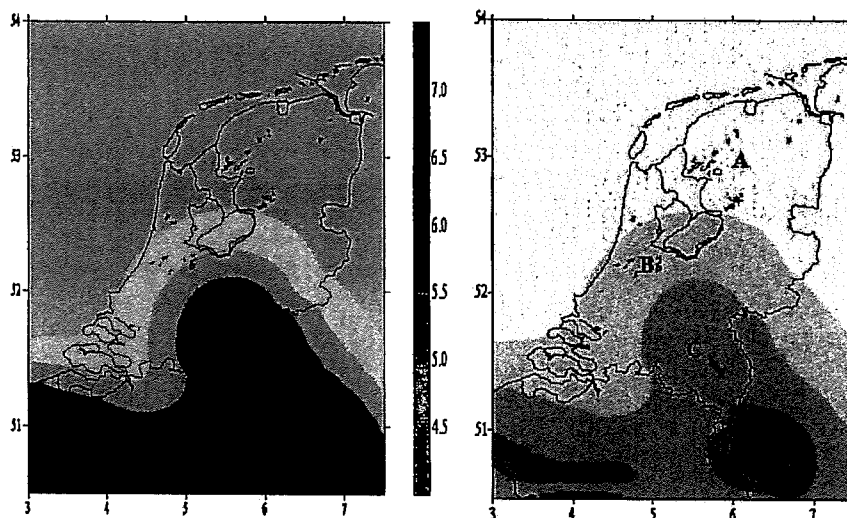
Nederland kent geen aardbevingen met verwoestende gevolgen. Dat komt doordat Nederland niet bij de rand van een tektonische plaat ligt [17]. Wel komen natuurlijke of tektonische aardbevingen voor in het Zuidoosten van Nederland door de aanwezigheid van verschillende breuklijnen (figuur 6). De meest krachtige aardbeving was in Roermond in 1992 met een intensiteit van VII op de EMS (Europese Macroseismische Schaal). Naast natuurlijke aardbevingen komen vooral in Noord-Nederland geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning voor (figuur 6). Geïnduceerde aardbevingen zijn lichter, duren korter en zijn meer schokvormig dan natuurlijke aardbevingen.



Figuur 6: Aardbevingen in Nederland in de periode 1904-2004 [18].

Het berekenen van het seismisch risico (de kans op een aardbeving) gebeurt op basis van historische gegevens, de plaats van actieve breuken en de demping van de bodem. Het risico wordt berekend in EMS intensiteit. De seismisch-risico kaart van Nederland (figuur 7) is gemaakt op basis van natuurlijke aardbevingen in Nederland, België en Duitsland. De geïnduceerde aardbevingen in Noord-Nederland zijn dus niet meegenomen. De risicokaart geeft de maximale intensiteit van seismische trillingen aan die te verwachten is in Nederland met een herhalingsjijd van 475 jaar.

In de omgeving van Delft heeft sinds 1904 slechts eenmaal een aardbeving plaatsgevonden met een EMS intensiteit van 2,5. De seismisch risico kaart van Nederland laat zien dat in de omgeving van Delft een aardbeving met een maximale EMS intensiteit van 4,5 - 5 verwacht kan worden. De daarbij behorende horizontale piek grondversnelling bedraagt $0,2 \text{ m/s}^2$.



Figuur 7: Seismisch risico in Nederland. De kaart links laat de te verwachten intensiteit zien met een herhalingsjijd van 475 jaar. Dit komt overeen met een overschrijdingskans van 10% in een periode van 50 jaar. De EMS-Intensiteit is aangegeven in de kleurschaal. De kaart rechts laat de horizontale piek grondversnellingen voor de zones A, B, C en D zien, respectievelijk 10, 22, 50 en 100 cm/sec^2 [19].

3.1 Ontwerpbasis

- Beschrijving van de ontwerpbasis aardbeving (DBE)

Als ontwerpcriterium voor de HOR is een aardbeving met een intensiteit tussen 5 en 6 op de EMS schaal vastgesteld. Een aardbeving met deze kracht zou gepaard kunnen gaan met seismische belastingen met waarden voor de

horizontale piekversnelling in de orde van grootte van $0,5 \text{ m/s}^2$. Bij dergelijke bevingen blijft de bassinconstructie echter nog intact zodat voldoende koeling van de reactorkern verzekerd is.

3.1.1 Aardbeving waartegen de installatie is ontworpen

- Conclusie over het adequaat zijn van de DBE

Voor de HOR is een ontwerpaardbeving vastgesteld waarbij de horizontale piekversnelling waarden van $0,8 \text{ m/s}^2$.

Op basis van seismische data kan geconcludeerd worden dat de seismische marge voor de HOR voldoende groot is om te kunnen garanderen dat de HOR bestand is tegen aardbevingen.

3.1.2 Voorzieningen in kader van DBE

- Opsomming van voorzieningen (structures, systems and components, SSC's) nodig om een veilige shutdown te bewerkstelligen, waarvan wordt aangenomen dat ze aanwezig en in bedrijf zijn na een aardbeving
- Ontwerp/constructionele voorzieningen
- Bedrijfsvoorzieningen (incl. noodplannen) om de gevolgen van een beving tegen te gaan – beschadiging van de kern te voorkomen
- Indirecte effecten van de beving:
 - Falen van SSC's en ev daaropvolgend falen van benodigde SSC's
 - Uitval extern spanningsnet (loss of offside power, LOOP)
 - Externe situaties die vertragend werken in aanvoer
 - Vuur en explosies

Het vermogen waarbij de HOR bedreven wordt, wordt beheerst door regelstaven meer of minder uit de kern te trekken. Deze beweging wordt bediend door het reactorregelsysteem dat bij een te groot vermogen de staven automatisch de kern indrijft (naar beneden beweegt). In de kern zijn vier van zulke staven aanwezig en in gebruik, terwijl slechts twee staven voldoende zijn om de reactor te veilig af te schakelen en afgeschakeld te houden (redundantie), dat wil zeggen dat de reactor nog steeds beheersbaar is in een situatie waarbij één of twee willekeurige staven geheel uit de reactor zijn verwijderd.

De staven zijn met dit regelsysteem verbonden door middel van elektromagneten, zodat bij bijvoorbeeld stroomuitval, de staven in de kern vallen en de shutdown een feit is. De stroom door deze magneten is zo zwak dat de staven al bij geringe trilling van de reatorbrug uit hun magnetische koppeling vallen zodat de reactor al stopt bij eventuele (voor)schokken van een aardbeving.

Het regelsysteem is zo ontworpen dat de regelstaaf zich altijd in een geleidebuis beweegt zodat de staaf bij stroomonderbreking in de magneet altijd recht in de geleiding, in de kern valt.

Dit valsysteem wordt wekelijks getest voor alle vier de staven zodat prompte shutdown bij een aardbeving voldoende redundant zeker gesteld is.

Naast dit shutdown-mechanisme om de reactor tijdig na een aardbeving te stoppen is er een voorziening aangebracht om ingeval van schade aan het bassin extra watersuppletie toe te voegen. Deze aparte leiding biedt de mogelijkheid om water vanuit de opslagtank naar het bassin te verpompen. In geval van nood kan de opslagtank direct worden bijgevuld uit het brandweerleidingnet via een speciale voorziening.

Naast de algemene bedrijfsvoorzieningen zoals ook beschreven in de algemene noodplannen zijn geen extra maatregelen noodzakelijk om de gevolgen van een beving tegen te gaan.

Doordat het afschakelsysteem volledig passief is uitgevoerd is het afschakelen van de reactor voldoende geborgd en zijn er geen indirecte effecten van een beving als falen van componenten, stroomuitval etc. te verwachten.

3.1.3 Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis

- Algemene organisatie
- Organisatie voor externe nood middelen
- Bekende afwijkingen tov veiligheid, planning
- Specifieke evaluaties als gevolg van het Fukushima ongeval

De algemene organisatie van het Reactor Instituut Delft met betrekking op het bedrijven van de HOR is beschreven in het veiligheidsrapport HOR. Later na een reorganisatie binnen de TU is de organisatie in 2010 beschreven in een addendum dat aan de toezichhoudende overheid ter instemming is voorgelegd.

Naast het bedrijfsnoodplan is voor het RID een gemeentelijk rampenbestrijdingplan RID opgesteld dat in een convenant tussen de burgemeester van Delft en de directeur van het RID is bekrachtigd.

In de 10 jaarlijkse herevaluatie, die momenteel wordt afgerond is vastgesteld dat de plannen op detailniveau aan de actuele situatie dienen te worden aangepast.

Het Fukushima ongeval heeft bij het RID niet geleid tot andere specifieke evaluaties dan onderhavige 'stresstest' evaluatie.

3.2 Evaluatie van de marges

3.2.1 Aanwezige informatie

- Zwakke punten in de installatie of organisatie (ihkv cliff edge effects)
- Voorstelbare voorzieningen hiertegen

Doordat de afschakelvoorzieningen bij de HOR passief zijn uitgevoerd zijn zij niet afhankelijk van (nood)stroom of andere externe voorzieningen, zodat zgn. 'cliff edge effects' niet aan de orde zijn.

Een bijzondere voorziening hierbij is de mogelijkheid om de kern tegen een LOCA ongeval te beschermen door op basis van communicerende vaten het bassin van buiten af te kunnen bijvullen met water. Het is echter denkbaar dat ten gevolge van een aardbeving het bassin dermate beschadigd is dat bijvullen vanuit de opslagtank ontoereikend is om de kern ondergedompeld te houden. Zoals bij het ontwerpbasisongeval is behandeld zijn de consequenties in dat geval echter beperkt.

In dit kader kan onderzocht worden of deze voorziening zo is aan te passen dat de kern door de watersuppletie toch nat gehouden wordt, ook bij een lage waterstand in het bassin.

3.2.2 Specificatie, gebaseerd op aanwezige informatie maximale aardbeving waartegen de installatie bestand is

Overeenkomstig IAEA-richtlijnen, waarbij de historische intensiteit van aardbevingen in een gebied rond de vestigingsplaats met een straal van 200 km in aanmerking wordt genomen, wordt voor de HOR een ontwerpaardbeving vastgesteld waarbij de horizontale piekversnelling een waarde van $0,8 \text{ m/s}^2$ zou kunnen bereiken.

De mogelijke uitwerking van genoemde ontwerpaardbeving met maximale intensiteit is nader beschouwd overeenkomstig de IAEA-criteria voor gesimplificeerde evaluatie van het aardbevingsrisico voor installaties als de HOR. Hierbij is gebleken, dat voor het behoud van integriteit van de bassinconstructie en waterkerende functies niet hoeft te worden gevreesd.

3.3 Aardbeving boven DBE

De evaluatie moet leiden tot het besef in hoeverre bij een installatie ernstige nucleaire ongevallen voorkomen kunnen worden, terwijl de constructie en voorziene noodmaatregelen als eerder beschreven, falen. In paragraaf 12.4 wordt duidelijk gemaakt dat vanwege het geringe vermogen van de HOR en daarmee het geringe volume van aanwezig splijtbaar materiaal in de installatie, ernstige nucleaire ongevallen niet voor kunnen komen.

4 Overstromingen

4.1 Ontwerpbasis

In de vergunningverlening van de HOR is, in verband met de ligging van het instituut beneden NAP, rekening gehouden met de mogelijkheid van overstromingen. Dit is destijds uitgewerkt in het veiligheidsrapport.

4.1.1 Overstroming waartegen de installatie is ontworpen

- Beschrijving van de ontwerpbasis overstroming (DBF)
- Methodologie om DBF te evalueren
- Conclusie over het adequaat zijn van de DBF

Bij overstroming van het poldergebied waarin de reactor is gelegen, zal onder de meest ernstige omstandigheden de waterhoogte een peil van circa 2,4 m boven het maaiveld kunnen bereiken. Het reactorgebouw is ontworpen om tegen een dergelijke eenzijdige waterdruk bestand te zijn.

Beschadiging van de reactor kan worden uitgesloten, zelfs als het water de reactorhal zou binnen dringen, aangezien de reactorkern geïsoleerd blijft van het binnendringen water. Het risico van ongecontroleerde verspreiding van radioactief materiaal is verwaarloosbaar klein.

4.1.2 Voorzieningen in kader van DBF

- Opsomming van voorzieningen (structures, systems and components, SSC's) nodig om een veilige shutdown te bewerkstelligen, waarvan wordt aangenomen dat ze aanwezig en in bedrijf zijn na een overstroming
 - Voorzieningen om de water inname te behouden
 - Voorzieningen om noodstroom te behouden
 - Voorzieningen om verspreiding van activiteit tegen te gaan
- Hoofd ontwerp voorzieningen (dijken, verhogingen)
- Bedrijfsvoorzieningen (incl. noodplannen) om de gevolgen van een overstroming tegen te gaan
- Indirecte effecten van de overstroming:
 - Uitval extern spanningsnet (loss of offside power, LOOP)
 - Uitval waterinname
 - Externe situaties die vertragend werken in aanvoer

Zoals in het vorige hoofdstuk is behandeld is de reactor prompt en passief in de 'shutdown' toestand te brengen door de magneetkoppeling van de regelstaven te onderbreken. Daar de gebouwen zo ontworpen zijn dat zij de

uitwendige waterdruk bij een overstroming kunnen weerstaan (de hoofd ontwerp voorziening) zijn verdere voorzieningen om de waterinname te behouden, de noodstroom te behouden en om de verspreiding van activiteit tegen te gaan niet nodig.

Naast de algemene bedrijfsvoorzieningen zoals ook beschreven in de algemene noodplannen zijn geen extra maatregelen noodzakelijk om de gevolgen van een overstroming tegen te gaan.

Doordat het afschakelsysteem volledig passief is uitgevoerd is het afschakelen van de reactor voldoende geborgd en zijn er geen indirecte effecten van een overstroming als falen van componenten, stroomuitval etc. te verwachten.

4.1.3 Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis

- Algemene organisatie
- Organisatie voor externe nood middelen
- Bekende afwijkingen tov veiligheid, planning
- Specifieke evaluaties als gevolg van het Fukushima ongeval

De algemene organisatie van het Reactor Instituut Delft met betrekking op het bedrijven van de HOR is beschreven in het veiligheidsrapport HOR. Later na een reorganisatie binnen de TU is de organisatie in 2010 beschreven in een addendum dat aan de toezichhoudende overheid ter instemming is voorgelegd.

Naast het bedrijfsnoodplan is voor het RID een gemeentelijk rampenbestrijdingplan RID opgesteld dat in een convenant tussen de burgemeester van Delft en de directeur van het RID is bekrachtigd.

In de 10 jaarlijkse herevaluatie, die momenteel wordt afgerond is vastgesteld dat de plannen op detailniveau aan de actuele situatie dienen te worden aangepast.

Het Fukushima ongeval heeft bij het RID niet geleid tot andere specifieke evaluaties dan onderhavige 'stresstest' evaluatie.

4.2 Evaluatie van de marges

4.2.1 Aanwezige informatie

- Mogelijke maatregelen te nemen tussen waarschuwing en overstroming
- Meest zwakke punten, gebouwen en apparatuur
- Voorstelbare voorzieningen hiertegen

Indien een nationale waarschuwing wordt afgevaardigd over ernstige overstromingen kunnen er een aantal eenvoudige maatregelen worden getroffen die gezien de passieve en veilige 'shutdown' van de HOR, afhankelijk van de situatie, op dat moment bepaald kunnen worden. Te

denken valt hierbij natuurlijk als eerste aan het afschakelen van de reactor, maar ook het uit voorzorg, ontladen van de kern.

Hoewel een overstroming niet tot "breekschade" zal leiden valt het vollopen van bijvoorbeeld de leidingtunnel niet uit te sluiten. Zo'n vollopen van de onderste delen van het instituut kan echter niet tot gevaarlijke situaties met betrekking tot de kernintegriteit leiden. Van het containment zal bij een overstroming het eerst het waterslot in de leidingtunnel (zijbeuk) vollopen waarbij het water via de luchtkanalen de reactorhal kan bereiken. Echter bevindt de luchtinlaat in de reactorhal zich op ongeveer 4 m boven maaiveld. Tot die waterstand zal de reactorhal dus droog blijven.

Het valt te overwegen om de inlaat van het waterslot hoger onder te brengen of zelfs het gehele waterslot op een hogere positie te positioneren. Voor zo'n modificatie zal echter eerst een studie over een goede werking van de (nieuwe) waterslotconfiguratie moeten plaatsvinden.

4.3 Overstroming boven DBF

De catastrofe door een tsunami in het Fukushima ongeval doet de vraag rijzen of een tsunami ook in de Noord-Atlantische wateren en in de Noordzee kan optreden. Op 1 november 1755 vond een zware aardbeving (8,6 op de schaal van Richter) bij Lissabon plaats (bron: Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ)). Hierop volgde een tsunami met drie golven van zo'n 20 m hoog. De hierdoor veroorzaakte schade is tot in Ierland gemeld en ook aan de Vlaamse kust was de golf merkbaar.

Ongeveer 7900 jaar geleden veroorzaakte een grote landverschuiving halverwege de Noorse kust de zogenaamde Storegga tsunami. Voor Shetland is achterhaald dat de hoogte van de golf 25 meter moet zijn geweest.

Berekeningen door het Waterloopkundig Laboratorium (Borgerhout) tonen aan dat een tsunami die met een golfhoogte van 10 m via het Kanaal de Noordzee bereikt, een maximale verhoging van de waterstand van 2 m kan veroorzaken aan de Belgische kust. Door de sterke vernauwing van het Kanaal verdwijnt een groot deel van de golfenergie, lang voordat de tsunami de kust bereikt.

Ook bij een golf vanuit het noorden neemt het ondiepe karakter van de Noordzee veel van de kracht weg. Daar het RID ongeveer 15 km van de kust verwijderd is, valt van een eventuele tsunami overstroming geen verwoestende inslag meer te verwachten.

5 Referenties

1. ENSREG, *EU "Stresstests" specifications*. 2011.
2. *Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)*. <http://www.ahn.nl/viewer>.
3. Siemens, *Contributions to the Safety Analysis Report of the HOR*. 1993. **KWU-NLS2/93/0013 Rev A/IRI-HOR-130-93-04**.
4. De Vries, J.W., et al., *Veiligheidsrapport Hoger Onderwijsreactor*. 1995. **IRI/HOR-130-95-01**.
5. *Bewijs Onderzoek en Beproeving (B.O.B.), met lijst van voorwaarden d.d. 7 febr. 1963 van de toenmalige Dienst voor het Stoomwezen (nu Lloyds) registratiemerk 74059*.
6. Groenewegen, A.C., *Verlag hallektest 10 en 11 november 2008*. **V-1216**.
7. Delorme, T.V., *Eindrapport inspectie reactorgebouw HOR*. 07-02-2008.
8. *RELAP5 code* <http://www.inl.gov/relap5>.
9. Hamidouche, T. and E.-K. Si-Ahmed, *Analysis of loss of coolant accident in MTR pool type research reactor*. *Progress in Nuclear Energy*, 2011. **53**(3): p. 285-289.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Research Reactor Core Conversion Guidebook*. IAEA Tecdoc 1992. **643**.
11. Hedayat, A., H. Davilu, and J. Jafari, *Loss of coolant accident analyses on Tehran research reactor by RELAP5/MOD3.2 code*. *Progress in Nuclear Energy*, 2007. **49**(7): p. 511-528.
12. Knezevich, M., et al., *Loss-of-water Experiment at the Livermore Pool-type Reactor*. *Health Physics*, 1965. **11**(6): p. 481-487.
13. Commission of the European Communities, *COSYMA A new programme for accident consequence assesment*. Final report EUR 13028 EN, 1990.
14. Villa, M., et al., *Accident scenarios of the TRIGA Mark II reactor in Vienna*. *Nuclear Engineering and Design*, 2010. **240**(12): p. 4091-4095.
15. Axmann, A., et al., *Radiologische Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes auf den Forschungsreaktor BER II - Vergleich der Auswirkungen bei HEU- und LEU-Brennstoff*. Rapport No. HMI-B 516, 1994.
16. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations*. IAEA Safety Standards, 2009. **No. NS-G-2.13**(Safety Guide).
17. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut www.knmi.nl.
18. van Eck, T., et al., *Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands*. *Engineering Geology*, 2006. **87**(1-2): p. 105-121.
19. Crook, T., *A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands*. *Geologie en Mijnbouw*, 1996. **75**: p. 11-18.