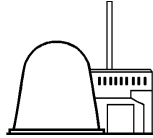


**Reactor Instituut Delft
TU Delft**



Hoger Onderwijs Reactor

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

Versie 2

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: 29 februari 2012 | Eindrapport ter instemming |
| 3 | Due: 30 juni 2012 | Eindrapport afgerond |

Inhoudsopgave

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Samenvatting..... | 5 |
| 2 | Introductie..... | 7 |
| 2.1 | RID in het IAEA ongevalskader | 8 |
| 2.2 | RID in het nationaal ongevalskader | 9 |
| 3 | Algemene beschrijving | 11 |
| 3.1 | Omgevingsaspecten..... | 11 |
| 3.2 | Installatie aspecten..... | 14 |
| 3.3 | Ontwerpbasis-ongevallen (DBA) | 19 |
| 3.4 | Buiten ontwerp-basis-ongeval | 21 |
| 3.5 | Kans op smelten van de kern..... | 23 |
| 3.6 | Maximale gevolgen HOR..... | 24 |
| 4 | Aardbevingen..... | 27 |
| 4.1 | Ontwerpbasis | 29 |
| 4.1.1 | Aardbeving waartegen de installatie bestand is..... | 29 |
| 4.1.2 | Voorzieningen in kader van DBE | 30 |
| 4.1.3 | Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis | 30 |
| 4.2 | Evaluatie van de marges | 31 |
| 4.2.1 | Aanwezige informatie | 31 |
| 4.2.2 | Specificatie, gebaseerd op aanwezige informatie maximale aardbeving waartegen de installatie bestand is | 31 |
| 4.3 | Aardbeving boven DBE | 32 |
| 5 | Overstromingen | 33 |
| 5.1 | Ontwerpbasis | 33 |
| 5.1.1 | Overstroming waartegen de installatie is ontworpen..... | 33 |
| 5.1.2 | Voorzieningen in kader van DBF | 33 |
| 5.1.3 | Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis | 34 |
| 5.2 | Evaluatie van de marges | 34 |
| 5.2.1 | Aanwezige informatie | 34 |
| 5.3 | Overstroming boven DBF | 35 |
| 6 | Extreem natuurgeweld..... | 36 |
| 6.1 | Extreme weer condities | 36 |
| 6.1.1 | Onweer | 36 |
| 6.1.2 | Windstoten | 37 |
| 6.1.3 | Hagelbuien | 37 |
| 6.2 | Zonnewind | 37 |
| 6.3 | Aardbeving boven DBE met consequentie overstroming boven DBF | 37 |
| 7 | Verlies van elektrische voeding | 38 |
| 8 | Verlies van warmteput (heat sink) | 38 |
| 9 | Severe accident management..... | 38 |
| 10 | Conclusie..... | 39 |
| 11 | Referenties..... | 40 |
| 12 | Bijlage 1: Ensreg kruistabel..... | 41 |

1 Samenvatting

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, aangeduid als 'stresstest'.

In Nederland heeft het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) ervoor gekozen om ook de onderzoeksreactor van het Reactor Instituut Delft op vrijwillige basis aan deze evaluatie te laten meedoen. Hierbij is afgesproken om de stresstest zoveel als mogelijk te laten aansluiten bij de door de European Nuclear Safety Regulator Group (ENSREG) opgestelde methodiek voor kerncentrales. Deze methodiek concentreert zich op zes modules die echter, gezien de beperkte omvang van deze 2 MW reactor en de daaruit volgende geringe gevaarzetting, niet allemaal in aanmerking komen om op de voorgestelde wijze in de analyse betrokken te worden.

De uitkomsten voor elke module zijn:

1. Aardbeving:

Voor de HOR is een ontwerpaardbeving bepaald waarbij de horizontale piekversnelling een waarde van $0,8 \text{ m/s}^2$ kan bereiken. Ten opzichte van de karakterisering van de omgeving ($0,5 \text{ m/s}^2$) is een marge van $0,3 \text{ m/s}^2$ in het ontwerp van de HOR aanwezig. Ten opzichte van de IAEA normering blijkt de koepel een veiligheidsmarge voor aardbevingbelasting te hebben van ongeveer een factor 13.

2. Overstroming:

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. Van het containment zal bij een overstroming eerst het waterslot in de leidingtunnel (zijbeuk) vollopen waarbij het water via de luchtkanalen de reactorhal kan bereiken. De luchtinlaat in de reactorhal bevindt zich echter op ongeveer 4 m boven maaiveld en tot die waterstand zal de reactorhal dus droog blijven.

3. Extreem Weer:

Geen enkel type of omvang van extreem weer vormt een bedreiging omdat ook in deze omstandigheden de reactor in veilige toestand gebracht kan worden.

4. Verlies van elektriciteit en koelmogelijkheden:
Niet van toepassing bij de HOR; de waterinhoud van het bassin is voldoende om de vervalwarmte af te voeren.
5. Andere extreme gebeurtenissen:
Voor de HOR een andere aanpak in verband met het geringe risico ten gevolge de activiteiteninventaris. Het bedrijfsnoodplan voorziet in de afhandeling van de geringe risico's bij de HOR.
6. Beheersing kernongevallen:
Het bedrijfsnoodplan voorziet in de afhandeling van de geringe risico's bij de HOR.
Daarboven heeft het RID elders in de TU een 'emergency data centre' met (passieve) 'control room habitability' ingericht zodat meetwaarden van de reactor, zoals het dosistempo, op verschillende locaties op afstand gevolgd kunnen worden.

Conclusie

Bij de voor de HOR relevante ENSREG-modules heeft het Reactor Instituut Delft veiligheidsmarges boven de oorspronkelijke ontwerpcondities en is daarmee veiliger dan de vergunningsbasis voorschrijft. Er zijn een aantal, nog nader te onderzoeken verbetermogelijkheden die deze marges verder kunnen vergroten.

Samengevat luiden de conclusies van het onderzoek:

- De Hoger Onderwijs Reactor van het RID is veilig;
- Het RID voldoet aan de vergunningvoorwaarden;
- De maximale potentiële dosis voor leden van de bevolking blijft zelfs voor het meest extreme ongeval onder de interventiewaarden die volgens de Nederlandse wetgeving (NPK) ingrijpen rechtvaardigt;
- De (ongevals)consequenties van de reactor beperken zich in alle gevallen tot tijdelijk ontruimen van het instituutsterrein;
- Er zijn voorzieningen om ongevallen het hoofd te bieden;
- Omdat de HOR in het meest extreme scenario de laagste drempelwaarde van het NPK buiten de terreingrens al niet overschrijdt, is het niet zinvol om een analyse te maken met 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.

2 Introductie

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 in Japan. Daarbij wordt gekeken naar extreme omstandigheden die boven de oorspronkelijke ontwerpeisen 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. Hierdoor wordt duidelijk waar eventuele zwakke plekken zitten en hoe die verbeterd kunnen worden.

De stresstest wordt uitgevoerd door de vergunninghouders als verantwoordelijke voor de nucleaire veiligheid. Gezien de afgesproken korte evaluatieperiode wordt de analyse uitgevoerd op basis van de beschikbare veiligheids- en ontwerpstudies. Hierbij is aangetekend dat het denkbaar is dat sommige berekeningen niet beschikbaar zullen zijn voor scenario's die niet in het huidige ontwerp zijn opgenomen.

De Nederlandse overheid heeft aan het Reactor Instituut Delft (RID) een kernenergievergunning verleend met aanvullende voorwaarden voor het in bedrijf hebben van de Hoger Onderwijs Reactor (HOR). Het RID voldoet aan al deze vergunningvoorschriften en voert op periodieke basis veiligheidsevaluaties uit die door de overheid beoordeeld worden. Daarnaast wordt het RID periodiek door IAEA evaluatiemissies bezocht. Aan deze veiligheidsevaluaties wordt nu de 'stresstest' toegevoegd op basis van gepostuleerde ernstige begingeburtenissen, zonder de lage waarschijnlijkheid van deze gebeurtenissen mee te wegen.

In vergelijking met reactoren met hogere vermogens zoals bij kerncentrales, is de feitelijke gevaarstelling van een reactor als de HOR in Delft beperkt. De reactor functioneert op een veel lagere druk en temperatuur en heeft in vergelijking weinig laagverrijkt uranium in de kern. Daarom richt de analyse zich 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 vliegtuiginslag, waarbij de kern smelt en de inventaris via de lucht naar het milieu wordt verspreid.

Om aan de doelstelling 'het onderkennen van zwakke punten en hoe deze verbeterd kunnen worden' te voldoen, behandelt de analyse echter wel alle 'actoren' volgens de ASN en ENSREG (zie ook bijlage 1) aanbevelingen met de maximale gevolgen op de HOR installatie.

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

2.1 RID in het IAEA ongevalskader

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, op 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 onderzoeksreactoren 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 [2] (pagina 106).

2.2 RID in het nationaal ongevalskader

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 niet aanbevolen.

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 § 3.4) 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-ongeval situatie. 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 reactorkoepel te verblijven.

Inmiddels is het NPK omgevormd tot een Ministeriële Regeling waarbij *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 geclassificeerd werd. In de Ministeriële Regeling is het laagste interventieniveau van 50 naar 10 mSv verlaagd. Door de voltooiing van de conversie van de kern van HEU naar LEU, waardoor er zich nog alleen laagverrijkt 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 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 ongevalscenario voor het RID wordt in 'bewoonde gebieden' rond het instituutsterrein geen enkel interventieniveau overschreden.

3 Algemene beschrijving

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.

3.1 Omgevingsaspecten

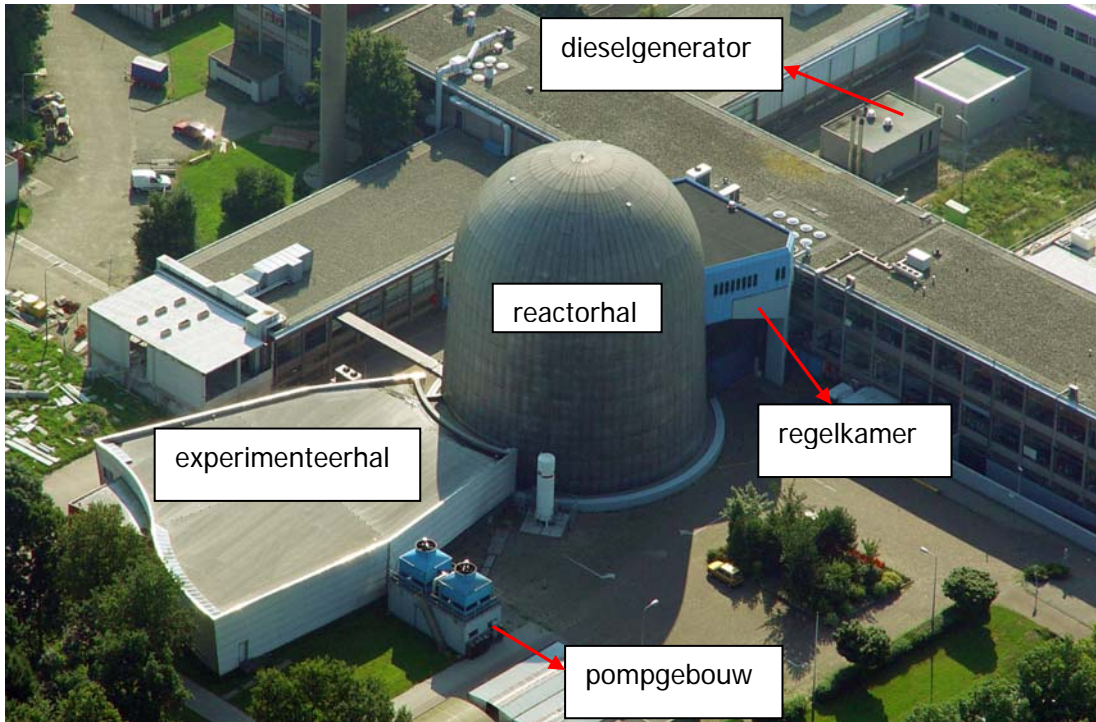
De kleinste afstand van de reactor tot de terreingrens (openbaar gebied) is tot de Mekelweg en bedraagt 75 meter. In de directe omgeving, binnen een straal van 300 m, van de HOR bevinden zich een beperkt aantal gebouwen van de TU. Een overzicht wordt gegeven in tabel 1.

Tabel 1 Gebouwen in de omgeving van de HOR

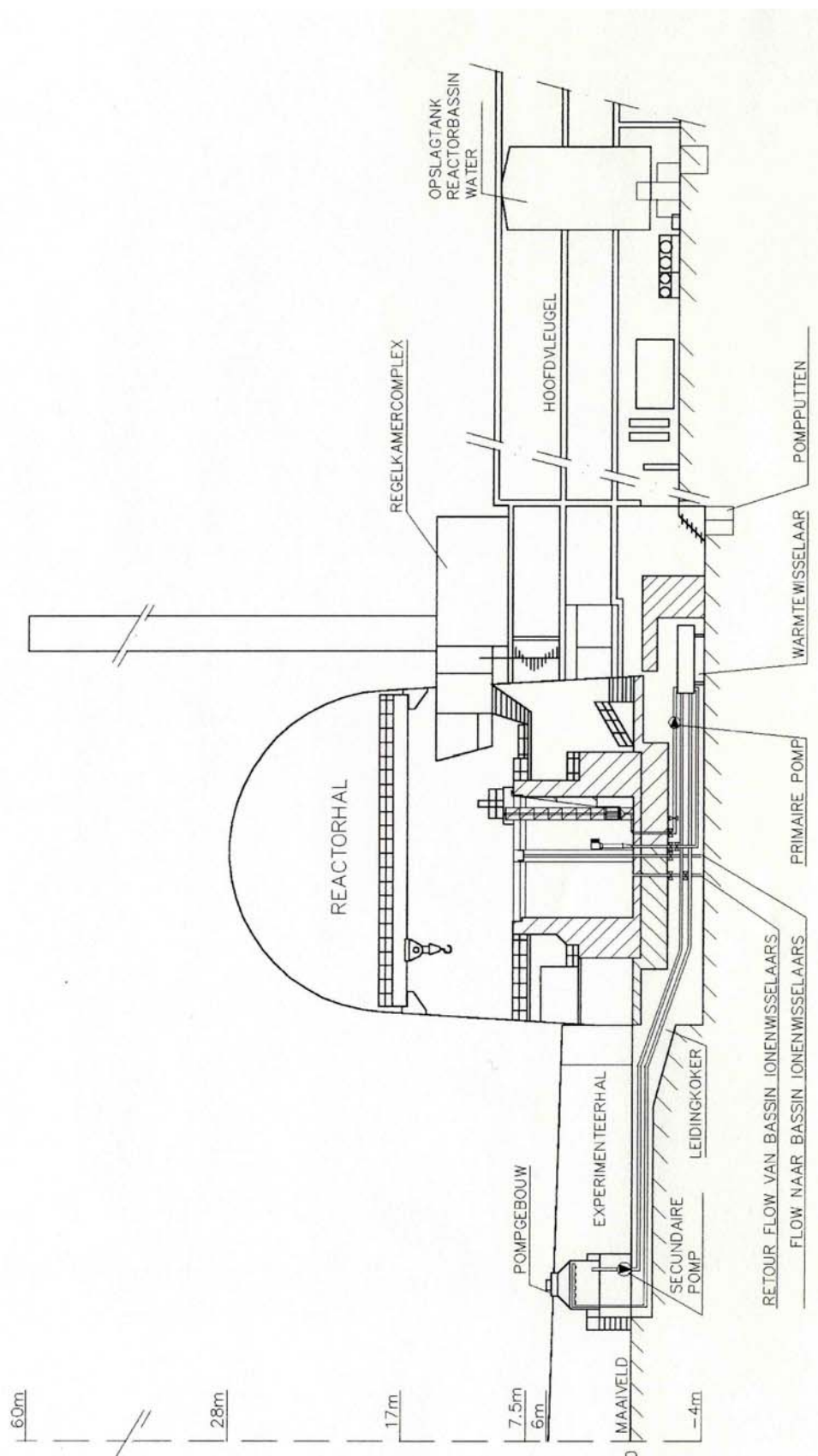
| Gebouw | Afstand |
|-------------------------------|----------------|
| Logistiek & Milieu (TU Delft) | 200 m |
| The Fellowship (TU Delft) | 300 m |
| FMVG (TU Delft) | 300 m |

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 [3].



Figuur 1: Overzicht van het RID terrein.



Figuur 2: Zijaanzicht van de HOR

3.2 Installatie aspecten

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 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 ^{235}U . Er worden twee typen elementen toegepast: standaardelementen en regelementen. Een standaard HOR LEU kern bevat 16 standaardelementen (E-xx) en 4 regelementen (EC-xx), zie figuur 3. Daarnaast zijn in een standaard LEU kern 21 beryllium reflectorelementen (R-xx) aanwezig.

| A1 | B1 | C1 | D1 | E1 | F1 |
|------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| P31 | R-19 | R-24 | R-29 | R-17 | R-18 |
| R-20 | Bigbebe | E-13 52.4 | E-20 30.1 | E-17 41.0 | R-16 |
| R-15 | E-19 36.8 | EC-03 49.6 | E-27 4.5 | EC-06 9.2 | E-22 23.5 |
| R-13 | E-24 17.1 | E-25 13.9 | Smallbebe | E-26 8.3 | E-23 21.5 |
| R-14 | E-15 44.0 | EC-04 42.9 | E-28 0.0 | EC-05 21.1 | E-21 28.4 |
| R-25 | R-28 | E-14 46.7 | E-18 38.0 | E-16 43.7 | R-26 |
| R-12 | R-22 | R-21 | R-27 | R-30 | R-23 |

Figuur 3: Standaard HOR kern

Onbestraalde splijtstofelementen worden opgeslagen in de daarvoor bestemde splijtstofkluis (droge opslag). Bestraalde splijtstofelementen mogen uitsluitend opgeslagen worden in de daarvoor bestemde opslagrekken in het reactorbassin (natte opslag, figuur 4 sectie 1&2).

De k-effectief van de opgeslagen onbestraalde splijtstof in de kluis en bestraalde splijtstof in het bassin mag de waarde van 0,95 niet overschrijden ook niet bij een overstroming waarbij de splijtstofkluis onder water komt te staan. Kriticietsanalyses tonen aan dat alle opslagfaciliteiten (opslagkluis en opslagrekken in bassin) aan deze specificatie voldoen [4].

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

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

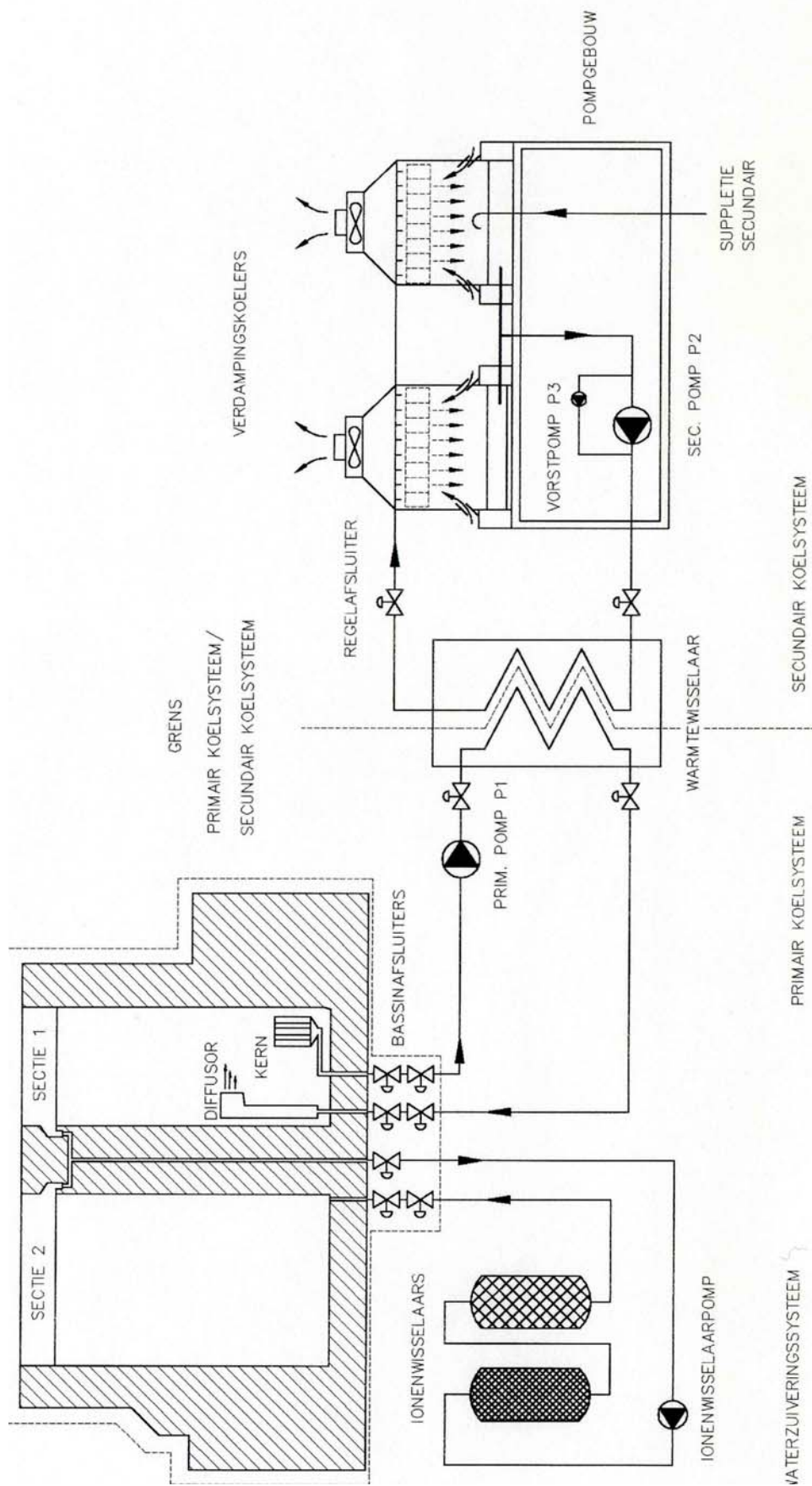
In verhouding tot de splijttingsproductinventaris van een langdurig, recent bestraald splijtstofelement in de kern is bovenstaande activiteitsinhoud zeer gering.

Bij regulier bedrijf op 2 MW wordt gebruikgemaakt van geforceerde koeling met een primair en secundair gedeelte (figuur 4).

Het primaire koelsysteem bestaat uit de warmtewisselaar, de primaire pompen en de afsluiters. Het bassinwater wordt continu gezuiverd met behulp van ionenwisselaars. Al deze componenten bevinden zich in de leidingtunnel.

Wanneer de reactor is afgeschakeld vindt koeling uitsluitend plaats door middel van natuurlijke convectie. De inhoud van het bassin (ongeveer 250 m³) is ruim voldoende om de geproduceerde vervalwarmte af te voeren zonder dat het bassin bijgevuld moet worden [5].

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.



Figuur 4: Schematische weergave reactorkoelsysteem

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 5). Het reactorbassin, inclusief de kern bevinden zich in het containment.

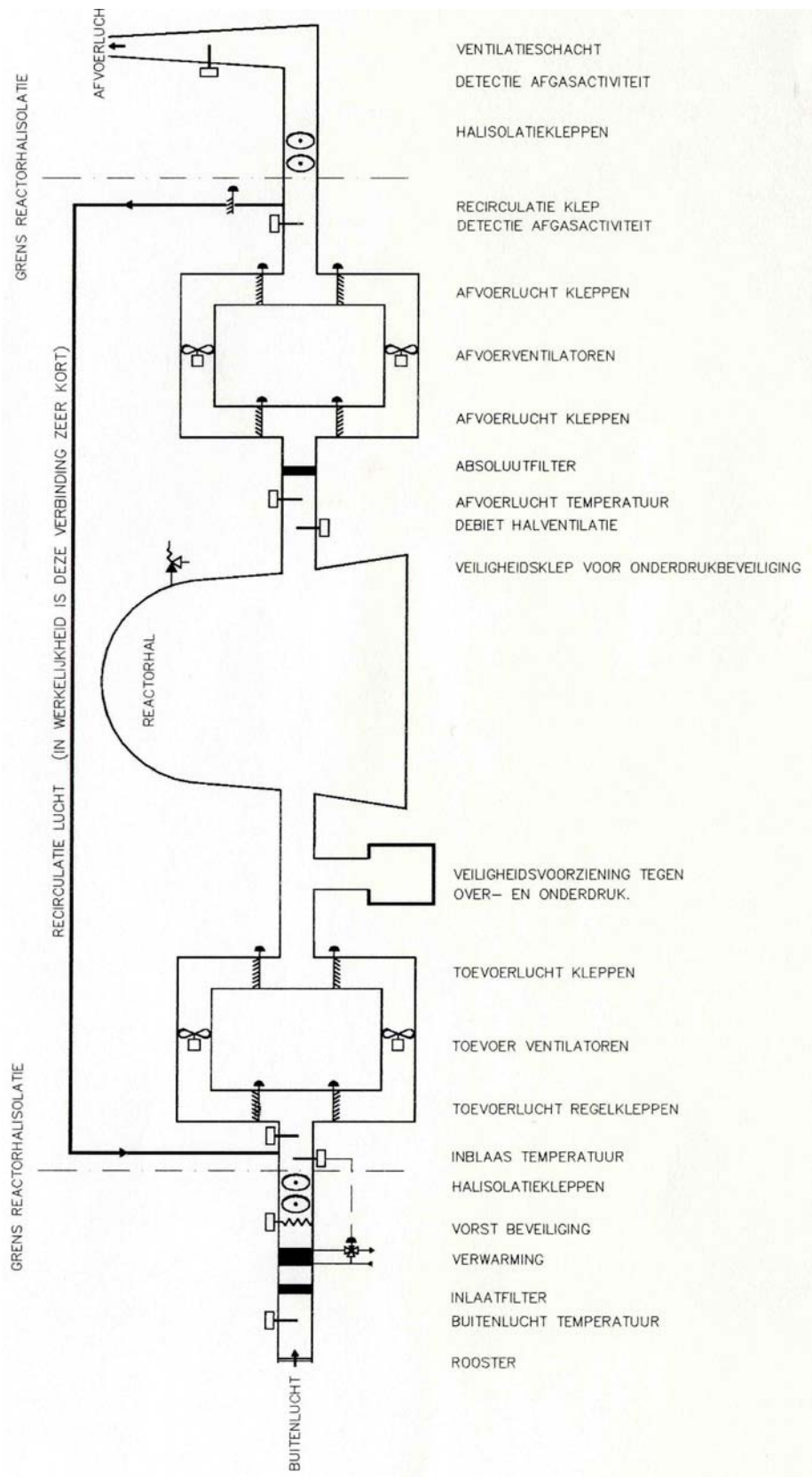
De reactorhal heeft de vorm van een afgeknotte kegel met daarop een bolsegment. De basis van de constructie wordt gevormd door aan elkaar gelaste staalplaten. De vloer is van gewapend beton met een toplaag van staal om eventuele lekkages op te vangen. Aan de voet heeft de hal een diameter van 25 meter; 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 splijststof. 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 (in figuur 5 aangegeven met 'veiligheidsvoorziening tegen over- en onderdruk').

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



Figuur 5: Het reactorinluitsysteem

3.3 Ontwerpbasis-ongevallen (DBA)

Ontwerpbasis-ongevallen (Design Base Accidents) hebben betrekking op ongevalscondities waartegen de installatie is ontworpen in overeenstemming met 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, zodat zij geen ernstige gevolgen kunnen induceren:

- Ongewenste reactiviteitsaddities
 - Ongecontroleerd uitlopen van regelstaven
 - Reactiviteitsaddities door experimenten
 - Kriticiteit 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 warmteafvoer 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 ernstigste 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 splijstofelementen in de kern geheel of gedeeltelijk droog komen te staan.

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 [6]. Hamidouche et al. hebben de RELAP5 code toegepast voor het simuleren van een LOCA ongeval met de IAEA 10 MW prototype onderzoeksreactor [7, 8]. In de studie werd een guillotinebreuk van de primaire koelleiding beschouwd. In deze situatie zal het bassin binnen 30 minuten geheel leeglopen. Een dergelijk scenario is doorgerekend voor verschillende nominale vermogens om het maximale vermogen waarbij nog geen schade aan de splijstofbekleding optreedt te bepalen. Voor LEU splijstofelementen is het smeltpunt van de splijstofbekleding 590 °C, de splijstof zelf smelt bij 1600 °C [5]. Beneden een vermogen van 4 MW werd een maximum temperatuur van de splijstofbekleding berekend lager dan 500 °C. Luchtcirculatie langs de splijstofplaten zorgt voor koeling en voorkomt het verder stijgen van de temperatuur waardoor het smeltpunt van de splijstofbekleding niet bereikt wordt.

Hedayat et al. vonden gelijksoortige resultaten bij simuleren van een LOCA ongeval met een 5 MW onderzoeksreactor van het zwembadtype [9]. 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 [8].

Bij de HOR is het ongunstigste LOCA 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 bassinwater niveau na circa 35 minuten het laagste niveau bereiken. De splijstofelementen staan dan nog voor circa 5 cm in het water zodat de warmteafvoer door geleiding naar het resterende bassinwater moet plaatsvinden via de roosterplaat en elementvoeten. Bij het bedrijven van de reactor op 2 MW is geforceerde koeling door water noodzakelijk om de warmte 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 afschakelen is er nog zo'n 6% (conservatief wordt hier vaak 10% voor aangenomen) aan vervalwarmte in de kern aanwezig dat aanvankelijk met een halveringstijd van ongeveer 50 s afneemt. Direct na afschakeling 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, wordt de kern ontkoppeld van de primaire koelleiding en komt de convectiestroming op gang. Er zijn vele redundante en diverse systemen aanwezig die elk voor prompte afschakeling van de reactor zorgen in het geval dat de geforceerde koelstroom wegvalt of te veel afneemt.

Op grond van bovenstaande 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 bij de HOR door lekkage zijn er echter nog verschillende back-up verdedigingslijnes 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 de reactorkern over te brengen 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 haar beurt weer direct worden bijgevuld uit het brandweerleidingnet via een speciale voorziening.

3.4 Buiten ontwerp-basis-ongeval

De ongevallen zoals besproken in hoofdstuk 3.3 (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 is hierbij gezekerd door het aanbrengen van voldoende redundantie.

De plannen voor ongevalsbeheersing buiten de installatie zijn gebaseerd op een conservatieve, pessimistische schatting van het radiologisch risico, volgens een gepostuleerd 'buitenontwerpbasis ongeval'. In dit ongeval (in het veiligheidsrapport wordt dit het overkoepelende ongeval genoemd) wordt propagatie van stromingsinstabiliteit gekoppeld aan het meervoudig falen van de automatische detectie zodat het systeem hierop niet op tijd ingrijpt tijdens reactorbedrijf.

Dit scenario is doorgerekend onder conservatieve aannamen (een maximaal thermisch vermogen van 3,15 MW en meervoudig falen van de automatische voorzieningen) en leidt tot een eindsituatie waarin 9 splijtstofplaten voor 40%

zijn gesmolten. Deze eindsituatie is op passief fysische gronden gebaseerd (dus zonder eerder ingrijpen van de actieve veiligheidsvoorzieningen) zoals beschreven in het veiligheidsrapport [5]. Zij leidt tot een situatie waarin splijtingsproducten zich vrij in het bassin en de reactorcoepel bevinden. In de vergunning is vastgelegd dat het lek vanuit de reactorhal maximaal 3% per 24 uur mag bedragen. Dit lekpercentage wordt periodiek gecontroleerd en is altijd minder dan het toegestane maximum van 3%. Met dit maximale lek is rekening gehouden in de berekening van de dosisgevolgen.

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 eruit als weergegeven in tabel 2. Hierin is geen rekening gehouden met de afschermdende werking van de reactorhal constructie en andere gebouwen op het RID terrein.

In de analyse zijn de 70-jarige gevolgen door besmetting betrokken van ± 30 splijtingsproducten. 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

Door de lage activiteitsinventaris van de HOR, worden de dosisgevolgen voornamelijk bepaald door activiteit met een korte halveringstijd, zodat de dosis na 48 uur nauwelijks nog bijdraagt.

Uit tabel 2 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. De 10 mSv contour ligt immers op een afstand van 75 meter, hetgeen overeenkomt met de kleinste afstand van de reactor tot de openbare weg. De verklaringen voor de gekozen afstanden en bijbehorende limieten uit tabel 2 zijn opgenomen in de voetnoot.

Tabel 2 Dosiswaarden in mSv van de HOR na het overkoepelende ongeval

| Totale eff. Dosis LEU [mSv] | 53m | 75m (Mekelweg) | 100 m | 237m | 300m ⁽¹⁾ | 350m (Kruithuisweg) | 550m |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------|------------------|---------------------|---------------------|-------|
| 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 ⁽²⁾ | 10 ⁽³⁾ | 5,6 | 1 ⁽⁴⁾ | 0,62 | 0,46 | 0,18 |

3.5 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 bevat met in elke sectie 5 splijtstofplaten gescheiden door de regelstaaf die neutronenabsorberend materiaal 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).

Als het beschadigde gebied van de splijtstofbekleding voldoende groot is, kan propagatie via stromingsinstabiliteit optreden naar andere splijtstofplaten. Op fysische gronden (thermohydraulische ont koppeling) kan zo'n propagatie zich niet voortzetten naar aangrenzende splijtstof- of regelementen. Bij regelementen zijn de beide splijtstofsecties eveneens thermohydraulisch ont koppeld.

Wanneer en of de laagste smeltemperatuur (de temperatuur waarbij de splijtstofbekleding smelt, $590\text{ }^{\circ}C$) bereikt wordt, hangt af van vele plaatselijke factoren binnen de kern zoals vermogensdichtheid, compactheid, geometrie, koelmedium water of lucht, evt. stoomvorming, stralingseffect bij hogere temperaturen (4de macht). Vóórdat smelten begint is vervorming van de platen en verlies van integriteit niet uit te sluiten. Vanaf ongeveer $450\text{ }^{\circ}C$

¹ Maatregelzone NPK

² Dosislimiet radiologisch werker

³ Drempelwaarde NPK

⁴ Dosislimiet bevolking

wordt de bekleding week. Hierbij kunnen blisters optreden waarbij vluchtige splijtingsproducten vrijkomen uit de matrix.

Bij de behandeling van het ontwerpbasisongeval LOCA (§ 3.3) 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 daarna schade door te hoge temperaturen zal optreden. De resterende vervalwarmte wordt in dat geval afdoende door geleiding naar het water afgevoerd en na het droogvallen door lucht.

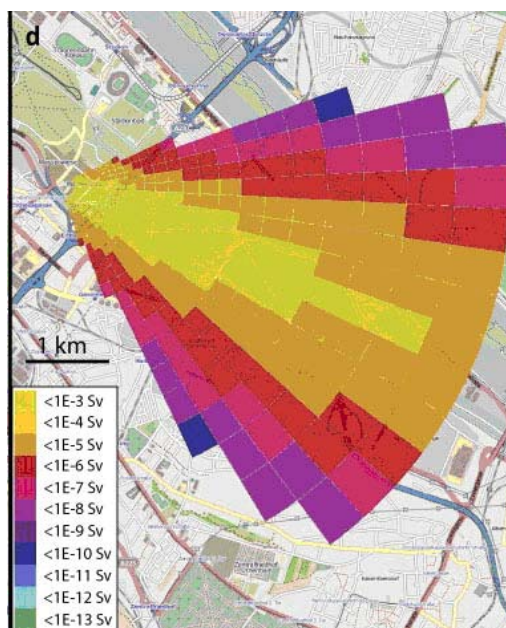
Daarboven is er echter nog een andere, zeer ongunstige situatie denkbaar:

De ongunstigste 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 niet tot stand kan komen. Door Interatom is voor de HOR zo'n situatie zeer conservatief berekend [10] 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 wordt, instantaan na het afschakelen van de reactor optreedt. Met deze ongunstige, overschatte aannamen 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 smelttemperatuur meer zullen bereiken.

3.6 Maximale gevolgen HOR

Voor het ongeval met maximale omgevingsgevolgen door de HOR wordt het ongunstigste 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 [11-13] uitgevoerd en zijn vanwege de zwembadopstelling vergelijkbaar met de HOR.

Voor de TRIGA reactor is de effectieve dosis in een straal van 5 km rondom de reactor berekend (zie figuur 6).



Figuur 6: Maximale effectieve dosis in 50 jaar in een gebied van 5 km rondom de TRIGA Mark II reactor in Wenen na het neerstorten van een vliegtuig [12].

De berekende doses worden gegeven op verschillende afstanden van de reactor en zijn berekend zowel zonder als met 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 3.

Tabel 3 Dosiswaarden in mSv van de HOR na een vliegtuigongeval gebaseerd op berekeningen van de TRIGA en BER-II reactoren [12, 13]

| | TRIGA | BER-II | HOR |
|--|--------------|---------------|------------|
| Maximale effectieve dosis (ICRP -60) na 1 dag | 0.37 | | 3.72 |
| Maximale effectieve dosis na 50 jaar op 600 m | <0.1 | | <1 |
| Maximale effectieve dosis na 50 jaar op 4.38 km | <0.01 | | <0.1 |
| Beenmergdosis na 7 dagen op 750 m zonder maatregelen | | 9.04 | 2.7 |
| Beenmergdosis na 7 dagen op 750 meter met maatregelen | | 0.70 | 0.21 |
| Effectieve dosis na 50 jaar op 750 m zonder maatregelen | | 199 | 60 |
| Effectieve dosis na 50 jaar op 750 m met maatregelen | | 12.6 | 3.8 |

Uit tabel 3 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.

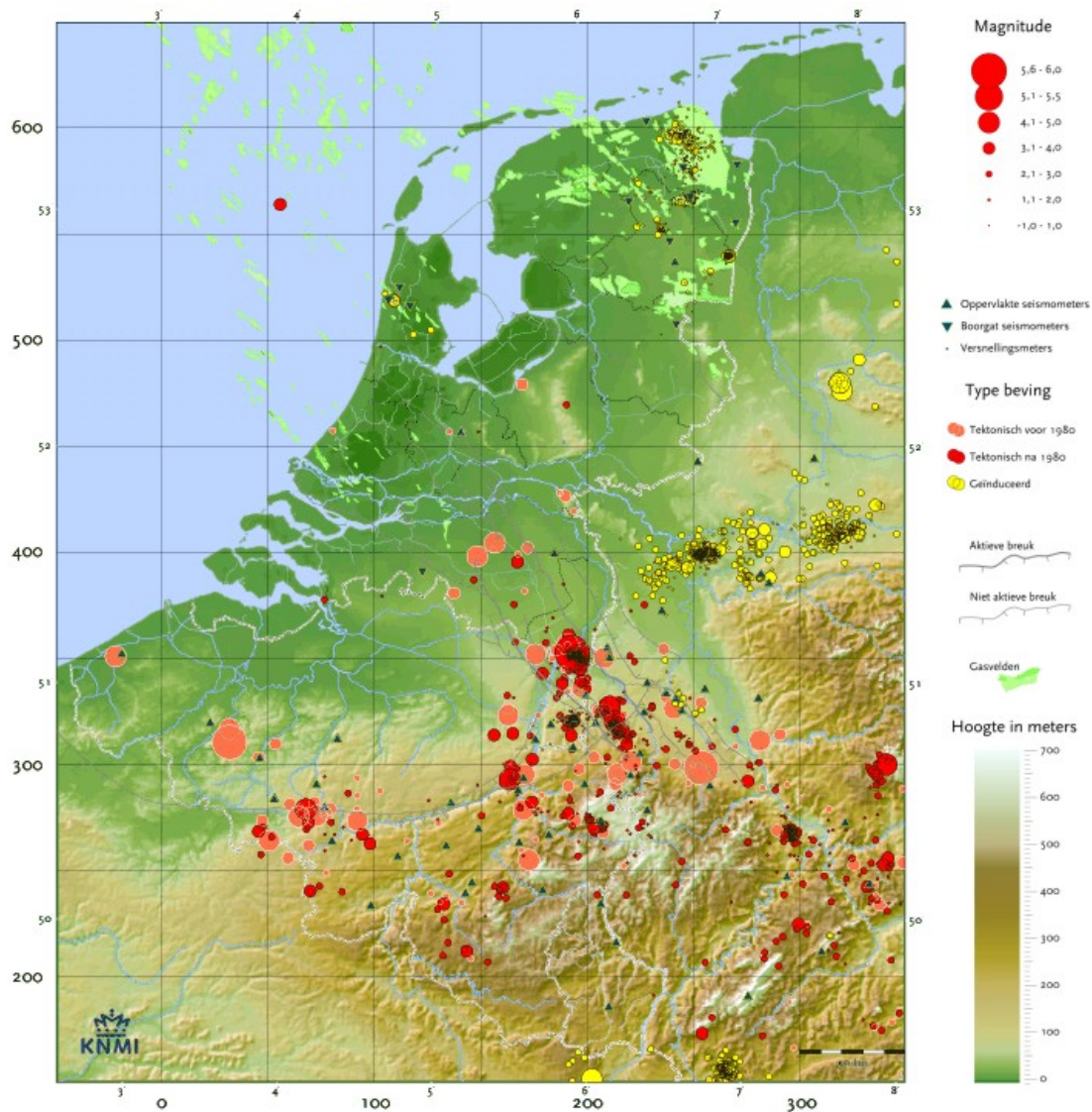
Geconcludeerd kan worden dat door de beperkte omvang van de HOR zelfs in het allerergst denkbare buiten-ontwerpbasis-ongeval de gevolgen voor de omgeving van de HOR beperkt zullen blijven en er van ernstige ongevallen voor leden van de bevolking geen sprake is.

4 Aardbevingen

Nederland kent geen aardbevingen met verwoestende gevolgen. Dat komt doordat Nederland niet bij de rand van een tektonische plaat ligt (figuur 7) [14]. Wel komen natuurlijke of tektonische aardbevingen voor in het Zuidoosten van Nederland door de aanwezigheid van verschillende breuklijnen (figuur 8). De meest krachtige aardbeving was in Roermond in 1992 met een intensiteit van 7 op de EMS (Europese Macroseismische Schaal). Naast natuurlijke aardbevingen komen vooral in Noord-Nederland geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning voor (figuur 8). Geïnduceerde aardbevingen zijn lichter, duren korter en zijn meer schokvormig dan natuurlijke aardbevingen.



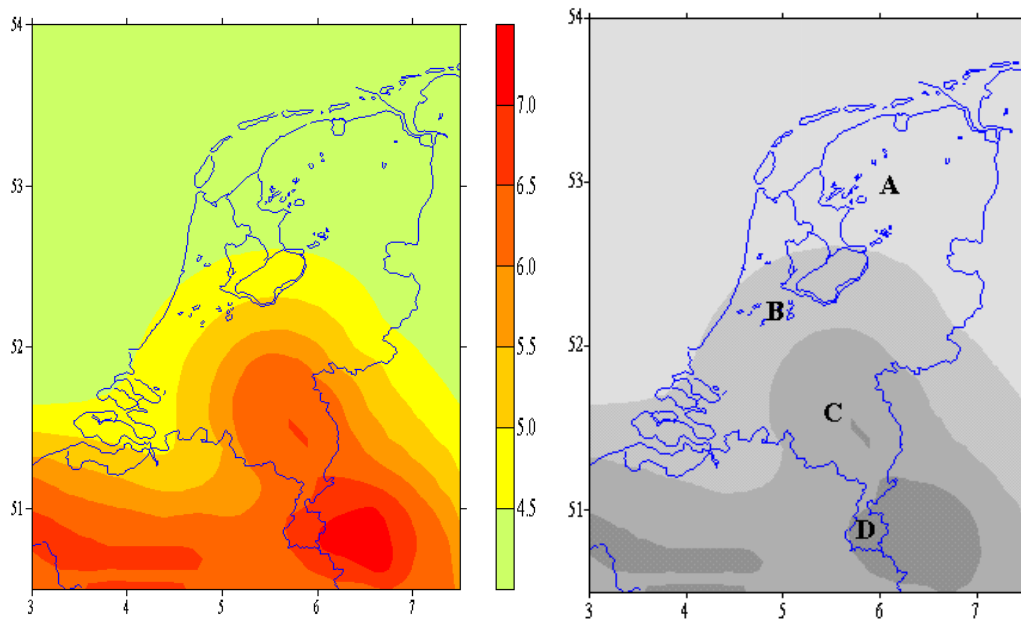
Figuur 7: Overzicht tektonische platen.



Figuur 8: Aardbevingen in Nederland in de periode 1904-2004 [14].

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 9) 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 herhalingstijd 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 9: Seismisch risico in Nederland. De kaart links laat de te verwachten intensiteit zien met een herhalingsstijd 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/sec² [15].

4.1 Ontwerpbasis

De seismische karakterisering van Delft en omgeving in de vorige paragraaf is voor het vestigingsgebied van het RID conservatief samengevat met een maximale aardbeving van de klasse 5 tot 6 (EMS-schaal). 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 m/s². Bij dergelijke bevingen blijft de bassinconstructie echter nog intact zodat voldoende koeling van de reactorkern verzekerd is.

4.1.1 Aardbeving waartegen de installatie bestand is

In overeenstemming met IAEA richtlijnen [16] is voor de HOR een ontwerp-aardbeving bepaald waarbij de horizontale piekversnelling een waarde van 0,8 m/s² kan bereiken. Ten opzichte van de karakterisering hierboven (0,5 m/s²) is dus een marge van 0,3 m/s² in het ontwerp van de HOR aanwezig.

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

4.1.2 Voorzieningen in kader van DBE

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 veilig af te schakelen en afgeschakeld te houden (redundantie), dat wil zeggen dat het reactorvermogen 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 ten gevolge van de zwaartekracht in de kern vallen en de afschakeling d.m.v. het beveiligingssysteem een feit is. De stroom door deze magneten is zo zwak dat de staven al bij geringe trilling van de reactorbrug uit hun magnetische koppeling vallen zodat de reactor al wordt afgeschakeld 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 afschakeling bij een aardbeving voldoende redundant zeker is gesteld.

Naast dit afschakelmechanisme om de reactor tijdig tijdens een aardbeving te kunnen stoppen is er een voorziening aangebracht om in geval van schade aan het bassin extra watersuppletie toe te voegen. Deze aparte leiding biedt de mogelijkheid om extra 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.

4.1.3 Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis

De algemene organisatie van het Reactor Instituut Delft met betrekking tot het bedrijven van de HOR is beschreven in het veiligheidsrapport HOR. Na een reorganisatie binnen de TU is de organisatie in 2010 beschreven in een addendum dat aan de toezichthoudende 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 de onderhavige 'stresstest' evaluatie.

4.2 Evaluatie van de marges

4.2.1 Aanwezige informatie

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 zodanig 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 kan worden, ook bij een lage waterstand in het bassin.

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

Om, in het kader van deze stresstest over een 'engineering judgement' te beschikken is een extern deskundige van de leerstoel Gebouwen van de TU faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen verzocht om op grond van beschikbare veiligheids- en ontwerpstudies een inschatting te maken of de installatie bestand is tegen de ontwerpaardbeving.

Op grond van de maximale windbelasting, die het containment met voldoende veiligheid kan dragen, de massa van de koepel en de aanname dat de koepel de grondversnelling bij een aardbeving volledig zal volgen, is beoordeeld of de koepel de ontwerpbeving zal weerstaan.

In vergelijking met IAEA-richtlijnen [16], waarbij de historische intensiteit van aardbevingen in een gebied rond de vestigingsplaats met een straal van 200 km in aanmerking wordt genomen en voor de HOR een ontwerpaardbeving is vastgesteld waarbij de horizontale piekversnelling een waarde van $0,8 \text{ m/s}^2$ zou kunnen bereiken, blijkt de koepel nog een extra veiligheidsmarge voor aardbevingbelasting te hebben van ongeveer een factor 13. De deskundige

concludeert hieruit dat het praktisch is uitgesloten dat het containment ooit door een aardbeving zal bezwijken.

Daarnaast is geanalyseerd hoe het koelwaterbassin zich onder aardbevingcondities gedraagt, waarbij drie mogelijke fenomenen (afschuiving, bezwijking en 'omvallen') zijn beschouwd. Hieruit wordt geconcludeerd dat de integriteit van de bassinconstructie en waterkerende functies en de fundering ook bij een (zeer onwaarschijnlijke) grondversnelling van $0,8 \text{ m/s}^2$ behouden blijft. Aanvullende maatregelen worden niet nodig geacht.

4.3 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 de voorziene noodmaatregelen zoals eerder beschreven, falen. In paragraaf 3.6 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.

5 Overstromingen

5.1 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.

5.1.1 Overstroming waartegen de installatie is ontworpen

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.

Zelfs als het water de reactorhal zou binnen dringen, blijft de reactorkern hiervan geïsoleerd omdat het slechts de buitenkant van het bassin bereikt. Instroming vindt pas plaats bij (uitwendige) overstroming van het bassin als het water in de koepel een peil van 8 meter boven maaiveld bereikt.

Beschadiging van de reactor kan hierdoor worden uitgesloten. Het risico van ongecontroleerde verspreiding van radioactief materiaal is verwaarloosbaar klein.

5.1.2 Voorzieningen in kader van DBF

Zoals in het vorige hoofdstuk is behandeld, is de reactor prompt en passief in de afgeschakelde toestand te brengen door de magneetkoppeling van de regelstaven te verbreken. 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 of om de verspreiding van activiteit tegen te gaan niet nodig. Immers is zoals al is toegelicht de waterinhoud van het bassin voldoende om de vervalwarmte bij afschakeling af te voeren.

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.

5.1.3 Voldoen van de installatie aan vergunningsbasis

De algemene organisatie van het Reactor Instituut Delft met betrekking tot het bedrijven van de HOR is beschreven in het veiligheidsrapport HOR [5]. Na een reorganisatie binnen de TU is de organisatie in 2010 beschreven in een addendum dat aan de toezichthoudende 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 de onderhavige 'stresstest' evaluatie.

5.2 Evaluatie van de marges

5.2.1 Aanwezige informatie

Indien een nationale waarschuwing wordt afgevaardigd over ernstige overstromingen kunnen er een aantal eenvoudige maatregelen worden getroffen die gezien de passieve en veilige afschakeling 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. Dit 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 de luchtinlaat in de reactorhal bevindt zich op ongeveer 4 m boven maaiveld en 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.

5.3 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 [17]. 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 [17]. 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 geen verwoestende inslag meer te verwachten, doordat die dan zal zijn gereduceerd tot een 'gewone' overstroming.

6 Extreem natuurgeweld

De aanleiding tot dit onderzoek, de aardbeving gevolgd door een tsunami in de zee voor Japan, is een vorm van het inwerken van extreem natuurgeweld op een nucleaire installatie. Vandaar dat de gevolgen van aardbevingen en overstromingen (tsunami's) bijzondere aandacht in Hoofdstuk 4 en 5 hebben gekregen.

Er zijn echter meerdere vormen van natuurgeweld te onderscheiden waarvan de mogelijke gevolgen samengevat in dit deel aan de orde komen. Natuurgeweld is op grond van haar herkomst te onderscheiden in geweld van:

- Meteorologische aard (weer condities),
- Kosmische aard
- Seismische aard.

Hierna worden op grond van de herkomst de te verwachten effecten besproken, waarbij de seismische effecten nu betrekking hebben op de combinatie van aardbeving en overstroming.

6.1 Extreme weer condities

6.1.1 Onweer

Onweer kan de installatie beïnvloeden doordat bliksem inslaat, of doordat de sterke begeleidende elektromagnetische puls elektronica verstoort.

Op het RID zijn alle gebouwen, inclusief de reactorkoepel, beschermd tegen blikseminslag door bliksemafleiders die bij eventuele inslag de energie naar aarde afleiden. In het geval dat van inslag op het RID of in de externe energievoorziening sprake is, kan dat resulteren in het uitvallen van de externe elektriciteitsvoorziening. Uitvallen van deze voorziening leidt tot een afschakeling van de reactor door het vallen van de regelstaven. Deze afschakeling is passief, d.m.v. de zwaartekracht en daardoor niet afhankelijk van in- of externe elektriciteitsvoorziening. Daar de warmtecapaciteit van het bassin voldoende is om de restwarmte van de kern op te nemen, zijn er vanaf dat moment geen externe koelfuncties nodig en is de reactor in een veilige toestand gebracht.

Mocht de elektromagnetische puls ondanks alle afschermingen (kooi van Faraday) zo sterk zijn dat zij de (regel)elektronica beïnvloedt, dan reageren de talrijke, verschillende beveiligingssystemen zo, dat de reactor wordt afgeschakeld.

6.1.2 Windstoten

De reactorkoepel is bestand tegen windstoten van 160 km/u [5]. Deze snelheid is boven de zwaarste categorie (12) op de schaal van Beaufort die toegekend wordt aan een orkaan vanaf windsnelheden groter dan 117 km/h. Voordat zulke waarden bereikt worden, zal door het toenemen van de onderdruk in de reactorhal door de storm de halventilatie automatisch worden afgeschakeld. Ten gevolge hiervan zullen ook de regelstaven worden ingedreven en is de reactor daarna afgeschakeld in een veilige toestand zonder van externe regel- of koelsystemen afhankelijk te zijn.

Materiële schade aan de gebouwen of externe energievoorziening ten gevolge van rondvliegende, door de storm meegenomen objecten is niet uit te sluiten, doch zal nimmer kunnen leiden tot een situatie waarbij de reactor niet (passief) zal afschakelen door het vallen van de regelstaven.

6.1.3 Hagelbuien

Extreme hagelbuien kunnen leiden tot verstoppingen in de koeltorens van het secundaire koelsysteem. Indien het koelvermogen van deze voorziening niet voldoende is, sturen de veiligheidssystemen van de reactor deze automatisch naar een lager vermogen, waarna er geen afhankelijkheid meer is van externe (koel)systemen.

6.2 Zonnewind

Hevige zonnewinden kunnen leiden tot storingen in het elektriciteitsnetwerk en in communicatienetwerken. Deze vorm van natuurgeweld komt voor wat betreft het effect overeen met de invloed van onweer in paragraaf 6.1.1. Zoals daar beschreven is de reactor hiertegen bestand.

6.3 Aardbeving boven DBE met consequentie overstroming boven DBF

Doordat Nederland niet op de rand van tektonisch platen (figuur 7) ligt, kent zij geen aardbevingen met verwoestende gevolgen. Daarboven ligt Nederland aan een relatief ondiepe zee waardoor ook tsunami's kunnen worden uitgesloten. Bij eventuele aardbevingen in zee waarbij grote massa's water in beweging gezet worden zijn de effecten op het RID ten gevolge van de ligging ver verwijderd van de kust gunstig omdat een vloedgolf op zijn weg over land veel energie verliest. Het effect komt hierdoor overeen met een 'gewone' overstroming waarvoor al in hoofdstuk 5 is aangetoond dat de HOR onder zulke condities in een veilige toestand komt en blijft.

7 Verlies van elektrische voeding

De veiligheidssystemen van de HOR zijn ontworpen volgens het principe van veilig falen. Dit betekent wanneer bijvoorbeeld de elektrische voeding wordt onderbroken, de beveiligingssystemen de reactor in een veilige toestand brengen (bijvoorbeeld het afschakelen van de reactor). Voor het in veilige toestand brengen van de reactor is dus geen elektrische voeding nodig. De regelstaven zoals genoemd in paragraaf 4.1.2 vallen onder invloed van de zwaartekracht in de reactorkern, waarbij met 2 van de 4 regelstaven de reactor kan worden afgeschakeld en afgeschakeld kan blijven.

De vervalwarmte die wordt geproduceerd na afschakelen van de reactor kan worden afgestaan aan het bassin, zoals beschreven in paragraaf 3.5. Hiervoor zijn geen actieve voorzieningen nodig zoals pompen die afhankelijk zijn van elektrische voeding.

8 Verlies van warmteput (heat sink)

Bij het regulier bedienen van de reactor op 2 MW is geforceerde koeling door water noodzakelijk om de warmte af te voeren. Tot een reactorvermogen 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 afschakelen is er nog zo'n 6% aan vervalwarmte in de kern aanwezig. Direct na afschakeling 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, wordt de kern ontkoppeld van de primaire koelleiding en komt de convectiestroming op gang.

Indien het water in het bassin als warmteput wegvalt, kan de HOR onder bepaalde omstandigheden d.m.v. lucht worden gekoeld, zie paragraaf 3.3 en 3.5

9 Severe accident management

Voor de HOR is een andere aanpak gekozen in verband met het geringe risico ten gevolge de activiteitsinventaris. Het bedrijfsnoodplan voorziet in de afhandeling van de geringe risico's bij de HOR.

Daarboven heeft het RID elders in de TU een 'emergency data centre' met (passieve) 'control room habitability' ingericht zodat meetwaarden van de reactor, zoals het dosistempo op verschillende locaties op afstand gevolgd kunnen worden.

10 Conclusie

Omdat de maximale potentiële dosis voor leden van de bevolking zelfs voor het extreemste ongeval (inslag van een vliegtuig) onder de interventiewaarden blijft die volgens de Nederlandse wetgeving (NPK) ingrijpen rechtvaardigt, is het voor het RID niet zinvol om de stresstest te betrekken op een stapsgewijze vergroting boven de ontwerpwaarde van bijvoorbeeld een aardbeving of overstroming.

Om echter wel aan de doelstelling 'het onderkennen van zwakke punten en hoe deze verbeterd kunnen worden' te kunnen voldoen, zijn de actoren uit internationale stresstest aanbevelingen wel onderzocht.

De aanbevelingen (bedoeld voor vermogensreactoren) geven een aantal onderwerpen aan die voor het RID niet van toepassing zijn gezien de beperkte mogelijke gevolgen of omdat (zoals bij het uitvallen van elektrische voeding) er geen ongevalsituatie uit voort komt.

De bestendigheid tegen aardbevingen zijn geanalyseerd en in orde bevonden. De veiligheidsmarge (factor 13) is ruim voldoende, zelfs onder zeer conservatieve aannamen over de mogelijke grondversnellingswaarden. Deze beoordeling heeft plaatsgevonden met behulp van een extern deskundige.

Als mogelijk verbeterpunt valt te onderzoeken of het mogelijk is een extra voorziening te treffen om de reactorkern nat te houden in geval het bassin leegstroomt en niet voldoende kan worden bijgevuld.

De ontwerpeisen en omstandigheden tegen overstroming zijn getoetst en in orde bevonden. Van een overstroming is geen ongevalsituatie te verwachten omdat de reactor altijd in de veilige uitgeschakelde situatie te brengen en te houden is.

Als verbeterpunt valt te onderzoeken of het laagste inlaatpunt naar de reactorhal (de uitlaat van het waterslot) op een hoger niveau te brengen is zodat pas bij een grotere overstroming het water tot de reactorhal kan doordringen.

Bij extreme weersituaties is vastgesteld dat zij niet kunnen leiden tot schade waarbij de reactor in een onveilige situatie komt.

Samengevat luiden de conclusies van het onderzoek:

- De Hoger Onderwijs Reactor van het RID is veilig;
- Het RID voldoet aan de vergunningvoorwaarden;
- De (ongevals)consequenties van de reactor beperken zich in alle gevallen tot tijdelijk ontruimen van het instituutsterrein;
- Er zijn voorzieningen om ongevallen het hoofd te bieden.

11 Referenties

1. ENSREG, *EU "Stresstests" specifications*. 2011.
2. International Atomic Energy Agency (IAEA), *INES THE INTERNATIONAL NUCLEAR AND RADIOLOGICAL EVENT SCALE USER'S MANUAL* 2008.
3. *Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)*. <http://www.ahn.nl/viewer>.
4. Siemens, *Contributions to the Safety Analysis Report of the HOR*. 1993. **KWU-NLS2/93/0013 Rev A/IRI-HOR-130-93-04**.
5. De Vries, J.W., et al., *Veiligheidsrapport Hoger Onderwijsreactor*. 1995. **IRI/HOR-130-95-01**.
6. *RELAP5 code* <http://www.inl.gov/relap5>.
7. 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.
8. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Research Reactor Core Conversion Guidebook*. IAEA Tecdoc 1992. **643**.
9. 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.
10. INTERATOM, *Fuel plate temperature for the HOR after a LOCA*. 1988.
11. Commission of the European Communities, *COSYMA A new programme for accident consequence assesment*. Final report EUR 13028 EN, 1990.
12. Villa, M., et al., *Accident scenarios of the TRIGA Mark II reactor in Vienna*. *Nuclear Engineering and Design*, 2010. **240**(12): p. 4091-4095.
13. 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.
14. *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut* www.knmi.nl.
15. 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.
16. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Earthquake Resistant Design of Nuclear Facilities with Limited Radioactive Inventory*. TECDOC 348, 1985.
17. Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ).
18. ASN, *Specifications for the complementary safety assessment of nuclear installations in the light of the Fukushima accident: Riks of flooding, earthquake, loss of power supply and loss of cooling, in addition to operational management of accident situations*. 2011.
19. Jukka Laaksonen, *Post-Fukushima "stress tests" of European nuclear power plants - contents and format of complementary safety assessment report*. 2011.

12 Bijlage 1: Ensreg kruistabel

Bij aanvang van deze studie is met de overheid afgesproken dat de rapportage in grote lijnen de opmaak zal volgen van het ASN document 'Specifications for the complementary safety assessment of nuclear installations in the light of the Fukushima accident' [18] voor zover dit op onderzoeksreactoren van toepassing is. Later is er een ENSREG-opmaak [1] voorgesteld waarvan een nadere specificatie van de inhoudsopgave is uitgewerkt [19]. Daar er, vanwege de beperkte gevaarzetting van de reactor, in overleg met de overheid is afgeweken van de aanpak om de analyse te betrekken op een stapsgewijze vergroting van actoren, is in deze bijlage de Engelstalige inhoudsopgave overgenomen met, waar van toepassing, een toelichting of verwijzing naar elders in dit document.

1. General data about site/plant

1.1. Brief description of the site characteristics

Zie hoofdstuk 3

1.2. Main characteristics of the unit

Zie paragraaf 3.2

1.3. Systems for providing or supporting main safety functions

Zie paragraaf 3.2

1.3.1. Reactivity control

Zie paragraaf 3.2

1.3.2. Heat transfer from reactor to the ultimate heat sink

Zie paragraaf 3.2, De inhoud van het bassin is voldoende om de vervalwarmte bij afschakeling af te voeren.

1.3.3. Heat transfer from spent fuel pools to the ultimate heat sink

Zie paragraaf 3.2

1.3.4. Heat transfer from the reactor containment to the ultimate heat sink

Zie paragraaf 3.2, figuur 4.

1.3.5. AC power supply

Niet van toepassing bij een onderzoeksreactor als de HOR; direct na het (passief) afschakelen is er geen veiligheidsafhankelijkheid van 'power supply'.

1.3.6. Batteries for DC power supply

Niet van toepassing bij een onderzoeksreactor als de HOR; direct na het (passief) afschakelen is er geen veiligheidsafhankelijkheid van 'power supply'.

1.4. Significant differences between units

'This chapter is relevant only for sites with multiple NPP units of similar type. '

Niet van toepassing bij een onderzoeksreactor als de HOR.

1.5. Scope and main results of Probabilistic Safety Assessments

PSA is niet van toepassing bij een onderzoeksreactor als de HOR.

2. Earthquakes

2.1. Design basis

Zie paragraaf 4.1

2.1.1. Earthquake against which the plant is designed

Zie paragraaf 4.1.1

2.1.2. Provisions to protect the plant against the design basis earthquake

Zie paragraaf 4.1.2

2.1.3. Compliance of the plant with its current licensing basis

Zie paragraaf 3.1.3

2.2. Evaluation of safety margins

2.2.1. Range of earthquake leading to severe fuel damage

Voor HOR andere aanpak in verband met het geringe risico ten gevolge de activiteitsinventaris, zie paragraaf 4.2.1

2.2.2. Range of earthquake leading to loss of containment integrity

Zie paragraaf 4.2.2

2.2.3. Earthquake exceeding the design basis earthquake for the plant and consequent flooding exceeding design basis flood

Zie paragraaf 4.3 en 4.3

2.2.4. Potential need to increase robustness of the plant against earthquakes

Zie paragraaf 4.2.1

3. Flooding

3.1 Design basis

3.1.1. Flooding against which the plant is designed

Zie paragraaf 5.1.1

3.1.2. Provisions to protect the plant against the design basis flood

Zie paragraaf 5.1.2

3.1.3. Plant compliance with its current licensing basis

Zie paragraaf 5.1.3

3.2 Evaluation of safety margins

3.2.1. Estimation of safety margin against flooding

Zie paragraaf 5.2.1

3.2.2 Potential need to increase robustness of the plant against flooding.

Zie paragraaf 5.2.1

4. Extreme weather conditions

4.1 Design basis

4.1.1. Reassessment of weather conditions used as design basis

Voor HOR andere aanpak in verband met het geringe risico ten gevolge de activiteiteninventaris, zie hoofdstuk 6.

4.2 Evaluation of safety margins

4.2.1 Estimation of safety margin against extreme weather conditions

Als boven

4.2.2 Potential need to increase robustness of the plant against extreme weather conditions

Als boven

5. Loss of electrical power and loss of ultimate heat sink

5.1 Nuclear power reactors

Niet van toepassing

5.2 Spent fuel storage pools

De inhoud van het bassin is voldoende om de vervalwarmte af te voeren, zie hoofdstuk 7 en 8.

6. Severe accident management

Zie hoofdstuk 9.

6.1.1. Maintaining the containment integrity after occurrence of significant fuel damage (up to core meltdown) in the reactor core

Is voorzien in het veiligheidsrapport

6.1.2. Elimination of fuel damage / meltdown in high pressure

Niet van toepassing, zie hoofdstuk 3.5

6.1.3. Management of hydrogen risks inside the containment

Niet van toepassing, zie hoofdstuk 3.3. De temperaturen zijn te laag voor (zirkonium) waterstof productie.

6.1.4. Prevention of overpressure of the containment

In voorzien door waterslot, zie figuur 5.