



# Jaarverslag NRG onderzoeksprogramma 2018

*Publieksverslag*



**Nuclear. For life.**



# Introductie

NRG verricht namens de Nederlandse samenleving onderzoek om de Nederlandse nucleaire kennis in stand te houden, te innoveren, uit te breiden en uit te dragen. Opdrachtgever voor dit onderzoeksprogramma is de Nederlandse overheid. De financiële middelen worden jaarlijks afgestemd met het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Met als uitgangspunt de prioriteiten van de Nederlandse overheid wordt het onderzoek van NRG inhoudelijk op hoofdlijnen verdeeld in:

- Het modelleren en simuleren van nucleaire processen en het opstellen van aanbevelingen daaromtrent. Voorbeelden daarvan zijn studies naar het gedrag van de kern, de koeling van een kerncentrale en de integriteit en de mechanische eigenschappen van het koelsysteem.
- Experimenteel onderzoek in de Hoge Flux Reactor (bestralingen) en laboratoria (nabestralingsonderzoek) gericht op het verkrijgen van gegevens over het gedrag van splijtstoffen en materialen die (langdurig) aan straling blootgesteld worden.
- Het ontwikkelen van technieken voor de veilige en duurzame verwerking en opslag van radioactief afval.
- Het opstellen van aanbevelingen gericht op een veilige omgang met radioactieve materialen in de industrie en gezondheidszorg.
- Het voorlichten van pers en publiek over het internationale onderzoekswerk van NRG.

## WAARDEVOLLE KENNIS

Het publiek gefinancierde Nederlandse nucleaire onderzoek van NRG staat al decennia op hoog niveau en heeft internationaal groot aanzien. Inmiddels staat het behoud van deze kennis, kunde en vaardigheden voor toekomstige generaties volop in de belangstelling. De manier van financieren en de hoogte van toegekende onderzoeksbudgetten bepalen de toekomstige competenties van de nucleaire sector in Nederland. De gevolgen zullen doorwerken in de nucleaire geneeskunde en de toekomstige inzet van kernenergie in een CO<sub>2</sub>-arme energievoorziening.

In 2019 zal het ministerie de kaders van het beleid ten aanzien van de nationale belangen van nucleaire energietechnologie en nucleaire medische technologie (opnieuw) vaststellen. Ook de door NRG vergaarde kennis en inzichten zullen hierbij beschouwd worden. Besluitvorming zal naar verwachting in de loop van 2020 plaats vinden.

Naast het in dit verslag beschreven publiek gefinancierde onderzoek voert NRG ook onderzoeks- en adviesopdrachten uit voor de private sector. Vanzelfsprekend werkt NRG voor de nucleaire industrie, maar ook onder

NRG is een internationaal opererende nucleaire dienstverlener. De onderneming produceert isotopen, verricht nucleair technologisch onderzoek, is consultant op het gebied van veiligheid en betrouwbaarheid van nucleaire installaties en dienstverlener in stralingsbescherming. Met haar onderzoek draagt NRG bij aan de instandhouding, innovatie en verdere ontwikkeling van de kennis in Nederland op het gebied van nucleaire technologie en veiligheid.

NRG is marktleider in de levering van medische isotopen in de wereld. In Nederland is NRG de autoriteit op het gebied van integrale stralingsbescherming. NRG exploiteert de Hoge Flux Reactor die eigendom is van de Europese Unie.

Bij de onderneming werken ongeveer 750 medewerkers. Met hun hoogwaardige kennis dragen zij bij aan de excellente resultaten van partners in de gezondheidszorg, de energiemarkt, de industrie, overheden en de wetenschap.

meer voor de olie- en gasindustrie en de medische sector. Bovendien is NRG met de Hoge Flux Reactor (HFR) 's werelds grootste producent van medische isotopen voor ziekenhuizen en behandelcentra in de hele wereld. De oorsprong van deze commerciële werkzaamheden vindt zijn basis in het onderzoeksprogramma. Het is de 'humuslaag' waarop andere activiteiten gedijen.

Het met publieke middelen uitgevoerde onderzoek bij NRG wordt in vijf samenhangende thema's toegelicht:

1. Nucleaire veiligheid
2. Radioactief afval en decommissioning
3. Geavanceerde nucleaire technologie
4. Stralingsbescherming
5. Publieke taak, publieksvoorlichting

## ALGEMENE ONTWIKKELINGEN

Er is groeiende aandacht voor kernenergie als onderdeel van een klimaatneutrale energiemix. Dat is internationaal het geval, maar ook nationaal. Een sprekend Nederlands voorbeeld is de uitzending 'Zondag met Lubach' waarin de bekende cabaretier Arjen Lubach een lans breekt voor kernenergie. Ook in de Tweede Kamer is er regelmatig serieuze politieke aandacht voor het onderwerp waardoor kernenergie weer op de maatschappelijke agenda staat.

### Klimaat katalysator kernenergie

Internationaal zijn het vooral instituten zoals het International Energy Agency (IEA),

de Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) en het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) die wijzen op het belang van kernenergie. Dit met het oog op het halen van de klimaatdoelstellingen: in 2050 moet de uitstoot van CO<sub>2</sub> met 95% gereduceerd zijn ten opzichte van 1990. Ook de Europese Commissie beschouwt in haar strategische langetermijnvisie kernenergie van vitaal belang voor de toekomstige energievoorziening. Volgens de EU zal kernenergie 'de ruggengraat vormen van een koolstofvrij Europees elektriciteitssysteem'. Kernenergie gaat wat de EU betreft samen in een mix met hernieuwbare energie. In het nieuwe klimaatakkoord voor Nederland lijkt vooralsnog geen rol weggelegd te zijn voor kernenergie. Mogelijk gaat dit in het licht van de huidige maatschappelijke aandacht veranderen.

Kennis is in dat geval onontbeerlijk. Willen we ons een goed oordeel kunnen vormen over een eventuele rol voor kernenergie, dan kan dat alleen met behulp van state-of-the-art nucleair-technologische kennis. Oproepen om de rol van kernenergie ook voor de toekomst open te houden, kunnen daarom niet los gezien worden van blijvende aandacht en zorg voor nucleair onderzoek. We moeten op zijn minst blijven. Denk aan ontwikkelingen als passieve veiligheid van kerncentrales en de toepassing van moderne digitale technieken bij het ontwerp, de bouw, het bedrijven en de uiteindelijke ontmanteling van kerncentrales. Je moet deze ontwikkelingen kunnen meenemen in een politieke, economische of klimaatafweging van kernenergie.

### Zorgen over afname financiële middelen nucleair onderzoek

Naast erkenning van het belang van nucleair-technologische kennis zijn er tegelijkertijd grote zorgen over de afname van financiële middelen voor het internationale nucleaire onderzoek en de bijbehorende experimentele infrastructuur. Die neergang hangt samen

met de afgenomen interesse in kernenergie in het westen na de eeuwwisseling. De consequenties van die neergang worden steeds beter zichtbaar. Zo viel in 2018 na bijna 60 jaar trouwe dienst het besluit de onderzoeksreactor in Halden (Noorwegen) te sluiten. Deze reactor werd wereldwijd beschouwd als één van de belangrijkste plekken voor experimenteel splijtstof- en materiaalonderzoek voor de huidige generatie kernreactoren. De sluiting is daarom een gevoelige klap voor de nucleaire onderzoekswereld en industrie, zeker omdat de nieuwe Franse Jules Horowitz-onderzoeksreactor naar verwachting pas in de tweede helft van de jaren '20 beschikbaar zal zijn.

In principe is dit ook weer een kans voor Nederland: de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten steeg na de aangekondigde sluiting van Halden in waarde. De HFR is nu nog een van de weinige operationele onderzoeksreactoren waar naar uitgeweken kan worden. Nederland kan deze kans verzilveren, want ons land beschikt over een uitgebreide nucleaire kennisinfrastructuur. Die is in 2016 door Technopolis in kaart gebracht.

Sinds de start van nucleair onderzoek in Nederland, eind jaren '50 van de vorige eeuw, is de kennisbasis steeds verder uitgebreid. Met deze kennis en inzichten zijn later met verstand van zaken belangrijke beslissingen genomen. Denk aan de bouw van de kerncentrale in Borssele, de verrijkingsinstallaties van URENCO, de molybdeenplant in Petten, de COVRA in Vlissingen en de komst van Pallas. Deze uitstekende kennis gaat ons ook helpen met belangrijke beslissingen in het licht van de klimaatverandering (kernenergie) en de volksgezondheid (nucleaire geneeskunde). Het onderzoeksprogramma zorgt mede voor het vitaal en actueel houden van de nationale nucleaire kennisbasis. Ook de goede inbedding van het programma in de internationale onderzoeksagenda is hiervoor belangrijk.



<sup>1</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>

## HIGHLIGHTS

### Boekpublicatie Ferry Roelofs

Eén van de hoogtepunten van 2018 was de publicatie van het boek van NRG-expert Ferry Roelofs over de thermohydraulica van metaalgekoelde reactoren. Metaalgekoelde reactoren vormen een belangrijke optie voor de verduurzaming van kernenergie. Dit boek vat de internationaal aanwezige kennis op dit gebied samen. Het verklaart hoe de koeling van metaalgekoelde reactoren zowel met experimentele als met simulatietechnieken geanalyseerd kan worden. De publicatie is de belangrijkste uitkomst van het Horizon 2020 project SESAME dat door NRG in 2015 geïnitieerd werd en in 2019 afgerond zal worden. De in het boek samengebrachte kennis is ook bruikbaar voor veiligheidsstudies voor huidige watergekoelde kerncentrales. Denk aan onderzoeken naar thermische vermoeiing, vibraties van splijtstofelementen of aan de modellering van de stroming in een splijtstofopslagbassin of een compleet primair systeem.



### Publicatie ooglensdosimetrie

Een ander highlight is de publicatie van de richtlijnen voor ooglensdosimetrie. De publicatie is van de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie en werd geregistreerd door NRG. Deze richtlijnen kunnen gedownload worden van de site van de NCS<sup>2</sup>. Verder werd de samenwerking met het Poolse National Centre for Nuclear research (onderzoeksinstituut NCBJ) bekrachtigd waardoor NRG voor haar werk gebruik kan maken van de supercomputer aldaar. Een samen met KIVI/NNS gehouden symposium over Small Modular Reactors werd zeer druk bezocht, een gevolg van de groeiende aandacht voor nucleaire energieopwekking.

### Horizon 2020

NRG heeft in september 2018 deelgenomen aan de derde call van het Horizon 2020 programma (WP2018). Intussen is bekend geworden dat NRG in Europees verband onderzoek gaat doen naar het neutronengedrag in een reactorkern. Daarnaast gaat NRG samen met de TU Delft onderzoek doen aan de gesmolten zout reactor. Inmiddels zijn de voorbereidingen gestart voor de volgende, grotere call (WP2019-2020). NRG zal zich daarbij onder andere gaan richten op het onderzoek naar de verlenging van de bedrijfsduur van bestaande kerncentrales als overbrugging naar de bouw van nieuwe kerncentrales.

### Eindberging radioactief afval

Tenslotte levert NRG sinds 2018 binnen het Europese Joint Programme EURAD een bijdrage aan het onderzoek rond de eindberging van radioactief afval. Het onderzoek van NRG wordt verder gefinancierd door COVRA, de organisatie die verantwoordelijk is voor de opslag van radioactief afval in Nederland.

<sup>2</sup> <https://radiationdosimetry.org/ncs/documents/ncs-31-radiation-protection-and-dosimetry-of-the-eye-lens>

# Nucleaire veiligheid

Verdere verbetering van de nucleaire veiligheid vraagt om experimenteel onderzoek en verbeterde nieuwe simulatiemethodieken. Experimenten zijn kostbaar en complex, maar uiterst waardevol. Met de gegevens uit experimenten kunnen namelijk computermodellen gevalideerd worden. Deze computermodellen zijn onmisbaar gereedschap, bijvoorbeeld voor de onderbouwing van een veilige bedrijfsduurverlenging van kerncentrales.

## PRESSURIZED THERMAL SHOCK

Computersimulatie is waardevol voor de bedrijfsvoering van een kerncentrale. NRG heeft zich in de afgelopen jaren internationaal onderscheiden met haar onderzoek naar Pressurized Thermal Shock (PTS, thermische schok onder hoge druk). De grote temperatuurverschillen die hierbij optreden hebben mogelijk op de langere termijn een gevolg voor de integriteit van het koelsysteem. De onderzoeken dragen bij aan een steeds beter inzicht in de effecten van een PTS op de integriteit van het koelsysteem van een reactor.

In 2018 leverde NRG unieke nieuwe data op die zijn verkregen met behulp van een high-fidelity simulatietechniek en de rekenkracht van een supercomputer. Deze data helpen om de lacune te dichten op het gebied van validatiedata voor de warmteoverdracht tijdens een relatief eenvoudig PTS-scenario aan de reactorvatwand. Internationaal zijn de resultaten beschreven als uniek en van grote waarde. Daarnaast werden de voorbereidingen afgerond voor de realisatie van nieuwe data voor een complexer PTS-scenario. De berekeningen zullen naar alle waarschijnlijkheid in 2019 op een supercomputer in de VS

worden uitgevoerd. Voor een nog complexer PTS-scenario werkt NRG samen met de TU-Eindhoven, het Massachusetts Institute of Technology (MIT) in de VS, en Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) in Duitsland. In dit complexe scenario stroomt er een water/stoom-mengsel het reactorvat binnen. Uiteindelijk moet de samenwerking resulteren in een nieuwe generieke methodiek voor de modellering van zo'n meefase PTS-scenario.

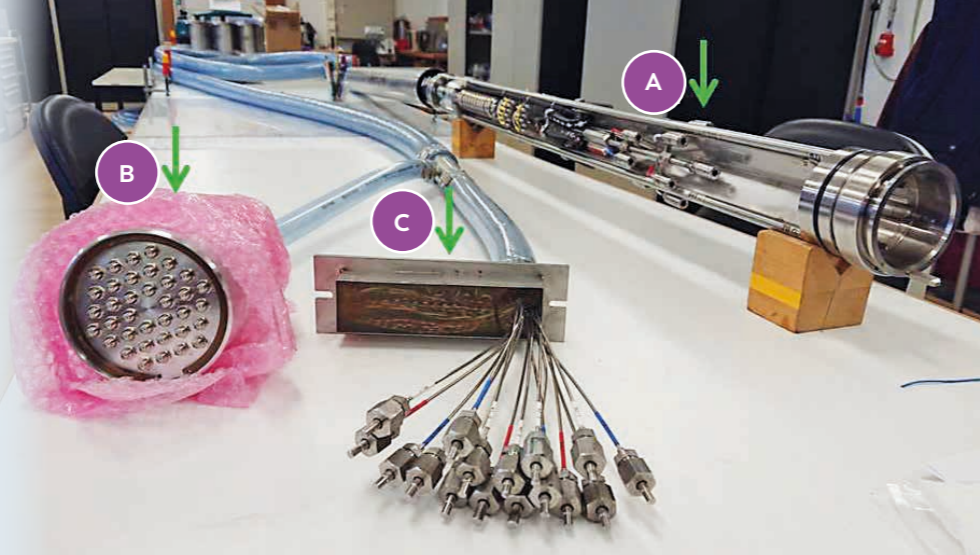
## MODELLEREN KERNSMELT

In 2018 is verder gewerkt aan het modelleren van wat er gebeurt als een reactorkern smelt. Hoe lopen de warmtestromen en hoe ontwikkelt de temperatuur zich? NRG heeft met modellen die oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor warmte-overdracht in metaalgekoelde reactoren, hier nieuwe state-of-the-art simulaties voor gedaan. Vergelijking met experimentele data heeft aangetoond dat de NRG-resultaten de warmtestromen en de temperatuur beter beschrijven dan de gebruikelijk standaardmodellen.

### Bestralingsexperiment splijtstof

De montage van de bestralingsopstelling om de kruip van de splijtstof tijdens bestraling te kunnen meten.

[A] toont de houder voor de capsules die beladen zijn met de splijtstof. De houder is middels de blauwe slang verbonden met aansluitingen voor de verwerking van de meetsignalen tijdens het experiment [B] en voor de toevoer van gas om de temperatuur te kunnen reguleren [C].



# Radioactief afval en decommissioning

## VEILIGE SPLIJTSTOF

Splijtstof in een kernreactor moet onder alle (ook extreme) omstandigheden veilig blijven. NRG onderzoekt het verschijnsel 'kruip' (een blijvende vervorming) in splijtstof. Kruip kan uiteindelijk leiden tot belasting van de metalen omhulling om de splijtstof. Die dient als een fysieke barrière en draagt bij aan de veiligheid van de kernbrandstof. De voorbereidingen op twee aangekondigde bestralingsexperimenten hebben vertraging opgelopen door onder andere onvoorziene ontwikkelingen bij toeleveranciers. De start is met circa een half jaar uitgesteld tot 2019.

## INTEGRITEIT VAN HET REACTORVAT

Door kernsplijting in een reactorkern wordt ook het omhullende reactorvat bestraald. Om uitspraken te kunnen doen over de eigenschappen van het reactorvat door de tijd heen, worden bestraalde inspectie monsters – monsters gemaakt van hetzelfde staal – van tijd tot tijd onderzocht op bijvoorbeeld hun sterkte. NRG beschikt over twee unieke sets monsters voor onderzoek naar de effecten van straling op reactorvatstaal. Eén set betreft reactorvatstaalmonsters afkomstig van een Armeense kerncentrale. De tweede set omvat een reeks modelstalen die in samenwerking met het Europese onderzoeksinstituut JRC tot januari 2018 bestraald is in de HFR. Het experimentele staalonderzoek aan de Armeense monsters is na oplevering van een aantal faciliteiten in een versnelling

gekomen. Na validatie van de zogenaamde 'reconstitution' faciliteit zijn in 2018 met succes de eerste serie monsters vervaardigd uit fragmenten van eerdere beproevingen. Dat maakt het mogelijk meer informatie aan de kleine monsters te onttrekken. De experimenten bevestigden verder de aanname dat de afgenomen treksterkte van bestraald staal bij opwarming tot een temperatuur 475°C grotendeels weer tenietgedaan wordt. Voor het onderzoek aan de tweede set monsters heeft NRG met JRC een Europees onderzoeksconsortium opgericht. Vanaf 2019 zullen binnen dit consortium de meer dan 600 monsters uitgebreid onderzocht en beschreven gaan worden.

## SLUITING HALDEN

De sluiting van de Halden reactor in Noorwegen had een direct effect op het onderzoek bij NRG. Er werd pas op de plaats gemaakt bij de voorbereidingen voor een Accident Tolerant Fuel-bestraling (ATF) in de HFR. In Halden stond namelijk een tweede, complementaire bestraling gepland. ATF is een nieuw splijtstofconcept dat ervoor moet zorgen dat waterstofexplosies zoals in Fukushima niet meer kunnen optreden. Ook de samenwerkingspartners National Nuclear Laboratory (Verenigd Koninkrijk) en Westinghouse AB (Zweden) werden hierdoor geraakt. Onder leiding van de OECD-NEA worden inmiddels de mogelijkheden van een nieuw, internationaal programma onderzocht om dergelijk baanbrekend onderzoek voort te kunnen zetten.

Onderzoek op het gebied van radioactief afval richt zich met name op het vinden van praktische oplossingen voor concrete problemen. De veiligheid van het opgeslagen radioactieve afval moet onder alle omstandigheden altijd gewaarborgd zijn. Omdat veilige ontmanteling van afgeschreven nucleaire installaties (decommissioning) steeds duurder wordt, is het belangrijk om antwoord te vinden op de vraag of dit efficiënter en dus goedkoper kan.

Het gaat bij decommissioning overigens niet alleen om kerncentrales, maar ook om andere nucleaire installaties zoals cyclotrons in ziekenhuizen. Ook bij de ontwikkeling van nieuwe veelbelovende technieken als de molten salt reactor (MSR), is aandacht voor de beheersing van de toekomstige afvalstromen. In 2018 zijn scheidingstechnieken en conditioneringstechnieken voor MSR-afval onderzocht. Binnen een aantal gremia van de IAEA deelt NRG kennis en ervaring op dit relatief nieuwe vakgebied.

Behandeling van de industriële, nucleaire en medische nucleaire afvalstromen moet zodanig gebeuren dat de veiligheid tijdens opslag geborgd is. Ontmanteling van industriële en (medische) nucleaire voorzieningen moet veilig én efficiënt gebeuren. Ontmanteling wordt immers steeds duurder. NRG neemt vanuit deze perspectieven deel aan een aantal gremia binnen de IAEA waar kennis en ervaring op deze gebieden gedeeld worden.

## EFFICIËNTER MAKEN DECOMMISSIONING

Decommissioning is een kostbaar onderdeel van de nucleaire cyclus. Ook Nederland zal in de komende decennia te maken krijgen met decommissioning van nucleaire installaties en daarbij vrijkomende afvalstromen. Kennis over het beperken van het volume aan afval dat moet worden opgeslagen, kan ontmantelen goedkoper maken. NRG richt zich op enkele (complexe) deelaspecten zoals het opstellen van modellen waarmee de hoeveelheid gas voor een bepaald volume afval onder bepaalde omstandigheden berekend kan worden. De vorming van gas kan leiden tot ongewenste drukopbouw in de afvalvaten. Verder wordt ook de robuustheid van potentiële verpakkingsmaterialen voor radioactief afval onderzocht. Chemische reacties tussen het afval en de verpakking kunnen bijvoorbeeld leiden tot corrosie ('roestvorming'). In 2018 zijn de eerste experimenten uitgevoerd met een speciaal ontworpen opstelling. De corrosiesnelheid van de geteste staalmonsters blijkt vergelijkbaar te zijn met de theoretische waarden uit de literatuur. In 2019 zal dit onderzoek worden afgerond met een tweede serie experimenten.

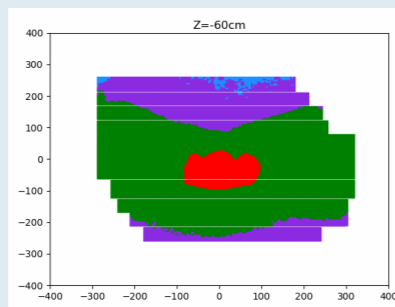
## ACTIVERING BETON

Van grote waarde voor kostenbeheersing is het onderzoek naar de mate van activering ('het radioactief worden') van beton tijdens het bedrijven van een nucleaire installatie. Die kennis kan gebruikt worden om in kaart te brengen waar zich de meest radioactieve delen van de constructie bevinden. Dan is op voorhand duidelijk welk deel van de constructie waarschijnlijk als laag-actief afval afgevoerd kan worden. Zo kan een eerste kostenschatting opgesteld worden. Het berekeningsmodel wordt gebouwd met de gegevens van de inmiddels afgebroken Lage Flux Reactor en nadert zijn voltooiing. Daarnaast is in 2018 een begin gemaakt met vergelijkbare berekeningen voor de decommissioning van kerncentrale in Dodewaard. Bij bewezen succes kan een dergelijk model ook ingezet worden bij de decommissioning van andere kerncentrales en bijvoorbeeld cyclotrons.

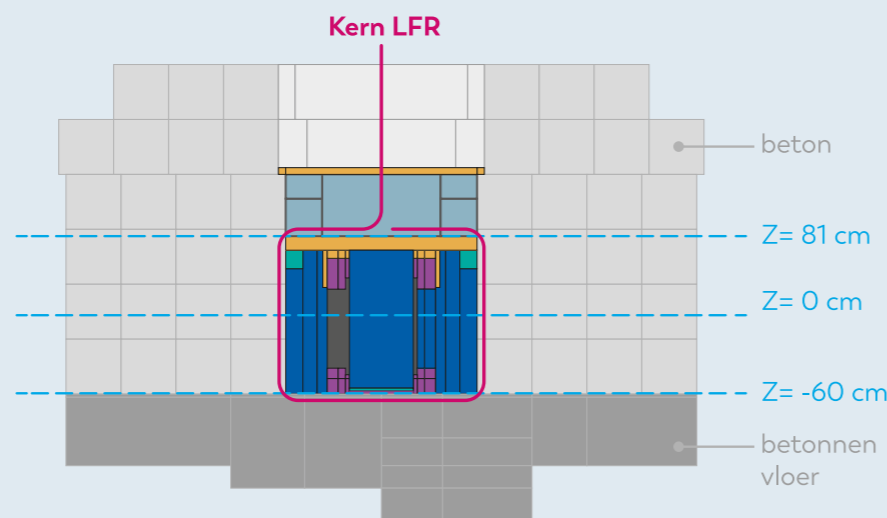
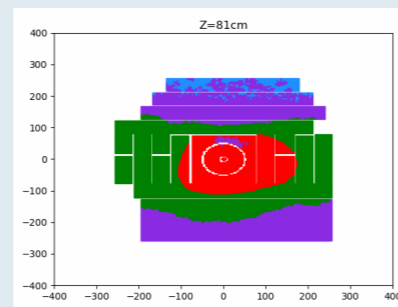
### Berekeningsmodel Lage Flux Reactor

Locatie van het radioactieve (geactiveerde) beton op twee (horizontale) niveaus in de Lage Flux Reactor, bepaald aan de hand van een speciaal ontworpen rekenprogramma. Rood betekent dat dat deel van het beton als radioactief afval behandeld en opgeslagen moet worden. De groene en blauwe delen behoeven geen verdere, speciale behandeling; dit beton kan worden vrijgegeven. De witte lijnen zijn een gevolg van de gehanteerde resolutie in het model en hebben geen verdere betekenis.

Resultaten van berekeningen uitgevoerd op de hoogtes Z= -60 cm



Resultaten van berekeningen uitgevoerd op de hoogtes Z= 81 cm



Bedrijven die radioactief afval verwerken en opslaan, vragen in toenemende mate om een volledige karakterisatie van de nucliden-inventaris. De samenstelling van de meeste afvalstromen is niet homogeen en dat vereist een goede scheiding van deze nucliden. Bestaande methoden voor directe analyse voldoen niet. NRG richt zich op een vijftal radionucliden:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{129}\text{I}$  en  $^{241}\text{Pu}$ . In 2018 zijn de eerste experimenten met scheiding van de verschillende nucliden met succes afgerond, in 2019 volgen nieuwe experimenten.

Omdat ook de Europese Commissie steeds meer aandacht heeft voor dit onderwerp, bereidt NRG zich voor op vragen uit deze hoek. Er ligt momenteel een aantal voorstellen op tafel voor de komende call (WP2019-2020), onder andere op het gebied van de behandeling en verwerking van radioactieve afvalstromen.

# Geavanceerde nucleaire technologie

Met de toegenomen interesse in kernenergie neemt ook de belangstelling voor toekomstige kerncentrales toe. Reactoren die zuiniger omgaan met brandstof, die nóg veiliger zijn dan de huidige en die goed passen bij de behoefte van een regio of land.

## GESMOLTEN ZOUT REACTOR

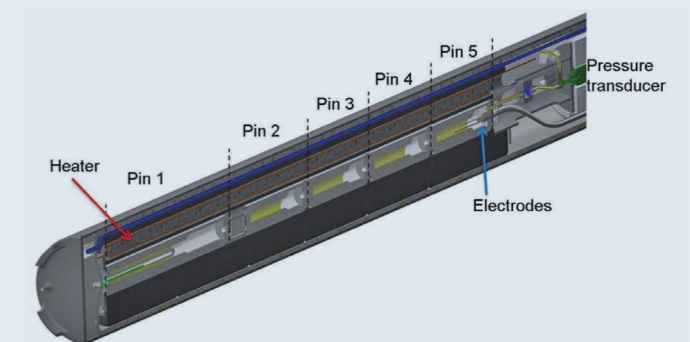
De gesmolten zout reactor krijgt op dit moment wereldwijd aandacht (Molten Salt Reactor, MSR). Ook het Department of Energy in de Verenigde Staten heeft onderzoeksbudgetten beschikbaar gesteld. NRG heeft inmiddels een leidende positie in dit onderzoek opgebouwd door haar baanbrekend bestralingsonderzoek op dit gebied. Dat leidt ook tot interesse vanuit de industrie die bij NRG onderzoek en bestellingen wil laten uitvoeren aan kandidaatmaterialen voor een MSR. Zo heeft NRG een ontwerp-opdracht van Terrestrial Energy (Canada) gekregen voor de voorbereiding van een grafietbestraling. NRG heeft grote expertise opgebouwd in eerdere door de overheid

gefinancierde grafietonderzoeken voor het Europese Hoge Temperatuur Reactor (HTR)-programma. Deze kennis sluit goed aan bij de vraag van Terrestrial Energy.

Voor het MSR-onderzoek is in 2018 hard gewerkt aan de opvolgers van de eerste bestraling die in de zomer van 2019 werd beëindigd. Zo is een begin gemaakt met het bouwen van een opstelling voor de bestraling van zout (zonder splijtstof) in het splijtstof-opslagbassin van de HFR met als doel de vorming van fluorgas ten gevolge van radiolyse beter te begrijpen en te kwantificeren. De vertraagde oplevering van de zout-monsters door de Tsjechische partners heeft helaas geleid tot uitstel van de start van de bestraling tot eind 2019. Oorspronkelijk stond die start gepland voor november 2018.

### SALIENT-3 experiment

Definitief ontwerp van het SALIENT-3 experiment, waarin de effecten van corrosie in gesmolten zout bestudeerd zullen worden. Het ontwerp toont de 5 capsules (Pin) die beladen zullen worden met zout en metaalmonsters, een verwarmingselement (heater) om het experiment bij de gewenste temperatuur te kunnen laten verlopen de elektroden om het corrosieproces te kunnen monitoren.



In 2018 zijn grote vorderingen gemaakt bij de voorbereidingen op een experiment waarin het optreden van corrosie centraal staat. Het wordt een technisch complex en ambitieus experiment dat erop gericht is om real time de interactie tussen gesmolten zout en verschillende materialen ('omhullende materialen') te monitoren. Dit stelt technisch hoge eisen aan de apparatuur en het ontwerp van het experiment.

## METAALGEKOELDE REACTOREN

Mondiaal is er grote belangstelling voor metaalgekoelde reactoren. Voor het werk binnen NRG staan twee Europese samenwerkingsprojecten centraal waarbinnen modelontwikkeling en evaluatie plaats vinden. Zoals eerder beschreven zijn de onderwerpen waar NRG aan werkt zodanig gekozen dat toepassing niet beperkt blijft tot vloeibare metalen. De modellen zijn ook bruikbaar voor (bestaande) watergekoelde reactoren.

Small Modular Reactors (SMR) trekken wereldwijd grote aandacht. SMR is een generiek begrip voor een reeks aan reactoren met een elektrisch vermogen beperkt tot circa 300 MW. Een SMR wordt beschouwd als een economisch aantrekkelijk alternatief voor de huidige generatie grote kerncentrales zoals de EPR en de AP1000. Die worden getypeerd door een elektrisch vermogen van meer dan 1000 MW. De economische aantrekkelijkheid

komt voort uit een verlaging van het investeringsrisico. Ze hebben de mogelijkheid om de bouwkosten te spreiden en al geld te verdienen met de eerst gebouwde module terwijl volgende modules nog gebouwd moeten worden. Ook is de optimalisatie van de veiligheidssystemen minder uitgebreid en kostbaar vanwege het lage vermogen. Er bestaan veel verschillende SMR-ontwerpen. Veel ontwerpers richten zich op watergekoelde reactoren omdat die het best aansluiten bij de huidige kennis en ervaring. Er bestaan echter ook alternatieven met andere koelmiddelen zoals vloeibare metalen. In Engeland worden dit soort alternatieven aangeduid met de term Advanced Modular Reactor (AMR).

Sinds 2018 werkt NRG samen met het Zweedse bedrijf LeadCold. LeadCold werkt aan de ontwikkeling van kleine lood-gekoelde reactoren voor de levering van elektriciteit en proceswarmte in afgelegen gebieden zoals het Canadese poolgebied. Daarnaast heeft LeadCold zich in 2018 ook aangemeld voor de Engelse evaluatie van toepassingen van AMRs binnen het Verenigd Koninkrijk. LeadCold wil een 1:1 elektrische mock-up bouwen. Door de samenwerking zal NRG in de toekomst toegang krijgen tot de experimentele data die met de mock-up behaald worden. Voornamelijk richt NRG zich op kennis over de koeling van deze AMR. Specifiek is NRG geïnteresseerd in de mogelijkheden ten aanzien van koelgedrag in uitzonderlijke situaties. Denk aan het uitvallen van één of meerdere koelsystemen of aan het wegvallen van het elektriciteitsnet.

# Stralingsbescherming

Het EZS-onderzoek rond stralingsbescherming richt zich op blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit (NORM: Naturally Occurring Radioactive Material) in bouwmaterialen, het modelleren van verspreiding van radioactiviteit in het milieu en op dosimetrie. De onderzoeksvelden bouwen voort op het werk en de resultaten van de afgelopen jaren.

## THORON, RADON

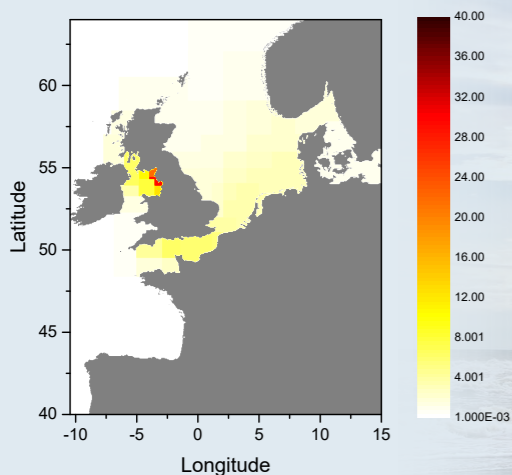
Door exhalatie uit de bodem en bouwmaterialen staan mensen bloot aan radon en thoron. Zeker is dat dit in bepaalde concentraties schadelijk is voor de volksgezondheid. Om de mate van blootstelling beter te kunnen kwantificeren heeft NRG eerder een techniek ontwikkeld voor directe meting van thoron. In overleg met de NEN werkt NRG inmiddels aan de publicatie van een nationale norm voor de directe meting van thoron.

Vanwege de bepalingen in het Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming (BSS) onderzoekt NRG in samenwerking met het Technisch Centrum voor de Keramische

Industrie het verschil in het vrijkomen van radon en thoron uit beton. Er lijkt een relatie te zijn tussen de porositeit en porieverdeling in beton. Samen met de bouwsector wordt gekeken naar de parameters die van direct invloed zijn op de porieverdeling tijdens de productie van beton.

Op het internationale vlak onderscheidt NRG zich met het opstellen van een risicoanalyse voor het (her)gebruik van NORM-houdend afval in bouwmaterialen. Een voorbeeld van zo'n afvalstroom is fosforgips, afkomstig uit de fosfor- en kunstmestindustrie. In 2019 zal de bijdrage afgerond worden met de publicatie van een brochure met daarin richtlijnen voor het veilig gebruik en verwerken van deze afvalstromen.





# Publieke taak, publieksvoorlichting

## VERSPREIDING RADIOACTIVITEIT IN ZEE

In 2018 heeft NRG haar model verder verfijnd waarmee de (eventuele) verspreiding van radioactiviteit in de Nederlandse kustwateren kan worden berekend. Het model is positief getoetst aan resultaten die uit experimenten bekend zijn. In 2019 zal het uiteindelijke model opgeleverd worden.

## DOSIMETRIE

In de nucleaire geneeskunde is er steeds meer aandacht voor de blootstelling van medewerkers aan radioactiviteit en straling bij de behandeling van patiënten. In Europees verband wordt gewerkt aan de definitie van onderzoeksvragen binnen het Horizon 2020 programma. NRG heeft de lead met het onderwerp extremiteitendosimetrie; oftewel: het meten van lokale dosis aan blootgestelde ledematen. Later in dit proces is NRG een studie gestart naar de dosimetrie bij inwendige blootstelling aan straling. De bestaande modellen schieten tekort bij het beschrijven van de verdeling van radionucliden over de afzonderlijke organen (compartimenten) en NRG gaat op zoek naar alternatieven.

## ONDERZOEK VEILIGHEIDSCULTUUR

In 2018 is het onderzoek afgerond naar het meten van de veiligheidscultuur bij instellingen die met straling werken. Ook is gekeken naar manieren om die cultuur verder te verbeteren. Samen met de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS) en de TU Delft heeft NRG een forum gecreëerd waar op een open manier over veiligheids-cultuur gesproken wordt. Vooral intervisie met inhoudelijke experts blijkt zeer effectief te zijn. Een aanpak op basis van spelregels vergemakkelijkt veelal het overleg tussen professionals op de werkvloer en meer generalistische managementlagen. Het ontwikkelen van instrumenten voor het meten van de veiligheidscultuur is echter niet eenvoudig. Daarom heeft de NVS een speciale commissie geïnstalleerd die blijvend aandacht vraagt voor veiligheidscultuur.

NRG focust op nucleaire vraagstukken die relevant zijn voor de Nederlandse samenleving. Voor het aspect van kennisoverdracht uit het onderzoeksprogramma zijn er ook in 2018 door NRG op het publiek gerichte communicatie-activiteiten ontplooid zoals deelname aan publieke debatten en het begeleiden van studenten en scholieren.

## ANVS

NRG vindt het belangrijk om de beschikbare nucleaire kennis in Nederland uit te dragen bij belanghebbenden. Bij de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) gebeurde dat in 2017 over het onderzoek rond stralingsbescherming en in september 2018 rond 'ageing management' en NRG's bijdrage aan het platform European Utility Requirements dat zich richt op het vertalen van nieuwe wet- en regelgeving naar ontwerp-eisen voor kerncentrales. De contacten met de ANVS zullen in de komende jaren verder worden uitgebreid.

## KENNISOVERDRACHT BINNEN DE SECTOR

In 2018 droeg NRG op verschillende manieren concreet bij aan kennisoverdracht van nucleaire technologie binnen de Nederlandse nucleaire sector. Naast de opleiding van professionals, werkzaam in de nucleaire sector in Nederland, werden er ook gastlessen gegeven op middelbare scholen in de regio Alkmaar over natuurlijke radioactiviteit, medische toepassingen van radioactiviteit en straling en stralingsbescherming. Verder werden er gastcolleges verzorgd aan de

TU Eindhoven over kernfusie en aan de Universiteit van Wageningen Department Omgevingswetenschappen over de technologische aspecten van kernenergie. Internationaal en nationaal droeg NRG bij aan publiekscommunicatie en verspreiding van kennis via KIVI-Kerntechniek/NNS. NRG bezet twee bestuursfuncties in dit gremium.

## KIVI/NNS

Op verzoek van KIVI/NNS heeft NRG in Arnhem een symposium gehouden over Small Modular Reactors. Er waren naast sprekers van NRG ook experts van het Department of Business, Energy and Industrial Strategy BEIS (Verenigd Koninkrijk), het Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit GRS (Duitsland) en het Royal Institute of Technology KTH (Zweden). De perspectieven van de SMR in de nabije toekomst en de rol van nationale overheden hierin werden voor het voetlicht gebracht. Daarnaast werd geparticipeerd in symposia over de verrijkingstechnologie bij URENCO en protonentherapie bij het Holland Particle Centre in Delft.



## IRPA

Op verzoek van de organisatie heeft NRC bijgedragen aan de conferentie van de International Radiation Protection Association (IRPA) die in juni 2018 in Den Haag werd gehouden. NRC gaf daar een toelichting op het onderzoeksprogramma in het algemeen en het onderdeel stralingsbescherming in het bijzonder. Daarnaast hebben medewerkers van NRC een 'school event' georganiseerd voor leerlingen en docenten uit het middelbaar onderwijs. Tijdens dit event werden zij via theorie en practica wegwijs gemaakt in de wereld van de nucleaire technologie en straling. Met de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne zal worden nagegaan hoe een vervolg op dit succesvolle event gegeven kan worden.

**Nuclear. For Life.**



[www.nrg.eu](http://www.nrg.eu)