



Jaarverslag NRG onderzoeksprogramma 2019

Publieksverslag



Nuclear. For life.

Terugblik op het onderzoeksprogramma 2016-2019, opbrengsten en betekenis

De afsluiting van het programma 2019 markeert de afronding van het meerjarig onderzoeksprogramma 2016-2019. Zoals gememoreerd in de inleiding vormt het programma onderdeel van de nationale nucleaire kennisbasis. Werkend vanuit die basis wordt met het onderzoeksprogramma doelgericht gewerkt aan de verdere ontwikkeling van de kennisbasis door het opstellen van nieuwe, geavanceerde modellen voor veiligheidsanalyses, door het vervaardigen van nieuwe faciliteiten voor laboratoria en het ontwerpen van nieuwe concepten voor bestralingen waarmee nieuwe inzichten verkregen kunnen worden in het gedrag van nucleaire materialen.

Bij de keuzes ten aanzien van de invulling van de verschillende onderwerpen wordt de verbinding gezocht met de internationale onderzoeksagenda waarmee aansluiting met internationale ontwikkelingen en regelgeving geborgd wordt. Van daaruit zijn ook in het programma 2016-2019 nieuwe methodes, technieken en expertises ontwikkeld als bijdrage van NRC, en Nederland, aan de internationale nucleaire kennisbasis van waaruit nieuwe toepassingen op het gebied van energie en gezondheid voortgebracht kunnen worden.

Wereldwijde ervaringen vanuit het bedrijven van nucleaire faciliteiten, ontwikkelingen en incidenten in combinatie met technologische innovaties zoals IT-systemen met meer rekenkracht, hebben tot nieuwe inzichten en modellen geleid die op hun beurt weer bijdragen aan een veilig, verantwoord en efficiënt bedrijf van nucleaire faciliteiten. Zo was het onderzoek op het gebied van nucleaire veiligheid in de afgelopen periode voor een belangrijk deel terug te voeren op het ongeluk in Fukushima in 2011. Dat heeft geleid tot verbeterde modellen en veiligheidsanalyses op het gebied van waterstofmanagement, het optreden van kernsmelt, en probabilistische veiligheidsanalyses.

De focus op één specifiek ongeval brengt het gevaar met zich mee dat er blinde vlekken ontstaan. Daarom is het belangrijk altijd waakzaam te blijven voor alle veiligheidsaspecten. NRG doet daarom ook onderzoek naar andere veiligheidsaspecten zoals *pressurized thermal shock* en vermoeiing. Een ander voorbeeld is het onderzoek naar de verspreiding van radioactiviteit in het (aqua)risch milieu; meetgegevens uit de kustwateren van Japan hebben de mogelijkheid geboden de bestaande modellen voor verspreiding van radioactiviteit, ook voor de Nederlandse kustwateren, verder te verbeteren en te valideren.

Mede door de sluiting van een aantal onderzoeksreactoren in de afgelopen periode, bekleedt NRC met de Hoge Flux Reactor een unieke positie in het internationale nucleaire onderzoek als leverancier van experimentele data van splijtstoffen en materialen. Experimentele data zijn van groot belang in het onderzoek naar verdere verbetering van de veiligheid en de introductie van nieuwe reactortechnologieën als onderdeel van de toekomstige energievoorziening. Zo heeft NRC in de afgelopen periode geanticipeerd op de wereldwijde interesse in de mogelijkheden van de gesmolten zoutreactor. Een

INLEIDING

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 wereldmarktleider in de levering van medische isotopen. 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 700 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.

Afbeelding cover: NRG experts bespreken de uitkomsten van een berekening van de temperatuurverdeling in een zogenaamd pebble bed.

toekomstig besluit over de bouw ervan vereist uitgebreide kennis en inzicht in het gedrag en eigenschappen van dergelijke reactoren. Innovatieve reactoren maken bijvoorbeeld gebruik van andere koelmiddelen dan water, zoals in de huidige generatie reactoren. Het gebruik van vloeibaar zout vraagt om de ontwikkeling en het beproeven van nieuwe, corrosiebestendige materialen. Met de Hoge Flux Reactor is NRG als één van de weinige bedrijven in de wereld in staat het gedrag van kandidaat-materialen voor zo'n reactor daadwerkelijk te testen. Met de experimentele data uit Petten kunnen door internationale partners in de komende jaren de volgende stappen in het ontwikkelproces gezet worden.

De meerwaarde van de combinatie van experimentele infrastructuur en computermodellen wordt ook zichtbaar in het onderzoek naar veilige en efficiënte verwerking en opslag van radioactief afval. Met een begrensd aantal meetgegevens over de samenstelling van afval – of van bijvoorbeeld betonnen constructies die afgebroken gaan worden – kan vooraf al berekend worden wat de hoeveelheid radioactief afval wordt en waar de meest radioactieve delen zich bevinden. Deze kennis is relevant met het oog op de toekomstige ontmanteling van kerncentrales (Dodewaard en Borssele) en bijvoorbeeld versnellers en cyclotrons bij ziekenhuizen. Omgekeerd kunnen de uitkomsten van modelberekeningen helpen bij het ontwerpen van complexe experimentele opstellingen. Zo kon op basis van berekeningen een opstelling ontwikkeld worden waarmee de vorming van gas in radioactief afval onderzocht kan worden. De mogelijkheid om te experimenteren met het meten van de hoeveelheid radioactiviteit in vaten heeft laten zien dat 'bulk metingen' van een vat kunnen leiden tot overschatting van de hoeveelheid radioactiviteit in het vat, en daarmee ook van de kosten voor opslag ervan.

Nieuwe reactortechnologieën zoals de gesmolten zoutreactor genereren nieuwe afvalstromen. Voor deze stromen bestaan nog geen verwerkingsprocessen. Parallel aan het bestralingsonderzoek in de reactor is

er daarom de afgelopen jaren een procedé ontwikkeld waarbij het (corrosieve) afval geneutraliseerd kan worden. Met deze integrale aanpak van het gesmolten zoutonderzoek heeft NRG internationaal veel belangstelling getrokken.

Bij dit alles is de afgelopen jaren samenwerking gezocht met overige spelers binnen de Nederlandse kennisinfrastructuur zoals de TU Delft, de COVRA, het RIVM, de ANVS, EPZ en Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie. Met laatstgenoemde instantie heeft NRG in 2019 een richtlijn gepubliceerd over het gebruik van ooglensdosimetrie in de medische sector in reactie op nieuwe, internationale aanbevelingen.

Daarnaast hebben meerdere studenten van Nederlandse universiteiten een deel van hun curriculum bij NRG uitgevoerd. Zo zijn in 2019 één student van de TU Eindhoven en één student van de TU Delft afgestudeerd aan de hand van het werk dat ze bij NRG hebben uitgevoerd. Verder werd er vanuit het NRG-onderzoeksprogramma gedurende drie jaar een onderzoeker aan de TU Delft gefinancierd. Ook onderhoudt NRG contacten met verschillende buitenlandse universiteiten. Studenten van die universiteiten voeren dikwijls hun afstudeerstage uit bij NRG. Sommige van die studenten vinden zelfs een permanente plek binnen NRG. Waar het om buitenlandse universiteiten gaat zijn er met name relaties met de universiteiten van Pisa en Modena in Italië en met MIT in de Verenigde Staten. Door de groeiende bekendheid van het werk van NRG, wordt ook de interesse van andere universiteiten gewekt en bereid dit netwerk zich de laatste jaren uit. Hiermee wordt niet alleen de kennisoverdracht internationaal gestimuleerd maar met name ook de kennisbasis in Nederland verrijkt.

De groeiende belangstelling vanuit de academia is een teken dat de kwaliteit van het werk van NRG gezien wordt en dat het werk relevant is. Een andere graadmeter voor de kwaliteit en relevantie van het onderzoek blijkt uit het aantal peer-reviewed publicaties in internationale vaktijdschriften. In de afgelopen periode waren er dat ruim 220.

Erkenning voor de aanwezige expertise binnen NRG blijkt tevens uit het feit de NRG-experts regelmatig gevraagd worden om lezingen te geven tijdens (inter)nationale conferenties en bijeenkomsten en uit het feit dat NRG-ers steeds vaker gevraagd worden om bij te dragen aan de organisatie van internationale vakcongressen. Daarnaast hadden (en hebben) van experts van NRG in de periode 2016-2019 zitting in de leidende organisaties en fora waar de basis voor (de richting van) het internationale nucleaire onderzoek gelegd wordt zoals SNETP, IAEA, en de OESO.

Algemeen



Nederland heeft een unieke, veelomvattende nucleaire infrastructuur. De kerncentrale Borssele levert sinds 1973 CO₂-vrije elektriciteit en Urenco verrijkt in Almelo uranium voor vreedzaam gebruik in kerncentrales over de gehele wereld. Bij de Technische Universiteit in Delft en NRG in Petten wordt nucleair onderzoek verricht op het gebied van energie en gezondheid met gebruikmaking van de onderzoeksreactoren, de HOR (Delft) en de HFR (Petten), en bijbehorende laboratoria. Daarbij heeft de HFR in Petten zich de laatste decennia ontwikkeld tot 's werelds belangrijkste producent van medische isotopen die onmisbaar zijn voor de behandeling van onder andere kanker. En als sluitstuk van die nucleaire keten beschikt Nederland met de COVRA over een organisatie waar al het radioactieve afval dat geproduceerd wordt, op veilige wijze wordt opgeslagen.

Veilig gebruik van nucleaire technologie en radioactiviteit vraagt om onderzoek waarmee ook nieuwe toepassingen ontwikkeld kunnen worden. NRG verricht onderzoek om te innoveren en om de bestaande Nederlandse nucleaire kennisbasis, in stand te houden en verder te ontwikkelen. Kennis die ook onmisbaar is in de besluitvorming over de toekomstige rol van kernenergie in de energiemix waarmee de klimaatdoelstellingen gerealiseerd moeten gaan worden. Kennis die nodig is om de vele mogelijkheden die medische isotopen bieden voor een nog betere gezondheidszorg waar te kunnen maken.

In 2019 heeft NRG haar visiedocument 'Nucleaire technologie voor energie en gezondheid' gepubliceerd. Dit document beschrijft de huidige status van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland en de benodigde ontwikkeling van de nationale nucleaire kennisinfrastructuur die in de ogen van NRG nodig zijn om in te kunnen spelen, en goed voorbereid te zijn, op vragen en behoeften van de samenleving op het gebied van energie en gezondheid. Het visiedocument is openbaar en kan gedownload worden van de website www.NRG.eu.

Het onderzoeksprogramma van NRG is onderdeel van de nationale nucleaire kennisinfrastructuur. Opdrachtgever voor dit programma is de Nederlandse overheid. Het is ook de overheid die de inhoudelijke kaders vaststelt. De begroting wordt jaarlijks afgestemd met het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Het programma valt uiteen in de volgende onderdelen:

- Het modelleren en simuleren van nucleaire processen in een reactor en daaruit volgend het opstellen van aanbevelingen. Voorbeelden daarvan zijn studies naar het gedrag van de splijtstof, de koeling van een kerncentrale en de integriteit en de mechanische eigenschappen van het koelsysteem.
- Experimenteel onderzoek in de Hoge Flux Reactor en laboratoria voor nieuwe gegevens ten behoeve van bovengenoemde modellen 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.

Nucleaire veiligheid

- 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 en het onder de aandacht brengen van de resultaten.

Dit rapport geeft een overzicht van de werkzaamheden in 2019, nieuwe ontwikkelingen en de behaalde resultaten. Een groot deel van het programma wordt uitgevoerd binnen internationale samenwerkingen. Een belangrijke vorm van samenwerking is deelname aan onderzoeksprojecten die medegefinancierd worden door de Europese Commissie. Met de extra gelden die langs deze weg verkregen worden, kan het onderzoeksbudget vergroot worden en kan het werkpakket verder uitgebreid worden. Internationale samenwerking biedt ook de mogelijkheid om de resultaten en nieuwe ideeën en ontwikkelingen te laten toetsen door collega's en specialisten uit andere landen. In 2019 heeft NRG met haar partners deelgenomen aan de laatste ronde van het Horizon 2020 onderzoeksprogramma van de Europese Commissie voor de financiering van nieuwe onderzoeksprojecten. En met succes: door de goedkeuring van elf nieuwe projecten ontvangt NRG in de periode 2020-2023 2,8 miljoen euro aan (extra) onderzoeksbudget.

Tenslotte: het programma van 2019 is de laatste van het meerjarige programma 2016-2019. Dit rapport wordt daarom afgesloten met een overzicht van een aantal belangrijke resultaten en opbrengsten van het onderzoeksprogramma. In 2020, dat een overgangsjaar wordt, zal NRG bij de overheid een voorstel indienen voor het nieuwe meerjarig onderzoeksprogramma 2021-2024.

Veilig gebruik van nucleaire technologie vraagt om onderzoek. We zijn nooit uitgeleerd. Uit de bedrijfsvoering komen nieuwe inzichten die de veiligheid weer verder verbeteren. Met steeds krachtigere computers kan alles wat in en om de reactor gebeurt steeds beter nagebootst worden. De resultaten laten zien wat nog verbeterd kan worden en welke vernieuwingen echt een bijdrage kunnen leveren aan het verbeteren van de veiligheid. Tegelijkertijd kunnen ook de modellen weer verbeterd worden door het uitvoeren van experimenten, zoals bijvoorbeeld in de Hoge Flux Reactor. De experimentele gegevens kunnen ingevoerd worden in de modellen waardoor de uitkomsten van de berekeningen beter onderbouwd worden.

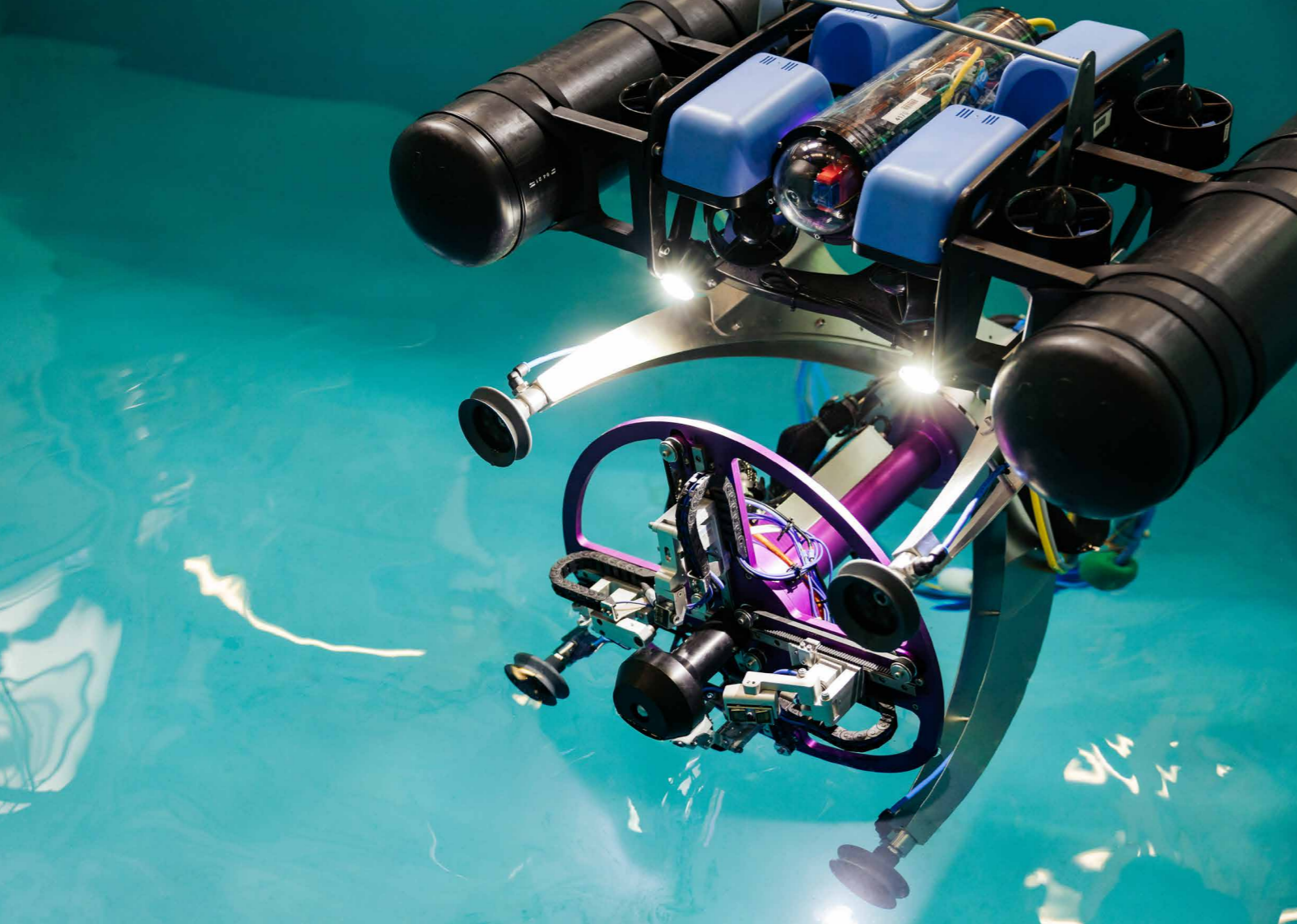
BEDRIJFSDUURVERLENGING

Met de groeiende internationale aandacht voor de bijdrage van kernenergie in de transitie naar een CO₂-vrije energiehuishouding, neemt ook de aandacht voor het langer openhouden van bestaande kerncentrales toe. NRG doet onderzoek naar de verouderingsmechanismen die een veilige bedrijfsduur van een kerncentrale mogelijk beïnvloeden. Dat levert belangrijke kennis op voor de besluitvorming of een kerncentrale veilig lang in bedrijf kan blijven. Denk aan de vermoeiingsverschijnselen in staalconstructies door temperatuurwisselingen. Zo kan een plotselinge injectie van koud koelmiddel leiden tot een thermische schok, een *pressurized thermal shock* (PTS) in het koelsysteem van de reactor waarin de temperatuur doorgaans zo'n 300°C bedraagt. Ook chemische processen als corrosie en blootstelling aan straling kunnen op termijn van invloed zijn op de eigenschappen van het binnenwerk van een reactor en het reactorvat waarin zich de splijtstof bevindt.

NRG onderscheidt zich met haar onderzoek naar *pressurized thermal shock* bij bijzondere

bedrijfsvoeringsomstandigheden. De grote temperatuurverschillen die hierbij optreden, kunnen op de langere termijn negatieve invloed hebben op de integriteit van het koelsysteem van een kerncentrale. NRG draagt bij aan een diepgaand inzicht in de effecten van een PTS. Zo werd in 2019 onder meer een uniek 3-dimensionaal computermodel ontwikkeld waarmee met hoge betrouwbaarheid complexe stromingen van geïnjecteerd koelwater berekend kunnen worden. Voor het rekenen aan dit zeer nauwkeurige model zijn wel supercomputers nodig.

Voor het verkrijgen van de benodigde reken-tijd op supercomputers werd internationaal samengewerkt met *Argonne National Laboratory* (ANL) and *Penn State University* (PSU) in Amerika. De uitkomsten van dit zeer nauwkeurige model worden vervolgens gebruikt bij de ontwikkeling en validatie van snellere rekenmodellen waarmee in de praktijk geavanceerde veiligheidsanalyses uitgevoerd kunnen worden. Zo kan het ontstaan van eventuele schade aan onderdelen van het primaire systeem van een kerncentrale tijdig worden voorspeld.



Test met een Remotely Operated Vehicle in een bassin op de NRG locatie in Arnhem. Deze onderzeeër wordt ingezet bij de inspectie van een reactorvat en kan als een drone bestuurd worden met een playstation joystick. Er zitten 4 zuignappen op waarmee de onderzeeër zich onder water op de gewenste positie vastklemt aan de wand. Met de tasters kunnen door middel van geluidgolven mogelijke onregelmatigheden in het materiaal, zoals scheurtjes, opgespoord worden.

OMGEVINGSFACTOREN EN TEMPERATUURWISSELINGEN

Omdat delen van de installatie continu gekoeld worden met water, is ook de chemische samenstelling van het water van invloed op de conditie van de installatie. Die blootstelling kan op termijn leiden tot beschadigingen en scheurvorming. In de praktijk blijkt de invloed van de samenstelling van het water echter minder groot dan verwacht omdat de aannames die in het verleden zijn gedaan conservatief waren. Je kunt dus stellen dat kerncentrales waarschijnlijk in betere conditie zijn, dan je op grond van deze conservatieve aannames zou mogen verwachten. In 2019 concentreerde NRG zich daarom met een studie naar het verbeteren van de gebruikte

voorspellende simulaties. Dat moet tot meer realistische voorspellingen van de toekomstige conditie van een centrale leiden. Omdat vooral temperatuurwisselingen de conditie van kerncentrales beïnvloeden, krijgt dit onderwerp volop aandacht. In 2019 zijn de hiervoor gebruikte 3D-modellen verder verbeterd. Dat gebeurde bijvoorbeeld met praktijkdata van het reguliere meetsysteem in kerncentrale Borssele. Dit reguliere meetsysteem is in iedere kerncentrale aanwezig voor het bedienen van de centrale. Naast dit reguliere meetsysteem is er in Borssele nog een speciaal meetsysteem aangebracht om vermoeiingsverschijnselen te meten. Dat heeft dus niet elke kerncentrale. Metingen uit dit systeem worden gebruikt om de 3D-modellen die alleen gebruik maken van input uit het reguliere meetsysteem te controleren.

STRALINGSINVLOED OP HET REACTORVAT EN INTERIEUR

Onder invloed van straling degradeert een reactorvat en alles wat daar in zit (interieur). Dat kan leiden tot haarscheurtjes en verbrossing van het staal. Het tempo waarin dit gebeurt, is onder andere afhankelijk van de samenstelling van het staal dat gebruikt is bij de vervaardiging van het vat, de bedrijfstemperatuur en de duur van de blootstelling aan straling. Kennis van dit soort processen is belangrijk bij het veiligheidsonderzoek om een kerncentrale langer in bedrijf te houden. Voor het langlopende onderzoek naar verbrossing van reactorvat-staal beschikt NRG over twee unieke, goed gedocumenteerde sets monsters. Eén set betreft (bestraalde) reactorvatstaalmonsters afkomstig van een Armeense kerncentrale. Het unieke monitoring materiaal van de Armeense reactor is 27 jaar lang bestraald. Door de plaatsing van het materiaal tussen de kern en het reactorvat, heeft dit monitoring materiaal een hoeveelheid straling ontvangen die overeen zou komen met 300 jaar gebruik als reactorvatmateriaal. Zover NRG kan nagaan is het nog nooit gelukt om zo ver in de tijd vooruit te kijken naar de conditie van een reactorvat. De tweede set is een serie van bijna 700 model-reactorvatstaalmonsters voor reactoren van zowel Westerse als Russische origine die in samenwerking met het Europese onderzoeksinstituut JRC tot januari 2018 bestraald zijn in de HFR. In 2019 is een begin gemaakt met de definitie van het nabestralingsonderzoek aan deze monsters. Hiervoor heeft NRG met JRC en een aantal Europese partners in 2019 een succesvolle aanvraag ingediend bij de Europese Commissie voor aanvullende financiële ondersteuning. Dit langlopende onderzoek levert onder andere inzichten op in de onderliggende schademechanismen die tijdens blootstelling aan neutronenstraling op microschaal optreden in het staal. Eén van de meest opvallende resultaten tot nu is de waarneming dat die schade hersteld kan worden door het materiaal thermisch te behandelen. Door het materiaal te verhitten krijgt het staal zijn oorspronkelijke eigenschappen weer grotendeels terug.

VEROUDERINGSBEHEER

De wijze van bedrijfsvoering, het onderhoud en de bediening: ze zijn allemaal van invloed op de conditie van een kerncentrale. Via verouderingsbeheer bepaalt een exploitant wanneer er onderdelen getest of geïnspecteerd moeten worden en wanneer dat moet leiden tot (preventieve) vervangingen zodat de gehele installatie voldoende veilig bedreven kan worden. Hiervoor schrijft het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) een *Ageing Management (AM)* voor. Om dit zo objectief mogelijk te doen, en zo veel mogelijk los te komen van *engineering judgement*, werkt NRG aan een software tool die is gebaseerd op openbaar beschikbare data. Deze aanpak maakt het door de exploitant gevolgde verouderingsbeheer voor alle belanghebbenden transparant. In 2019 heeft NRG de criteria wanneer een bepaald verouderingsmechanisme optreedt en expliciet opgenomen dient te worden in AM, voor alle bekende verouderingsmechanismen vastgesteld voor onderdelen en componenten van een drukwaterreactor. Daarbij is ook een handleiding voor het gebruik van de database geschreven. Uiteindelijk is het streven de software tool geschikt te maken voor meerdere reactortypen.

KERNSTABILITEIT

Een ongestoorde productie is voor de economische bedrijfsvoering van een kerncentrale van groot belang. Naarmate de leeftijd van een kerncentrale toeneemt, wordt inzicht in de conditie van de kern belangrijker. Vibraties in de kern door bijvoorbeeld turbulentie, veroorzaakt door langstromend koelmiddel, zijn ongewenst en kunnen leiden tot verstoringen in de productie of zelfs tot splitsstofschade. Om tijdens bedrijf tijdig zicht te kunnen hebben in dergelijke verstoringen worden de procesgegevens van een reactor continu gemonitord. Verstoringen vertalen zich in (kleine) schommelingen in de signalen. NRG werkt in internationaal verband aan een methodiek waarmee dergelijke schommelingen in een vroeg stadium gedetecteerd

en gerelateerd kunnen worden aan concrete verschijnselen en processen in de kern. Als onderdeel van deze benadering is in 2019 is een begin gemaakt met het modelleren van de invloed van vibraties in de kern op één van deze signalen, te weten de neutronenflux in de reactor.

Daarnaast is er langlopend onderzoek naar het trillen van splijtstofelementen en stoomgeneratorbuizen als gevolg van interactie met koelmiddel. Dit heeft eind 2019 geresulteerd in een internationale samenwerking. Industriële partners uit Zweden, Frankrijk, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk hebben onder regie van NRG hun handtekening gezet onder het *joint-industry* project VIKING.

VEILIGHEIDSEVALUATIES

De hernieuwde interesse in kernenergie – en daarmee de bouw van nieuwe centrales – vraagt onder andere om kennis rond de veiligheidsvoorschriften van nieuwe centrales. De nucleaire gemeenschap in Europa werkt daarom, met deelname van NRG, aan het opstellen en harmonisatie van Europese veiligheidsvoorschriften voor nieuwe typen kerncentrales om het proces van vergunningverlening in de toekomst te kunnen bespoedigen. Ook de introductie van digitale systemen gaat gepaard met vragen over veiligheid en betrouwbaarheid. NRG is betrokken bij een internationaal onderzoeksprogramma van de *Nuclear Energy Agency*, onderdeel van de OESO, dat zich richt op het beoordelen van de veiligheid van nieuwe generaties digitale reactorbedieningsystemen. De aandacht gaat daarbij vooral uit naar het modelleren van het faalgedrag van dergelijke systemen en de interpretatie van de uitkomsten. Het blijkt dat de uitkomsten verschillend geïnterpreteerd kunnen worden. Om deze reden is harmonisatie van de interpretatie noodzakelijk; dit zal in 2020 zijn beslag moeten krijgen.

In het verslagjaar heeft NRG verder gewerkt aan de analyse van de effecten van externe factoren op de veiligheid van een kerncentrale; een zogenaamde stapeling van extreme

gebeurtenissen. NRG droeg onder andere bij aan de analyse van de effecten van deze externe gebeurtenissen op de betrouwbaarheid van menselijk handelen in zulke gevallen. Denk bijvoorbeeld aan het handmatig moeten openen van een klep.

Hoe wordt de warmte afgevoerd en hoe ontwikkelt de temperatuur zich als een reactorkern smelt? In 2019 is verder gewerkt aan het modelleren van wat er in zo'n situatie gebeurt. Daarbij is samengewerkt met de technische universiteit van Stockholm (KTH, Zweden) waarbij de modelleerexpertise van NRG gecombineerd werd met de computerrekenkracht en kennis uit (complementaire) experimenten van KTH. Het doel is om uiteindelijk tot een gezamenlijke database te komen.

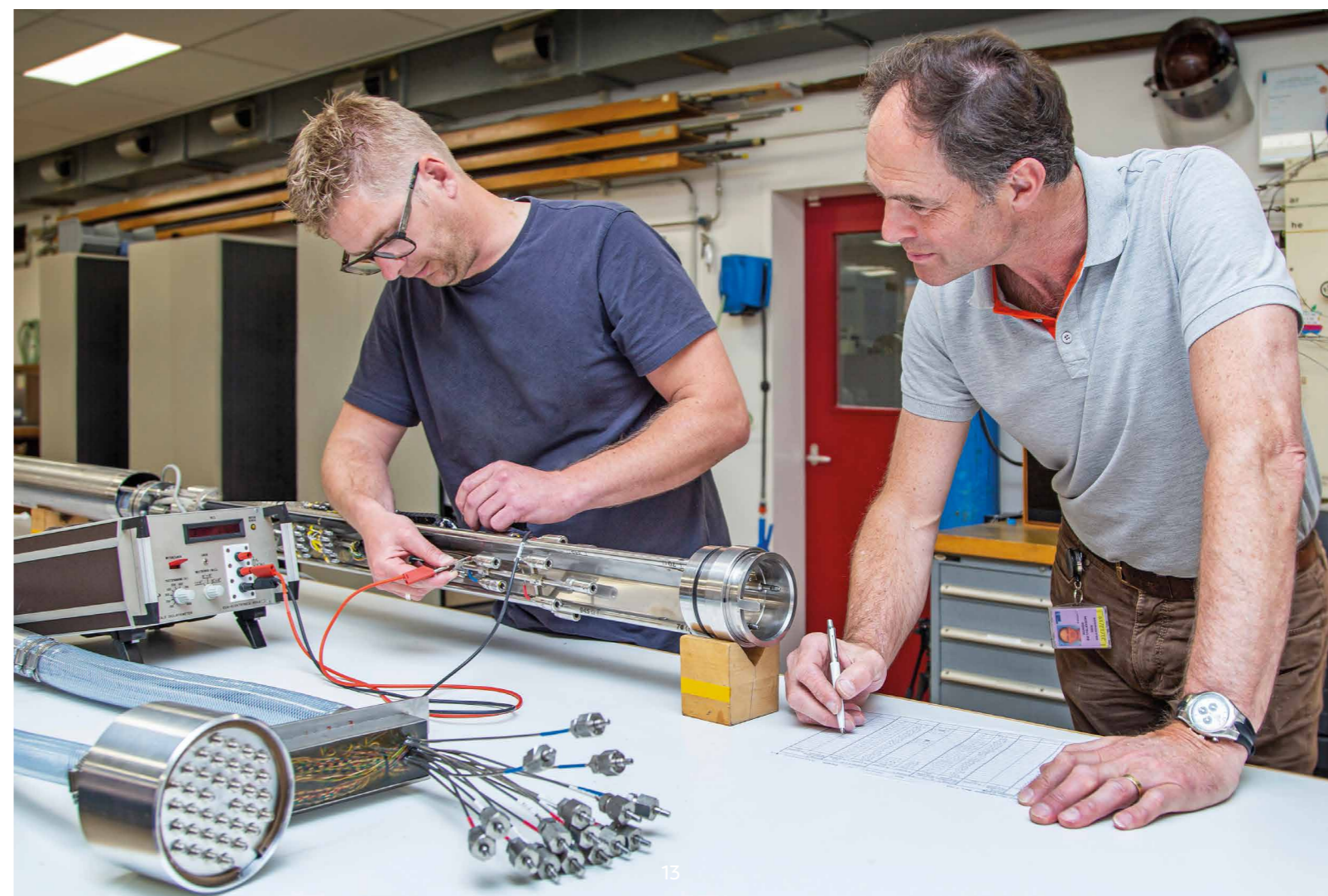
Ook is gekeken naar het ontstaan en het gedrag van waterstof in ongevalsomstandigheden. Waterstof leidde in het Japanse Fukushima in 2011 tot de beruchte explosies waarvan de filmbeelden de wereld overgingen. In 2019 heeft NRG onder meer verder gewerkt aan de verbetering van haar waterstofontbrandingsmodel. Een deel van dit werk is ingebed in een Europese samenwerking onder leiding van het Franse onderzoeksinstituut dat de regelgever in Frankrijk ondersteunt. Als onderdeel van deze zelfde Europese samenwerking heeft NRG in 2019 een nieuw, door Framatome ontwikkeld model om de werking van *recombiners* (apparaten in een reactorgebouw die waterstof uit de lucht halen) na te bootsen in haar codes geïmplementeerd. Dit nieuwe model voorspelt aanzienlijk hogere concentraties waterstof dan de veel gebruikte oude modellen. NRG heeft daarom besloten voortaan dit nieuwe model te gebruiken in haar veiligheidsanalyses. Met de kennis die modellering van het gedrag van waterstof oplevert, kunnen risico's beter worden ingeschat en tegenmaatregelen effectiever worden gemaakt.

VEILIGE SPLIJTSTOF

De splijtstof in een kernreactor moet onder alle omstandigheden veilig blijven. Ruim zestig jaar na de introductie van kernenergie neemt onderzoek naar de eigenschappen en gedrag van splijtstof nog altijd een prominente plaats op de internationale onderzoeksagenda. Nieuwe inzichten, krachtigere computers en technologische innovaties brengen onze kennis en inzichten in veilige toepassing van kernenergie op een steeds hoger plan. NRG heeft door decennia een goede reputatie opgebouwd op dit gebied. Met de recente ontwikkelingen op het gebied van splijtstof én de sluiting van andere onderzoeksreactoren neemt het belang van splijtstofonderzoek bij NRG met de HFR verder toe. In 2019 werd door NRG al voorgesorsteerd op het gedeeltelijk overnemen

van de rol van de Noorse reactor in Halden die in 2018 gesloten werd. Dat gebeurt met het oog op het zekerstellen van de continuïteit van dit onderzoek; de nieuwe onderzoeksreactoren PALLAS (Nederland) en Jules Horowitz (Frankrijk) zullen naar verwachting pas in de tweede helft aan het einde van dit decennium beschikbaar zijn. Daarnaast heeft NRG in 2019 de uitnodiging aanvaard van de Nuclear Energy Agency, onderdeel van de OESO, om deel te nemen aan een nieuw internationaal onderzoeksprogramma op het gebied van splijtstofonderzoek. De verwachting is dat dit programma, FIDES, in 2021 van start zal gaan. Als onderdeel van de voorbereidingen heeft NRG in september 2019 een aantal voorstel voor de NEA gepresenteerd. Deze zullen in de komende jaren verder uitgewerkt gaan, samen met partners in de USA en Europa.

Tijdens de finale oplevering controleren medewerkers van de centrale werkplaats de isolatieweerstand van de verschillende thermokoppel-contacten van een nieuw bestralingsexperiment.



Radioactief afval en decommissioning

Een tweede belangrijke pijler onder dit deel van het programma is het onderzoek naar de mechanische eigenschappen van de cladding – de splijtstofomhulling. De cladding zorgt ervoor dat radioactieve producten die ontstaan tijdens het splijtingsproces van uranium niet in het koelwater komen. Net als het reactorvatstaal wordt de cladding blootgesteld aan straling en andere belastingen. Het is daarom belangrijk de cladding tijdens de bestraling intact blijft. Het kernongeval in Fukushima heeft geleid tot nieuw onderzoek naar claddingmaterialen met verbeterde eigenschappen (*Enhanced Cladding Materials*). NRG ontwikkelt en bouwt een faciliteit voor het testen van claddingmaterialen waarmee onder andere het falen van oude en nieuwe generatie claddingmaterialen bij verhoogde temperatuur en druk onderzocht kan worden.

In een eerste fase van het project wordt een opstelling gebouwd waarin bij hoge temperatuur en druk gewerkt kan worden. In deze opstelling kunnen claddingbuizen tot een druk van 1.200 bar en een temperatuur van 450°C onderzocht worden. Door het uitzetten van de claddingbuizen te volgen onder steeds toenemende druk kan precies

gemeten worden bij welke interne druk deze falen. Bovendien wordt door het volgen van de beweging van de buiswand met gevoelige meetapparatuur ook afgeleid hoe de stress-opbouw in het materiaal plaatsvindt. Door deze metingen te herhalen bij verschillende temperaturen kan op deze wijze belangrijke informatie worden verkregen die bijdraagt aan veiligheidsstudies naar het gedrag van bestaande en nieuwe bekledingsmaterialen.

Na het uitgebreid testen van de opstelling zal deze worden verplaatst naar een *hot cell* waar dezelfde type tests ook uitgevoerd gaat worden aan bestraalde claddingmaterialen. Door de intensieve interactie van materialen met neutronen kunnen de eigenschappen van deze materialen aanzienlijk veranderen. Hierdoor is het belangrijk dat materiaal-eigenschappen ook worden vastgesteld na bestraling.

Deze nieuwe meetopstelling mag reeds rekenen op belangstelling uit de internationale gemeenschap. Deze faciliteit vormt dan ook een belangrijke schakel in het nieuwe Europese onderzoeksproject PATRICIA dat in de loop van 2020 van start gaat.

Gebruik van en werken met radioactiviteit leidt tot de productie van afval. Een kerncentrale, een ziekenhuis, een olieplatform, onderzoeksinstituten: allemaal produceren ze afval dat radioactief is. Soms veel, soms weinig; van handschoenen en injectienaalden uit het ziekenhuis tot gebruikte splijtstofstaven uit een kerncentrale bij de productie van elektriciteit. Ook bij het afbreken van kerncentrales en laboratoria waar met radioactiviteit is gewerkt – ontmanteling, ook wel decommissioning genoemd – komt radioactief afval vrij. Beton kan door de straling bijvoorbeeld ook radioactief worden.

NRG ontwikkelt technieken om:

- de radioactiviteit en samenstelling van het afval nauwkeurig te kunnen meten,
- het afval op een veilige en efficiënte manier in te kunnen pakken zodat de radioactiviteit niet in het milieu terecht kan komen.

Nederland zal in de komende decennia in toenemende mate te maken krijgen met decommissioning van nucleaire installaties. Decommissioning is een integraal onderdeel van de nucleaire cyclus.

Mede door veranderende eisen voor de verwerking en opslag van het afval, wordt decommissioning met de tijd steeds duurder. Het is daarom belangrijk om antwoord te vinden op de vraag of decommissioning wellicht efficiënter kan. Het onderzoek van NRG richt zich met name op het vinden van praktische oplossingen voor concrete problemen zoals methodes die het afvalvolume beperken. Minder afval dat moet worden opgeslagen, maakt het ontmantelingsproces goedkoper. Zo zou het verkleinen van brokken beton kunnen helpen bij een betere scheiding van de radioactieve en niet-radioactieve componenten met een geringer volume om op te slaan als resultaat. Zo'n proces heeft echter

ook weer technische en financiële gevolgen. Het blijft dus zoeken naar een economisch optimum.

KARAKTERISATIE

NRG werkt voortdurend aan een set technische methoden en hulpmiddelen voor het stapsgewijs verminderen van het afvalvolume. Deze set bestaat uit een reken-tool waarmee de mate van activering ('het radioactief worden van een materiaal door blootstelling aan neutronen') kan worden vastgesteld van (sloop)afval als staal en beton.

In 2019 werden de praktijkresultaten gepresenteerd van de karakterisatie van beton uit de ontmantelde Lage Flux Reactor die in Petten decennia in gebruik is geweest. Doel was om de scheidslijn in beeld te brengen tussen beton dat als radioactief afval bestempeld moet worden en beton dat kan worden vrijgegeven. Met deze methode kan voor toekomstige ontmantelingsprojecten een betere inschatting worden gemaakt van het totale volume radioactief afval dat uiteindelijk moet worden opgeslagen.

Een soortgelijke rekenexercitie is gedaan voor de nog te ontmantelen kerncentrale Dodewaard. Berekeningen laten zien waar in de centrale zich het meest radioactieve beton bevindt, en welke delen van het gebouw uit beton bestaan dat als niet-radioactief bestempeld kan worden. Dit is belangrijke informatie voor als veiligheidsanalyses gemaakt gaan worden, voorafgaand aan de start van de sloop. De berekende hoeveelheden radioactief beton leveren een onderbouwing bij de (vergelijkbare) schattingen die in het verleden zijn gedaan. De resultaten laten ook zien dat de eerdere schattingen geen rekening hielden met de kortlevende radioactiviteit in de periode tot 2010. Daardoor lopen de resultaten van de oude en de nieuwe berekeningen nogal uiteen. Vanaf het moment dat het kortlevende afval is 'uitgedoofd' in 2010, blijken de resultaten van beide berekeningen wel weer goed overeen te komen. Dodewaard wordt overigens pas na een periode van veilige insluiting in de tweede helft van deze eeuw ontmanteld.

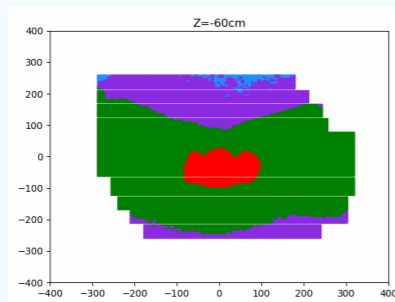
Om de samenstelling van afval te onderzoeken, worden steekproeven uit het bulkmateriaal genomen. Deze monsters worden geanalyseerd waarna er een uitspraak gedaan kan worden over de totale hoeveelheid radioactiviteit in het bulkmateriaal. Analyseren is tijdrovend, moet uiteraard heel precies gebeuren en is mede daarom relatief duur. NRG werkt daarom aan een methode waarbij aan de hand van de analyse van een beperkt aantal radioactieve elementen (nucliden) uitspraken gedaan kunnen worden over de volledige samenstelling van het bulkmateriaal. Deze benadering is terug te voeren op de ervaring dat bepaalde nucliden vaak in vaste verhoudingen in een bepaalde afvalstroom voorkomen. Op deze manier worden de kosten gereduceerd worden en kunnen in dezelfde tijd meer monsters geanalyseerd worden.

Historisch afval is in gemengde samenstelling opgeslagen in vaten. NRG kan met *hot cell* gamma-spectrometrie een inschatting

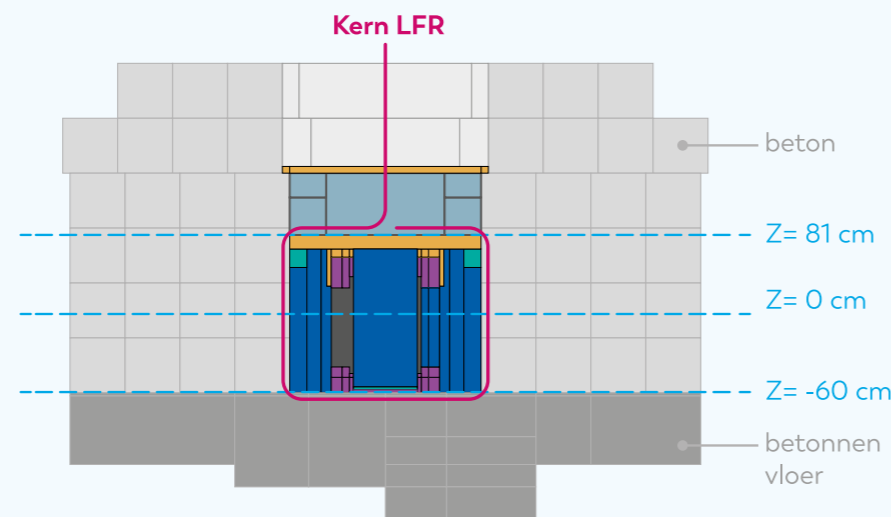
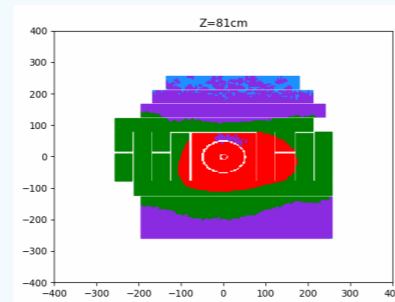
Gemiddelde verdeling van het geactiveerde radioactief beton (rood) op twee (horizontale) niveaus in de LFR.

De groene en blauwe delen behoeven geen verdere 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



maken van de inhoud van zo'n vat. Omdat de precieze samenstelling van dit afval niet bekend is, worden (conservatieve) aannames gedaan, wat tot (conservatieve) resultaten leidt. Dit heeft tot gevolg dat afval te vaak als middel of hoogactief wordt aangeduid wat grote (financiële) gevolgen heeft voor het transport en de opslag van het afval.

Om deze redenen heeft NRG ook de losse inhoud van de drums gescand. Vanaf 2017 zijn scans van radioactieve objecten gemaakt waarmee de scanner is gevalideerd. De scanner heeft nu een veel gunstiger onzekerheidsmarge van tien tot dertig procent. Met de opgedane kennis en ervaring kan ook de vatscanner verder worden geoptimaliseerd zonder dat het vat zelf hoeft te worden geopend.

STABILISATIE

Naast karakterisatie van radioactief afval is ook de stabiliteit ervan belangrijk voor opslag. Soms produceert het afval gassen welke licht ontvlambaar kunnen zijn. Daarnaast kan de vorming van gas leiden tot ongewenste drukopbouw in de afvalvaten. Ook kan straling of de chemische samenstelling van het afval invloed uitoefenen op de verpakking waarin het is opgeborgen. Chemische reacties tussen het afval en de verpakking kunnen bijvoorbeeld leiden tot corrosie ('roestvorming'). In 2018 is de vorming van gassen bestudeerd met behulp van een nieuw ontwikkeld theoretisch model. Om het model te valideren zijn in 2019 experimenten uitgevoerd met een speciaal ontworpen opstelling voor het meten van de vorming van waterstofgas.

Een ander bekend probleem is de combinatie van PVC-laboratoriumafval en radioactief afval. Onder invloed van straling ontstaat zoutzuur dat de stalen verpakking aantast. NRG onderzoekt zuurbestendig verpakking- of bekledingsmaterialen van keramiek, roestvrijstaal en beton. In 2019 zijn tests gestart waaruit blijkt dat roestvrijstaal en beton niet geschikt zijn als verpakkingsmateriaal. Keramiek scoort beter, wel is de breekbaarheid ervan een punt van aandacht.

Nucleaire experimenten leveren bijzondere afvalstromen op die om maatwerk vragen. Denk aan de gesmolten zout experimenten voor de ontwikkeling van de thorium centrale. In 2019 zijn mogelijke stabilisatie-oplossingen voor dit specifieke afval in kaart gebracht die in 2020 in overleg met COVRA verder worden uitgewerkt. Uiteindelijk zal dit afval volgens overeengekomen vaste criteria worden behandeld en gestabiliseerd en bij COVRA worden opgeslagen.

DECOMMISSIONING

NRG heeft unieke ervaring opgedaan bij de ontmanteling van de Lage Flux Reactor (2016-2018). Het is een van de weinige voorbeelden in de wereld van de volledige decommissioning van een onderzoeksreactor waarbij de locatie als 'groene weide' is opgeleverd. Het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) biedt een platform waarbinnen deze kennis internationaal gedeeld wordt en waar grote belangstelling is voor de ervaringen van NRG. Ook in Nederland wachten nucleaire (ziekenhuis) voorzieningen op ontmanteling als het einde van de bedrijfsduur wordt bereikt. In 2020 wil NRG zowel haar eigen kennis en ervaring delen, als de internationale kennis en ervaring die beschikbaar is via de IAEA. Zo kunnen ook belanghebbende Nederlandse bedrijven hierover de beschikking krijgen.

Geavanceerde nucleaire technologie

Er komt binnen en buiten Nederland steeds meer interesse in kernenergie als onderdeel van de transitie naar een klimaatneutrale energiehuishouding. In verschillende Aziatische landen, en met name in China, in de Verenigde Staten en in een aantal Europese landen worden momenteel de nieuwe reactoren gebouwd. Bij de ontwikkeling van deze reactoren zijn de jarenlange kennis en ervaring bij de operatie van de vorige generatie reactoren (zoals Borssele) meegenomen. Dat heeft geresulteerd in een verdere verbetering van de nucleaire veiligheid. Deze generatie reactoren vormen naar verwachting de opmaat van een nieuwe generatie reactoren (ook wel Generatie IV genoemd): reactoren die zuiniger omgaan met splijtstof, die nóg veiliger zijn dan de bestaande kerncentrales en waarvan de 'output' afgestemd kan worden met de behoeften van een regio of land.

De afgelopen jaren maakte NRG internationaal naam met het onderzoek naar gesmolten zout reactoren, een voorbeeld van een Generatie IV-technologie. NRG heeft inmiddels een leidende positie in dit onderzoek opgebouwd door haar baanbrekend bestralingsonderzoek. In 2019 hield NRG een presentatie over haar vorderingen bij het gerenommeerde *Oak Ridge National Lab* (Verenigde Staten) waar in de jaren 60 van de vorige eeuw de eerste experimenten uitgevoerd werden. Contacten met de industrie werken als katalysator voor het onderzoek in Nederland. Ook de Amerikaanse toezichthouder, *US Nuclear Regulatory Commission* (de zusterorganisatie van de Nederlandse ANVS) toonde haar interesse in het onderzoek van NRG en nodigde NRG in 2019 uit voor een toelichting op haar gesmolten zoutonderzoek. Inmiddels heeft ook China belangstelling getoond voor het onderzoek. Verder is er een nieuw Europees onderzoeksproject gestart dat geleid wordt door de TU Delft waarin NRG een belangrijke partner is.

Medio 2019 werd met de beëindiging van de bestraling van het eerste gesmolten zout-experiment, na 527 vollast bestralingsdagen,

een belangrijke mijlpaal bereikt. Inmiddels zijn de voorbereidingen van het nabestralingsonderzoek gestart dat zal plaatsvinden in de *Hot Cell Laboratories*. Daar zijn de eerste gammascans gemaakt die inzicht moeten geven in onder andere het gedrag en de veranderde samenstelling van het bestraalde zout en de omhullende materialen. In 2020 komen de eerste onderzoeksresultaten beschikbaar.

Tegelijkertijd is in 2019 verder gewerkt aan de voorbereidingen op een nieuw bestralings-experiment dat meer inzicht moet geven in corrosie van beoogde installatiematerialen. Een technisch complex en ambitieus experiment dat real time de interactie tussen gesmolten zout en verschillende materialen monitort. Het ontwikkelen en in gereedheid brengen van de voor dit experiment benodigde apparatuur is een uiterst delicaat proces waarbij internationaal met collega-instituten wordt samengewerkt.

In het kielzog van deze gesmolten zout bestralingen vindt nog een aantal aanvullende onderzoeken plaats. Bijvoorbeeld naar de invloed van helium op het verbrossen van



Na bestraling wordt het gesmolten zout experiment SALIENT-01 in een hot-cell ontdaan van leidingen en instrumentatie waarna het experiment, de horizontaal-liggende cilinder, in een speciale container overgebracht wordt naar het Hot Cell Laboratorium voor verder materiaalkundig onderzoek.



nikkel-staallegeringen en het ontstaan van fluor gas uit zouten onder invloed van gamma-straling.

Naast de gesmolten zout technologie, is er ook internationale belangstelling voor metaalgekoelde snelle reactoren. Het is een veelbelovende reactortechnologie waar in het verleden al veel ervaring mee is opgedaan. Dit soort reactoren hebben succesvol gewerkt in de Verenigde Staten, Frankrijk, Rusland, Japan en India. Tegenwoordig is er nog een aantal reactoren van dit type in bedrijf in Rusland, India, en China. Op korte termijn wordt een nieuwe reactor in bedrijf genomen in India. Deze reactoren zijn veilig, duurzaam, zuinig en produceren weinig langlevend afval. Ze kunnen zelfs langlevend radioactief afval opbranden. Het duurzame concept past goed in de transitie naar een CO₂-vrije energiehuishouding. NRG richt zich op de veiligheid van een gesloten splijstofcyclus en de ontwikkeling van de benodigde splijstoffen. Zo onderzoekt NRG in de HFR een kandidaat splijstof voor zo'n cyclus, een mengsel van uranium en americium in verschillende samenstelling, op het vrijkomen van gassen tijdens bestraling. Daarnaast wordt gekeken op welke manier de productie van splijstoffen goedkoper gemaakt kan worden zodat ze kunnen concurreren met de huidige gangbare splijstoffen.

NRG draagt met modelstudies bij aan de veiligheid van metaalgekoelde reactoren. Zo heeft NRG modellen ontwikkeld die de interactie laten zien tussen het koelmiddel en de splijstofpennen. Daarnaast modelleerde NRG de complexe 3-dimensionale stroming van het koelmiddel in een reactorvat waarbij alle belangrijke componenten gesimuleerd werden. Voor een Europees loodgekoeld reactorontwerp was dit model gereed in 2018 en in 2019 volgden de eerste simulaties. Daarmee kon de slechte menging van de temperatuur in het reactorvat worden aangetoond. Deze uitkomsten worden weer meegenomen in het ontwikkelproces van de reactor.

Ook de publicatie van het boek van NRG-expert Ferry Roelofs over de thermohydraulica van metaalgekoelde reactoren trok grote internationale aandacht; thermohydraulica

beschrijft hoe de warmte die in de kern van een reactor vrijkomt wordt afgevoerd door het koelmiddel, het koelsysteem en eventueel de noodkoelsystemen. Het samenstellen van dit boek was door Roelofs in 2015 gestart en werd in 2019 afgerond tijdens een workshop met 75 internationale collega's. Roelofs maakt de interactie van het koelmiddel met de installatie inzichtelijk zodat er onder meer voorspellingen kunnen worden gedaan over warmtetransport en vibraties in het koelcircuit. De in het boek samengebrachte kennis is ook bruikbaar voor veiligheidsstudies voor huidige watergekoelde kerncentrales. Bijvoorbeeld voor onderzoeken naar thermische vermoeiing, vibraties in splijstofelementen of aan de modellering van de stroming in een splijstofopslagbassin of zelfs een compleet koelcircuit.

Sinds 2018 werkt NRG ook samen met het Zweedse bedrijf LeadCold dat zich richt op de ontwikkeling van kleine lood-gekoelde reactoren. Deze zijn geschikt voor de levering van elektriciteit en proceswarmte in afgelegen gebieden zoals het Canadese poolgebied. NRG werkt aan een 3-dimensionaal rekenmodel waarin het hele koelcircuit inzichtelijk gemaakt kan worden. In 2019 is dit model verder gedetailleerd.

Een derde ontwikkeling betreft de *Small Modular Reactor* (SMR) waar meerdere grote leveranciers aan werken. De SMR is een generieke benaming voor een reeks verschillende reactoren met een beperkt elektrisch vermogen tot circa 300 MW. Een SMR wordt gezien als een economisch aantrekkelijk alternatief voor de huidige generatie 1.000 MW-kerncentrales met name vanwege het lagere investeringsrisico. De eerst gebouwde module kan al in bedrijf gaan, terwijl de volgende modules nog gebouwd moeten worden. Zo worden bouwkosten gespreid. Ook is vanwege het lage vermogen de optimalisatie van de veiligheidssystemen minder uitgebreid en kostbaar. NRG draagt bij aan de veiligheid van deze ontwerpen met het doorrekenen van ongevals-scenario's en het verbeteren van de gebruikte modellen. Ook leidt NRG buitenlandse collega's op in de gebruikte rekencodes.

Stralingsbescherming

Het EZS-onderzoek rond stralingsbescherming richt zich op blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit 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.

Het werkveld van de dosimetrie heeft zich o.a. geconcentreerd op innovaties en risico-beheersing bij blootstelling aan ooglenzen en ledematen. Onder voorzitterschap van NRG is er een richtlijn document opgesteld van de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS) met handreikingen voor invulling van de herziene blootstellingsgrens voor de ooglenzen. Bij de invoering van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) in 2018 is deze grens conform de EURATOM-richtlijn 59/2013 verlaagd van 150 naar 20 mSv per jaar. Vanaf 2020 wordt er gewerkt aan richtlijnen voor handelswijzen m.b.t. de stralingsdosis aan de ledematen, extremitetendosimetrie. Deze werkzaamheden vloeien voort uit de toenemende aandacht voor dosimetrie bij digital imaging en ander gebruik van radio-isotopen, en vinden plaats onder de paraplu van NCS en, binnen Europa, het platform EURADOS.

Voor de voorspelling van (theoretische) verspreiding van radioactiviteit in het aquatische milieu werkt NRG aan een softwaretool met de naam POSEIDON. De tool voorspelt hoe een emissie van radioactiviteit zich verspreidt en wordt opgenomen in het aquatische milieu. Een vergelijking met een ander (buitenlands) voorspellend rekenmodel, toonde vergelijkbare uitkomsten. Daarmee kon in 2019 worden vastgesteld dat de voorspellende waarde van de beide softwaretools goed zijn. De aandacht wordt nu verlegd van

verspreiding in zee naar bovenstrooms: de grote rivieren.

THORON & RADON

Door exhalatie uit de bodem en bouwmaterialen staan mensen bloot aan radioactieve edelgassen radon en thoron. Zeker is dat dit in bepaalde concentraties schadelijk is voor de volksgezondheid. NRG werkt aan de ontwikkeling van een geharmoniseerd meetprotocol voor het registreren van thoron. Dit is nodig om gegevens uit heel Europa met elkaar te kunnen vergelijken. Ook is in 2019 gewerkt aan een computermodel waarmee het vrijkomen van radon en thoron uit poreuze bouwmaterialen kan worden gesimuleerd. Het model is gevalideerd aan de hand van praktijkgegevens.

RISICOPERCEPTIE EN COMMUNICATIE

Er komt meer aandacht voor de sociaal-wetenschappelijke kant van blootstelling aan radioactiviteit en straling. Het doel is om een methode te ontwikkelen die inzicht geeft over hoe het publiek de risico's van stralingsblootstelling percipieert en wat de invloed is van op de individu toegesneden informatie op deze perceptie. Er wordt gedacht aan een "virtual



Kennisontwikkeling

Met kennisontwikkeling anticipeert NRG op de toekomstige behoefte aan kennis en kunde op specifieke deelterreinen van de nucleaire technologie.

Bestralingsexperimenten leveren belangrijke informatie op over hoe de eigenschappen van materialen veranderen onder invloed van radioactieve straling. Die eigenschappen leveren gegevens op die gebruikt worden voor nieuwe modellen waarmee het gedrag van materialen gemodelleerd kunnen worden. Omdat het vaak om relatief kleine, en een beperkt aantal monsters gaat – en bestralingsexperimenten kostbaar zijn – is het belangrijk om zoveel mogelijk informatie uit die monsters te halen. *Electron Backscattered Diffraction* (EBSD) is een techniek waarmee met gebruikmaking van een elektronenmicroscoop veranderingen in de microstructuur van materialen in kaart kunnen worden gebracht. Zo kunnen bijvoorbeeld veranderingen in de structuur van splijtstoffen door rekristallisatie van splijtstoffen ten gevolge van neutronenstraling en temperatuurbelasting worden gevolgd. Die veranderingen kunnen gekoppeld worden aan veranderingen in de chemische samenstelling van het materiaal. Zo kan meer en gedetailleerdere informatie uit één onderzoeksmonster worden gehaald. Om deze redenen investeert NRG sinds 2018 in kennis en vaardigheden in het hanteren van EBSD-technieken. Om in de toekomst goede en betrouwbare resultaten te boeken zijn in 2019 routines ontwikkeld voor de monster voorbereiding. Medio 2020 kunnen naar verwachting de eerste metingen worden gedaan.

Door toegenomen rekenkracht van computers nemen de mogelijkheden voor modellering

toe. Zo wordt het mogelijk om meerdere fysische processen gecombineerd te modelleren of om processen op verschillende schaal-grootte gecombineerd te modelleren. In de praktijk komt dat neer op het combineren van rekencodes. Daardoor is het tegenwoordig mogelijk om fysische effecten zowel op het niveau van individuele componenten als op het niveau van een volledige kerncentrale inzichtelijk te maken. In 2019 is NRG een project gestart om de mogelijkheden van gecombineerde thermo-hydraulische berekeningen te verruimen. Naast een methode waarbij overlap gebruikt wordt, komt er ook een methode waarbij deze overlap niet nodig is. Beide methodes hebben voor- en nadelen. Door over beide methodes te beschikken kan voor elke situatie de geschikte methode gekozen worden.

CONDITIONEREN AFVAL

De eisen aan het inzicht in de samenstelling van op te slaan radioactief afval zullen steeds scherper worden. Waar eerst een berekening van de verwachte samenstelling voldeed, wordt door de ontvangende partij steeds vaker gevraagd om data op basis van chemische analyses. Nu zijn niet alle elementen even makkelijk te meten; bovendien moeten de monsters in een aantal gevallen voorbehandeld worden om ze geschikt te maken voor analyse. Omdat de monsters radio-

Kalibratie van een dosistempometer met een meetopstelling in Petten; met een dergelijke meter kan de hoeveelheid straling (dosis) per tijdseenheid nauwkeurig gemeten worden.

reality game” waarin mensen ervaringen met blootstelling opdoen. Die variëren van een bezoek aan de tandarts voor een röntgenfoto tot een vakantie in een gebied met hogere achtergrondstraling. Het project is tot stand gekomen in een samenwerking met het RIVM en zal in 2020 verder vormgegeven worden. Hierin wordt ook de betrokkenheid van het ANVS nagestreefd om te komen tot een breed gedragen initiatief. Er wordt gedacht aan een ‘proeftuinstudie’. Het doel is om vast te stellen tot welk niveau deelnemers de “person-based” aangeboden informatie willen gebruiken bij meningsvorming over radioactiviteit en straling.

MILIEUMONITORING

NRG heeft een internationale vergelijking gemaakt van milieumonitoring rond nucleaire installaties. Er wordt gezocht naar (toekom-

stige) verbeteringen. In Nederland is wettelijk voorgeschreven hoe monitoring plaatsvindt. Een opvallend verschil met het buitenland is dat Nederland nog geen gebruik maakt van publieksparticipatie, bijvoorbeeld via apps en eventuele extra tools verbonden met smartphones. Omringende landen doen dat dus wel. De mogelijkheden voor de Nederlandse situatie worden in 2020 in kaart gebracht.

UNSCEAR, het wetenschappelijk bureau van de Verenigde Naties voor de effecten van straling op de bevolking, heeft expert Govert de With van NRG om een bijdrage gevraagd. Hij werkt mee aan een wetenschappelijke publicatie over de blootstelling van nucleaire professionals tijdens hun werk. De UNSCEAR-publicaties hebben grote wetenschappelijke autoriteit in de wereld en worden gebruikt voor het vaststellen van standaarden en limieten in de nucleaire industrie. De publicatie staat nu gepland voor 2021.

actief zijn moeten in afgeschermd omgevings met beperkte toegang ingewikkelde opstellingen geconstrueerd worden. Sinds 2017 werkt NRG aan analyse- en scheidingsmethodes voor een aantal 'lastig te meten' radioactieve elementen in radioactief afval. Dat betreft met name vluchtige elementen. In 2018 waren al flinke stappen in gezet, in 2019 zijn er ook procedures opgesteld voor jodium-129 en chloor-36.

Veilige behandeling en opslag van radioactief afval vraagt ook om kennis over het gedrag van afval op de lange termijn. Eén van de gebruikelijke routes is het vermengen van radioactief afval met cement. Om de effecten van vermenging van radioactief afval op de eigenschappen van het cement te kunnen voorspellen, ontwikkelt NRG een thermodynamisch model waarmee de procesparameters geoptimaliseerd kunnen worden. De internationale belangstelling voor dit model is groot, reden ook dat NRG met dit model vanaf 2020 deelneemt aan een Europees project naar de conditionering van radioactief afval.

STRALINGSBESCHERMING

Met de voortschrijdende ontwikkeling van de nucleaire geneeskunde komt er grotere behoefte aan kennis over de verspreiding van radioactiviteit in het menselijk lichaam. De gangbare dosimetrie-procedures gaan uit van een homogene verspreiding van isotopen met een gemiddelde verblijfstijd per orgaan gebaseerd op een populatie van gezonde personen. Voor nucleair medische toepassingen is deze aanpak ontoereikend. Dat maakt aanvullend onderzoek noodzakelijk. Ook blijft de wetenschap zoeken naar de balans tussen het therapeutische effect en de risicovolle bijwerkingen van een medisch isotoop: welke dosis is optimaal? Gebruik van geavanceerde biokinetische modellen is essentieel om tot een optimale dosis te komen. Dat is voor NRG reden om de mogelijkheden van biokinetische modellering te inventariseren en de mogelijke effecten ervan op de (individuele en collectieve) behandeling in kaart te brengen.

Publieksvoorlichting

NRG focust op nucleaire vraagstukken die relevant zijn voor de Nederlandse samenleving. Voor de overdracht van kennis uit het onderzoeksprogramma worden door NRG op het publiekgerichte communicatie-activiteiten ontplooid. Naast het informeren van het algemene publiek, zijn de doelen het motiveren van studenten en onderzoekers op het gebied van nucleaire technologie. Dat moet de samenwerking tussen industrie, onderwijs en instituten verder aanjagen en leiden tot versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur.

Onder deze activiteiten vallen onder meer deelname aan publieke debatten en het begeleiden van studenten en scholieren. Zo organiseerde NRG in 2019 kennismakingsbijeenkomsten voor nieuwe medewerkers in de nucleaire sector. Bezoekers kregen een lezing over kernfusie en kernsplijting gevolgd door een rondleiding in de HFR en de *Hot Cell Laboratories*. Ook werden, net als voorgaande jaren, studenten begeleid, gastlessen verzorgd en discussies gehouden met onderwijzend personeel over de recente ontwikkeling op het gebied van nucleaire technologie en stralingsbescherming. Dit gebeurde in een breed spectrum van het onderwijs: van een algemene kennismaking voor klassen in het voorgezet onderwijs in Alkmaar tot aan specifieke gastlessen bij universiteiten. Bij de TU Eindhoven ging die over kernfusie. Bij de TU Wageningen werd voor tweedejaars studenten een gastles verzorgd met als titel *Technological Aspects of Nuclear Power*; voor de Universiteit van Groningen werd een lezing gehouden over de gesmolten zout reactor.

Voor het overdragen van kennis neemt NRG deel in meerdere gremia, zoals KIVI Kern-techniek. Daar werd vooral aandacht besteed aan de potentiële rol van kernenergie in een CO₂-vrije energiehuishouding. Ook werd er stilgestaan bij de lessen die het kernongeluk bij het Japanse Fukushima (2011) de sector leerde.

Voor Nederland is NRG lid van de Hoge Wetenschappelijke Commissie van de European Nuclear Society (ENS). Deze commissie functioneert als een denktank en adviseert het ENS-bestuur over nucleaire ontwikkelingen op alle deelgebieden (fysica, biologie, geneeskunde, engineering en sociale wetenschappen). NRG droeg bij met een *position paper* over de bijdrage van kernenergie aan een van CO₂-arme wereld. Ook is NRG lid van het *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform* dat voor de Europese Commissie het onderzoek naar kernenergie coördineert.

Nuclear. For Life.



www.nrg.eu