



ONDERZOEKS- JAARVERSLAG 2017



ONDERZOEKSJAARVERSLAG 2017

Introductie	5
Stralingsbescherming	6
Nucleaire veiligheid	8
Karakteriseren en conditioneren van radioactief afval	14
Geavanceerde nucleaire technologie	16
Publieke taak en publieksvoorlichting	19

COLOFON

Teksten en productie

Art de Vos, Krimpen a/d IJssel
Corporate Communications NRG

Fotografie

Hein van den Heuvel, Amsterdam

Vormgeving

Axioma Communicatie, Baarn

NUCLEAR RESEARCH AND CONSULTANCY GROUP

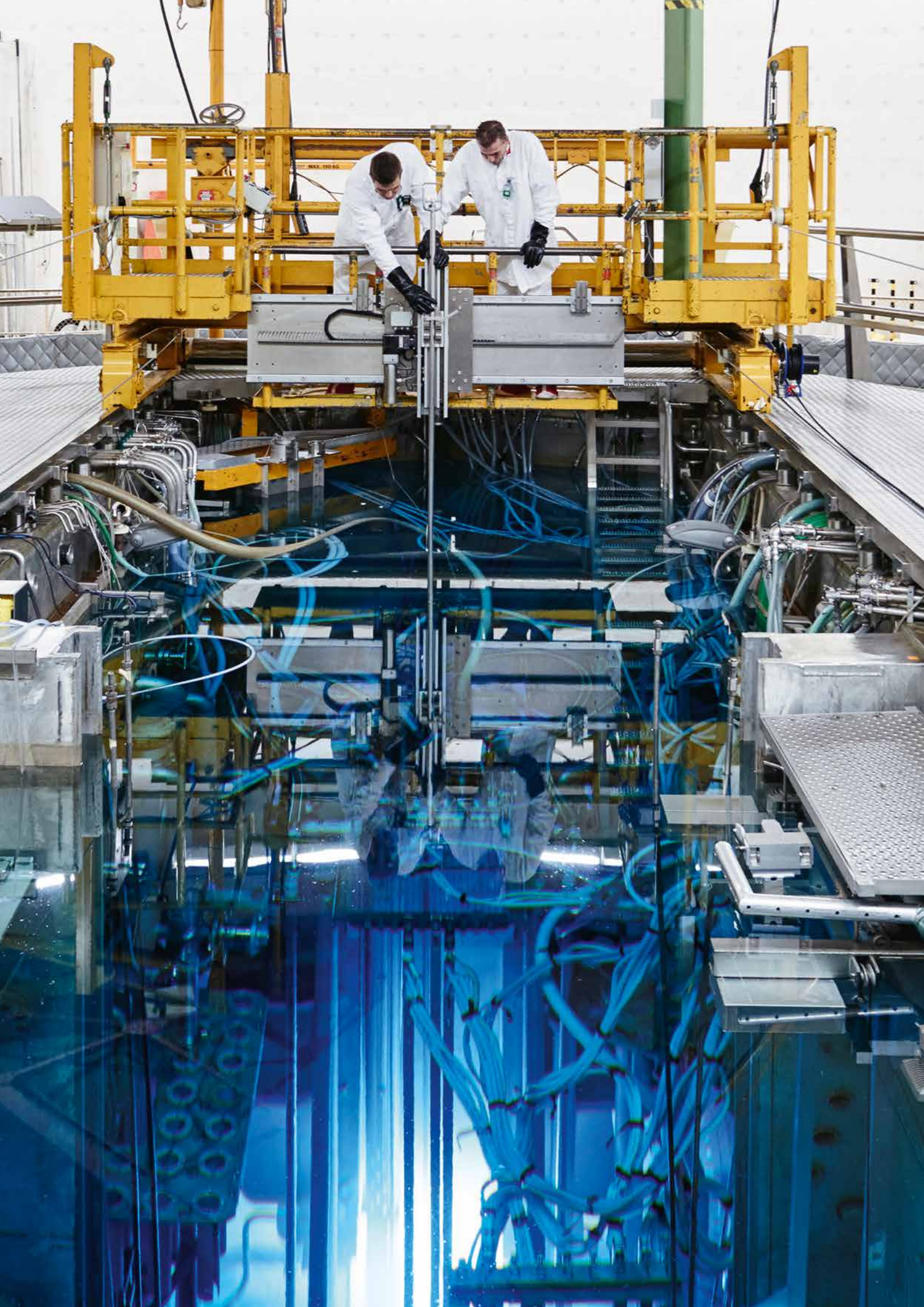


NRG is een internationaal opererende nucleaire dienstverlener. De onderneming produceert isotopen, verricht nucleair technologisch onderzoek, is consultant op het gebied van veiligheid en betrouwbaarheid van nucleaire installaties en dienstverlener in stralingsbescherming. Met haar onderzoek draagt NRG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

de kennis in Nederland op het gebied van nucleaire 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 500 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.



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 van de inhoud van het onderzoeksprogramma is de Nederlandse overheid. De financiële middelen worden jaarlijks afgestemd met het Ministerie van Economische Zaken.

Gegeven de vier 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 splijtstof en materialen die langdurig aan straling blootgesteld worden.*
- *Het voorlichten van pers en publiek over het internationale onderzoekswerk van NRG.*

Thematisch is dit onderzoek in vijf samenhangende thema's te ordenen die de leidraad van dit verslag vormen. Het gaat om de aspecten:

1. *Stralingsbescherming*
2. *Nucleaire veiligheid*
3. *Karakteriseren en conditioneren van radioactief afval*
4. *Geavanceerde nucleaire technologie*
5. *Publieke taak, publiekvoorlichting*

Het in dit verslag toegelichte publiek gefinancierde Nederlandse nucleaire onderzoek staat al jaren op hoog niveau en heeft internationaal aanzien. Dit vertaalt zich onder andere in een groot aantal 'peer-reviewed' publicaties en deelname aan door de EU (mede)gefinancierde onderzoeksprojecten

Naast het in dit verslag beschreven publiek gefinancierde onderzoek voert NRG ook commerciële opdrachten uit. Met de Hoge Flux Reactor (HFR) is NRG 's werelds grootste producent van medische isotopen voor ziekenhuizen en behandelcentra in de hele wereld. Tevens voert NRG onderzoeks- en adviesopdrachten uit voor de private sector: vanzelfsprekend voor de nucleaire industrie, maar ook onder meer voor de olie- en gasindustrie en de medische sector. Hierover wordt in een separaat jaarverslag gerapporteerd.

STRALINGSBESCHERMING

In de nucleaire industrie is alles gericht op het vermijden van onnodige blootstelling aan straling en contact met radioactieve stoffen. Kennen is kunnen en meten is weten.

NRG draagt bij aan stralingsbescherming met dosimetriediensten, radioecologie, educatie en training en de ontwikkeling van tools voor de verbetering van de veiligheidscultuur bij bedrijven.

Dosimetrie

Vanaf februari 2018 gelden strengere limieten voor de blootstelling van de ooglenzen aan straling. De limiet gaat naar beneden van 150 naar 20 mSv. Dat betekent met name voor radiologisch werkers in ziekenhuizen een behoorlijke verandering. In 2017 is een conceptrichtlijn opgesteld die door de belangrijkste stakeholders wordt beoordeeld. De richtlijn moet helpen om de blootstelling van de ooglenzen bij (medische) professionals stap voor stap te verminderen. NRG zit de commissie voor die deze richtlijn definitief zal maken. In oktober zijn de eerste bevindingen gepresenteerd, de richtlijn wordt naar verwachting in de eerste helft van 2018 gepubliceerd.

Er komt een nieuwe generatie dosimeters op de markt die direct afleesbaar zijn; Direct Ion Storage, DIS. Het grote voordeel is dat deze dosimeters niet naar een centrale dienst hoeven te worden opgestuurd om ze uit te lezen. Dat kan lokaal met behulp van Bluetooth. Uiteraard moeten deze nieuwe dosimeters wel functioneel en betrouwbaar zijn. Oftewel: ze moeten overeenkomen met de eisen in de IEC62387-norm. Uitkomsten van de uitgebreide onderzoeken die NRG verricht, zullen in 2018 op een bijeenkomst van de International Radiation Protection Association (IRPA)

worden gepresenteerd. In februari en september 2017 heeft NRG Eurados meetings bijgewoond. Deze werkgroep houdt zich bezig met stralingsbescherming voor professionals en patiënten bij medical imaging. In 2018 zal NRG actief gaan bijdragen aan de werkzaamheden van deze werkgroep.

Radio-ecologie: verspreiding van radioactiviteit in het milieu

In 2015 is NRG gestart met het gebruik van POSEIDON. Dat is een software code voor het berekenen van de potentiële verspreiding van radioactiviteit in zeewater, sediment en voedselketen. Uit validatietests bleek dat berekening van verspreiding en resultaten uit experimenten goed overeenkomen. In 2016 is gestart met de toepassing van het model voor de Nederlandse wateren. De Nederlandse rivierdelta is een complex water systeem, waarvoor bij NRG ook 3-dimensionale hydrologische rekenmodellen zijn ingezet. Deze bevindingen zijn meegenomen in de customisatie van het POSEIDON model. Tevens is het model uitgerust met een geavanceerd voedselketen-model waarin de opname van radio-activiteit in de gehele zee flora wordt doorgerekend. Dit omvat zowel de pelagische als benthische water-organismen.

Het model steunt op leerervaring uit Fukushima en berekent de opname van radioactiviteit door de voedselketen. Het omvat alle relevante blootstellingspaden in de Noordzee en de Atlantische Oceaan, met een verfijning langs de Nederlandse kusten. Het valideren van het model

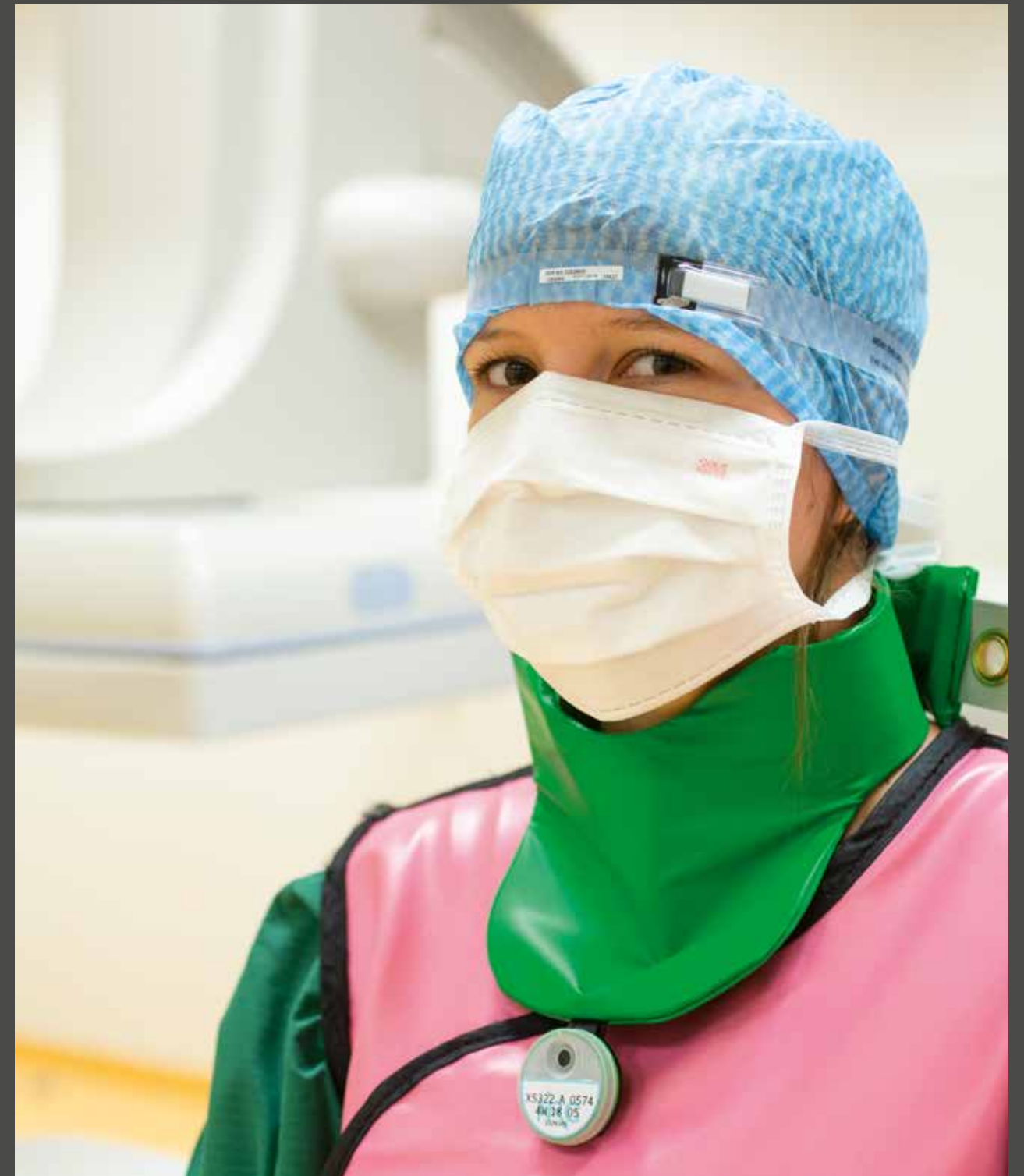
is lastig door het ontbreken van relevante data voor de Nederlandse kustwateren. Nader onderzoek is voorzien voor 2018.

Educatie en training

In 2017 heeft NRG zijn bijdrage afgerond aan ENETRAP III, de ontwikkeling van nieuwe, innovatieve trainingmethoden voor stralingsbescherming.

Veiligheidscultuur

In 2015 startte NRG een project op het gebied van veiligheidscultuur met de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS) en de Safety Science & Security Group van de TU-Delft. Het doel: ontwikkelen van tools voor (nucleaire) bedrijven om hun veiligheidscultuur mee te monitoren en te verbeteren. In 2016 werden de contouren hiervoor geschetst; in 2017 kwam het tot resultaten. Er werden workshops 'interviews' gegeven; er is een informatie-portal ingericht; een on-line enquête naar de beleving van de veiligheidscultuur in de praktijk (belangrijk resultaat: een gevoel gemis aan 'leiderschap' op de werkvloer); er is aandacht gekomen voor 'soft skills' als risicoperceptie en -communicatie. In 2018 moeten workshops 'Institutionele Interviews' tot protocollen en inbedding bij de deelnemende organisaties leiden. De doelgroepen zijn de managers van grote bedrijven en ziekenhuizen, de NVS, ANVS en de NVVK (Nederlandse Vereniging voor Veiligheidskunde). De resultaten worden gepresenteerd op de IRPA-conferentie van 2018.



Radon & thoron

Door exhalatie uit de bodem en bouwmaterialen in de gebouwde omgeving staan mensen bloot aan radon en thoron. Zeker is dat dit in bepaalde concentraties schadelijk is voor de volksgezondheid. Dat heeft er toe geleid dat er internationaal meer aandacht is voor dit fenomeen. Daardoor is er internationaal ook grote belangstelling voor de door NRG ontwikkelde methode om snel en adequaat de radiologische eigenschappen

van bouw materiaal vast te stellen. Zo zijn onder andere de recentelijk gepubliceerde internationale meetnormen (EN en ISO) voor radiologische karakterisatie van bouwmaterialen gebaseerd op NRG's meettechnieken en -protocollen. Kort geleden is op initiatief van NRG een internationaal ringonderzoek uitgevoerd naar thoron uit bouwmaterialen. In het verlengde van dit onderzoek zal in 2018 gestart worden met de ontwikkeling van een nationale NEN-norm voor bepaling van

de thoronexhalatiesnelheid uit bouwmaterialen. Dit is een unieke ontwikkeling, gegeven het feit dat er op dit moment wereldwijd nog geen enkele geharmoniseerde meetnorm bestaat voor het bepalen van deze materiaaleigenschap. Daarnaast is onderzoek gedaan naar exhalatie uit verschillende soorten beton en de invloed op de exhalatie van NORM-toeslag, oppervlakteafwerking en materiaalstructuur.

NUCLEAIRE VEILIGHEID

In de nucleaire industrie heeft veiligheid de hoogste prioriteit. Alles draait om het veilig ontwerpen, onderhouden en bedrijven van nucleaire installaties en het veilig omgaan met radioactieve processen en stoffen.

Omdat veel kerncentrales door conservatief ontwerp langer in bedrijf kunnen blijven dan bij de bouw werd beoogd, wordt kennis over verouderingsverschijnselen steeds belangrijker. NRG is een gerenommeerd leverancier van deze kennis. Ook draagt NRG bij aan harmonisatie van eisen en de verdere ontwikkeling van industriële normen. Denk bijvoorbeeld aan de ASME-code. Daarnaast is NRG betrokken bij de ontwikkeling van Europese veiligheidsnormen voor (nieuwe) reactoren, zoals de Koreaanse APR1400 reactor waarvan er momenteel vier in aanbouw zijn in de Verenigde Arabische Emiraten.

Long Term Operation

Op veel plaatsen in de wereld worden kerncentrales langer in bedrijf gehouden. Dit is alleen mogelijk als de veiligheid aantoonbaar kan worden gewaarborgd. NRG levert de kennis en de kunde waarmee de veiligheid van kerncentrales tot enkele decennia na de initiële ontwerp levensduur kan worden aangetoond. Dit vakgebied wordt ook wel Long Term Operation (LTO) genoemd.

Internationaal werkt NRG onder andere samen via het Europese project ATLAS+ aan geavanceerde en realistische methodieken om een veilige, verlengde bedrijfsvoering van bestaande kerncentrales te kunnen onderbouwen. Concreet ontwikkelt NRG methodes voor het voorspellen van thermische vermoeiingsverschijnselen in staal onder normale bedrijfsomstandigheden. Daarnaast werkt NRG aan voorspellende (probabilistische)

Lek-voor-Breuk modellen onder praktijkomstandigheden. Laatsgenoemde werkzaamheden zijn in september 2017 van start gegaan. Met numerieke stromingsberekeningen draagt NRG bij aan een betere voorspelbaarheid van de consequenties van Pressurized Thermal Shock (PTS). Dit fenomeen treedt op bij plotselinge temperatuurverschillen in nucleaire koelkringlopen, bijvoorbeeld bij het injecteren van koud (nood)koelwater. PTS is een belasting in het ontwerp van het reactorvat. De materiaal-eigenschappen die van belang zijn voor deze belasting, veranderen gedurende de levensduur van de centrale. Daardoor wordt nauwkeurige bepaling van de belasting steeds belangrijker. De grootte van de belasting wordt bepaald door de dynamiek in het systeem zoals turbulentie. Met name de effecten van die turbulentie zijn moeilijk te voorspellen. Daardoor moesten er oorspronkelijk grote veiligheidsmarges worden meegenomen in de veiligheidsanalyses waarmee moet worden aangetoond dat een gepostuleerd defect stabiel blijft tijdens een koelmiddelinjectie. Deze rekenmethodes worden verder ontwikkeld om ze nauwkeuriger te maken. In 2016 zijn hiervoor grote stappen gezet door de beschikbaarstelling van 1.000-processor rekencapaciteit bij de Poolse partner NCBJ Swierk Computing Centre. Er is echter een veelvoud van deze rekencapaciteit nodig. Daarvoor is inmiddels een overeenkomst met de Poolse partner gesloten die binnen een driejarige contract acht maanden lang 5.000-processor rekencapaciteit zal

verschaffen. Deze samenwerking zal NRG een unieke kennispositie opleveren op het gebied van de thermo-hydraulische berekening van PTS. De eerste resultaten zijn in 2017 gepresenteerd op een IAEA-conferentie. Verder heeft NRG de invloed van PTS op waterstofvlokken ('haarscheurtjes') in een reactor-vatwand onderzocht in combinatie met de invloed van verbrossing van het vatstaal door neutronenstraling. Uit probabilistisch en deterministisch onderzoek blijkt dat de in de praktijk gebruikte codes voor het bepalen van de invloed conservatief zijn.

Een ander aspect van Long term Operation zijn breuk-mechanische beoordelingen van leidingen in nucleaire installaties. NRG werkt al bijna tien jaar in internationaal verband samen bij het opstellen van een industriële code aan de hand waarvan deze beoordelingen gedaan kunnen worden. Door detailonderzoek van NRG zijn de probabilistische modellen, waarmee dergelijke breuk-mechanische voorspellingen worden gedaan, realistischer gemaakt. De uitkomsten van dit onderzoek hebben geleid tot een aanpassing van de toonaangevende breukmechanica code R6.

Bestaande methodes voor het beoordelen van vermoeiing zijn conservatief. In 2016 en 2017 heeft NRG vergelijkend onderzoek gedaan naar de voorspelling vanuit de code en naar het feitelijk moment van breuk (op basis van faaldata uit de literatuur) als gevolg van vermoeiing. De resultaten

leiden tot een beter begrip van toepassing van de code bij het gedrag in de praktijk. Ook voert NRG in de praktijk van een operationele kerncentrale onderzoek uit naar vermoeiing onder bedrijfscondities. Door de vergaarde praktijkgegevens te vergelijken met (conservatieve) ontwerpcriteria en met numerieke stromingsmodellen, ontstaat een realistisch beeld van de effecten van temperatuurwisselingen op vermoeiing van de installatie. Daarmee kunnen modelberekeningen verder worden verbeterd. Het materiaalgedrag van een reactorvat en de bijbehorende inventaris verandert ook onder invloed van straling en interactie met koelwater. Dit gedrag laat zich met bestaande methodes moeilijk voorspellen, terwijl het belang van kennis hiervan in de toekomst toeneemt. In 2017 heeft NRG verder gewerkt aan betrouwbare numerieke modellering van het gedrag van koelmiddel rond de kwetsbare plekken (zoals bouten) in een reactorvat. Hiermee kunnen betere voorspellingen worden gedaan over de structurele integriteit van het binnenwerk van reactorvaten tijdens LTO.

Tenslotte is er nog het fenomeen van 'verbrossing' van reactorvat onder invloed van jarenlange neutronenstraling. NRG onderzoekt in dat verband een unieke serie reactorvatstaalmonsters afkomstig van een Armeense kerncentrale. Het gaat om onbestraalde en in praktijkomstandigheden bestraalde stukken staal. Het bestraalde en onbestraalde staal wordt binnen een meerjarenprogramma samen met internationale partners onderzocht en vergeleken. De goed gedocumenteerde monsters uit de Armeense kerncentrale worden gekarakteriseerd door langs experimentele weg de mechanische eigenschappen, zoals de breuksterkte, te bepalen. Met behulp van een elektronenmicroscopie is de microstructuur beschreven. In het onderzoek naar de effecten van langdurige blootstelling aan neutronenstraling tijdens reactorbedrijf, is in 2016 vastgesteld dat het neveneffect van de

temperatuur hierbij minimaal is. Met die wetenschap is in 2017 een begin gemaakt met een omvattende test-campagne waarin de bestraalde monsters mechanisch gekarakteriseerd worden. Doorgaans zijn de monsters beperkt in aantal en omvang. Daarom is de infrastructuur in de laboratoria uitgebreid met apparatuur die het mogelijk maakt om monsters meerdere keren te kunnen testen. Uiteindelijk geven al deze data meer inzicht in het (toekomstig) gedrag van reactorvatstaal.

Veiligheidsbeoordelingen

Het ongeluk in Fukushima (Japan, 2011) heeft geleerd dat het beheersen en stabiliseren van een gesmolten kern van grote invloed is op het ongevalsverloop. In Fukushima kwam de gesmolten kern buiten het stalen reactorvat terecht en trad een chemische reactie op met het beton. In Europees verband worden momenteel de mogelijkheden onderzocht om een gesmolten kern te stabiliseren waarbij het reactorvat intact blijft. Kennis over temperaturen en de belasting van het reactorvat zijn dus essentieel, maar de daarvoor bestaande modellen schieten tekort. NRG heeft in 2017 een model ontwikkeld waarmee meer gedetailleerde gegevens over de temperatuurverdeling en de stromingen (convectie) in een gesmolten kern ter hoogte van het reactorvat verkregen kunnen worden.

Probabilistic Safety Assessment

Het ongeval in Fukushima heeft er ook toe geleid dat de Probabilistic Safety Assessment (PSA) van kerncentrales volop in de schijnwerpers is komen te staan. Nederland loopt voorop met de PSA-benadering van externe gebeurtenissen zoals een overstroming. In 2016 is een Europese studie afgerond naar 'good practices' voor het identificeren van externe gebeurtenissen. In 2017 is NRG in een nieuw samenwerkingsproject binnen het Europese Horizon 2020 onderzoeksprogramma gestapt. Dat richt zich vooral op (natuurlijke) externe gebeurtenissen en combinaties

van meerdere gebeurtenissen zoals in Fukushima. Wat is bijvoorbeeld de kans op het optreden daarvan? Tegelijkertijd zullen in deze studie ook de gevolgen van het optreden van deze gebeurtenissen beschouwd worden. Kenmerkend voor deze bedreigingen is dat ze veelomvattend zijn en meerdere functies (en gebouwen) tegelijk kunnen raken in combinatie met een verwoeste infrastructuur. In 2017 zijn voorbereidingen getroffen, in 2018 worden de eerste resultaten binnen dit onderzoeksproject verwacht. De uitkomsten van de studie zullen uiteindelijk meegenomen worden in nieuwe veiligheidsanalyses van nucleaire installaties.

Veiligheidsberekeningen

De laatste jaren is er internationaal steeds meer aandacht voor het kwantificeren van de foutenmarges in de berekeningen die de basis vormen voor veiligheidsanalyses. De verwachting is dat toezichthouders en reactorbedrijvers de zogenaamde uncertainty quantification (onzekerheidsmarge) voor dit soort berekeningen in de toekomst als eis zullen gaan stellen. Deze benadering staat ook bekend als BEPU: Best Estimate Plus Uncertainty. In 2016 deed NRG mee aan een OECD/NEA benchmarkstudie naar een gevalideerde methode voor het bepalen van onzekerheden van complexe numerieke stromingsberekeningen. Bij de beoordeling bleek de door NRG ontwikkelde systematiek de op één na beste te zijn van de 20 deelnemers. In 2017 is een nieuwe benchmark gestart onder regie van de OECD/NEA. Deze benchmark, waaraan ook NRG weer deelneemt, heeft een looptijd van drie jaar en zal zich richten op het bepalen van onzekerheden van thermo-hydraulische berekeningen.

Vloeistof-Structuur Interactie

In 2014 is NRG begonnen met een studie naar 'vibrerende splijtstofstaven' als gevolg van turbulentie in koelmiddel zoals water. Bestaande



reactoren moeten soms worden stilgelegd vanwege het optreden van trillingen in het koelsysteem. Vanuit bedrijfsvoeringsoogpunt is dit niet gewenst. Kennis omtrent de achtergrond van het optreden is van belang om maatregelen te kunnen treffen. In 2017 heeft NRG een model opgeleverd waarmee de wisselwerking tussen het (chaotische) gedrag van koelmiddel en de eventueel vibrerende splijfstof-elementen kan worden gesimuleerd. Het model is in een praktijktest gedeeltelijk gevalideerd, optimalisatie en verdere validatie staan voor 2018 gepland.

Passieve veiligheidssystemen

Sinds 2015 werkt NRG aan de ontwikkeling van een passief veilige elektriciteits-generator die kan worden

ingezet bij een total station black out (wegvallen van externe stroomvoorziening). Deze krachtbron maakt geen gebruik van netspanning of diesel, maar maakt zelf stroom door het benutten van temperatuurverschillen binnen het containment van een kerncentrale. Met de (grote) temperatuurverschillen tussen verschillende ruimtes kan een Stirling of Rankine motor worden aangedreven. Op die manier kan zonder hulp van buitenaf binnen in het containment elektriciteit worden opgewekt waarmee bijvoorbeeld noodkoel-systemen kunnen worden aangedreven of bediend.

De studie heeft aangetoond dat op deze manier een verdere verbetering in de toch al veilige centrales zou kunnen worden behaald.

Digitale besturing

Digitale besturing van kerncentrales is in opkomst als vervanging van de tot nu toe gangbare analoge bediening. NRG verricht veel werk aan het vaststellen van de betrouwbaarheid van digitale instrumentatie met behulp van probabilistische veiligheidsmodellen.

In 2016 heeft NRG een case study voorbereid voor het categoriseren van functies en de classificatie van systemen. In 2017 is NRG gestart met de vergelijking van PSA-modellen, de inventarisatie van mogelijke verbeteringen in deze modellen en de bestudering van de toepasbaarheid van industriële normen voor (betrouwbare) digitale instrumentatie. Ook op dit gebied wordt samengewerkt met partners binnen de OECD/NEA.

Veiliger splijstof

De splijstof in een reactor moet onder alle (ook extreme) omstandigheden in een reactor veilig blijven. In dit kader onderzoekt NRG het verschijnsel 'kruip' (een blijvende vervorming) in splijstof. Kruip kan uiteindelijk leiden tot belasting van de metalen omhulling die als een fysieke barrière voor de splijstof dient. In 2016 is een bestralingsexperiment uitgevoerd waarmee het principe van een door NRG ontwikkelde technologie getest is. Daarmee kan de vervorming tijdens bestraling op micrometerschaal on-line gemonitord worden. De temperaturen tijdens de succesvolle bestraling varieerden van 500 tot 1200 graden Celsius. Een technisch hoogstandje dat aan het splijstof-onderzoek een nieuwe dimensie geeft. Het nabestralingsonderzoek in 2017 heeft de succesvolle werking van het experiment aangetoond.

Daarnaast is een start gemaakt met de voor-bereidingen van twee nieuwe experimenten waarin enkele verbeteringen in de instrumentatie zijn meegenomen. Tijdens deze experimenten zal dan het kruipgedrag van twee soorten splijstof onderzocht worden: uraniumoxide en MOX. Een deel van het onderzoek wordt uitgevoerd binnen het kader van een nieuw Europees Horizon 2020 project. De data die deze experimenten opleveren, zijn essentieel om bestaande, wereldwijd gebruikte thermo-mechanische modellen verder te verfijnen. In 2018 zal deze nieuwe instrumentatie gereed komen, eind van dat jaar (mogelijk begin 2019) starten dan de twee nieuwe bestralingen.

Naast het opbouwen van meer kennis over het gedrag van bestaande splijstof wordt er wereldwijd gewerkt aan de ontwikkeling van 'ongevalstolerante splijstof'. Oftewel: splijstof die in ongevalsituaties niet snel zal leiden tot ernstige incidenten zoals het vrijkomen van waterstof (wat in Fukushima leidde tot explosies). NRG werkt in internationaal verband samen bij de ontwikkeling van ATF, Accident Tolerant Fuel. Er lopen verkennende gesprekken met

Westinghouse AB (Zweden) and NNL (Verenigd Koninkrijk) voor een bestraling in Petten van een kandidaat-splijstof. Verder draagt NRG bij aan een ATF experiment binnen het Fuels & Materials programma (2018-2020) van het Halden Reactor Project (HRP) in Noorwegen.

Binnen ditzelfde kader werkt NRG ook aan alternatieve splijstofomhullingen. Splijstof zit doorgaans in een omhulling vervaardigd uit een zirconiumlegering. Deze legering kan in ongevalsomstandigheden voor de vorming van waterstofgas zorgen. NRG onderzoekt alternatieve metalen en materialen die die dit nadeel niet hebben. In het verlengde hiervan werkt NRG aan modellen om het gedrag van deze nieuwe splijstof en omhullingen in praktijkomstandigheden te kunnen onderzoeken. Hiervoor is in 2017 een aantal experimentele faciliteiten opgeleverd en getest waarmee de interactie tussen splijstof en omhulling onderzocht kan worden. Het is de bedoeling om in de komende jaren deel te gaan nemen aan een internationaal ringonderzoek om de kwaliteit van de metingen te kunnen borgen. Als leverancier van veel experimentele data, werkt NRG ook aan de verbetering van de bestaande rekenmodellen waarmee het gedrag van huidige en toekomstige splijstof inzichtelijk wordt gemaakt. Zulk gedrag is zeer complex omdat er vele factoren een rol spelen. Bestaande modellen zijn gebaseerd op data waarin afzonderlijke factoren niet te onderscheiden zijn. Met de eerder genoemde ontwikkelde meetmethode om kruip te meten, echter, kan NRG in de toekomst als eerste over zulke data beschikken. Dit zal de mogelijkheid openen naar sterke verbeteringen in modelleermethoden. In 2017 is gestart met kennisopbouw over zulke nieuwe methoden. In 2018 hoopt NRG hiermee aansluiting te vinden bij de internationale state-of-the-art op dit gebied om vervolgens daarna met unieke nieuwe meetdata, liefst samen met een internationale partner, verdere stappen te zetten.

Veiligheid in splijstofopslagbassins
In de sommige reactoren en vooral bij reactoren in landen zonder interim of eindberging voor gebruikte splijstof, hoopt deze zich op in diepe, met water gevulde bassins in of nabij kerncentrales. De verwachting is, dat de hoeveelheden opgeslagen gebruikte splijstof zullen toenemen. Voorkomen moet worden dat deze (goedgeels) opgebrande splijstof onder zekere omstandigheden opnieuw kritisch wordt door de nog aanwezige splijfbare bestanddelen. NRG draagt bij aan de ontwikkeling en validatie van modellen waarmee berekend kan worden of, en onder welke omstandigheden, er risico's ontstaan rond opgeslagen gebruikte splijstof.



KARAKTERISEREN EN CONDITIONEREN VAN RADIOACTIEF AFVAL

Nucleaire technologie kent veel toepassingen: van energieopwekking en meettechniek tot medische diagnostiek en behandeling. Deze activiteiten leveren ook een zekere hoeveelheid radioactief afval op. Daarnaast produceren ook niet-nucleaire sectoren, zoals olie- gas en ertswinning en mineraalverwerkende industrieën, radioactief afval. Deze afvalstromen vereisen specifieke zorg en aandacht. Alle inspanningen zijn erop gericht dat de radioactieve reststoffen mens en milieu zo min mogelijk belasten.

Karakterisatie van radioactief afval

NRG werkt aan technieken om radioactieve reststoffen efficiënt en betrouwbaar te analyseren. In het verlengde hiervan, onderzoekt NRG technologieën waarmee radioactieve reststromen qua volume tot een minimum beperkt kunnen worden. Een goed voorbeeld hiervan is het beton van een nucleaire installatie. Door neutronenstraling kan dit beton radioactief worden (activering). De aanpak van NRG is erop gericht om vóór afbraak van een installatie inzicht te krijgen in de hoeveelheid radioactief materiaal die bij de sloop vrij kan komen en vast te stellen welke delen van de installatie het meest radioactief zijn. Een eerste stap is het berekenen van de nuclidenvector van het geactiveerde beton van een nucleaire installatie: welke radioactieve isotopen hebben zich tijdens het bedrijf van de installatie gevormd? De ontmanteling van de eigen Lage Flux Reactor (LFR) op het NRG-terrein blijkt hiervoor een effectieve case study. Om tot een goede methode te komen, moeten tal van hindernissen worden genomen. De chemische samenstelling van beton, inclusief verontreinigingen, blijkt van grote invloed op de mate van activering van beton. Als de chemische samenstelling bekend is, kan een betrouwbare berekening worden gedaan. De eerste resultaten laten

veelbelovende resultaten zien. Verder onderzoek is nodig om het model te verfijnen. In 2018 zullen ook de voorbereidingen getroffen worden voor berekeningen aan de kerncentrale van Dodewaard die in 1997 uit bedrijf is genomen.

Omdat het bij de ontmanteling van nucleaire installaties gaat om grote hoeveelheden beton, gaat er veel aandacht uit naar scheidingstechnieken. Naar schatting kan met een effectieve scheidingsmethode de hoeveelheid op te slaan geactiveerd beton met de helft worden teruggebracht. In samenwerking met de betonverwerkende industrie is een praktijkproef gedaan met niet-radioactieve monsters van het zeer dichte LFR-beton. Daaruit blijkt dat brokstukken van dit beton met bestaande technieken zodanig gebroken en vormalen kunnen worden, dat de cementsteen en het toeslagmateriaal (het grind) efficiënt gescheiden kunnen worden. In 2018 zal dit experiment op laboratoriumschaal voortgezet worden met kleinere hoeveelheden radioactief beton.

Gedetailleerde informatie over de samenstelling van radioactief afval is van groot belang voor de verdere verwerking ervan. Daarom zijn in voorgaande jaren analysetechnieken ontwikkeld voor de karakterisering van

een breed scala aan materialen. Als toets voor de kwaliteit van deze technieken is een aantal metaalmonsters bestraald in de HFR. Metalen worden veel gebruikt in een kernreactor, bijvoorbeeld voor het reactorvat en de regelstaven. Door de neutronenstraling worden deze metalen radioactief (activering). Vooraf werd berekend hoeveel de staalmonsters geactiveerd (radioactief) zouden worden. Vervolgens is met de nieuwe analysetechnieken vastgesteld in hoeverre de metalen waren geactiveerd. De berekende en de vastgestelde mate van activiteit kwamen overeen. Daarmee is aangetoond dat de werkwijze kan worden gebruikt voor de karakterisatie van daadwerkelijk geactiveerd staal.

Niet altijd wordt gekozen voor levensduurverlenging, zoals in Duitsland waar de politiek besloten heeft kernenergie uit te faseren. Wereldwijd is er daardoor steeds meer aandacht voor decommissioning (ontmanteling) van nucleaire installaties, die uit gebruik zijn genomen. Ook de kerncentrale van Borssele zal na 2034 ontmanteld moeten worden. NRG participeert in internationale onderzoeksfora en projecten die antwoord moet geven op de vraag hoe uitbedrijf genomen nucleaire installaties het veiligst en

meest economisch (kostenefficiënt) ontmanteld kunnen worden. Om een beeld te krijgen van de stand van de techniek, bezocht NRG internationale bijeenkomsten en concrete decommissioning projecten. Daarnaast wordt samengewerkt in IAEA-werkgroepen op het gebied van karakterisatie van restmateriaal en decommissioning van installaties.

Een grote uitdaging vormen heterogene radioactief afvalstromen waarbij de herkomst en samenstelling van de inhoud van de verpakkingen niet bekend is. Zo is het heel moeilijk om van buitenaf een goed beeld te krijgen van de radioactiviteit binnen in een afvalvat. Afscherming van objecten door andere objecten en verstrooiing van straling zorgen voor onbetrouwbare metingen. Om die reden wordt de inventaris veelal conservatief ingeschat, wat weer leidt tot (onnodig) grote volumes radioactief afval. In 2017 is door NRG een achttal vaten met heterogeen afval nader onderzocht. Er is eerst een bulk-scan gemaakt van de ongeopende vaten, daarna is de inhoud los, stuk voor stuk, gescand. Het blijkt dat de som van de los gescande inhoud flink lager is dan de uitkomsten van de bulk-scan. Openmaken en sorteren heeft dus nut. Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om tot een geaccepteerde methode te komen om dergelijk afval te karakteriseren. Internationale acceptatie, validatie van de methode, waaronder correct gebruik van de bulk- en de object-scanner, vergen veel aandacht.

Stabilisatie van radioactief afval

Soms leidt de samenstelling van ongesorteerd radioactief afval tot onvoorziene complicaties. Een bekend fenomeen is de chemische reactie van PVC onder invloed van straling. De producten die daaruit ontstaan, tasten staal- en betonverpakking aan. NRG onderzoekt verpakkingen (bijvoorbeeld keramische of loodmantels) die tegen deze chemische reactie bestand zijn.



Een speciale categorie afval zijn de reststoffen uit nucleaire experimenten. Om deze veilig te kunnen opslaan, is veelal maatwerk nodig. Zo vereisen bijvoorbeeld bestraalde zouten uit het Molten Salt Reactor-onderzoek speciale behandeling voordat het resterende afval geaccepteerd kan worden door COVRA. NRG onderzoekt de mogelijke conversie (bijvoorbeeld via oxidatie) van dit afval naar vormen die wel geschikt zijn voor interim-opslag bij COVRA. Op basis van de eerste resultaten in 2017 zal in 2018 een serie experimenten uitgevoerd gaan worden met (onbestraalde) zouten.

Eindberging

In 2017 liep het door COVRA geleide OPERA-programma af (Onderzoeks Programma Eindberging Radioactief Afval). De afronding trok veel aandacht van de Nederlandse media. NRG participeerde in OPERA, samen met TNO, De TU-Delft, Wageningen UR, de UvA, Deltares en buitenlandse instellingen, zoals de Belgische partner SCK•CEN. Vanuit het onderzoeksprogramma heeft NRG bijgedragen aan de review van de safety case voor de opslag van radioactief afval in de diepe bodem (Boomse Klei). Een

tweede speerpunt betrof het Europese onderzoek naar het vrijkomen van het radioactieve C-14 in de eindbergingsomstandigheden. Het model, dat hiervoor werd ontwikkeld, laat zien dat het niet waarschijnlijk is dat C-14 binnen de vervaltijd door de Boomse Klei kan dringen. De resultaten zullen in 2018 op het afsluitende symposium gepresenteerd gaan worden.

Inventaris gebruikte splijtstof

NRG werkt sinds 2016 aan een verbeterde methode voor het berekenen van de inventaris van gebruikte splijtstof. Dat is namelijk van groot belang voor veiligheidsanalyses voor de opslag van de splijtstof en op de behandeling ervan. Met name voor de zeer langlevende actiniden, zoals americium, dat ontstaat tijdens bestraling van het uranium in de kernreactor, is een nauwkeurige bepaling eerder heel lastig gebleken. In mei 2017 werden de resultaten van een door NRG ontwikkelde methode gepresenteerd op het International Symposium on Reactor Dosimetry. De methode kon op grote belangstelling en waardering rekenen omdat dit de eerste succesvolle methode is, waarmee het gehalte aan americium zeer nauwkeurig berekend kan worden.



GEAVANCEERDE NUCLEAIRE TECHNOLOGIE

Een deel van het Europees ingebedde onderzoek van NRG staat in het teken van de veiligheid van nieuwe generaties kernreactoren. Denk aan snelle reactoren met gesloten splijtstofcycli of aan gesmolten zout reactoren die gebruik maken van thorium als alternatieve splijtstof. De verwachting is dat deze reactoren een rol gaan spelen in een toekomstige CO₂-arme energievoorziening.

Het woord 'snel' slaat op de snelheid van de neutronen in de reactor: snelle reactoren hebben geen moderator die neutronen 'remt'. Een snelle reactor kan het veelvoorkomende maar niet-splijtbare U-238 omzetten in het wel-splijtbare plutonium (Pu-239). Een snelle reactor kan zelfs meer splijtbaar materiaal produceren dan hij verbruikt (kweekreactor). Een snelle reactor kan ook ingezet worden om de hoeveelheid hoog radioactief afval te verminderen. Koelen gebeurt met vloeibaar natrium, vloeibaar lood of helium. De gerealiseerde prototypes zijn voornamelijk uitgevoerd met natrium.

Naast de snelle reactoren waarmee uranium efficiënter kan worden gebruikt dan in de huidige lichtwaterreactoren, wordt wereldwijd ook het gebruik van thorium als splijtstof bestudeerd. Thorium komt veelvuldig voor op de aarde en kan efficiënt gebruikt worden in geavanceerde gesmolten zout reactoren waarvan er enkele in het verleden operationeel zijn geweest.

Gesmolten zout reactoren

Er is wereldwijd grote belangstelling voor gesmolten zout reactoren. Het concept dateert uit de tweede helft van de vorige eeuw, maar is, ondanks zijn aantrekkelijke kanten, niet doorgebroken. Ook de Nederlandse pers volgt de ontwikkelingen nauwgezet en deed verslag van de ontwikkeling van bestralingstechnologie voor gesmolten

zout bij NRG. In april 2017 kreeg NRG toestemming voor de bestraling van een zout-splijtstof mengsel. In augustus 2017 is het bestralings-experiment gestart, het eerste gesmolten zoutexperiment in de wereld sinds de jaren '60 van de vorige eeuw. Er wordt hierbij nauw samengewerkt met JRC Karlsruhe (Duitsland). Het doel is om meer te weten te komen over het gedrag van gesmolten zout onder reactor-omstandigheden en de eigenschappen van het zout na de bestraling te kunnen bestuderen. De eerste on-line metingen hebben laten zien dat het experiment zich ontwikkelt zoals vooraf berekend.

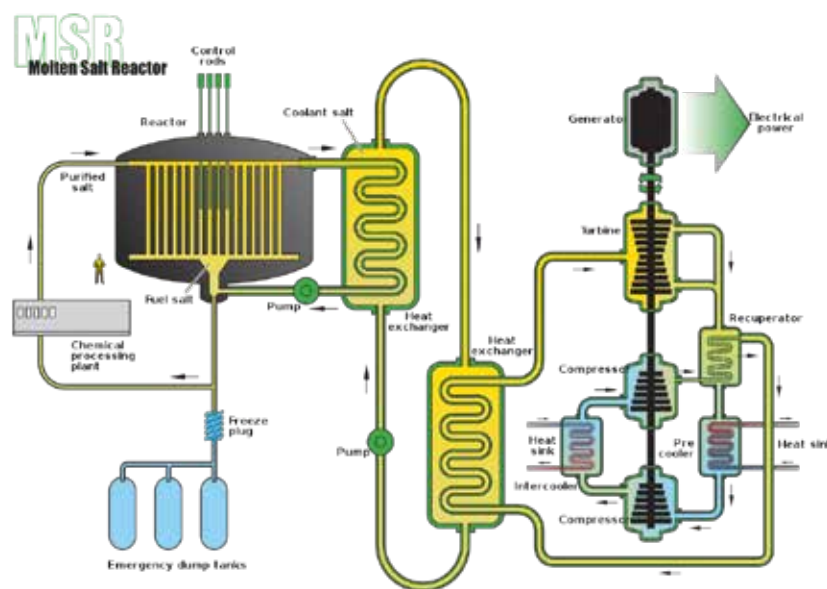
De bevindingen van het SALIENT-experiment zullen in 2018 worden meegenomen in de voorbereidingen van een volgend experiment. Hiervoor werd in november 2017 een nieuwe samenwerkingsovereenkomst gesloten tussen NRG en JRC. In dat experiment zullen met name de chemische reacties tussen het corrosieve zout en verschillende metalen bestudeerd gaan worden. Het gaat om metalen die mogelijk in de toekomstige gesmolten zout reactor als omhullende gebruikt kunnen gaan worden.

In december bracht een afvaardiging van het Chinese onderzoeksinstituut SINAP een bezoek aan NRG. Ook SINAP heeft grote belangstelling voor de SALIENT-experimenten, vooral vanwege de rol van nikkel-legeringen.

SINAP wil deze nikkel-legeringen beschikbaar stellen waarmee NRG de smeltkroezen zal maken. Inmiddels zijn er ook contacten met het gerenommeerde Massachusetts Institute of Technology (MIT) voor participatie, waardoor ook de betrokkenheid van de USA in het verschieft ligt.

Met de TU-Delft werkt NRG sinds 2016 samen om meer inzicht te krijgen in het gedrag van splijtingsproducten in Molten Salt Reactors. Hoewel we weten dat de brandstofsamenstelling en splijtingsproducten elkaar sterk beïnvloeden, is hierover slechts weinig bekend. Deze kennis is noodzakelijk voor het kunnen uitvoeren van veiligheidsanalyses. Door de combinatie van experimenten, berekeningen en modellering kunnen (gevalideerde) thermodynamische databases opgesteld worden. Daarmee kunnen de eigenschappen van splijtingsproducten onder verschillende omstandigheden vastgesteld worden.

De meer praktische kant van de MSR wordt niet uit het oog verloren. Zo wordt een 'fuel salt loop' ontworpen die de gesmolten-zout kringloop onder reactorcondities nabootst. Ideaal voor de kwalificatie van materialen en het verrichten van metingen aan (bijvoorbeeld) brandstofprestaties. De ontwikkeling van de loop is een iteratief proces dat in 2016 is begonnen, doorliep in 2017 en in 2018 voor zover mogelijk afgerond en



gedocumenteerd zal worden. De daadwerkelijke bouw zal afhangen van de (financiële) participatie van andere belanghebbenden.

Metaalgekoelde reactoren

NRG is betrokken bij Europese studies naar de veiligheid van vierde Generatie snelle reactoren met een gesloten splijtstofkringloop. Deze technologie is dicht bij volwassenheid. Sinds de allereerste kernreactor die energie opwekte is wereldwijd al een twintigtal van dit type reactoren in bedrijf geweest. Nieuwe reactoren zijn of worden inmiddels opgestart in Rusland en India. NRG is betrokken bij Europese studies naar geavanceerde splijtstofcycli, het thermo-hydraulische gedrag van vloeibaar metaal en de economische haalbaarheid van het type reactor.

Geavanceerde splijtstofcycli in snelle, metaalgekoelde reactoren kunnen worden ingezet om de hoeveelheid en toxiciteit van radioactief afval te verminderen. NRG onderzoekt de transmutatie van 'langlevend' splijtingsproduct americium door dit respectievelijk in 3 en 15 procent bij te voegen in splijtstof. Door een hernieuwd verblijf in de reactor wordt americium omgezet in minder langlevende actiniden. NRG onderzoekt de beste uitvoering en samenstelling van deze splijtstof (pellets of sphere-Pac-particles?) en buigt zich over het probleem van

eventuele gasvorming.

Door de gebruikelijke technische en logistieke uitdagingen rond dit soort (grensoverschrijdende) nucleaire experimenten, is 2017 vooral benut voor de voorbereidingen. De daadwerkelijke onderzoeken en de review van de resultaten vinden plaats in 2018.

Grenzend aan deze experimenten vinden er EU-gefinancierde studies plaats naar de veiligheid van snelle, metaalgekoelde reactoren. NRG concentreert zich op het modelleren van de warmteoverdracht binnen de inventaris van de reactor. Denk aan de turbulentie van het koelmiddel, aan de koeling van splijtstofelementen en aan de koeling in het reactorvat. Maar NRG kijkt ook naar de warmtehuishouding van het complete systeem, van de kern tot aan de energieconversie loop. De simulatiemethodieken die met dit werk worden ontwikkeld en gevalideerd, kunnen ook voor andere typen reactoren worden benut.

Concreet werkt NRG aan de evaluatie en verdere verbetering van een eerder door NRG ontwikkeld turbulentie warmteoverdracht-model. In 2017 zijn grote stappen gezet, in 2018 volgt verdere evaluatie en ontwikkeling van het model. Daarnaast werkt NRG aan een simulatie van het gedrag (vibraties) van splijtstofelementen in vloeibaar metaal, met speciale aandacht voor 'wire wrapped pins'. In dit type

splijtstofelement is de klassieke afstandhouder vervangen door een om de splijtstofstaaf gewikkelde draad. Doel is een beter begrip van het gedrag van de verschillende ontwerpen voor splijtstofelementen onder normale bedrijfscondities en onder ongevalsomstandigheden. Validatie van dit model wordt in 2018 verwacht. Resultaten worden, bijvoorbeeld, gebruikt voor de MYRRHA reactor die in het Belgische Mol ontworpen wordt.

Verder werkt NRG aan de ontwikkeling en validatie van state-of-the-art thermo-hydraulische modellen van complete systemen die minder conservatief zijn dan de bestaande modellen. Hiertoe worden complete reactorvaten inclusief kern, warmte-wisselaars en pompen gemodelleerd. Er wordt sinds 2016 gewerkt aan CFD-modellen van de Belgische ESCAPE en de Italiaanse CIRCE faciliteiten. In 2017 zijn rekenmodellen hiervoor afgemaakt. De uitkomsten van de modellen werden vergeleken met de eerste beschikbare experimentele resultaten. Op enkele details na, werken de modellen naar tevredenheid voor de reeds beschikbare data. Verwachting is dat in 2018 meer experimentele data beschikbaar komen zodat verdere validatie van de opgezette modellen zal kunnen plaatsvinden. De kennis die NRG door de jaren heen heeft opgebouwd rond het gedrag van metaalgekoelde reactoren, is in internationaal verband gedeeld tijdens lezingen bij het Von Karman instituut in Brussel.

Implementatie van metaalgekoelde reactoren vereist gedegen kennis van het thermo-hydraulisch gedrag van zulke reactoren. Een eerdere roadmap voor dit vakgebied in Europees verband is in 2017 geactualiseerd met een vooruitblik tot 2025. Daarnaast is in 2017 een economische analyse gepubliceerd voor co-generation (warmte/kracht) met de 'kleine' metaalgekoelde ALFRED-reactor, een Europees initiatief dat mogelijk in Roemenië gedemonstreerd gaat worden.

PUBLIEKE TAAK EN PUBLIEKSVORLICHTING

NRG focust op nucleaire vraagstukken die relevant zijn voor de Nederlandse samenleving. Voor het aspect van kennisoverdracht uit het onderzoeksprogramma zijn er in 2017 door NRG op het publiek gerichte communicatie-activiteiten ontplooid zoals deelname aan publieke debatten en het begeleiden van studenten en scholieren.

Veel aandacht was en is er in de Nederlandse media voor het onderzoek naar de Molten Salt Reactors (de SALIENT-bestralingen). Hiervoor hebben verschillende medewerkers van NRG de (schrijvende) pers, waaronder NRC en Vrij Nederland, te woord gestaan.

Ook in 2017 heeft NRG gastlessen op middelbare scholen in de regio Alkmaar verzorgd over natuurlijke radioactiviteit, medische toepassingen van radioactiviteit en straling en stralingsbescherming. Daarnaast zijn er gastlezingen gehouden over kernfusie bij de TU-Eindhoven en over de

technologische aspecten van kernenergie aan de Landbouw-universiteit van Wageningen. 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 organiseerde in 2017 een aantal publieke bijeenkomsten over kernenergie en nucleaire technologie. Via deze weg stimuleert NRG ook jonge wetenschappers om te netwerken. KIVI/NNS organiseerde in 2017 een symposium over de nasleep van de Klimaatakkoorden van Parijs, een symposium over '75 jaar kernreactoren' en een symposium over het

onderzoek naar de eindberging voor radioactief afval (OPERA) waaraan NRG een belangrijke bijdrage geleverd heeft. Daarnaast is er een bezoek gebracht aan de Mülheim-Kärlich kerncentrale in Duitsland die momenteel ontmanteld wordt. Met het bestuur van de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging (KNCV) is een bijeenkomst gehouden over de rol van radiochemie en het belang ervan in het curriculum van diverse universitaire opleidingen. Vanaf december 2017 participeert NRG namens de NNS ook in de raad van bestuur van de European Nuclear Society.



NRG Petten

Westerduinweg 3
P.O. Box 25
1755 ZG Petten
t +31 (0)224 564950

NRG Arnhem

Utrechtseweg 310 - R42
P.O. Box 9034
6800 ES Arnhem
t +31 (0)26 3568524

www.nrg.eu



www.nrg.eu