

**Thorium**

**Numerieke wiskunde**

**Patiëntdosimetrie**

**Computersimulaties**

**Straling**

**myMUSCLE**

**Radionucliden**

**Workforce**

**Ageing**

**Radioactief afval**

**Transmutatie**

**Materiaalvermoeiing**

# Onderzoeksjaarverslag NRG 2020

*Nucleaire professionals aan het woord*



**Nuclear. For life.**



## Voorwoord:

# Kernenergie kan ons helpen om klimaatdoelen te halen

*In 2020 werd de mens met zijn neus op de feiten gedrukt. Enorme bosbranden op meerdere continenten, ontdooiende permafrostbodems in de noordelijke gebieden en steeds sneller smeltende ijskappen. De bron van de problemen is menselijk handelen, het aandeel door de mens veroorzaakte CO<sub>2</sub> in de atmosfeer is aantoonbaar. En daar ligt ook de oplossing: verminder de CO<sub>2</sub> uitstoot en doe dat snel.*

Zorgen over de klimaateffecten op onze leefomgeving eisen inmiddels veel van onze aandacht op. Een snel veranderend klimaat laat duidelijk zien hoe kwetsbaar wij zijn. Maar de mens zou de mens niet zijn als hij geen oplossing vindt. Dat bleek ook bij die andere grote dreiging in 2020: COVID-19. Dankzij de inzet van wetenschappers over de hele wereld kon de mensheid in een recordtijd een effectief en flexibel wapen ontwikkelen in de strijd tegen de COVID-19-pandemie: het mRNA-vaccin. Ongetwijfeld kan de mens eenzelfde inventiviteit en creativiteit laten zien bij het bestrijden van de mondiale klimaatdreiging. Want, zoals ingenieurs plegen te zeggen, onder druk wordt alles vloeibaar.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot moet binnen een paar decennia terug naar bijna nul. Daarvoor moet de energievoorziening drastisch worden veranderd. De eerste stappen zijn gezet met de vervanging van kolencentrales door duurzame bronnen zoals zon en wind. Er zullen nog vele stappen moeten volgen.

Klimaatneutrale kernenergie kan ons helpen met die vervolgstappen. Kernenergie heeft enkele kenmerken die haar aanvullend maken op duurzame bronnen: landschappelijk goed inpasbaar en 24/7 inzetbaar, onafhankelijk

van de beschikbaarheid van wind en zon. Kernenergie is een bewezen en veilige technologie met veel perspectieven voor de toekomst.

Op verzoek van de Tweede Kamer heeft KPMG een marktconsultatie uitgevoerd naar de bereidheid om te investeren in kerncentrales in Nederland. Die bereidheid is er, uiteraard onder voorwaarden. De benodigde kennis, kunde en technologie zijn door jarenlang onderzoek en ontwikkeling paraat in Petten, Delft, Almelo, Borssele en .... Den Haag! Immers, het huidige onderzoek bij NRG vindt zijn oorsprong in de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie uit 1946. Vanaf dat jaar hebben vele generaties politici – ondanks de wisselende opinies over kernenergie – geld vrijgemaakt voor nucleair onderzoek. Nederland kan zich hiermee gelukkig prijzen. Deze langjarige overheidsbetrokkenheid betaalt zich uit.

Nederland beschikt nu kernenergie weer actueel wordt over een zeer vitale internationaal gewaardeerde nucleaire sector. Mede dankzij deze overheidsgefinancierde nucleaire kennis heeft Nederland een goede reputatie opgebouwd bij het bouwen en bedrijven van de kerncentrales. Borssele kan op basis van

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.





Geert-Jan de Haas:

“ *Klimaatneutrale kernenergie kan een waardevolle bijdrage leveren aan de CO<sub>2</sub>-vrije energiemix van morgen.* ”

deze kennis en kunde nog twee decennia langer door dan gepland met het maken van klimaatneutrale stroom.

Elke dag doet NRG onderzoek naar nieuwe innovatieve nucleaire technologie. Denk aan de gesmolten zout-thoriumcyclus. Nieuwe veilige technologie die in de toekomst een waardevolle bijdrage kan leveren met klimaatneutrale energie en een efficiënter gebruik van grondstoffen. Uranium is nu al een bron voor vele honderden jaren klimaatneutrale energie, met de inzet van thorium wordt dat zelfs duizenden jaren. Kortom, kernenergie kan de overstap naar een CO<sub>2</sub>-vrije energiehuishouding in 2050 versnellen en vergemakkelijken.

Wat we in dit verslag slechts zijdelings aanstippen, is de zeer belangrijke spin-off van het onderzoekswerk met de Hoge Flux Reactor (HFR). Elke dag worden tienduizenden zieke mensen (kanker en hart- en vaatziekten) onderzocht en behandeld met medische isotopen die zijn gemaakt met de HFR.

Hou bij het lezen in gedachten dat onze succesvolle (wereld)productie van medische isotopen rechtstreeks voortkomt uit decennia-lang nucleair onderzoek in Petten en Arnhem. Uiteraard weet iedereen die te maken krijgt met radiodiagnostiek en -therapie hoe belangrijk deze spin-off is.

Nu ook het klimaat op de behandeltafel ligt, groeit de maatschappelijke belangstelling voor ons klassieke nucleaire onderzoek. Bij NRG merken we dat aan de vragen die wij krijgen uit de politiek en de samenleving. Ook kiezen jonge (en ook oudere) mensen met verschillende professionele achtergronden welbewust voor een carrière in de nucleaire technologie. Zij willen bijdragen aan een oplossing en hun ambities zijn groot.

Zij komen zelf aan het woord in dit onderzoeksjaarverslag.

Geert-Jan de Haas  
Programmamanager Nucleair Onderzoek

## Internationale aandacht voor waardevol NRG-onderzoek

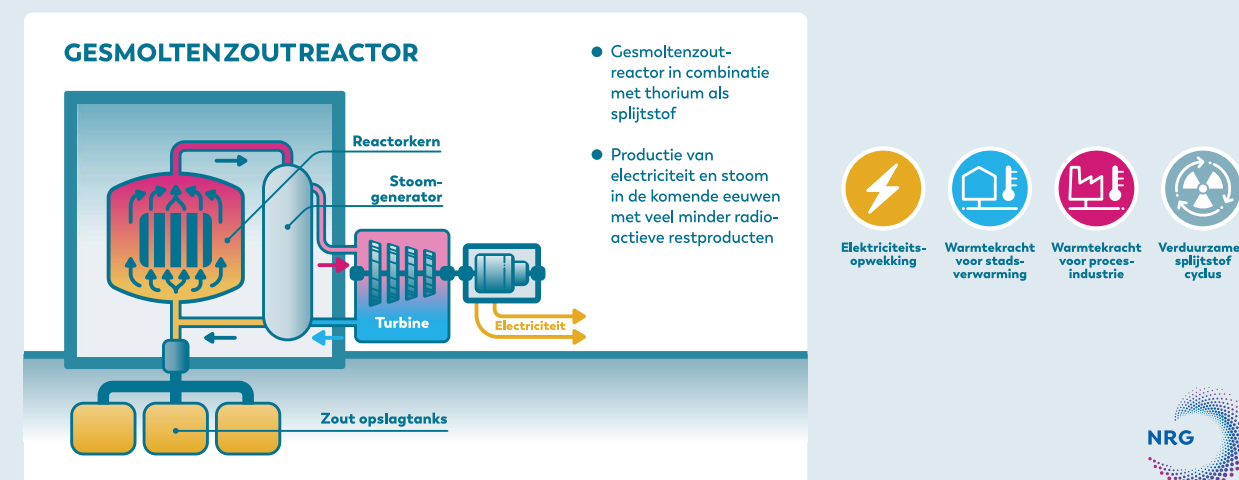
# Gesmolten zout (thorium) reactor

Senior research consultant Ralph Hania houdt zich bij NRG bezig met de gesmolten zout reactor (molten salt reactor of MSR). “Het is de ideale reactor waarin je thorium als splijtstof kunt inzetten.” Het concept stamt uit de jaren '50 en '60 van de vorige eeuw en trekt de laatste jaren weer veel aandacht vanwege de mogelijkheden in kader van de energietransitie. “De kennis moet opnieuw worden opgebouwd.”

Hania: “De gesmolten zout reactor heeft in Oak Ridge in de Verenigde Staten echt gedraaid, al was dat een kleine testreactor. Helaas legde het concept het af tegen de drukwaterreactor die in die periode al commercieel doorbrak.” Een vergelijking met de auto-industrie dringt zich op: de elektrische auto en de auto met verbrandingsmotor hadden begin 20ste eeuw gelijke kansen, maar de verbrandingsmotor won de race. Inmiddels is er een enorme dynamiek ontstaan rond de gesmolten zout reactor vanwege een paar grote voordelen. Zo zijn de voorraden thorium op aarde vele malen groter dan de voorraden uranium.

“Bovendien is de thoriumreactor veel zuiniger met brandstof, maakt minder langlevend afval en de gesmolten zout systemen zijn bijna drukloos, wat ze veiliger maakt.”

In de gesmolten zout reactor circuleert een mengsel van gesmolten zout met splijtstof dat tevens dient als koelmiddel. Een kern met splijtstofelementen ontbreekt. Omdat dit concept in de vergetelheid raakte, zijn we de kennis erover kwijtgeraakt. En we missen praktijkervaring. “Dat heeft in dit geval ook een voordeel: omdat we nu weer overnieuw beginnen, kunnen we van het begin af aan rekening houden met thorium als brandstof.”



Dat is kansrijker dan achteraf bestaande concepten, zoals de drukwater kerncentrale, hiervoor geschikt maken.

Bij de gesmolten zout reactor gaan idealisme en realisme hand in hand. Gedreven kleine bedrijven willen de markt op, overheden en toezichthouders willen zekerheden. “Wij verzamelen de data waarnaar zowel enthousiaste start-ups als overheden op zoek zijn.” Deze dynamiek slingert de vraag naar kennis aan. “En die kennis zit onder andere bij NRG omdat NRG relatief vroeg – in 2015, bij de eerste belangstelling – begonnen is met het opbouwen van kennis. Door onze nieuwe kennis te combineren met de al bestaande kennis van splijtstofgedrag in een stralingsveld, hebben wij een voorsprong en zijn de ogen van de wereld op Petten gericht. Op dit moment, zeg ik er meteen bij.” Want inmiddels wordt in de Verenigde Staten ook hard aan een MSR bestralingsprogramma gewerkt.

Hoe gedragen materialen zich in de reactor? Welke radioactiviteit ontstaat in de reactor? Wat gebeurt daarmee en waar blijft die?

Hoe maak je de beste splijtstof? Het ontwikkelen van deze kennis duurt lang. “Het gaat om de fundamentele kennis die nodig is voor een volledig begrip van de (thorium) gesmolten zout reactor.”

In de HFR worden daarvoor reactoromstandigheden nagebootst. Een monsterhouder met daarin met zout gevulde grafietscapsules werden onder de naam SALIENT-01 twee jaar lang (2017- 2019) blootgesteld aan neutronenstraling.

Na bestraling kon eind 2019 een begin gemaakt worden met het oogsten van de eerste experimentele data. Dat betekende dat het analyseren van de monsters (het nabestralingsonderzoek) in één keer goed moest gaan, anders waren die twee jaar in de reactor en jaren van voorbereiding voor niets geweest, vertelt collega Dirk Visser, chemisch technoloog en projectmanager.

Door de gevoeligheid van het zout voor vocht en zuurstof zijn inerte condities wenselijk, wat het nabestralingsonderzoek extra complex maakt. Eén van de te onderzoeken aspecten



**Ralph Hania:**

“ Als we de fluorproductie helemaal begrijpen, kan de industrie de veiligheid van de gesmolten zout reactor nog verder vergroten. ”

ontstaan. Omdat dit gas extreem corrosief is, wil je het ontstaan zoveel mogelijk beperken of helemaal voorkomen.”

Om het proces van het ontstaan van dit fluor-gas beter te kunnen begrijpen, is meer onderzoek nodig. “In het SAGA experiment willen we de fluorgasproductie maximaliseren om te begrijpen welke factoren een rol spelen.” Ook vergelijkt NRG verschillende zouten met elkaar. “De vergelijking van de eerste vijf zoutmonsters laat grote verschillen zien.” Ook onderzoekt NRG of fluorgas weer recombineert met zout als de temperatuur stijgt. “Als we de fluorproductie helemaal begrijpen, kan de industrie de veiligheid van de gesmolten zout reactor nog verder vergroten.” Ook zal NRG in de nabije toekomst een materiaalonderzoek starten (SALIENT-03) om materialen te kunnen selecteren die tegen de agressieve (zout, fluor) omstandigheden in de reactor bestand zijn.

**Wanneer breekt de eerste start-up door met een gesmolten zout reactor?**

Hania: “Ik denk dat ze na 2040 een heel eigen rol gaan krijgen. Vanwege de hoge temperaturen zijn ze bijvoorbeeld interessant voor waterstofproductie en andere proces-industrieën. En omdat ze klein en drukloos zijn, kunnen ze goed ingepast worden in intensief benutte gebieden dicht bij steden.”

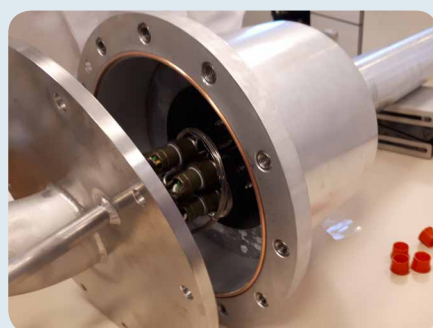
Voor het zover is, zal er nog het nodige onderzoek moeten worden verricht. De uitgangspositie van NRG om in dit onderzoek een prominente rol te gaan spelen is uiterst gunstig.

was de verspreiding van splijtingsgassen. Die kunnen een negatieve impact hebben op de neutroneneconomie van de reactor. Bovendien kunnen ze leiden tot drukopbouw. “Het ‘doorprikken’ (puncturing) van de monsterhouder om via de opening het splijtingsgas te bemonsteren was dus behoorlijk spannend,” aldus Visser. “Bij falen ontsnapt het gas en is er geen mogelijkheid meer om de cruciale data zeker te stellen. We hebben flink ge-oefend op dummies.” Het lukte en de gemeten hoeveelheid splijtingsgassen bleek overeen te komen met praktisch volledige vrijzetting uit het zout. “Uniek. Het zijn de eerste metingen die inzicht geven in het gedrag van splijtingsproducten in gesmolten zout. Een positieve uitkomst voor de verdere ontwikkeling van de MSR-technologie.”

Inmiddels loopt er alweer een nieuw NRG-onderzoek wat grote belangstelling wekt: het SAGA radiolyse-onderzoek. Hania: “Een gesmolten zout reactor bedrijf je bij temperaturen tussen 500 en 700 graden Celsius.” Maar als het bestraalde, radioactieve zout af zou koelen naar kamertemperatuur (bijvoorbeeld als de reactor stilvalt), dan verbreken er bepaalde chemische verbindingen in het zout. “Dat noemen we radiolyse. In die situatie, die van toepassing kan zijn op het opslaan en verwerken van bestraalde splijtstof en lekkage van zout uit de reactor kern, kan er fluorgas

**De SAGA-faciliteit wordt ingezet om fluorgas-productie in een stralingsveld te kwantificeren**

Links de ‘kop’ van het experiment met binnenin de druksensoren waarmee de gasproductie wordt gevolgd; rechts een capsule gevuld met fluoridezout (in dit geval lithium fluoride).





# Bio-kinetische modellering

## Hoe gedraagt een radioactief medicijn zich in mijn lichaam?

Ramona Bouwman houdt zich vanuit een achtergrond in technische natuurkunde bezig met bio-kinetisch modellen, het simuleren van het gedrag van radioactieve stoffen in het menselijk lichaam. “Deze modellen voorspellen wat er in het lichaam gebeurt tijdens een behandeling, houden rekening met de individuele kenmerken van een patiënt én de eigenschappen van het medicijn.” Zo kan een arts de behandeling van bijvoorbeeld kanker optimaliseren. Bijkomend voordeel: het computermodel kan mogelijk in de toekomst dierproeven gedeeltelijk gaan vervangen.



**Ramona Bouwman:**

“Iedere patiënt is anders. Juist daarom is het zo waardevol dat we in het bio-kinetische model ook de persoonlijke kenmerken van de patiënt kunnen vastleggen.”

Het bio-kinetisch model waar Ramona Bouwman aan werkt, bevat alle relevante organen van brein tot de nieren in de vorm van ‘legobouwstenen’. Ook een tumor is zo’n bouwsteen. En al die bouwstenen zijn met elkaar verbonden. Haar stip op de horizon is om alle relevante menselijke organen in hun onderlinge samenhang tot op celniveau in het bio-kinetisch model op te nemen. Bouwman: “Voor de milt heb ik de opname van radioactief medicijn gemodelleerd en dit vormt het bouwblok voor de andere organen.”

Als het model klaar is, kan het voor talloze nucleair geneeskundige behandelingen voorspellen wat er in het lichaam gebeurt als je een medicijn toedient. Waar gaat de radioactiviteit heen? Komt het op de juiste plek in de tumor? Zijn er ongewenste plekken waar schade ontstaat? En wat gebeurt er als de dosering hoger of lager is? Of als de arts een andere isotoop gebruikt?

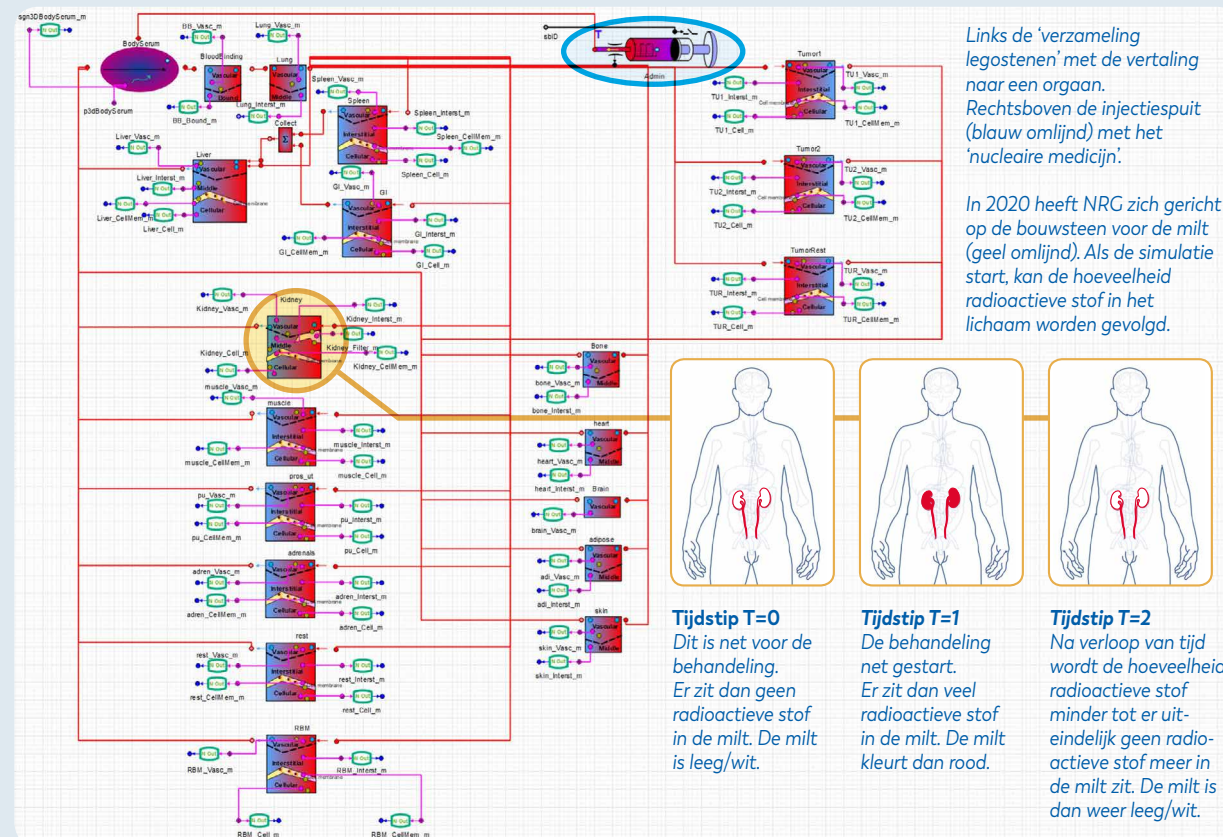
Het model wordt ontwikkeld in het softwareplatform PhysPK en maakt zichtbaar hoe specifieke tumoren en organen het toegediende nucleaire medicijn opnemen. Dat medicijn bestaat uit een molecuul (een peptide) dat wordt gecombineerd met een medisch isotoop (nucleair medicijn). Deze behandeling wordt daarom peptide receptor radionuclide therapie (PRRT) genoemd. “In de tumorcellen zitten receptoren waar de specifieke peptiden zich aan binden. Als we deze peptiden vooraf combineren met een medische isotoop, zullen die zich dus samen

hechten aan de receptoren. Vervolgens wordt er een signaal afgegeven ‘neem mij op’ en gaat het radioactieve medicijn de cel in.” Het radioactieve medicijn beschadigt vervolgens de tumorcel. “Belangrijk hierbij is dat het radioactieve verval zo veel mogelijk in de tumorcellen plaatsvindt en zo min mogelijk in gezonde cellen. Dan blijven nevenschade en bijwerkingen beperkt.”

Voor een optimale behandeling is het van belang om voor iedere patiënt de juiste dosering te bepalen. Bouwman: “Iedere patiënt is anders. Juist daarom is het zo waardevol dat we in het bio-kinetische model ook de persoonlijke kenmerken van de patiënt kunnen vastleggen.” Het model kan vervolgens gebruikt worden om het effect van de behandeling te voorspellen. “Dit helpt om toe te werken naar ‘personalized medicine’, een op het individu toegesneden medische handeling.” Daarnaast kunnen bio-kinetische computersimulaties in de toekomst gaan helpen bij onderzoek naar nieuwe nucleaire medicijnen. “Het computermodel kan bijdrage om van nieuwe medicijnen de effecten op het lichaam te voorspellen. Ze kunnen mogelijk zelfs een gedeelte van de proeven op mensen en dieren gaan vervangen.”

Voordat de modellen daadwerkelijk in het ziekenhuis en bij onderzoek gebruikt kunnen worden, is nog veel aanvullend onderzoek nodig. “Alles wat je modelleert, moet je ook toetsen aan de werkelijkheid. Om de voorspelling van het model te kunnen vergelijken met patiënten data, ga ik samenwerken met onder meer het Nederlands Kanker Instituut (NKI).” In 2021 zal deze validatie starten.

### Bio-kinetisch model





De Fingerspitzen van de nucleaire zorgprofessional:

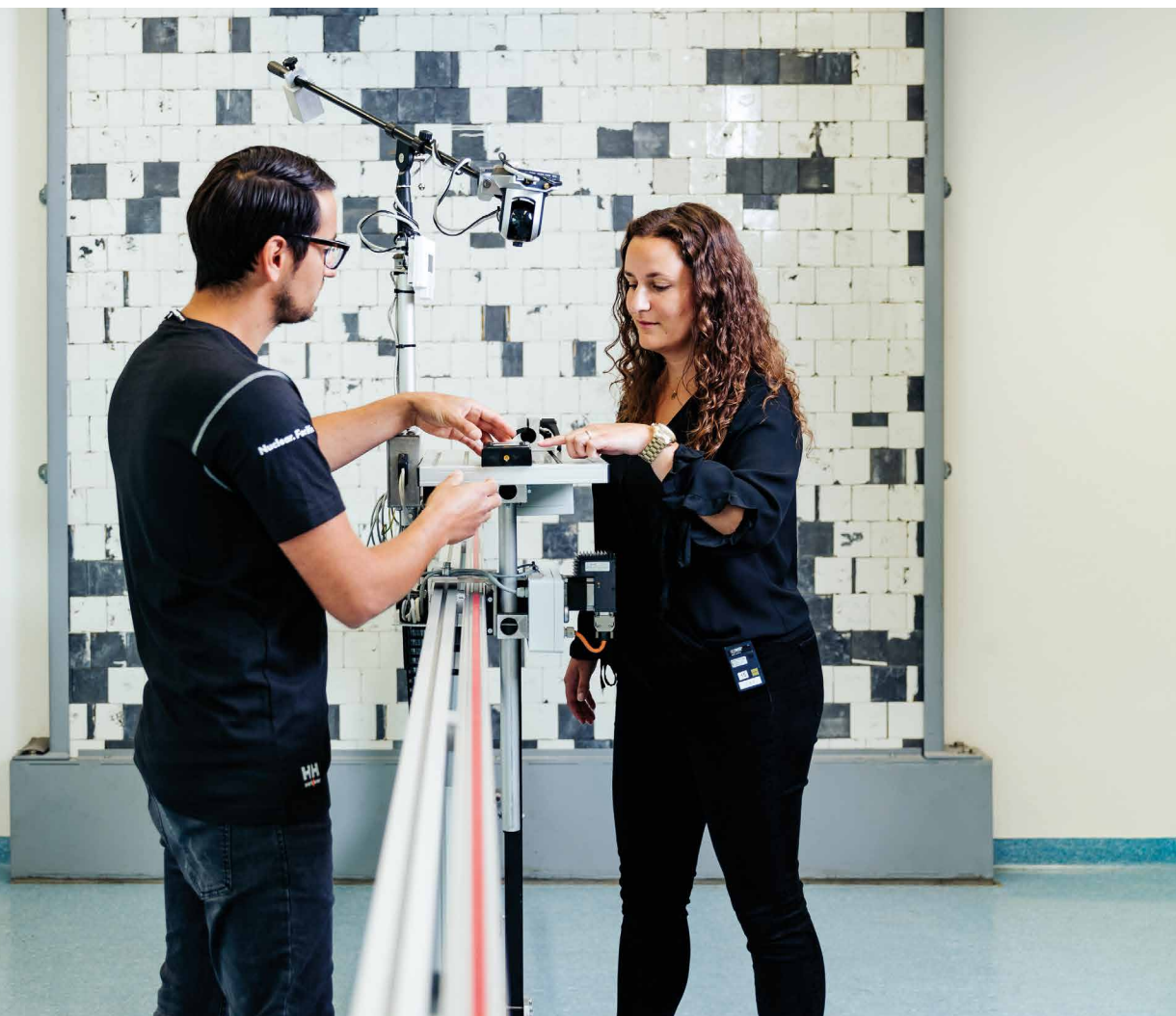
## Zes keer hogere dosis dan gedacht

Robert Kollaard heeft een achtergrond als klinisch fysicus en werkt bij NRC. Hij houdt zich bezig met dosimetrie: de registratie van stralingsdosis op het lichaam van nucleaire zorgprofessionals. En hij adviseert mogelijke maatregelen om de opgelopen stralingsdosis te verminderen. De natuurkundige is zelf afkomstig uit de gezondheidszorg.

Artsen, laboranten en verpleegkundigen worden bij hun werk regelmatig blootgesteld aan radioactiviteit en straling. Denk aan het bereiden en toedienen van radioactieve stoffen bij kankerbestrijding of de bediening

van een toestel (röntgen, PET-CT). Wie niet de juiste voorzorgen in acht neemt, wordt onnodig blootgesteld aan straling. Soms leidt dat tot gezondheidsrisico's.

Kalibratie van een dosistempometer in Petten



**Robert Kollaard:**

“Staar dreigde onder radiologen een beroepsziekte te worden. Met name de oogleden is gevoelig voor straling.”

Vingertoppen lopen vaak de meeste straling op bij het hanteren van preparaten en injectiespuiten.”

Daarom wordt een ringdosimeter aan de wijsvinger gedragen. “Maar zelfs die plek blijkt niet representatief en onderschat de maximale dosis mogelijk met een factor zes!” Een te hoge blootstelling van de huid kan leiden tot een ontsteking van de huid (radio-dermatitis).

Daarbij spelen ook de razendsnelle ontwikkelingen in de radiofarmacie een rol. Bij nieuwe isotopen is er weinig bekend over de dosis die behandelaars aan hun handen ophopen. “Zo doen wij een pilot study naar het toepassen van de nieuwe isotopen gallium-68 en lutetium-177 voor de diagnose en behandeling van prostaatkanker.”

NRC onderzoekt samen met het Europese dosimetrie-platform EURADOS en de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS) best-practices rondom extremitetendosimetrie. Belangrijk om de blootstelling van de medewerker te beperken zijn de toepassing van afscherming, het nemen van afstand en het beperken van de blootstellingstijd. “Het werken met pincetten helpt al, automatisering nog beter. Injectieautomaten kun je onder beschermende omstandigheden vullen om daarna de patiënt op afstand te injecteren.”

In 2021 zal een overzichtartikel worden gepubliceerd rondom extremitetendosimetrie in de nucleaire geneeskunde.

Radiologen en cardiologen werken regelmatig in het stralingsveld van doorlichttoestellen. “Het plaatsen van een pacemaker vindt bijvoorbeeld plaats met ondersteuning van een röntgentoestel.” Ze worden tijdens hun werk dus aan (röntgen)straling blootgesteld. “Met name de oogleden is gevoelig voor straling. Toen bleek dat onder radiologen staar min of meer een beroepsziekte dreigde te worden, is de dosislimiet voor de oogleden naar beneden bijgesteld, van 150 millisievert per jaar naar 20.” NRC is vervolgens betrokken om te bepalen hoe in de praktijk met deze forse verlaging moet worden omgegaan. “Uiteindelijk heeft dit geleid tot een nieuwe nationale richtlijn die beschrijft welke voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen.”

Nucleair medisch personeel draagt een dosimeter op de borst als uit de risico-inventarisatie blijkt dat de mogelijk opgelopen dosis richting de wettelijke norm gaat. “We weten echter dat op die plek niet altijd representatief wordt gemeten.” Daarom is er specifiek aandacht voor de handen (in jargon: extremiteten). “Handen komen dicht bij radioactieve bronnen en lopen dus meer dosis op dan andere lichaamsdelen.” Omdat de huid van de hand beter tegen straling kan dan de oogleden, ligt de limiet veel hoger: 500 millisievert. “Maar we weten ook dat de dosis op de hand niet homogeen verspreid is.



Praktijkennis Ageing interessant voor nieuwbouw

# NRG neemt deel in internationaal Ageing-program IAEA-IGALL

Manager Nuclear Compliance and Projects Frederic Blom is bij NRG dé expert op het gebied van 'veroudering' van kerncentrales. Een onderwerp dat in veel landen hoog op de agenda staat. Het atoomagentschap van de Verenigde Naties IAEA coördineert het langlopende programma International Generic Ageing Lessons Learned for Nuclear Power Plants (IGALL) waar ook NRG in deelneemt. "Landen delen in IGALL hun kennis en methoden over verouderingsbeheersing. Dat zal tot nieuwe internationale richtlijnen leiden, relevant voor bestaande én nieuwe kerncentrales."

Door namens Nederland deel te nemen in internationale programma's zoals IGALL verzekert NRG zich van een positie op de eerste rij als het gaat om delen van verouderingskennis. IGALL beslaat drie deelterreinen die van belang zijn bij veroudering van kern-

centrales: elektrische installatie, civiele werken en mechanische componenten. NRG is vooral expert op dat laatste terrein. Blom: "Denk aan vermoeiing in componenten als leidingen of verbrossing van reactorvatstaal onder invloed van neutronenstraling."

Spaanse kerncentrale in Guadalajara de Trillo



**Frederic Blom:**

*“ Door kennis van veroudering en de manier waarop je die beheerst in te brengen in het ontwerpproces, krijg je nieuwe kerncentrales die nóg veiliger zijn. ”*

IGALL is om meerdere redenen interessant voor Nederland. "Overall in de wereld – ook in Nederland – besluiten regeringen om kerncentrales langer in bedrijf te houden."

Ze zijn voor een bedrijfsduur van veertig jaar ontworpen, maar blijken door hun conservatief ontwerp in de praktijk veel langer mee te kunnen. "Dat dit veilig kan, moet je natuurlijk wel klip en klaar kunnen aantonen. De Internationale kennis uit IGALL helpt met de onderlinge vergelijking van methodes van bewijsvoering." Hieruit groeit een internationale standaard. "Bij NRG hebben wij onze werkwijze hier inmiddels al op aangepast en is ook het LTO onderzoek gestructureerd met behulp van IAEA en IGALL richtlijnen."

Ook nieuwe kerncentrales hebben baat bij IGALL. "Door kennis van veroudering en de manier waarop je die beheerst in te brengen in het ontwerpproces, krijg je uiteindelijk nieuwe kerncentrales die nóg veiliger zijn." Of, kort gezegd: je gebruikt ervaringen in oude centrales om nieuwe centrales veiliger te maken. "Denk aan het opstellen van programma's voor verouderingsbeheersing en analyses voor ontwerp levensduurbepaling."

Nu vanwege de energietransitie de belangstelling voor mogelijke nieuwbouw van kerncentrales ook in Nederland weer groeit, is het belangrijk dat ook wij hier actuele kennis

van hebben. "Dat maakt ons als land onafhankelijker van de industrie en van expertise van buurlanden. Ook voor het langer in bedrijf houden van de Hoge Flux Reactor en de nieuw te bouwen PALLAS-reactor is deze kennis belangrijk."

Uiteraard kom je niet zomaar op die eerste rij terecht. "NRG heeft van oudsher een gedegen reputatie, onder meer opgebouwd als inspecteur van kerncentrales over de hele wereld." Die ervaring, gecombineerd met eigen onderzoek en ontwikkelwerk geeft NRG haar sterke positie in de nucleaire wereld. "We worden daardoor vaak geraadpleegd over mechanische veroudering in kerncentrales." Zo was NRG betrokken bij de bewijsvoering voor de bedrijfsduurverlenging van kerncentrale Borssele tot 2034. "Zelfs tot in Argentinië weten ze ons te vinden. En we zijn betrokken bij het Long Term Operations project van de Spaanse kerncentrale in Guadalajara de Trillo."

In 2020 is fase 5 van IGALL-programma van start gegaan. NRG draagt hieraan bij op het gebied van vermoeiing (zie ook het artikel waarin Marieke Hannink 'Vermoeiing' toelicht). Naast NRG levert ook de exploitant van kerncentrale Borssele EPZ een bijdrage aan IGALL. De ANVS draagt financieel bij zodat het IGALL-programma vanuit Nederland breed ondersteund wordt.



# Vermoeiing in staal

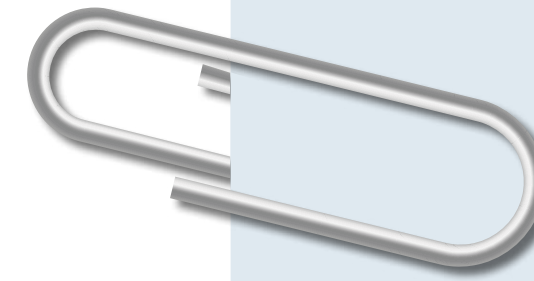
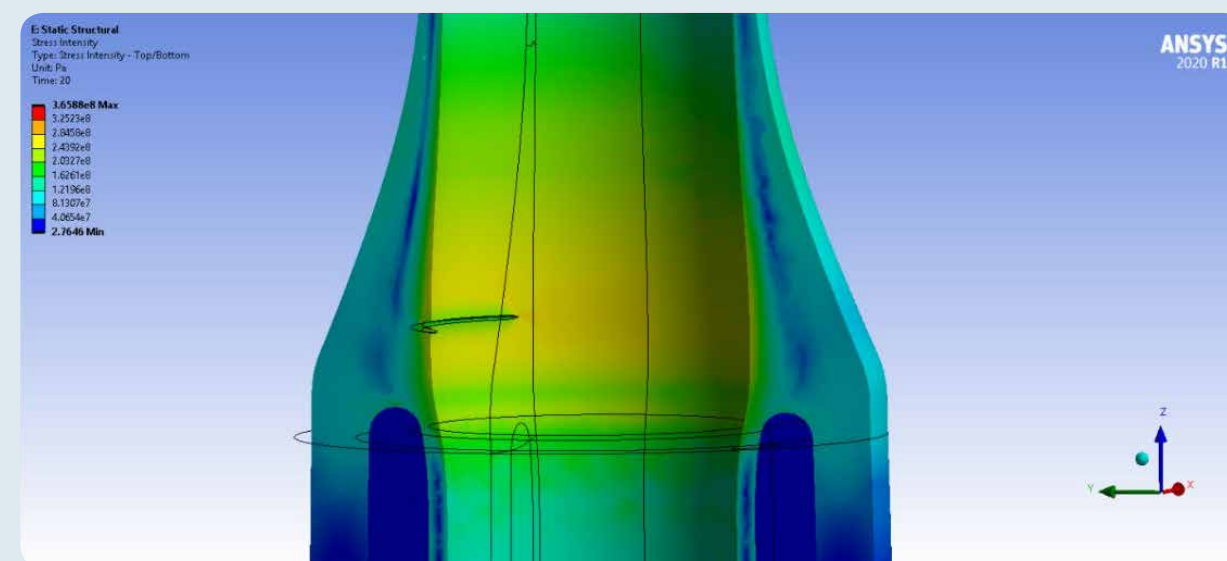
## Computersimulatie maakt verschil tussen normberekeningen en realiteit zichtbaar

Marieke Hannink is werktuigbouwkundig ingenieur en gespecialiseerd in het modelleren van vermoeiingsverschijnselen in staal. “Door wisselende thermische belasting en door inwerking van omgevingsinvloeden, wordt staal na verloop van tijd zwakker.” Er zijn normen die bepalen wanneer je ervanuit moet gaan dat staal ‘moe’ wordt. Maar is dat ook zo? “Door componenten in de computer te modelleren kun je nauwkeurig het verschil tussen norm en werkelijkheid berekenen.”

Iedereen kent het verschijnsel. Vouw een paperclip open en beweeg een uiteinde enkele keren flink op en neer: het breekt af. “Maar beweeg je het pootje maar een klein stukje, dan moet je dat misschien wel dertig keer doen voor er breuk optreedt.” Dus: de manier van belasten bepaalt de mate en het tempo van vermoeiing.

Zo bepaalt het tempo en de mate van vermoeiing ook de restlevensduur van stalen onderdelen in een kerncentrale. “NRG wil de conservatieve normen voor levensduur vergelijken met de werkelijke levensduur. Dat verschil geeft beter inzicht in de restlevensduur van een component als je de centrale veilig langer in bedrijf wil houden.”

Berekeningsresultaat voor de vermoeiingsbeoordeling van een sproeistomp uit een kerncentrale



Marieke Hannink:

“ Door het verschil tussen de norm en de werkelijkheid inzichtelijk te maken voorkom je dat een nog in goede conditie verkerende kerncentrale afgeschreven wordt. ”

In het verleden werden kerncentrales ontworpen voor een bedrijfsduur van veertig jaar. Daar gaan de gestelde normen dus van uit. Echter, door nieuwe inzichten (klimaat!) is het wenselijk ze langer open te houden. En dat kan ook.

“De normen die worden gebruikt voor het ontwerp van kerncentrales, bevatten vaak veel conservatisme.” Dat betekent dat er flink wat ruimte zit tussen wat de norm voorschrijft en het moment waarop daadwerkelijk vermoeiing optreedt. Om dat uit te leggen, grijpt Hannink terug op het voorbeeld van de paperclip. “Het kan dus zo zijn dat de norm zegt dat na vijf kleine bewegingen de paperclip moet worden weggegooid. En dat terwijl het pootje in de praktijk pas na dertig rukjes afbreekt. Dat verschil willen wij dus kwantificeren.”

En dat kan door de ‘paperclip’ in de computer te modelleren, met al zijn eigenschappen en alle belastingen die erop uitgeoefend worden. “Door het verschil tussen de norm en de werkelijkheid inzichtelijk te maken, voorkom je dat je componenten in een kerncentrale onnodig vervangt. Of dat je een nog in goede conditie verkerende kerncentrale afschrijft.”

De industrie zou dus erg geholpen zijn met goede modellen waarin je thermische

belasting (zoals door koelmiddel) en omgevingsvermoeiing in stalen componenten kunt simuleren.

“NRG is begonnen met het modelleren van een ‘proefstaafje’. Dat is een staalmonster waarvan precies bekend is wanneer het door een wisselende trekbelasting vermoeid raakt en bezwijkt. Modelresultaten en praktijk kwamen precies overeen.”

Daarna ging NRG complexere structuren modelleren, zoals een sproeistomp. Daar worden praktijkdata op losgelaten uit de procesmonitoring- en meetsystemen van een echte kerncentrale. Zo kan uitgerekend worden wanneer de sproeistomp door vermoeiing zal falen.

“De modellen zijn de afgelopen jaren verfijnd en gevalideerd zodat er nu betrouwbare berekeningen mee kunnen worden gedaan.” Uiteindelijk moeten de modellen – naast de norm – kunnen uitrekenen wanneer je iets zou moeten vervangen.

De Nederlandse overheid investeert in deze kennis bij NRG, vanwege haar ‘onafhankelijkheid’. “Als land wil je onafhankelijk zijn van de industrie of van andere landen als je de veiligheid van nucleaire installaties gaat beoordelen.”



Nauwkeurig inzicht in complexe meergefasestromingen

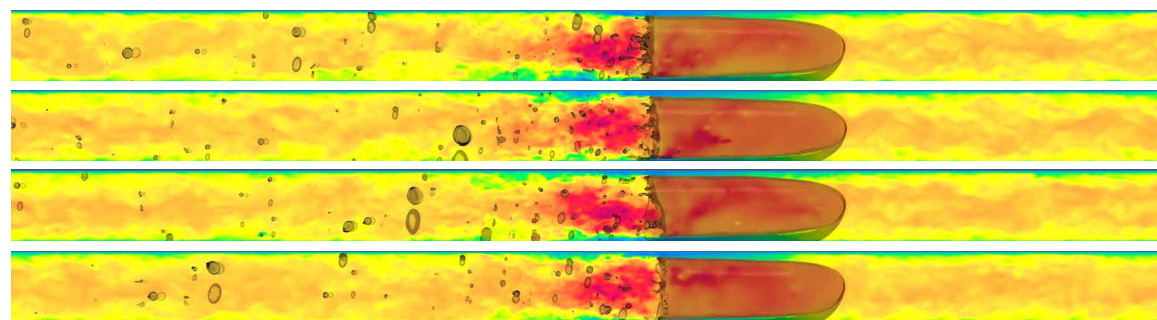
## Wat niet zichtbaar is kun je berekenen!

Edo Frederix is als numeriek wiskundige gespecialiseerd in modellering van meergefasestromingen. “Denk hierbij aan deeltjes die door de lucht zweven of bellen in een waterstroom.” Als je in staat bent om deze fenomenen goed te modelleren, kun je bepaalde omstandigheden nabootsen en zien wat er gebeurt. Maar niet alles wordt zichtbaar in gangbare modellen. Frederix rekent het onzichtbare uit en maakt het daarna alsnog zichtbaar.

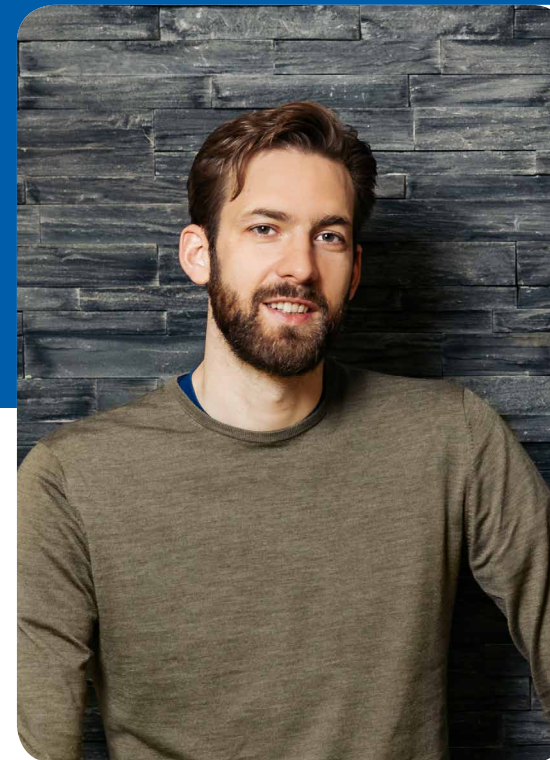
Met meergefasemodellen kun je bijvoorbeeld het wegvallen van koeling in een drukwaterreactor zichtbaar maken. Het model laat zien hoe water rond de kern gaat koken waarna bellen ontstaan die weer een extra negatief effect op de koeling hebben. Bellen kunnen een ongeluk dus verergeren. Dus wil je het fenomeen helemaal begrijpen.

Een probleem bij de huidige stand van de techniek bij meergefase stromingsmodellering is de nauwkeurigheid van het model. “Die wordt bepaald door de resolutie. Hoe hoger de resolutie, hoe nauwkeuriger. Maar ook: hoe duurder het model.” Een meergefase stromingsmodel wordt nu doorgerekend op computers met tientallen

Visualisatie van de stroming van een sigaarvormige Taylorluchtbel in een pijp met water



De stroming is berekend met de door NRG ontwikkelde hoge-resolutie simulatiesoftware. De sterke turbulente stroming in het zog van de bel zorgt voor het afbreken van kleine satellietbellen uit de rok van de Taylorluchtbel. De resultaten bieden nieuwe en nauwkeurige inzichten in complexe meergefasestromingen die kunnen optreden in reactorsystem tijdens normale operatie of tijdens ongevalsituaties.



Edo Frederix:

“ Visualiseren met hoge-resolutie simulatiesoftware om het bellen-gedrag in een kernreactor precies te kunnen doorgronden. ”

processoren. “Maar eigenlijk zou je naar duizenden processoren toe moeten – en dat is niet betaalbaar.” Het resultaat is dat de uitkomst van het model nu eigenlijk nog te pixelig is om heel precies te kunnen zien wat er gebeurt, terwijl de ontbrekende details juist een grote invloed kunnen hebben op het gedrag van de reactor.

Frederix toont een afbeelding van zijn werk in 2020. “Stel je een luchtbel in water voor. Het grensgebied tussen lucht en water is een diffuse overgangslaag die met de huidige modelleringstechniek eigenlijk niet zichtbaar te maken is.” De bel is op de grens tussen water en lucht inderdaad wat rafelig. “Je mist hier dus wetenschappelijke nauwkeurigheid die je wel nodig hebt om bijvoorbeeld het bellen-gedrag in een reactor precies te kunnen doorgronden.”

Deze blinde vlek zichtbaar maken kan gelukkig wel met numeriek wiskundig rekenwerk. Frederix vult wat ontbreekt in het model aan met formules die hij afleidt uit wetmatigheden en data uit metingen. “Met de ondersteuning van die formules kun je daarna met behulp van hoge-resolutie simulatiesoftware alsnog heel precies uitrekenen wat er gebeurt.”

Met andere woorden Frederix maakt het onzichtbare dus alsnog zichtbaar. “NRG is als één van de weinigen in ons land in staat de nauwkeurigheid van meergefase modellen te verhogen. Visualiseren doen we met hoge-resolutie simulatiesoftware, maar zonder de hoge kosten van een supercomputer.”

Het klinkt erg abstract – en dat is het ook – maar in de praktijk is dit heel nuttig. “Je kunt er in de voedingsmiddelensector het condensatieproces van melk tot in detail mee zichtbaar maken. Maar denk ook aan het gedrag van bluswater. Wat gebeurt er precies als je bluswater met een jet over een lange afstand door de lucht verplaatst? Is bluswater dan nog effectief?”

En je kunt er dus de veiligheid van kerncentrales mee aantonen en verbeteren. “Je krijgt antwoorden op vragen als: wanneer ontstaan bellen in het koelwater? Waar? Hoeveel? Hoe groot? Hoe gedragen ze zich? Daarmee kun je veilige nieuwe kerncentrales ontwerpen en het gedrag van een bestaande kerncentrale tijdens een ongeval voorspellen.” Ook voor toekomstige kerncentrales is dat interessant. “In gesmolten zout reactoren wil je juist wél bellen in het koelmiddel (gesmolten zout). Daarmee kun je namelijk afvalstoffen wegfilteren uit het koelmiddel. Dat proces wil je natuurlijk zo efficiënt mogelijk ontwerpen.”

# myMUSCLE: Spierbundel die nucleaire processen koppelt

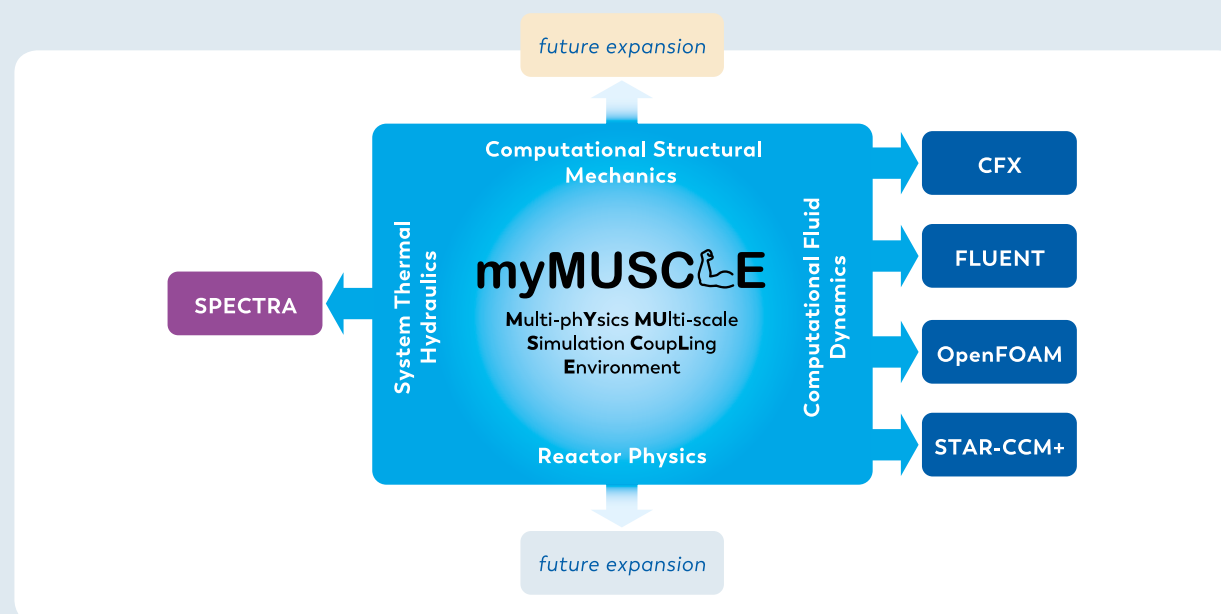
Ferry Roelofs is bij NRG programmamanager nucleaire modellering en simulatie. Eenvoudig gezegd stopt NRG binnen dit programma stukjes kerncentrale in de computer. Daarmee loopt NRG mee met een wereldwijde trend. De droom van Roelofs is dat hij ooit een héle kernreactor tot in voldoende detail zal kunnen simuleren. Wat houdt hem tegen? "Rekenkracht." Er zijn gewoon nog geen computers die dit aankunnen. "De vraag is zelfs of die er ooit komen." Er moet dus een slimme oplossing komen.

In een kernreactor spelen verschillende natuurkundige verschijnselen op uiteenlopende schalen een rol. Koeling, warmteoverdracht, beweging van neutronen, het gedrag van materialen op specifieke plekken et cetera. "Veel van deze individuele verschijnselen zijn de afgelopen decennia met losse rekencodes nagebootst in computermodellen." Er is

inmiddels een omvangrijke set van dit soort modellen.

"Deze modellen maken het nu mogelijk om ieder afzonderlijk verschijnsel en detail te bekijken. Omdat deze verschijnselen elkaar beïnvloeden, is er grote behoefte de codes te koppelen. Als dat lukt, krijg je meer overzicht

Grafische presentatie van de door NRG ontwikkelde koppelingstool 'myMUSCLE'



Ferry Roelofs:

" myMUSCLE is een tool waarmee je meerdere stukjes van de reactor-puzzel met elkaar verbindt tot een groter, samenhangend geheel. "

zonder dat er details verloren gaan." Je kan dan dus in- en uitzoomen op elkaar beïnvloedende processen.

Omdat gedetailleerde totale simulatie van een kernreactor toekomstmuziek blijft, bedachten Roelofs en zijn collega's een tussenoplossing: myMUSCLE. Een tool waarmee je meerdere stukjes van de reactorpuzzel met elkaar verbindt tot een groter, samenhangend geheel. "De tool verbindt als het ware 'draadjes' van verschillende rekencodes aan elkaar en gebruikt daar verschillende soorten knopen voor. Je kunt dat vergelijken met spieren die gesimuleerde deelprocessen met elkaar verbinden."

Rekenkracht van computers neemt gelukkig nog steeds toe en er wordt dus ook steeds meer mogelijk. "Zo lukte het ons enkele jaren geleden al om enkele codes voor een specifieke toepassing via 'draadjes' aan elkaar te knopen. Het tegelijkertijd kunnen nabootsen van verschillende natuurkundige verschijnselen in hun onderlinge samenhang en in verschillende niveaus van detail was een groot succes."

Maar wat je eigenlijk wilt, is een gebruiksvriendelijke tool die alle verschillende rekenmodellen die we gebruiken aan elkaar kan koppelen. E ntje waarbij je kunt kiezen uit verschillende soorten knopen: voor ieder

'draadje' de beste knoop. Op die manier zou je de héle kernreactor kunnen modelleren. De NRG-systeemcode SPECTRA kon al langer op hoofdlijnen een volledige kernreactor nabootsen. En omdat NRG zelf deze code heeft ontwikkeld, slaagden Roelofs en zijn collega's er in 2020 in om SPECTRA te knopen aan de gedetailleerde rekencodes van een set simulaties van deelprocessen. Het resultaat: een algemene spierbundel die verschillende deelprocessen zoals koeling en warmteoverdracht bij de kladden grijpt en ze het rekenmodel van SPECTRA intrekt. "Wij kunnen nu dus de interactie van deelprocessen laten zien binnen het grotere geheel van een kernreactor." Maar Roelofs beseft dat hij er nog niet is. "Als je de ene gevalideerde (goedgekeurde) code koppelt aan de andere gevalideerde code, dan betekent dat niet automatisch dat ook de koppeling zelf gevalideerd is." Dus ook de koppeling tussen de codes z lf moet gevalideerd worden. "Alleen dan zal het geheel van simuleerde processen geaccepteerd worden door een reactorontwerper of de toezichthouder."

Voor het echte succes moet myMUSCLE dus een generieke, gevalideerde koppeling worden die tussen de verschillende codes kan worden gezet. "In 2020 is door ons daar hard aan gewerkt en in 2021 en de jaren daarna zullen we ons richten op verdere uitbreiding door ook andere rekencodes via 'draadjes' te koppelen en door ook andere 'knopen' te ontwikkelen en gebruiken. Daarnaast zullen we hard moeten blijven werken aan de gebruiksvriendelijkheid, toegankelijkheid en de verificatie en validatie van myMUSCLE."



Het kwantificeren van onzekerheid:

# Computersimulaties benaderen de werkelijkheid

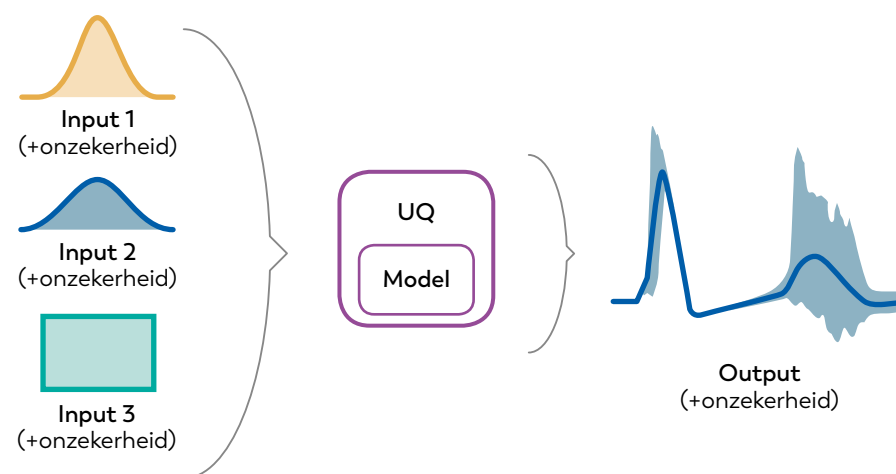
Chemisch technoloog Dirk Visser en zijn collega's houden zich bij NRG bezig met computersimulaties. Deze worden gebruikt om processen in installaties zoals kerncentrales na te bootsen en te voorspellen. Dat moet natuurlijk zo precies mogelijk, maar door onzekerheden in de invoer zal er altijd ook een zekere mate van onzekerheid zijn in de uitvoer. "Wij zoeken naar methodes waarmee we de onzekerheid in de uitkomst kunnen kwantificeren."

Kerncentrales worden conservatief ontworpen. 'Veiligheid-op-veiligheid' heet dat. Weet je iets niet zeker? Dan maak je het gewoon extra sterk. Maar eigenlijk wil je heel precies weten wat zich afspeelt in en om de reactor. Hoe realistischer de uitkomsten van het computermodel, hoe meer inzicht

je hebt in het proces en hoe beter en veiliger je een installatie kunt maken. Visser: "Als je niet conservatief maar realistisch rekent om de werkelijkheid te benaderen, dan moet je wel kunnen aangeven wat de onzekerheid is in de uitkomst van je computersimulatie."

## Uncertainty Quantification (UQ)

Het bepalen van de onzekerheid in de uitkomst, is de sleutel die realistisch modelleren mogelijk maakt.



Dirk Visser:

“ Je moet kunnen aangeven wat de onzekerheid is in de uitkomst van je computersimulatie. Als dat 1 graad is dan weet je dat de temperatuur van het koelwater veilig blijft. ”

uitkomsten kun je dan de onzekerheid in de uiteindelijke koelwatertemperatuur afleiden.”

NRG zoekt naar de meest efficiënte manier om onzekerheden van computersimulaties te bepalen. “In feite komt dat neer op zo weinig mogelijk rekenstappen met het betrouwbaarste resultaat.” Vanuit de literatuur zijn talloze UQ-methodes bekend om onzekerheden te kwantificeren, maar hoe goed zijn ze? Daarnaast worden er een hoop verschillende rekencodes gebruikt bij NRG voor bijvoorbeeld systeemanalyses, thermomechanica, vloeistofdynamica en neutronica. Het is daarom ook de vraag welke UQ-methode het meest geschikt is voor welke code?

In 2020 is NRG gestart met een inventarisatie gevolgd door een grove selectie. “We hebben gekeken wat er allemaal wordt aangeboden en deze UQ-methodes losgelaten op een simpele case. Dat leidde meteen al tot de kick-out van methodes die niet praktisch bleken.” Voor komend jaar staat een verfijningsslag gepland. “We laten de UQ-methodes per code los op een meer realistische casus.

Het resultaat? “Met de juiste UQ-methodes kunnen we realistischer simuleren. Hoe dichter we de realiteit benaderen, hoe beter het inzicht in een installatie wordt.” Uiteindelijk zal dit bijdragen aan veiligere kerncentrales. “Dat is waar je dit tenslotte allemaal voor doet.”

Visser geeft een voorbeeld: “Het is een heel verschil of jouw computermodel de koelwatertemperatuur voorspelt op 90 graden Celsius met een onzekerheid van 15 graden of met slechts 1 graad onzekerheid. Want 90 plus 15 graden is 105 graden en dan kookt je koelwater. Als de onzekerheid slechts 1 graad is, weet je zeker dat je koelwatertemperatuur beslist aan de veilige kant blijft.”

Uncertainty Quantification (UQ), het bepalen van de onzekerheid, is de sleutel die realistisch modelleren mogelijk maakt. “Dat doen we op wiskundige manier. Eigenlijk komt het erop neer dat we alle mogelijke toleranties als input meegeven en daarna alle variaties doorrekenen. En van al die rekensommen kunnen we dan de gemiddelde uitkomst en de onzekerheid rond dit gemiddelde bepalen.”

Ook deze uitleg vraagt om een voorbeeld: “Bij de onzekerheid rond koelwatertemperatuur neem je alle mogelijke afwijkingen in leidingdiameter mee, stroomsnelheden, warmte-afgifte et cetera. Dus alle afwijkende millimeters, kubieke centimeters en graden Celsius stop je er al aan het begin van de rekensom in. Je herhaalt de berekening soms wel duizenden keren. En uit de verschillende

Een nieuwe kernreactor wordt digitaal beveiligd

# Hoe betrouwbaar is de software?

Hans Brinkman is risicoanalist en rekt met de Probabilistische VeiligheidsAnalyse (PSA) de kans op een ongeval met kernreactoren uit. Voor klassieke 'hard wired' (analoge) kerncentrales is daarmee veel ervaring. Voor nieuwe kerncentrales met digitale beveiliging nog niet. Gecoördineerd door het de risicowerkgroep (WGRisk) van OECD-NEA zocht NRG met vijf andere internationaal gerenommeerde organisaties naar de beste manier om de faalkans van digitale beveiliging (computers en software) van kerncentrale te modelleren.

Voor Nederland is het cruciaal om de betrouwbaarheid van kerncentrale-beveiligingssoftware te kunnen berekenen. "Denk aan de voorgenomen bouw van de PALLAS-reactor. Of de eventuele bouw van een nieuwe 'Borssele'. Deze nieuwe kernreactoren zullen

digitaal bediend en beveiligd worden. Je wil daarvan wel de risico's kunnen beoordelen."

Bestaande kerncentrales zitten voor een aanzienlijk deel vol met techniek uit de jaren zeventig en tachtig. Alle essentiële functies



Hans Brinkman:

“ Bij falende software is het waar en waarom vaak niet duidelijk. En juist dat wil je weten om herhaling van dezelfde fout te voorkomen. ”

zoals pompen en kleppen worden via kabels, relais, schakelaars en printplaten bediend. Die bediening is bovendien meervoudig en divers uitgevoerd. Gaat iets stuk? Dan is er altijd een reserve aansturing die het overneemt. "Duidelijk en aanwijsbaar en daardoor relatief eenvoudig uit te rekenen wat de faalkans is."

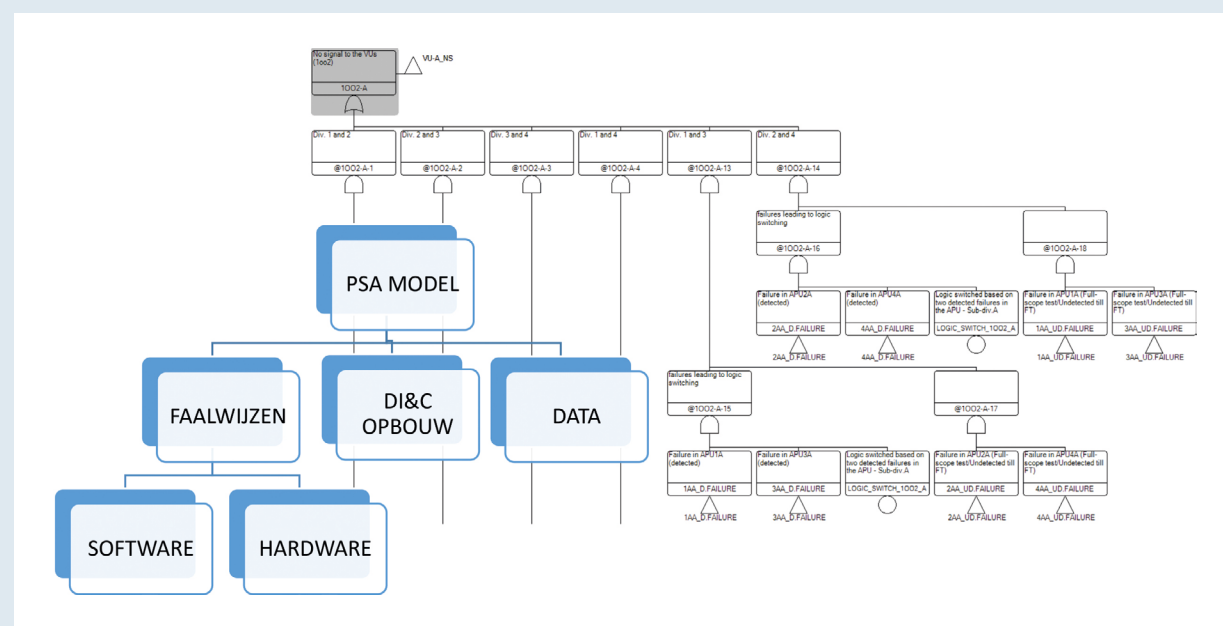
Maar hoe betrouwbaar ook, deze techniek is wel achterhaald. "Technici van nu worden er niet in opgeleid, onderdelen worden niet meer gemaakt, reservedelen raken op." De nucleaire sector maakt in feite dezelfde ontwikkeling door als de luchtvaart: ook de rolroeren van een verkeersvliegtuig worden niet meer met staalkabels bediend. "Digitale techniek heeft bovendien grote voordelen: kan meer, is flexibeler en veel preciezer." Kortom: ook kerncentrales gaan over op digitale instrumentatie.

Dit moet natuurlijk wel veilig gebeuren. De gangbare PSA vereist bij software een andere benadering. Bij analoge techniek is dan snel duidelijk waar je het zoeken moet. Een printplaat of iets dergelijks gaat stuk. "Bij falende software is het waar en waarom vaak niet duidelijk. En juist dat wil je weten. Dan kun je zorgen voor back-up software die het meteen overneemt. Het liefst software van een ander type op een ander platform om herhaling van dezelfde fout te voorkomen."

Dus hoe pak je dat aan? Zes deskundige organisaties, waaronder het Franse EDF en het Koreaanse Atomic Energy Research Institute en NRG gingen aan de slag. "Bijna vijf jaar lang hebben we elk met een eigen aanpak gerekend aan een ongeval in een fictieve kerncentrale: het stilvallen van koelmiddelpompen. Geanalyseerd werd wat de digitale beveiliging moet doen en hoe dit mis kan gaan." Op zoek naar de softwarefout.

De één pakte het heel globaal aan, de ander heel gedetailleerd, NRG zat daar tussenin. Na vijf jaar puzzelen, kunnen de zes verschillende faalkansberekeningen met elkaar worden vergeleken. Het project moet in 2021 nog worden afgesloten, maar Brinkman durft al wel wat voorzichtige conclusies te trekken. "Het interessante is, dat zeer verschillende aanpakken leiden tot ongeveer dezelfde resultaten. Er zitten wel verschillen tussen de uitkomsten, maar die zijn niet extreem en goed verklaarbaar." Van die detailverschillen in de uitkomsten valt veel te leren over de verschillende rekenmethodes. Brinkman: "Je ziet dat een heel detaillistische PSA-aanpak op onderdelen noodzakelijk is, maar lang niet voor alles. In de praktijk moet de PSA natuurlijk wel werkbaar blijven vanwege onderhoud en modificaties. Als je iets aanpast in de software, moet je snel kunnen uitrekenen wat het met faalkans doet. De kunst wordt om hierin de balans te vinden."

Probabilistische VeiligheidsAnalyse (PSA)





## Radioactiviteit en bodem:

# Voorspellen hoe en waarheen radionucliden reizen

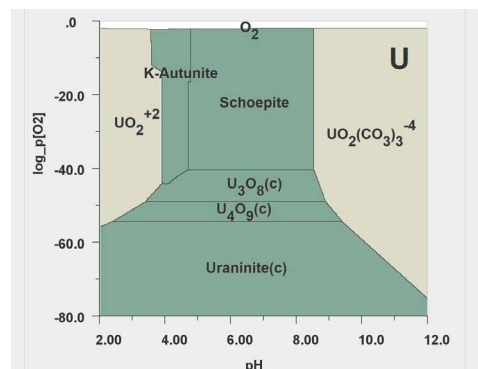
Hans Meeussen is geochemicus, specialist in chemische processen die zich in de bodem afspelen. “En dan met name in de mobiliteit van stoffen; hun reisgedrag door de bodem.” Om dit soort complexe processen beter te snappen is het heel nuttig om deze op een computer na te bootsen. Voor dit doel heeft hij het computermodel ORCHESTRA ontwikkeld. Met deze tool kan over een periode van vele duizenden jaren nauwkeurig worden voorspeld waar een (radioactieve) stof blijft die je vandaag in de bodem stopt. En hoe die stof er dan uitziet.

Geochemie is de natuurwetenschap die principes uit de scheikunde gebruikt om mechanismen achter chemische processen in de aardkorst te verklaren. “Stoffen beïnvloeden elkaar en ook de bodem waarin deze stoffen zitten zijn daar weer van invloed op. Wat je wilt weten is hoe deze stoffen reageren en hoe ze zich in de bodem gedragen.”

ORCHESTRA voorspelt dit op basis van de regels van thermodynamica. Dat is heel handig voor tal van vakgebieden. “Landbouwkundigen gebruiken ORCHESTRA om het gedrag van fosfaten en nitraten te voorspellen in akkerbodems; NRG is vooral geïnteresseerd in de verplaatsing van radionucliden in de diepe aardbodem.” Wel is de tijdspanne

### Voorbeeld modelberekening

Berekende thermodynamisch stabiele vormen van uranium als functie van pH en zuurstofdruk.  
Lichtgroen: opgeloste, mobiel vormen  
Donkergroen: vaste immobiele vormen



Hans Meeussen:

“Klei is plastisch, scheurt niet en laat geen water door. We weten heel zeker dat je radioactief afval er veilig in kunt opbergen.”

bijzonder. “In een akker heb je het over seizoenen of jaren, bij radioactief afval gaat het over vele duizenden jaren waarin je het gedrag ervan in de bodem wilt overzien.”

Fysische en chemische processen zijn voor tal van geo-vakgebieden gelijk. “Maar van elkaars kennis en kunde kun je veel leren,” zo verklaart hij hoe een bij de Landbouwuniversiteit Wageningen geschoolde geochemicus in de nucleaire industrie terecht komt. “Bijvoorbeeld als je radioactief afval in een geologische aardlaag wilt opslaan.”

Omdat er veel bekend is over chemisch (reis) gedrag van deze stoffen in de bodem, kan ORCHESTRA betrouwbare voorspellingen doen. Ook over een periode van duizenden jaren. “Ik snap dat dit voor buitenstaanders moeilijk te bevatten is, toch weten we eigenlijk heel zeker dat je radioactief afval veilig in een diepe kleilaag kunt opbergen. We kennen het gedrag van de kleilaag die al 35 miljoen jaar stabiel is en dat ook blijft. We kennen de inventaris van het radioactief afval. De meeste radionucliden hechten zich bovendien goed aan klei. Klei is bovendien plastisch, zal niet scheuren en laat geen water door. Dus radioactiviteit kan eigenlijk niet snel genoeg door de bodem naar boven reizen om daar kwaad te kunnen.”

In de meest ongunstige situatie zou dit volgens ORCHESTRA-berekeningen al tien tot honderdduizenden jaren duren, en de hoeveelheid zou dan zo klein zijn dat deze in het niet zou vallen bij natuurlijke radioactiviteit. “Dat komt door wetmatigheden als halfwaardetijden en het maximale tempo waarin deze stoffen zich zouden kunnen verplaatsen.” Radioactief afval opslaan in een diepe kleilaag, wordt zo dus meer een ethisch-filosofische kwestie dan een geochemische.

Dat is belangrijke wetenschap, want Nederland moet nog een eindberging maken voor radioactief afval uit ziekenhuizen, de industrie en kernreactoren.

Het unieke van het vrij beschikbare ORCHESTRA is dat het geen alomvattend model is, maar meer een ‘lego’ modellenbouwdoos, die onderzoekers voor hele verschillende toepassingen kunnen gebruiken. Dat leidt allerlei interessante kruisbestuivingen. Bij de Universiteit Wageningen maken ze met ORCHESTRA klei-adsorptiemodellen om reisgedrag van stoffen in kleigrond beter te begrijpen, en dat is voor ons dus ook weer heel interessant.” We werken op een vergelijkbare manier samen met een aantal universiteiten. Op deze manier helpt ORCHESTRA om kennis tussen vakgebieden uit te wisselen maar ook om universitaire kennis in de praktijk toe te passen. En precies dat is de reden dat NRG namens het ministerie van Economische Zaken en Klimaat verder ontwikkeling en verspreiding van het gebruik van ORCHESTRA ondersteunt.

## Transmutatieonderzoek:

# Problematisch radioactief afval omzetten in minder lastige stoffen

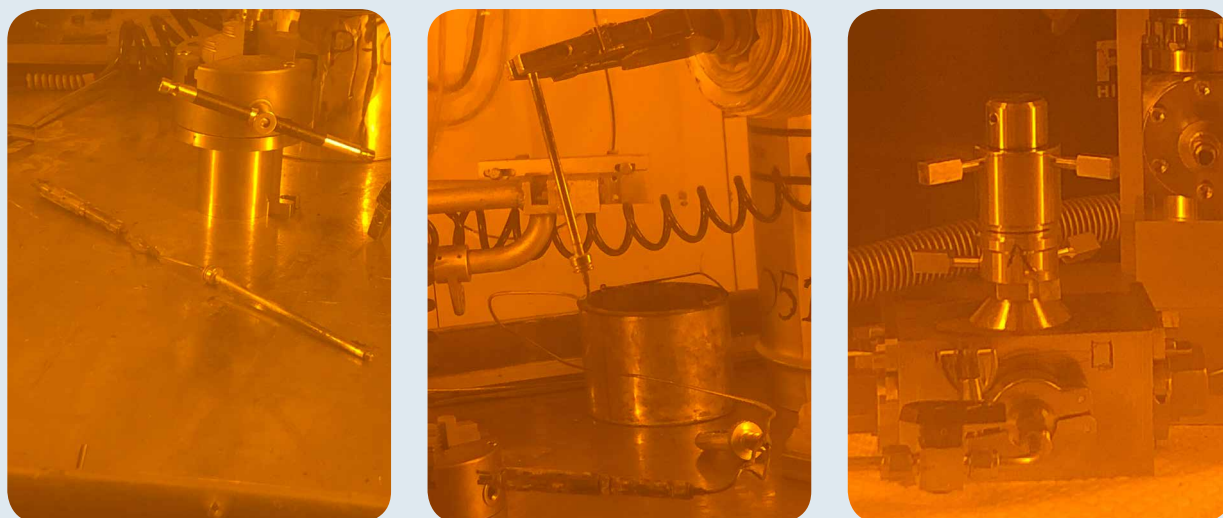
Sander van Til is natuurkundige en gespecialiseerd in deeltjesfysica. Bij NRG is hij lead scientist bij het transmutatieonderzoek. Dat richt zich op het oplossen van de achilleshiel van kernenergie: het radioactief afvalvraagstuk.

Als een uraniumatoom in de reactor in aanraking komt met vrije neutronen, kunnen er twee dingen gebeuren. Het atoom splijt, waarbij er veel warmte wordt geproduceerd. Als restant zijn er twee brokstukken: splijtingsproducten. Het tweede proces is dat het uranium het neutron invangt, maar niet splijt. Het invangen van neutronen zorgt ervoor dat het uranium verandert in zwaardere actiniden. Plutonium bijvoorbeeld. Of americium.

Van Til: "Zowel splijtingsproducten als actiniden zien we op dit moment als radioactief afval." De splijtingsproducten blijven relatief kort radioactief, maar een aantal actiniden juist heel lang. "Verreweg het grootste deel van die actiniden is plutonium. Gelukkig is dat in veel gevallen goed te gebruiken als splijtstof in een reactor. Americium is dat niet, maar kan onder de juiste omstandigheden in een reactor weer worden omgezet in splijtbaar."

**De bestraalde splijtstofpennen in een hot cell na succesvolle ontmanteling uit hun experiment** (links en midden)  
De drukopnemers voor het registreren van de He-vrijzetting is nog verbonden met de pennen via een (mini)gasbuisje.

**Het huis waarin een splijtstofpen wordt geplaatst** (rechts)  
De splijtstofpen wordt gepuncteerd en het inwendige gas wordt naar een meetopstelling geleid. Zo kan de inwendige druk en de gas-samenstelling bepaald worden.



Sander van Til:

“ Het radioactief afvalvraagstuk terugbrengen naar meer menselijke dimensies. ”

wel zoveel mogelijk van het americium omzet. Onze onderzoeksresultaten worden gebruikt om computersimulaties te verbeteren die worden gebruikt voor de splijtstofontwikkeling.”

Hoewel de hoeveelheid americium gering is, heeft het lastige eigenschappen voor de eindberging; zo produceert het nog veel warmte. "Ons transmutatieonderzoek bekijkt of het technisch mogelijk is deze actiniden om te zetten in stoffen die minder problematisch zijn."

Het goede nieuws: dat kan.

"Wij werken aan nieuwe splijtstoffen waarin plutonium en americium zijn verwerkt. Als deze actiniden voor een tweede keer in de reactor aan neutronen worden blootgesteld, kunnen ze alsnog splijten." Je gebruikt dus de langstlevende afvalproducten volledig als splijtstof en je houdt alleen de kortlevende splijtingsproducten over. "Ook is het afval in deze samenstelling minder giftig en produceert het minder warmte. Eindbergen wordt eenvoudiger."

Van Til onderzocht afgelopen jaren het gedrag van deze splijtstof onder reactoromstandigheden. "Wij stellen americiumsplijtstof in de HFR bloot aan neutronenstraling en onderzoeken wat er dan gebeurt." Eén van de vele aspecten die worden bekeken, is het ontstaan van helium. "Je kunt je voorstellen dat dit gas tot drukopbouw en zwellingen leidt. Je wilt dat natuurlijk precies weten zodat je veilige splijtstofomhullingen kunt maken, terwijl je

De americiumsplijtstof werd in 2020 op de volgende eigenschappen onderzocht:

- de totale hoeveelheid gas die zich heeft opgehoopt in de splijtstof
- de mogelijke vervorming van de omhulling als gevolg van het zwellen van de splijtstof
- de verdeling van splijtingsproducten en de hoeveelheid overgebleven americium in de splijtstof

In 2021 zal onder andere de microstructuur van de splijtstof bekeken worden om meer te weten te komen over de gevolgen van het vrijgekomen gas. Gasbellen in de splijtstof kunnen namelijk zorgen voor slechtere thermische geleiding. Daardoor wordt de temperatuur hoger en de splijtstof zwaarder belast.

Het type kerncentrale waar deze splijtstof in kan worden toegepast, ligt nog op de teken-tafel, maar de natriumgekoelde snelle reactor krijgt inmiddels al wel veel belangstelling. Toekomstmuziek? "Je moet denken aan 2040 en later." Toch is het heel belangrijk om nu al te investeren in onderzoek. "Als we straks vanwege klimaatverandering meer kernenergie willen, hebben deze snelle reactoren grote voordelen. Ze gaan veel zuiniger om met uraniumreserves en brengen het radioactief afvalvraagstuk terug naar meer menselijke dimensies."



# Werken aan de ‘workforce’ van de toekomst

*Carla Salet is business consultant en coördineert het traineeprogramma bij NRG. Met het traineeprogramma werken we aan “de nucleaire workforce van de toekomst.” Zo’n vijftieng jonge academici met een bèta-achtergrond werden in de afgelopen jaren geïntroduceerd in het brede nucleaire werkveld van NRG. “Zij maken bij NRG carrière in de nucleaire technologie van morgen.”*

“Ook in 2020 stroomden er weer negen young graduates direct van de universiteit in het programma,” vertelt Salet enthousiast. “Niet per sé met een nucleaire achtergrond, wel allemaal bèta’s.”

NRG laat de trainees achttien maanden lang kennismaken met allerlei aspecten van het nucleaire. Ze maken kennis met zowel hard-core onderzoekswerk als met concrete

uitvoeringsprojecten in korte cycli van maximaal zes maanden. “Die zes maanden-cyclus zorgt voor beweging. De trainees leren veel mensen kennen en ervaren veel facetten van het werkveld. Ze gaan de verbanden ertussen zien en leren vakgebied-overschrijdend werken en denken. Zo ontdekken ze niet alleen heel veel over de nucleaire wereld, maar vooral ook over zichzelf,” aldus Salet.



**Carla Salet:**

*“ De nucleaire wereld biedt volop carrièrekansen. Met jonge instroom kunnen we de vooraanstaande nucleaire kennispositie die Nederland nu heeft, behouden. ”*

heden verder te verbeteren.” Ze vindt het mooi als bijvoorbeeld een jonge geologe uiteindelijk haar werkplek vindt bij Fieldlab. “Daar werkt ze nu dus aan de nucleaire geneeskunde van de toekomst!”

Het traineeprogramma is voortgekomen uit de consultancy-tak van NRG. Daar is de behoefte aan technisch talent het grootst. Business Unit Directeur Joost van den Broek: “Met de toegenomen belangstelling voor klimaatneutrale kernenergie maar ook de grote ontwikkelingen op het gebied van medische isotopen is het belangrijk om nú te investeren in talent. Daarmee verzekert ons land zich van de kennis en kunde om later nucleaire technologie in te kunnen zetten. Die technologie is voornamelijk onmisbaar om onze energiehuishouding in 2050 volledig CO<sub>2</sub>-neutraal te maken.”

Carla Salet vult aan: “Het ministerie van EZK legt hiervoor in haar programma onderzoeksprioriteiten. Wij zorgen ervoor dat de kennisbasis behouden blijft door jong talent ook hiermee kennis te laten maken.”

Salet twijfelt geen moment aan het nut van het traineeprogramma: “Dat is goed voor de toekomst van BV-Nederland. De nucleaire wereld vergrijsst. Willen we als Nederland onze vooraanstaande nucleaire kennispositie behouden, dan is jonge instroom keihard nodig.” Maar ze vindt het vooral heel leuk en inspirerend: “Je ziet jonge technici groeien. Het persoonlijk effectiviteitsprogramma en hun persoonlijke coach helpt hen om hun sterke kanten te ontdekken en bepaalde vaardig-

In de bijna vijf jaar dat het trainee-programma nu draait, heeft NRG zo’n 25 jonge academici een mooie start van hun carrière geboden in de nucleaire wereld. “Het is prachtig te zien dat de instroom bestaat uit kandidaten met verschillende achtergrond. Niet alleen de man/vrouw verhouding van 60/40, maar ook diverse nationaliteiten en studierichtingen zorgen voor een mooie dynamiek”.

Uit het verslagjaar van het EZK-onderzoek noemt Salet het onderdeel ‘Kennisoverdracht’ dat in 2020 volledig door trainees werd uitgevoerd in het zogenaamde Junior Academy NRG (JAN) project.

“Om leerlingen meer gevoel te geven bij het onderwerp radioactiviteit, heeft de Junior Academy NRG lesmateriaal ontwikkeld dat ondersteuning biedt aan het curriculum voor ‘Medische Beeldvorming’. Wat zo leuk is aan dit lesmateriaal, is dat leerlingen met dit rollenspel een stuk praktijkervaring meekrijgen. In de realiteit moeten verschillende disciplines namelijk ook samenwerken om patiënten zo goed mogelijk te kunnen helpen.”

Hier horen dus ook onderdelen bij die in het eindexamen terugkomen, zoals berekeningen met halfwaardetijden. In 2022 wordt een module ontwikkeld rondom het thema Kernenergie.

*De NRG Traineegroep 2020*





# Uitbreiding lab-methoden voor de radiochemische karakterisatie van radioactief afval

Omdat radioactief afval voor duizenden jaren veilig moet worden opgeslagen, wil de overheid de exacte inventaris weten voor ze het afval accepteert. De radiochemici Tanja Tomasberger en Patrick Haaß ontwikkelen bij NRG methoden voor het radiochemisch karakteriseren van radioactief afval. “Als die bekend is, kunnen we precies voorspellen hoe de langzaam veranderende inventaris zich gedraagt in de tijd.” Je kunt dan voor de eindberging de juiste maatregelen nemen tegen (bijvoorbeeld) corrosie en zo voorkomen dat probleemstoffen in het milieu komen.

Tanja Tomasberger: “Overall in de wereld ontstaat radioactief afval. Bij ziekenhuizen, de industrie onderzoeksinstellingen en kerncentrales. We kunnen dat alleen veilig opslaan als we precies weten hoe dit afval is samengesteld.” Soms kun je de inventaris berekenen. Maar als niet precies bekend is waaruit dit afval bestaat, is dat niet goed mogelijk. “Dan zal de overheid voor de zekerheid altijd vragen om de samenstelling met een analyse aan te tonen.” Pas als de inventaris met zekerheid vaststaat, wordt radioactief afval voor opslag geaccepteerd.



**Tanja Tomasberger:**

“ Door kobalt machinaal af te scheiden, verminder je de blootstelling van medewerkers in het lab nog verder. ”

Soms is dat moeilijk. Meten wordt soms bemoeilijkt door de aanwezigheid van ‘stoorzenders’. Het sterk gamma-stralend kobalt-60 overstraalt minder energieke isotopen die daardoor onzichtbaar worden. “Die staan in feite dus in de schaduw en zijn niet meer te meten.” Vandaar dus de grote belangstelling van de industrie voor analysemethoden die zowel de zwakke als de sterke stralers uit een monster kunnen afscheiden waarna analyseren ‘makkelijker’ wordt.

**Patrick Haaß:**

“ Als we in een harsmonster het technetium afscheiden en meten dan kunnen we berekenen hoeveel er in de hele batch zit. ”



## STOORZENDER...

We beginnen met het heftig stralende kobalt-60. Tomasberger: “De radioactiviteit is om twee redenen uitdagend. Allereerst wil je laboratoriummedewerkers zo min mogelijk blootstellen aan straling. Als je een sterk stralende isotoop zoals kobalt-60 kunt afscheiden uit een te onderzoeken monster, verminder je voor hen het blootstellingsgevaar.” Daarnaast maakt de afwezigheid van het dominante kobalt-60 het dus makkelijker om de rest van een monster te analyseren.

“Helaas is afscheiden lastig omdat kobalt zich chemisch net zo gedraagt als ijzer en nikkel.” Maar in 2020 heeft Tomasberger voor NRG een kolomscheidingstechniek ontwikkeld die werkt op basis van ionenuitwisseling. “We kunnen daarmee heel effectief kobalt afscheiden uit een monster van opgelost roestvrijstaal.” Zonder ‘stoorzender’ kobalt-60, kun je daarna de aanwezigheid van onder andere minder stralend nikkel-63 en ijzer-55 veel beter meten.

In 2020 is een begin gemaakt met de automatisering van de methode. “Door kobalt machinaal af te scheiden, verminder je de blootstelling van medewerkers in het lab nog verder.” Het initiatief heeft een eerste prototype van een laboratoriumtoestel opgeleverd dat komende jaren wordt doorontwikkeld. “Daarna wordt het toestel geïmplementeerd op het laboratorium om het op te nemen in de routine,” aldus Tomasberger.

## ...VERSUS MOEILIK TE METEN

Haar collega radiochemicus Patrick Haaß concentreerde zich in 2020 vooral op het heel moeilijk te meten technetium-99. Lastig omdat het in tegenstelling tot kobalt juist helemaal geen gammastraling uitzendt. technetium-99 is in een eerder project geïdentificeerd als belangrijk ‘moeilijk te meten’ radionuclide. Technetium-99 is een splijttingsproduct van uraniumsplijtstof in een kerncentrale en kan in de ionenwisselaarharsen terecht komen. Deze processtoffen worden na gebruik als radioactief afval behandeld. Ze moeten dus radiochemisch worden gekarakteriseerd voor ze worden geaccepteerd voor opslag. “De ontvangende partij wil precies weten wat de inventaris van deze harsen is, dus ook hoeveel van het moeilijk te meten technetium-99 er in zit,” legt Haaß uit. “Je moet je voorstellen dat het makkelijker is om een moeilijk te meten stof aan te tonen in helder water dan in koffie met melk en suiker.” Die harsen zijn dus ‘koffie-melk-en-suiker’ en daarin zit ook die technetium-99 verstopt. “Metingen worden dus bemoeilijkt door allerlei storende organische verbindingen.”

Het lukte Haaß in 2020 om technetium efficiënt van de ‘koffie’ te scheiden met behulp van kolomscheiding. De gedemonstreerde methode wordt in 2021 gevalideerd. Het nut? “Als we er in slagen om uit een harsmonster het technetium af te scheiden en te meten, dan kunnen we representatief berekenen hoeveel er in de hele batch zit. Je hoeft dan



dus niet de hele batch te analyseren om hem geaccepteerd te krijgen voor opslag.”

#### **GEBRUIK 3D-PRINTER**

Daarnaast keek Haaß in 2020 naar beschikbare 3D-printtechnieken voor het maken van laboratorium-hulpmiddelen met een complexe vorm. “Het is interessant als wij 3D-printers kunnen gebruiken om bestaande dure roestvrijstalen hulpmiddelen te vervangen.” Belangrijk is om te weten welke kunststoffen beschikbaar zijn en hoe zij zich gedragen onder radiochemische onderzoeksomstandigheden.

“Kunststoffen kunnen een aantal voordelen hebben. Sommige kunststoffen zijn beter bestand tegen onze radiochemische processen en daarna makkelijker schoon te maken dan RVS,” verklaart Haaß. “En als we ze toch moeten afvoeren, zijn kunststoffen makkelijker samen te persen dan RVS. Als het volume radioactief afval kleiner is, dan bespaart dat opslagkosten,” vult zijn collega Tomasberger aan.

#### **Prototype van het laboratoriumtoestel**

*Hiermee kan kobalt-60 automatisch worden afgescheiden. Door machinaal scheiden, worden medewerkers minder blootgesteld.*



**Nuclear. For Life.**



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