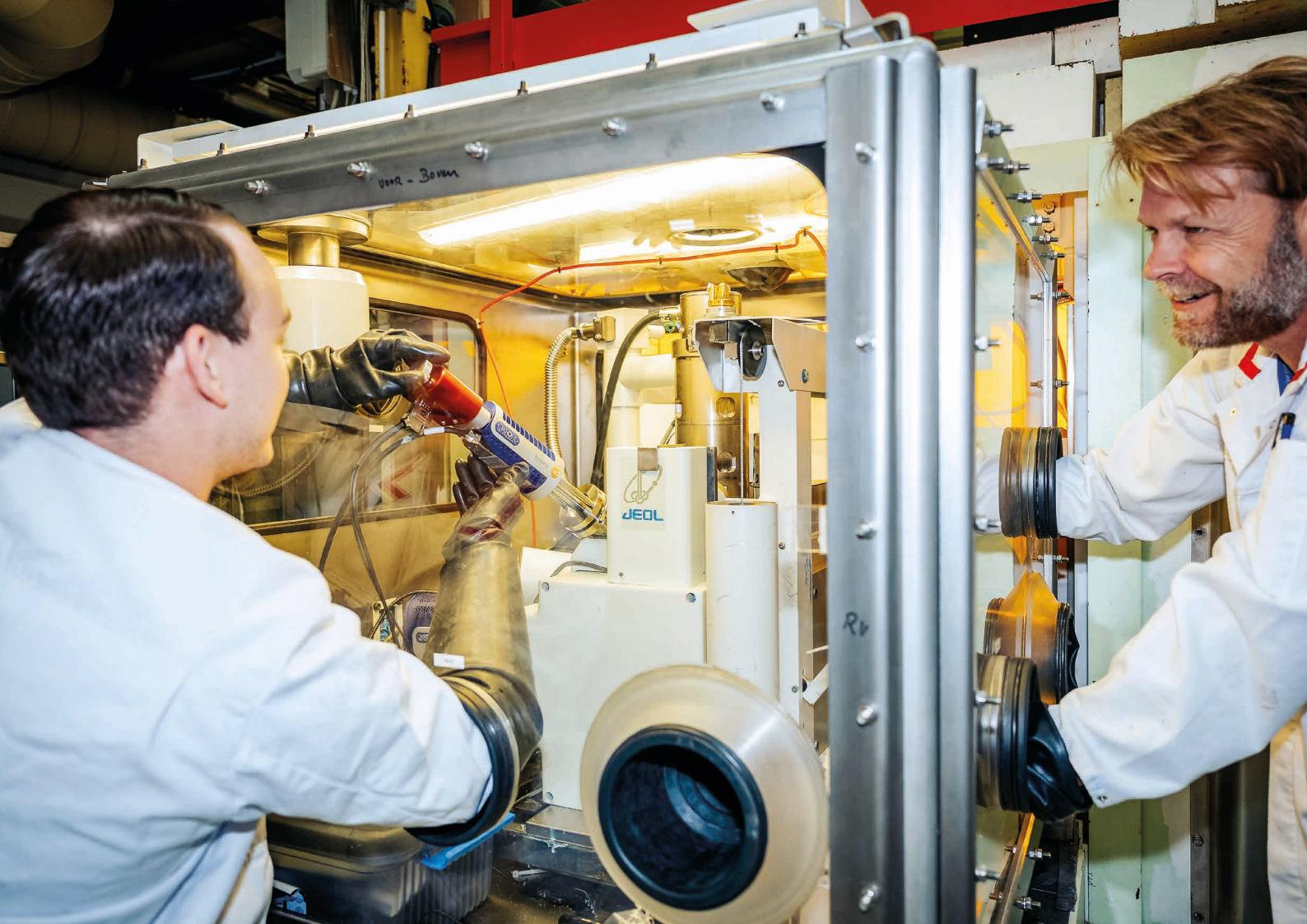




Onderzoeksjaarverslag 2024

NUCLEAIRE PROFESSIONALS AAN HET WOORD

NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.



NRG PALLAS is een internationaal erkend nucleair expertisecentrum. 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 PALLAS bij aan de instandhouding, innovatie en verdere ontwikkeling van de kennis in Nederland op het gebied van nucleaire technologie en veiligheid.

NRG PALLAS is wereldmarktleider in de levering van medische isotopen. In Nederland is NRG PALLAS hét kenniscentrum op het gebied van integrale stralingsbescherming. NRG PALLAS exploiteert de Hoge Flux Reactor die eigendom is van de Europese Unie. Bij de onderneming werken ongeveer 800 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.

Inhoud

Nucleair onderzoek naar een volgende versnelling Maurits Wolleswinkel	4	Al schakend ervaring opdoen met ‘toy problems’ Edo Frederix	20
Versnelling ontwikkeling Small Modular Reactors Murthy Kolluri	6	Razendsnelle én veelbelovende nucleaire ontwikkelingen Ferry Roelofs	22
Kerncentrales aantoonbaar veilig 20 jaar langer in bedrijf houden Lorenzo Stefanini	8	SUE: zekerheid van gesmolten zout reactor-simulaties Marek Stempniewicz	24
Waterstofveiligheidssysteem kan nu beter gemodelleerd worden Dirk Visser	10	Hoe beïnvloedt de beveiliging de veiligheid van een kerncentrale Luuk Duisings	26
Benchmark PSA niveau-3 methode Gilliam van Oudenaren	12	Nieuw leven voor elektronen-microscop SEM Yasin Yigittop	28
Twee kansrijke verglazingsroutes voor radioactief afval Eva de Visser-Týnová	14	Simulaties voor veilige metaalgekoelde reactoren Akshat Mathur	30
Stralingsdosis berekenen voor een precieze radionuclidentherapie Tim van Dijk	16	Verborgен schat in Petten Steven van der Marck	32
Heliumverbrossing onder de loep Kiki Naziris	18	Hoe nauwkeurig kunnen we ‘neutronenruis’ simuleren? Alan Wichink	34

Afbeelding cover: Yasin Yigittop (links), “Een investering die zich ruimschoots terugverdient”, zie interview op pagina 28.

VOORWOORD:

Nucleair onderzoek naar een volgende versnelling

Het nucleaire energieonderzoekprogramma PIONIER van NRG PALLAS past goed binnen de nationale en internationale context van hernieuwde aandacht voor kernenergie. Het programma is de gereedheidskist die nodig is voor het halen van de beleidsdoelen van het de overheid. Om meer kernenergievermogen bij te bouwen in ons land, is een goede kennisbasis noodzakelijk. NRG PALLAS verschaft met PIONIER deze kennisbasis en is daarmee een belangrijke speler in huidig én toekomstig nucleair onderzoek.

Dit publieksverslag legt verantwoording af over het overheidsgefinancierd kernenergieonderzoek van afgelopen jaar. De onderzoeksgebieden volgen uit de langetermijnagenda van de Nederlandse overheid. Het uiteindelijke doel ervan is om met kernenergie bij te dragen aan een klimaatneutrale energiehuishouding rond 2050.

Opschaling kernenergie

De bouw van nieuwe kerncentrales en de ontwikkeling van verschillende soorten Small Modular Reactors (SMR's) spelen hierin een belangrijke rol. NRG PALLAS reikt met PIONIER de samenleving de noodzakelijke tools aan. Kennis en kunde die zeker niet mogen ontbreken bij de voorgenomen opschaling van kernenergie. Denk aan kennis over nucleaire veiligheid, verantwoorde omgang met radioactief afval en adequate stralingsbescherming voor mens en milieu. Het PIONIER-programma onderhoudt en vergroot deze Nederlandse nucleaire know how.

Wat waren de opvallendste onderzoeksontwikkelingen van het afgelopen jaar? Zeker de serieuze stappen die zijn gezet in de ontwikkeling van Small Modular Reactors (SMRs), zowel de 'gewone' drukwaterreactoren als de nieuwe, geavanceerde concepten zoals de gesmolten zout reactor.

Zee- en ruimtevaart

Interessant zijn de SMR's die zowel geschikt zijn voor warmte- en krachtproductie op land en off-shore en ook, op termijn, voor scheepsvoortstuwing. De internationale maritieme industrie werkt daar hard aan en wij zijn er trots op hieraan te mogen bijdragen. Voor de ruimtevaart onderzoeken we interessante nucleaire mogelijkheden voor de energievoorziening.

Wij werken met onze Europese partners hard aan de kwalificatie van innovatieve materialen en productiemethodes om te zorgen dat nieuwe vormen van nucleaire energieopwekking goedgekeurd en gebouwd kunnen worden.

Maurits Wolleswinkel:

"NRG PALLAS reikt met PIONIER de samenleving de noodzakelijke nucleaire tools aan."

Lees verderop in dit verslag over onze bijdrage aan deze innovaties.

Daarnaast brengen technologische innovaties op nucleair gebied nieuwe vraagstukken met zich mee. Denk bijvoorbeeld over het beheer en de verwerking van radioactief afval. Geavanceerde SMR's, zoals de gesmolten zout reactoren, leveren nieuwe soorten radioactief afval op maar ook perspectief op mogelijk hergebruik van afval als brandstof. Wij werken hard aan praktische en veilige oplossingen voor dit afval.

Medische spin-off

De waarde van het programma gaat echter verder dan alleen het behalen van beleidsdoelen. Zo heeft kernenergie-onderzoek ook positieve effecten op andere gebieden, zoals de nucleaire geneeskunde. In dit verslag staat een mooi voorbeeld van spin-off naar het medische domein. Door ons werk wordt in de nabije toekomst de bestraling van kankerpatiënten nog preciezer waardoor nevenschade in het lichaam vermindert en de kwaliteit van leven voor de



kankerpatiënt verbetert. Dit soort waardevolle spin-offs hoort bij de aard van nucleair energie-onderzoek en laat zien hoe belangrijk en maatschappelijk relevant het werk van NRG PALLAS is.

Ik hoop dat dit verslag u inspireert en uw enthousiasme voor nucleair onderzoek aanwakkert – zowel voor energie als voor medische toepassingen. Bedenk daarbij dat de grondleggers van ons vakgebied, zoals Marie Curie en Henri Becquerel, met één been in de natuur- en scheikunde en met het andere in de medische wetenschap stonden. Die wisselwerking blijft vandaag de dag net zo relevant.

*Maurits Wolleswinkel,
CEO NRG PALLAS*

Versnelling ontwikkeling Small Modular Reactors

Small Modular Reactors (SMR's) zijn de toekomst van de koolstofarme energievoorziening. De eerste van deze compacte (druk)waterreactoren zullen al snel beschikbaar zijn. Daarna volgen geavanceerdere types, zoals gesmolten zout reactoren. "De voorbereidingen voor het materiaalonderzoek voor deze Small Modular Reactors zijn al gestart," vertelt NRG PALLAS-onderzoeker Murthy Kolluri. In 2027 beginnen de eerste bestralingen in de Hoge Flux Reactor (HFR) met MIDI (Materials Irradiation Device).

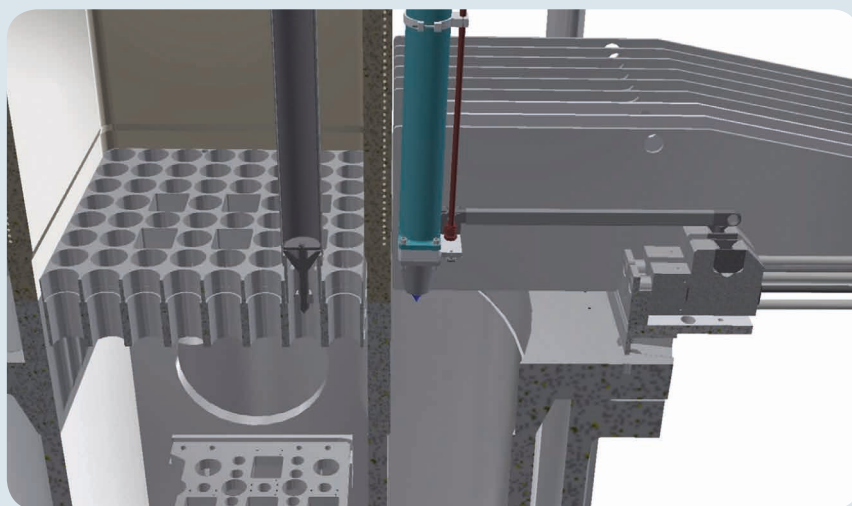
SMR's zijn niet alleen compact, maar ook flexibel inzetbaar. "In tegenstelling tot traditionele kerncentrales zullen SMR's modulair in fabrieken worden gemaakt. Ze worden in onderdelen vervoerd en geassembleerd op plekken waar klimaatneutrale energie nodig is, maar energietransport een obstakel vormt," legt Kolluri uit. "Denk aan afgelegen Arctische gemeenschappen, eilandstaten of industriële locaties waar energienetten ontbreken of overbelast zijn."

Nieuwe productiemethoden vereisen kwalificatie

"De manier waarop SMR's fabrieksmatig worden geproduceerd is nieuw: gestandaardiseerd en in componenten." Dit introduceert nieuwe productiemethoden in de nucleaire sector, zoals 3D-printen, elektronenstraallassen en koud-spuitechnologie. "De materialen die bij deze technieken worden gebruikt, moeten eveneens geschikt zijn voor toepassing in een kerncentrale. Ze zullen dus gekwalificeerd moeten worden."

Een artists Impression van MIDI, het Materials Irradiation Device dat met aan boord samples van nieuwe reactor materialen enkele jaren in de HFR zal komen te zitten.

3D-impressie van MIDI (groen). Het Materials Irradiation Device is bestand tegen de extreme neutronenflux in de poolside-facility van de HFR. De kern van de HFR is links van het MIDI te zien.



Murthy Kolluri,
NRG PALLAS Onderzoeker:

"De nucleaire industrie gaat met de komst van SMR's een nieuwe fase in."

NRG PALLAS helpt samen met JRC hierbij met MIDI, het Materials Irradiation Device, legt Kolluri uit, terwijl hij het ontwerp toont van een buisvormig apparaatje van ongeveer 60 bij 7 centimeter. "Het conceptuele ontwerp is in 2024 afgerond, als onderdeel van een samenwerking tussen JRC en NRG PALLAS."

Het apparaatje is uitgerust met thermokoppels, receptoren, gasleidingen en diverse andere meetvoorzieningen die bestand moeten zijn tegen de extreme neutronenflux van de HFR. "Gelukkig hebben we al tientallen jaren ervaring met dit soort metingen." MIDI is namelijk de verbeterde versie van een eerder apparaat waarmee NRG PALLAS onderzoek deed naar 'gewoon' reactorvatstaal voor conventionele kerncentrales.

Internationale samenwerking voor wereldwijde impact

"Wereldwijd, van Canada tot Frankrijk, hebben we verzoeken uitstaan bij partners of zij monsters van nieuwe materialen kunnen aanleveren." MIDI kan namelijk meerdere monsters van internationale partners tegelijkertijd herbergen. "Daardoor ontstaat uit één enkele bestraling een rijke dataset voor meerdere materialen."

In 2027 zal MIDI aan een manipulator afdalen in de Hoge Flux Reactor. "Direct naast de reactorkern." Het apparaat zal daar vervolgens meerdere jaren diverse experimenten ondersteunen.

"Uiteindelijk zal NRG PALLAS met MIDI bijdragen aan de kwalificatie van materialen en nieuwe productiemethoden voor SMR's," concludeert Kolluri. "Maar ook de huidige waterreactoren zullen profiteren van de experimenten." De resultaten zullen zelfs relevant zijn voor de bedrijfsduurverlenging van bestaande kerncentrales. "Want ook daar kunnen nieuwe productietechnieken en nieuwe materialen bijdragen aan de efficiënte en veilige vervaardiging van vervangende onderdelen."

Kerncentrales aantoonbaar veilig 20 jaar langer in bedrijf houden

“Wist je dat 30% procent van de kerncentrales richting de 60 jaar productie gaat? Veel van deze centrales, waaronder die in Borssele, overwegen om nóg langer open te blijven: 80 jaar. Dit komt vooral door de gestegen energieprijzen en zorgen over klimaatverandering en leveringszekerheid van energie.”

Lorenzo Stefanini leidt het team Ageing Management & Long Terms Operations bij NRG PALLAS. Hij brengt in kaart hoe je kunt aantonen dat kerncentrales 80 jaar veilig in bedrijf kunnen blijven.

“NRG PALLAS heeft internationaal het initiatief genomen om in nauwe samenwerking met partners uit onder andere Frankrijk en de Verenigde Staten een inventarisatie en analyse te maken van alle beschikbare informatie. Daarmee willen we een kennisbank opbouwen van waar uit we kunnen beoordelen of kerncentrales zo lang veilig in bedrijf kunnen blijven.”

NRG PALLAS startte dit samenwerkingsproject in 2022 met de OECD/NEA. “We werken met ongeveer 60 experts uit 20 landen samen met internationale organisaties zoals IAEA, EPRI, WNA, EU en JRC. NRG PALLAS coördineert dit project.” In 2024 werd het LTO-60+ rapport definitief gemaakt met conclusies en voorstellen

voor vervolgstappen, waarbij de letters LTO staan voor Long Term Operation. In de tweede helft van 2025 en in 2026 zullen de resultaten worden gedeeld via workshops en conferenties.

60+ jaar: mogelijk, mits aangetoond

“Van de meeste westerse kerncentrales verwachten we dat ze wel 60+ jaar in bedrijf kunnen blijven. De uitdaging zit ‘m er vooral in om dit grondig aan te tonen en te borgen.” Daarbij ziet Stefanini drie belangrijke aandachtsgebieden.

“Ten eerste zijn deze kerncentrales gebouwd in de jaren ‘70 en ‘80 van de vorige eeuw. Dat betekent dat techniek uit die tijd obsoleet gaat worden.” Vergelijk het met computers uit die tijd. “Hoewel ze ongetwijfeld nog functioneren: wie kan er nog uit de voeten met floppy discs?” Dus moet je scherp kijken naar de instrumentatie in een kerncentrale en bedenken: kunnen we daar over 20 jaar nog steeds mee uit de voeten?

Bij de kerncentrale Borssele (Zeeland) loopt op dit moment een Long Term Operations onderzoek om de bedrijfsduur te verlengen van 60 naar 80 jaar.



Lorenzo Stefanini,
Consultant Verouderingsbeheer:

“De meeste westerse kerncentrales kunnen naar verwachting 60+ jaar mee, mits dat grondig wordt aangetoond.”



En zo nee: wanneer moet je deze instrumentatie gaan vervangen en waarmee? “Technisch is dit allemaal mogelijk. Maar je moet wel een plan en een kostenplaatje hebben.”

Civiele gebouwen en constructies

Ten tweede zijn inmiddels ook de civiele structuren (gebouwen en conventionele installaties) op het kerncentralecomplex 60 jaar in bedrijf. “De nucleaire componenten zijn al die tijd zeer nauwkeurig gemonitord en onderhouden. Maar geldt dat ook voor al die civiele constructies?” Er zal dus aandacht moeten komen voor de ondersteunende gebouwen van (gewapend) beton met hulpfuncties als koelwaterpompen, kranen en werkplaatsen. “Kunnen die ook nog 20 jaar extra mee? Is er onderhoud of vervanging nodig? Wanneer? Wat gaat dat kosten?”

Schaars talent

En ten slotte moet er oog zijn voor de ‘menselijke factor’. “De jonge generatie gaat de oudere generatie opvolgen, terwijl er wereldwijd een schaarste aan menselijk kapitaal is.” Daar komt bij dat kerncentrales veelal verder weg van economisch bedrijvige locaties zijn gebouwd. “Dat maakt het aantrekken en vasthouden van jong talent extra moeilijk.” Behoud van kennis en kunde moet dus ook voor de komende twintig jaar aantoonbaar zeker gesteld zijn. “Een strategische planning voor menselijk kapitaal is

daarmee een wezenlijk onderdeel van het 60+ jaren bedrijven van een kerncentrale.”

Spin-off

Intussen is NRG PALLAS ook gestart met een spin-off uit dit onderzoek. Via Time Limited Ageing Analysis (TLAA) wordt onderzoek gedaan naar de veiligheid en functionaliteit van componenten die aan slijtage onderhevig zijn. Eenvoudig gezegd: het beantwoorden van de vraag of en wanneer een onderdeel moet worden vervangen. “Denk aan de wanddikte van koelwaterpijpen. Naarmate de tijd vordert, neemt de dikte af door onder meer corrosie.” Je kan dit proces extrapoleren in de tijd en berekenen wanneer vervanging nodig is. “Maar je kunt ook kijken of je de chemie van het koelwater kunt aanpassen. Dan zal corrosie afnemen waardoor ook de wanddikte minder snel afneemt en de pijp langer meegaat.” Operators kunnen dan kiezen welke oplossing het beste past.

Een andere spin-off is onderzoek naar het verminderen van de belasting van de organisatie door LTO-onderzoek. “Zoals gezegd: technisch talent is schaars. We weten dat ageing management veel capaciteit vraagt. Wij onderzoeken nu of we met speciale tools en de inzet van kunstmatige intelligentie de belasting van de organisatie met onderzoek en documentatie kunnen verminderen.”

Waterstofveiligheidssysteem kan nu beter gemodelleerd worden

Dat blijkt uit berekeningen die NRG PALLAS binnen een Europees project heeft uitgevoerd in een virtueel containment met experimentele data uit Duitsland en in samenwerking met leverancier Framatome.

Het Europese project AMHYCO (Accident Management of the HYdrogen/CO combustion risk) richt zich op het verminderen van het risico op ongecontroleerde ontbranding en ontploffing van waterstof en koolmonoxide tijdens een ernstig ongeval in een kerncentrale. Visser vertelt dat de onderzoekers zich in dit project zijn gaan concentreren op de ex-vessel fase van een kernsmeltongeval in een drukwaterreactor.

“We weten vrij gedetailleerd wat er met waterstof gebeurt bij de in-vessel fase van een ongeval. Dus als de kern smelt en het reactorvat intact blijft,” legt Dirk Visser uit. Als senior consultant Fluid Dynamics bij NRG PALLAS en expert in het modelleren van gasstromingen, is Visser al jaren nauw betrokken bij dit onderzoek. “We weten echter nog weinig over de volgende ex-vessel fase: wat gebeurt er in het containment als

het reactorvat niet intact blijft?” In dat extreme geval smelt de inhoud van het reactorvat door het staal heen en komt in aanraking met het beton en andere materialen binnen de veiligheidsomhulling.

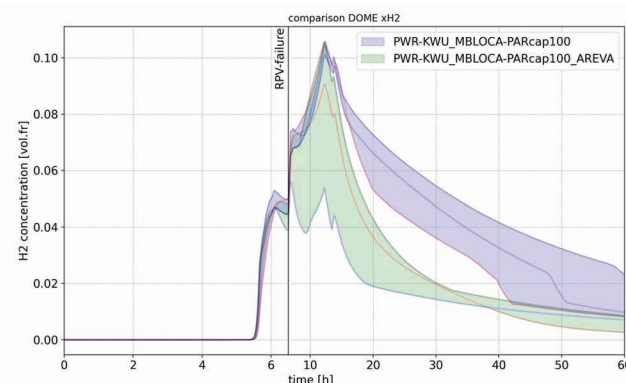
Omstandigheden veranderen wezenlijk tijdens ex-vessel fase

“Je kunt wel begrijpen dat de omstandigheden binnen het containment wezenlijk veranderen als het reactorvat smelt en de extreem hete vloeibare kern naar buiten stroomt,” licht Visser toe. “Temperatuur en druk lopen verder op en naast meer waterstof wordt er ook koolmonoxide gevormd door de interactie tussen de gesmolten kern en beton.” Waterstof en koolmonoxide zijn beide brandbare gassen die tot een potentieel explosiegevaar kunnen leiden.

Grafieklijn van de waterstofconcentratie in de reactorinsluiting (containment) gedurende een kernsmeltongeval

Het reactorvat faalt na 7 uur. Daarvoor is het ongeval in-vessel en daarna begint de ex-vessel fase.

- Lijn 1 (groen) is verkregen met bestaande recombiner correlatie
- Lijn 2 (paars) is verkregen met verbeterde recombiner correlatie



Dirk Visser,
Senior Consultant Fluid Dynamics:

“Het model van een generieke drukwaterreactor kan ongevals-scenario's doorrekenen.”

Om de concentratie van waterstof tijdens een dergelijk ernstig ongeval laag te houden en het explosiegevaar te beheersen, worden onder andere waterstof-recombinatoren gebruikt. Dat zijn simpel gezegd grote kasten met daarin een katalysator die boven een bepaalde waterstof-concentratie volledig passief (dus zonder aansturing) waterstof en zuurstof omzetten naar water.

De werking van de recombinatoren tijdens de ex-vessel omstandigheden, na het bezwijken van het reactorvat, was nog niet eerder in detail onderzocht. “Om inzicht te verkrijgen zijn binnen het AMHYCO-project verschillende experimenten uitgevoerd.” Deze tests toonden aan dat de waterstof-recombinatoren minder goed werken tijdens ex-vessel omstandigheden zoals lage zuurstofconcentraties en de aanwezigheid van koolmonoxide. “Er blijkt een verschil te zitten in de prestaties van waterstof-recombinatoren tijdens de zogeheten in-vessel en ex-vessel fase van een kernsmeltongeval.”

Bestaande veiligheidsanalyses niet meer 'up-to-date'

“Een ernstig ongeval kunnen we natuurlijk niet uittesten in een kernreactor, dat kunnen

we alleen virtueel doen met behulp van simulatiecodes.” NRG PALLAS werkt al jaren aan de ontwikkeling, validatie en onderhoud van zulke simulatiecodes voor het analyseren van ernstige ongevallen en om het risico van waterstof te kunnen voorspellen.

In de simulatiecodes wordt de waterstof-omzetting door de recombinatoren meegenomen via de correlaties van de leverancier. Op basis van de recombinator tests in AMHYCO zijn deze correlaties verder uitgebreid en verbeterd voor de ex-vessel fase van een ernstig ongeval. In 2023 voltooide NRG PALLAS het model van een generieke drukwaterreactor en in 2024 zijn hiermee verschillende ongevalsscenario's doorgerekend, zowel met de bestaande als met de verbeterde recombinator-correlaties.

Wij zagen bevestigd dat de bestaande correlaties tijdens de in-vessel fase prima voldoen, maar dat er in de ex-vessel fase sprake was van enige afwijkingen. De industrie is gewend aan het voortdurend verbeteren van hun kerncentrales volgens de laatste stand der techniek. In de komende periode zal daarom onderzocht worden wat de impact hiervan kan zijn op de bestaande veiligheidsanalyses.

Benchmark PSA niveau-3 methode

Om de veiligheid van kernenergie aan te tonen, is in Nederland een driedelige risicoanalyse verplicht: de kans op kernschade (PSA niveau-1), de kans op en eigenschappen van radioactieve emissies (PSA niveau-2) en de gevolgen voor de bevolking (PSA niveau-3). Voor dit derde niveau zijn internationale rekenmethodes nu met elkaar vergeleken om van elkaars aanpak te leren.

"PSA staat voor Probabilistic Safety Assessment," legt specialist Gilliam van Oudenaren uit. "Het is een verplicht onderdeel van de veiligheidsstudie bij een kernenergiewetvergunning. Niveau 1 berekent de kans op kernsmelting, niveau 2 de kans en samenstelling van een lozing, en niveau 3 de stralingsdoses en gezondheidsrisico's voor omwonenden."

Locatie en weer bepalen de risico's

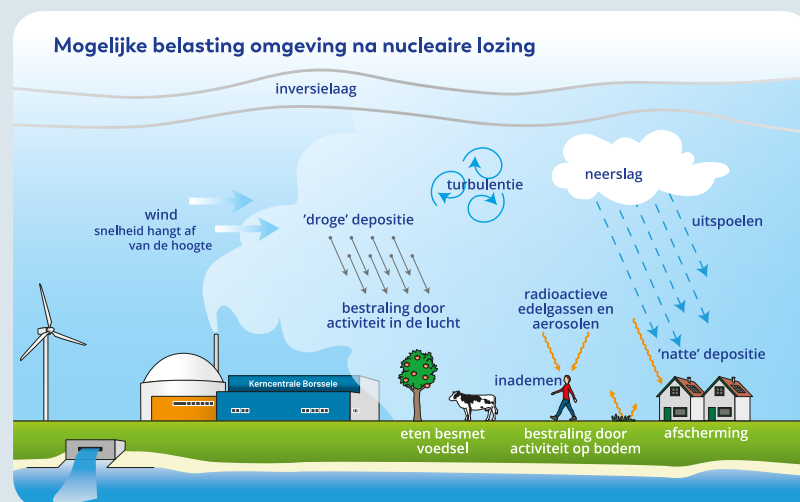
PSA niveau-3 berekent de risico's voor de bevolking bij een mogelijke lozing, waarbij onder andere het weer op een specifiek moment en de locatie worden meegenomen.

"Windrichting, windsnelheid, wel of geen neerslag – in PSA niveau-3 wordt met veel variabelen gerekend," legt Van Oudenaren uit. NRG PALLAS gebruikt hiervoor KNMI-gegevens en verspreidingsmodellen. Ook de locatie en het jaargetijde zijn bepalend: de omstandigheden in Petten, Borssele of Almelo verschillen, net als de risico's in zomer of herfst. Wereldwijd voeren slechts enkele landen PSA niveau-3 uit; Nederland is daar één van. Vijf van deze landen, waaronder Nederland, hebben nu hun rekenmethodes vergeleken in een benchmark. "Zo'n vergelijking maakt verschillen zichtbaar en helpt landen om hun aanpak verder te verbeteren."

Cloudshine

Bij 'cloudshine', een voorbijtrekkende radioactieve wolk die straling uitzendt, komen de internationale resultaten goed overeen.

Zo'n wolk is een reëel risico, want mis je net die NL-Alert die jou opdraagt om te schuilen, dan loop je die dosis inderdaad op.



Gilliam van Oudenaren,
PSA niveau-specialist:

"Windrichting, windsnelheid, wel of geen neerslag op het moment van lozing bepalen de risico's."

Gelijk speelveld

Een benchmark betekent dat verschillende landen dezelfde situatie doorrekenen met hun eigen methode. "We merkten dat de vijf deelnemende landen: India, Japan, Nederland, het VK en Zuid-Korea de opdracht verschillend interpreteerden," vertelt Van Oudenaren. Veel tijd ging dan ook naar het eenduidig vastleggen van alle parameters, tot details als de grootte van aerosolen. Uiteindelijk ontstond een gelijk speelveld: een helder gedefinieerd scenario waarin een kerncentrale radioactiviteit uitstoot. De verschillende modellen berekenden vervolgens de gevolgen voor de bevolking.

Opmerkelijk positief

Gilliam van Oudenaren noemt de benchmark-resultaten 'opmerkelijk positief'. "Het eindrapport moet nog verschijnen, maar de meeste modellen laten op belangrijke punten grote overeenkomsten zien, ondanks de complexiteit van de berekeningen." Er waren ook verschillen, vooral bij zeer lange doorrekeningen (decennia) en bij de dosis via voedselinname. "Die laatste verschillen zijn minder problematisch," aldus Van Oudenaren, "omdat blootstelling via voedsel goed te beheersen is met gerichte maatregelen."

Verschillende aannames, verschillende uitkomsten

De verschillen in uitkomsten zijn deels te verklaren door de complexe modellen voor het transport van radioactieve stoffen via de

voedselketen en landspecifieke aannames. "Gelukkig zijn de praktische gevolgen minimaal," zegt Van Oudenaren, "omdat maatregelen zoals oogstverboden radioactiviteit effectief buiten de voedselketen houden. Ook de bestaande EU-regelgeving is hiervoor adequaat. Radioactiviteit is goed meetbaar, en overschrijdingen worden voorkomen." Voor het veel problematischer onderdeel 'cloudshine', een voorbijtrekkende radioactieve wolk, kwamen de internationale resultaten juist goed overeen. "Zo'n wolk is een reëel risico: als je net die NL-Alert mist die oproept tot schuilen, Dan loop je inderdaad een dosis op."

Vertrouwen en verbeterkansen

Met de publicatie van de benchmarkresultaten begint een nieuwe fase: leren. "De benchmark werkt als een spiegel waarin deelnemers zien waar hun resultaten verschillen." Ze beseffen dat modelkeuzes en aannames de uitkomsten sterk beïnvloeden, wat direct leidt tot verbeterpunten en nieuwe kansen. Toch benadrukt Van Oudenaren dat de belangrijkste les is dat alle geteste methodes op cruciale punten betrouwbaar zijn.

Twée kansrijke verglazingsroutes voor radioactief afval

Gesmolten zout reactoren (MSR's) zijn een veelbelovend alternatief voor traditionele kernreactoren. Ze zijn vrijwel drukloos en erg efficiënt, plus: ze kunnen draaien op diverse splijtstofsoorten. Het onderzoek van NRG PALLAS naar deze reactoren trekt wereldwijd de aandacht. En dat geldt zeker voor het onderzoek naar de verwerking van het radioactieve afval uit deze innovatieve reactoren.

"In Europa hebben we veel ervaring met het verglazen (vitrificatie) van hoogradioactief afval uit drukwaterreactoren," vertelt research consultant Eva de Visser-Týnová. "Bij NRG PALLAS onderzoeken we wat er nodig is om deze methode te kunnen toepassen op afval uit gesmolten zout reactoren."

Het immobiliseren van radioactief afval in glas is volgens haar een "heel aantrekkelijke oplossing." Zodra kernsplijtingsafval (actiniden) zijn ingesloten in de glasmatrix, kunnen ze niet meer ontsnappen. "Actiniden kunnen er feitelijk niet meer uit, waardoor het verglaasde afval veilig kan worden opgeborgen in de bunkers bij COVRA, de Nederlands beheerder van radioactief afval." De vaten met gestold glas kunnen later zo in een eindberging worden gezet. Je zou denken: meteen doen met dat gesmolten zout afval! "Tja, daar lopen we tegen specifieke verschillen aan tussen het afval van drukwaterreactoren en dat van gesmolten zout reactoren."

Het hoogactieve afval uit reactoren zoals de Borssele-centrale bestaat voornamelijk uit

stabiele oxides. Echter, omdat de splijtstof bij MSR's in gesmolten zout is opgelost, heeft het afval totaal andere chemische eigenschappen. "We krijgen te maken met fluoriden. Die zitten niet in 'klassiek' kernsplijtingsafval," merkt De Visser-Týnová op.

De rol van fluoriden en radiolyse

Fluoriden zijn veelzijdige verbindingen waarin fluor combinaties aangaat met andere elementen of groepen elementen. De uitdaging zit hem in het feit dat het gedrag van fluoriden beïnvloed wordt door radiolyse. "Fluoriden worden afgebroken door blootstelling aan ioniserende straling. Dat kan leiden tot de vorming van nieuwe chemische verbindingen die soms zelfs gasvormig zijn." Zou dit in gestold glas gebeuren, dan kunnen die gassen uit het glas ontsnappen. "Zeker als je weet dat de nieuwe chemische verbindingen het glas ook nog kunnen aantasten." Met het gas zou dus ook radioactiviteit kunnen uitlogen. En dat is iets wat COVRA uiteraard niet wil tijdens de interim en eindopslag.

Verglaasde gesmolten zout afval in borosilicaat glas



Eva de Visser-Týnová,
Research Consultant:

"De focus ligt op defluorisatie voorafgaand aan het vitrificatieproces."

Op zoek naar stabilisatie

Er moet dus een oplossing gevonden worden voor de stabilisatie van gesmolten zout afval. Het team van Eva de Visser-Týnová is inmiddels een heel eind op weg. "We zijn ons onderzoek gestart met een uitgebreide literatuurstudie naar stabilisatie van de gesmolten zouten, er zijn meerdere methodes onderzocht en getest. Uiteindelijk zijn twee kansrijke 'glas-routes' als meest geschikt aangemerkt. Ook werd contact gelegd met COVRA om tot acceptatiecriteria te komen", aldus Eva.

Bij NRG PALLAS zijn inmiddels praktische experimenten gestart om te kijken welke oplossingen de beste zijn. "Daarbij ligt de focus op defluorisatie voorafgaand aan het vitrificatieproces." Immers, als je fluor er zoveel mogelijk uithaalt, haal je ook de angel uit het probleem. Defluorisatie gebeurt bij hoge temperaturen, bij deze hoge temperatuur worden fluoriden ontleed en omgezet in oxiden, waardoor de afvalstoffen in een stabielere en minder reactieve vorm worden gebracht. "Dat brengt dit afval in de richting van de toekomstige eisen voor beheer en opslag bij COVRA."

Succesvolle experimenten en volgende stappen

'Het onderzoeksteam heeft inmiddels twee glas-mengsels bekeken: ijzerfosfaatglas (ijzeroxide en

fosfaat) en borosilicaatglas (siliciumdioxide en booroxide). "Beide soorten glas staan bekend om hun hoge thermische en chemische weerstand, waardoor ze radioactief afval veilig en effectief kunnen immobiliseren (insluiten). Ook de tests waren succesvol, inclusief analyses van de gevitricificeerde monsters." Het is nog te vroeg om een voorkeur voor een glassoort uit te spreken, beide hebben voor- en nadelen. Eva de Visser-Týnová: "In 2024 zijn aanvullende vitrificatietests uitgevoerd om de datasets te completeren. Een artikel met de resultaten wordt in 2025 gepubliceerd."

De volgende stap is vitrificatie van 'echt afval'. "We gaan daarvoor de ongeveer 20 ml 'echt' afval gebruiken dat is ontstaan uit recente gesmolten zoutbestralingsexperimenten in de HFR." Om dat te kunnen doen, moest er wel een speciale oven worden gebouwd, geschikt voor gebruik in een hot-cell. "Dat is gelukt." De oven is klaar en wordt nu in het lab gebruikt voor de testen. Binnen het Europese project MIMOSA wordt, parallel aan het hierboven beschreven onderzoek, gewerkt aan een route voor chloridehoudend afval. Met de partners in dit project worden namelijk de mogelijkheden onderzocht van het gebruik van plutonium- en uraniumchloriden als splijtstof voor gesmolten zout reactoren. De komende jaren zullen dus belangrijk worden voor de ontwikkeling van afvalroutes voor gesmolten zout reactoren.

MICRODOSIMETRIE:

Stralingsdosis berekenen voor een precieze radionuclidentherapie

Radionuclidentherapie is een veelbelovende methode waarbij radioactieve deeltjes gericht naar tumorcellen worden gebracht. Deze deeltjes geven daar energie af om de tumor te bestrijden. Een belangrijk aspect hierbij is het vaststellen van de hoeveelheid energie – de stralingsdosis – die deze deeltjes afgeven in de tumor.

Radionucliden geven hun energie af op celniveau, maar deze energieafgifte is lastig te meten. “Op celniveau kan dat niet meer direct,” legt Tim van Dijk uit. Daarom wordt er gemodelleerd en berekend, onder andere met de rekencode Monte Carlo N-Particle (MCNP). Traditionele methoden uit de radiotherapie meten energie op orgaanniveau (macro-dosimetrie) en zijn niet nauwkeurig genoeg voor kleinere schaal. Beeldvorming werkt via straling die buiten het lichaam te meten is, maar bij radionuclidentherapie wordt de straling van binnenuit snel geabsorbeerd en reiken de elektronen niet zo ver.

Van macro via micro naar nano

De snelle energieabsorptie in het weefsel is een groot voordeel van deze therapie, omdat gezond weefsel gespaard blijft. Het nadeel is dat het effect nauwelijks direct te meten is. “Om de stralingsdosis nauwkeurig te bepalen, schakelen we over van macrodosimetrie naar micro- en nanodosimetrie,” legt Tim uit. Hoewel ‘dosimetrie’ meten betekent, wordt op cel- en DNA-niveau vooral gerekend. “Omdat directe meting niet mogelijk is, simuleren en berekenen we wat er precies gebeurt, met natuurkundige kennis en geavanceerde rekenmethodes.”

Een voorbeeld van een vereenvoudigd model dat gebruikt is in de simulaties.

Hierbij zijn de paden van de elektronen (groene lijnen) gesimuleerd van I-125 nucliden (groene cirkels) op het oppervlak van een cel (grote zwarte cirkel). Op deze manier kan de energie-afgifte in de cel worden berekend.



Tim van Dijk, Natuurkundige en Stralingsbeschermingsdeskundige:

“Het pad van het elektron bepaalt of er voldoende energie in de kankercel terechtkomt om deze kapot te maken”.

Microdosimetrie berekent en simuleert de energieafgifte aan cellen of celstructuren zoals de celkern. Nanodosimetrie kijkt nog dieper, naar de energieafgifte binnenin de cel, op DNA-niveau. “Ik werk nu vooral op micro-niveau,” aldus Tim.

Wat we willen begrijpen: het pad van het elektron

Tim verduidelijkt: “Stel dat dit bolletje een kankercel is. De groene bolletjes zijn radionucliden die elektronen uitzenden. Deze elektronen zwerven door het weefsel en leggen grillige paden af.” De groene lijntjes in de afbeelding tonen deze paden, en juist deze bepalen of er genoeg energie in de kankercel komt om deze te vernietigen.”

Internationale samenwerking

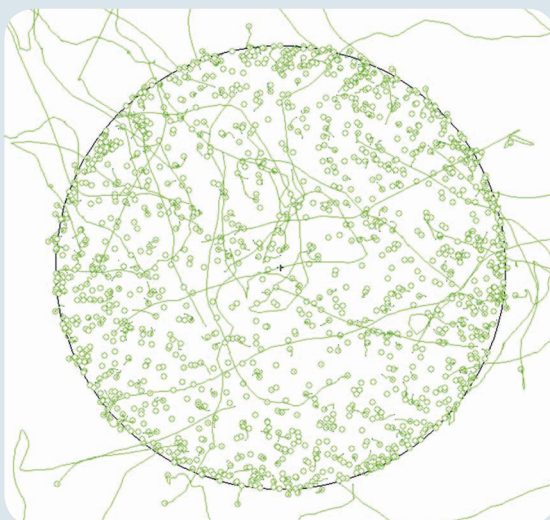
De afbeelding is uiteraard een vereenvoudiging, benadrukt Tim. Het doel is het testen van de rekenmethode, onder andere via een internationale benchmark waarbij verschillende landen de energieafgifte van jodium-125 aan een cel berekenen. “Het is als dezelfde som op verschillende rekenmachines uitrekenen: komen

dezelfde resultaten eruit?” Als er internationale overeenstemming is over de beste methode, begrijpen we beter wat er op celniveau gebeurt. De rekencode presteert goed in vergelijking met literatuur en andere deelnemers, maar er zijn ook verschillen die verder onderzoek vragen. Na jodium-125 richten we ons binnenkort op lutetium-177,” vertelt Tim.

De weg vooruit

De therapieën die hieruit voortkomen zijn veelbelovend. Door radionucliden te koppelen aan moleculen die tumorcellen opsporen, wordt de stralingsbron gericht naar kankercellen, ook de kleine, niet zichtbare uitzaaiingen. De radionuclide geeft energie af en vernietigt tumorcellen met minimale nevenschade.

Hoewel het nog zeker tien jaar duurt voordat deze therapie in ziekenhuizen wordt toegepast, wordt er hard aan gewerkt. Microdosimetrie is daarbij essentieel: hoe meer we weten over de effecten, hoe dichter we bij nieuwe behandelmogelijkheden komen, aldus Tim van Dijk.



ONDERZOEK NAAR HET JUISTE STAAL VOOR DE GESMOLTEN ZOUT REACTOR

Heliumverbrossing onder de loep

De ontwikkeling van gesmolten zout reactoren (MSR's) groeit wereldwijd. Verschillende ontwikkelaars werken aan deze innovatieve technologie. Een belangrijke uitdaging is het vinden van geschikte materialen voor het reactorvat. Bij NRG PALLAS wordt hier intensief onderzoek naar gedaan.

Kiki Naziris, research consultant bij NRG PALLAS, leidt het onderzoek naar materialen voor de Molten Salt Reactor. Ze onderzoekt metaalmonsters op bestraling en temperatuurbestendigheid. "Een gesmolten zout reactor werkt bij temperaturen tot 700°C, meer dan het dubbele van conventionele reactoren zoals Borssele," legt Kiki uit. "Daarnaast is het zout een zeer corrosief koelmiddel, wat hoge eisen stelt aan het materiaal. Het reactorvat moet bestand zijn tegen hitte, straling én de agressieve werking van het zout."

De uitdaging van heliumverbrossing

Nikkellegeringen worden gezien als veelbelovend. "We weten dat ze goede mechanische eigenschappen bij hoge temperaturen hebben en bestand zijn tegen corrosie," aldus Kiki. Ze zijn echter nog niet gekwalificeerd voor gebruik in nucleaire constructies. "We weten dat wanneer nikkel neutronenstraling absorbeert, er helium vrijkomt. Dit kan onder bepaalde omstandigheden leiden tot verbrossing van de legering. We werken hard aan het analyseren en begrijpen van dit fenomeen zodat de industrie met oplossingen kan komen."

Beproefd trekmonster
Onderdeel van het nabestralingsonderzoek van het helium onderzoeksproject.



Kiki Naziris,
Research Consultant:

"Neutronenstraling is bepalend voor de degradatie van de kandidaatlegeringen".

Voor haar onderzoek heeft Kiki monsters van zeven kandidaat-legeringen verzameld. "Daarvan hebben we drie sets gemaakt: een referentieset die nergens aan blootgesteld is, een set die in een oven op 650°C is geplaatst en een set die op dezelfde hoge temperatuur werd bestraald in de Hoge Flux Reactor (HFR)."

Na 270 dagen zijn de monsters uit de HFR en de oven gehaald. "We zagen inderdaad wat we al vermoedden: de samples uit de oven vertonen zeer geringe degradatie, terwijl in de samples die aan neutronenstraling werden blootgesteld heliumverbrossing zichtbaar is." Er kan dus geconcludeerd worden dat niet de temperatuur, maar de neutronenstraling bepalend is voor de degradatie van de kandidaatlegeringen.

"Misschien goed om hier wel te vermelden dat er in deze studie niet naar het effect van het zout is gekeken," voegt Kiki Naziris toe. "De samples zijn in een inerte atmosfeer bestraald. We hebben puur het effect van bestraling bij hoge temperaturen onderzocht."

Mogelijke oplossingen voor heliumverbrossing

Zodra het fenomeen heliumverbrossing volledig wordt begrepen, komen er oplossingen in zicht. "Denk aan een 'heliumval'," legt Kiki uit. Door nanodeeltjes aan te brengen, kan helium weggevoerd worden van kritieke plekken naar

minder schadelijke locaties. Een praktische oplossing is het reactorvat volledig vervangbaar maken. "Als je weet dat maar een paar materialen geschikt zijn en kwalificatie jaren kost, kun je daarmee in het ontwerp rekening houden. Een gedegraderd vat kan dan tijdens een onderhoudsstop worden vervangen, mits je de verwachte levensduur goed kent."

Taaheid en structuur

Nu de bestraling is afgerond, start het 'nabestralingsonderzoek', vooral gericht op mechanische beproevingen om de taaheid en sterkte van de monsters te bepalen. "We onderzoeken de microstructuur met onze eigen elektronenmicroscop, maar zoeken ook een partner die nog dieper in het bestraalde materiaal kan kijken," vertelt Kiki Naziris. Ze merkt op dat de nikkelhoudende legeringen gevoeliger zijn voor heliumverbrossing dan roestvast staal.

AI schakend ervaring opdoen met ‘toy problems’

Kunstmatige intelligentie (AI) speelt een steeds belangrijkere rol in ons dagelijks leven. AI kijkt in onze auto's mee naar verkeerssituaties en op school en het kantoor zijn Large Language Models als ChatGPT, Le Chat en Gemini niet meer weg te denken. Ook in de nucleaire industrie kan AI processen verbeteren en veiliger maken. “We zijn nu bezig met ervaring opdoen,” legt Edo Frederix AI-consultant bij NRG PALLAS uit. “Het is net als schaken: je leert het niet uit een boekje, je moet het vooral veel doen.”

Kunstmatige intelligentie kan in potentie aanzienlijk bijdragen aan nucleair onderzoek en innovatie. Bij NRG PALLAS worden nu de eerste stappen gezet. Een team van AI-experts werkt aan zogenaamde ‘toy problems (speelgoed-problemen)’. “Dit zijn bekende nucleaire uitdagingen waar al veel ervaring mee is,” vertelt Frederix. “We passen kunstmatige intelligentie toe om te zien welke oplossingen die genereert zodat we de uitkomsten kunnen vergelijken met wat we al weten.”

Verrassende uitkomsten

Soms kan AI een eye-opener zijn. “Gangbare praktijken leiden tot gangbare uitkomsten. Hierdoor blijven nieuwe oplossingen mogelijk onopgemerkt,” aldus Edo Frederix. Om dit te illustreren, toont hij een afbeelding van een

ruimte-antenne die bij NASA door AI werd voorgesteld. “Kunstmatige intelligentie op basis van een genetisch algoritme selecteerde uit een grote groep varianten de best presterende individuen en kruiste die tot een optimale variant.”

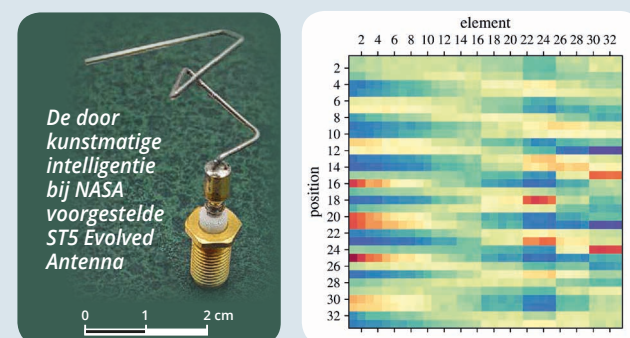
Zo'n selectieproces is gemodelleerd naar Darwins ‘survival of the fittest’, waarin de sterkste ontwerpen overleven en de minder sterke afvallen. “Dit leidde bij NASA tot een onverwacht antenne-ontwerp dat onder omstandigheden in de ruimte het beste presteert.”

‘Selecteer de optimale kernsamenstelling’

Een van de ‘speelgoeduitdagingen’ waaraan Edo Frederix' team werkt, is het bepalen van de optimale samenstelling van een reactorkern.

Met een genetisch algoritme gegenereerde geoptimaliseerd kernbelading voor de Hoge Flux Reactor. Op dit moment wordt dit nog gedaan met vaste lijsten van uraniummassa's. Hier is gewerkt met ‘populaties van mogelijke kernsamenstellingen’. Hierdoor wordt het genereren van nieuwe, betere kernsamenstellingen veel dynamischer en flexibeler.

De kleur in de matrix geeft aan hoe waarschijnlijk het is dat een bepaald element (kolommen) op een specifieke positie (rijen) terechtkomt. Een blauwe kleur betekent een lage waarschijnlijkheid, terwijl rood staat voor een hoge waarschijnlijkheid.



Edo Frederix, AI-consultant:

“AI biedt voordelen bij de snelle, eerste selectie van kansrijke oplossingen voor alledaagse uitdagingen in de nucleaire sector.”



Ieder jaar wordt deze bij een operationele kerncentrale vernieuwd en aangepast. Er komen nieuwe splijtstofstaven bij, oude worden afgevoerd en een deel wordt anders geplaatst; een hele puzzel. “De reactorkern moet voldoen aan specifieke wensen,” legt Frederix uit. “Je wilt bijvoorbeeld een bepaalde temperatuur – niet te hoog of te laag – en zo weinig mogelijk radioactief afval overhouden door optimale ‘verbranding’.”

Zo'n optimale kernsamenstelling wordt nu nog berekend met vertrouwde technieken die zijn gebaseerd op ruim vijftig jaar praktijkervaring. “AI kan hier een nieuwe, nuttige bijdrage leveren,” vermoedt Frederix. “AI-software kan namelijk veel sneller dan welk mens of gangbare techniek honderden mogelijke kern-ontwerpen analyseren op basis van daartoe getrainde neurale netwerken. Het kiest daaruit de best-presterende varianten en kruist die weer tot een nieuwe generatie. Een deel hiervan presteert nóg beter, terwijl een ander deel alsnog afvalt.”

Dit proces van ‘natuurlijke selectie’ kan net zo lang worden herhaald totdat de ideale reactorkern overblijft: bijvoorbeeld die met de beste temperatuurprestatie bij de minste hoeveelheid radioactieve afval. “AI is en blijft een hulpmiddel. De uiteindelijke beslissing blijft uiteraard altijd de taak van de expert die de AI-resultaten controleert met gevalideerde methodes,” verzekert Frederix.

AI als ‘early warning systeem’

Een andere ‘toy-uitdaging’ die bij NRG PALLAS wordt onderzocht, is het trainen van AI met operationele ervaring. Een kerncentrale heeft een specifieke handleiding en functioneert op basis van voorspelbare informatie. “Denk aan druk-, temperatuur- en debietmetingen die samenkomen in de regelkamer.” Kunstmatige intelligentie kan als ‘early warning systeem’ razendsnel vaststellen of er ergens een afwijking optreedt. Ook kan het systeem, op basis van informatie uit de ‘handleiding’ van de kerncentrale, een suggestie voor een oorzaak en een herstel-actie doen. “Met zo'n AI-systeem kun je operationele beslissingen van het wachtpersoneel snel en efficiënt ondersteunen. Je wint aan snelheid en je voorkomt dat je in de analysefase iets over het hoofd ziet.” De uiteindelijke beslissing wordt altijd genomen door operators die werken op basis van gevalideerde procedures en methodes.

De toekomst

Net als in veel andere sectoren staat de introductie van AI in de nucleaire industrie nog helemaal aan het begin. Het bevindt zich, zoals gezegd, in de ‘speelgoed’-fase. Toch is het Frederix wel duidelijk waar de voordelen liggen: “de snelheid waarmee kansrijke oplossingen voor allerlei praktische vraagstukken kunnen worden geselecteerd en tot besluitvorming voorgesteld.”

Razendsnelle én veelbelovende nucleaire ontwikkelingen

NRG PALLAS is een studie gestart naar het gebruik van nucleaire technologie in de ruimte- en scheepvaart. Het doel is om NRG PALLAS-experts beter in staat te stellen vragen te beantwoorden en potentiële nieuwe toepassingen te identificeren.

Er is inmiddels brede (internationale) samenwerking gezocht, onder meer met het European Space Agency (ESA) en met het Nederlandse Allseas en NuclearDrive consortium. Volgens Ferry Roelofs, Account Manager Research, liggen er kansen in voortstuwing en energievoorziening op zee en in de ruimte.

Op zee

De noodzaak tot verduurzaming drijft de maritieme sector, die worstelt met beperkte opties voor duurzame energie aan boord. Roelofs stelt dat nucleaire energie één van de weinige opties is voor schepen om aan nul-emissie-eisen te voldoen. Grote spelers zoals het Nederlandse Allseas willen rond 2030 al op atoomkracht varen. Nucleair aangedreven schepen, zoals onderzeeërs en ijsbrekers, zijn niet nieuw. Nederland heeft bovendien zowel een rijke scheepsbouw- als nucleaire historie, met o.a. het NERO-ontwerp voor een scheeps-reactor uit de jaren zestig. Dat ontwerp brak toen niet door, omdat fossiele aandrijving veel goedkoper was en klimaat of milieu nauwelijks een issue was.

De huidige SMR's (die overigens wel lijken op het NERO-ontwerp) bieden naast nul-emissie ook voordelen als langere vaartijden zonder te hoeven bunkeren, wat tijd, geld en milieu-impact bespaart. Ook voor schepen met energie-intensieve installaties (zoals voor diepzee-mijnbouw), is nucleaire energie een efficiënte en misschien wel dubbele oplossing (voortstuwing én energievoorziening).

Uitdagingen en kansen

Veiligheid en regelgeving zijn cruciale aandachtspunten, waaronder risico's bij aanvaringen en ingrijpen op afstand bij verlies van controle over het schip. Landen als Nederland en Noorwegen, met hun nucleaire maar vooral maritieme traditie en doelgerichte regelgeving, bieden wellicht goede mogelijkheden op het gebied van vergunningen. Veiligheidsdoelen worden voorgescreven, maar de regelgeving biedt flexibiliteit in de manier waarop die doelen worden bereikt. "Daarmee biedt de Nederlandse regelgeving ruimte voor innovatie en sluit ze goed aan op nieuwe technologieën, terwijl tegelijkertijd de veiligheid gewaarborgd blijft."



Allseas wil scheepsreactoren ook geschikt maken voor toepassing op land. De verwachting is dat dergelijke kleine, modulaire reactoren een bijdrage gaan leveren aan de verduurzaming en van energie-intensieve sectoren, zoals industrieclusters, havens en datacenters. De kleine modulaire reactor van Allseas (met een elektrisch vermogen van 25 MW en met een vermogen van 70 MW aan opwerkte warmte) levert stabiele, CO₂-vrije elektriciteit en warmte. Daarmee kan het overbelaste elektriciteitsnet worden ontlast en de energiezuikerheid voor industrie en havens worden versterkt.

Ferry Roelofs, Account Manager
Research & Innovation:

"Er liggen zowel op zee als in de ruimte kansen op voortstuwing en energievoorziening."



In de ruimte

Nucleaire technologie biedt ook interessante voordelen voor ruimtemissies. Zo kan zij worden gebruikt voor de aandrijving van raketten in de ruimte (niet bij de lancering), het opwekken van stroom op een ruimtebasis, of het leveren van warmte en elektriciteit aan satellieten, voertuigen of andere toepassingen via radio-isotopen. "NRG PALLAS heeft veel kennis over nucleaire veiligheidsaspecten in huis, inclusief ongevals-scenario's en de verspreiding van radioactieve emissies. Die kunnen kennis en expertise van bijvoorbeeld ESA dus aanvullen." Veiligheid zal bij alle geschetste ruimtevaartontwikkelingen voorop staan. "Hoewel de perspectieven goed zijn en de ontwikkelingen ook relatief snel gaan, is er dus nog genoeg uit te zoeken en kan NRG PALLAS bijdragen met bestaande en nieuw te ontwikkelen kennis en kunde."

De rol van NRG PALLAS

Het onderzoeksteam van NRG PALLAS heeft de Nederlandse én internationale nucleaire historie inmiddels in kaart gebracht, inclusief incidenten en mislukkingen. Ook de huidige positie van NRG PALLAS is geïnventariseerd. Zo zijn de kennis van technische, veiligheids- en regelgevingsaspecten beschreven en zijn relevante stakeholders bekend, waarmee al eerste contacten zijn gelegd. Roelofs: "Deze studie wordt voortgezet en kan leiden tot nieuwe onderzoeksvoorstellen binnen het PIONEER-programma of tot andere initiatieven zoals Europese samenwerkingsprojecten.

In ieder geval heeft het nu al geleid tot een opdracht van Allseas, waarvoor een conceptueel veiligheidsdocument wordt opgesteld dat als basis kan dienen voor overleg met de ANVS. Ook wat we nog niet weten of nog moeten doen, is in kaart gebracht." Roelofs benadrukt dat specifieke omgevingsfactoren, zoals golfslag op zee of het gebrek aan zwaarte-kracht/koelmogelijkheden in de ruimte, nog moeten worden meegenomen in de bestaande simulatietools. "Die moeten daarna natuurlijk ook weer opnieuw worden gevalideerd.

Internationale samenwerking

NRG PALLAS is in contact met diverse internationale samenwerkingsverbanden die deze innovatieve nucleaire ontwikkelingen verkennen:

SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform): een Europees platform dat de ontwikkeling van veilige, duurzame en economisch haalbare nucleaire technologieën bevordert, zoals SMR's die interessant zijn voor de maritieme industrie.

ESA (European Space Agency): NRG PALLAS onderzoekt mogelijkheden voor samenwerking.

NuclearDrive: een Nederlands consortium (onder leiding van Nederland Maritiem Land) dat het gebruik van kernenergie in de maritieme sector onderzoekt, met partners als TU Delft, TNO en Allseas.

NuProShip (Nuclear Propulsion in Shipping): een Noors initiatief dat de ontwikkeling van nucleaire voortstuwings-technologieën voor commerciële scheepvaart stimuleert.

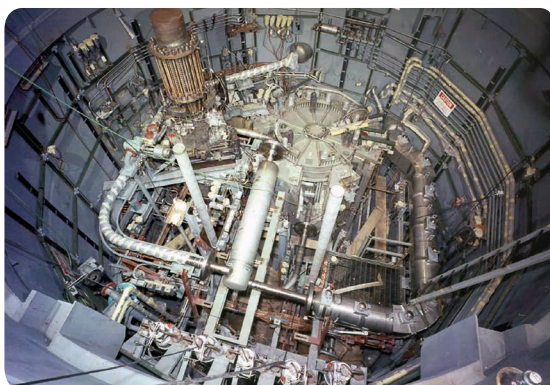
SANE (Safety Assessment of Non-Electric Uses of Nuclear Energy): een nieuw Europees samenwerkingsproject waar NRG PALLAS aan deelneemt, gericht op de veiligheidsbeoordeling van niet-elektrische nucleaire toepassingen, met voor NRG PALLAS een focus op warmtekracht koppeling (bv. waterstofproductie) en maritieme/ruimtevaarttoepassingen.

SUE: zekerheid van gesmolten zout reactor-simulaties

Nu ontwikkelaars van geavanceerde Small Modular Reactors (ook wel: AMR's) werken aan een nieuwe generatie kleine kerncentrales, groeit de interesse in oude experimenten, zoals de gesmolten zout reactor in Oak Ridge (VS, 1965-1969). NRG PALLAS heeft hiervoor een thermo-hydraulisch model gemaakt om simulaties te vergelijken met de werkelijkheid.

Om de betrouwbaarheid van de simulaties te bepalen, berekent het programma SUE de onzekerheidsmarge. Marek Stempniewicz, systeemcode-specialist bij NRG PALLAS, legt uit: "We kunnen een gesmolten zout reactor nabootsen in een computer, maar hoe betrouwbaar zijn die resultaten?" Paradoxaal genoeg verhoogt het kennen van de onzekerheidsmarge juist de zekerheid over de berekening.

Vergelijking met een experiment helpt hierbij, al moesten ze voor dit type reactor zestig jaar terug in de tijd, wat onzekerheden veroorzaakt door onvolledige of onduidelijke verslaglegging. Zowel de simulatie als het experiment dragen dus bij aan die onzekerheid. De vraag is: hoe beïnvloeden deze onzekerheden belangrijke aspecten zoals reactiviteit, temperatuur en vermogen?



Klinkt dit als Abracadabra?

Marek Stempniewicz legt het uit met een voorbeeld waar we allemaal bekend mee zijn: het zetten van thee. "Het duurt gemiddeld 5 minuten om water aan de kook te brengen in een elektrische waterkoker. Maar een ervaren theezetter weet dat die tijd kan variëren." Om te begrijpen waardoor die variatie ontstaat, kijken we naar de invoerwaarden. "We nemen voor het gemak drie factoren: 2.000 Watt elektrische energie, 0,5 liter leidingwater, en een beetje energieverlies. Vervolgens zetten we 200 keer thee om de variaties en hun invloed op de kooktijd te onderzoeken. We zien dat het vermogen fluctueert tussen 1.980 en 2.020 Watt. Ook komen kleine afwijkingen voor, zoals 0,45 of 0,55 liter water gebruiken, en variaties in de samenstelling van het leidingwater. Daarnaast verschillen de kamertemperaturen ook iets." Uiteindelijk blijft de gemiddelde kooktijd 5 minuten, maar met een onzekerheidsmarge van plus of min 5 procent.

"In dit voorbeeld gaat het ons om de kooktijd; we willen weten hoe lang het duurt voordat de thee klaar is (5 minuten $\pm 5\%$). Bij een reactor-toepassing willen we bijvoorbeeld weten hoe snel we veiligheidsmaatregelen moeten nemen, bijvoorbeeld hoe lang het duurt voordat de kern beschadigd raakt (bijvoorbeeld 10 uur $\pm 10\%$). Er moet voldoende marge zijn om schade te

Marek Stempniewicz,
Systeemcode-specialist:

"NRG PALLAS heeft de historische data van het gesmolten zout reactor experiment in Oak Ridge (USA) ingevoerd in de computer om het experiment na te bootsen."



voorkomen. "Als we concluderen dat we 10 uur minus 10% hebben, betekent dat eigenlijk 9 uur minus een extra veiligheidsmarge."

Efficiënt rekenen op basis van willekeurige en deterministische bemonstering

Honderden keren thee zetten is iets wat we allemaal wel doen, maar de kooktijd elke keer meten is best lastig. Het is nog veel moeilijker om honderden of zelfs duizenden computersimulaties van ongelukken in een kerncentrale te draaien en al die data nauwkeurig te controleren. Daarom is er een tool nodig die dit werk automatisch kan doen. Marek ontwierp daarvoor een Uncertainty Quantification (UQ) computercode genaamd SUE (System code Uncertainty Evaluation). "SUE bepaalt hoeveel simulaties nodig zijn, maakt de invoergegevens voor elke simulatie klaar door willekeurig steekproeven te nemen uit de onzekere parameters, start vervolgens alle simulaties, controleert de resultaten en geeft mij uiteindelijk de samenvatting van de uitkomst."

Dit proces is een voorbeeld van een aselechte steekproefmethode. Er bestaat ook een slimmere methode: de deterministische steekproefmethode. Die kan het aantal benodigde berekeningen flink verminderen. "We gebruiken een wiskundige truc om representatieve resultaten uit een kleinere dataset te halen." SUE kan beide methodes

toepassen, zowel aselechte als deterministische steekproeven.

Historische Data en SUE's rol

"Om te weten hoe betrouwbaar het model is, wil je de onzekerheidsmarge kennen. Dus hebben we de historische data van het gesmolten zout reactor-experiment in Oak Ridge ingevoerd om het experiment na te bootsen," vervolgt Marek. Zoals gezegd is er onzekerheid rond de parameters van dit experiment. "Wat ik deed, was variaties toevoegen aan de zouteigenschappen, dichtheid, viscositeit van het mengsel, warmtegeleiding en nog meer realistische variaties aan de input."

Het computermodel begon te simuleren en SUE berekende vervolgens wat deze variaties deden met het gedrag van de reactor. "Daaruit rolden allerlei uitkomsten. Voor sommige parameters, zoals bijvoorbeeld warmtecapaciteit, waren de verschillen minimaal. Voor andere parameters, zoals warmtegeleiding, waren de uitkomsten veel gevoeliger."

De berekeningen die nu gedaan zijn, zullen worden herhaald met betere invoergegevens die inmiddels via een Amerikaanse partner verkregen zijn. Bovendien zal het Amerikaanse Argonne National Laboratory met hun eigen systeemcode en onzekerheidscode dezelfde berekeningen uitvoeren. "We kunnen dan de resultaten met elkaar vergelijken."

EXTERNE DREIGING:

Hoe beïnvloedt de beveiliging de veiligheid van een kerncentrale?

De beveiliging van kerncentrales is cruciaal, vooral in een wereld die almaar onzekerder wordt. De invloed van beveiligingsincidenten op de kans van een kernongeluk krijgt steeds meer aandacht. "Er is zeker een koppeling tussen veiligheid en beveiliging, maar hoe meet je de invloed precies?"

In Nederland werkt NRG PALLAS aan een veiligheid/beveiliging-interface. Dit instrument geeft met een getal inzicht in zowel de veiligheid als de beveiliging van een nucleaire installatie. Luuk Duisings, Risk and Reliability Consultant bij NRG PALLAS, legt uit dat deze methode moet leiden tot een gestandaardiseerde aanpak die het effect van beveiligingsincidenten op de veiligheid van kernreactoren vaststelt.

Het verschil tussen 'safety' en 'security'

Traditioneel is er in de nucleaire sector een duidelijke scheiding tussen 'safety' (veiligheid) en 'security' (beveiliging):

De focus van safety (veiligheid) ligt op risico's die voortkomen uit onbedoelde en toevallige gebeurtenissen en faalscenario's. Denk hierbij

aan natuurlijk voorkomende gevaren zoals aardbevingen, hardware-falen van systemen, structuren en componenten, of menselijke fouten. Nucleaire veiligheidsanalyses houden zich bezig met het effect en de kans van een kernongeluk "Dit noemen we de Safety Hazard Approach," legt Duisings uit. "Met back-upsystemen, training en procedures kunnen we die kans weer verkleinen."

Security (beveiliging) richt zich op opzettelijke handelingen en kwaadwillende bedoelingen. Hoewel deze 'security-incidenten' de veiligheid uiteraard ook beïnvloeden, is het uitdagend om dit effect te kwantificeren. Duisings wil daarom naast de Safety Hazard Approach ook een Security Hazard Approach ontwikkelen. "Deze kan uiteindelijk zelfs onderdeel worden van de Probabilistische Veiligheidsanalyse (PSA)."

De vier stappen van de 'Security PSA'

Om de beveiligingsaspecten in de PSA op te nemen, heeft Duisings een methode in vier stappen voorgesteld:

1. Bepalen van specifieke bedreigingen: welke bedreigingen worden in de analyse meegenomen?
2. Uitwerken van scenario's: hoe kunnen de gekozen bedreigingen zich in de praktijk voordoen?
3. Modelleren van installatiereacties: hoe reageert de kerncentrale(organisatie) op de bedreiging en wat zijn de gevolgen voor de systemen?
4. Kwantificeren van de gevolgen: de effecten van de scenario's worden uitgedrukt in een getal dat maakt de impact meetbaar maakt.

Luuk Duisings,
Risk & Reliability Consultant:

"Leren van het verleden en
internationaal samenwerken
zijn cruciaal."



De PSA is dé standaardmethode waarmee de kans op een kernongeluk wordt berekend en uitgedrukt in een kansgetal.

Bedreigingen en de Design Basis Threats (DBT's)

Duisings stelt dat beveiligingsrisico's ('Security Hazards') op dezelfde manier kunnen worden benaderd als veiligheidsrisico's ('Safety Hazards'). Hierbij vormen beveiligingsincidenten waartegen een kerncentrale bestand moet zijn de leidraad." Denk aan terroristische aanvallen, cyber-aanvallen, sabotage of diefstal van nucleair materiaal. "Ook de eventuele rol van eigen personeel wordt hierin meegenomen."

Is het activisme of terrorisme?

Een gematigd voorbeeld is activisme. Als indringers worden gedetecteerd, komt de beveiligingsorganisatie van de kerncentrale in actie. Zelfs als een indringer snel wordt overmeesterd en geen directe schade aanricht, heeft dit al een theoretisch effect op de kans op kernsmelt. Immers: als een kerncentrale uit voorzorg wordt afgeregeld, worden er systemen aangestuurd en handelingen verricht. Dat heeft invloed op de uitkomsten van de PSA.

Een stap verder gaat de (fictieve) testcase waarbij Duisings fictieve terroristen verschillende beveiligingsringen laat doorbreken om bijvoorbeeld een primair pompegebouw over te

nemen. "Dit scenario is gemodelleerd in de PSA, waarbij onder andere het falen van detectie, respons en/of bescherming werd meegenomen. Als de kerncentrale het pompegebouw verliest, is het effect daarvan uit te rekenen."

Zo wordt een Security Hazard dus vertaald naar een Safety Hazard, "die vervolgens gekwantificeerd kan worden."

Toekomst van de Security PSA

Meteen doen dus, zo'n Security PSA! "Helaas, het implementeren van deze aanpak is niet eenvoudig," weet Duisings uit ervaring. "De huidige PSA-methode is in tientallen jaren ontwikkeld en evolueert langzaam." Bovendien is beveiligingsinformatie vaak geheim, waardoor openbaar onderzoek bemoeilijkt wordt. "Wij lossen dat op door naar het verleden te kijken: welke incidenten hebben plaatsgevonden en welke invloed hadden die op de nucleaire veiligheid?" Ook internationale samenwerking is cruciaal. Tijdens de IAEA-conferentie ICON (mei 2024) en door gesprekken met IAEA-experts verzamelde Duisings waardevolle inzichten voor deze methode. "De eerste stappen zijn gezet. We weten dat de Security PSA mogelijk is, maar de weg is nog lang," aldus Duisings.

Nieuw leven voor elektronen-microscoop SEM

In 2010 nam NRG PALLAS een Scanning Elektronen Microscoop (SEM) in gebruik voor toepassing in een hot cell. Vijftien jaar lang maakte hij diepgaand onderzoek mogelijk naar bestraalde materialen uit de HFR. Deze SEM leverde een schat aan informatie op, totdat de oorspronkelijke sensoren versleten waren en niet meer leverbaar bleken.

“Samen met onze partners hebben we nieuwe Oxford Instruments SEM-detectoren uitgebreid met stralingsafscherming, speciaal voor onze microscoop,” legt Yasin Yigittop, Projectmanager Fuel & Material Irradiation bij NRG PALLAS, uit. „Ze zijn stralingsbestendiger, nauwkeuriger en sneller, en dragen zo bij aan toekomstig kernenergieonderzoek.”

Hoe werkt een elektronenmicroscoop?

Een elektronenmicroscoop gebruikt, in tegenstelling tot een lichtmicroscoop, een bundel elektronen om objecten te bekijken. “Dit zorgt voor veel hogere resolutie en vergroting,”

legt Yigittop uit. Een SEM kan tot wel 500 keer sterker vergroten dan een optische microscoop. Daarnaast geeft een SEM meer dan alleen een vergroot beeld: “Hij onthult ook de chemische samenstelling en kristallijne structuur van materialen, via de elektronenreflectie die door de sensoren wordt opgevangen,” aldus Yigittop.

Essentieel voor nabestralings-onderzoek

NRG PALLAS gebruikt de SEM voor nabestralings-onderzoek, gericht op veranderingen in materialen door straling. Yigittop: “Reactorvatstaal moet zestig jaar straling weerstaan. In de HFR



Yasin Yigittop, Projectmanager Fuel & Material Irradiation:

“Een investering die zich ruimschoots terugverdient nu nucleair onderzoek volop in de belangstelling staat.”

versnellen we dit door staal zes jaar intensief neutronenstraling te geven.” Onder de microscoop zie je zo zestig jaar stralingsschade en kun je langetermijneffecten voorspellen. De afgelopen vijftien jaar leverde de SEM samen met fysische onderzoeken belangrijke inzichten voor de nucleaire industrie, van reactorvatstaal tot grafiet en splijtstof.

Dedicated detectoren

Door intensief gebruik in de radioactieve Hot Cell raakte de SEM versleten. “Straling beschadigt detectoren, waardoor ze onnauwkeurig worden of defect raken,” legt Yigittop uit. Na vijftien jaar waren er geen reserve-sensoren meer verkrijgbaar. Een nieuwe SEM voor een Hot Cell kost miljoenen, daarom onderzochten we nieuwe, speciale detectoren.

Samen met Oxford Instruments, JEOL en NewTec Scientific ontwikkelden en installeerden we drie nieuwe detectoren in de SEM van NRG PALLAS:

- De Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) detector die de elementaire samenstelling van een monster analyseert.
- De Electron Backscatter Diffraction (EBSD) detector voor het karakteriseren van de kristallijne structuur.
- De Backscattered Electron Imaging (BEI) detector die beelden creëert aan de hand van teruggekaatste elektronen.

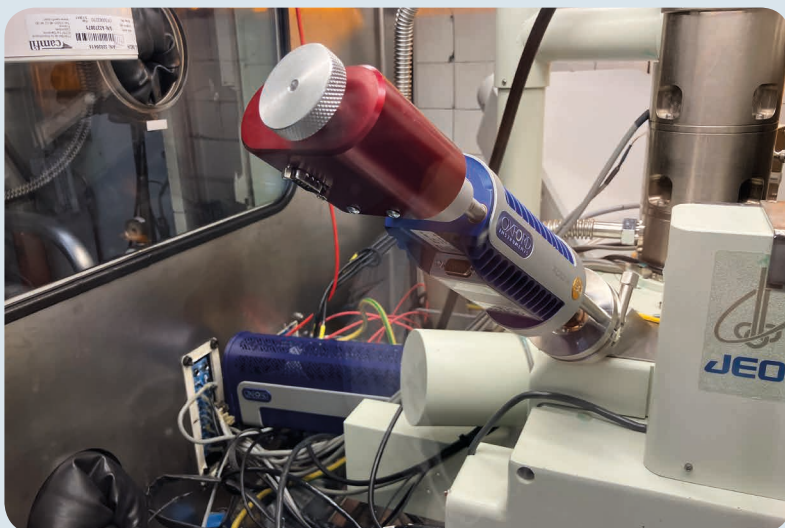
De andere detectoren en de body van de SEM bleken nog in orde.

Eén muisklik

De drie nieuwe sensoren kostten enkele tonnen euro's, veel goedkoper dan een nieuwe SEM van miljoenen, zegt Yigittop. “Een investering die zich terugverdient nu nucleair onderzoek groeit.” De nieuwe detectoren werken ook sneller: waar de oude EBSD drie dagen nodig had, is het nu in twintig minuten klaar.

Dankzij de sensoren ziet de SEM nu meer, zoals porositeitsverdeling in materialen. “Vroeger onzichtbaar, nu zichtbaar. Cruciale info omdat porositeit sterkte, dichtheid en doorlaatbaarheid beïnvloedt.” De vervanging was lastig door beperkte ruimte in de Hot Cell. “De cel moest gedecontamineerd worden, en een team van vijf man werkte zes dagen, inclusief aanpassingen aan Hot Cell en detector.”

Is de SEM klaar voor tien jaar? “Dat gaan we zien,” lacht Yigittop. “Meer onderzoek betekent meer slijtage, maar ook meer kennis. Gaat hij korter mee, is dat ook goed nieuws.”



Een foto van de Hot Cell

In het midden met de rode module is de nieuwe Energy Dispersive Spectroscopy (EDS-detector).

Links, dieper erachter, in het blauw, de Electron Backscatter Diffraction (EBSD).

WAT ALS DE KOELING VAN EEN SPLIJTSTOFSTAAF BLOKKEERT?

Simulaties voor veilige metaal-gekoelde reactoren

De volgende generatie kernreactoren, 'Generatie IV', wijkt technisch sterk af van de huidige drukwaterreactoren. De loodgekoelde reactor is hier een voorbeeld van: veiliger, en hoger rendement en tot wel 20 keer zo zuinig met de uranium splijtstof, dus veel meer energie uit dezelfde brandstof. Daarom wordt de ontwikkeling van metaalgekoelde reactoren versneld voortgezet.

"Door de voordelen is de industrie erg geïnteresseerd in kennis over kernkoeling met gesmolten lood," zegt research consultant Akshat Mathur. Hij onderzoekt afwijkingen in de loodkoeling van splijtstof. "Ik simuleer situaties waarin de koeling deels faalt. Blijft de reactor dan veilig?"

Hoe werkt het?

De kern bestaat, net als bij een gewone reactor, uit splijtstofelementen opgebouwd uit splijtstofstaven. Tussen deze staven stroomt gesmolten lood als koelmiddel. "Deze splijtstofelementen verschillen van die in een drukwaterreactor," legt Akshat uit. "Ze moeten temperaturen tot

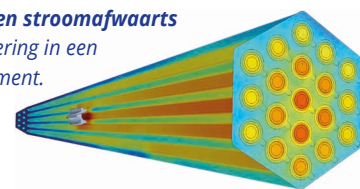
800 graden Celsius en een agressievere omgeving door corrosie en erosie doorstaan."

In een gewone kerncentrale worden splijtstofstaven op vaste plekken van elkaar gescheiden door roosters of afstandhouders ('spacers'), waar koelwater vrij doorheen stroomt. "In de loodgekoelde reactor waar wij ons hier op richten, krijgen de splijtstofstaven een ander soort spacer," vertelt Akshat. "Elke staaf wordt ondersteund en gescheiden door een speciale draad die eromheen is gewikkeld." Deze oplossing biedt constructieve voordelen, maar kent ook een nadeel.

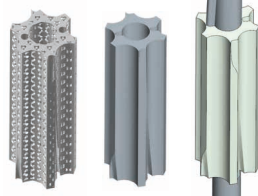
3D-geprinte poreuze keramische blokkering voor gebruik in de experimenten door KIT (Duitsland).



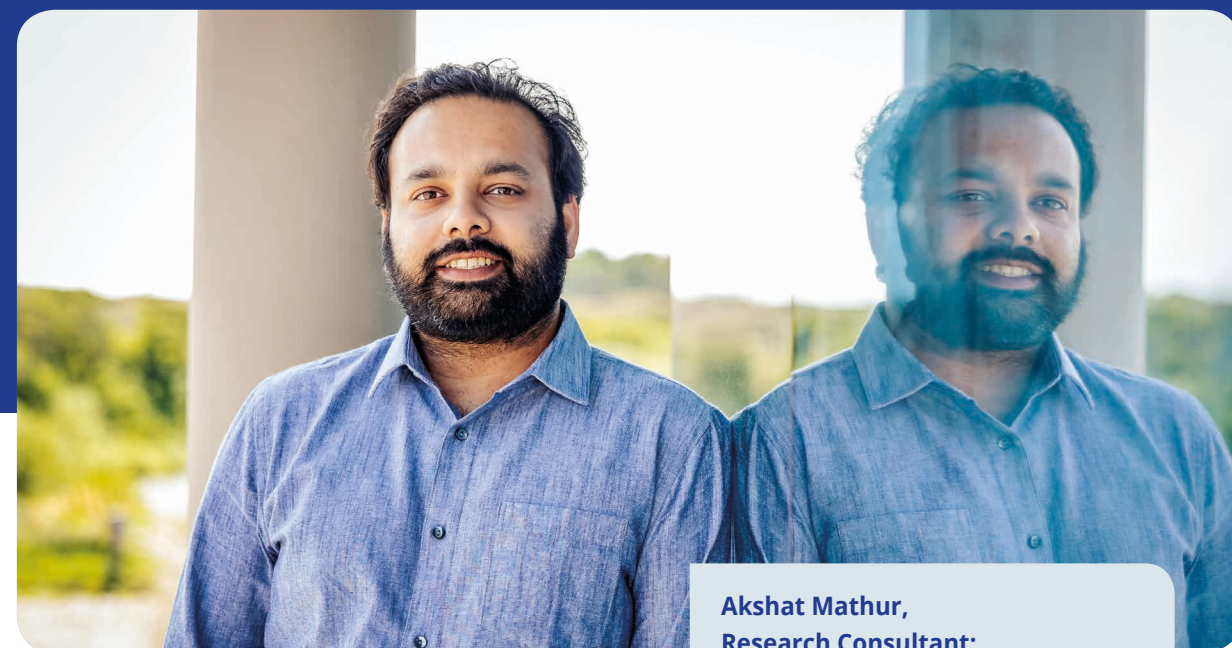
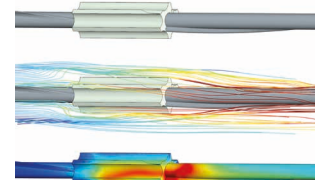
Temperaturen stroomafwaarts van de blokkering in een brandstofelement.



3D-structuur van de poreuze blokkering.



Koelmiddel- en brandstofstaaf-temperatuur rond poreuze blokkering.



Akshat Mathur,
Research Consultant:

"In een simulatie kun je de temperatuur op elke willekeurige plek berekenen."

Risico op verstoppingen

Akshat: "De kans op verstoppingen en blokkades neemt toe, vooral omdat er meer 'vreemde delen' in een metaalgekoelde reactor kunnen voorkomen." De omgeving is corrosiever dan in een waterreactor, waardoor er meer zwevende vaste deeltjes in het koelmiddel kunnen zitten. "Kleine deeltjes kunnen zich ophopen tussen de splijtstofstaven, wat de koeling belemmert."

Internationaal onderzoek

Om te onderzoeken of de reactor dan nog veilig is, werken België, Duitsland, VS en Nederland nauw samen. "In Duitsland en de VS zijn experimenten gedaan waarbij reactor-omstandigheden werden nagebootst met elektrische splijtstofstaven," legt Akshat uit. Eerst werd een volledige blokkade getest, daarna een complexere, poreuze blokkade.

Wat gebeurt er als 5, 10 of 15 procent van de koelmiddelstroming tussen de splijtstofelementen is geblokkeerd? De experimenten leverden veel waardevolle data op, waarmee Akshat zijn computermodel voedde. "Geruststellend was dat in geen enkel experiment de maximum-temperatuur de kritische grens overschreed; de splijtstofstaven bleven heel." Deze experimenten zijn nodig om verder te extrapoleren. "Interessant wordt het pas bij bijvoorbeeld 50 procent blokkade van zes koelkanalen. Zulke scenario's test je niet in de

praktijk vanwege de risico's, dus daarvoor zijn simulaties nodig waaraan ik nu werk."

Experimenten versus simulaties

Bij een volledige blokkade van één koelkanaal laten experimenten en simulaties zien dat de temperatuur het hoogst is in het hart van de blokkade, maar niet te hoog. "Bij een meer waarschijnlijke poreuze blokkade zien we iets anders: de temperatuur piekt stroomafwaarts van de blokkade."

Simulaties hebben grote voordelen ten opzichte van experimenten. "Die zijn duur en beperken zich tot vaste meetpunten," legt Akshat uit. "Met simulaties kun je de temperatuur overal berekenen." Bovendien kun je het gedrag van het koelmiddel visualiseren, wat bij experimenten onmogelijk is omdat gesmolten lood ondoorzichtig is.

De huidige simulaties komen al redelijk overeen met de experimenten, al is 'redelijk' niet genoeg. Soms worden temperaturen overschat. NRG PALLAS werkt daarom aan het verfijnen van het model om het uiteindelijk te valideren. Dan is het klaar om ongevalsscenario's te simuleren, analyseren en helpen voorkomen," besluit Mathur.

VIJFTIG JAAR OUD EXPERIMENT TREKT AANDACHT VAN ONTWIKKELAARS GEAVANCEERDE SMR's

Verborgen schat in Petten

De wereld heeft grote belangstelling voor zogenaamde 'snelle reactoren'. Die zijn namelijk heel zuinig met splijtstof en maken weinig afval dat bovendien korter radio-actief blijft. NRG PALLAS duikt in het verleden en vindt een schat aan 'snelle' informatie.

Nederland was vijftig jaar geleden samen met België en Duitsland goed op weg met de ontwikkeling van een natrium gekoelde snelle reactor. Steven van der Marck van NRG PALLAS: "We waren weliswaar een kleine speler, maar liepen wél voorop bij allerlei ontwikkelingen!" Zo bouwde de voorloper van NRG PALLAS in Petten de STEK-reactor. "Een experimentele opstelling waarmee metingen werden gedaan in een neutronenomgeving die vergelijkbaar is met die van natrium gekoelde snelle reactor." Dit type reactor staat, vanwege zijn gunstige eigenschappen, weer enorm in de belangstelling. "Er zijn op dit moment in de wereld meer dan 100 SMR-concepten in ontwikkeling. Een groot

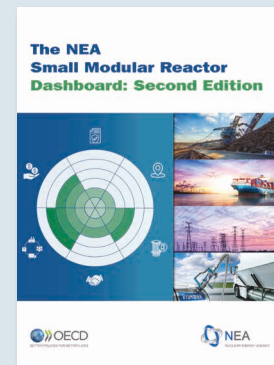
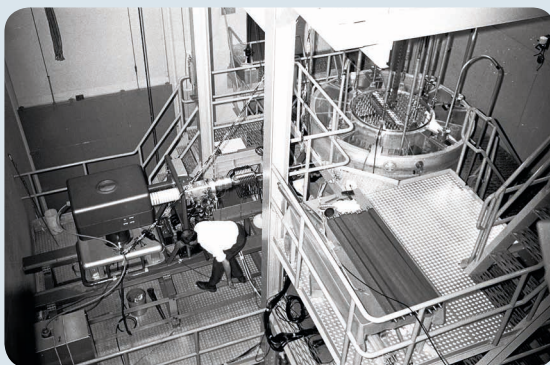
deel daarvan zijn snelle reactoren! Er is dus grote behoefte aan praktische kennis." Geen wonder dus dat er internationaal grote belangstelling is voor de meetresultaten van 50 jaar geleden. "Ze blijken bovendien zo goed dat ze mogelijk leiden tot een standaard waaraan de huidige ontwikkelaars hun computermodellen kunnen toetsen."

STEK

De afkorting STEK staat voor Snel Thermisch Experiment in Krito. 'Snel' staat voor snelle neutronen. Krito is de naam van het reactorvat, overgebleven van een ander experiment: de bouw van een Nederlandse scheepsreactor.

De STEK-reactor

Omdat het een zogenaamde nul-vermogen reactor was, gaf STEK weinig straling af en konden medewerkers na afschakeling dicht bij de reactor komen. Van der Marck: "Het ziet er imposant uit en dat was ook zo. In het Krito-vat staat in het midden de droge kern die de snelle neutronen levert. Daar ging het immers om. Daaromheen staat nog een 'natte ring' met splijtstof. De langzame neutronen hieruit waren nodig om het kernsplijtingsproces in de reactor op gang te brengen." Een technisch hoogstandje dat het geavanceerde karakter van het nucleaire onderzoek in die tijd goed illustreert. "We profiteren nu nog steeds van resultaten uit die tijd."



In een rapport van de OECD/NEA staat een uitgebreid overzicht van nieuwe SMR-concepten.

https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2025-07/7671_the_nea_smr_dashboard_-_second_edition.pdf

Steven van der Marck,
Senior Research Consultant:

"Er is dringend behoefte aan deze zeldzame informatie, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van geavanceerde SMR's."



Steven van der Marck legt het voor alle duidelijkheid even bondig uit: "Langzame reactoren gebruiken 'langzame' neutronen. Ze worden in de reactor vertraagd door ze, bijvoorbeeld, op watermoleculen te laten botsen. Vertraging vergroot de kans dat een neutron wordt gevangen door een (uranium-235) atoom, waardoor die splitst en er energie vrijkomt." Dit type reactor werd een commercieel succes, bijna alle gangbare kerncentrales hebben een water gemodereerde reactor.

3 tot 10 keer meer energie

"Snelle reactoren gebruiken 'snelle' neutronen. Ze worden in de 'droge' reactor niet afgeremd en hebben zo veel energie dat ze splijtstof veel verder kunnen 'opbranden'." Snelle neutronen kunnen namelijk niet alleen uranium-235 splijten, maar alle uranium- en plutonium-isotopen "Afhankelijk van de soort splijtstof halen snelle reactoren tot 20 keer meer energie uit één lading splijtstof." Bovendien blijft er minder splijtingsafval over dat bovendien minder lang straalt.

"De ontwikkeling van snelle reactoren is 50 jaar geleden nagenoeg gestopt, mede omdat de water-gemodereerde reactoren succesvol waren." Gelukkig hebben de onderzoekers van toen wel goed werk geleverd. "Vooral door de goede verslaglegging kunnen we de resultaten uit die tijd nu weer goed gebruiken bij nieuwe ontwikkelingen."

Het doel van de experimenten 50 jaar geleden was het achterhalen van de invloed van bepaalde (kernsplijtings)producten op het splijtingsproces in de snelle reactor. "Er zijn indertijd een stuk of 50 materialen onderzocht." Om een voorbeeld te noemen: bij zirkonium werd ook gekeken naar het effect van zirkonium 90, 91, 92 en 96. "Echt een heel uitgebreid en goed gedocumenteerd onderzoek en daardoor nu zo waardevol."

Benchmark

In 2024 zijn er met de STEK-resultaten computermodellen gemaakt voor vijf verschillende opstellingen. Deze modellen werden gebruikt om de simulaties te vergelijken met metingen die ooit in de STEK-faciliteit zijn gedaan. "De meeste vergelijkingen tussen de metingen en de berekeningen waren positief. We kunnen concluderen dat de documentatie van de STEK-faciliteit goed genoeg is om verder te gaan."

Het idee is om de alle bruikbare resultaten te vatten in een internationaal handboek. "Er is bij ontwikkelaars dringend behoefte aan deze zeldzame informatie. We hopen in feite om zelfs tot een internationale benchmark te komen. Dat is, zeg maar, de toetssteen waarlangs simulaties voor nieuwe reactor-ontwerpen kunnen worden gelegd."

Hoe nauwkeurig kunnen we ‘neutronenruis’ simuleren?

Bij experimenten in een onderzoeksreactor zoals de Hoge Flux Reactor (HFR) is een stabiele neutronenflux essentieel. Meet je een afwijking? Dan wil je snel weten wat de oorzaak is. “Met een goed computermodel kun je mogelijke oorzaken simuleren tot de uitkomst overeenkomt met de praktijk,” legt Alan Wichink Kruit uit, Neutronics Analyst bij NRG PALLAS en bedenker van het model.

De grootste uitdaging is het onderscheiden van ‘onverwachte neutronenruis’ van de constante ‘achtergrondruis’ in de reactor. Gangbare modellen zijn niet nauwkeurig genoeg voor de HFR, waar zelfs kleine verschillen belangrijk zijn, legt Alan uit. Met een zeer precies computer-model kunnen zulke afwijkingen vanaf je bureau onderzocht worden, zonder fysiek in de reactor te zijn. Dat bespaart tijd en verhoogt de veiligheid.

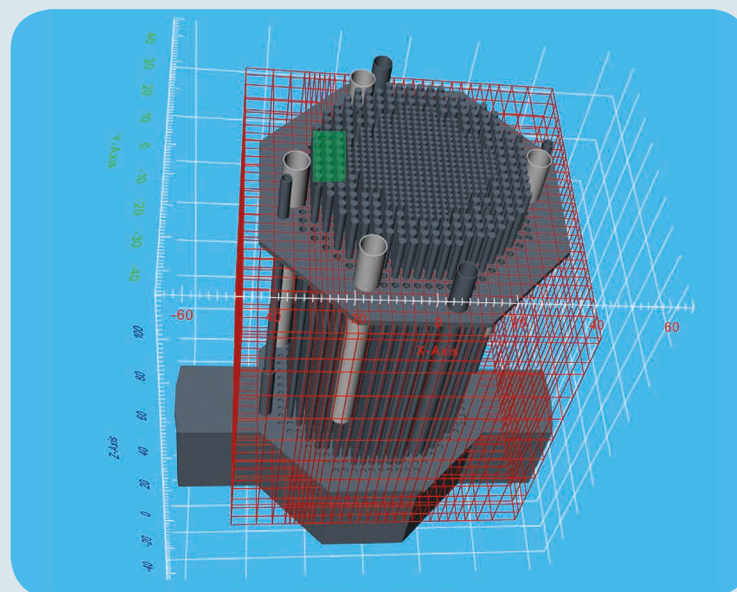
Zwitserse CROCUS-reactor

NRG PALLAS werkt samen met de École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) in Zwitserland, waar de kleine, laagvermogen CROCUS-reactor staat. Deze 100 Watt reactor wordt vooral gebruikt voor onderwijs in stralings- en reactorfysica. CROCUS heeft gevoelige sensoren die kleine veranderingen meten. NRG PALLAS mocht experimentresultaten van CROCUS gebruiken voor hun simulaties.

De CROCUS-reactor, gebouwd in OSCAR-5

De 18 groene staven aan de linkerkant van de reactor oscilleren richting het centrum van de kern en veroorzaken de neutronenruis.

De neutronenflux wordt voor elk raster (rode rechthoek) berekend en de waarden bij de buizen (de detectoren) rond de kern worden vergeleken met de experimentele waarden.



Alan Wichink Kruit,
Neutronics Analyst:

“Minuscule veranderingen in de neutronenflux kunnen van invloed zijn op de resultaten van onderzoek.”

Het specifieke experiment onderzocht het gecontroleerd oscilleren van splijtstofstaven en de invloed daarvan op de neutronenflux. Dit trillen kan in de HFR ook spontaan optreden door koelmiddelinteractie of blokkades. NRG PALLAS focust op het modelleren van de aller-kleinste veranderingen ten opzichte van achtergrondruis, omdat die de onderzoeks-resultaten beïnvloeden. Als het model de CROCUS-data goed simuleert, kan het ook succesvol op de HFR worden toegepast, aldus Alan.

Het model in de praktijk: OSCAR-5 en MGRAC

Voor het model gebruikte Alan de Zuid-Afrikaanse rekencode OSCAR-5. Om de gevoeligheid voor de CROCUS-simulatie te vergroten, schakelde hij de neutronica-oplosser MGRAC in. Hij herhaalde het CROCUS-experiment in de computer, met goede overeenkomsten. “Een driedimensionale kinetische transiëntstudie bevestigde dat het model in OSCAR-5 goed werkt en het oscillerende gedrag van de staven correct weergeeft,” aldus Alan.

De volgende stap: ‘Blinde vlekken’ vullen

Zoals vaak bij dergelijke ontwikkelingen, is een model nooit in één keer perfect. “De vermogensschommelingen als gevolg van de trillingen reageerden op een onverwachte manier,” merkt Alan op. Toch denkt hij al te weten in welke richting hij de oplossing moet zoeken. Het model probeert de geometrie van de reactor te ‘vangen’ in een driedimensionaal raster. Elk knooppunt in dit raster representeert een specifiek punt in de reactor. Met neutronicaberekeningen kijkt NRG PALLAS naar de reacties tussen neutronen en de nuclides. “Elke reactie heeft een andere kans van optreden. Vanaf daar krijgen we de neutronenflux in beeld: de dichtheid van neutronen. Op elk knooppunt berekenen we op die manier de flux op basis van de reacties tussen de neutronen en de materialen in het raster,” verduidelijkt Alan Wichink Kruit

Echter, tussen de lijnen van dit raster ontstaan ‘blinde vlekken’, vooral wanneer de lokale vorm in de reactor complex is. Wat binnen deze ‘blinde vlekken’ gebeurt, wil NRG PALLAS ook weten, omdat dit de simulatie nog nauwkeuriger maakt – een absolute noodzaak voor het onderzoekswerk in de HFR. “Wat er binnen de ‘blinde vlekken’ gebeurt, kun je berekenen aan de hand van wat er aan de randen gebeurt,” legt Alan uit. Dit wordt dus zijn uitdaging voor 2025/2026.



NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.

www.nrgpallas.com