



**Nucleaire sloop geen standaardklus**

# Complexe kernverfenis

*De reactoren van de eerste generatie kerncentrales komen aan het eind van hun technische levensduur. Er staan veel omvangrijke en complexe sloopklussen op stapel. Efficiëntiewinst bij het ontmantelingswerk, dat honderden miljarden euro's gaat kosten, valt echter nauwelijks te behalen. 'Bijna elke reactor is uniek, zodat elke centrale een eigen sloopplan vereist.'*

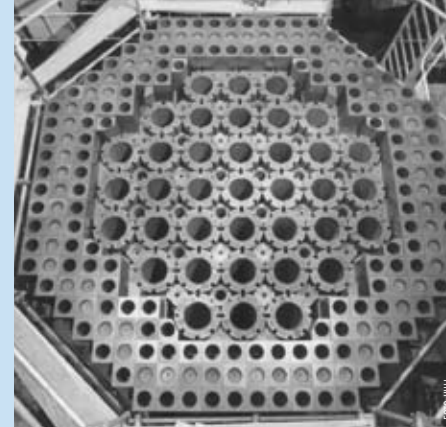
*Een lintzaag snijdt het reactorvat van de Duitse kerncentrale Stade in stukken.*

## GRAFJETVERWERKING GAAT MOEIZAAM

Een groot aantal kerncentrales van met name de eerste en tweede generatie gebruikt grafiet als moderator. De koolstofblokken remmen de snelle neutronen af, zodat de kettingreactie in stand blijft. Terwijl veel landen al snel na de start van het nucleaire tijdperk overschakelden op water als neutronenremmer, bleven kernfysici in met name Rusland en Groot-Brittannië verzet op grafiet. Tot in de jaren tachtig werden daar grafietgemodereerde reactoren van het type RBMK, Magnox en AGR (Advanced Gas-cooled Reactor) aan het net gekoppeld. De blokken grafiet raken als gevolg van het jarenlange neutronenbombardement zelf radioactief

door de vorming van onder meer kobalt-60, chloor-36 en koolstof-14. Het kobalt verdwijnt door natuurlijk verval relatief snel, maar de laatste twee isotopen hebben een halfwaardetijd van respectievelijk 300 000 en 5700 jaar. Verwerking van het materiaal als conventioneel puin is hierdoor niet mogelijk. Gezien de enorme hoeveelheid grafiet – een gemiddelde Magnox-reactor bevat ongeveer 1400 m<sup>3</sup> – is opslag in speciale depots ook geen aantrekkelijk optie. Daarom lopen er meerdere onderzoeksprojecten naar alternatieve verwerkingsprocessen. Volumereductie geldt steeds als centraal uitgangspunt. Er zijn verschillende mogelijkheden. De meest

eenvoudige aanpak is erop gericht de blokken zodanig te versnijden dat er zo veel mogelijk grafiet in een stralingblokkerende container past. De koolstofblokken zijn bijna altijd voorzien van een cilindervormig kanaal, waarin normaliter de splijtstof- of regelstaven zitten. Samengepakt in een kostbare container vormen deze gaten loze ruimten. Door de blokken te verzagen zijn de containers efficiënter te vullen. Van een wezenlijke volumereductie is met deze rudimentaire methode echter geen sprake. Verbranding van de blokken levert wel een forse verkleining van het volume op. Het leeuwendeel van de radionucliden is als as af te voeren,



Een Britse Advanced Gas-cooled Reactor (AGR) bevat gemiddeld zo'n 1400 m<sup>3</sup> grafiet, dat als moderator fungeert.

maar er belanden ook radioactieve isotopen in de rookgassen. Speciale filters zijn dan ook vereist om de deeltjes af te vangen. Het verwijde-

ren van de isotopen uit het gas is echter lastig en de hoeveelheid radioactief restproduct blijft fors. Bovendien laat grafiet zich slecht verbranden. Het oxidatieproces is enigszins te versnellen door het materiaal eerst met zuren te behandelen, waardoor het contactoppervlak toeneemt. In Frankrijk, Japan en de Verenigde Staten hebben succesvolle proefprojecten gedraaid, maar grootschalige verwerking van de koolstofblokken is uitgebleven.

Pyrolyse gevolgd door omvorming met stoom heeft meer potentie. Hierbij wordt het grafiet in een zuurstofarme omgeving sterk verhit. Wanneer het materiaal vervolgens in contact komt

met waterdamp, oxideert het, waarbij hoofdzakelijk waterstof en koolstofmonoxide vrijkomen. Wederom blijven de radioactieve bestanddelen als as achter. Een voordeel van deze techniek is het ontbreken van een grote luchtstroom; voor de oxidatie van het materiaal wordt immers geen lucht gebruikt. Het vrijkomende rookgas voert zodoende ook minder radionucliden mee. In de Verenigde Staten draait al een installatie die deze methode gebruikt voor de verwerking van radioactief verontreinigde harsen. De oxidatie vindt plaats bij een temperatuur van ongeveer 700 °C. Voor de verwerking van grafiet is echter een temperatuur van ongeveer 1100 °C nodig.

**PUTTEN EN KUILEN MET REGENWATER EN** scheuren vol onkruid, het is duidelijk dat het uitgestrekte en nagenoeg lege parkeerterrein van Kernkraftwerk Greifswald de laatste jaren weinig onderhoud heeft gezien. De valse, baksteenkleurige gebouwen van wat ooit de grootste kerncentrale in de DDR was, liggen er desolaat bij. Kort na de val van de Berlijnse muur moest het complex de deuren sluiten, omdat de Sovjet-reactoren niet voldeden aan de strenge Europese veiligheidsnormen. Het lijkt alsof er sinds 1990 niets meer met de centrale is gebeurd, maar schijn bedriegt. Vol trots toont dipl.-Ing. Dieter Rittscher de ruim 1000 m lange turbinehal, die een grondige verbouwing heeft ondergaan. 'De stoomturbines, funderingen en leidingen zijn verwijderd. Nu bouwt Liebherr hier onderdelen voor havenkranen', zegt de gezette Duitser, terwijl hij naar de vakwerkconstructies in de hal wijst. 'De westelijke helft van de hal huisvest het bedrijf Modul- und Anlagenbau Lubmin, dat rompsecties voor schepen maakt.' Afsluiters en doorgezaagde leidingen vormen stille getuigen van de oorspronkelijk functie van het enorme gebouw.

Als directeur van Energiewerke Nord, dat verantwoordelijk is voor de uiteindelijke ontmanteling van de kerncentrale, voorziet Rittscher gouden tijden voor het gebied. Het koelwaterkanaal dat de centrale met de Oostzee verbindt, doet nu dienst als haven. Hier zal ook de Duits-Russische gasleiding Nord Stream aanlanden. Een compressiestation voor de pijplijn is reeds in aanbouw en op de wal liggen honderden buissegmenten gereed. Daarnaast zijn er plannen voor de bouw

**'Bij het ontwerpen hield niemand rekening met de sloop van de reactoren'**

van drie of vier conventionele elektriciteitscentrales. Met een werkloosheid van bijna 12 % kan deelstaat Mecklenburg-Vorpommern de industriële opleving en investeringen goed gebruiken. 'Kernkraftwerk Greifswald vervult een voorbeeldfunctie en laat zien dat een oude kerncentrale ook mogelijkheden biedt.' Het klinkt als een succesverhaal, maar tegelijkertijd vormt de kerncentrale twintig jaar na sluiting nog altijd een enorme kostenpost. Voor de sloop van de kerncentrale – het grootste civiele nucleaire complex dat momenteel wordt ontmanteld – heeft de Duitse overheid tot 2037 een bedrag van 2,3 miljard euro gereserveerd.

Alle landen met een nucleaire sector kampen met hetzelfde probleem: de eerste kerncentrales zijn in de jaren vijftig en

zestig in bedrijf genomen en bereiken nu massaal het einde van hun technische levensduur. Terwijl in onder meer de Verenigde Staten en Japan al meerdere reactoren zijn ontmanteld, begint er nu in Europa vaart te komen in sloopwerk. Het gaat om tientallen reactoren en daar komt het komende decennium een vergelijkbaar aantal bij. Naar schatting gaat de gigantische sloopklus enkele honderden miljarden euro kosten. Overheden en energiebedrijven, die meestal verantwoordelijk zijn voor het ontmantelingswerk, beschouwen de lopende sloopprojecten als testcases. Tegelijkertijd rekent de nucleaire sector zich rijk met zo veel werk in het vooruitzicht.

Maar of het ontmantelen van kerncentrales daadwerkelijk uitgroeit tot een lucratieve niche en de sloopprojecten zich tot standaardklussen ontwikkelen, valt nog te bezien. Vooralsnog breken exploitanten, overheden en nucleaire ondernemingen zich het hoofd over de beste aanpak. Die lijkt er niet te zijn en de voortgang van de lopende projecten is tergend traag. 'Tijdens het ontwerpproces hield niemand rekening met de uiteindelijk sloop van de reactoren', verklaart Rittscher. 'Daar komt bij dat bijna elke centrale uniek is, mede doordat er tijdens de operationele periode vaak modificaties zijn doorgevoerd.' Elke installatie vereist dan ook een specifiek sloopplan.

Wel zijn er drie sloopstrategieën te onderscheiden. Allereerst is het mogelijk een centrale kort na stopzetting van de elektriciteitsproductie volledig te ontmantelen, waarna de nucleaire licentie voor de locatie wordt beëindigd of er op dezelfde locatie een nieuwe reactor kan verrijzen. De tweede strategie laat zich omschrijven als uitgestelde ontmanteling. Kort na sluiting van de centrale volgt de sloop van de niet-radioactieve systemen, zoals de stoomturbines en generatoren.



Kernkraftwerk Greifswald in Duitsland vormt momenteel het grootste nucleaire ontmantelingsproject ter wereld.

Het gebouw inclusief reactorvat blijft vervolgens dertig tot honderd jaar staan, waarna de volledige sloop volgt. Dode waard is een voorbeeld van deze methode: de volledige ontmanteling volgt na 2045. Tot slot geldt het voor onbepaalde tijd afsluiten van een reactor als mogelijkheid. Bij deze aanpak verwijdert de exploitant alleen de splijtstof.

De strategiekeuze hangt voor een belangrijk deel af van de beschikbaarheid van financiële middelen, politieke besluitvorming en toekomstige nucleaire ambities. Deze factoren vertalen zich in nationale verschillen. In Groot-Brittannië, waar kerncentrales tot voor kort in overheidshanden waren, is bijvoorbeeld nooit geld opzijgelegd voor ontmanteling, zodat de belastingbetaler nu opdraait voor het opruimen van de nucleaire complexen. Doordat een grote pot geld ontbreekt, wordt het sloopwerk over een lange periode uitgesmeerd. In het voormalige Oost-Duitsland doet zich een vergelijkbare situatie voor, terwijl in West-Duitsland wel geld is gereserveerd voor de ontmanteling van centrales. Électricité de France (EDF) bediende zich



In Zwischenlager Nord liggen reactorvaten en andere radioactief verontreinigde componenten van Kernkraftwerk Greifswald.

voorheen ook van de uitstelstrategie, maar wil in verband met plannen voor de bouw van nieuwe centrales en met het oog op de publieke opinie aantonen dat directe ontmanteling goed mogelijk is. Bovendien verplicht een wet uit 2006 EDF geld apart te zetten voor het sloopwerk. Ook in de Verenigde Staten moeten energiebedrijven voor elke gegenereerde kilowattuur geld opzijleggen en domineert de eerste strategie.

Naast politieke en financiële overwegingen zijn het reactortype en operationele verleden van grote invloed op de keuze van de ontmantelingsstrategie. De meeste centrales in Europa zijn voorzien van gasgekoelde of watergekoelde reactoren. Het eerste type is met name te vinden in Groot-Brittannië, waar ze bekend staan onder de namen Magnox en AGR (Advanced Gas-cooled Reactor). De meeste andere Europese landen met een nucleaire industrie schakelden in een vroeg stadium, na de bouw van enkele gasgekoelde installaties, over op centrales met waterkoeling.

De sloop van gasgekoelde reactoren is in de regel complexer. Weliswaar ligt het aantal samengestelde componenten, die zich lastig laten reinigen, lager, maar het stralingsniveau in de centrales is na het buiten bedrijf stellen hoger. Dit vergroot de risico's voor het personeel tijdens het sloopwerk. Bijkomend probleem is de enorme hoeveelheid grafiet, dat in de meeste gasgekoelde centrales als moderator fungeert en na een jarenlang neutronenbombardement zelf radioactief is geworden. Door deze combinatie geniet uitgestelde ontmanteling doorgaans de voorkeur. In

## RADIOACTIEVE RAMPREACTOR

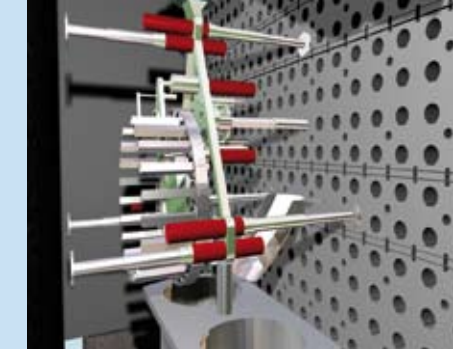
De ontmanteling van de Britse kernreactor Windscale Pile 1, die momenteel in voorbereiding is, staat als een van de meest complexe nucleaire sloopprojecten te boek. De installatie stond in 1957 ruim twee dagen lang in brand. Een gloeioperatie om mechanische spanning uit het grafiet te halen liep uit de hand, waarna de moderatorblokken in de reactorkern vlam vatten. Er kwam veel radioactief materiaal vrij, waarmee de brand de grootste Britse nucleaire ramp werd. Sinds het incident is er praktisch niets met de installatie gebeurd. In de reactorkern zit nog altijd zo'n 15 000 kg aan uranium en andere radionucliden.

Maar hier komt verandering in. Plannen voor de verwijdering van het hoogradioactieve materiaal en op termijn de volledige ontmanteling van Windscale Pile 1 bevinden zich in een vergevorderd stadium. De reactorkern bestaat uit een opeenstapeling van blokken grafiet, waarin horizontale kanalen zitten. Deze 7,5 m lange kanalen, die zelf ook vaak zijn beschadigd, bevatten de brandstofstaven en isotopencontainers. Toen de centrale nog in bedrijf was, werden de staven en containers vanaf de laadzijde door de reactor geduwd, waarna ze aan de ontladzijde in

een waterbassin vielen. Uit proeven is gebleken dat de vaak beschadigde elementen zich alleen langs de ontladzijde laten verwijderen. De ruimte tussen de achterwand van de reactor en de zware betonnen muur van het reactorgebouw bedraagt echter maar 1,7 m, waardoor er niet veel ruimte is voor apparatuur. Speciaal voor het project ontwikkelt het bedrijf SA Robotics de Fuel Channel Retrieval Tool. Het apparaat komt aan een lange verticale arm in

de spleet te hangen. 'Met zes pneumatische cilinders kan het instrument zich vastzetten tussen de reactorwand en de buitenmuur', vertelt projectleider Richard Sexton van de Amerikaanse onderneming CH2M HILL. 'De beperkte ruimte maakt het onmogelijk om een lange arm in te zetten voor het grijpen van de elementen. Deze bevinden zich op maximaal 7,5 m afstand van de achterwand. Om deze afstand te overbruggen is de Fuel Channel Retrieval Tool voor-

zien van een carrousel met 22 korte stangen. Door de stangen aan elkaar te koppelen zijn ook de elementen aan de voorzijde van de reactor te bereiken.' De arm is uit te rusten met een scala aan gereedschap. 'Door de brand zijn veel elementen beschadigd en vervormd. Het is daarom elke keer maatwerk.' De Fuel Channel Retrieval Tool plaatst de brandstofelementen en isotopencontainers na verwijdering in rijdende bakken op de bodem van het reactorgebouw. Over acht tot tien jaar zijn alle kanalen leeg, verwacht Sexton. Dan volgt de verdere ontmanteling van de reactor. De demontage van de reactorkern, die uit 150 000 radioactieve



De Fuel Channel Retrieval Tool is speciaal ontworpen voor het verwijderen van brandstofstaven uit Windscale Pile 1.

blokken grafiet bestaat, zal eveneens met op afstand bestuurd instrumenten gebeuren. Hierna volgen het reactorgebouw en de koeltoren. De einddatum voor het complete ontmantelingsproject staat nog niet vast.

watergekoelde centrales doet het koelmedium tegelijkertijd dienst als moderator. Het water laat zich relatief gemakkelijk van radioactieve isotopen ontdoen. Bovendien ligt het stralingsniveau in centrales met waterkoeling na stopzetting lager. Dit tezamen maakt directe sloop een haalbare optie.

Energiewerke Nord bedient zich in Greifswald van een strategie die het midden houdt tussen de eerste en tweede variant: de radioactief verontreinigde componenten zijn verwijderd, maar de gebouwen blijven nog enkele decennia staan. 'Allereerst is alle splijtstof weggehaald', vertelt Rittscher. 'Er lag hier bijna 600 ton aan nucleaire brandstof. Rusland wilde het na 1990 niet meer hebben, zodat Energiewerke Nord uiteindelijk tot de bouw van een tijdelijk opslagcomplex naast de centrale besloot.' Zwischenlager Nord heet het 200 m lange, zwaar beveiligde gebouw. Onder het wakend oog van neutronendetectors en videocamera's staan in Hal 8 tientallen massieve stalen vaten met daarin alle hoogradioactieve splijtstof. 'De verwerking van de brandstofelementen heeft alles bij elkaar zes jaar geduurd. Dit jaar volgt de ontmanteling van het waterbassin van reactor 3, dat is gebruikt voor het laden van de vaten.'

In de overige zeven hallen van Zwischenlager Nord zijn alle grote onderdelen van de centrale te vinden. Ook de radioactieve verontreinigde componenten van onder meer kerncentrale Rheinsberg komen hier terecht. 'Het uitgangspunt is uiteindelijk zo weinig mogelijk radioactief verontreinigd afval over te houden', licht Rittscher toe. 'De stoomketels worden verder verwerkt. Een lintzaag snijdt de stoomgeneratoren, turbines



Een lintzaag snijdt een stoomgenerator in stukken.

en andere grote componenten in stukken. In een speciale cabine krijgen de metalen stukken een gritstraalbehandeling, waarbij de toplaag en daarmee eventuele radioactieve verontreiniging wordt verwijderd. Daarna ondergaan ze nog een reinigingsbeurt met een hogedruksput. Wat rest zijn metalen stukken die zich lenen voor recycling.' De reactorvaten blijven echter intact. 'Deze hebben een wanddikte van 30 cm, zodat verwerking ervan zeer arbeidsintensief zou zijn. Daarnaast kennen de vaten een relatief hoog stralingsniveau. Het bleek veel eenvoudiger en goedkoper ze compleet te verwijderen en op te slaan.' De oude reactorvaten staan keurig in de verf, terwijl de roestige stoomgeneratoren een vervallen indruk maken. De dikke laag verf moet corrosie van de stalen vaten voorkomen.

**'De besmette componenten opslaan verplaatst slechts het probleem'**

Het natuurlijk verval van radioactieve isotopen geldt ook voor de Britse ondernemingen Magnox North en Magnox South als belangrijk argument om de ontmanteling van 22 oude Magnox-reactoren over enkele decennia uit smeren. Minimalisatie van de hoeveelheid radioactief verontreinigd afval staat hier eveneens centraal. 'Technisch gezien is het mogelijk om een centrale kort na de stopzetting volledig te ontmantelen', vertelt Brian Burnett, programmadirecteur Magnox bij de Nuclear Decommissioning Authority (NDA), dat de Britse ontmantelingsprojecten coördineert en het overheidsgeld verdeelt. 'De sloop van de Windscale Advanced Gas-cooled

Reactor (het belangrijkste Britse demonstratieproject, red.) laat dit zien. Maar deze werkwijze kost aanzienlijk meer geld dan de uitstelmethode. Bovendien betekent directe sloop meer radioactief afval. Het natuurlijk verval van met name kobalt-60 moet het werk aanzienlijk vereenvoudigen.'

Net zoals in het Duitse Greifswald gebeurt, verwijderen de Britten eerst de brandstofelementen. Hierna volgen alle conventionele systemen, zoals de turbines en generatoren. Maar in tegenstelling tot de Duitsers laten de Britten het gebouw, de reactorkern en de stoomgeneratoren volledig intact. 'Het heeft weinig zin om de radioactief verontreinigde componenten uit het reactorcomplex te halen als die vervolgens in een opslagplaats belanden. Hiermee wordt het probleem alleen maar verplaatst. Bovendien biedt het reactorgebouw zelf een hele goede bescherming; hier is het complex immers speciaal voor ontworpen.' De veelal massieve reactorgebouwen vormen weliswaar een goede bescherming, maar de bouwwerken zijn wel al een halve eeuw oud. Om nog eens 85 tot 100 jaar te kunnen blijven staan krijgt elk reactorgebouw een op maat gemaakte tweede façade. Deze tweede schil moet het pand beschermen tegen weersinvloeden om toekomstig onderhoud te minimaliseren. Ook komt er bij elke centrale een kleine tijdelijke opslagplaats voor radioactief verontreinigd materiaal. Op alle locaties zijn namelijk altijd wel een paar



Radioactief verontreinigde componenten van Kernkraftwerk Greifswald ondergaan een gritstraalbehandeling.

besmette systemen of componenten te vinden. De Britse werkwijze volgt echter ook uit praktische overwegingen. Het land heeft namelijk nog geen definitieve opslagplaats voor middelactief afval. 'Het duurt waarschijnlijk nog enkele decennia voordat een dergelijke bergplaats operationeel is', aldus Burnett. Daarnaast speelt het grafietprobleem een belangrijke rol. Een gemiddelde Magnox- of AGR-reactor zou na ontmanteling 1400 m<sup>3</sup> aan radioactieve koolstofblokken opleveren. De verwijdering van de duizenden blokken met op afstand be-

stuurd gereedschap vormt een ingewikkelde en kostbare klus, maar problematischer is het ontbreken van een verwerkingsfabriek. De enorme hoeveelheid grafiet zou daarom net als ander radioactief afval voor lange tijd in een depot belanden. Er lopen overigens wel verschillende studies naar de mogelijkheden om het radioactieve materiaal te verwerken (zie het kader 'Grafietverwerking gaat moeizaam').

### ONZEKERHEDEN

Aan de uitstelstrategie kleven ook nadelen. Hoewel de radiologische risico's door natuurlijk verval met de jaren afnemen, brengt de lange wachttijd veel onzekerheden met zich mee. Nucleaire regelgeving is in het verleden bijvoorbeeld continu aangescherpt. Als deze trend zich voortzet, heeft dit mogelijk implicaties voor de uitvoerbaarheid van huidige ontmantelingsplannen. Daarmee samenhangend bestaat het risico dat de sloopkosten sterk toenemen of de beschikbare fondsen door inflatie dan wel een financiële crisis aan waarde inboeten. Tot slot bestaat het gevaar dat kennis verloren gaat. Aan de lopende ontmantelingsprojecten werken hoofdzakelijk technici mee die voorheen de centrales draaiende hielden. Met het oog op deze nadelen heeft directe ontmanteling de voorkeur, mits de benodigde financiële middelen beschikbaar zijn. In onder meer de Verenigde Staten, Japan en Frankrijk vindt

## VARIABELE KOSTEN

Ongeveer 73 miljard pond (90 miljard euro) verwacht Groot-Brittannië nodig te hebben voor de ontmanteling van negentien kerncentrales. De belastingbetaler moet het enorme bedrag over een periode van ongeveer negentig jaar opbrengen. Al verschillende malen stelde de National Audit Office de kostenraming naar boven bij. Groot-Brittannië publiceert als een van de weinige landen met een nucleaire sector een complete begroting voor de volledige ontmanteling van de reactoren, inclusief de definitieve opslag van radioactief materiaal. Het land kent namelijk geen speciaal fonds voor het sloopwerk, zodat de Nuclear Decommissioning Authority

(NDA) het budget jaarlijks moet verdedigen. Veel andere landen, zoals Frankrijk en het voormalige West-Duitsland, verplichten energiebedrijven voor elke kilowattuur atoomstroom geld apart te zetten. Maar de uiteindelijke opslag van radioactief afval komt veelal voor rekening van de staat. Hoeveel de sloop en verwerking van oude reactoren precies kost, is door deze mix van privaat en publiek geld moeilijk te zeggen. De lange looptijd van de projecten en de opdeling in deelprojecten maken het financiële plaatje nog diffuser. De reeds voltooide projecten, waarop de

budgetten en fondsen worden afgestemd, laten evenmin een eenduidig beeld zien. Met de sloop van de Amerikaanse reactor van het Fort Saint Vrain Generating Station begin jaren negentig was een bescheiden bedrag van 195 miljoen dollar (160 miljoen euro) gemoeid. Omgerekend komt dit neer op 485 euro per kilowatt. De sloop van de eveneens Amerikaanse centrale Connecticut Yankee bleek met 820 miljoen dollar (665 miljoen euro) aanzienlijk duurder. Naar vermogen kostte het project 1130 euro per kilowatt. Duitsland hanteert vergelijkbare kostenramingen.

Energiewerke Nord heeft voor de sloop van de Kernkraftwerk Greifswald 2,1 miljard euro, ofwel 950 euro per kilowatt, beschikbaar. Maar dit budget voorziet nog niet in de afbraak van de gebouwen en de opslag van radioactief materiaal. Groot-Brittannië verwacht dat de ontmanteling van de Magnox-reactoren bijna twee keer zoveel zal kosten. De Nuclear Decommissioning Authority gaat uit van ruim 2100 euro per kilowatt. Frankrijk reserveert nog meer geld: de Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) becijfert de sloop van de snelle kweekreactor Superphénix op zo'n 3220 euro per kilowatt, wat neerkomt op een totaal van ruim



De sloop van Brennilis, het Franse pilotproject, kost naar schatting 6800 euro per kilowatt.

4 miljard euro. Demonstratieproject Brennilis, met een vermogen van 70 MW een centrale van bescheiden formaat, spant voorlopig de kroon: de sloop van het complex kost meer dan 6800 euro per kilowatt. Het Nederlandse EPZ, dat net als de Franse energiebedrijven verplicht is kerncentrale Borssele direct na de stillegging te ontmantelen, begroot de

sloop veel rooskleuriger: de exploitant reserveert 357 miljoen euro voor de volledige sloop, wat meer komt op ruim 736 euro per kilowatt. De grote variatie in kosten laat zich slecht verklaren. Wel is duidelijk dat de totale sloopkosten moeilijk voorspelbaar zijn. Verschillende projecten, waaronder Brennilis, blijken uiteindelijk veel duurder dan bij aanvang werd verwacht. Door deze onzekerheid lopen sloopbedrijven, maar ook de energiebedrijven en overheden relatief veel risico, waardoor projecten mogelijk voor een te hoog bedrag worden aanbesteed. Dit roept de vraag op of er voldoende geld zit in de ontmantelingsfondsen.

hoofdzakelijk directe ontmanteling plaats. Ook de Nederlandse Borssele wacht na stillegging onmiddellijke sloop. Hiertoe is exploitant EPZ bij de verlenging van de bedrijfsduur in 2006 verplicht. Een concreet plan voor de ontmanteling is echter nog niet gereed. Frankrijk daarentegen is al een stuk verder; de eerste sloopprojecten zijn reeds in volle gang. 'Honderd jaar wachten levert maar weinig voordelen op', vertelt Jérôme Rieu, directeur Onderzoek en Afval bij de Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). 'Iedereen voert het natuurlijke verval van kobalt-60 aan als argument om de sloop op de lange baan te schuiven, maar zelfs na honderd jaar is het stralingsniveau nog dusdanig hoog dat er een berg radioactief verontreinigd materiaal overblijft. Tegelijkertijd nemen de veiligheidsrisico's met de jaren toe. De reactorgebouwen zijn ontworpen op een levensduur van veertig, vijftig jaar. Als ze nog eens honderd jaar moeten blijven staan, is onderhoud onvermijdelijk. En dat kost uiteraard ook een berg geld.'

Brennilis in Bretagne is de eerste Franse kerncentrale die volledig wordt ontmanteld. In de reeds afgeronde eerste fase zijn de brandstofelementen verwijderd en de koelleidingen gereinigd. Ook de tweede fase, waarbinnen de conventionele installaties zijn afgebroken, is inmiddels voltooid. Momenteel vindt de sloop van het gebouw inclusief stoomgeneratoren en reactorvat plaats. 'Het hoge stralingsniveau maakt het tot een complexe klus, maar het is mede door de inzet van op afstand bestuurbare robots goed uitvoerbaar', geeft Rieu aan. 'Het project moet in 2015 zijn voltooid, waarna het gebied een nieuwe bestemming krijgt. In principe kan er dan een basisschool komen, zo schoon moet het zijn.'

Naast Brennilis ontmantelt Frankrijk momenteel nog zes kerncentrales, die in totaal acht reactoren tellen. Deze projecten bevinden zich nog in de eerste of tweede fase. Net als Duitsland gaat Frankrijk het radioactief verontreinigd materiaal dat bij de



sloop vrijkomt, opslaan. Hiervoor bouwt EDF bij de kerncentrale Bugey een groot depot, waarin onder meer de reactorvaten komen te liggen. De opslagplaats, waarvan de bouw deze zomer is begonnen, moet in 2013 operationeel zijn. Rieu verwacht dat de ervaring met Brennilis de ontmanteling van de overige reactoren zal versnellen. 'Brennilis is echt een leerproject, waarop de Auto-

Berkeley is de eerste commerciële kerncentrale in Groot-Brittannië die wordt ontmanteld. Alle conventionele installaties zullen in 2013 zijn verwijderd, de twee reactorgebouwen blijven tot 2074 staan.

rité de Sûreté Nucléaire nieuwe regelgeving baseert en de sloopplannen voor de andere centrales afstemt.'

Bedrijven die traditioneel de bouw en het onderhoud van centrales voor hun rekening nemen, verwachten dat de ontmantelingswerkzaamheden uiteindelijk veel geld in het laatje brengt. De sloop van een kerncentrale zou op termijn een standaardklus worden. Maar Burnett van de Britse Nuclear Decommissioning Authority toont zich hierover sceptisch. 'Elke centrale is uniek. Zelfs de Magnox-reactoren in Groot-Brittannië, die allemaal van hetzelfde type zijn, wijken sterk van elkaar af. Elk project vereist zodoende een nieuw ontmantelingsplan; een draaiboek volstaat niet.' Bovendien levert de Britse wijze van financieren onzekerheid op. Het budget van de Nuclear Decommissioning Authority, dat op jaarbasis ongeveer 2,5 miljard pond (3 miljard euro) bedraagt, wordt jaarlijks vastgesteld. Het ontbreken van een fonds dwingt de autoriteit tot het stellen van

prioriteiten, waarmee de nucleaire sloopbranche maar geen momentum wil krijgen.

Rittscher van Energiewerke Nord voorziet evenmin efficiëntiewinst bij de sloopprojecten. 'Het ontwerp van de nucleaire componenten verschilt per centrale en meestal zelfs per reactor. Tijdens het operationele leven van de installaties zijn er ook vaak modificaties doorgevoerd, bijvoorbeeld doordat leidingwerk tussentijds is vervangen. Vanwege deze uniciteit is de inzet van personeel dat de centrale vroeger draaiend hield, cruciaal. Zij zijn immers bekend met de modificaties. Voor een groot deel van het werk is overigens geen speciale kennis vereist. Conventionele aannemers voeren de sloop van de meeste gebouwen en niet-nucleaire installaties uit.' Asbest vormt soms een groter probleem dan de radioactieve isotopen, vult Burnett aan. 'Turbines en stoomgeneratoren zijn vaak volledig in asbest verpakt. De verwijdering hiervan kost veel geld en zorgt regelmatig voor vertraging.'

Toch gloort er hoop dat toekomstige ontmantelingsprojecten minder complex zijn en tevens minder kosten. Bij de bouw van de eerste generatie kerncentrales had niemand oog voor de uiteindelijke ontmanteling. De ontwerpers hielden zelfs geen rekening met de vervanging van de stoomgeneratoren. 'Maar dat is sinds de aanvang van het nucleaire tijdperk wel veranderd', vertelt Richard Sexton, ontmantelingspecialist bij het Amerikaanse bedrijf CH2M HILL. Begin jaren negentig was hij betrokken bij het eerste grote project in de Verenigde Staten, de ontmanteling van het Fort Saint Vrain Generating Station, en nu leidt hij de ontmanteling van de Britse rampreactor Windscale Pile 1 (zie het kader 'Radioactieve rampreactor'). 'Met de verdere ontwikkeling van kerncentrales kregen technici steeds meer aandacht voor het onderhoud van de reactoren.' Hierdoor zijn de nucleaire installaties vaak beter te bereiken. 'Ook kennen modernere reactoren in de regel een eenvoudiger ontwerp. Het aantal kleppen en afsluiters is bijvoorbeeld vele malen kleiner geworden. Dat vermindert niet alleen het onderhoud, maar vergemakkelijkt ook de ontmanteling.'

Daarnaast kunnen bedrijven de onderhoudsexpertise inzetten bij de sloopwerkzaamheden, meent Sexton. 'Begin jaren tachtig gold de vervanging van stoomgeneratoren als een enorm complexe klus. Een centrale was toen al snel twee jaar buiten bedrijf. De veiligheid van personeel door hoge stralingsniveaus was bovendien regelmatig in het geding.' Sindsdien zijn er nieuwe technieken ontwikkeld en procedures opgesteld die het werk veel veiliger maken en versnellen. 'Tegenwoordig duurt het vervangen van stoomgeneratoren hooguit anderhalve maand. Veel technieken en methoden zijn ook inzetbaar bij de afbraak van een centrale. En de industrie bevindt zich nog maar aan het begin van de leercurve.' ●

Kostenoverzicht van de sloop van verschillende kerncentrales.

| Kerncentrale       | Land             | Vermogen (MWe) | Kosten (mln €) | Kosten (€/kWe) | Status          |
|--------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Windscale AGR      | Groot-Brittannië | 32             | 117            | 3656           | in ontmanteling |
| Fort Saint Vrain   | Verenigde Staten | 330            | 160            | 485            | voltooid        |
| Borssele           | Nederland        | 485            | 357            | 736            | operationeel    |
| Brennilis          | Frankrijk        | 70             | 476            | 6800           | in ontmanteling |
| Connecticut Yankee | Verenigde Staten | 590            | 665            | 1130           | voltooid        |
| Greifswald         | Duitsland        | 2200           | 2100*          | 950            | in ontmanteling |
| Superphénix        | Frankrijk        | 1242           | 4000           | 3220           | in ontmanteling |

\*exclusief sloop van gebouwen

### INTERNETBRONNEN

[www.ewn-gmbh.de](http://www.ewn-gmbh.de)

Energiewerke Nord is verantwoordelijk van de sloop van Kernkraftwerk Greifswald.

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

Het Franse EDF exploiteert kerncentrales en is tevens verantwoordelijk voor de ontmanteling.

[www.asn.fr](http://www.asn.fr)

De Autorité de Sûreté Nucléaire ziet in Frankrijk toe op de ontmantelingswerkzaamheden.

[www.magnoxelectric.com](http://www.magnoxelectric.com)

Magnox North en Magnox South nemen de sloop van 22 Magnox-reactoren in Groot-Brittannië voor hun rekening.

[www.nda.gov.uk](http://www.nda.gov.uk)

De Nuclear Decommissioning Authority coördineert de sloop van Britse kerncentrales.

Het Dossier  
KERNCENTRALES

Ontmanteling  
op maat