

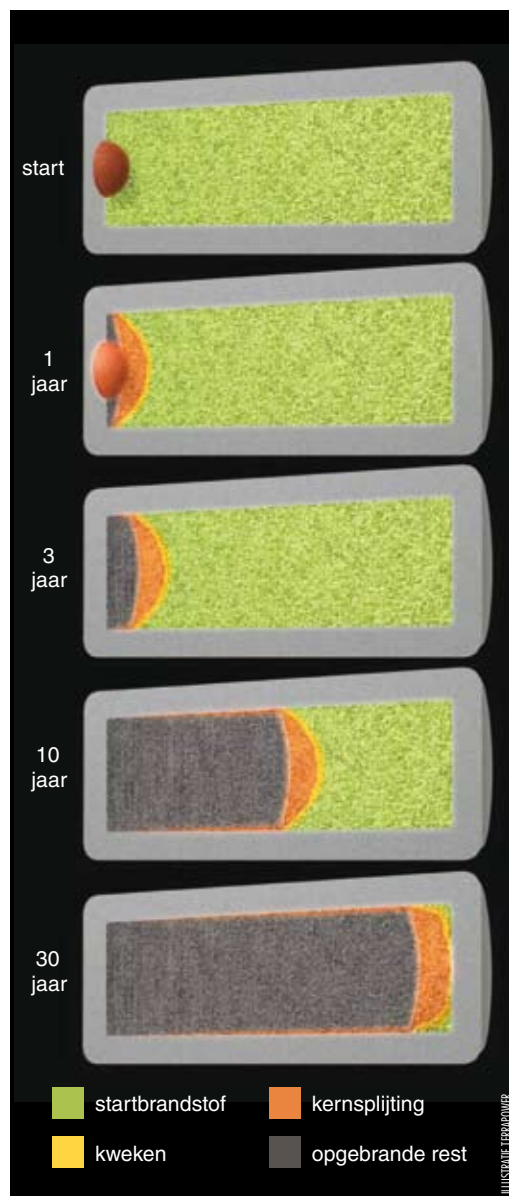
KWEKGOLFREACTOR LEVERT ONAFGEBROKEN ATOOMSTROOM

Veilige kernafvalvreter

NA DE RAMP IN HET JAPANESE FUKUSHIMA IS DE VEILIGHEID VAN KERNCENTRALES OPNIEUW IN HET GEDING. EEN CONCEPT DAT WEINIG AANDACHT KRIJGT, MAAR VEEL VEILIGER IS DAN DE HUIDIGE KERNREACTOREN, IS DE TRAVELLING WAVE REACTOR, EEN IDEE VAN DE AMERIKAAN EDWARD TELLER EN DE NEDERLANDER HUGO VAN DAM. EXTRA VOORDEEL IS DAT DEZE CENTRALE WERKT OP HET NUCLEAIRE AFVAL DAT AL DIE ANDERE ATOOMBROEDERS HEBBEN GEPRODUCEERD.

EEN KERNREACTOR DIE OP NIETS anders werkt dan afval van andere kerncentrales. Die na het laden van dat afval een halve eeuw lang hermetisch gesloten kan blijven en al die tijd onafgebroken stroom levert. En die, als er verspreid over de aardbol exemplaren van worden gebouwd, tot in de verre toekomst de complete wereldbevolking van energie kan voorzien, want daar is de voorraad kernafval van de afgelopen zestig jaar groot genoeg voor. Het klinkt te mooi om waar te zijn, maar daar denkt het Amerikaanse Intellectual Ventures, opgericht door softwaremiljardair Bill Gates, anders over. Deze denktank werkt sinds een paar jaar aan de zogeheten Travelling Wave Reactor (kweekgolffreactor). Tot vreugde van prof.dr.ir. Hugo van Dam, emeritus hoogleraar Reactorfysica aan de TU Delft en een van de vaders van het concept. 'Kernenergie is nu in feite een wegwerpsysteem', stelt hij. 'De huidige centrales gebruiken namelijk niet meer dan 1 % van de energie uit de splijtstof.' De wereldreserve aan natuurlijk uranium slinkt dan ook in even hoog tempo als de voorraad fossiele brandstoffen. Als alles goed gaat, kan de kweekgolffreactor daar verandering in brengen.

De nucleaire installatie onderscheidt zich op het eerste gezicht vooral van andere reactoren door zijn veel grotere kern, die met een omvang van verscheidene meters gerust monolithisch is te noemen. Het afval in de kern bestaat uit splijtstaven die door gewone reactoren zijn 'uitgeput' en die bijna geheel uit het niet-splijtbare uranium-238 bestaan. De reactor, gebaseerd op een idee uit de jaren negentig van de Amerikaanse kernfysicus Edward Teller, maakt van dat verarmde uranium weer bruikbare nucleaire brandstof. Het is



De golf van kweken en splijten verplaatst zich door de aanwezige nucleaire brandstof.



De opslagplaats voor nucleair afval bij Paducah in de Amerikaanse staat Kentucky bevat 38.000 zware cilinders met verarmd uraniumhexafluoride. Dat is genoeg voor 260.000 gigawattjaar aan elektriciteit uit kweekgolffreactoren, ofwel een kleine drieduizend jaar energie voor de gehele VS.

thus per definitie een kweekreactor, maar dan wel een van een zeer afwijkend soort. Binnen de kern is altijd maar een kleine regio actief. Dat gebied verplaatst zich met een snelheid van enkele centimeters per jaar door de kern heen, als een traag lopende golf. In het voorste deel van die golf wordt het aanwezige uranium massaal omgezet in het splijtbare plutonium-239. Vlak daarachter zit een gebied dat die kweekreactie al heeft ondergaan. Het plutonium daar is bezig te splijten en zo de warmte voor elektriciteitsproductie te leveren. En daar weer achter bevinden zich de 'uitgebrande' splijtingsproducten. Het hele proces van kweken, splijten en golfvoortplanting kan zichzelf in stand houden, zonder hulp van buitenaf.

Het plan voor de kweekgolffreactor ontstond toen Intellectual Ventures verschillende mogelijke oplossingen voor energieschaarste in de toekomst met elkaar vergeleek. Hernieuwbare energiebronnen als zonnecellen bleken, aldus medewerker dr. John Gilleland in het blad *Nuclear News*, simpelweg te weinig

STOELENDANS VAN SPLIJTSTAVEN

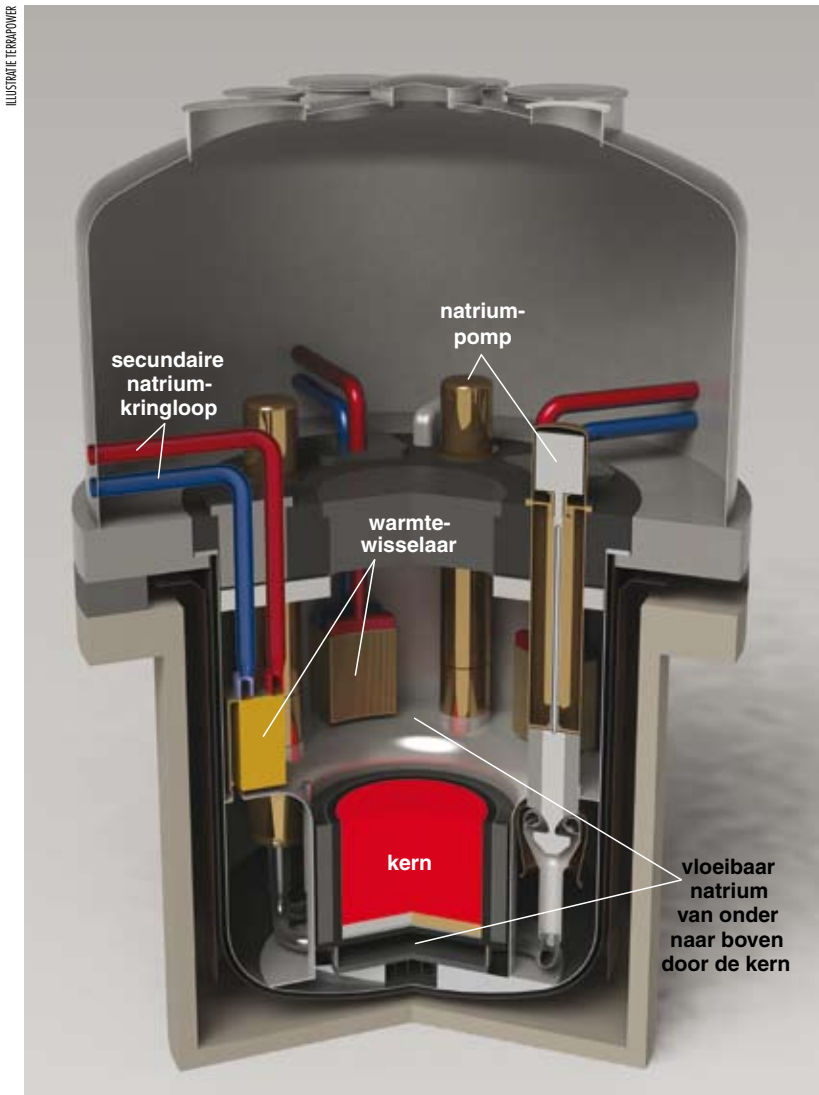
Bij een gewone kweekreactor wordt de wisselwerking tussen kweken en splijten, die voor de kweekgolffreactor essentieel is, juist stevig onder de duim gehouden. Anders zou er veel meer hitte vrijkomen dan de onderdelen aankunnen. Het hart van de reactor is verdeeld in twee afzonderlijke regio's: de kern en de kweekmantel. De kern, veel kleiner dan die van de kweekgolffreactor, wordt opgeleverd met 10 tot 15 % plutonium. Door splijting daalt dat percentage geleidelijk. De kweekmantel, die de kern omsluit, bevat aanvankelijk bijna zuiver uranium-238. Door invangst van neutronen uit de kern ontstaat daarin steeds meer plutonium. In de mantel wordt dus vooral gekweekt, in de kern vooral gespleten. Om dat zo te houden vervangen medewerkers de staven uit de mantel als hun plutoniumgehalte te hoog wordt, en die uit de kern als hun gehalte te laag wordt. Daarna onttrekt een opwerkingsfabriek plutonium aan de ene soort staven en voegt het aan de andere toe, zodat ze weer terug in de reactor kunnen. Deze stoelendans van splijtstaven kost veel geld en energie.

potentie te hebben. Dat betekent in de praktijk dat er toch weer meer kolencentrales bij komen, die zorgen voor CO₂-uitstoot. Bovendien raken kolen op. Kernenergie daarentegen is in principe uitstootvrij en met de inzet van kweekreactoren zou er geen gebrek aan grondstoffen dreigen. Aan kweekreactoren, waarvan er op dit mo-

ment in de wereld maar twee commerciële in werking zijn, zitten echter weer andere haken en ogen. Ze moeten vaak open om splijtstaven te verwisselen (zie het kader 'Stoelendans van splijtstaven'), waardoor ongelukken en diefstal van plutonium voor wapenproductie denkbaar zijn. De opwerkingsfabrieken die de splijtstaven leveren, vormen een conflictu-

euze politieke factor. Het Westen gunt ze niet aan de meeste andere landen, want wat als die ze gebruiken om er kernwapens mee te maken? 'Zo blijft er een scheve situatie van nucleaire havens en havenots in de wereld bestaan, waar we graag vanaf zouden willen', zegt Gilleland tegen *De Ingenieur*.

Intellectual Ventures-medewerker dr. Lowell Wood, een kernfysicus die in de jaren negentig assistent is geweest van Teller, bracht vervolgens de kweekgolffreactor onder de aandacht van zijn collega's. Het principe was voor het eerst in 1958 voorgesteld door een Rus, Saveli Feinberg, maar was als technisch onhaalbaar terzijde geschoven: het metalen reactorvat zou de hoge vermogensdichtheden niet aankunnen. In de jaren negentig waren de materialen echter veel beter geworden. Teller, boven de tachtig maar nog steeds actief, pakte het onderwerp op en rekende het op een van zijn dochter geleende laptop door. De – gunstige – uitkomsten werden niet erg serieus genomen in de door overheidssubsidies gedomineerde wereld van het nucleaire



Ontwerp van een kweekgolffreactor van 1000 MW. Het koelmiddel stroomt door de kern en staat via warmtewisselaars zijn hitte af aan het secundaire natriumcircuit, dat elders water omzet in stoom, die een turbine met generator aandrijft.

onderzoek, waar volgens critici weinig ruimte is voor radicaal nieuwe ideeën. Gates had Intellectual Ventures echter juist opgericht om met zijn privékapitaal technologische doorbraken te financieren die mondiale problemen oplossen en waar de grote bureaucratieën niet aan toekomen. De organisatie besloot het concept onder haar hoede te nemen.

Teller had de werking van de reactor duidelijk uitgetekend. Om hem te starten moet een nucleaire 'lucifer' binnen de kern worden gebracht. Dat kan een bundel splijtstaven zijn met een fors percentage actieve splijtstof (plutonium of het vergelijkbare uranium-235), die een stroom neutronen produceert. U-238-kernen in het materiaal vangen deze neutronen in en veranderen in plutonium. Als er daarvan een grote concentratie is ontstaan, wordt het materiaal kritisch. Plutoniumkernen die door neutronen worden geraakt, breken dan in stukken. Daarbij zenden ze nieuwe neutronen uit, die weer zo veel andere plutoniumkernen splijten dat er een (warmteproducerende) kettingreactie ontstaat. Maar

proces in gang gezet. De activiteit plant zich als een traag lopende golf (in feite twee golven: een kweekgolf direct gevolgd door een splijtgolf) door de kern voort met een snelheid van een paar centimeter per jaar, zodat een levensduur van een halve eeuw of langer mogelijk is.

Los van de golfvoortplanting lijkt de werking van de installatie veel op die van eerder gebouwde kweekreactoren. De kern is opgebouwd uit bundels van splijtstaven, waar vloeibaar natrium, het koelmiddel, tussendoor stroomt. Eigenlijk zou 'warmtetransportmiddel' een betere term zijn, want behalve dat het de kern koelt, brengt het natrium de warmte ook naar de plaats waar er energie mee wordt opgewekt. Natrium is het favoriete koelmiddel in kweekreactoren, omdat het de gelukkige eigenschap heeft de rondvliegende neutronen nauwelijks af te remmen. Plutonium laat zich namelijk beter kweken naarmate die harder vliegen. Maar natrium is chemisch wel een erg reactief goedje, en daarom mag het radioactief geworden koelmiddel niet bui-

VOORAL LICHTWATERREACTOREN

Verreweg de meeste van de ruim 440 kernreactoren in de wereld zijn zogeheten lichtwaterreactoren, die nucleaire brandstof verbruiken zonder nieuwe te produceren. Hun energiebron is verrijkt uranium, dat wordt gemaakt door het gehalte van de splijtbare isotoop U-235 in natuurlijk uranium kunstmatig te verhogen tot zo'n 3%. De naam 'lichtwaterreactor' refereert eraan dat gewoon water (en niet zwaar water, wat ook kan) dienstdoet om de warmte van de kern af te voeren. Met die warmte wordt stoom geproduceerd, die een turbine met generator aandrijft.

De kweekreactoren die sinds de jaren zestig zijn gebouwd, vallen op de vingers van twee handen te tellen. Er zijn er momenteel nog twee in bedrijf: de Monju van 246 MWe in Japan en de Belojarsk-3 van 560 MWe in Rusland. Kweekreactoren produceren naast elektriciteit ook nieuwe splijtstof. Ze werken meestal op basis van dezelfde kernreacties als de kweekgolffreactor: omzetting van uranium-238 in plutonium en splijting van het plutonium. Het internationale kernenergieforum Generation IV probeert sinds enkele jaren de ontwikkeling van kweekreactoren (de vierde generatie) weer vlot te trekken. In Nederland werken de TU Delft en NRG in Petten mee aan het onderzoek daarvoor.

niet alle vrijkomende neutronen splijten een volgende plutoniumkern; een deel ervan komt in het aangrenzende, nog plutoniumvrije gebied terecht. Daar veranderen ze uranium in nieuw plutonium, dat zelf gaat splijten zodra het kritisch is. Zo wordt een zichzelf in stand houdend

ten de kernomhulling komen. Een tweede, gescheiden natriumkringloop neemt de warmte over en voert die naar buiten af. Ergens anders in het reactorgebouw wordt er hete stoom mee gemaakt, die een turbine met generator aandrijft. Het personeel kan de energieproductie van de centrale regelen door, zo ver als nodig, staven in de kern neer te laten die neutronen afvangen en zo de kweek- en splijtreacties vertragen. De regelstaven in hun geheel neerlaten komt neer op uitschakelen van de reactor.

GEK

Van Dam deed begin jaren 2000 in Delft, op het concept geattendeerd door een praatje van Teller, het eerste systematische onderzoek naar lopende golven. 'Onder welke voorwaarden kan het, hoe moet de ontsteking plaatsvinden, wat voor vorm krijgt een golf en hoe gaat het koelen van de reactor kern', vat hij zijn onderzoeksvragen samen. In die tijd was hij samen met de Japanner Sekimoto de enige die zich met het kweekgolfconcept bezighield. 'Sommige mensen moeten gedacht hebben dat ik volkomen gek was', zegt hij nu. 'Dat hindert niks; het is een bewijs dat je iets origineels doet. Het mooie van het concept is dat het inherent stabiel is. Als de kweekgolf een beetje sneller loopt, komen er door de grotere afstand met de splijtgolf minder neutronen binnen, waardoor hij weer vertraagt. Gaat de splijtgolf even wat sneller, dan komt hij in een gebied waar nog weinig plutonium is en remt hij dus eveneens af. Het omgekeerde gebeurt als een van de golven spontaan vertraagt. De splijt- en kweekgolf houden elkaar in bedwang.'

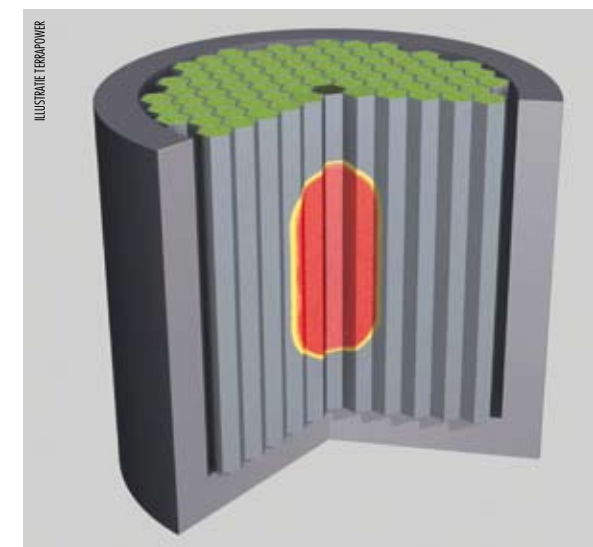
Tijdens de levensduur van een kweekgolffreactor wordt ongeveer de helft van het aan-

wezige uranium omgezet en verspleten. Een 'opgebrande' reactor zit dus nog voor de helft vol met uranium, de rest bestaat uit splijtingsproducten, zoals cesium en xenon, en door neutroninvangst ontstane zware elementen (transuranen) als plutonium en neptunium – bij elkaar ruwweg hetzelfde afvalmengsel als dat van gewone kerncentrales. Intellectual Ventures kan nog niet zeggen wat de voorkeur heeft, het afval verwijderen of de reactor zelf als begraafplaats ervan gebruiken.

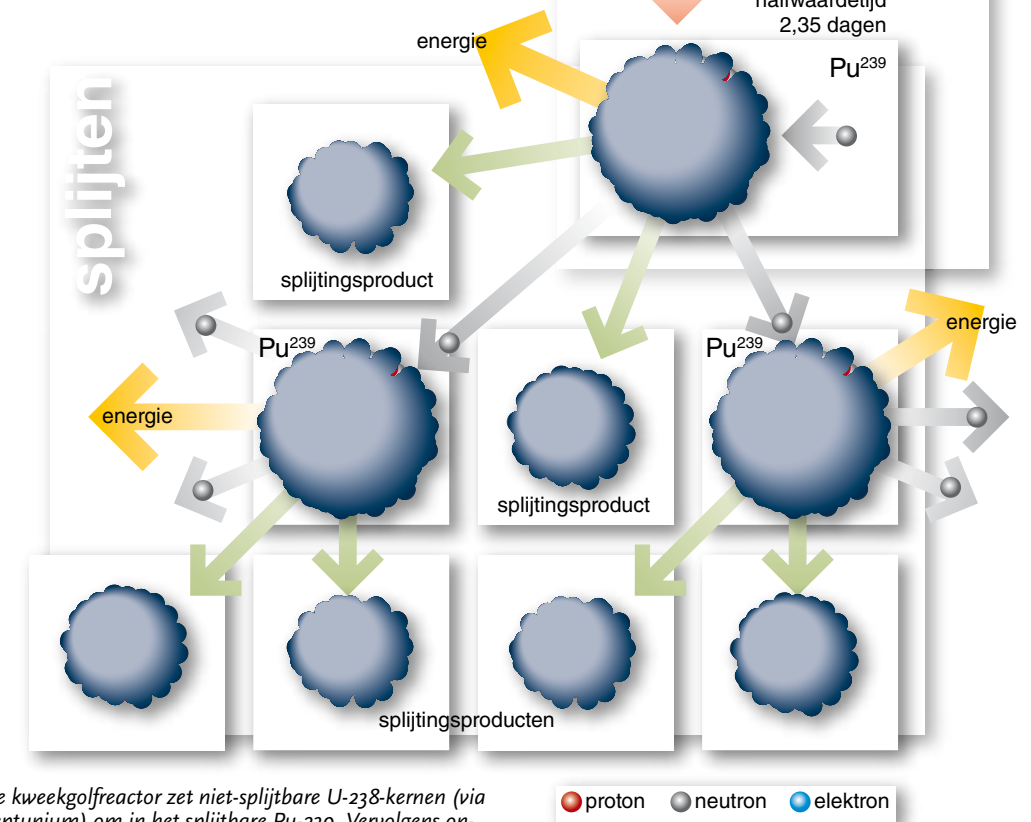
Nadat het voorstel van Wood was aangenomen, ging Intellectual Ventures over tot de eerste echte test. Er werd een bedrijf opgericht, TerraPower, waar een staf van ongeveer 25 mensen zich onder leiding van kernfysisch ingenieur Gilleland uitsluitend met de kweekgolffreactor ging bezighouden. Ze ontwierpen een aantal versies van reactor-kernen en rekenden die tot op atomair niveau door, voortbouwend op het werk van Van Dam en Sekimoto. Daarvoor moesten ze de bestaande softwarepakketten voor neutronenmodellering die bij universiteiten en de industrie in gebruik zijn, grondig ombouwen. 'We hebben er miljoenen dollars aan besteed', laat Gilleland weten. 'Uiteindelijk kregen we dezelfde antwoorden als Teller op zijn dochters laptop. Hij was opgelucht toen hij dat hoorde.'

Nu deze eerste stap is gezet, is het de bedoeling dat de grote fabrikanten, universiteiten en onderzoeksinstituten het concept technisch volwassen gaan maken. Gates is in bespreking geweest met Westinghouse, 's werelds grootste bouwer van kerncentrales, maar dat heeft niets concreets opgeleverd. Enkele Amerikaanse instituten, zoals het Massachusetts Institute of Technology (MIT), doen wel onderzoek naar het concept. De verdere ontwikkeling 'staat of valt met de materialen', in de woorden van Van Dam. Zullen er metalen komen voor de kernbehuizing en de splijtstaven die de intense hitte van 550 °C en het continue neutronenbombardelement kunnen doorstaan? Los van die metalen zijn er de gasvormige splijtproducten in de staven, die de inhoud sterk laten opzwellen en tot gevaarlijke plaatselijke verdichtingen kunnen leiden, waarschuwt Van Dam. Het is nog een open vraag of het lukt alle problemen te overwinnen.

Om een relatief gemakkelijk opstapje te maken wil TerraPower de eerste generatie kweekgolffreactoren met een lagere splijtstof-dichtheid laten werken, zodat niet meer dan ongeveer 20% van het uranium wordt verspleten. Voor het detailwerk zijn echter jaren van onderzoek in grote gespecialiseerde laboratoria als dat van het MIT nodig. TerraPower kan ondertussen hoop putten uit de grote ver-



De kern is opgebouwd uit zeshoekige elementen. Het rode gebied is actief en breidt zich geleidelijk uit, terwijl de reactie in het midden ervan langzaam dooft. Eenmaal uitgebrand wordt het middelste element naar buiten verplaatst, en gaan de andere staven een stap naar binnen, waardoor het actieve gebied weer zijn oorspronkelijke vorm krijgt.



De kweekgolffreactor zet niet-splijtbare U-238-kernen (via neptunium) om in het splijtbare Pu-239. Vervolgens ondergaan de plutoniumkernen een kettingreactie van splijtingen, waarbij warmte vrijkomt.

beteringen die de reactormaterialen in de afgelopen halve eeuw hebben laten zien.

Het bedrijf, dat op dit moment bezig is een kleine, modulaire variant te ontwerpen, gaat ervan uit dat de eerste commerciële kweekgolffreactor op z'n vroegst in 2040 in bedrijf komt. Van Dam ziet deze pas verschijnen als opvolger van de vierde generatie van kernreactoren (zie het kader 'Vooral lichtwaterreactoren'), die ook rond dat jaartal worden ver-

wacht. Mocht de missie van TerraPower slagen, dan ontstaat er een voor deze tijd ongekende luxesituatie op het gebied van energie. Het uraniumafval dat nu ligt opgeslagen ('goedkope rommel' volgens Van Dam) bevat dan, bij een wereldbevolking van tien miljard mensen, genoeg energie voor iedereen, tienduizenden jaren lang. • www.intellectualventures.com www.terrapower.com