



WERELDWIJD MAKEN SLECHTS VIJF REACTOREN MOLYBDEEN-99

Penibele isotoopproductie

DE RADIOACTIEVE ISOTOOP MOLYBDEEN-99 WORDT WERELDWIJD IN LIEFST 80 % VAN DE MEDISCHE NUCLEAIRE TOEPASSINGEN GEBRUIKT. SLECHTS VIJF REACTOREN ZIJN VERANTWOORDELIJK VOOR DE PRODUCTIE ERVAN UIT URANIUM. NA TIJDELIJKE SLUITING VAN DE REACTORS IN PETTEN EN CANADA EN DOOR POLITIEK GESTEGGEL ROND HET BEZIT VAN HOOGVERRIJKT URANIUM ZIJN ALTERNATIEVE PRODUCTIE-METHODEN RELEVANTER DAN OOI.

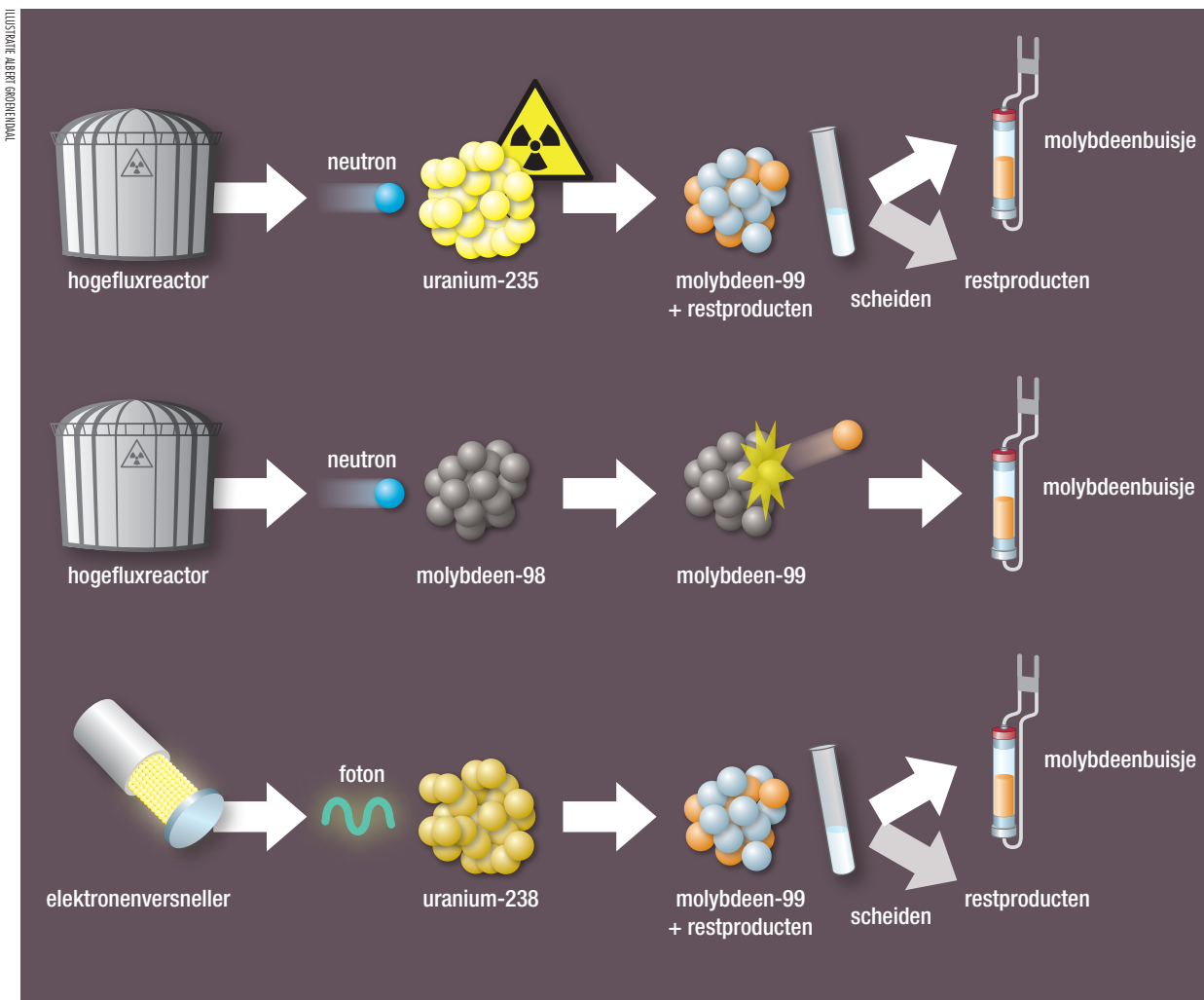
WERELDWIJD OVERLIJDEN ELK JAAR ongeveer acht miljoen mensen aan de gevolgen van kanker. Daarmee is de ziekte verantwoordelijk voor ongeveer 13 % van alle sterfgevallen. Om dat cijfer te drukken is het van groot belang kanker vroegtijdig op te sporen. Een van de hulpmiddelen daarbij is de radioactieve isotoop technetium-99m, een soort atomaire undercoveragent. Gekoppeld aan bepaalde antilichamen wordt het stofje

ongemerkt meegevoerd naar de plek waar zieke cellen zich bevinden. Resultaat: artsen kunnen de kankercellen opsporen door buiten het lichaam de uitgestoten gammastraling te meten. Ook organen en de bloedsomloop laten zich op die manier onderzoeken, wat er toe leidt dat het goedje gretig aftrek vindt in de medische gemeenschap. Alleen al in de Verenigde Staten wordt technetium dagelijks ongeveer 80 000 keer gebruikt bij een me-

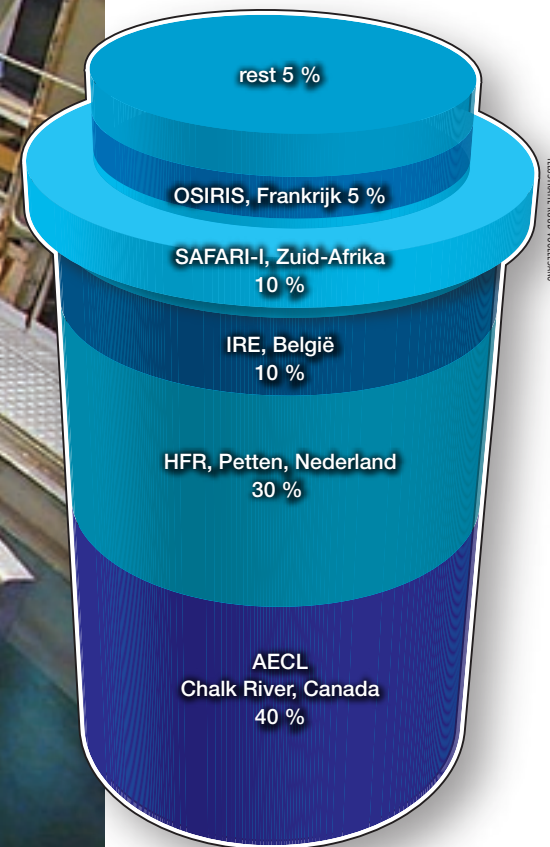
disch onderzoek. Een van de grootste voordelen van de isotoop is een korte vervaltijd, waardoor patiënten na onderzoek niet nog dagenlang radioactief rondlopen. Helaas is dat ook direct een van de belangrijkste nadelen: al na zes uur is een significant gedeelte van het technetium waardeloos geworden. Om dat te omzeilen leveren bedrijven als Covidien geen technetium, maar molybdeen-99. Deze radioactieve isotoop vervalt met een halfwaardetijd van 66 uur tot het gewenste product. Door het molybdeen te koppelen aan een stofje waarvan technetium niet blijft vastplakken, zijn buisjes te maken waar door te spoelen alleen het reeds tot technetium vervallen product uitkomt.

Het zijn die buisjes – in de medische gemeenschap beter bekend als ‘koeien’, omdat ze zijn te ‘melken’ – waarvan er jaarlijks ongeveer 200 000 aan ziekenhuizen over de hele wereld worden geleverd. Daarbij blijft regelmatige levering overigens noodzakelijk, want ook molybdeen kent een beperkte houdbaarheidstijd: na vijf à zes dagen is alles vervallen en is een nieuwe ‘koe’ nodig. Om aan die behoefte te voldoen wordt in reactoren hoogverrijkt ura-

Drie verschillende methoden om molybdeen-99 te produceren: op de huidige manier in een hogefluxreactor met radioactief uranium, door het beschieten van molybdeen-98 (Wolterbeek) en door uranium-238 te beschieten met fotonen (Triumf).



De productie van isotopen in de Hoge Flux Reactor te Petten.



Vijf reactoren zijn de belangrijkste wereldproducenten van medische isotopen.

anium, dat voor meer dan 95 % bestaat uit de radioactieve isotoop uranium-235, gespleten door beschieting met neutronen. Een van de splijtingsproducten is molybdeen-99.

Helaas is niet zomaar elke reactor bij voorbaat geschikt. Doordat molybdeen direct begint te vervallen, is er een evenwicht tussen vorming en verval. Hoe hoger het aantal afgevuurde neutronen per seconde van de reactor, de flux, hoe gunstiger dat evenwicht naar de kant van vorming verschuift. Molybdeen wordt daarom wereldwijd slechts in vijf grote hogefluxreactoren gemaakt, waarvan de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten en de reactor Chalk River in Canada het leeuwendeel, ongeveer 70 %, voor hun rekening nemen.

Helaas zijn het juist deze reactoren die, actief sinds respectievelijk 1961 en 1957, op hun laatste benen lijken te lopen. De HFR heeft te kampen met belletjes door corrosie, met een

tijdelijke stillegging en een nog uit te voeren definitieve reparatie tot gevolg, terwijl de reactor in Canada sinds juni voor drie maanden buiten bedrijf is. Het toont de kwetsbaarheid van het productieproces. Bovendien kan hoogverrijkt uranium ook worden gebruikt om wapens te produceren. Aanscherping van wereldwijde non-proliferatieverdragen en diplomatieke druk van de VS zouden ervoor kunnen zorgen dat de productie van molybdeen in dergelijke reactoren in de toekomst helemaal stil komt te liggen. Het wordt daarom dus tijd voor alternatieven.

RESTAFVAL

Een daarvan komt uit Nederland, waar prof.dr. Bert Wolterbeek in het Delftse reactorinstituut in staat is om op een nieuwe manier molybdeen te maken. Volgens hem is neutronsplijting van uranium-235, de huidige

methode, erg inefficiënt. ‘Slechts 6 % van het splijtingsproduct is molybdeen-99, 94 % moet worden afgevoerd.’ Hij ging daarom op zoek naar een methode die weinig restafval produceert. Die bleek al sinds de jaren dertig te bestaan en staat bekend als de Szilard-Chalmed-

reactie, waarbij men de stabiele isotoop molybdeen-98 beschiet met neutronen om molybdeen-99 te krijgen. In de natuur bestaat molybdeen voor een kwart uit de isotoop met massagetal 98, dus het stofje moet eerst verrijkt worden. ‘Dat kunnen we’, aldus Wolterbeek.

Gebruik van die methode kent twee belangrijke voordelen: hij produceert geen extra radioactief restafval en zorgt ervoor dat hoogverrijkt uranium niet langer als splijstof nodig is. Het gebruik van hoogverrijkt uranium is zelfs helemaal uit te sluiten zodra alle reactoren overstappen op laagverrijkt uranium als brandstof om neutronen mee te maken – iets dat de opvolger van de huidige HFR,

‘Of het proces überhaupt haalbaar is, weten we over een jaar’

METHODE	VOORDELEN	NADELEN
neutronsplijting uranium-235 hoogverrijkt (huidige methode)	produceert 100 % molybdeen-99 in hoge concentratie productieproces reeds bewezen	gebruikt hoogradioactief uranium veel radioactief afval productieproces broos
neutroninvang molybdeen-98 (Wolterbeek)	geen radioactief afval geen hoogverrijkt uranium	nog steeds reactoren nodig productieproces broos opschaling niet bewezen
fotonsplijting uranium-238 (Triumf)	geen hoogverrijkt uranium extra productiecapaciteit los van huidige kernreactoren zelfde splijtingsproduct als bij huidige methode	veel radioactief afval hoge energiekosten werking fotonenproductie niet bewezen
neutronsplijting uranium-238 laagverrijkt (Argentinië)	geen hoogverrijkt uranium technisch mogelijk en economisch haalbaar	veel radioactief afval dure omschakeling nog steeds reactoren nodig productieproces broos

De voor- en nadelen van verschillende productiemethoden van molybdeen-99.

de Pallas die in 2015 staat gepland, sowieso zal doen.

Toch is deze methode ondanks die voordelen de afgelopen zeventig jaar nog niet industrieel toegepast, omdat het niet rendabel was. 'Als je een neutron op molybdeen-98 schiet, kun je molybdeen-99 krijgen, maar de kans dat je er eentje raakt is niet zo groot. Daarom zal niet al het targetmateriaal veranderen in molybdeen-99.' Omdat er daardoor minder materiaal in het eindproduct zit dat kan vervallen tot technetium, is heel veel nodig voor dezelfde opbrengst. Het is dus de uitdaging om uit het beschoten materiaal alleen het molybdeen-99 te vissen. Chemisch zijn de isotopen 98 en 99

Canada werkt aan molybdeenproductie uit versnellers

echter identiek, dus is een truc nodig. Deze is gebaseerd op het feit dat de kern door het neutron een opdonder krijgt, de zogenoemde *recoil energy*. Er komt direct een foton vrij en de kern schiet even uit zijn omgeving los. 'Dan moet je hem meteen pakken en in een apart potje stoppen.' Helaas kan Wolterbeek niet precies vertellen hoe dat werkt, want een patent is nog in aanvraag. Toch lijkt zijn idee goed, want in Delft lukte het hem om op deze wijze molybdeen-99 van voldoende hoge specifieke activiteit te produceren. 'We hebben daardoor *proof of principle* en dat is iets dat tot nu toe nog nooit eerder is gelukt.'

De volgende stap is dat Wolterbeek de neutronen van de HFR gaat gebruiken. Of dat lukt moet nog blijken, want de omstandigheden bij de reactor zijn anders dan in zijn eigen experimentele opstelling. Er zijn inmiddels afspraken met Urenco, leverancier van het molybdeen-98, met NRG, het bedrijf achter de HFR en de Pallas, en met Covidien, die

ren. Daar zullen dan nog wel enige jaren overheen gaan.'

Een – naar eigen zeggen – sneller alternatief komt uit Canada, waar onderzoeksinstituut Triumf werkt aan molybdeenproductie uit uranium in versnellers. Dat vindt getrappt plaats. Eerst worden elektronen tot hoge energie (zo'n 30 MeV) versneld, waarna ze op een zwaar metaal botsen. Deze zogenoemde convertor, waarschijnlijk gemaakt van wolfram of lood, zal na botsing fotonen uitzenden (*bremstrahlung*). De ontstane fotonen hebben een energiespectrum met een maximum op de gebruikte elektronenergie, voldoende om splijting te veroorzaken.

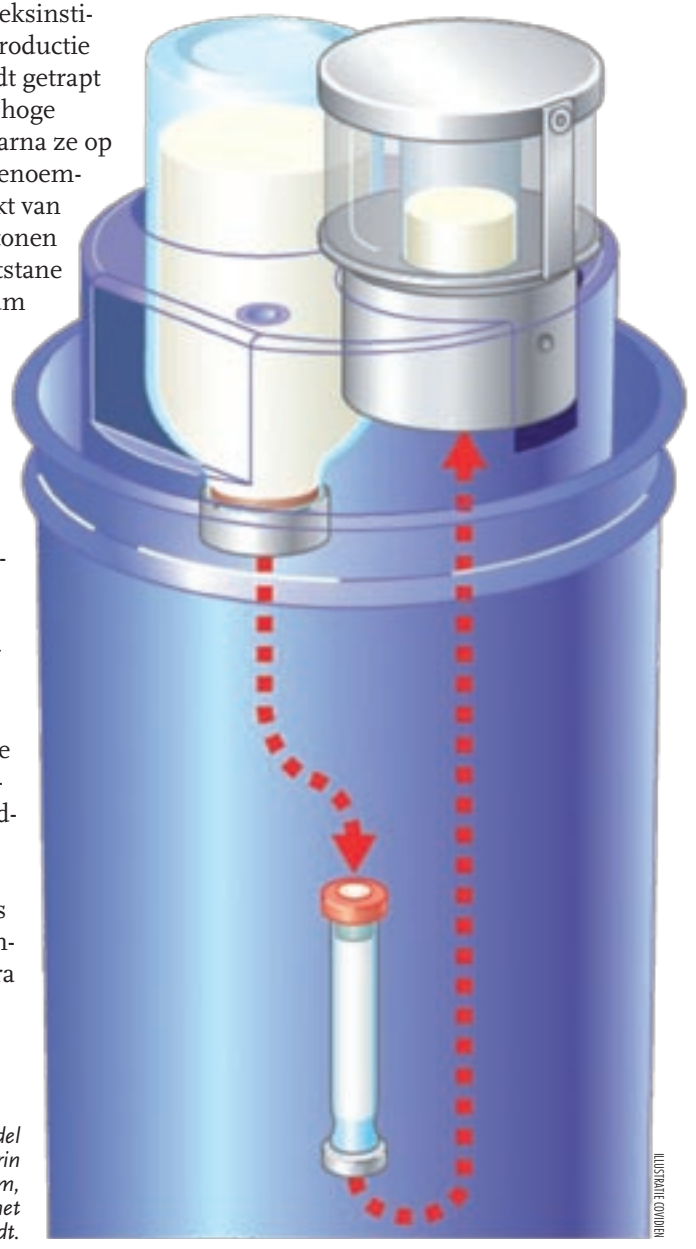
Grootste voordeel is dat Triumf kan werken met uranium-238, de in de natuur meest voorkomende niet-radioactieve isotoop, omdat splijting met fotonen niet erg gevoelig is voor het aantal neutronen in de target. Verder blijkt dat foton-splijting van uranium-238 ongeveer dezelfde opbrengst levert als neutronsplijting van uranium-235. 'Daardoor is het mogelijk de huidige chemische infrastructuur bij reactoren te blijven gebruiken om het eindproduct te maken. Dat zorgt er vermoedelijk voor dat het vergunningproces snel kan verlopen', aldus onderzoeker Thomas J. Ruth. Bovendien is het straks niet nodig om extra reactoren te bouwen om de productiecapaciteit van molybdeen op te schroeven. 'Het is goedkoper om

Een speciale houder leidt spoelmiddel langs een buisje, de melkkoe, met daarin radioactief molybdeen en technetium, waarna het opgeloste technetium in het medicijnflesje belandt.

de 'koeien' maakt. 'Of het proces überhaupt haalbaar is, weten we over een jaar. Daarna moeten we commercialiseren en kijken hoe we het routinematig kunnen invoeren.

over vijftig jaar een versneller af te breken dan een reactor.'

Toch is ook deze methode, net als die van Wolterbeek, niet zo heel gemakkelijk te realiseren. Grootste resterende probleem is het maken van een goede convertor. De hoge energie van de elektronen maakt het metaal gloeiend heet. 'Daarvoor hebben we een efficiënt koelsysteem nodig. Onze oplossingen zijn gebaseerd op die van anderen: een ro-



BERNARD THURMESTON



De Hoge Flux Reactor in Petten zal in 2010 een ingrijpende reparatiebeurt ondergaan.

gen. Bovendien blijft de molybdeenproductie nog altijd afhankelijk van dezelfde paar hogefluxreactoren.

Het is daarom niet opmerkelijk dat NRG wel brood ziet in de methode van Wolterbeek, waarbij zowel de noodzaak van hoogverrijkt uranium als de grote afvalproductie wordt weggenomen. En ook MDS Nordion, de Canadese pro-

ductent van medische isotopen, lijkt nog niet bereid om zomaar op laagverrijkte targets over te stappen. Het bedrijf sloot eind april een overeenkomst met Triumf om de haalbaarheid van zijn alternatief verder te onderzoeken en legde daarbij de nadruk op het vervangen van hoogverrijkt uranium en de extra back-up die de versnellers in de productieketen zouden kunnen vormen.

Ondanks dat vormt het gebruik van laagverrijkt uranium wel degelijk een goede derde optie voor het geval de alternatieven van Wolterbeek en Triumf inderdaad niet haalbaar blijken en de aanscherping van de regels rond het gebruik van hoogverrijkt uranium alsnog roet in het eten gooit. 'Mochten onze opdrachtgevers en de overige partijen in de productieketen erom verzoeken, dan zal NRG meewerken aan een haalbaarheidsonderzoek voor omzetting naar laagverrijkte targets in de nieuwe Pallas-reactor', meldt Duijvestijn.

Onafhankelijk van welke optie het uiteindelijk ook wordt, het zal allemaal nog wel even op zich laten wachten. Dus terwijl alle isotopen – niet alleen molybdeen – met een ouder wordende bevolking steeds meer in trek raken, blijven patiënten over de hele wereld de komende jaren nog afhankelijk van de huidige status quo: isotoopproductie in vijf oude reactoren, waarin nieuwe productieproblemen nog altijd op de loer liggen. ●

ARGENTINIË

Op zoek naar een neutrale instantie om de waarde van deze twee veelbelovende alternatieven in te schatten komen we terecht in de VS, het land dat druk zet achter de vermindering van hoogverrijkt uranium. Dr. Kevin D. Crowley werkt daar bij de onafhankelijke instantie The National Academies, die de Amerikaanse overheid van wetenschappelijk advies voorziet. Vanuit die functie schreef hij een lijvig rapport over de alternatieven voor het gebruik van hoogverrijkt uranium bij de

rend wiel dat waterkoeling levert, of koeling door de convertor uit vloeibaar lood te maken.'

Ruth heeft in elk geval veel vertrouwen in zijn methode. Hij is met de Canadese overheid in overleg voor financiering en spiegelt een rooskleurig toekomstbeeld voor. 'Als wij tien miljoen dollar krijgen, dan kunnen we in 2011 een demonstratiemachine hebben staan. Als die inderdaad werkt, kunnen we in 2013 de eerste versnellers bouwen.' Ruth denkt dat de bouw van nieuwe reactoren die de oude moeten opvolgen, zoals de Pallas in Petten, meer tijd zal vergen. 'Daar hebben ze het over 2015, maar dat geloof ik eigenlijk niet zo. Je hebt toch het *nimbyprincipe* (*not in my backyard*) en ze hebben nog niet eens een locatie.'

Omgekeerd heeft NRG weer niet zoveel vertrouwen in de door Triumf beloofde snelheid. 'Er liggen technisch wel een heleboel vragen. Ik denk dat het nog tien tot twintig jaar duurt voordat ze zover zijn', meent Marieke Duijvestijn, commercieel manager isotopen bij NRG.

productie van medische isotopen. Zijn conclusie? We moeten ons heil niet zoeken in de alternatieven van Triumf of Wolterbeek. 'Geen van beide methoden is op dit moment geschikt. Molybdeen-99 kan ook gemaakt worden in reactoren door laagverrijkte uraniumtargets te beschieten.' Hij wijst daarbij op Argentinië, die dat reeds in de praktijk toepast. 'De alternatieven moeten economisch en kwalitatief de concurrentie kunnen aangaan met het huidige product. Het is niet zeker of ze dat zullen kunnen.'

Toch dringt één vraag zich direct op: als het zo gemakkelijk is om over te schakelen op laagverrijkte targets, waarom hebben instanties als NRG dat dan niet allang gedaan? Het antwoord: overschakelen brengt veel problemen met zich mee. 'We zouden de complete bestralingsketen moeten aanpassen', vertelt Duijvestijn. 'Dat betekent een aanpassing van het targetontwerp, de bestralingsfaciliteiten, de radiochemische processen, de laboratoria en het afvalverwerkingsproces. Aanpassing naar laagverrijkte targets leidt daarnaast tot een nieuw eindproduct dat medisch getoetst en geregistreerd moet worden. Tot slot zijn er dan nieuwe nucleaire vergunningen nodig. NRG is slechts verantwoordelijk voor de bestraling van molybdeen-99, terwijl deze aanpassing gevolgen heeft voor de gehele keten.' Bovendien kent ook het gebruik van laagverrijkt uranium nog steeds ongewenste gevolgen. Zo kan – afhankelijk van de gekozen productiemethode – de totale hoeveelheid afval enorm toenemen. Doordat laagverrijkt uranium minder actieve stof bevat, is er veel meer van nodig om dezelfde opbrengst te krij-

'We moeten dan de complete bestralingsketen aanpassen'