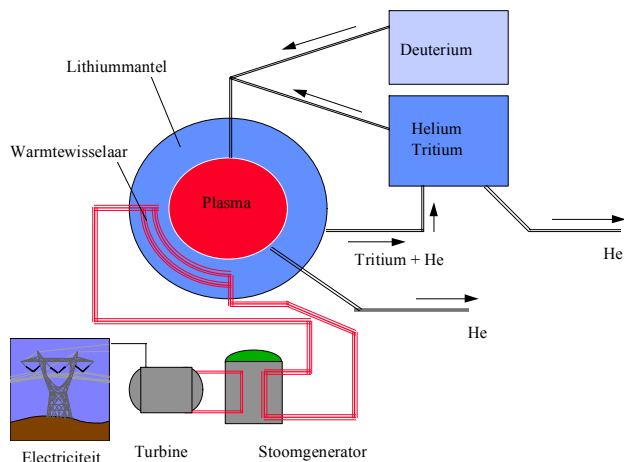


## Inleiding

Meerdere energiemogelijkheden voorspellen dat het energieverbruik in 2050, twee tot vier maal zo hoog zal zijn als vandaag. Deze scenario's baseren zich op een toename van de bevolking en een verdere globale economische ontwikkeling. Alle mogelijke energiebronnen en energiebesparende maatregelen moeten benut worden om in de verwachte behoeften te kunnen voorzien. Ze spelen allemaal een rol en hebben elk hun voor- en nadelen. Die hangen samen met de beschikbaarheid van de energiebronnen, hun verspreiding over de wereld, de invloed op het milieu en de veiligheid. Fusie – meer bepaald kernfusie - is een mogelijke energiebron met het potentieel op grote schaal elektriciteit te kunnen leveren. Dit gaat ons allemaal aan en meer in het bijzonder ook het SCK·CEN waar we fusieonderzoek doen, des te meer na de beslissing in juni 2005 om ITER (het toekomstige thermonucleaire fusieproject) in Cadarache (Zuid-Frankrijk) te bouwen.



## 1. Wat is kernfusie?



Kernfusie is het samensmelten van atoomkernen tot een nieuwe kern. Dat is niet eenvoudig door hun gelijksoortige lading, waardoor de kernen elkaar afstoten en een mogelijke samensmelting of fusie belemmeren. Fusiereacties kan men toch tot stand brengen door de kernen voldoende energie mee te geven zodat ze die wederzijdse afstoting overwinnen. Kernfusie is eigenlijk het proces dat plaatsvindt in de zon.

Op de zon is de druk zeer hoog en fusie kan inderdaad ontstaan bij 15 miljoen graden. Op aarde zal die hoge druk niet behaald worden en zullen we 10 maal hoger in temperatuur moeten gaan: 100 tot 200 miljoen graden.

### Miniatuurzonnen op aarde

De zon levert al miljarden jaren energie en zal dat nog miljarden jaren doen. Per seconde wordt ongeveer 600 miljoen ton waterstof omgezet in 596 miljoen ton helium. Vier miljoen ton materie verdwijnt daarbij in de vorm van energie. Een enorm grote hoeveelheid maar toch klein in vergelijking met de reserve aan waterstof die in de zon aanwezig is. Het is niet mogelijk miniatuurzonnen op aarde te bouwen. Het energieproductiesysteem van de zon is ongeschikt voor gebruik op de aarde, omdat de condities zoals ze zich in de zon voordoen, op aarde niet kunnen worden nagebootst. Willen we kernfusie op aarde realiseren, dan moeten we proberen een zo hoog mogelijke temperatuur en/of zo een hoog mogelijke druk te verwezenlijken.

### De brandstof

Fusie is mogelijk via de samensmelting van meerdere lichte kernen. De deuterium-tritium reactie is het makkelijkst te realiseren. Deuterium en tritium zijn isotopen van waterstof. Deuterium komt in grote hoeveelheden in zeewater voor. Uit een liter zeewater kan evenveel energie gehaald worden als uit een 300-tal liter benzine. Tritium kan worden bereid uit lithium dat ook uit zeewater kan worden gewonnen. Zeewater is overvloedig aanwezig. Het is dan ook niet overdreven te stellen dat de mensheid met kernfusie over een haast onuitputtelijke energiebron beschikt. Daarbij komt nog dat het eindproduct van die reactie haast onschadelijk is. Hiermee zeggen we niet dat kernfusie totaal vrij is van afvalproducten.

### Kernfusie onder extreem hoge druk of inertiële fusie

Een manier om kernfusie op aarde te verkrijgen, is de *inertiële* fusie. Hierbij wordt een brandstofdruppeltje met een diameter van enkele honderden micronmeter en gevuld met gelijke hoeveelheden deuterium en tritium, met krachtige laserstralen in een paar miljardste seconden homogeen verhit. De buitenste schil van de brandstof verdampt daarbij zo snel dat een schokgolf ontstaat, met een geweldige drukverhoging als gevolg. Daardoor moet men niet meer naar die zeer hoge temperaturen streven. Enkele miljoenen graden Celsius zijn al voldoende om de kernen te fuseren.

## Kernfusie onder extreem hoge temperatuur of magnetische fusie



De tweede fusiemethode is de *magnetische fusie*. Tot nu toe blijkt dit het meest succesvol, meer specifiek met de tokamak configuratie. Tokamak is een acroniem voor het Russische *TOroidal'naja KAmera s MAgnitnimi Katushkami*, vrij vertaald: "magnetische kamer met magnetische spoelen". Om kernfusie tot stand te brengen, moet een mengsel van deuterium en tritium worden verhit tot een temperatuur van 150 miljoen graden. Bij zulke hoge temperaturen ontstaat een gas dat

*plasma* wordt genoemd. Het is een elektrisch geleidend maar neutraal geheel waarin elektronen en atoomkernen volledig los van elkaar bewegen. Om te zorgen dat het hete plasma de wand niet raakt (het zou daardoor te veel afkoelen) en lange tijd op de juiste temperatuur blijft, wordt het in een donutvormig vat bij elkaar gehouden door krachtige magneetvelden en vervolgens met verschillende methoden verhit. De machine waarin dit gebeurt heet een *tokamak*. Het hart van ITER is ook een tokamak.

## 2. Veiligheid

Zoals bij elke vorm van energieproductie het geval is, wordt er ook bij kernfusie veel aandacht besteed aan veiligheid, zowel voor de werknemers, voor de bevolking voor het milieu. Hierna een overzicht van de belangrijkste problemen in verband met veiligheid die zich met fusie kunnen stellen.

### *Tritium wordt omsloten*

Tritium is een radioactieve stof (bèta-straler) met een halfwaardetijd van 12,3 jaar. Tritium komt slechts beperkt voor in de natuur maar kan worden bereid door lithium met neutronen te bestralen. Tritium vormt met de zuurstof van bijvoorbeeld lucht getritieerd water,  $T_2O$ . Dat heeft een biologisch halfleven van 10 dagen in het lichaam. Daarentegen zijn er andere isotopen die niet onder watervorm zijn en dus biologisch een veel langere periode hebben: eens men bijvoorbeeld plutonium in het lichaam heeft, blijft een gedeelte ervan praktisch permanent aanwezig.

Het eventueel vrijkomen van tritium kan zorgen voor een stralingsblootstelling van de bevolking. Daarom wordt bij elk ontwerp veel aandacht besteed aan het opsluiten van tritium. Dit probleem kan ook verminderd worden door de keuze van andere brandstoffen, waarbij men minder tritium gebruikt maar wel deuterium of

helium3. Dat is wel gemakkelijker gezegd dan gedaan, want een andere keuze betekent dat men nog hogere temperaturen moet bereiken.

### *Stralingsvelden en activatie*

De eindproducten van kernfusiereacties zijn neutronen en kerndeeltjes zoals helium. De hoogenergetische neutronen treffen al wat zich rond het plasma bevindt en maken het radioactief. De risico's voor de werknemers kunnen aanzienlijk beperkt worden door voldoende afscherming rond de reactor en het opleggen van toegangsrestricties. Door gepaste materialenkeuzes, bv. ijzer-chroom, vanadiumlegeringen, enz, kan de hoeveelheid geproduceerde radioactiviteit aanzienlijk worden verminderd. Een aantal van de geactiveerde onderdelen zal gedurende de normale levensduur van de reactor vervangen moeten worden. Dat moet gebeuren met behulp van telemanipulatietechnieken waardoor de radiologische impact op het personeel minimaal is.

### *Afval*

Een kernfusiereactor produceert geen langlevende radioactieve elementen zoals het geval is bij een kernsplijtings- of fissiereactor (bv. afvalproducten van de splijtstof). Daarentegen moet een aantal componenten in de fusiereactor meerdere keren vervangen worden gedurende hun levensduur, met als gevolg een afvalstroom van geactiveerd materiaal. Deze afvalstroom zal qua volume groter zijn omdat er meer vervangingen zijn als bij een normale fissiereactor. Op lange termijn is de radiotoxiciteit (een maat voor de biologische schade bij ingestie of inhalatie van een bepaalde hoeveelheid radioactieve stof) echter veel lager. Na een periode van 100 jaar is de radiotoxiciteit voor een fusiereactor van dezelfde orde als deze van de assen van een kolencentrale en dit voor eenzelfde productie van elektrische energie. Een grote fractie van het materiaal kan worden vrijgegeven na 50 jaar. Slechts een klein gedeelte van het materiaal moet in de eerste jaren van een actieve koeling voorzien worden. Het is zo dat 70% van het materiaal kan worden gerecycleerd of worden vrijgegeven na 50 jaar. Men kan bijgevolg stellen dat het fusieafval geen belasting vormt voor toekomstige generaties.

### *Risico's van falingen*

De kans op een ongecontroleerde fusiereactie met radioactieve uitstoot is bijna onbestaand. Bijna alle falingen van apparatuur leiden tot het stilvallen van de fusiereactie. Zo zal een contact van het plasma met de wand de reactie stoppen. Ook zijn er inherent limieten door de beperkte hoeveelheid brandstof aanwezig in de reactor. Zelfs bij totaal verlies aan koeling blijft de schade beperkt. Een fusie-elektriciteitscentrale zou zodanig kunnen ontworpen worden dat een evacuatie van de bevolking niet vereist is na een zwaar ongeval in de centrale.

### *Proliferatie*

Het is weinig waarschijnlijk dat een fusiereactor zou kunnen bijdragen tot de proliferatie van kernwapens. Onder normale omstandigheden is er geen splijtbaar materiaal in het reactorgebouw aanwezig.

Maar, rond het reactorvat in zogenaamde "hybride" reactorontwerpen plaatst men een uranium mantel. De fusieneutronen kweken dan daarin plutonium. En dit plutonium zou dan weer voor minder prettige doeleinden kunnen gebruikt worden. Ook kan men in principe de normale brandstoffen (deuterium-tritium) ontvreemden voor de productie van een fusiebom. De technische moeilijkheden bij het vervaardigen van dergelijke tuigen zijn echter zo groot dat dit buiten het bereik valt van subnationale groepen.

### 3. Even terugblikken in de geschiedenis

**1920** - Er bestaan vermoedens dat fusie de energiebron is van de zon.

**1934** - Experimenten in de Universiteit van Cambridge (Engeland) bevestigen dat fusie kan via waterstof en dat daarbij energie vrijkomt.

**1950** - De Sovjet fysici Igor Tamm en Andrei Sakharov ontwikkelen de tokamak-technologie.

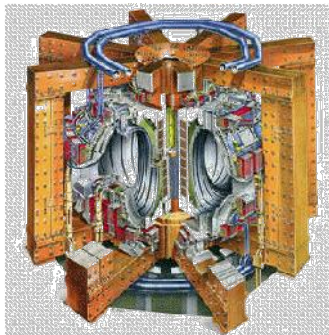
**1958** - Het wordt stilaan ook duidelijk dat gecontroleerde magnetische fusie niet kan gebruikt worden om wapens mee te produceren. Het onderzoek wordt gedeclasseerd en de partners van de Koude Oorlog beslissen om samen te werken rond fusieonderzoek.

**60-er jaren** - Het tokamak-principe dat nog altijd dient als basis voor het huidige ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) concept, wordt verder ontwikkeld. In 1972 waren wereldwijd 17 tokamaks in werking (In 2000 was het totale aantal tokamaks en aanverwante machines reeds meer dan 100. De tokamak is het meest succesvolle ontwerp tot nu toe).

**1973** - Door het OPEC olie-embargo ontstaan er olietekorten en rijst de olieprijs de pan uit. Politici realiseren zich plots hoezeer we afhankelijk zijn van oliebronnen en dat energie zeer belangrijk is voor de economie. Als gevolg daarvan worden de budgetten voor onderzoek en ontwikkeling rond energie drastisch verhoogd. In de VS bijvoorbeeld werd het fusiebudget vertienvoudigd in twee jaar.

**1976** - De Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) werd operationeel aan de Princeton Universiteit. Sindsdien heeft deze belangrijke bijdragen geleverd aan het fusieonderzoek. Van bij het begin in 1976 was de TFTR-opdracht om de deuterium-tritium fusie te onderzoeken, de plasmafysica te bestuderen van grote tokamaks en om ervaring op te doen met reactor-scale engineering.

**1978** - De JET (Joint European Torus) wordt operationeel in het Verenigd Koninkrijk. De JET die drie keer zo klein is als het huidige ITER-ontwerp, is de grootste fusie-installatie. Ongeveer 350 wetenschappers en ingenieurs uit Europa maken deel uit van het JET-team. Met dit grote project bewijst de JET-installatie dat fusie succesvol en veilig



kan worden gerealiseerd.

**1982** - Canada maakt fondsen vrij voor fusie-onderzoek. Het Canadian Fusion Fuels Technology Project (CFFTP) en het Centre Canadien de Fusion Magnétique dragen beiden bij tot fusie-ontwikkelingen. Onlangs zijn ze verbonden in een ITER-Canada consortium, gesticht om de Canadese kandidatuur voor ITER te bestuderen.

**1985** - De Europese Unie, de Sovjet Unie, Japan en de Verenigde Staten worden het op de top van Genève eens over de samenwerking voor het ontwerp van een fusie- installatie, de eerste stap richting ITER.

**1986** - In Tsjernobyl (zie ook onze brochure "Tsjernobyl 20 jaar later") in de Oekraïne gebeurt het zware nucleaire ongeval. Dit ongeval zou het gevolg zijn van een slecht beleid. Hierna is de interesse in efficiënte energie en in alternatieven zoals fusie terug aangewakkerd.

**1988** - ITER krijgt stilaan vorm. Canada voegt zich bij het Europese ITER-team. Voor het design werken de VS, Rusland, Japan en Europa samen.

**1995** - De TFTR-machine in de VS vestigt een record door 10 megawatt fusie-energie te produceren, een mijlpaal in het fusieonderzoek.

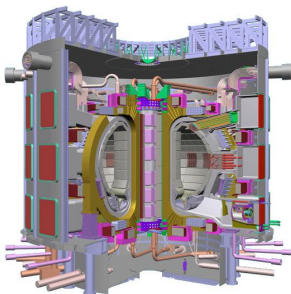
**1996** - Eind 1996 heeft de OPEC 800 000 miljoen vaten ruwe olie in reserve of ongeveer 80 % van de wereldvoorraad. Volgens de OPEC zijn op basis van de olieconsumptie van 1996, deze oliereserves voldoende voor de volgende 80 jaar.

**1997** - De JET-tomakak in Engeland breekt het record van 1995 en produceert 16 megawatt fusie-energie.

**1998** - Japan bereikt een break-even equivalent in hun JET-60-tokamak. Met andere woorden, de hoeveelheid energie nodig om het deuterium-tritium plasma te verhitten om op die manier fusie te doen ontstaan, is gelijk aan de hoeveelheid energie die wordt vrijgegeven.

**1999** - Canada uit bij de Europese Unie zijn wens om het ITER-project in Canada onder te brengen. Als stichtend lid in 1988, trekt de VS zich terug uit het ITER-project door gebrek aan ondersteuning in het Congres en door reductie van de fusiebudgetten. Maar de interesse voor deelname aan het fusie-onderzoek blijft bestaan bij de Amerikaanse wetenschappers wat de VS ertoe brengt om zijn politiek te herzien als er andere partners kunnen worden gevonden. Wat ze effectief enkele jaren later gingen doen. Als gevolg hiervan verklaren Europa, Japan en Rusland zich bereid om het ITER-ontwerp te vervolledigen en om de nodige stappen te nemen voor de bouw.

**2003** – Bij de vier initiële partners: Europa, de VS, Japan en Rusland hebben zich China en Zuid-Korea gevoegd. Er moet nog een keuze vallen waar de ITER zal gebouwd worden: in Europa (in Cadarache, Frankrijk) of Japan (Rokkasho). De financiering zou geen probleem meer zijn: de landen die meewerken aan het project hebben zich allemaal bereid verklaard geld op tafel te leggen. Het prijskaartje wordt geraamd op 4,7 miljard euro voor de bouw, nog eens 4,8 miljard euro om de reactor twintig jaar te laten draaien en een half miljard om hem nadien te ontmantelen.



**2005** – De keuze valt op Cadarache als 'de' site voor de bouw van ITER en de licensingstudies kunnen beginnen. De reactor zou rond 2015 in werking treden. India sluit zich aan bij de zes andere partners. Het ITER-project wordt zo het grootste wetenschappelijke consortium ooit en betreft meer dan de helft van de wereldbevolking.

**2006** – India heeft besloten om ook deel te nemen aan het ITER-initiatief. Op 21 November, in Parijs, werd plechtig de handtekening gezet op het ITER-verdrag door alle zeven partners.

#### 4. Het SCK•CEN en fusie

Het SCK•CEN levert een essentiële bijdrage tot het fusieonderzoek, meer bepaald op vlak van structuurmaterialen onder straling, instrumentatie, afval en ontmanteling. Voor het wetenschappelijk onderzoek zijn onze BR2 reactor, de hot-cells, onze kennis van beryllium en onze ervaring rond de ontmanteling van de BR3 reactor van essentieel belang. Naast dit onderzoek, besteden we eveneens aandacht aan sommige socio-economische aspecten. Het SCK•CEN-onderzoek vertegenwoordigt ongeveer de helft van de Belgische bijdrage aan het fusieonderzoek, de rest wordt geleverd door het plasma-onderzoek in de Koninklijke Militaire School en de ULB.

##### *Start van het fusieonderzoek op het SCK•CEN*

Het SCK•CEN is in 1974 ingestapt in het Europese kernfusieprogramma. Het laboratorium voor plasmafysica van de Koninklijke Militaire School was toen in dat gebied al vele jaren actief. Aanvankelijk vaardigden we één persoon af voor de voorbereidingsfase van de Joint European Torus (JET) in Engeland, een project dat tot de grootste fusie-installatie op aarde moest leiden. Rond de jaren 80 raakte het SCK•CEN overtuigd dat de eigen kennis van nut kon zijn voor deze 'fusie'-onderneming.

##### *Hoe stond men toen ten opzichte van fusie?*

Fusie werd toen nog algemeen beschouwd als de veilige, onuitputtelijke potentiële energiebron met minimale omgevingsrisico's. Alleen het technische deel, de bouw van een fusiereactor stond nog in de weg. Al vlug kwam er reactie van de tritiumspecialisten die zich vragen stelden bij het opsluiten van grote hoeveelheden tritium in een omgeving waar toch met hoge temperaturen wordt gewerkt. Even later reageerden de materialenspecialisten: fusie zou hoogenergetische neutronen produceren met als gevolg dat ze alles activeren wat ze raken. In de loop van de jaren 80 werd ook duidelijk dat een kernfusiereactor wel eens zou kunnen zorgen voor aanzienlijke hoeveelheden radioactief afval. Fusie was niet langer de kernafvalvrije energiebron.

##### *Overstap naar fusieonderzoek*

Het SCK•CEN had een jarenlange ervaring op het vlak van stralingsschade aangericht door neutronen in structuurmaterialen van fissiereactoren en op het vlak van de activering ervan. De overstap naar het onderzoek van de schade die hoogenergetische neutronen van een fusiereactor kunnen aanrichten, was vlug gemaakt. De voornaamste bijdrage die we daarbij hebben geleverd, is de constructie en de uitbating van een systeem waarmee in de BR2 reactor vermoeidheidsproeven werden verricht op potentiële constructiematerialen van de wand die het plasma moest omhullen.

Door de jarenlange ervaring in het kader van de ontwikkeling van een snelle neutronenreactor, hadden we een belangrijke kennis van zaken opgebouwd rond vloeibaar natrium. Het was dan ook een kleine stap om een lithium en lithium-lood kringloop te bouwen om het gedrag van potentiële structuurmaterialen van de fusiereactor in een omgeving van vloeibaar lithium of lithium-lood te testen. Ondanks de heel interessante resultaten, werd dat project uiteindelijk gestopt omdat de kosten veel te hoog zouden oplopen. We hadden gehoopt die te kunnen drukken door een grotere inbreng van de industrie. Dat bleek wishful thinking. Die moeilijke samenwerking met de industrie beperkte zich spijtig genoeg niet tot dit deel van het onderzoek. Een soortgelijk scenario speelde zich af bij de ontwikkeling van keramische kweekmaterialen. We hebben dan maar in onze BR2 reactor kringlopen gebouwd om het gedrag van structuurmaterialen onder neutronenbestraling te testen.

##### *Het SCK•CEN speelde een belangrijke rol*

Het groeiende aandeel van de fusietechnologie vereiste een nieuwe structuur van het Belgische fusieprogramma. In het midden van de jaren 80 werd dat aandeel zo groot dat de Belgische bijdrage tot het fusieprogramma werd opgedeeld in een deel plasmafysica, waarvan de Koninklijke Militaire School de leiding bleef hebben en een deel fusietechnologie, dat onder de leiding van het SCK•CEN kwam. Het SCK•CEN kreeg daarmee de opdracht om andere instellingen en industrieën bij het technologische deel te betrekken.

Dat resulteerde in een samenwerking met de K.U.Leuven op het gebied van corrosie en met de Faculté Polytechnique de Mons op het gebied van sensoren. Later zullen industriële partners zoals Gradel-Luxemburg en IBA in Louvain-la-Neuve ook meedoen.

### *Jaren negentig*

Op Europees vlak kwamen enerzijds de onderzoeksbudgetten onder druk. Anderzijds groeide binnen het fusieprogramma, zij het zeer langzaam, de technologie- of machinepoot tegenover de plasmafysische poot.

Dit betekent dat de plasmafysici die jarenlang met niet-radioactief waterstof het fusieonderzoek dreven, zich bewust werden dat volgende stappen in de fusieontwikkeling deuterium-tritium reacties vereisen en dat daarbij neutronen gevormd worden. De kennis en ervaring vanuit de fissiehoek kon dus zonder problemen overgeheveld worden naar een fusiereactoromgeving.

### *Financiën*

België spendeert ongeveer 8 miljoen euro per jaar aan fusieonderzoek, waarvan bijna 4 miljoen op het SCK•CEN. Dit stemt ongeveer overeen met 1.6 % van de totale Europese inspanning in dit domein. Op het SCK•CEN zijn ongeveer een honderdtal collega's die op dit onderwerp werken voor een equivalent totaal van 23 persoon-jaren. De Europese Commissie betaalt ons een dik miljoen euro per jaar, wat ongeveer de helft is van alle SCK•CEN-inkomsten uit Europese projecten.

### *Departementen*

De grootste bijdragen komen uit twee departementen: Reactormaterialenonderzoek (stralingsinvloeden op de mechanische en corrosie-eigenschappen van structuurmaterialen) en Instrumentatie (instrumentatie in stralingsomgeving voor plasmadiagnostiek en afstandbediening). In beide gebieden coördineren we het Europese onderzoek voor specifieke deelaspecten.

### *De BR2 speelt hier een belangrijke rol*

De BR2 reactor is onze belangrijkste troef. Zo zorgt fusie, jaar na jaar, voor een derde of zelfs de helft van het wetenschappelijke gebruik van de reactor. Andere kleinere maar lang niet onbelangrijke bijdragen, vangen de afvalproblematiek op (Instituut "Milieu, Gezondheid en Veiligheid"). Ook de sociologische aspecten komen aan bod.

### *Fusie en de publieke opinie*

Sinds enkele jaren besteedt EFDA, de instantie die het fusieonderzoek binnen Europa coördineert, ook aandacht aan economische en sociale aspecten van fusie als energiebron.

Eén van de onderzoeksdomeinen is "Fusie en de publieke opinie", waarin men er wil achter komen hoe de bevolking staat tegenover fusie en het onderzoek dat hiermee verband houdt.

Eén van de bijzondere aandachtspunten momenteel is de houding van de bevolking ten opzichte van de mogelijke vestiging van ITER in Cadarache. Het SCK•CEN heeft samen met IRSN (Frankrijk) en CEPE (Zwitserland) een project opgestart om te peilen naar de houding van de bevolking, de lokale overheid, de diverse verenigingen en de hulpdiensten ten opzichte van deze mogelijke vestiging in de streek. Dit gebeurde aan de hand van 'focusgroepen', dit zijn semi-geleide groepsdiscussies. Tijdens deze discussies werd aandacht besteed aan:

- de impact op de regio (bv. wegeninfrastructuur, grondprijis);
- de perceptie van de risico's (veiligheid, maar ook financieel);
- het experimentele karakter van de installatie (en het onderscheid tussen fusie en fissie);
- de internationale dimensie van het project (zowel in beheer als qua vestiging van medewerkers);
- de rol van de diverse actoren (wetenschappers, politici, ...) en
- de behoefte aan informatie en communicatie. Dit kreeg zeer veel aandacht in de diverse groepen.

### *Externe kosten van fusie*

Tot slot buigt SCK•CEN's PISA-groep (een groep die sociale aspecten in het nucleair onderzoek bestudeert) zich over de "externe" kosten van fusie.

### *Waar draait het om?*

In het SERF-project (Socio-Economic Research on Fusion) wordt onderzocht of fusiereactoren qua gezondheids- en milieu-impact ook de vergelijking kunnen doorstaan met mogelijke concurrenten in een verre toekomst. Voor deze vergelijking baseerde men zich op de methode van de 'externe kosten'-berekening.

Alle relevante impacts, bv. uitstoot van broeikasgassen, luchtvervuiling, mogelijke ongevallen, enz. worden systematisch in kaart gebracht over de gehele levenscyclus, te beginnen met de ontginning van de nodige grondstoffen (de 'wieg', bv. uranium, steenkool, olie of gas), tot aan de finale afvalstoffen (het 'graf', bv. ontmanteling van centrales, radioactief afval, enz.). Vervolgens probeert men aan deze impacts een economisch prijskaartje te hangen, uitgedrukt in mEuro (één tiende van een Eurocent) per kilowattuur geproduceerde electriciteit. De impacts van verschillende technologieën kunnen zo heel gemakkelijk voorgesteld worden (zie tabel).

### *Bijdrage van de PISA-groep*

Leden van de PISA-groep waren betrokken bij een methodologische reflectie over deze benadering. Er zitten namelijk een aantal addertjes onder het gras. Men kan bijvoorbeeld wel enkele bedenkingen formuleren bij het gebruik van de methode voor impacts op een heel lange termijn. Ook is het bijzonder moeilijk de visuele impact van een windmolen te vergelijken met het risico op een kernongeval (hoe vergelijk je appels met peren?). Hoewel dergelijke economische methodes ons wel kunnen helpen om tot een betere beeldvorming te komen over toekomstige energiekeuzes, moet er toch omzichtig worden omgesprongen met de resultaten.

Technologie	Externe kosten (mEuro/kWu)
IGCC	4.97 (1.96-14.77)
PFBC	9.35 (3.05-32.22)
NGCC	2.73 (1.00-8.72)
IGCC met CO <sub>2</sub> opslag	3.90 (1.25-13.47)
PFBC met CO <sub>2</sub> opslag	6.51 (1.99-23.23)
NGCC met CO <sub>2</sub> opslag	2.01 (0.60-7.37)
Gasificatie van biomassa	4.24 (1.14-16.30)
Brandstofcel PAFC	5.31(1.71-18.60)
Brandstofcel MCFC	3.58 (1.18-12.40)
Geothermische energie	1.33 (0.14-3.98)
PV met batterijen	2.03 (0.54-8.06)
PV zonder batterijen	0.72 (0.18-3.00)
Windenergie	0.43 (0.12-1.53)
Fusie	0.63 (0.21-4.29)

### Verklaring:

In deze tabel worden de externe kosten samengevat voor verschillende technologieën. Het eerste getal geeft een gemiddelde schatting, de getallen tussen haakjes geven de schatting van onzekerheid weer. Kosten van de uitstoot van broeikasgassen werden niet verrekend.

*IGCC, PFBC*: geavanceerde steenkoolcentrales

*NGCC*: een geavanceerde gascentrale

*Gasificatie van biomassa*: een geavanceerde gascentrale op basis van biomassa

*Geothermische energie*: energie op basis van aardwarmte

*PV*: fotovoltaïsche energie (zonnecellen)

*PAFC, MCFC*: brandstofcellen

*Fusie*: verschillende types fusiereactoren

## 5. Besluit

Feit is dat onderzoekers, actief in het beheersen van kernfusie, al meerdere decennia een uitzicht op een zonnige toekomst beloven. Hoewel die toekomstperspectieven nog geen werkelijkheid werden, blijft het geloof in de technologie, zeker gesteund door de enorme brandstofvoorraad, voortbestaan. Het SCK•CEN moet de vereiste ontwikkelingen blijven beschouwen als een opportuniteit om zinvol onderzoek te doen.

### Interessante websites:

<http://www.iter.org/>

<http://fusedweb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>

<http://www-drfc.cea.fr/>

### Contact

Anne Verledens

Informatie-uitwisseling en media contacten

[anne.verledens@sckcen.be](mailto:anne.verledens@sckcen.be)

[www.sckcen.be](http://www.sckcen.be)