

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.

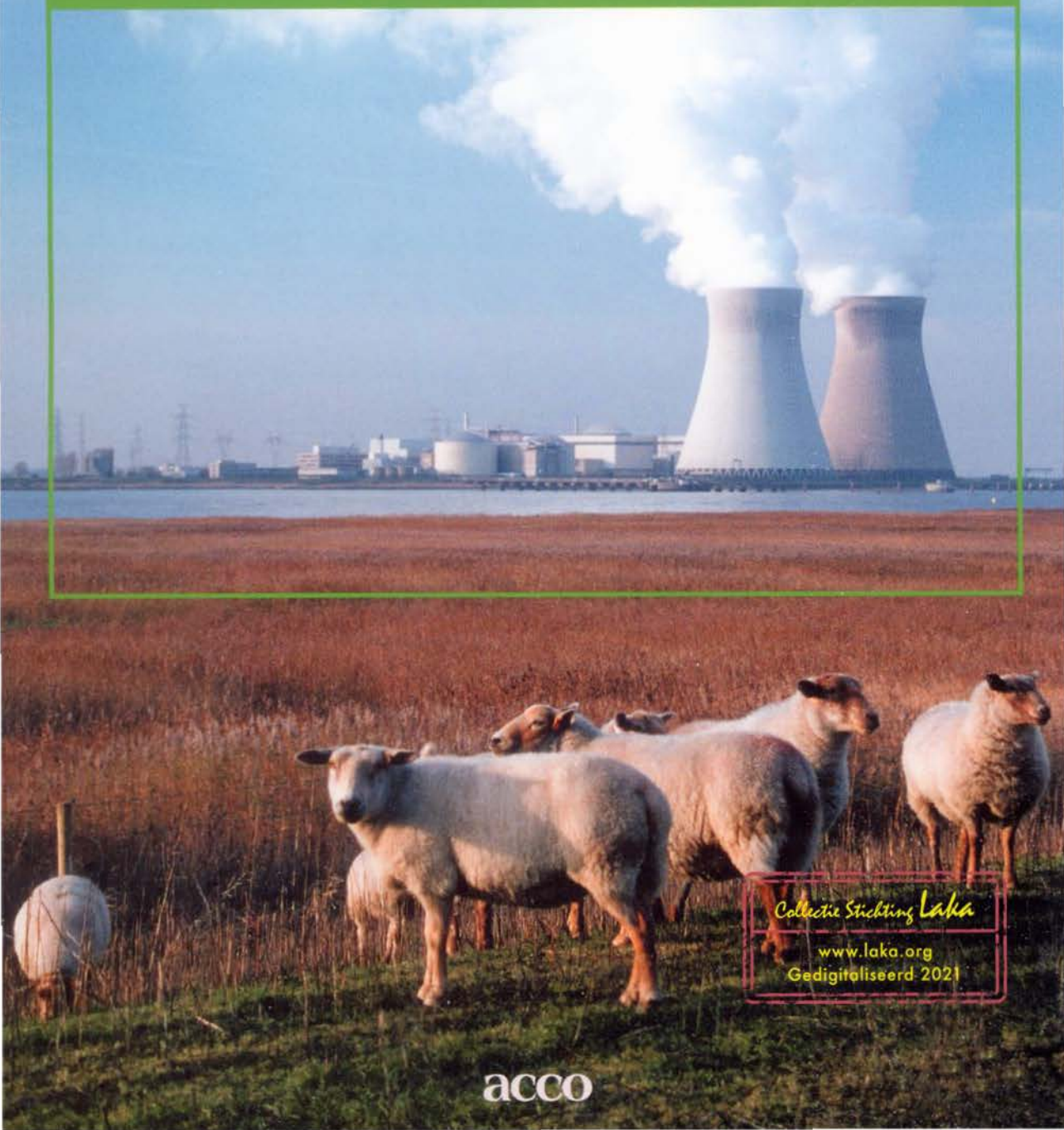


www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

De energiebronnen en kernenergie

Vergelijkende analyse en ethische reflecties

Christian Hoenraet (red.)



Collectie Stichting Laka

www.laka.org
Gedigitaliseerd 2021

acco

DE ENERGIEBRONNEN EN KERNENERGIE
VERGELIJKENDE ANALYSE EN ETHISCHE REFLECTIES

Christian Hoenraet (red.)

De energiebronnen en kernenergie

Vergelijkende analyse en ethische reflecties

Acco Leuven / Amersfoort

Eerste druk: 1999

Gepubliceerd door Uitgeverij Acco, Tiensestraat 134-136, 3000 Leuven (België)

Voor Nederland:

- *Uitlevering*: Centraal Boekhuis bv, Culemborg
- *Correspondentie*: Hamersveldseweg 86, 3833 GT Leusden

Omslagontwerp: Danny Juchtmans

© 1999 by Acco (Academische Coöperatief c.v.), Leuven (België)

Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, by mimeograph, film or any other means without permission in writing from the publisher.

| Inhoud

Lijst van figuren en tabellen	9
Woord vooraf	13
Ten geleide	15
Synopsis	17
Inleiding	25
Hoofdstuk 1. Ethische grondbeginselen	27
1.1 Waarom een ethische reflectie?	27
1.2 Grondprincipes van een christelijke ethiek	28
1.2.1 De universele bestemming van de aardse goederen	28
1.2.2 Verantwoordelijkheid en medezeggenschap	29
1.2.3 De waarde van het menselijk leven en het milieu	29
1.3 Is ethiek hier terzake?	30
1.3.1 Bezig zijn met ethiek mondt uit in een gewetensonderzoek	30
1.3.2 Onze verantwoordelijkheid nu voor een verre toekomst	31
1.3.3 Objectiviteit versus intuïtieve oordelen	31
1.3.4 Hoe met risico's en onzekerheden omgaan?	31
1.4 Wat met een ethische reflectie over het gebruik van kernenergie?	32

Hoofdstuk 2. 	Vergelijkende analyse van de energiebronnen	35
2.1	De energiesituatie	35
2.1.1	De energievoorziening op wereldvlak	36
2.1.1.1	Consumptie	36
2.1.1.2	Reserves	41
2.1.2	De fossiele brandstoffen	45
2.1.2.1	Kolen	45
2.1.2.2	Aardolie	45
2.1.2.3	Aardgas	47
2.1.3	Uranium	49
2.1.4	De kernfusie-energie	52
2.1.5	De hernieuwbare energiebronnen	53
2.1.5.1	De eolische of windenergie	54
2.1.5.2	De zonne-energie	54
2.1.5.3	De hydraulische energie	56
2.1.5.4	De geothermische energie	57
2.1.5.5	Mogelijke hinderpalen bij het gebruik van hernieuwbare energiebronnen	58
2.1.6	De vraag naar energie in de toekomst: prognoses	58
2.1.7	Evaluatie	60
2.2	Energie en milieu: de milieueffecten	67
2.2.1	Het broeikaseffect	67
2.2.2	De emissies van SO ₂ en NO _x	72
2.2.3	Andere pollutanten	73
2.2.4	De specifieke impact van kernenergie	73
2.2.4.1	Radioactiviteit en straling	73
2.2.4.2	Radioactieve lozingen	76
2.2.4.3	Radioactief afval	78
2.2.5	Samengevat overzicht van de energiebronnen	84
2.2.6	Evaluatie	84
Hoofdstuk 3. 	De elektriciteitsvoorziening in België	87
3.1	De elektriciteitsproductie	87
3.2	De productiemiddelen	88
3.2.1	Klassieke thermische centrales	88
3.2.2	Stoom- en gascentrales (STEG)	89
3.2.3	Warmtekrachteenheden	89
3.2.4	Turbojets	89
3.2.5	Waterkrachtcentrales	89
3.2.6	Centrales op basis van hernieuwbare energiebronnen	90
3.2.7	Kerncentrales	90
3.2.7.1	Werking van een kerncentrale	90

3.2.7.2	De Belgische splijstofcyclus	93
3.2.7.3	Uraniumbevoorrading	94
3.2.7.4	Opwerking, recyclage van splijststoffen en afvalproductie	97
3.2.7.5	Voordeel van het gebruik van kernenergie	100
3.3	De productie en het milieu	100
3.3.1	Emissies van CO ₂	100
3.3.2	De verzurende emissies	101
3.3.3	Andere polluenten	101
3.3.4	Nucleaire impacten	101
3.3.5	Milieuprestaties van de Belgische elektriciteitscentrales in 1997	101
3.4	Economische aspecten	102

Hoofdstuk 4. | Kernenergie 105

4.1	De veiligheid van nucleaire installaties	105
4.1.1	Herhaling van enkele basisbegrippen	105
4.1.2	De veiligheid van kerncentrales van het PWR-type	109
4.1.3	Welke defecten kunnen in een kerncentrale voorkomen?	112
4.2	De nucleaire ongevallen in de wereld	115
4.2.1	Beschrijving van de nucleaire ongevallen	115
4.2.1.1	De internationale nucleaire evenementenschaal – INES	115
4.2.1.2	Windscale	115
4.2.1.3	Three Mile Island	116
4.2.1.4	Tsjernobyl	117
4.2.2	Is een Tsjernobylongeval mogelijk in onze streken?	120
4.2.3	Evaluatie	122
4.3	De nucleaire transporten	125
4.3.1	De reglementering	126
4.3.1.1	Belgische reglementering	126
4.3.1.2	Internationale reglementen	126
4.3.2	Colli gebruikt voor bestraalde splijststof, verglaasd afval, MOX-splijststof en plutonium	127
4.4	Het radioactief afval	130
4.4.1	De soorten radioactief afval	130
4.4.2	Vormt het radioactief afval een bedreiging voor mens en milieu?	131
4.4.3	De definitieve berging in diepe geologische lagen	133
4.4.3.1	Algemene beginselen van de berging	135
4.4.3.2	Beschrijving van de geologische berging	136
4.4.4	Welke hoeveelheden afval worden er in België geproduceerd?	137
4.5	Non-proliferatie	138
4.5.1	Het non-proliferatieverdrag	138
4.5.2	Het nucleaire wapen	139
4.5.3	Evaluatie	140
4.6	Stralingseffecten	141

Besluit	145
Bijlagen	151
Bijlage 1: Gebruikte eenheden en conversiefactoren	151
Bijlage 2: Geografische definities	154
Bijlage 3: Gebruikte afkortingen	155
Bijlage 4: Geraadpleegde bronnen	156
Bijlage 5: Principe van de opwerking	158
Bijlage 6: Technische gegevens van een reactor	161
Bijlage 7: Technische gegevens van een TN12/2-transportverpakking voor bestraalde splijtstof	163
Bijlage 8: De intervenanten in de splijtstofcyclus	166
Bijlage 9: De toxiciteit van plutonium	168

| Lijst van figuren en tabellen

Figuur 1.	Primaire energieconsumptie (Gtoe) – geografische spreiding.	37
Figuur 2.	Primaire energieconsumptie per capita (toe) – geografische spreiding.	37
Figuur 3.	Primaire energieconsumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding.	38
Figuur 4.	Primaire energieconsumptie (Gtoe, %) – energiemix.	38
Figuur 5.	Elektriciteitsconsumptie op wereldvlak (TWh, %) – energiemix.	39
Figuur 6.	Bruto nationaal product.	39
Figuur 7.	Energie-intensiteit.	40
Figuur 8.	Brandstoffen en uranium: reserves (Gtoe) – basis 1995.	40
Figuur 9.	Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves (Gtoe).	42
Figuur 10.	Aangetoonde reserves (Gtoe) – basis 1995 – geografische spreiding.	42
Figuur 11.	Productie en consumptie van brandstoffen en uranium (Gtoe).	43
Figuur 12.	Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves en productie (Gtoe, %) – geografische spreiding.	43
Figuur 13.	Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves en productie (Gtoe, %) – brandstofmix.	44
Figuur 14.	Brandstoffen en uranium: levensduur van de aangetoonde reserves.	44
Figuur 15.	Kolen – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.	47
Figuur 16.	Aardolie – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.	48
Figuur 17.	Aardgas – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.	48
Figuur 18.	Uranium – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.	49
Figuur 19.	Kernreacties.	50
Figuur 20.	Evolutie van de wereldbevolking – scenario's.	62
Figuur 21.	Geografische demografische evolutie van de wereldbevolking – scenario Wereldbank-Median.	62
Figuur 22.	Bruto nationaal product – prognoses.	63
Figuur 23.	Energie-intensiteit per regio – prognoses.	63

Figuur 24.	Primaire energieconsumptie per regio (Gtoe) – prognoses.	64
Figuur 25.	Primaire energieconsumptie per capita (toe) – prognoses.	64
Figuur 26.	Gecumuleerde primaire energieconsumptie per energiebron (Gtoe) – prognoses (1995-2100).	65
Figuur 27.	Primaire energieconsumptie op wereldvlak (Gtoe, %) – energiemix – prognoses.	65
Figuur 28.	Primaire energieconsumptie per regio (Gtoe, %) – geografische spreiding – prognoses.	66
Figuur 29.	Elektriciteitsconsumptie op wereldvlak (TWh, %) – energiemix – prognoses.	66
Figuur 30.	Het broeikaseffect.	68
Figuur 31.	Schematische voorstelling van de milieuverzuring.	72
Figuur 32.	Soorten straling.	74
Figuur 33.	Bronnen van radioactiviteit.	76
Figuur 34.	Het Pantheon in Rome.	80
Figuur 35.	Doorsnede van een oppervlaktebergingsinstallatie.	80
Figuur 36.	Centre de Stockage de l'Aube – luchtfoto.	81
Figuur 37.	Site van El Cabril – luchtfoto.	82
Figuur 38.	Werkingsprincipe van een klassieke thermische centrale.	88
Figuur 39.	Werkingsprincipe van een kerncentrale.	91
Figuur 40.	Netto-elektriciteitsproductie in 1997 opgesplitst per energiebron (%) (totale productie 75.079 GWh).	91
Figuur 41.	Evolutie van de netto-elektriciteitsproductie tijdens de periode 1972-1997 (GWh), opgesplitst per energiebron.	92
Figuur 42.	Principeschema van een PWR-centrale – België – detail.	92
Figuur 43.	Kerncentrale van Doel met een vermogen van 2.776 MWe.	93
Figuur 44.	De Belgische splijtstofcyclus.	94
Figuur 45.	Uraniumproducenten en verrijkingsfabrieken.	95
Figuur 46.	Uraniumbevoorrading 1985-1995.	95
Figuur 47.	Verrijkingsdiensten 1985-1995.	96
Figuur 48.	Jaarlijkse hoeveelheden uranium in Belgische centrales.	96
Figuur 49.	Gebruik van MOX-elementen.	99
Figuur 50.	Milieuprestaties van de Belgische elektriciteitscentrales in 1997.	102
Figuur 51.	Klassieke thermische centrale.	105
Figuur 52.	Principewerking van een PWR (1).	106
Figuur 53.	Principewerking van een PWR (2).	107
Figuur 54.	Splijtstofelement.	108
Figuur 55.	Werking van een koeltoren.	109
Figuur 56.	Schematische voorstelling van de verschillende barrières.	110
Figuur 57.	Reactorkuip en inwendige structuren.	110
Figuur 58.	Kerncentrale van Tihange met een vermogen van 2.937 MWe.	112
Figuur 59.	Veiligheidskoelkringen van een reactor van het PWR-type.	113
Figuur 60.	Reactorkern.	114
Figuur 61.	INES-schaal.	116
Figuur 62.	Reactor van het RBMK-type – principeschema.	119
Figuur 63.	Kern van een RBMK 1.000 (horizontale doorsnede).	120

Figuur 64.	Belangrijkste tests uitgevoerd op type-B-colli.	128
Figuur 65.	Valtest (9 m) van een TN12/2.	128
Figuur 66.	Weg- en spoortransport van een collo TN12/2.	129
Figuur 67.	Behandeling van hoogradioactief afval.	135
Figuur 68.	Schema van een geologische berging.	136
Figuur 69.	Berging van kernafval – hoeveelheden met het huidige nucleaire programma (veertig jaar).	137
Figuur 70.	Vergelijking atoombom en kernreactor.	139
Figuur 71.	Jaarlijkse dosislimiet.	141
Figuur 72.	Principeschema van de opwerking.	158
Figuur 73.	Opwerkingsfabriek van Cogema te La Hague – luchtfoto.	159
Figuur 74.	La Hague – opslag bestraalde splijtstofelementen.	160
Figuur 75.	Model van de TN12/2-verpakking.	163
Figuur 76.	Schema van de TN12/2-verpakking.	164
Figuur 77.	Transport van een collo TN12/2.	165
Figuur 78.	De splijtstofcyclus: intervenanten en verantwoordelijkheidsverdeling.	166

Tabel 1.	Beschrijving van het werkmodel.	59
Tabel 2.	Procentuele primaire energieconsumptiemix.	59
Tabel 3.	Jaar van uitputting van de aangetoonde en basisreserves.	60
Tabel 4.	Gemiddelde CO ₂ -emissies.	70
Tabel 5.	CO ₂ -emissies per geproduceerde kWh (levenscyclus).	71
Tabel 6.	Verzurende emissies per geproduceerde kWh (levenscyclus).	73
Tabel 7.	Biologische wegingsfactoren van de stralingen.	75
Tabel 8.	Vloeibare radioactieve lozingen van de Belgische kerncentrales (% van de jaarlimiet).	77
Tabel 9.	Gasvormige radioactieve lozingen van de Belgische kerncentrales (% van de jaarlimiet).	77
Tabel 10.	Overzicht van de afvalproductie in België.	83
Tabel 11.	Samengevat overzicht van de energiebronnen.	84
Tabel 12.	Ontwikkelbaar nettovermogen per productietype.	87
Tabel 13.	Opwerkingscontracten van België.	97
Tabel 14.	Elektrische productiekosten.	103
Tabel 15.	Procentuele verdeling van de productiekosten.	103
Tabel 16.	Externe kosten.	104
Tabel 17.	Vermoedelijke gezondheidseffecten op lange termijn.	118
Tabel 18.	Fundamentele verschillen tussen een RBMK en een PWR.	121
Tabel 19.	Werkgelegenheid in de Belgische nucleaire sector in 1997.	124
Tabel 20.	Effecten van hoge stralingsdoses.	143
Tabel 21.	Technische gegevens Doel 4.	161
Tabel 22.	Nomenclatuur van de delen van een transportverpakking.	165
Tabel 23.	Technische gegevens van een TN12/2-verpakking.	165

| Woord vooraf

De problemen in verband met het leefmilieu worden regelmatig onder de aandacht van het publiek gebracht in kranten, op radio en televisie. Het nieuws verspreidt zich snel en wordt gebracht in de vorm van 'scoops': alleen het belangrijkste wordt verteld ... met weinig woorden en zonder context. Het publiek ziet een heleboel anekdotische informatie op zich afkomen, die de indruk van een permanente catastrofe oproept. Van al deze problemen is er één dat als zeer bedreigend wordt beschouwd: het gebruik van *kernenergie en het daaruit resulterend radioactief afval*. Het probleem van het radioactief afval wordt zelfs ervaren als de zwaarste bedreiging voor de gezondheid.

Om een klaar inzicht te krijgen in de energieproblematiek en in de problematiek van het gebruik van kernenergie, om na te denken en een antwoord te geven op de opgeroepen vragen vanuit een christelijke visie, werd in het Bisdom Brugge in opdracht van de bisschop, Mgr. Roger Vangheluwe, een onafhankelijke studiegroep opgericht '*Werkgroep Ethiek en Kernenergie – W.E.K.*', met vertegenwoordigers van uiteenlopende disciplines (zowel specialisten als niet-specialisten).

De W.E.K. heeft zich ten doel gesteld alle nodige informatie te verzamelen over de bestaande energiebronnen en een vergelijkende analyse uit te voeren van hun impact op mens en milieu. De economische en sociale aspecten komen ook aan bod. De resultaten van deze studie werden onderworpen aan een ethische reflectie.

Dit boek vormt de neerslag van de debatten en uitgevoerde studies van de W.E.K. en belicht alle aspecten van de energieproblematiek en in het bijzonder kernenergie. Het boek is als volgt ingedeeld:

1. Ethische grondbeginselen.
2. Vergelijkende analyse van de energiebronnen.
3. De elektriciteitsvoorziening in België.
4. Kernenergie.

Dit boek wil een degelijke inhoudelijke bijdrage leveren over de energieproblematiek en kernenergie en biedt aan politici, leerkrachten, studenten, journalisten en al wie hierover wil reflecteren, de nodige informatie om een klaar inzicht te krijgen van de gevolgen van het gebruik van kernenergie en andere energiebronnen, en om met kennis van zaken een objectief standpunt in te nemen tijdens toekomstige debatten.

De redactie van dit boek werd verzorgd door Christian Hoenraet, bijgestaan door de leden van de werkgroep. Hij is kernfysicus, voorzitter van de werkgroep, en sedert dertig jaar werkzaam in de nucleaire sector. Vandaag is hij vooral actief op het gebied van de opwerking van bestraalde splijtstoffen en de conditionering van radioactief afval.

Tot de werkgroep behoren de volgende deskundigen, die volop in de praktijk staan: Freddy Decamps (deskundige conditionering en berging van radioactief afval), Paul De Meester (hoogleraar K.U.Leuven), Guillaume Robeyns (deskundige controle fissiele materialen), Herman Sannen (veiligheidsdeskundige transport radioactieve materialen). Verder: Christine Deforche (godsdienstwetenschappen), Reginald Huysentruyt (leraar fysica HSO, pedagogisch begeleider HSO vak fysica), Eddy Lagae (moraaltheoloog, docent aan het Groot Seminarie te Brugge), Monica Lamote (thuiswerkende echtgenote), Guido Maertens (moraalfilosof, erector van de K.U.Leuven, Campus Kortrijk), Peter Vancoillie (stafmedewerker ACW), Antoon Ver Elst (leraar fysica HSO).

De Werkgroep Ethiek en Kernenergie

| Ten geleide

Met vreugde en dankbaarheid nam ik kennis van de voorliggende studie over de energiebronnen en de kernenergie. Ze is het resultaat van een denkproces gedurende een tweetal jaren. Christenen hebben elkaar ontmoet en bevraagd: zowel experts uit de kernenergiesector als 'leken': een huismoeder, ethici, onderwijsmensen, een vrijgestelde uit een sociale organisatie. Al kwamen zij uit heel verscheidene achtergronden en was er een grote verscheidenheid in competentie, toch leefde er in de werkgroep een bereidheid tot dialoog, tot het formuleren en het opnemen van verantwoordelijkheid in functie van een toekomstgericht denken. De christelijke inspiratie die deze groep bezielt, leidt niet tot een absolute waarheid maar tot meer openheid en vertrouwen in het gezamenlijk bestuderen van problemen. Op de drempel van het derde millennium behoort deze aanpak tot de 'tekenen van de tijd' en draagt ze bij tot de kwaliteit van het menselijke samenleven.

Ik beveel deze studie graag aan. Het is een waardevolle bijdrage in het debat over het gebruik van energie. Voor mij was ze heel verhelderend. Allen die begaan zijn met het milieu en het welzijn van de aarde met haar bewoners kunnen er hun voordeel mee doen. Ze kan ongetwijfeld ook helpen om politieke en economische beslissingen te nemen met grotere kennis van zaken en dus meer gefundeerde verantwoordelijkheid.

Met mijn oprechte dank aan de leden van de werkgroep.

Mgr. R. Vangheluwe
Bisschop van Brugge

In de eerste helft van de twintigste eeuw heeft de mensheid de geheimen van de kernsplijting en de kernfusie leren begrijpen, in de tweede helft heeft ze gaandeweg geleerd de energie die daarbij vrijkomt te gebruiken, aanvankelijk uitsluitend voor militaire toepassingen, later ook voor burgerlijke toepassingen. Beide aanwendingsvormen konden in de democratische wereld rekenen op vrij ruim verspreid protest in brede lagen van de bevolking.

Wellicht zal ooit in historisch perspectief meer duidelijkheid geboden kunnen worden over de vraag hoe noodzakelijk energieproductie door middel van kernenergie voor deze relatief korte tijdspanne (geweest) is. Dergelijke afweging zal evenzeer rekening moeten houden met de huidige (on)beschikbaarheid van alternatieven die grote elektrische vermogens op industriële schaal kunnen produceren, als met de stralende nalatenschap waarover onze nakomelingen nog honderden jaren zullen moeten waken.

Dit boek zoomt in op de burgerlijke toepassing van kernenergie. Het belicht uitvoerig de wetenschappelijke en technische achtergronden van de energieproductie en illustreert dit met een overvloed aan feitelijke gegevens, figuren en cijfermateriaal. Doorheen deze feitelikheden nodigt het de lezer uit te reflecteren op de verantwoordelijkheid van de mens en confronteert hem vanuit de christelijke ethiek met de wijze waarop hij omgaat met energiebronnen, veiligheid, milieu en afval.

Wellicht zal het boek de tegenstander niet overtuigen. Daarvoor beklemtoont het te vaak de *rationale* van de genomen beslissingen, en staat het te weinig stil bij het complexe kluwen van emotie, vooroordelen en onwetendheid dat de weerstand vaak domineert. Alvast op dit laatste punt heeft het boek een ontegensprekelijke verdienste: het tracht de ingewikkelde materie toegankelijk te maken voor de geïnteresseerde leek, zodat deze zijn standpunt op gefundeerde wijze kan uitbouwen.

Jaak Palmans

*Voorzitter Vlaams Verbond van het Katholiek Secundair Onderwijs (VVKSO) –
Werkgroep Natuurwetenschappen en Ethiek*

| Synopsis

Energie! Zij heeft ongetwijfeld een enorme invloed op de maatschappij waarin wij leven. Zij bepaalt in hoge mate ons welzijn, ons comfort en onze mobiliteit. Zij bepaalt eveneens de prijs die wij hiervoor moeten betalen: de invloed van het energiegebruik op ons milieu.

Energie is een *universeel goed* dat de goddelijke voorzienigheid ten dienste van de hele mensheid heeft gesteld, ongeacht het betrokken werelddeel. Het gebruik van de energiebronnen mag niet ontkoppeld worden van de eerbied voor morele wetten. Wij moeten zorg dragen voor de kwaliteit van het leven van de medemens, ook van toekomstige generaties. Wij mogen de toekomst niet onleefbaar maken, maar wij mogen ze ook niet overdreven afremmen omwille van een beperkt aantal schadelijke gevolgen. De toekomst bevat hoe dan ook een aantal onzekerheden, die we nu niet volledig kunnen inschatten. We kunnen niet met absolute zekerheid beslissen. Bovendien kunnen negatieve effecten in de toekomst misschien weggewerkt worden dankzij nieuwe technologieën of zuiniger energiegebruik.

Bij de productie van energie mogen er *geen onverantwoorde risico's* genomen worden voor mens en milieu. Risico's moeten zo laag als redelijkerwijze mogelijk worden gehouden (*ALARA-principe*: As Low As Reasonably Achievable), nu en in de toekomst. Risico's die voor ons vandaag onaanvaardbaar zijn, mogen we niet overdragen naar de toekomst, dat wil zeggen dat men dezelfde risiconormen moet hanteren voor zowel de toekomstige als de huidige generaties. Respect voor het menselijk leven en het milieu is een hoofdvereiste verbonden aan iedere menselijke activiteit.

Energieproductie benut *grondstoffen* en deze zijn *niet onuitputtelijk*. Op basis van de aangetoonde reserves¹ en de energieconsumptie van 1995 zijn er voor ongeveer een eeuw energiereserves van verschillende aard gekend. Deze vaststelling schetst een nogal somber beeld voor de toekomst. De uraniumvoorraden zijn ook beperkt, maar afhankelijk van de gebruiksopties kunnen de splijtstofvoorraden op een significante wijze uitgebreid worden (zelfs met een factor 50 à 60 bij gebruik van kweekreactoren). De thoriumreserves zijn even omvangrijk als deze van uranium en dienen ook in aanmerking te komen. De splijtstoffen, met inbegrip van thorium, kunnen in de toekomst een belangrijke rol spelen bij de elektriciteitsproductie.

1. Aangetoonde reserves: ze omvatten de geïdentificeerde lagen die technisch en op een economisch verantwoorde manier ontginbaar zijn met de huidige technologie.

Wij moeten *beheerst omspringen met energie en grondstoffen*. Het is onze plicht ervoor te zorgen dat de toekomstige generaties beschikken over voldoende grondstoffen en technologieën om aan de energievraag te voldoen. Deze generatie moet de huidige energieproblemen oplossen en het nodige onderzoek verrichten en investeringen doen om problemen niet af te wentelen op de toekomstige generaties. Zonder verwijl moeten we energie rationeel gebruiken: het is de *ethische plicht van onze generatie*. Want energieschaarste betekent economische teruggang en armoede.

Rationeel energiegebruik betekent zuinig en efficiënt omspringen met energie en systematisch zoeken naar de optimale benutting ervan. *Zuinig* of spaarzaam omspringen met energie betekent niet dat we aan levenskwaliteit moeten inleveren. Het gaat hier hoofdzakelijk om een oordeelkundige aanwending van energie. *Efficiënt* betekent dat we méér moeten halen uit de gebruikte energiebron, maar ook dat we, rekening houdend met de geografische mogelijkheden en de lokale omstandigheden, de energievorm aanspreken die het best geschikt is voor een bepaalde toepassing.

Energie rationeel gebruiken: het is ieders verantwoordelijkheid, het is een primaire doelstelling voor nu en later.

Een van de energiedragers die onze manier van leven bepalen, is *elektriciteit*. Wij onder vinden pas echt wat ze betekent wanneer ze er toevallig niet is, bij pannes bijvoorbeeld. Met de volgende drie primaire energiebronnen wordt elektriciteit tot op heden geproduceerd:

- fossiele brandstoffen, zoals kolen, aardolie en aardgas;
- minerale stoffen die gebruikmaken van de kernsplijting² in zware metalen, zoals uranium en thorium;
- hernieuwbare energieën zoals onder meer wind, water en zon.

De fossiele brandstoffen zijn nog steeds koploper in de totale energiebevoorrading van de wereld.

De volgende vragen komen aan bod:

- In welke mate is de beschikking over energie bepalend voor welvaart?
- Kunnen wij ons het grote onevenwicht veroorloven in het gebruik van energie tussen de ontwikkelde landen en de derde wereld?
- Hoe kunnen wij tot een objectieve discussie komen over de echte en vermeende effecten van de verschillende energievectoren op het leefmilieu van de mens?
- Is het verantwoord de beperkte fossiele brandstoffen in een belangrijke mate verder te gebruiken voor energieproductie? Kolen, aardgas en aardolie zijn eerst en vooral grondstoffen voor de chemie en farmacie, voor bepaalde geneeskundige toepassingen, voor voedsel, enzovoort.

Het is niet de bedoeling op de vier vragen afzonderlijk in te gaan. Ze zijn immers met elkaar verbonden.

2. Energie kan ook opgewekt worden door *kernfusie*. Wanneer men erin zou slagen een gecontroleerde fusie voort te brengen tussen deuteriumkernen, dan zou men beschikken over een virtueel onuitputtelijke energiebron. De fusie van deuterium vervat in 1 liter water kan een hoeveelheid energie produceren die overeenkomt met 300 liter aardolie. Vandaag weten wij echter nog niet met zekerheid of kernfusie in een nabije toekomst commercieel bruikbaar zal zijn.

Op wereldvlak wordt jaarlijks tot 8 miljard toe³ verbruikt, waarvan 87% fossiele brandstoffen, 6% kernenergie en 7% hydraulische en hernieuwbare energiebronnen. Het elektriciteitsaandeel in dat geheel bedraagt 36% en verdeelt zich als volgt: 10% aardolie, 16% aardgas, 38% kolen, 17% kernenergie en 19% hydraulische en hernieuwbare energiebronnen.

De geografische spreiding van het verbruik laat ons toe het energieprobleem zeer scherp te stellen. Noord-Amerika en Europa nemen meer dan 50% van dit verbruik voor hun rekening. Daartegenover staat bijvoorbeeld de schamele 3% van Afrika met een sterk toenemende bevolking. Vergelijken we even de huidige primaire energieconsumptie per capita: Noord-Amerika: 8,1 toe/capita; Europa: 3,1 toe/capita; Afrika: 0,45 toe/capita; China: 0,72 toe/capita. Ook China, met een bevolking van 1,2 miljard en dat in volle industriële ontwikkeling is, heeft nog een grote achterstand in te halen.

Vinden we een dergelijke situatie normaal? Moeten we er iets aan doen en, zo ja, wat? Waartoe zijn wij bereid of welke creatieve oplossingen komen er?

In de hypothese van een doorgedreven rationeel energiegebruik kan men aannemen dat hoogstens één derde van ons huidige gebruik vermeden kan worden. Dan nog blijft er een factor tien bestaan in de verhouding tussen het energiegebruik van Noord-Amerika + Europa enerzijds en de derdewereldlanden anderzijds.

Het is duidelijk dat het verschil in energiegebruik tussen de betrokken continenten gepaard gaat met een welvaartsverschil. Maar men moet oog hebben voor de zeer grote culturele verschillen tussen de continenten. Misschien willen deze bevolkingen niet leven zoals wij. Het is hun goed recht daarover zelf te beslissen. Het is echter onze plicht hen in de gelegenheid te stellen gebruik te maken van onze verworvenheden op gebied van hygiëne, gezondheid, veiligheid en leefcomfort, essentiële voorwaarden om welvaart en welzijn te bereiken.

Bovendien zal de bevolkingsaan groei in de komende honderd jaar bijna uitsluitend gerealiseerd worden in deze reeds achtergestelde continenten; het gaat hier over een mogelijke verdubbeling van de huidige zes miljard mensen op deze wereld.

Rekening houdend met deze factoren kan, in vergelijking met vandaag, in de komende honderd jaar de energievraag toenemen met 300%. Kan onze planeet dit aan?

Laat ons nu eens de *leefmilieueffecten* analyseren die gepaard gaan met die energietoename. Bij de energieproductie op grote schaal komen er stoffen in gasvormige, vloeibare of vaste vorm in het leefmilieu terecht, die een voor de mens negatieve invloed kunnen uitoefenen. De verbranding van fossiele brandstoffen belast voornamelijk de lucht, een belangrijke levensfactor van de mens. CO₂, NO_x, SO₂, vliegias en stof zijn bestanddelen met ieder een specifiek negatief effect. CO₂ wordt in verband gebracht met de klimaatwijziging ten gevolge van het broeikas effect. De gassen NO_x en SO₂, vliegias en stof kunnen kanker en chronische longziekten verwekken. Deze gassen zijn verantwoordelijk voor de zure regen; dit heeft een sterke negatieve invloed op het bossenbestand en verstoort het evenwicht in de CO₂-huishouding.

3. toe (ton olie-equivalent): gewicht aan brandstof met een totale warmte-inhoud van 41,86 GJ, wat overeenkomt met 1 ton aardolie. Er werd internationaal afgesproken om als conversiefactor 42 GJ te gebruiken. De eenheid toe laat ons toe de energiebronnen onderling met elkaar te vergelijken.

De verbranding van fossiele brandstoffen brengt jaarlijks ongeveer 27 miljard ton CO₂ in de atmosfeer, waarvan de elektriciteitsproductie een goede 30% voor haar rekening neemt. De bijdrage van kernenergie in de wereldelectriciteitsproductie bedraagt 17%. Hierdoor wordt de emissie van ongeveer 2 miljard ton CO₂ vermeden. Tussen 1990 en 1995 nam de jaarlijkse CO₂-uitstoot toe met ongeveer 12%. Alle metingen die tot op heden werden uitgevoerd, wijzen op een sterk toenemende concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer.

Op 20.000 jaar tijd, overeenkomend met de periode van het laatste ijstijdperkmaximum tot 1765, is de concentratie van koolzuurgas natuurlijkerwijs toegenomen van 200 tot 279 ppmv,⁴ een stijging van slechts 79 ppmv. Van 1765 tot nu was er een toename van 279 ppmv tot circa 364 ppmv. In deze geologisch korte tijdspanne, 230 jaar, steeg de CO₂-concentratie met 85 ppmv. Gemiddeld steeg tussen 1765 en 1960 het CO₂-gehalte met 0,2 ppmv per jaar, tussen 1960 en 1995 met 1,3 ppmv per jaar.

Menselijke activiteiten werken in op het milieu met een snelheid die negentig à honderd keer hoger ligt dan die van de natuur. De versnelde toename van de koolzuurconcentratie is verontrustend. De snelheid waarmee het milieu wordt aangetast door de mens, evenals de grootte van de verstoring, rechtvaardigen de vrees voor een onomkeerbare klimaatverandering. Wanneer het huidige ritme wordt aangehouden, zal de CO₂-concentratie in het jaar 2050 oplopen tot meer dan 500 ppmv en op het einde van de éénnentwintigste eeuw tot meer dan 900 ppmv.

De versnelde toename van de koolzuurconcentratie is een probleem dat prioritair en op wereldvlak moet worden opgelost. Volgens het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), een organisatie opgericht in 1988 door de World Meteorological Organisation en de Verenigde Naties, zal aan het huidige ritme van CO₂-uitstoot de temperatuur tijdens de komende honderd jaar stijgen met 1 tot 3,5°C. Een van de belangrijkste gevolgen van de opwarming is de verwachte stijging van het zeewaterniveau door het afsmelten van de ijsformaties (gletsjers, noordpool) en door de uitzetting van de watermassa's in de oceanen. Het niveau van de zeeën zou gevoelig kunnen stijgen, met alle gevolgen van dien voor het leefmilieu van de mens. Een hoger zeewaterpeil bedreigt vooral de dichtbevolkte deltagebieden (Noord-West-Europa en Zuid-Oost-Azië). Andere gevolgen zijn nog moeilijker te voorzien. Er worden voor de meeste gebieden op aarde verschuivingen verwacht in regenval-, wind- en warmtepatronen.

De productie van elektriciteit met kernenergie veroorzaakt geen zure regen en draagt niet bij tot het broeikaseffect. Onder normale omstandigheden resulteert het in kleine emissies van radioactieve stoffen in het milieu en zeer geringe stralingsdoses voor de bevolking. De stralingsdosis die ieder van ons jaarlijks uit natuurlijke bronnen ontvangt, wordt door de elektronucleaire productie slechts verhoogd met één of twee duizendste eenheid. Kunnen wij nog lang de ogen sluiten voor het waarschijnlijk reëel risico van klimaatverandering ten gevolge van de uitstoten veroorzaakt door de verbranding van fossiele brandstoffen? Waarom zouden wij dat risico banaliseren en tegelijkertijd het risico van het effect van lage stralingsdoses als gevolg van de toepassing van kernenergie diaboliseren? Bovendien is het effect van lage stralingsdoses op de gezondheid nog niet gekend. Ook de invloeden van de andere productiemiddelen moeten verder worden onderzocht.

4. ppmv = parts per million in volume (= één op één miljoen).

Een besparing op energie kan ook leiden tot slachtoffers, bijvoorbeeld een besparing op de nachtverlichting van onze snelwegen kan meer verkeersongevallen tot gevolg hebben.

De productie van elektriciteit met kernenergie gaat gepaard met de productie van radioactief afval, maar in relatief kleine hoeveelheden. Met de huidige technologieën is het mogelijk de geproduceerde hoeveelheden radioactief afval veilig op te slaan en te bergen, zonder risico's van contact met mens en milieu. In de loop van de tijd verdwijnt de radioactiviteit door het natuurlijk verval. Een groot deel van het afval verliest trouwens op relatief korte termijn zijn radioactiviteit.

Het probleem dat de radioactieve afvalstoffen stellen, is technisch gezien niet groter dan de problemen met het industrieel en huishoudelijk afval. Het radioactief afval mag gerust de vergelijking doorstaan met de chemische en minerale toxiciteiten, zoals bijvoorbeeld zware metalen die in de natuur worden gedumpt. *Het echte probleem is er voornamelijk een van psychologische en politieke aard, van publieke aanvaarding van de berging van het radioactief afval.*

Voor België, dat een grote verbruiker van kernenergie is (60% van de totale elektriciteitsproductie), geeft de jaarlijkse elektronucleaire productie per inwoner aanleiding tot slechts één bierblikje laagactief afval en één vingerhoed hoogactief afval. Weegt het beheer van deze beperkte hoeveelheid afvalstoffen voldoende zwaar door om kernenergie op te geven? Volgens ons niet. Ook voor andere energiebronnen is men nog op zoek naar veiliger methoden voor bewaring en beheer. Voor kernafval zijn de risico's eerder gering omwille van de strenge veiligheidsmaatregelen.

De stelling dat een technologie niet ontwikkeld mag worden zolang niet al haar effecten op het milieu gekend én opgelost zijn, is niet redelijk. Alle industriële activiteiten produceren afvalstoffen, waarvan het beheer op lange termijn niet op voorhand vastligt.

In vergelijking met andere industriële activiteiten en rekening houdend met het massief gebruik van kernenergie (einde 1997: 437 kernreactoren in dienst die 17% van de wereld-elektriciteit produceren), kan men zeggen dat de veiligheidsbalans zeer positief is.

In de westerse landen komt de kernindustrie op de eerste plaats wat de veiligheid betreft. In geen enkele andere industrie worden de risico's zo goed beheerst. Bovendien bestaat er in deze landen een ware 'veiligheidscultuur'. De prioritaire bekommernis om de veiligheid is alomane aanwezig. Risico nul bestaat echter niet en incidenten en ongevallen blijven ook in zo'n veiligheidscultuur mogelijk. Maar die veiligheidscultuur zorgt ervoor dat de gevolgen van incidenten of ongevallen zoveel mogelijk beperkt worden.

Ter gelegenheid van de 25ste verjaardag van de Zwitserse kerncentrale van Beznau (1994) verwoordde Kardinaal Henry Schwery, aartsbisschop van Sion, het als volgt:

*"Je ne connais aucune autre activité humaine, des domaines domestique, industriel, des transports, des loisirs et des sports, où les risques ont été calculés aussi sévèrement et où les mesures de sécurité ont été prises avec autant de garanties. Il faut souhaiter que l'on persévère dans cette voie."*⁵

5. Ik ken geen enkele andere menselijke activiteit op het vlak van huishouden, industrie, transport, ontspanning en sport waar de risico's zo streng werden berekend en de veiligheidsmaatregelen met zoveel waarborgen werden getroffen. Laten we hopen dat men resoluut deze weg blijft volgen.

De heer Georges Charpak, Nobelprijswinnaar in 1992 voor fysica, drukt zich in dezelfde termen uit: de kernindustrie is inzake veiligheid superieur. De zeldzame lichamelijke ongevallen die zich in de kernindustrie hebben voorgedaan, hadden niets te maken met het nucleaire karakter van de installatie. De elektronucleaire productie heeft tijdens haar 45 productie jaren in alle landen ter wereld, met uitzondering van de Sovjet-Unie (Tsjernobyl – 1986), tot nu toe nog geen enkel slachtoffer gemaakt. De catastrofe van Tsjernobyl vond plaats in een land dat volgens Charpak “zijn institutionele en veiligheidsstructuren niet meer onder controle had”.

De ongevallenbalans met dodelijke afloop van andere technologische, energetische en scheikundige activiteiten is veel ernstiger.

Het gebruik van kernenergie is ook *vanuit een economisch standpunt verantwoord*. De kerneenheden bieden een stabiele en relatief lage kWh-prijs. De reden is dat de splijtstof slechts voor een gering deel, minder dan 25%, bijdraagt tot de kostprijs van het kWh. Daarenboven dekt de kWh-prijs alle kosten, inclusief de ontmanteling van de installaties, het beheer en de veilige berging van de afvalstoffen.

Om redenen die niet worden toegepast op andere industriële activiteiten wordt kernenergie eenzijdig bekeken, gewogen en te licht bevonden. *Is de veroordeling van kernenergie ethisch verantwoord naar de toekomstige generaties toe?*

De verbranding van fossiele brandstoffen is een verspilling. Steenkool, aardolie en vooral aardgas zijn eerst en vooral grondstoffen voor voedsel, vezelproducten, geneesmiddelen, enzovoort. De toekomstige generaties zullen het ons bijzonder kwalijk nemen dat wij deze edele grondstoffen zo hebben verkwist. Uranium en thorium daarentegen kunnen alleen gebruikt worden voor energieproductie, op enkele marginale toepassingen na in de metallurgie van legeringen. Is het niet aangewezen kernenergie als een mogelijkheid te bewaren om voor de toekomst niets uit te sluiten?

De huidige evaluatie van de energietoestand op wereldvlak brengt ons ertoe te besluiten dat de volgende strategie verantwoord is:

- de ontwikkelde landen moeten een grote inspanning leveren om hun energiegebruik te rationaliseren;
- de ontwikkelde landen moeten hun economische ontwikkeling op peil houden om de nodige inspanningen te kunnen leveren voor de ontwikkeling van de zachte energiebronnen en de hernieuwbare bronnen zoals zon, wind, water, biomassa, enzovoort;
- voor wat de productie van de basisenergie betreft, moet er op wereldvlak een evenwicht gevonden worden tussen het gebruik van fossiele brandstoffen en kernenergie. Het eventuele gevolg is dat in bepaalde continenten vooral de ene bron van energie zal worden aangewend, in andere continenten vooral de andere, bijvoorbeeld kernenergie in de ontwikkelde landen en fossiele brandstoffen in de ontwikkelingslanden.

Het afwijzen van de militaire toepassingen van kernenergie is geen reden om de civiele toepassingen te verbieden. Het opgeven van de civiele kernenergie heft de risico's van proliferatie niet op.

Met kernenergie en kernfusie heeft de mensheid een nieuwe stap gezet in haar ontwikkeling en een nieuwe dimensie toegevoegd aan haar verantwoordelijkheid. De mens vordert in het onderzoek naar de wisselwerking tussen materie en energie. Hij maakt daarbij krachten los die op wereldvlak een steeds ruimere impact zullen hebben.

Het debat kernenergie moet geplaatst worden in het globaal kader van 'de energievoorziening en de productiemiddelen'. Tijdens debatten wordt er vaak intuïtief gereageerd, dat wil zeggen: onmiddellijk en op basis van voor-oordelen die sterk gevoelsgeladen zijn. Het wijst op onze betrokkenheid en engagement. Toch pleit het ons niet vrij om te zoeken naar een objectief oordeel dat steunt op exacte feiten en gegevens.

Een radicale en exclusieve tegenstelling creëren tussen kernenergie en het respect voor de mens en het milieu is verkeerd. Alle technologieën gebruikt voor de productie van elektriciteit, ongeacht de energiebron, hebben zowel voor- als nadelen en houden bepaalde risico's in. Het volstaat ze te vergelijken. Kernenergie doorstaat de vergelijking op een uitstekende manier.

Nu is het aan de burger om zijn eigen mening te vormen op basis van objectieve informatie. Daartoe heeft de Werkgroep Ethiek en Kernenergie (W. E. K.) van het Bisdom Brugge naar best vermogen een bijdrage willen leveren:

God heeft ons de vrijheid gegeven ons leven te organiseren naar best vermogen. Hij ontheft ons echter niet van onze verantwoordelijkheid voor de Schepping die Hij ons heeft toevertrouwd. Wij moeten de Schepping beheersen zoals een goede huisvader of huismoeder. De opties en de beslissingen die de mens neemt, moeten in harmonie zijn met de goddelijke orde. Zij moeten in de eerste plaats het welzijn nastreven van de gehele mensheid van nu en morgen.

Kernenergie behoort tot de mogelijkheden van de wereld. De mens is verantwoordelijk voor een ethisch verantwoord gebruik ervan. Veiligheid staat hierbij voorop. *Aan ons de keuze met goede kennis van zaken!*

| Inleiding

Het lot van onze samenleving wordt in hoge mate bepaald door energie. Zonder energie is er geen welvaart en geen welzijn. Zonder energie vallen verwarming en verlichting, transport en telecommunicatie weg.

Mensen staan er niet bij stil dat elektriciteit de meest polyvalente energievorm van deze eeuw is. Licht, drijfkracht, communicatie, vervoer, warmte en huishoudelijk comfort zijn immers toepassingen van elektriciteit die tot het dagdagelijkse leven behoren.

Sinds het begin van deze eeuw is het wereldenergiegebruik meer dan vertienvoudigd. Het gemiddelde energiegebruik per inwoner ligt in de geïndustrialiseerde landen acht- à negenmaal hoger dan in de derdewereldlanden. Wij kunnen ons bij die scheefgetrokken toestanden niet neerleggen. Tijdens de laatste tien jaar streven de derdewereldlanden terecht naar een beter beschavings- en comfortpeil. Per capita van de bevolking wordt er over de gehele wereld, maar vooral in de geïndustrialiseerde landen, steeds meer energie gebruikt. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de groei van de wereldbevolking en het fenomeen van de toenemende stedelijke concentratie.

Het energiegebruik is een belangrijke indicator van de ontwikkeling van een land. Volgende energie betekent niet alleen welvaart maar ook sociale ontwikkeling.

Het grootste deel van de energievoorziening wordt in de twintigste eeuw waargenomen door fossiele energiedragers, zoals kolen, aardolie en aardgas. Men mag echter niet uit het oog verliezen dat fossiele brandstoffen niet onuitputtelijk zijn. Fossiele energie is een schaars goed.

Wie begaan is met de eindige energiebronnen en bezorgd om het leefmilieu, heeft ongetwijfeld interesse voor de wijze waarop elektriciteit wordt geproduceerd.

Er moet een inspanning geleverd worden voor een rationeel energiegebruik. Energiegebruik moet gericht zijn op besparing, efficiëntie en diversificatie. Zelfs bij een matige stijging van het energiegebruik zullen de toekomstige generaties grote hoeveelheden energie nodig hebben.

Daarnaast mag men de milieuproblematiek niet uit het oog verliezen. Schadelijke emissies en afvalstoffen moeten zoveel mogelijk beperkt worden. Er moet gezocht worden naar betere energieproductietechnieken.

In het licht van de economische en ecologische uitdagingen wordt kernenergie sedert de jaren zeventig in België en andere Europese landen beschouwd als een goed alternatief voor fossiele brandstoffen. In tegenstelling tot fossiele brandstoffen heeft de prijs van splijtstof weinig invloed op de totale productiekosten en produceert kernenergie tijdens de exploitatie noch CO₂, noch zure uitstoot.

In België is kernenergie, met 60% van de nationale elektriciteitsproductie (40% van de geïnstalleerde capaciteit), de hoeksteen van het Belgische elektriciteitssysteem.

Veel aandacht gaat er vandaag uit naar duurzame hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie en biomassa, windenergie, geothermische en hydraulische energie. Deze energiebronnen hebben ook hun voor- en nadelen.

1. | Ethische grondbeginselen

1.1 | Waarom een ethische reflectie?

Zonder ethiek is er geen leven mogelijk. Er is geen ethiek mogelijk zonder richtlijnen die ons dagelijks individueel of collectief gedrag bepalen. Ethiek roept op tot internationale verantwoordelijkheid en is toekomstgericht. Het gaat hier niet alleen om onze welvaart en veiligheid, maar ook om rechtvaardigheid en solidariteit met de bevolking van de andere continenten en de toekomstige generaties.

Op 14 november 1980 richtte Paus Johannes-Paulus II zich tot de geleerden die deelnamen aan een studieweek over 'Energie en de mensheid' georganiseerd door de Pauselijke Academie voor Wetenschappen. In zijn toespraak vertolkte de Paus de visie van de Kerk. Hij besloot als volgt:

“Energie is een universeel goed dat de goddelijke voorzienigheid ten dienste van de mens heeft gesteld, ten dienste van alle mensen, ongeacht het deel van de wereld dat zij bewonen. Wij moeten ook denken aan de toekomstige generaties, want de Schepper heeft de verantwoordelijkheid over de aarde aan de mens toevertrouwd.

Ik ben van mening dat men het als een rechtvaardige en liefdadige plicht moet beschouwen spaarzaam om te gaan met de energiebronnen en de natuur te eerbiedigen, niet alleen opdat de huidige generaties er zouden kunnen gebruik van maken, maar ook de toekomstige. Wij zijn solidair met de toekomstige generaties. Ik hoop dat de christenen, op een bijzondere manier aangespoord door hun erkentelijkheid aan God, door de overtuiging van de zin van het leven en de wereld, door de hoop en door een menslievendheid zonder grenzen, de eersten zullen zijn om deze plicht te waarderen en er de nodige gevolgen uit te trekken.”

Het doeltreffend gebruik van de beschikbare energiebronnen is vandaag een ethisch geladen probleem. Het is onze plicht aan de toekomstige generaties een wereld door te geven die even rijk is aan mogelijkheden als de huidige. Wij hebben de opdracht de nodige kennis, middelen en natuurlijke rijkdommen over te dragen aan onze opvolgers.

In de pastorale constitutie over de kerk in de wereld van deze tijd – *Gaudium et Spes* (GS) (1965) – wordt deze opdracht als volgt omschreven:

De mens is naar het beeld van God geschapen en kreeg van Hem de opdracht de aarde met alles wat zij in zich bevat aan zich te onderwerpen, de wereld in rechtvaardigheid en heiligheid te besturen, God als de Schepper van alles te erkennen, zichzelf en de totaliteit van de dingen naar Hem terug te voeren, zodat na de onderwerping van alles aan de mens de naam van God over de hele wereld te bewonderen zal zijn. (GS, Dl. I, Hfd. III, par. 34) Zoals nu de menselijke activiteit uit de mens voortkomt, zo wordt ze ook geordend op de mens. Want de mens verandert bij zijn werk niet alleen de dingen en de samenleving, maar hij vervolmaakt ook zichzelf. (...) Daarom is de norm ons opgelegd door God dat alle menselijke activiteiten naar zijn plan en volgens zijn wil, het authentiek welzijn van de mensheid nastreven. (GS, Dl. I, Hfd. III, par. 35)

Dit wordt als volgt samengevat in de *Katechismus van de Katholieke Kerk* (KKK) (1993):

In den beginne heeft God aan de menselijke gemeenschap het gezamenlijk beheer van de aarde en al haar natuurlijke hulpbronnen toevertrouwd, om er zorg voor te dragen, om ze door haar arbeid te onderwerpen en om van haar vruchten te genieten. De goederen van de schepping zijn bestemd voor de hele mensheid. (KKK 2402)

Voor de gelovige heeft de Schepping een doel en is zij een coherent geheel. De wetten die haar beheersen, bepalen een doelbewuste orde. De opties en de beslissingen die door de mens genomen worden, moeten dan ook in harmonie zijn met de goddelijke orde.

1.2 | Grondprincipes van een christelijke ethiek

1.2.1 | De universele bestemming van de aardse goederen

Wij hebben de goddelijke opdracht gekregen de natuurlijke rijkdommen van de aarde te beheren als een goede rentmeester.

God heeft de aarde met alles wat daarin is, bestemd voor het gebruik van alle mensen en volkeren, zodat de geschapen goederen in een billijke verdeling aan allen moeten toekomen, onder de schutse van de rechtvaardigheid, vergezeld van de liefde. (...) Daarom moeten deze goederen ter beschikking gesteld worden van alle afzonderlijke personen of volkeren opdat eenieder zichzelf verder kan helpen en ontwikkelen. (Gaudium et Spes, Dl. II, Hfd. III, par. 69)

Het welzijn nastreven van de huidige en toekomstige generaties is een ethische plicht van de mens.

Het benutten van de minerale, plantaardige en dierlijke hulpbronnen van het heelal mag men niet scheiden van de eerbied voor de morele wetten. De heerschappij over de bezielde en onbezielde natuur, die de Schepper aan de mens heeft toevertrouwd, is niet absoluut; ze wordt beperkt door de zorg voor de kwaliteit van het leven van de medemens, met inbegrip van de toekomstige generaties; ze vereist een religieuze eerbied voor de heilheid van de schepping. (KKK 2415)

De ontwikkeling en het welzijn van de wereldmaatschappij is in grote mate afhankelijk van de inbreng van de technologie en de industriële procédés, waaronder de productie en het grootschalig gebruik van elektriciteit. Elektriciteitsproductie benut grondstoffen en deze zijn niet onuitputtelijk. Daarom moeten wij spaarzaam omgaan met de steeds schaarser wordende energiebronnen. Want energieschaarste betekent economische teruggang en armoede.

De volgende generaties moeten kunnen beschikken over voldoende grondstoffen en technologieën om aan hun energievraag te voldoen.

1.2.2 | Verantwoordelijkheid en medezeggenschap

De menselijke gemeenschap bestaat uit een gemeenschap van personen, begaafd met verstand, vrijheid en individuele verantwoordelijkheid. Elke mondige burger heeft via de bestaande democratische instellingen recht op inspraak in ieder maatschappelijk debat. Een scherp toezicht en een strenge controle moeten uitgeoefend worden door deze instellingen op de uitvoering van de democratisch genomen beslissingen.

Verantwoordelijkheid opnemen en medezeggenschap hebben kunnen slechts indien men over voldoende en objectieve informatie beschikt. Met objectieve informatie bedoelen we het geheel van de beschikbare gegevens getoetst aan de wetenschappelijke, ecologische, economische en maatschappelijke realiteit.

Het is de plicht van de beleidsverantwoordelijken de burger te informeren. Zo kan hij zich een objectief beeld vormen over de mogelijke gevolgen, op plaatselijk en wereldniveau, van een bepaalde maatschappelijke keuze.

1.2.3 | De waarde van het menselijk leven en het milieu

Alle menselijke activiteiten houden risico's in en brengen afval voort. De regels voor het respect van het menselijk leven en het milieu eisen dat alles in het werk wordt gesteld om de veiligheid van de bevolking te verzekeren. Alle wetenschappelijke en industriële activiteiten zijn onderworpen aan deze regels.

In zijn toespraak ter gelegenheid van de studieweek over 'Energie en de mensheid' (cf. supra) verwoordde de Paus een en ander als volgt:

"Ik heb zelf kunnen vaststellen welke schade werd berokkend aan de schoonheid van de natuur door de implantatie van industriële complexen

die ergens anders neergezet hadden kunnen worden, of op een andere manier ontworpen hadden kunnen worden.

Ik heb in het bijzonder, uit persoonlijke ervaring, het lijden gekend van de mijnwerkers uit de koolmijnen, waarvan de longen doordrongen waren van het stof dat de mijngangen vergiftigt.

Ik hoop dat van nu af aan, in naam van de rechten van de mens en de verbetering van het leefmilieu, nieuwe doeltreffende methoden worden ontwikkeld en toegepast bij het gebruik van de bestaande energiebronnen, zodat naast het natuurlijk milieu, ook de arbeiders en de bevolking niet meer in gevaar worden gebracht."

Paus Johannes-Paulus II verwijst naar de rechten van de mens. De fundamentele rechten van de menselijke persoon zijn volgens hem in de menselijke natuur gegrift en gewild door God. Daarom horen zij universeel te worden nageleefd en aanvaard. Geen enkele menselijke autoriteit kan ze aantasten door zich te beroepen op een meerderheidsstandpunt of op een politieke of economische consensus of onder het voorwendsel van respect voor pluralisme en democratie. Menselijke activiteiten van welke natuur ook dienen altijd de principes en morele waarden te weerspiegelen die overeenkomen met een gezond mensbeeld en het algemeen welzijn ten goede komen.

Er mogen geen onverantwoorde risico's genomen worden voor mens en milieu. Risico's zijn slechts aanvaardbaar om nog grotere risico's te vermijden. Risico's moeten zo laag als redelijkerwijze mogelijk worden gehouden (*ALARA-principe*: As Low As Reasonably Achievable).

De economische en sociale gevolgen van een keuze moeten ook geëvalueerd worden. Economische belangen mogen geen voorrang krijgen op de veiligheid. Maar onzinnige uitgaven moeten vermeden worden om een reeds klein risico nog verder te verminderen. Dit geldt zeker wanneer een doeltreffende investering van deze bedragen op andere terreinen vele mensenlevens kan sparen.

1.3 | Is ethiek hier terzake?

1.3.1 | Bezig zijn met ethiek mondt uit in een gewetensonderzoek

De problemen rond kernenergie spelen zich op het eerste gezicht af ver van onze dagelijkse leefwereld. Toch is het civiele gebruik van kernenergie vandaag een gevoelsgeladen dossier geworden. Wanneer kernenergie ter sprake wordt gebracht, denken veel mensen spontaan aan rampen zoals Hiroshima, Nagasaki of Tsjernobyl.

Een ethisch oordeel vellen over kernenergie lijkt een bezigheid die vooral anderen aangaat. Toch moeten we nader toekijken en onze eigen betrokkenheid opsporen.

Kernenergie is één van de vormen van energieproductie. Energie die uiteindelijk dient voor consumptie. Onze energieconsumptie is medebepalend voor de behoefte en die op haar beurt voor de productie. Wanneer zou blijken dat wij verspillend of gewoonweg inefficiënt omgaan met energie, dan belasten wij, zonder het te bedoelen, het milieu.

Het westerse energiegebruik torent hoog uit boven het gebruik van de derde wereld. Maar welke effecten zal een welvaartstoename in de derdewereldlanden hebben? Komt er een andere verdeling tussen de ontwikkelde wereld en de landen in ontwikkeling? Waartoe zijn wij bereid of welke creatieve oplossingen komen er?

Kortom, het debat over kernenergie gaat niet louter over wat anderen moeten doen en laten, maar ook over onze eigen positie. Het mondt uit in een gewetensonderzoek.

1.3.2 | Onze verantwoordelijkheid nu voor een verre toekomst

De opslag van radioactief afval, de bouw van kerncentrales, zijn beslissingen die gevolgen hebben op lange termijn. Het gebruik van fossiele brandstoffen eveneens.

We kunnen ons afvragen wat de mogelijke scenario's zijn, welke kansen en gevaren er schuilen in elk scenario en in welke mate we de toekomst mogen belasten. Onze verantwoordelijkheid naar de toekomst is reëel maar ook relatief. Wij mogen de toekomst niet onleefbaar maken, maar wij mogen ze ook niet overdreven afremmen omwille van een beperkt aantal schadelijke gevolgen. De toekomst bevat hoe dan ook een aantal onzekerheden, die we nu niet volledig kunnen inschatten. Het is onmogelijk om met een absolute zekerheid te beslissen. Bovendien kunnen negatieve effecten in de toekomst misschien weggewerkt worden dankzij nieuwe technologieën of zuiniger energiegebruik.

1.3.3 | Objectiviteit versus intuïtieve oordelen

Hoe vaak reageren we niet intuïtief, met andere woorden: onmiddellijk en op basis van vooroordelen die gevoelsgeladen zijn? Het wijst op onze betrokkenheid en engagement. Toch pleit het ons niet vrij om te zoeken naar een objectief oordeel op basis van objectieve gegevens.

De vraag is nu: door welke instanties laten we ons informeren? Want een zelfstandig onderzoek is praktisch niet mogelijk. Zijn het de milieugroeperingen, is het de sector zelf, zijn het de media? Gaat het om informatie of sensatie?

Het negatieve beeld van kernenergie is meestal te wijten aan een gebrek aan objectieve informatie, of aan angst van het onbekende, of onzekerheid omwille van het grootschalige karakter van die energievorm.

1.3.4 | Hoe met risico's en onzekerheden omgaan?

Planmatigheid, controle, veiligheid: het zijn sleutelwoorden in ons huidig aanvoelen. Toch kunnen ze extreem toegepast worden. Dan wordt elke creativiteit en elke vorm van spontaneïteit platgelegd. Elke innovatie wordt onmogelijk.

Geschiedenis is niet louter herhaling en extrapolatie. Zij bevat een element van onvoorspelbaarheid, van risico, van onzekerheid. Het is de prijs die we betalen om te kunnen leven, om vooruitgang te maken in een veranderende omgeving.

Planmatigheid, controle, veiligheid zijn noodzakelijke voorwaarden in een technische omgeving. Maar of deze woorden sleutelwoorden kunnen worden voor het samenleven is wat anders. Samenleven dat uitsluitend geregeld wordt door planmatigheid en controle is geen samenleven meer. Het wordt verdrukking. Verlamming en wantrouwen zullen hoogtij vieren.

Vertrouwen is eveneens een sleutelwoord voor het samenleven. Vertrouwen in de goede wil en de kundigheid van de specialisten. Vertrouwen ook van hun kant uit: dat ze niet voorbijgaan aan de terechte bekommernissen van de bevolking. Een vertrouwen dat bevestiging krijgt als men enige vorm van controle toelaat. Zo is vertrouwen een wederkerig en wederzijds element van het samenleven.

1.4 | Wat met een ethische reflectie over het gebruik van kernenergie?

Een christelijk ethische reflectie moet afgestemd zijn op de beginselen die gedefinieerd werden in 1.2 en 1.3. De reflectie moet steunen op actuele, objectieve wetenschappelijke gegevens en oriëntaties van het lopend wetenschappelijk onderzoek. Het ligt voor de hand dat een ethische reflectie vanuit de exclusieve invalshoek 'kernenergie' geen zin heeft. Het debat kernenergie moet geplaatst worden in het globaal kader van 'de energievoorziening en de productiemiddelen'.

Eerst moet een antwoord worden gezocht op de vragen:

- Waarvoor is er energie nodig?
- Hoeveel energie heeft men nodig?
- Hoe worden de energiebehoeften nu en in de toekomst verdeeld?
- Over welke energiebronnen beschikken wij?
- Hoe zijn de energiebronnen verdeeld?
- Wat zijn de bestaande reserves in functie van de verbruiksprognoses?
- Wat met diversificatie bij het gebruik van de bestaande energiebronnen?

Aanvullend moet men de volgende evaluatie maken:

- Wat is de impact op mens en milieu?
- Wat is een aanvaardbaar risico?
- Hoe veilig is een bepaalde energiebron?
- Worden bepaalde technologieën voldoende beheerst?
- In hoeverre worden de belangen van de toekomstige generaties gevrijwaard?

Tot slot blijft er een sociaal-economische evaluatie over.

We kunnen de reeks gestelde vragen als volgt samenvatten:

- Waar staan we vandaag? (Over welke hoeveelheden beschikken wij vandaag?)
- Waar gaan we naartoe? (Hoeveel reiken onze voorraden?)
- Wat laten we toe? (Welke risico's aanvaarden wij?)
- Hoeveel zijn we bereid te betalen en hoe? (Wat is economisch haalbaar en met welke prioriteit?)

Een ethische reflectie moet toekomstgericht zijn. Er moet rekening worden gehouden met de huidige voordelen en deze die overgemaakt worden aan de toekomstige generaties. Het gaat hier in het bijzonder over de bijdrage tot een betrouwbare bevoorrading van energie aan aanvaardbare economische voorwaarden en de vermindering van de atmosferische, land- en zeevervuiling.

Een ethische reflectie wordt bepaald door de op vandaag beschikbare gegevens die vertaald worden in huidige en toekomstige voor- en nadelen.

2. | Vergelijkende analyse van de energiebronnen

2.1 | De energiesituatie

Onze levenswijze hangt af van de energie waarover we beschikken. Arbeid vraagt energie. Om de huidige situatie beter te begrijpen is het nuttig even het verleden te overlopen. Onze verre voorouders beschikten, wat energiebronnen betreft, over hun spierkracht en later over het vuur. Vervolgens heeft de mens sommige diersoorten tot huisdieren gemaakt en gebruikte hij hen bij zijn arbeid. Later vond hij wind- en watermolens uit.

In de Oudheid was de energiebevoorrading afhankelijk van slavenarbeid. Men verbruikte nochtans ook veel brandstof: het hele Middellandse Zeegebied werd ontbost. In de Middeleeuwen werd het slavenendom door het lijfeigenschap vervangen.

Amper tweehonderd jaar geleden werd er nagenoeg uitsluitend met hout of houtskool gekookt en verwarmd. Bij het malen van graan werden de molens aangedreven door de energie van de wind en de kracht van het water. Men gebruikte olie voor de verlichting. De spierkracht van mens en dier was nodig om het land te bebouwen, goederen en materialen te vervaardigen. Voor het transport werden dieren gebruikt.

Met de uitvinding van de stoommachine en de ontginning van de koolmijnen die daarmee gepaard ging, nam het energiegebruik in de negentiende eeuw snel toe. De daarop volgende industriële revolutie werd versneld door de ontdekking van aardolie, de productie van elektriciteit en de uitvinding van de explosiemotor.

Door de aanwending van de drijfkracht van machines die op natuurlijke hulpbronnen werken, werd de mens grotendeels verlost van zware lichamelijke arbeid. Een van de belangrijkste energievormen is elektriciteit.

Energie betekent welvaart, maar is ook de motor van de sociale ontwikkeling. Dankzij energie kon men de arbeidstijd verminderen en de mens de mogelijkheid bieden zijn persoonlijk leven tot ontplooiing te laten komen. Dankzij de technische vooruitgang leven de meeste mensen nu duidelijk beter en langer. Welvaart is niet meer het voorrecht van een kleine groep mensen.

Toch leeft vandaag nog een groot deel van de mensheid, vooral in Azië en Afrika, in menonwaardige omstandigheden. De derde wereld heeft een grote behoefte aan energie en moet een enorme achterstand inlopen.

We gebruiken grote hoeveelheden energie en grondstoffen. Ze zijn niet onuitputtelijk en hun ongecontroleerd gebruik brengt wereldomvattende milieueffecten met zich mee:

zure neerslag, broeikaseffect, aantasting van de ozonlaag, radioactieve besmetting... Het zijn grensoverschrijdende problemen. De 'limieten van de groei' en het risico van de teeloorgang van onze aarde dwingen ons tot een beheerst omspringen met energie en grondstoffen. '*Duurzame ontwikkeling*' vereist dat de huidige generatie een leefbare wereld doorgeeft aan de toekomst.

Energie is geen louter economisch goed. De ecologische dimensie mogen we zeker niet uit het oog verliezen. *Energie, economie en ecologie* zijn de drie factoren waarmee we tegelijk rekening moeten houden.

2.1.1 De energievoorziening op wereldvlak

2.1.1.1 Consumptie

Het grootste deel van de wereldenergievoorziening wordt tot stand gebracht door middel van fossiele energiedragers, namelijk kolen, olie en aardgas. In 1995 verbruikte de wereld 8,1 Gtoe,¹ verdeeld over 35% aardolie, 21% aardgas, 31% kolen,² 6% kernenergie en 7% hydraulische en hernieuwbare energiebronnen. De wereldconsumptie van primaire energie wordt voor 1985, 1990 en 1995 gedetailleerd weergegeven in de figuren 1 tot en met 4.

Van 1985 tot 1995 nam de energieconsumptie met 17,1% toe, wat overeenstemt met een gemiddelde stijging van 1,6% per jaar. Noord-Amerika en Europa nemen meer dan 50% van de consumptie voor hun rekening. De consumptie per capita bedraagt in Noord-Amerika 8,1 toe en in Europa 3,1 toe. De westerse landen moeten een inspanning leveren om hun energiegebruik te matigen. Zoals vandaag kan het niet verder.

Het elektriciteitsaandeel in de primaire energieconsumptie (cf. figuur 5) bedroeg in 1995 zowat 36% (13.200 TWh³) in vergelijking met 31,7% (9.850 TWh) in 1985 en 33,2% (11.700 TWh) in 1990. Tussen 1985 en 1995 nam de elektriciteitsconsumptie met 34% toe, wat overeenstemt met een gemiddelde jaarlijkse stijging van 2,97%.

De *energie-intensiteit* is een maat voor economische ontwikkeling en energie-efficiëntie. Zij legt de relatie vast tussen consumptie, bruto nationaal product (cf. figuur 6) per inwoner en bevolkingsaantal (cf. figuur 21). Naarmate de energie-intensiteit daalt, stijgt de economische groei en neemt de efficiëntie van het energiegebruik toe.

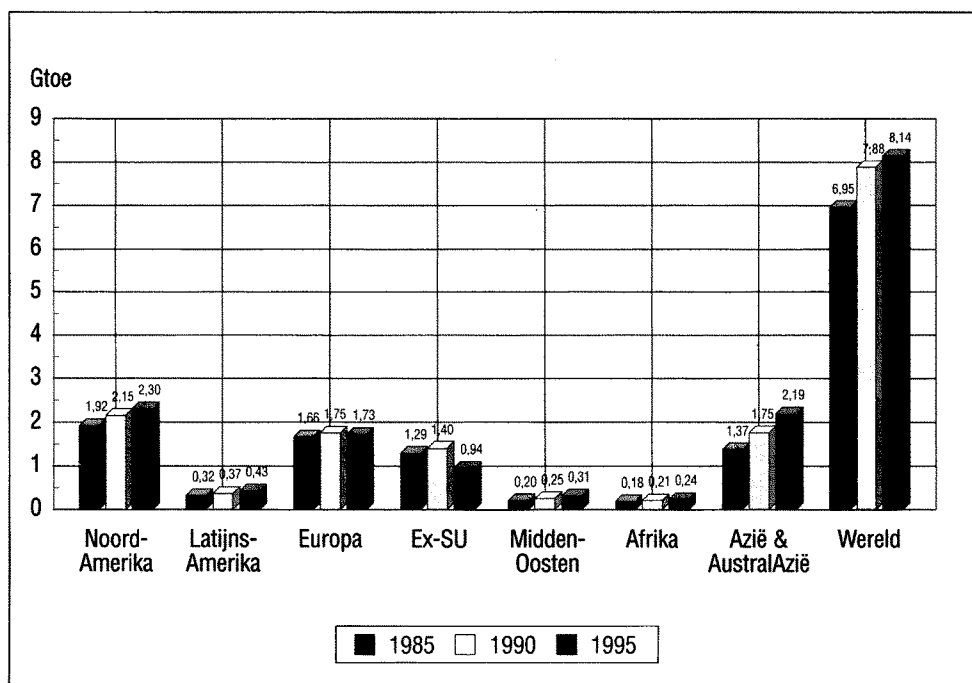
De energie-intensiteit wordt als volgt berekend:

$$I_i = \frac{C_i}{P_i \cdot R_i}$$

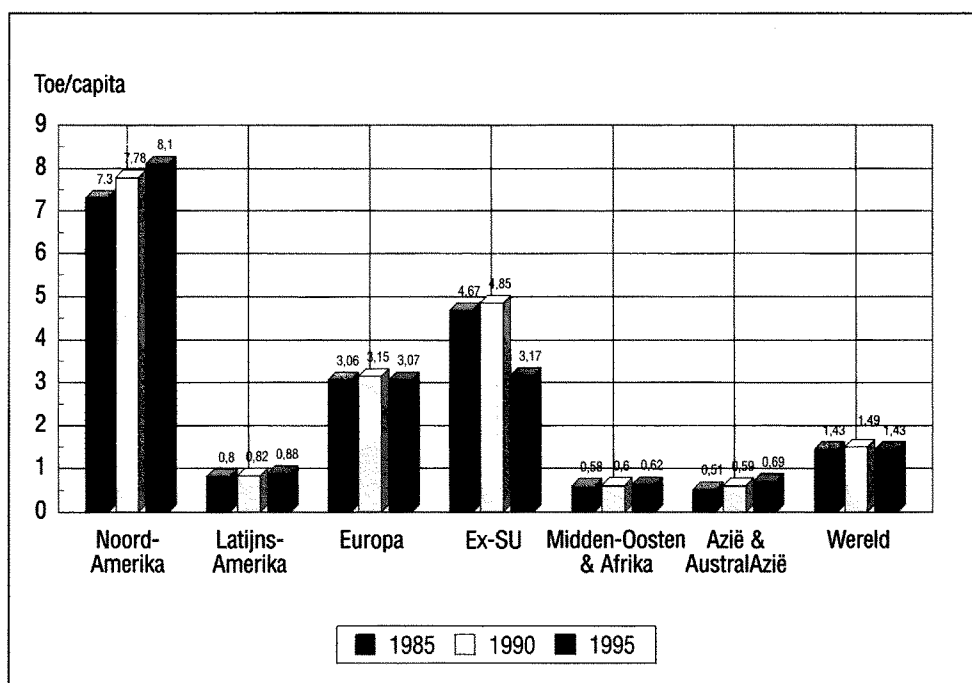
I_i = energie-intensiteit
 C_i = energieconsumptie
 P_i = aantal inwoners
 R_i = BNP – bruto nationaal product per inwoner
 i = beschouwd jaar

Tussen 1985 en 1995 stellen we een dalende trend vast in de energie-intensiteit (cf. figuur 7). Volgens de huidige prognoses zal deze trend zich verder zetten.

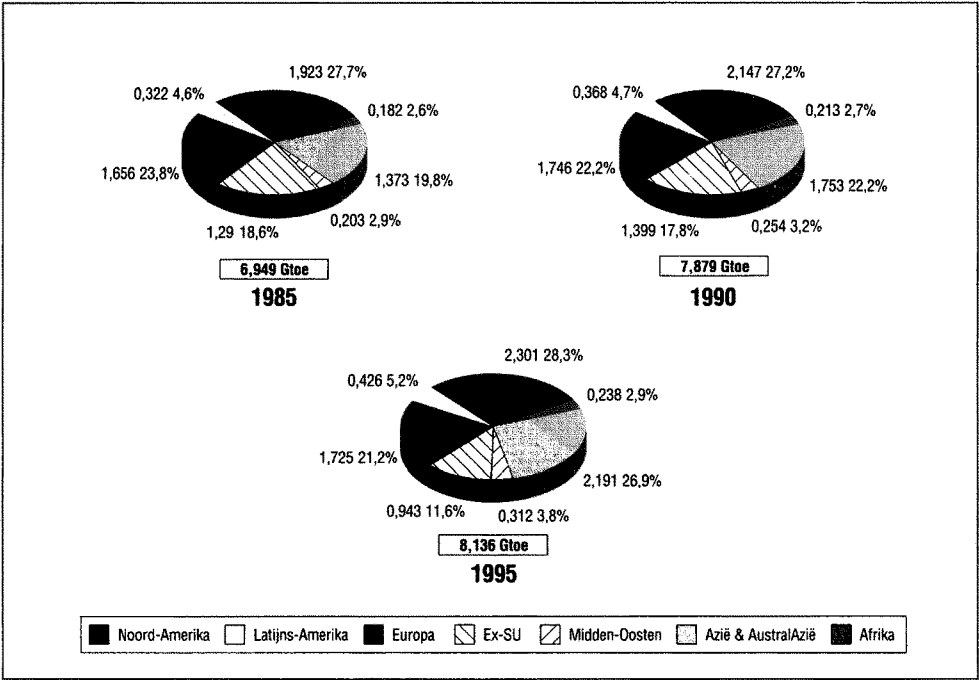
1. Definities gebruikte eenheden: cf. bijlage 1; definities geografische gebieden: cf. bijlage 2.
 2. Steenkool + ligniet.
 3. Definities gebruikte eenheden: cf. bijlage 1.



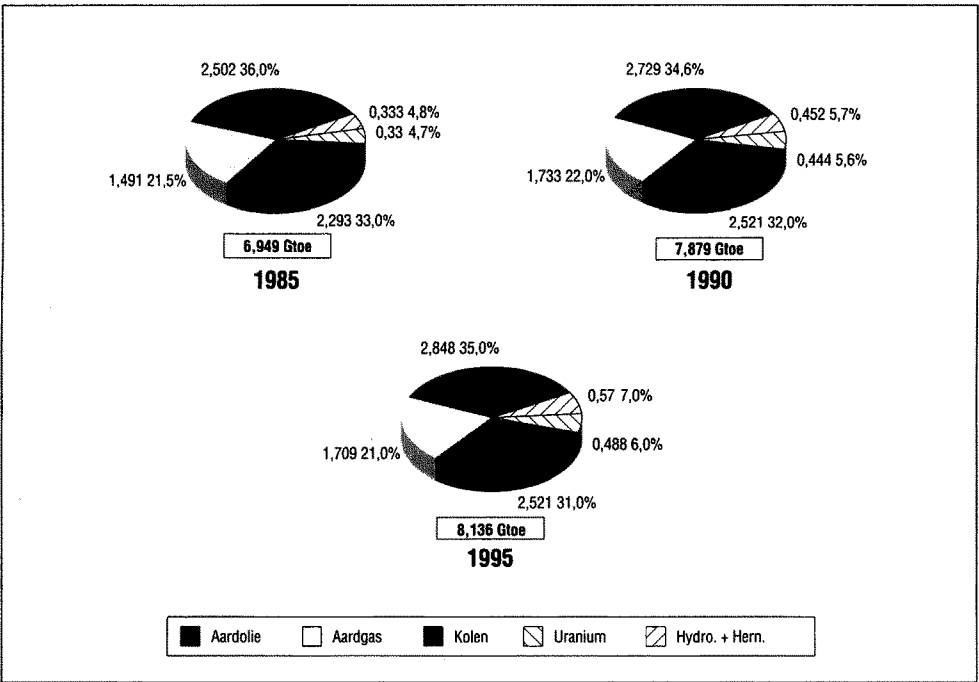
Figuur 1. Primaire energieconsumptie (Gtoe) – geografische spreiding.



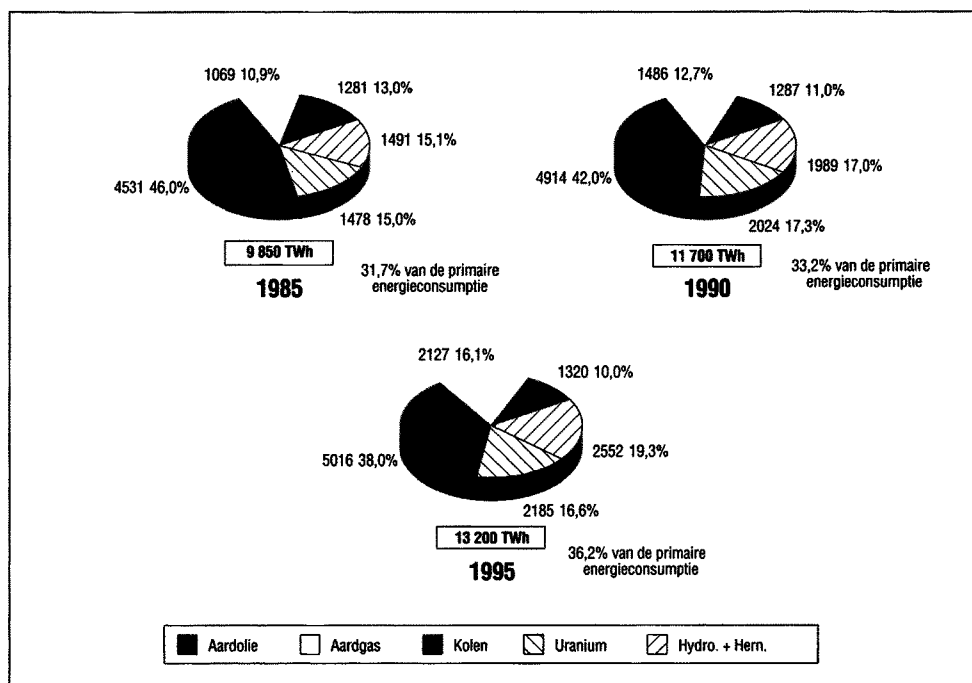
Figuur 2. Primaire energieconsumptie per capita (toe) – geografische spreiding.



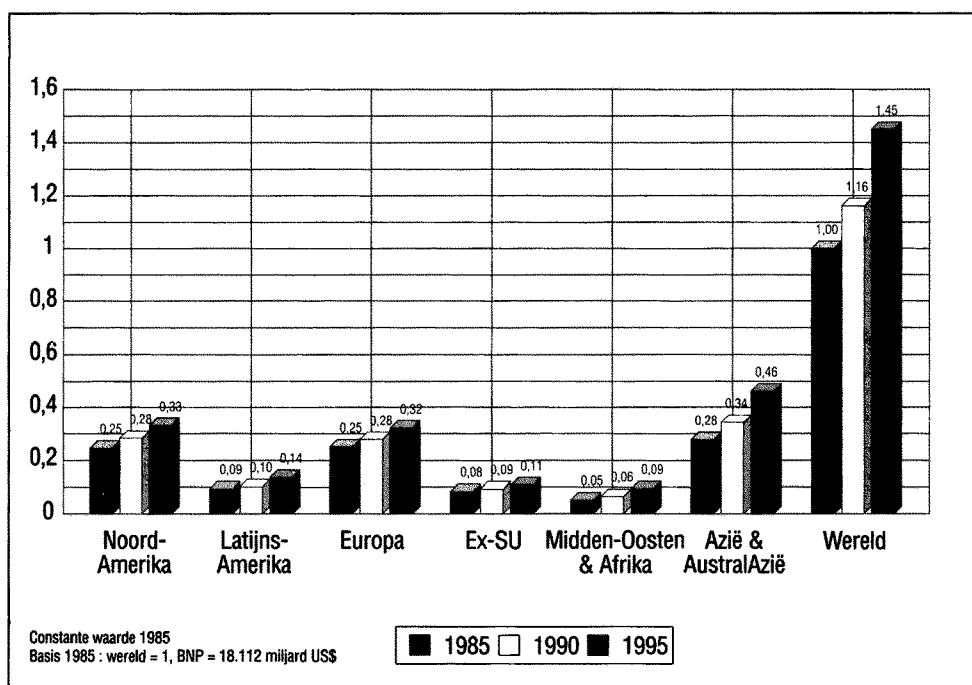
Figuur 3. | Primaire energieconsumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding.



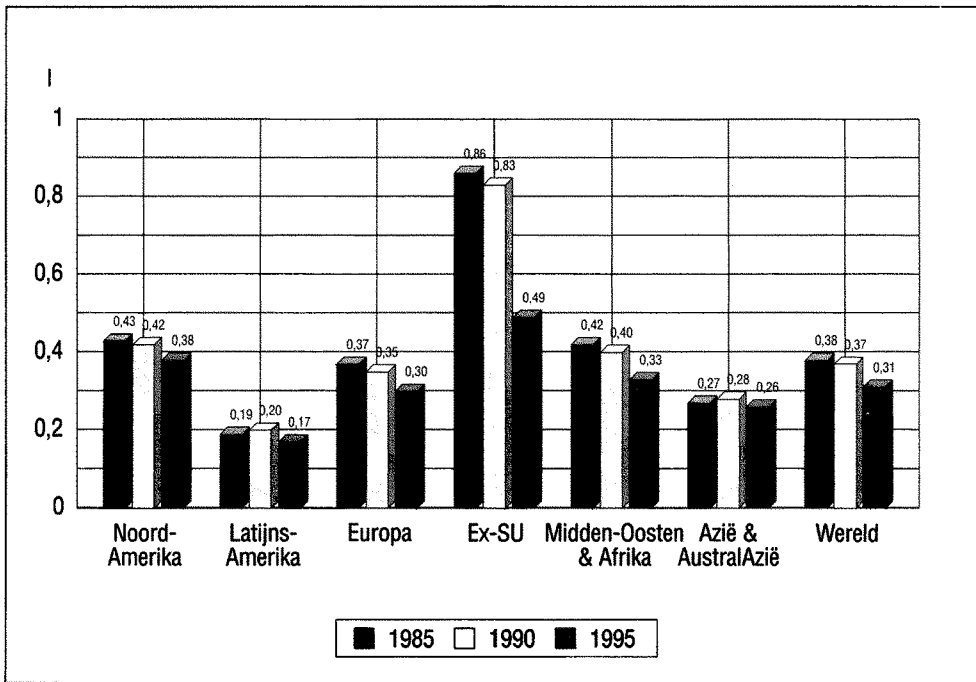
Figuur 4. | Primaire energieconsumptie (Gtoe, %) – energiemix.



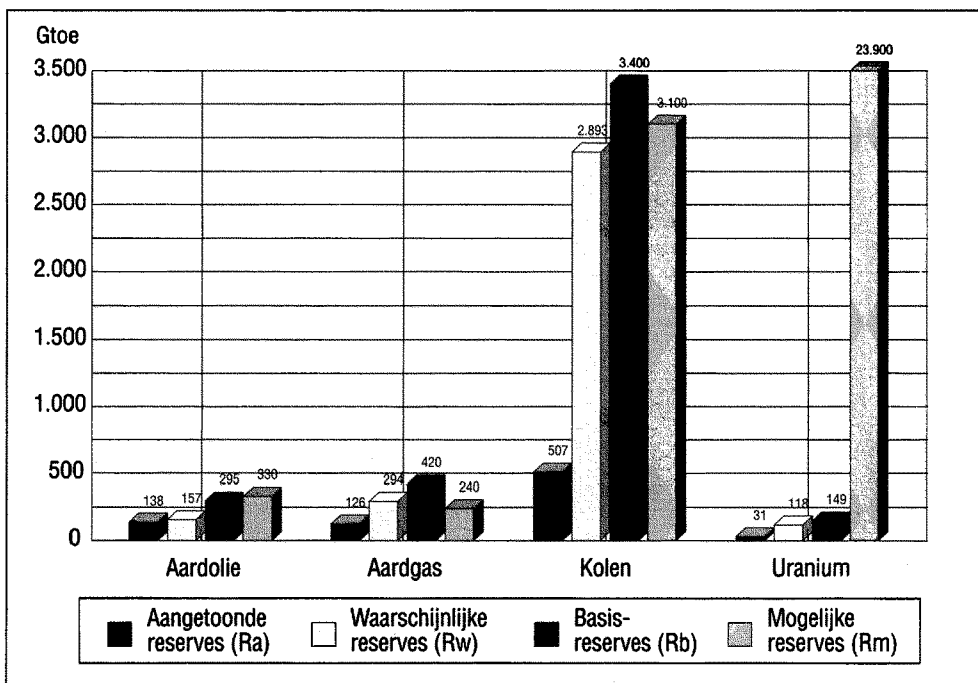
Figuur 5. | Elektriciteitsconsumptie op wereldvlak (TWh, %) – energiemix.



Figuur 6. | Bruto nationaal product.



Figuur 7. | Energie-intensiteit.



Figuur 8. | Brandstoffen en uranium: reserves (Gtoe) – basis 1995.

2.1.1.2 | Reserves

Door de belangrijke positie die fossiele brandstoffen innemen in de energieproductie, wordt er vandaag veel aandacht besteed aan de bestaande reserves. Deze reserves en de uraniumreserves zijn beperkt.

De energiebronnen en hun gebruiksmogelijkheden worden driedimensionaal gekenmerkt: de geologische kennis, de economische en technologische mogelijkheden.

In functie van deze drie criteria onderscheidt men:

- de *aangetoonde reserves* (R_a): ze omvatten de geïdentificeerde lagen die technisch en op een economisch verantwoorde manier ontginbaar zijn met de huidige technologie;
- de *waarschijnlijke reserves* (R_w): ze omvatten de geïdentificeerde lagen die in de toekomst, dankzij de technologische vooruitgang, hoogstwaarschijnlijk geologisch, technisch en op een economisch verantwoorde manier ontginbaar zullen zijn;
- de *basisreserves* (R_b): som van de aangetoonde en de waarschijnlijke reserves;
- de *mogelijke reserves* (R_m): ze omvatten de nog niet geïdentificeerde lagen waarvan het bestaan, op basis van de huidige geologische kennis, met een grote onzekerheid wordt verondersteld.

De aardolie-, aardgas-, kolen- en uraniumreserves⁴ worden weergegeven in figuur 8.

De *levensduur TP_i van de aangetoonde reserves R_a* voor een gegeven jaar wordt als volgt gedefinieerd (cf. figuur 14):

$$TP_i = \frac{R_{ai}}{PR_i}$$

TP_i = levensduur
 R_{ai} = aangetoonde reserves
 PR_i = productie
 i = beschouwd jaar

De aangetoonde fossiele brandstof- en uraniumreserves (basis 1995) bedragen samen 802 Gtoe. Deze reserves verdelen zich als volgt: 17,2% aardolie, 15,7% aardgas, 63,3% kolen en 3,8% uranium⁵ (cf. figuur 9, 10, 12 en 13). De productie en consumptie van fossiele brandstoffen en uranium worden weergegeven in de figuren 11 tot en met 13.

De levensduur bij een constant productieritme TP of een constant consumptieritme TC ⁶ van de aangetoonde fossiele brandstof- en uraniumreserves wordt weergegeven in figuur 14.

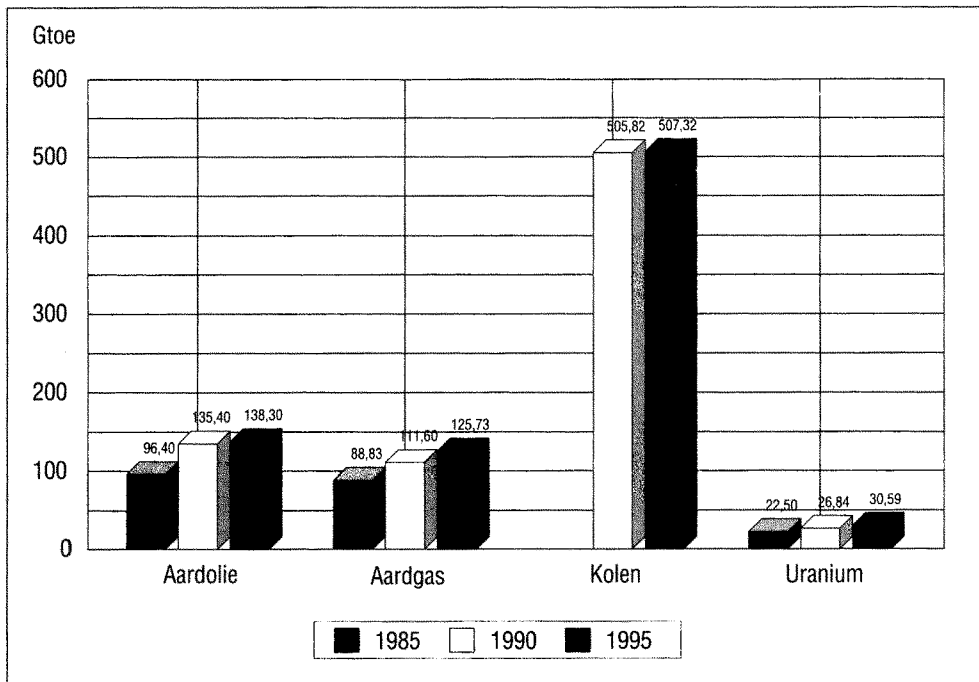
Het verschil tussen TP_i en TC_i wordt verklaard door het bestaan van voorraden die in het verleden door de producenten en de consumenten werden aangelegd. Dit geldt in het bijzonder voor uranium.

Op basis van de aangetoonde reserves en de energieconsumptie van 1995, zijn er voor ongeveer een eeuw brandstofreserves van verschillende aard gekend. Deze vaststelling schetst een nogal somber beeld voor de toekomst.

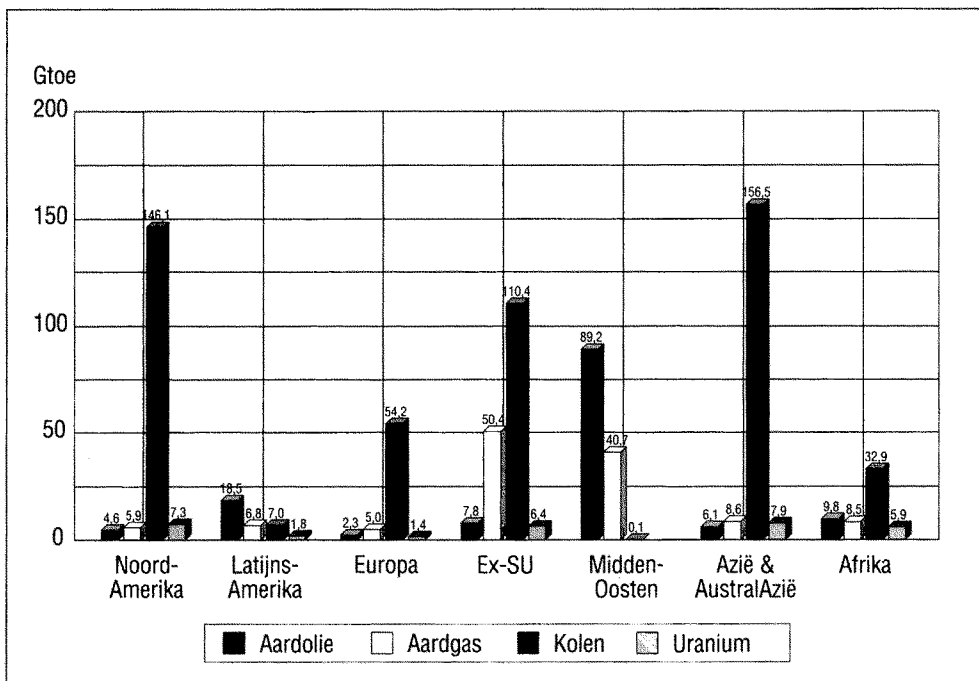
4. Wat de uraniumreserves betreft cf. ook 2.1.3.

5. Wat de uraniumreserves betreft cf. ook 2.1.3.

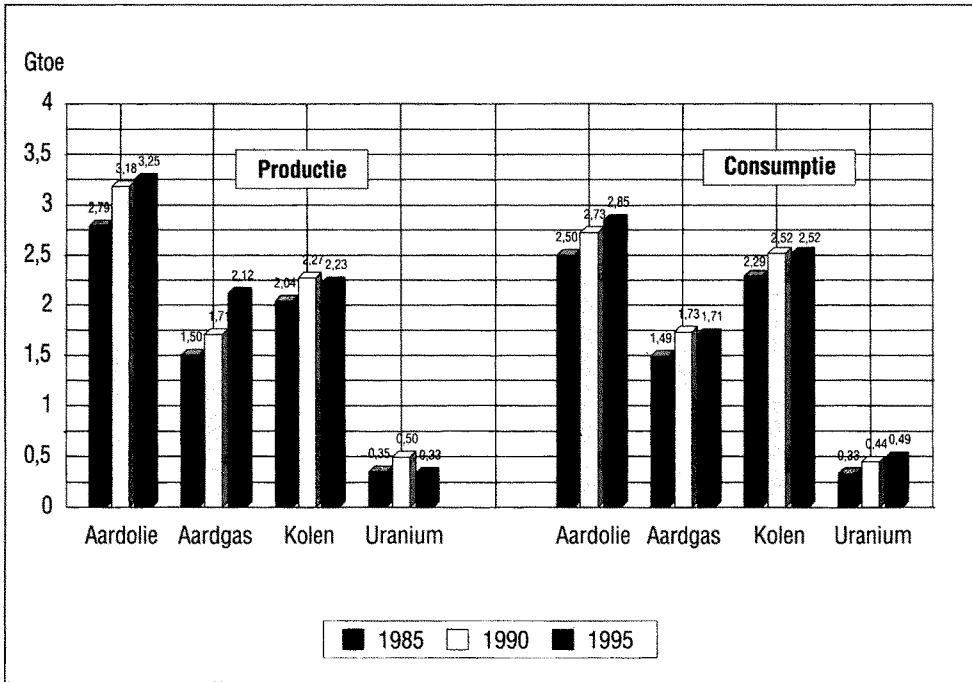
6. TC wordt op een analoge manier gedefinieerd als TP .



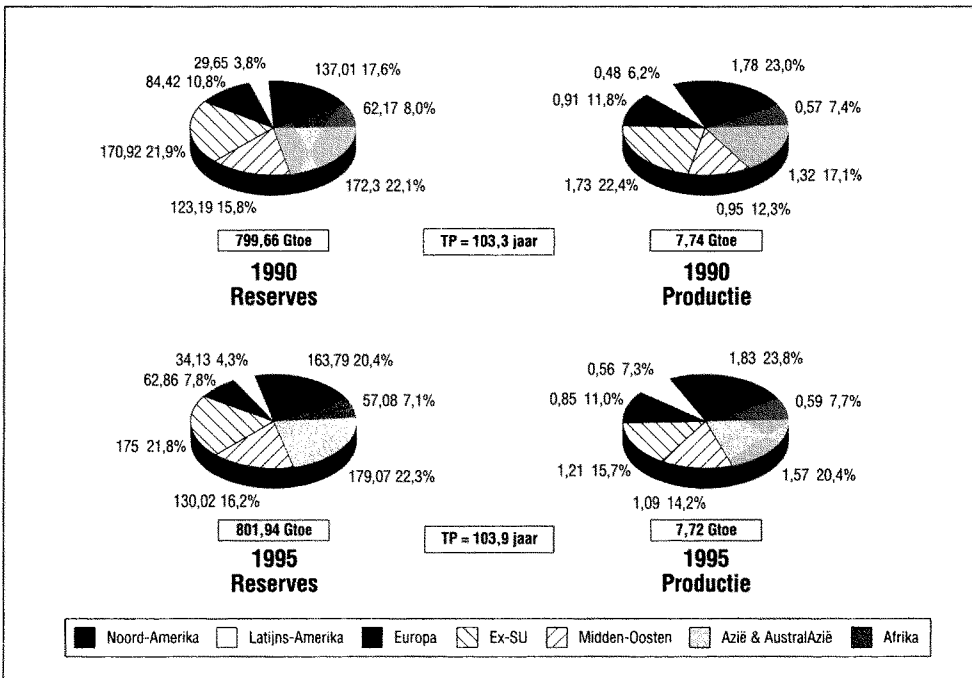
Figuur 9. | Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves (Gtoe).



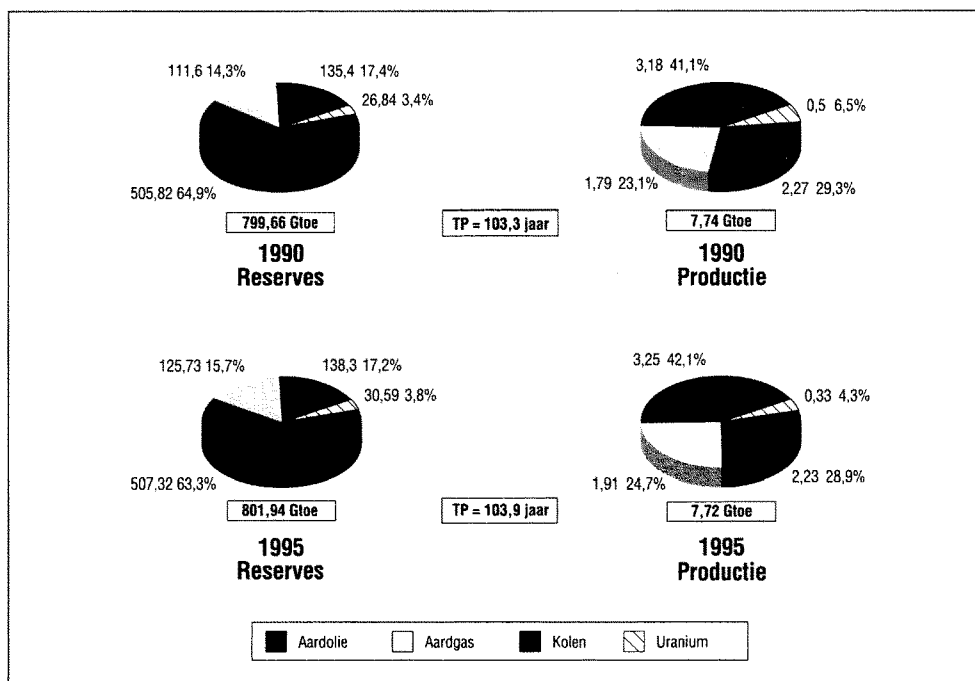
Figuur 10. | Aangetoonde reserves (Gtoe) – basis 1995 – geografische spreiding.



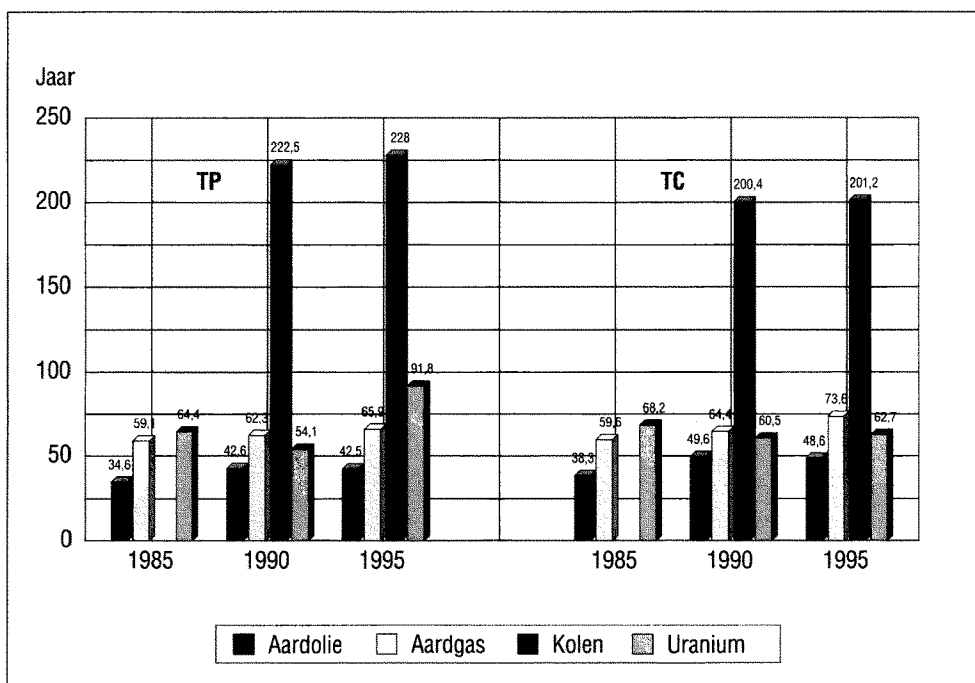
Figuur 11. Productie en consumptie van brandstoffen en uranium (Gtoe).



Figuur 12. Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves en productie (Gtoe, %) – geografische spreiding.



Figuur 13. | Brandstoffen en uranium: aangetoonde reserves en productie (Gloe, %) – brandstofmix.



Figuur 14. | Brandstoffen en uranium: levensduur van de aangetoonde reserves.⁷

2.1.2 | De fossiele brandstoffen⁷

2.1.2.1 | Kolen⁸

Kolen werden gevormd door de opeenhoping van plantaardige resten van diverse oorsprong op het aardoppervlak. In kolen worden wortelen, stammen, takken, bladeren, sporen, enzovoort teruggevonden. Er vormt zich eerst turf. Het turf dat geleidelijk aan werd bedolven onder steeds dikker wordende bezinkingsgesteenten, evolueerde naar ligniet en dan naar steenkool.

Een afzetting bestaat over het algemeen uit een bundel van verschillende lagen kolen. Zo'n lagenbundel kan 2.000 m en zelfs 3.000 m dik zijn. Vele duizenden jaren waren er nodig voor de vorming van één enkele laag. Kolenvoorraden kunnen niet aangevuld worden binnen de termijn van het menselijk bestaan. De kolenreserves bestaan uit *steenkool* en *ligniet*.

De aangetoonde reserves (Ra) bedragen 507 Gtoe (basis 1995). Aan het huidige productietme van 2,23 Gtoe/jaar volstaan deze reserves voor 228 jaar (cf. figuur 15). De basisreserves worden geschat op 3.400 Gtoe, de mogelijke reserves op 3.100 Gtoe (cf. figuur 8).

In tegenstelling tot de aardolie- en aardgasreserves zijn de kolenreserves uitzonderlijk groot. Theoretisch zijn er voldoende kolen om gedurende verschillende eeuwen de wereldenergievraag te dekken.

Om meerdere redenen mogen steenkool en ligniet niet de enige brandstoffen zijn die in de toekomst verder gebruikt zullen worden om energie te produceren. De meeste vindplaatsen liggen heel diep, waardoor de ontginningsmogelijkheden beperkt worden. De reserves zijn zeer ongelijk verdeeld. De grootste kolenvelden liggen in het noordelijk halfrond: de ex-Sovjet-Unie, de Verenigde Staten en China. Deze drie regio's beschikken over ongeveer 80% van de wereldreserves. De omvang van de kolenmassa vormt een handicap bij het transport naar de plaats van gebruik. Bovendien is de verbranding van kolen bijzonder schadelijk voor het milieu: zuurstofverbruik, emissies van koolzuurgas (broeikaseffect), zwavel- en stikstofoxiden (zure neerslag), roet en stof. De verbranding van grote tonnages kolen leidt tot een aanzienlijke verwarming van de lucht in de steden en de industriegebieden, wat stellig heeft bijgedragen tot een wijziging in het microklimaat van sommige streken. Steenkool is ook radioactief.

2.1.2.2 | Aardolie

De koolwaterstoffen waarover we tegenwoordig beschikken, zijn hoofdzakelijk van biochemische oorsprong. Planten en dierlijke organismen werden door sedimentatie op de zeebodem afgezet. Hierdoor werden organische stoffen met een nogal veranderlijke samenstelling gevormd die men '*kerogeen*' noemt en die men gewoonlijk nader bepaalt

7. Wat de uraniumreserves betreft cf. ook 2.1.3.

8. De impact op het milieu en de mens van alle energiebronnen wordt in 2.2 behandeld.

9. Steenkool + ligniet.

enerzijds door de verhouding waterstof tot koolstof (H/C) en anderzijds door de verhouding zuurstof tot koolstof (O/C).

Het kerogeen kan gevormd worden door planten zoals bijvoorbeeld zeewier of door de ontbinding van kleine zeediertjes. Kerogeen kan ook nog gevormd worden door de ontbinding van hogere planten en van humus, die wel degelijk van continentale en niet van mariene oorsprong zijn.

Het kerogeen is meestal van mariene oorsprong: 95% van de aardolie is afkomstig uit gebieden waar mariene sedimentatie heeft plaatsgevonden, hetzij in gebieden waar de zee zich reeds lang heeft teruggetrokken (uitgedroogde zeeën), hetzij in gebieden zoals de continentale plaat die zich langs de kust van onze huidige zeeën en oceanen uitstrekt (en waar sedimentatie nog actief plaatsgrijpt).

Aardolie werd eerst op het vasteland ontdekt. Later is men gaan boren in de continentale plaat zoals nu bijvoorbeeld in de Noordzee wordt gedaan.

Men onderscheidt drie grote koolwaterstofsoorten: aardolie, aardgas, bitumen en asfalt. Aardolie en aardgas kunnen door poreus en permeabel gesteente migreren en in een reservoirgesteente opgesloten blijven als dit aan de bovenzijde wordt begrensd door een impermeabel gesteente, zoals bijvoorbeeld klei of een schalie.

Met de huidige technologie kan er slechts een deel van de aardolie uit de vindplaats gehaald worden. Op de continenten is de aardolieprospectie tot op een diepte van 3.000 m zover gevorderd dat er maar weinig kans toe bestaat er nog nieuwe reserves te ontdekken. Dieper dan 3.000 m wordt het ontdekken van aardolieaccumulaties onwaarschijnlijk omdat de temperatuur en de druk daar veel te hoog zijn. In de toekomst zal men in diep water moeten gaan prospecteren en zullen er met zekerheid nog nieuwe olievelden ontdekt worden. Hun uitbating zal echter op veel moeilijkheden stuiten.

Het energiegebruik van de huidige wereld stijgt echter zo snel dat de petroleumreserves binnen afzienbare tijd uitgeput zullen zijn.

De aangetoonde aardoliereserves (Ra) bedragen 138 Gtoe (basis 1995). Aan het huidige productieritme van 3,25 Gtoe/jaar volstaan deze reserves voor 42,5 jaar (cf. figuur 16). De basisreserves worden geschat op 295 Gtoe, de mogelijke reserves op 330 Gtoe (cf. figuur 8).

De aardoliereserves bevinden zich hoofdzakelijk in het Midden-Oosten. Europa is dus sterk afhankelijk van het Midden-Oosten voor zijn bevoorrading, gezien de huidige Europese voorraad slechts 2,3 Gtoe bedraagt en de jaarlijkse consumptie 0,64 Gtoe, wat een TC oplevert van 3,5 jaar.

Ten overstaan van steenkool biedt aardolie enkele voordelen. De verbranding van eenzelfde hoeveelheid geeft meer energie. Aardolie is dus een betere brandstof en verbrandt zonder stofafgifte, maar produceert dezelfde gassen als steenkool. Zij is gemakkelijker te ontginnen en te vervoeren.

Aardolie is echter de grondstof voor bijna alle kunststoffen, zonder dewelke ons leven vandaag bijna ondenkbaar zou zijn. Bijgevolg is zij te kostbaar om te verbranden.

2.1.2.3 | Aardgas

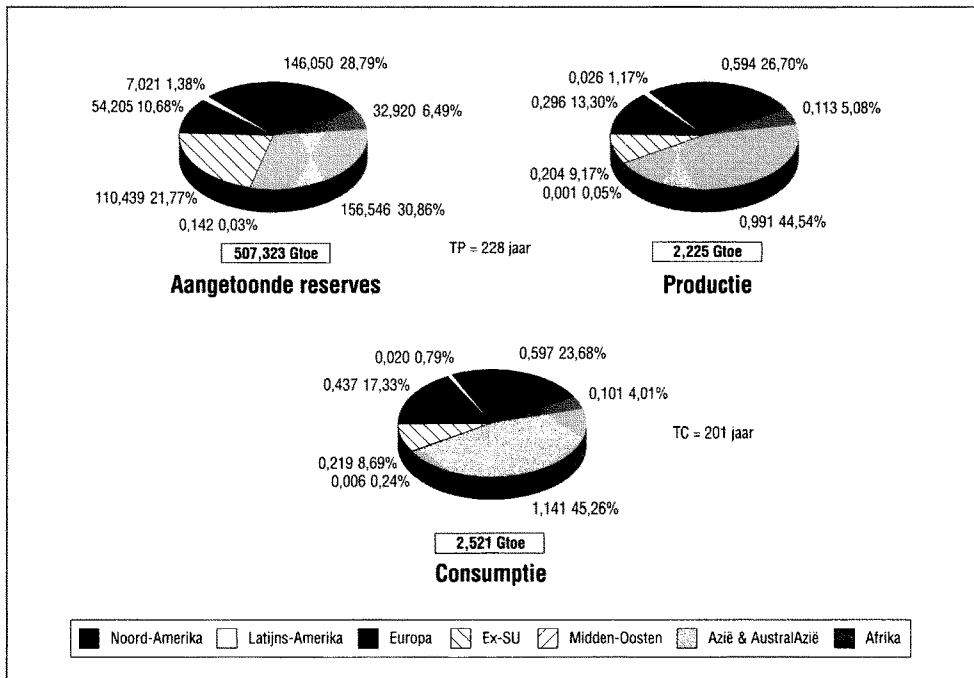
Aardgas en aardolie worden praktisch altijd samen gevonden. Net als aardolie werd aardgas, dat ermee verwant is, gevormd door de ontbinding van zeedieren en planten die gedurende miljoenen jaren met sedimentgesteenten bedekt werden en onder de invloed van een zeer sterke druk langzaam in aardolie of aardgas werden omgezet.

Onder de fossiele brandstoffen belast aardgas het leefmilieu het minst. Aardgas bevat praktisch geen zwavel en veroorzaakt dus geen zwaveldioxide (zure regen). Bovendien komt bij verbranding ervan slechts zowat de helft koolzuurgas vrij als bij kolenstook.

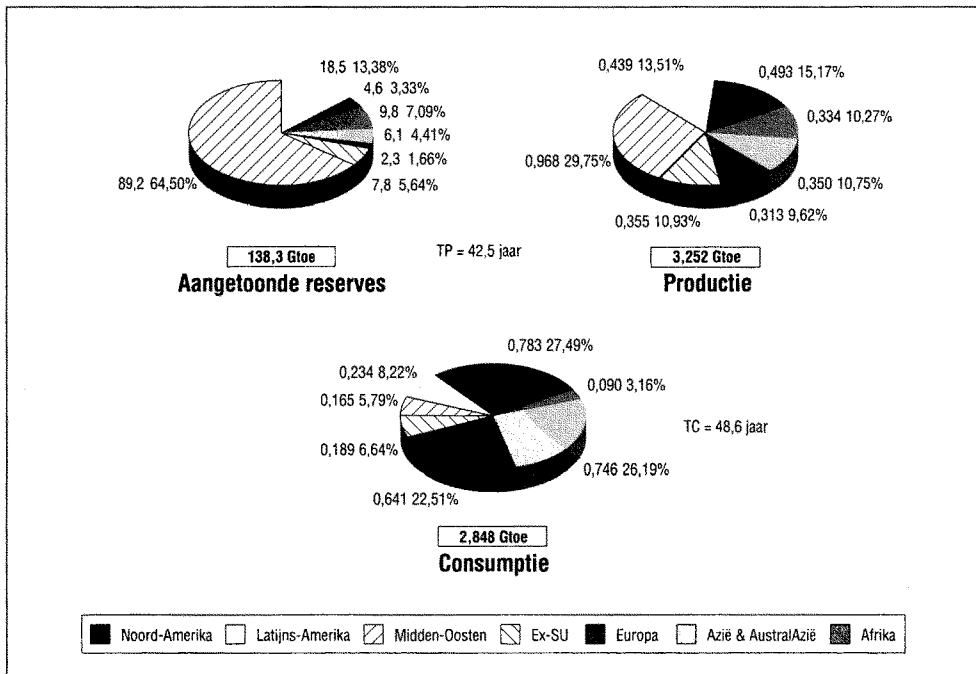
De samenstelling van aardgas hangt af van de vindplaats: de meeste aardgassoorten bestaan hoofdzakelijk uit methaan, andere uit een mengsel van propaan en ethaan. Men moet zich echter realiseren dat methaan een broeikasgas is dat 20 à 25 keer effectiever is dan CO₂.

De aangetoonde aardgasreserves bedragen (Ra) 126 Gtoe (basis 1995). Aan het huidige productieritme van 1,9 Gtoe/jaar volstaan deze reserves voor 66 jaar (cf. figuur 17). De basisreserves worden geschat op 420 Gtoe, de mogelijke reserves op 240 Gtoe (cf. figuur 8).

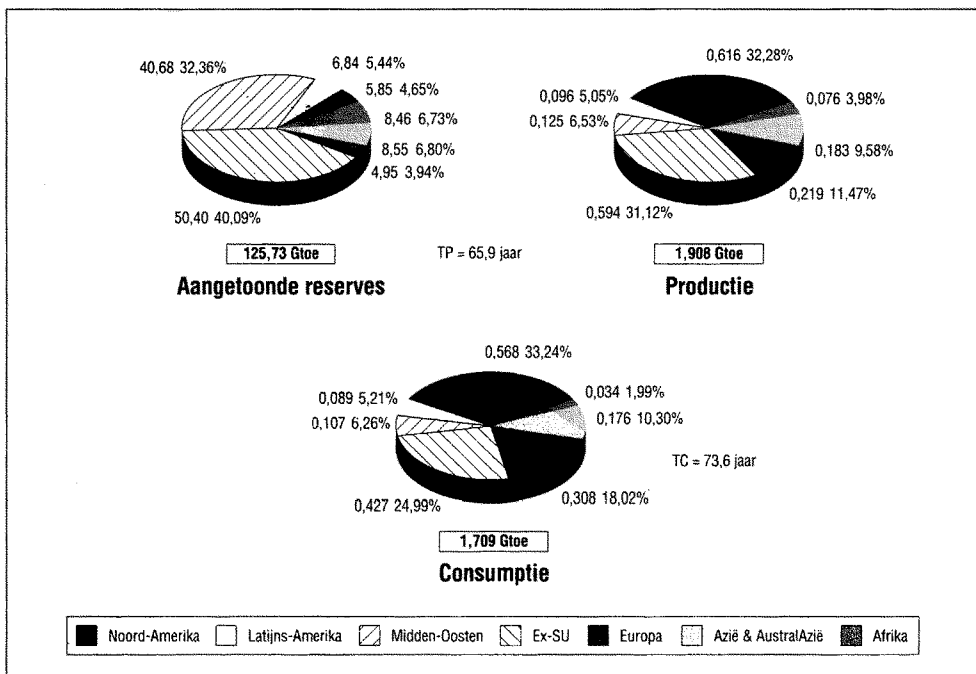
De aardgasreserves bevinden zich hoofdzakelijk in het Midden-Oosten en de ex-Sovjet-Unie.



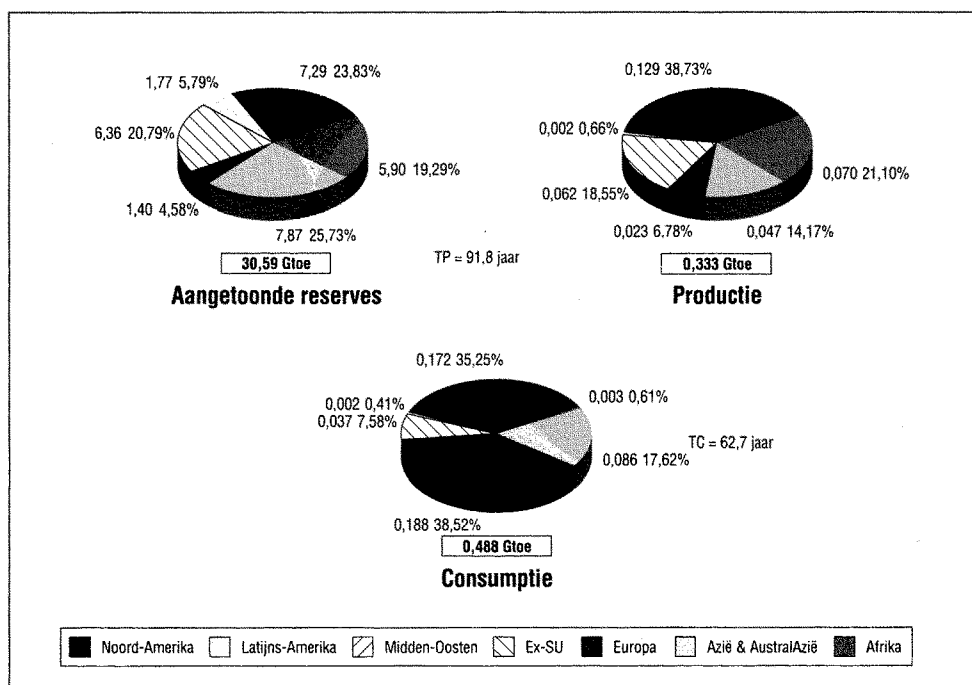
Figuur 15. | Kolen – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.



Figuur 16. Aardolie – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.



Figuur 17. Aardgas – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.



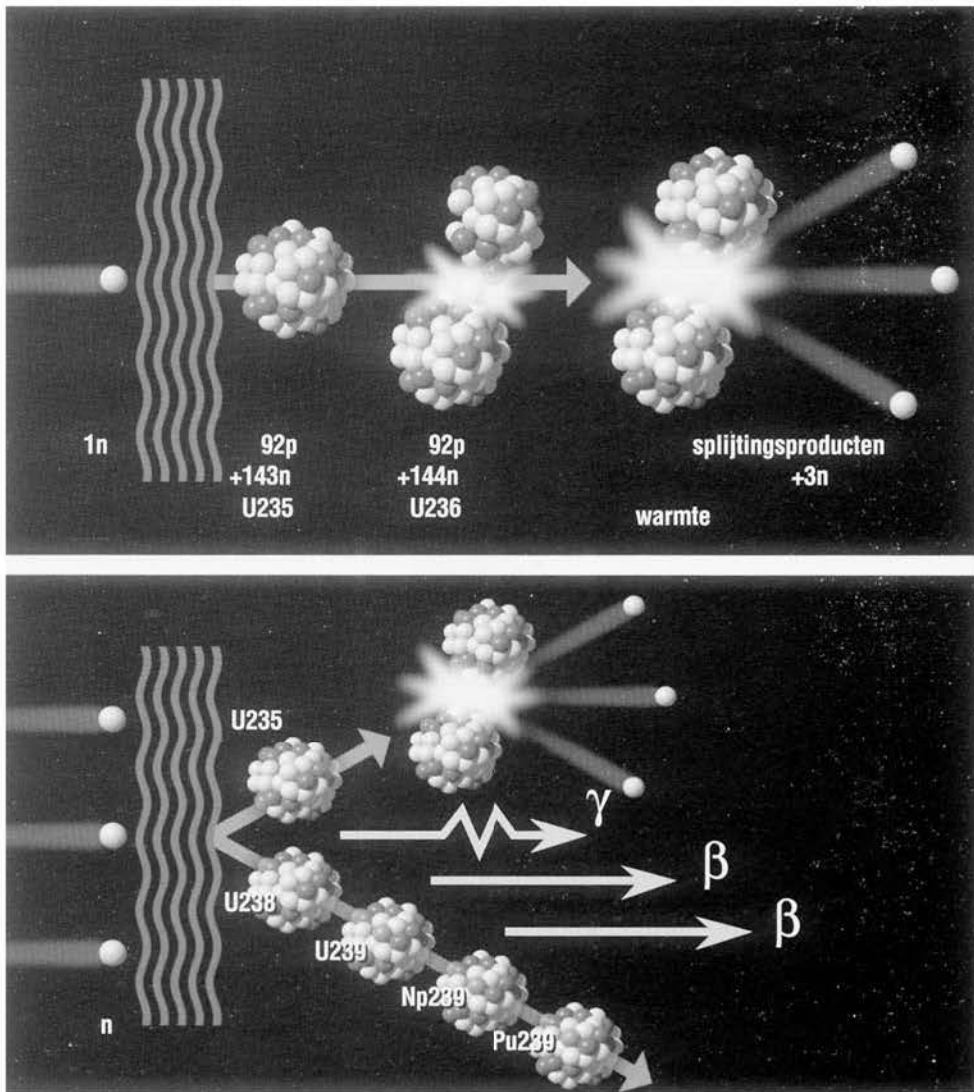
Figuur 18. Uranium – aangetoonde reserves, productie en consumptie (Gtoe, %) – geografische spreiding – basis 1995.

2.1.3 | Uranium

Uranium is een metaal dat in weinig geconcentreerde vorm aanwezig is, dikwijls vermengd met andere mineralen. Het komt zowat overal op aarde voor, ook in het zeewater. Op wereldschaal komt het duizendmaal meer voor dan goud (Au), evenveel als wolfram (W), tantaal (Ta) en arseniek (As), meer dan kwikzilver (Hg), zilver (Ag) of cadmium (Cd), die toch als niet-zeldzame metalen beschouwd worden, maar duizendmaal minder dan ijzer (Fe). De voornaamste producenten zijn Australië, Canada, de Verenigde Staten, het Gemeenebest van Onafhankelijke Staten (GOS), China, Namibië, Niger en Gabon (cf. figuur 45 en 3.2.7.3). Het leeuwenaandeel van de reserves bevindt zich in die landen.

Het uranium ondergaat een reeks *bewerkingen* (cf. 3.2.7.3). Daar de erts slechts kleine hoeveelheden uranium bevatten, bestaat een eerste bewerking uit een concentratieverhoging. Deze bewerking wordt uitgevoerd in de nabijheid van de mijn. Het bekomen concentraat is een uraniumoxide of uranaat (de 'yellow-cake') dat 80% tot 85% U_3O_8 bevat. Het uranium kan onder deze vorm verscheept worden. Het wordt nadien in een conversiefabriek gezuiverd en omgevormd tot uraniumhexafluoride (UF_6), een vaste stof die bij $56^\circ C$ overgaat in gasfase.

Het natuurlijk uranium (zoals het in de natuur voorkomt) is samengesteld uit drie isotopen: een bijzonder kleine fractie U-234, ongeveer $0,711\%$ $^{235}_{92}U$ en bijna 99% $^{238}_{92}U$. U-235 is splijtbaar, U-238 niet. Om nu een gecontroleerde kettingreactie op gang te brengen



Figuur 19. Kernreacties.

moet het gehalte aan U-235 van het uraniummengsel verhoogd worden tot 3 à 4%. Deze bewerking vindt plaats in een verrijkingsfabriek. Het verrijkt uranium (UF_6) gaat daarna naar een fabriek van splijfstofelementen, waar het omgevormd wordt tot UO_2 -tabletten. De splijfstoftabletten worden in een metalen structuur opgestapeld. De afgewerkte splijfstofelementen worden daarna afgevoerd naar de kerncentrale. Na een eventuele opslag worden ze in de reactor geladen.

Plutonium is ook een splijtbaar materiaal, maar het komt in de natuur uiterst zelden voor. Het ontstaat omdat sommige U-238-kernen een neutron opvangen en in $^{239}_{94}Pu$ veranderen (cf. figuur 19 en 3.2.7.4).

De energie die door het uranium geleverd wordt, ligt in de atoomkernen. Door de splijting van de U-235-kernen komt ze vrij. De splijting van de kernen gebeurt door beschieting met neutronen. De kernen vallen uiteen in meerdere splijtingsfragmenten en sturen op hun beurt neutronen uit. Deze kunnen nieuwe splijtingen veroorzaken.

Men spreekt van een gecontroleerde kettingreactie. Tijdens het splijtingsproces komt er een enorme warmte-energie vrij die aangewend wordt om water in stoom om te zetten (cf. figuur 19).

Als een deel van de splijtstof energetisch is uitgeput, worden de betrokken splijtstofelementen uit de reactor ontladen. Dit gebeurt in cyclussen van drie of vier jaar, waarbij na een jaar 1/3, respectievelijk 1/4 van de splijtstofelementen wordt vervangen. Na ontlading worden de splijtstofelementen naar een opslagbekken overgebracht om er gedurende meerdere jaren af te koelen. Tijdens de opslagperiode vervalt de radioactiviteit en de restwarmte in de gebruikte splijtstof geleidelijk. De structuur en de werking van een reactor worden uitgebreid beschreven in 3.2.7.1 en 4.1.1.

Na de definitieve ontlading bevat de splijtstof, die oorspronkelijk alleen uit uranium bestond, nog 96% uranium, 1% plutonium en 3% splijtingsproducten. Nadat de splijtstof voldoende is afgekoeld, bestaan er twee mogelijkheden:

- ofwel conditionering van de splijtstofelementen in verzegelde containers. Deze containers worden later als hoogradioactief afval geborgen (*open cyclus*);
- ofwel opwerking, met andere woorden: scheiding en terugwinning van het uranium en plutonium (*gesloten cyclus*), terwijl de niet meer bruikbare splijtingsproducten geconditioneerd worden met het oog op de definitieve berging ervan (cf. 2.2.4.3, 3.2.7.4 en 4.4.1). Opwerking is in feite een recyclageprocédé. Het principe van de opwerking wordt beschreven in bijlage 5.

De voordelen van opwerking zijn: besparing van natuurlijk uranium, gebruik van het door kernsplijting geproduceerd plutonium, besparing op de nodige energie voor uraniumverrijking, afscheiding, sortering en conditionering van de afvalstoffen.

Met het gerecycleerd uranium en plutonium kan een belangrijke hoeveelheid elektriciteit geproduceerd worden, terwijl men natuurlijke grondstoffen spaart. Het beheer van de afvalstoffen wordt gemakkelijker.

Men beweert dat plutonium bijzonder giftig is. Dat is juist, maar plutonium is niet giftiger dan andere zware metalen. De toxiciteit van plutonium wordt verder behandeld in bijlage 9.

Een kerncentrale produceert geringe hoeveelheden laagactieve vaste afvalstoffen. Laagactief afval wordt, in afwachting van definitieve berging, in containers opgeslagen. Bij de gesloten cyclus zijn de hoeveelheden hoogactief afval gering.

In tegenstelling tot fossiele brandstoffen wordt bij het gebruik van splijtstoffen noch koolzuurgas, noch stikstofdioxide, noch zwaveldioxide, noch stof geproduceerd. Slechts een kleine hoeveelheid radioactiviteit komt vrij in de lucht. Deze hoeveelheid is totaal verwaarloosbaar ten opzichte van de natuurlijke radioactiviteit (cf. 2.2.4.1 en 2.2.4.2).

De aangetoonde uraniumreserves (Ra) bedragen 31 Gtoe (basis 1995). Aan het huidige productieritme van 0,34 Gtoe/jaar volstaan deze reserves voor 92 jaar (cf. figuur 18). De basisreserves worden geschat op 149 Gtoe, de mogelijke reserves op 23.890 Gtoe (cf. figuur 8).

Het grote verschil tussen TP en TC wordt verklaard door het bestaan van aanzienlijke voorraden die in het verleden door de producenten en de consumenten werden aangelegd.

De juiste omvang van de aangelegde voorraden is moeilijk te bepalen, maar deze dekken ruimschoots het jaarlijks productiedeficit.

De levensduur van de uraniumreserves is bepaald op basis van het gebruik van reactoren van het LWR-type¹⁰ en de toepassing van een 'open cyclus'. Bij de toepassing van een 'gesloten cyclus' (opwerking) worden deze reserves aanzienlijk aangevuld door het gerecycleerd uranium en plutonium. Ook het militair plutonium kan voor elektriciteitsproductie worden gebruikt (cf. 4.5.2).

Er bestaan op dit ogenblik reusachtige reserves uranium onder de vorm van verarmd uranium (verrijkingsafval).¹¹ Dit verrijkingsafval bevat nog 0,2 à 0,3% splijtbaar U-235; de rest is niet-splijtbaar U-238.

Het gebruik van *kweekreactoren* kan de splijtstofreserves met een factor 50 à 60 doen toenemen. Deze reactoren kunnen op grote schaal uit het niet-splijtbaar U-238 splijtbaar plutonium produceren. Dit type reactor bestaat uit een UO₂-PuO₂-kern, omgeven door een axiale en radiale mantel, bestaande uit verarmd uranium, dat men kweekmateriaal noemt. Door absorptie van neutronen wordt het U-238 omgezet tot plutonium.

Kweekreactoren zijn in ontwikkeling of in bedrijf. In de wereld zijn er tien kweekreactoren in werking:

- vier experimentele reactoren: Rapsodie (Frankrijk), BR5 (Rusland), FBTR (India) en JOYO (Japan);
- vier demonstratiereactoren: Phénix – 250 MWe (Frankrijk), BOR 60 – 12 MWe (Rusland), BN 350 – 150 MWe (Kazachstan) en MONJU – 300 MWe (Japan);
- twee industriële prototypes: Superphénix – 1240 MWe (Frankrijk)¹² en BN 600 – 600 MWe (Rusland).

Een ander soort kweekreactor is in ontwikkeling: de reactor op hoge temperatuur (HTR – High Temperature Reactor) die Th-232 (thorium) in splijtbaar U-233 omzet. De thoriumreserves zijn minstens even groot als de uraniumreserves.

Kernfissiereactoren kunnen in feite voor verschillende eeuwen instaan voor de wereldelektriciteitsproductie.

2.1.4 | De kernfusie-energie

Onder de alternatieven voor kernsplijtingsenergie is er een die ook van nucleaire oorsprong is, dat wil zeggen: verbonden met een structurele transformatie van de atoomkernen, maar die opmerkelijk verschilt van de kernsplijtingsenergie: deze energievorm heet de (kern)fusie-energie.

Kernsplijtingsenergie en kernfusie-energie komen beide voort uit een transformatie van een bepaalde hoeveelheid materie in energie.

10. Lichtwaterreactoren (LWR): het gebruikte koelmiddel is (gewoon) water.

11. Afvaluranium na verrijking van de splijtstoffen.

12. Superphénix had in het verleden een aantal werkingsproblemen. De reactor is nu volledig operationeel. Door een zuiver politieke regeringsbeslissing (onder druk van de groene coalitiepartner) werd de reactor (definitief?) stilgelegd.

Bij de *productie van kernsplijtingsenergie* (cf. ook 2.1.3) komt de energie vrij tijdens het splijten (breken) van een kern van zeer zware elementen zoals $^{235}_{92}\text{U}$ en $^{239}_{94}\text{Pu}$. Deze splijtingsreacties komen vrij gemakkelijk tot stand door het 'absorberen' van een elementair deeltje, neutron genaamd, door een zware kern. Bovendien brengt de splijting twee of drie neutronen voort, die een kettingreactie kunnen onderhouden.

Bij de *productie van kernfusie-energie* komt de energie vrij tijdens de fusie (versmelten) van twee kernen met lichte elementen. Er vormen zich zwaardere elementen met stabiele kernen. Fusiereacties komen tot stand door het zeer hevig botsen van lichte kernen, veroorzaakt door een 'thermische agitatie' onder uiterst hoge temperaturen. Deze temperaturen komen voor in de sterren, waar fusie ontstaat die de nodige energie levert om de straling van het hemellichaam te onderhouden.

Deze temperaturen ontstaan eveneens tijdens de ontploffing van een kernsplijtbom, die een fusiereactie kan teweegbrengen van lichte kernen; oordeelkundig in de splijtingsbom aangebracht; dit is het principe van de waterstofbom.

Om een fusiereactie op gang te brengen moeten de kernen dicht bij elkaar gebracht worden. Dit gebeurt in een milieu dat zich op een zeer hoge temperatuur moet bevinden (100 miljoen °C). De grote moeilijkheden bestaan erin deze zeer hoge temperatuur te bereiken en te handhaven gedurende de nodige tijd. Bij een dergelijke temperatuur is het milieu gasvormig en volledig geïoniseerd. Het geïoniseerd gas noemt men 'plasma'.

Typische fusiereacties zijn:

- fusie tussen een deuterium- en tritiumkern (deuterium is een zwaar isotoop van waterstof in de natuur aanwezig; tritium is een kunstmatig nog zwaarder isotoop van waterstof);
- fusie tussen twee deuteriumkernen;
- fusie tussen een deuterium- en heliumkern.

Wanneer men erin zou slagen gecontroleerde fusie voort te brengen tussen deuteriumkernen of deuterium- en lithiumkernen, zou men beschikken over een virtueel onuitputtelijke energiebron, aangezien de fusie van deuterium vervat in een liter water een hoeveelheid energie produceert die overeenkomt met de verbranding van 300 liter aardolie. Vandaag weten wij echter nog niet met zekerheid of kernfusie in de nabije toekomst commercieel bruikbaar zal zijn.

2.1.5 | De hernieuwbare energiebronnen

De inzet van hernieuwbare energiebronnen zal in de toekomst een wezenlijke bijdrage moeten leveren tot het totstandkomen van een duurzaam energiebeleid om de toenemende vraag naar energie deels op te vangen.

De hernieuwbare energiebronnen zijn slechts beschikbaar op een welbepaald ogenblik: de zonne-energie overdag, de eolische (wind)energie wanneer er wind is, de hydraulische energie wanneer er neerslag valt; ofwel zijn ze door hun aard zelf gelokaliseerd, zoals bijvoorbeeld de hydraulische, geothermische, getijden- of eolische energie. Deze bronnen moeten noodzakelijkerwijze ter plaatse gebruikt worden, of de voortgebrachte energie moet omgezet worden in een vervoerbare vorm.

De energievraag doet zich meestal voor op een welbepaalde plaats en tijd. Het is dus niet altijd mogelijk met de meeste van deze hernieuwbare energiebronnen energie op te wekken op het moment dat de gevraagde energiehoeveelheid ter beschikking moet staan. De hernieuwbare energiebronnen kunnen vandaag bij uitstek aangewend worden voor kleinschalige gedecentraliseerde elektriciteits- of warmteproductie. De energieopslag blijft nog een groot probleem.

2.1.5.1 | De eolische of windenergie

Wind is een onuitputtelijke energiebron, maar is zeer onregelmatig. De windenergie is het belangrijkst langs de kusten, sterker in de winter dan in de zomer, overdag dan 's nachts. De aanwending van windenergie wordt sterk beïnvloed door micrometeorologische effecten (bijvoorbeeld in verband met de atmosferische gelaagdheid, het reliëf, de hindernissen, enzovoort), en de vestigingsplaats dient met kennis van zaken bepaald te worden.

Reeds lang installeert men generatoren op staartmolens om elektriciteit te produceren. De moderne windmolens (eoliennes) zijn heel duur en komen meestal in aanmerking voor plaatsen die niet aan het net gekoppeld zijn en regelmatig aan wind zijn blootgesteld. Het totaal eolisch piekvermogen in de wereld bedraagt vandaag 7.700 MW, waarvan 1.730 MW in de Verenigde Staten en 220 MW (416 windmolens) in Denemarken. De jaarlijkse wereldelektriciteitsproductie bedraagt ongeveer 13 TWh/jaar.

In België bestaat er een windmolenpark (23 windmolens) in de voorhaven van Zeebrugge met een piekvermogen van 5,4 MW. De gemiddelde afstand tussen de windmolens bedraagt 120 m. Het park bestrijkt een afstand van ongeveer 3 km. In Nederland zijn er verschillende windmolenparken in bedrijf.

Door haar afmetingen is een windcentrale met groot vermogen in België ondenkbaar. Om het vermogen van een grote thermische centrale te bereiken zou men een oppervlakte van 50 tot 100 km² bestrijken.

Voor België stellen wij ons de vraag wat het beschikbaar vermogen is van de windenergie in de verschillende delen van het land en hoe dit uitgebaat kan worden door kleine maar talrijke windgeneratoren.

2.1.5.2 | De zonne-energie

De zon zendt enorme hoeveelheden energie in de ruimte onder de vorm van elektromagnetische straling. Deze energie is afkomstig van kernreacties. De kernreacties stemmen overeen met een onafgebroken massaverlies van het hemellichaam. Op menselijk vlak en wat ons betreft kunnen wij de uitgezonden zonnestraling beschouwen als stabiel en onafgebroken.

De aarde onderschept slechts een zeer klein gedeelte van de globaal uitgezonden straling. De intensiteit van de ontvangen straling, aan de grenzen van de atmosfeer, varieert zeer lichtjes in de loop van het jaar als gevolg van de verandering van de afstand aarde-zon. Vooraleer de grond te bereiken wordt de straling gevoelig verzwakt.

De zonne-energie is in tegenstelling tot andere energiebronnen tamelijk gelijkmatig verdeeld over de planeet.

Om gebruikt te worden, moet zonne-energie omgezet worden, hetzij in de vorm van thermische energie van een technische vloeistof (water, lucht, ...), hetzij in de vorm van elektriciteit, hetzij onder een chemische vorm.

De opslag van warmte en energie is bij zonne-energie een zeer belangrijk probleem. Enerzijds zijn de verbruiksuren onafhankelijk van de periodes van zonneshijn, anderzijds is de vraag meestal maximaal wanneer de zonneshijn nul ('s nachts) of beperkt (winter) is.

Het meest gebruikte opslagsysteem is het verzamelen van warm water in een geïsoleerd reservoir. Deze technologie staat op punt en wordt grootschalig gebruikt in Turkije. Daar worden de collectoren op het dak van de woningen geplaatst. Turkije is een door de zon verwend land.

De huidige zonnecollectoren die in woningen ingebouwd zijn, laten tegenwoordig toe, zelfs in onze streken, warm water voor het huishouden te produceren, zij het alleen tijdens de dag en de zomerperiode. De woningen kunnen eveneens verwarmd of gekoeld worden. De warmte die de collectoren verlaat, kan met behulp van een absorptiekoelmachine worden omgezet in koelte. Vermits de vraag aan koelte het grootst is gedurende de periode van maximale zonneshijn, bevindt klimaatregeling via de zon zich in een veel gunstiger positie dan alleen verwarming.

Dit nog zeer dure systeem kan als aanvulling dienen en zou in de komende decennia een deel van de huidige verbruikte brandstof kunnen vervangen. De verdere ontwikkeling van het systeem is nodig om het economisch leefbaar te maken.

De thermische (verwarming) zonne-energieproductie in de wereld bedraagt vandaag 0,40 Mtoe/jaar.

Een andere soort zonnecollector, fotonvoltaïsche cel genoemd, laat de rechtstreekse omzetting van zonne-energie in elektriciteit toe.

Twee types zonnecellen zijn thans in gebruik, siliciumcellen (Si) en cadmiumsulphidecellen (CdS). Het huidige rendement van de gecommercialiseerde Si-cellen ligt ongeveer rond de 13%. Het rendement van CdS-cellen is lager. Nieuwe cellen zijn in ontwikkeling. Omwille van hun hoge kostprijs worden zonnecellen tot nu toe alleen gebruikt daar waar economische hinderpalen te verwaarlozen zijn. Als voorbeeld vermelden we de elektriciteitsvoorziening van kunstsatellieten, meteostations, radio- of televisiestations in gebieden zonder energiestructuur.

Om het vermogen van een grote thermische centrale te bereiken (1.000 MW) zou een oppervlakte van 25 tot 50 km² bestreken moeten worden met zonnecollectoren. Dit is mogelijk in grote woestijngebieden, maar niet in onze streken.

Er bestaan enkele zonnecentrales in de wereld: Zuid-Californië (10 MW), Serre /Italië (3,3 MW) (deze centrale beslaat een oppervlakte van 7 hectaren), Spaanse hoogvlakte bij Toledo (1 MW), Krim (5 MW). De totale capaciteit van de zonnecentrales in de wereld bedraagt vandaag 300 MW (0,3 TWh/jaar).

Andere technieken om zonne-energie om te zetten in elektriciteit zijn in ontwikkeling, zoals de thermo-elektrische en thermo-ionische omzetting. Deze technieken bevinden zich nog in het laboratoriumstadium.

Een bijzondere vorm om zonne-energie op te slaan is de 'biomassa'. In feite leeft de aardse biomassa al drieënhalve miljard jaar passief van zonne-energie. De zonne-energie wordt door fotosynthese opgenomen door planten en gewassen. Men kan de energie terugwinnen ofwel via plantaardig en dierlijk afval afkomstig van landbouwkundige activiteiten,

ofwel door directe conversie uitgaande van geselecteerde aanplantingen met een snelle vernieuwing zoals rietsuiker en maniok. In onze streken bedraagt het energetisch rendement van de vegetatie slechts 1%.

De energieproductie in de wereld door (commerciële) biomassa bedraagt vandaag 100 Mtoe/jaar.

In Brazilië, waar men beschikt over enorme bebouwbare oppervlakten, produceert men grote hoeveelheden methanol gewonnen uit suikerriet.

Om het vermogen van een grote thermische centrale te bereiken (1.000 MW) zou een oppervlakte van 3.000 à 5.000 km² met biomassa aangeplant moeten worden.

Vanuit plantaardig en dierlijk afval kan men methaangas en meststoffen van hoge kwaliteit produceren.

2.1.5.3 | De hydraulische energie

■ De witte steenkool

De natuurlijke waterlopen verstrooien de energie die zij inhouden in de vorm van warmte. De mens kan deze warmte terugwinnen door ze om te vormen tot mechanische energie met behulp van watermolens of – beter – dankzij hydraulische turbines of waterturbines. Een alternator, aangedreven door de turbine, zet de mechanische energie om in elektrische energie.

Wij onderscheiden:

- de *stuwdammen* die met hun opwaarts stuwmeer een sterk peilverschil scheppen. Ze worden aangebracht in het hogergelegen gedeelte van hydrografische bekkens waar de debieten betrekkelijk klein zijn.
- de *stuwen op vlakterivieren*: ze beschikken meestal over een aanzienlijk debiet maar vertonen een klein verval. Het debiet van een waterloop verandert weinig van het ene uur naar het andere maar daarentegen varieert het sterk in de loop van het jaar. Voor de aanpassing van het debiet aan het verbruik worden waterspaarbekkens aangelegd. Ze laten toe een gedeelte van het water op te slaan in periodes met laag verbruik of in periodes waarin veel water voorkomt, waarna het opgeslagen water opnieuw gebruikt kan worden tijdens de uren met sterke vraag of bij een klein natuurlijk waterdebiet.

De geschiktste natuurlijke plaatsen bevinden zich ofwel op grote stromen, ofwel afwaarts van grote natuurlijke of kunstmatige meren tot stand gebracht door stuwdammen. Tegenwoordig wordt minder dan 20% uitgebaat van het bruto hydro-elektrisch wereldpotentiaal. In België zijn de mogelijkheden zeer klein, omdat de vervallen en de debieten weinig belangrijk zijn.

De technologie van grote hydraulische centrales is ver gevorderd. De omvorming van de energie gebeurt met een zeer hoog rendement (ongeveer 85%).

De bijdrage van witte steenkool zal in het geheel van de geïndustrialiseerde landen in de toekomst een dalend verloop kennen, daar in deze landen de geschikte natuurlijke plaatsen reeds op een passende wijze werden uitgerust. De hydraulische elektriciteitsproductie in de wereld bedraagt vandaag 2.500 TWh/jaar.

■ De getijkrachtcentrales

Het principe is als volgt: men schept een waterbekken door een estuarium of een baai te isoleren van de zee door middel van een dam of waterkering. De schommelingen van het waterpeil, ten gevolge van het getijverschijnsel, worden benut om opeenvolgend het bekken te vullen en te ledigen met een stelsel van turbines en kleppen.

Gunstige plaatsen voor getijkrachtcentrales werden onder meer gevonden in Canada, Groot-Brittannië, Frankrijk, Australië.

De getijkrachtcentrale van de Rance in Frankrijk (Baai van de Mont Saint-Michel) is tot nu toe de enige verwezenlijking van grote omvang. Deze centrale ontwikkelt een vermogen van 240 MW en produceert gemiddeld 544 GWh/jaar. Ze geeft volledige voldoening. Deze technologie heeft haar sporen verdiend. Wij stellen echter vast dat de landen die de meest geschikte plaatsen bezitten, vandaag nog geen voorzieningen hebben getroffen om deze technologie te gebruiken.

Indien men bijvoorbeeld een getijkrachtcentrale van 1.000 MW zou bouwen langs onze kust, dan zou men die centrale moeten bouwen op een dijk die Westende met Westkapelle verbindt.

De menselijke activiteiten zijn afgestemd op de zonnecyclus en de getijden op de maancyclus; deze dagelijkse tijdverschuiving van ongeveer één uur bemoeilijkt de uitbating van een getijkrachtcentrale. Daarenboven doet de halfmaandelijke periode van de lunisolaire verschijnselen het rendement van de centrale op een nadelige wijze schommelen tussen springtij en doodtij.

■ Energie uit zeedeining

De zee is een eolische machine die de energie van de wind in hydraulische energie omzet. De schommelingen van het wateroppervlak zijn te wijten aan de energie van de wind. Enkele geschikte plaatsen voor deze energie bestaan langs de Atlantische kust van Afrika en aan de Middellandse Zee. In België is deze energievorm niet toepasselijk.

■ Energie door zeestromingen

De energie van de zeestromingen kan ook worden opgevangen door generatoren die overeenkomst vertonen met aërogeneratoren (eolische generatoren, windmolens). Door de beweging van de wateren worden schroeven in werking gesteld die op hun beurt een alternator aandrijven die elektrische stroom voortbrengt. Enkele geschikte plaatsen zijn de Cap de la Hague in Frankrijk en de Beneden-Congo bij Matadi. Tot nu toe bestaat er geen enkele verwezenlijking.

2.1.5.4 | De geothermische energie

De aarde is een warmtereservoir. De temperatuur van onze planeet neemt met de diepte toe. Er bestaat dus een geothermische gradiënt die van plaats tot plaats verschilt en zelfs volgens de diepte. Op 2.000 à 3.000 meter diepte kan de temperatuur waarden bereiken van 50 tot 300°C. De moeilijkheid schuilt in de ontginning van de warmte.

In sommige vulkanische gebieden, waar de gloeiend hete, vloeibare aardmassa (magma) aan het aardoppervlak raakt en stoom uit de bodem komt (bijvoorbeeld in Noord-Italië,

IJsland en Japan), is elektriciteitsproductie mogelijk. De dampen bevatten meestal zwavel en andere chemische stoffen, waardoor het milieuevenwicht verstoord wordt.

Heden ten dage overweegt men ook de exploitatie van aardwarmte buiten vulkanische gebieden door gaten van verschillende duizenden meters diepte te boren; in hete rotsen zou water gepompt worden dat in de vorm van stoom opnieuw de oppervlakte zou bereiken.

De geïnstalleerde vermogens nemen snel toe in de geothermische gebieden die al verkend zijn en in tal van landen wordt de prospectie actief voortgezet.

In Californië is een vermogen van 500 MW geïnstalleerd, in Italië 400 MW, in Nieuw-Zeeland 140 MW. Het totaal geïnstalleerd vermogen bedraagt vandaag 7.000 MW (40 TWh/jaar). In IJsland wordt 80% van de bevolking verwarmd door middel van aardwarmte.

Geothermische energie vereist echter zware aanvangsinvesteringen en er zijn ook geologische risico's aan verbonden.

2.1.5.5 | Mogelijke hinderpalen bij het gebruik van hernieuwbare energiebronnen

De hernieuwbare energiebronnen zullen een steeds belangrijkere plaats innemen. De technische hinderpalen, de economische implicaties en de milieubelasting mogen echter niet onderschat worden. De technisch-wetenschappelijke hinderpaal is het bekomen van een positieve energiebalans. De milieuhinderpalen zijn:

- stuwdammen wijzigen drastisch het hydrologisch stelsel en worden meestal aangevochten door de bevolking;
- windmolens scheppen, naast hun laag rendement, grote hinder (microklimaat, geluidshinder);
- getij-motorische centrales verstoren sterk het ecosysteem van de baai;
- zonnecentrales op grote oppervlakten wijzigen het thermisch evenwicht van de atmosfeer;
- geforceerde extensieve biomassa leidt tot zware milieubelasting.

2.1.6 | De vraag naar energie in de toekomst: prognoses

De vraag naar energie in de toekomst is afhankelijk van de technologische vooruitgang, de economische groei en de toename van de wereldbevolking. In figuur 20 worden verschillende scenario's voor de bevolkingsaan groei weergegeven (Wereldbank, VN, IPCC, CNRS, Justitia et Pax).¹³

In deze studie werken we ter illustratie het scenario van de Wereldbank-Median uit. Dit scenario wordt meestal als basis gebruikt bij het opstellen van prognoses. Prognoses zijn echter speculatief. De resultaten kunnen slechts als indicatief beschouwd worden.

De werkhypotheses zijn:

- *bevolkingsaan groei: scenario Wereldbank-Median* (cf. figuur 21);

13. Stel dat het wereldgeboortecijfer gelijk is aan dat van het Westen (1,7/1.000), dan zou de wereldbevolking in 2050 en 2150 respectievelijk 7,8 en 4,3 miljard bedragen.

- een matige economische groei;
- een continu groeiende afname van de energie-intensiteit;
- een belangrijke technologische vooruitgang (zeker wat de duurzame hernieuwbare energiebronnen en kernenergie betreft).

Het werkmodel wordt in tabel 1 samengevat. Het basisreferentiejaar is 1995.

Tabel 1. | Beschrijving van het werkmodel.

Periode	1995 - 2100
Demografische evolutie	5,7 miljard inwoners in 1995 8,1 miljard inwoners in 2020 10,2 miljard inwoners in 2050 12,1 miljard inwoners in 2100
Gemiddelde economische groei	2,1% per jaar
Gemiddelde evolutie van de energie-intensiteit	- 0,8% per jaar
Primaire energieconsumptie	8,14 Gtoe in 1995 13,36 Gtoe in 2020 23,00 Gtoe in 2050 33,02 Gtoe in 2100

De geografische demografische evolutie wordt weergegeven in figuur 21, het BNP in figuur 22, de energie-intensiteit per regio in figuur 23, de primaire energieconsumptie per regio in figuur 24, per capita in figuur 25, de gecumuleerde primaire energieconsumptie per energiebron voor de periode 1995-2100 in figuur 26.

De procentuele primaire energieconsumptiemix voor de verschillende periodes wordt weergegeven in tabel 2 en figuur 27, de procentuele primaire energieconsumptie per regio in figuur 28, de elektriciteitsconsumptie in figuur 29.

Tabel 2. | Procentuele primaire energieconsumptiemix.

Jaar	Kolen %	Aardolie %	Aardgas %	Kernenergie %	Hernieuwbare energiebronnen %
1995	31,0	35,0	21,0	6,0	7,0
2020	22,7	28,2	22,3	5,9	20,8
2050	17,8	18,6	20,7	15,0	28,0
2100	10,3	11,0	11,7	28,0	39,0

Het jaar van uitputting van de aangetoonde (Ra) en de basisreserves (Rb) voor het beschouwde scenario wordt weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. | Jaar van uitputting van de aangetoonde en basisreserves.

Basis 1995	Aardolie	Aardgas	Kolen	Uranium ¹⁴
Aangetoonde reserves (Ra)	2032	2037	> 2100	2027
Basisreserves (Rb) ¹⁵	2071	> 2100	verschillende eeuwen	2063

Op basis van de aangetoonde reserves en de energieconsumptie volgens het beschouwde scenario hebben we voor minder dan een halve eeuw energiereserves. Wanneer wij de waarschijnlijke reserves in rekening brengen, wordt het iets minder dan een eeuw.

In het jaar 2020 zullen de hernieuwbare energiebronnen en kernenergie samen meer dan de helft van de elektriciteitsproductie voor hun rekening nemen, meer dan 75% in 2050 en bijna de totaliteit in 2100.

Men stelt vast dat de energie-intensiteit wereldwijd zal afnemen: 0,31 in 1995, 0,20 in 2050 en 0,14 in 2100. Deze afname is het gevolg van de economische en sociale ontwikkeling in de derdewereldlanden en een toenemend rationeel energiegebruik.

2.1.7 | Evaluatie

Vandaag nemen de fossiele brandstoffen de belangrijkste plaats in op het vlak van de energievoorziening. Deze brandstoffen zijn niet onuitputtelijk en bovendien ongelijkmatig verdeeld.

Het gebruik van aardolie zou in de toekomst zoveel mogelijk beperkt moeten worden tot de petrochemische industrie, waar zij als grondstof praktisch niet te vervangen is.

De kolenreserves kunnen nog enkele eeuwen bijdragen tot de energievoorziening, maar de verbranding van kolen is bijzonder milieubelastend. Ook hier dringt zich een gebruiksbeperking op.

De uraniumvoorraden zijn begrensd, maar afhankelijk van de gebruiksopties kunnen de splijtstofvoorraden op een significante wijze uitgebreid worden (zelfs met een factor 50 à 60 bij het gebruik van kweekreactoren). De thoriumcyclus moet ook in aanmerking komen, want de thoriumreserves zijn even omvangrijk als de uraniumreserves. De splijtstoffen met inbegrip van thorium (cf. 2.1.3) kunnen in de toekomst een belangrijke rol spelen in de elektriciteitsproductie.

Door het zeer snel stijgende energiegebruik zullen de aardolie- en aardgasreserves binnen afzienbare tijd uitgeput zijn.

Het is wenselijk dat in de toekomst hernieuwbare energiebronnen als substitutie-energie een steeds belangrijkere rol toebedeeld krijgen om de toenemende wereldenergievraag op

14. Open cyclus. Bij een gesloten cyclus zijn de reserves voldoende om aan de vraag te voldoen tot na het jaar 2100. De ontwikkeling van nieuwe reactortypes zal in de toekomst ook bepalend zijn. Met het gebruik van kweekreactoren kunnen de splijtstofreserves met een factor 50 à 60 toenemen. Ook de thoriumcyclus (reactoren van het HTR-type) moet in aanmerking komen. De thoriumreserves zijn even omvangrijk als de uraniumreserves.

15. Wij gaan ervan uit dat vanaf het jaar 2030, dankzij de verwachte technologische vooruitgang, de aangetoonde reserves gelijk zullen zijn aan de basisreserves.

te vangen. We hebben nu de opgave al het nodige te doen om een duurzame ontwikkeling van deze energievorm mogelijk te maken.

Kernenergie kan wezenlijk bijdragen tot de energiebevoorrading, in het bijzonder voor de elektriciteitsproductie. Het zou niet redelijk zijn deze energiebron uit te sluiten. Kernenergie wordt in 3.2.7 en 4. uitvoerig behandeld.

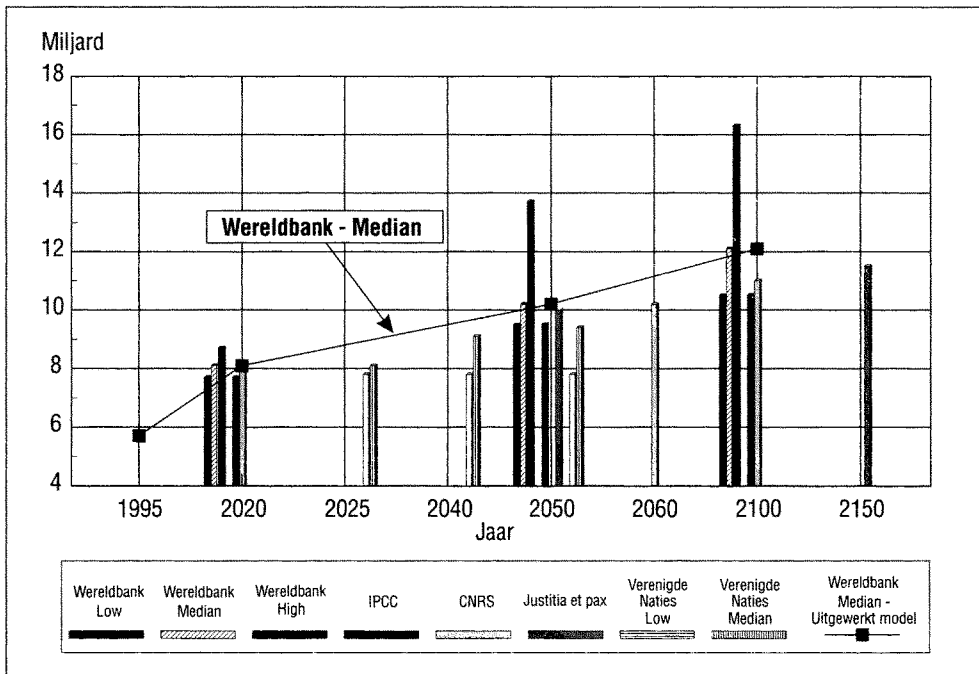
Niettemin is er een verdere investering nodig in de aardolie- en aardgasprospectie en in de ontwikkeling van geperfectioneerde en veilige ontginningstechnieken.

Onze energievraag mag de energiebevoorrading van de toekomstige generaties niet in gevaar brengen. Deze generatie moet de huidige energieproblemen oplossen en het nodige onderzoek verrichten en investeringen doen om problemen niet af te wentelen op de toekomstige generaties. Zonder verwijl moeten we energie rationeel gebruiken: het is de *ethische plicht van onze generatie*. Want energieschaarste betekent economische teruggang en armoede.

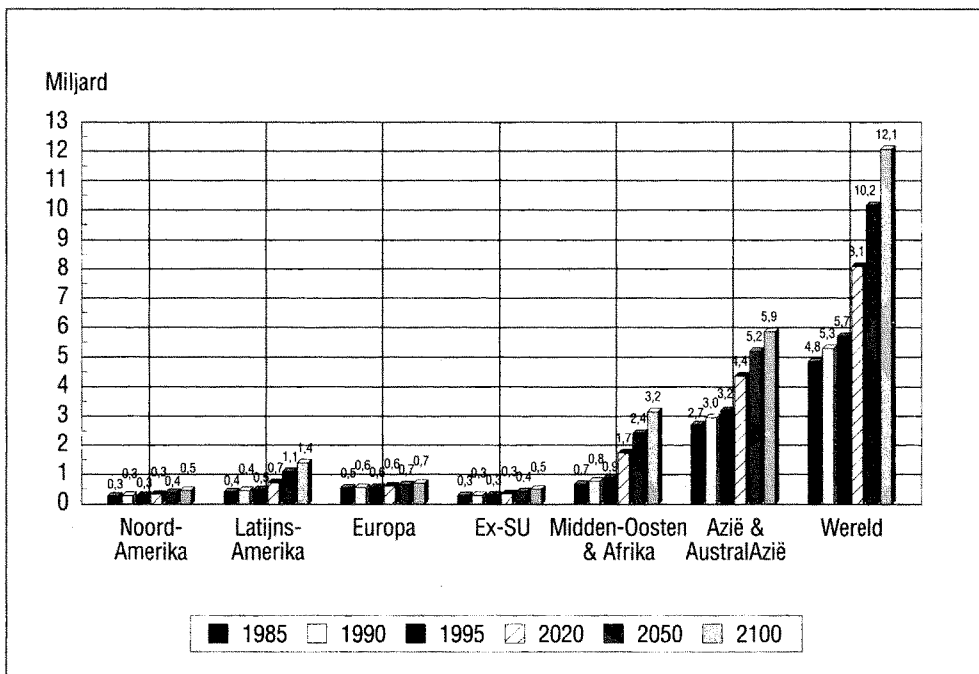
Het wordt hoog tijd dat we ons energiebeleid richten op een krachtig programma inzake energiebesparing en rationeel energiegebruik. De nationale overheden moeten financiële aanmoedigingsmaatregelen treffen om de pay-back van de energiebesparende investeringen te verbeteren, om hulp te bieden bij de introductie van nieuwe technologieën en bij de uitbouw van een dienstverlening die specifiek gericht is op rationeel energiegebruik en energiebesparingen.

Rationeel energiegebruik betekent zuinig en efficiënt omspringen met energie en systematisch zoeken naar de optimale benutting ervan. Zuinig of spaarzaam omspringen met energie betekent niet dat we aan levenskwaliteit moeten inleveren. Het gaat hier hoofdzakelijk om een oordeelkundige aanwending van energie. Efficiënt betekent dat we méér moeten halen uit de gebruikte energiebron, maar ook dat we, rekening houdend met de geografische mogelijkheden en de lokale omstandigheden, de energievorm aanspreken die het best geschikt is voor een bepaalde toepassing. Energie rationeel gebruiken is ieders verantwoordelijkheid, het is een primaire doelstelling voor nu en later.

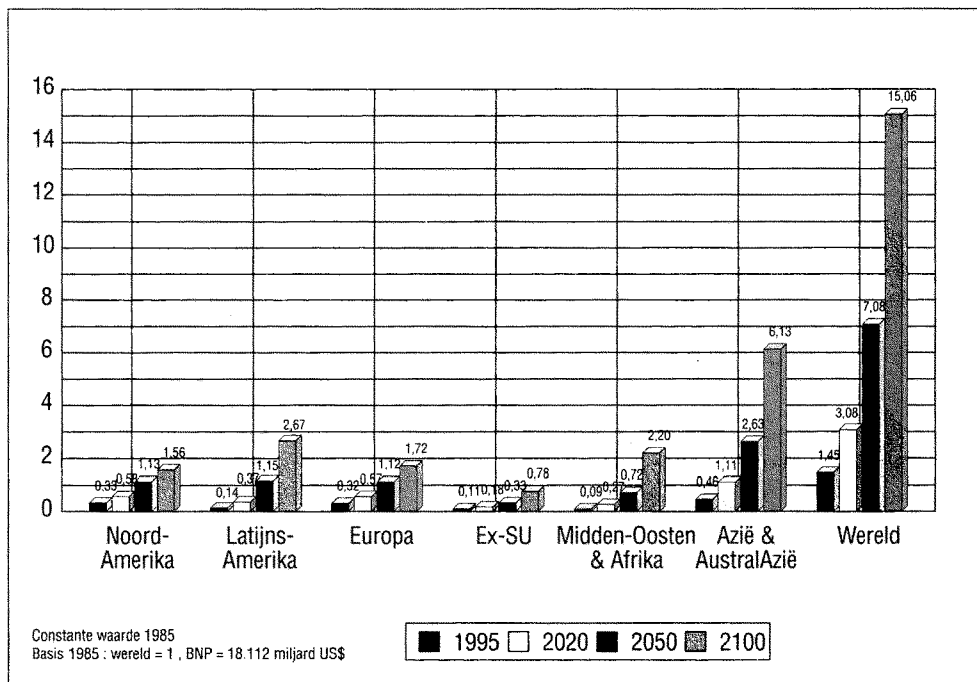
Energie heeft ook een ecologische dimensie. Ecologisch gezien moeten we het leefmilieu zoveel mogelijk vrijwaren. De impact op het milieu en de mens van iedere energiebron wordt in de volgende sectie behandeld.



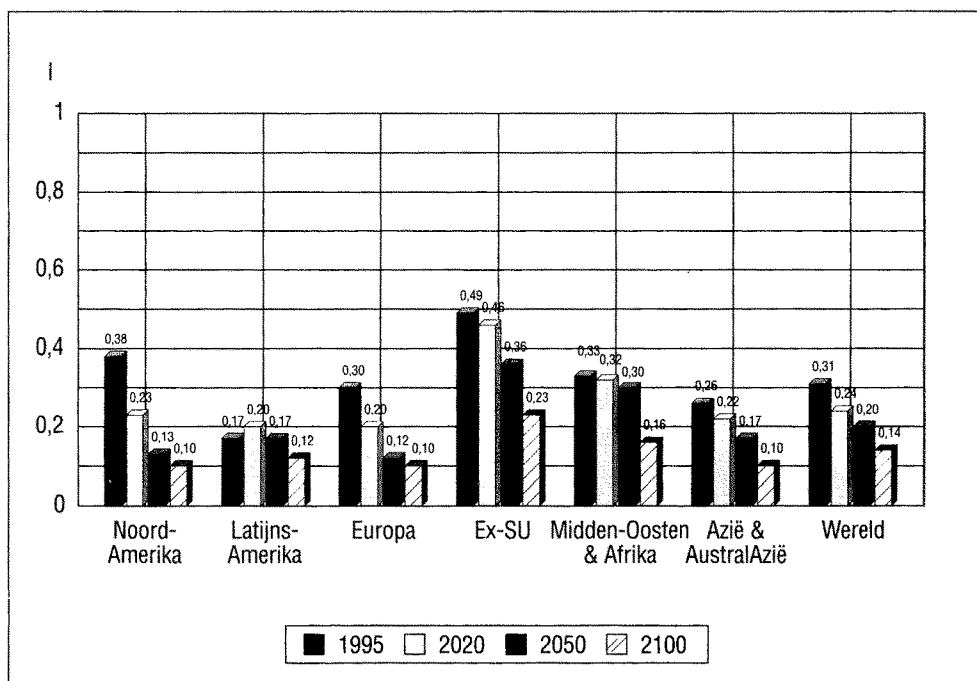
Figuur 20. Evolutie van de wereldbevolking – scenario's.



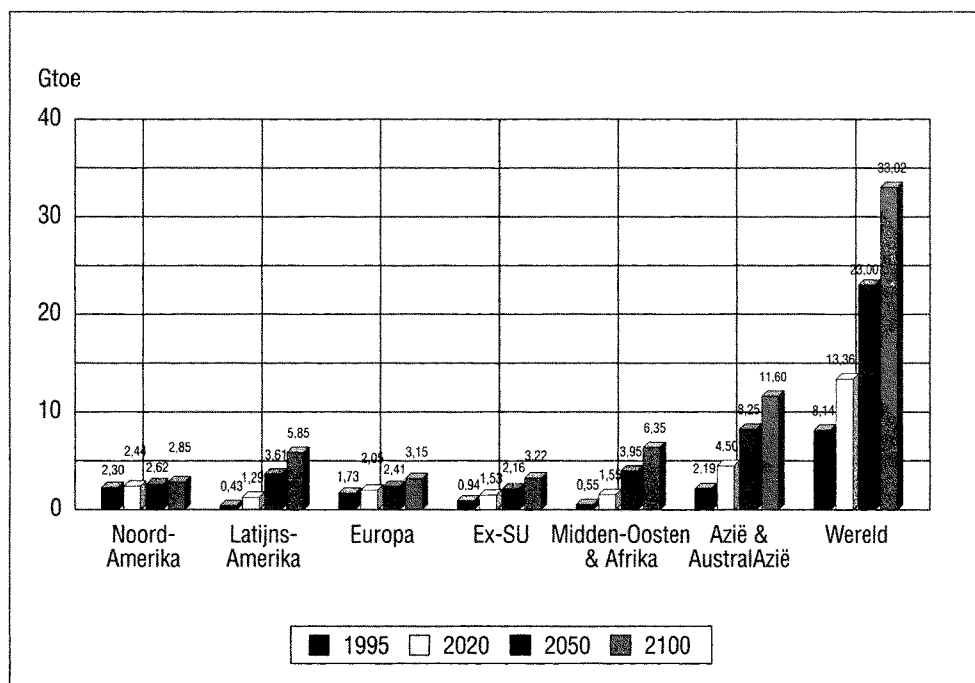
Figuur 21. Geografische demografische evolutie van de wereldbevolking – scenario Wereldbank-Median.



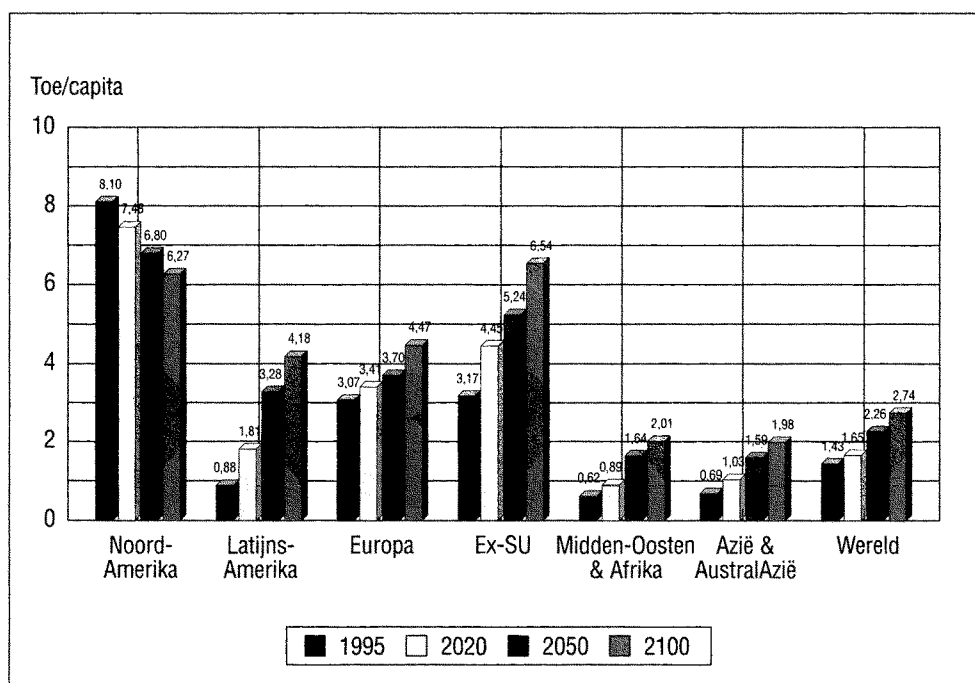
Figuur 22. | Bruto nationaal product – prognoses.



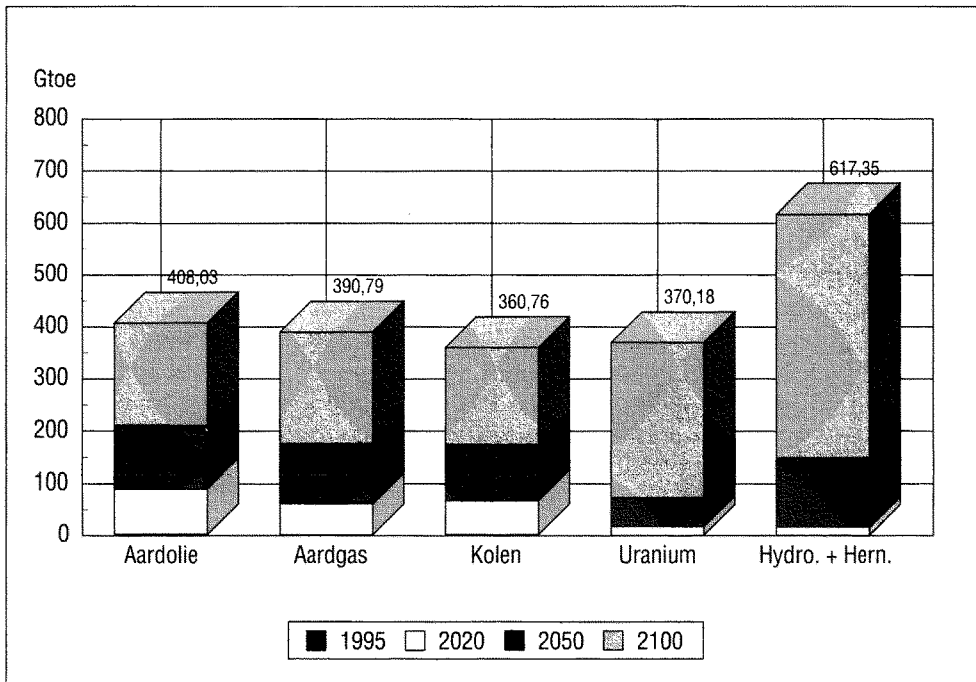
Figuur 23. | Energie-intensiteit per regio – prognoses.



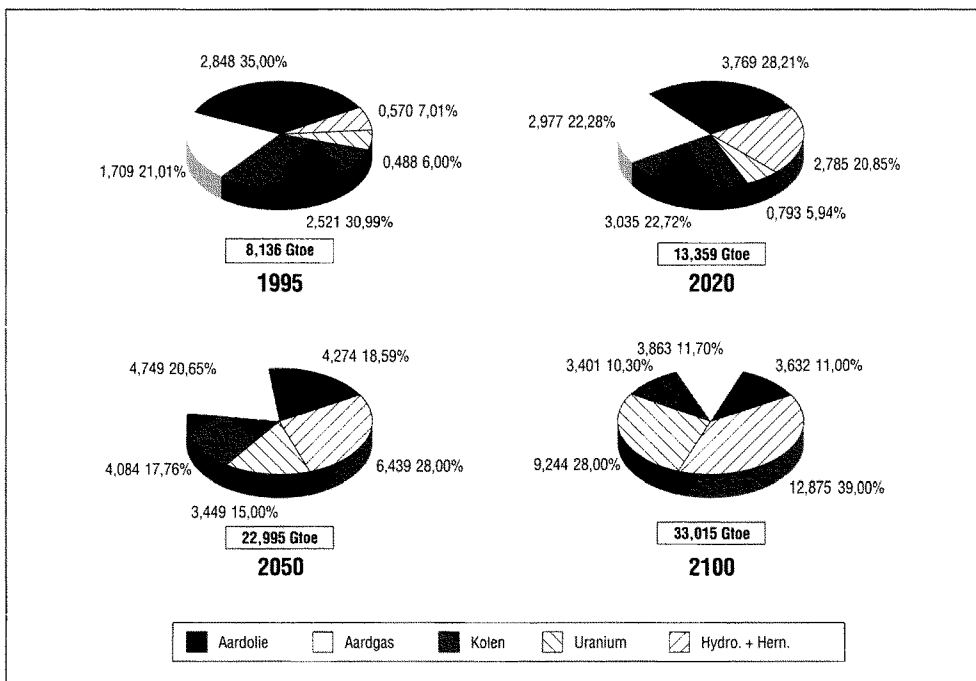
Figuur 24. Primaire energieconsumptie per regio (Gtoe) – prognoses.



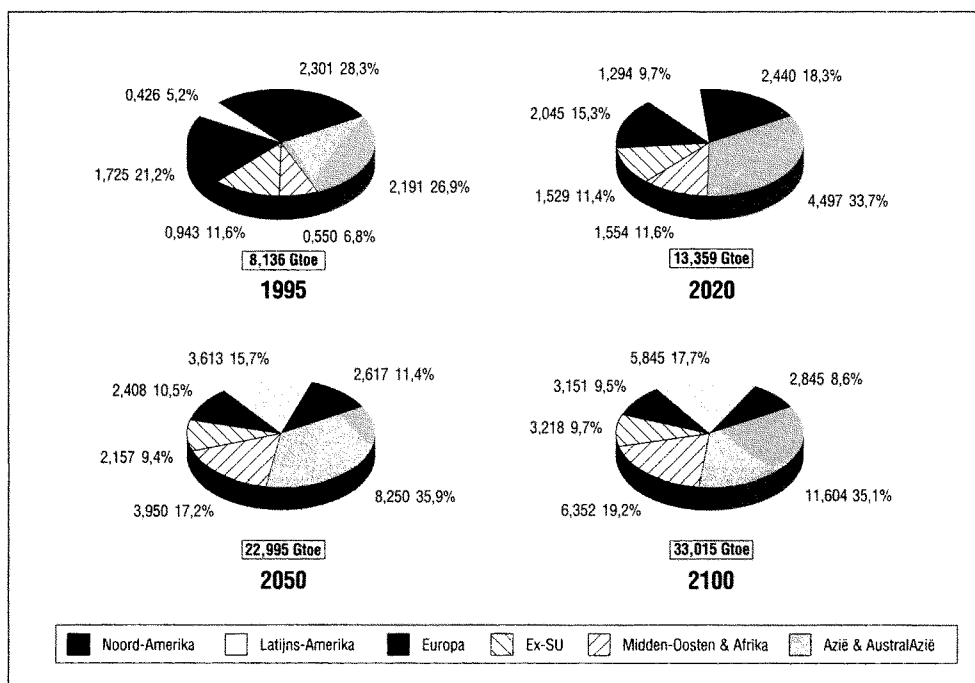
Figuur 25. Primaire energieconsumptie per capita (toe) – prognoses.



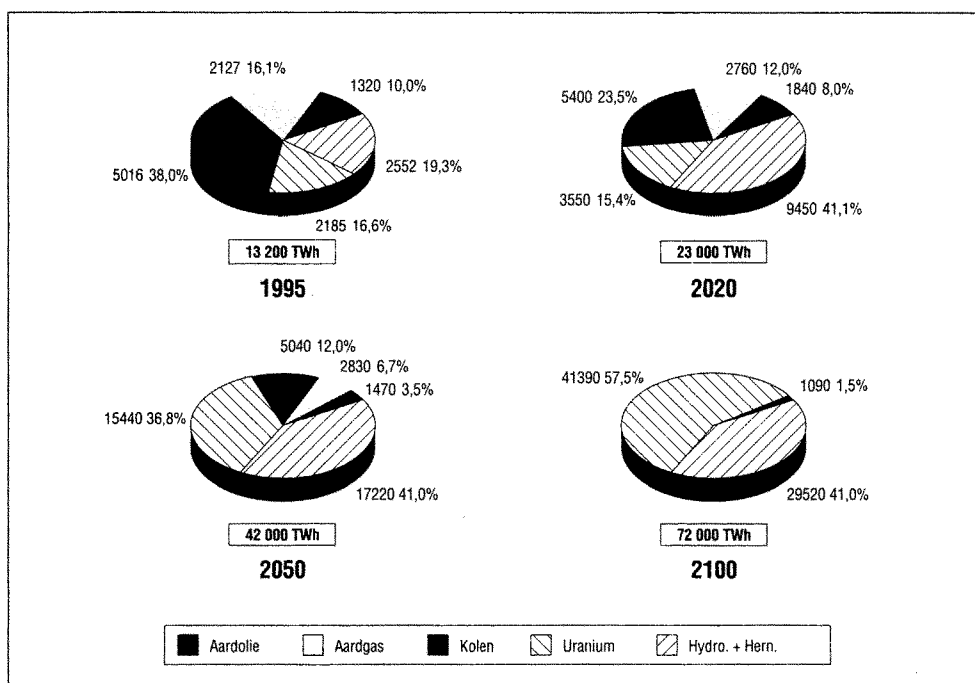
Figuur 26. Gecumuleerde primaire energieconsumptie per energiebron (Gtoe) – prognoses (1995-2100).



Figuur 27. Primaire energieconsumptie op wereldvlak (Gtoe, %) – energiemix – prognoses.



Figuur 28. Primaire energieconsumptie per regio (Gtoe, %) – geografische spreiding – prognoses.



Figuur 29. Elektriciteitsconsumptie op wereldvlak (TWh, %) – energiemix – prognoses.

2.2 Energie en milieu: de milieueffecten

Energie en milieu zijn nauw met elkaar verweven. De meeste milieuproblemen vinden hun oorsprong, rechtstreeks of onrechtstreeks, in de productie en het gebruik van energie. De negatieve milieueffecten ten gevolge van het gebruik van energie komen niet enkel voor in water, lucht en bodem, zij vormen tevens een bedreiging voor onze atmosfeer.

De huidige energievoorziening in de wereld is hoofdzakelijk gebaseerd op het gebruik van fossiele energiedragers. De verbranding ervan vormt een zware belasting voor de omgevingslucht: de hoofdelementen van de brandstof, koolstof (C) en waterstof (H), reageren met zuurstof (O₂) en waterdamp (H₂O). Ook de stikstof (N) aanwezig in de lucht wordt tijdens het verbrandingsproces geoxideerd tot stikstofoxide (NO_x). Indien de brandstof zwavel bevat, wordt er tevens zwaveldioxide (SO₂) gevormd. De gasvormige restproducten CO₂, NO_x en SO₂ zijn de belangrijkste milieuvveruilers verbonden aan het gebruik van fossiele energiedragers.

Bij het gebruik van kernenergie is de belangrijkste factor het vermijden van de verspreiding van radioactieve stoffen in het leefmilieu en de hierbij gepaard gaande straling. De hinder veroorzaakt door de hernieuwbare energiebronnen (windenergie, zonne-energie,...), is meestal van visuele aard wegens de grote landoppervlakte die zij in beslag nemen.

De voornaamste probleemvelden tussen energie en milieu zijn:

- het broeikaseffect, veroorzaakt door de accumulatie in de atmosfeer van een reeks schadelijke gassen, waaronder voornamelijk CO₂, met als gevolg dat de warmtebalans op aarde verstoord wordt en er klimaatsveranderingen optreden;
- de verzuring van het leefmilieu, voornamelijk te wijten aan de lozing van zwavel- en stikstofverbindingen (zure regen);
- de aantasting van de kwaliteit van de omgevingslucht in de steden, rond de industriegebieden en langs de belangrijke verkeersaders (SO₂, NO_x, stofdeeltjes, vluchtige organische verbindingen, CO, zware metalen, enzovoort);
- straling door radioactieve emissies;
- de productie van vloeibare en vaste afvalstoffen.

2.2.1 Het broeikaseffect

De zonnestraling die invalt op de aarde, wordt deels weerkaatst en deels opgenomen door de opeenvolgende lagen van de atmosfeer en door de aarde zelf. De chemische samenstelling van de atmosfeer is van cruciaal belang voor de wijze waarop de opgenomen warmte kan worden uitgestraald in het heelal. Sedert 4 miljard jaar is de chemische samenstelling van onze atmosfeer onveranderd gebleven.

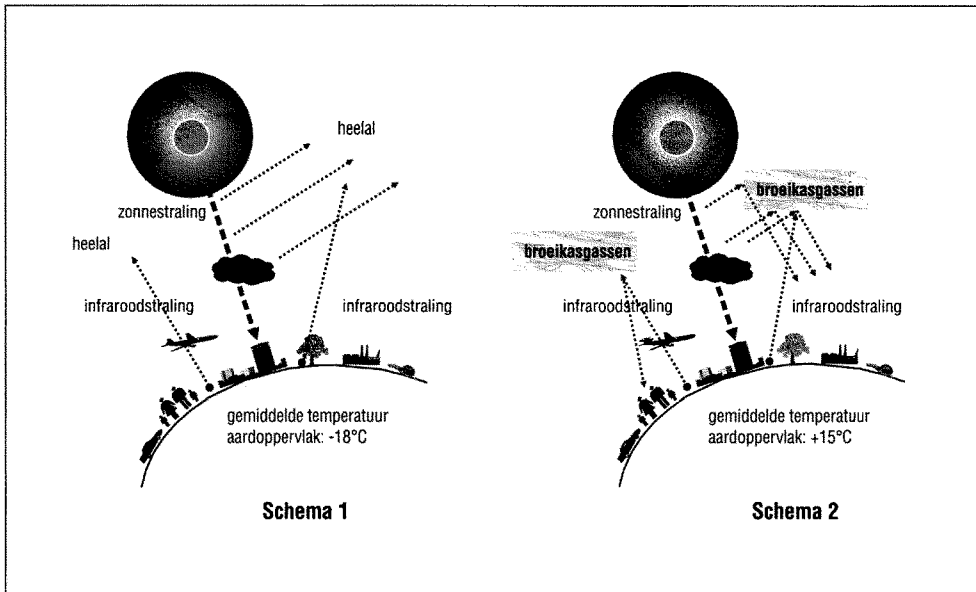
Door de zonnestraling ontvangt elke vierkante meter van de aarde 342 Joule/sec (342 Watt). 105 W/m² van deze 342 W/m² worden naar de ruimte weerkaatst en dragen dus niet bij tot het totstandkomen van het klimaat op aarde. Er blijven bijgevolg 237 W/m² over, die zouden worden opgeslorpt door het aardoppervlak indien er geen atmosfeer was.

Vermits het aardoppervlak een zwart lichaam is, zendt het een energie uit die afhangt van zijn temperatuur. Het oppervlak van de aarde straalt een energie uit in het infrarood.

Omdat nu bij evenwicht de opgeslorpte energie (237 W/m^2) gelijk is aan de afgegeven energie, heeft men:

$$\sigma T_e^4 = 237 \text{ W/m}^2 \quad \begin{array}{l} \sigma = \text{constante van Stéfan-Boltzmann} = 5,66 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} (\text{K})^{-4} \\ T_e = \text{de temperatuur in K}^{16} \text{ van de aarde zonder atmosfeer.} \end{array}$$

De mathematische uitwerking van deze vergelijking levert een T_e op van 255 K of -18°C , wat ver beneden de temperatuur van het aardoppervlak ligt, namelijk $+15^\circ\text{C}$ (cf. figuur 30). Het verschil tussen beide, 33°C , concretiseert het belang van de atmosfeer op aarde.



Figuur 30. | Het broeikaseffect.

We maken eenzelfde soort berekening, ditmaal op de atmosfeer en haar stralingseigenschappen. De 237 W/m^2 zullen nu geabsorbeerd worden én door de atmosfeer én door het oppervlak: 68 W/m^2 dienen om de atmosfeer direct op te warmen, de overige 169 W/m^2 worden opgeslorpt door het oppervlak. Vermits de energie uitgestraald door het oppervlak afhangt van de vierde macht van zijn temperatuur (288 K of 15°C), straalt dit oppervlak 390 W/m^2 uit. Anderzijds leert het energetisch evenwicht van de gehele aarde ons dat de 237 W/m^2 die ze absorbeert terug moet stralen. Vermits nu het oppervlak 390 W/m^2 uitstraalt en de flux naar de ruimte slechts 237 W/m^2 bedraagt, kan men afleiden dat de atmosfeer $(390 - 237) = 153 \text{ W/m}^2$ tegenhoudt, en dat in het infrarood. Deze absorptie van energie is het gevolg van de zogenaamde broeikasgassen (cf. figuur 30).

16. K = graden Kelvin, $T = 273,16 \text{ K} = 0,01^\circ\text{C}$ is de evenwichts (driefase)-temperatuur van water (ijs, vloeibaar, damp). Hieruit volgt: $t^\circ\text{C} = T \text{ K} - 273,15$.

De atmosfeer bestaat voor 99% uit stikstof en zuurstof. Het restant wordt ingenomen door andere gasen waaronder koolzuurgas (CO_2) en waterdamp (H_2O). Deze gasen vormen een isolerend deken rond de aarde, waardoor felle temperatuurschommelingen worden voorkomen.

Verschillende gasen in de atmosfeer dragen bij tot het 'broeikaseffect'. In de eerste orde hebben we waterdamp (H_2O), vervolgens koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4), ozon (O_3), lachgas (N_2O) en de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's).

Ieder broeikasgas heeft zijn eigen bijzondere kenmerken. CO_2 is in grote concentraties in de atmosfeer aanwezig, maar de concentratie neemt jaarlijks sterk toe door de menselijke activiteiten. Methaan is veel minder aanwezig in de atmosfeer, maar neemt ook jaarlijks toe. Het opwarmingseffect van een molecuul CH_4 is 25 keer groter dan van een molecuul CO_2 .

De relatieve bijdrage van ieder van de vier broeikasgasen tot het antropogene opwarmingseffect is als volgt: 56% voor CO_2 , 23% voor CFK's, 14% voor CH_4 en 7% voor N_2O (bron: IPCC).

Elke verhoging van de concentratie van deze broeikasgasen versterkt het absorberen van energie door de atmosfeer, waardoor het natuurlijk broeikaseffect wordt versterkt, met andere woorden: het isolerend deken wordt alsmaar dikker en doet de temperatuur op aarde stijgen. Het gewraakte broeikaseffect is bijgevolg de verwachte temperatuurstijging op aarde ten gevolge van de verstoring van de warmtebalans tussen de aarde en het heelal.

Vanwaar komen nu de bijkomende broeikasgasen die heden ten dage door menselijke activiteiten worden uitgestoten? De verbranding van fossiele brandstoffen is een chemisch proces waarbij koolwaterstoffen (verbindingen van koolstof en waterstof) met zuurstof (O_2) omgezet worden tot CO_2 en waterdamp (H_2O). Zo is de uitstoot van CO_2 één van de hoofdverantwoordelijken voor het broeikaseffect. CO_2 is verantwoordelijk voor ongeveer 56% van het antropogene broeikaseffect.

De huidige wetenschappers zijn het er over eens dat 13% te wijten is aan de ontbossingen en 43% ten gevolge van de verbranding van fossiele brandstoffen.

In 1995 werd door toedoen van de mens 26,3 Gt CO_2 naar de atmosfeer afgevoerd: 82,1% is te wijten aan het verbranden van fossiele brandstoffen, 15,5% aan ontbossing en 2,4% aan diverse activiteiten. Tussen 1990 en 1995 nam de jaarlijkse CO_2 -uitstoot toe met ongeveer 12%. Alle metingen die tot nu toe werden uitgevoerd, wijzen op een sterk toenemende concentratie van broeikasgasen in de atmosfeer.

Op 20.000 jaar tijd, overeenkomend met de periode van het laatste ijstijdperkmaximum tot 1765, is de concentratie van koolzuurgas natuurlijkerwijs toegenomen van 200 tot 279 ppmv,¹⁷ een stijging van slechts 79 ppmv. Van 1765 tot nu was er een toename van 279 ppmv tot circa 364 ppmv. In deze geologisch korte tijdspanne, 230 jaar, steeg de CO_2 -concentratie met 85 ppmv. Gemiddeld steeg tussen 1765 en 1960 het CO_2 -gehalte met 0,2 ppmv per jaar, tussen 1960 en 1995 met 1,3 ppmv per jaar.

Menselijke activiteiten werken dus op het milieu in met een snelheid die negentig à honderd keer hoger ligt dan die van de natuur. De versnelde toename van de koolzuurconcentratie is verontrustend. De snelheid waarmee het milieu wordt aangetast door de mens, evenals de grootte van de verstoring, rechtvaardigen de vrees voor onomkeerbare kli-

17. ppmv = parts per million in volume (= één op één miljoen).

maatsverandering. Wanneer het huidige ritme wordt aangehouden, zal de CO₂-concentratie in het jaar 2050 oplopen tot meer dan 500 ppmv en op het einde van de éénentwintigste eeuw tot meer dan 900 ppmv. *De versnelde toename van de koolzuurconcentratie is een probleem dat prioritair en op wereldvlak moet worden opgelost.*

Volgens het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), een organisatie opgericht in 1988 door de World Meteorological Organisation en de Verenigde Naties, zal aan het huidige ritme van CO₂-uitstoot de temperatuur tijdens de komende honderd jaar stijgen met 1 tot 3,5°C.

Een van de belangrijkste gevolgen van de opwarming is de verwachte stijging van het zeewaterniveau door het afsmelten van de ijsformaties (gletsjers, noordpool) en door de uitzetting van de watermassa's in de oceanen. Het niveau van de zeeën zou gevoelig kunnen stijgen, met alle gevolgen vandien voor het leefmilieu van de mens. Een hoger zeewaterpeil bedreigt vooral de dichtbevolkte deltagebieden in de wereld (Noord-West-Europa en Zuid-Oost-Azië).

Andere gevolgen zijn nog moeilijker in te schatten. Er worden voor de meeste gebieden op aarde verschuivingen verwacht in regenval-, wind- en warmtepatronen.

Jammer genoeg is CO₂ niet het enige gas met broeikas effect. De concentratie van methaan bijvoorbeeld is meer dan verdubbeld sinds de industriële revolutie. Ze nam toe van 700 ppbv tot 1.710 ppbv. Bovendien is een molecule methaan vijftientig keer efficiënter dan CO₂ in het vasthouden van infrarode energie, dus in het vergroten van het broeikas effect, en chloorfluorkoolwaterstofverbindingen zelfs 20.000 keer. Gelukkig zijn de concentraties van deze gassen heel wat kleiner dan die van CO₂. Was dit niet het geval, dan zou de aarde lijken op Venus en de oppervlaktetemperatuur zou ongeveer 400°C bedragen.

Energieconsumptie door middel van elektriciteit heeft geen directe CO₂-emissies tot gevolg bij de gebruiker. Op indirecte wijze geeft deze consumptie echter wel aanleiding tot CO₂-emissies, aangezien elektriciteit deels geproduceerd wordt in fossiel gestookte elektriciteitscentrales. De fossiele brandstoffen dragen elk verschillend bij tot de lozing van CO₂ in de atmosfeer. Steenkool bijvoorbeeld is per energie-eenheid meer vervuilend dan aardolieproducten of aardgas.

De gemiddelde emissiefactor overeenstemmend met 1 GJ elektriciteit is afhankelijk van de samenstelling van het elektriciteitspark en de aard van de aangewende brandstoffen. Hoe groter het aandeel van kernenergie, hoe kleiner de CO₂-emissiefactor. De emissiefactoren worden weergegeven in tabel 4.

Tabel 4. | Gemiddelde CO₂-emissies.

Energiedrager	Gemiddelde emissiefactor kg CO ₂ /GJ
Kolen	104
Aardolie	76
Aardgas	60
Uranium / plutonium	0

Voor iedere energiebron moet men de volledige levenscyclus beschouwen: van de wieg tot het graf. In het geval van de elektriciteitsproductie komen de volgende fases in aanmerking:

- de ontginning van de grondstoffen;
- de energie noodzakelijk om de installaties te bouwen en te ontmantelen;
- de gebruikte brandstoffen.

Rekening houdend met deze fases komt men tot de volgende emissies per geproduceerde kWh (cf. tabel 5):

Tabel 5. | CO₂-emissies per geproduceerde kWh (levenscyclus).

Energiedrager ¹⁸	g CO ₂ /kWh
Ligniet	1.140 - 1.470
Kolen	990 - 1.180
Aardolie	760 - 960
Aardgas	350 - 800
Zonne-energie fotovoltaïsch (*)	50 - 340
Kernenergie (*)	17 - 25
Hydraulische energie (*)	13 - 22
Windenergie (*)	13 - 22

In 1995 bedroeg de nucleaire wereldelectriciteitsproductie 2.200 TWh (cf. figuur 29). Indien we deze nucleair geproduceerde elektriciteit nu zouden produceren met:

- kolenstook, dan zou dit leiden tot een toename van de CO₂-emissies met 2,2 à 2,6 Gt;
- aardolieverbranding, dan zou dit leiden tot een toename van de CO₂-emissies met 1,7 à 2,1 Gt;
- aardgasverbranding, dan zou dit leiden tot een toename van de CO₂-emissies met 0,8 à 1,8 Gt.

De globale CO₂-balans wordt bekomen door het samenvoegen van de deelbalansen van de elektriciteitsproductie, de industrie, de vervoersector en de huishoudelijke sector. Dit resulteert op wereldniveau in 26,3 GtCO₂, waarvan ongeveer 31% of 8,2 GtCO₂ toe te schrijven is aan de elektriciteitsproductie.

In 1995 waren de CO₂-emissies verdeeld als volgt:

- elektrische centrales: 31%;
- industrie: 23%;
- transport: 26%;
- huishoudelijke sector: 20%.

18. (*) Energie nodig om de installaties te bouwen en te ontmantelen.

2.2.2 De emissies van SO_2 en NO_x

De SO_2 -emissies zijn hoofdzakelijk het gevolg van de verbranding van zwavelhoudende fossiele energiedragers, namelijk kolen en aardolie. Aardgas bevat nagenoeg geen zwavelverbindingen zodat zijn bijdrage tot de SO_2 -verontreiniging te verwaarlozen is.

Alle verbrandingsprocessen zijn verantwoordelijk voor de productie van NO_x , ongeacht de gebruikte brandstof, dus ook aardgas.

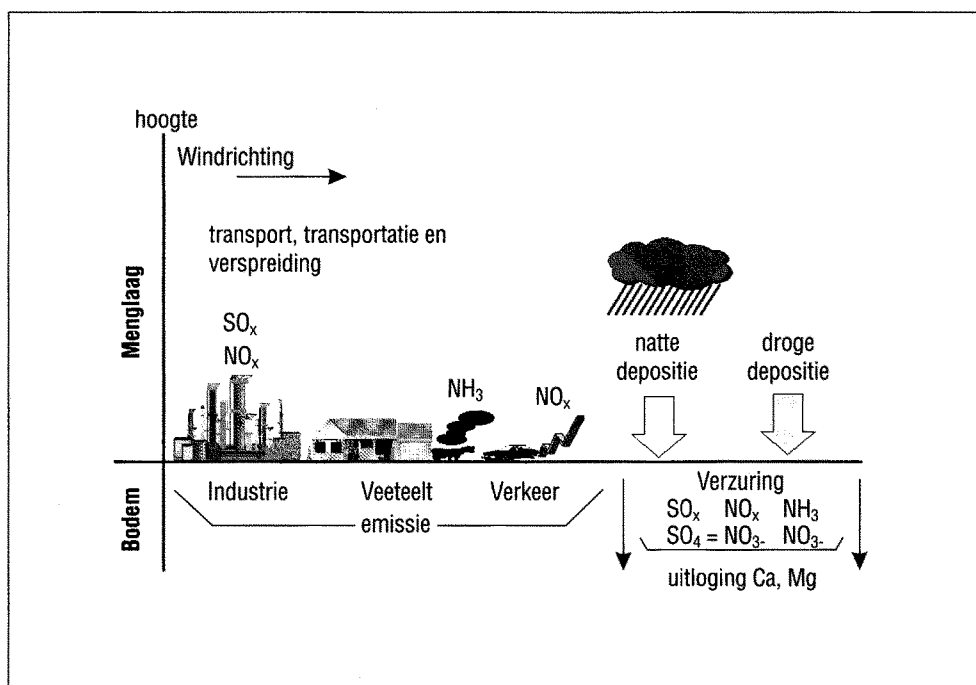
Voor de ammoniakemissies zijn de landbouw- en veeteeltbedrijven de grote verantwoordelijken.

Atmosferische transporten van deze zwavel- (SO_2) en stikstofverbindingen (NO_x) en ammoniak (NH_3) geven op een belangrijke schaal aanleiding tot een degradatie van de boom- en plantengroei en tot de verzuring van de bodem en de meren.

De schade doet zich niet alleen voor in het bosbestand en de vegetatie, maar ook in het visbestand, bij de verbouwing van cultuurgewassen, via de aantasting van gebouwen en metalen constructies. Het verzurend effect van deze gassen bestaat erin dat zij in contact met water zwavelzuur en salpeterzuur vormen.

Ammoniak wordt door bacteriële werking in de grond omgezet in nitraat en draagt aldus bij tot de verzuring. Na uitstoot worden de uitgezonden stoffen gedeeltelijk in de directe omgeving terug neergezet en gedeeltelijk met de wind over lange afstanden meegevoerd.

Een schematische voorstelling van de milieuverzuring wordt weergegeven in figuur 31.



Figuur 31. Schematische voorstelling van de milieuverzuring.

Ter vergelijking worden in tabel 6 de verzuringsemissies per geproduceerd kWh weergegeven voor de diverse energiebronnen.

Tabel 6. | Verzurende emissies per geproduceerde kWh (levenscyclus).

Energiedrager	NO _x g/kWh	SO ₂ g/kWh
Ligniet	0,71 - 2,85	0,68 - 19,60
Kolen	0,90 - 4,54	0,94 - 24,51
Aardolie	1,21 - 2,06	3,77 - 9,61
Aardgas	0,88 - 1,79	0,02 - 0,42
Zonne-energie fotovoltaïsch	0,25 - 0,59	0,69 - 3,62
Kernenergie	0,02 - 0,06	0,05 - 0,15
Hydraulische energie	0,010 - 0,012	0,008 - 0,011
Windenergie	0,05 - 0,14	0,10 - 0,28

Indien we nu alle elektriciteit die in 1995 nucleair in de wereld werd voortgebracht, zouden produceren met

- kolenstook, dan zou dit leiden tot een toename van de NO_x-emissies met 160 à 1.000 Mt en de SO₂-emissies met 150 à 5.400 Mt;
- aardolieverbranding, dan zou dit leiden tot een toename van de NO_x-emissies met 270 à 450 Mt en de SO₂-emissies met 800 à 2.100 Mt;
- aardgasverbranding, dan zou dit leiden tot een toename van de NO_x-emissies met 190 à 400 Mt en de SO₂-emissies met 4 à 90 Mt.

2.2.3 | Andere pollutanten

Steenkool bevat gemiddeld ongeveer 15% onbrandbare bestanddelen. Zij blijven na de verbranding achter als korrelas en vliegias. Vliegias vertegenwoordigt ongeveer 90% van de totale asmassa. Vliegias wordt met de rookgassen meegevoerd.

De uitstoting van as in de atmosfeer bedraagt tussen 0,74 tot 2,52 g per geproduceerde kWh. Daarenboven bezit deze as radioactieve concentraties tussen 100-25.000 Bq/kg.

Steenkool bevat ook een zeer kleine hoeveelheid zware metalen zoals arseen, cadmium, chroom, koper, nikkel, lood, zink en kwik. Tijdens het verbrandingsproces worden ze bijna volledig aan de assen gebonden.

2.2.4 | De specifieke impact van kernenergie

2.2.4.1 | Radioactiviteit en straling

De productie van elektriciteit in kerncentrales resulteert onder normale omstandigheden in kleine emissies van radioactieve stoffen in het milieu en zeer geringe stralingsdoses (hoeveelheid ontvangen straling) voor de bevolking.

Radioactiviteit is de eigenschap van niet-stabiele kernen (radionucliden) om spontaan onder uitzending van deeltjes en straling, over te gaan in een anders opgebouwde atoomkern. Ook de nieuw gevormde kern kan na enige tijd opnieuw spontaan overgaan in een andere kern. Dit verval zet zich net zolang door, totdat een stabiele atoomkern is gevormd. Dit verschijnsel heet het radioactief verval.

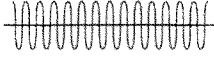
De tijd waarin de helft van de kernen van een radionuclide tot een stabiele vorm vervalst, heet de halveringstijd. Deze halveringstijd is voor elk van de radionucliden erg verschillend en kan gaan van enkele seconden tot miljarden jaren.

Na één halveringstijd blijft nog maar de helft van de kernen straling uitzenden, na twee halveringstijden nog maar een vierde enzovoort. Na tien halveringstijden is een stof nageenog volledig radioactief vervallen; ze is 1.024 keer minder radioactief geworden.

De meeteenheid van *radioactiviteit* – niet te verwarren met straling – is de *Becquerel* (*Bq*).¹⁹ Materiaal met een radioactiviteit van één Bq is materiaal waar in elke seconde één onstabiele atoomkern verandert en straling uitzendt.

De Becquerel is een heel kleine eenheid. In ons lichaam zit ongeveer 120 Bq natuurlijke radioactieve stoffen per kilogram. Een heel grote hoeveelheid radioactieve stof met een activiteit van vele miljoenen Bq is niet altijd gevaarlijk.

Straling kan worden uitgezonden als deeltjes (alfa-, bètastraling) of als golven (gammastralen) (cf. figuur 32).

Soort	Samenstelling	Tegengehouden door
α	heliumkernen 	 blad papier luchtlaag : 3 cm
β	elektronen positronen 	 aluminiumplaat : < 1 cm luchtlaag : 3 m
γ	ioniserende golven 	 ijzer, beton, lood : 1 m waterlaag : 3 m

Figuur 32. | Soorten straling.

19. Definities gebruikte eenheden: cf. bijlage 1.

De alfadeeltjes zijn positief geladen heliumkernen. Ze zijn relatief zwaar en ioniseren sterk. Ze zijn niet erg doordringend en worden gemakkelijk tegengehouden. Een dunne luchtlaag van 3 cm of een blad papier volstaat.

De bètadeeltjes zijn lichte, negatief geladen elektronen of positief geladen positronen. Met hun kleinere massa en geringe grootte dringen ze dieper in de materie binnen.

Er is dus meer nodig om ze tegen te houden, bijvoorbeeld een dunne plaat uit aluminium, of een 3 meter dikke luchtlaag.

De gammastralen zijn ongeladen fotonen en bestaan uit elektromagnetische golven met een zeer hoge frequentie; ze bezitten geen massa. Ze hebben een groot vermogen om door te dringen in de omringende materie en kunnen maar tegengehouden worden door een dikke laag ijzer, lood of beton.

Wanneer materie straling absorbeert, ontvangt ze een zekere hoeveelheid energie. De eenheid van *geabsorbeerde stralingsenergie* is de *Gray (Gy)* en is gelijk aan 1 joule stralingsenergie per kg bestraald materiaal.

Naargelang het type straling (alfa, bèta, gamma, ...) zal eenzelfde hoeveelheid stralingsenergie minder of meer effect hebben.

Om de biologische uitwerking of het schade-effect te kunnen bepalen bij een bepaalde opname van radioactiviteit (in Bq), dient men te weten met wat voor een radioactieve stof men te maken heeft, op welke wijze deze stof zich in het lichaam verplaatst en vervolgens wordt uitgescheiden en welke inwendige organen bestraald werden.

De maat voor het *effect van straling op de mens* wordt uitgedrukt in *Sievert*. De Sievert houdt rekening met een biologische wegingsfactor die de schadelijkheid van elk type straling weergeeft.

De Sievert komt overeen met 1 Gy vermenigvuldigd met een biologische wegingsfactor. De eenheid voor de *stralingsdosis* die wij hier hanteren, is de *milliSievert (mSv)*.²⁰

Ter informatie worden in tabel 7 de biologische wegingsfactoren weergegeven voor de verschillende types van stralingen.

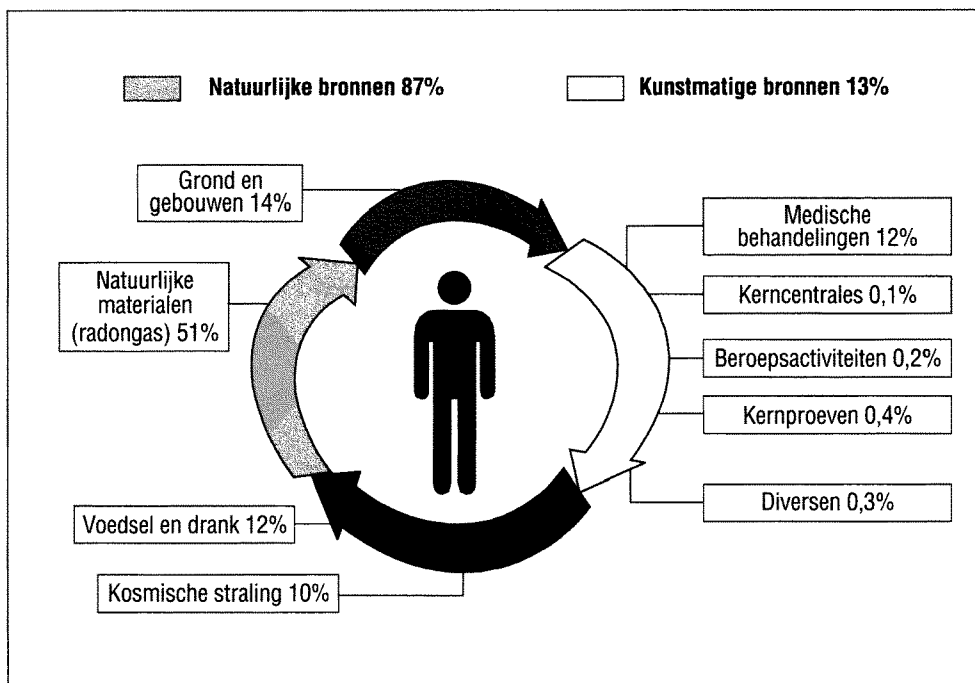
Tabel 7. | Biologische wegingsfactoren van de stralingen.

Type straling	Wegingsfactor
X-stralen, γ -stralen, β -deeltjes en elektronen	1
Snelle neutronen en protonen	10
Thermische neutronen	5
α -deeltjes	20

α -straling is dus 20 keer schadelijker dan gammastraling.

Om zich een idee te vormen van wat een stralingseenheid concreet betekent, kijken we naar de stralingsbelasting waaraan iedereen is blootgesteld en die afkomstig is van de uit de ruimte uitgezonden straling en de straling van de natuurlijke stoffen in de bodem, in de

20. De invloed van de ioniserende stralingen op mens en milieu wordt verder behandeld in 4.6.



Figuur 33. | Bronnen van radioactiviteit.

muren van gebouwen en in ons eigen lichaam. Gemiddeld ontvangt iedere Belg jaarlijks 3,5 eenheden.

De natuurlijke stralingsbelasting is streekafhankelijk en wordt in grote mate bepaald door de gesteenten in de ondergrond. In België varieert de dosis van 2 tot 10 eenheden per jaar. In het zuiden van ons land noteren we een hogere natuurlijke straling dan in het noorden. In sommige gebieden op aarde (India, Brazilië) wordt de bevolking aan een dosis van 20 eenheden blootgesteld. Hun gezondheid wordt daardoor niet aangetast.

De stralingsdosis die ieder van ons jaarlijks uit natuurlijke bronnen ontvangt, wordt door de elektronucleaire productie slechts verhoogd met één of twee duizendste eenheid.

Het aandeel van de natuurlijke radioactiviteit overtreft ruimschoots dat van de kunstmatige. De verdeling van de bronnen van radioactiviteit wordt weergegeven in figuur 33.

2.2.4.2 | Radioactieve lozingen

De normale werking van een kernreactor omvat een aantal verrichtingen waarbij kleine hoeveelheden besmet gas of radioactieve vloeistoffen geproduceerd worden. Deze gasvormige of vloeibare afvalstoffen komen terecht in afzonderlijke installaties voor behandeling en opslag. Zij worden daarna onder controle geloosd in de lucht of in het water.

Sommige vloeibare afvalstromen worden zo behandeld dat ze als vast afval kunnen worden verwerkt.

De vloeibare en gasvormige laagactieve lozingen door kerncentrales zijn gebonden aan een strenge reglementering (de normen zijn vastgelegd door de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming) en vergunning en staan onder toezicht van diverse overheidsinstellingen.

De lozingslimiet – de maximale radioactiviteit die jaarlijks geloosd mag worden – is voor elke centrale afzonderlijk bepaald.

Ter informatie worden de vloeibare en gasvormige lozingen van de Belgische kerncentrales weergegeven in de tabellen 8 en 9.

Tabel 8. | Vloeibare radioactieve lozingen van de Belgische kerncentrales (% van de jaarlimiet).

Jaar	Tihange		Doel	
	bèta - gamma	tritium	bèta - gamma	tritium
1985	5,64	31,28	0,95	45,08
1990	5,14	38,24	1,05	60,81
1991	6,24	25,07	2,04	36,74
1992	6,05	23,58	0,31	43,63
1993	4,63	23,78	1,59	33,13
1994	3,46	26,06	0,63	32,74
1995	3,03	27,84	2,56	45,39
1996	8,28	30,20	1,28	30,22
1997	3,33	31,96	1,78	37,05
limiet	888 GBq	148 TBq	1.480 GBq	103,6 TBq

Tabel 9. | Gasvormige radioactieve lozingen van de Belgische kerncentrales (% van de jaarlimiet).

Jaar	Tihange			Doel		
	aërosolen	jodium	edelgassen	aërosolen	jodium	edelgassen
1985	0,030	1,070	0,810	0,220	3,780	2,630
1990	0,120	2,000	1,550	0,110	3,280	0,530
1991	0,070	0,580	0,750	0,070	4,440	1,060
1992	0,020	0,260	0,490	0,050	1,300	0,890
1993	0,020	0,180	1,820	0,005	0,660	0,180
1994	0,028	0,110	0,530	0,004	0,060	0,030
1995	0,046	0,037	0,180	0,002	0,210	0,140
1996	0,030	0,350	0,660	0,002	0,055	0,069
1997	0,014	0,107	0,441	0,001	0,040	0,002
limiet	111 GBq	14,8 GBq	2.220 TBq	148 GBq	14,8 GBq	2.960 TBq

2.2.4.3 | Radioactief afval

Een kerncentrale produceert tijdens de exploitatie ook vast laagactief afval. Dit afval bestaat uit materiaal dat op een of andere manier besmet kan zijn, zoals filterpatronen, radioactieve harsen, slib, werktuigen, kledij, schoonmaakproducten, beschermingsmiddelen. De kerncentrale behandelt deze afvalstoffen vooraf. De behandeling verschilt naargelang de aard van het afval:

- waterfilters en laagactieve harsen worden in beton gegoten;
- het overige vast afval wordt ofwel verpakt om bij een conditioneringsbedrijf (in België: Belgoprocess) eerst in een 'superpers' te worden gecompacteerd en daarna in beton te worden gegoten; ofwel wordt het eerst versnipperd om eveneens – in een conditioneringsbedrijf – in een oven te worden verbrand; de assen worden nadien ook ingebetonneerd.

Daarna wordt het geconditioneerd afval in een stalen vat ingesloten.

In België staat NIRAS (Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen) in voor het beheer van het radioactief afval van zodra het de kerncentrale verlaat. Het volume van dit afval uitgedrukt in finaal te stockeren hoeveelheden geconditioneerd afval dat door de Belgische kerncentrales wordt overgedragen aan NIRAS, bedraagt een $8,47 \text{ m}^3 / \text{TWh}_n$.²¹ In 1997 bedroeg de Belgische nucleaire productie $45,1 \text{ TWh}_n$ ²² (60% van de totale elektriciteitsproductie), wat overeenkomt met een afvalproductie van 382 m^3 . Men kan dus spreken van kleine hoeveelheden.

De stalen vaten met geconditioneerd afval worden opgeslagen in afgesloten gebouwen op de site van Belgoprocess in afwachting van hun definitieve berging. NIRAS onderzoekt hiervoor de mogelijkheid van gecontroleerde oppervlakteberging. Bij oppervlakteberging wordt het radioactief afval geborgen in betonnen bunkers aan de oppervlakte. De technologie van oppervlakteberging staat op punt en biedt een veilige berging, waar het radioactief materiaal kan vervallen zonder contact met mens en milieu. Het afval waar hier sprake van is, behoort tot *categorie A*.²³

Het afval van deze categorie bevat lage concentraties bèta- en gammastralers met een lage stralingsintensiteit en een halveringstijd van minder dan 30 jaar.

De oppervlaktebergingsuitrusting steunt op het principe van de multiveiligheidsbarrières (cf. figuur 35): de ene zijn kunstmatig (het materiaal waarin het afval vevat zit, het conditioneringscollo, de gebouwde structuren), de andere zijn natuurlijk (de geologie van de site zelf). Ze is zodanig ontworpen dat ze een innerlijke veiligheid in zich draagt, minstens tot het eind van de insluitingsperiode, dat gebaseerd is op de betrouwbaarheid van de kunstmatige barrières. De ondergrond waarin de structuren gebouwd worden, is bovendien zodanig gekozen dat hij de rol speelt van bijkomende barrière die een eventueel falen van de andere barrières kan ondervangen.

21. TWh_n = nucleaire terrawattuur geproduceerd op basis van splijtstoffen (nettoproductie).

22. In 1996 bedroeg de productie $41,2 \text{ TWh}$ (57% van de totale productie).

23. De indeling van radioactieve afvalstoffen wordt verder behandeld in 4.4.1.

- Een eerste barrière wordt gevormd door het collo (het gevulde stalen vat). Het afval zit stevig ingebed in cement of bitumen. De radioactiviteit wordt door het collo perfect ingesloten.
- Een aantal colli wordt samen in een betonnen bunker geplaatst. Zodra de bunker vol is, wordt tussen de colli opvullingsbeton gegoten, waardoor een stevig ondoordringbaar blok beton wordt gevormd, waarin alle colli vastzitten. Het opvullingsmateriaal en de wanden van de bunker vormen een tweede barrière.
- De bunker wordt met verschillende lagen bedekt. Samen met de ondergrond waarop de bunker gebouwd is, vormen zij een derde barrière.

Voor de oppervlakteberging van laagactief afval in België is er een terrein nodig van 100 meter breed en 300 meter lang (3 hectare). Wanneer de bunkers volledig gevuld zijn en alle beschermingslagen erboven zijn aangebracht, komt een groenvoorziening op de bovenlaag. Zo wordt het uitzicht van het landschap minimaal verstoord. Als de radioactiviteit van het afval een aanvaardbaar peil bereikt heeft (na ongeveer 200 à 300 jaar), kan het terrein voor andere doeleinden gebruikt worden.

Dat beton een betrouwbaar materiaal is dat de tand des tijds meer dan behoorlijk weerstaat, bewijst het Pantheon in Rome (cf. figuur 34). Deze tempel voor alle Romeinse goden werd meer dan 2.000 jaar geleden gebouwd. Hij kreeg een koepel van licht beton, bedekt met dakpannen. Dit beton staat al twintig eeuwen lang aan alle mogelijke klimatologische omstandigheden bloot.

Oppervlakteberging is een oplossing die in een groot aantal landen reeds wordt toegepast. In figuur 35 wordt een doorsnede weergegeven van een oppervlaktebergingsinstallatie.

In Europa zijn of waren de volgende oppervlaktebergingsinstallaties voor laagactief en middelactief afval in werking:

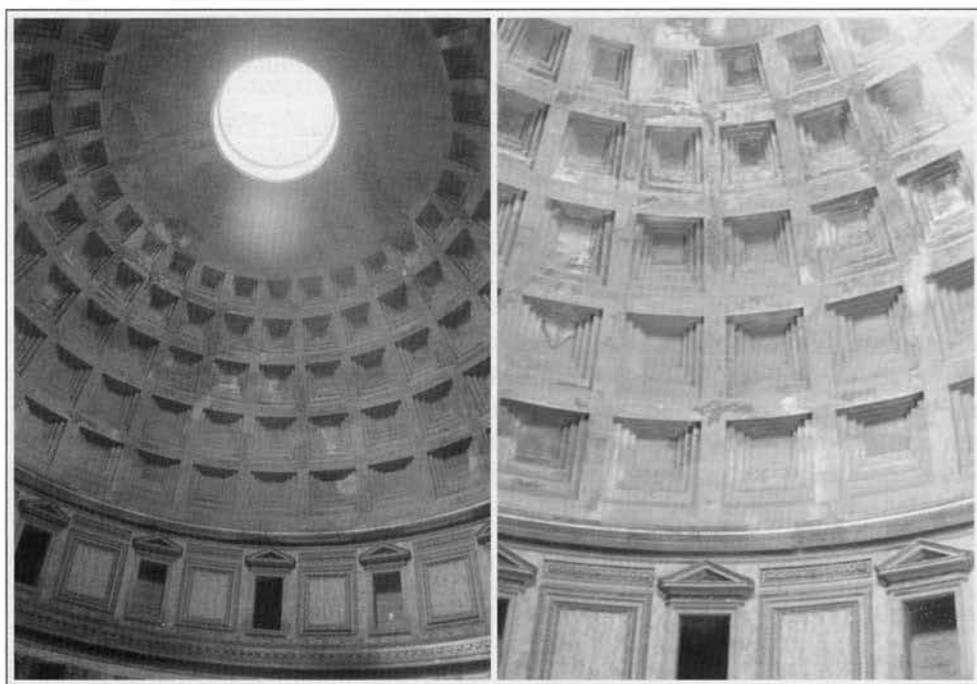
☐ Twee oppervlaktebergingsinstallaties in Frankrijk

- Le Centre de Stockage de la Manche (Normandië) – gesloten. In 1969 werd dit Centrum in gebruik genomen. De maximumcapaciteit van dit centrum, ongeveer 525.000 m³, werd bereikt in het begin van 1994.
- Le Centre de Stockage de l'Aube (cf. figuur 36). Het centrum van de Aube, ontworpen en beheerd door ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, tegenhanger van de Belgische NIRAS), bevindt zich nabij het dorp Soullaines, op 200 km ten zuidoosten van Parijs. In januari 1992 werd het centrum in gebruik genomen. Deze site van 110 hectare heeft een capaciteit van 1 miljoen m³. De exploitatie is voorzien tot in het jaar 2050. Daarna zal de site gedurende 300 jaar onder toezicht blijven.

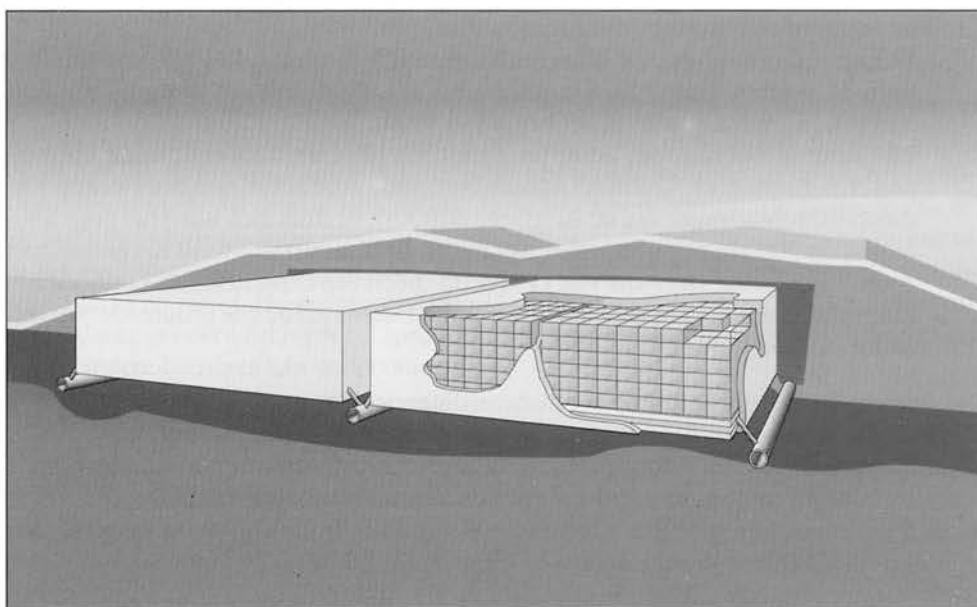
Het toegepaste concept berust op het multibarrièreprincipe:

- het collo: inkapseling van het afval, betonnen of metalen vaten, identificatie;
- de bergingsstructuren: betonnen boxen die afgeschermd worden door een waterdichte betondaktegel en gecontroleerd door een ondergronds netwerk van galerijen;
- de site: eenvoudige geologie, waterdichte kleilaag die de ondergrondse waterlaag beschermt, één enkele regenwaterafvoer die gemakkelijk te controleren is.

De bergingsstructuren bestaan uit boxen van 24 x 21 x 8 meter. De dikte van de muren in gewapend beton bedraagt 30 cm. De gemiddelde capaciteit per box is ongeveer 2.200 m³.



Figuur 34. | Het Pantheon in Rome.



Figuur 35. | Doorsnede van een oppervlaktebergingsinstallatie.



Figuur 36. | Centre de Stockage de l'Aube – luchtfoto.

Tijdens het vullen en in afwachting van de intermediaire bedekking wordt de box beschermd door middel van een mobiel dak om te voorkomen dat regenwater zou binnendringen.

Om de inhoud van een box te stabiliseren worden, van zodra hij vol is, de lege ruimten tussen de vaten opgevuld met kiezelzand of mortel. Vervolgens wordt op de box een betonnen daktegels gegoten. Om de waterdichtheid te verzekeren wordt daarna op de betondaktegels een laag impregnerende plastic (polyurethaan) verpulverd. Na die operaties wordt het mobiel dak verplaatst naar een nog te vullen box.

Geleidelijk worden de ruimten tussen de afgewerkte boxen opgevuld met aarde. Ten slotte wordt de definitieve bedekking aangebracht, die de ondoorlaatbaarheid van alle boxen garandeert. Zij bestaat uit een bitumineus membraan, afwisselende lagen van zand en klei en een tapijt teelaarde waarop gras wordt gezaaid en struiken geplant.

De geologie van de site wordt gekenmerkt door een oppervlak dat is samengesteld uit zand dat rust op een ondoorlaatbare kleilaag; de natuurlijke helling van het terrein zorgt voor de afvloeiing van het regenwater naar één enkele afvoer, waardoor de controle gemakkelijker wordt.

□ Eén oppervlaktebergingsinstallatie in Spanje. De Spaanse definitieve oppervlaktebergingsinstallatie bevindt zich op 130 km ten noordwesten van Cordoba op de site van El Cabril (cf. figuur 37). De site beslaat 1,126 hectare en is gelegen in de heuvels van de Sierra Albarrana, deel van de Sierra Morena-bergketen. De site met een nettocapaciteit van 45.000 m³ werd in 1993 in bedrijf genomen. De Spaanse productie van laagactief en middelactief afval kan tot 2010 opgenomen worden.

Het toegepaste concept berust zoals bij het Franse concept op het multibarrière-principe. De constructies in beton zijn parallellepipedumcellen van 24 x 19 x 10 meter. De cellen zijn verdeeld over twee platformen van respectievelijk 12 (6 + 6) en 16 (8 + 8) cellen.

In tegenstelling tot het Franse concept, dat niet voorziet in een tussenstructuur tussen de afsluitingen en de individuele vaten, wordt bij de definitieve berging in El Cabril gebruikgemaakt van kubusvormige containers in beton waarin 18 standaardvaten kunnen worden opgestapeld. Een cel heeft een opslagcapaciteit van 320 containers. Het gebruik van deze containers komt tegemoet aan een eis van de Spaanse veiligheidsinstanties betreffende het creëren van omstandigheden die de recuperatie van het afval, indien nodig, mogelijk maken.

Op geologisch vlak is de site van El Cabril ingeplant loodrecht op een gneis- en micaformatie (de Cabrilformatie genoemd) van meer dan 300 meter dik.



Figuur 37. | Site van El Cabril – luchtfoto.

- ☐ Twee oppervlaktebergingsinstallaties in het Verenigd Koninkrijk: Drigg (1959) en Dounray (1988).
- ☐ Drie oppervlaktebergingsinstallaties in Zweden: Ringhals, Oskarshamn en Studvik.

De uitgeputte splijtstofelementen, die uit de kernreactor worden verwijderd, bevatten nog bruikbare stoffen. Voor die splijtstoffen bestaan er twee mogelijkheden: recycleren of meteen als hoogactief afval opslaan (cf. 2.1.3).

Bij de eerste mogelijkheid – *recyclage door opwerking* (cf. bijlage 5) – worden ze vervoerd naar een opwerkingsfabriek. Hier wordt het nog bruikbare uranium (96%) en plutonium (1%) gescheiden van de onbruikbare splijttingsproducten (3%) (cf. 2.1.3). Deze laatste vormen het hoogradioactief afval. Het afval wordt ingekapseld door verglazing (het

afval wordt op hoge temperatuur met glas versmolten tot een homogeen en onoplosbaar eindproduct). Vervolgens wordt het in dichtgelaste roestvrije stalen flessen ingesloten. Een mogelijkheid om het definitief te bergen, is het opslaan in galerijen in zeer diepe geologische lagen, zoals klei, zout of graniet (cf. 4.4.1 en 4.4.3). Zo kan geen radioactiviteit in de omgeving worden verspreid. NIRAS onderzoekt de mogelijkheden voor diepteberging in de kleilagen van ons land. Vóór de definitieve berging worden de flessen gedurende enkele tientallen jaren voorlopig opgeslagen in een gebunkerd gebouw op de site van Belgoprocess. De tweede mogelijkheid bestaat erin dat de gebruikte splijtstoffen onmiddellijk *als hoog-radioactief afval* beschouwd worden. Na een tijdelijke opslag in de kerncentrale worden ze geconditioneerd vóór de definitieve berging. Dezelfde kleilagen als deze voor het hoogactief opwerkingsafval komen hiervoor in aanmerking.

Een jaarlijkse nucleaire productie van 45,1 TWh_n (Belgische productie 1997) resulteert bij recyclage in een productie van 14,4 m³/jaar hoogactief afval (1 TWh_n komt overeen met de productie van ongeveer 0,32 m³ verglaasd afval). Bij directe berging ligt dit cijfer aanzienlijk hoger. Dit afval behoort tot *categorie C* en bevat bèta- en gammastralende stoffen met een korte tot middellange halveringstijd en alfastralers met een lange halveringstijd. Het afval geeft warmte af.

Om de kerncyclus te sluiten moeten we nog het afval van *categorie B* vermelden. Deze categorie omvat hoofdzakelijk afval dat besmet is met alfastralers met een halveringstijd van meer dan 30 jaar, naast bèta- en gammastralers. Hoofdzakelijk wordt dit type afval geproduceerd bij de fabricage van splijtstofelementen en bij de opwerking van splijtstof. Dit resulteert voor de bovengenoemde nucleaire productie in 220 m³/jaar middelactief afval (1 TWh_n komt overeen met de productie van ongeveer 4,85 m³ middelactief afval).

In tabel 10 wordt een overzicht gegeven van de jaarlijkse afvalproductie voor het Belgisch nucleair programma.

Tabel 10. | Overzicht van de afvalproductie in België.

Rangschikking van het radioactief afval	Voornaamste stralingen	Benaming	Jaarlijkse productie bij een nucleaire jaarlijkse productie van 45,1 TWh _n
Laag- of middelactief, korte halveringstijd	bèta, gamma	Categorie A of laagactief afval	382 m ³
Laag- of middelactief, lange halveringstijd	alfa	Categorie B of middelactief afval	220 m ³
Hoogactief, korte halveringstijd + middelactief, lange halveringstijd	bèta, gamma + alfa	Categorie C of hoogactief afval	14,4 m ³

De hoeveelheid radioactief afval geproduceerd tijdens de kerncyclus is klein in vergelijking met de hoeveelheden afval die bijvoorbeeld in de hele Europese Unie worden geproduceerd. Het radioactief afval vertegenwoordigt nauwelijks 1% van de totale hoeveelheid industrieel toxisch afval dat metalen en chemische bestanddelen bevat die zeer gevaarlijk blijven gedurende zeer lange periodes, zo niet tot het oneindige.

Daarenboven vertegenwoordigt het hoogactief afval slechts 2% van de totale hoeveelheid radioactief afval. Elke radioactieve stof dooft uit, ook al is daar in bepaalde gevallen heel veel tijd voor nodig. Dit laatste geldt evenwel slechts voor een minderheid van het volume.

Als men nu het volume radioactief afval dat in België door het huidige nucleaire programma geproduceerd wordt, uitdrukt per inwoner en per jaar, komt men hoogstens tot één bierblikje afval van categorie A en B en één vingerhoed afval van categorie C. Men kan dus zeker niet spreken van een afvalberg.

2.2.5 | Samengevat overzicht van de energiebronnen

In tabel 11 wordt een samengevat overzicht gegeven van de ecologische impact van de verschillende energiebronnen. Ter informatie worden in deze tabel ook de geopolitieke en economische aspecten met elkaar vergeleken.

Tabel 11. | Samengevat overzicht van de energiebronnen.

Energiebron	Geopolitieke spreiding grondstoffen	Ecologisch	Economisch	
			Investering en uitbating	Brandstof- en spleijstofkost
Kernenergie	positief (verspreid)	compact radioactief afval	hoog	zeer laag
Steenkool	zeer positief	CO ₂ , NO _x , SO ₂ en as	tamelijk hoog	gemiddeld
Aardolie	negatief	CO ₂ , NO _x en SO ₂	gemiddeld	gemiddeld
Aardgas	gemiddeld	minder CO ₂ , NO _x en geen SO ₂	laag	gemiddeld
Hernieuwbare energie	beperkt	visueel	zeer hoog	gratis

2.2.6 | Evaluatie

Op de dag van vandaag weten we dat we niet ongestraft het milieu verder kunnen verstoren. De maatschappij van vandaag zal hier haar steentje moeten bijdragen, want indien we ons geen beperkingen opleggen, zullen we de toekomstige generaties opzadelen met een zware erfenis. *Het is een ethische plicht van de mensheid om de opwarming van de aarde en de verzuring van de bodem en de meren door het menselijk toedoen, zoveel als redelijk mogelijk te beperken.* Een aantal maatregelen is dringend nodig:

- de CO₂-, SO₂- en NO_x-uitstoot moeten terugvallen onder het huidige niveau door een beperking van het verbruik van fossiele brandstoffen. Wij moeten onverwijld de 'nul graad'-strategie toepassen;
- de bescherming van de regenwouden;
- de herbebossing.

Productie van elektriciteit met kernenergie is een milieuvriendelijke techniek: er is geen verbranding en bijgevolg geen zuurvormende zwavel- en stikstofoxiden en evenmin koolstofdioxide. De productie veroorzaakt geen zure neerslag en draagt niet bij tot het broeikaseffect. Wanneer men de volledige kerncyclus beschouwt, zijn deze effecten verwaarloosbaar.

De verhoging van de radioactiviteit in het milieu is onbeduidend ten opzichte van de natuurlijke radioactiviteit. Het effect op de mens en zijn omgeving is onbeduidend.

De toch geringe hoeveelheden radioactief afval die geproduceerd worden, kunnen met de huidige technologieën veilig worden opgeslagen en geborgen, zonder contact met mens en milieu.

Kernenergie is een geschikte energievorm als alternatief voor de fossiele brandstoffen. In de praktijk bedraagt het maximaal aanvaardbaar nucleair aandeel ongeveer 2/3 van de totale elektriciteitsvoorziening (de zogenaamde basislast). Om de schommelingen in de vraag op soepele wijze op te vangen moet het overige derde via niet-nucleaire weg worden opgewekt. In de toekomst kunnen hier de *hernieuwbare energiebronnen* zoals wind- en zonne-energie, waterkracht, enzovoort, een belangrijke rol spelen.

De uitbouw van de gecombineerde productie kernenergie - hernieuwbare energie is voor de toekomst een reëel alternatief voor de fossiele-brandstof-substitutiestrategie.

Onder de dreiging van het broeikaseffect en de verzuring is het debat over het gebruik van kernenergie vandaag bijzonder actueel. Het debat wordt toegespitst op de afweging tussen twee potentiële risico's voor de mens en zijn milieu, met name het nucleaire risico versus het nog veel grotere risico op klimaats- en bodemveranderingen.

3. | De elektriciteitsvoorziening in België

3.1 | De elektriciteitsproductie

In 1997 bedroeg de netto-elektriciteitsproductie in België 75.079 GWh. Kernsplijtstoffen produceerden 60,1%, vaste en vloeibare fossiele brandstoffen 19,7%, aardgas 14,6% en de overige energiebronnen 5,6% (cf. figuur 40). Wat de fossiele brandstoffen betreft is sinds 1980 het aandeel van vloeibare brandstoffen aanzienlijk gedaald en vervangen door aardgas (cf. figuur 41).

Eind 1997 bedroeg het ontwikkelbaar nettovermogen van de elektriciteitscentrales in België zowat 14.677 MW. De verdeling per productietype wordt weergegeven in tabel 12.

Tabel 12. | Ontwikkelbaar nettovermogen per productietype.

Productietype	MW netto
Nucleaire productie	5.713,0
Klassieke productie	5.099,6
Stoom- en gasturbines (STEG)	1.942,0
Warmtekrachteenheden	360,4
Turbojets	260,0
Energiereducatie	51,4
Hydraulische centrales ¹	1.250,7
Totaal	14.677,1

1. Het windmolenpark te Zeebrugge inbegrepen.

3.2 De productiemiddelen

3.2.1 Klassieke thermische centrales

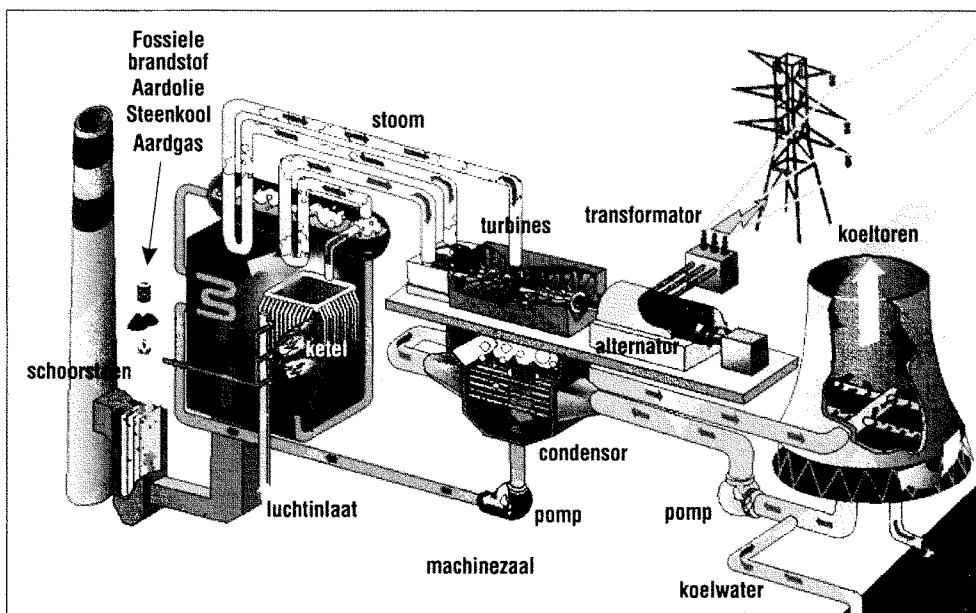
De klassieke thermische centrales (een zestiental) zijn meestal polyvalent: ze kunnen op steenkool, gas of aardolie werken. Zij bieden de soepelheid om het geproduceerde vermogen te kunnen aanpassen aan de schommelende vraag naar elektriciteit. De meest recente of vernieuwde centrales voldoen aan de basisvraag naar elektriciteit. De oudere centrales dienen om verbruikspieken op te vangen.

De klassieke centrales worden zoveel mogelijk gemoderniseerd om te voldoen aan de milieudoelstellingen en om hun rendement te verhogen.

De laatste jaren staan steenkool en gas in voor het grootste deel van de fossiele productie. De bevoorradingsbronnen zijn gediversifieerd en de gemiddelde prijs is de laatste jaren gedaald.

Olie is praktisch in onbruik omdat de centrales na de oliecrisissen van de jaren zeventig werden omgebouwd naar andere energiebronnen om minder afhankelijk te worden van de OPEC-landen.

Figuur 38 toont hoe een dergelijke centrale werkt. De warmte die door verbranding van de brandstof vrijkomt, doet water verdampen. De geproduceerde stoom gaat onder hoge druk en bij een hoge temperatuur naar een turbine. Onder druk beginnen de schoepbladen van de turbine te draaien. Thermische energie wordt omgezet in mechanische energie. De turbine geeft de draaiende beweging aan de alternator, die de mechanische energie omzet in elektriciteit. De stoom aan de uitgang van de turbine vloeit langs de koude tussenschotten van een condensor en gaat opnieuw in water over. Het water keert terug naar de verwarmingsketel en de cyclus begint opnieuw. De restwarmte die in de condensor achter-



Figuur 38. | Werkingsprincipe van een klassieke thermische centrale.

blijft, wordt op haar beurt door een tertiaire kringloop afgevoerd naar een waterloop of een koeltoren. In dit laatste geval keert het grootste deel van het koelwater in een gesloten kringloop naar de centrale terug.

3.2.2 | Stoom- en gascentrales (STEG)

STEG-centrales (een drietal) zijn installaties met een zeer hoog rendement: meer dan 50% tegenover 40% bij klassieke centrales. Een STEG-eenheid bestaat uit een gasturbine waarbij de hete uitlaatgassen (restwarmte) via een recuperatiestoomketel worden hergebruikt om een bijkomende stoomturbine aan te drijven. De gasturbine en de stoomturbine zijn elk verbonden met een alternator. Een beperking is wel dat de STEG's uitsluitend aardgas gebruiken en dus niet polyvalent zijn.

3.2.3 | Warmtekrachteenheden

Warmtekrachtkoppeling (een tiental eenheden) levert gelijktijdig elektriciteit aan het net en stoom die bestemd is voor een nabijgelegen industrie.

Een gasturbine gekoppeld aan een alternator produceert elektriciteit, terwijl de uitlaatgassen naar een recuperatiestoomketel worden geleid, die water omzet in stoom.

Het totale energierendement (elektriciteit en warmte) is zeer hoog en bedraagt meer dan 80%. Deze centrales hebben echter een beperking: de klant die de warmte gebruikt, moet in de onmiddellijke buurt gelegen zijn en moet een stabiel en intensief warmteverbruik hebben.

3.2.4 | Turbojets

Het werkingsprincipe van deze eenheden is identiek aan dat van de gasturbines. Lucht uit de omgeving wordt aangezogen, samengeperst en naar een verbrandingskamer gevoerd waar ze met kerosine wordt vermengd. Het mengsel wordt verbrand op zeer hoge temperatuur, 1.200 tot 1.300°C. De verbrandingsgassen die daarbij ontstaan, drijven een turbine aan.

Turbojets hebben het voordeel dat ze heel vlug kunnen opstarten en lage investeringen vergen: ze zijn uitgerust met oude vliegtuigmotoren. Ze gebruiken echter een dure brandstof. Daarom worden ze uitsluitend gebruikt om een plotse stijging in het verbruik of een eventuele tijdelijke storing in een andere centrale op te vangen.

3.2.5 | Waterkrachtcentrales

De werking van de waterkrachtcentrales berust op het principe van een watermolen: het water doet een turbine draaien die aan een alternator is gekoppeld. Dit principe wordt toegepast in de pompcentrale van Coe door accumulatie. 's Nachts wordt het water van een lager gelegen bekken opgepompt naar twee bekkens die 250 m hoger liggen.

Goedkope elektriciteit, die vooral afkomstig is van kerncentrales, levert de nodige energie om het water op te pompen. Overdag laat men het geaccumuleerde water op de momenten van hoge vraag naar elektriciteit naar beneden stromen om de turboalternatoren in werking te stellen.

Op deze manier wordt 75% van de energie gerecupereerd die nodig was om het water 's nachts op te pompen.

3.2.6 | Centrales op basis van hernieuwbare energiebronnen

In België zijn er momenteel elf waterkrachtcentrales 'langs de waterloop' in gebruik. In Zeebrugge is er een windmolenpark in exploitatie (5,4 MW) en in Melle functioneert een experimentele installatie op zonne-energie (fotovoltaïsche omzetting). Nieuwe projecten zijn in ontwikkeling.

3.2.7 | Kerncentrales

3.2.7.1 | Werking van een kerncentrale

De kerncentrales (waarvan vier eenheden in Doel en drie in Tihange) werken zoveel mogelijk op hun volle vermogen, zowel overdag als 's nachts. Zij leveren meer dan 50% van de stroom aan het net. Door hun capaciteit en de splijtstof waarop ze werken, produceren ze het goedkoopste kWh.

Een kerncentrale verschilt van een klassieke thermische centrale door de manier waarop warmte wordt geproduceerd. De verbranding van fossiele brandstoffen is vervangen door de splijting van uranium- en plutoniumatomen (cf. 2.1.3). In figuur 39 wordt het werkingsprincipe van een kerncentrale weergegeven.

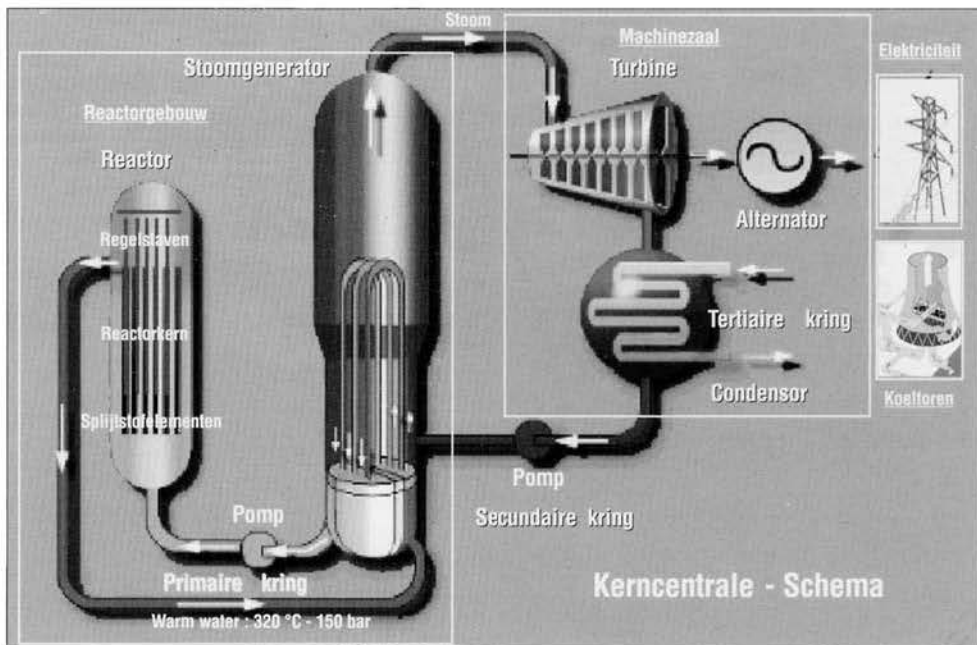
De splijtstofelementen bevinden zich in een met water gevulde reactorkuip. Een pomp doet het water rondstromen, dat dan door contact met de elementen wordt opgewarmd. Regelstaven in de reactor regelen de warmteproductie. Trekt men de regelstaven uit, dan produceert de reactor zijn maximale energie. Laat men de regelstaven tussen de splijtstofelementen zakken, dan vermindert het vermogen. Wanneer de regelstaven helemaal in de reactor worden neergelaten, stopt het splijttingsproces en wordt de koelingsprocedure ingezet.

Het reactorwater, dat door de buizenbundel van de stoomgenerator stroomt, heeft een temperatuur van ongeveer 320°C onder een druk van circa 150 bar, zodat het niet kan verdampen. Het vervult zowat dezelfde functie als de brander in een klassieke centrale.

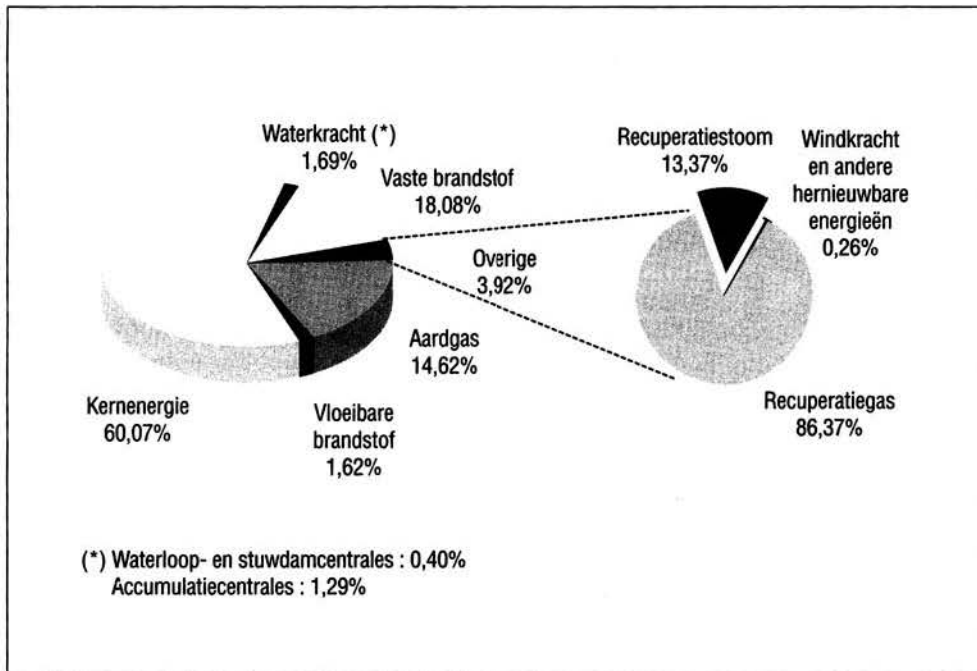
Het deel reactor-stoomgenerator vormt de primaire kringloop. Waar in een klassieke centrale het water onmiddellijk wordt omgezet in stoom, is er in de kerncentrale van het type met water onder druk (PWR – Pressurised Water Reactor) een tussenstap (cf. figuur 42). Alle Belgische reactoren zijn van dit type.

In de warmtewisselaar of stoomgenerator wordt water van een tweede kringloop door contact met de hete pijpen, waarin het reactor-koelwater stroomt, omgezet tot stoom. De stoom doet de turbine draaien waaraan de alternator is gekoppeld.

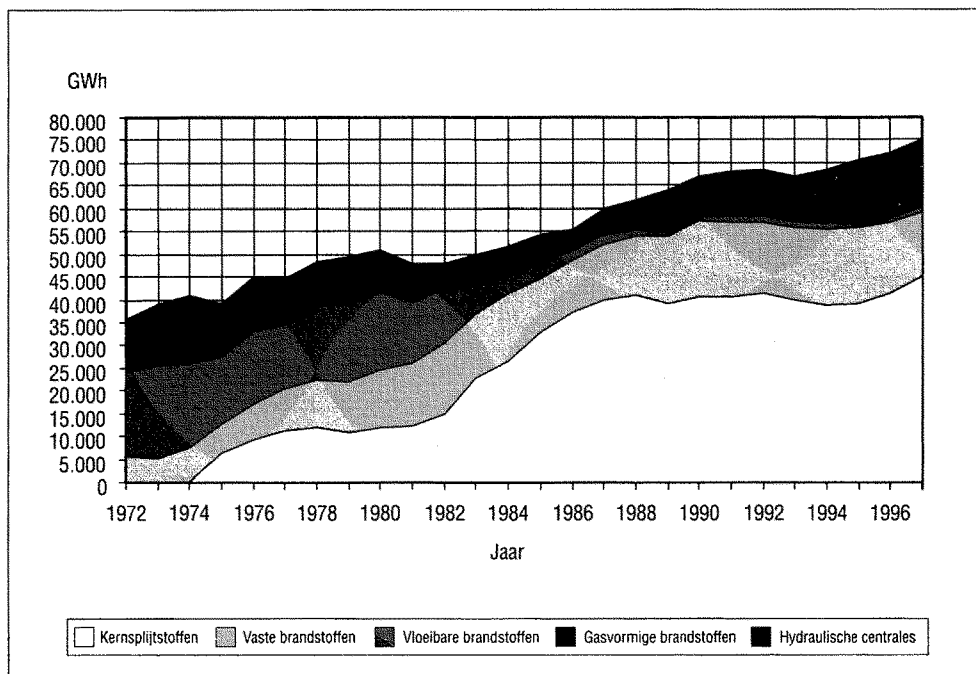
De mechanische en elektrische installaties van een kerncentrale (turbine – alternator – condensor) en een klassieke thermische centrale zijn identiek.



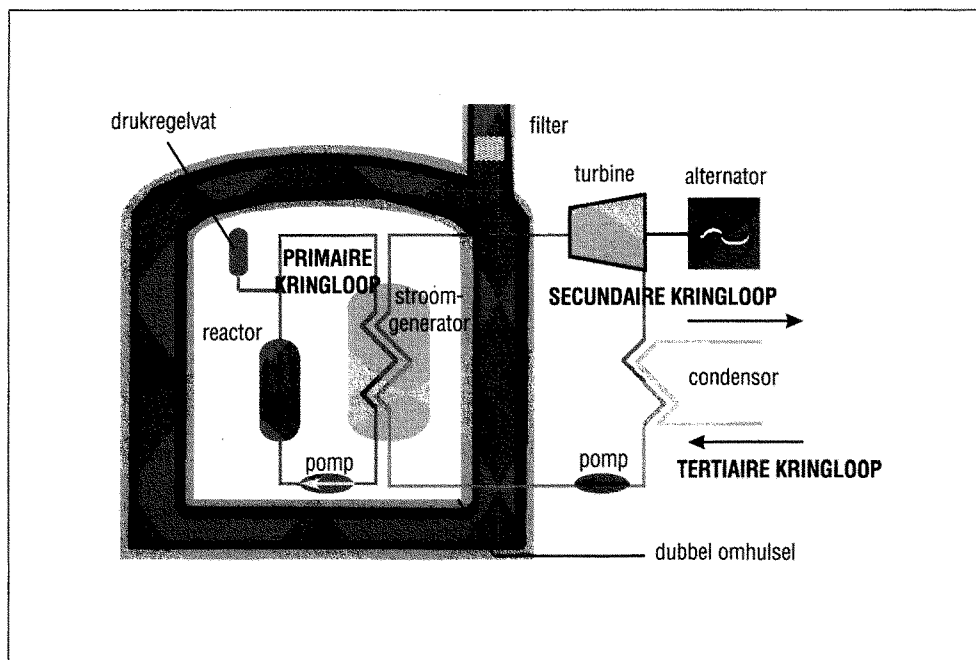
Figuur 39. | Weringsprincipe van een kerncentrale.



Figuur 40. | Netto-elektriciteitsproductie in 1997 opgesplitst per energiebron (%) (totale productie 75.079 GWh).



Figuur 41. Evolutie van de netto-elektriciteitsproductie tijdens de periode 1972-1997 (GWh), opgesplitst per energiebron.



Figuur 42. Principeschema van een PWR-centrale – België – detail.

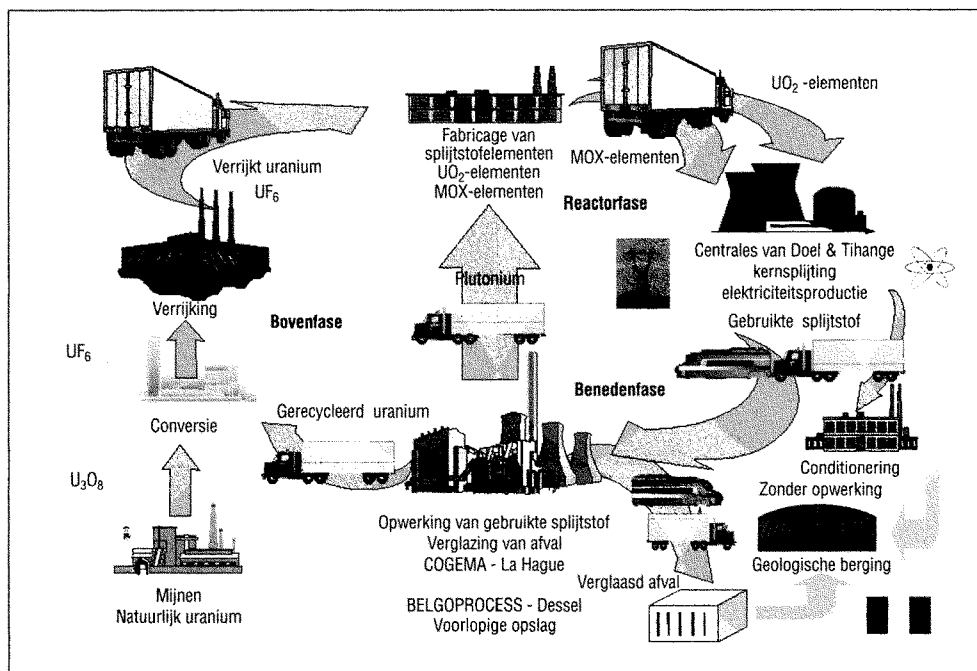


Figuur 43. | Kerncentrale van Doel met een vermogen van 2.776 MWe.

3.2.7.2 | De Belgische splijfstofcyclus

Men verstaat onder de term '*splijfstofcyclus*' het verblijf van de splijstofelementen in de reactor en alle operaties die plaatsvinden vóór de lading van nieuwe elementen en na de ontlading van energetisch uitgeputte elementen (cf. figuur 44). De splijfstofcyclus kan in drie fases ingedeeld worden:

- *De bovenfase*: zij begint bij de ontginning van de uraniumhoudende ertsen en eindigt bij de levering van de splijstofelementen aan de kerncentrale. Vooraleer de splijstof in de reactor wordt geladen, ondergaat zij een lange reeks transformaties, namelijk:
 - de ontginning en concentratie van het erts;
 - het omzetten in hexafluoride (conversie);
 - de verrijking;
 - de fabricage van de splijstofelementen.
- *De reactorfase*: zij begint bij de lading van splijstofelementen in de reactor en eindigt bij het ontladen van de energetisch uitgeputte elementen die een welbepaald aantal irradiatiecycli hebben doorlopen. De periode tussen het starten en het stilleggen van de reactor voor ontlading en herlading van splijstofelementen wordt aangeduid door de term '*irradiatiecyclus*'. Na elke irradiatiecyclus (bedrijfsperiode van de reactor) wordt er een kwart tot een derde van de elementen definitief ontladen en vervangen door een gelijk aantal nieuwe elementen.



Figuur 44. De Belgische splijtstofcyclus.

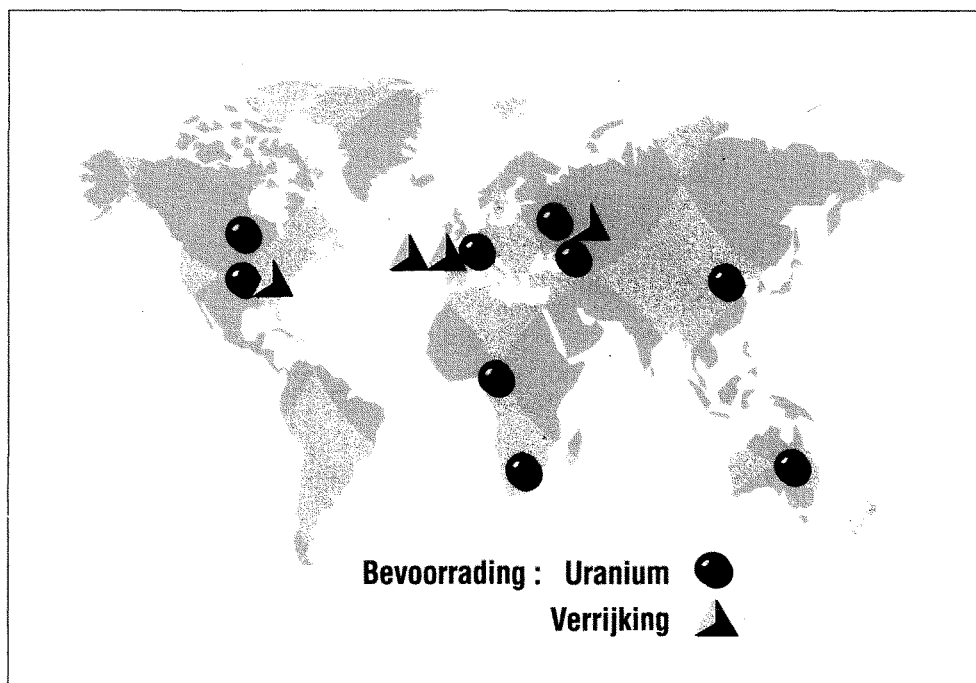
- De *benedenfase*: zij begint bij het ontladen van energetisch uitgeputte splijtstofelementen en eindigt bij de definitieve berging van het afval.

De verantwoordelijkheidsverdeling tussen de verschillende intervenanten in de splijtstofcyclus wordt weergegeven in bijlage 8.

3.2.7.3 | Uraniumbevoorrading

Australië, Canada, de Verenigde Staten, het GOS, China, Zuid-Afrika, Namibië, Niger en Gabon zijn de belangrijkste producenten van uranium (cf. 2.1.3 en figuren 45 en 46). België verzekert haar bevoorrading door middel van contracten op middellange en lange termijn met leveranciers uit deze landen. De Belgische bevoorrading wordt aangevuld door de recyclage van plutonium en uranium en door punctuele spotaankopen. België bezit geen ontginbare uraniumplaats. Er is echter een Belgische productie van ongeveer 40 ton per jaar door extractie van uranium uit Marokkaanse fosfaten. Deze fosfaten worden ingevoerd voor de productie van fosforzuur, vooral bestemd voor de landbouw. De Belgische uraniumproductie dekt ongeveer 5% van de vraag. Het ontgonnen uraniumerts wordt eerst gebroken en vergruisd, daarna geconcentreerd en omgezet in een verwerkbare chemische vorm. Het eindproduct wordt 'uraniumconcentraat' of ook 'yellowcake' genoemd; meestal heeft het de vorm van U_3O_8 .

Om natuurlijk uranium te verrijken moet het uraniumconcentraat worden omgezet in een fluorhoudende verbinding, uraniumhexafluoride UF_6 . Deze bijzondere vorm is gekozen



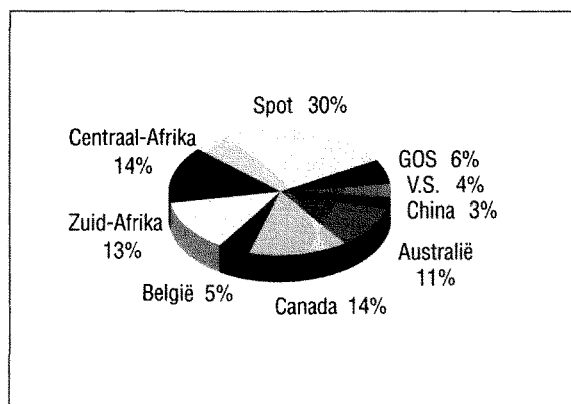
Figuur 45. | Uraniumproducenten en verrijkingsfabrieken.

om zijn fysische eigenschappen: UF_6 is vast bij kamertemperatuur en wordt een gas zodra het verwarmd wordt op meer dan $56^\circ C$.

De conversie van uraniumconcentraten in hexafluoride vindt hoofdzakelijk plaats in Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten, Canada en het GOS.

Sommige conversie-installaties voltooien de zuivering van het gerecycleerd uranium en produceren een uraniumhexafluoride dat opnieuw verrijkt kan worden.

België vertrouwt het uitvoeren van de conversiediensten toe aan vrijwel alle bestaande fa-

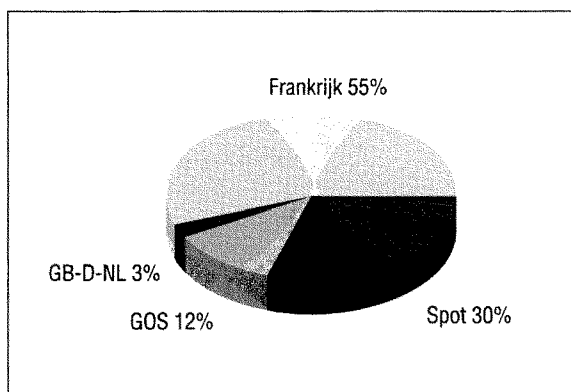


Figuur 46. | Uraniumbevoorrading 1985-1995.

brieken in het kader van langetermijncontracten: Cameco in Canada, Comurhex in Frankrijk, British Nuclear Fuel (BNFL) in het Verenigd Koninkrijk en Converdyn in de Verenigde Staten.

De procédés die gebruikt worden om het uranium te verrijken zijn gebaseerd op een fysische scheiding, dat wil zeggen: door het verschil in massa tussen de twee isotopen die in natuurlijk uranium aanwezig zijn.

Het meest gangbare procédé is de *gasdiffusie*, waarbij gasvormig



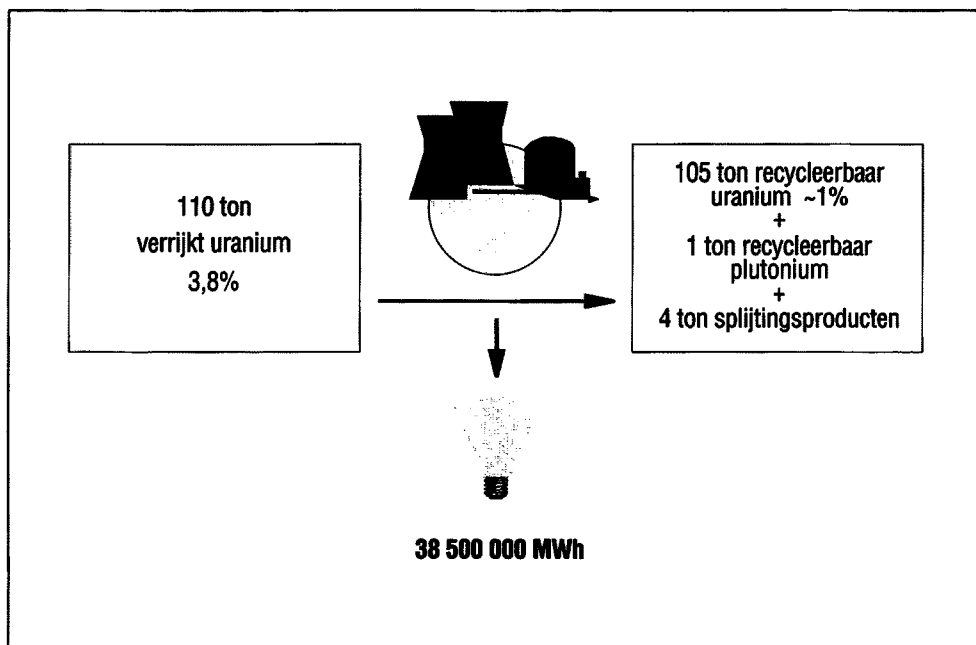
Figuur 47. | Verrijkingdiensten 1985-1995.

uraniumhexafluoride gestuwd wordt door een reeks wanden voorzien van microscopische poriën. U-235, dat lichter is, diffundeert sneller dan U-238. Iedere keer dat een hoeveelheid gas door de wanden gaat, verrijkt het zich een beetje in U-235. Deze operatie moet ongeveer duizendmaal worden uitgevoerd om een verrijking van 3,8% te bekomen. Het procédé wordt toegepast in Frankrijk en de Verenigde Staten. Een ander procédé, de *ultracentrifugering*, wordt toegepast in Nederland, het Verenigd Koninkrijk, Duitsland, het GOS en op

kleinere schaal in Japan. Het uraniumhexafluoride wordt geplaatst in op grote snelheid draaiende centrifuges.

Om 1 kg verrijkt uranium te bekomen is er ongeveer 8,5 kg natuurlijk uranium (0,711% U-235) nodig. Na verrijking bekomt men enerzijds 1 kg uranium met 3,8% U-235 (verrijkt uranium) en anderzijds 7,5 kg uranium met 0,3% U-235 (verarmd uranium).

Voor de bevoorrading van de zeven Belgische kerncentrales heeft men jaarlijks ongeveer 1.000 ton natuurlijk uranium nodig. Na afloop van de verrijkingsoperatie is de 1.000 ton



Figuur 48. | Jaarlijkse hoeveelheden uranium in Belgische centrales.

natuurlijk uranium, 110 ton verrijkt uranium (3,8% U-235) geworden, nog altijd onder de chemische vorm UF_6 (cf. figuur 48).

Ons land vertrouwt het uitvoeren van de verrijkdienst hoofdzakelijk toe aan Eurodif in Frankrijk (cf. figuur 47). Eurodif is de tweede producent in de wereld en België heeft een participatie van 11% in het bedrijf.

Nadat het natuurlijk uranium werd verrijkt, kunnen de splijtstofelementen worden vervaardigd. Het verrijkt uraniumhexafluoride wordt eerst omgezet in UO_2 -poeder. De poeders worden vast aangedrukt door geautomatiseerde persen en in een oven bij $1.800^\circ C$ gesinterd. De bekomen keramische tabletten worden in Zircalloy-buizen geschoven. Aan de uiteinden van de buizen wordt een dop gelast. De afgewerkte splijtstofstiften worden ingebracht in een geraamte bestaande uit acht à tien vierkante roosters, bijeengehouden door geleidingsbuizen. Het geheel wordt nog voorzien van een kop- en voetstuk.

In bijna de gehele wereld zijn er fabrieken voor de fabricage van splijtstofelementen. De Belgische nucleaire exploitanten vertrouwen de fabricage toe aan een aantal daarvan: de Frans-Belgische Maatschappij voor Fabricage van Brandstoffen (FBFC) in Dessel (België) en in Romans (Frankrijk), Advanced Nuclear Fuels (ANF) in Lingen (Duitsland) en in Richland (VS), ABB in Zweden, RBU-Siemens in Duitsland.

3.2.7.4 | Opwerking, recyclage van splijtstoffen en afvalproductie

Ingevolge een regeringsbeslissing die werd genomen in december 1993, na het parlementair debat terzake van 1993, staat de optie niet opwerken (open cyclus) op voet van gelijkheid met de optie opwerking en recyclage (gesloten cyclus).

In uitvoering van de regeringsbeslissing worden de studies in verband met directe berging (open cyclus) prioritair voortgezet.

Tabel 13. | Opwerkingscontracten van België.

Opwerkingsperiode	Hoeveelheden	Al opgewerkt (31 december 1998)
1980-1985	140 ton	140 ton
1990-2000	530 ton	453 ton
2001-2010	225 ton	opgezegd
2001-2015	opties tot 120 ton per jaar	opgezegd

Tot aan het volgende parlementaire debat wil men in België, voor de periode na 2000, de keuze tussen beide opties openhouden.

Wat de gesloten cyclus betreft heeft België contracten afgesloten met Cogema, het bedrijf dat de opwerkingsfabriek in La Hague (Frankrijk) exploiteert (cf. tabel 13).

Van 1990 tot het jaar 2000 zal de opwerking van splijtstoffen leiden tot het terugwinnen van ongeveer 4,8 ton plutonium en 485 ton uranium. In uitvoering van de regeringsbeslissing van 1993 werden de contracten voor opwerking na het jaar 2000 opgeschort. Op verzoek van de huidige regering werden deze contracten in december 1998 definitief opgezegd.

Tot het volgende parlementaire debat worden voor de periode post-2000 de oplossingen open gelaten.

Tijdens het komende parlementaire debat, voorzien na de verkiezingen van midden 1999, zal men de situatie opnieuw beoordelen.

Het gebruik van gerecycleerd uranium en plutonium werd toegestaan door de regeringsbeslissing van december 1993. De splijtstofelementen met gerecycleerd uranium worden thans geladen in Doel 1. Het gerecycleerde plutonium wordt gebruikt voor de vervaardiging van een nieuw type splijtstofelement, het MOX-element (mengsel van uranium en plutonium). Het gerecycleerde plutonium kan op een uitstekende manier U-235 vervangen. Een MOX-element is niets anders dan een splijtstofelement waarin plutonium (dat zich in een reactor heeft gevormd) wordt vermengd met uranium.

Door de opwerking van zeven gebruikte standaard splijtstofelementen kan men 35 kg plutonium recupereren (cf. figuur 49). Deze hoeveelheid is voldoende om 1 MOX-element te vervaardigen.

Tijdens de vier jaar dat een MOX-element in de reactor verblijft, daalt de plutoniuminhoud van 35 naar 26 kg. Er wordt dus 9 kg verbruikt (cf. figuur 49). Telkens wij een standaard element vervangen door een MOX-element, voorkomen we de productie van 5 kg plutonium. Iedere keer dat een MOX-element wordt geladen in de reactor, vermindert men dus de uiteindelijke hoeveelheid plutonium met 14 kg (9 + 5). Men spreekt hier van een negatieve plutoniumbalans.

In België wordt, dankzij het gebruik van 16 MOX-elementen per jaar, de plutoniumbalans telkens weer verminderd met 224 kg.

MOX-elementen werden vanaf 1963 ingezet in de BR3 van het SCK en vanaf 1974 in de Frans-Belgische centrale van Chooz A. De opgedane ervaring met MOX-elementen heeft hun veilige en betrouwbare werking aangetoond.

De vergunning om MOX-elementen te gebruiken in Doel 3 en Tihange 2 werd op 1 juni 1994 door de bevoegde overheid afgeleverd. Het aantal MOX-elementen aanwezig in de kern van elke reactor, is beperkt tot 37. Sedert 1995 worden MOX-elementen geladen in Doel 3 en Tihange 2.

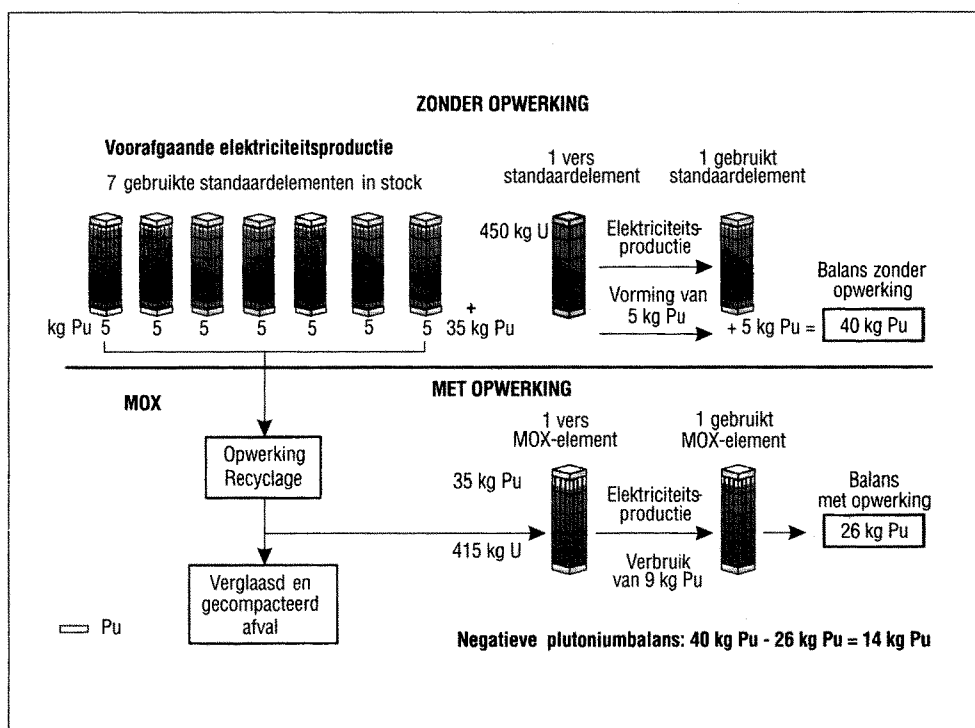
In de fabriek van Belgonucleaire te Dessel worden de MOX-splijtstoftabletten vervaardigd en de splijtstofstiften samengesteld en afgewerkt. De assemblage van de splijtstofstiften gebeurt bij FBFC in Dessel.

De productie van MOX-elementen wordt aangepast aan de hoeveelheid plutonium afkomstig van de opwerking; zo is er geen overtollige Belgische plutoniumvoorraad.

In de komende tien jaar zal er met de gerecycleerde splijtstoffen een hoeveelheid elektriciteit geproduceerd worden die overeenkomt met het Belgische elektriciteitsverbruik van ongeveer een jaar.

In de opwerkingscontracten afgesloten tussen Cogema en de buitenlandse klanten is voorzien dat de afvalstoffen die tijdens de opwerking worden gescheiden van het uranium en plutonium, naar het land van herkomst worden teruggestuurd. De uitvoering van de contracten afgesloten door Synatom voor de periode tot 2000 werd, zoals reeds vermeld, door het Parlement en de Regering bevestigd, na een debat dat in 1993 plaatsvond.

De splijttingsproducten, die 3% uitmaken van de kernbrandstof en 98% bevatten van de radioactiviteit, hadden vanaf 1997 onder verglaasde vorm geleidelijk naar België moeten terugkomen. Tot nu toe is er nog niets gebeurd.



Figuur 49. | Gebruik van MOX-elementen.

Deze afvalstoffen worden ingebed in borosilicaatglas. Het borosilicaatglas is een uitstekend matrixmateriaal om de verschillende scheikundige elementen in het afval in een vaste vorm te brengen. Het eindproduct is een zwart glas dat bestand is tegen straling en warmte, en tegen insijpeling van water.

Het glasproduct bevindt zich in een roestvrije stalen container. Een glascontainer is een koker van 1,34 m hoog en 43 cm diameter. De wand is 5 mm dik. De container heeft een inhoud van ongeveer 150 liter en kan 400 kg glasproduct bevatten. In het glasproduct is er gemiddeld 14% hoogactief afval aanwezig. Een dergelijke container bevat 98% van de radioactiviteit die ontstaat bij het gebruik van 1,5 ton splijtstof in de centrales, of de productie van 525 miljoen kWh.

In één glascontainer vindt men de resten terug van het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van 100.000 Belgische gezinnen.

In uitvoering van de opwerkingscontracten zal er in het totaal 75 m³ glasproduct, verdeeld over een 420-tal glascontainers, naar België worden teruggestuurd. Een volume van 75 m³ komt overeen met een kamer van 5 meter op 5 en 3 meter hoog.

Gelijksoortige afvalstoffen werden tussen 1985 en 1991 bij Belgoprocess in Dessel verglaasd en veilig opgeslagen in een afzonderlijk gebouw. Deze afvalstoffen behoren tot het passief van Eurochemic. Zij werden overgedragen aan de Belgische staat, in uitvoering van vroegere afgesloten multilaterale conventies met de deelnemende landen aan het project Eurochemic.

3.2.7.5 | Voordeel van het gebruik van kernenergie

Dankzij het gebruik van kernenergie kunnen we in België ieder jaar meer dan 20 miljard frank aan deviezen besparen door de aankoop van geïmporteerde aardolie, aardgas en steenkool te vermijden.

Het is ook belangrijk te weten dat er voor de productie van 1.000 kWh elektriciteit nodig is:

- ofwel 350 kg steenkool;
- ofwel 250 liter aardolie;
- ofwel 300 m³ aardgas.

Er is echter minder dan 4 gram uranium nodig.

Een elektriciteitscentrale van 1.000 MWe produceert bij een jaarlijkse werking van 6.600 uur 6,6 miljard kWh. Voor deze productie verbruiken fossiele centrales en kerncentrales de volgende hoeveelheden brandstof en splijtstof:

- steenkool: 2,30 Mt. Om deze hoeveelheid te transporteren heeft men 23.000 spoorwegwagons nodig of 65 ertsschepen;
- aardolie: 1,65 miljard liter. Voor het transport van deze hoeveelheid heeft men drie supertankers nodig;
- aardgas: 2 miljard m³. Voor het transport van deze hoeveelheid heeft men een gazoduc nodig of enkele tientallen methaantankers;
- uranium: 26,4 t. Voor het transport van deze hoeveelheid heeft men enkele vrachtwagens nodig.

Als men weet dat het gemiddelde elektriciteitsverbruik van een Belgisch gezin per jaar ongeveer 3.500 kWh bedraagt, dan kan men zich zonder moeite voorstellen wat een massa's fossiele grondstoffen er extra nodig zouden zijn om onze kerncentrales te vervangen door fossiele centrales, en wat een milieuvervuiling ze zouden veroorzaken. Kerncentrales dragen niet bij tot het broeikaseffect, de ozongaten en de zure regens.

3.3 | De productie en het milieu

3.3.1 | Emissies van CO₂

In 1997 stootten de elektriciteitscentrales ongeveer 22 miljoen ton CO₂ uit. De specifieke CO₂-emissies bedroegen 0,29 kg CO₂/totale kWh en 0,78 kg CO₂/fossiele kWh. De evolutie van de CO₂-emissies wordt in sterke mate beïnvloed door het aandeel van de kerncentrales in de elektriciteitsproductie. In 1986 bereikte dit aandeel zijn tot dusver maximale waarde van 67,2% (cf. figuur 41) en waren de totale CO₂-emissies het laagst sinds 1980.

De specifieke CO₂-emissies van het Belgische productiepark (60% elektronucleaire productie) behoren tot de laagste in Europa en in de wereld; alleen Frankrijk (0,1 kg CO₂/kWh) heeft nog lagere emissies dankzij de massale inzet van kerncentrales (79% elektronucleaire productie).

Luxemburg (1,17 kg CO₂/kWh), Griekenland (0,99 kg CO₂/kWh) en Denemarken (0,86 kg CO₂/kWh) zijn de grootste vervuilers in Europa. Door het gebruik van kerncentrales werd in België in 1997 een uitstoot van 35 miljoen ton CO₂ vermeden.

3.3.2 | De verzurende emissies

In 1997 bedroegen de SO₂-emissies 61 kton (2 miljard zuurequivalenten).² De specifieke emissies bedroegen 0,81 g SO₂/kWh en 2,16 g SO₂/kWhf. De emissies van NO_x bedroegen in datzelfde jaar 45 kton (1 miljard zuurequivalenten) en de specifieke emissies waren 0,60 g NO_x/kWh en 1,59 g NO_x/kWhf. Frankrijk en België zijn weer koplopers in Europa. Behalve Nederland doen de andere Europese landen het bijzonder slecht. Door het gebruik van kerncentrales werd in België in 1997 een uitstoot van 97 kton SO₂ en 72 kton NO_x vermeden.

3.3.3 | Andere pollutanten

In 1997 stootten onze steenkoolcentrales zo'n 5 kton stof uit. De specifieke emissies bedroegen 0,067 g stof/kWh en 0,18 g stof/kWhf. De elektriciteitscentrales produceerden ook 640 kton vliegias. Dankzij het gebruik van kernenergie hebben we een uitstoot van 8 kton stof en 1.000 kton vliegias vermeden.

Door de steenkoolcentrales werd zo'n 7 ton zware metalen uitgestoten zoals arseen, cadmium, enzovoort.

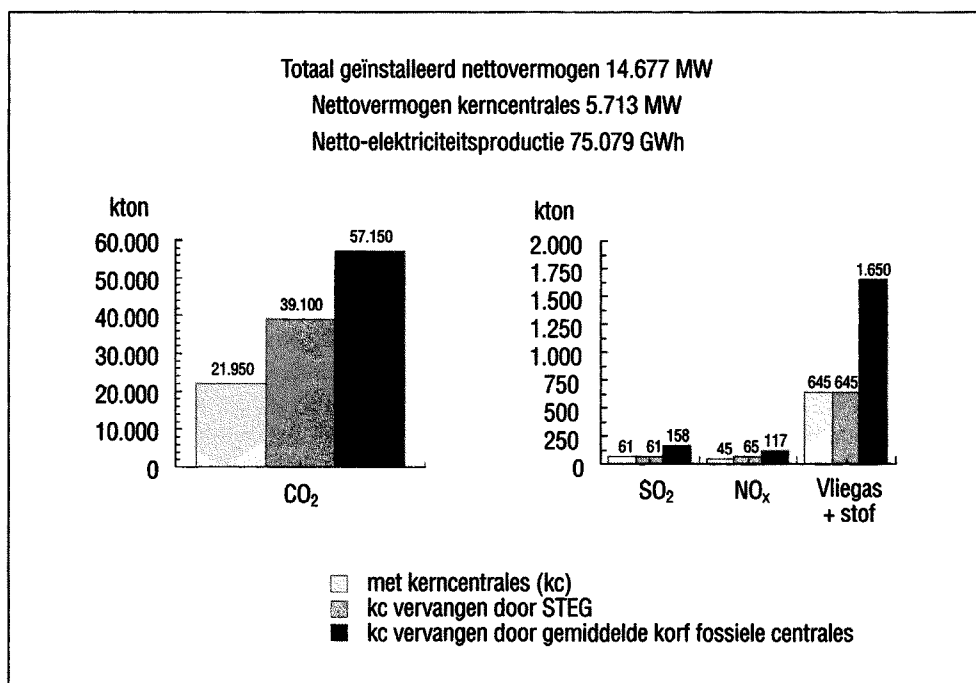
3.3.4 | Nucleaire impacten

De specifieke milieu-impacten eigen aan de productie van elektriciteit door kerncentrales zijn klein. Dit werd uitvoerig behandeld in punt 2.2.4. De Belgische situatie werd in dit deel als typevoorbeeld doorgelicht.

3.3.5 | Milieuprestaties van de Belgische elektriciteitscentrales in 1997

In figuur 50 worden voor 1997 de milieuprestaties van de Belgische elektriciteitscentrales weergegeven.

2. Het verzurend effect van emissies wordt uitgedrukt in zuurequivalenten (zeq.). Voor NO_x bedraagt het verzurend effect 21,7 zeq/kg tegenover 31,2 zeq/kg voor SO₂.



Figuur 50. Milieuprestaties van de Belgische elektriciteitscentrales in 1997.

3.4 Economische aspecten

Ons land bezit zelf bijna geen energiebronnen: we zijn praktisch volledig afhankelijk van het buitenland. België voert een energetische politiek van diversificatie, zowel wat het type brandstoffen en splijtstof als wat de importlanden betreft.

Economisch gezien bieden kerneenheden een stabiele en relatief lage kWh-prijs. De reden is dat de splijtstof slechts voor 23% tussenbeide komt in de kostprijs van het kWh, daar waar voor de klassieke kWh de brandstof voor 50% of meer tussenkomt. Daarenboven draagt het kWh uit kernenergie alle kosten, inclusief voor de ontmanteling van de installaties en het beheer van het radioactief afval tot en met de veilige berging ervan.

De investering in een kerncentrale is hoog, onder meer door de veiligheidsmaatregelen. De investeringskosten dragen voor een goede 40% bij tot de prijs van het kWh. Het voordeel is dat de investeringskosten binnenlandse uitgaven zijn, wat ten goede komt aan onze betalingsbalans. De bouw van een kerncentrale is ook werkintensief. De bouw van een centrale van 1.000 MW vertegenwoordigt 40 miljoen werkuren in België, of het equivalent van 2.500 betrekkingen gedurende tien jaar. Daarenboven zijn de buitenlandse productie-uitgaven voor de aankoop van splijtstof gering en liggen de voornaamste uraniumreserves in politiek stabiele landen zoals de Verenigde Staten, Canada en Australië. Ten gevolge van de diverse oliecrisisen en met het doel onze afhankelijkheid van de fossiele brandstoffen te verminderen en een groot deel van onze bevoorrading veilig te stellen, heeft België geopteerd voor stroomopwekking deels op basis van kernenergie.

Alhoewel kerncentrales duurder zijn in investering en meer hooggespecialiseerd onderhoud en studiewerk vergen dan klassieke eenheden, kost de splijtstof evenwel merkkelijk minder dan fossiele brandstof. De kostprijs van het nucleaire kWh en het klassieke kWh wordt in tabel 14 vergeleken.

Tabel 14. | Elektrische productiekosten.

Productiekost mECU/kWh	Kernenergie 1000 MWe ³	Kolen 600 MWe	STEG - Aardgas 300 MWe
Vaste kosten ⁴	33	27	11
Proportionele kosten ⁵	8	22	29
Totaal	41	49	40

Constante ECU 1997 – Intrestvoet 5% – Afschrijvingsduur 20 jaar – Benuttingsfactor 80% (7.000 uren/jaar)

De nucleaire productiekost bedraagt vandaag slechts 85% van de klassieke thermische productiekost (gemiddeld Belgisch productiepark). De procentuele (%) productiekostenverdeling wordt voor beide types weergegeven in tabel 15.

Tabel 15. | Procentuele verdeling van de productiekosten.

Deelkost	Nucleaire productie	Gemiddelde klassieke thermische productie
Brandstoffen – splijtstof	23	50
Exploitatie	35	36
Investerings + financiële lasten	42	14
Totaal	100	100

De Belgische kerncentrales werken zoveel mogelijk op vol vermogen, zowel overdag als 's nachts. Zij leveren het grootste deel van de stroom aan het net: door hun omvang en de splijtstof waarop ze werken, produceren ze het goedkoopste kWh.

De productiekost van een STEG-centrale ligt aan de huidige lage gasprijs nu iets lager dan de nucleaire kostprijs. De brandstofprijsschommelingen hebben een zeer sterke invloed op de kostprijs van dit productietype, wat niet het geval is voor de nucleaire productie.

-
- Onder normale omstandigheden hebben de Belgische kerncentrales doorgaans een benuttingsfactor tussen 95 en 99%.
 - Vaste kosten: bouwkosten, investeringskosten, financiële lasten, vaste exploitatiekosten, enzovoort. Bij kernenergie zijn bij de vaste kosten de ontmantelingskosten inbegrepen.
 - Proportionele kosten: brandstof-splijtstofkosten, specifiek verbruik. Bij kernenergie zijn bij de proportionele kosten de opslag- en bergingskosten van het radioactief afval inbegrepen.

Daarbij komt nog dat we voor onze gasbevoorrading sterk afhankelijk zijn van politiek onstabiele landen. Een gascrisis is in de toekomst goed denkbaar.

Om volledig te zijn moeten we de *externe kost* voor de verschillende types van energieproductie evalueren.

Voor de econometist is een externe kost (externality cost) het financieel gevolg van ieder extern verschijnsel (externality) dat een impact heeft op het welzijn van de individuen en veroorzaakt wordt door een bepaalde economische activiteit, maar niet wordt verrekend in het prijzensysteem, bijvoorbeeld de CO₂-, NO_x-, SO_x- en stofemissies ten gevolge van de elektriciteitsproductie met fossiele brandstoffen, radioactieve lozingen ten gevolge van de elektronucleaire productie, enzovoort.

Tabel 16. | Externe kosten.

Energievorm	Externe kost mECU/kWh(*)	Equivalent dodenaantal per GWj
Kolen	15	37
Ligniet	10	27
Aardolie	12	32
Aardgas	0,6	2
Wind	2,2	0,3
Hydro	2,2	0,8
Kernenergie ⁶	0,4	1

Bron: Externalities of Energy, ExternE report, Rep. EUR-16522, EC, Brussels (1995).

(*) De externe kost met betrekking tot de CO₂-emissies is niet inbegrepen. De evaluatie van deze kost, gezien zijn complexiteit, is nog niet afgerond. Men kan nu al stellen dat voor fossiele brandstoffen – met uitzondering van aardgas – de externe kost van dezelfde orde van grootte is als die van de brandstofprijs. Wat aardgas betreft, ligt deze kost wel lager. Voor kernenergie en de hernieuwbare energieën is deze kost te verwaarlozen.

In de externe kost worden de directe en toekomstige financiële gevolgen van een economische activiteit verrekend, namelijk de schade toegebracht aan het milieu, de impact op de volksgezondheid, de schade aan gebouwen, en dergelijke.

De Europese commissie heeft tussen 1991 en 1995 een methodologie ontwikkeld om de externe kost voor iedere energieproductievorm te bepalen. De resultaten van de EC-studie worden weergegeven in tabel 16.

Wanneer wij de som 'productiekost + externe kost' maken (cf. tabellen 14 en 16), dan bestaat er geen twijfel meer over dat kernenergie de meest competitieve energiebron is. In sommige westerse landen overweegt de overheid voor de toekomst trouwens de invoering van een CO₂-emissiebelasting met het doel de emissiearme energiebronnen te bevorderen.

6. Er werd rekening gehouden met zware accidenten zoals Tsjernobyl.

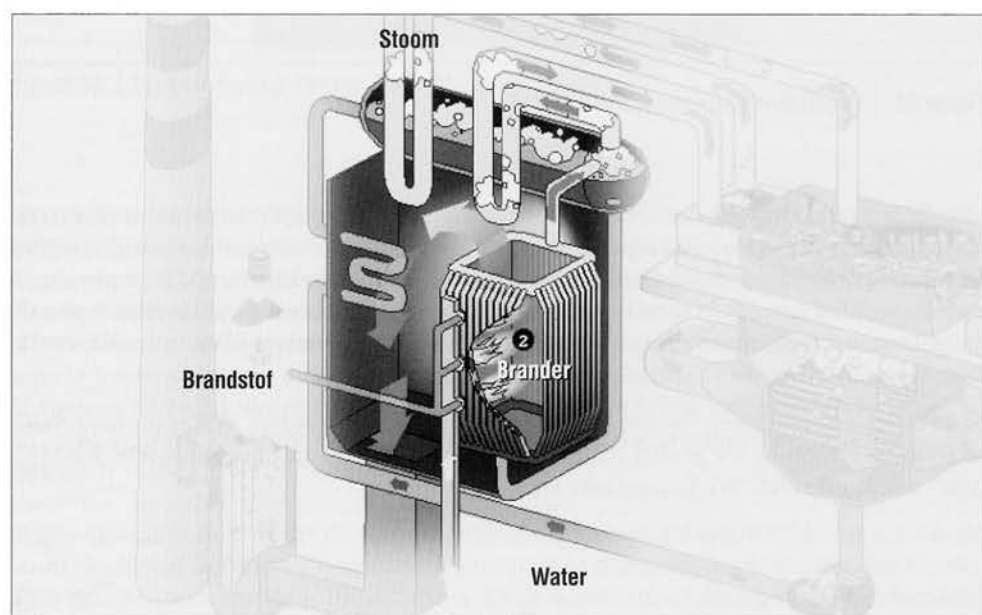
4. | Kernenergie

4.1 | De veiligheid van nucleaire installaties

4.1.1 | Herhaling van enkele basisbegrippen

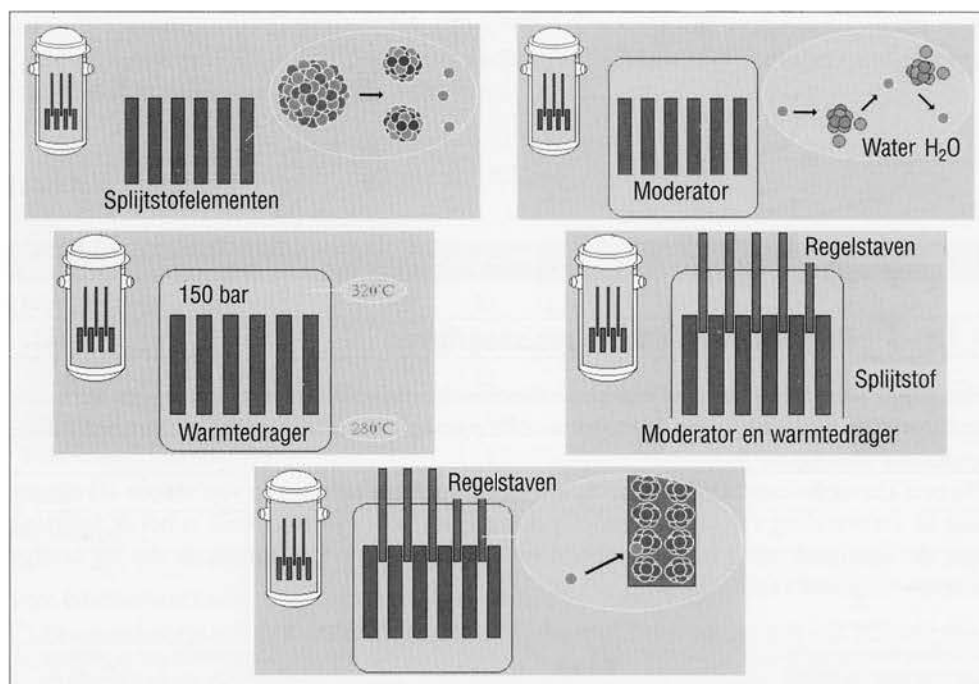
Het enige verschil tussen een klassieke thermische elektriciteitscentrale en een kerncentrale zit in de manier waarop de stoom wordt opgewekt voor het aandrijven van een turbo-generator (cf. figuur 51).

Bij een klassieke centrale is de nodige warmte voor het opwekken van stoom afkomstig van de verbranding van kolen, aardolie of aardgas. In een kerncentrale is het de splitsing van de uraniumkernen in een stabiele en gecontroleerde kettingreactie die de nodige warmte vrijmaakt (cf. 3.2.7.1).



Figuur 51. | Klassieke thermische centrale.

Bij de meeste reactoren die heden ten dage in de wereld in bedrijf zijn, wordt deze warmte onttrokken door watercirculatie (de primaire kring die bestaat uit één of meer lussen) (cf. figuur 53). Voor de eigenlijke stoomproductie en het transport ervan naar de turbine worden uiteenlopende methoden gebruikt. Om de kernreactie constant te houden moet zich een constant aantal splitsingen per seconde voordoen, en wel zo dat elke kernsplijting er welgeteld één andere veroorzaakt, niet meer en niet minder.

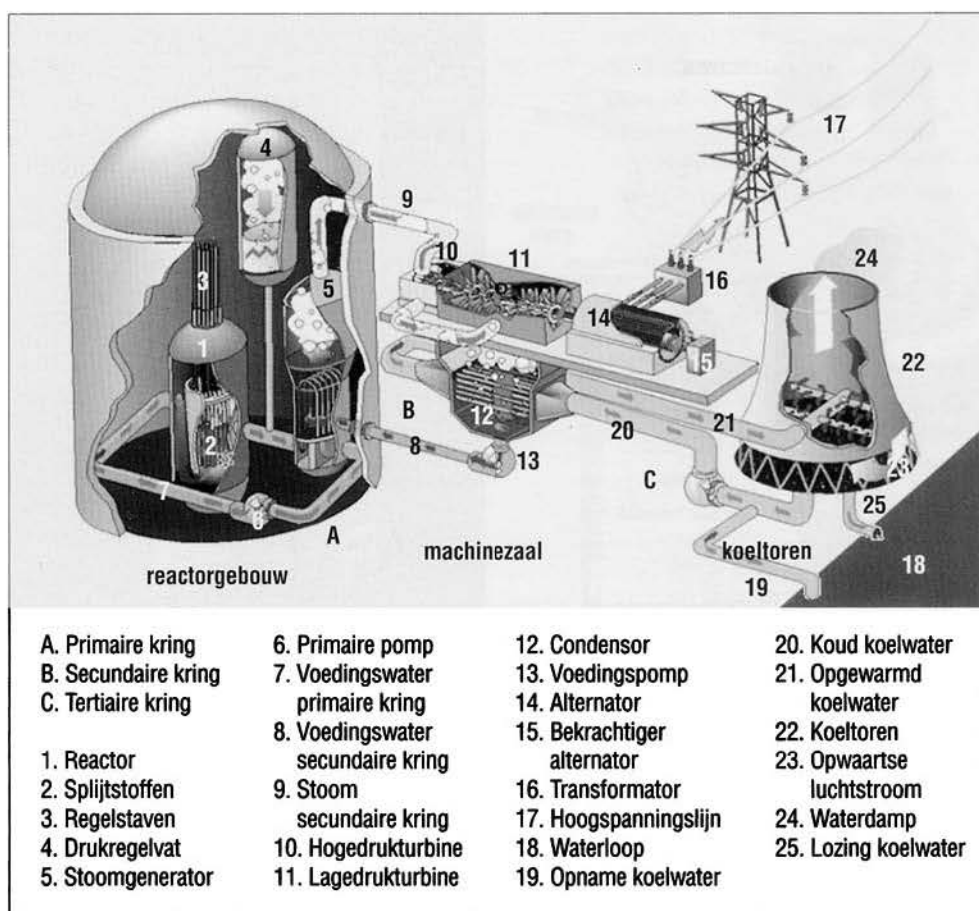


Figuur 52. | Principewerking van een PWR (1).

Om dit te bereiken heeft men een voldoende hoeveelheid splijtbaar uranium (kritische massa) nodig, en het moet zo zijn dat de neutronen die uit de uraniumkernen geslingerd worden, vertraagd worden tot op een snelheid die voldoende laag is opdat ze gevangen kunnen worden door de kernen er omheen. Slechts op die manier blijft de reactie aan de gang. Deze *neutronenvertraging* is mogelijk dankzij de aanwezigheid in de reactor van de zogenaamde ‘moderator’, die uit water of grafiet bestaat.

In de Belgische reactoren van het PWR-type is de moderator water. Water is onontvlambaar, in tegenstelling tot grafiet dat in sommige reactoren zoals het Russische RBMK-type¹ wordt gebruikt. We komen hier later op terug.

1. RBMK is een Russische afkorting en staat voor “vermogenreactor met kokend water”.

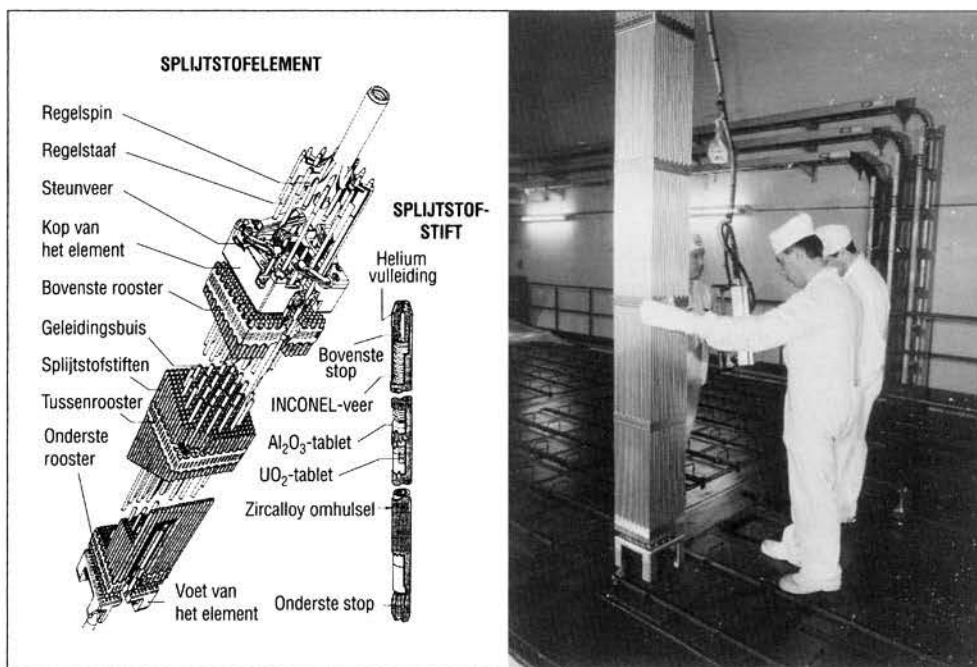


Figuur 53. | Principewerking van een PWR (2).

Het controleren van de reactie, en dus van het geproduceerde vermogen, kan op twee manieren gebeuren: ofwel met regelstaven die dieper of minder diep in het hart van de reactor worden geschoven, ofwel door middel van chemische absorptiemiddelen waarvan men de concentratie in het koelwater kan laten variëren. Het principe van beide systemen is hetzelfde: het absorberen van de neutronen in een regelbare hoeveelheid, om zo de reactie te kunnen regelen, en ook volledig te kunnen stopzetten.

In figuren 52 en 53 wordt de principewerking van een PWR schematisch beschreven (cf. ook 3.2.7.1). De technische gegevens van een PWR worden weergegeven in bijlage 6.

In een kerncentrale gebeurt de warmteproductie als volgt: de splijtstof komt voor in de vorm van kleine tabletten. Zij worden opgestapeld in stiften die aan hun uiteinden hermetisch gesloten worden: de splijtstofstiften. Deze worden dan samengebracht in bundels, die splijtstofelementen worden genoemd (cf. 3.2.7.3). Voor details verwijzen we naar figuur 54. Het geheel van de splijtstofelementen vormt het hart van een kernreactor.



Figuur 54. | Splijststofelement.

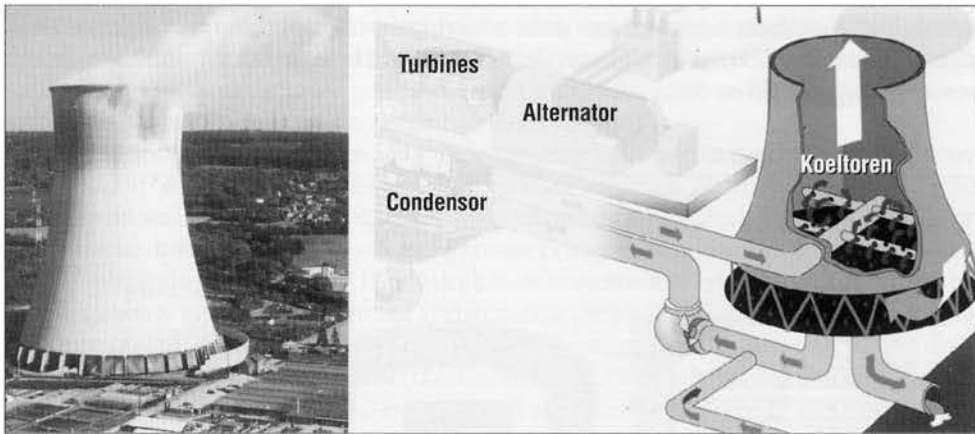
Door de kernsplijting in het uranium verhitten de stiften. Een warmtedrager of warmte-fluidum (water, gas of vloeibaar metaal), koelmiddel genoemd, stroomt tussen de stiften.

Bij de meeste reactoren (drukwaterreactoren) gebruikt men gewoon water als koelmiddel. Het water wordt erg heet – zo'n 300°C – maar gaat niet aan de kook omdat het onder hoge druk – zo'n 150 bar – wordt gehouden (cf. figuren 52 en 53).

Het verhitte water wordt naar een warmtewisselaar geleid: de stoomgenerator. Het reactorwater draagt zijn warmte over aan een afzonderlijke tweede of secundaire kring (de water-stoomkring). Het water uit dit circuit gaat wel over in stoom, omdat de druk er veel lager is dan in de primaire kring. De stoom dient om een turbine aan te drijven, waaraan een alternator is gekoppeld (cf. figuur 53).

Ten slotte gaat de stoom die de turbine verlaat, door afkoeling opnieuw over in water. Het koelproces gebeurt in de condensor, door middel van een tertiaire koelkring, waarin het koelwater afkomstig van een externe bron circuleert (cf. figuren 53 en 55). Als het een *open kringloop* betreft, ook 'met directe koeling' genoemd, komt het koelwater uit een stroom of rivier en wordt er iets warmer in teruggebracht. De stroom of rivier kent plaatselijk een temperatuurstijging. Wanneer thermische centrales gebouwd worden op plaatsen waar niet genoeg water voorhanden is of wanneer men voor de bescherming van het water moet afzien van de directe koeling, beschikt men over een gepaste oplossing: afkoeling in *gesloten kringloop*.

Eens het koelwater door warmte-uitwisseling met de stoom van de turbinekringloop verwarmd is, wordt het in een zogenaamde *koeltoren* gebracht.



Figuur 55. | Werking van een koeltoren.

Hoe een koeltoren werkt illustreren we in figuur 55. Het koelwater neemt in de condensor warmte op en wordt naar de koeltoren gepompt. Hier wordt het verdeeld over een horizontaal rooster, waarlangs het als een intense regen naar beneden druipt. Door contact met de opwaartse luchtstroom (natuurlijk schoorsteeneffect) koelt het water af; een kleine fractie (1,5%) ervan verdampt en ontsnapt als een damppluim bovenaan de toren. Een deel van het koelwater gaat terug naar de stroom of rivier. Het merendeel wordt in een bekken onderaan de toren verzameld en opnieuw gemengd met fris water uit de stroom of rivier naar de condensor geleid.

4.1.2 | De veiligheid van kerncentrales van het PWR-type

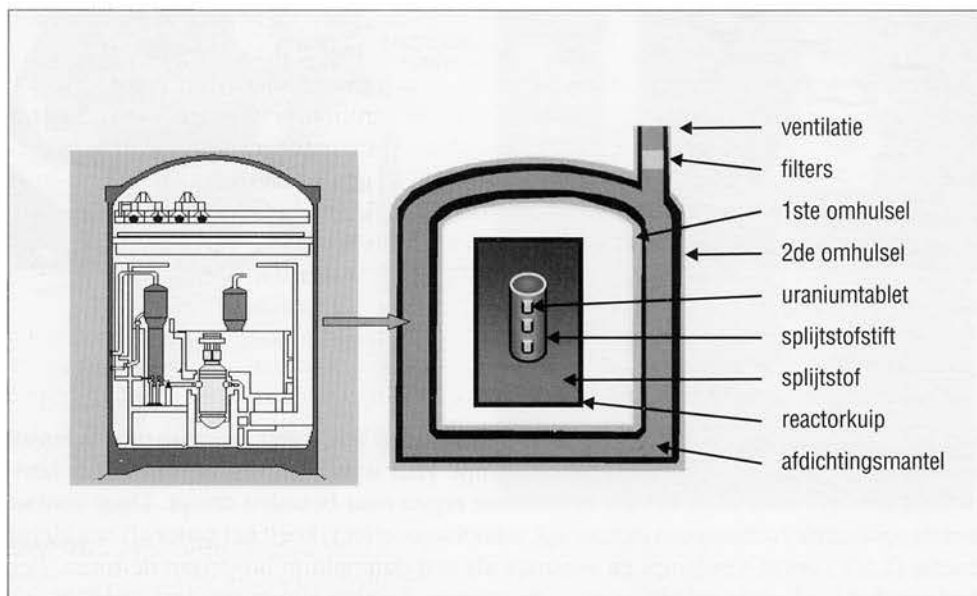
Het enige potentiële gevaar van een kerncentrale ligt in de hoograadioactieve splijtingsproducten, die in de splijtstofelementen geaccumuleerd worden. De beveiliging gebeurt door tussen de splijtingsproducten en de buitenwereld een voldoende aantal barrières te plaatsen, zodat bij het in gebreke blijven van één of meerdere ervan die producten toch niet doorgelaten worden. Figuur 56 geeft een schematische voorstelling van de verschillende barrières (cf. ook figuur 57).

Een eerste barrière wordt gevormd door de splijtstoftablet zelf, waarvan de materiaalstructuur zodanig is dat de splijtingsproducten er als het ware in gevangen blijven. De splijtstoftabletten zitten in hermetisch dichtgelaste stiften (cf. figuur 54) die vóór, tijdens en na het opvullen met aangerijkte uraniumtabletten diverse controles op de dichtheid ondergaan. Het Zircalloy-metaal waaruit de stiften zijn samengesteld, geleidt de warmte goed, maar houdt tegelijk de splijtingsproducten vast. Dit is de tweede barrière.

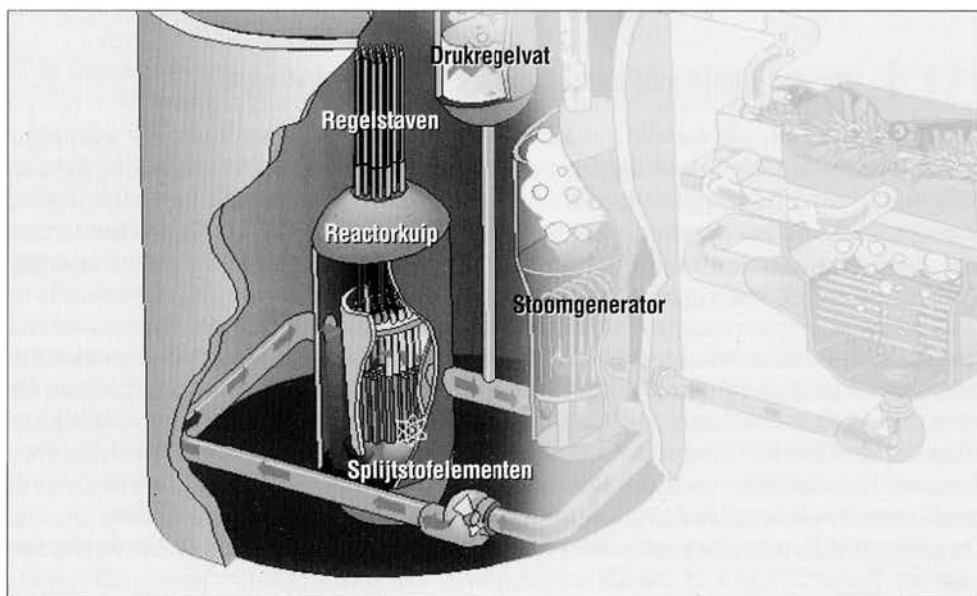
De splijtstofstiften worden gebundeld tot splijtstofelementen en geborgen in de reactor-kuip (cf. figuur 57), een 25 cm dikke stalen kuip. Dit is de derde barrière.

De reactor vormt samen met de stoomgenerator, het drukregelvat en de primaire kringloop, een hermetisch gesloten geheel (cf. figuur 53 en 57).

Een dubbel luchtdicht omhulsel met grote afmetingen sluit de gehele primaire kring van de buitenwereld af. De wanden van het dubbel omhulsel bestaan samen uit 2 m gewapend beton (cf. figuren 53 en 56).



Figuur 56. | Schematische voorstelling van de verschillende barrières.



Figuur 57. | Reactorkuip en inwendige structuren.

Het omhulsel bestaat uit een soort luchtdichte klok van 6 mm dik staal (afdichtingsmantel), die steunt op een andere omhulling uit voorgespannen beton, die bestand is tegen sterke druk van binnenuit. Dit geheel belet dat mogelijke radioactiviteit uit de primaire kring zou ontsnappen. Dit is de vierde barrière.

Een tweede omhulsel uit gewapend beton zorgt voor bijkomende bescherming tegen ongevallen van buitenaf zoals een explosie of een vliegtuigcrash. De tussenruimte tussen het primaire en secundaire omhulsel wordt constant op een lagere druk gehouden dan de atmosferische druk buiten de gebouwen. Wanneer er toch gassen zouden ontsnappen uit het primaire omhulsel, dan zorgt de lagere druk in de tussenruimte ervoor dat deze gassen het reactorgebouw niet ongecontroleerd verlaten, daar de atmosferische druk buiten het secundaire omhulsel hoger is en gassen zich steeds bewegen van hogere naar lagere druk. Deze eventueel ontsnappende gassen komen uiteindelijk terecht in het ventilatie- en controlesysteem en worden gefilterd en gezuiverd alvorens het gebouw te verlaten, of worden gestockeerd tot hun radioactiviteit voldoende is afgenomen. Dit is de vijfde barrière.

De opeenvolgende barrières zijn zo doeltreffend, dat zelfs in het (volledig hypothetische) geval dat de grootste leiding van de primaire kringloop het begeeft, de dosis waaraan de omringende bevolking blootgesteld zou worden, nog ver onder de toegelaten grens blijft.

Kerncentrales zijn beveiligd tegen ongevallen van buitenaf. Zo zijn onze centrales gebouwd om weerstand te bieden aan:

- aardbevingen:
 - Bij een aardstok met een intensiteit van VI (Mercalli-schaal)² blijft de centrale in werking. Een dergelijke beving met een horizontale versnelling van 0,048 g³ wordt als sterk bestempeld en algemeen en met schrik gevoeld. Schade aan gebouwen.
 - Bij een aardstok met een intensiteit van VII, wat overeenkomt met een horizontale versnelling van 0,102 g, loopt de centrale geen enkele schade op die van die aard is om haar veiligheid in het gedrang te brengen, en kan ze in een veilige staat van stilstand worden gebracht. Een dergelijke beving wordt als zeer sterk bestempeld. Het blijven staan valt zeer moeilijk, voorwerpen vallen om. Mogelijk zware schade aan gebouwen. Een dergelijke aardstok heeft zich in België nog nooit voorgedaan.
- overstromingen;
- het neerstorten van een burgerlijk vliegtuig van het Boeing-type of een F16 (militair). Hetzelfde geldt voor explosies (munitietrein, binnenschip met scheikundige producten, enzovoort) of voor zware branden.

Naast de ingebouwde of intrinsieke veiligheden (passieve beveiliging) voorzien in het bouwconcept, staat een actief beveiligingssysteem in voor de veilige werking van de centrale. Bij de berekening werd net zoals voor de passieve veiligheidssystemen ervan uitgegaan dat ook het zwaarste ongeval geen invloed mag hebben op het milieu en dat de schade beperkt moet blijven tot het reactorgebouw. Zo is er het noodkoelingssysteem van de

2. Voor het bepalen van een aardbevingssterkte gebruikt men de 12-delige schaal van Mercalli. Ze gaat uit van zichtbare en voelbare uitwerkingen (I = onmerkbaar – niet voelbaar tot XII = buitengewoon catastrofaal – algemene verwoesting) en werd later in verband gebracht met de maximale versnelling van de beweging van de grond (Richter: I = 0,001 g tot XII = 2,243 g). In België is een aardbeving met een intensiteit van IV vrijwel de sterkste die kan voorkomen.

3. g = de versnelling van de zwaartekracht = 9,81 m/sec².

reactorkern, dat in geval van verlies van reactorkoelwater de kern onder water houdt en koelt. Op deze manier wordt de beschadiging van de splijststofelementen beperkt, alsook het vrijkomen van de splijtingsproducten.

In de praktijk zijn alle systemen om ongevallen van inwendige oorsprong op te vangen, in drievoud uitgevoerd en werken ze onafhankelijk van elkaar.

Indien de normale elektrische voeding van deze veiligheidssystemen zou uitvallen, dan neemt een reservevoeding de taken over. Als alle externe voedingssystemen in gebreke zouden blijven, dan zorgen automatisch startende dieselaggregaten voor de noodvoeding.

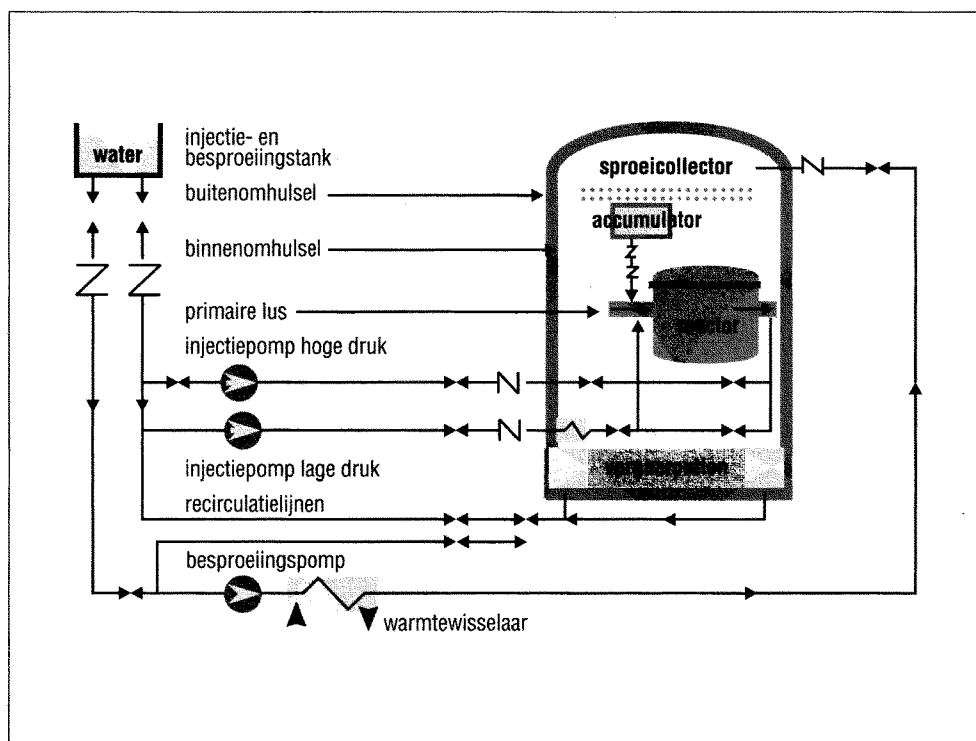
4.1.3 | Welke defecten kunnen in een kerncentrale voorkomen?

Een kerncentrale is een zeer ingewikkelde installatie. Het is dan ook onvermijdelijk dat soms een pomp een lek vertoont of dat een klep blokkeert. Dergelijke storingen zijn totaal ongevaarlijk, zelfs wanneer men de centrale moet stilleggen om de herstelling uit te voeren.

Het ergste defect dat men zich in een kerncentrale kan inbeelden (hoewel de kans daartoe uiterst miniem is), is een lek van het koelmiddel van de reactor, bijvoorbeeld door een breuk in een van de hoofdleidingen. Er bestaan nog andere mogelijke defecten, maar die zijn veel minder ernstig.



Figuur 58. | Kerncentrale van Tihange met een vermogen van 2.937 MWe.



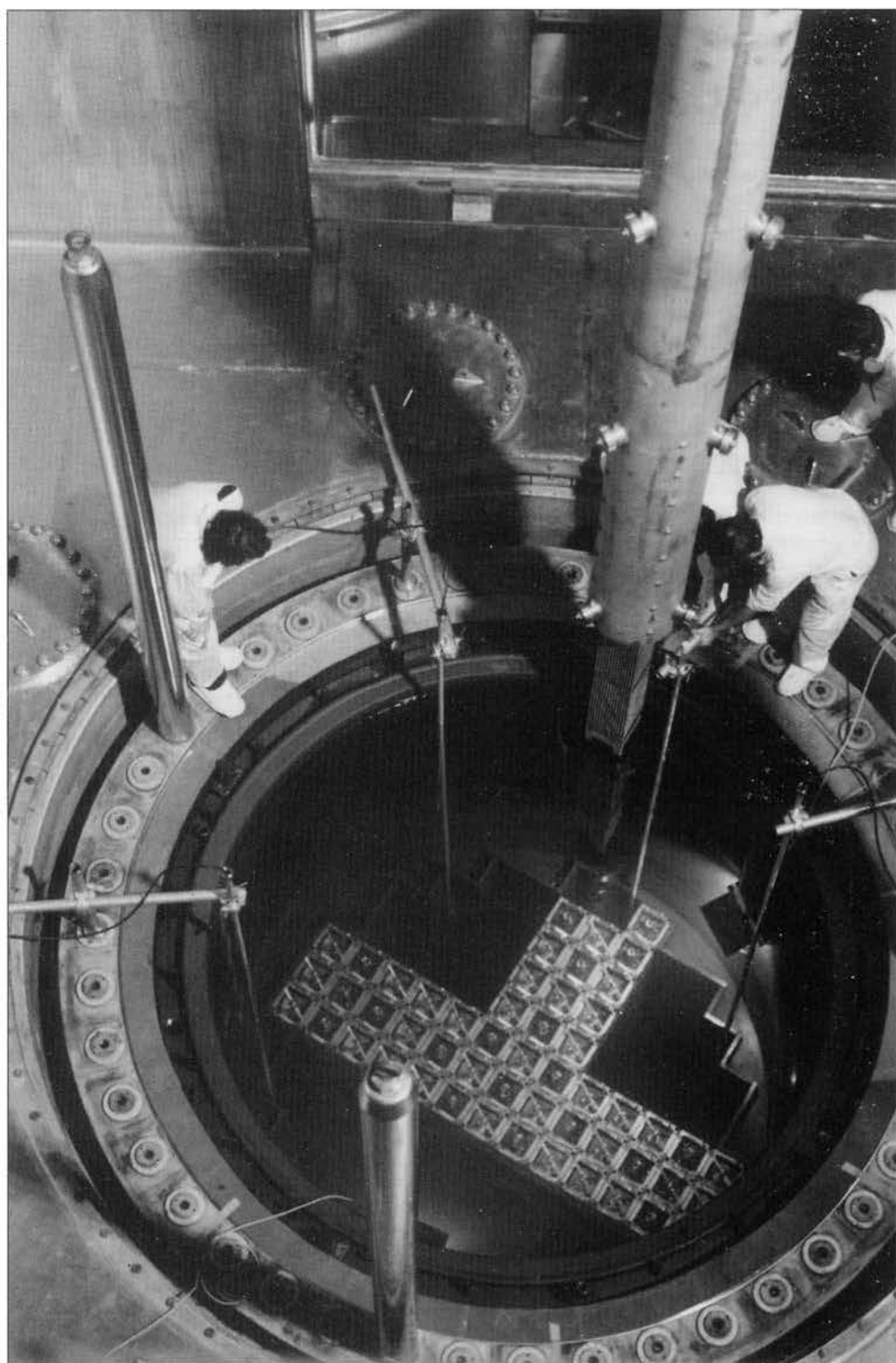
Figuur 59. | Veiligheidskoelkringen van een reactor van het PWR-type.

Wanneer nu het koelmiddel niet meer zou circuleren, dan zouden de splijtstofstiften verhitten en het risico lopen te barsten en te smelten, waardoor de splijtstof zou ontsnappen. Van zodra de temperatuur van de reactor abnormaal stijgt, worden automatisch de regelstaven neergelaten in de kern en wordt het onmiddellijk stilleggen van de splijtingsreactie verzekerd.

Verschillende onderling onafhankelijke temperatuurmeetinstrumenten kunnen elk afzonderlijk het stilleggen van de reactor bevelen. Wanneer dus één of zelfs meerdere van die instrumenten defect zouden raken, zou het systeem steeds blijven werken. Deze werkwijze, dat wil zeggen: voor elke belangrijke beveiligingstaak meerdere onafhankelijke systemen gebruiken om aldus de werking van minstens één van de systemen te waarborgen, is een basisprincipe dat toegepast wordt in de kerncentrales.

Het stilleggen van een reactor ingevolge een lek van het koelmiddel onderbreekt het splijtingsproces, maar de splijtstoffen blijven warmte vrijmaken. Om de warmte op te vangen is er in een noodkoelinstallatie voorzien.

Van zodra er zich een lek voordoet, wordt een grote hoeveelheid water, die zich permanent in drukreservoirs bevindt, in de reactor gestuwd (cf. figuur 59). In een tweede stadium wordt water uit een ander reservoir in de reactor gebracht. Al het water loopt naar de bodem van het gebouw waar zich de reactor bevindt en vanwaar het naar de reactorkern (cf. figuur 60) gepompt wordt. Daardoor wordt een nieuwe koelkringloop verzekerd, zodat de schade onder controle blijft.



Figuur 60. | Reactorkern.

4.2 | De nucleaire ongevallen in de wereld

Er gaat praktisch geen dag voorbij zonder dat de media een relaas geven over een ongeval in de nucleaire sector: lekken in een centrale, vrijkomen van stoom, een brand, een lichte besmetting van een arbeider, enzovoort. Over het algemeen gaat het om onbeduidende incidenten, waarvan de nucleaire industrie het monopolie zou hebben.

Iedere menselijke activiteit is echter niet zonder risico's. In alle takken van de industrie komen er ongevallen voor, maar deze in de nucleaire industrie, hoe onschuldig ze ook mogen zijn, halen de voorpagina van de kranten en de titels op het radio- en televisienieuws. Wanneer wij de protestacties erbij voegen, wordt het publiek regelmatig overspoeld met negatieve nucleaire informatie.

De verstrekte informatie is ofwel onvolledig en maakt de zaak onbegrijpelijk voor het publiek, ofwel ontbreekt er enige uitleg, ofwel wordt er een tendentieuze uitleg gegeven, wat nog erger is. Het resultaat is dat het publiek in de war wordt gebracht en kernenergie associeert met groot gevaar.

4.2.1 | Beschrijving van de nucleaire ongevallen

Tot nu toe hebben zich drie zware nucleaire ongevallen voorgedaan in kerncentrales, namelijk in Windscale (Groot-Brittannië) in 1957, Three Mile Island (Verenigde Staten) in 1979 en Tsjernobyl (Sovjet-Unie) in 1986.

4.2.1.1 | De internationale nucleaire evenementenschaal – INES

In figuur 61 wordt de internationale nucleaire evenementenschaal weergegeven. Deze schaal heeft acht niveaus (0 tot 7). Niveau 7 stemt overeen met een zeer ernstig accident, zoals dat van Tsjernobyl.

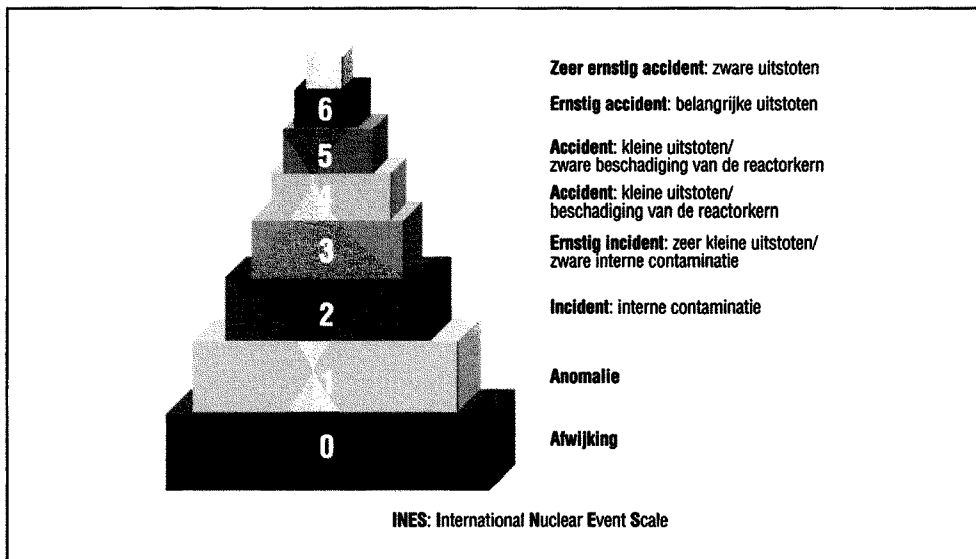
4.2.1.2 | Windscale

Tussen 7 en 12 oktober 1957 doet zich tijdens een onderhoudsbeurt van de gas-grafietreactor van Windscale een ongeval voor. Fissieproducten worden in de atmosfeer uitgestoten, hoofdzakelijk 740 TBq I-131. De impact van dit ongeval bedroeg 1/1.000 van Tsjernobyl (cf. 4.2.1.4).

Van de omwoners werden er 126 licht besmet op het niveau van de schildklier. De maximaal waargenomen ontvangen dosis op dit niveau bedroeg 0,16 Sv, wat ongevaarlijk is voor de gezondheid. Ter vergelijking: de jaarlijkse limietdosis voor personeel van nucleaire installaties bedraagt 0,5 Sv voor de schildklier.

Onder het personeel van de kerncentrale hebben er ongeveer honderd op het niveau van de schildklier een dosis ontvangen van 0,1 Sv. Een veertiental liep ook een lichte externe contaminatie op.

De hoogste dosis die werd opgemeten, bedroeg 0,047 Sv, dus iets minder dan de jaarlijks toegelaten dosis van 0,05 Sv voor personeel tewerkgesteld in een nucleaire installatie.



Figuur 61. | INES-schaal.

Het ongeval werd geclassificeerd op 'niveau 5' van de INES-schaal.

4.2.1.3 | Three Mile Island

Op 28 maart 1979 gebeurt het ongeval in de centrale van Three Mile Island. De reactor nr. 2 van het PWR-type is de zetel van een gedeeltelijke fusie van de kern en van een hoge contaminatie binnenin het primaire omhulsel. Het ongeval werd geclassificeerd op 'niveau 5' van de INES-schaal. Het ongeval was te wijten aan een cumulatie van uitrustings-deficiënties en foutieve interpretaties van de gegevens door de operatoren. Het heeft geen invloed gehad op de bevolking en het milieu. Niemand werd bestraald, ook niet het personeel van de centrale. Het systeem van de omhulsels bewees zijn doeltreffendheid.

De media buiten het voorval uit en spreken van een ware tragedie, een drama, een nucleaire nachtmerrie. Antinucleaire groeperingen organiseren manifestaties, politici voelen zich geroepen om hun standpunt over de zaak te verkondigen zonder ervoor terug te deinzen foutieve informatie te verstrekken.

Men mag dit ongeval niet minimaliseren, er werden zware menselijke fouten gemaakt. Hieruit werden de nodige lessen getrokken en de nodige maatregelen genomen om in de toekomst dergelijke ongevallen te voorkomen. In ieder geval heeft dit ongeval bewezen dat de reactoren van het PWR-type intrinsiek veilige reactoren zijn.

De huidige reactoren van het PWR-type werden verder geperfectioneerd inzake veiligheid. De Belgische reactoren zijn ook van het PWR-type en mogen beschouwd worden als de veiligste ter wereld. Hun concept en een complex systeem van meervoudig uitgevoerde beveiligingssystemen en de hooggekwalificeerde mensen die het werk uitvoeren, staan garant voor de veiligheid (cf. 4.1.2).

4.2.1.4 | Tsjernobyl

Zeven jaar later, op 26 april 1986, gebeurt het tot op vandaag zwaarste nucleaire ongeval. Het ongeval doet zich voor in één van de Tsjernobylreactoren (Oekraïne) en werd geclassificeerd op 'niveau 7' van de INES-schaal, dit is het hoogste niveau. De reactor met een vermogen van 1.000 MWe is van het RBMK-type, met waterkoeling en grafiet als moderator⁴ (Russisch concept).

Het ongeval in Tsjernobyl was in de eerste plaats te wijten aan een reeks onvergeeflijke menselijke fouten (onvoldoende scholing, gebrek aan verantwoordelijkheidszin, enzovoort) en een gebrekkig concept.

We lichten even nader toe. Een reactor van het RBMK-type is onstabiel en kan onder bepaalde omstandigheden op hol slaan. Daarenboven komt het noodstopstelsel traag op gang en is dit type reactor niet voorzien van een behoorlijk omhulsel dat in staat is het massaal vrijkomen van radioactief materiaal tegen te houden.

Het gebruik van onvoldoende gecontroleerde componenten (volledig ontbreken van quality control en quality assurance systemen) heeft zeker een rol gespeeld.

De menselijke fouten zijn echter de hoofdoorzaak van het ongeval. De drie automatische beveiligingssysteem werden opzettelijk uitgeschakeld tijdens een onvoldoende voorbereide proefneming. Er is hier dus sprake van een ontoelaatbare onachtzaamheid en tijdens de proef werden onvergeeflijke fouten begaan.

Resultaat: verlies van de controle over de reactiviteit met als gevolg een sterke toename van het vermogen van de reactor en een vervorming van de splijtstofelementen door de toenemende hitte. De brutale verhitting van het water dat zich omzet in stoom, veroorzaakt een explosie in de kern en vernietigt een deel van de reactor. Er ontstaat brand door het aanwezige grafiet. De brand in de gebouwen was snel onder controle, maar het branden van de grafietblokken heeft nog een tiental dagen geduurd. 6% van de radioactiviteit opgesloten in de kern kwam in die periode vrij.

Van het *exploitatiepersoneel* werd er één op slag gedood door de explosie, twee overleden enkele uren later ten gevolge van zware brandwonden.

Op de 1.000 man van het *interventiepersoneel* werden er 135 zwaar bestraald, 28 man overleden binnen enkele maanden na het ongeval, 1 overleed in 1990. Deze laatste werd zwaar bestraald tijdens het overvliegen van de kern van de reactor. Hij werd medisch behandeld in de Verenigde Staten. Verder liepen er nog zo'n 200 man hoge stralingsdoses op.

Het officiële dodental bedraagt 32.

Ongeveer 115.000 personen (*geëvacueerden* genoemd) die binnen een straal van 30 km rond de centrale woonden en 10.000 stuks vee werden ijlings geëvacueerd.

650.000 personen (*liquidatoren* genoemd) werden achteraf ingeschakeld voor het opruimen van de site. Van deze groep ontvingen zo'n 200.000 (eerste groep) een gemiddelde stralingsdosis die tweemaal hoger lag dan de jaarlijks toegelaten dosis, een paar duizend (tweede groep) kregen een stralingsdosis die meer dan tienmaal hoger lag en voor een paar dozijn (derde groep) lag de dosis nog beduidend hoger.

4. Moderator: stof die de snelheid van de neutronen afremt om de kernreactie in stand te houden.

Van de groep geëvacueerden ontving 95% een stralingsdosis beduidend lager dan het gemiddelde van de eerste groep liquidatoren.

De meer dan 400.000 personen (*residentiëlen* genoemd) die in zones woonden die later geclassificeerd werden als strikt bewaakte zones, ontvingen hoofdzakelijk een beperkte stralingsdosis tijdens de eerste maanden na het ongeval.

Binnen een straal van 15 km werd de gemiddelde dosis per inwoner geraamd op 350 à 550 mSv. Zij was lager dan 60 mSv tussen 15 à 30 km. De gemiddelde individuele dosis werd voor de 75 miljoen inwoners van de Oekraïne en van Wit-Rusland geraamd op 0,045 mSv. Ter vergelijking: de gemiddelde dosis te wijten aan natuurlijke radioactiviteit bedraagt in die streken tussen 1,5 en 3 mSv.

Voor het totaal van de 1.166.000 individuen uit de vier hoofdgroepen (interventiepersoneel, liquidatoren, geëvacueerden en residentiëlen) werd de vermoedelijke toename op lange termijn van sterfgevallen door kanker ten gevolge van de ontvangen doses, geëvalueerd door de WHO⁵ in samenwerking met het IAEA en de Europese Unie. De resultaten werden gepubliceerd in 1996.

In tabel 17 wordt een overzicht gegeven van de vermoedelijke gezondheidseffecten op lange termijn (somatisch-stochastische effecten⁶) ten gevolge van het Tsjernobylongeval.

Tabel 17. | Vermoedelijke gezondheidseffecten op lange termijn.

Groep	Aantal personen	Verwachte sterfgevallen door natuurlijke kankers	Vermoedelijke toename van de verwachte sterfgevallen door kanker ten gevolge van straling (toename %)
Interventiepersoneel (eerste dagen)	1.000*	150-200	10-20 (2,0%)
Liquidatoren	650.000	90.000	2.000 (0,3%)
Geëvacueerden 1986	115.000	17.000	400 (0,3%)
Residentiëlen (hoge zone)	300.000	40.000	1.000 (0,3%)
Residentiëlen (lage zone)	100.000	13.300	100 (0,1%)
Kinderen 1986 (tot 14 jaar)	1.000.000	0-50**	ongeveer 200-500**

* waarvan 28 overleden binnen enkele maanden na het ongeval en 1 in 1990.

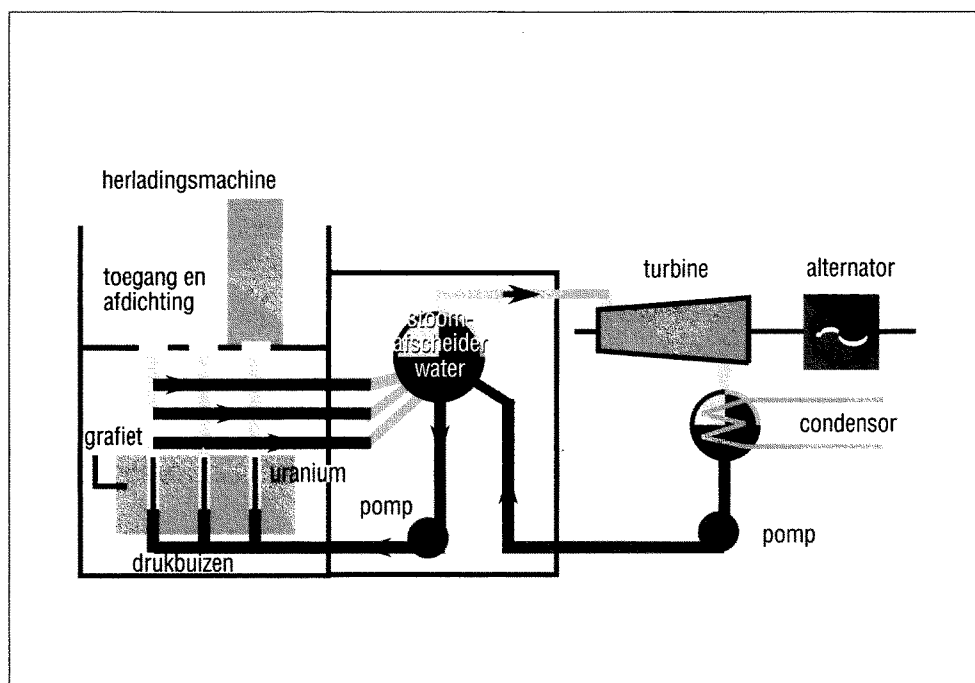
** schildklierkanker.

Bron: *One decade after Chernobyl: Summarizing the consequences of the accident* (Proc. Conf. Vienna, 1996), IAEA, Vienna (1996).

IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire – Frankrijk), 1996.

5. WHO: World Health Organization (wereldgezondheidsorganisatie).

6. Somatisch-stochastische effecten: vermoedelijke gezondheidseffecten die later kunnen optreden en die naargelang de gecumuleerde ontvangen dosis en haar drempelwaarde de kans op kanker doen toenemen, dat wil zeggen dat de ernst van het ziektegeval hier niet bepaald wordt door de dosis, maar bij toename van de ontvangen dosis neemt de kans op kanker toe (cf. 4.6).



Figuur 62. | Reactor van het RBMK-type – prinseschema.

Men veronderstelt een vermoedelijke toename van zo'n 4.000 sterfgevallen (0,3%) door kanker, meestal op latere leeftijd, ten opzichte van 160.500 normaal verwachte sterfgevallen (14%) door kanker ten gevolge van andere oorzaken. Deze bepaling ligt in de orde van grootte van het waargenomen gevolg voor de overlevenden van de atoomexplosies van Hiroshima en Nagasaki. Voor deze populatie werd een toename van 0,7% sterfgevallen door kanker vastgesteld, meestal op latere leeftijd. Er werd wel een toename vastgesteld van schildklierkanker onder kinderen. Een toename van leukemie werd nog niet vastgesteld.

Er werden ook kortetermijnmilieu-impacten waargenomen binnen een zone van 10 km van de kernreactor, zoals het afsterven van coniferen en het sterven van kleine zoogdieren. Het milieu is zich zichtbaar beginnen te herstellen rond 1989.

Wat waren nu de gevolgen van het ongeval in het Westen? De stralingsdoses die de mensen ontvingen, verschillen aanzienlijk van streek tot streek. In België lag de totale maximumdosis die een individu had kunnen ontvangen ten gevolge van het ongeval van Tsjernobyl tussen 0,12 en 0,26 mSv. Dit is minder dan één tiende van de dosis die iemand jaarlijks ontvangt door natuurlijke radioactiviteit. Als men rekening houdt met de totale dosis die door de Belgische bevolking ontvangen wordt, dan komt de bijkomende dosis te wijten aan Tsjernobyl overeen met minder dan 2% van de jaarlijkse dosis ontvangen door de natuurlijke radioactiviteit.

Voor België en Frankrijk lagen de stralingsdoses gemiddeld vijfmaal lager dan deze opgemeten in Duitsland en Italië.

4.2.2 | Is een Tsjernobylongeval mogelijk in onze streken?

Het antwoord is een duidelijk *neen*. Waarom? Een ongeval zoals dat in Tsjernobyl kan zich in ons land niet voordoen, wegens de fundamentele technische verschillen tussen de Russische RBMK en de Belgische PWR. We zetten even de fundamentele verschillen tussen beide types reactoren op een rijtje.

Bij een RBMK bevindt het uranium zich in een waaier van buizen, de zogenaamde drukbuizen, die doorstroomd worden door het koelwater van de primaire kring. Men spreekt van 'primaire', maar in feite is er maar één enkel circuit: het water wordt bij het doorstromen van de buizen aan het koken gebracht, en de stoom die zo geproduceerd wordt, gaat rechtstreeks naar de turbine (cf. figuur 62). De moderator, die dient om de neutronen te vertragen, bestaat uit grafiet.

Bij een RBMK 1.000 bestaat de kern uit een 1.900-tal drukbuizen uit een speciale legering. Acht op negen buizen zijn gevuld met uraniumstiften, terwijl de negende telkens een regelstaaf is die dient om de reactie te regelen. De moderator bestaat uit grafiet, namelijk vierkante blokken waarin de drukbuizen steken (cf. figuur 63).

De kern zit ingesloten in een enkelvoudig stalen omhulsel waarin 1.700 openingen geboord zijn. Deze dienen om het regelmatig laden en ontladen mogelijk te maken terwijl de reactor op volle temperatuur en volle druk verder blijft werken.

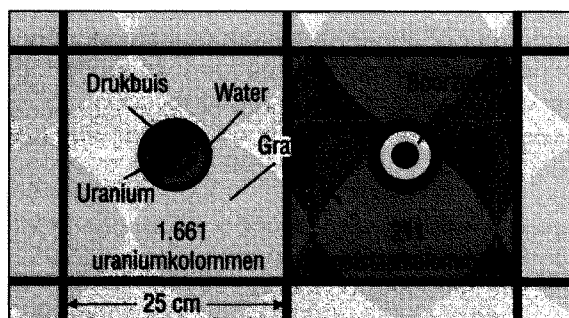
Een RBMK wordt niet alleen gebruikt voor de opwekking van elektriciteit maar ook voor de productie van militair plutonium. Een RBMK heeft een onstabiel karakter en vertoont de neiging om op hol te slaan. Dit heeft te maken met de sterk positieve 'vacuümcoëfficiënt'.

We lichten dit nader toe. In een *watergekoelde en met water gemodereerde PWR* heeft het water in vloeibare vorm een vertragend effect op de neutronen, terwijl ook een aantal ervan wordt opgeslorpt. Indien de reactor nu oververhit zou geraken, zou het water overgaan in stoom. Waar stoombellen ontstaan, is er plaatselijk geen moderator aanwezig om neutronen af te remmen en zo de reactie in stand te houden.

De vorming van stoombellen in water vermindert de dichtheid van het water: men zegt dat er 'vacuüms' ('voids') ontstaan. De daling van de dichtheid heeft een invloed op de snelheid van de neutronen en op het aantal neutronen, en dus op de reactiviteit en het vermogen van de reactor.

De kettingreactie zal uitdoven, want U-235 splijt alleen door beschieting met trage neutronen. Als al het water in de reactorkern in stoom overgaat, kan de splijtingsreactie volledig stilvallen.

De vacuümcoëfficiënt is hier dan zogezegd *negatief*. Een negatieve vacuümcoëfficiënt is een van de belangrijkste intrinsieke veiligheden van een PWR.



Figuur 63. | Kern van een RBMK 1.000 (horizontale doorsnede).

In een *watergekoelde maar met grafiet gemodereerde RBMK* zijn de reacties complexer. De vertraging van de neutronen gebeurt altijd door het grafiet. Door de aanwezigheid van stoom in het water stijgt het aantal neutronen dat uit de brandstof in de moderator terechtkomt (er worden minder neutronen door het water opgeslorpt), zodat de reactiviteit en het vermogen van de reactor stijgen. De vacuümcoëfficiënt is hier dan zogezegd *positief*. In een dergelijke reactor moet men er dan ook voor zorgen dat schommelingen in het stoomvolume in de reactorkern geleidelijk aan en traag doorgevoerd worden, opdat de stijging van de reactiviteit steeds gecompenseerd zou kunnen worden door het inbrengen van de regelstaven. Deze voorwaarde werd in de nacht van het Tsjernobylongeval bewust overtreden.

Het verloop van het ongeval heeft tevens aangetoond dat het noodstopstelsel van reactoren van het RBMK-type onvoldoende snel is. Er zijn 20 seconden nodig voordat het stelsel echt werkzaam wordt, tegenover 1 seconde bij reactoren van het PWR-type. Reactoren van het RBMK-type zijn niet voorzien, zoals reactoren van het PWR-type, van een luchtdicht omhulsel met grote afmetingen (in België worden twee dergelijke omhulsels aangebracht), ze zijn alleen uitgerust met luchtdichte caissons die zorgen voor een lokale afsluiting. Dergelijke caissons kunnen niet weerstaan aan overdruktoestanden, explosies en onverwachte belastingen.

In tabel 18 geven we een beknopt overzicht van de fundamentele technologische verschillen tussen een RBMK en een PWR.

Tabel 18. | Fundamentele verschillen tussen een RBMK en een PWR.

Nadelen van de RBMK	Voordelen van de Belgische PWR
Trage noodstopvoorziening (20 seconden)	Snelle noodstopvoorziening (1 seconde)
Moderator: grafiet, oorzaak van brand	Moderator: water, dus niet brandbaar
Positieve vacuümcoëfficiënt: op hol slaan van de reactie bij ongecontroleerde stoomvorming of weglekken van de koelvloeistof	Negatieve vacuümcoëfficiënt: afremming van de reactie onder dezelfde omstandigheden
Reactor met grote omvang, moeilijk te controleren (765 m ³)	Compacte reactor (30 m ³)
Een veelheid van buizen (1.700), talloze mogelijkheden tot breuk	Eén enkele kuip
Permanente herlading terwijl de reactor werkt en warm is (militaire doeleinden: plutonium)	Slechts één keer per jaar herladen terwijl de reactor niet werkt en koud is (uitsluitend burgerlijke doeleinden)
Geen luchtdicht omhulsel	Dubbel luchtdicht omhulsel
Eén enkele kring reactor/turbine: overdracht van radioactiviteit	Gescheiden kringen voor reactor en turbine: afzondering van de radioactiviteit

4.2.3 | Evaluatie

In vergelijking met andere industriële activiteiten en rekening houdend met het massief gebruik van kernenergie (einde 1997: 437 kernreactoren in dienst die 17% van de wereld-elektriciteit produceren), kan men zeggen dat de veiligheidsbalans zeer positief is. De Belgische en westerse reactoren zijn intrinsiek veilig. In de westerse landen komt de kern-industrie op de eerste plaats op het vlak van veiligheid. In geen enkele andere industrie worden de risico's zo goed beheerst.

Bovendien bestaat er in deze landen een ware 'veiligheidscultuur'. De prioritaire bekommernis om de veiligheid is alomane. Risico nul bestaat echter niet en incidenten en ongevallen blijven ook in zo'n veiligheidscultuur mogelijk. Maar die veiligheidscultuur zorgt ervoor dat de gevolgen van incidenten of ongevallen zoveel mogelijk beperkt worden.

Ter gelegenheid van de 25ste verjaardag van de Zwitserse kerncentrale van Beznau (1994) verwoordde Kardinaal Henry Schwery, aartsbisschop van Sion, het als volgt:

*"Je ne connais aucune autre activité humaine, des domaines domestique, industriel, des transports, des loisirs et des sports, où les risques ont été calculés aussi sévèrement et où les mesures de sécurité ont été prises avec autant de garanties. Il faut souhaiter que l'on persévère dans cette voie."*⁷

De heer Georges Charpak, Nobelprijswinnaar in 1992 voor fysica, drukt zich in dezelfde termen uit: de kernindustrie is inzake veiligheid superieur. De zeldzame lichamelijke ongevallen die zich in de kernindustrie hebben voorgedaan, hadden niets te maken met het nucleaire karakter van de installatie.

De elektronucleaire productie heeft tijdens haar 45 productie jaren in alle landen ter wereld, met uitzondering van de Sovjet-Unie (Tsjernobyl – 1986), tot nu toe nog geen enkel slachtoffer gemaakt. De catastrofe van Tsjernobyl vond plaats in een land dat volgens Charpak "zijn institutionele en veiligheidsstructuren niet meer onder controle had".

De ongevallenbalans met dodelijke afloop van andere technologische, energetische of scheikundige activiteiten is veel ernstiger. Hier volgen enkele voorbeelden:

- 1978 (11/7) in Los Alfaques (Spanje): 200 doden en evenveel zwaargewonden door de ontploffing van een tankwagen met propyleengas;
- 1984 (19/11) in Mexico stad: ontploffing van een gasstockage: 452 doden en 4.248 gewonden;
- 1984 in Bhopal: ontploffing in een scheikundige fabriek: 2.347 (7.000?) doden en 14.000 gewonden en gehandicapten;
- breuk van stuwdammen:
 - 1959 (2/12) in Malpasset (Var – Frankrijk): 423 doden;
 - 1961 (13/3) in Kiev (Oekraïne): 145 doden;
 - 1963 (9/10) in Vaiont (Italië): 2.118 doden;
 - 1972 (26/2) in Logan (Virginia – Verenigde Staten): 450 doden;
 - 1985 (19/7) in Tesero (Italië): 264 doden;

7. Ik ken geen enkele andere menselijke activiteit op het vlak van huishouden, industrie, transport, ontspanning en sport, waar de risico's zo streng werden berekend en de veiligheidsmaatregelen met zoveel waarborgen werden getroffen. Laten we hopen dat men resoluut deze weg blijft volgen.

- ongevallen in koolmijnen;
 - 1956 (8/8) in Marcinelle (België) – ramp van Bois du Casier: 263 doden;
 - 1961 (9/7) in Dukla (Slovakije): 108 doden;
 - 1985 (25/2) in Forbach (Frankrijk): 22 doden en 103 zwaargewonden;
 - 1990 (26/8) in Kreka (Joegoslavië): 178 doden;
 - 1992 (3/3) in Kozlu (Turkije): 388 doden;
- 1989 in de Oeral: breuk van een gazoduc: verschillende honderden doden;
- 1993 (28/9) in Venezuela: breuk van een gazoduc: 53 doden.

Wanneer wij alle rampen die tijdens de laatste 45 jaar plaatsvonden, zouden opsommen, dan wordt deze lijst ongelukkigerwijze nog langer.

Ter informatie nog het volgende:

- In de wereld sterven er per jaar ten gevolge van een verkeersongeval 400.000 mensen en telt men 12 miljoen gekwetsten.
- Sedert 1989 hebben 28 luchtrampen de dood veroorzaakt van 4.176 mensen. De zwaarste luchtrampen die zich hebben voorgedaan, zijn:
 - 1977 (27/3): botsing op de grond tussen een Pan Am- en een KLM-vliegtuig te Tenerife (Canarische eilanden): 583 doden;
 - 1985 (12/8): neerstorten te Mtogura (Japan) van een B-747 van Japan Airlines: 520 doden.
- Sedert 1980 kwamen er 11.000 mensen om in rampen met ferries. Het drama van 6 maart 1987 te Zeebrugge met de Herald of Free Enterprise, waarbij 189 mensen het leven verloren, ligt nog vers in ons geheugen.

De catastrofe van Tsjernobyl heeft op onze maatschappij een zware psychologische impact gehad die men voorzichtig moet benaderen, zonder daarom de menselijke en materiële gevolgen ervan te minimaliseren. Zij heeft een deel van de Belgische publieke opinie, de beleidsverantwoordelijken en de burgers doen afglijden naar een gevaarlijke paradox: onze maatschappij streeft wel naar het doel, maar weigert de middelen. Deze paradox is natuurlijk niet eigen aan de elektriciteitsproductie. Maar op het vlak van de nucleaire elektriciteit is hij flagrant.

Het elektriciteitsverbruik stijgt elk jaar. En toch! Regelmatig wordt er een beschuldigende vinger uitgestoken naar kernenergie, die in ons land instaat voor 60% van de elektriciteitsproductie.

De Belgische kerncentrales werken volgens een procédé dat fundamenteel verschilt van dat van Tsjernobyl. Inzake kernenergie wordt een uiterst strikte reglementering nageleefd die gebaseerd is op de strengste internationale normen. De toepassing ervan wordt gecontroleerd door onafhankelijke organismen. In de zeven Belgische reactoren heeft zich sedert hun ingebruikneming, voor drie ervan reeds meer dan 24 jaar geleden, geen enkel incident van betekenis voorgedaan.

We mogen ons gelukkig achten dat we in een democratische maatschappij wonen. Dit was niet het geval voor de mensen van Tsjernobyl. In een democratie worden de beslissingen niet genomen op basis van gangbare opvattingen, rommelige concepten of particuliere belangen, maar met kennis van zaken, ten bate van het algemeen belang en rekening houdend met het welzijn van de toekomstige generaties. De beslissingen inzake het energiebeleid moeten het wezenlijke resultaat zijn van objectieve keuzen, dat wil zeggen dat de volgende elementen geëvalueerd moeten worden:

- Ondanks alle maatregelen die er getroffen worden inzake het rationeel energiegebruik, zal het elektriciteitsverbruik toenemen. De vraag is: zijn wij bereid ons elektriciteitsverbruik te beperken?
- Een radicale en exclusieve tegenstelling creëren tussen kernenergie en het respect voor de mens en het milieu is verkeerd. Alle technologieën gebruikt voor de productie van elektriciteit, ongeacht de energiebron, hebben zowel voor- als nadelen en houden bepaalde risico's in. Het volstaat ze te vergelijken. Deze vergelijking werd uitgevoerd in punt 2.2. Kernenergie doorstaat de vergelijking op een uitstekende manier. Is het dan gerechtvaardigd deze energiebron op te geven ten voordele van andere die bijdragen tot het broeikaseffect en de atmosferische vervuiling? Is het verstandig kostbare primaire energiebronnen te verspillen waarvan men weet dat ze beperkt zijn en die zich pas na miljoenen jaren evolutie in de natuur hebben gevormd?
- De economische gevolgen van de 'olieschokken' van de voorbije decennia doen zich nog steeds voelen. Een toekomstige gascrisis is goed denkbaar. Aardolie en aardgas bevinden zich grotendeels in politiek onstabiele landen. Voor zijn primaire energiebevoorrading hangt België bijna volledig af van het buitenland. Is het aanvaardbaar dat een volledige gemeenschap voor haar werking aangewezen is op een internationale context die economisch en politiek gezien bijzonder onstabiel is? Trouwens, vergeleken met olie, gas en steenkool, levert kernenergie onze betalingsbalans een bonus op van meer dan 20 miljard BEF. De nucleaire sector waarborgt bovendien een stabiele prijs van het kWh (cf. 3.4) en de primaire energiebevoorrading op lange termijn. Kernenergie biedt ten slotte het enorme voordeel dat ze noch CO₂, noch zure regen veroorzaakt.

Tabel 19. | Werkgelegenheid in de Belgische nucleaire sector in 1997.

Direct			
Doel + Tihange	~ 2.000		
Belgonucleaire	355		
NIRAS + BP	~ 300		
FBFC	306		
SCK	~ 600		
Westinghouse	~ 50		
TECNUBEL	~ 110		
TRANNUBEL	~ 20		
SYNATOM	25		
Anderen	~ 550		
		Kerncentrales	360 man/GW
		STEG/Nieuwe steenkoolcentrales	90 man/GW
Totaal	~ 4.300		
Indirect			
Totaal	~ 3.200		
Algemeen totaal	~ 7.500 man		

- Ook de economische en sociale impact van de nucleaire sector mag niet uit het oog verloren worden in één tijd waarin werkgelegenheid een belangrijk maatschappelijk probleem vormt. Globaal genomen biedt de productie van elektriciteit door kernenergie vandaag in België een directe werkgelegenheid aan een 4.300-tal mensen en een indirecte werkgelegenheid aan meer dan 3.200 mensen (cf. tabel 19). De bouw van een nieuwe centrale zou gedurende acht jaar zo'n 4.000 mensen aan het werk houden, zonder het cascade-effect in aanmerking te nemen dat een dergelijke investering kan hebben.

Is het dan gerechtvaardigd het ongeval van Tsjernobyl als referentie te nemen bij keuzen inzake energie waarvoor ons land staat? Mogen wij het kind met het badwater weggooien? Laten wij ons niet blindstaren, want dit leidt tot grote kortzichtigheid. Iedere industriële activiteit houdt risico's in; een absolute veiligheid behoort tot het domein van de utopie. Kernenergie behoort tot de mogelijkheden van deze wereld. De mens is verantwoordelijk voor een ethisch verantwoord gebruik ervan. Veiligheid staat hier voorop.

Kernenergie wekt bij vele mensen contestatie op. Contestatie op zichzelf is goed en heeft ontegenzeggelijk heilzame gevolgen, want dit leidt tot een verbetering van de veiligheidsnormen en het verplicht tevens tot transparantie en dialoog.

Toch moet nogmaals gezegd worden dat in de westerse landen vanaf het begin de veiligheidsnormen voor kernenergie op een weergaloos strenger niveau lagen dan deze voor andere industriële activiteiten. We verwijzen in dat verband naar de reeks ernstige ongevallen die we in het begin van dit hoofdstuk vermeld hebben.

We mogen ook niet uit het oog verliezen dat de nucleaire productie, samen met het gebruik van hernieuwbare energiebronnen, in de komende halve eeuw een ernstig alternatief kan bieden voor het vervangen van fossiele energiedragers, waarvan de reserves afnemen en die sterk bijdragen tot de atmosferische vervuiling. Het gebruik van kernenergie maakt ons energetisch ook minder afhankelijk.

4.3 | De nucleaire transporten

Tijdens de afgelopen dertig jaar zijn er vanuit tal van landen meer dan 4.500 verpakkingen met gebruikte splijtstoffen naar La Hague vervoerd. In België werden er over de weg en per spoor tijdens de laatste twintig jaar ongeveer 450 verpakkingen vervoerd met verbruikte splijtstof. Verschillende honderden transporten plutonium en MOX-splijtstof werden ook uitgevoerd op het Belgische grondgebied. Geen enkel incident met gevolgen voor de bevolking en het milieu heeft zich voorgedaan. Het transport van verglaasde residu's verschilt niet essentieel van het transport van verbruikte splijtstof.

De veiligheid van de transporten berust in wezen op de veiligheid van de verpakkingen. Deze verpakkingen beantwoorden aan de vereisten die door de internationale reglementering worden opgelegd.

4.3.1 | De reglementering

4.3.1.1 | Belgische reglementering

Het transport van radioactieve stoffen op Belgisch grondgebied maakt het voorwerp uit van *Hoofdstuk VII van het algemeen reglement op de bescherming van de bevolking en van de werknemers tegen het gevaar van ioniserende stralingen*. Dit reglement voert de basisnormen in op het gebied van stralingsbescherming, zoals zij vastgesteld zijn in de Europese richtlijnen.

Krachtens dit reglement wordt ieder transport van radioactieve stoffen onderworpen aan een voorafgaande vergunning van de bevoegde overheid (DBIS, Dienst voor Bescherming tegen Ioniserende Stralingen van het Ministerie van Sociale Zaken, Volksgezondheid en Leefmilieu), met uitzondering van het transport van zeer kleine hoeveelheden radioactieve stoffen. Aan deze vergunningen kunnen bijzondere voorwaarden gekoppeld zijn.

Op technisch vlak moeten de bepalingen van de internationale reglementen worden toegepast.

4.3.1.2 | Internationale reglementen

Alle internationale reglementen zijn gebaseerd op de aanbevelingen van het IAEA (International Atomic Energy Agency), die opgenomen zijn in zijn "Reglement voor het vervoer van radioactieve stoffen" ("Safety Series", nr. 6, uitgave van 1985, herzien in 1990). Dit reglement heeft tot doel het publiek, het personeel van de transportmaatschappijen, de bezittingen en het milieu te beschermen tegen de invloeden van de radioactieve stoffen, zonder echter het (internationaal) transport van deze stoffen onnodig te hinderen.

Het reglement legt de nadruk op de normen inzake prestatievermogen van de colli (verpakking + radioactieve inhoud), in termen van behoud van de integriteit van de insluiting en de bescherming, wat een factor van intrinsieke veiligheid vormt. Deze normen inzake prestatievermogen hangen af van de hoeveelheid en de aard van de vervoerde radioactieve stoffen, zodanig dat hetzelfde veiligheidsniveau bereikt wordt voor alle types van collo, zowel in normale transportomstandigheden als in ongevalsomstandigheden.

De normen zijn opgesteld in functie van het risico dat de radioactieve inhoud vertoont. Zij bevatten voorschriften voor het ontwerp en voor proeven die de transportomstandigheden nabootsen.

Het reglement maakt onderscheid tussen verschillende types van collo, al naargelang hun prestatievermogen:

- de colli van type A zijn ontworpen om weerstand te bieden aan de normale transportomstandigheden; hun radioactieve inhoud is beperkt, zodat in geval van een ernstig ongeval, de radiologische impact aanvaardbaar blijft, zelfs indien de opsluiting en de afscherming volledig vernield zijn;
- de colli van type B zijn ontworpen om weerstand te bieden aan ongevalsomstandigheden; hun inhoud is aanzienlijker dan die van een collo A, maar hij wordt echter geval per geval beperkt in de goedkeuringscertificaten van het model van collo;

- de 'uitgezonderde' colli worden gebruikt voor het transport van kleine hoeveelheden; zij moeten slechts minimale normen inzake prestatievermogen eerbiedigen, daar de impact in geval van een ernstig ongeval zeer beperkt blijft;
- de industriële colli worden in het bijzonder gebruikt voor het transport van laagactief afval; de drie soorten industriële colli moeten weerstaan aan routinevoorwaarden en, in functie van hun inhoud, aan de normale transportvoorwaarden.

4.3.2 | Colli gebruikt voor bestraalde splijtstof, verglaasd afval, MOX-splijtstof en plutonium

Het transport van bestraalde splijtstof, verglaasd afval, MOX-splijtstof en plutonium wordt uitgevoerd in colli van type B. Ze maken zelfs het voorwerp uit van bijkomende voorschriften. Deze colli behoren tot het type B(U)F.

Deze colli worden onderworpen aan een reeks mechanische en thermische tests die toelaten hun weerstand onder normale en ongevalsomstandigheden te waarborgen.

De tests zijn (cf. figuren 64 en 65):

- Normale omstandigheden:
 - besproeiing met water gedurende 1 uur;
 - een vrije val van 0,3 à 1,2 m op een onvervormbaar oppervlak, dat wil zeggen: een oppervlak dat bij een val alle energie terugkaatst;
 - doorbuigingstest: vijfmaal de massa van het collo;
 - penetratie van een 6 kg zware staaf losgelaten vanop een hoogte van 1 m.
- Ongevalsomstandigheden:
 - een val van 9 m hoog op een onvervormbaar oppervlak;
 - een val van 1 m op een puntige metalen bout;
 - een brand van een half uur op ten minste 800°C, dat betekent dat de container langs alle zijden omringd is door een koolwaterstofbrand (brandende fuel). Tijdens de test loopt de temperatuur te midden van de vuurhaard op tot 1.200°C;
 - een onderdompeling gedurende acht uur in water met een druk equivalent aan een diepte van 15 à 200 m.

De tests zijn cumulatief (de tests worden achtereenvolgens op hetzelfde prototype uitgevoerd): dat wil zeggen dat er rekening gehouden moet worden met de maximale totale beschadiging door alle tests samen.

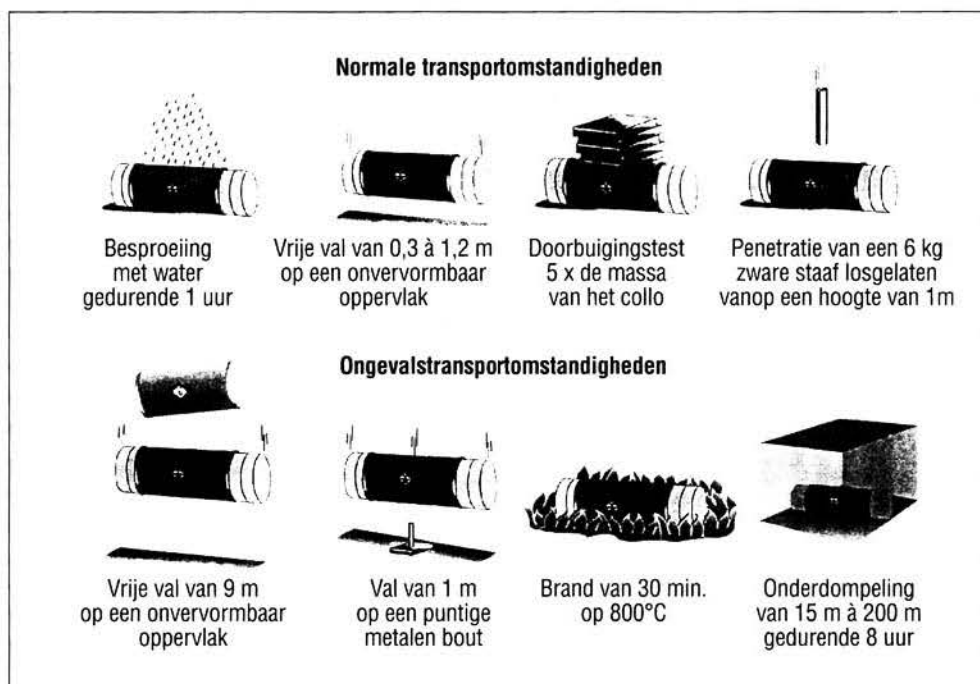
Deze tests werden ontwikkeld om te bewijzen dat na het zwaarst denkbare transportongeval de integriteit van de beschadigde colli gewaarborgd blijft.

De transportreglementering stelt de limiet voor afneembare besmetting vast op:

- 4 Bq/cm² voor β - en γ -besmetting;
- 0,4 Bq/cm² voor α -besmetting.

De stralingsdosis aan het buitenoppervlak van het collo mag niet groter zijn dan 2 mSv/h, niet meer dan 0,5 mSv/h bedragen op een afstand van 1 m van het collo en niet meer dan 0,1 mSv/h op 2 m afstand van het buitenoppervlak van het voertuig (wegtransport) of van de wagon (spoortransport). Deze limietwaarden zijn bijzonder laag.

Het model van collo maakt het voorwerp uit van een veiligheidsrapport, waarin aange-toond moet worden dat het model de bepalingen van het reglement eerbiedigt. Het veilig-



Figuur 64. | Belangrijkste tests uitgevoerd op type-B-colli.



Figuur 65. | Valtest (9 m) van een TN12/2.

heidsrapport wordt voorgelegd aan de bevoegde overheid van ieder land dat betrokken is bij het transport, om een goedkeuringscertificaat te bekomen. Dit certificaat wordt slechts afgeleverd als de overheid van mening is dat het model van collo de bepalingen van het transportreglement eerbiedigt en dat het in het bijzonder beantwoordt aan de normen inzake prestatievermogen.

De technische karakteristieken van een TN12/2-verpakking voor bestraalde splijtstofelementen worden weergegeven in bijlage 7.

Er werd een specifieke verpakking ontworpen voor het vervoer van glasproducten. De verpakking voldoet aan de strenge vereisten inzake gewicht, afmetingen, straling en afgifte van warmte. Het is de TN28VT, die 28 glascontainers (14 ton) kan vervoeren. Deze verpakking heeft een hoogte van 6,6 m, een diameter van 2,4 m en een brutogewicht van 112 ton.



Figuur 66. | Weg- en spoortransport van een collo TN12/2.

Centraal Bureau Loka

www.loka.org
Gedigitaliseerd 2021

De TN28VT werd met succes ingezet voor het transport van glasproducten van Frankrijk naar Japan en Duitsland. Deze verpakking is volledig in overeenstemming met de vereisten van het Internationaal Agentschap voor Atoomenergie en de wetgeving in Frankrijk, België en in de landen van de andere klanten van Cogema.

Deze verpakkingen zijn van dezelfde aard als de verpakkingen die al meer dan twintig jaar gebruikt worden voor het vervoer van gebruikte splijtstofelementen vanuit Doel 1 & 2 en Tihange 1 naar La Hague (bijvoorbeeld TN12/2).

4.4 Het radioactief afval

De productie van elektriciteit door kernsplijting en het gebruik van radio-isotopen in de geneeskunde, onder meer voor het opsporen en behandelen van kanker – medische toepassingen waarvan het nut onbetwistbaar is – en in de industrie, ontsnappen niet aan de algemene regel van elke menselijke activiteit: deze activiteiten brengen afval voort, afval dat radioactief of mogelijk radioactief is.

4.4.1 De soorten radioactief afval

Het grootste deel van het afval van de nucleaire toepassingen bestaat uit *technologisch afval*: het gaat om materialen en voorwerpen die gebruikt worden in zogenaamde gecontroleerde zones en die per definitie verdacht worden van radioactieve besmetting: overkleding, handschoenen, papier, laboratoriummateriaal, glas, plastic, kabels en andere voorwerpen die het gevolg zijn van onderhoudswerken of transformaties binnen deze zones. Deze materialen worden na gebruik bijeengebracht en behandeld, en de residu's ervan worden vastgezet in beton, cement, polymeer of bitumen, dat op zijn beurt verpakt wordt in standaardvaten van hoge kwaliteit. Het uiteindelijke resultaat van deze operaties wordt '*conform collo*' genoemd. De vaste verpakkingen vormen het gros van wat wij het afval van *categorie A* noemen: laagactief afval en afval met korte halveringstijd (cf. 2.2.4.3).

Dan is er het *procédé-afval* dat al veel minder omvangrijk is: filters van vloeistofkringen gebruikt voor de ventilatie en afkoeling, spuikranen van koelkringen, enzovoort. Dit afval wordt verwerkt, verhard en verpakt met het reeds vermelde technologisch afval, en vormt deels afval van categorie A en deels laag- of middelactief afval van *categorie B*, maar met lange levensduur (bijvoorbeeld procédé-afval van de fabricage van MOX-splijtstof). Tot deze categorie behoren eveneens de verbruikte bronnen die toegepast worden voor het stellen van medische diagnoses, voor de behandeling van kanker of bij medische beeldvorming, allemaal toepassingen waarvan de heilzame werking voor de mens niet meer bewezen hoeft te worden (cf. 2.2.4.3).

Rest ons nog de zogenaamde *verbruikte splijtstof*: men zou het de as van de nucleaire verbranding kunnen noemen. Bij wijze van spreken althans, want in tegenstelling tot de verbranding van steenkool, gas of olie is er hier hoegenaamd geen sprake van vuur.

Wat kan men doen met deze verbruikte splijtstof (cf. 2.1.3 en 2.2.4.3)? In de kernenergie bestaat er een *traditie van recuperatie en reductie van afval*. Gebruikte splijtstof bevat

nog veel restsplijtstoffen en weinig onbruikbare stoffen; deze laatste zijn splijttingsproducten en de kleinere hoeveelheden transuraniumelementen die de echte nucleaire as vormen. De splijtstof wordt chemisch behandeld om de restsplijtstoffen te scheiden van de onbruikbare stoffen en ze te recycleren. De splijttingsproducten en de transuraniumelementen worden verglaasd en vormen het afval van *categorie C*: afval dat zeer hoogactief is, maar waarvan de volumes zeer gering zijn. De structuren van de verbruikte splijtstof, die radioactief zijn geworden door activering, worden ingekapseld in beton en verpakt, en vormen eveneens hoogactief afval van categorie C. Zoals ieder ander procédé brengt de opwerking van verbruikte splijtstof op haar beurt procédé-afval en technologisch afval voort dat wordt verwerkt, verhard en verpakt volgens dezelfde technieken als van de andere toepassingen van de nucleaire cyclus of de medische toepassingen van radio-isotopen.

De opwerking van de verbruikte splijtstof is evenwel omstreden en sommigen beweren dat men niet moet proberen de restsplijtstoffen te recupereren. In dit geval moet de verbruikte splijtstof beschouwd worden als afval van categorie C. Zij vervangt als dusdanig het afval dat voortgebracht wordt bij de opwerking, dat betekent dat zij dezelfde splijttingsproducten bevat maar met één groot verschil, namelijk de niet te verwaarlozen aanwezigheid van splijtstoffen en het volume van het afval.

4.4.2 | Vormt het radioactief afval een bedreiging voor mens en milieu?

Momenteel beschouwt het publiek het radioactief afval als een bedreiging voor de volksgezondheid. Heeft het probleem te maken met de kwantiteit of met de kwaliteit? Of is het eerder een probleem van perceptie, van gewaarwording?

De kwantiteit hoeft geen probleem te zijn (cf. 2.2.4.3). Inderdaad, als we de hoeveelheden afval vergelijken die in de hele Europese Unie worden geproduceerd, zien we dat het radioactief afval nauwelijks 1% van de totale hoeveelheid industrieel toxisch afval vertegenwoordigt. Het echt gevaarlijke afval, het afval van hoge activiteit, vertegenwoordigt slechts een geringe fractie van deze 1%. Men kan dus niet zeggen dat het om een probleem van volume of kwantiteit gaat.

Is het dan een kwaliteitsprobleem? Ja, althans in de ogen van het publiek. Inderdaad, de enkele tientallen miljoenen m³ industrieel toxisch afval dat in Europa geproduceerd wordt, bevat metalen en chemische bestanddelen die zeer gevaarlijk zijn en gevaarlijk blijven gedurende zeer lange periodes, zo niet tot in het oneindige. Elke radioactieve stof daarentegen dooft uit, ook al is daar in bepaalde gevallen heel veel tijd voor nodig. Dit geldt slechts voor een minderheid van het volume.

De reactie van het publiek ten opzichte van dit aspect is op zijn minst tegenstrijdig te noemen: de grote volumes industrieel afval lijken de mensen niet te verontrusten, de beperkte volumes nucleaire afval daarentegen op een onredelijke wijze wel. Zelfs de uitdoving kan daar niets aan veranderen. Wat door de technicus als een onbetwistbaar voordeel wordt beschouwd, wekt bij het publiek alleen maar afkeer op. Dit is op zijn minst een interessante paradox. Te meer daar het leidmotief bij het beheer van nucleair afval ontegensprekelijk stabilisatie en insluiting is. Het onverwerkte radioactieve afval wordt zo snel mogelijk na zijn productie verwerkt en geïmmobiliseerd in een vaste, stabiele en goed verpakte ma-

trix. Het resultaat is een gekwalificeerd industrieel product dat op zichzelf een eerste insluitingsbarrière voor radioactiviteit vormt.

Wat is dan wel het probleem? Het probleem is dat men aan weerszijden spreekt, maar elkaar niet begrijpt. Men spreekt niet dezelfde taal. De beheerders van het radioactief afval konden zich niet inbeelden dat de politieke wereld en het publiek de in hun ogen vanzelfsprekende voordelen van insluiting, stabilisatie en verval van het radioactief afval niet zouden weten te waarderen; voordelen die automatisch moesten uitmonden in de aanvaarding van het principe van berging.

Het probleem is immers niet van technische aard. Het gaat om een *ethisch probleem* dat verschillende, zeer complexe aspecten omvat:

- het aspect van de rechtvaardigheid tussen generaties, de generatie die profiteert van een techniek en de generatie die er enkel de negatieve gevolgen van draagt, namelijk het kWh enerzijds, het radioactief afval anderzijds;
- de technische onzekerheden met betrekking tot het beheer op lange termijn;
- het mogelijke belangenconflict tussen de plaatselijke bevolking en de bevolking in het algemeen.

De belangrijke vraag die rijst bij het beheer van radioactief afval is de vraag wat men gaat doen met het gekwalificeerd product dat voortkomt uit de verwerking, conditionering en verpakking van het primaire afval. Er zijn eigenlijk maar drie opties:

- oppervlakteberging voor het éne afval (cf. 2.2.4.3), berging in diepgelegen geologische lagen voor het andere of voor al het afval samen, zonder de bedoeling te recupereren. Deze optie stemt overeen met de bepaling in de Belgische wet;
- bovengrondse opslag op lange termijn, verlengd van generatie op generatie;
- andere toekomstige oplossingen die het gevolg zijn van spectaculaire ontwikkelingen van de techniek, die het voortbrengsel zijn van de verbeelding of zich gewoon aandienen op een gegeven moment: berging in de ruimte, in diepe oceanen, vernietiging, enzovoort.

De Belgische afvalbeheerder NIRAS benadert de huidige opties met vertrouwen in zijn knowhow en vertrouwt erop dat hij deze knowhow zal verbeteren. Hij is zich bewust van de onzekerheden, die hij aanpakt in het kader van weldoordachte onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma's.

Het publiek denkt er helemaal anders over: 'Men moet alles stopzetten, mirakeloplossingen afwachten, niets doen dat als definitief wordt ervaren.'

Uit de confrontatie van beide standpunten groeit het gevaar van totaal immobilisme, het uitblijven van beslissingen, de bevestiging van het *Nimbysyndroom*.⁸

Er dient opgemerkt te worden dat het radioactief afval nu reeds een realiteit is. Of men vandaag dan wel morgen of overmorgen de kerncentrales sluit, verandert niets aan het huidige probleem.

De voorstellen van NIRAS inzake het radioactief afvalbeheer gaan in de richting die wordt aangegeven door ethische principes, die gestoeld zijn op een streven naar rechtvaardigheid tussen generaties onderling en binnen de huidige generatie. Alles ligt echter

8. Not in my backyard (niet in mijn tuin).

in handen van de regering die op basis van objectieve feiten en een reële rechtvaardigheidszin een democratische beslissing moet nemen

Met rechtvaardigheidszin wordt er in de eerste plaats bedoeld dat men dezelfde risiconormen hanteert voor de toekomstige en voor de huidige generaties. Op de tweede plaats wordt er bedoeld dat men de berging geleidelijk invoert, waarbij in elke fase de vooruitgang van het onderzoek wordt geïntegreerd en de belanghebbende partijen worden geraadpleegd: de bevolking, de verbruikers van elektriciteit en bijgevolg de producenten van afval.

Bij dit debat rijzen de volgende pertinente vragen:

- Als wij er niet in slagen een consensus te bereiken inzake het beheer op lange termijn, moeten wij dan capituleren en de toekomstige generaties de zorg laten te beslissen over wat zij zullen doen met het afval dat wij hun nalaten?
- Moet er het koste wat het kost geprobeerd worden de plaatselijke overheden te overtuigen om de berging te aanvaarden ten bate van de gehele gemeenschap of moet eenvoudigweg de tijdgeest gevolgd worden?
- Volstaan de technische onzekerheden om het uitstellen van beslissingen en het behoud van opslagplaatsen voor langdurige opslag te rechtvaardigen?
- Indien wij niet in staat zijn een consensus te bereiken, waarom zouden de toekomstige generaties er dan wel in slagen, vooral als men rekening houdt met een eventuele achteruitgang van de noodzakelijke deskundigheid?

Men kan niet ontkennen dat er in brede lagen van de bevolking een tekort aan elementaire kennis bestaat over radioactiviteit en radioactief afval. Het is dus noodzakelijk om deze elementaire kennis te verspreiden, wat het doel is van dit document, zodat in alle objectiviteit maatschappelijke debatten over kernenergie kunnen worden gehouden. Deze basis-kennis is onontbeerlijk om onze maatschappij en haar vertegenwoordigers in staat te stellen op het juiste moment de juiste beslissingen te nemen inzake het gebruik van kernenergie en het beheer van het radioactief afval.

4.4.3 | De definitieve berging in diepe geologische lagen

Het hoogactief (categorie C) en middelactief (categorie B)⁹ afval moet afgezonderd worden van het milieu. Zij vereisen een opsluiting op lange termijn. Het afval van categorie B bevat vooral alfastralers, terwijl het hoogactief afval naast alfastralers aanzienlijke hoeveelheden bètastralers en gammastralers bevat. De alfastralers hebben een beperkte reikwijdte maar lange halveringstijden die duizenden jaren belopen. De bètastralers en gammastralers, die in grote hoeveelheden aanwezig zijn in hoogactief afval, hebben overwegend gemiddelde halveringstijden maar een bijzonder hoog stralingseffect, wat verklaart waarom dit afval warmte vrijmaakt. Om die reden moeten ze vele tientallen jaren opgeslagen worden in silo's die uitgerust zijn met een krachtig ventilatiesysteem dat het afval afkoelt tot een temperatuur die zijn definitieve berging mogelijk maakt. De defi-

9. De berging van het radioactief afval van categorie A (oppervlakteberging) werd in punt 2.2.4.3 behandeld.

nitieve berging moet van die aard zijn dat de radioactieve stoffen zolang van de mens en het milieu worden afgezonderd dat ze geen gevaar meer vormen.

Op internationaal vlak erkent men vandaag dat de stabiele en moeilijk doordringbare geologische lagen op lange termijn een veilige oplossing vormen voor de berging van afval met lange halveringstijd en hoge radioactiviteit. De gesteenten die thans bestudeerd worden, zijn voornamelijk zout, graniet, basalt, klei en schiefers.

Het onderzoek van analogonen – natuurfenomenen die radioactieve stoffen gedurende zeer lange tijd isoleren – heeft reeds heel wat informatie opgeleverd. Twee miljard jaar geleden ontstond er in Gabon (West-Afrika), ingevolge een natuurlijke kettingreactie die minstens 100.000 jaar werkzaam was, een hoge uranium- en plutoniumconcentratie. Franse geologen hebben de weerstand bestudeerd van de kleilagen waarin deze concentraties gevangen zaten en hebben de migratie van het radioactief afval van deze kernreactie gemeten. Zij hebben daarbij vastgesteld dat, ook al was het afval niet verglaasd, de ondergrond voor een goede afscherming had gezorgd en elke migratie naar de biosfeer had verhindert. Deze eeuwenoude ervaring mag als uniek beschouwd worden en toont aan dat er een veilige oplossing bestaat voor de berging van radioactief afval.

De ontwerpstudies voor een definitieve berging staken in België van wal in 1974 en worden sinds 1976 ondersteund door de Commissie van de Europese Gemeenschap. België is één van de toonaangevende landen in het onderzoek terzake.

Door het S.C.K. (Studiecentrum voor Kernenergie – Mol) en NIRAS werd een inventaris opgemaakt van de geologische formaties die het meest geschikt lijken voor een definitieve berging. Na een vergelijkende analyse van de gunstige formaties, namelijk de klei- en schiefer-leisteenlagen, werd de Boomse klei weerhouden als referentiegesteente voor een O&O-programma over de diepe definitieve berging.

In een dergelijke kleilaag onder de site van het S.C.K. op 230 m diepte werd een pilootlaboratorium gebouwd dat bekendstaat onder de naam *HADES* (High Activity Disposal Experimental Site). In 1997 werd een tweede toegangsschacht uitgegraven. Dankzij deze schacht zal er niet alleen een verbindingsgalerij naar *HADES* kunnen worden gerealiseerd, maar ook een galerij waar de operaties voor de definitieve opslag zullen worden gesimuleerd.

De bestudeerde kleilaag werd 30 tot 35 miljoen jaar geleden gevormd en alles bevestigt dat haar stabiliteit niet verstoord zal worden tijdens de honderdduizenden jaren die nodig zijn om de radioactieve stoffen te laten uitdoven.

De watercirculatie in de kleilaag is zeer zwak. Tevens bezit de klei de eigenschap dat ze heel wat elementen in oplossing kan 'vastzetten', wat hun verspreiding tegenwerkt, zelfs wanneer de kunstmatige barrières het laten afweten. De klei is ook buigzaam en heeft een groot vermogen om te 'helen': onder invloed van de druk door de diepte sluit ze zich opnieuw en herstelt ze aldus elke barst of scheur die door de mens of bewegingen van het terrein veroorzaakt kunnen worden.

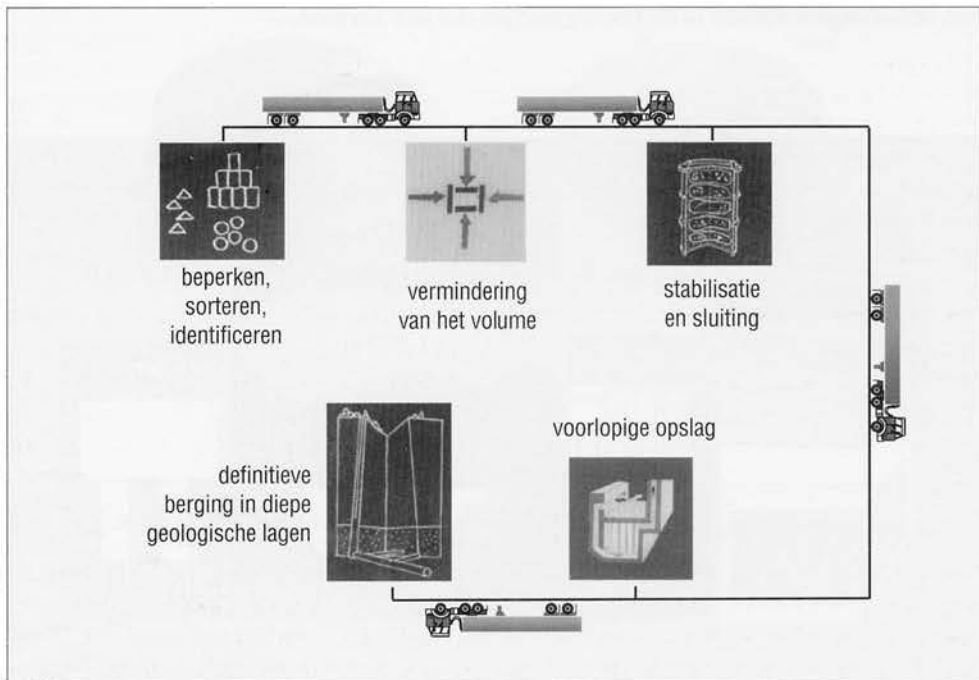
Daar er een afkoelingsperiode aan de oppervlakte van ongeveer vijftig jaar nodig is vooraleer het hoogactief afval een temperatuur bereikt heeft waarop de klei niet meer aangestast kan worden, zal de noodzaak om over een operationele installatie te beschikken voor de definitieve berging in diepe geologische lagen zich pas doen voelen vanaf de jaren 2040-2045. Van deze periode wordt gebruikgemaakt om de eigenschappen van de klei en de architectuur van de toekomstige bergingsuitrusting verder ten gronde te bestuderen.

De grote lijnen van de architectuur van een infrastructuur voor geologische berging in België werden reeds uitgetekend. Zij zijn gebaseerd op de resultaten van het *SAFIR-rapport* (Safety Assessment and Feasibility Interim Report – voorlopig rapport over de veiligheidsanalyse en de uitvoerbaarheid). De voorgestelde vormgeving zal waarschijnlijk nog gewijzigd worden aan de hand van de resultaten van het onderzoekswerk dat nog aan de gang is. In afwachting van definitieve oplossingen worden de Belgische radioactieve afvalstoffen voorlopig opgeslagen in aangepaste gebouwen bij Belgoprocess (industriële dochtermaatschappij van NIRAS) in Dessel.

4.4.3.1 | Algemene beginselen van de berging

De opvatting van het concept berust op het beginsel van de conditionering-opsluiting en, wat dit laatste betreft, op het beginsel van de veelvoudige barrières. Dit laatste bestaat erin opeenvolgende barrières aan te brengen tussen het radioactief afval of de geconditioneerde bestraalde splijtstofelementen. Als een barrière ophoudt haar rol te vervullen, nemen de volgende haar rol over en beperken zij de vrijlating van de radionucliden tot aanvaardbare waarden.

De vaste vorm van het geconditioneerd afval is een eerste barrière. De luchtdichte verpakking is de tweede barrière. Deze barrière zondert het afval en de verbruikte splijtstofelementen fysisch af van het gastgesteente gedurende de warme periode (300 jaar voor het verglaasd afval, 1.000 jaar voor de bestraalde splijtstof). De derde barrière is het opvul-



Figuur 67. | Behandeling van hoogradioactief afval.

materiaal, dat verenigbaar moet zijn met de klei van de gastformatie. Zij heeft twee doelstellingen:

- de warmte afvoeren opdat zij geen schade zou berokkenen aan de integriteit van het afval of de bestraalde splijtstofelementen, wat de uitloging zou vergemakkelijken;
- vermijden dat de niet of slecht opgevulde galerijen de structuur zelf van de kleilaag geomechanisch zouden verstoren, wat de opsluiting zou bedreigen.

Op lange termijn is de vierde en voornaamste barrière de kleilaag zelf, waarin het afval en de bestraalde splijtstoffen geborgen worden. De Boomse klei vertoont zoals reeds gezien de daarvoor geschikte karakteristieken.

In figuur 67 wordt de weg die het hoogradioactief afval aflegt bij de behandeling ervan, schematisch voorgesteld.

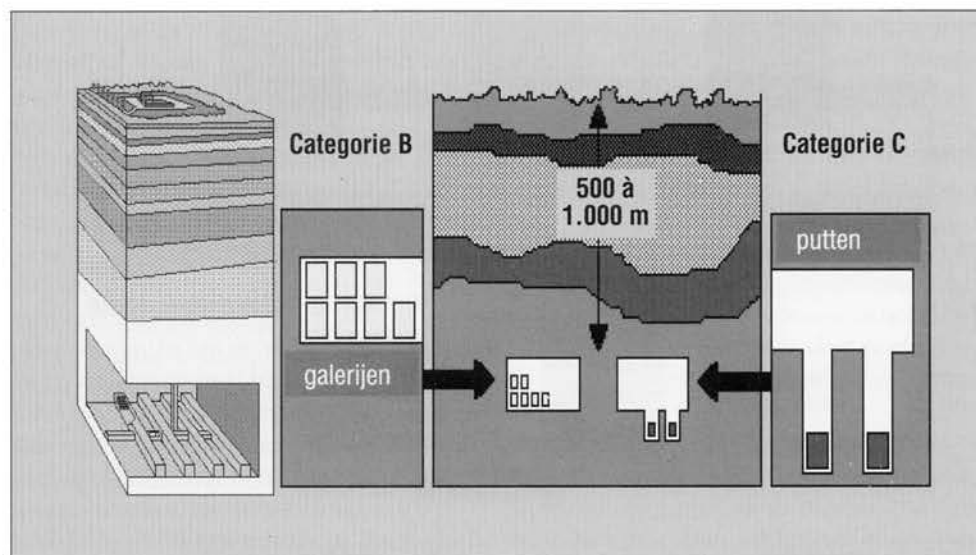
4.4.3.2 | Beschrijving van de geologische berging

De ondergrondse bergplaats bestaat uit twee afzonderlijke zones (cf. figuur 68):

- de ene zone voor het afval van categorie B en het middelmatig warmte-afgevend afval van categorie C;
- de andere zone voor het sterk warmte-afgevend afval van categorie C en/of de geconditioneerde bestraalde splijtstofelementen.

Deze zones zijn in feite een groot netwerk van onderaardse gangen van verschillende diameter. In de grote gangen kan het afval getransporteerd en behandeld worden, in de kleine gangen wordt het opgeslagen.

Bij de sluiting van de bergplaats worden de twee zones afgezonderd door het aanbrengen van opvullingsmateriaal in de hoofdgalerijen die hen verbinden.



Figuur 68. | Schema van een geologische berging.

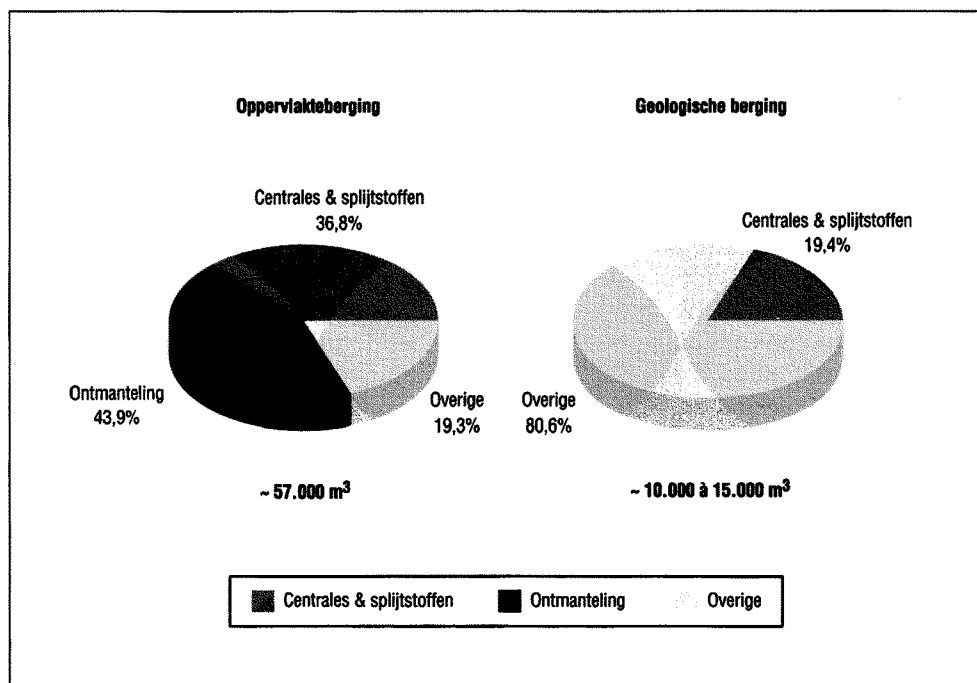
4.4.4 Welke hoeveelheden afval worden er in België geproduceerd?

We gaan uit van de volgende hypothesen:

- afval geproduceerd tijdens de eerste veertig jaar van de werking van de huidige centrales;
- afval geproduceerd door Belgonucleaire, SCK, IRE en de Belgische Staat (ex-Eurochemic), beperkt tot veertig jaar;
- afvalproductie in de geneeskunde, industrie, ... beperkt tot veertig jaar;
- ontmanteling van alle bestaande kerninstallaties.

In 1989 schatte men de hoeveelheid op 150.000 m³. Dankzij de technische vooruitgang bedraagt deze hoeveelheid vandaag minder dan 75.000 m³. De hoeveelheden met het huidige nucleaire programma (veertig jaar) verdelen zich als volgt (cf. figuur 69):

- oppervlakteberging: ~57.000 m³;
- geologische berging: ~10.000 à 15.000 m³;
- algemeen totaal – geologische + oppervlakteberging: < 75.000 m³.



Figuur 69. | Berging van kernafval – hoeveelheden met het huidige nucleaire programma (veertig jaar).

4.5 Non-proliferatie

4.5.1 Het non-proliferatieverdrag

Het doorsneepubliek is ervan overtuigd dat het gebruik van kernenergie inherent gepaard gaat met een verdere verspreiding van kernwapens en het risico van terrorisme.

Het verspreiden van kernwapens verhinderen is inderdaad een complexe taak, die een internationale samenwerking vereist en het opbouwen van vertrouwen op alle niveaus, zowel bilateraal, regionaal als globaal. Het opgeven van civiele kernenergie verhindert geenszins de aanmaak van kernwapens.

Vandaag, meer dan een halve eeuw nadat de ontzettende vernietigende kracht van kern-explosies voor het eerst werd aangetoond, bestaat er een reeks internationale en wettelijke mechanismen – met inbegrip van verdragen en andere akkoorden, fysische veiligheidsmaatregelen en exportcontrolesystemen – die definitief geïnstitutionaliseerd zijn.

In 1953 werden er tussen de Verenigde Staten en andere landen, waaronder België, afspraken gemaakt die transfers van nucleaire technologie slechts toelaten voor vredelievende toepassingen. Bilaterale safeguards (waarborg)-regelingen werden ingevoerd.

Het *Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA)* werd in het kader van de UNO in 1957 opgericht. Enkele jaren na zijn oprichting startte het IAEA in het kader van bindende safeguards agreements¹⁰ met de inspecties van kernsites.

In maart 1970 trad het Non-proliferatieverdrag voor kernwapens – *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT)* in werking. Het werd ondertekend door de Sovjet-Unie, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten. Het verdrag verbiedt de staten die over nucleaire wapens beschikken, andere staten die daar niet over beschikken, aan dergelijke explosieven te helpen. Een veertigtal andere landen ondertekenden wat later het NPT. De staten die niet over nucleaire wapens beschikken, verplichten er zich toe af te zien van dergelijke wapens. In mei 1995 werd het NPT voor onbepaalde tijd verlengd. Op dit ogenblik hebben meer dan 180 landen het verdrag ondertekend. Daardoor zijn ze onderworpen aan de safeguardscontroles van het IAEA.

De vijf landen die officieel behoren tot de kernwapenmogendheden zijn: China, de Russische Federatie, Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten. Alle ondertekenaars van het NPT met uitzondering van de kernwapenmogendheden hebben dus vrijwillig afgezien van het aanmaken van atoomwapens en al hun nucleaire sites worden onderworpen aan de internationale safeguardscontroles van het IAEA. Het hele Zuid-Amerikaanse en Afrikaanse continent (Zuid-Afrika heeft zijn atoomarsenaal ontmanteld en het NPT ondertekend) zijn nu "Nuclear Weapons Free Zones". Het wordt hoog tijd dat de vijf kernwapenmogendheden het voorbeeld van de verticale non-proliferatie geven (zoals Artikel VI van het NPT hen daartoe verplicht) en dat, net zoals het in Europa gebeurt, al hun civiele nucleaire installaties aan de internationale safeguards worden onderworpen.

Staten zoals India, Israël en Pakistan die het NPT niet ondertekend hebben, bezitten de technologie om atoomwapens aan te maken. In de eerste helft van 1998 hebben India en Pakistan proeven uitgevoerd met atoombommen. Onder internationale druk zijn beide landen nu bereid geen verdere atoomwapens meer aan te maken en het NPT te ondertekenen.

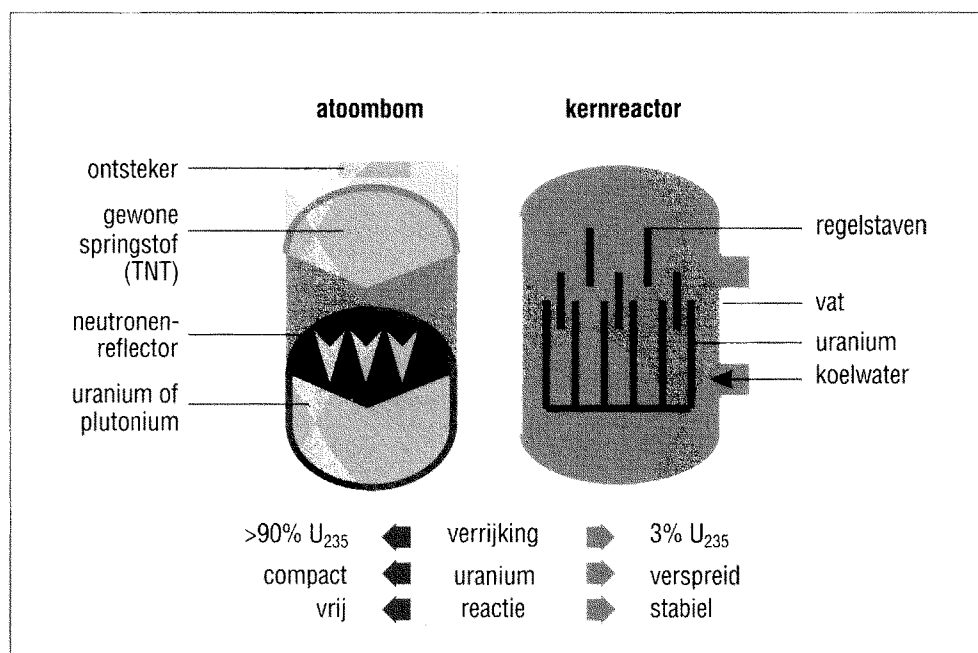
10. Safeguards agreements: waarborgakkoorden; in de tekst gebruiken we de internationaal erkende Engelse benaming.

4.5.2 | Het nucleaire wapen

Het nucleaire wapen is een ontplofbaar projectiel gevormd door een voldoende massa splijtbare stoffen, namelijk plutonium of hoog verrijkt uranium (cf. figuur 70).

Om een atoombom met plutonium te maken is zeer zuiver plutonium nodig, dat wil zeggen: plutonium met een zeer hoog gehalte aan splijtbare isotopen.¹¹ Om een dergelijke zuiverheid te bereiken gebruiken militairen plutonium dat wordt geproduceerd in splijtstoffen die slechts enkele weken hebben vertoefd in speciaal voor dit doel gebouwde reactoren.

Civiel plutonium daarentegen is afkomstig van de opwerking van splijtstoffen van reactoren van het type dat in België wordt gebruikt. Het plutonium is niet geschikt om er atoomexplosieven mee te maken en wel om de volgende reden: de splijtstof verblijft drie à vier jaar in de reactor en het plutonium is te onzuiver geworden om een nucleair wapen te vervaardigen.



Figuur 70. | Vergelijking atoombom en kernreactor.

11. De isotopische samenstelling van in reactoren van het LWR-type geproduceerd plutonium is grosso modo de volgende: 60% Pu-239, 24% Pu-240, 10% Pu-241, waarbij andere isotopen in kleinere hoeveelheden aanwezig zijn. Het plutonium voor bewapening, geproduceerd in speciaal voor dat doel ontworpen reactoren, bevat ongeveer 93% Pu-239 en 7% Pu-240. Globaal gezien, hoe langer het plutonium in de reactor verblijft, hoe meer Pu-240 er gevormd wordt. Daarom wordt de splijtstof in militaire reactoren reeds na enkele weken ontladen. Civiel plutonium daarentegen verblijft drie à vier jaar in de reactor. Voor het gebruik van wapens is Pu-240 een vergif, omdat het spontane neutronen afgeeft die een onvoorspelbaar afgaan van een bom kunnen veroorzaken. Anders gezegd, een explosief apparaat dat met civiel plutonium vervaardigd zou worden, is zo onbetrouwbaar en zo onvoorspelbaar dat het als wapen niet gekwalificeerd kan worden. Daarenboven is het onmogelijk om Pu-240 te scheiden van Pu-239.

Nog nooit werd plutonium van dit type gebruikt voor nucleaire wapens. Nog nooit werd plutonium afkomstig van civiele reactoren betrokken bij eender welke poging ook tot ontduiking van het door het NPT ingestelde controlesysteem.

Civiel plutonium is niet geschikt voor de fabricage van bommen; daarentegen kan 'militair' plutonium heel goed in civiele kerncentrales worden gerecycleerd.

Het plutonium afkomstig van de Russische en Amerikaanse kernarsenalen die ontmanteld moeten worden, zou perfect geschikt zijn voor recyclage in civiele kerncentrales, na denaturatie door vermenging met uranium en opwerking tot MOX-splijtstof. Deze demilitarisering van plutonium biedt een goede oplossing voor non-proliferatie, houdt rekening met het milieu en is economisch verantwoord.

De weigering om MOX-splijtstof te gebruiken in civiele kerncentrales zou ongetwijfeld een belemmering vormen voor het elimineren van de gedemilitariseerde plutoniumvoorraden.

Om de zaken in hun verband te plaatsen, herinneren wij eraan dat er voor het fabriceren van een explosief nucleair projectiel een zeer specifieke kennis nodig is op talrijke verregaande gespecialiseerde gebieden en dat Irak gedurende tien jaar één miljard dollar per jaar heeft uitgegeven voor zijn militair nucleair programma, waarbij meer dan 10.000 hooggekwalificeerde wetenschappers en technici betrokken waren. Trouwens, het Irak van Saddam Hoessein heeft de weg van hoog verrijkt uranium gevolgd om zijn militair programma te verwezenlijken. Hetzelfde was geldig voor Zuid-Afrika.

Het ontwikkelen van een nucleair explosief, zelfs primitief, is niet binnen het bereik van een groep terroristen, en het is hoogst onwaarschijnlijk dat een dergelijke groep de deskundigheid, de benodigde materialen en de enorme financiële middelen zou kunnen verwerven buiten het medeweten van de regering van het gastland.

Het is voor terroristen oneindig veel eenvoudiger cesium-137 of kobalt-60 te vinden, die algemeen gebruikt worden in bijna alle ziekenhuizen ter wereld, dan plutonium te verkrijgen.

De terroristen van deze wereld hebben helaas geen plutonium nodig om hun sinistere plannen te verwezenlijken. Kijken we maar naar de vreselijke aanslagen die overal ter wereld worden gepleegd. Trouwens, chemisch terrorisme is schrikwekkender, oneindig meer geloofwaardiger en minder duur dan radioactief terrorisme.

4.5.3 | Evaluatie

De mogelijkheid om een zogenaamd radioactief wapen te vervaardigen bestaat onafhankelijk van het al dan niet produceren van elektriciteit van nucleaire oorsprong.

Het in reactoren van het LWR-type geproduceerde plutonium is niet geschikt voor het aanmaken van atoomwapens. Bovendien wordt op het gebruik ervan in hoge mate en op doeltreffende wijze toezicht gehouden in de aan controle onderworpen landen.

In de landen van de OESO die het NPT ondertekend hebben en hun civiele nucleaire installaties aan de internationale safeguardscontroles hebben onderworpen, is er nog nooit een verduistering van splijtbaar materiaal vastgesteld. De controles van het IAEA en ook van Euratom (voor de landen van de Europese Gemeenschap) hebben in dit opzicht hun doeltreffendheid bewezen.

De Verenigde Naties zouden een code met internationale sancties moeten instellen tegen landen die het NPT ondertekend hebben en op heterdaad betrapt worden bij het niet nakomen van hun verplichtingen. Deze sancties zouden automatisch van toepassing moeten zijn zonder dat er daarvoor een stemming nodig is en zonder het risico te lopen dat een lid van de Veiligheidsraad zijn veto daarover stelt.

De vijf kernwapenmogendheden zouden er zich toe moeten verplichten geen splijtbare materialen meer te produceren voor militair gebruik en aanvaarden dat het geheel van hun civiele nucleaire installaties onderworpen wordt aan internationale safeguardscontroles. De Verenigde Staten zouden wat dit laatste betreft het voorbeeld moeten geven, voordat men kan hopen dergelijke controles in Rusland en China uit te voeren.

Het terrorisme is een ernstig maatschappelijk probleem. Het is evenwel een vergissing de publieke opinie te willen doen geloven dat de civiele nucleaire industrie ertoe bijdraagt de risico's daarvan te vergroten.

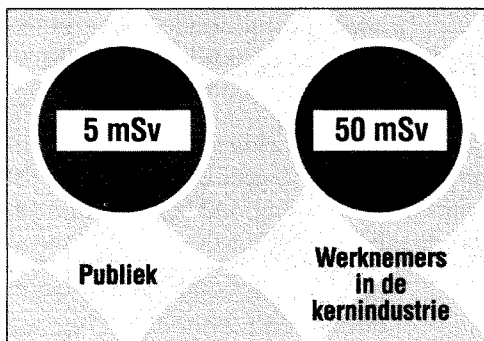
4.6 | Stralingseffecten

De uiteenlopende toepassingen van straling en radioactieve stoffen brengen meestal een zeer geringe stralingsbelasting teweeg die aan de dosis van natuurlijke straling die ieder van ons ontvangt, moet worden toegevoegd (cf. 2.2.4.1).

Elke vorm van leven is slechts mogelijk dankzij het feit dat de cellen die in alle levende materie aanwezig zijn, kunnen groeien en zich kunnen vermenigvuldigen. Bestraling is een van de vele wijzen waarop deze processen kunnen worden beïnvloed.

Bij bestraling wordt een gedeelte van de stralingsenergie door de cel geabsorbeerd. Hierdoor kan ionisatie optreden, die op haar beurt chemische veranderingen in de cel teweegbrengt. Dergelijke veranderingen vinden voortdurend plaats en het lichaam heeft een zeer doeltreffende methode om deze ongedaan te maken. Het feit dat het leven zich in een radioactieve omgeving heeft ontwikkeld, is daar het beste bewijs van. Ons lichaam staat elke seconde aan duizenden bestralingen bloot. Zonder een doeltreffend herstelmecanisme zou het leven gewoon onmogelijk zijn.

Doch chemische veranderingen kunnen niet altijd ongedaan worden gemaakt. De getroffen cel zal dan afsterven of in een gewijzigde vorm overleven. In dat geval spreken we van een getransformeerde cel.



Figuur 71. | Jaarlijkse dosislimiet.

De effecten van celsterfte worden gewoonlijk al spoedig na de blootstelling aan straling vastgesteld en worden vroege stralingseffecten genoemd. De effecten van celtransformaties die pas vele jaren later aan het licht komen, worden late stralingseffecten genoemd.

De jaarlijkse dosislimiet vastgesteld door de ICRP (International Commission for RadioProtection) is 5 mSv voor het publiek en 50 mSv voor de werknemers in de kernindustrie (cf. figuur 71). De ICRP is een over de hele wereld erkende onaf-

hankelijke commissie samengesteld uit medische en wetenschappelijke deskundigen, die al ruim zestig jaar advies verstrekt over de bescherming tegen straling.

De norm voor werknemers in de kernindustrie ligt tienmaal hoger dan deze voor het publiek. De reden is dat de werknemers in de kernindustrie gekend zijn en medisch opgevolgd worden.

In deze normen wordt de dosis ten gevolge van de natuurlijke straling niet in rekening gebracht. In België alleen varieert naarmate de streek waar men woont deze natuurlijke dosis van 2 tot 10 mSv/jaar. Er zijn gebieden op aarde waar de bevolking aan 20 mSv/jaar is blootgesteld.

Om enigszins toch rekening te houden met de dosis ontvangen door natuurlijke straling heeft de ICRP onlangs een aanbeveling gedaan om de huidige vastgestelde normen te verlagen tot 5 mSv/5 jaar voor het publiek en 100 mSv/5 jaar voor de werknemers in de kernindustrie.

Een volwassene bestaat uit ongeveer 60.000 miljard cellen. Dagelijks sterven miljoenen cellen af, die door nieuwe vervangen worden. De meeste cellen die door blootstelling aan een lage of een matige stralingsdosis zijn afgestorven, worden binnen enkele dagen of weken vervangen. Bij een zeer grote stralingsdosis van 1.000 mSv of meer kan de celfsterfte zo groot zijn dat het lichaam de dode cellen niet snel genoeg kan vervangen. Dit gaat gepaard met ernstige verschijnselen zoals brandwonden en braken; circa 10.000 mSv of meer hebben binnen enkele dagen of weken de dood tot gevolg. Dergelijke effecten zijn alleen opgetreden ten gevolge van kernwapenexplosies en het ongeval van Tsjernobyl (cf. 4.2.1.4).

Indien over een langere periode gespreid dezelfde dosis wordt ontvangen, kan het lichaam de beschadigde cellen vervangen en treden er geen vroege effecten op.

Er bestaat een drempeldosis waaronder geen schadelijke vroege effecten worden vastgesteld. Deze drempeldosis bedraagt ongeveer 1.000 mSv (1 Sv) en is 500 keer hoger dan de gemiddelde dosis die ieder van ons jaarlijks aan natuurlijke straling ontvangt.

De kans tot kanker ten gevolge van straling neemt toe met de ontvangen drempeldosis (somatisch-stochastische effecten – cf. 4.2.1.4). Volgens de ICRP is deze kans $1,25 \cdot 10^{-2}$ per Sv. Stel dat 10.000 personen elk een dosis van 1 Sv (1.000 mSv) ontvangen, dan kan men verwachten dat er 125 onder hen later aan de gevolgen van stralingskanker kunnen overlijden. Voor een populatie van 10.000 is het normale sterftecijfer ten gevolge van kanker ongeveer 1.400. Voor een kleinere dosis is deze verwachtingswaarde navenant kleiner.

De effecten (somatisch-niet-stochastische effecten¹²) van hoge stralingsdoses (ogenblikkelijk ontvangen dosis of gecumuleerde dosis ontvangen binnen een korte tijdspanne) worden weergegeven in tabel 20.

Personen die stralingsdoses van vele honderden mSv of meer hebben ontvangen tijdens hun leven, lopen een iets groter risico om kanker te krijgen. Wij leggen er de nadruk op dat bij werknemers in de kernindustrie de beroepsmatige blootstelling over het algemeen gering is en over een lange periode wordt gespreid. Er is zelfs gebleken dat het totale aantal

12. Somatisch-niet-stochastische effecten: effecten waarvan de ernst afhangt van de ontvangen dosis maar die begrensd worden door de drempelwaarde.

Tabel 20. | Effecten van hoge stralingsdoses.

Dosis (mSv)	Effecten
300	Geen effect, voor sommige personen lichte braakneigingen
700	Voorbijgaande braakneigingen (gedurende enkele uren); soms braken en een weinig koorts. Geen medische problemen, alles komt in orde zonder medische behandeling
1.500	Braken en kans op ontstekingen, daling van de bloeddruk, vermoeidheid, koorts, risico op bloedingen. Hospitalisatie noodzakelijk
4.000	Zwaar braken, zware vermoeidheid, koorts, spijsverteringsstoornissen gepaard gaande met ernstige diarree, bloedingen, ernstige ontstekingen, uitvallen van haar. Kans op dodelijke afloop bij ontbreken van medische behandeling
6.000	Zelfde tekenen als voorgaande met daarbij draaiingen en zware evenwichtsstoornissen. Het risico van overlijden is groot ondanks een medische behandeling (mergtransplantatie)
8.000	Sombere vooruitzichten. Meestal fatale afloop
10.000	Fatale afloop binnen enkele dagen of weken

kankergevallen in deze categorie lager ligt dan bij de algemene bevolking, hoewel in sommige gevallen een lichte stijging van de incidentie van bepaalde vormen van kanker is geconstateerd.

De werknemers in de kernindustrie worden geregeld aan een medisch onderzoek onderworpen en de door hen ontvangen stralingsdoses worden geregistreerd.

Er zijn in ieder geval geen bewijzen dat het aantal kankergevallen hoger ligt dan normaal bij doses van minder dan 200 mSv. Zo is ook de totale incidentie van kanker in gebieden met een hoge natuurlijke straling niet hoger dan normaal en worden er bij werknemers in de kernindustrie zeker niet meer kankergevallen geregistreerd dan bij werknemers uit andere sectoren. Bij mensen die aan enkele honderden tot verscheidene duizenden mSv werden blootgesteld, bestaat er een verhoogd kankerrisico, maar dergelijke blootstellingen komen echter zelden voor (cf. 4.2.1.4).

Zoals bij stralingskanker gaat men ervan uit dat een bepaalde stralingsdosis enig risico voor erfelijke afwijkingen oplevert. Onder normale omstandigheden bestaat er een vrij groot risico (ongeveer 1 op 30) dat elk kind met een erfelijke afwijking geboren wordt. Over de mogelijke oorzaken is er echter maar weinig bekend. Er wordt aangenomen dat het erfelijkheidsrisico bij een bestraalde ouder net zo groot is als het kankerrisico. Maar dankzij de herstelprocessen in het lichaam kan het eigenlijke risico zelfs kleiner uitvallen. In Hiroshima en Nagasaki zijn er bij de kinderen die door bestraalde ouders werden verwekt, geen erfelijke afwijkingen waargenomen die aan de straling van de atombomexplosies kunnen worden toegeschreven.

| Besluit

Het civiele gebruik van kernenergie is vandaag een gevoelsgeladen dossier geworden. Wanneer kernenergie ter sprake komt, denken vele mensen spontaan aan rampen zoals Hiroshima, Nagasaki of Tsjernobyl. Het negatieve beeld van kernenergie is meestal te wijten aan een gebrek aan objectieve informatie, of aan angst voor het onbekende, of aan onzekerheid omwille van het grootschalige karakter van die energievorm. *Het debat kernenergie is een gevoelig ethisch debat dat geplaatst moet worden in het globaal kader van 'de energievoorziening en de productiemiddelen'.* Tijdens debatten wordt er vaak intuïtief gereageerd, dat wil zeggen: onmiddellijk en op basis van vooroordelen die sterk gevoelsgeladen zijn. Dit wijst op onze betrokkenheid en engagement. Toch pleit het ons niet vrij om te zoeken naar een objectief oordeel op basis van objectieve gegevens.

We lichten dit even nader toe. Energie is er nodig en we verbruiken veel energie. Energie is van levensbelang voor onze ontwikkeling en sociale welvaart. Maar hoeveel energie hebben we werkelijk nodig? Het staat vast dat de westerse wereld tot op vandaag nogal kwistig is omgesprongen met energie. Energiebesparingen zijn noodzakelijk. Een rationeel energiegebruik is absoluut noodzakelijk, daar de fossiele energiedragers niet onuitputtelijk zijn en mettertijd schaarser zullen worden. Energiebesparingen moeten ons desnoods opgedrongen worden (door de overheid), wanneer wij niet in staat zouden blijken het op eigen initiatief te doen. Zoals vandaag kan het niet verder.

De vraag naar energie zal in de toekomst sterk toenemen door de groei van de wereldbevolking, de toename van de verstedelijking en de ontwikkeling in de derdewereldlanden. *Recht op energie is een universeel recht*, want God heeft het beheer van de schepping toevertrouwd aan alle mensen, ongeacht het betrokken werelddeel.

Op een duurzame wijze en met respect voor het milieu en de mens voldoen aan de stijgende vraag naar energie is vandaag een reëel probleem, dat alleen opgelost kan worden door overleg op wereldvlak.

Zij die er echter van overtuigd zijn dat alles opgelost kan worden door energiebesparingen, zijn irrealistisch en naïef. Zij die beweren dat in een nabije toekomst kernenergie vervangen kan worden door hernieuwbare energiebronnen, zijn even irrealistisch. Het is noodzakelijk deze energievormen verder te ontwikkelen, maar het deficit op de energiebalans is zo gigantisch dat kernenergie onvervangbaar blijft. Het toenemende verbruik

van fossiele brandstoffen voor energieproductie is geen geldig alternatief. Trouwens, het gebruik van deze grondstoffen gaat gepaard met CO₂-, NO_x- en SO₂-emissies die zwaar milieubelastend zijn.

Op basis van een uitgebreide analyse van de energieproblematiek en vanuit een christelijke invalshoek kunnen we volgende reflecties maken:

❑ Indien wij mateloos fossiele brandstoffen blijven verstoken, benadelen we de toekomstige generaties. Wij mogen niet verkwistend omgaan met deze energiebronnen, die schaarser worden en die vooral grondstoffen zijn voor de chemie en farmacie, voor bepaalde geneeskundige toepassingen, voor voedsel, enzovoort. De toekomstige generaties zullen het ons bijzonder kwalijk nemen dat wij deze edele grondstoffen zo hebben verkwist. Het is onze opdracht en plicht de toekomst van de mensheid te vrijwaren en zorg te dragen voor het energetisch wereldpatrimonium.

Splijtstoffen zoals uranium en thorium kunnen alleen gebruikt worden voor energieproductie, op enkele marginale toepassingen na in de metallurgie van legeringen. Is het dan niet aangewezen kernenergie in leven te houden om de toekomstige generaties toe te laten hun eigen keuzes te maken?

Bij de keuze van energieopties mogen we ons niet laten leiden door persoonlijke belangen of toegeven aan irrationele, dogmatische, ideologische of machiavellistische druk.

❑ Allen zijn we verantwoordelijk voor het welzijn van de derdewereldlanden. Die landen worden niet geholpen met sympathiebetuigingen. Financiële en technologische hulp van onze rijke landen is onontbeerlijk. Ook ontwikkelingslanden hebben recht op het verwerven van een welvaartspeil dat overeenkomt met hun tradities.

Misschien willen deze bevolkingen niet leven zoals wij. Het is hun goed recht daarover zelf te beslissen. Het is echter onze plicht hen in de gelegenheid te stellen gebruik te maken van onze verworvenheden op het gebied van hygiëne, gezondheid, veiligheid en leefcomfort, essentiële voorwaarden om welvaart en welzijn te bereiken.

Wij kunnen bijvoorbeeld helpen door ons verbruik van fossiele brandstoffen te beperken. Zo kunnen zij een beter beroep doen op deze brandstoffen om hun vitale energiebehoeften te dekken. Wij hebben de mogelijkheid andere energiebronnen aan te spreken. Kernenergie kan tot één van de mogelijkheden behoren.

❑ De productie van elektriciteit met kernenergie veroorzaakt geen zure regen en draagt niet bij tot het broeikaseffect. Onder normale omstandigheden resulteert het in kleine emissies van radioactieve stoffen in het milieu en zeer geringe stralingsdoses voor de bevolking. De stralingsdosis die ieder van ons jaarlijks uit natuurlijke bronnen ontvangt, wordt door de elektronucleaire productie slechts verhoogd met één of twee duizendste eenheid. De radioactieve lozingen in de atmosfeer door de kerncentrales zijn gering en hebben geen impact op mens en milieu.

Kunnen wij nog lang de ogen sluiten voor het waarschijnlijk reëel risico van klimaatverandering ten gevolge van de uitstoten veroorzaakt door de verbranding van fossiele brandstoffen? Waarom zouden wij dat risico banaliseren en tegelijkertijd het risico van het effect van lage stralingsdoses als gevolg van de toepassing van kernenergie diaboliseren?

Bovendien is het effect van lage stralingsdoses op de gezondheid nog niet gekend. Ook de invloeden van de andere productiemiddelen moeten verder worden onderzocht.

Kunnen wij verder de atmosfeer bezoedelen, onze steden, bossen en velden laten aantasten door zure regens en uiteindelijk de gehele wereld onleefbaar maken? De emissies van broeikasgassen moeten in ieder geval zo laag mogelijk gehouden worden om antropogene klimaatsveranderingen op onze planeet te beperken. Kernenergie kan bijdragen tot het beperken van deze zeer schadelijke emissies.

De productie van elektriciteit met kernenergie gaat gepaard met de productie van radioactief afval, maar in relatief kleine hoeveelheden. Met de huidige technologieën is het mogelijk de geproduceerde hoeveelheden radioactief afval veilig op te slaan en te bergen, zonder risico's van contact met mens en milieu. In de loop der tijd verdwijnt de radioactiviteit door het natuurlijke verval. Een groot deel van het afval verliest trouwens op relatief korte termijn zijn radioactiviteit.

Het probleem dat de radioactieve afvalstoffen stellen, is technisch gezien niet groter dan de problemen met het industrieel en huishoudelijk afval. Het radioactief afval mag gerust de vergelijking doorstaan met de chemische en minerale toxiciteiten, zoals bijvoorbeeld zware metalen die in de natuur worden gedumpt. Het echte probleem is er voornamelijk een van psychologische en politieke aard, van publieke aanvaarding van de berging van het radioactief afval.

Voor België, dat een grote verbruiker van kernenergie is (60% van de totale elektriciteitsproductie), geeft de jaarlijkse elektronucleaire productie per inwoner aanleiding tot slechts één bierblikje laagactief afval en één vingerhoed hoogactief afval.

Weegt het beheer van deze beperkte hoeveelheid afvalstoffen voldoende zwaar door om kernenergie op te geven? Volgens ons niet. Ook voor andere energiebronnen is men nog op zoek naar veiliger methoden voor bewaring en beheer. Voor kernafval zijn de risico's eerder gering omwille van de strenge veiligheidsmaatregelen.

In tegenstelling tot wat sommigen beweren, kan hoogradioactief afval veilig op lange termijn opgeslagen worden. De tot nu toe bereikte resultaten van een omvangrijk onderzoek, dat wereldwijd gevoerd wordt, laten nu reeds toe te stellen dat berging ervan ook op zeer lange termijn de vereiste veiligheid kan bieden.

40 ton splijtstof produceert 14 TWh. Door opwerking van deze hoeveelheid gebruikte splijtstof kan men het hoogactief afval reduceren tot 4,5 m³ glasproduct (in het glasproduct is 14% hoogradioactieve stoffen aanwezig), wat een uiterst kleine hoeveelheid is. Deze hoeveelheid kan vervoerd worden in één enkele verpakking.

Om eenzelfde productie met de modernste kolencentrales te bekomen moet men ongeveer 4,9 miljoen ton steenkool verbranden. Dit heeft emissies van 13,9 miljoen ton CO₂, 1,26 miljoen ton NO_x en 1,32 miljoen ton SO₂ tot gevolg.

Zijn wij niet opgeroepen om in volle verantwoordelijkheid de meest geschikte energievormen te kiezen?

☐ De stelling dat een technologie niet ontwikkeld mag worden zolang niet al haar effecten op het milieu gekend en *opgelost* zijn, is niet redelijk. Alle industriële activiteiten produceren afvalstoffen, waarvan het beheer op lange termijn niet op voorhand vastligt.

☐ Het gebruik van kernenergie is ook vanuit een economisch standpunt verantwoord. De kerneenheden bieden een stabiele en relatief lage kWh-prijs. De reden is dat de splijtstof slechts voor een gering deel, minder dan 25%, bijdraagt tot de kostprijs van het kWh.

Daarenboven dekt de kWh-prijs alle kosten, inclusief de ontmanteling van de installaties, het beheer en de veilige berging van de afvalstoffen.

❑ In het verleden hebben we een nucleaire wapenwedloop gekend. Grote hoeveelheden plutonium werden gebruikt voor het fabriceren van atoombomben. Om het plutonium dat door de ontmanteling van het overbodig atoomwapenarsenaal wordt herwonnen te elimineren, kan het, mits transformatie, als splijtstof in de bestaande kerncentrales worden gebruikt. Zo kan men gehoor geven aan de bijbelse opdracht: 'de zwaarden omsmeden tot ploegijzers'.

❑ Het afwijzen van de militaire toepassingen van kernenergie is geen reden om de civiele toepassingen te verbieden. Om de vrede te waarborgen stelt de militaire dimensie uiteraard specifieke eisen aan de wereldorde. Het opgeven van de civiele kernenergie heft echter de risico's van proliferatie niet op. De productie van kernwapens valt buiten het domein van de civiele kernenergie.

In de westerse landen lijkt de kernindustrie moeilijk weer op adem te komen na de afremming die volgde op het ongeval van Tsjernobyl. Er zijn echter tekenen van opleving in de landen van het ex-Sovjetblok, waar de onderbroken programma's opnieuw worden opgestart van zodra het nodige kapitaal beschikbaar is. In Azië werden de programma's nooit echt vertraagd. Dat continent telt nu de meeste reactoren in aanbouw. Dit geldt voor Japan, de volksrepubliek China, Korea, Taiwan, India en Pakistan.

In Europa en in de Verenigde Staten daarentegen is stoppen de tendens. Deze tendens wordt nog versterkt door het feit dat het publiek getraumatiseerd blijft door het voorval in Tsjernobyl. Alleen in Finland staat de bouw van een nieuwe centrale op het programma.

Deze tendens lijkt niet onomkeerbaar, want de situatie kan veranderen door een forse prijsstijging van fossiele brandstoffen naarmate ze schaarser worden en naarmate het publiek bewust wordt van de impact van CO₂ op het broeikas-effect.

Het eventueel opgeven van kernenergie in onze landen, waar veilige kerncentrales in werking zijn, sluit het bouwen van kerncentrales in andere delen van de wereld niet uit.

Het voortbestaan van de westerse technologie in het domein van kernenergie is uiterst belangrijk. Het opgeven van deze technologie zou gelijkstaan met het weggooien van het kind met het badwater.

Het is essentieel samen te werken op wereldniveau om nog economischer, veiliger en milieuvriendelijker reactoren te ontwerpen. Laten we vertrouwen hebben in de verantwoordelijkheidszin en de kundigheid van onze ingenieurs en technici. Licht onze verantwoordelijkheid er juist niet in dat alleen de beste en veiligste kerncentrales worden gebouwd?

In het Westen is de prioritaire bekommernis om de veiligheid alomanezig. Deze veiligheidscultuur moet ook door de andere landen worden overgenomen. Een systematische controle van het naleven van de zeer strenge veiligheidsnormen moet aan internationale organismen worden toevertrouwd.

De nucleaire veiligheid is een wereldverantwoordelijkheid. We kunnen ze niet doorschuiven naar anderen om net zoals Pontius Pilatus onze handen in onschuld te wassen: wat er ver van onze deur gebeurt, is onze verantwoordelijkheid niet. Passiviteit en onverschilligheid verminderen de risico's niet, integendeel. Onze realiteitszin dwingt ons onze verantwoordelijkheden in deze materie op te nemen.

Een nucleair incident of ongeval kan nooit uitgesloten worden. Wie het tegendeel beweert, doet zichzelf geweld aan. Maar een veiligheidscultuur zorgt ervoor dat de gevolgen ervan zoveel mogelijk beperkt worden. Iedere menselijke activiteit brengt risico's mee, maar daarom kunnen wij niet laten van leven.

Een radicale en exclusieve tegenstelling creëren tussen kernenergie en het respect voor de mens en het milieu is verkeerd. Alle technologieën gebruikt voor de productie van elektriciteit, ongeacht de energiebron, hebben zowel voor- als nadelen en houden bepaalde risico's in. Het volstaat ze te vergelijken. Kernenergie doorstaat de vergelijking op een uitstekende manier. Is het gerechtvaardigd deze energiebron op te geven ten voordele van andere die bijdragen tot het broeikaseffect en de atmosferische vervuiling?

Nu is het aan de burger om zijn eigen mening te vormen op basis van objectieve informatie. Daartoe heeft de Werkgroep Ethiek en Kernenergie (W. E. K.) van het Bisdom Brugge naar best vermogen een bijdrage willen leveren.

God heeft ons de vrijheid gegeven ons leven te organiseren naar best vermogen. Hij ontheft ons echter niet van onze verantwoordelijkheid voor de Schepping die Hij ons heeft toevertrouwd. Wij moeten de Schepping beheersen zoals een goede huisvader of huismoeder. De opties en de beslissingen die de mens neemt, moeten in harmonie zijn met de goddelijke orde. Zij moeten in de eerste plaats het welzijn nastreven van de gehele mensheid van nu en morgen.

Kernenergie behoort tot de mogelijkheden van de wereld. De mens is verantwoordelijk voor een ethisch verantwoord gebruik ervan. Veiligheid staat hierbij voorop.
Aan ons de keuze met goede kennis van zaken!

| Bijlagen

Bijlage 1 | Gebruikte eenheden en conversiefactoren

■ Joule (J), Watt (W) en Bar

De joule is de eenheid voor arbeid, energie of warmtehoeveelheid. De joule is de arbeid die verricht wordt wanneer het aangrijpingspunt van een kracht van 1 newton (N)¹ zich in de richting van die kracht over een meter verplaatst.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$$

De eenheid van vermogen is de J/sec = 1 watt (W)

Het toevoegen van de energie van 4,186 J zal de temperatuur van een gram water met één °C verhogen.

$$1 \text{ calorie (cal)} = 4,186 \text{ J}$$

De eenheid van druk is de bar = 10^5 N/m^2

■ kWh (kilowattuur)

Dit is de energie die vrijkomt wanneer een vermogen van 1.000 watt gedurende 3.600 seconden werkzaam is. Vermits een joule juist bepaald is als de energie van een watt, toegepast gedurende een seconde, is een kWh gelijk aan $1.000 \times 3.600 \text{ J}$ of 3,6 MJ.

■ Eenheden van radioactiviteit²

□ De Becquerel (Bq)

Vroeger werd de activiteit van een radioactieve bron gemeten in Curie (Ci) zijnde $3,7 \times 10^{10}$ desintegraties per seconde. Dit ongewone cijfer werd als eenheid gekozen omdat het gelijk was aan de radioactiviteit van een gram van één van de meest bestudeerde radio-

1. $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/sec}^2$ = eenheid van kracht.

2. Cf. 2.2.4.1.

isotopen in de beginjaren van het radioactief onderzoek, namelijk ^{226}Ra , dat een halveringstijd van 1.600 jaar heeft. Die arbitraire eenheid is nu vervangen door de meest eenvoudige eenheid, namelijk één desintegratie per seconde; de eenheid is de Becquerel met

$$1 \text{ Bq} = 1 / 3,7 \times 10^{10} \text{ Ci} \approx 27 \times 10^{-12} \text{ Ci} \approx 27 \text{ pCi}$$

□ Geabsorbeerde dosis: de Gray (Gy)

Toen men in de stralingscontrole de eenheden moest vastleggen, gold nog het cgs-stelsel (centimeter, gram, seconde). Hierin was de eenheid van geabsorbeerde dosis nog de rad, gelijk aan een geabsorbeerde energie van 100 erg per gram bestraald materiaal. In het SI-systeem, waar men met joule ($= 10^7$ erg) en met kilogram ($= 10^3$) werkt, leidt dit tot

$$1 \text{ rad} = 100 \times 10^{-7} \text{ J} / 10^{-3} \text{ kg} = 0,01 \text{ J/kg}$$

Om een eenheid te bekomen, die zonder conversiefactoren uit de grondeenheden afgeleid kan worden, heeft men de Gray zo bepaald dat

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} (= 100 \text{ rad})$$

Zo bekomt men ook:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

□ Dosisequivalent: de Sievert (Sv)

Om de biologische uitwerking van de onderling verschillende ioniserende stralingen te kunnen vergelijken, hebben de deskundigen het begrip equivalente dosis ingevoerd. Zij is gelijk aan het product van de geabsorbeerde dosis met een wegingsfactor. De oude eenheid van dosisequivalent, de rem, is nu vervangen door de Sievert met:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Omgekeerd geldt dan:

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$$

■ toe (ton olie-equivalent)

Dit is een gewicht aan brandstof met een totale warmte-inhoud van 41,86 GJ. Dit komt overeen met 1 ton aardolie. Er werd internationaal afgesproken om als conversiefactor 42 GJ te gebruiken. De eenheid *toe* laat ons toe de energiebronnen onderling met elkaar te vergelijken.

■ Conversiefactoren

In onze studie worden alle energiebronnen uitgedrukt in *toe*. De gebruikte conversiefactoren zijn (bron: BP):

$$1 \text{ toe} = 1,5 \text{ ton kolen}$$

$$1 \text{ toe} = 3,0 \text{ ton ligniet}$$

$$1 \text{ toe} = 1.111 \text{ m}^3 \text{ aardgas}$$

1 toe = 0,0001 tU uranium (open cyclus – reactoren van het LWR-type)³

1 TWh (primaire energie) = 0,22335 Mtoe

■ Veelvouden van eenheden

ppmv = parts per million in volume (= één op één miljoen)

ppbv = parts per billion in volume (= één op één miljard)

piko	p	=	10^{-12}	=	0,000.000.000.001
nano	n	=	10^{-9}	=	0,000.000.001
micro	μ	=	10^{-6}	=	0,000.001
milli	m	=	10^{-3}	=	0,001
kilo	k	=	10^3	=	1.000
mega	M	=	10^6	=	1.000.000
giga	G	=	10^9	=	1.000.000.000
tera	T	=	10^{12}	=	1.000.000.000.000

3. Cf. 2.1.3.

Bijlage 2 | Geografische definities

Noord-Amerika: Verenigde Staten (zonder Puerto Rico) en Canada.

Latijns-Amerika: Mexico, Centraal- en Zuid-Amerika en de Caraïben (met Puerto Rico).

West-Europa: Europese leden van de OESO, Cyprus, Gibraltar en Malta.

Centraal-Europa: Albanië, Bulgarije, Tsjechië, Slowakije, Hongarije, Polen, Roemenië, Joegoslavië en de voormalige Joegoslavische republieken.

Europa: West- en Centraal-Europa.

Ex-Sovjet-Unie: Azerbeidzjan, Kazachstan, Russische federatie (GOS – Gemenebest van Onafhankelijke Staten), Turkmenistan, Oekraïne, Oezbekistan en de andere voormalige sovjetrepublieken.

Noord-Afrika: gebieden gelegen aan de noordkust van Afrika gaande van Egypte tot de Westelijke Sahara.

West-Afrika: gebieden gelegen aan de westkust van Afrika gaande van Mauritanië tot Angola met inbegrip van de Kaap Verdische Eilanden.

Oost- en Zuid-Afrika: gebieden gelegen aan de oostkust van Afrika gaande van Soedan tot de republiek Zuid-Afrika, met inbegrip van Namibië, Malawi, Zambia, Zimbabwe, Oeganda en Madagascar.

Afrika: Noord-, West-, Oost- en Zuid-Afrika.

Midden-Oosten: Arabisch schiereiland, Iran, Irak, Israël, Libanon, Jordanië en Syrië.

Azië: geheel van Azië met uitzondering van het Midden-Oosten en Turkije.

AustralAzië: Australië en Nieuw-Zeeland.

Europese leden van de OESO (Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling): België, Denemarken, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Groot-Brittannië (met inbegrip van Noord-Ierland), Ierse republiek, IJsland, Italië, Luxemburg, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Portugal, Spanje, Turkije, Zweden en Zwitserland.

Landen van de Europese Gemeenschap: België, Denemarken, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Groot-Brittannië (met inbegrip van Noord-Ierland), Ierland, Italië, Luxemburg, Nederland, Oostenrijk, Portugal en Spanje.

Bijlage 3

Gebruikte afkortingen

AEN	<u>A</u> gence pour l' <u>E</u> nergie <u>N</u> ucléaire
ALARA	<u>A</u> s <u>L</u> ow <u>A</u> s <u>R</u> easonably <u>A</u> chievable
BFE	<u>B</u> eroeps <u>F</u> ederatie van producenten en verdelers van <u>E</u> lektriciteit in België
BNP	<u>B</u> ruto <u>N</u> ationaal <u>P</u> roduct
BP	<u>B</u> ritish <u>P</u> etrol
CNRS	<u>C</u> entre <u>N</u> ational pour la <u>R</u> echerche <u>S</u> cientifique (France)
COGEMA	<u>C</u> OMPagnie <u>G</u> ÉNÉrale des <u>M</u> ATIères nucléaires (France)
DBIS	<u>D</u> ienst voor <u>B</u> escherming tegen <u>I</u> oniserende <u>S</u> tralingen (België)
EBL	<u>E</u> lectra <u>B</u> e <u>L</u>
EC	<u>E</u> uropean <u>C</u> ommunities
GOS	<u>G</u> emenebest van <u>O</u> nafhankelijke <u>S</u> taten
GS	<u>G</u> audium et <u>S</u> pes: Pastorale constitutie over de Kerk in de wereld van deze tijd
HTR	<u>H</u> igh <u>T</u> emperature <u>R</u> eactor
IAEA	<u>I</u> nternational <u>A</u> tomic <u>E</u> nergy <u>A</u> gency
ICRP	<u>I</u> nternational <u>C</u> ommission for <u>R</u> adio <u>P</u> rotection
INES	<u>I</u> nternational <u>N</u> uclear <u>E</u> vent <u>S</u> cale
IPCC	<u>I</u> ntergovernmental <u>P</u> anel on <u>C</u> limate <u>C</u> hange
JEP	<u>J</u> ustitia <u>E</u> t <u>P</u> ax – Franse commissie voor rechtvaardigheid en vrede
KKK	<u>K</u> atechismus van de <u>K</u> atholieke <u>K</u> erk
LWR	<u>L</u> ight <u>W</u> ater <u>R</u> eactor
MOX	<u>M</u> ixed <u>O</u> xide
NIRAS	<u>N</u> ationale <u>I</u> nstelling voor <u>R</u> adioactief <u>A</u> fval en Verrijkte <u>S</u> plijtstoffen (België)
NPT	<u>N</u> on- <u>P</u> roliferation <u>T</u> reaty of nuclear weapons
OCDE	<u>O</u> rganisation de <u>C</u> oopération et de <u>D</u> éveloppement <u>E</u> conomiques (OESO)
OESO	<u>O</u> rganisatie voor <u>E</u> conomische <u>S</u> amenwerking en <u>O</u> ntwikkeling
OPEC	<u>O</u> rganisation of <u>P</u> etrol <u>E</u> xport <u>C</u> ountries
OPEN	<u>O</u> rganisation des <u>P</u> roducteurs d' <u>E</u> nergie <u>N</u> ucléaire
PWR	<u>P</u> ressurised <u>W</u> ater <u>R</u> eactor
RBMK	Russische afkorting voor “vermogenreactor met kokend water”
SAFIR	<u>S</u> afety <u>A</u> ssessment and <u>F</u> easibility <u>I</u> nterim <u>R</u> eport
SCK	<u>S</u> tudie <u>C</u> entrum voor <u>K</u> ernenergie (België)
UI	<u>U</u> ranium <u>I</u> nstitute
UN	<u>U</u> nited <u>N</u> ations
UNPEDE	<u>U</u> Nion <u>I</u> nternationale de <u>P</u> roducteurs <u>E</u> t de <u>D</u> istributeurs d' <u>E</u> nergie électrique
UNO	<u>U</u> nited <u>N</u> ations <u>O</u> rganisation
VN	<u>V</u> erenigde <u>N</u> aties
WEC	<u>W</u> orld <u>E</u> nergy <u>C</u> ouncil
WMO	<u>W</u> orld <u>M</u> eteorological <u>O</u> rganisation

Bijlage 4 | Geraadpleegde bronnen

Het statistisch cijfermateriaal gebruikt in deze studie werd ontleend aan studies uitgevoerd door:

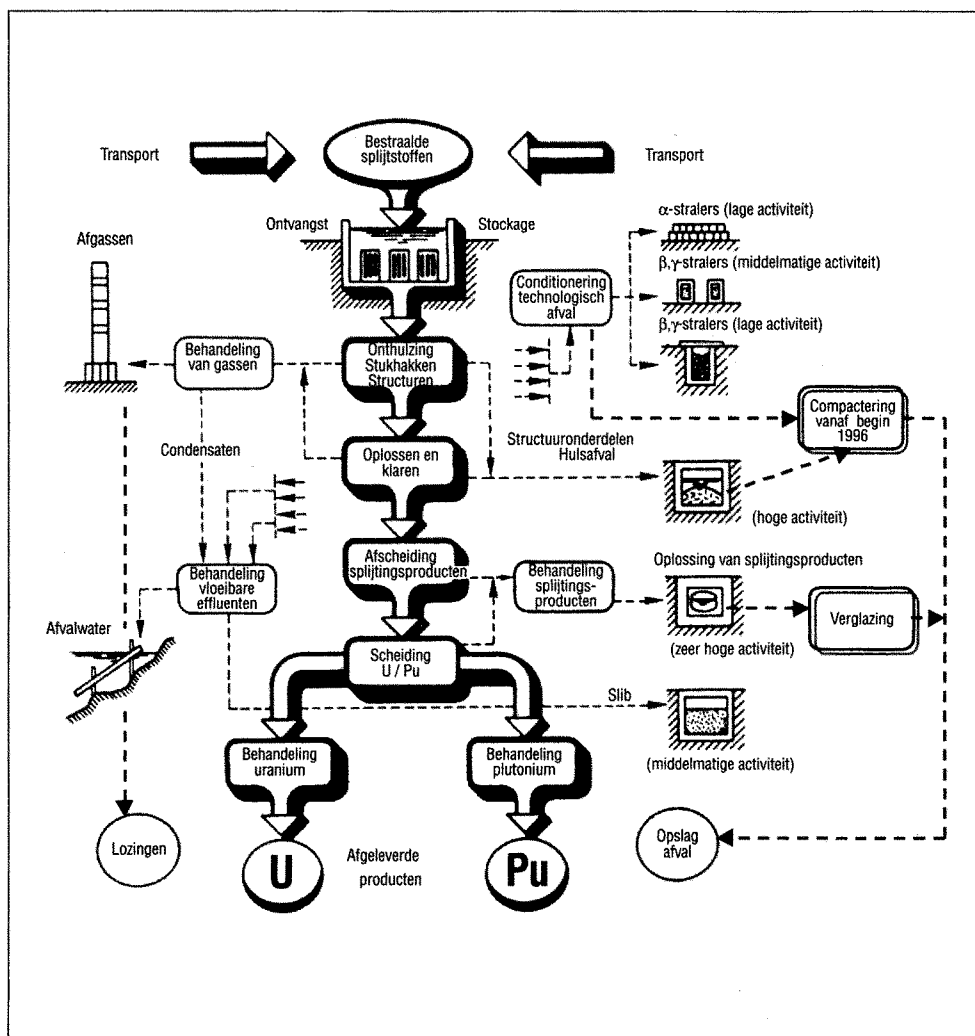
- BP: Statistical Review of World Energy – alle energiebronnen – 1996.
- WEC: Energy for Tomorrow's World – alle energiebronnen – 1996.
- IPCC: Alle energiebronnen.
- OESO: Alle energiebronnen.
- IAEA: Uranium.
- VN en de Wereldbank: Wereldbevolking en BNP.
- EBL: Milieurapport 1995, 1996 en 1997.
- BFE: Statistisch jaarboek 1995, 1996 en 1997.
- UI: The global nuclear Fuel Market: Supply and demand 1995 - 2015 (Edition 1996).
- OPEN / UNPEDE: Survey on Uranium and Enrichment – Requirements and Supplies in Western Europe – 1995.

Literatuur

- Gaudium et Spes – Pastorale constitutie over de Kerk in de wereld van deze tijd. Concilium Vaticanum II: constitutiones, decreta, declarationes, Vaticaanstad 1966.
- Katechismus van de Katholieke Kerk – Ed. 1993. Licap c.v.b.a., Brussel 1995.
- Réflexions éthiques concernant le projet d'un laboratoire d'études sur le stockage souterrain des déchets nucléaires dans le sud de la Vienne. Commission Diocésaine Justice et Paix du Diocèse de Poitiers, Poitiers 1996.
- Pour une éthique de l'énergie nucléaire. Université Catholique de Lyon, Lyon 1990.
- Fondements environnementaux et éthiques de l'évacuation géologique. AEN/OCDE, Paris 1995.
- Sustainable development and nuclear power. IAEA, Vienna 1997.
- The IAEA's safeguards system. IAEA, Vienna 1997.
- Kerncentrale Doel. Electrabel, Brussel 1995.
- Elektriciteit uit Kernenergie. Electrabel, Antwerpen 1990.
- La centrale nucléaire de Tihange. Electrabel, Bruxelles 1992.
- Rationeel energiegebruik – Strategie voor een duurzame ontwikkeling. Electrabel, Brussel 1993.
- MOX in alle klaarheid. Electrabel, Brussel 1993.
- Tsjernobyl, balans en lessen voor de toekomst. Electrabel, Brussel 1990.
- Les techniques du retraitement. Cogema, Paris 1992.
- Retraiter pour recycler. Cogema, Paris 1997.
- Straling en de mens. Commissie van de Europese Gemeenschappen, Luxemburg 1996.
- Environnement, énergie, santé. Société française d'énergie nucléaire, Paris 1991.
- Het beheer van radioactief afval – dossier. NIRAS, Brussel 1996.
- L'énergie nucléaire en 110 questions, Claude Mandil. Le cherche midi éditeur, Paris 1996.

- Lumière d'atomes – Le nucléaire au service de l'homme. Revue Générale Nucléaire, Paris 1994.
- Pourquoi l'énergie nucléaire?, Paul Bonnet. Eyrolles, Paris 1990.
- L'Electronucléaire en France, Syndicat CFDT de l'Energie atomique. Editions du Seuil, Paris 1994.
- Plutonium – Blessing or Curse?, Herman V. Henderickx. The Copper Beech, Brussels 1998.
- Evolutions démographiques – Document du Conseil Pontifical pour la famille. Editions du Cerf, Paris 1994.
- De leefbaarheid op aarde – Global change: met welke toekomst?, R. Weiler & D. Holemans (Red.). Garant, Leuven 1997.

Bijlage 5 | Principe van de opwerking



Figuur 72. | Principeschema van de opwerking.

In de opwerkingsfabriek van La Hague (cf. figuur 73) worden de splijtstofelementen gesneden door een hydraulische zaag. De splijtstofbundel wordt systematisch vooruitgeschoven, geplet door een stootbalk en in fragmenten van 2,5 tot 3,5 cm lang gezaagd. De hulzen vallen in een mand, die in een oplosster met salpeterzuur wordt geplaatst.

De oplossing wordt overgebracht naar een extractiecircuit waar de splijtingsproducten worden gescheiden van het uranium en plutonium. De splijtingsproducten vormen het vloeibaar hoogactief afval dat 98% van de radioactiviteit van de gebruikte splijtstoffen bevat.

Het uranium en plutonium worden gezuiverd. Het uranium wordt opgeslagen onder de vorm van uranyl-nitraat (UNH) en het plutonium onder de vorm van PuO_2 .

Het vloeibaar hoogactief afval wordt eerst opgeslagen in een dubbelwandige ketel, om later verglaasd te worden.

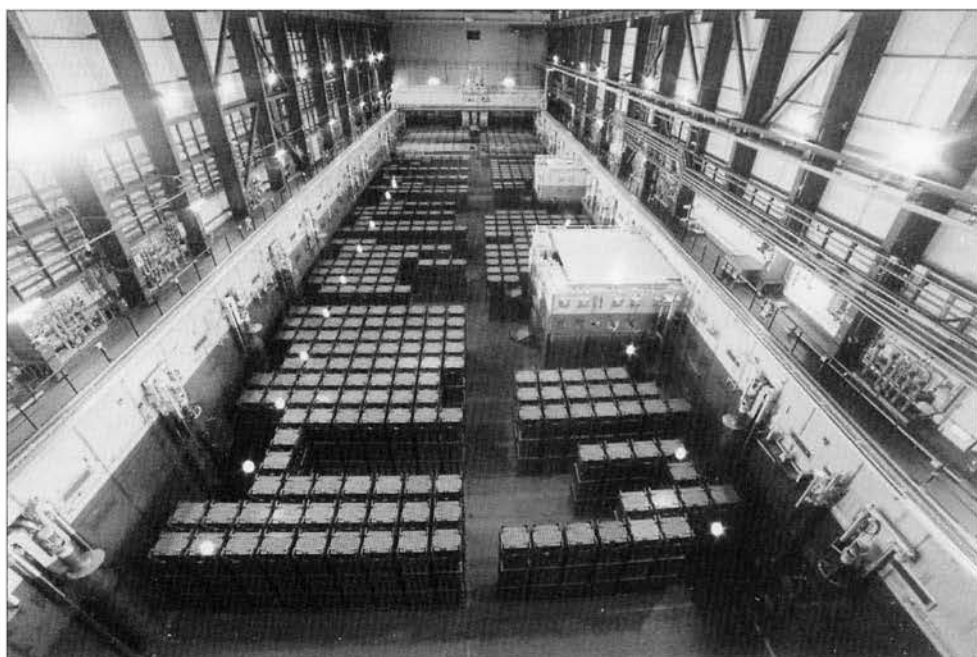
Het vast afval (structuuronderdelen, hulzen) werd tot eind 1995 geconditioneerd door inbedding in speciaal cement. Dit soort afval is veel minder radioactief dan het verglaasd afval.

Vanaf begin 1996 wordt het vast afval voorlopig onder water in betonnen containers opgeslagen, om later gecompacteerd te worden in een compacteerinstallatie, die in aanbouw is. Het in bedrijf stellen van de compacteerinstallatie is voorzien in de loop van het jaar 2000.

Tijdens de opwerkingsoperaties wordt ook ander afval (vloeibaar of vast afval van lage of matige activiteit) afgezonderd. Dit afval wordt in beton of bitumen ingebed. In de toekomst zal ook dit afval gecompacteerd worden.



Figuur 73. | Opwerkingsfabriek van Cogema te La Hague – luchtfoto.



Figuur 74. | La Hague – opslag bestraalde splijtstofelementen.

Bijlage 6

Technische gegevens van een reactor

De kern van een PWR van 900-1.000 MW bestaat uit 157 splijtstofelementen die elk, volgens het type van centrale, 430 à 540 kg verrijkt uranium bevatten. De technische gegevens van de reactor Doel 4 worden weergegeven in tabel 21.

De elementen verblijven ongeveer vier jaar in de reactor. Tijdens deze periode loopt de aanvankelijke verrijking in U-235, ongeveer 3,8%, terug naar 0,8% of iets minder. Ieder jaar worden er ongeveer veertig verbruikte elementen ontladen en vervangen door nieuwe.

Tabel 21. Technische gegevens Doel 4.

Reactortype	PWR
Elektrisch vermogen (bruto)	1.056 MW
Elektrisch vermogen (netto)	1.001 MW
Thermisch vermogen	2.988 MWth
Rendement (netto)	33,5%
Primair gedeelte	
Primaire koelwaterdruk	155 bar
Koelwatertemperatuur in	289°C
Koelwatertemperatuur uit	327°C
Reactorkern	
Aantal splijtstofelementen	157
Aantal stiften per element	264
Actieve splijtstoflengte	4.267 mm
Buitendiameter stiften	9,5 mm
Gewicht splijtstofelement	780 kg
Verrijking bij herlading	3,85%
Reactorkuip	
Binnendiameter	3.900 mm
Minimumwanddikte cilindervormig gedeelte	200 mm
Totale inwendige hoogte (met deksel)	13.500 mm
Totaal gewicht	334 t
Regelstaven	
Aantal absorberende staven	52
Koeltoren	
Hoogte	176,28 m
Basisdiameter	132,88 m

De periode tussen twee onderbrekingen voor ontlading en herlading van splijtstofelementen wordt aangeduid door de term '*irradiatiecyclus*'. Na elke irradiatiecyclus, de tijd van verblijf in de reactor, wordt een kwart tot een derde van de splijtstofelementen definitief ontladen en vervangen door een gelijk aantal nieuwe elementen.

Na iedere irradiatiecyclus neemt de verrijking in U-235 af. De verarming van de splijtstof komt overeen met wat men de '*versplijtingsgraad*' noemt. Men kan hier ook spreken van de uitputtingsgraad van de splijtstof.

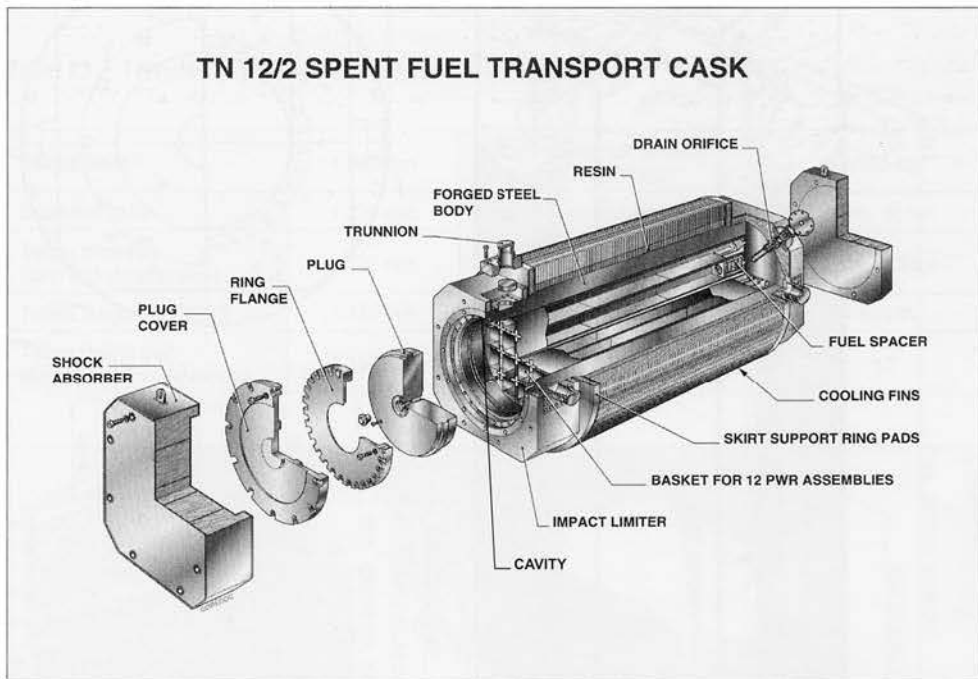
De versplijtingsgraad wordt uitgedrukt in megawatt-dagen per ton uranium (MWd/tU). Dit komt overeen met de hoeveelheid thermische energie die per gegeven hoeveelheid splijtstof tijdens het verblijf in de reactor wordt geproduceerd.

Bij de huidige stand van de techniek bereiken de splijtstoffen een versplijtingsgraad van 45.000 – 50.000 MWd/tU. Anders gezegd: 1 ton splijtstof produceert een thermische energie van bijvoorbeeld $45.000.000 \times 24$ kWh. Rekening houdend met het rendement van een kerncentrale (ongeveer 34%) wordt uit deze ton splijtstof $45.000.000 \times 24 \times 0,34 = 370$ miljoen kWh geproduceerd.

Bijlage 7

Technische gegevens van een TN12/2-transportverpakking voor bestraalde splijtstof

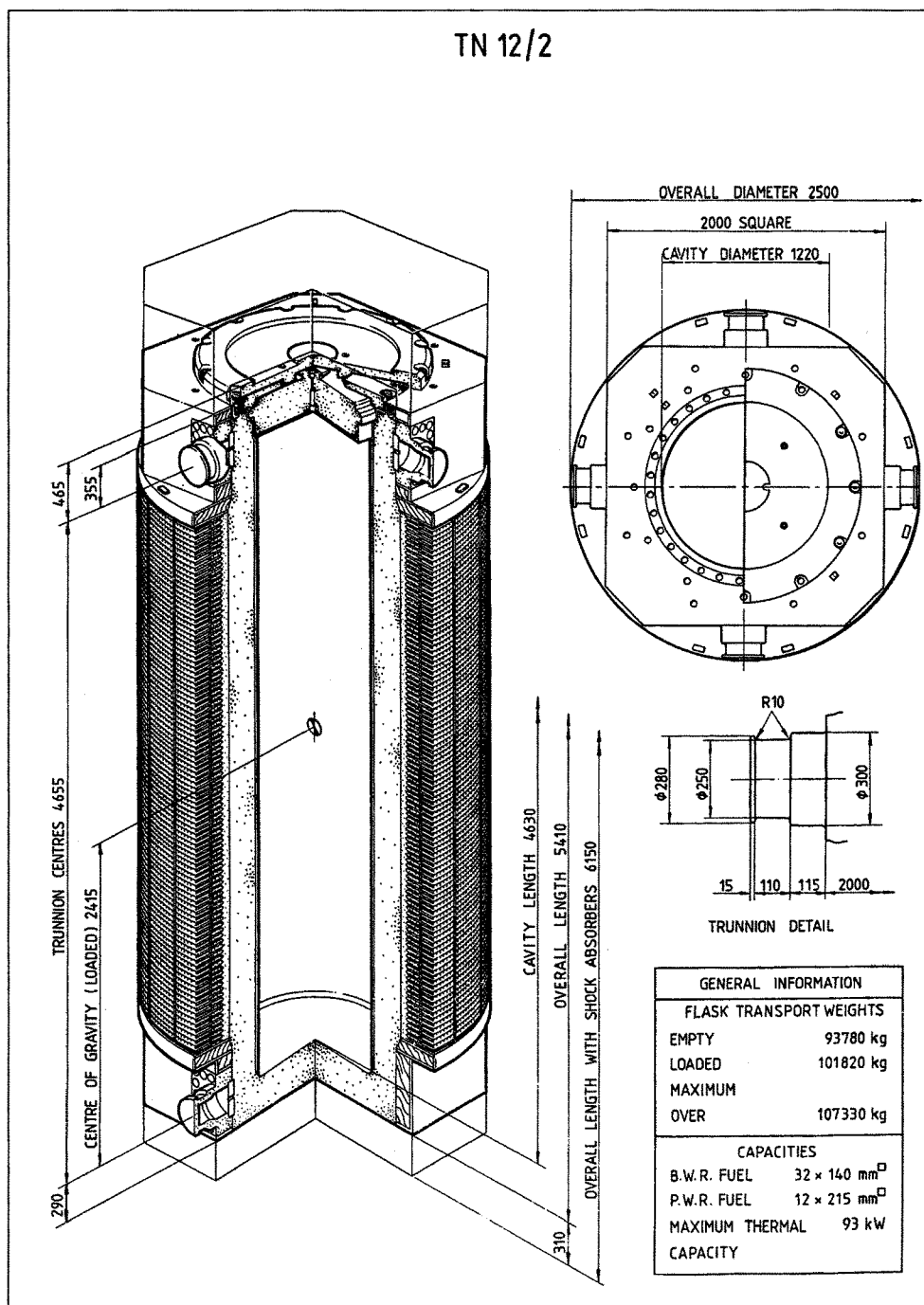
In figuren 75 en 76 wordt een gedetailleerd schema weergegeven van de transportverpakking TN12/2 voor bestraalde splijtstofelementen.



Figuur 75. | Model van de TN12/2-verpakking.

De nomenclatuur van de delen van de TN12/2-transportverpakking wordt samengevat in tabel 22 en de technische kenmerken worden weergegeven in tabel 23.

TN 12/2



Figuur 76. | Schema van de TN12/2-verpakking.

Tabel 22. | Nomenclatuur van de delen van een transportverpakking.

Trunnion	Hef-steunbout	Shock absorber	Stootabsorberende kap
Cooling fins	Koelribben	Plug	Plug
Cavity	Holte	Basket	Splijststofkorf
Ring flange	Ringvormige flens	Impact limiter	Stootbegrenzer
Plug cover	Afsluitingsstop	Skirt support ring pads	Stootopvangringen
Forged steel body	Lichaam in smeedstaal	Fuel spacer	Splijststofstut
Resin	Hars	Drain orifice	Afvoeropening

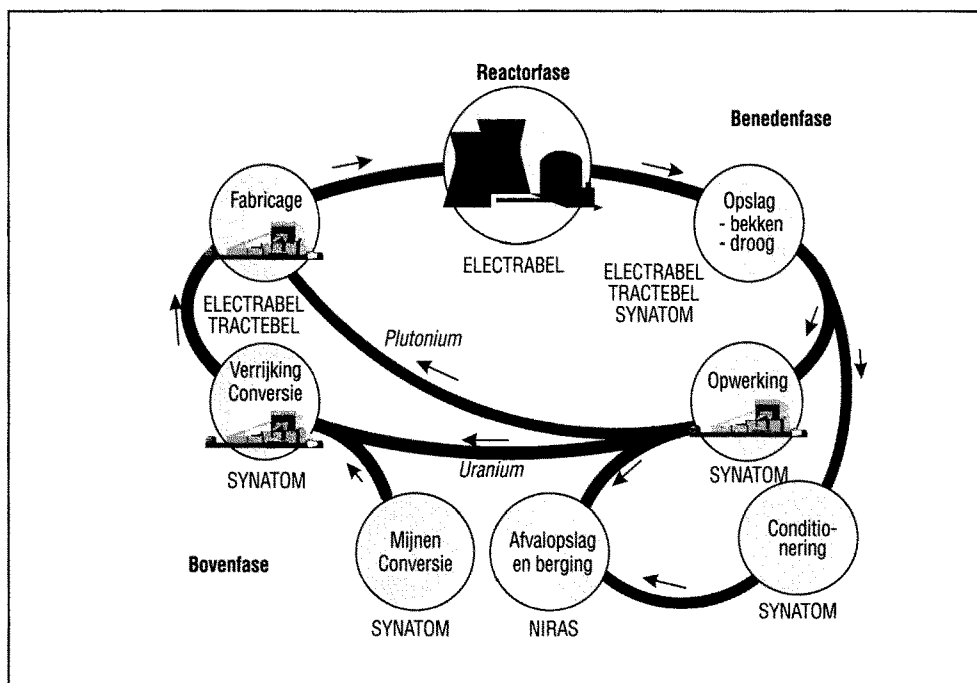
Tabel 23. | Technische gegevens van een TN12/2-verpakking.

Lengte holte	4.630 mm	Afstand tussen het middelpunt van de hef-steunbouten	4.655 mm
Diameter holte	1.220 mm	Gewicht lege verpakking	Max. 98 ton
Totale diameter (over hef-steunbouten)	2.500 mm	Gewicht geladen verpakking	Max. 112 ton
Totale lengte	5.410 mm	Maximale thermische capaciteit	93 kW
Totale lengte met stootabsorberende kappen	6.150 mm	Aantal PWR bestraalde splijststofelementen	12

**Figuur 77.** | Transport van een collo TN12/2.

Bijlage 8

De intervenanten in de splijtstofcyclus



Figuur 78. De splijtstofcyclus: intervenanten en verantwoordelijkheidsverdeling.

In België zijn de verantwoordelijkheden op het gebied van de splijtstofcyclus verdeeld tussen Synatom (Belgische Maatschappij voor Kernbrandstoffen), de eigenaar en exploitant van de kerncentrales Electrabel en de openbare instelling NIRAS (Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen) (cf. figuur 78).

❑ Synatom

Synatom is een dochteronderneming van Electrabel. De staat bezit een 'bijzonder aandeel' (Golden Share), dat haar de mogelijkheid biedt om twee vertegenwoordigers in de Raad van Bestuur van Synatom te benoemen. Deze hebben een vetorecht aangaande beslissingen die in strijd zouden zijn met de energiepolitiek van de regering.

De taken van Synatom bestaan hoofdzakelijk uit:

- de bevoorrading van de Belgische kerncentrales in verrijkt uranium: Synatom staat in voor een betrouwbare en stabiele bevoorrading van verrijkt uranium tegen een zo laag mogelijke kostprijs, dat betekent dat zij moet beschikken over voldoende hoeveelheden.

- den (strategische voorraden), op de juiste plaats en op het juiste moment (diversificatie van de leveringen gedekt door langetermijncontracten);
- het beheer van de gebruikte splijtstof die definitief uit de kerncentrales werd ontladen en het afval. Zij financiert deze operaties tot aan de definitieve overdracht van het geconditioneerd afval aan de publieke instelling NIRAS. Synatom staat in voor de uitbouw van een duurzaam en economisch afvalbeheer.

☐ NIRAS

NIRAS werd door de overheid belast (wet van 8 augustus 1980, vervangen door de wet van 11 januari 1991) met het beheer van al het radioactief afval dat op het Belgisch grondgebied wordt geproduceerd. NIRAS heeft het statuut van een openbare instelling.

NIRAS heeft een dochteronderneming, Belgoprocess, op de site van Dessel. Ze is belast met alle technische operaties die nodig zijn voor de behandeling en de voorlopige opslag van het radioactief afval.

NIRAS heeft onder meer als opdracht om, op korte en op lange termijn, de veiligheid van het beheer van het radioactief afval te waarborgen, en oplossingen voor de definitieve berging te ontwikkelen.

NIRAS is verantwoordelijk voor de overname van het afval van de Belgische splijtstoffen, en meer in het bijzonder voor:

- de goedkeuring van hun specificaties;
- de definitie van de acceptatiecriteria;
- de follow-up van het kwaliteitsverzekeringsprogramma;
- het in ontvangst nemen van de afvalproducten.

☐ Electrabel en Tractebel

De fabricage van splijtstofelementen valt niet onder de bevoegdheid van Synatom. De eigenaar en exploitant van de kerncentrales, Electrabel, stelt de specificaties van de splijtstofelementen op en vertrouwt de fabricage ervan toe aan de eerder vermelde fabrikanten (cf. 3.2.7.3). Het opvolgen van de fabricage wordt uitbesteed aan Tractebel Energy Engineering.

De eigenaar en exploitant van de kerncentrales, Electrabel, beheert het gebruik van de splijtstofelementen in de reactoren. Het volgen van deze operaties is grotendeels uitbesteed aan Tractebel Energy Engineering.

Bijlage 9 | De toxiciteit van plutonium

Plutonium is giftig. Maar het moet dan wel eerst in het leefmilieu vrijkomen en opgenomen worden. De opname door het organisme, vooral in de vorm van oxide, is moeilijk. Indien, zoals sommigen beweren, honderd kilo plutonium voldoende is om de mensheid te vernietigen, zouden we allemaal in de jaren zestig gestorven zijn ten gevolge van de vier of vijf ton plutonium die door militaire tests in de atmosfeer werden verspreid.

Net zoals alle zware metalen is plutonium chemisch giftig. Plutonium heeft bovendien een belangrijke radiologische toxiciteit. Vooral dit beïnvloedt de publieke opinie in grote mate.

Plutonium is hoofdzakelijk een alfastraler. Op schaal van een organische cel verliest deze straling haar energie op een zeer kort traject. Haar doordringingsvermogen is gering. Een eenvoudig blad papier houdt haar tegen, maar in het organisme wordt zij schadelijk, want zij kan nabijgelegen cellen vernietigen.

Zolang plutonium aan de oppervlakte van het lichaam blijft, kan het door een eenvoudige wassing verwijderd worden. Men moet echter vermijden dat het in het lichaam binnendringt door inslikken, injectie in het bloed of via de ademhalingswegen.

Wanneer plutonium door opname van voedsel in het spijsverteringskanaal terechtkomt, heeft het weinig effect, want het wordt door de spijsvertering geëlimineerd en diffundeert praktisch niet door de wand van de ingewanden. Volgens de ICRP komt minder dan 0,001% van het langs deze weg ingenomen plutoniumoxide in het organisme terecht.

Injectie in het bloed is gevaarlijker indien het plutonium zich in een oplosbare vorm (metaalvorm) bevindt. Dit is niet het geval voor het in de MOX-splijtstof gebruikte oxide. *Plutoniumoxide is onoplosbaar in water.* Het plutonium verlaat de opwerkingsfabriek in de vorm van een oxide. In het hoogst onwaarschijnlijke geval van een rechtstreekse injectie in het bloed werkt het eventueel opgelost plutonium traag in. Men heeft de tijd om in te grijpen door producten te injecteren die zich met plutonium verbinden. Het samengestelde product wordt gemakkelijk door het lichaam verwijderd.

Opname van plutonium via de ademhalingswegen is het ergste. Buiten de fabrieken waar plutonium wordt verwerkt en waar uiterst strenge veiligheidsmaatregelen worden getroffen, bestaan er maar weinig mogelijkheden om plutonium op die manier in te nemen. Plutoniumoxide bezit hetzelfde soortelijk gewicht als lood. Dit betekent dat indien er plutoniumoxide ontsnapt, het zeer snel neervalt op de grond en zich moeilijk verder verspreidt. Plutoniumoxide is onoplosbaar in water en kan slechts moeizaam in het metabolisme van zeeplanten binnendringen. Onafhankelijke Japanse onderzoeken hebben aangetoond dat, indien er één ton plutonium in de vorm van oxide op een diepte van 500 meter en op een geringe afstand van de kust (40 km) in de oceaan verspreid zou worden, de overdracht via de voeding voor de meest blootgestelde personen kan leiden tot het ontvangen van een relatief kleine stralingsdosis. Deze dosis is twintig keer kleiner dan de limiet vastgesteld door de ICRP voor het publiek en dertig à veertig keer kleiner dan de natuurlijke straling.

De apocalyptische overtuiging die er heerst bij het groot publiek over de vermeende verwoestende kracht van plutonium, wordt ontkracht door de waarnemingen die werden ge-

daan na de verspreiding van plutonium in het leefmilieu ten gevolge van atmosferische kernwapenproeven.

Tot in 1973, toen deze proeven werden verboden, werd er ongeveer 4,2 ton plutonium in de vorm van fijne oxidedeeltjes in de atmosfeer verspreid. Deze hoeveelheid vertegenwoordigt slechts 0,4% van de natuurlijke radioactiviteit die zich in de eerste twee centimeter van de bodem bevindt.

De problemen in verband met het leefmilieu worden regelmatig onder de aandacht van het publiek gebracht in kranten, op radio en televisie. Het publiek ziet een heleboel anekdotische informatie op zich afkomen: alleen het belangrijkste wordt verteld, met weinig woorden en zonder enige context. Onder de milieuproblemen wordt het gebruik van kernenergie en het daaruit resulterend radioactief afval als zeer bedreigend beschouwd.

Dit boek wil een degelijke inhoudelijke bijdrage leveren aan het debat over de energieproblematiek en kernenergie. Het biedt aan politici, leerkrachten, studenten, journalisten en al wie hierover wil reflecteren, de nodige informatie om een klaar inzicht te krijgen in de gevolgen van het gebruik van kernenergie en andere energiebronnen en om met kennis van zaken een objectief standpunt in te nemen tijdens toekomstige debatten.

De redactie van dit boek werd verzorgd door CHRISTIAN HOENRAET, bijgestaan door de leden van de Werkgroep Ethiek en Kernenergie van het Bisdom Brugge. Hij is kernfysicus, voorzitter van de werkgroep, en al dertig jaar werkzaam in de nucleaire sector. Vandaag is hij vooral actief op het gebied van de opwerking van bestraalde splijtstoffen en de conditionering van radioactief afval.

