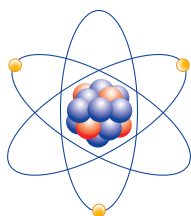
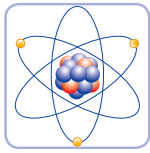


Kernenergie

beter begrijpen

Oktober 2012



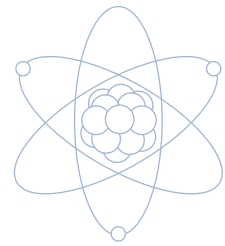


Kernenergie

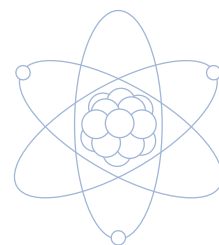
beter begrijpen

VOORWOORD

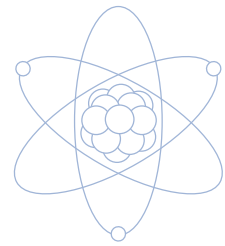
INLEIDING	6
BEELDVORMING ROND KERNENERGIE	6
VOOR WIE IS DIT DOCUMENT BESTEMD?	7
RADIOACTIVITEIT	8
OORSPRONG VAN RADIOACTIVITEIT	8
HET VERSCHIJNSEL RADIOACTIVITEIT	8
De halveringstijd	10
Ioniserende stralingen	11
Meeteenheden: becquerel, gray en sievert	12
STRALINGSBRONNEN	12
Natuurlijke stralingsbronnen	12
Kunstmatige stralingsbronnen	14
BIOLOGISCHE EFFECTEN EN GEZONDHEIDSEFFECTEN	15
Equivalente dosis	15
Dosisdebiet	15
Bestraling en besmetting	15
Deterministische en stochastische stralingseffecten	16
Somatische en genetische effecten	17
BLOOTSTELLING AAN IONISERENDE STRALING	17
Normen en principes van stralingsbescherming	17
Blootstelling van werknemers	18
Blootstelling van de bevolking	19
TOEPASSINGEN IN DE GENEESKUNDE	20
NUCLEAIRE GENEESKUNDE: DIAGNOSTIEK	23
In vivo	23
In vitro	26
RADIOTHERAPIE	26
Externe of uitwendige bestralingstherapie (deeltjesversnellers)	26
Bestralingstherapie door in vivo-inplanting van gesloten bronnen (curietherapie of brachytherapie)	27
Bestralingstherapie via in vivo-toediening van open bronnen (metabolische radiotherapie)	28
TOEPASSINGEN IN ANDERE SECTOREN	30
RADIOSTERILISATIE IN VERSCHILLENDE SECTOREN	30
Huishoudelijke toepassingen	30
Aardwetenschappen	30
Industriële toepassingen	31
DE PRODUCTIE VAN ELEKTRICITEIT	34
VAN SPLIJTINGSENERGIE EN KETTINGREACTIES...	34



... NAAR DE PRODUCTIE VAN ELEKTRICITEIT	35
PWR: HET BELANGRIJKSTE REACTORTYPE	36
DE GESCHIEDENIS VAN DE BELGISCHE KERNENERGIE	37
DE ROL VAN DE KERNENERGIE IN BELGIË	41
De energiebevoorrading	41
Fossiele brandstoffen besparen	42
Leefmilieu	44
Economisch	45
TOEKOMST	46
Op middellange termijn: de Generatie 2015	46
Op langere termijn: de "multifunctionele" Generatie 2035	47
Op zeer lange termijn: gecontroleerde thermonucleaire fusie?	48
DE ONTMANTELING VAN KERNCENTRALES	50
BESCHRIJVING VAN DE SPLIJTSTOFCYCLUS	52
DE BOVENFASE VAN DE SPLIJTSTOFCYCLUS	54
SPLIJTING IN DE REACTOR	56
DE BENEDENFASE VAN DE SPLIJTSTOFCYCLUS	57
Tijdelijke opslag van de splijtstofelementen	57
Gesloten cyclus: recyclage	58
Open cyclus: de directe berging	60
VEILIGHEID	62
BASISPRINCIPES VAN NUCLEAIRE VEILIGHEID	62
Bescherming in de diepte	62
Meerdere barrières	62
Beheersing van veiligheidsfuncties	63
Veiligheidsanalyse	64
REGLEMENTERING EN ACTOREN	65
Op het niveau van de exploitant	65
Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) en de erkende organismen	65
Op internationaal niveau	66
VEILIGHEID IN DE BELGISCHE KERNCENTRALES	68
NOODPLAN	68
Wettelijk kader	68
Situaties die een noodinterventie vereisen	69
Gezondheidsredenen die na een ongeval een beschermende actie rechtvaardigen	70
Interventieprincipes	70
DE INES-SCHAAL	71
NON-PROLIFERATIEVERDRAG	72



NUCLEAIRE ONGEVALLEN	72
De grootste nucleaire ongevallen	72
Burgerlijke aansprakelijkheid en verzekering van kerncentrales	74
KERNENERGIE EN HET MILIEU	76
ZEER LAGE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN	76
LOZINGEN	78
MILIEUBEWAKING	79
Radiologische meldingsnetwerken	79
Controle van de radioactiviteitsniveaus op het grondgebied	80
Radio-ecologische opvolging	80
Conclusies	80
KERNAFVAL	81
NIRAS beheert, de producenten betalen	81
Drie categorieën	82
Verantwoord beheer van kernafval	82
Het totale volume van kernafval	86
En transmutatie?	87
CONCLUSIE: KERNENERGIE, EEN MOTOR VOOR VOORUITGANG	88
BIJLAGEN	90
VERKLARENDE WOORDENLIJST	90
MARKANTE GEBEURTENISSEN IN DE ATOOMGESCHIEDENIS	92
LIJST MET NUTTIGE ADRESSEN	94



Dit document ontstond vanuit de vaststelling dat er een gebrek is aan duidelijke en overzichtelijke informatie over kernenergie. Het wil de lezer dan ook helpen om inzicht te krijgen in een onderwerp dat ieder van ons aanbelangt, al zijn we er ons vaak niet bewust van, en waarover moeilijk kan worden gepraat zonder een zekere basiskennis.

Het begrip 'kernenergie' doet ons in de eerste plaats denken aan de tak van de wetenschap die zich bezighoudt met het bestuderen van atoomkernen, elementaire deeltjes en de daarmee samenhangende straling. Daarnaast omvat het echter ook de vele technieken en toepassingen die dankzij deze wetenschap werden ontwikkeld in tal van domeinen, zowel op het vlak van energie, industrie, geneeskunde als milieubehoud.

Wie het thema kernenergie aansnijdt, raakt ook een emotioneel gevoelig onderwerp, hoofdzakelijk door de gebeurtenissen tijdens de Tweede Wereldoorlog en door het ongeval in Tsjernobyl. Maar kernenergie is ook een symbool van de wetenschap, een domein waarin op zeer korte tijd enorme vooruitgang werd geboekt, wat soms een beetje afschrikt. Tot slot mogen we ook de complexiteit en het technische karakter van kernenergie niet uit de weg gaan, ook al beseffen we dat die elementen niet altijd bijdragen tot de aantrekkelijkheid van het onderwerp.

Als auteurs waren we ons van deze factoren bewust. De 'Belgian Nuclear Society' (BNS) is een organisatie die in België alle personen verzamelt die een opleiding hebben genoten die verband houdt met de nucleaire wetenschap en die dan ook bijzonder geïnteresseerd zijn in alle ontwikkelingen binnen dit domein. We volgen van dichtbij de toepassingen van kernenergie voor niet-militaire en maatschappelijk nuttige doeleinden en we willen de ontwikkelingen in dit domein kenbaar maken aan een ruimer publiek. We beschouwen zowel het bestuderen van de technische en sociologische aspecten van kernenergie als het verstrekken van objectieve informatie aan de betrokken overheden, en ruimer ook aan de bevolking, als twee prioritaire opdrachten. We hopen dan ook dat dit document dienst zal doen al een informatief basiswerk, dat of als een geheel, of per deelonderwerp kan gelezen worden.

Begin jaren '90 publiceerde de BNS voor het grote publiek al het boek "Un demi-siècle du nucléaire en Belgique", dat begin 2008 werd aangevuld met het boek "Histoire du nucléaire en Belgique, 1990-2005". Kort na het verschijnen van het eerste boek werd binnen de BNS op initiatief van Leon Baetslé een werkgroep opgericht die een begin moest maken met het schrijven van een informatief referentiewerk waarin alle kennis van de leden van de BNS, hoofdzakelijk vanuit hun professionele ervaring, zou worden gebundeld. De ambitie was groot, maar de opdracht bleek al vlug een echt titanenwerk. Om die reden werd meer vervolgens een tweede werkgroep opgericht, waarvoor een beroep werd gedaan op competenties van het Belgisch Nucleair Forum. Dat liet toe om complementaire deskundigheid samen te brengen zowel vanuit wetenschappelijk oogpunt (energie, industrie, medisch) als op het vlak van de vereiste vaardigheden (technisch, sociologisch, communicatief). Deze werkgroep bestond uit Frank Deconinck, Henri Bonet, Robert Leclère, Luc Frankignoulle en Antoine Debauche. De groep stelde een document op waarin alle aspecten van civiele kernenergie aan bod komen, en waarin ze vooral reeds bestaande informatie hebben samengevat en bijgewerkt. Het resultaat van die collectieve inspanning ligt nu voor u.

We kunnen ze onmogelijk allemaal vernoemen, maar we willen toch de vele tientallen experts bedanken die rechtstreeks of onrechtstreeks hebben meegewerkt aan de totstandkoming van dit document.

Daarnaast willen we bij voorbaat ook al de lezers bedanken, die door hun eventuele opmerkingen zullen bijdragen aan een volgende, nog betere editie. We beschouwen dit werk immers als "de kern" van een elektronisch referentiedocument dat op een dynamische manier kan evolueren naarmate ook de technologie en kennis evolueert. Als uitgevers engageren wij ons ertoe eventuele fouten te verbeteren en nuttige suggesties via het adres SSB@bnsorg.be te integreren.

In naam van de werkgroep,

Jean Van Vyve

Voorzitter van de BNS



Inleiding

Sinds het begin van de 20e eeuw hebben wetenschappers indrukwekkende ontdekkingen gedaan met betrekking tot radioactiviteit. De grondigere kennis van kernenergie heeft geleid tot een spectaculaire vooruitgang op het vlak van elektriciteitsproductie en de productie van isotopen voor medische en industriële doeleinden. Daarnaast is ook ons inzicht in radioactieve verschijnselen in ons heelal, en de impact ervan op de biosfeer en op de mens, spectaculair toegenomen.

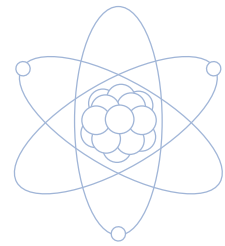
BEELDVORMING ROND KERNENERGIE

Kernenergie wordt door het grote publiek niet noodzakelijk positief gepercipieerd, al is het begrip perceptie uiteraard erg relatief en bijna per definitie voortdurend in evolutie. Het feit dat het onderwerp bijzonder complex is heeft hier onmiskenbaar toe bijgedragen. Anderzijds is het ook zo dat het verstrekken van relevante informatie op zich niet volstaat om tot een andere beeldvorming te komen. Informatie kan immers snel als belerend of agressief worden ervaren als het doelpubliek ze zonder meer voor waar moet aannemen en te horen krijgt dat zijn eventuele angsten of onzekerheden uitsluitend gestoeld zijn op de eigen onwetendheid.

Net zoals voor heel wat andere technieken, houden ook de meeste onzekerheden rond kernenergie vooral verband met de manier waarop de mensen de betrokken risico's inschatten. Er zijn heel wat factoren die een invloed hebben op de manier waarop die risico's worden gepercipieerd. Ten eerste is de perceptie helemaal anders naargelang het gaat om risico's waarvoor men zelf kiest, dan wel om opgelegde risico's. Risico's waarvoor men zelf kiest, bijvoorbeeld de risico's verbonden aan het besturen van een wagen, worden veel gemakkelijker aanvaard dan risico's die men ervaart als opgelegd van hogerhand, zoals het geval is met kernenergie. Ten tweede weegt men de risico's ook altijd af tegen de voordelen. Bij kernenergie zijn die voordelen vaak erg verspreid, en denkt men vaak dat ze ook op andere minder complexe manieren kunnen worden bereikt. De risico's verbonden aan kernenergie lijken daardoor vaak groter en directer dan de voordelen. Naarmate de behoeften en voordelen duidelijk worden toegelicht en naarmate men vertrouwer wordt met nucleaire installaties en het beheer ervan, aanvaardt men

ook beter de risico's. Andere factoren die eveneens een invloed hebben op de risicoperceptie zijn o.a. de mate van controle, vertrouwdheid met de technologie, de graad van onzekerheid of controverse rond een bepaald onderwerp, angst voor de gevolgen, de perceptie van macht en belangen, het vertrouwen in de instellingen en in de overlegpartners en beslissingsprocedures, evenals de ideeën en waarden van de collectieve gemeenschap waarin men leeft.

Het nucleaire thema omvat dus een veel ruimer domein dan enkel de wetenschappelijke realiteit. In veel gevallen gaapt er werkelijk een kloof tussen de perceptie van risico's door onderzoekers en experts enerzijds en door het grote publiek anderzijds. En het is vaak van die kloof dat specifieke belangengroepen dankbaar gebruik maken. Om al die redenen, en omdat energie een thema is dat ons allemaal aanbelangt, is het belangrijk een grondige dialoog te voeren. De overheid heeft hier een cruciale taak in te spelen. Energie raakt aan onze essentiële levensbehoeften en op termijn moet de bevolking dan ook in staat zijn om alle pro's en contra's van de verschillende energievormen te vergelijken, met onder meer oog voor de lasten die we doorgeven aan toekomstige generaties, zoals het langlevend afval, de klimaatverandering en de uitputting van natuurlijke rijkdommen.



Hoe kijken de Belgen aan tegen elektriciteitsproductie door kernenergie?

De belangrijkste en de meest terugkerende trends zijn:

- de meeste mensen hebben weinig interesse voor kernenergie en energie in het algemeen, behalve dan voor die aspecten die direct te maken hebben met het leven van alledag, zoals de prijs of het terugdringen van het energieverbruik
- er zijn twee lagen van de bevolking van respectievelijk zowat 20%, die enerzijds fervente voorvechters zijn van kernenergie en anderzijds fervente tegenstanders. Daartussenin **heeft meer dan 50% van de bevolking niet echt een mening over kernenergie en evolueert hun opinie in functie van de gebeurtenissen** (sinds 2002 in positieve zin voor kernenergie)
- er bestaan grondige misvattingen
 - over een aantal energieaspecten: meer dan de helft van de bevolking denkt dat kernenergie in België kan worden vervangen door hernieuwbare energievormen, meer dan 40% van de bevolking denkt dat een uitstap uit kernenergie zou bijdragen tot het terugdringen van de klimaatopwarming
 - over radioactiviteit: 75% van de bevolking weet niet dat radioactiviteit afneemt in de tijd, meer dan 40% denkt dat radioactiviteit door de opslagcontainers heen sijpelt
 - over radioactief afval: nauwelijks iets meer dan 5% van de bevolking weet dat er verschillende types radioactief afval bestaan, meer dan 70% weet absoluut niet hoe dit afval wordt beheerd

- de meningen met betrekking tot nucleaire veiligheid zijn erg verdeeld: zowat 60% van de mensen denkt dat er een ernstig ongeval kan gebeuren in een westerse kerncentrale, terwijl 40% denkt dat het risico daarop erg klein of onbestaande is; de bevolking denkt dat de kans op een ernstig ongeval ongeveer even groot is in de kernindustrie, de chemische industrie of de transportsector (vijf jaar geleden werd “het nucleaire risico” nog veel hoger ingeschat dan de twee andere)

VOOR WIE IS DIT DOCUMENT BESTEMD?

Dit document wil de lezer op een beknopte manier een breed gamma aan concrete informatie aanreiken over de belangrijkste niet-militaire of vreedzame toepassingen van kernenergie in onze huidige wereld. Geen enkel onderwerp – hoe gevoelig ook – werd hierbij uit de weg gegaan.

Dit document wil in de eerste plaats voldoen aan een behoefte die leeft bij heel wat leerkrachten, studenten, politieke vertegenwoordigers en verenigingen. Het niveau is afgestemd op het eerste jaar hoger onderwijs. In een tijdperk waarin steeds meer maatschappelijke en bedrijfssectoren zich vragen stellen over onze energietoekomst en over de rol die kernenergie daarin al dan niet zal spelen, richt deze publicatie zich tot iedereen die er belang bij heeft of die er gewoon nood aan heeft om de uitdagingen en vooruitzichten die verbonden zijn aan deze energievorm beter te begrijpen.

OPMERKING

Dit document is in de eerste plaats bedoeld als een vulgariserend werk. Dat is meteen ook de reden waarom er een aantal benaderingen/vereenvoudigingen werden gehanteerd.

2

Radioactiviteit

Radioactiviteit, een volkomen natuurlijk verschijnsel, schuilt in de kern van de materie, ligt aan de oorsprong van het heelal en doordringt het sinds zijn ontstaan. Na haar ontdekking op het einde van de 19e eeuw door de Franse geleerde Henri Becquerel is radioactiviteit onophoudelijk bestudeerd, overal ter wereld. Dankzij ultragevoelige opsporingsmethodes behoort dit verschijnsel vandaag dan ook tot het meest nauwkeurig gekende van de wetenschap. Radioactiviteit is dus van nature overal aanwezig in het heelal. Maar vooral dankzij het feit dat de mens het fenomeen wist te doorgronden en dankzij de ontdekking van de kunstmatige radioactiviteit door Irène en Frédéric Joliot-Curie in 1934 konden er allerhande toepassingen worden ontwikkeld in de geneeskunde en de industrie.

OORSPRONG VAN RADIOACTIVITEIT

Aan de hand van de analyse van het kosmische achtergrondgeluid of de kosmische ruis, dat een beeld geeft van de staat van het heelal zowat 380.000 jaar na de big bang, schat men dat ons heelal vandaag zowat $13,7 (\pm 0,2)$ miljard jaar oud is.

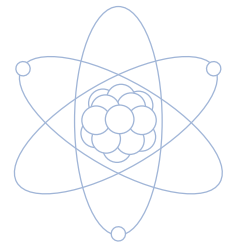
Tijdens het eerste miljoen jaar ontstonden de lichtere kernen en de atomen tot beryllium. De gravitatiekracht geeft aanleiding tot het ontstaan van sterren. De temperatuur stijgt, waardoor er fusiereacties op gang komen en er elementen ontstaan zoals koolstof, zuurstof, silicium of ijzer. Als de ster tamelijk massief is ($> 1,4$ keer de grootte van onze zon) zal ze onder impuls van de zwaartekracht uiteindelijk imploderen, waarbij er zodanig hoge temperaturen worden bereikt dat protonen en elektronen zich hercombineren tot neutronen. Dit gaat vooraf aan een explosie waarbij de ster verandert in een supernova¹. Door het neutronenbombardement van de weggeslingerde materie ontstaan alle elementen uit de tabel van Mendelejev, onder meer uranium, thorium en kalium, die we vandaag in natuurlijke vorm aantreffen op aarde. Ze zijn het "radioactieve afval" van de ontploffing van de supernova waaruit onze planeet ontstond.

De radionucliden (of radioactief isotoop van een element, zie § 2.2.1), of ze nu van natuurlijke of kunstmatige oorsprong zijn, vormen een van de bronnen van natuurlijke blootstelling van de mens. De radionucliden verspreiden zich in gasvormige, vaste of vloeibare toestand in het water, de bodem en de vegetatie op aarde, waardoor ook de mens er rechtstreeks of onrechtstreeks mee in contact komt.

HET VERSCHIJNSEL RADIOACTIVITEIT

Radioactiviteit is de eigenschap die onstabiele isotopen van elementen uit de tabel van Mendelejev bezitten om zich door desintegratie om te vormen tot een ander, stabiel atoom. Die transformatie is het gevolg van een wijziging van de atoomkern, waarbij er corpusculaire stralingen (alfa-, bètadeeltjes enz.) of elektromagnetische stralingen (gammastralen) worden uitgezonden. Het gaat dus om een puur 'nucleair' (verbonden aan de nucleus of kern, los van de elektronen), spontaan, toevallig (zie § 2.4.4) en statistisch verschijnsel. Er bestaan met andere woorden statistische wetten i.v.m. de radioactieve desintegratie rekening houdend met een groot aantal kernen. De (natuurlijke of kunstmatige) radioactieve elementen worden ook wel radio-elementen genoemd².

- 1. Na de transformatie van de materie in neutronen, zorgen deze deeltjes voor een nieuwe situatie die de inkringing van de kern stopt en hem erg ondoordringbaar maakt. Maar de andere lagen van de ster blijven verder instorten. Ze bereiken de buitenkant van de onsamendrukbare kern, botsen ertegen met erg hoge snelheid en worden teruggedraaid. Daardoor ontstaat een enorme schokgolf die zich van de kern weg beweegt en alles op zijn weg meeneemt. Het omhulsel van de ster wordt compleet weggeblazen. De materie wordt in de interstellaire ruimte geslingerd tegen snelheden van duizenden kilometer per seconde. Door de enorme hoeveelheid energie die vrijkomt, gaat de ster zo fel stralen als wel 200 zonnen, soms zelfs als een heel melkwegstelsel. Dit is wat men een supernova noemt*
- 2. Slechts een klein aantal radioactieve elementen bestaat in de natuur: het gaat om een paar zware elementen (thorium, uranium, radium, enz.). Er bestaan ook een paar lichte natuurlijke radionucliden (koolstof-14, kalium-40). De andere radionucliden, meer dan 1.500, worden voor medische of andere toepassingen kunstmatig aangemaakt in laboratoria of kernreactoren.*



Protonen, neutronen, elektronen, isotopen

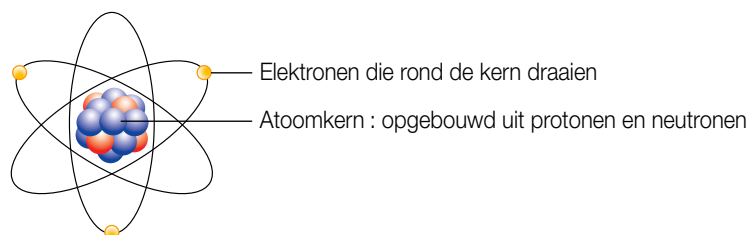
Een chemisch element bestaat uit drie soorten deeltjes: protonen, neutronen en elektronen. Een atoomkern is samengesteld uit protonen en neutronen. De verzamelnaam voor de deeltjes waaruit atoomkernen zijn opgebouwd (protonen en neutronen) is nucleonen. Rondom de kern bewegen de elektronen. De atoomkern met daaromheen de wolk elektronen vormt een atoom. In natuurlijke vorm bestaan er 91 verschillende atomen, die in de tabel van Mendelejev gerangschikt zijn van het lichtste (waterstof – één proton en één elektron) – naar het zwaarste (uranium – 92 protonen en 92 elektronen)³. De elementen die nog zwaarder zijn dan uranium worden transuranen genoemd. Ze bestaan meestal niet in natuurlijke vorm. Protonen zijn positief elektrisch geladen, elektronen hebben een negatieve elektrische lading. Elk atoom heeft evenveel protonen als elektronen en is daardoor elektrisch neutraal. Een atoom wordt gekenmerkt door het aantal protonen (Z) en het aantal neutronen (N) waaruit het is samengesteld. De som van die twee geeft het massagetal (A). Het aantal protonen wordt ook het atoomnummer genoemd. Dit atoomnummer bepaalt de plaats in de tabel van Mendelejev: ${}^A_Z X$ bijv. ${}^4_2 \text{He}$.

Isotopen zijn elementen met hetzelfde atoomnummer, maar met een verschillend aantal neutronen.

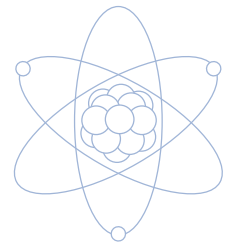
Zo zijn de isotopen van waterstof bijvoorbeeld waterstof (1 proton, 0 neutronen), deuterium (1 proton en 1 neutron) en tritium (1 proton en 2 neutronen). De twee meest courante isotopen van uranium zijn uranium 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$, 92 protonen en 143 neutronen) en uranium 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$, 92 protonen en 146 neutronen). Atomen verbinden zich met elkaar om moleculen te vormen. Zo is een watermolecule (H_2O) samengesteld uit één zuurstofatoom (${}^{16}_8\text{O}$) en twee waterstofatomen (${}^1_1\text{H}$). Deze atoomverbindingen zijn gerelateerd aan de elektronenstructuur en behoren tot het domein van de chemie.

De kernfysica houdt zich bezig met de studie van de atoomkernen.

Schema van een atoomkern



3. Element 43, Technetium, bestaat niet als natuurlijk element.

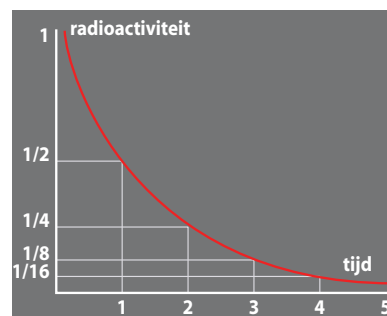


De halveringstijd

De meeste atomen op aarde zijn stabiel. Sommige zijn echter onstabiel en evolueren via het verschijnsel radioactiviteit na verloop van tijd naar een stabiele toestand. Deze **radioactieve atomen vallen spontaan uit elkaar**, zenden daarbij ioniserende stralen uit en **verdwijnen op die manier snel of minder snel**, binnen een periode die voor elk specifiek isotoop kenmerkend is. In dat verband spreekt men van halveringstijd, of de tijd waarin de helft van de oorspronkelijk aanwezige radioactieve atomen verdwijnt.

De halveringstijd kan variëren van enkele fracties van een seconde tot verschillende miljarden jaren. Hoe korter de halveringstijd, hoe instabieler het isotoop, hoe meer desintegratie er zal plaatsvinden en hoe sneller het radio-isotoop zich zal omvormen in een ander isotoop of stabiel zal worden. Hoe langer de halveringstijd, hoe minder radioactief het isotoop zal zijn, want het is dan al bijna stabiel. De afname van de radioactiviteit of het radioactief verval verloopt systematisch over de tijd (halvering tijdens elke periode). Zo zal na 10 periodes de radioactiviteit 1.000 keer lager zijn (1.024 keer of 2¹⁰). In tegenstelling tot chemische substanties, worden radioactieve stoffen na verloop van tijd dus minder schadelijk.

Radioactief verval



- De radioactiviteit van een stof neemt af met de tijd
- Halveringstijd= tijd waarbinnen een stof de helft van haar radioactiviteit verliest
- De halveringstijd verschilt van stof tot stof (van enkele seconden tot miljoenen jaren)

De radioactiviteit neemt af volgens de volgende wet:

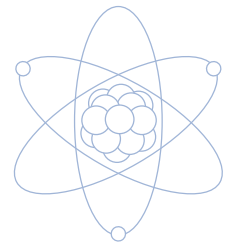
$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{0,6931}{\tau} \cdot t} \text{ waarbij}$$

- A = radioactiviteit over de tijd t
(in Becquerel, zie p.12)
- A_0 = oorspronkelijke radioactiviteit van de bron
- t = tijd (tijdseenheid)

τ = halveringstijd van het radio-isotoop

Halveringstijd van een aantal radio-isotopen (N = natuurlijk; K = kunstmatig)

zuurstof-15 (K)	124 seconden
technetium-99m (K)	6 uur
radon-222 (N)	3,8 dagen
iodium-131 (K)	8 dagen
iridium-192 (K)	74 dagen
kobalt-60 (K)	5,3 jaar
cesium-137 (K)	30 jaar
americium-241 (K)	432 jaar
radium-226 (K)	1600 jaar
koolstof-14 (N en K)	5730 jaar
plutonium-239 (K)	24.100 jaar
uranium-235 (N)	700 miljoen jaar
uranium-238 (N)	4,5 miljard jaar
thorium-232 (N)	14 miljard jaar











Ioniserende stralingen

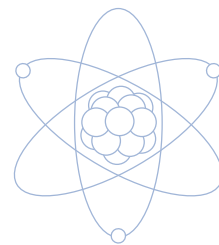
Naast de halveringstijd wordt een radioactief isotoop ook gekenmerkt door de aard van de straling die het uitzendt. De stralingen worden ioniserend genoemd omdat ze voldoende energie bezitten om een elektron vrij te maken uit de elektronenschil van de atomen. Wanneer dat gebeurt, wordt het atoom positief elektrisch geladen en ontstaat een ion. Het geïoniseerde atoom wordt chemisch reactief. Als die chemische reactie plaatsgrijpt in een levende cel, dan kan ze letsels veroorzaken en biologisch schadelijke gevolgen hebben. Die gevolgen zijn afhankelijk van verschillende factoren: het type straling, de intensiteit ervan, de plaats, de duur van de blootstelling enz.

De belangrijkste soorten straling:

- De **alfa**stralen zijn weinig doordringend, positief geladen, maar sterk ioniserend. Ze zijn samengesteld uit heliumkernen (2 protonen en 2 neutronen). Deze zware deeltjes dringen door een paar centimeter lucht, een paar duizendste van een millimeter onder water en worden tegengehouden door een gewoon blad papier.
- De **De bèta⁻**stralen zijn meer doordringend en negatief geladen, ze zijn samengesteld uit elektronen. Ze worden tegengehouden door een vel aluminium van een paar millimeter dikte.
- De **bèta⁺**stralen zijn identiek aan de bèta⁻stralen, maar positief door de aanwezigheid van positronen (positief geladen elektronen, de tegendeeltjes of antimaterie van de e⁻). Ze ontstaan hoofdzakelijk door kosmische straling en dankzij deeltjesversnellers.
- De **gamma**stralen zijn van elektromagnetische aard, ongeladen, maar ze kunnen bijzonder doordringend zijn. Het gaat om fotonen. Ze gaan dwars door variabele diktes lood en beton.
- De **X-stralen** hebben dezelfde aard als gammastralen (elektromagnetisch) en zijn meestal afkomstig uit de elektronenschil van de atomen. Ze gaan door variabele materiaaldiktes heen.
- De **neutronen** zijn ongeladen deeltjes, zwaar en bijzonder doordringend. Ze kunnen makkelijk doordringen tot atoomkernen die hun weg kruisen en hen radioactief maken.

Verschillende soorten straling

Type	Samenstelling/lading	Gestopt door
α	 Heliumkernen ++	 Blad papier Luchtdikte: 3 cm
β^{\pm}	 Elektronen, positronen - +	 Aluminiumplaat: < 1 cm Luchtdikte: 3 m
γ, X	 Niet geladen ioniserende golven	 Ijzer, beton, lood: 1 m Waterlaag: 3 m
n	 Niet geladen	 Beton, water: grote dikte



Meeteenheden: becquerel, gray en sievert

(zie ook bijlage 10)

- De becquerel (Bq) is de eenheid voor het meten van radioactiviteit. Het is de activiteitseenheid die overeenstemt met de desintegratie van één kern per seconde. De activiteit van een stof staat voor het aantal radioactieve atomen dat desintegreert binnen een bepaalde tijdseenheid.
- De gray (Gy) meet de geabsorbeerde stralingsenergie m.a.w. de dosis energie die geabsorbeerd werd door een materie die werd blootgesteld aan straling. Eén gray stemt overeen met een energieabsorptie van 1 joule per kilogram materie.
- De sievert (Sv) meet de equivalente dosis (zie p.15), m.a.w. de biologische effecten van de radioactiviteit. Die effecten zijn afhankelijk van het dosisdebiet en van de aard en de energie van de straling. De equivalente dosis komt overeen met de geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met een coëfficiënt (de kwaliteitsfactor) die rekening houdt met de aard van de straling (zie p.15).

Deze drie eenheden zijn de wettelijke meeteenheden inzake stralingsbescherming.

Er bestaat een beeld dat het verband tussen de verschillende meeteenheden duidelijk maakt:

- De becquerels? Dat zijn de steentjes die door een kind in de lucht worden gegooid.
- De grays? Dat zijn de steentjes die zijn vriendje dat naast hem staat in het gezicht krijgt.
- De sieverts? Dat zijn de ernstige of minder ernstige verwondingen die eruit voortvloeien.

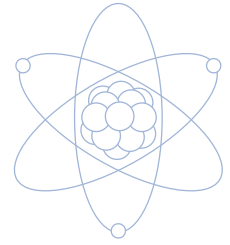
STRALINGSBRONNEN

Natuurlijke stralingsbronnen

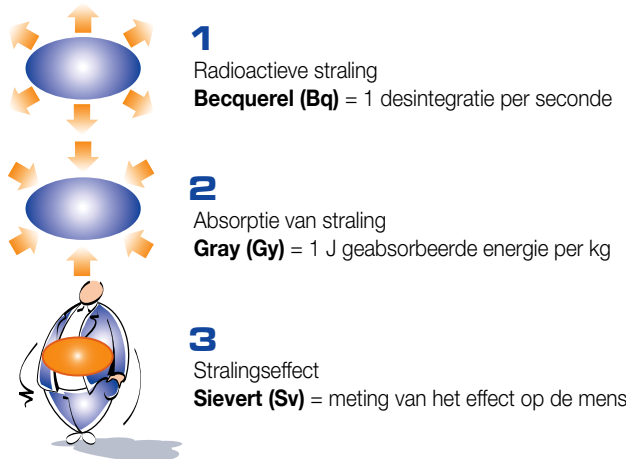
Natuurlijke radioactiviteit heeft een dubbele oorsprong: ze kan kosmisch of aards zijn.

Kosmische straling is erg energierijke straling die afkomstig is uit de ruimte: al miljarden jaren bombardeert zij onophoudelijk onze planeet. Gemiddeld dringen zo'n twee deeltjes per seconde door het blad heen dat u nu aan het lezen bent. Deze stralen kunnen elektrische wijzigingen veroorzaken in alles wat ze doorkruisen en zijn dus een vorm van ioniserende straling. Een groot deel van deze straling wordt geabsorbeerd door de kosmos, waardoor de kosmische straling sterker is op grotere hoogte. Op zeespiegelniveau bedraagt ze zo'n 0,3 millisievert (mSv) per jaar per individu; op 12.000 meter bereikt ze gemiddeld zowat 40 millisievert per jaar. De equivalente dosis (ook wel het dosisequivalent) tijdens een trans-Atlantische vlucht bedraagt zo'n 0,05 millisievert (of vijf keer zoveel als het jaarlijkse dosisequivalent in de buurt van een kerncentrale). Personeel van luchtvaartmaatschappijen of mensen die heel vaak reizen, worden blootgesteld aan doses die meer dan 1 mSv/jaar kunnen bedragen. Men schat dat de gemiddelde dosis op jaarbasis tussen de 1 à 2 mSv ligt voor personeel dat continentale vluchten uitvoert, tussen de 3 à 5 mSv voor intercontinentale vluchten en tot 10 mSv voor personeel dat bijvoorbeeld vluchten uitvoert voor koeriersbedrijven.

De bodem is de andere natuurlijke bron van radioactieve straling. Deze straling is afhankelijk van de bodemgesteldheid, en de equivalente doses op jaarbasis kunnen dan ook sterk variëren van streek tot streek. De hoogste doses worden geregistreerd in regio's waar de bodem rijk is aan graniet, uranium en thorium. Dat is bijvoorbeeld het geval in Bretagne, het Centraal Massief en de Ardennen, waar men de hoogste radonconcentraties meet. Zoet water bevat gemiddeld 0,37 Bq/l, terwijl zeewater goed is voor 13 Bq/l. Sommige mineraalwaters hebben een hogere radioactiviteit.



Een deel van de radioactiviteit moeten we ook bij onszelf zoeken: **de mens is van nature radioactief**. In ons organisme schuilt ongeveer 4.500 Bq aan kalium-40, 3.700 Bq aan koolstof-14 en 13 Bq aan radium-226.

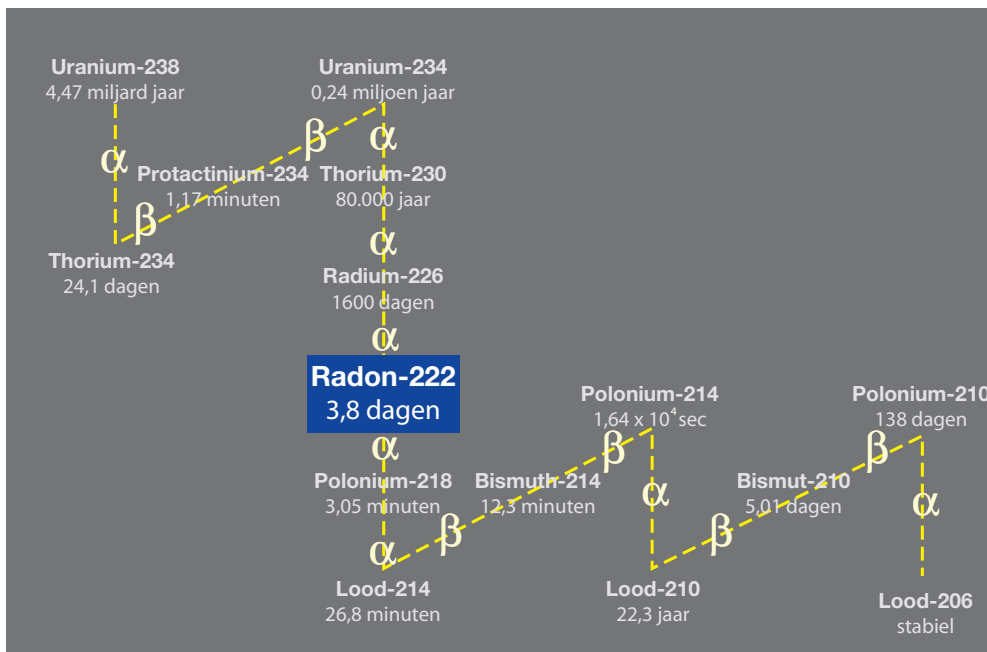


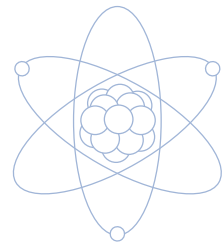
Radon

Radon is een radioactief gas dat kleurloos, geurloos en smaakloos is. Het is afkomstig van de desintegratie van uranium, radium en thorium aanwezig in de natuur. Het is maar gevaarlijk vanaf een bepaalde concentratie en in bepaalde omstandigheden.

Het belangrijkste isotoop, radon-222, is afkomstig van het radioactief verval van radium-226. Het heeft een halveringstijd van 3,82 dagen en valt uiteen in meerdere vaste elementen die alfastralen uitzenden: polonium-218, polonium-214, bismut-214 en lood-214. Dit zijn natuurlijke radioactieve elementen die men in variabele hoeveelheden aantreft in de aardkorst. Ze hechten zich vast aan stofdeeltjes die vervolgens ingeademd kunnen worden door de mens. Op die manier nestelen ze zich in de longen, waar ze de weefsels bestralen en op termijn kanker kunnen veroorzaken.

Het geval radon





Kunstmatige stralingsbronnen

Door een vel aluminium te bombarderen met alfadeeltjes afkomstig van een radioactieve poloniumbron, bewaarden Irène en Frédéric Joliot-Curie begin 1934 radioactief fosfor: fosfor-30. Dit fosforisotoop komt niet voor in de natuur en is dus het eerste kunstmatige isotoop dat ooit werd geproduceerd in een laboratorium. Sindsdien zijn er verschillende honderden isotopen geproduceerd waarvan slechts een dertigtal voor wetenschappelijke en industriële doeleinden bruikbaar is (de meeste andere zijn te instabiel).

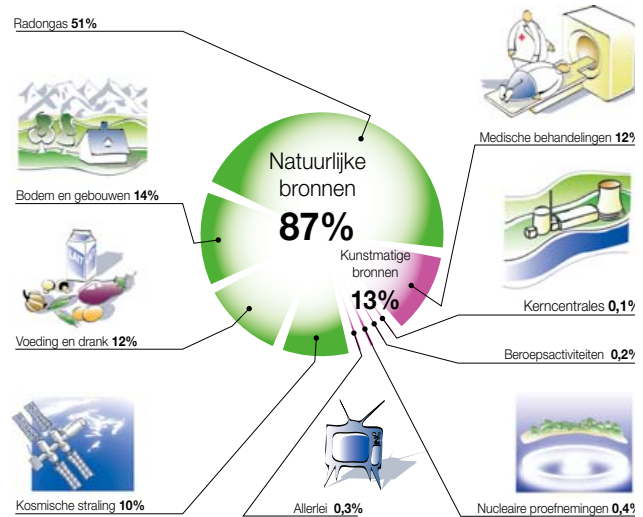
De activiteitsdomeinen waarbinnen de mens geconfronteerd wordt met het risico op blootstelling aan ioniserende straling kunnen als volgt worden onderverdeeld:

- nucleaire installaties zoals kerncentrales, deeltjesversnellers, de aanmaak of verwerking van radioactieve stoffen enz.;
- het transport van radioactieve stoffen;
- ioniserende straling: of ze nu afkomstig is van radionucliden of opgewekt werd door elektrische apparaten (X-stralen), ze wordt gebruikt in vele domeinen zoals de geneeskunde, de menselijke biologie, de onderzoekswereld, de industrie, maar bijvoorbeeld ook voor toepassingen in de dierengeneeskunde, de medisch-juridische wereld, of zelfs voor de bewaring van voedingsproducten;
- radioactief afval en daaraan gerelateerde opslag- en verwerkingssites;
- activiteiten waarbij materialen worden gebruikt (grondstoffen, bouwmaterialen, industriële restproducten) die natuurlijke radionucliden bevatten, maar die niet om die eigenschap worden aangewend. Het kan onder meer gaan om industrietakken zoals de extractie van fosfaat of kleuropigmenten, of de exploitatie van zeldzame aardmineralen zoals monaziet.

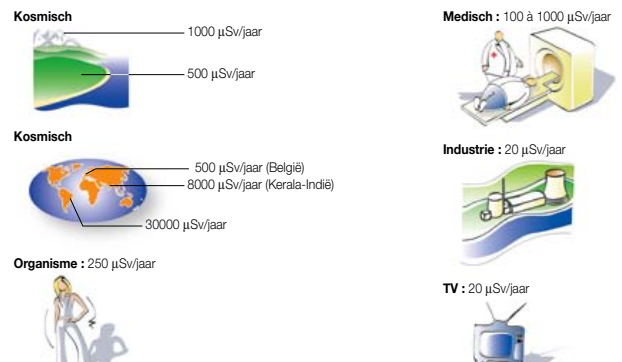
De geneeskunde is verantwoordelijk voor vrijwel alle kunstmatige straling waaraan wij tijdens ons leven blootstaan. De ontdekking van de radioactiviteit wekte al zeer snel de belangstelling van de geneeskunde. Hieruit ontstonden bijvoorbeeld de radiotherapie (geneeskundige aanwending van straling) en nog later de nucleaire

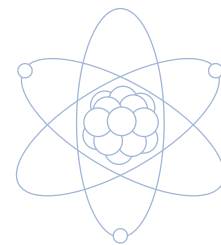
diagnostiek (gebruik van radioactieve tracers). Een van de belangrijkste bronnen van kunstmatige straling is de radiologie (gebruik van ioniserende straling voor het onderzoeken en behandelen van ziekten). Een radiografie van het menselijke gebit stemt overeen met een dosis van 0,02 millisievert. Voor een radiografie van de longen of een ander orgaan is al gauw een dosis nodig van zowat 0,05 millisievert. Voor diagnostisch onderzoek (scan van het hele lichaam, schildklierscan enz.) kan de straling oplopen tot een paar millisievert per onderzoek, maar hoe dan ook wegen de doses waaraan de patiënt wordt blootgesteld op tegen de nadelen van de gebruikte technieken. Meer dan de helft van alle radiografieën wordt uitgevoerd in de tandheelkunde.

Natuurlijke en kunstmatige stralingsbronnen



Enkele voorbeelden van jaardoses





De industriële activiteit (met inbegrip van de opwekking van elektriciteit met behulp van kernreactoren) veroorzaakt slechts een miniem deel van alle kunstmatige straling. Bij nominale belasting vertegenwoordigt een kerncentrale amper een dosis van 0,01 millisievert/jaar. Ter vergelijking: de straling waaraan we worden blootgesteld door courante gebruiksvoorwerpen zoals kathode- of beeldbuischermen (klassieke tv's bijvoorbeeld) bedraagt 0,02 millisievert/jaar.

BIOLOGISCHE EFFECTEN EN GEZONDHEIDSEFFECTEN

De biologische effecten van straling zijn uiterst complex en hebben variabele en onzekere gevolgen. Ze zijn afhankelijk van een reeks factoren, zoals het soort straling, de intensiteit, de plaats, de duur van de blootstelling enz. Bovendien duurt het een poos vooraleer ze zich manifesteren: bij een grote blootstelling na een paar uur tot een paar weken, bij lage blootstelling pas na meerdere jaren. Vaak is het in dat laatste geval trouwens erg moeilijk om het opduiken van een bepaalde pathologie te binden aan een specifieke oorzaak.

Equivalente dosis

De equivalente dosis is een belangrijk begrip om de biologische effecten van ioniserende straling te kunnen begrijpen. De equivalente (ook wel 'effectieve') dosis is gelijk aan de geabsorbeerde dosis, vermenigvuldigd met een factor die rekening houdt met de aard van de straling. Deze coëfficiënt – de zogenaamde kwaliteitsfactor – werd bepaald aan de hand van experimenteel onderzoek. Hij is gelijkaan 1 voor X-stralen, bètastralen en gammastralen, aan 2,3 voor de zogenaamde "trage" (of "thermische") neutronen, aan 10 voor snelle neutronen en bij alfastralen bedraagt hij 20. Bij dezelfde geabsorbeerde dosis kunnen de biologische effecten met andere woorden sterk variëren naargelang van het soort straling. Bij blootstelling aan alfastraling kan het effect 20 keer groter zijn dan bij blootstelling aan dezelfde dosis gammastraling. De equivalente dosis wordt uitgedrukt in Sievert (Sv).

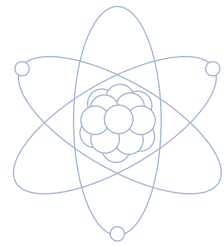
Equivalente dosis (Sv) = geabsorbeerde dosis (in Gray) x kwaliteitsfactor

Dosisdebiet

Een belangrijke factor om de effecten van een bestraling te beoordelen – onder meer in de radiotherapie – is het dosisdebiet. Zo kun je perfect elke dag een digestiefje drinken, maar als je de hoeveelheid drank die je zo bijvoorbeeld over een hele maand drinkt in een paar minuten naar binnen zou werken, riskeer je een alcoholcoma. Op dezelfde manier is de biologische efficiëntie van een bestraling afhankelijk van het debiet, d.w.z. van de toegediende dosis per tijdseenheid. Ze zal uiteraard afnemen naarmate het debiet daalt. En dat debiet kan heel sterk variëren: in de radiotherapie werkt men bijvoorbeeld met grootteordes van Sievert per minuut, terwijl de straling voor omwonenden van een kerncentrale wordt uitgedrukt in microSievert (duizendste van een milliSievert, miljoenste van een Sievert). Om een kanker te behandelen, dient men lokaal (op de plaats van de tumor) over een periode van een paar weken doses toe van 40 tot 80 Sv, of met andere woorden 10 tot 20 keer de "letale dosis 50" (dosis die gemiddeld voor 50 percent van een proefpopulatie dodelijk is) bij algemene bestraling. We kunnen dan ook maar zinnig over doses spreken als we het volume van het bestraalde lichaam en de duur van de bestraling preciseren.

Bestraling en besmetting

Blootstelling aan straling kan op twee manieren gebeuren: **bestraling en besmetting**. In het eerste geval wordt het organisme blootgesteld aan een stralingsbron, meestal van externe oorsprong (kosmische straling, X-stralen enz.). De stralingsbron kan echter ook inwendig zijn (binnen het lichaam), met name wanneer een radioactief deeltje door het organisme is opgenomen. In dat geval zetten radioactieve deeltjes zich bijvoorbeeld neer op de huid of kledij, of ze kunnen worden ingeademd of ingeslikt. Deeltjes die alfastralen uitzenden, die weinig doordringend zijn en al worden tegengehouden door een blad papier, zijn erg gevaarlijk wanneer ze worden ingeademd en rechtstreeks in contact komen met bijvoorbeeld de longen. **Bestraling is te vergelijken met zonnestralen: om zich daartegen te beschermen, zoekt men de schaduw op of opent men een parasol. Besmetting is vergelijkbaar met regen: om zich daartegen te beschermen, trekt men waterdichte kleren aan.**



Deterministische en stochastische stralingseffecten

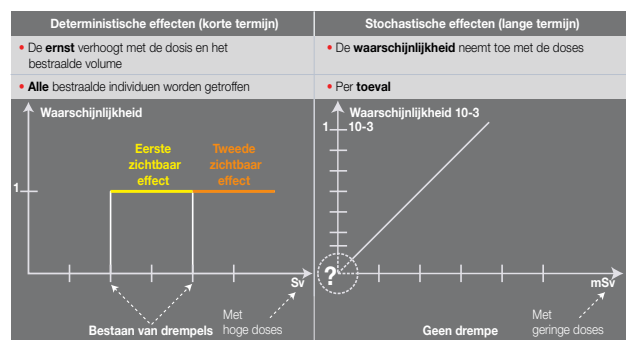
Of het nu gaat om geladen deeltjes, bijvoorbeeld een elektron (bètastraling) of een heliumkern (alfastraling), dan wel om fotonen bij elektromagnetische straling (X- of gammastralen), ioniserende stralen zullen hoe dan ook interageren met de atomen en moleculen waaruit levende materie is opgebouwd en kunnen dus ook chemische veranderingen veroorzaken in menselijke cellen. De belangrijkste letsels die op die manier kunnen worden veroorzaakt, zijn diegene met betrekking tot het cel-DNA. Ze verschillen niet fundamenteel van de letsels veroorzaakt door de chemische stoffen afkomstig van het celmetabolisme. Indien ze niet worden gerepareerd door de cellen zelf, kunnen ze leiden tot celsterfte en tot het optreden van gezondheidseffecten van zodra het weefsel zijn functies niet meer behoorlijk kan vervullen.

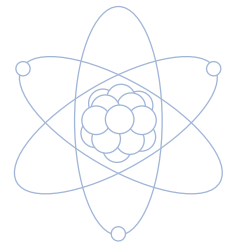
Deze deterministische effecten zijn al heel lang gekend, de eerste effecten werden reeds vastgesteld op het einde van de 19e eeuw, kort nadat Röntgen de X-stralen ontdekte. Ze zijn niet afhankelijk van toeval, verschijnen al na korte termijn en automatisch van zodra een bepaalde drempeldosis wordt overschreden (boven die drempeldosis treden letsels op). Het gaat hier heel duidelijk om hoge doses. Afhankelijk van de dosis kunnen de gevolgen voor de mens sterk variëren. De eerste weefselsletsels die door ioniserende straling worden veroorzaakt, staan in verhouding tot de geabsorbeerde dosis. Van zodra de dosis hoger is dan 0,5 Sv, zullen de effecten optreden na een periode die varieert van een paar uur tot een paar weken. Bij doses tussen 1 en 4 Sv stelt men misselijkheid en braakneigingen vast. Voor doses boven 4 Sv zijn de biologische verstoringen veel groter en kunnen ze dodelijk zijn.

Een paar grootteordes

Dosisequivalent	Effecten
$d < 0,1 \text{ Sv}$	Geen enkel gezondheidseffect op korte termijn
$0,5 \text{ Sv} < d < 2 \text{ Sv}$	Misselijkheid, duizeligheid, braken enz., maar snel herstel
$2 \text{ Sv} < d < 4 \text{ Sv}$	Huidverschijnselen (rode vlekken, haaruitval)
$4 \text{ Sv} < d < 6 \text{ Sv}$	50% overlevingskans, beenmergtransplantatie om de overlevingskans te verhogen
$6 \text{ Sv} < d < 10 \text{ Sv}$	10% overlevingskans
$d > 10 \text{ Sv}$	Fatale afloop (na enkele uren tot een paar weken)

De **stochastische effecten**, ook wel probabilistische effecten genoemd, treden daarentegen niet met absolute zekerheid op. De statistische kans dat ze zich voordoen, staat in verhouding tot de dosis. Met andere woorden, hoe hoger de dosis, hoe groter de kans dat er zich effecten voordoen. Deze effecten kunnen zich voordoen meerdere jaren na de blootstelling aan de straling en kunnen ook een lichte verhoging veroorzaken van de frequentiegraad van reeds bestaande ziekten. Over het algemeen is het bijna onmogelijk om de effecten vast te stellen van (erg) **lage doses**. We kunnen het bijvoorbeeld vergelijken met het gebruik van gsm's.





We “baden” voortdurend in lichte elektromagnetische velden en het is vandaag nagenoeg onmogelijk om het effect op de mens, als dat er al is, te meten. Uit de verschillende epidemiologische studies komt geen duidelijke en unaniem aanvaarde tendens naar voren. Bovendien variëren deze effecten in functie van de categorie van de bestraalde populatie. Sommige mensen zijn gevoeliger voor straling dan andere. Dat is bijvoorbeeld het geval bij kinderen die in contact komen met radioactief jodium; zij zullen veel sneller schildklierkanker ontwikkelen dan volwassenen.

Somatische en genetische effecten

We noemen zowel deterministische als stochastische effecten “somatisch” wanneer ze zich voordoen op het lichaam van het bestraalde individu of dier. Als de effecten zich manifesteren in het organisme van nakomelingen van de bestraalde individuen, dan spreken we over genetische effecten. Die laatste treden per definitie niet met zekerheid op en kunnen soms maar bij de tweede of derde generatie tot uiting komen. Ze beïnvloeden de kiemcellen (voortplantingscellen). Bij een aantal dierenrassen kon er proefondervindelijk een verband worden vastgesteld tussen ioniserende straling en erfelijk overdraagbare mutaties; bij de mens kon dit tot dusver niet worden aangetoond.

BLOOTSTELLING AAN IONISERENDE STRALING

Normen en principes van stralingsbescherming

Waarom dosislimieten ?

Een straalvliegtuig dat opstijgt of een fabrieksschoorsteen die rook uitstoot, veroorzaken allebei hinder voor de mens en zijn omgeving. Zo worden ook een arbeider die een boorhamer hanteert of een chemicus die met organische solventen werkt, door hun beroepsactiviteiten blootgesteld aan schadelijke effecten voor hun gezondheid. Ieder van ons wordt permanent geconfronteerd met geluiden, trillingen, rook, schadelijke dampen enz. De effecten op onze gezondheid kunnen variëren van verwaarloosbaar

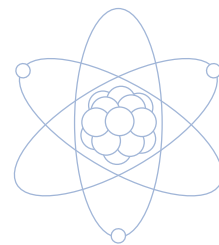
klein tot werkelijk ondraaglijk, gevaarlijk en zelfs dodelijk.

Om gezondheidsrisico's te voorkomen, zijn veiligheidsmaatregelen over het algemeen gebaseerd op grenswaarden die niet mogen worden overschreden. Voor het bepalen van die waarden baseert men zich op resultaten van hetzij epidemiologisch onderzoek op de mens, hetzij dierenproeven. Hetzelfde geldt voor stralingsbescherming: ook hier zijn grenswaarden vastgelegd voor blootstelling aan externe straling of voor opname van radioactieve stoffen in het lichaam, d.w.z. die zouden kunnen worden ingeslikt of ingeademd. In de praktijk komt de dosislimiet overeen met het hinder- of schadeniveau dat niet mag worden overschreden zodat een activiteit routinematig kan worden uitgevoerd zonder onaanvaardbare risico's voor de mens en de samenleving.

Fundamentele principes van de regelgeving inzake stralingsbescherming

De Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) beveelt voor de dosislimieten het onderstaande systeem aan :

- handelingen die blootstelling aan ioniserende straling met zich brengen, dienen te worden gerechtvaardigd door economische, sociale of andere voordelen - het “principe van de rechtvaardiging van de praktijk”;
- de doses moeten zo laag gehouden worden als redelijkerwijze mogelijk is. Hierbij wordt rekening gehouden met economische en sociale factoren. In het vakjargon noemt men dit het ALARA-principe (“As Low As Reasonably Achievable”) - het “principe van de optimalisatie van de bescherming”.
- zowel voor de bevolking als voor de werknemers die door hun beroep blootgesteld worden, zijn individuele dosislimieten bepaald - het “principe van de individuele dosislimieten”.



Het ALARA-principe en het voorzorgsprincipe

De effecten van hoge doses zijn gekend, maar over die van lage doses bestaat nogal wat onenigheid. Sommigen zijn van mening dat elke ioniserende straling potentieel schadelijk is, ongeacht de intensiteit ervan. We dienen hier op te merken dat in heel wat gebieden ter wereld, zoals in Kerala in India, de natuurlijke radioactiviteit 10 tot 50 keer hoger ligt dan bij ons en dat men hier geen waarneembare schadelijke effecten vaststelt bij de bevolking. Anderen zijn dan weer van oordeel dat onder een bepaalde drempel de effecten onbestaande of zelfs “gunstig” zijn. Zo heeft men bij lage doses bijvoorbeeld gunstige effecten vastgesteld op het stimuleren van de celgroei bij bepaalde planten.

Een groot deel van de vraagtekens rond de effecten van lage doses is niet toe te schrijven aan de specialisten in radioactiviteit (zij zijn in staat om de doses met een extreme precisie te meten), maar wel aan de biologen, die nog maar een gedeeltelijke kennis hebben van de genetische mechanismen (van 90% van het DNA kent men vandaag nog altijd niet de precieze rol). Daarnaast is het ook zo dat het menselijk lichaam 60 miljard km DNA bevat, dat elke dag 10 triljoen (miljard maal miljard) reparaties ondergaat: elke dag wordt er 40 miljoen km DNA opnieuw aangemaakt (zelfs zonder enige kunstmatige bestraling).

Bij gebrek aan een duidelijk antwoord met betrekking tot de effecten van lage doses, paste men (en dat doet men vandaag nog altijd) het ALARA-principe toe (As Low As Reasonably Achievable). De toepassing van dat principe houdt in dat men systematisch de stralingsbeschermingsmaatregelen zal identificeren, evalueren en selecteren die het best in staat zijn om zowel beroepsmatige

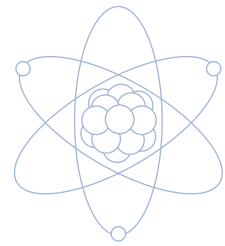
blootstelling als de blootstelling van burgers tot een zo laag mogelijk en redelijkerwijs aanvaardbaar niveau te beperken. In de loop der jaren is dit principe zich gaan vermengen met het voorzorgsprincipe: uit voorzorg past men de dosislimieten toe die worden aanbevolen door de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP), met als doel de niet-stochastische schadelijke effecten te voorkomen en de kans dat stochastische effecten zich manifesteren te beperken tot een niveau dat redelijkerwijs aanvaardbaar is.

Het voorzorgsprincipe is zeker geen principe van systematische mijding en wordt vooral toegepast bij activiteiten op grote schaal en/of activiteiten die een potentieel risico opleveren op onomkeerbare schade.

Blootstelling van werknemers

Reeds meerdere decennia geleden werden stralingsbeschermingsystemen ingevoerd voor personen die werken in installaties waar ioniserende straling wordt gebruikt. Personen die beroepshalve aan ioniserende straling worden blootgesteld moeten verplicht een dosimeter dragen, waardoor gecontroleerd kan worden of de vastgestelde waarden onder de voor werknemers vastgestelde limieten blijven. Dankzij de meetgegevens kan ook de gecumuleerde blootstellingsdosis over een bepaalde periode worden bepaald.

Het toelaatbare risiconiveau voor veilige beroepen is de gemiddelde risicograad voor alle werknemers van die beroepstak. Het individuele risico varieert in functie van de individuele beroepstaken en zal normaal niet ver uit de buurt van het gemiddelde liggen. **Het doel van de dosis-equivalentlimieten is een afdoende bescherming te bieden aan de personen met de hoogste blootstellingsgraad.**



De dosislimieten worden aanbevolen door de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) en hebben zowel betrekking op externe stralingsbronnen als op interne besmetting door de opname van radioactieve stoffen. De dosislimieten zijn van toepassing op beide categorieën van effecten (deterministische en stochastische). Voor beroepshalve aan ioniserende straling blootgestelde personen en bij een gelijkmatige blootstelling van het volledige organisme, schrijft een Europese richtlijn een limiet voor van 100 mSv in een periode van 5 opeenvolgende jaren voor de stochastische effecten. Bij gedeeltelijke blootstelling van het organisme (organen en weefsels afzonderlijk -> huid, longen, schildklier, beenderen enz.) is de limiet 1.000 mSv/periode van 5 opeenvolgende jaren. België heeft gekozen voor limieten van respectievelijk 20 mSv/periode van 12 maanden bij blootstelling van het volledige organisme en van 500 mSv/12 opeenvolgende maanden bij gedeeltelijke blootstelling. Voor werknemers van de Belgische kerncentrales en ook in andere sectoren werden doelstellingen vooropgesteld die ver onder de Belgische voorschriften blijven: 10 mSv per periode van 12 opeenvolgende maanden bij blootstelling van het volledige organisme en 100 mSv per periode van 12 opeenvolgende maanden bij gedeeltelijke blootstelling. In de praktijk blijkt uit de metingen die door het betrokken personeel worden uitgevoerd dat de werkelijke blootstelling ruim onder de limieten blijft die de uitbater zichzelf oplegt.

Blootstelling van de bevolking

De risico's die verband houden met straling vormen slechts een bijzonder kleine fractie van alle gevaren waaraan burgers in hun omgeving worden blootgesteld.

Om de dosislimieten voor de bevolking te bepalen, heeft de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) rekening gehouden met de risico's die inherent zijn aan ons dagelijkse leven.

De ICRP nam als referentiepunt het openbaar vervoer (de veiligheidsvoorwaarden in deze sector zijn streng gereguleerd door de overheid en de burgers beschouwen de risico's verbonden aan openbaar vervoer over het algemeen als aanvaardbaar) en legde vervolgens dosis-

limieten op die een stuk lager zijn dan de limieten voor werknemers: 1 mSv per jaar voor blootstelling van het volledige organisme en 50 mSv per jaar bij gedeeltelijke blootstelling.

Medische blootstelling

Het grootste verschil tussen de blootstelling van medische patiënten aan ioniserende straling en de blootstelling in andere domeinen (werknemers, bevolking), is dat er in de medische wereld geen strikte limieten gelden, al blijven ook hier het rechtvaardigingsprincipe en het optimaliseringsprincipe van toepassing. De situatie is bovendien verschillend in het domein van de diagnostiek (radiologie, nucleaire diagnostiek) en dat van de inwendige of uitwendige radiotherapie. In het eerste geval gaat men optimaliseren door op zoek te gaan naar de minimale dosis die vereist is om relevante informatie te verkrijgen, in het tweede geval gaat men op zoek naar de dosis die nodig is om een tumor te doden, maar die het omliggende gezonde weefsel zoveel mogelijk ontziet. De dosis die wordt toegediend aan de patiënt is afhankelijk van de kwaliteit van het gebruikte materiaal, wat meteen ook ten volle rechtvaardigt dat de gebruikte medische apparatuur aan een strenge controle wordt onderworpen. Niet alleen de stralingsapparatuur zelf, maar ook de andere apparatuur (als de lichtbak voor de bestudering van röntgenfoto's bijvoorbeeld niet optimaal werkt, zou het kunnen dat er hogere doses moeten worden toegediend om clichés te bekomen die toch bruikbaar zijn). Daarnaast is de dosis ook afhankelijk van de aard van de medische verrichting en van de stralingsbron (röntgenbuis, deeltjesversneller, radionucliden in niet-verzegelde bron enz.).

3

Nucleaire toepassingen in de geneeskunde

Nauwelijks een paar maanden nadat Röntgen de X-stralen ontdekte, was de ontdekking van het fenomeen radioactiviteit door Becquerel en Curie al even ophefmakend. De ontdekking lag aan de basis van twee belangrijke toepassingen in de geneeskunde: de **radiodiagnostiek** en de **behandeling door ioniserende straling**.

De hand van Dr. von Kollikers, een vriend van Röntgen, en de tweede gekende radiografie ooit.



Naast de **radiodiagnostiek** (waarbij gebruik wordt gemaakt van **X-stralen** opgewekt door elektrische generatoren), maakt de nucleaire geneeskunde gebruik van **radio-isotopen, al dan niet in gesloten bron**⁴. In dat geval bundelt de combinatie van een radio-element en een farmaceutisch product **de voordelen van de chemie** (die het mogelijk maakt een radio-isotoop naar de gewenste plaats te brengen)

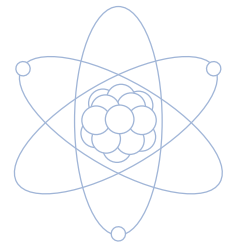
en van de kernfysica, die de straling van het isotoop ofwel gebruikt als lokalisatiesignaal (diagnostiek), ofwel om specifieke doelcellen te vernietigen (radiotherapie). Andere medische toepassingen zijn dan weer gebaseerd op de ontwikkelingen in de kernfysica en maken bijvoorbeeld **rechtstreeks gebruik van protonenbundels** (opgewekt in een cyclotron) of van neutronenbundels. Niet alleen specifieke toepassingen zoals protonentherapie zijn uniek, in het algemeen kunnen we stellen dat het gebruik van radio-elementen in de geneeskunde **onmiskenbare voordelen** biedt **doordat ze op molecule- en celniveau werken**. Er bestaan vandaag geen performantere alternatieven.

Elk jaar zijn zo'n 30 miljoen patiënten over de hele wereld afhankelijk van het gebruik van radio-elementen (hoofdzakelijk technetium-99m). En daar eindigt het verhaal zeker niet, want het domein van de kernfysica beschikt nog over veel ontwikkelingsmogelijkheden

De medische beeldvorming, zowel met behulp van X-stralen als met behulp van radio-isotopen, is zonder enige twijfel een van de medische domeinen waarin de voorbije twintig jaar spectaculaire vooruitgang werd geboekt. Door recente ontwikkelingen is het niet alleen mogelijk een **betere diagnose** te stellen, maar ontstaat er onrechtstreeks ook **nieuwe hoop om tal van ziekten te kunnen behandelen**. Dankzij een precieze lokalisatie wordt het makkelijker om chirurgisch in te grijpen, voor sommige zieken de enige mogelijke behandeling. Daarnaast maken nieuwe technieken het ook mogelijk om een beter inzicht te krijgen in de werking van bepaalde organen waarover nog lang niet alles geweten is (o.a. de hersenen).

Wat de medische toepassingen van ioniserende straling betreft, is het nuttig erop te wijzen dat een van de drie basisprincipes van de stralingsbescherming, met name het streven naar een zo beperkt mogelijke dosis, hier niet zonder meer van toepassing is (zie p. 17). In tegenstelling tot de andere toepassingen is de blootstelling aan straling, zowel voor diagnose als voor therapie, in het belang van de patiënt. Het is dan ook aan de arts om geval per geval te bepalen in welke mate de patiënt mag worden blootgesteld om het gewenste doel te bereiken.

4. De radiografie maakt dus geen deel uit der nucleaire geneeskunde



Radiodiagnostiek (radiografie door middel van X-stralen)

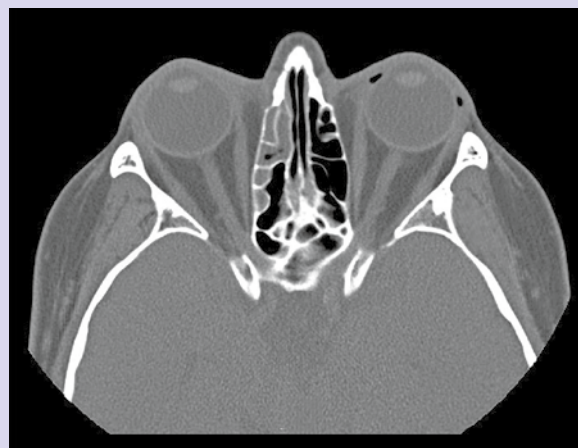
De radiodiagnostiek is de discipline in de medische beeldvorming die het **geheel van technieken omvat om de morfologie van het menselijk lichaam in beeld te brengen door middel van X-stralen**. In december 1895 maakte W.C. Röntgen, de ontdekker van de X-stralen, een eerste radiogram van de hand van zijn vrouw. De techniek maakt gebruik van het feit dat X-stralen in staat zijn om door het menselijke lichaam heen te gaan en, afhankelijk van de aard van het doorkruiste weefsel, in mindere of meerdere mate worden geabsorbeerd (beenderen zijn moeilijker doordringbaar, spieren makkelijker, wat op een foto leidt tot delen die donkerder en lichter zijn). Dankzij dit type straling kunnen er dus radiogrammen worden gemaakt om bijvoorbeeld een botbreuk of beschadigd weefsel aan het licht te brengen (bij een longfoto bijvoorbeeld).

De “**conventionele radiologie**” omvat nog altijd het overgrote deel van alle radiologische onderzoeken die worden uitgevoerd. Het betreft in hoofdzaak röntgenfoto's van beenderen, van de borststreek en van de buikstreek.

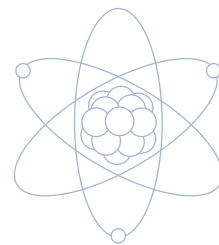
Bij een CT-scan (Computerized Tomography) of computertomografie draaien precies gerichte X-stralen, opgewekt in een X-stralenbuis, helemaal rond het lichaam van de patiënt. Met behulp van software voor dataverzameling en -verwerking wordt vervolgens een driedimensionaal beeld van de organen samengesteld. Dat levert een beeldkwaliteit op die vaak hoger ligt dan bij de traditionele radiologie, met een contrastrijker beeld van de orgaanstructuur. Met een CT-scanner kunnen onder meer de hersenen, de borstkas, de buik of opnieuw ook de beenderen worden bestudeerd. De scanner brengt afwijkingen aan het licht die op een gewoon radiogram of een echografie niet zichtbaar zijn.

Naast de conventionele radiologie en de scanner, worden er ook **meer gespecialiseerde technieken** ontwikkeld die het diagnosebereik uitbreiden. Voorbeelden zijn onder meer **coronarografie** (inwendig onderzoek waarbij foto's worden gemaakt van het hart en de kroonslagaders om eventuele vernauwingen vast te stellen) en **mammografie** (röntgenonderzoek van de borsten). Daarnaast geven we u ook nog mee dat **tandheelkundige röntgenapparatuur** een belangrijke plaats inneemt in het totale radiologiepark. Een veel gebruikte techniek is de panoramische röntgenfoto, waarbij een röntgentoestel gedurende een tiental seconden om het hoofd van de patiënt heen draait en een beeld maakt waarop zowel de onder- als bovenkaak te zien zijn.

Radiologisch onderzoek heeft vooral betrekking op de macroscopische structuur van de verschillende organen. Om die structuur duidelijk in beeld te brengen, moet het verschil in densiteit of dichtheid van de verschillende weefsels voldoende hoog zijn (bv. het verschil tussen beenderweefsel en zachte weefsels). Als dat niet het geval is, zal men vaak een ‘contrast-product’ inspuiten (bv. een joodoplossing bij een coronarografie) om een beter beeld te bekomen.



Dwarsdoorsnede ter hoogte van de oogballen (CT-scan)



Andere technieken, die geen gebruik maken van ioniserende straling

Magnetische resonantie

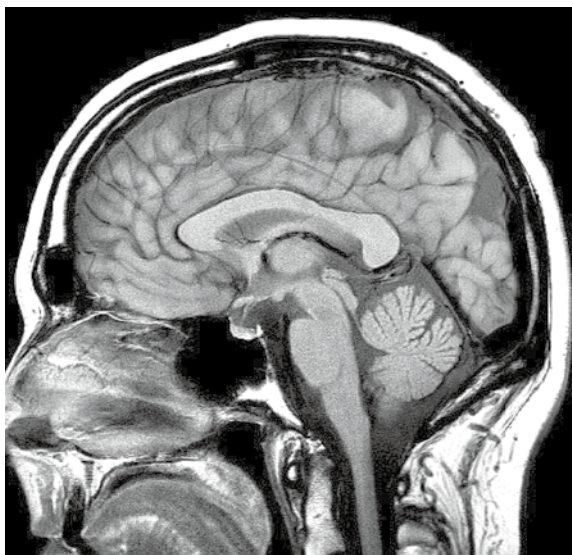
De röntgenscanner, aanvankelijk een ware revolutie in de radiologische wereld, krijgt vandaag onder meer voor neurologisch onderzoek en voor specifieke onderzoeken steeds meer concurrentie van de MRI-scan (magnetic resonance imaging).

Bij deze techniek wordt de patiënt in een **krachtig magnetisch veld geplaatst**. Ons organisme bevat grote hoeveelheden waterstofkernen, onder meer in watermoleculen. Als die moleculen in een magnetisch veld terechtkomen en ze blootgesteld worden aan zorgvuldig uitgekozen radio-impulsen met een specifieke frequentie, "antwoorden" de **waterstofkernen** door **radiogolven** uit te sturen met een gelijkaardige frequentie. Aan de hand van dat signaal kunnen beelden worden gegenereerd. Dit morfologisch onderzoek maakt dus gebruik van de magnetische eigenschappen van de atoomkernen in de verschillende structuren van ons organisme. Het voordeel t.o.v. de röntgenscanner is dat er geen blootstelling

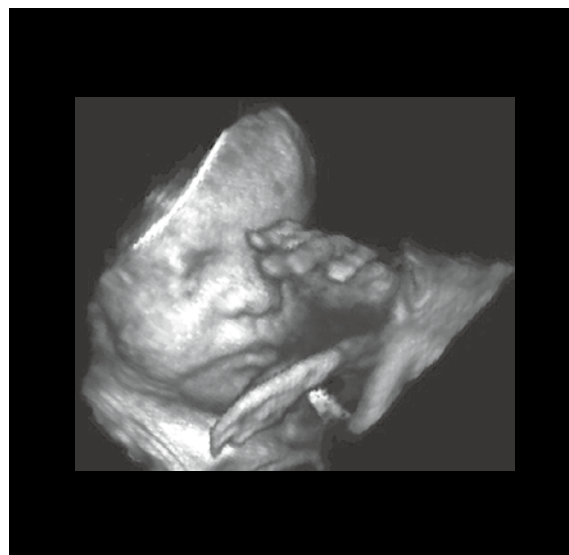
is aan straling, het nadeel is dat het onderzoek een stuk langer duurt (soms 20 tot 30 minuten). MRI is uitgegroeid tot de voorkeursmethode om zachte weefsels met een hoge ruimtelijke resolutie in beeld te brengen en is bijzonder doeltreffend bij cerebrospinale structuren (hersenen en ruggenmerg). Via MRI kunnen ook bepaalde functies van de hersenen worden bestudeerd, door lokaal de veranderingen in de bloedcirculatie te gaan meten. De techniek is duur maar relatief veilig.

Echografie (ultrageluid)

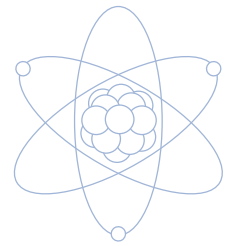
In de ultrasone beeldvorming maakt men gebruik van een externe bron die ultrasone pulserende golven uitzendt. Het moment en de richting van de golven zijn allebei gekend. Bij de grensvlakken tussen de verschillende weefsels worden de golven gedeeltelijk weerkaatst. Door de tijd te meten die verstrijkt tussen de vertrekkende en de terugkerende golf, kan men een beeld samenstellen. Echogrammen of geluidsfoto's worden vooral gebruikt om zachte weefsels in beeld te brengen en voor de prenatale opvolging van baby's. De techniek is snel, onschadelijk en goedkoop, waardoor hij wereldwijd dan ook erg verspreid is.



MRI-scan van de hersenen



Echografie van een foetus in de buik van zijn moeder



NUCLEAIRE GENEESKUNDE: DIAGNOSTIEK

De diagnostische toepassingen van de nucleaire geneeskunde vallen uiteen in een luik **in vivo-technieken**, waarbij **de patiënt radio-elementen toegediend krijgt**, en een luik in **in vitro-technieken**, waarbij een **staal** dat bij de patiënt werd afgenomen (bloed, urine, biopsie enz.) **in het laboratorium onderzocht** wordt. Nucleaire beeldvorming is de meest courante in vivo-toepassing, terwijl radio-immunologische dosering (zoals de hormonale dosering in het bloed) de meest verspreide techniek is binnen de in vitro-diagnostiek.

Via de **nucleaire geneeskunde** is men in staat om tot functionele beeldvorming te komen (d.w.z. met betrekking tot de werking), en deze techniek is dan ook een **belangrijke aanvulling op de puur morfologische beeldvorming** via conventionele radiologie, scanner, echografie of magnetische resonantie.

In vivo

Deze techniek bestaat erin het metabolisme van een

orgaan te bestuderen door middel van een specifieke radioactieve stof – het zogenaamde radiofarmacon – die wordt toegediend aan een patiënt. De aard van het radiofarmacon is afhankelijk van het onderzochte orgaan. Het **radio-element kan ofwel rechtstreeks worden gebruikt, ofwel vastgehecht aan een drager** (molecule, hormoon, antilichaam enz.) met een hoge affiniteit voor het orgaan dat wordt onderzocht.

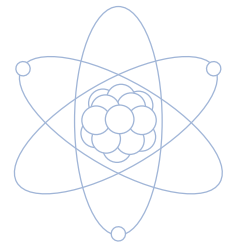
De lokalisatie van de radioactieve stof in het organisme gebeurt met een specifieke detector – de gammacamera of scintillatiecamera – die bestaat uit een natrium-jodidekristal en software voor beeldverzameling en -verwerking. Met deze apparatuur kan men een beeld krijgen van de **werking van organen** (scintigrafie). Scintillatie betekent letterlijk ‘fonkeling, schittering’. De werking berust m.a.w. op het meten van de lichtflitsjes die door de radioactieve straling worden opgewekt in een scintillatiekristal of -vloeistof. Het scintigram is dan de grafische weergave van de intensiteit van de door het orgaan of lichaamsdeel uitgezonden straling. Deze techniek wordt onder meer gebruikt bij **schildklieronderzoek, skeletscintigrafie en hartscintigrafie** (cardiologisch onderzoek naar de werking van het hart).

Het voorbeeld dat historisch gezien de techniek het best illustreert, is het gebruik van radioactief jodium om de werking van de schildklier te onderzoeken of om schildklieraandoeningen te behandelen. De schildklier heeft een natuurlijke affiniteit voor jodium, die ze nodig heeft om schildklierhormoon af te scheiden. In België bevat de schildklier van mensen die een normaal dieet volgen 8 tot 10 mg jodium-127, dat stabiel is. Als men echter jodiumrijke voeding gaat toedienen (bv. veel zeevruchten), dan zal de schildklier het extra jodium absorberen als een spons, tot ze helemaal verzadigd is. De schildklier maakt daarbij geen onderscheid tussen de verschillende isotopen van jodium, ongeacht het feit of ze al dan niet radioactief zijn. Als men bijgevolg een heel kleine maar gekende dosis radioactief jodium toedient (bv. jodium-131), dan weerspiegelt de hoeveelheid jodium die aanwezig is in de schildklier de affiniteit van het orgaan voor jodium, en met andere woorden dus ook de schildklierwerking (diagnostiek). Zoals bij alle fysische metingen, mag de meettechniek de werking van het bestudeerde orgaan

niet verstoren. Als de toegediende dosis jodium te hoog is, zal de eigenlijke schildklierwerking zelf beïnvloed worden. Daarom gebruikt men in de schildklierdiagnostiek zo klein mogelijke hoeveelheden radioactief jodium: men spreekt van een radioactief spoortje (en naar analogie ook van “**tracers**”). Anderzijds moet de radioactiviteit ook voldoende hoog zijn om tot een aanvaardbare meetkwaliteit te komen (betrouwbaarheid).

Het bovenstaande voorbeeld illustreert meteen ook de belangrijkste uitdagingen voor de nucleaire beeldvorming:

- een molecule selecteren of ontwikkelen die in staat is om het geschikte radio-element tot bij het onderzochte orgaan te brengen en vervolgens te bestuderen hoe het zich verspreidt (temporeel en ruimtelijk);
- op zoek gaan naar de vereiste toegediende dosis voor een optimale diagnose bij een minimale straling;
- farmaceutische effecten van de molecule vermijden door slechts spoorhoeveelheden toe te dienen.



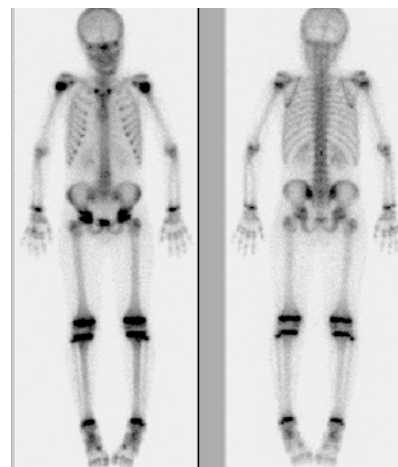
De radio-elementen of tracers worden dusdanig gekozen dat hun γ -emissie extern kan worden gedetecteerd. Er bestaan heel wat van deze radio-elementen of "zuivere γ -emitters" (ze zenden enkel fotonen uit), technetium-99m, jodium-123, thallium-201, indium-111 enz. Technetium-99m is evenwel veruit het meest gebruikte radio-element (meer dan 90% van alle gevallen). Het beschikt over uitstekende fysische eigenschappen, is niet duur en makkelijk beschikbaar en het beschikt over een stralingsenergie die vanuit dosimetrisch oogpunt erg aangewezen is voor de patiënt. Er bestaat in de natuur geen stabiel technetium: alle isotopen zijn radioactief. Technetium-99m is het vervalproduct van molybdeen-99, dat zelf een splijtingsproduct is van uranium-235. De halverings- of halfwaardetijd is 6 uur, bij de meeste onderzoeken een ideale tijdsduur voor de γ -camera's, maar anderzijds te kort om langer dan een dag te worden bewaard. De halveringstijd van molybdeen-99 is 66 uur. Dat maakt het mogelijk om een molybdeen-99-generator te stockeren en het vervalproduct, technetium-99m, maar te gebruiken in functie van de behoeftes. In België wordt molybdeen-99 o.m. verkregen door de bestraling van sterk verrijkte uraniumplaatjes in de BR-2-reactor van het SCK•CEN, gevolgd door extractie en zuivering bij het Instituut voor Radio-elementen in Fleurus.

In 1935 spoot Nobelprijswinnaar George de Hevesy een kleine hoeveelheid fosfor-32 in bij ratten. Na de radioactiviteit van de beenderen te hebben gemeten, formuleerde hij een in die tijd erg controversiële stelling: "This result strongly supports the view that the formation of bones is a dynamic process, the bone continuously taking up phosphorus atoms which are partly or wholly lost again, and are replaced by other phosphorus atoms"⁵. Deze dynamische visie ging lijnrecht in tegen alle statische theorieën in die tijd, maar G. de Hevesy had wel gelijk en vandaag is **skeletscintigrafie** het vaakst uitgevoerde onderzoek in de nucleaire geneeskunde. Voorafgaand aan het onderzoek injecteert men fosfonaat, gebonden aan technetium-99m.

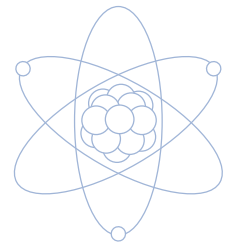
Deze tracer gaat actief op zoek naar zones waar botgroei plaatsvindt. Het beeld van de radioactiviteit weerspiegelt de botgroei en het botmetabolisme.

De onderstaande afbeelding toont een normale botsintigrafie, uitgevoerd met een γ -camera, soms ook wel Angercamera genoemd, naar Hal Anger, de man die het apparaat in 1956 uitvond. We zien het botmetabolisme van een jonge patiënt (voor- en achteraanzicht).

Aangezien het om digitale beelden gaat, kan er ook een **driedimensionaal beeld** van de organen gegenereerd worden (waarbij de camera om de patiënt heen draait), volgens hetzelfde principe als bij de scanner die werkt met behulp van X-stralen. Men spreekt dan over **tomografie** (het reconstrueren van beelden vanuit projecties). D. Kuhl ontwikkelde vanaf 1964 de emissietomografie. De ruimtelijke resolutie van tomografische beeldvorming is vergelijkbaar met die van de klassieke beeldvorming, maar doordat letsels veel contrastrijker in beeld worden gebracht, is het makkelijker ze te onderzoeken.



5. " Dit resultaat staft de opvatting dat botvorming een dynamisch proces is, waarbij de beenderen voortdurend fosforatomen opnemen die vervolgens gedeeltelijk of geheel verloren gaan en dan weer vervangen worden door andere fosforatomen"



Positron Emissie Tomografie (PET-scan)

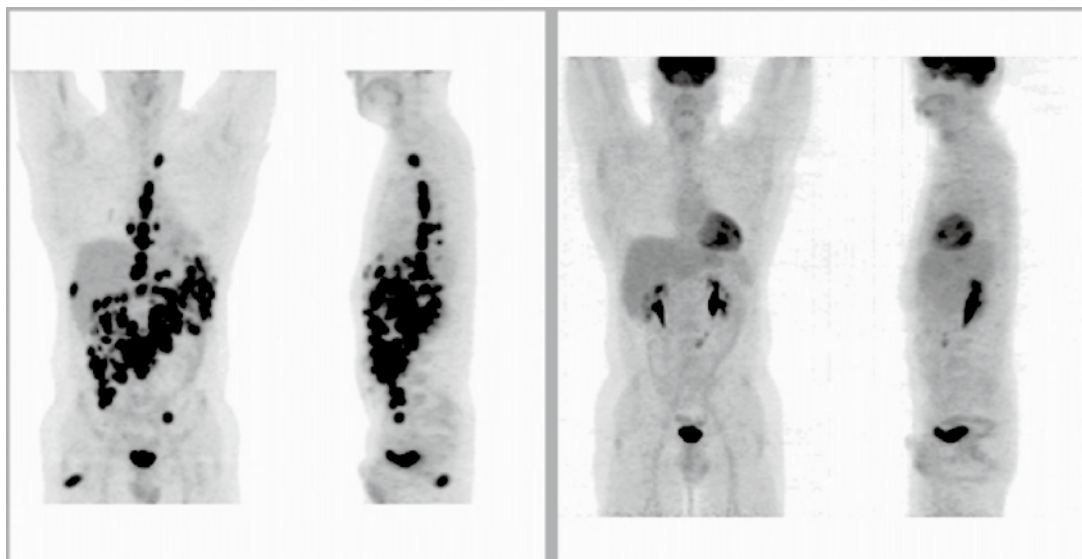
Met deze techniek is het mogelijk doorsnedebeelden te maken die de verspreiding weergeven (zowel temporeel, ruimtelijk als kwantitatief) van een radioactieve tracer die positronen uitzendt (positieve elektronen, antideeltjes van negatieve elektronen).

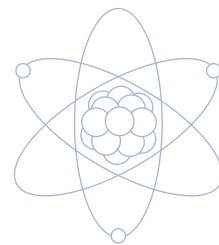
De tracers zijn gemerkt met een radio-element dat positronen uitzendt (zie ook p. 11) en worden dus radiotracers. Aangezien er voor de productie van de radio-elementen een cyclotron nodig is (deeltjesversneller waarbij de deeltjes in een bijna cirkelvormige baan worden geleid) en aangezien de straling maar van korte duur is, kunnen de radiotracers uitsluitend worden gebruikt dicht bij de plaats waar ze werden

opgewekt. Het voordeel van deze vorm van merken, met een zeer hoge specifieke radioactiviteit, is dat er maar **erg kleine hoeveelheden tracer** moeten worden geïnjecteerd. F 18-FDG (fluor-18-desoxyglucose) is hiervoor goed geschikt. Het beschikt over een halveringstijd van 110 minuten en vervalt in stabiel zuurstof-18 door een positron af te stoten.

Het afgestoten positron gaat dan “op reis” tot het op een vrij elektron botst. De botsing zal ze allebei vernietigen en de gelijktijdige emissie van 2 γ -fotonen veroorzaken die elk 180° t.o.v. elkaar (in tegenovergestelde richting) zullen vertrekken. Die fotonen worden dan gedetecteerd door de positroncamera's die verbonden zijn met een berekeningsunit.

Een reeks beelden gemaakt met een positroncamera van een patiënt die lijdt aan lymfoom (lymfekliertumor), vóór en na chemotherapie.





In vitro

In dit geval gaat het om een analysetechniek uit de medische biologie, waarbij er geen radio-elementen aan de patiënt worden toegediend, maar die het wel mogelijk maakt om bepaalde **bestanddelen in de biologische fluïda, en dan vooral in het bloed, te doseren**: hormonen, medicijnen, tumormerkers enz. Deze techniek maakt gebruik van doseringsmethodes die gebaseerd zijn op immunologische reacties (antilichaam-antigeenreacties gemerkt met jodium 125), vandaar de naam radio-immunologie of RIA (Radio Immunology Assay).

In 1977 ontvingen Rosalyn Yalow en Solomon Berson de Nobelprijs voor hun werk rond deze in vitro-doseringmethode, die tegelijk raakvlakken had met de immunologie, het isotopenonderzoek, de wiskunde en de fysica. Aanvankelijk probeerden de onderzoekers insulineniveaus vast te stellen. De RIA-techniek is dermate gevoelig dat men insulinegehalten van slechts 10 to 20 pg per ml kan vaststellen (10 pg = 1 honderd miljardste van een gram).

Het principe is als volgt. Laten we aannemen dat u een monster krijgt waarin u een onbekende concentratie van een bepaald hormoon moet achterhalen. Bereid een standaard oplossingsmonster van dit hormoon. Voeg vervolgens aan beide monsters een gekende hoeveelheid van een radioactief gemerkt hormoon toe. Daarna voegt u aan beide monsters antilichamen van het hormoon toe. De gemerkte en niet-gemerkte hormonen zullen zich allebei trachten te binden met het antilichaam. Door de radioactiviteit te meten van het gebonden en het niet-gebonden hormoon in de standaardoplossing en in het onbekende monster kunt u de concentratie van het hormoon in het onbekende monster afleiden.

De radio-immunologische dosering bracht een revolutie teweeg in het biologisch en medisch onderzoek.

Tegenwoordig beschikken we over een groot aantal procedures van het RIA-type om zowat alles vast te stellen wat we maar willen meten: peptides⁶ en hormonen, enzymen, virussen, antilichamen, allerlei medicijnen enz. De laatste jaren moeten de radioactieve methodes gaandeweg wijken voor niet-radioactieve alternatieven, vooral in het kader van stralingsbescherming en door de verwerkingskosten van het radioactief afval.

RADIOTHERAPIE

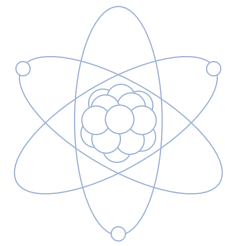
Sinds de eerste radiumbehandelingen⁷ (aan het einde van de 19^{de} eeuw) is de radiotherapie zeer sterk geëvolueerd. Samen met chirurgie en chemotherapie (waarbij gebruik wordt gemaakt van toxische moleculen) is het **een van de meest gebruikte technieken voor de behandeling van kankertumoren**. Bij radiotherapie wordt gebruik gemaakt van ioniserende straling, afkomstig uit een externe of interne bron, om kwaadaardige cellen te vernietigen. De toegediende doses worden op die manier berekend dat de straling zoveel mogelijk geconcentreerd wordt op de tumor en dat de omliggende, gezonde cellen zo weinig mogelijk bestraald worden.

Externe of uitwendige radiotherapie (deeltjesversnellers)

Voorafgaand aan de bestralingssessies wordt er altijd een patiëntspecifiek behandelingsplan opgesteld waarin heel precies de doses worden bepaald, het te bestralen volume, de dosimetrie, de banen die de stralenbundels moeten beschrijven (ballistiek) en de duur van elke behandeling. Voor de uitwerking van dit plan, dat tot doel heeft een hoge en homogene stralingsdosis te bereiken in het doelvolumen en tegelijk het behoud van de gezonde weef-

6. Een peptide is een keten van minstens 50 aminozuren die aan elkaar gekoppeld zijn door peptidebindingen (covalente binding tussen een koolstof- en een stikstofatoom van twee aminozuren).

7. De eerste radiumbehandelingen of 'curietherapieën' werden uitgevoerd een paar jaar na de ontdekking van radioactiviteit door Becquerel en de ontdekking van radium door de familie Curie. Marie Curie richtte "L'Institut du Radium" op en heeft eigenhandig meer dan 5.000 radiumbronnen gekalibreerd.



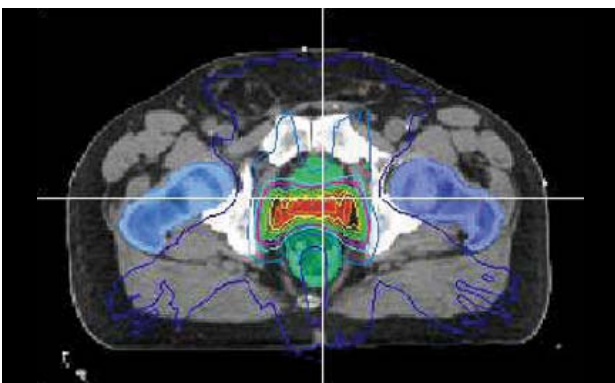
Kernenergie
beter begrijpen

Nucleaire toepassingen in de geneeskunde

sels te verzekeren, is een nauwe samenwerking vereist tussen de radiofysicus (stralingsdeskundige) en de radiotherapeut (oncoloog).

De bestraling gebeurt ofwel met behulp van **deeltjesversnellers** (lineaire versneller of cyclotron), ofwel, zij het steeds minder vaak, met toestellen voor telegammatherapie die uitgerust zijn met een kobalt-60-bron (**kobalttherapie**) of een cesium-137-bron. De deeltjesversneller maakt het mogelijk energierijke **elektronen** of geladen deeltjes zoals protonen op te wekken, ofwel onrechtstreeks ook **fotonen** of **neutronen**. De **stralenbundels** die worden bekomen, zijn **extreem dun**, wat het mogelijk maakt ze met een grote precisie te sturen. De meest courante techniek is die met behulp van elektronenversnellers. De opgewekte elektronen worden onmiddellijk gebruikt, behandelen de eerste centimeters en stoppen vervolgens in functie van hun energie. Die limiet kan heel nauwkeurig worden gekozen. Daarbij gaan de elektronen X-stralen genereren waarvan de energie veel dieper wordt afgezet. Ook fotonen worden gebruikt voor therapeutische doeleinden. **Dankzij radiotherapie is het mogelijk dieper liggende tumoren (10 tot 15 cm) te bestralen en daarbij de meer oppervlakkige weefsels te sparen.**

Simulatie van bestralingszones met bijbehorende stralingsdoses.

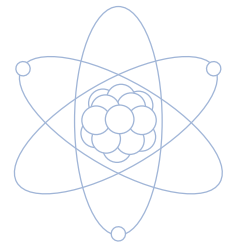


De **cyclotron**⁸ wordt vooral gebruikt bij **protonentherapie**. De protonentherapie benut twee voordelen van de manier waarop protonenbundels met andere stoffen interageren: er is maar weinig zijwaartse strooiing (in het weefsel) door de zwakke diffusie van de protonen tijdens hun traject en aan het einde van de dracht geven ze hun energie af in de vorm van een piek (de Braggpiek), waarbij de plaats van de piek zeer goed kan worden gecontroleerd (afhankelijk van de energie van de invallende deeltjes) en de dosis op de piek zeer groot is. Dankzij deze ballistische precisie (stuurbaarheid van het traject) kan elke protonenbundel aangepast worden om de dosisverdeling driedimensionaal af te stemmen op de vorm van het te bestralen doelvolumen (de tumor). Daardoor wordt het ook **mogelijk om de doses in het behandeld volume op te drijven en tegelijk de dosis, en dus de bijhorende complicaties, in gezond omliggend weefsel te minimaliseren**. De protonentherapie belooft binnen de radiotherapie een veelbelovende techniek te worden wanneer de behandelde tumor zich dicht in de buurt van stralingsgevoelige structuren bevindt (optische banen, ruggenmerg enz.).

Bestralingstherapie door in vivo-inplanting van gesloten bronnen (curietherapie of brachytherapie)

De curietherapie of brachytherapie maakt het mogelijk om specifiek of aanvullend op andere behandelingen kankertumoren te behandelen in de neus-keel-oorsfeer, de huid, de borsten of de geslachtsorganen. De radionucliden die vandaag het vaakst gebruikt worden in de curietherapie, in verzegelde of gesloten bron, zijn cesium-137 en iridium-192. Zij hebben definitief de plaats ingenomen van radium-226 dat in de eerste helft van de 20^{ste} eeuw gebruikt werd in de vorm van naalden of buisjes.

8. De cyclotron is een apparaat om bundels van geladen deeltjes te versnellen door ze onder invloed van een hoogfrequente wisselspanning tevens door een magneetveld te leiden. De elektrisch geladen deeltjes (protonen, deutronen) worden in een luchtledige kamer gebracht en beschrijven vervolgens vanuit het centrum van de cyclotron een spiraalvormig traject naar de buitenkant van het apparaat toe, waar de snelheid van de deeltjes erg hoog is geworden. Ze beschrijven dus meerdere cirkelbanen vooraleer ze worden afgebogen naar buiten en eventueel tegen een zeer hoge snelheid op een doel worden geprojecteerd dat zich op een paar meter van het apparaat bevindt. Als dat gebeurt, vinden er transmutaties plaats waarbij er radioactieve isotopen worden geproduceerd en er verval van atomen plaatsvindt. Door straling uit te zenden, keren de atomen terug naar een stabiele toestand. Met een cyclotron is het mogelijk om energieniveaus tot zowat 1 GeV (giga-elektronvolt) te halen. Synchrotrons zijn als het ware de moderne en grotere versies van een cyclotron, geperfectioneerd en krachtiger gemaakt. Zij kunnen een stralenbundel van een paar honderd meter opwekken en produceren hoogenergetische deeltjes van meerdere honderden GeV.



Er bestaan in feite drie vormen van curietherapie:

- als het stralende materiaal langzaam straalt (0,4 tot 2 Gy/u) spreekt men over Low Dose Rate of LDR-behandeling. De patiënt moet dan gedurende meerdere dagen gehospitaliseerd worden. De applicator heeft vaak de vorm van een fijn draadje van enkele centimeters. Sinds een paar jaar worden ook jodium-125-bronnen gebruikt voor de behandeling van prostaatkanker;
- als het stralende materiaal een middelmatige stralingssnelheid heeft (2 tot 12 Gy/u), spreekt men over Medium Dose Rate. Men maakt gebruik van een specifieke stralingsbron (iridium-192 in kleine afmetingen). Aangezien het dosisdebiet hoger is, kan de bestraling eventueel ook worden opgedeeld in vele kleine stapjes (Pulsed Dose Rate). Dat resulteert in een hoger comfort voor de patiënt, die de stralingsbron niet constant in zijn lichaam hoeft te dragen;
- bij High Dose Rate-behandelingen (meer dan 12 Gy/u) wordt ook gebruik gemaakt van een stralingsbron en is de behandelingstijd erg kort (hooguit een paar minuten). Dit gebeurt in de regel enkel met een zogenaamd 'afterloadingtoestel' als applicator.

Bestralingstherapie via in vivo-toediening van open bronnen (metabolische radiotherapie)

Als men aan een tumor hoge doses straling wil toedienen zonder de omliggende (gezonde) weefsels te bestralen, dan moet de stralingsbron zich zo dicht mogelijk bij het doelvolume bevinden. Om dat te bereiken, maakt men gebruik van een draagmolecule met een hoge affiniteit voor het orgaan en/of de tumor. De molecule is als het ware "de draagraket" en het radio-element dat alfa- of β -deeltjes naar de geviseerde cellen zendt "de kernkop". Bij een aantal behandelingen injecteert men daarom rechtstreeks een **radiofarmacon (een radio-element gekoppeld aan een molecule met een hoge affiniteit voor het te vernietigen weefsel)**. Zo gebruikt men onder meer jodium-131, dat goede re-

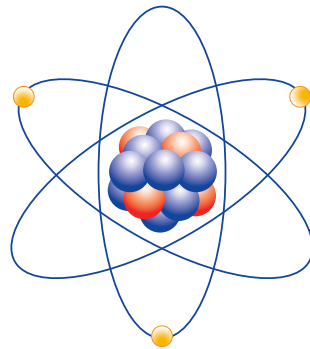
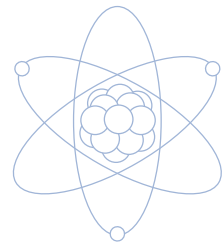
sultaten oplevert bij de behandeling van schildklierkanker. Deze behandeling maakt gebruik van het feit dat schildklierweefsel van nature jodium absorbeert (zie ook kaderstukje p. 23). Een veelbelovende isotoop voor andere indicaties is renium-188 (β - en γ -emitter), die over handige fysische en chemische eigenschappen beschikt. Ook yttrium-90 (zuivere β -emitter) wordt in deze context gebruikt. Daarnaast vermelden we ook nog strontium-89 en samarium-153, dat gebruikt wordt om de pijn veroorzaakt door botmetastasen (uitzaaiingen) te verlichten. Het strontium volgt hetzelfde metabolismetraject als calcium, hoopt zich op in vers botweefsel, bestraalt de zenuwuiteinden en verlicht op die manier de pijn.

Meer recentelijk ontwikkelde zich de **radio-immunotherapie**. Bij het merendeel van de eenvoudige ionen en moleculen is de affiniteit voor het doelvolume immers ontoereikend voor therapeutische doeleinden. Door grote moleculen te gebruiken die zich binden met de antigenen op de kankercellen, en niet met de gezonde weefsels, kan de selectiviteit van de behandeling worden opgevoerd.

De strategie is als volgt:

- er wordt een monoklonaal antilichaam geïnjecteerd; een klein percentage van het geïnjecteerde antilichaam wordt gemerkt met een γ -emitter ter wille van de beeldvorming;
- er worden beelden gegenereerd om te verifiëren in welke mate de tumor het antilichaam absorbeert;

Indien de selectieve absorptie voldoende hoog is, injecteert men een gemerkte molecule, ook wel ligand genoemd, met een zeer hoge affiniteit voor het antilichaam. Het ligand, dat gemerkt is met een isotoop dat β - of α -deeltjes uitstraalt, zal zich binden met het monoklonale antilichaam. Het isotoop (bijvoorbeeld renium-188) wordt gekozen in functie van de dosis die dodelijk is voor de kankercellen rond het monoklonaal antilichaam.



4

Toepassingen in andere sectoren

Sinds de ontdekking van het verschijnsel radioactiviteit, zowat honderd jaar geleden, zijn er talloze toepassingen van kernreacties, ioniserende straling en radioactieve stoffen ontwikkeld. Radioactiviteit wordt vandaag gebruikt in heel wat verschillende sectoren, met elektriciteitsproductie en geneeskunde wellicht als de bekendste. Maar daarnaast worden radioactieve isotopen ook gebruikt in de voedingssector, voor huishoudelijke toepassingen, in de landbouw, de industrie, de ruimtevaart, de archeologie, en ga zo maar door. In dit hoofdstuk gaan we iets dieper in op een aantal van die toepassingen.

RADIOSTERILISATIE IN VERSCHILLENDE SECTOREN

In het Musée de l'Homme in Parijs werd in 1976 de mummie van farao Ramses II gerestaureerd. Schimmels die de mummie aantastten, werden met radio-sterilisatie behandeld.



Bij het **ioniseren van voedingsmiddelen** worden de producten blootgesteld aan X-stralen of gammastralen om de aanwezige micro-organismen te vernietigen. Uiteraard worden de voedingsproducten zelf niet radioactief! Ze worden niet besmet of geactiveerd door de straling waaraan ze worden blootgesteld (de energie van de gebruikte X- of gammastralen is onvoldoende om de producten zelf radioactief

te maken). Heel wat producten worden op deze manier gesteriliseerd: onze roze en grijze **garnalen**, kikkerbilletjes, **kruiden**, sommige **diepvriesproducten**, kurken van luxebieren enz. De techniek maakt het ook mogelijk om het kiemen van planten zoals aardappelen, uien of look te vertragen. En in de Verenigde Staten wordt radiosterilisatie gebruikt om de voedselveiligheid van hamburgers te garanderen. Daarnaast is bestraling ook een veelgebruikte sterilisatietechniek voor **chirurgisch materiaal**, **prothesen** en andere **farmaceutische** of **cosmetische producten**.

Dankzij de **radiosterilisatie van insecten** (of steriele insectentechniek) kon in de jaren '70 in Florida en Texas de schroefwormvlieg (*Cochliomyia hominivorax*) worden uitgeroeid (een parasiet die het vee teisterde). Meer recent werd de techniek ook gebruikt in de strijd tegen de schroefwormvlieg in Egypte en Libië.



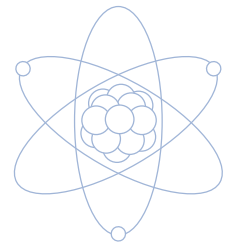
De bestrijdingstechniek bestaat erin om een grote populatie mannetjes, die door bestraling steriel werden gemaakt, los te laten op de natuurlijke populatie. Dat zorgt ervoor dat de vrouwtjes veel minder nakomelingen zullen produceren en het is dus een manier om op grote schaal een schadelijk insect te bestrijden zonder gebruik te maken van toxische middelen (pesticiden).

HUISHOUDELIJKE TOEPASSINGEN

De bekendste **huishoudelijke toepassing** is wellicht de **rookdetector** die werkt op basis van een radioactieve gesloten bron. Er bestaan verschillende types niet-radioactieve detectoren, maar de ionisatie op korte afstand door middel van alfadeeltjes is de snelste manier om rook op te sporen, nog voor die zichtbaar is.

Ook een "huishoudelijke" toepassing, zij het in iets ruimere zin, zijn **bliksemafleiders** die gebruik maken van een radium-226, een americium-241, een europium-152, of een krypton-85-bron. Hun werking is gebaseerd op de aanname dat de ionisatie van grote volumes lucht de elektrische geleidbaarheid van de lucht verhoogt en dus het efficiënter opvangen van de door de bliksem veroorzaakte ladingen mogelijk maakt. Vroeger was dit type bliksemafleiders erg courant, vandaag mogen ze niet meer verkocht worden in België.

Tritium wordt nog altijd gebruikt in luminescente verven (horloges, wijzerplaten), ter vervanging van radium.



Kernenergie
beter begrijpen

AARDWETENSCHAPPEN

In de agronomie of landbouwkunde hebben nucleaire technieken bijgedragen tot een rationeler gebruik van de watervoorraden in de bodem. Gebaseerd op de wetenschap dat snelle neutronen worden afgeremd door de waterstofatomen in water, is de vochtigheidsmeter of neutronsonde in staat om heel precies de **vochtigheidsgraad** van de bodem te bepalen.

Radioactiviteit wordt ook toegepast in de **aard- of geowetenschappen**. Met behulp van uranium, kalium of rubidium kan men **de leeftijd van de aarde** bepalen. Klimatologen meten de hoeveelheid beryllium-10 dat geproduceerd wordt door de kosmische straling in de atmosfeer en opgeslagen wordt in de ijskappen van de polen. Hoe hoger de berylliumconcentratie hoe lager de zonneactiviteit. Beryllium-10 heeft een halveringstijd van 1,6 miljoen jaar en het is een van de producten die ontstaan uit de breuk (spallatie) van zuurstof- en koolstofkernen onder impuls van de kosmische straling. Het geeft ons dus precieze informatie over de evolutie van de atmosfeer en gaat heel ver terug in de tijd.

Oceanografen kunnen aan de hand van het **koolstof 14**-gehalte in zeewater het traject van een oceaanstroming nagaan. Dankzij koolstof-14 is het ook mogelijk om tientallen duizenden jaren terug te gaan in het verleden. Koolstof, dat deel uitmaakt van de koolstofgasverbinding die aanwezig is in onze atmosfeer, is erg verspreid in ons milieu. Dat koolstof bestaat hoofdzakelijk uit het stabiele koolstof-12 en voor een heel klein deel uit koolstof-14, dat radioactief is en een vervaltijd van 5.730 jaar heeft (koolstof-14 wordt door de kosmische straling permanent aangemaakt in de stikstof die aanwezig is in de lucht). De verschillende uitwisselingen tussen de atmosfeer en de "levende wereld" (ademhaling, fotosynthese, voedsel) brengen de verhouding tussen de hoeveelheid koolstof-12 en koolstof-14 in evenwicht. Maar zodra een organisme sterft, wordt de hoeveelheid koolstof-14 in dat organisme niet meer vernieuwd aangezien de uitwisselingen met de externe wereld stoppen. De verhouding tussen koolstof-14 en koolstof-12 zal geleidelijk dalen door radioactief verval, en de verhouding tussen de twee isotopen maakt het dan ook mogelijk om lang na de dood of het afsterven van een organisme de leeftijd ervan te

bepalen (koolstofdatering). Hoe minder koolstof-14 er in een staal aanwezig is, hoe langer het organisme al dood is. De koolstof-14-methode zorgde voor een ware revolutie in de archeologie, omdat ze toelaat **voorwerpen of plaatsen** te dateren tot zowat 40.000 jaar geleden. Als men nog verder moet teruggaan in de tijd, maakt men gebruik van andere methodes die eveneens gebaseerd zijn op radioactief verval (de verhouding kalium/argon bijvoorbeeld).

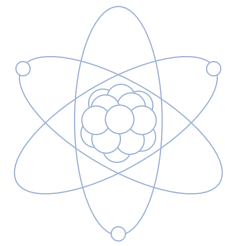
Versteend skelet van een paard,
gevonden bij Oudenburg, in de buurt van Oostende



Dankzij methodes gebaseerd op radioactiviteit kunnen de overblijfselen uit het verleden nauwkeurig geïdentificeerd, geanalyseerd en bestudeerd worden. We kunnen de authenticiteit ervan bepalen en er een schat aan archeologische of geschiedkundige informatie uit halen en op die manier meer te weten komen over de manier waarop onze voorouders hebben geleefd. Bovendien zijn deze overblijfselen juist door hun leeftijd vaak erg kwetsbaar en laten de radioactieve methodes toe om ze te behandelen op een dusdanige manier dat ook vele generaties na ons ze nog zullen kunnen bewonderen.

INDUSTRIËLE TOEPASSINGEN

Radioactieve tracers kunnen gebruikt worden om bijvoorbeeld te volgen hoe bepaalde stoffen zich doorheen het productieproces in een chemische fabriek bewegen of om lekken op te sporen in ondergrondse leidingen. Ze spelen ook een rol in de (kwaliteits)controle van heel wat industriële fabricageprocedures. Het gaat hierbij telkens om niet-destructieve controles die de fabricagecyclus niet verstoren. Zo wordt er in de petrochemische sector in raffinaderijen bijvoorbeeld een kleine hoeveelheid argon-41-atomen toegevoegd in de fase waarin de zware



Kernenergie
beter begrijpen

Toepassingen in andere sectoren

fuel wordt 'gekraakt' (proces waarbij moleculen en alkanen zich door verhitting, dikwijls in aanwezigheid van een katalysator, in kleinere moleculen splitsen). De ingenieurs volgen op die manier het productieproces, brengen verbeteringen aan, en zorgen er zo voor dat automobilisten uiteindelijk kwalitatief betere brandstof tanken aan de pomp.

In grote cementfabrieken gaan de stortbakken die de grondstoffen aanvoeren voorbij een neutronenbron. De gammastralen afkomstig van de desexcitatie van de geactiveerde kernen geven informatie over de exacte samenstelling van de mengeling, waardoor het mogelijk wordt om permanent bij te sturen en cement te produceren van een constante kwaliteit.

In veel hogere stralingsdoses wordt radioactiviteit ook gebruikt om de mechanische en chemische eigenschappen van materialen te wijzigen. Zo bestaat er bijvoorbeeld een industrieel procedé dat vergelijkbaar is met dat voor de restauratie van oude meubelen, en waarbij zacht hout wordt veranderd in een parket zo hard als steen. Deze hoogresistente parketvloeren worden bijvoorbeeld toegepast op plaatsen die heel intensief gebruikt worden, zoals luchthavens, openbare gebouwen, grote winkels, musea enz.

Er bestaan nog tal van andere industriële toepassingen waarbij gebruik wordt gemaakt van radio-elementen **in gesloten bron**, zodat enkel de straling kan ontsnappen en de materie van de stralingsbron zelf niet in het milieu terecht komt (men spreekt dan over stralende, maar niet-besmettende bronnen). Voor 1940 bestonden enkel de radiumbronnen die gebruikt werden in de geneeskunde. Na de Tweede Wereldoorlog, met de opkomst van de kernreactor en de eerste cyclotrons, werd het mogelijk om nieuwe stralingsbronnen aan te maken en ontstonden ook heel wat nieuwe industriële toepassingen, veelal in domeinen waar er geen gelijkwaardige alternatieven bestonden zonder het gebruik van radioactiviteit.

De **industriële radiografie** is een niet-destructieve analysemethode. Met behulp van X-stralen of γ -stralen wordt de kwaliteit gecontroleerd van metalen onderdelen, lasnaden, afgietsels enz. Op veel werven is het vaak niet mogelijk om X-stralen te gebruiken en maakt men gebruik van radio-elementen in gesloten bron. De meest gebruikte isotopen zijn kobalt-60, iridium-192, selenium-75,

thulium-170, ytterbium-169 en cesium-137. Ook neutronbundels worden gebruikt in de industriële neutrografie (bijvoorbeeld om vliegtuigvleugels te onderzoeken op sporen van corrosie).

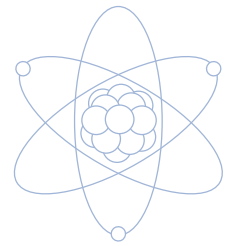
Industriële meet-, analyse- en beproevingsapparatuur is erg divers, en maakt veelal gebruik van een van de onderstaande isotopen: cesium-137, kobalt-60, americium-241, krypton-85, strontium-90, promethium-147 en radium-226, al of niet gekoppeld met beryllium. We kunnen een onderscheid maken tussen de volgende families:

- transmissiemetingen, waarbij dichtheden of vloeistofstromen worden gemeten (bv. in de brouwerijsector);
- retrodiffusiemetingen, waarbij vochtigheid of corrosie wordt gemeten;
- reactiemetingen, die gebruik maken van verschijnselen zoals X-fluorescentie en die de bestanddelen van bepaalde materialen (bv. van verf) of ertsen analyseren, of de dikte van bepaalde lagen.

Bij de exploitatie van boorputten worden talrijke bronnen gebruikt voor de meting van de dichtheid, de poreusheid, de vochtigheid, het koolwaterstofgehalte van bepaalde geologische structuren of materialen. Cesium-137 is daarvoor de meest gebruikte isotoop, met neutronenbronnen zoals americium, beryllium, plutonium/beryllium of ra-

Radiografie van een pijplijnverbinding, controle op eventuele scheurtjes





Toepassingen in andere sectoren

dium/beryllium. Er zijn vier types van technieken:

- gammametingen, die het mogelijk maken gesteentes te identificeren aan de hand van hun natuurlijke straling (uranium, thorium, kalium);
- neutronenmetingen, die het mogelijk maken de porositeit van de gesteentes te evalueren;
- gamma/gammametingen, gebruikt om gassen op te sporen;
- neutronen/gammametingen, die de hoeveelheid chloor en zouten in kaart brengen.

Antistatische apparatuur wordt gebruikt om elektrostatische problemen te ondervangen in sectoren waar vonkjes en stofdeeltjes voor grote problemen kunnen zorgen, zoals in de elektronicasector. Deze apparatuur maakt veelal

gebruik van stralingsbronnen (alfastralen) met grote afmetingen, hoofdzakelijk americium-241, radium-226 en polonium-210.

Tot slot willen we aan het einde van dit korte overzicht, dat lang niet alle toepassingen vermeldt van radioactiviteit in andere sectoren dan de geneeskunde en de elektriciteitsproductie, toch nog even de **toepassingen in de ruimtevaart** vermelden. Al sinds de jaren '60 gebruikt men radioactieve bronnen om elektriciteit te produceren aan boord van ruimtetuigen. Er werden thermo-elektrische generatoren ontwikkeld om de energie die ontstaat uit radioactief verval om te zetten in elektriciteit. Zo kan plutonium-238 zonder al te grote ongemakken worden gebruikt gedurende een periode van zowat vijf jaar.

Toepassing	Radio-element	Activiteit van de bron
Industriële radiografie	¹⁹² Ir ⁶⁰ Co (¹³⁷ Cs, ¹⁷⁰ Tm, ¹⁶⁹ Yb)	0.1-5 TBq 0.1-5 TBq
Boorputten	²⁴¹ Am/Be ¹³⁷ Cs (²⁵² Cf)	1-800 GBq 1-100 GBq
Vochtigheidsdetectoren	²⁴¹ Am/Be ¹³⁷ Cs (²⁵² Cf, ²²⁶ Ra/Be)	0.1-2 GBq 400 MBq
Overdrachtsmetingen	¹³⁷ Cs	0.1-40 GBq
Dichtheidsmetingen	¹³⁷ Cs ²⁴¹ Am	1-20 GBq 1-10 GBq
Niveaubepaling	¹³⁷ Cs ⁶⁰ Co (²⁴¹ Am)	0.1-20 GBq 0.1-10 GBq
Diktebepaling	⁸⁵ Kr ⁹⁰ Sr (¹⁴ C, ¹⁴⁷ Pm, ²⁴¹ Am)	0.1-50 GBq 0.1-4 GBq
Antistatische apparatuur	²⁴¹ Am ²¹⁰ Po (²¹⁶ Ra)	1-4 GBq 1-4 GBq
Reactiemetingen	⁵⁵ Fe ¹⁰⁹ Cd (²³⁸ Pu, ²⁴¹ Am, ⁵⁷ Co)	0.1-5 GBq 1-8 GBq



De productie van elektriciteit

Het werkingsprincipe van een kerncentrale verschilt in wezen niet van dat van een centrale met fossiele brandstof. Alleen de manier waarop de warmte geproduceerd wordt, is verschillend. Kerncentrales gebruiken, in een reactor, de splijting van uranium- en plutoniumatomen als warmtebron, terwijl de zogenaamde 'klassieke' centrales warmte produceren door de verbranding van aardgas, steenkool of aardolie. In beide gevallen zorgt de productie van warmte ervoor dat water in stoom wordt omgezet.

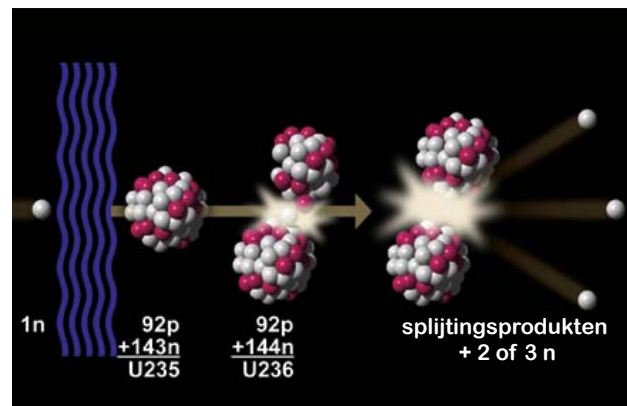
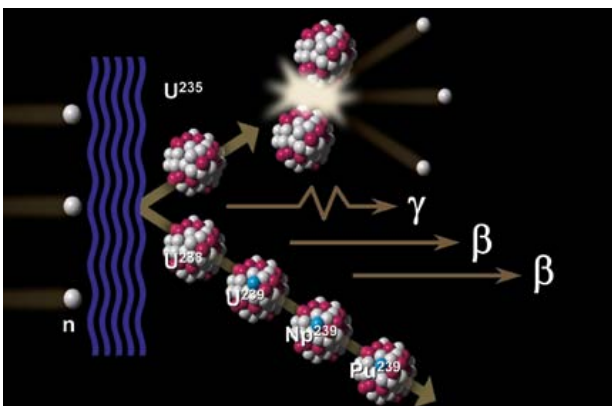
VAN SPLIJTINGSENERGIE EN KETTINGREACTIES...

In een reactor met kernsplijting wordt de energie verkregen wanneer een zware atoomkern (zoals uranium-235⁹) die door een neutron wordt beschoten in twee lichtere kernen breekt. Behalve deze twee splijtingsproducten komen door de splijting ook enkele neutronen vrij, alfa- en bètadeeltjes en gammastralen. Er zijn ongeveer 2.000¹⁰ splijtingsproducten bekend die de isotopen vormen van een dertigtal scheikundige elementen. De meeste van deze producten zijn radioactief en evolueren door opeenvolgende desintegraties naar een stabiele toestand (zie hoofdstuk 2). De massa verkregen deeltjes en splijtingsproducten is een fractie lichter dan de oorspronkelijke massa gevormd door de zware atoomkern en het

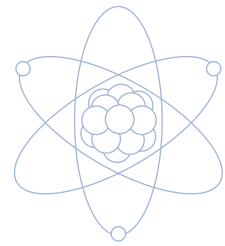
neutron dat de kern heeft doen splitsen. De ontbrekende massa op het einde is niet verdwenen, maar omgezet in energie, volgens de wet van Einstein¹¹ $E = mc^2$, in de vorm van warmte. De vrijgemaakte thermische energie is hoofdzakelijk afkomstig van de kinetische energie of bewegingsenergie van de deeltjes van de kern van het oorspronkelijke uraniumatoom. Per gesplitst atoom uranium-235 is de vrijgemaakte energie gelijk aan 200 miljoen elektronvolt¹² (Mev).

Een splijting van een tiental atomen uranium-235 levert gemiddeld 23 neutronen op. Deze neutronen hebben de neiging te worden gevangen door absorberende materialen (boor, cadmium, gadolinium) of te ontsnappen uit het milieu waarin de splijting plaatsvindt. Om een evenwichtige kettingreactie te krijgen, is het noodzakelijk één neu-

Schema van de splijtingsreactie en omzetting U^{238} in Pu^{239}



9. Uranium, het zwaarste element dat overvloedig in natuurlijke toestand voorkomt, heeft het ideale profiel voor de uitvoering van een splijtingsreactie en vertoont dus fysische eigenschappen waardoor het bruikbaar is als splijtstof in kerncentrales. Met name een van zijn isotopen, uranium-235, is splijtbaar. Maar hoewel uranium relatief overvloedig op aarde voorkomt, is de verhouding van het splijtbare isotoop 235 miniem (0,7%) ten opzichte van het niet splijtbare isotoop 238 (99,3%).
10. 24 uur na de stopzetting van de splijtingen, blijven er ongeveer 200 over die nog radioactief zijn.
11. m : massa; c : lichtsnelheid (in het luchtledige).
12. De elektronvolt (ev) stemt overeen met de energie die een elektron verkrijgt bij het doorlopen van een potentiaalverschil van één volt. Een elektronvolt is gelijk aan $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule of $4,44 \cdot 10^{-23}$ wattuur.



tron te recupereren per gesplitst atoom uranium om een nieuwe splijting te produceren. Bij het merendeel van de huidige reactoren (zoals de Belgische reactoren, zie p. 38) moeten de vrijgemaakte neutronen worden ‘afgeremd’ opdat ze zouden worden geabsorbeerd door het uranium-235 (en het splijten), en niet door het uranium-238, dat een neutron kan opsorpen om een nieuw splijtbaar element te vormen, plutonium-239. Deze afremmende rol wordt uitgeoefend door de moderator. De neutronen die vrijkomen uit de kernen bij de splijting en afgeremd worden door de moderator zullen andere atoomkernen treffen die op hun beurt zullen worden gesplitst en dus warmte en straling zullen produceren en andere neutronen vrijmaken.

Wanneer elke splijting wordt gevolgd door een nieuwe splijting, houdt de kettingreactie zichzelf in stand en levert ze een aanzienlijke en constante hoeveelheid warmte. We zeggen dan dat de reactor “kritisch” is.

... NAAR DE PRODUCTIE VAN ELEKTRICITEIT

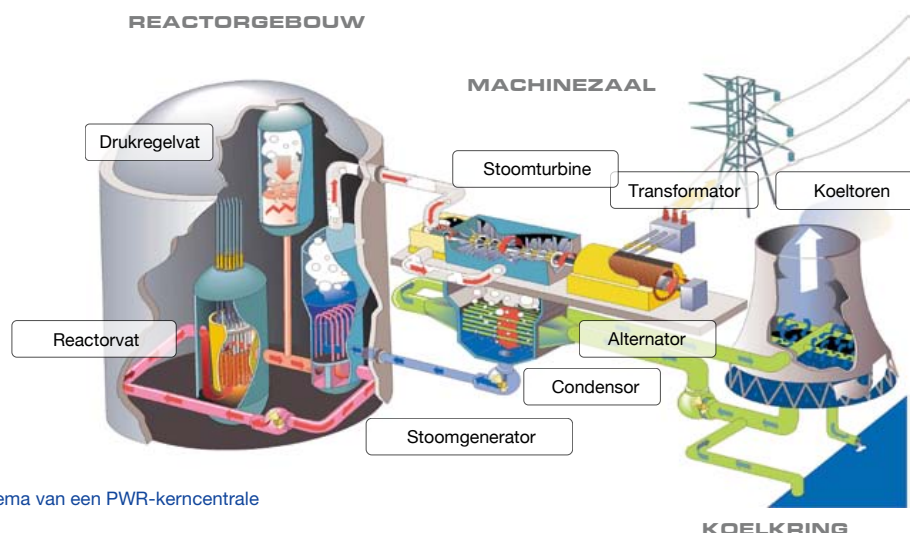
De splijtingsmateries, die in de splijtstofstaven zitten, zetten hun kinetische energie dus om in warmte en verwarmen het water van het primaire circuit dat een gemiddelde temperatuur van 300°C bereikt. Dankzij het **drukregelvat** wordt het water onder druk gehouden (155 bar), waardoor het niet kookt. Dit water speelt niet alleen een rol als moderator maar dient ook als warmtetransporteur: in contact

met het hart van de reactor geeft het zijn warmte af aan het water van het secundaire circuit in de **stoomgenerator** (grote cilindervormige warmtewisselaars bestaande uit duizenden buizen in de vorm van een omgekeerde U en vastgelast op een buisvormige plaat). Het water van dit secundaire circuit wordt vervolgens omgezet in stoom. Deze twee circuits zijn hermetisch van elkaar gescheiden.

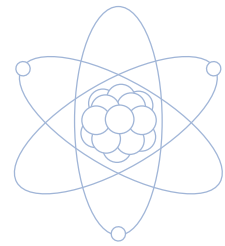
De geproduceerde stoom ontspant zich nadien in meerdere turbines die een alternator aandrijven. Deze laatste zet de mechanische energie om in elektriciteit die het hoogspanningsnet zal voeden.

Na de turbines in werking te hebben gezet, wordt de stoom “aangezogen” door de onderdruk die gecreëerd wordt in de condensor. Bij het contact met de duizenden buizen waaruit deze condensor bestaat, wordt de stoom “gecondenseerd” dankzij het koude water (dat afkomstig kan zijn van een waterloop of van de zee) van een tertiair circuit. Het water van het secundaire circuit stroomt daarna terug naar de stoomgeneratoren.

De **koeltoren**, die zowel bij klassieke thermische centrales als kerncentrales aanwezig is, dient zoals zijn naam het zegt om het water van het tertiaire circuit te koelen dankzij een natuurlijk luchtcirculatie. Het gekoelde water kan eventueel opnieuw worden gebruikt in de condensor. Slechts 1,5% van dit niet-radioactieve water ontsnapt uit de koeltoren in de vorm van stoom: dit is de ‘rookpluim’ die bijna permanent boven de koeltoren hangt.

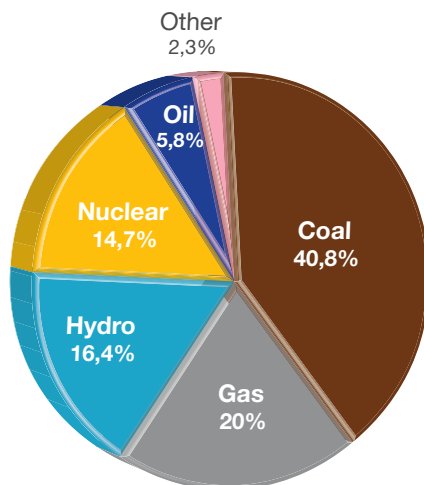


Werkingschema van een PWR-kerncentrale



DRUKWATERREACTOR: HET BELANGRIJKSTE REACTORTYPE

Half 2009 waren er wereldwijd 436 kerncentrales operationeel in 30 landen, goed voor een totale netto geïnstalleerde capaciteit van 372.000 GW(e) en 45 installaties in aanbouw¹³. Ze leveren bijna 15 % van de totale wereldproductie aan elektriciteit.



Bron: OESO/IEA 2006

Ze behoren tot verschillende families of kernreactortypes. Elk van die types kenmerkt zich door het geheel van aangewende technieken om elektriciteit te produceren in een kernreactor. Het procedé wordt bepaald door drie elementen: de **splijstof**, de **moderator** (een neutronenvertragende stof) en de **warmtetransporterende vloeistof**.

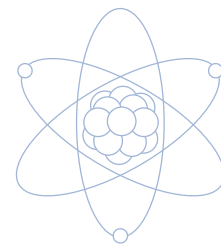
Het Pressurized Water Reactor of PWR-type vertegenwoordigt 75% van de geproduceerde elektriciteit door actieve kerncentrales in de Europese Unie en 61% in de wereld. Een ander belangrijk type (goed voor 21% van de geproduceerde elektriciteit door actieve kernreactoren in de wereld) is de BWR (Boiling Water Reactor) of reactor met kokend water. Daarnaast zijn er nog andere types reactoren (18 % van het wereldpark), zoals GCR (Gas Cooled Reactor), PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor, ook CANDU genaamd), FBR (Fast Breeder Reactor), RBMK (of LWGR voor Light Water Graphite Reactor).

NUCLEAR POWER PLANTS INFORMATION OPERATIONAL & LONG TERM SHUTDOWN REACTORS BY TYPE

Operational		
Type	No of Units	Total MW (e)
BWR	92	83656
FBR	2	692
GCR	18	8909
LWGR	16	11404
PHWR	44	22441
PWR	264	243121
Total	436	370221

Above data from PRIS database (IAEA). Last updated on 2009/05/06

13. Bron: PRIS (Power Reactor Information System) - IAEA



DE GESCHIEDENIS VAN DE BELGISCHE KERNENERGIE

België is een van de pioniers geweest in de ontwikkeling van kernenergie. Hoewel ons land eerder toevallig in de atoomgeschiedenis is terechtgekomen door de mijnen in Kongo, eerst van radium en later van uranium, heeft het nadien een actieve rol gespeeld in de buitengewone opgang van de atoomenergie in de jaren 50 en 60. De eerste Belgische nucleaire experimenten werden voor het merendeel uitgevoerd in het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) in Mol. Op 11 mei 1956 werd de eerste gecontroleerde kettingreactie verkregen met de onderzoeksreactor BR 1 (Belgian Reactor 1), die nog altijd in werking is. België was het derde land in West-Europa, na Groot-Brittannië en Frankrijk, dat erin slaagde een nucleaire kettingreactie in een reactor te verwezenlijken. Zeer snel na dit eerste succes besloot ons land een proefreactor voor het bestralen van materialen te bouwen en in gebruik te nemen (BR 2) evenals een krachtige experimentele kernreactor met het doel elektriciteit te produceren (BR 3).

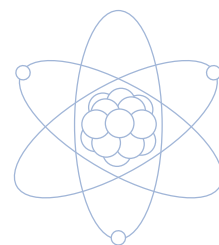
De reactor BR 2, die in 1961 in bedrijf werd gesteld, wordt gebruikt in het onderzoek naar het gedrag van reactormaterialen en splijtstoffen onder bestraling. De reactor produceert ook radio-isotopen voor medische en industriële toepassingen. Die activiteit wordt verder ontwikkeld in het Nationaal Instituut voor Radio-isotopen in Fleurus, dat vandaag internationale faam in dit domein geniet.

In 1962 werd de eerste Belgische reactor voor de productie van elektriciteit, BR 3, in gebruik genomen. Het oorspronkelijke plan was om die te installeren op de terreinen van de Expo '58 in Brussel. In oktober 1962 werd deze reactor met een vermogen van 11,2 MWe op het elektriciteitsnet aangesloten. De exploitatie ervan werd in handen gegeven van de elektriciteitsproducenten.

Het was, na de Verenigde Staten, de eerste reactor type die werkte met water onder druk (PWR). Het personeel van de toekomstige centrales van Doel en Tihange kreeg hier zijn opleiding. Vanaf 1963 diende de reactor ook om MOX-splijtstof (mengsel van uranium- en plutoniumoxides) in reële omstandigheden te testen. In 1987 werd hij definitief buiten gebruik gesteld na elf werkingscampagnes. Toch doet de BR 3 nog altijd dienst, want de reactor werd door de Europese Commissie aangeduid als pilootinstallatie voor het onderzoek naar de ontmanteling van kernreactoren.

In de periode dat de eerste reactoren werden opgestart, werd de elektriciteitsproductie in België voor drie vierde verzekerd door steenkoolcentrales. Een groot deel van deze steenkool was afkomstig uit Belgische mijnen. Deze mijnbouw was echter hoe langer hoe minder rendabel, terwijl ook het elektriciteitsverbruik voortdurend bleef toenemen. Van 1950 tot vandaag is het wereldverbruik aan elektriciteit vertwaalfvoudigd. Deze groei is in twee fasen verlopen: een snelle groei tot 1973 (de eerste oliecrisis), en daarna een tragere groei. Steenkool, waarop de Europese industriële ontwikkeling in de 19de en de eerste helft van de 20ste eeuw steunde, werd vanaf de jaren '60 geleidelijk vervangen door andere energiebronnen.

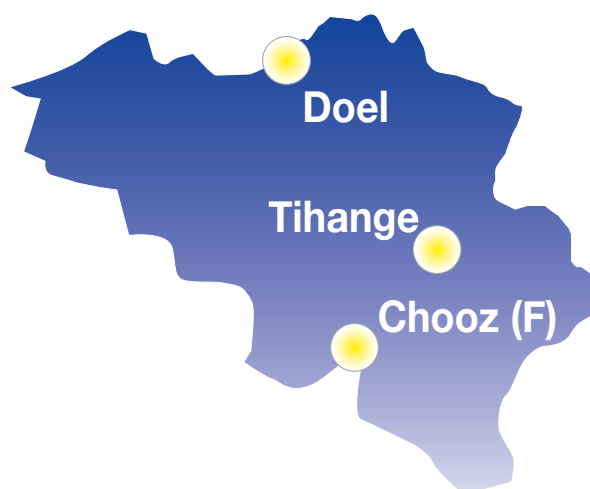
In de ogen van de beleidsvoerders leek uranium al snel het vervangmiddel bij uitstek voor steenkool om elektriciteit te produceren. Dankzij de hoeveelheden elektriciteit die met behulp van kernenergie konden worden opgewekt, kon men de toekomst met een gerust hart tegemoet zien. De eerste Belgische kerncentrale werd in samenwerking met Frankrijk gebouwd in Chooz, in een bocht van de Maas op het grondgebied van de Franse gemeente Givet. Deze PWR-centrale (Pressurized Water Reactor – Drukwaterreactor), waarvan de reactor destijds de krachtigste ter wereld was (242 MWe), begon elektriciteit aan het hoogspanningsnet te leveren in 1967. De centrale werd definitief buiten gebruik gesteld in 1991.



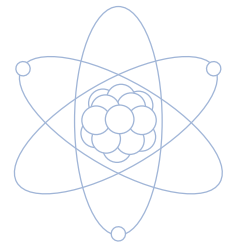
De centrale van Chooz, Chooz A genaamd, heeft België en Frankrijk in de gelegenheid gesteld knowhow en ervaring op te doen, zowel wat betreft de fabricage van materiaal om de toekomstige kerninstallaties mee uit te rusten als inzake het dagelijkse beheer van een centrale. Na de inbedrijfstelling van Chooz A besloot België van start te gaan met zijn eigen elektronucleair programma. Hiervoor werden twee sites uitgekozen: Doel, op de linkeroever van de Schelde, stroomafwaarts van Antwerpen, en de industriezone van Tihange, op de rechteroever van de Maas, stroomopwaarts van Luik. De eerste reactoren kwamen in industriële exploitatie in 1975 (Doel 1, Doel 2 en Tihange 1). Deze drie eenheden werden tussen 1982 en 1985 aangevuld met Doel 3, Tihange 2, Doel 4 en Tihange 3.

In 1973, het jaar van de eerste oliecrisis, werd de elektriciteitsproductie in België voor 52% verzekerd door aardolie en voor 0,2% door kernenergie (geleverd door BR 3). In de jaren '80 schommelde het aandeel van de kernenergie gemiddeld rond 66%. Met andere woorden, twee lampen op drie in België brandden toen op kernenergie.

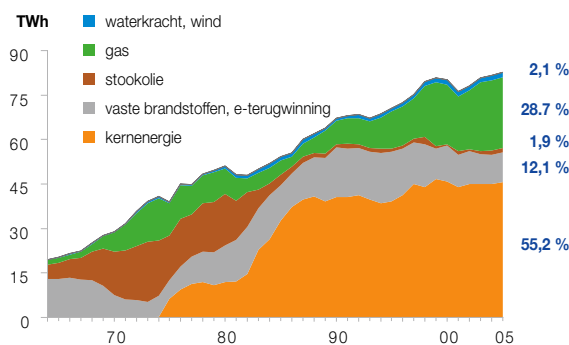
De kernparken van Doel, Tihange en Chooz



Eenheid	Inbedrijfstelling	Ontwikkelbaar vermogen	Splijtstof
Nucleaire productiezone Doel		2839,5 MW	
Doel 1	1975	392,5 MW	UO ₂
Doel 2	1975	433 MW	UO ₂
Doel 3	1982	1 006 MW	UO ₂ en MOX
Doel 4	1985	1 008 MW	UO ₂
Nucleaire productiezone Tihange		2 985 MW	
Tihange 1	1975	962 MW	UO ₂
Tihange 2	1983	1 008 MW	UO ₂ en MOX
Tihange 3	1985	1 015 MW	UO ₂



Evolutie van de gebruikte energiebronnen in de Belgische elektriciteitscentrales tussen 1964 en 2005



De politieke toestand in België en Europa

België

In februari 2003 verscheen in het Belgisch Staatsblad de wet met de principiële beslissing van de federale regering om de elektriciteitsproductie door middel van kerncentrales in België stop te zetten. In de praktijk voorziet deze wet de sluiting van de zeven actieve kernreactoren in België (splijting) na een maximale duur van 40 jaar vanaf de datum van hun eerste inbedrijfstelling. Dat betekent dus in 2015 voor de eerste reactoren, Doel 1/2 en Tihange 1, en in 2025 voor de recentere reactoren. De wet bepaalt echter dat een uitzondering kan worden toegestaan in geval van 'overmacht' (bijvoorbeeld om de energiebevoorrading van het land te garanderen).

Het is belangrijk te onderstrepen dat het hier om een zuiver **politieke beperking** gaat.

In de exploitatievergunningen voor de Belgische kerncentrales wordt immers geen enkele wettelijke levensduur vermeld¹⁴. Heel wat waarnemers stellen zich vragen over het realisme van deze beslissing. Ten eerste omdat er geen enkel geloofwaardig alternatief wordt gegeven voor de productie van elektriciteit op basis van kernenergie (55% van de Belgische productie), maar ook omdat deze beslissing negatieve gevolgen zal hebben voor België, zowel op economisch vlak als inzake milieunormen (Kyoto) en bevoorradingszekerheid.

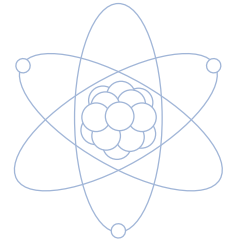
Is het mogelijk om aan de vraag naar elektriciteit in België te voldoen zonder kernenergie?

In theorie is dit mogelijk. Maar zelfs in de veronderstelling van een maximale exploitatie van hernieuwbare energie, zal bijna 90% van de Belgische elektriciteitsproductie afkomstig zijn van gas en steenkool, die broeikasgassen uitstoten en de energieafhankelijkheid van ons land vergroten.

En in Europa? (situatie 2006)

Kerncentrales leveren 31% van alle elektriciteit in West-Europa. Slechts zeven West-Europese landen beschikken niet over kernenergie. Landen zoals Italië, Duitsland, Zweden en België hebben geopteerd voor een uitstapprogramma. Finland, Frankrijk en Bulgarije hebben daarentegen beslist om een nieuwe reactor te bouwen en in 2007 is een nieuwe reactor opgestart in Roemenië. Er moet op gewezen worden dat de Europese landen die gekozen hebben voor een uitstap uit kernenergie niet over alternatieven beschikken die een zekere en milieuvriendelijke energiebevoorrading kunnen waarborgen. Het meest frappante **voorbeeld** is wellicht **Zwe-**

14. De exploitanten moeten evenwel om de 10 jaar een 'veiligheidsexamen' afleggen. Het gaat om een grondige revisie waarbij de installaties worden geïnspecteerd en zo nodig aangepast aan de technische evolutie en aan de geldende normen en voorschriften, wat aanzienlijke investeringen vereist.

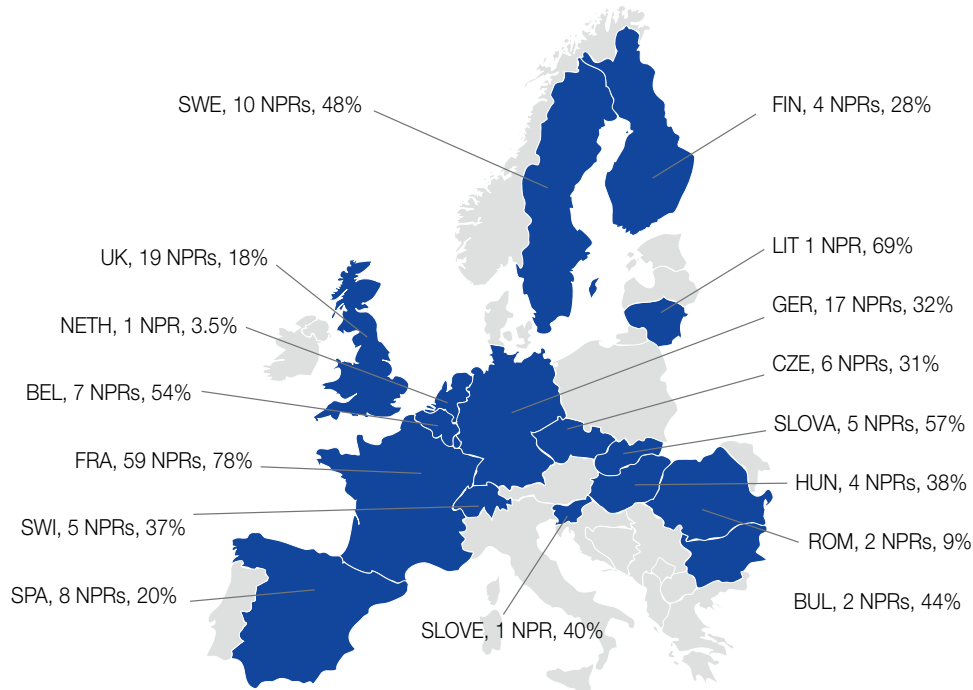


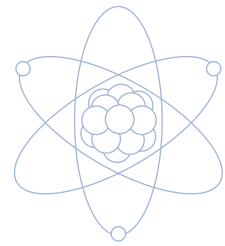
den. In 1980 werd er een referendum gehouden, waarbij het land besliste om binnen de tien jaar uit kernenergie te stappen. Dat moest mogelijk worden door energiebesparingen door te voeren en in grotere mate een beroep te doen op hernieuwbare energievormen. In 1999 (hoewel de vooropgestelde doelstellingen niet waren gerealiseerd) werd de onderneming Sydkraft door een politieke beslissing verplicht om, weliswaar na ontvangst van een schadevergoeding, de centrale 1 van Barsebäck te sluiten (600 MW).

Sinds die sluiting importeert Zweden 4 miljard kWh per jaar, afkomstig uit steenkoolcentrales (met bijgevolg een hoge CO₂-uitstoot) en heeft het land het stilleggen van de centrale Barsebäck 2, oorspronkelijk voorzien voor juli 2001, uitgesteld tot een niet nader bepaalde datum. De energieoperator van de Zweedse staat is zelfs van plan om de komende 15 jaar 1,9 miljard dollar te investeren in de renovatie van de overblijvende reactoren.

Situation en Europe

(source : World Nuclear Association (% GWh 2006, réacteurs exploités en 2008))





Op 1 mei 2004 zijn tien landen uit Centraal-, Oost- en Zuid-Europa toetreden tot de Europese Unie. De buitengrenzen van de Unie zijn in het oosten verlegd naar Estland, Hongarije, Letland, Litouwen, Polen, Slovenië, Slowakije en Tsjechië, in het zuiden naar Cyprus en Malta. In vijf van de nieuwe lidstaten wordt een deel van de elektriciteit geproduceerd op basis

van kernenergie, waardoor het totale aantal "kernlidstaten" is gestegen tot dertien. Ondanks moderniseringsprogramma's is bij de toetredingsonderhandelingen afgesproken dat de reactoren van de eerste generatie geleidelijk buiten gebruik zullen worden gesteld. Dat zal onder meer gebeuren in Litouwen (sluiting van de enige twee reactoren) en in Slowakije.

DE ROL VAN DE KERNENERGIE IN BELGIË

Kernenergie is goed voor 55 % van de elektriciteitsproductie in België (2009), dat is ongeveer het equivalent van **het volledige industriële verbruik, plus 20% van het huishoudelijke verbruik in ons land**. Kernenergie is dus een belangrijke energiebron in de Belgische energiemix, samen met fossiele brandstoffen en hernieuwbare bronnen).

De elektriciteitsproductie op basis van kernenergie betekent in België ook:

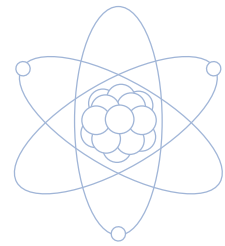
- **2.000 directe banen op een totaal van 4.500 rechtstreekse voor de nucleaire sector als geheel**
- gemiddeld **2.000.000 uren arbeid in onderaanneming** per jaar
- **meer dan 100 miljoen euro investeringen** op jaarbasis.

De energiebevoorrading

Voor onze energiebevoorrading kan kernenergie als een veilige, betrouwbare energiebron worden beschouwd. De uraniumreserves zijn verspreid over verschillende, overwegend stabiele regio's : Australië, Noord-Amerika, Afrika en Centraal-Azië. Die spreiding garandeert zowel de zekerheid als de diversiteit van de bevoorrading, zeker als het tot een plotselinge onderbreking van de fossiele brandstofbevoorrading zou komen. Dat risico is niet ondenkbaar als men weet dat de belangrijkste voorraden geconcentreerd zijn in potentieel instabiele gebieden zoals het Midden-Oosten. Vanuit strategisch oogpunt vormt kernenergie voor Europa, en in het bijzonder voor West-Europa en voor de landen die over onvoldoende fossiele brandstoffen beschikken, een belangrijke factor van stabiliteit en energieonafhankelijkheid.

Bovendien kan splijtstof gemakkelijk en tegen aanvaardbare prijzen worden opgeslagen zodat centrales altijd over een reserve beschikken. In België ligt, overeenkomstig de Euratom-norm, altijd voor twee jaar reserve opgeslagen

Het is goed eraan te herinneren dat er binnen de 25 landen van Europa ook uraniumreserves aanwezig zijn (Frankrijk, Spanje, Bulgarije, Roemenië enz.), waarvan de exploitatie om economische redenen is stopgezet op het ogenblik dat de U-prijs wereldwijd sterk gedaald was.



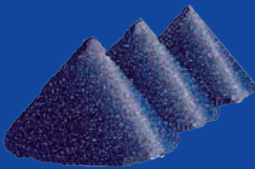
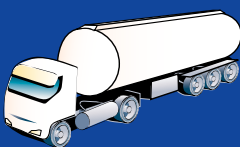
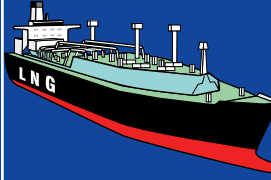
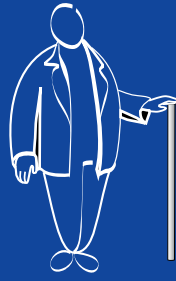
Fossiele brandstoffen besparen

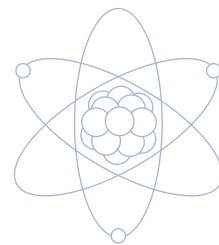
Het energiepotentieel van uranium is bijzonder groot. Voor de productie van 100.000 kWh heeft men 35.000 kg steenkool, 25.000 liter stookolie, 30.000 m³ aardgas of... amper 400 gram uranium nodig. De productie van een kerncentrale van 1000 MWe gedurende een kalenderjaar (8760 uur) bedraagt 8,76 miljard kilowattuur, wat overeenstemt met een volume van 1.880.000 TAE (ton aardolie equivalent) of 2.690.000 TSE (ton steenkool equivalent)! Rekening houdend met het feit dat 45 miljard kilowatt-

uur in België van nucleaire oorsprong is, betekent dat maar liefst **10 miljoen ton aardolie die elk jaar worden bespaard, of bijna 14 miljoen ton steenkool.**

Naast de besparing van fossiele brandstoffen is het dankzij het gebruik van kernenergie ook mogelijk om soms zeer belastende transportstromen te vermijden. Als we een centrale van 1000 MW als basis nemen, is er per jaar 20 ton splijtstof nodig (1 vrachtwagen per jaar) voor kernenergie, 2.500.000 ton (2 tot 3 treinen per dag) voor steenkool en ongeveer 30 gastankers van 130.000 m³ in het geval van gas.

Hoeveelheid brandstof nodig voor de productie van 100 000 kWh

Steenkool	Stookolie	Aardgas	Verrijkt uranium
35 000 kg	25 000 l	30 000 m ³	400 g
			



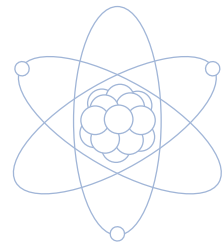
Hoe lang kunnen we met de bestaande uraniumvoorraden nog kernenergie produceren?

We nemen als uitgangspunt het 'Red Book' van de OESO en het IAEA, dat al sinds 1965 de evolutie van de uraniummarkt volgt en daarbij rekening houdt met verschillende zienswijzen en hypothesen, zowel met betrekking tot het aanbod als de vraag naar uranium. Een eerste vaststelling is dat indien alle kerncentrales ter wereld samen een elektriciteitsproductie zouden moeten blijven leveren die gelijk is aan de totale productie van 2004, dat de (in 2005) geïdentificeerde conventionele uraniumvoorraden dan nog volstaan om gedurende **85 jaar** de uraniumbehoefte te dekken. Als we een ander criterium nemen voor het uraniumaanbod, met name zowel de geïdentificeerde voorraden, de bewezen voorraden als de geschatte voorraden, dan volstaan de ontginbare reserves nog

voor **270** jaar. En als we nog een stap verder gaan en ook rekening houden met niet-conventionele bronnen en uranium uit secundaire bronnen (zoals fosfaten), dan gaat het rapport ervan uit dat de uraniumvoorraden nog volstaan voor **675** jaar. Deze cijfers houden nog geen rekening met de opwerking en recyclage van gebruikte splijtstof. Laten we ook niet voorbijgaan aan de technologische evolutie: de nieuwe types kernreactoren zullen in staat zijn om op basis van veel minder uranium dezelfde hoeveelheid elektriciteit te produceren als de huidige reactoren. We zouden zelfs uranium kunnen onttrekken aan zeewater, wat de bevoorrading nagenoeg onbeperkt maakt, of thorium gaan gebruiken in de plaats van uranium als splijtstof bij de productie van elektriciteit. Hoe dan ook is de bevoorrading op lange termijn verzekerd. We beschikken nog over uraniumreserves voor honderden jaren, zelfs bij een aanzienlijke stijging van het verbruik.

Technologie	Aantal jaar (op basis van elektrische productie 2004) met geïdentificeerde bronnen	Aantal jaar (op basis van elektrische productie 2004) met totaal van conventionele bronnen	Aantal jaar (op basis van elektrische productie 2004) met totaal van conventionele bronnen en fosfaten
"Klassiek" (zoals PWR)	85	270	675
Snelle reactor met recyclage van splijtstof	2 570	8 015	19 930

Bron: "Uranium 2005: Bronnen, Productie en Vraag" (IAEA/OESO)



Leefmilieu

De productie van elektriciteit op basis van kernenergie gebeurt **zonder uitstoot van gassen of deeltjes die bijdragen tot het broeikas-effect**, de verzuring van het regenwater of de afbraak van de ozonlaag. De volledige productieketen – uraniumontginning, fabricage van splijtstofelementen, bouw, exploitatie, ontmanteling van de reactor en het afvalbeheer – genereert ongeveer hetzelfde koolstofequivalent per kWh als windenergie of waterkracht.

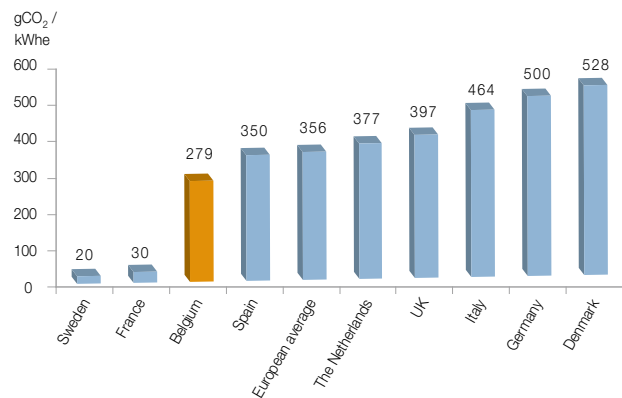
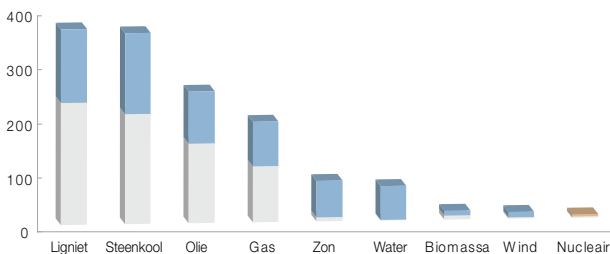
In ons land is de uitstoot van CO₂ per geproduceerde kilowattuur, dankzij de kernenergie, een van de laagste van Europa (279 g per kWh in 2004). Dit resultaat wordt alleen behaald door landen die eveneens gebruik maken

van kernenergie en/of door landen die beschikken over een grote capaciteit aan waterkrachtenergie.

De CO₂-uitstoot ten gevolge van elektriciteitsproductie bedraagt in België zowat 20 miljoen ton per jaar. Zonder kernenergie zou dit bijna 50 miljoen ton per jaar zijn. Kernenergie zorgt er dus voor **dat de productie van ongeveer 30 miljoen ton CO₂ per jaar vermeden wordt, of het equivalent van het volledige Belgische autopark.**

Volgens de Europese Unie wordt dankzij kernenergie in Europa (25 lidstaten) elk jaar de uitstoot van bijna 700 miljoen ton CO₂ vermeden, wat neerkomt op de uitstoot aan CO₂ van alle voertuigen voor personenvervoer in de Unie!

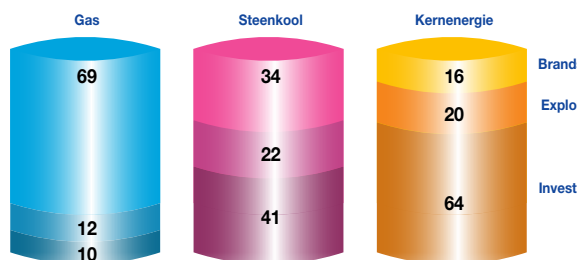
Uitstoot broeikasgassen
(gCO₂-equivalent/kWhe)



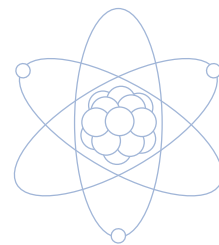
Bron: gemeenschappelijke gegevens AEN en IAEA.

Samenstelling van de kostprijs per brandstof

Elektriciteitsproductie (in %)



Bron: Ministerie van Economie, Financiën, Industrie (Frankrijk)



Economisch

De kostprijs van energie in het algemeen en van elektriciteit in het bijzonder is zowel een belangrijk element in ons hedendaagse leven als in het concurrentievermogen van ondernemingen. Dat concurrentievermogen is in het bijzonder van belang voor de sterk sectoraal ingedeelde Belgische industrie, die niet alleen veel energie verbruikt, maar ook aan heel wat mensen werk biedt.

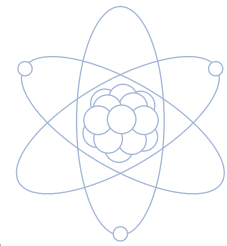
Er bestaan wereldwijd heel wat economische studies waarin een vergelijking wordt gemaakt van de productiekosten bij de verschillende manieren om elektriciteit te produceren. Helaas is het erg moeilijk om een van die studies eruit te pikken als referentiepunt, omdat men telkens vertrekt vanuit andere beginvoorwaarden en omdat ook de parameters, zeker de laatste jaren, heel snel evolueren. Daarom hebben wij ervoor gekozen om hierna gewoon zo objectief mogelijk een aantal vaststellingen te vermelden.

Eerst en vooral willen we erop wijzen dat de aantrekkelijkheid van een energie afhankelijk is van de specifieke context in de verschillende regio's van de wereld. Zo is elektriciteit op basis van steenkool over het algemeen economischer in regio's waar steenkool overvloedig aanwezig is of waar de uitstoot van koolstof weinig of niet wordt gesanctioneerd (o.a. Noord-China, het midwesten van de Verenigde Staten, Australië). In regio's die verder verwijderd zijn van fossiele brandstofvoorraden (o.a. Japan, Chinese kuststreken, Frankrijk, België) zorgen de hoge transportkosten van die brandstoffen ervoor dat kernenergie aantrekkelijker wordt.

Algemeen kunnen we stellen dat de markt ervoor zorgt dat de globale productiekosten van nieuwe kerncentrales en centrales op gas of steenkool in dezelfde grootteorde liggen. De komende jaren zullen verschillende factoren de concurrentiepositie van kernenergie t.o.v. de andere energiebronnen gaan bepalen:

- de investeringskosten zullen een belangrijke impact hebben. Dit speelt in principe in het nadeel van kernenergie, want de investeringskosten vertegenwoordigen zowat 60% van de kostprijs van de geproduceerde elektriciteit (in tegenstelling tot zowat 20% bij gas en 40 tot 50% bij steenkool);
- de kostprijs van fossiele brandstoffen. Gascentrales zijn hier erg afhankelijk van (60 tot 80%, t.o.v. 40% bij steenkoolcentrales. Bij kernenergie bedraagt de afhankelijkheid van de brandstofprijzen slechts 15%, waarvan slechts 5%¹⁵ rechtstreeks verbonden is aan de uraniumbevoorrading);
- de mate waarin de uitstoot van koolstof (fiscaal) gesanctioneerd zal worden. Dit speelt in het voordeel van kernenergie;
- het feit dat industriëlen en bedrijven op middellange en lange termijn zicht moeten hebben op de energiekostprijs. In die optiek, en zelfs los van het prijsaspect, is het duidelijk dat kernenergie op lange termijn een goed zicht biedt op de kosten; die termijn kan zelfs samenvallen met het einde van de levensduur van de centrales.

15. Zelfs een gevoelige stijging van de uraniumprijs zou geen grote invloed hebben op de productiekost van elektriciteit op basis van kernenergie.



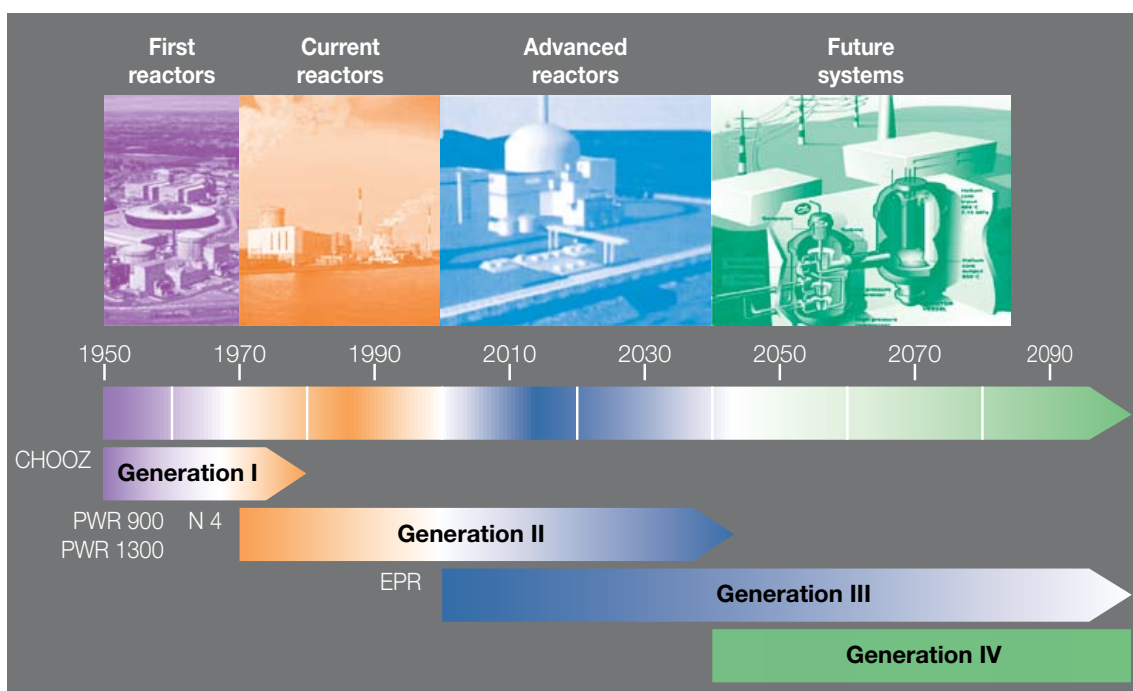
TOEKOMST

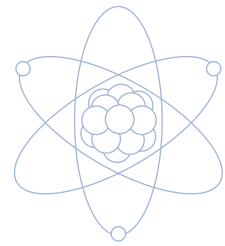
De nucleaire sector wordt gekenmerkt door nieuwe projecten voor de korte termijn en denkpistes voor de langere termijn. Voor die reactortypes van de toekomst wordt een onderscheid gemaakt tussen 'evolutionaire' en 'revolutionaire' reactoren.

De eerste types zijn al in aanbouw (Finland, Frankrijk, China) en kunnen op korte termijn in gebruik worden genomen. Ze worden 'evolutionair' genoemd omdat ze afgeleid zijn van de reactoren die momenteel in werking zijn. Ze zijn m.a.w. gebouwd volgens hetzelfde principe en bouwen voort op de ervaring die de voorbije tientallen jaren werd opgedaan in een aantal grote reactoren. Deze **evolutionaire reactoren** worden ook vaak reactoren van **Generatie III (of III+)** genoemd, of reactoren van **Generatie 2015**. Daarnaast zijn er de zogenaamde **revolutionaire reactoren of reactoren van Generatie IV**, die vanuit technologisch oogpunt fundamenteel verschillen met de huidige reactoren en waarvoor de ingebruikname mogelijk is **tegen 2035**.

Op korte termijn: de generatie 2015

Wanneer men het heeft over Generatie 2015, doelt men op reactoren die tegen die datum commercieel in gebruik kunnen worden genomen en dus bijdragen tot de vernieuwing van het huidige park. Ze vormen een perfectionering van de vorige generatie en zijn geoptimaliseerd met het oog op recentere regelgeving. De meest geavanceerde van deze reactoren, zoals de ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) van General Electric, zijn momenteel al functioneel. En ook de EPR (European Pressurized Water Reactor) van AREVA en de AP 1000 (Advanced Passive Pressurized Water Reactor) van Westinghouse BNFL (USA/UK), zijn in aanbouw in Europa, China en de Verenigde Staten.





De EPR en de AP 1000: drukwaterreactoren die veiliger en krachtiger zijn dan hun voorgangers.

Deze reactortypes beschikken over een aantal innovaties die hun gebruiksveiligheid als drukwaterreactor nog verhogen en tegelijk hun prestaties en dus hun beschikbaarheid verbeteren. Op het vlak van de veiligheid is de nadruk veel meer komen liggen op preventie dan op het neutraliseren van de gevolgen. Van bij het ontwerp zijn de nodige voorzieningen ingebouwd om “zware ongevallen” op te vangen en ook de beveiliging tegen externe ongevallen is verbeterd (met de Belgische centrales als ‘model’!). De AP 1000 biedt economisch voordeel door doorgedreven vereenvoudiging: minder componenten, en versnelde bouwtijd door gebruik te maken van in de fabriek gemonteerde modules, die ter plaatse samengebouwd worden.



EPR - Olkiluoto

Half lange termijn: de “multifunctionele” Generatie 2035

Deze reactoren zitten nog in de ontwikkelingsfase en worden momenteel nog niet gebruikt (hoewel er al een aantal prototypes werden gebouwd). Er moet nog heel wat getest, bestudeerd en onderzocht worden, op beperkte of industriële schaal, vooraleer ze werkelijk operationeel zouden kunnen worden. Het geheel van deze toekomstgerichte projecten kreeg de naam ‘Generatie IV’ mee.

Doelstellingen: de productie van elektriciteit en waterstof en de ontzilting van zeewater

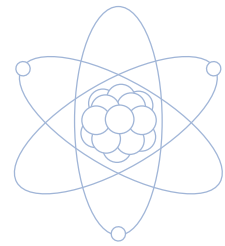
Om economisch en ecologisch succesvol te zijn, zullen de reactoren van de toekomst open moeten staan voor nieuwe markten, met nieuwe toepassingen zoals de productie van waterstof¹⁶ en de ontzilting van zeewater¹⁷ voor grote stedelijke agglomeraties. Ze zullen moeten kaderen binnen een perspectief van duurzame ontwikkeling, door efficiënter gebruik te maken van de brandstof dan de huidige reactoren en ook minder afval te produceren.

Lopend onderzoek: stand van zaken

De eerste golf projecten in het onderzoek naar toekomstige kernenergie had betrekking op de modulaire hogetemperatuurreactoren (ongeveer 800 °C), die functioneren op nieuwe types splijtstof – bolletjes of splijtstofelementen samengesteld uit kleine kogels splijtbaar materiaal (uraniumkogels) – en die gekoeld worden op gas. Er zijn in hoofdzaak twee procedés (de zogenaamde Pebble Bed Modular Reactor en de Gas Turbine Modular Helium Cooled Reactor). In 2001 werd er dan een tweede golf projecten opgestart op initiatief van het Amerikaanse ministerie van Energie (Department of Energy), onder de verzamelnaam “Generation IV Nuclear Energy Systems Initiative”. Dit initiatief bracht kernonderzoeksinstituten uit 10 verschillende landen samen in een informele samenwerkingsstructuur die de naam GIF meekreeg (Generation

16. Er lijkt een mooie toekomst weggelegd voor waterstof, het belangrijkste element voor de productie van brandstofcellen, dat bij verbranding alleen water uitstoot en geen broeikasgassen. In de toekomst zouden centrales hun warmte kunnen afgeven voor de productie van waterstof via elektrolyse bij hoge temperatuur of thermochemisch kraken van water.

17. Drinkbaar water is een van de natuurlijke rijkdommen waaraan er in de toekomst een tekort dreigt te zijn. Onderzoekers denken dan ook na over manieren om de productie van elektriciteit te combineren met systemen voor de ontzilting van zeewater via distillatie of omgekeerde osmose. Volgens de huidige prognoses zou de cogeneratie van elektriciteit en ontzilt water in combinatie met kernenergie rendabeler zijn dan in combinatie met fossiele energie. Gekoppeld aan een reactor van 200 thermische MW zou er via distillatie tot 43.000 m³ water per dag kunnen worden gewonnen, en dat zonder invloed op de elektriciteitsproductie en tegen een marginale kostprijs.



IV International Forum). Het GIF spitst zijn onderzoek toe op zes reactor-/splijtstofsysteemen: eenvoudig gezegd één lichtwaterreactor, één zeer-hoge-temperatuurreactor (tot 1.100 °C) gekoeld door gas, drie snelle-neutronenreactoren die het mogelijk zouden maken om met een factor 100 te besparen op de grondstoffen¹⁸, en één reactor op gesmolten zouten die erg weinig splijtstof verbruikt (thorium-uranium).

Wat doet België?

Het CEN•SCK kan en wil bijdragen tot de evolutie naar de duurzame implementatie van kernenergie door de bouw van een nieuwe onderzoeksinstallatie, die onder meer zal worden gebruikt voor materiaal- en splijtstofonderzoek voor toekomstige reactoren. Dat innovatieve systeem, MYRRHA genaamd, is gebaseerd op een loodgekoelde snelle reactor met ADS-technologie (reactor gestuurd door een deeltjesversneller). Daardoor kunnen langlevende radioactieve stoffen omgezet worden in kortlevende elementen, wat zal toelaten de hoeveelheid hoogradioactief afval drastisch te beperken. Dat project zal ook de industrialisatie van de Gen IV-technologie demonstreren. De start van de bouwwerken is voorzien in 2014 en de exploitatie is gepland voor 2020.

Op zeer lange termijn: gecontroleerde thermonucleaire fusie?

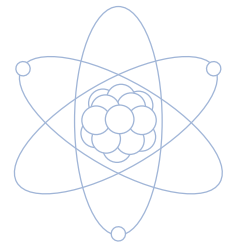
Net zoals de splijting van een zware kern energie doet vrijkomen, is ook de fusie van twee lichte kernen tot een zwaardere kern¹⁹ een bron²⁰ van energie. Het is zelfs de meest verspreide energievorm in ons heelal, want kernfusie ligt aan de basis van de immense energieproductie in de zon en de sterren²¹. In tegenstelling tot de kernsplijting, waarbij een vrij neutron met een geschikte kinetische energie wordt opgevangen, maakt kernfusie gebruik van gelijk geladen deeltjes die elkaar afstoten. Om die afstootkracht te overwinnen en de kernen "samen te brengen" binnen een afstand die voldoende klein is om het fusiemechanisme op gang te brengen, moet de temperatuur van het milieu (het zogenaamde plasma) opgevoerd worden tot erg hoge waarden: enkele tientallen miljoenen graden. Er bestaan verschillende manieren om het plasma "in te sluiten": ofwel door gebruik te maken van zeer krachtige magnetische velden ofwel door gebruik te maken van laserstralen, die naast het insluiten het plasma ook samendrukken om het fusieproces op gang te brengen. In het eerste geval spreekt men van magnetische insluiting, in het tweede van inertieële insluiting. Wie het werkingsprincipe begrijpt, begrijpt meteen ook dat het een enorme

18. Met de zogenaamde 'thermische' (of trage) neutronen, draagt slechts een klein deel van de gebruikte splijtstof daadwerkelijk bij aan de productie van energie (twee derde van het uranium-235, dat zelf maximaal 4% uitmaakt van de splijtstof). Uiteindelijk zal het uranium-238 (enkel oneven isotopen zijn splijtbaar met thermische neutronen), dat 95% uitmaakt van de splijtstof voor de centrales, nauwelijks gebruikt worden. De oplossing om dat te vermijden, zijn snelle neutronen. Die deeltjes beschikken over de eigenschap dat ze het uranium-238, kunnen omzetten in plutonium-239, een splijtbaar stof die bijgevolg geschikt is voor de productie van energie. Aangezien uranium-238 de meest voorkomende natuurlijke U isotoop is en dat er voorraden van zijn aangelegd afkomstig van de opwerking van de gebruikte splijtstof van de huidige generatie reactoren (scheiden van het niet-verbrande plutonium en uranium van het afval), zou het gebruik van snelle neutronen in de centrales kunnen leiden tot een besparing van de grondstoffen met maar liefst een factor 100. Een ander voordeel van snelle neutronen is dat ze sommige soorten radioactief afval met een lange levensduur verbranden en bijgevolg de resthoeveelheden ervan beperken. Minder afval en minder grondstoffen: twee troeven die in de ogen van de leden van het Generation IV International Forum perfect beantwoorden aan de criteria van duurzame ontwikkeling.

19. Meer bepaald de fusie van twee deuteriumkernen of van één deuterium- en één tritiumkern tot een heliumkern.

20. Bij kernfusie komt veel meer energie vrij dan bij kernsplijting (twee grootteordes, verschil van factor 100).

21. Het is de zwaartekracht die de lichte kernen zal insluiten en ervoor zorgt dat er fusiereacties ontstaan bij temperaturen van een paar miljoen graden. Op aarde moet er een temperatuur gehaald worden van zowat 50 miljoen graden Celsius en moet er gebruik worden gemaakt van de interne magnetische velden in plaats van de zwaartekracht.



(technologische) uitdaging wordt om kernfusie op een betaalbare en gecontroleerde manier te laten verlopen. Als dat ooit zou lukken, beschikt de mens over een nagenoeg onuitputtelijke energiebron. Bij de kernfusie die voor gebruik in fusiereactoren toegepast wordt, worden een deuteriumkern (waterstof met 1 neutron) en een tritiumkern (waterstof met 2 neutronen) omgezet in een heliumkern, energie, en een neutron. De brandstoffen, deuterium en tritium, zijn zo overvloedig aanwezig dat ze voor miljoenen jaren energie kunnen zorgen. Deuterium bijvoorbeeld vindt men onder meer in zeewater. Bovendien wordt geen afval met lange halveringstijd geproduceerd. Helaas is het vandaag onmogelijk te voorspellen hoeveel dat uiteindelijk zal kosten en zal de economische competitiviteit van kernfusie in de toekomst in grote mate afhangen van de productiekosten van andere manieren om elektriciteit op te wekken. Kernfusie wordt al sinds het begin van de jaren '50 grondig onderzocht, in het bijzonder ook in Europa. Dankzij de ervaring met het JET-project²² en met andere experimentele reactoren, kon er een experimentele reactor worden ontworpen van het Tokamak-type²³, die de naam ITER²⁴ meekreeg. Dit internationale project, dat ook gesteund wordt door het IAEA, moet proefondervindelijk de geloofwaardigheid van kernfusie als energiebron aan-

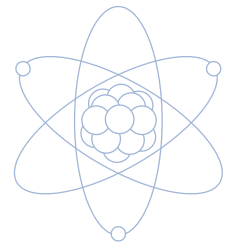
tonen. België van zijn kant werkt ook aan een aantal ontwikkelingsprogramma's met betrekking tot kernfusie en ook de Belgische industrie toont zich betrokken bij deze uitdaging. Er werd al aanzienlijke vooruitgang geboekt op wetenschappelijk en technisch vlak, waardoor het gebruik van kernfusie voor de productie van elektriciteit op lange termijn realistischer wordt (horizon 2100).

Kernfusie biedt veel voordelen op het vlak van veiligheid en milieu-impact en is wellicht de energiebron waarop de meeste hoop is gevestigd in het kader van een duurzame ontwikkeling in de toekomst.

22. JET staat voor 'Joint European Torus' en is de naam van het plasmaonderzoekslaboratorium in Culham (Verenigd Koninkrijk) dat in 1991 de wetenschappelijke haalbaarheid van kernfusie aantoonde.

23. Tokamak: letterwoord afgeleid van het Russische "Toroidalnaya Kamera y Magnitnaya Katucha", plasma-insluiting in een torus met behulp van magnetische velden.

24. ITER staat voor "International Thermonuclear Experimental Reactor".



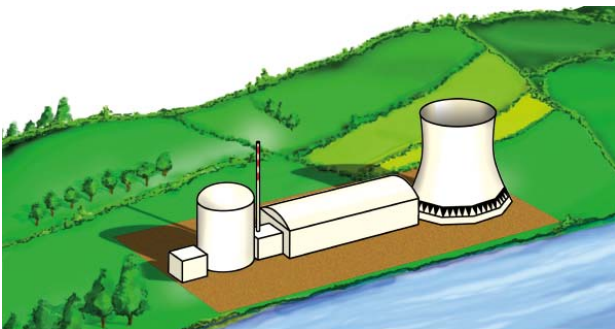
DE ONTMANTELING VAN KERNCENTRALES

De levensduur van een industriële installatie bestaat uit verschillende fasen, en dat is bij een nucleaire installatie niet anders. Wanneer er wordt beslist om de exploitatiefase van een centrale te beëindigen – om politieke, technische of economische redenen – breekt de ontmantelingsfase aan.

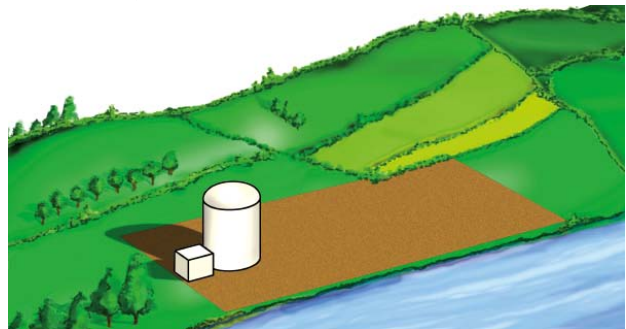
De ontmanteling van een nucleaire installatie omvat het geheel van demontage- en afbraakactiviteiten voor de materialen en structuren die in contact zijn geweest met radioactieve stoffen.

De ontmanteling verloopt in drie opeenvolgende fasen:

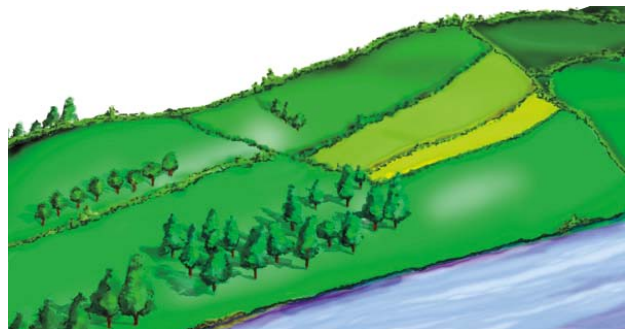
- Een fase van **definitieve stillegging**: de splijtstof wordt uit de reactor gehaald en de kringen worden gereinigd, wat 99,9% van de radioactiviteit elimineert. De niet-nucleaire installaties worden definitief buiten gebruik gesteld en de systemen die niet meer vereist zijn voor de veiligheid worden gedemonteerd.



- Een fase van **gedeeltelijke ontmanteling**: de niet-nucleaire gebouwen kunnen worden hergebruikt voor andere doeleinden of afgebroken worden. De zone rond de reactor wordt geïsoleerd, ingesloten en onder toezicht geplaatst.

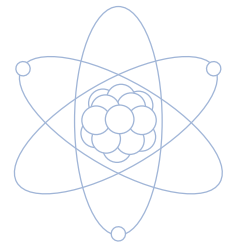


- Een fase van **volledige ontmanteling**: het reactorgebouw en de nog radioactieve materialen en uitrusting worden volledig gedemonteerd, stralingsveilig verpakt en afgevoerd. Toezicht is niet langer noodzakelijk en de site kan worden hergebruikt.



Er zijn twee strategieën op het vlak van ontmanteling:

- **Progressieve ontmanteling**: de installatie wordt gedeeltelijk ontmanteld en de volledige ontmanteling wordt meerdere tientallen jaren uitgesteld (30 tot 100 jaar).
- **Directe ontmanteling**: er is geen wachttijd en de installatie wordt meteen volledig ontmanteld.



De duur van de ontmanteling kan dus, afhankelijk van de gekozen strategie, variëren van één tot meerdere tientallen jaren na de definitieve stillegging van de kerncentrale. De keuze voor een van deze strategieën heeft gevolgen op economisch, sociaal en politiek vlak en wordt bepaald door aspecten van (stralings)veiligheid en milieubescherming. De huidige tendens neigt meer en meer naar directe ontmanteling, in hoofdzaak om de verantwoordelijkheid van de exploitant te beperken in de tijd.

En wie financiert de ontmanteling?

De nucleaire industrie is bekommerd over wat er op lange termijn van haar installaties geworden is. Al van bij de inbedrijfname van de centrales werd er beslist om de kosten voor de ontmanteling niet te laten dragen door de consumenten van morgen, maar veeleer door de consumenten van nu die ook het genot hebben van de stroom die door de reactoren wordt geproduceerd. **Deze kost wordt dan ook geïntegreerd in de prijs voor een kilowattuur elektriciteit.** De elektriciteitsonderneming legt tijdens de volledige exploitatieduur van de centrales voorzieningen aan, om dan op het moment dat de centrales worden stilgelegd over voldoende financiële middelen te kunnen beschikken.

In België werd het aanleggen van voorzieningen voor de ontmanteling van kerncentrales al geregeld van bij hun inbedrijfstelling en momenteel wordt deze materie geregeld door de wet van 11 april 2003. De concrete toepassingsmodaliteiten werden toevertrouwd aan een commissie voor nucleaire voorzieningen, waarin zowel vertegenwoordigers van de regering als van de elektriciteitssector zetelen. Het bedrag van de voorzieningen wordt elke drie jaar bijgesteld en omvat de kosten voor de ontmantelingswerken, de engineering, het toezicht en onderhoud van de installaties, de veiligheid van de site en het volledige afvalbeheer.

Al ervaring met ontmanteling?

De ontmanteling van nucleaire installaties is in België een realiteit sinds 1988, met de start van ontmantelingsprogramma's voor de oude opwerkingsfabriek EUROCHEMIC in Dessel door Belgoprocess en van de BR 3 in Mol, ooit Europa's eerste drukwaterreactor. Daarnaast wordt er ook op internationaal niveau ervaring opgebouwd met de ontmanteling van een aantal oudere kerncentrales.

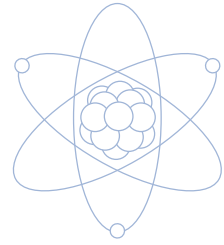


Beschrijving van de spleijstofcyclus

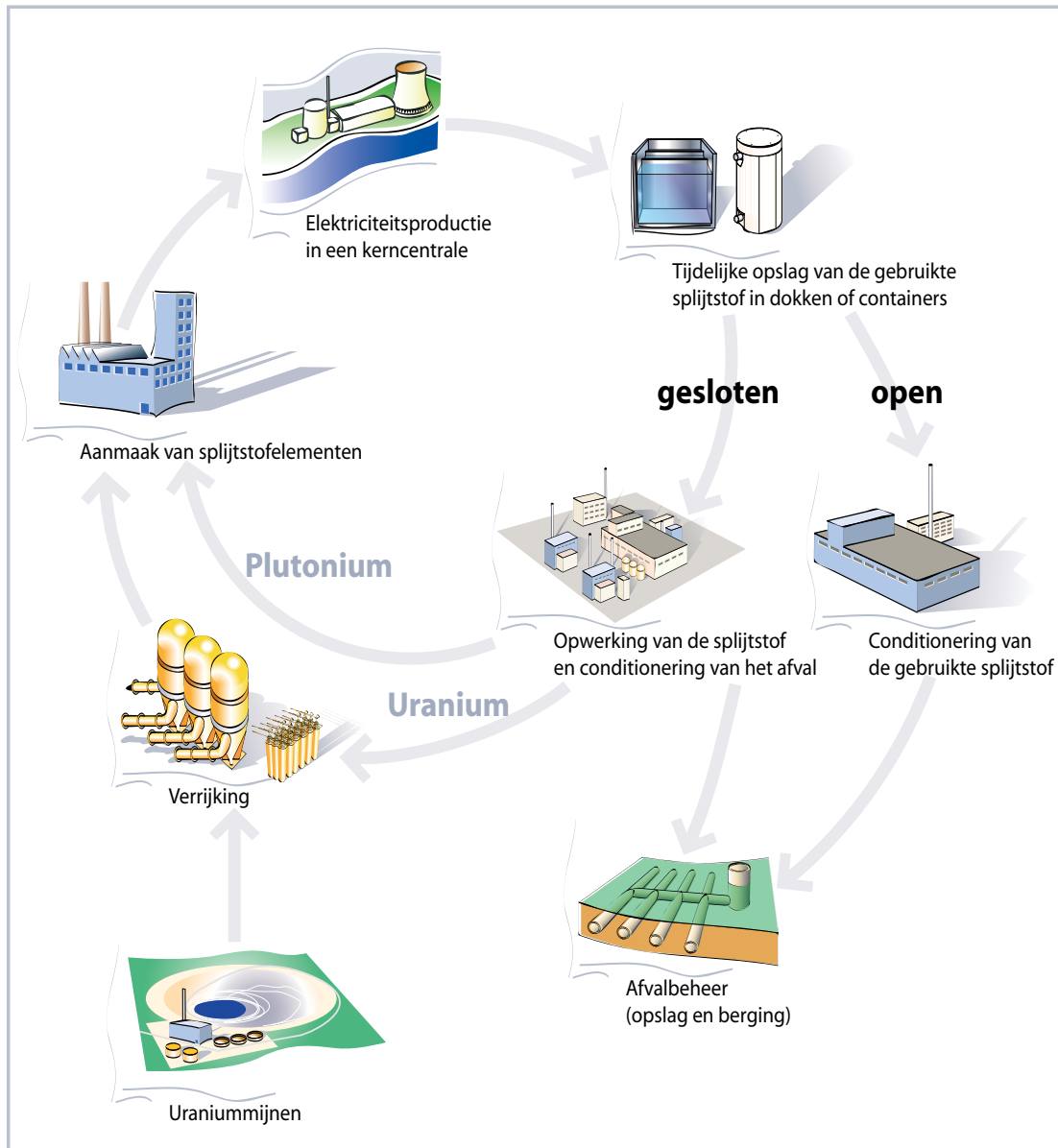
Onder 'spleijstofcyclus' verstaat men het geheel van activiteiten die verbonden zijn met de kernbrandstof of spleijstof. De cyclus valt uiteen in twee delen die respectievelijk de fases vormen voor en na het gebruik van de spleijstof in een kernreactor, ofwel de fases stroomopwaarts, de **bovenfase**, en stroomafwaarts, de **benedenfase**, van de spleijstofcyclus. **Deze cyclus kan gesloten zijn of open.** In het eerste geval wordt de spleijstof **opgewerkt** om de nog bruikbare materialen²⁵ die de spleijstof bevat te recyclen om opnieuw elektriciteit te produceren; de afvalstoffen worden op hun beurt gesorteerd in verschillende categorieën en vervolgens geconditioneerd (verpakt) alvorens te worden afgevoerd en opgeslagen. In het tweede geval worden de nog bruikbare materialen niet gerecycleerd. De gebruikte spleijstof wordt tijdelijk opgeslagen, vervolgens geconditioneerd en uiteindelijk definitief geborgen. Met recycling heeft men reeds meerdere tientallen jaren internationale ervaring; deze techniek wordt industrieel beheerst en de kosten zijn gekend. De directe berging bevindt zich nog in projecttoestand: talrijke technische en regelgevende aspecten zijn reeds vastgelegd en er is een kostenraming gemaakt op internationaal niveau.

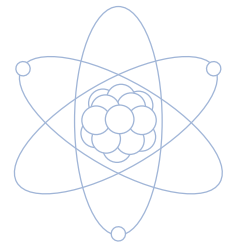
De **keuze voor een open of gesloten cyclus** moet steunen op overwegingen die verband houden met diverse aspecten: economisch (reserves, grootte van het kernpark, markt van het basisproduct uranium), energetisch (beschikbare energiereserves, optimaal gebruik van het energiepotentieel), technisch (geologie van een opslagsite, beheersing van de technologie), wettelijk (multilaterale relaties of akkoorden, ...) en maatschappelijk (bv. de aanvaarding door het publiek). In sommige landen wordt een tendens vastgesteld om deze beslissing geheel of gedeeltelijk uit te stellen en te opteren voor een tijdelijke keuze die bestaat in het veilig opslaan voor min of meer lange duur van de gebruikte spleijstof. Dat is onder meer het geval in België.

25. Uranium en plutonium.



Gesloten splijstofcyclus (met recyclage van de splijstof)
en
Open splijstofcyclus (zonder recyclage van de splijstof)





DE BOVENFASE VAN DE SPLIJTSTOF CYCLUS

De cyclus begint met de ontginning van het uraniumerts. Uranium, dat twee eeuwen geleden ontdekt werd, behoort tot de meest verspreide chemische elementen op aarde. Het komt evenveel voor als lood, maar meer dan tin of zilver. De aardkorst bevat gemiddeld 3 tot 4 gram uranium per ton gesteente²⁶. Uranium wordt ontgonnen in openluchtmijnen, in ondergrondse galerijen of door uitloging²⁷.

Uranium is bijzonder aantrekkelijk voor de westerse landen omdat het op heel wat plaatsen ter wereld voorkomt. De grootste uraniumreserves bevinden zich hoofdzakelijk in Canada, Australië en Kazachstan, gevolgd door Rusland, Namibië, Niger en Oezbekistan. Na de eerste oliecrisis van 1973 bood uranium onmiddellijk het voordeel van een geregelde en gegarandeerde bevoorrading. De huidige jaarlijkse wereldproductie van dit erts schommelt tussen de 30.000 en 45.000 ton.

Om het uranium uit het erts te halen worden de rotsen gebroken, vermalen en onderworpen aan een reeks scheikundige processen: zuiveren, neerslaan, wassen, filteren enz. Deze reeks reacties geeft een felgeel concentraat, de zogeheten yellow cake, dat ongeveer 75% uranium bevat. Duizend ton erts levert doorgaans anderhalve ton yellow cake op.

De yellow cake bestaat uit natuurlijk uranium dat een mengsel van twee isotopen bevat: uranium-238 voor 99,3% en uranium-235 voor 0,7%. Aangezien alleen uranium-235 splijtbaar is, moet het gehalte aan U-235 van het mengsel verhoogd worden. Hiervoor gaat men in eerste instantie over tot de omzetting in uraniumhexafluoride (UF_6) door een chemische reactie (op basis van fluor).

Deze **chemische transformaties** worden uitgevoerd in installaties die gespecialiseerd zijn in nucleaire scheikunde. In Europa bestaan er twee centra waar deze operaties worden uitgevoerd: Malvesie in Frankrijk en Springfields in het Verenigd Koninkrijk. Uraniumhexafluoride is een vaste stof op kamertemperatuur die sublimeert of vervluchtigt bij 56 °C. Ze wordt in vaste toestand vervoerd in grote cilinders van ongeveer 12 ton U. De sublimatie of vervluchtiging is de directe overgang van vaste naar gasvormige toestand zonder vloeibare tussenfase. In gasvormige toestand vindt dan de volgende fase plaats: de verrijking.

De verrijking bestaat erin het gehalte aan U-235 te verhogen. Om het uranium in PWR-reactoren te kunnen gebruiken, is een verrijkningsniveau vereist tussen 3 en 5% U-235.

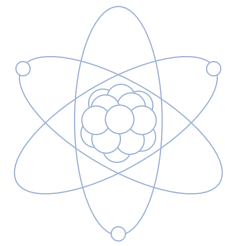
Er bestaan verschillende methodes die allemaal gebaseerd zijn op het massaverschil tussen de kernen van de twee isotopen (uranium-238 is iets zwaarder). Gasdiffusie was tot op heden de meest gebruikte techniek. Hierbij worden UF_6 -moleculen door een reeks dunne

Yellow Cake



26. Als je een klassieke tuin (ook bij ons hier) zou afgraven over een oppervlakte van 10 x 10 m en tot op één meter diepte, zou die hoeveelheid aarde ongeveer 400 gram uranium bevatten

27. Uitloging bestaat in het wassen van de rots met een oplosmiddel om het erts eruit te halen.



Kernenergie
beter begrijpen

Beschrijving van de splijtstofcyclus

poreuzewanden gestuurd (diffusiebarrières). De lichtere hexafluoridemoleculen met uranium-235 gaan sneller door deze barrières. Na één doorgang is het aan de andere kant verkregen gas echter nog maar zeer weinig verrijkt. Om verrijkt uranium van 3 tot 5% te verkrijgen, zijn er meer dan 1000 cascades nodig. De Eurodif-fabriek in Pierrelatte (Frankrijk) telt er 1.400.

Een ander procedé is vooral in Europa ontwikkeld op basis van ultracentrifugeren²⁸. Ook Frankrijk en Duitsland passen deze techniek toe. URENCO beschikt over productie-eenheden op basis van deze techniek in Nederland, Duitsland en Engeland.

Daarna komt de **fabricage van de splijtstof**. Het verrijkte gas wordt omgezet in zwart uraniumoxidepoeder dat sa-

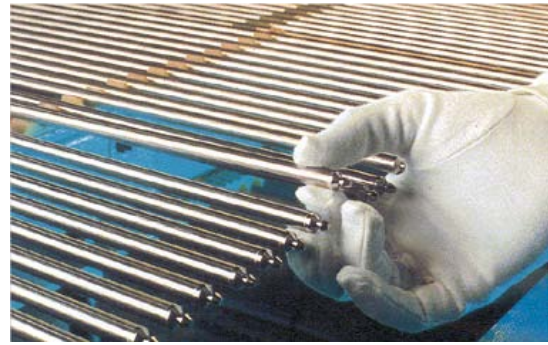
mengeperst en daarna gebakken wordt op hoge temperatuur tot een soort keramische tabletten (ter grootte van een vingerring). Deze tabletten worden nadien op elkaar gestapeld in cilindrische buizen uit zircaloy van vier meter lang, de zogenaamde staven. Deze staven worden samengevoegd tot een splijtstofelement.

Voor een PWR-reactor van 1.000 MW worden 264 dergelijke staven van ongeveer 4 meter lang gebundeld tot een splijtstofelement. Het hart van de reactor bevat 157 van deze elementen, die samen 41.448 staven en meer dan 11 miljoen tabletten bevatten. Dit stemt overeen met 72,5 ton splijtstof.

De Eurodif-fabriek



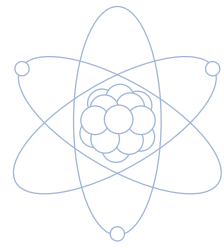
Splijtstofstaven



Urenco (Duitsland):
installatie voor de verrijking van uranium-235



28. Dit procedé maakt gebruik van de centrifugale kracht uitgeoefend op het gasvormige hexafluoride in een recipiënt dat met hoge snelheid rond zijn as draait. Het zwaarste isotoop (U-238) gaat naar de buitenkant terwijl het met U-235 verrijkte uranium zich tegen de as van het recipiënt verzamelt. Een industriële installatie voor ultracentrifugeren bevat duizenden centrifuges.



SPLIJTING IN DE REACTOR

De splijtstof zal meerdere jaren in de reactor doorbrengen en er tijdens splijtingsreacties belangrijke wijzigingen ondergaan die betrekking hebben op het gehalte aan splijtstof, zijn samenstelling en fysische toestand. Tijdens zijn verblijf in het hart van de reactor vermindert de hoeveelheid uranium-235 geleidelijk als gevolg van de splijtingsreacties, die splijtingsproducten voortbrengen, en een gedeelte van het uranium-238 wordt omgezet tot transuranen

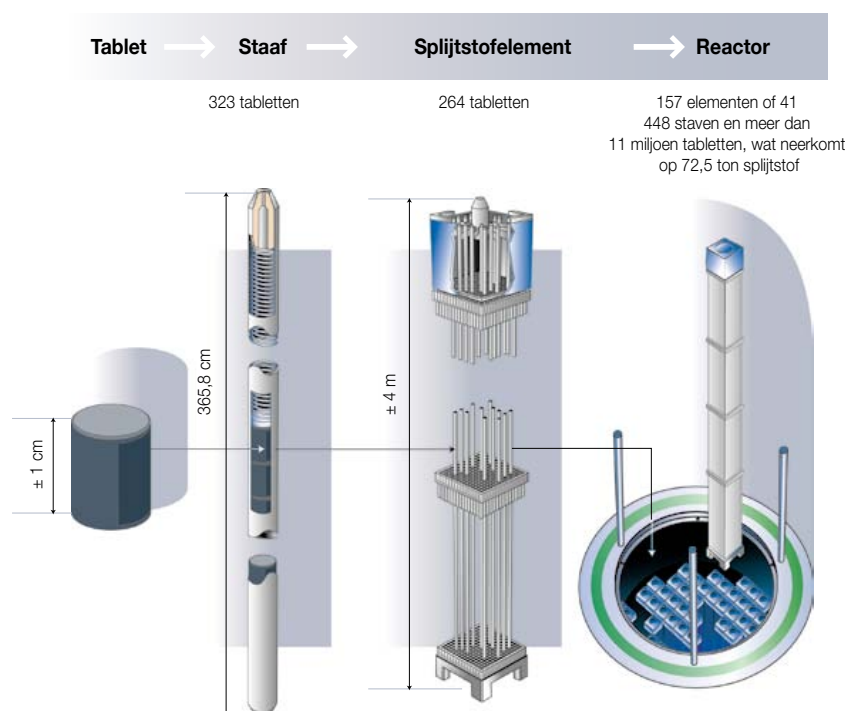
(elementen waarvan het atoomnummer hoger is dan 92) door de opname van neutronen; dat is met name het geval voor plutonium.

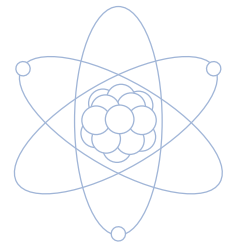
Nadat de reactor gedurende 12 tot 18 maanden gewerkt heeft, wordt een derde van de elementen vervangen door nieuwe elementen. Wanneer de splijtstof de reactor verlaat, is de 100% splijtstof die bij het begin aanwezig was (verdeeld tussen circa 4% uranium-235 en 96% uranium-238) omgezet in 1% uranium-235, 95% uranium-238, 1% plutonium-239 en 3% splijtingsproducten.

Binnenzicht van een PWR-reactor



PWR-reactor van 1000 MW





DE BENEDENFASE VAN DE SPLIJTSTOFCYCLUS

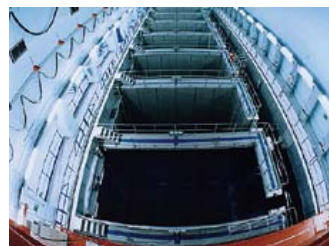
Tot in de jaren 80 was de uraniumprijs hoog en leken de wereldreserves aan fossiele brandstoffen relatief laag ten opzichte van de geschatte toekomstige behoeften. Bovendien was men bezig met de ontwikkeling van snelle kweekreactoren die zich kenmerkten door het feit dat ze meer splijtbaar stof produceerden²⁹ dan dat ze er verbruikten. Het was dus in die context³⁰ dat de opwerking van gebruikte splijtstof geleidelijk overal ter wereld de referentie werd als beheermethode voor het stroomafwaartse gedeelte van de splijtstofcyclus.

Vanaf de tweede helft van de jaren '70 opeerden de Verenigde Staten om diverse redenen (waaronder de non-proliferatie van nucleaire kennis) voor een beleid van niet-opwerking. In dezelfde periode, ook in de Verenigde Staten, stelde men een daling van de investeringen in nieuwe kerncentrales vast, in de nasleep van het ongeval van Three Mile Island. Het ongeval met de kernreactor van Tsjernobyl, hoewel deze volgens een totaal andere technologie werkte, leidde op zijn beurt tot de stopzetting van meerdere kerncentraleprojecten in tal van westerse landen. De ontdekking van omvangrijke reserves uranium en nieuwe ontginningprocedures deden de uraniumprijs instorten, doordat het aanbod aanzienlijk groter was dan de vraag. De ontwikkeling van het procedé van de snelle kweekreactoren kwam tot stilstand en de noodzaak om over plutonium te beschikken verminderde sterk. Deze volledige verandering van de nucleaire context leidde in België tot een parlementair debat in 1993 over wat er diende te gebeuren met gebruikte splijtstof. De regering besliste op grond van de aanbevelingen van het parlement tot een moratorium op de ondertekening van nieuwe opwerkingscontracten, tot de afzonderlijke recyclage van plutonium in de Belgische kerncentrales voor een hoeveelheid van 4,8 ton en tot een grondig onderzoek naar de opties van recyclage en niet-recyclage (directe berging), die

op voet van gelijkheid werden geplaatst.

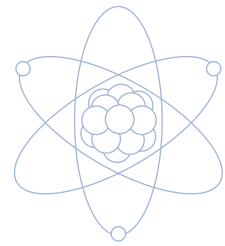
Tijdelijke opslag van de splijtstofelementen

Bij het verlaten van de reactor verspreidt de gebruikte splijtstof nog energie in de vorm van restwarmte. In afwachting van een eventuele recyclage of directe berging wordt de splijtstof tijdelijk opgeslagen op de productiesite zelf, hetzij in een opslagbekken (Tihange) hetzij in containers (Doel), waarin de radioactiviteit kan afnemen. Tijdens deze periode van tijdelijke opslag kunnen bepaalde zware kernen evenals kortlevende splijtingsproducten door hun verval hun radioactiviteit zien verminderen. In elk geval is deze periode een noodzakelijke fase omdat ze ervoor zorgt dat de splijtstof voldoende afkoelt alvorens te worden geborgen.



29. In dit geval plutonium.

30. Bescherming van de energievoorraden, economische redenen (recuperatie en gebruik van de energetische grondstoffen van de gebruikte splijtstof – in het bijzonder plutonium in de snelle kweekreactoren) en milieuredenen (vermindering van het volume afval).



Gesloten cyclus: recyclage

De opwerking: eerste fase in de recyclage van de gebruikte splijtstof

Bevat ze nog ongeveer 96% uranium (waarvan 1% U-235) en 1% plutonium³¹ die herbruikbaar zijn om opnieuw elektriciteit te produceren. De **opwerking, eerste fase in de recyclage van de gebruikte splijtstof**, bestaat erin deze herbruikbare materialen te scheiden van de "as" van de kernreacties (3% van de massa van de gebruikte splijtstof) gevormd door de splijttingsproducten en lagere actiniden³². Het uranium dat gerecupereerd wordt door het opwerkingsproces wordt opnieuw verrijkt en opnieuw gebruikt. Wat het plutonium betreft, dit wordt gezuiverd, omgezet in oxide (poeder) en verpakt in lekvrije verpakkingen. Het wordt dan gemengd met verarmd uraniumoxide en vormt zo MOX, de afkorting voor Mixed OXide, dat in een aantal reactoren wereldwijd wordt gebruikt. In België werd MOX gebruikt van 1995 tot 2006.

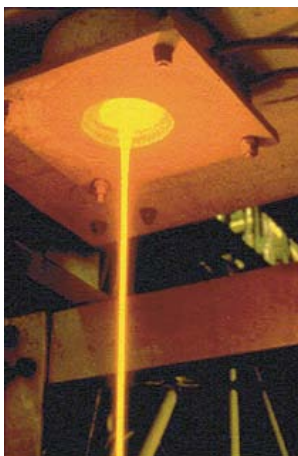
Door een standaard uraniumbrandstofelement te vervangen door een MOX-element wordt 9 kg plutonium verbruikt in plaats van 5 kg te produceren. De recyclage van plutonium in MOX elementen vermindert dus ontegensprekelijk de hoeveelheid plutonium die kerncentrales produceren en dus ook de behoefte aan uraniumerts.

Verglazing van de splijttingsproducten

De splijttingsproducten die in de gebruikte splijtstof zitten, vertegenwoordigen het grootste deel van de radioactiviteit verbonden aan de elektriciteitsproductie. Deze splijttingsproducten zijn niet herbruikbaar en worden behandeld als hoogradioactief afval. Bij de opwerking wordt de kleinste fractie (3%) van splijttingsproducten en actiniden "verglasd", dat wil zeggen bij hoge temperatuur ingekapseld in borosilicaatglas. Dit glas immobiliseert deze producten en zorgt voor een aangepaste isolatie tot de definitieve berging.

Op internationaal vlak wordt borosilicaatglas unaniem erkend als de meest geschikte en meest stabiele bewa-

Gieten van glas

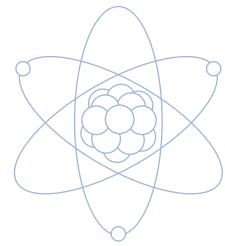


Container voor verglaasd afval



31. Element geproduceerd in een kernreactor, waarva sommige isotopen de eigenschap bezitten dat ze eveneens splijtbaar zijn. Meer bepaald plutonium-239 levert ongeveer een derde van de energieproductie afkomstig van zogenaamde "standaard" splijtstof.

32. Sommige neutronen, in plaats van de uraniumatomen te desintegreren, worden door deze laatste opgenomen en doen zwaardere atomen ontstaan dan de oorspronkelijk aanwezige atomen. Dit zijn de actiniden. Actiniden andere dan uranium en plutonium worden secundaire actiniden genoemd.



Kernenergie
beter begrijpen

Beschrijving van de splijtstofcyclus

ringsvorm voor deze afvalproducten (de verglaasde splijtingsproducten kunnen zich niet verspreiden in het milieu, noch in gasvorm noch als vloeistof en zelfs niet als deeltjes). Het verglaasde afval bevat in een compact volume 99% van de radioactiviteit van de verschillende afzonderlijke afvalmaterialen die ontstaan in de loop van de opwerkingsoperaties.

De container waarin het verglaasde afval wordt gegoten, is een cilinder uit roestvrij staal van 1,34 m hoog en 43 cm diameter, hermetisch gesloten en met een inhoud van 150 liter (ongeveer 400 kg) vast glas, waarvan 14% splijtingsproducten die overeenstemmen met de hoogradioactieve rest van circa 1,4 ton gebruikte splijtstof.

Tussentijdse opslag van het verglaasde afval

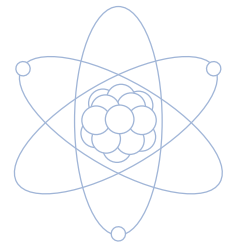
In een eerste fase wordt het verglaasde afval afkomstig van de opwerking van Belgische splijtstof bij AREVA NC – La Hague tussentijds en veilig opgeslagen op de site van BELGOPROCESS, een filiaal van NIRAS, te Dessel (Kempen) in een gebouw dat speciaal voor deze tussentijdse opslag is gebouwd. We spreken van tussentijdse

opslag omdat dit gebouw niet de definitieve bestemming van het hoogradioactief afval is. Dit afval moet volkomen veilig worden geïsoleerd op een plaats waar de radioactiviteit op natuurlijke wijze verder kan afnemen. Het verglaasde afval verspreidt aanvankelijk een maximaal thermisch vermogen van ongeveer 2 kW per container. Dat vermogen is vergelijkbaar met dat van een elektrische radiator voor huishoudelijk gebruik. Het afval moet daarom gedurende een vijftigtal jaar afkoelen op een aangepaste opslagplaats alvorens het kan worden geborgen in stabiele en diepe aardlagen.

Het opslaggebouw is door zijn ontwerp bestand tegen extreme omstandigheden: aardbevingen, storm, een ontploffing in de omgeving en het neerstorten van een jachtvliegtuig. De opslagzone is met dat doel omgeven door dikke en stevige muren die dankzij de door blinde ankers verstevigde bewapening ook bij zware aardbevingen rechttop blijven staan. Deze muren maken het ook mogelijk het stralingsniveau zowel binnen als buiten het opslaggebouw onder de wettelijke normen te houden.

Opslaggebouw voor verglaasd afval





Open cyclus: de directe berging

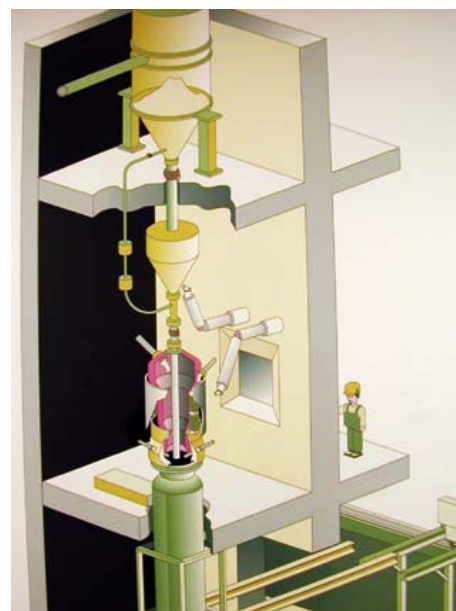
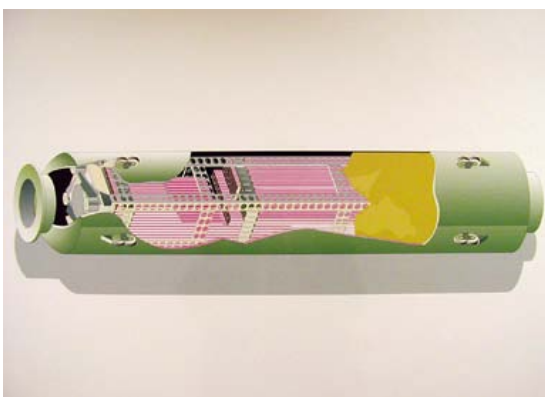
Bij directe berging van de gebruikte splijtstof vindt er geen selectieve scheiding van de nog bruikbare en onbruikbare materialen plaats zoals in het geval van recyclage. De verpakking heeft tot doel het splijtstofelement in te sluiten om de verspreiding van de radioactieve elementen te vermijden en de gebruikte splijtstof gemakkelijk te kunnen manipuleren tijdens de volgende behandelfases. Bij de ontwikkeling van deze verpakking moet dus rekening worden gehouden met de criteria die het resultaat zijn van het onderzoeks- en ontwikkelingswerk inzake geologische berging waar NIRAS op dit ogenblik mee bezig is.

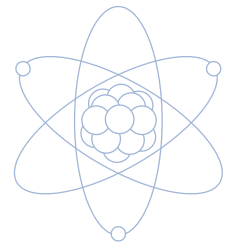
Voor de inkapseling van de gebruikte splijtstofelementen is een cilindervormige verpakking ontworpen – de zogenaamde “fles”. Afgezien van zijn lengte vertoont deze verpakking grote overeenkomsten met de containers voor verglaasd afval.

Aangezien de geologische omstandigheden van land tot land verschillen (zout, klei, graniet enz.), bestaat er geen standaardprocedé voor de verpakking van de splijtstofelementen en elk concept moet worden gekozen in functie van de geologische context.

Tussen 1995 en 1998 zijn er uitgebreide studies verricht naar het ontwerp van een verpakkingsfabriek en de uitwerking van een verpakkingsprocedé. Er is ook een testinstallatie ontwikkeld om de kritische fases van het procedé te simuleren (de vulling met zand en het dichtlassen van de fles na het inbrengen van een verpakt splijtstofelement) (zie figuur hieronder).

Eind 1998 heeft de regering de specialisten opdracht gegeven om de werkzaamheden in verband met de verpakking van de gebruikte splijtstof en de ondergrondse berging voort te zetten, maar tegelijk ook door te gaan met het vergelijkend onderzoek tussen de open cyclus (directe berging) en de gesloten cyclus (recyclage).





Definitieve berging

Op internationaal niveau erkennen de wetenschappers dat de berging in diepe, stabiele en weinig doorlatende aardlagen een goede oplossing vormt voor hoogactief afval (zowel verglaasd – gesloten cyclus – of afkomstig van directe afvoering – open cyclus – van de gebruikte splijtstof). In ons land voldoen verschillende gesteentes aan

deze criteria, waaronder de Boomse klei. Sinds meer dan 20 jaar is een uniek en intensief onderzoeksprogramma in het ondergronds laboratorium op de site van het Studiecentrum voor Kernenergie (CEN•SCK) in Mol aan de gang om de technische en praktische haalbaarheid aan te tonen van berging in dit type gastgesteente. Het leverde reeds een enorme massa aan resultaten op, die de waarde van Boomse klei bevestigen.

Ondergronds onderzoekslaboratorium HADES in Mol.





Veiligheid

Nucleaire veiligheid omvat het geheel van technische en organisatorische maatregelen die worden getroffen in alle stadia van het ontwerp, de bouw, de werking en de stillegging van installaties, om een normale werking te waarborgen, ongevallen te voorkomen en de gevolgen voor gezondheid en milieu te beperken.

In het nucleaire domein is veiligheid altijd een hoofdbekommernis geweest van zowel de wetenschappelijke wereld als de bedrijfswereld. Er is in de geschiedenis van de Westerse techniek geen ander voorbeeld te vinden waarbij veiligheid al van bij het begin van de ontwikkeling van een technologie een dermate belangrijke rol heeft gespeeld. De technologische vooruitgang, de kwalificatie en opleiding van het personeel, de maatregelen voor het beheer van ongevallen en een versterkte reglementaire doeltreffendheid hebben ervoor gezorgd dat de risico's van en de kansen op nucleaire ongevallen zijn afgenomen.

BASISPRINCIPES VAN NUCLEAIRE VEILIGHEID

Naast de basisprincipes die hierna worden beschreven, is nucleaire veiligheid ook afhankelijk van de competenties van de mensen die beroepsmatig met kernenergie bezig zijn en van een efficiënte organisatie. Allemaal samen vormen ze de pijlers van de veiligheidscultuur. Die verplicht iedereen die bij de werking van een kerncentrale betrokken is om zich voortdurend alert, gedisciplineerd, voorzichtig en communicatief te gedragen.

Bescherming in de diepte

Met het concept “defence in depth” of “bescherming in de diepte” doelt men op het systematisch rekening houden met potentiële (menselijke en technische) zwakheden en het zich wapenen tegen deze zwakheden door een opeenvolging van maatregelen:

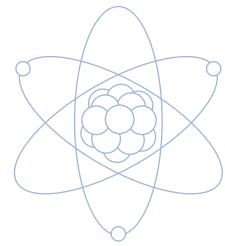
- Afwijkingen van de normale werking en het falen van apparatuur voorkomen. Dit impliceert dat de reactor wordt ontworpen, gebouwd, onderhouden en uitgerust volgens hoogstaande kwaliteitseisen;
- Afwijkingen van de normale werking opsporen en er gepast op reageren om ongevalsituaties te voorkomen. Dit impliceert de aanwezigheid van specifieke systemen en procedures voor de operator om de gevolgen van deze oorzakelijke gebeurtenissen (= gebeurtenissen die aanleiding kunnen geven tot afwijkingen) te beperken. Deze systemen en procedures maken deel uit van de veiligheidsanalyse (zie p. 64);

- Voorzien in bijkomende veiligheidssystemen die gebaseerd zijn op de evaluatie van de gevolgen van een eventueel ongeval. Indien de voorgaande principes niet zouden volstaan om de gevolgen van een oorzakelijke gebeurtenis op te vangen, dan moeten specifieke systemen en aangepaste procedures het mogelijk maken om een nucleaire installatie terug te brengen tot een veilige en stabiele toestand. Indien er gevaar bestaat op het vrijkomen van radioactiviteit in het milieu, dan worden er ook organisatorische maatregelen genomen die vertaald worden in een zogenaamd nood- of urgentieplan (zie p. 68).

Deze principes m.b.t. bescherming in de diepte zijn van toepassing op alle veiligheidsgerelateerde activiteiten. Indien er zich een incident voordoet, dan moet het gedetecteerd worden en vervolgens op een geschikte manier rechtgezet. Aangezien de verschillende beschermingsbarrières onafhankelijk zijn van elkaar, zijn er – indien één barrière zou worden doorbroken – altijd nog andere barrières om te beletten dat er radionucliden terechtkomen in de omgeving.

Meerdere barrières

Opeenvolgende “beschermingsbarrières” moeten de radioactieve stoffen indijken en vermijden dat ze in de omgeving terechtkomen. België is een dichtbevolkt land en één van de hoofdbekommernissen van de ontwerpers van onze kerncentrales (om maar één voorbeeld te nemen van een nucleaire installatie) bestond er dan ook in om zoveel mogelijk beschermingsbarrières te voorzien tussen de splijtstof en de buitenwereld. De eerste



barrière (a) wordt gevormd door de splijtstoftabletten zelf, de tweede (b) door de van een speciale legering gemaakte hulzen waarin ze zijn gestapeld. De derde (c) bestaat uit de volledige kringloop (primaire kringloop genaamd, zie p. 35) waarin het water circuleert dat de warmte afvoert afkomstig van de splijtstofelementen. De twee laatste barrières (d) ten slotte worden gevormd door de dubbele mantel rond het reactorgebouw, die moet beantwoorden aan een reeks criteria inzake dichtheid en bestandheid tegen aardbevingen, vliegtuiginslagen enz... Deze dubbele ommanteling biedt bescherming tegen ongevallen van zowel interne als externe oorsprong.

Beheersing van veiligheidsfuncties

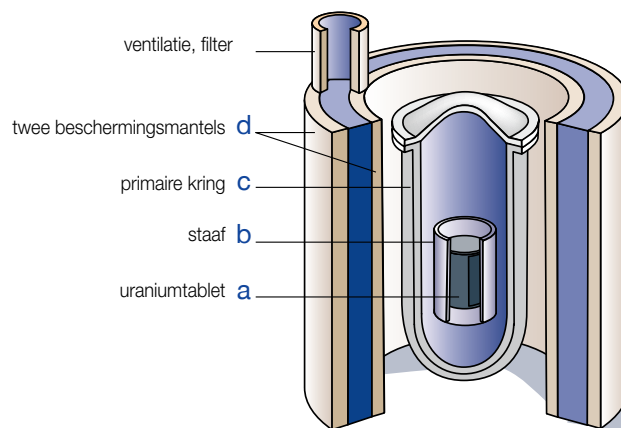
Het beheersen van de veiligheidsfuncties (de controle van

de kettingreactie, koeling van de splijtstof en insluiting van de radioactieve stoffen) vereist de inachtneming van essentiële regels zoals de redundantie, de diversificatie en de fysieke scheiding van de verschillende installaties.

Om aan te tonen dat de veiligheidsdoelstellingen bereikt worden, moet men kunnen bewijzen dat de ingezette middelen het mogelijk maken deze doelstellingen te halen, gebaseerd op kwantitatieve criteria of veiligheidscriteria die overeenstemmen met bepaalde fysische parameters (temperatuur, druk enz.) die niet mogen worden overschreden:

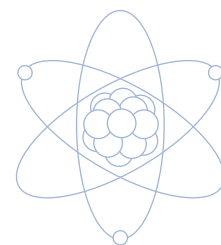
- de splijtstof moet bestand zijn tegen straling en beschadigende processen (corrosie, trillingen, materiaalmoetheid enz.) die kunnen optreden in normale, tijdelijke en accidentele werksomstandigheden;

De verschillende barrières tussen de splijtstof en de omgeving



33. onform de beslissing van de Belgische veiligheidsautoriteiten volgen de Belgische centrales de Amerikaanse regelgeving. Die regelgeving is gebaseerd op twee referentiebevingen: de Safe Shutdown Earthquake (maximale potentiële beving of beving die zich één keer om de 10.000 jaar voordoet en waarbij de centrale zonder risico voor de bevolking moet kunnen worden stilgelegd) en de Operating Basis Earthquake (beving die redelijkerwijze kan verwacht worden tijdens de levensduur van de eenheid, of beving met een frequentie van 1 keer om de 500 jaar, waarbij de exploitatie van de centrale niet hoeft te worden stilgelegd mits het verifiëren van bepaalde reglementaire parameters). De gebouwen waarin de uitrusting staat opgesteld die betrekking heeft op de veiligheid, zijn ontworpen om bestand te zijn tegen het eerste criterium. Hetzelfde geldt voor de apparatuur die nodig is om de centrale op een veilige manier stil te leggen (noodstop). In de praktijk is het zo dat wanneer men een wijziging aanbrengt of wanneer men nieuwe uitrusting installeert, men elk onderdeel vooraf zal testen op een trillatfel. De montage ter plekke dient dan op identiek dezelfde manier te gebeuren als in de testomgeving. Het traject van de leidingen wordt zodanig berekend dat ze bestand zijn tegen bepaalde verplaatsingen zonder dat er lekken ontstaan en zonder de naburige uitrusting te raken.

34. Algemeen kunnen we stellen dat de Belgische kerncentrales wellicht de best beschermde burgerlijke installaties zijn om het hoofd te bieden aan terroristische aanslagen zoals die op 11 september 2001. Een kerncentrale is als doelwit ook niet te vergelijken met de WTC-torens: qua hoogte van de gebouwen is er een verschil van factor 10 en de configuratie van de site en de grootte van het reactorgebouw en de infrastructuur er omheen maken een precieze benadering bijna onmogelijk. Na de aanslagen van 11 september hebben bijkomende studies aangetoond dat de structuur van de verschillende gebouwen (reactor, opslagbekken) bestand is tegen grotere beproevingen dan diegene waarmee men rekening hield bij het ontwerp en dat de veiligheid van de nucleaire installaties niet in het gedrang zou komen (in het bijzonder geen gevaar voor kernsmelting). Bovendien zijn er sinds de WTC-aanslagen bijkomende duurzame maatregelen getroffen in samenspraak met de bevoegde autoriteiten: verscherpte toegangscontrole voor personen, specifieke opleidingen voor het betrokken personeel, installatie van nieuwe apparatuur (hoofdzakelijk om doeltreffend een grootschalige kerosinebrand te kunnen bestrijden) enz.



- de vormgeving van de reactorkern en de reactorkuip moet er niet alleen voor zorgen dat ze bestand zijn tegen de krachten waaraan ze worden blootgesteld (zowel bij normale werkingsomstandigheden als bij dimensioneringsongevallen), ze moet er ook voor zorgen dat de kwaliteit op elk moment geverifieerd kan worden aan de hand van inspecties en tests terwijl de reactor in werking is. Dit geldt niet alleen voor de splijtstofelementen zelf, maar ook voor de beveiligings- en controlesystemen;
- er moeten maatregelen worden genomen om de koel-systemen van de reactor te kunnen controleren (hoeveelheid koelvloeistof, temperatuur, druk), zodat de grenzen die bepaald zijn voor normale en accidentele werkingsomstandigheden nooit kunnen worden overschreden. Er moeten geschikte middelen worden voorzien om het restvermogen correct af te voeren, met de mogelijkheid om circuits te verbinden of van elkaar af te sluiten, (wat nodig is om lekken op te sporen en te isoleren). Dit dient te gebeuren op een manier die voldoende betrouwbaar is, met de vereiste redundantie-, diversificatie- en onafhankelijkheidsgraad;
- de ommanteling van de reactor moet in staat zijn om de eventuele uitstoot van radioactieve stoffen in het milieu onder bepaalde grenswaarden te houden, zelfs bij ongevalsituaties. De mechanische weerstand van de ommanteling moet worden berekend op basis van de mechanische en thermische belasting bij dimensioneringsongevallen, en er moeten voldoende ruime marges worden ingebouwd. Er moet ook rekening worden gehouden met de effecten van andere potentiële belastingen (scheikundige reacties, radiolyse, externe gebeurtenissen enz.).

Veiligheidsanalyse

De veiligheidsanalyse heeft tot doel te bevestigen dat de ontwerpgrondslagen van de veiligheidsbepalende elementen toereikend zijn. Ze moet aantonen dat de installatie op een dusdanige manier is ontworpen dat de grenswaarden die ervoor moeten zorgen dat er zich geen onaanvaardbare gevolgen voordoen, met name inzake radioactieve straling, te allen tijde gerespecteerd worden,

ook bij ernstige ongevalsituaties.

Om aan te tonen dat een installatie veilig is, kan een deterministische dan wel een probabilistische aanpak worden gehanteerd.

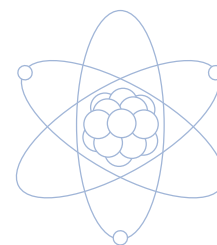
Deterministische aanpak

De ontwerpgrondslagen voor veiligheidsbepalende systemen werden aanvankelijk bepaald door te vertrekken van extreme gebeurtenissen waarvoor men toch nog in staat moest zijn om de veiligheidsdoelstellingen te halen. Er wordt a priori een reeks van incidentele en accidentele dimensioneringssituaties opgesteld, wat wil zeggen dat men vanuit een pessimistisch standpunt alle categorieën van gebeurtenissen opsomt waaraan men zich zou kunnen verwachten. Deze tijdelijke situaties worden in kaart gebracht op basis van de volgende principes:

- de situatie is het gevolg van een eenmalig falen, waarbij alle kritische omstandigheden die men zich kan indenken worden samengebracht;
- de situatie wordt nog beïnvloed door verergerende omstandigheden, zoals het falen van een beveiligingssysteem;
- de situatie doet zich voor in de meest kritische werkingsomstandigheden en de doeltreffendheid van de beveiligingssystemen wordt geminimaliseerd.

Probabilistische aanpak

Probabilistische veiligheidsstudies brengen zo volledig mogelijk de opeenvolging van incidentele en accidentele gebeurtenissen in kaart die de installatie kunnen beïnvloeden. Onder opeenvolging van accidentele gebeurtenissen verstaat men reeksen van storingen of defecten waarvan men kan berekenen hoe groot de kans is dat ze zich voordoen (probabiliteit) en waarvan men ook de gevolgen kan beoordelen, bijvoorbeeld vanuit stralingsoogpunt. Voor elke accidentele reeks kan men bijgevolg de omvang en de waarschijnlijkheid berekenen. In tegenstelling tot de deterministische analyse, die vertrekt vanuit weinig waarschijnlijke, extreme situaties, heeft de probabilistische aanpak oog voor alle situaties die zich zouden kunnen voordoen. Die krijgen een bepaalde waarschijnlijkheidsfactor toegekend en worden geanalyseerd op basis van



zo realistisch mogelijke parameters en berekeningsmethodes, rekening houdend met bepaalde onzekerheden.

Deze aanpak maakt het mogelijk de exploitatieomstandigheden van de installatie systematisch te analyseren op basis van de onderstaande factoren:

- de oorzakelijke gebeurtenissen die het meest bijdragen tot het globale risico, met inbegrip van gebeurtenissen van externe aard;
- de zwakke punten van de beveiligingssystemen, waardoor de gevolgen van een ongeval groter kunnen worden;
- verbeteringen aan het ontwerp en de procedures, zowel bij normale werking als in noodomstandigheden, waardoor de kans op en de gevolgen van een zwaar ongeval worden teruggedrongen.

In de praktijk

De verschillende analysefasen zien er als volgt uit:

- identificatie van de oorzakelijke gebeurtenissen die aanleiding zouden kunnen geven tot het vrijkomen van radioactief materiaal binnen of buiten de installatie;
- samenbrengen van andere oorzakelijke gebeurtenissen in verschillende categorieën, zodat er maar een beperkt aantal ongevalsituaties overblijft op basis waarvan de systemen en onderdelen worden ontworpen;
- identificatie van ongevallen met eventuele radiologische gevolgen;
- het uitsluiten van situaties (door ontwerp en vormgeving) die aanleiding kunnen geven tot het vroegtijdig vrijkomen van radioactieve stoffen. Men verstaat hieronder het opsporen van deze situaties en het doorvoeren van de noodzakelijke ontwerpwijzigingen om ervoor te zorgen dat de kans dat een dergelijk scenario zich voordoet extreem onwaarschijnlijk wordt. Voor PWR-reactoren gaat het om:
 - reactiviteitsongevallen (verhogen het vermogen van de reactor) gekoppeld aan de injectie van koud water of niet boorhoudend zuiver water;
 - situaties waarbij kernsmelting optreedt;
 - situaties die leiden tot waterstofontploffing.

REGLEMENTERING EN ACTOREN

In België vallen de nucleaire installaties onder de wet van 15 april 1994 en het Koninklijk Besluit tot inwerkingstelling van deze wet (afgekondigd op 20 juli 2001) houdende het Algemeen Reglement op de Bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van Ioniserende Stralingen (ARBIS).

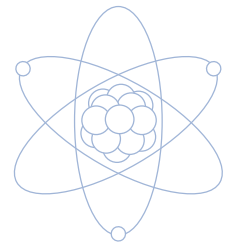
Op het niveau van de exploitant

De exploitant is verantwoordelijk voor de veiligheid van zijn installatie, want hij alleen is in staat om de concrete daden te stellen die de veiligheid direct beïnvloeden. De veiligheid is een prioriteit voor de exploitanten. Een veilige exploitatie waarborgt niet alleen de bescherming van het personeel, de bevolking en het milieu, maar ook de goede werking van de installaties op lange termijn.

Een interne dienst voor preventie en controle (eigen aan de exploitant, de zogeheten Fysieke Controledienst) wordt reglementair belast met de organisatie van en het toezicht op de maatregelen die nodig zijn voor de naleving van het ARBIS.

Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) en de erkende organismen

De controle op de Belgische nucleaire installaties is de verantwoordelijkheid van het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC, instelling van openbaar nut, www.fanc.fgov.be). Het Agentschap staat onder de voogdij van de minister van Binnenlandse Zaken en heeft als doelstelling erover te waken dat de bevolking en het leefmilieu op een doeltreffende manier worden beschermd tegen de gevaren van ioniserende straling. Door zijn statuut geniet het FANC een grote onafhankelijkheid, die noodzakelijk is voor de onpartijdige uitoefening van zijn verantwoordelijkheid ten aanzien van de maatschappij.



Kernenergie
beter begrijpen

Voor de permanente controle op de sites, doet het FANC een beroep op een gespecialiseerde en door de Belgische overheid erkende instelling die belast is met de oplevering van de installaties en het controleren van de goede werking ervan. Die controle gebeurt permanent voor de installaties van klasse I (kerncentrales bijvoorbeeld), ten minste om de drie maanden voor de installaties van klasse II en ten minste jaarlijks voor de installaties van klasse III.

De voornaamste organismen voor de controle van nucleaire activiteiten zijn Bel V, AIB-Vinçotte Controlatom (AVC) en Techni-Test. Deze organismen bestrijken andere, maar complementaire domeinen van de nucleaire sector:

- Bel V³⁵ staat in voor de controle van de veiligheid in de vier eenheden van Doel en de drie eenheden van Tihange. Bel V komt tussenbeide in alle stadia van de levensduur van de centrales: het ontwerp, de bouw, de exploitatie en de ontmanteling. De ambtenaren van Bel V die belast zijn met de exploitatiecontrole hebben vrije en permanente toegang tot de site van de centrales. Bel V staat ook in voor de controle van BELGOPROCESS in Dessel, van het onderzoekscentrum SCK•CEN in Mol, van BELGONUCLEAIRE in Dessel en van het IRE in Fleurus. Gezien zijn deskundigheid werkt Bel V mee aan tal van internationale projecten en vertegenwoordigt het organisme België in technische vergaderingen die onder meer worden georganiseerd door het IAEA (Internationaal Atoomenergie-agentschap) of het NEA (Nucleair Energie Agentschap);
- AV Controlatom controleert meer dan 3.000 instellingen.
- Het kan gaan van transporteurs van radioactieve stoffen over universiteitslaboratoria tot radiografieapparaten voor toepassingen in de industrie, in ziekenhuizen enz. AV Controlatom voert bovendien het overgrote

deel van de individuele stralingsdosismetingen uit van de 20.000 werknemers die bij de uitoefening van hun beroep blootgesteld worden aan ioniserende straling. Deze werknemers zijn ongeveer als volgt verdeeld: 74% in de medische sector, 20% betrokken bij de cyclus van de kernbrandstof (dus ook de werknemers van de kerncentrales), 2% in de industrie en 4% in andere sectoren;

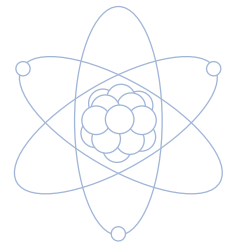
- Techni-Test controleert het overgrote deel van de exploitanten van klasse III-installaties.

Op internationaal niveau

De organisatie van de nucleaire veiligheid in België beantwoordt aan het niveau van de aanbevelingen van internationale instellingen zoals het IAEA, het NEA, de WENRA of de WANO:

- Het Internationaal Atoomenergie-agentschap werd in 1957 opgericht door de Verenigde Naties om de ontwikkeling van het praktische gebruik van kernenergie voor vreedzame doeleinden aan te moedigen en ervoor te waken dat kernenergie niet zou worden aangewend voor militaire doeleinden. Sinds het begin van de jaren '70 ontwikkelt het IAEA veiligheidsnormen met betrekking tot het ontwerp en de exploitatie van kerncentrales. Al snel (aangemoedigd door o.a. het NEA) ontwikkelde zich een systeem voor het verzamelen, analyseren en verspreiden van informatie met betrekking tot nucleaire veiligheid voor de landen met kernenergie die daaraan wensten deel te nemen. Door de bouw van steeds meer installaties en onder impuls van de exploitanten, breidde het IAEA zijn activiteiten uit. De organisatie begon diensten aan te bieden die dichterbij de installaties zelf staan. Daartoe richtte ze internationale teams die zich niet enkel bezig houden met het theoretisch bestuderen van documenten,

35. Op 11 april 2008 sloten AVN (Associatie Vincotte Nucleair) en Bel V een akkoord waarbij de controleactiviteiten van AVN werden overgedragen aan Bel V. De filialisering kadert in de aanbevelingen van de parlementaire resoluties van vorig jaar met als doel om de nucleaire reglementaire controles in België efficiënter te organiseren waardoor de veiligheid van de werknemers en bevolking nog beter wordt gegarandeerd. Met deze transfer werden alle reglementaire controles die door AVN werden uitgevoerd door Bel V overgenomen. Er zal verder gewerkt worden opdat gelijkaardige akkoorden mogelijk zouden worden met de andere instellingen werkzaam in het domein van de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming.

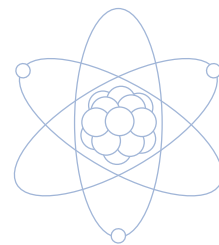


maar die, op uitnodiging van de betrokken landen, in de kerncentrales zelf de veiligheid gaan controleren. Zo is in 1982 OSART ontstaan (Operational Safety Review Team). Het OSART-programma heeft als doel de exploitanten uit de lidstaten te helpen om de operationele veiligheid van hun kerncentrales te verhogen en de onophoudelijke ontwikkeling van die veiligheid te stimuleren door het uitwisselen van informatie met betrekking tot goede praktijken, nieuwe methodes en gedragslijnen enz. Het programma wil met andere woorden komen tot uitmuntendheid op het vlak van nucleaire veiligheid;

- het Nucleair Energie Agentschap (Nuclear Energy Agency) legt zich toe op het gemeenschappelijk stellen van de kennis inzake veiligheid en de analyse van incidenten die hebben plaatsgevonden in nucleaire installaties;

Op vraag van de Belgische nucleaire veiligheidsautoriteiten grepen twee OSART audits plaats. Een audit te Tihange (5-23 mei 2007) en een te Doel (8-25 maart 2010). Het bilan is positief en bemoedigend. De experts hebben onder meer bevestigd dat Electrabel absoluut prioriteit geeft aan veiligheid en ook werk maakt van een dynamiek van voortdurende verbetering. Ze hebben een aantal concrete verbeteringstrajecten uitgestippeld die Electrabel moeten helpen om te evolueren naar de beste praktijken ter wereld (OSART-referentiekader). Tot slot hebben ze ook een groot aantal goede praktijken aangestipt die tot voorbeeld kunnen strekken in andere kerncentrales ter wereld.

- de niet-gouvernementele organisatie WENRA (Western European Nuclear Regulators' Association), bestaat officieel sinds 1999 en verenigt de regelgevende overheden voor nucleaire veiligheid van 17 landen (waaronder België), om bij te dragen tot de totstandkoming van een gemeenschappelijke Europese cultuur inzake nucleaire veiligheid. WENRA streeft een drievoudig doel na en mikt daarbij op een continu verbeterings- en harmoniseringsproces van de huidige veiligheidsaanpak:
 - een internationaal netwerk van ervaringsuitwisseling onderhouden en uitbouwen tussen alle verantwoordelijken voor nucleaire veiligheid;
 - een gemeenschappelijke aanpak ontwikkelen inzake veiligheid en nucleaire reglementering, in het bijzonder binnen de Europese Unie;
 - onafhankelijke onderzoekscapaciteit met betrekking tot nucleaire veiligheid uitbouwen.
- De associatie WANO (World Association of Nuclear Operators) verenigt alle nucleaire exploitanten van de wereld. Ze heeft tot doel de operationele veiligheid en betrouwbaarheid van de kerncentrales te maximaliseren via de uitwisseling van informatie en het stimuleren van communicatie, onderlinge vergelijking en een gezonde concurrentie tussen haar leden. Op verzoek van haar leden organiseert WANO de zogeheten "WANO Peer Reviews". Deze peer reviews zijn gebaseerd op dezelfde principes als de OSART-missies. De sites van Doel en Tihange worden periodiek onderworpen aan deze WANO-audits.



VEILIGHEID IN DE BELGISCHE KERNCENTRALES

De Belgische overheid was de eerste die aan de kerncentrale-exploitant een verplichting oplegde die intussen in veel landen wordt toegepast en die deel uitmaakt van de huidige internationale aanbevelingen: de periodieke veiligheidsherziening (of tienjaarlijkse herziening). Deze verplichting, die is vastgelegd in de vergunningsbesluiten van de centrales, bepaalt dat, na de industriële inbedrijfstelling van de eenheid, de exploitant en het erkend organisme om de tien jaar moeten overgaan tot een vergelijking tussen enerzijds de staat van de centrale en de regels die er worden toegepast, en anderzijds de meest geavanceerde reglementen, normen en praktijken in het buitenland. Deze periodieke veiligheidsherzieningen maken het mogelijk om, naast de permanente verbeteringen aan de installatie, het veiligheidsniveau aanzienlijk te doen evolueren. De vernieuwing van de controle- en besturingssystemen, de instrumentatie- en veiligheidssystemen of de brandbeveiliging zijn voorbeelden van zulke verbeteringen.

De Belgische kerncentrales werken reeds meer dan 30 jaar zonder incidenten of ongevallen die een gevaar eigen aan de nucleaire activiteit hebben opgeleverd voor de werknemers, de bevolking en het leefmilieu.

Nucleaire veiligheid in de nieuwe lidstaten van de Europese Unie

Sinds begin jaren '90 is met internationale steun een programma op touw gezet om alle Russische reactortypes te moderniseren. De VVER-reactoren konden gemakkelijk worden geoptimaliseerd en hebben vandaag een veiligheids- en betrouwbaarheidsniveau dat helemaal vergelijkbaar is met de West-Europese reactoren.

De financiële middelen zijn grotendeels afkomstig van de Europese commissie en de EBRD (European Bank for Reconstruction and Development). Ondanks deze moderniseringsprogramma's werd tijdens de toetredingsonderhandelingen met een aantal nieuwe Europese lidstaten overeengekomen dat de RBMK- en VVER-reactoren van de eerste generatie geleidelijk buiten dienst zullen worden gesteld. Dat is onder meer het geval in Litouwen (sluiting van de enige twee reactoren in Ignalina, type RBMK) en in Slowakije (sluiting van de twee oudste reactoren van de kerncentrale van Bohunice).

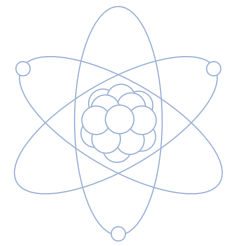
NOODPLAN

We hebben reeds gezegd dat er enorm veel inspanningen worden geleverd om ongevallen te vermijden die een impact zouden kunnen hebben op de installaties, het personeel, het leefmilieu of de bevolking. Die inspanningen starten al bij het ontwerp van de installaties en worden voortgezet tijdens de volledige levensduur ervan. Een van de aspecten die aan bod komen, is het uittekenen van een organisatie voor noodgevallen, iets wat gebeurt onder controle van de overheid.

Elke exploitant is reglementair verplicht een intern noodplan op te stellen om het hoofd te bieden aan alles wat er kan mislopen in zijn installatie, en de overheid organiseert een extern noodplan om het hoofd te bieden aan de eventuele gevolgen van een ongeval buiten de nucleaire site.

Wettelijk kader

In België wordt het Nucleair en Radiologisch Noodplan voor het Belgische grondgebied geregeld door de Koninklijke Besluiten van 17 oktober 2003 en 16 februari 2006. Het noodplan heeft tot doel de maatregelen te coördineren die bij een radiologische noodtoestand moeten worden genomen om de bevolking en het milieu te beschermen.



Naast de algemene organisatie beschrijft het noodplan de taken die moeten worden uitgevoerd door de verschillende instellingen en diensten, binnen hun respectieve wettelijke en reglementaire bevoegdheden. Het noodplan wordt aangevuld door specifieke interventieplannen op de verschillende interventieniveaus (o.a. provincie en gemeenten) en door operationele procedures die eigen zijn aan elke eenheid die in het kader van het noodplan een rol vervult. De minister van Binnenlandse Zaken zorgt voor de coördinatie van het noodplan op federaal niveau, het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) verleent technische en wetenschappelijke assistentie bij het opstellen van de plannen. Het Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen (FAVV) neemt ook deel aan de organisatie, evenals het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI), het Studiecentrum voor Kernenergie te Mol (SCK•CEN), het Nationaal Instituut voor Radio-elementen (IRE), instellingen zoals Bel V en nog vele andere actoren.

Het huidige noodplan houdt ook rekening met de ervaring die tijdens de voorbije jaren werd opgedaan (Tsjernobyl, Tokai-Mura, dioxinecrisis in België, organisatie van Euro 2000, Belgisch voorzitterschap van de Europese Unie in 2001,...). De lessen die konden worden getrokken uit deze incidenten of evenementen, hebben aanleiding gegeven tot organisatorische aanpassingen t.o.v. het vorig plan. Het noodplan voorziet ook in het opstellen van een globaal jaarplan, dat gebaseerd is op oefeningen en moet uitmonden in een actieplan.

Het federaal noodplan heeft hoofdzakelijk betrekking op de belangrijke kerninstallaties in ons land, evenals op de nabije kerncentrales in Frankrijk en Nederland. Het noodplan heeft ook oog voor andere ongevallen, zoals een ongeval met een transport van radioactieve stoffen, een stralingsongeval in een ziekenhuis of incidenten in het buitenland die gevolgen kunnen hebben op het Belgische grondgebied. In dit kader heeft België twee conventies geratificeerd met het IAEA, allebei gedateerd op 26/09/86, een met betrekking tot het onverwijld melden van nucleaire incidenten en een met betrekking tot het verlenen van bijstand in geval van een nucleair ongeval.

Situaties die een noodinterventie vereisen

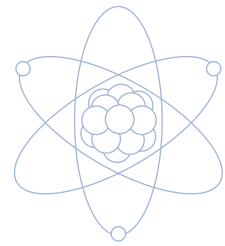
Bij normale exploitatieomstandigheden van een nucleaire installatie blijven de bijkomende stralingsdoses voor de omwonende bevolking extreem laag, meerdere grootteordes onder het niveau van de natuurlijke radioactiviteit (zie p. 17).

Bij een ernstig ongeval zouden er evenwel radioactieve stoffen kunnen vrijkomen in de omgeving en het is dan ook noodzakelijk om beschermingsmaatregelen te nemen om de doses waaraan de bevolking wordt blootgesteld te beperken. Bij die uitzonderlijke beschermingsmaatregelen denken we onder meer aan :

- het binnen blijven in woningen of schuilplaatsen;
- het toedienen van jodiumtabletten;
- preventieve of curatieve evacuatie;
- het tijdelijk of permanent elders huisvesten van de bevolking;
- het verbod om bepaalde voedingsmiddelen te gebruiken;
- het wijzigen van landbouw- of industrieprocessen;
- decontaminatie of ontsmetting.

Deze beschermingsmaatregelen (op het vlak van gezondheid, economie enz.) zijn zelf niet zonder gevolgen: sommige ervan hebben een directe impact op de gezondheid en het welzijn van de bevolking. Bij het overleg en het bepalen vanaf wanneer een bepaalde beschermingsmaatregel nodig is, moet men een afweging maken tussen de gezondheidsvoordelen die de maatregel biedt (terugdringen van het stralingsrisico) en de ongemakken die voortvloeien uit de maatregel zelf.

Er moet in ieder geval een onderscheid worden gemaakt tussen de dosislimieten en -beperkingen die van toepassing zijn bij normale werkingsomstandigheden en de interventieniveaus die van toepassing zijn na een ongeval. Bij het beheersen van een geplande uitstoot van radioactieve stoffen wordt de straling die de bron zelf



veroorzaakt in de installatie vergeleken met de bijkomende stralingsblootstelling die ze veroorzaakt in de omgeving. Bij noodinterventies wordt het voordeel van de interventie afgewogen tegen de mate waarin de stralingsblootstelling door de interventie wordt teruggedrongen.

Gezondheidsredenen die na een ongeval een beschermende actie rechtvaardigen

Door een ongeluk kunnen radioactieve stoffen worden uitgestoten en vervolgens terecht komen in de lucht, het water en de bodem. Vooral bij ongevallen waarbij een belangrijke uitstoot in de atmosfeer terechtkomt, moeten er onmiddellijk beschermende maatregelen worden getroffen. Na elke uitstoot van radioactieve stoffen in de atmosfeer kan de bevolking immers worden blootgesteld aan straling, ofwel rechtstreeks via de radioactieve wolk, ofwel via het inademen van radioactieve deeltjes en gassen die afkomstig zijn van de wolk. Naarmate de wolk uiteenvalt, zetten de radioactieve deeltjes zich af op het bodemoppervlak bij droog weer of worden ze neergeslagen door de regen of andere vormen van neerslag. De bevolking kan dan via die neergeslagen deeltjes rechtstreeks worden blootgesteld aan straling, door deeltjes in te ademen die van op de bodem terug in de lucht terechtkomen, door besmette voedingsmiddelen te eten of door besmet water te drinken. De bepalingen van het noodplan zijn dus van toepassing in die gevallen waar de bevolking het risico loopt te worden blootgesteld aan hoge radiologische doses via:

- uitwendige besmetting (bron buiten het lichaam) via de lucht en/of neergeslagen radioactieve deeltjes;
- inwendige besmetting (bron binnen het lichaam) door het inademen van besmette lucht en/of het inslikken van besmet voedsel of water.

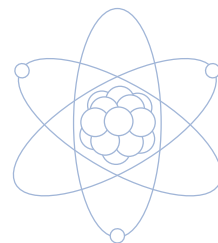
Interventieprincipes

Burgerbevolking

Het nemen van beschermingsmaatregelen beperkt de bewegings- of keuzevrijheid van de bevolking en is belastend voor de maatschappij. Er zijn drie algemene principes die men hanteert om te beslissen of er al dan niet wordt overgegaan tot een interventie:

- a. Alles moet in het werk worden gesteld om ernstige deterministische effecten op de gezondheid te vermijden. Deze deterministische effecten kunnen worden vermeden indien de doses voor alle burgers onder de drempelwaarden blijven die voor deze effecten werden bepaald.
- b. De interventie moet gerechtvaardigd zijn, d.w.z. dat de voordelen door het nemen van de beschermingsmaatregelen groter moeten zijn dan de ongemakken die eruit voortvloeien. De interventie is gerechtvaardigd wanneer het duidelijk voordeliger is om in te grijpen. Het is belangrijk om de voordelen en de ongemakken van een interventie nauwkeurig af te wegen, want voor bepaalde beschermingsmaatregelen zijn die ongemakken groter dan het voordeel van de vermeden straling.
- c. Het grensniveau om een beschermingsmaatregel toe te passen, en het niveau om die daarna weer op te heffen, moet zorgvuldig worden geoptimaliseerd om ervoor te zorgen dat de maatregel een zo groot mogelijk netto voordeel oplevert. Bij een maximaal netto voordeel van de beschermingsmaatregel is de interventie gemaximaliseerd. Voor elke beschermingsmaatregel kan men een interventieniveau kiezen waarboven de maatregel normaal wordt genomen en waaronder hij niet wordt genomen. Dat interventieniveau moet dus worden gekozen om een zo groot mogelijk netto voordeel te bekomen.

De interventieniveaus moeten worden toegepast met de nodige soepelheid, om te vermijden dat individuen worden blootgesteld aan hoge risico's. De bevoegde



autoriteiten moeten zich ervan bewust zijn dat, om een lage bijkomende straling te vermijden, de ongemakken snel kunnen toenemen. Men vergelijkt onmiddellijke ongemakken en potentiële risico's op langere termijn, wat vaak een kwestie is van politieke keuzes.

Personeel van de nucleaire installaties

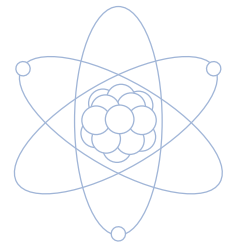
Voor werknemers is het de blootstelling aan de stralingsbron die gerechtvaardigd moet kunnen worden en de bescherming tegen de straling die geoptimaliseerd moet worden. Aangezien het hier gaat om een bewuste en gecontroleerde blootstelling, moeten de dosislimieten voor werknemers gerespecteerd worden zolang er geen dwingende redenen zijn om daarvan af te wijken. In een aantal heel uitzonderlijke gevallen kan het gerechtvaardigd worden om een aantal werknemers bloot te stellen aan waarden die boven de expliciet vastgelegde dosislimieten liggen. Deze toestand verschilt niet van deze die brandweerlui of leden van de burgerbescherming meemaken tijdens grote branden of ontploffingen in industriële of commerciële installaties.

DE INES-SCHAAL

De ongevallen van Three Mile Island en Tsjernobyl brachten aan het licht hoe moeilijk de verantwoordelijken van de nucleaire sector het hadden om met de pers en het grote publiek te communiceren. Specialisten in kernenergie kwamen daardoor tot het besef dat er een efficiënt referentie- en informatiemiddel moest worden uitgewerkt dat in geval van nucleaire incidenten of ongevallen kon worden gebruikt. Uit dit besef is de INES-schaal ontstaan.

De internationale schaal voor nucleaire gebeurtenissen (International Nuclear Event Scale) werd aan het einde van de jaren '80 op punt gesteld door een groep experts van het IAEA en het NEA. Ze is gebaseerd op hetzelfde principe als de schaal van Richter, die wordt gebruikt om de ernst van aardbevingen te beoordelen. De INES-schaal omvat zeven niveaus die zijn verdeeld in twee categorieën. De laagste niveaus (1 tot 3) betreffen incidenten, de hoogste niveaus (4 tot 7) ongevallen. De beoordeling van de incidenten en ongevallen hangt af van drie criteria: de gevolgen voor de bevolking en het milieu (buiten de site), de gevolgen bin-





nen de site en de aantasting van het “defence in depth”-concept (zie p. 62). Alleen gebeurtenissen die een weerslag hebben of kunnen hebben op de nucleaire veiligheid van de installaties worden in deze schaal opgenomen. Het ongeval van Three Mile Island werd bijvoorbeeld geklasseerd als niveau 5 op de INES-schaal en dat van Tsjernobyl als niveau 7.

Het is van essentieel belang om erop te wijzen dat deze schaal uitsluitend een communicatie-instrument is en dat het aantal INES-gebeurtenissen op zich niet mag worden gebruikt om het veiligheidsniveau van een nucleaire installatie te beoordelen.

NON-PROLIFERATIEVERDRAG

Zowel de politieke verantwoordelijken als de bevolking zijn ervoor beducht dat gevoelige radioactieve stoffen, in het bijzonder plutonium, sterk verrijkt uranium, thorium-232 of uranium-233, evenals de technologie en de nucleaire installaties die in het kader van civiele activiteiten worden aangewend, zouden worden ontvreemd en ingezet voor militaire of terroristische doeleinden. Het is in elk geval zo dat de meeste landen die kernwapens willen bemachtigen dat doen via gespecialiseerde militaire en vaak geheime structuren, en niet door radioactieve stoffen te ontvreemden die afkomstig zijn van civiele kernactiviteiten, die in de meeste gevallen gebonden zijn door internationale richtlijnen en garanties. Niettemin blijft het zo dat ontvreemding van splijtstof een mogelijkheid kan zijn om een noodzakelijke technische stap voor de productie van kernwapens over te slaan. Het non-proliferatiestelsel moet dan ook ver genoeg reiken om splijtstoftrafiekken efficiënt te traceren en bijgevolg ook een ontradend effect te hebben. Dit wordt des te belangrijker naarmate er elektronucleaire programma's (productie van elektriciteit op basis van kernenergie) worden opgestart in nieuwe regio's en landen.

Het non-proliferatieverdrag (NPV) of het verdrag inzake de niet-verspreiding van kernwapens uit 1970 is het belangrijkste instrument om de productie of de ontvreemding van radioactieve stoffen voor militaire doeleinden te

ontmoedigen. Dit verdrag verbindt 187 landen (alle landen ter wereld behalve Israël, India en Pakistan) en belooft de niet-kernmachten de voordelen van alle vredelievende toepassingen van kerntechnologie in ruil voor hun engagement geen kernwapens te ontwikkelen, te gebruiken of na te streven. De naleving van deze verbintenis wordt gecontroleerd via een internationaal waarborgsysteem dat beheerd wordt door het IAEA en dat controleert of de nucleaire activiteiten van de landen die niet over kernwapens beschikken uitsluitend van niet-militaire aard zijn. In het verleden waren er wel al een paar landen die hun engagement hebben geschonden (Irak, Iran, Noord-Korea).

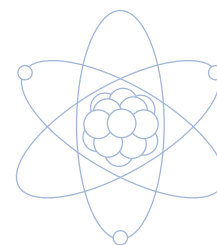
NUCLEAIRE ONGEVALLEN

De grootste nucleaire ongevallen

Ondanks de permanente veiligheidszorg in nucleaire installaties, hebben er zich in het verleden al een paar ongevallen voorgedaan. Paradoxaal genoeg hebben die ongevallen bijgedragen tot een significante verhoging van het wereldwijde veiligheidsniveau. Hieronder hebben we een aantal representatieve gebeurtenissen samengevat

Goiana (medische bron)

Op 13 september 1987 werd uit een voormalig ziekenhuis in Goiana (Brazilië) een gesloten radioactieve bron meegenomen. Het ging om een hoogradioactief staafje (60 terabequerel) met cesiumchloridepoeder (CsCl) dat ingebouwd zat in een radiologietoestel. De bron werd geopend in een woongebied en de radioactieve stof raakte verspreid in een stedelijke zone over zowat 1 km². Heel wat mensen raakten besmet en/of bestraald. In totaal werden 110.000 personen gecontroleerd, waarvan 149 medische zorgen nodig hadden. Vier mensen zijn binnen de maand gestorven. In totaal waren 85 woningen significant besmet, 41 woningen werden verlaten, 7 huizen werden afgebroken, 45 openbare plaatsen (straten, pleinen, winkels enz.) werden ontsmet, evenals 50 voertuigen. In totaal gaf het ongeval aanleiding tot 3.000 m³ radioactief afval en duur-



de het onder controle brengen ervan ongeveer 10 jaar. Door het regenwater raakte ook een nabijgelegen rivier besmet over een afstand van meer dan 10 km, tot op niveau die vandaag nog altijd meetbaar zijn.

Tokai Mura (kriticiteitsongeval)

Op 30 september 1999 vond in het Japanse stadje Tokai Mura een kriticiteitsongeval plaats in een fabriek voor de conversie van uranium. Bij de fabricage van een 19% verrijkte splijtstof (veel meer dan de splijtstof die courant wordt gebruikt in kerncentrales) voor een onderzoeksreactor, treden vier onervaren werknemers de veiligheidsprocedures met de voeten. Om de gewenste chemische neerslag te verkrijgen, verrichten ze een aantal handelingen met uranium. Ze laten een verplichte tussentijdse controle achterwege, waardoor de massa uranium (16 kg) de toegestane waarden (2,4 kg!) overschrijdt en de 'kritieke massa' wordt bereikt om een splijtingsreactie tot stand te brengen. Kriticiteit is de toestand waarbij in de kernreactor een zichzelf onderhoudende kettingreactie plaatsvindt. Er ontstond geen ontploffing, wel een neutronenstraling met een hoge intensiteit. Er kwamen schadelijke splijtingsproducten vrij in gasvormige toestand die via het ventilatiesysteem ook gedeeltelijk buiten de installatie terecht kwamen.

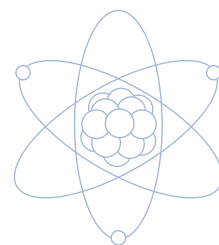
Drie werknemers werden blootgesteld aan een hoge stralingsdosis, één werknemer is overleden en een zestigtal werknemers, brandweerlui en burgers werden blootgesteld aan een lichte straling zonder onmiddellijke fysieke gevolgen. 200 omwonenden werden geëvacueerd omdat ze in een straal van minder dan 350 meter van de plaats van het ongeval woonden. Niemand van hen werd blootgesteld aan een straling van meer dan 25 mSv. Buiten de nucleaire installatie waren er geen effecten op de gezondheid. Het ongeval was overduidelijk te wijten aan het gebrek aan ervaring van de operatoren en het niet-naleven van de veiligheidsvoorschriften.

Three Mile Island (gedeeltelijke kernsmelting)

Op 28 maart 1979 vond een ongeval plaats in eenheid 2 van de kerncentrale van Three Mile Island (TMI), nabij Harrisburg in de Amerikaanse staat Pennsylvania. Om 4 uur 's ochtends ontstond een panne in het secundaire circuit: de warmteafvoer wordt onderbroken. Door de drukverhoging in het primaire circuit opent de veiligheidsklep van het primaire circuit zich, maar vervolgens sluit ze niet opnieuw. Dat laatste wordt echter niet waargenomen door de operator, die vanuit een foutieve interpretatie eerst de veiligheidsinjectie opheft en dan de primaire pomp stopt. De temperatuur van de reactorkern gaat snel de hoogte in en een deel van de splijtstof smelt. Het duurt meerdere uren vooraleer de situatie onder controle is. In die tijdspanne vormt zich een waterstofbel door de oxidatie van een deel van het zirkonium uit de splijtstofhulzen. Vandaag weten we dat er geen gevaar bestond dat die bel zou ontploffen, maar indertijd had men nog nooit rekening gehouden met een dergelijk scenario en werd het personeel geconfronteerd met een onverwachte situatie.

Door het potentiële risico ontstond er paniek bij de politieke verantwoordelijken en bij de bevolking, die werd aangeraden om het gebied te verlaten. Er kwamen ook kleine hoeveelheden radioactief materiaal in de atmosfeer terecht. Duizenden stalen van water, lucht, melk en andere landbouwproducten werden geanalyseerd, maar er werd geen enkele gevaarlijke besmetting voor de gezondheid vastgesteld.

Sinds het ongeval houden de exploitanten van PWR-reactoren rekening met de ervaringen van TMI in hun veiligheidsbeleid en beslisten ze ook om hun samenwerking en ervaringsuitwisseling op te voeren. Er werden onder meer bijkomende opleidingen uitgewerkt op simulatoren, om verschillende incidentscenario's te kunnen reproduceren. Uiteindelijk had het ongeval van TMI, geen gevolgen voor de bevolking of het milieu.



Tsjernobyl (kernsmelting, brand en explosie)

Op 26 april 1986 om 1u23 's nachts deed er zich een explosie voor in reactor nr. 4 van de kerncentrale van Tsjernobyl, in de toenmalige Sovjet-Unie. De RBMK-reactor werkte op lichtverrijkt uranium, kokend water en grafiet. Het was een reactor van exclusieve Sovjetmakelij met een design dat geoptimaliseerd was voor de productie van militaire splijtstoffen. De operatoren voerden op bevel van Moskou een experiment uit met de reactor, een experiment dat niet alleen compleet mislukte, maar ook de grootste niet-militaire kernramp uit de geschiedenis veroorzaakte. Door een opeenvolging van menselijke handelingen – met name het doelbewust onderdrukken van de automatische veiligheidssystemen ter wille van het experiment – werd de reactor te zwaar belast, sloeg hij op hol en werd hij vernietigd. Een paar seconden later volgde een tweede ontploffing die ook een deel van het gebouw vernietigde, waardoor hoogradioactieve brokstukken in de onmiddellijke omgeving terecht kwamen en er verschillende branden veroorzaakten. Door het contact met de lucht ontbrandde het grafiet en kwamen er grote hoeveelheden radioactief materiaal in de atmosfeer terecht.

De radioactieve wolk afkomstig van Tsjernobyl bereikte uiteindelijk ook ons land. De radioactiviteit die in België werd gemeten, bleek niet significant te zijn en had een verwaarloosbare impact op het milieu.

Een ongeval zoals dat in Tsjernobyl is in België onmogelijk om drie redenen: PWR-reactoren zijn in tegenstelling tot RBMK-reactoren intrinsiek stabiel (ze kunnen niet op hol slaan); er wordt gebruikgemaakt van water als moderator en niet van brandbaar grafiet; en onze centrales beschikken over een dubbele ommanteling, wat in Tsjernobyl niet het geval was.

Burgerlijke aansprakelijkheid en verzekering van kerncentrales

De burgerlijke aansprakelijkheid van de nucleaire exploitanten is vastgelegd in de wet van 22 juli 1985. Die bevat de maatregelen tot toepassing van het Verdrag van Parijs en van het Aanvullend Verdrag van Brussel inzake wettelijke aansprakelijkheid op het gebied van kernenergie.

De wet bepaalt dat de exploitanten van een kerninstallatie aansprakelijk zijn voor de schade veroorzaakt door een kernongeval binnen de perken van de bedragen bepaald in het Verdrag.

Bij een kernongeval kunnen de nucleaire exploitanten zelf aansprakelijk worden gesteld voor een bedrag van **300 miljoen euro**. Om aan die wettelijke verplichting te voldoen hebben zij een polis Burgerlijke Aansprakelijkheid afgesloten bij het Belgische Syndicaat voor kernverzekeringen (SYBAN).

Indien de schade meer van 300 miljoen euro zou bedragen, voorziet het wettelijk systeem dat een bijkomende vergoeding wordt betaald door de Belgische Staat en de andere lidstaten³ die gebonden zijn door het Verdrag van Parijs en het Aanvullend Verdrag van Brussel.

Die Verdragen zijn ondertussen in 2004 gewijzigd op basis van een aantal Protocollen die voor een betere risicodekking moeten zorgen:

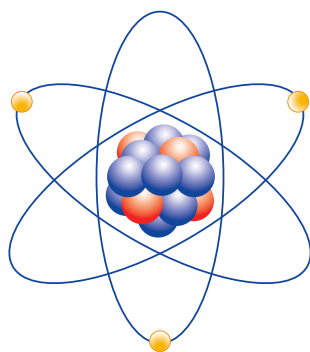
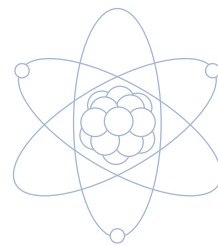
Het huidige bedrag van 300 miljoen euro dat de nucleaire exploitanten zelf moeten verzekeren zal op termijn naar **700 miljoen euro** worden opgetrokken.

De tussenkomst van de Belgische Staat zal op **500 miljoen euro** neerkomen.

Daar bovenop is er nog een tussenkomst van de lidstaten gebonden door het Verdrag van Parijs voor een bedrag van **300 miljoen euro**.

Dat brengt de totale vergoeding voor de risicodekking na herziening van de Verdragen dus op **1,5 miljard euro**.

Er is voorzien dat de wijzigingen bepaald in de Protocollen van 2004 tegen het einde van 2010 van kracht zouden worden.





In tegenstelling tot wat veel mensen denken, kan kernenergie tot op zekere hoogte worden beschouwd als een milieuvriendelijke energievorm. Als we de productie van elektriciteit op basis van kernenergie vergelijken met de klassieke elektriciteitscentrales op fossiele brandstof (steenkool, gas, aardolie) dan stellen we vast dat kerncentrales bijna geen gassen of deeltjes uitstoten die bijdragen tot het broeikaseffect, de verzuring van het regenwater of de afbraak van de ozonlaag. Het spreekt voor zich dat de nucleaire industrie wel op een verantwoorde manier het kernafval en de milieurisico's moet beheeren.

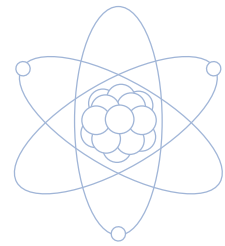
DE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN TEN GEVOLGE VAN ENERGIEPRODUCTIE

Zoals we kunnen zien in de onderstaande tabel, zijn kernenergie en wind- en waterenergie de energievormen die geen (of erg weinig) CO₂ uitstoten. Daarna komt zonne-energie en biomassa. De stoom- en gascentrales (STEG-centrales, hoog rendement) betekenen weliswaar een forse vooruitgang ten opzichte van de moderne steenkoolcentrales, maar stoten niettemin nog altijd 400 g CO₂ per geproduceerd kWh uit.

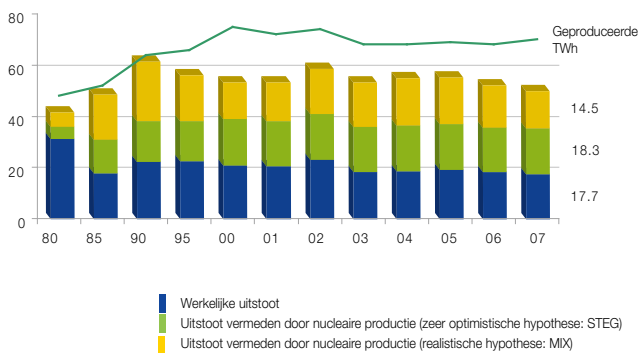
De aan elektriciteitsproductie verbonden CO₂-uitstoot bedroeg in 2006 ongeveer 13% van de totale CO₂-uitstoot in België. Die bedraagt ongeveer 150 miljoen ton per jaar. Uit prognoses blijkt dat bij een eventuele uitstap uit kernenergie de toekomstige CO₂-uitstoot verbonden aan elektriciteitsproductie een stuk hoger zal zijn. Indien men kernenergie zou vervangen door aardgas, zal de CO₂-uitstoot stijgen met bijna 20 miljoen ton per jaar t.o.v. het huidige niveau, en indien men zou kiezen voor een 'mix' van vervangingsbrandstoffen zou de stijging bijna 30 miljoen ton bedragen.

Uitstoot van broeikasgassen ten gevolge van energieproductie	Kernenergie	Windenergie		Zonne-energie		Waterkracht		Biomassa		STEG	Steenkool nieuwe generatie
		Kust	Binnenland	1996	2005	Pomp	Micro	Hout	Slib		
Gebruiksduur $\left[\frac{\text{kWh}_{\text{el}}}{\text{kW}_{\text{piek}} \cdot \text{jaar}} \right]$	7600	3000	1000	750	800	1000	5000	6000	5000	6500	5500
Levensduur (jaar)	40	20	20	20	25	40	40	15	30	30	30
$\frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$	7	9	25	130	60	8	15	55	540	400	850
	Investeringsmiddelen										
Splijtstofcyclus											
Verbranding											
(#) Bouw + onderhoud + afbraak											

Gebruiksduur in uur per jaar
Bron: Ampèrereport



CO₂-uitstoot voor de Belgische elektriciteitssector volgens drie scenario's:



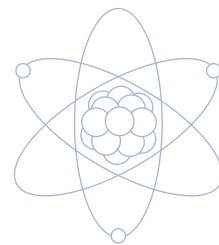
Het Kyoto-protocol

De kaderconferentie van de Verenigde Naties over de klimaatverandering (goedgekeurd in Rio in 1992) heeft als doelstelling "een stabilisatie van de atmosferische concentratie van broeikasgassen, op een niveau waarbij een gevaarlijke antropogene verstoring van het klimaat wordt vermeden". Om dat doel te halen, voorziet het Kyoto-protocol uit 1997 voor 38 industrielanden het verminderen tijdens de periode van 2008-2012 van de emissies met minstens 5% ten opzichte van 1990 (-7% voor de Verenigde Staten, -8% voor de Europese Unie, -6% voor Japan en Canada enz.). Hoewel ze verantwoordelijk zijn voor 25% van de wereldwijde CO₂-uitstoot, weigerden de Verenigde Staten het protocol te ratificeren. Binnen de Europese Unie, werden de reductiedoelstellingen verdeeld in functie van de bestaande uitstoot (hoe hoger de uitstoot, hoe groter de reductie): zo moet Duitsland bijvoorbeeld zijn uitstoot met 21% terugschroeven terwijl de uitstoot van Portugal in theorie met 27% zou mogen stijgen. De ondertekenende landen moeten een openbaar beleid invoeren om de energie-efficiëntie te verbeteren en het gebruik van hernieuwbare energievormen aan te moedigen, maar ze kunnen

daarbij ook een beroep doen op verschillende zogenaamde flexibele mechanismen. Een daarvan is het "mechanisme voor schone ontwikkeling" (Clean Development Mechanism) waarbij industrielanden kunnen investeren in projecten die de netto-emissies in ontwikkelingslanden of landen uit Oost-Europa verlagen. In ruil daarvoor mag het investerende land (een deel van) de resulterende emissiereductie op eigen rekening schrijven. Sinds de akkoorden van Marrakech, en op initiatief van de Europese Unie, mag kernenergie evenwel geen deel uitmaken van deze flexibele mechanismen.

Nu Europa zich tot doel heeft gesteld om tegen 2020 zijn CO₂-uitstoot met 20 tot 30% te verminderen, gaat er steeds meer aandacht naar de plaats van kernenergie binnen een evenwichtige energiemix.

De voorbije jaren waren er binnen de Europese instellingen heel wat bemoedigende woorden te horen in verband met kernenergie. In 2007 lijkt men van woorden te zijn overgegaan tot daden. Het is niet langer voldoende om te stellen dat kernenergie deel zal uitmaken van de oplossing voor het energievraagstuk: men moet ook de context creëren die dat mogelijk maakt.



In de tweede helft van 2007 werden er verschillende Europese initiatieven geconcretiseerd die duidelijk een koerswijziging aantonen:

European Nuclear Energy Forum

Eind november 2007 werd in Bratislava (Slowakije) het eerste Europese nucleaire energieforum (ENEF) gehouden. Alle grote thema's rond de toekomstige ontwikkeling van kernenergie kwamen er aan bod: goed beheer, financiering, marktpenetratie, bouw van nieuwe installaties, publieke opinie, onderzoek enz. Het Forum opende de weg voor een publiek debat waaraan ook de burgermaatschappij volop kan deelnemen. Kernenergie brak daarmee als het ware uit het "getto" waarin ze verzeild was geraakt.

Sustainable Nuclear Energy Technology Platform

Op 21 september 2007 lanceerde de Europese Commissie in Brussel het technologisch platform voor duurzame kernenergie (SNE-TP). Binnen Europa bestaan al zo'n dertigtal van die sectorale technologieplatformen. Alle actoren uit de sector denken er samen en op Europees niveau na over de meest geschikte onderzoeks- en ontwikkelingstrajecten voor de toekomst. Die denkoefening stuurt ver-

volgens de strategische agenda's en de Europese kaderprogramma's aan met betrekking tot het onderzoek in de betrokken sector. Bij de lancering van het platform sprak Andris Piebalgs, de Europese Commissaris voor Energie, de volgende woorden uit: "De erkenning van kernenergie als een valabele bron voor een economie met een lage koolstofuitstoot wordt bedreigd door de lage publieke aanvaarding in een aantal landen en zelfs een totale afkeer in andere landen. Deze houding is vaak gebaseerd op een gebrekkige kennis en transparantie."

High Level Group Safety and Radioactive Waste

Deze groep rond nucleaire veiligheid en radioactief afvalbeheer is voor de eerste maal samengekomen in oktober 2007. Hoge functionarissen van de nationale regelgevende of veiligheidsautoriteiten maken er deel van uit. De groep moet de Europese Commissie helpen bij het bepalen van de prioriteiten op vlak van nucleaire veiligheid. Hij moet de Commissie eveneens helpen bij het progressief uitwerken van regels rond de nucleaire veiligheid van installaties en voor het veilig beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval.

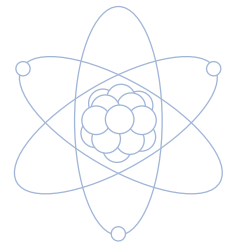
LOZINGEN

Zoals alle industriële installaties lozen ook kerncentrales stoffen in het milieu. Ondanks filtersystemen, die nooit 100% doeltreffend kunnen zijn, betreft het hier afval dat sporen bevat van radionucliden die worden geproduceerd tijdens de werking van de centrale. Dit afval kan zowel gasvormig zijn (xenon-133, krypton-85, koolstof-14, jodium-131, jodium-129, tritium) als vloeibaar (tritium, kobalt, nikkel,...). Deze radioactieve lozingen zijn in normale bedrijfsomstandigheden uiterst beperkt. Zowel de werknemers als de omwonenden lopen enkel in het

geval van een ernstig ongeval een reëel risico. De weerslag van de jaarlijkse lozingen van de Belgische kerncentrales vertegenwoordigt 0,01 mSv³⁶, of 0,1% van de maximale dosis die door de reglementering wordt opgelegd voor blootstelling aan kunstmatige straling (exclusief medische blootstelling). Bij deze dosis zijn nog nooit effecten vastgesteld, vermits ze vele ordes van grootte lager is dan de natuurlijke straling.

Alle lozingen (thermische, chemische of radioactieve) van nucleaire installaties zijn gereguleerd en worden gecontroleerd door de exploitanten en door de overheid.

36. Ter vergelijking: bij een longradiografie wordt men blootgesteld aan 0,14 mSv en bij een hartangiografie aan 6,8 mSv.



MILIEUBEWAKING

Zoals bij elke industriële installatie heeft ook de inplanting van een nucleaire installatie onvermijdelijk een weerslag op de omgeving. Die invloed manifesteert zich op verschillende terreinen: men denkt vaak onmiddellijk aan de stralingsimpact, maar daarnaast is er ook de esthetische impact, de geluidsimpact, eventuele wijzigingen van de temperatuur, van het regime en de fysisch-chemische samenstelling van waterlopen, de invloed op de aquatische flora en fauna, de thermische uitstoot in de atmosfeer en de economische en maatschappelijke impact.

Verschillende jaren voor de bouw van een nucleaire site wordt er een impactstudie uitgevoerd waarin de oorspronkelijke toestand van de site wordt beschreven, de verschillende invloeden of effecten die men kan verwachten en de manieren om de eventuele hinder zoveel mogelijk te beperken.

Vervolgens worden zowel bij het ontwerp als tijdens de bouw en de exploitatie alle nodige maatregelen genomen om ervoor te zorgen dat de installatie compatibel is met de omgeving waarin ze wordt ingeplant, zonder risico's te veroorzaken voor de menselijke gezondheid.

Milieubewaking (ook wel omgevingstoezicht genoemd) omvat dus zowel thermische, chemische, akoestische, aquatische, landschappelijke, socio-economische als radiologische aspecten. De radiologische monitoring vormt slechts één aspect van de milieubewaking.

Radioactiviteit komt zowel via vloeibare lozingen als via gasvormige uitstoot in het milieu terecht. Om de impact van die lozingen te beperken, worden er volgens het principe van de Russische baboesjka (een poppetje met verschillende lagen) meerdere barrières ingebouwd tussen de radioactieve stralingsbron en de externe omgeving.

Bij een normale werking is de gezondheidsimpact van de vloeibare en gasvormige lozingen van een nucleaire site extreem laag. Het jaarlijkse dosisequivalent van de meest blootgestelde burger blijft meerdere ordes van grootte onder de natuurlijke straling waaraan deze persoon sowieso wordt blootgesteld.

Uit de metingen die worden uitgevoerd in het kader van milieutoezicht blijkt dat het bodemecosysteem slechts in zeer geringe mate wordt beïnvloed door de radioactieve uitstoot van nucleaire installaties.

Het waterecosysteem vertoont wel een aantal sporen van kunstmatige radio-elementen afkomstig uit de vloeibare lozingen. Men vindt deze sporen terug in het sediment en mossen stroomafwaarts van nucleaire sites (H^3 , Co^{58} , Ag^{110m}).

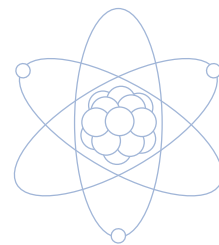
De milieubewaking vervult drie technische functies en een informatieve functie naar de overheid en de bevolking toe.

De drie technische functies zijn achtereenvolgens een meldingsfunctie, een controlefunctie en een opvolgings- en onderzoeksfunctie. Dankzij de meldingsfunctie kan er snel en alert worden gereageerd op een eventuele nucleaire anomalie. De controlefunctie maakt het mogelijk om zich ervan te verzekeren dat de gezondheidsreglementeringen worden gerespecteerd. Ze is gebaseerd op een aantal radiologische criteria. De opvolgingsfunctie op wetenschappelijk en onderzoeksvlak maakt het mogelijk om op basis van de vaststellingen toekomstige evoluties te voorspellen.

Naast de technische functies is er ook de informatiefunctie, die vooral belangrijk is bij ongebruikelijke, abnormale of accidentele omstandigheden.

Radiologische meldingsnetwerken

Deze automatische netwerken bestaan uit lucht- en riviermeetpunten met een beschikbaarheidsgraad van meer dan 99% en die in staat zijn om de geringste afwijkingen ten opzichte van de natuurlijke achtergrondruis te detecteren. Ze bewaken de perimeter van nucleaire installaties, de omliggende dorpen en agglomeraties en het volledige grondgebied. Ook de rivieren worden constant bemeten. De meetgegevens worden verzameld via een informaticasysteem en beheerd door de instanties die verantwoordelijk zijn voor de stralingsbescherming. Bij pannes of meldingen staan er mobiele interventieteams klaar die snel kunnen ingrijpen.



Sinds het ongeval in Tsjernobyl beschikken de meeste Europese landen over een dergelijke infrastructuur. Het TELERAD-net (www.telerad.fgov.be) is een automatisch netwerk dat de radioactiviteit op het Belgische grondgebied vanop afstand meet ("telemeting"). Het bestaat uit 212 meetstations die voortdurend de radioactiviteit in de lucht en het rivierwater meten. De meetstations zijn verspreid over het volledige Belgische grondgebied en in het bijzonder rond de nucleaire installaties (Tihange, Doel, Mol, Fleurus en Chooz) en de agglomeraties in de omgeving van deze installaties.

Het netwerk heeft twee hoofddoelstellingen: onverwijd alarm slaan wanneer een abnormale situatie wordt vastgesteld en het permanent registreren van meetgegevens om vervolgens statistische informatie op te leveren met betrekking tot de stralingsniveaus in ons land. Het TELERAD-net is dus in de eerste plaats een alarmnetwerk dat in staat is om in reële tijd abnormale situaties te detecteren die, afhankelijk van hun ernstgraad, aanleiding kunnen geven tot het inwerkingstellen van het Nucleaire Noodplan. Bij een eventueel nucleair ongeval zou het TELERAD-net een belangrijke rol spelen in zowel de beslissingname, de optimalisatie van de interventies en het bepalen van de vereiste tegenmaatregelen door de bevoegde instanties, als in de informatieverstrekking naar de bevolking toe. Daarnaast is het TELERAD-net ook uitgerust met meteorologische apparatuur. De gegevens afkomstig van deze "weerapparatuur" maken het mogelijk om de atmosfeer in kaart te brengen (modellisering), zowel in normale omstandigheden als in ongevalsituaties.

Controle van de radioactiviteitsniveaus op het grondgebied

De exploitant is verplicht om alle effluenten die hij loost te controleren en wordt daarbij op zijn beurt gecontroleerd door de overheid. Het milieu of de omgeving waarin die lozing plaatsvindt wordt gemonitord door de overheid, die een reeks controles uitvoert met betrekking tot de omgevingsstraling, de atmosferische stofdeeltjes, het regenwater, het rivierwater, het drinkwater, de bodem, de vegetatie en de melk. De voedselketen en

de "boodschappenmand van de huisvrouw" (aantal representatieve producten) worden onder het toezicht en voor rekening van de overheid ook in metrologische laboratoria gecontroleerd op lage radioactieve waarden. Deze systematische controles leveren geregelde informatie op over de radioactiviteitsniveaus op het grondgebied.

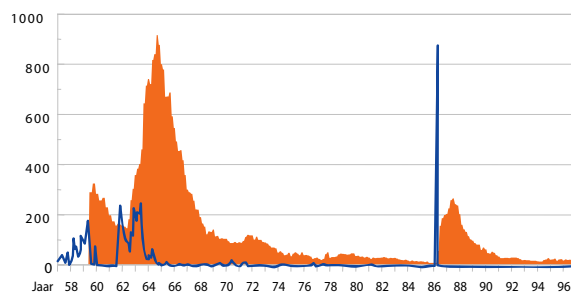
Radio-ecologische opvolging

De wetenschappelijke studie van de oorsprong en het traject van radio-elementen die in het milieu terechtkomen (de radio-ecologie) heeft tot doel de trajecten in kaart te brengen waarlangs de mens in contact kan komen met radioactieve stoffen. Over het algemeen kan een radio-ecologisch onderzoek uit meerdere fasen bestaan: een stand van zaken voor de opstart van de nucleaire site (de zogenaamde radio-ecologische nultoestand), een tienjaarlijkse stand van zaken bij wijze van opvolging, een jaarlijkse follow-up van de belangrijkste parameters m.b.t. het bodem- en watermilieu, eventuele gerichte studies op aanvraag.

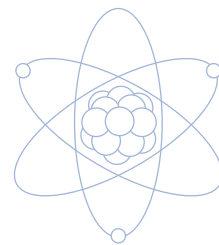
Conclusies

De gegevens die permanent worden aangeleverd door de exploitanten, door het automatische meetnetwerk en door het controleprogramma van ons grondgebied tonen aan dat de impact van de gasvormige of vloeibare radioactieve lozingen op de omgeving erg klein is (het dosis-equivalent van het individu met de hoogste blootstelling, het zogenaamde kritische individu, blijft meerdere ordes van grootte onder de natuurlijke straling waaraan hij/zij

Maandgemiddelde



■ Cesium-137 lichaamsbesmetting in België (Bq)
— Activiteit van het luchtstof (mBq/m³)



wordt blootgesteld). De controles die worden uitgevoerd in het kader van de milieubewaking bevestigen dat de impact van nucleaire installaties verwaarloosbaar is wanneer men vergelijkt met de natuurlijke radioactiviteit, met de resten van de fall-out (radioactieve neerslag) van militaire kernproeven of van het ongeval in Tsjernobyl (tijdens enkele jaren na 1986).

KERNAFVAL

Elke menselijke activiteit brengt afval voort, d.w.z. al dan niet schadelijke producten zonder nut. Ook nucleaire activiteiten, of ze nu van industriële, wetenschappelijke of medische aard zijn, ontsnappen niet aan die regel: een deel van het voortgebrachte afval is radioactief³⁷, soms veel radioactiever dan de natuurlijke stoffen in het milieu.

NIRAS beheert, de producenten betalen

In België is het beheer van radioactief afval volgens de wet toevertrouwd aan een overheidsinstelling: NIRAS (Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijstoffen). De industriële, wetenschappelijke en medische producenten van radioactief afval nemen hun verantwoordelijkheid op door dit beheer te financieren. De huidige en de toekomstige kosten die verbonden zijn aan het beheer van de gebruikte-splijstofcyclus worden geïntegreerd in de kostprijs van de nucleaire kWh. De wet van 11 april 2003 op de nucleaire provisies of voorzieningen belast SYNATOM³⁸ met het beheer van de voorzieningen voor het beheer van bestraalde splijstof en de ontmanteling van kerncentrales. In het bijzonder moet SYNATOM erop toezien dat het bedrag van de voorzieningen voldoende hoog is en ook beschikbaar is. De eindverantwoordelijkheid voor de financiering van de voorzieningen ligt bij de exploitant, ook al zouden de geprovisioneerde bedragen onvoldoende blijken. Het bepalen van het bedrag van de voorzieningen gebeurt enerzijds op basis van de huidige (en dus gekende) kosten en anderzijds op basis van ramingen, waarbij geval per geval ook een onzekerheidsmarge wordt ingebouwd.

NIRAS

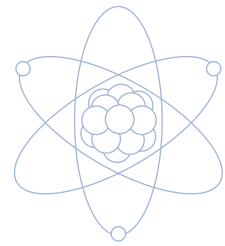
Vanuit de wens een gecentraliseerd en veilig systeem voor het beheer van radioactief afval te hebben, richtte de Belgische wetgever in 1980 de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijstoffen (NIRAS) op. Als overheidsinstelling heeft NIRAS niet de bedoeling winst te maken. De opdrachten worden uitgevoerd tegen kostprijs, waarbij de producenten (kerncentrales, ziekenhuizen, laboratoria enz.) de prijs betalen die noodzakelijk is om hun afval zowel op korte als op langere termijn veilig te kunnen beheren en bijgevolg de veiligheid van de huidige bevolking en van de toekomstige generaties te kunnen verzekeren.

Krachtens de wetten van 8 augustus 1980, 11 januari 1991 en 12 december 1997 is NIRAS belast met het uitwerken van een definitieve oplossing voor al het radioactief afval in België, zowel van lage, middelmatige als hoge activiteit.

NIRAS is verantwoordelijk voor het beheer van al het radioactieve afval op Belgisch grondgebied. De instelling moet een coherent en veilig afvalbeheer uitwerken, wat de volgende aspecten omvat: opstellen van een lijst of inventaris, het ophalen en vervoer van het afval, de tijdelijke opslag, het beheer op lange termijn, de ontmanteling van nucleaire installaties en het beheer van verrijkte splijstoffen.

37. Ze bevatten stoffen die ioniserende stralen uitzenden in de vorm van alfastralen (heliumkernen), bètastralen (o.a. elektronen) of gammastralen (elektromagnetische golven).

38. SYNATOM beheert de volledige splijstofcyclus voor de Belgische kerncentrales.



Drie categorieën

NIRAS deelt radioactief afval in op basis van twee criteria:

1. De hoeveelheid radioactieve stoffen in het afval, in combinatie met de aard van de radioactieve emissie. Dit criterium wordt uitgedrukt in de activiteitsgraad van het afval (hoog, middelmatig of laag).
2. De duur van het risico (rechtstreeks gekoppeld aan de mate van radioactiviteit), die afhankelijk is van de afname van de radioactiviteit en uitgedrukt wordt in een periode van radioactiviteit (kort of lang, zie hoofdstuk 2). Deze duur wordt meestal aangeduid aan de hand van de halveringstijd (tijd waarin de helft van de oorspronkelijk aanwezige radioactieve atomen verdwijnt).

Categorie A: laagactief of middelactief afval met een korte levensduur

Deze categorie omvat laagactief of middelactief afval met een halveringstijd van minder dan 30 jaar. Dat betekent dat het radioactiviteitsniveau van dit afval na maximaal 300 jaar vergelijkbaar is met de (natuurlijke) omgevingsradioactiviteit. Het afval is zowel afkomstig van de normale exploitatie en de ontmanteling van kerncentrales als van de fabricage en het gebruik van radioactieve elementen voor medische, industriële of onderzoeksdoeleinden. Het betreft vooral materialen die in contact zijn gekomen met radioactieve producten (handschoenen, recipiënten, overalls enz.).

Categorie B: laagactief of middelactief afval met een lange levensduur

Deze categorie omvat afval waarvan sommige elementen een langere levensduur hebben (halveringstijd van meer dan 30 jaar) en die in te hoge hoeveelheid aanwezig zijn om in categorie A te kunnen worden ondergebracht. Dit afval komt voort van de splijtstofcyclus, in hoofdzaak van de fabricage van splijtstoffen of de opwerking van bestraalde splijtstof.

Categorie C: hoogactief of zeer hoogactief afval

Categorie C omvat hoogactief afval met een zeer lange levensduur (in de meeste gevallen meerdere duizenden jaren). Dit afval is afkomstig van de gebruikte splijtstof en bevat grote hoeveelheden radioactieve elementen die bètastralen en alfastralen uitzenden. Het gaat vooral om gebruikte splijtstof zelf, die warmte uitstraalt (de zogeheten restwarmte) en die voldoende moet afkoelen alvorens ze op grote diepte kan worden geborgen (zie p. 85).

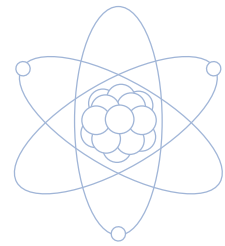
Een verantwoordelijk beheer van het radioactieve afval

Een verantwoordelijk beheer maakt het mogelijk om het afval te isoleren van het milieu tot zijn radioactiviteit door natuurlijk verval gedaald is tot een voldoende laag niveau. De principes van het beheer van radioactief afval zijn vergelijkbaar met die van het beheer van industrieel en huishoudelijk afval en omvatten verschillende aspecten, zoals volumevermindering, sortering, terugwinning enz. Er dient evenwel rekening te worden gehouden met het specifieke karakter van de verwerkte stoffen.

De verwerking is het proces waarbij het afval (vloeibaar of vast) een stabiele en vaste vorm krijgt. De conditionering is het proces waarbij het verwerkte afval in een geschikte container of verpakking wordt geplaatst zodat het geborgen kan worden zonder verspreiding van de radioactieve elementen.

Laagactief en middelactief afval met een korte levensduur

NIRAS staat in voor de ophaling van dit type afval bij het overgrote deel van de producenten. Het afval wordt geïnventariseerd en getransporteerd naar de verwerkings- en conditioneringsinstallaties van BELGOPROCESS in Dessel. Sommige producenten beschikken zelf over installaties waarmee ze een groot deel van hun afval kunnen verwerken. In dat geval wordt het eindproduct naar de centrale opslaginstallaties van BELGOPROCESS gebracht. De transporten worden uitgevoerd door gespecialiseerde bedrijven.



liseerde firma's die over het vereiste materiaal en over een transportvergunning beschikken die werd afgeleverd door het FANC. Om het volume van het afval te verminderen, gebruikt men verschillende technieken³⁹. Na de verwerking worden de tussenproducten geconditioneerd: ze worden omgoten met cement (bij het slib) of asfalt (bij de as en het metaalafval) zodat er een vast geheel ontstaat.

Die blokken worden vervolgens opgesloten in metalen vaten. Deze vaten zijn makkelijker te hanteren in de latere fases van het afvalbeheer. Aan elk vat wordt een identificatie bevestigd, zodat het op elk moment mogelijk is om de aard en de oorsprong van het afval erin te controleren.

Sinds de ondertekening van het moratorium van Londen in 1982, waarbij het zinken van radioactief afval op de zeebodem voor 10 jaar werd opgeschort, is NIRAS gestart met onderzoek naar de mogelijkheden om laagradioactief afval aan land op te slaan. Indertijd werden aanvankelijk drie opties weerhouden: definitieve berging op een "geologisch gunstige" site, definitieve berging in de Limburgse mijnen (na het beëindigen van de steenkoolexploitatie) en definitieve berging in diepe ondergrondse kleilagen. In 1990 werd de optie van de Limburgse mijnen afgevoerd door het potentiële risico op besmetting van de ondergrondse waterlagen. In juni 1997 publiceerde NIRAS een rapport⁴⁰ over de technische opties met betrekking tot het langetermijnbeheer van afval met een lage activiteit en een korte levensduur.

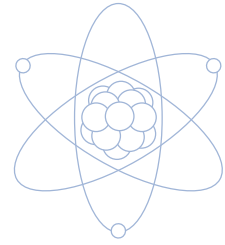
Op 16 januari 1998 nam de regering een strategische beslissing: opteren voor een progressieve, flexibele en omkeerbare oplossing die op termijn definitief zou kunnen worden. Enkel de concepten "definitieve bovengrondse berging"⁴¹ en "definitieve ondergrondse berging"⁴² werden voortaan nog weerhouden. NIRAS kreeg vervolgens de opdracht om beide opties uit te werken en te finaliseren, om zich te beperken tot de bestaande nucleaire zones (Doel, Fleurus, Mol-Dessel en Tihange), en om een methodologie te ontwikkelen die het mogelijk zou maken een dergelijk bergingsproject lokaal te integreren (de bevolking erbij betrekken en een antwoord formuleren op hun zorgen en wensen).

39. Vloeibaar radioactief afval wordt chemisch (fixeren van de radioactieve stoffen) of thermisch bewerkt (kookprocedé waarbij radioactief slib overblijft als residu). Vast radioactief afval dat brandbaar is wordt in een industriële verbrandingsoven tot 900 °C verhit en herleid tot as. De rookgassen worden gefilterd en komen pas daarna in de atmosfeer terecht. Vast radioactief afval dat onbrandbaar is wordt samengeperst onder hoge druk. Is het ook niet samendrukbaar, dan wordt het in stukken gesneden en in vaten met gestandaardiseerde afmetingen opgeslagen. Vast radioactief afval dat onbrandbaar maar wel samendrukbaar is, wordt ook eerst in stalen vaten gestopt en vervolgens onder zeer hoge druk (2.000 ton) samengeperst: het eindproduct is een platte schijf van zowat 25 cm dik.

40. Dit rapport benadrukte dat de maatschappij zich vragen moest stellen over de lange termijn en een beheerstrategie moest uitwerken op basis van twee ethische principes: ten eerste mogen de te verwachten effecten op de gezondheid van toekomstige generaties niet hoger liggen dan de niveaus die vandaag aanvaardbaar worden geacht, en ten tweede mag de huidige generatie de toekomstige generaties niet opzadelen met overmatige lasten.

41. De definitieve bovengrondse berging is volledig gebaseerd op het principe van de meervoudige afschermingsbarrières, zoals bij Russische baboesjka's waarbij het kleinste popje wordt omgeven en beschermd door alle grotere popjes. Zodra er wordt beslist om een betonnen opslagmodule af te sluiten, worden de pakketjes laag radioactief berging kunstmatig beschermd door verschillende ondoordringbare lagen. Het uiteindelijke geheel waarborgt een radiologische impact die veel lager is dan de natuurlijke radioactiviteit.

42. Bij de optie van definitieve ondergrondse berging wordt de veiligheid op lange termijn verzekerd door het gastgesteente dat de opslaginfrastructuur huisvest. Het onderzoek in België spitst zich momenteel toe op klei als gastgesteente. Klei is weinig doorlaatbaar, beschikt over goede absorptie-eigenschappen en neutraliseert door zijn plastisch karakter de vorming van scheurtjes. De bouwexperimenten in het ondergrondse laboratorium op 230 meter diepte in Mol tonen aan dat het mogelijk is om in het kleimassief op een industriële manier gangen te graven van een voldoende diameter.

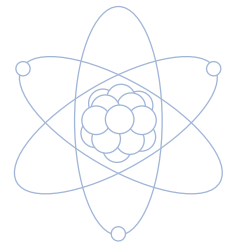


Op de ministerraad van 23 juni 2006 werd beslist dat er gekozen zou worden voor definitieve berging in een bovengrondse berginginstallatie op het grondgebied van de gemeente Dessel. Deze beslissing vloeide in de eerste plaats voort uit een maatschappelijke keuze. De gemeenten Dessel en Mol hadden zich bereid verklaard om de bouw van een bovengrondse of ondergrondse bergingsinstallatie die door hun respectieve partnerships⁴³ waren ontwikkeld (STOLA-

Dessel en MONA-Mol) te overwegen, op voorwaarde dat de voorwaarden die aan de inplanting van een dergelijke installatie waren gekoppeld zouden worden nageleefd. De berginginstallatie zou rond 2015 in gebruik moeten worden genomen. Tot dan wordt het afval van categorie A opgeslagen op de site van BELGOPROCESS, een dochteronderneming van NIRAS, te Dessel.



43. De partnerships zijn vzw's die werden opgericht voor het beheer van de voorstudies die noodzakelijk zijn om een definitief opslagproject van laag- en middelactief radioactief afval met een korte levensduur te realiseren. Dit alles diende te gebeuren op een zo transparant mogelijke manier en zo dicht mogelijk bij de bevolking. STOLA-Dessel is in 2005 omgevormd tot STORA: 'STudie- en Overleg Radioactief Afval Dessel'. Deze vzw volgt de uitvoering van de regeringsbeslissing over de berging van laag- en middelactief kortlevend afval op en heeft ook de ruimere taak om alle andere soorten radioactief afval te volgen.

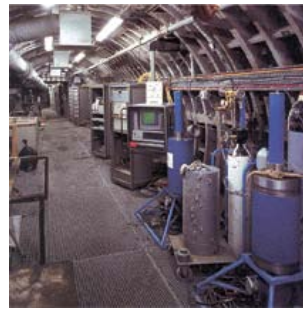


Hoogradioactief afval

Voor het hoogradioactieve afval (categorie C) werden uitgebreide onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma's opgestart om de verschillende mogelijkheden voor definitieve opslag te bestuderen. Die wetenschappelijke programma's, die vaak het voorwerp uitmaken van nauwe internationale samenwerking, nemen allemaal hetzelfde uitgangspunt, namelijk de bouw van definitieve opslaginfrastructuren in diepe en stabiele geologische lagen die hun isolerend vermogen gedurende miljoenen jaren hebben bewezen⁴⁴ of die in staat zijn om de eventuele migratie van radionucliden naar de biosfeer zeer doeltreffend te beperken. Bovendien moeten de intrinsieke kenmerken van die lagen de rol van kunstmatige barrières (bijvoorbeeld de glaslaag van verglaasd afval, speciale opslagcontainers of andere barrières) versterken om een doeltreffende isolering van het afval te verzekeren.

De concepten en scenario's voor het beheer van radioactief afval die door NIRAS werden ontwikkeld hechten, zoals gevraagd door de Belgische overheid, veel belang aan de progressiviteit en de omkeerbaarheid van de realisatie. Het volledige beslissingsproces rond de technische keuzes, de bouw, de exploitatie en de sluiting van de opslaginstallatie zal stapsgewijs verlopen en alle betrokken partijen zullen in elke stap bij het beslissingsproces worden betrokken.

In samenwerking met de Commissie van de Europese Gemeenschap en het Studiecentrum voor Kernenergie in Mol (SCK•CEN), onderzoekt NIRAS momenteel de bouw van een definitieve opslaginstallatie in ondergrondse

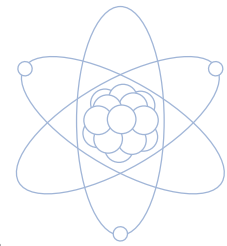


kleilagen die over uitstekende eigenschappen beschikken om de radioactieve elementen in te sluiten en een doeltreffende bescherming bieden op lange termijn. Teneinde experimenten te kunnen uitvoeren in de kern van het kleimassief werd er 230 meter

onder de site van het SCK•CEN in de Boomse klei een testlaboratorium met de naam Hades (High Activity Disposal Experimental Site) gebouwd. Momenteel voltooiën het SCK•CEN en NIRAS, verenigd in de economische belangenvereniging EURIDICE, de realisatie van een uitbreiding van het laboratorium dat de naam PRACLAY kreeg. Daarin wordt er een experimenteel programma uitgevoerd. De experimenten (waarvan de eerste resultaten verwacht worden tegen 2013) zijn gericht op het simuleren van een opslag van afval in klei. Ze analyseren het effect op de klei in de omgeving en moeten de technische en praktische uitvoerbaarheid aantonen van definitieve opslag in klei.

Wat de timing betreft, is het zo dat dit kernafval (hoofdzakelijk splijtstof) eerst een vijftigtal jaar moet afkoelen alvorens het definitief kan worden opgeslagen. In afwachting van die definitieve opslag wordt de gebruikte splijtstof gestockeerd op de nucleaire sites van Doel en Tihange. Het verglaasde afval dat terugkomt van de opwerkingsfabriek in Cap la Hague in Frankrijk, wordt op een veilige manier opgeslagen in een gebouw van BELGOPROCESS (zie p. 57).

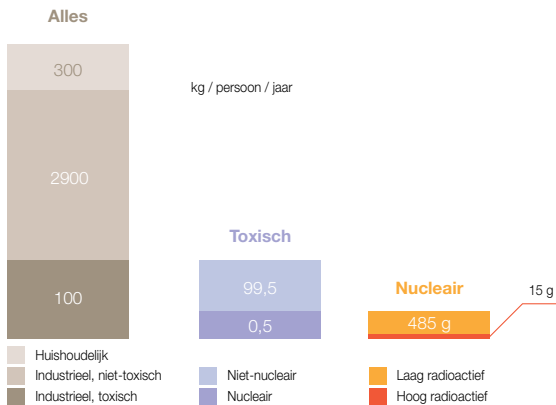
44. De hypothesen die worden gebruikt om de veiligheid van de opslag te evalueren, werden in de natuur zelf gevalideerd. Ongeveer twee miljard jaar geleden hebben in Gabon (in de Oklo-regio) gedurende verschillende duizenden jaren bij tussenpozen verschillende (13) natuurlijke kernreactoren gewerkt. Men heeft vastgesteld dat de splitsingsproducten die werden voortgebracht door die kernreacties zich slechts enkele centimeters van hun plaats van herkomst hebben verplaatst. Bovendien werden er andere belangrijke verschijnselen voor geologische opslag bestudeerd in analoge natuurlijke situaties, bijvoorbeeld corrosie van metalen, de ontwikkeling van de eigenschappen van klei, de migratie van stoffen die opgelost worden in verschillende milieus, chemische absorptie en de klimaatverandering op lange termijn. Op die manier kan onze kennis worden getest van processen die zeer traag verlopen of die een te grote omvang hebben om direct te worden gemeten in een laboratorium of ter plaatse.



Het totale volume van kernafval

Kernafval vormt slechts een miniem deel van de totale hoeveelheid afval die in België wordt voortgebracht: van al het afval dat de Belgen op jaarbasis voortbrengen, is 3% toxisch (100 kg), 0,015% (of 0,5 kg) radioactief en 0,0005% hoogradioactief (15 g).

Jaarlijkse productie van afval in België



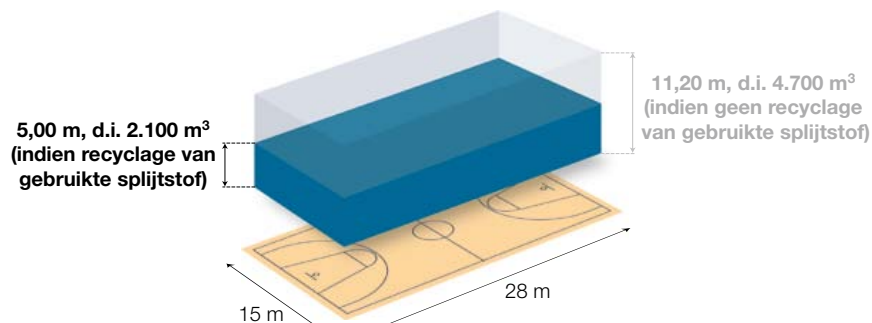
Volgens NIRAS zal men in 2070 (volgens een basisscenario) de volgende volumes radioactief afval moeten beheren:

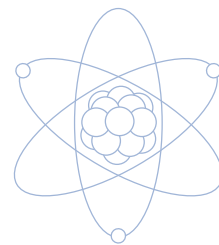
- 70.500 m³ afval van categorie A (kortlevend laag- of middelactief afval)
- 8.900 m³ afval van categorie B (langlevend laag- of middelactief afval)
- 2.100 tot 4.700 m³ afval van categorie C (hoogactief radioactief afval met lange levensduur)

Met andere woorden, en nog altijd rekening houdend met een 40-jarige exploitatieduur van de Belgische reactoren (goed voor zowat 55% van de Belgische elektriciteitsproductie), stemt het volume hoogradioactief afval overeen met één of twee tennisballen per persoon.

De exploitatieduur van de kerncentrales verlengen heeft trouwens geen invloed op het beheer van het kernafval. Aangezien het grootste deel van het afval voortkomt uit de ontmanteling van de kernreactoren heeft het ook maar een beperkte invloed op de totale hoeveelheid afval.

Volume hoogradioactief afval voor een periode van 40 jaar exploitatie van de Belgische kerncentrales





En transmutatie?

Het principe van transmutatie (het omzetten van atoomkernen in andere) toegepast op radioactief afval bestaat erin de kernen van radioactieve elementen met een lange halveringstijd te bestralen en ze om te zetten in stabiele elementen of radio-elementen met een kortere levensduur en/of een lagere radiotoxiciteit.

Wanneer ze beschoten worden met neutronen, protonen of fotonen, kunnen sommige kernen zich omzetten in andere elementen. Deze transmutatie-eigenschap zou kunnen worden benut in installaties zoals reactoren, subkritische systemen of deeltjesversnellers om secundaire actiniden (neptunium, americium en curium) met een lange halveringstijd om te zetten in andere radioactieve elementen die een kortere halveringstijd hebben of die andere stralen uitzenden. Snelle neutronen-reactoren moeten in theorie in staat zijn om bepaalde sterk radiotoxische elementen in de splijtstof die vandaag wordt gebruikt te elimineren. Ook hoogenergetische protonen of fotonen en subkritische installaties zouden kunnen worden gebruikt. We moeten er ons dan wel van bewust zijn dat er in de bovenfase van de bestralingsinstallatie ook een specifieke industrie moet worden ontwikkeld om de lanthaniden (elementen van de lanthaanreeks) te elimineren en om de elementen die getransmuteerd moeten worden isotopisch af te scheiden.

Het huidige onderzoek is ondermeer gericht op elementen zoals ^{99}Tc , dat een radioactieve periode van 210.000 jaar heeft, en dat via neutronenvangst (thermische neutronen)

kan worden omgezet in ^{100}Tc , dat een halveringstijd van 15,8 seconden heeft en uiteenvalt in ^{100}Ru , dat stabiel is. Naast de technische aspecten, moet ook de industriële haalbaarheid worden geanalyseerd en moet er ook nog worden aangetoond dat dit onderzoek een significant globaal voordeel kan opleveren. Enerzijds moet de impact op het milieu worden bekeken (gasvormige en vloeibare radioactieve uitstoot) en anderzijds moet worden nagegaan of deze cyclus globaal zuiniger is.

Ook het gebruik van Am^{241} en van andere actiniden zoals ^{244}Cm wordt onderzocht, maar er zijn nog heel wat technische problemen die moeten worden opgelost: multirecyclage, pyrochemie, snelle neutronen-reactoren of gemengde installaties die een deeltjesversneller koppelen aan een subkritische reactor zoals bij het MYRRHA-project te Mol. Al deze elementen moeten nog verder worden ontwikkeld en ook de specifieke doelkernen moeten nog worden bepaald.

Gebruikte splijtstof mag in deze context niet worden bestempeld als "afval": 96% ervan bestaat uit stoffen met een valoriseerbaar energiepotentieel. Eens het uranium en plutonium zijn afgescheiden, blijven de secundaire actiniden Np, Am, Cm over, samen met een mengeling van talrijke en gevarieerde splijtings- of activeringsproducten. Om die te isoleren is een afzonderlijke aanpak per element vereist en moeten er dus verregaande scheidingsprocedures worden uitgewerkt. Pyrochemie kan hierin in de toekomst een belangrijke rol spelen. Het gaat om metallurgieoperaties bij zeer hoge temperaturen die zich voltrekken in een niet-waterig milieu (gesmolten zouten).



Conclusie: Kernenergie, een motor voor vooruitgang

Radioactiviteit is alomtegenwoordig en zonder radioactiviteit zouden we niet eens bestaan. Ten eerste omdat zonder de fusiereacties van waterstofkernen de sterren niet zouden schijnen en het heelal alleen uit waterstof zou bestaan. Ten tweede omdat onze planeet al lang afgekoeld zou zijn: het is dankzij de warmte diep in de aardbol, hoofdzakelijk afkomstig van de radioactieve desintegraties die er plaatsvinden, dat we al zo lang genieten van milde klimaatomstandigheden. Het leven speelt zich als het ware af in een onophoudelijk stralingsbad en het is dankzij die straling dat het zich aanpast, zich diversificeert en evolueert. Radioactiviteit is ook alomtegenwoordig in ons dagelijkse leven. We vermoeden niet dat ze er is, maar we komen er voortdurend mee in contact: zowel wanneer we hoge bergen beklimmen of het vliegtuig nemen als wanneer we naar de kelder gaan om een goede fles wijn te halen. Door de aanwezigheid van natuurlijk radioactieve elementen in onze voeding of in ons lichaam (zoals kalium), zijn we trouwens zelf radioactief.

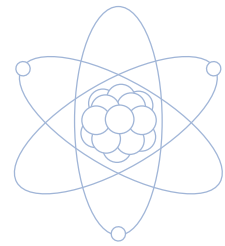
Kunstmatige radioactiviteit wordt aangewend voor een brede waaier van toepassingen (zie hoofdstukken 3, 4 en 5). Radioactiviteit is ook een onvervangbaar hulpmiddel voor de geneeskunde. Ze zorgde voor een ware revolutie in de beeldvorming en de behandeling van het levende organisme en de artsen beschikken vandaag over tal van technieken die een generatie geleden nog ondenkbaar waren. Dankzij de recente en onophoudelijke vooruitgang kan er ook steeds selectiever te werk worden gegaan. In de radiotherapie is het nu mogelijk de stralingsenergie maximaal te concentreren in zieke cellen en gezonde cellen zoveel mogelijk te ontzien.

Een andere belangrijke toepassing van kernenergie is uiteraard de productie van elektriciteit, die in België voor meer dan de helft afkomstig is van kerncentrales. En naast de eigenlijke energieproductie stimuleert deze industrie ook al meer dan een eeuw een ware golf van onderzoek & ontwikkeling die ten goede komt aan heel wat andere domeinen: van burgerlijke bouwkunde over elektronica tot materiaalkunde, geneeskunde en het diepgaande onderzoek naar tweeën driefasige toestanden van vloeistoffen. De nucleaire industrie en het nucleair onderzoek is in België goed voor zowat 4.500 rechtstreekse banen. In alle sectoren samen

maken 20.000 mensen voor hun beroep gebruik van de eigenschappen van ioniserende stralen. Het overgrote deel daarvan werkt in de medische sector.

In het nucleaire domein is veiligheid altijd een hoofd bekommernis geweest van zowel de wetenschappelijke wereld als de bedrijfswereld. Er is in de geschiedenis van de Westerse techniek geen enkel ander voorbeeld te vinden, behalve tot op zekere hoogte de luchtvaart, waarbij veiligheid tijdens de volledige ontwikkeling van een technologie een dermate belangrijke rol heeft gespeeld. Dankzij de technologische vooruitgang, de competenties en opleiding van het personeel, de maatregelen voor het beheer van ongevallen, het verscherpte reglementaire kader en de ervaring van meerdere tientallen jaren, is kernenergie uitgegroeid tot een volwassen technologie. De nucleaire sector is een van de meest gecontroleerde ter wereld. Naast de wettelijke verplichtingen waaraan de exploitanten van nucleaire installaties moeten voldoen, worden er zowel op nationaal als internationaal niveau strenge controles georganiseerd door onafhankelijke structuren. Zo heeft het Internationaal Atoomagentschap (IAEA) internationale veiligheidsnormen ontwikkeld en speelt dit agentschap een belangrijke rol in het kennisbehoud en de kennisuitwisseling op wereldschaal. Zo werd er met het non-proliferatieverdrag (NPV) een universeel verdrag opgesteld, het eerste in zijn soort, dat door 187 landen werd ondertekend en dat de verspreiding moet tegengaan van splijtstoffen die voor niet-vredelievende doeleinden zouden kunnen worden gebruikt.

Voor een harmonieus gebruik van kernenergie moet er een antwoord worden geformuleerd op de bekommernissen van het grote publiek met betrekking tot de impact van nucleaire activiteiten op de menselijke gezondheid, en in het bijzonder van radioactief afval. Alleen al door de term 'probleem' te horen, vrezen sommigen dat er geen oplossing bestaat. Dat is nochtans niet zo. De eisen inzake het beheer van kernafval zijn bijzonder stringent en voor de lange termijn ontwikkelt NIRAS (Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen) samen met talrijke onderzoekspartners technische oplossingen die tegelijk veilig en efficiënt zijn en die ook ruimte laten voor maatschappelijke inspraak in het beheer en de opslag van kernafval. Als sommige



landen met kernenergie nog niet hebben gekozen voor één bepaalde of meerdere formules om hoogradioactief afval te beheren, dan is dat in de eerste plaats omdat het niet hoogdringend is (dit afval moet eerst een vijftigtal jaar afkoelen alvorens het geborgen kan worden) en omdat ze voor die oplossing of oplossingen willen kiezen die wetenschappelijk het meest verantwoord zijn. In afwachting wordt dit hoogradioactief afval, dat slechts 5% van het totale volume kernafval vertegenwoordigt, maar wel 99% van de radioactiviteit, in alle veiligheid opgeslagen. De radioactiviteit van het laagactieve kernafval – 95% van het totale volume en 1% van de radioactiviteit – zal dan weer binnen de 300 jaar afnemen tot het niveau van de natuurlijke radioactiviteit en baart vanuit die optiek dan ook weinig zorgen. De Belgische regering heeft beslist⁴⁵ om dit laagradioactieve afval bovengronds te bergen in de gemeente Dessel. De totale hoeveelheid kernafval die door de 7 Belgische kerncentrales (55% van de Belgische elektriciteitsproductie) wordt voortgebracht over een exploitatieperiode van 40 jaar, stemt overeen met het volume van 1 tennisbal per inwoner. Uiteraard mogen we niet voorbijgaan aan de noodzaak om alle nodige voorzorgsmaatregelen te nemen, maar kernafval is in de eerste plaats een probleem dat sterk op de spits wordt gedreven, vooral ook vanuit emotioneel oogpunt.

Het valt niet te ontkennen dat de perceptie van kernenergie bij het grote publiek niet altijd positief is. Er zijn dan ook heel wat factoren die psychologisch remmend werken: de angst voor risico's, wapens en terrorisme, de bruuske koerswijziging na de oliecrisis van 1973, het gebrek aan objectieve informatie of informatie die niet als ontransparant of arrogant wordt beschouwd, foutieve veralgemeningen die tot vervelens toe worden uitgebuit door bepaalde belangengroepen enz. Tot voor kort remde ook het ongeval van Tsjernobyl de ontwikkeling van de elektronucleaire sector nog altijd af. Maar tijden veranderen, en ook de mentaliteit verandert. De geopolitieke onzekerheden, het doembeeld van de uitputting van de fossiele brandstofreserves door de spectaculair gestegen vraag, de toename van de risico's die daarmee gepaard gaan – volatiliteit van de brandstofprijzen, hogere energiefacturen, angst voor schaarste, onderbreking van de bevoorrading enz. – zijn stuk voor stuk ele-

menten die kernenergie haar maatschappelijke relevantie (terug)geven. Maar vooral ook Kyoto en de doelstellingen die de Europese Unie zich tegen 2020 heeft gesteld, maken van de strijd tegen de klimaatverandering voortaan een verplichting. Steeds meer stemmen gaan dan ook op, zowel in de politieke en academische wereld als in de verenigingswereld, om de positie van kernenergie als een ernstige optie voor duurzame ontwikkeling te herbekijken. Niet alleen omwille van het ecologische aspect, maar ook om economische redenen en om de bevoorradingszekerheid veilig te stellen.

De mens heeft de radioactiviteit niet zelf uitgevonden, maar al wel meer dan een eeuw lang de geheimen van de atoomkern steeds verder doorgrond. Naast de jammerlijke ontwikkeling van militaire toepassingen, heeft die kennis van de radioactieve verschijnselen in het heelal en van hun impact op de biosfeer en op de mens, vooral een spectaculaire ontwikkeling mogelijk gemaakt van de elektriciteitsproductie en van de fabricage van radio-isotopen voor medische en industriële toepassingen.

Het is belangrijk dat beslissingen in het nucleaire domein worden genomen met oog voor zowel de wetenschappelijke, de ecologische, de economische als de maatschappelijke dimensie. Een goed begrip van nucleaire kwesties hangt samen met de houding van het grote publiek tegenover energie in het algemeen, en belangt ons dus allemaal aan. Het is dan ook van cruciaal belang dat de betrokken actoren, de overheid op kop, er werk van maken om de vrees die bij veel mensen leeft te ontkrachten en om de kloof tussen experts en wetenschappers enerzijds en het grote publiek anderzijds te verkleinen. Kernenergie is en blijft een motor voor vooruitgang, die nog heel wat veelbelovende mogelijkheden biedt en die zal blijven verrassen en tot de verbeelding spreken, net zoals dat het geval was bij het begin van zijn ontwikkeling. We willen dit overzicht van alle aspecten rond kernenergie dan ook graag afsluiten in de hoop dat zo'n objectief bewustwordingsproces alle kansen krijgt.

45. Heel wat landen kiezen voor de definitieve berging van hun laag- en middelactief afval met een korte levensduur: o.a. Nederland, Frankrijk, Spanje, Zwitserland, Engeland, Zweden, de Verenigde Staten en Japan.

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Activiteit : het aantal atoomkerntransformaties per seconde.

Atoomnummer: nummer dat aan elk element wordt toegekend in de tabel van Mendelejev (periodiek systeem der elementen). Het is gelijk aan het ladingsaantal, dit is het aantal protonen dat zich in de atoomkern bevindt.

AVC: AIB-Vinçotte Controlatom. Erkend organisme voor de controle van nucleaire installaties in België.

Becquerel: eenheid voor het meten van radioactiviteit. 1 Bq komt overeen met één desintegratie van een radionuclide per seconde.

Bel V: Bel-V : erkend organisme in België belast met de permanente controle van grote nucleaire installaties zoals de kerncentrales, het SCK•CEN, BELGONUCLEAIRE, BELGOPROCESS en het IRE.

BR1: Belgian Reactor 1, onderzoeksreactor (SCK•CEN).

BR2: Belgian Reactor 2, proefreactor voor materiaaltests (SCK•CEN).

BR3: Belgian Reactor 3, prototype PWR-reactor die momenteel ontmanteld wordt (SCK•CEN).

SCK•CEN: StudieCentrum voor Kernenergie, opgericht in 1952 en met laboratoria gevestigd te Mol.

Curie: activiteit van één gram radium, stemt overeen met 37 miljard becquerel.

Divergentie: het tot stand brengen van een kettingreactie in een kernreactor.

Elektron: negatief geladen elementair deeltje dat zich rond de kern beweegt, is 2.000 keer lichter dan een proton, heeft als tegendeeltje het positieve elektron of positron.

Equivalente dosis of dosisequivalent: product van de geabsorbeerde dosis en een coëfficiënt afhankelijk van de aard van de straling (kwaliteitsfactor). De eenheid voor het dosisequivalent is de sievert (Sv).

FANC: Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) is een overheidsinstelling. De missie van het agentschap bestaat erin ervoor te zorgen dat de bevolking en het milieu op een doeltreffende manier beschermd worden tegen de gevaren van ioniserende straling.

Fusie: samensmelting van twee lichte kernen, waarbij een hoeveelheid energie vrijkomt.

Geabsorbeerde dosis: hoeveelheid energie die door ioniserende straling wordt overgedragen op een stof per massa-eenheid van deze stof. De eenheid voor geabsorbeerde dosis is gray (Gy).

Gray: eenheid voor geabsorbeerde dosis. Drukt de hoeveelheid energie uit die door straling wordt overgedragen op een stof. 1 gray stemt overeen met 1 joule per kilogram. De eenheid die vroeger gebruikt werd, is de RAD (Radiation Absorbed Dosis, 1 Gray = 100 RAD).

HADES: High Activity Disposal Experimental Site (SCK•CEN), ondergronds laboratorium te Mol.

Halveringstijd: gemiddelde tijd die nodig is om de activiteit van een radioactieve bron te laten dalen tot de helft van haar oorspronkelijke waarde.

IAEA: Het Internationaal Atoomenergie-agentschap (in Wenen) werd opgericht in 1957 om "de ontwikkeling van het praktische gebruik van atoomenergie voor vredelievende doeleinden te bevorderen en om het onderzoek in dit domein te stimuleren". Het IAEA werkt onder de vleugels van de Verenigde Naties.

INES: Internationale schaal voor nucleaire gebeurtenissen, die aan het einde van de jaren '80 op punt gesteld door een groep experts van het IAEA en het NEA. Ze is gebaseerd op een gelijkwaardig principe als de schaal van Richter (gebruikt om de ernst van aardbevingen te beoordelen), met als enige fundamenteel verschil dat het toekennen van een van de zeven niveaus niet tijdens de gebeurtenis gebeurt, maar achteraf op basis van verschillende criteria.

IRE: Nationaal instituut voor radio-elementen (Fleurus).

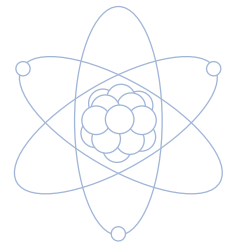
Isotoop: atomen van een chemisch element met hetzelfde aantal protonen maar met een verschillend aantal neutronen. Ze hebben dus hetzelfde atoomnummer (zelfde plaats in tabel van Mendelejev), maar een verschillend massagetal.

Kritische massa of kritieke massa: hoeveelheid nucleair materiaal die nodig is om een kettingreactie door kernsplijting in stand te houden.

Letale dosis en letale dosis 50: stralingsdosis die respectievelijk voor 100 of 50 procent van een proefpopulatie dodelijk is (zonder medische behandeling)

Massagetal: totaal aantal protonen en neutronen in de kern van een atoom.

Moderator: element dat de neutronen afremt (noodzakelijk in de zogenaamde thermische neutronenreactoren, niet in de snelle neutronen-reactoren). Men gebruikt grafiet, gewoon water of zwaar water.



MOX: mengsel van oxides of Mixed Oxyde Fuel. Kernbrandstof op basis van een mengsel van uranium- en plutoniumoxides; wordt in sommige reactoren gebruikt als splijtstof.

NEA: Nuclear Energy Agency, het Europees Agentschap voor Kernenergie, werd opgericht in 1958 en heet sinds 1972 het agentschap voor kernenergie van de OESO. Het omvat alle Europese lidstaten van de OESO, alsook Australië, Canada, de Verenigde Staten en Japan. Het NEA "spant zich in om gezamenlijke projecten te stimuleren, om de activiteiten in bepaalde domeinen te harmoniseren en om te komen tot een verenigd juridisch en administratief stelsel voor kernenergie in Europa".

Neutron: elektrisch neutraal kerndeeltje dat, samen met de protonen, deel uitmaakt van de atoomkern.

NIRAS: Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen. Ze werd opgericht in 1980 en is onder meer belast met het uitwerken van een definitieve oplossing voor de berging van alle categorieën kernafval.

OESO: Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (Parijs).

PET: Positron Emissie Tomografie (PET-scan). Met deze techniek is het mogelijk doorsnedebeelden te maken die de verspreiding weergeven (zowel temporeel, ruimtelijk als kwantitatief) van een radioactieve tracer die positronen uitzendt.

Plutonium: element 93 uit de tabel van Mendelejev; door de mens gemaakt metaalelement; ontstaat door neutronenabsorptie bij de splijting van uranium. Plutonium is een transuraan (element nog zwaarder dan uranium).

Proton: elektrisch positief geladen kerndeeltje dat, samen met de neutronen, deel uitmaakt van de atoomkern.

PWR: Pressurised Water Reactor of drukwaterreactor. Type reactor in bijna 60% van alle kerncentrales ter wereld.

Radioactiviteit: eigenschap van bepaalde elementen om zich door opeenvolgende desintegraties (reorganisatie van onstabiele atoomkernen) tot een ander element om te vormen. Deze desintegratie gaat gepaard met het uitzenden van corpusculaire straling (alfa- of bètadeeltjes) of elektromagnetische straling (gammastralen).

Radio-element: chemisch element dat radioactief is

Radon: natuurlijk radioactief element afkomstig van de desintegratie van radium, thorium en actinium.

Rem: Röntgen Equivalent Man. Oude eenheid voor dosisequivalent; vervangen door de eenheid sievert. 100 rem is gelijk aan 1 sievert.

Sievert (Sv): Eenheid voor dosisequivalent; 1 sievert = 100 rem.

SPECT: Single Photon Emission Computerized Tomography of reconstructie van een beeld aan de hand van virtuele doorsneden (tomografie) van het lichaam.

Splijting: splitsing van een kern in twee lichtere kernen, waarbij een hoeveelheid energie vrijkomt.

Splijtstof of kernbrandstof: stof die energie produceert door kernsplijting via een gecontroleerde kettingreactie. De energie die ingesloten is in de kernen komt vrij in de vorm van warmte. Het kan gaan om natuurlijk uranium, licht verrijkt uranium, uranium verrijkt met plutonium of om thorium.

Splijtstofcyclus: volledige cyclus van industriële operaties om kernbrandstof te winnen, te gebruiken en te beheren, van de ontginning van uranium in de uraniummijnen tot de definitieve verwerking en berging van het afval.

Stralingsbescherming: geheel van regels, procedures en preventie- en bewakingsmiddelen dat de schadelijke effecten van ioniserende straling op de mens of het milieu moet terugdringen of elimineren.

Transuranen: reeks van chemische elementen in de tabel van Mendelejev (periodiek systeem der elementen) onmiddellijk na uranium. Het gaat o.a. om neptunium, plutonium, americium of curium.

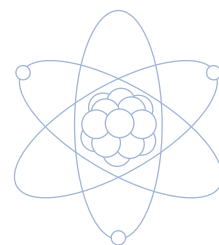
Uitloging: industrieel procédé om uranium te winnen uit grof uraniumerts door het langdurig te besproeien met een zwavelzuuroplossing.

Uranium: natuurlijk element dat in 1789 ontdekt werd in Joachimsthal (Bohemen) door de Duitse chemicus Martin Klaproth. Het is het zwaarste scheikundige element en komt overvloedig voor in de natuur. Uranium heeft veertien radioactieve isotopen, waarvan uranium-238 en uranium-235 de belangrijkste zijn.

Verrijking van uranium: procedé waarbij men de concentratie aan het uranium-235-isotoop in uranium opvoert.

Warmtetransporteur: vloeistof (gas, water of vloeibaar natrium) die de warmte afvoert die geproduceerd wordt in de reactorkern. In België wordt gebruik gemaakt van water.

Zircaloy: legering van zirkonium en één of meerdere andere metalen (tin, ijzer, chroom, nikkel); is mechanisch en chemisch bijzonder resistent; wordt gebruikt in de productie van splijtstofstaven.



MARKANTE GEBEURTENISSEN IN DE ATOOMGESCHIEDENIS

1789

Ontdekking van het element uranium door de Duitse chemicus Martin Klaproth.

1895

8 november: ontdekking van X-stralen en eerste radiografieën door Wilhelm Röntgen.

1896

Februari: ontdekking van het verschijnsel natuurlijke radioactiviteit door Henri Becquerel.

1898

18 juli: ontdekking van radium door het echtpaar Curie.

1905

Relativiteitstheorie van Albert Einstein.

1909

Ontdekking alfadeeltjes door Rutherford.

1913

Ontdekking van het verschijnsel kosmische straling.

1922

15 december: de radioactieve straling van de eerste paar gram radium in België wordt gefotografeerd.

1928

Oprichting van de ICRP (International Commission for Radiation Protection).

1934

Ontdekking van de kunstmatige radioactiviteit door Irène en Frédéric Joliot-Curie.

Ontdekking van het neutron door Chadwick.

1935

de Hevery bestudeert het metabolisme van P-32 bij ratten.

1938

December: Otto Hahn en Fritz Strassmann ontdekken het verschijnsel kernsplijting.

1939

2 augustus: Einstein ondertekent de brief die de Amerikaanse president Roosevelt moest waarschuwen voor het gevaar van een Duitse atoombom.

1942

- 2 december: eerste gecontroleerde kettingreactie gerealiseerd door het Fermi-team in Chicago.
- Eerste therapeutisch gebruik van jodium-131.

1945

- 16 juli: eerste atoombom wordt tot ontploffing gebracht in Alamogordo (Verenigde Staten).
- 6 augustus: Little Boy wordt gedropt op de Japanse stad Hiroshima.
- 9 augustus: Fat Man wordt gedropt op Nagasaki.

1949

- 4 april: ondertekening van het verdrag tot oprichting van de NAVO.
- 29 augustus: eerste Russische A-bom.

1946

Ontdekking nucleaire magnetische resonantie door Bloch en Purcell

1951

- 20 december: eerste productie van elektriciteit op basis van kernenergie, gerealiseerd met de Amerikaanse EBR 1-reactor (Experimental Breeder Reactor).
- Eerste positroncamera (Brownell).

1952

Oprichting van het Studiecentrum voor Kernenergie te Mol (SCK•CEN.).

1954

Eerste medisch gebruik van echografie.

1956

- 11 mei: eerste gecontroleerde kettingreactie in België, met de BR1-reactor te Mol.
- 27 augustus: inbedrijfname van de eerste kerncentrale met een redelijk vermogen (50 MW) te Calder Hall in Groot-Brittannië.

1957

- Eerste scintigrammen met behulp van een gamma-camera (Anger).
- 18 december: inbedrijfstelling eerste Amerikaanse kerncentrale te Shippingport.

1961

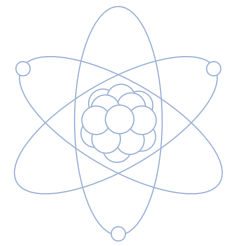
29 juni: BR2-reactor voor het eerst kritisch.

1962

- 29 augustus: inbedrijfstelling BR3.
- 10 oktober: de BR3 wordt aan het elektriciteitsnet gekoppeld.

1963

Eerste Belgische wetgeving (Stallaert, Lafontaine en Halter).



1966

Oktober: eerste divergentie (kettingreactie in kernreactor) in de centrale van Chooz.

1972

- Eerste CT-scans (Hounsfield).
- Oprichting van het Instituut voor Radio-Elementen (IRE).

1973

Eerste MRI-scans, magnetic resonance imaging (Lauterbur).

1975

- 15 februari: inbedrijfstelling Doel 1.
- 1 oktober: inbedrijfstelling Tihange 1.
- 1 december: inbedrijfstelling Doel 2.

1976-78

Ondertekening opwerkingscontract met Franse COGEMA (COmpagnie GENérale des MATières nucléaires).

1979

28 maart: ongeval van Three Mile Island.

1980

8 augustus: oprichting van NIRAS.

1982

1 oktober: inbedrijfstelling Doel 3.

1983

1 februari: inbedrijfstelling Tihange 2.

1985

- 1 juli: inbedrijfstelling Doel 4.
- 1 september: inbedrijfstelling Tihange 3.

1986

26 april: ongeval van Tsjernobyl.

1988

Weigering om een achtste kerncentrale te bouwen in België (Doel 5).

1993

Parlementair rapport over het beheer van gebruikte splijtstof. De regering beslist op grond van de aanbevelingen van het parlement tot een moratorium op de ondertekening van nieuwe opwerkingscontracten, tot de recyclage van plutonium in de Belgische kerncentrales (MOX-brandstof) en tot een grondig onderzoek van zowel de optie recyclage als de optie niet-recyclage (directe berging).

1994

- 11 februari: België aanvaardt de conventie van Londen, die het verzinken van radioactief afval op de zeebodem verbiedt.
- 26 april: NIRAS maakt aan het Ministerie van Economische Zaken een lijst over met 98 sites die meer in detail moeten worden onderzocht met het oog op de bouw van een eventuele bovengrondse bergingsinstallatie voor laagradioactief afval.
- Oprichting van het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC).

1998

- De Belgische regering beslist om de keuze voor een van de twee opties voor het beheer van bestraalde splijtstof (recyclage of directe berging) uit te stellen en vraagt om het lopende onderzoek voort te zetten.
- Het in 1991 ondertekende recyclagecontract (voor de periode na 2000) moet worden ontbonden en er kan geen nieuw contract worden afgesloten zonder de goedkeuring van de regering.

1999

30 september: ongeval van Tokai Mura (Japan).

Van 2000 tot 2007

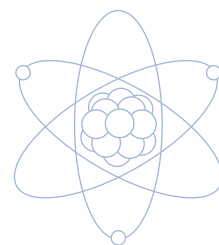
Transporten van verglaasd radioactief afval afkomstig van Areva-NC (Cogema-de-Hague, Frankrijk) naar de site van BELGOPROCESS op 5/4/00, 17/11/00, 20/02/01, 28/02/02, 25/09/02, 10/09/03, 11/02/04, 16/06/05, 14/09/05, 18/01/06, 27/06/06, 13/09/06, 17/01/07 en 3/4/07.

2003

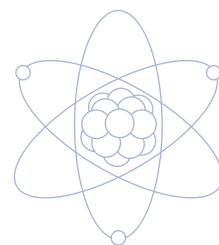
- 31 januari 2003: Belgische wet i.v.m. de uitstap uit kernenergie.
- 11 april: goedkeuring van de wet op de nucleaire voorzieningen (intussen gewijzigd door de wet van 25 april 2007), waarbij
 - Synatom wordt omgevormd tot de instelling die verantwoordelijk is voor het beheer van de financiële voorzieningen die moeten worden aangelegd voor de ontmanteling van de kerncentrales en het beheer van de bovenfase van de splijtstofcyclus.
 - Synatom moet een deel van de nucleaire voorzieningen verplicht beleggen in activa buiten de groep SUEZ.
 - oprichting van een controlecommissie: de Commissie voor Nucleaire Voorzieningen, hoofdzakelijk met vertegenwoordigers van de staat.

2006

23 juni 2006: de Belgische regering kiest voor de site van Dessel voor de definitieve berging van kernafval van categorie A.


LIJST MET NUTTIGE ADRESSEN

Organisatie	Beschrijving
AIB-VINCOTTE CONTROLATOM Business Class Kantorenpark Jan Olieslagerslaan 35 1800 Vilvoorde T: 02/674 51 20 F: 02/674 51 40 www.controlatom.be	Organisme dat deel uitmaakt van de Vinçotte groep, erkend voor de controle van grote nucleaire installaties waaronder FBFC en IRMM, evenals voor meer dan 3000 instellingen van klasse II en III.
BEL V Walcourtstraat 148 1070 Brussel T: 02/528 01 11 F: 02/528 02 01 www.belv.be	Filiale van het FANC, belast met de controle van de nucleaire veiligheid en de stralingsbescherming in nucleaire installaties zoals de kerncentrales, het SCK•CEN, BELGONUCLEAIRE, BELGOPROCESS en het IRE.
BELGISCH NUCLEAIR FORUM Guledelle 96 1200 Brussel T: 02/528 02 11 F: 02/764 94 59 www.nuclearforum.be	De vereniging van ondernemingen en instellingen die zich in België inzetten voor de vreedzame toepassing van nucleaire technologie en wetenschap. Het Forum richt zich met informatie tot de politieke wereld, de pers en het grote publiek.
BELGOPROCESS Gravenstraat 73 2480 Dessel T: 014/33 40 00 www.belgoprocess.be	Naamloze vennootschap, 100% dochteronderneming van NIRAS. Belast met de verwerking en conditionering van al het radioactief afval in België dat niet rechtstreeks wordt verwerkt door de producenten. Staat ook in voor de tijdelijke opslag van geconditioneerd afval in afwachting van definitieve opslag.
BELGIAN NUCLEAR SOCIETY (BNS) Herrmann-Debrouxlaan 40 1160 Oudergem www.bnsorg.be	Deze vereniging heeft als hoofddoel het bevorderen van de wetenschappelijke kennis en engineering inzake niet-militaire toepassingen van kernenergie en alle daaraan verwante wetenschappen.
ELECTRABEL Regentlaan 8 1000 Brussel T: 02/518 61 11 F: 02/518 64 00 www.electrabel.com	Electrabel GDF SUEZ verkoopt elektriciteit, aardgas en energieproducten en -diensten, is de grootste elektriciteitsproducent van de Benelux en is actief in de trading van elektriciteit en aardgas op alle Europese energiemarkten.
FEDERAAL AGENTSCHAP VOOR NUCLEAIRE CONTROLE Ravensteinstraat 36 1000 Bruxelles T: 02/289 21 01 F: 02/289 21 03 www.fanc.fgov.be	Deze openbare instelling heeft als missie ervoor te zorgen dat de bevolking en het milieu op een doeltreffende manier beschermd worden tegen de gevaren van ioniserende straling. Het FANC staat in voor het beheer van het Telerad-netwerk (radiologische bewaking van het Belgisch grondgebied) en het draagt ook bij aan de werking van internationale instellingen zoals de Europese Commissie en het IAEA.



<p>FORATOM Belliardstraat 65 1040 Brussel T: 02/502 45 95 F: 02/502 39 02 www.foratom.org</p>	<p>European Atomic Forum, professionele vereniging van de Europese kernindustrie. Publiceert regelmatig informatie over kernenergie die in heel Europa wordt verspreid.</p>
<p>NATIONAAL INSTITUUT VOOR RADIO-ELEMENTEN (IRE) Avenue de l'Espérance, 1 6220 Fleurus T: 071 82 95 56 www.ire.eu</p>	<p>Het IRE is een openbare instelling die actief is op het gebied van gezondheid en milieu. Het is een belangrijke wereldproducent van radio-elementen voor gebruik in de nucleaire geneeskunde, met name voor diagnose en therapie. Het IRE zet ook technologie in voor het bewaken en meten van de radioactiviteit in de bodem, de lucht en het water.</p>
<p>NIRAS Kunstlaan 14 1210 Brussel T: 02/212 10 11 F: 02/218 51 65 www.nirond.be</p>	<p>NIRAS is verantwoordelijk voor het beheer van al het radioactieve afval op Belgisch grondgebied. De instelling moet een coherent en veilig afvalbeheer uitwerken, wat de volgende aspecten omvat : opstellen van een inventaris, het ophalen en vervoer van het afval, de tijdelijke opslag, het beheer op lange termijn, de ontmanteling van nucleaire installaties en het beheer van verrijkte splijtstoffen. NIRAS staat onder toezicht van de Minister voor Energie.</p>
<p>SCK•CEN Herrmann-Debrouxlaan 40 1160 Brussel T: +32 2 661 19 51 www.sckcen.be</p>	<p>Het SCK•CEN is een onderzoeksinstituut van openbaar nut die vanuit het kader van duurzame ontwikkeling en in een internationale context via onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten, opleiding, communicatie en dienstverlening meewerkt aan nucleaire veiligheid en stralingsbescherming, aan medische en industriële toepassingen van straling en aan het beheer van de volledige splijtstofcyclus.</p>
<p>SYNATOM Arianelaan 7 1200 Brussel T: 02/505 07 11 F: 02/505 07 90 www.synatom.com</p>	<p>Synatom is een volle dochteronderneming van Electrabel GDF SUEZ. De onderneming staat in voor de splijtstofbevoorrading van de Belgische kerncentrales, beheert de gebruikte splijtstof en legt de nucleaire provisies aan.</p>