

Kernafvallozingen en de kwaliteit van de binnenwateren

Voordracht uit de 35e vakantiecursus in drinkwatervoorziening 'Europees milieubeleid en de gevolgen voor de waterleidingbedrijven', gehouden aan de TH Delft op 6 en 7 januari 1983.

1. Inleiding

1.1. Het specifieke probleem van het radioactieve afval

De problematiek van het radioactieve afval moet in haar geheel worden bekeken, evenals de relatieve belangrijkheid van de verschillende factoren die aan de basis liggen van een verhoging van de natuurlijke radioactiviteit. Men kan alleen maar vaststellen dat we thans over voldoende inlichtingen beschikken aangaande brandstofbalansen in kerncentrales en verwerkingsfabrieken [1, 2] maar niet altijd voor centra voor kernonderzoek en voor de geneeskundige toepassingen.

TABEL I – Algemene karakteristieken van een theoretische eenheid van 1.000 MW(e) werkend op de brandstof ^{235}U

Circuit	Volume (m ³)	Temperatuur	Debiet	Spuiingen
primaire	380	320 °C 270–280 °C	52 m ³ /h	3.600 m ³ /jaar
secundaire	(0,1–2)	270 °C	6 m ³ /h	12.500 m ³ /jaar
afvalbaden	625–1.400	30–50 °C (gekoeld)	statisch	periodisch
Koelcircuits	Opties mogelijk			
– Condensor		+ 13 °C (< 42 °C)	32–36 m ³ /s	(*)
– Niet nucleair gedeelte		+ 6 °C	0,77 m ³ /s	
– Nucleair gedeelte		+ 12 °C	0,85 m ³ /s	
– Hulpcircuit		+ 6 °C	0,12 m ³ /s	

(*) Veranderlijk voor directe lozing (open kring) en voor een halfgesloten systeem met verdamping van 0,6–0,75 m³/s.



W. J. MASSCHELEIN, Dr. Wet.,
Directeur bij de BIWM,
Waterloosesteenweg 764,
B-1180 BRUSSEL (België)

Bij deze laatste komen, bijvoorbeeld, mCi's voor van ^{125}I , ^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{197\text{m}}\text{Hg}$, ^{203}Hg , enz. voor radiologische diagnosemethoden. Gelukkig hebben sommige isotopen maar een erg korte halfwaardetijd (respectievelijk 60 dagen, 8 dagen, 6 uren, 24 uren, 47 dagen) want ze worden vrijwel altijd weggevoerd door rechtstreekse lozing in het leefmilieu. De groei van de energiebehoeften, de stijging van de kostprijs van de conventionele energiebronnen en de achterstand van het onderzoek naar alternatieve energiemiddelen hebben de industrielanden doen kiezen voor de ontwikkeling van de kerncentrales. Op wereldschaal voorziet men dat tegen het jaar 2000, 4.300 GW(e) zullen zijn geïnstalleerd. België zou er ongeveer 150 tot 20 GW voor zijn rekening nemen. Theoretische ramingen op heel lange termijn [3] schatten dat de wereldbevolking tot 20 miljard mensen kan stijgen wat zou overeenstemmen met een energiebehoefte van 400 TW(e). Dit zou de limiet van onze ontwikkeling betekenen.

1.2. Huidige technologie van de kerncentrales

De opwekking van kernenergie gebeurt thans hoofdzakelijk met normaalwaterreactoren en in Europa met drukwaterreactoren (PWR = Pressurized Water Reactor). Afb. 1 toont een algemeen schema van het PWR-type.

Het water van het primaire circuit staat onder een druk van 155 bar bij een temperatuur van 320 °C. De stoom wordt gevormd met behulp van één of meerdere stoomgeneratoren, waarin het primaire en het secundaire circuit volledig zijn gescheiden. De voortgebrachte stoom wordt, na expansie in een turbine, gecondenseerd in een condensor die met een koudebron, meestal oppervlaktewater, wordt gekoeld. Gelet op de verschillen in

druk en temperatuur tussen het primaire en het secundaire circuit moet speciaal op de dichtheid tussen beide circuits worden gelet; een gebrekkige afdichting zou immers oorzaak kunnen zijn van een verlies van radioactief materiaal, dat normaal in het primaire circuit moet opgesloten blijven. In tabel I worden typische operationele parameters gegeven voor een theoretische centrale van 1.000 MW(e), volgens de technische uitvoeringen van Westinghouse, AEC, Belgonucléaire of Framatome.

1.3. Lozingen

Het rechtstreeks effect van de PWR-centrales op de kwaliteit van het water van de binnenrivieren bestaat uit vier hoofdcomponenten:

- thermisch effect en waterverlies;
- vermindering van het waterdebiet en overeenstemmende verhoging van de concentratie van onzuiverheden;
- lozing van allerlei afvalwater en, inzonderheid, van sulfaten en chloorhoudende producten;
- lozing van radioactief afvalwater.

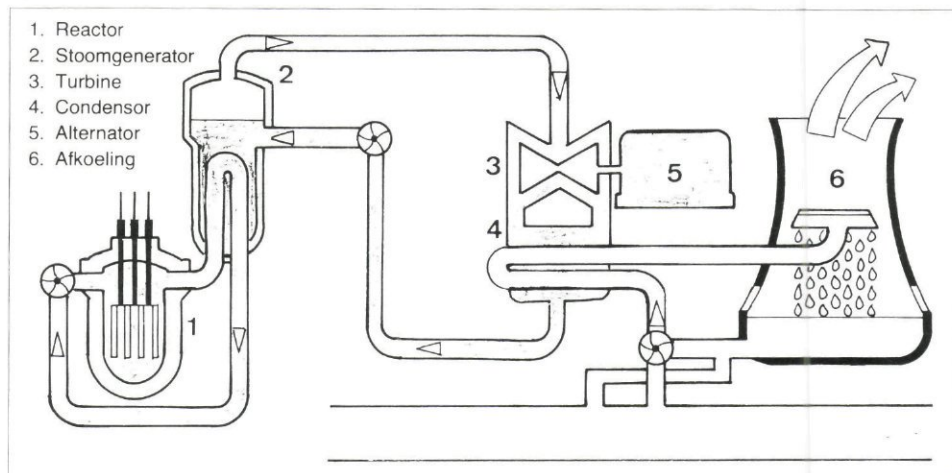
2. Thermisch effect

2.1. Thermisch rendement

In de meeste moderne centrales op basis van fossiele brandstof kan de stoomtemperatuur

570 °C bereiken. In dat geval bedraagt de thermische efficiëntie, d.w.z. het percentage van de in elektrische energie omgezette warmte, zowat 40%. Ongeveer 10% van de energie verdwijnt met de verbrandingsgassen en 5% wordt gebruikt in het station zelf. 45% van de geproduceerde warmte wordt aldus opgeslorpt door de condensor. In PWR-centrales bereikt de thermische efficiëntie amper 33%; de gehele technologie is er immers gebaseerd op een stoombron met een temperatuur van minder dan 300 °C. Wanneer we aannemen dat binnen in de gebouwen zowat 5% warmte vrijkomt, betekent zulks dat de warmtedissipatie in het leefmilieu 62% vertegenwoordigt van het geïnstalleerde vermogen, tegen 45% voor de centrales met klassieke brandstof. In België totaliseert het grootste park centrales met klassieke brandstof een capaciteit van 1.560 MW(e) (complex van Ruiken). De PWR-centrales van Doel hebben een capaciteit van 2.700 MW(e) en Tihange 2.750 MW(e). Het Franse EdF-project op de Maas te Chooz bereikt 5.400 MW(e) in vier eenheden van elk 1.300 MW(e), naast de thans al bestaande centrale van 320 MW(e). De PWR-technologieën worden om verschillende redenen (bijvoorbeeld veiligheid) gegroepeerd in ruimere parken dan de

Afb. 1 - Schema van een PWR-centrale.

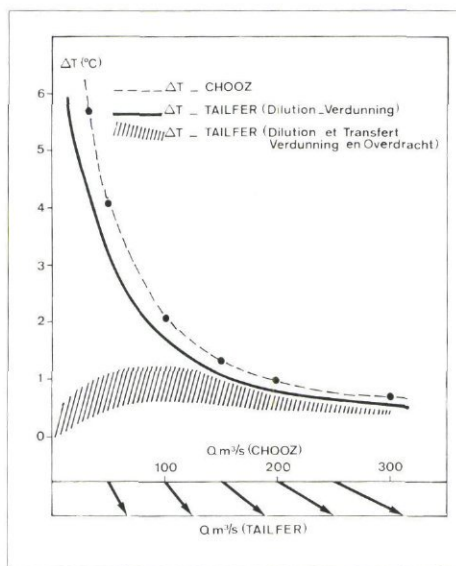


klassieke centrales. Een gevolg daarvan is een plaatselijk erg belangrijke energie-dissipatie, die een aanzienlijk thermisch effect kan hebben op het leefmilieu. Dit kan eventueel de aanwending vergen van geschikte dispersietechnieken. Verder dient ook een schaalfactor [4] te worden vermeld vermits de temperatuurverhoging van het water gebruikt als koudebron, belangrijker is voor centrales met een groter vermogen, bijvoorbeeld + 10,8 °C voor 900 MW(e) en + 13,8 °C voor 1.300 MW(e). Volgens geruchten zouden te Chooz zelfs eenheden van 1.500 MW(e) worden overwogen. De gevolgen op het gebied van de thermische lozingen die hiermee gepaard zouden gaan, zijn nog niet te overzien.

2.2. Reglementeringen betreffende de temperatuur van de lozingen

De EEG-richtlijn 75/440 betreffende de kwaliteit van het oppervlaktewater dat bestemd is voor de produktie van drinkwater geeft een maximale temperatuurwaarde aan van 25 °C. Dat is een eerste gegeven dat in het oog moet worden gehouden bij thermische lozingen. Nationaal kunnen andere limieten worden opgelegd. Zo mag bijvoorbeeld in België de temperatuur van het geloosde water, volgens het Koninklijk Besluit van 3 augustus 1976, evenmin als in Frankrijk, behoudens speciale afwijkingen, niet hoger zijn dan 30 °C. Deze limietwaarde wordt over het algemeen internationaal aanvaard. In de dossiers wordt de stijging van de temperatuur van het rivierwater onmiddellijk na de centrales doorgaans vastgesteld op 2 à 3 °C en de temperatuurtoename van het water van de condensoren op 10 à 15 °C.

Elke temperatuurstijging verhoogt de kinetika van de chemische en biochemische processen. De bacteriën- en algenpopulaties kunnen toenemen [5], maar in het algemeen kan geen enkele directe echt schadelijke verandering zwart op wit worden vastgesteld. Vanaf 35 °C groeien voornamelijk de blauw-groene algen. Deze zijn ongewenst en giftig voor waterorganismen. De grootste vissterfte wordt evenwel pas genoteerd tijdens de ontbindingsfasen van deze algen, waarschijnlijk ingevolge een gebrek aan zuurstof. Voor elke nucleaire zone zou een onderzoek moeten plaatshebben en zou er een specifieke beschrijving moeten worden gemaakt. Volgens het NTAC, USA (National Technical Advisory Committee) zouden de temperatuurtoenames als volgt moeten worden beperkt: de hoeveelheid warmte die gedurende een maand aan een waterloop wordt toegevoegd zou op de dag met het kleinste debiet in die maand geen temperatuurstijging van meer dan 2,8 °C mogen veroorzaken in de onmiddellijke omgeving van de centrale. In meren en lagunes zou de temperatuur van de bovenlaag



Afb. 2 - Temperatuurtoename (geval Chooz en de Belgische Bovenmaas).

(3 tot 4 m) ook niet met meer dan 1,6 °C mogen stijgen. Voor water met een estuariumregime zou de maximale temperatuurtoename beperkt moeten blijven tot 2,2 °C, behalve 's zomers. Dan zou een limiet van + 0,83 °C [6, blz. 331] worden voorzien.

Op basis van de optimale ontwikkelings-temperatuur en de hoogste letale temperatuur van vissen beveelt het EPA volgend criterium aan: het weekgemiddelde voor de temperatuur mag niet stijgen boven de optimale ontwikkelingstemperatuur + 1/3 (van de hoogste letale temperatuur - optimale ontwikkelingstemperatuur).

Bijvoorbeeld:

– voor de meerval:

$$T_{\text{limiet}} = 30 + \frac{1}{3} (38 - 30) = 32,7^{\circ}\text{C}$$

– voor het blauwneusje:

$$T_{\text{limiet}} = 22 + \frac{1}{3} (33,8 - 22) = 26^{\circ}\text{C}$$

– voor de forel:

$$T_{\text{limiet}} = 14,5 + \frac{1}{3} (25,5 - 14,5) = 18,2^{\circ}\text{C}$$

Het is dus duidelijk dat men in de officiële machtigingen ook rekening moet houden met de visteelt in de binnenwateren. Bij plotse stopzetting van de lozing moet een 'koude thermische schok' worden vermeden. Ook dient er hier op te worden gewezen dat de Richtlijn 202/3 betreffende vereiste kwaliteit van zoet viswater, de toegelaten grenzen voor thermische lozingen als volgt bepaalt: zowel wat het water voor zalm-achtigen als dat voor karperachtigen betreft, moeten de temperatuurwaarden beneden de 20 °C blijven tijdens het warme seizoen en

beneden de 10 °C tijdens het koude seizoen. Die temperaturen gelden voor het water dat zich bevindt in de zones die rechtstreeks worden beïnvloed door de thermische lozingen. Voor zover die waarden niet worden overschreden, kunnen stijgingen met + 1,5 °C en + 3 °C worden toegestaan in de zones waar vermenging van de thermische lozingen plaatsvindt.

2.3. Besluit

Opgelegde temperatuurlimieten voor waterlopen die gebruikt worden voor visteelt zullen de lozingstechnieken van thermisch afvalwater van de kernparken in belangrijke mate beïnvloeden, en dit vooral als er belangrijke debietschommelingen zijn. Onze aardbol verliest naar schatting 120×10^{12} kW in de vorm van warmte in de ruimte. Op dit ogenblik vertegenwoordigt de menselijke produktie $4,5 \times 10^9$ kW of 4×10^{-5} delen van de ontvangen zonne-energie. In de extreme veronderstelling [3] van een produktie van 4×10^{11} kW zou de verhouding 3×10^{-3} bereiken. Op wereldvlak bekeken zou die inbreng een stijging van + 0,2 °C meebrengen in de hydrosfeer.

2.4. Raming van het waterverlies door rechtstreekse lozing van het condensatorwater in een open circuit

2.4.1. De afkoeling in een open circuit blijft de eenvoudigste en de goedkoopste techniek voor de dissipatie van het warmteoverschot. De nodige afkoelingsdebieten zijn echter aanzienlijk: voor een PWR-centrale van 1.000 MW(e) die 62 % van haar thermisch vermogen afvoert, dient $(62/33) \times 1.000 = 1.900$ MW te worden gedissipeerd. Het waterdebiet dat nodig is om de temperatuurtoename in de lozingszone zelf tot + 10 °C te beperken bedraagt aldus:

$$Q (10^3 \text{ kg/s} \approx \text{m}^3/\text{s}) = 1.900 \times 10^6 / 10 \times 4.186 \times 10^3 = 45 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Indien men rekening houdt met het gemiddelde jaarlijkse debiet van de Maas op Belgisch grondgebied tussen 140 m³ (Heer) en 250 m³ (afwaarts van Luik) en met de overeenstemmende uiterste jaargemiddelden van 55 m³/s en 97 m³/s (waarden in 1976), dan worden de limieten van deze techniek onmiddellijk duidelijk.

2.4.2. Heet water geeft hoofdzakelijk op drie manieren warmte af: door straling, door verdamping en door convectie. Convectie vereist een contact lucht-water. Dit contact werkt eveneens de verdamping in de hand. Bijgevolg zijn die beide processen afhankelijk van de snelheid van de wind. De globale coëfficiënt van de energieoverdracht wordt uitgedrukt door drie termen [7, blz. 13]:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = (95 + T) + (54 + 32 u) e^{0,05 T} + (62 + 37 u)$$

Het debietverlies en de specifieke dissipatie door verdamping voor temperaturen nabij het evenwicht worden bepaald via volgende formule:

$$-\Delta Q \text{ (m}^3/\text{s)} = \frac{W}{585} \frac{A_2}{A}$$

waarin:

T = temperatuur aan de waterspiegel,
 u = snelheid van de wind in m/s, twee meter boven het vrije oppervlak van het water,
 W = de geloosde warmte in Mcal/s.

Als wij aannemen dat $u = 2,2$ m/s en $W = 540$ Mcal/s (1.000 MW(e)), dan blijft het bijkomende waterverlies beperkt tot $\leq 0,1$ m³/s.

2.4.3. De thermische relaxatieafstand van een waterloop is de afstand D in km waarna de door een thermische lozing veroorzaakte temperatuuroptename T is teruggelopen tot een derde van haar aanvankelijke waarde. Volgens Mosse [8] neemt men aan, voor toestanden van volledige vermenging, dat

$$T = (dt) \frac{d}{Q}, \text{ waarin } dt, \text{ de temperatuur-}$$

toename is van de condensorflux met een debiet, d , die in een debiet Q , van de stroom wordt geloosd. Volgens [7] wordt de relaxatieafstand uitgedrukt door

$$D = \frac{h'Q}{hl} \cdot \frac{864}{0,01T + 0,95 + (0,62 + 0,37u)(1 + 0,87e^{0,05T})}$$

In deze verhouding zijn h en h' respectievelijk de gemiddelde diepte van de waterloop en de dikte van de waterlaag die door de lozing wordt beïnvloed, l de breedte van de wateroppervlakte die met de lucht in aanraking is. In de meeste gevallen en in het bijzonder voor de Bovenmaas in België geldt: $h' = h$. Als de thermische lozing van het kernpark van Chooz wordt vastgesteld op 20 m³/s bij + 8 °C (SENA) en 6 m³/s bij + 7 °C (EdF), krijgt men de toename T die op afb. 2 afgebeeld zijn.

Als men een debiet van 35 m³/s neemt, zou de ogenblikkelijke temperatuuroptename na volledige vermenging 5,75 °C bedragen. Indien $l = 110$ m, $u = 2,2$ m/s en $T = 25$ °C, dan is de berekende waarde van D gelijk aan 39 km. In de praktijk leidt die methode dikwijls tot een te hoog geschatte waarde van D .

2.4.4. Een ander vereenvoudigd model voor de schatting van de warmteoverdracht op een vrij stromend wateroppervlak wordt gegeven door Valiron [9]:

$$T = T_m \exp(-S/x) \text{ waarin}$$

$$x = \frac{23,9 \times Q \text{ (m}^3/\text{s)}}{1 + \frac{u \text{ (m/s)}}{1,16}}$$

waarin T_m de temperatuur van het rivierwater is na volledige vermenging van het thermisch afvalwater, S de vrije oppervlakte in 10⁴ m², hetzij hectaren, en x de equivalente warmteverspreidingsoppervlakte. Op het traject Chooz-Tailfer toegepast, levert die benadering de waarden op aangeduid in afb. 2. Ze stemmen goed overeen met de huidige waarnemingen en illustreren dat de afwaartse temperatuurschommelingen binnen het gamma van de dag-nacht variaties blijven.

2.4.5. Voor de afkoeling door lagunering en verdamping kan het verdampte debiet worden geschat door de verhouding

$$\Delta Q \text{ (m}^3/\text{s)} = 0,01 S (2,12 + 1,25 u) (e^{0,05T} - \phi e^{0,05T_a})$$

waarin T_a de temperatuur en ϕ de betrekkelijke vochtigheid [7] van de lucht is. De oppervlakte die voor een gegeven afkoeling noodzakelijk is, wordt bekomen door de vergelijking

$$S \text{ (km}^2) = \frac{d \text{ (m}^3/\text{s)}}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_i - T_a} \right)$$

T_i = temperatuur van het water aan de ingang van de condensor, bijvoorbeeld $\approx T - 1,5$ °C; $\Delta T = T_{\text{uitgang}} - T_a$

α is de warmteoverdrachtscoëfficiënt per eenheidsoppervlakte (in Mcal km⁻² s⁻¹ °C⁻¹):

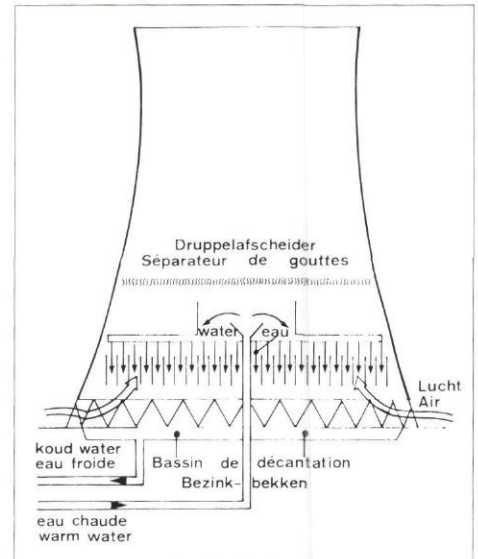
$$\alpha = 1,16 \times 0,01 \bar{T} + 0,95 + (0,62 + 0,37u) \times (1 + 0,87 e^{0,05 \bar{T}})$$

waarin $\bar{T} = T_a + \bar{T}$ (hetzij de gemiddelde temperatuur van het water).

Laten wij, bij wijze van voorbeeld, veronderstellen dat we te doen hebben met een theoretische centrale van 1.000 MW(e), uitgerust met koeltorens, vóór de afvoer van het thermische afvalwater.

$\bar{T} = 28$ °C; $T_a = 20$ °C; $u = 2,2$ m/s; $d = 0,56$ m³/s bij + 7 °C (d.w.z. na afkoeling door de toren). De berekening volgens bovenstaande gegevens geeft: $S \sim 0,082$ km².

Onder die voorwaarden zou voor de vestiging van 4 eenheden van 1.300 MW(e) ongeveer 0,4 km² nodig zijn. Te Cattenom op de Moezel heeft men via een dam op de Mirtgenbach voor een actieve oppervlakte van zowat 1 km² gezorgd. Het opgelegde criterium van de temperatuur van het water van de Moezel onder 28 °C houden, met een maximale toename van + 1,5 °C zal er dan ook gemakkelijk kunnen worden nageleefd. De directe afkoeling voor een centrale 1.300 MW(e), zijnde $d = 60$ m³/s bij $\Delta 10$ °C, zou volgens dezelfde criteria een actieve oppervlakte van zowat 8,5 km² vereisen. Afkoeling door lagunering gaat dus snel te veel grondoppervlakte vragen, maar ze kan



Afb. 3 - Koeltoren van het tegenstroomprincipe.

wel dienen als aanvullende afkoeling naast de koeltorens of als voorafgaande verdunning. Een betere modulatie van de lozingen wordt aldus mogelijk gemaakt. Het hulpwater dat nodig is om de lagunes voor direct gebruik aan te vullen, kan volgens de hierboven omschreven methode worden geschat op zowat 1 m³/s per eenheid van 1.000 MW(e).

2.5. Versnelde koeling in halfgesloten circuit

De in Europa meest gebruikte technologie voor versnelde afkoeling van condensorwater is die van de koeltorens en, meer bepaald, van het type met natuurlijke of aangejaagde trek, gebaseerd op het tegenstroomprincipe. Het principe van die technologie wordt geïllustreerd in afb. 3.

De laagst mogelijke waarde van de temperatuur van het geloosde water van een koeltoren op basis van verdamping is de vochtige temperatuur van de omgevende lucht. Die temperatuur, die afhankelijk is van de relatieve vochtigheid van de lucht, is over het algemeen in de winter 4 tot 5 °C en in de zomer 8 tot 10 °C lager dan de temperatuur van de droge lucht. Onder goede bedrijfsomstandigheden zullen de koeltorens vloeibaar effluent leveren met een temperatuur die 4 tot 8 °C hoger is dan de vochtige temperatuur. Concreet komt dat erop neer dat, voor de Bovenmaas in België, de vochtige temperatuur schommelt tussen 1 en 14 °C, met maxima van 20 °C. Bijgevolg is de temperatuur van 28 °C voor het geloosde effluent van een koeltoren de thermodynamische toprestatie die altijd zou kunnen worden gewaarborgd. Het grootste deel van de warmte (~ 80% van het gedissipeerde totaal) wordt in dergelijke torens weggewerkt door waterverdamping. Het andere deel wordt gedissipeerd door het meesleuren van druppeltjes met de opwaartse

TABEL II – Geïnstalleerd vermogen en afkoelprincipe van de PWR-eenheden.

Localisatie	Vermogen		Datum van exploitatie	Afkoelingsprincipe
	MW(e)	MW(th)		
Chooz (**) (SENA)	320	1.400	1971	open circuit
Chooz (**) (EdF)	4 x 1.300	4 x 4.300	1988 1992	torens (+ gesloten circuit met versterkte ventilatie)
Tihange (**) (SEMO)	870	2.700	1977	open circuit (*)
Tihange (**) (UEB)	900 980	2.700 3.000	1982 (1984)	toren natuurlijke trek (toren versterkte vent., natuurlijke trek)
DOEL (***) (EBES)	390 390 930 1.000	1.200 1.200 3.000 3.000	1974 1975 1982 1984-5	open circuit open circuit toren natuurlijke trek

(*) Met optie voor een toren met versterkte ventilatie.

(**) Maas.

(***) Schelde-estuarium.

luchtstroom (0,0025% van het debiet in torens met natuurlijke trek en 0,005% in torens met versterkte trek) en door verhitte van lucht. Het globale rendement belooft gewoonlijk 85-87%. De bijkomende hoeveelheid water nodig voor een doorlopende werking belooft 3 tot 5% van het in de koeltorens rondstromende debiet. In de praktijk kan een grotere spuiing noodzakelijk zijn om de toename van het zoutgehalte te beperken.

(In torens met droge koeling is er geen direct contact tussen het water en de lucht, zodat er geen verdamping is. Het water vloeit door buizen en de warmteoverdracht gebeurt door convectie naar de over de buizen gejaagde lucht. Afgezien van het feit dat de kostprijs van dergelijke torens hoger is, kan ook de temperatuur van het teruggestuurde koelwater nog 10 tot 17 °C hoger liggen dan bij natte torens. Daardoor daalt het rendement van de turbines met 10 tot 15%). De koelsystemen in de Belgische bestaande en geplande centrales en te Chooz, staan vermeld in tabel II.

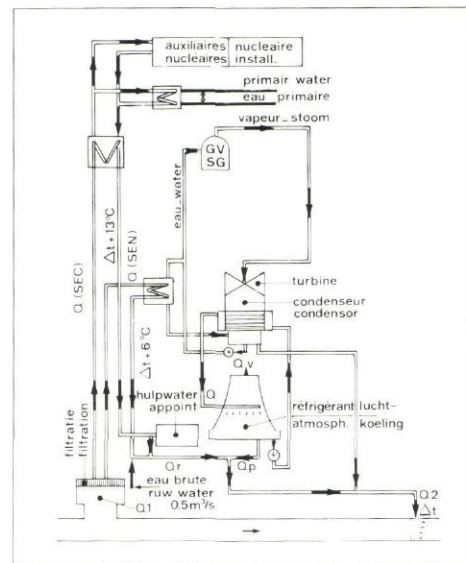
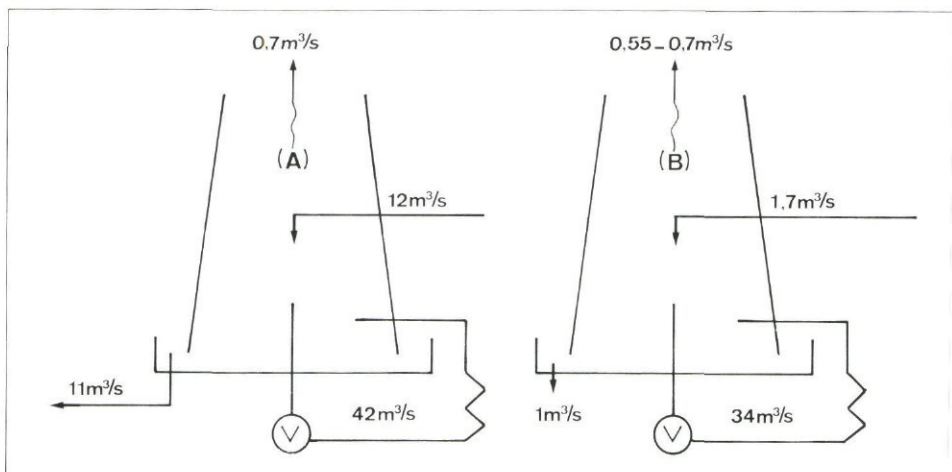
3. Concentratieverhoging van de onzuiverheden en lozing van divers afvalwater

3.1. Concentratieverhoging van minerale bestanddelen door debietverlies

De concentratie van minerale bestanddelen in het geloosde thermische afvalwater hangt af van de graad van bijvulling en van de geloosde hoeveelheid water (zie bijv. afb. 4 en 5). Voor de SENA-centrale bedraagt het koelwaterdebiet 20 m³/s en voor Doel I en II, 2 x 40 m³/s, en dit bij een temperatuuroptuename van 10 °C. Bij afkoeling in open kringloop is het waterverlies zeer klein in verhouding tot het gebruikte debiet. De concentratieverhoging aan minerale bestanddelen is er altijd lager dan 1%. Afb. 4 geeft het algemene schema weer van de afkoeling in een toren voor een centrale met een maximaal vermogen van 1.000 MW(e).

Als we een theoretische centrale van 1.000 MW(e) nemen, belooft het debiet Q dat in de afkoelinrichting circuleert ten minste 35 m³/s en doorgaans 40 tot 50 m³/s. De verdamping (Q_v) schommelt ten minste tussen 0,5 en 0,9 m³/s, naar gelang van de toegestane ΔT -waarde van het geloosde debiet Q₂ (zo wordt 7 °C voorgesteld te Chooz). De twee gesloten koelcircuits van de nucleaire en niet-nucleaire neveninstallaties werken respectievelijk tegen een debiet van 0,8 m³/s bij temperatuuroptuename van + 13 °C en 0,7 m³/s bij ongeveer + 6 °C. Het opslaan van veiligheidswater om te kunnen ingrijpen in het primaire circuit vergt een bijkomend debiet van zowat 0,03 m³/s. Om ketelsteenaanslag in de koeltorens te voorkomen is spuiing noodzakelijk. De grootte hangt af van de aanladings-eigenschappen van het water en van de kwaliteit van het water dat ter plaatse voor de verdunning van het afvalwater beschikbaar is. Bij een centrale van 1.000 MW(e) belooft het waterverlies door de verdamping die noodzakelijk is om de temperatuuroptuename tot 7 °C te beperken, minstens zowat 0,75 m³/s.

Afb. 5 - Concentratiefactoren toepasselijk op de thermische lozingen te Doel (A) en te Chooz (B) (per theoretische schijf van 1.000 MW(e)).



Afb. 4 - Schema van de circulatie van het koelwater in een halfgesloten circuit gecombineerd met een koeltoren.

Afb. 5 toont de principes van de toevoer-verdunning in de centrales van Doel (BE) en in degene die te Chooz (EdF) zijn gepland. In Doel blijft de concentratietoename aan permanente zouten in het geloosde water altijd lager dan 1%, dank zij een substantiële toevoer van vers water. In het geval van Chooz (in ontwerp) stelt men een erg beperkte toevoer voor, zodat de concentratie maximaal (bij laag debiet in de Maas) met een factor 1,7 zou kunnen verhogen. Dat feit heeft drie belangrijke gevolgen: de concentratietoename van permanente zouten, de noodzaak van een behandeling om ketelsteenaanslag in het SEN-circuit te verwijderen en de spuiing van de torens. Voor die operatie wordt tot nu over het algemeen zwavelzuur aangewend.

3.2. Gevolgen van de behandeling tegen ketelsteen

3.2.1. Bij een gemiddeld debiet, bijvoorbeeld

beeld 132 m³/s voor de Maas te Chooz, blijkt de toevoer van sulfaten miniem te zijn, en in elk geval binnen de toelaatbare grenzen. Bij gering debiet, bijvoorbeeld 12 m³/s, is de stijging van het sulfaatgehalte erg belangrijk, zoals blijkt uit onderstaande tabellen, die steunen op een wateropname uit de Maas van 12 m³/s en een afgave van 9 m³/s.

Maas bij gemiddeld debiet

Q = 132 m³/s
SO₄⁼ingang : 36 g/m³
SO₄⁼ingang : 432 g/s
SO₄⁼toevoer : 540 g/s
Demineralisatie : 57 g/s
SO₄⁼uitgang : 1.029 g/s
Q afwaarts = 129 m³/s
Conc. Maas afwaarts : 44 g/m³

Maas bij lage waterstand

Q = 12 m³/s
SO₄⁼ingang : 60 g/m³
SO₄⁼ingang : 720 g/s
SO₄⁼toevoer : 540 g/s
Demineralisatie : 57 g/s
SO₄⁼uitgang : 1.317 g/s
Q afwaarts : 9 m³/s (theoretisch)
Conc. Maas afwaarts : 206 g/m³

Dit voorbeeld toont aan dat het sulfaatgehalte, in periodes van lage waterstand, een kritische drempel kan bereiken voor een normaal gebruik van het afwaartse water. Dat geval is echter theoretisch, vermits er voor de werking van de centrales onder die omstandigheden een hulpdebet voorzien is via een opgeslagen reserve.

3.2.2. Voor de alkaliteit zien de tabellen er als volgt uit:

Maas bij gemiddeld debiet

pH = 7,9
HCO₃⁻ingang : 190 g/m³
HCO₃⁻ingang : 2.280 g/s
HCO₃⁻geëlimineerd : 700 g/s
HCO₃⁻uitgang : 1.580 g/s
Q afwaarts = 129 m³/s
Conc. afwaarts : 208 g/m³

Conc. CO₂ ingang : 4 g/m³
Toevoer van CO₂ : 505 g/s
CO₂ uitgang : 540 g/s
Conc. CO₂ afwaarts : 41 g/m³

Maas bij lage waterstand

pH = 8,6
HCO₃⁻ingang : 280 g/m³
HCO₃⁻ingang : 3.360 g/s
HCO₃⁻geëlimineerd : 700 g/s
HCO₃⁻uitgang : 2.660 g/s
Q afwaarts : 9 m³/s (theoretisch)
Conc. afwaarts : 576 g/m³

Conc. CO₂ ingang : 1 g/m³
Toevoer van CO₂ : 505 g/s
CO₂ uitgang : 515 g/s
Conc. CO₂ afwaarts : 57 g/m³

Het effect op de pH van het ruwe water kan geschat worden via volgende vergelijking:

$$\text{pH} = \text{pK}_1 - \log \frac{(\text{CO}_2)}{(\text{HCO}_3^-)}$$

Toestand bij lage waterstand:

$$\text{pH} = 6,39 - \log \frac{1,30}{9,40} = 7,25$$

Bijgevolg hangt het effect van de behandeling van ketelsteen in de koelcircuits hoofdzakelijk af van de karakteristieken van het beschikbare ruwe water. Dit effect zal voor de Maas erg belangrijk zijn in periodes van laag debiet.

3.3. Reglementaire aspecten

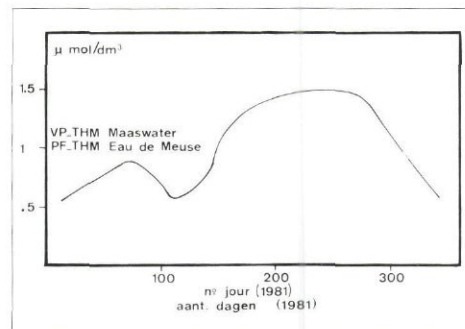
De richtlijnen van de Europese Gemeenschappen laten een maximale sulfaatconcentratie van 250 g/m³ toe zowel voor water dat voor drinkbaarmaking in aanmerking komt als het drinkwater zelf.

Het hierboven aangehaalde voorbeeld van de Maas toont aan dat het sulfaatgehalte, ten opzichte van de natuurlijke toestand, in belangrijke mate kan stijgen in periodes van gering debiet. In sommige gevallen zou de behandeling van ketelsteen met zwavelzuur het normale gebruik van aluminiumsulfaat als coaguleermiddel kunnen beperken. Zowel door de vermeerdering van de sulfaten als door de toename van het CO₂ kan het water corrosief en agressief worden en, bijgevolg, steeds meer mineraliseren door het in oplossing nemen van natuurlijke elementen of door het aantasten van bouwwerken van de waterwegen.

Op wereldvlak blijft de inbreng van CO₂ van de kernenergiecentrales, ook op lange termijn, in vergelijking met de 5 10¹⁵ mol/jaar CO₂ van de natuurlijke cyclus, nog steeds marginaal. Bovendien ligt dat effect aanzienlijk lager dan dat veroorzaakt door de directe verbranding van fossiele stoffen bij gelijkaardige aanwending.

3.4. Lozingen van chloorverbindingen

In de USA [11] mag het gehalte aan vrij chloor in de lozingen van de centrales in geen geval 0,5 mg/dm³ overschrijden en moet het gemiddelde beneden 0,2 mg/dm³ liggen. Het gehalte in de ontvangende waterloop moet steeds lager zijn dan 0,01 mg/dm³ en, indien het gaat om water geschikt voor zalmachtigen lager dan 0,002 mg/dm³. Behoudens afwijking, moet de lozing van chloorhoudend water beperkt blijven tot minder dan twee uren per dag.



Afb. 6 - Vormingspotentiaal van trihalomethanen (VP-THM) uit Maaswater [12].

In de BRD mag het geloosde water niet meer dan 0,25 mg chloor per liter bevatten. Net als in andere landen hangen in België de lozingen af van sectoriële machtigingen, die worden afgeleverd door de voogdij-overheid voor gezondheidszorg.

In Frankrijk wordt in de dossiers van EdF de limietwaarde van 0,1 mg/dm³ opgelegd. Chloorinjectie is bedoeld om de biologische aangroei in de koelcircuits te bestrijden. Om een continuïteit te vermijden, verrichten de exploitanten een doorgedreven chlorering van bijvoorbeeld, 10 mg/m³ gedurende 24 tot 48 uur. Sommige doseringen bereiken soms 40 g/m³. Tijdens die periodes wordt de spuiing van de koelcircuits stilgelegd. Bij terugkeer naar een normale toestand worden de chloreerprodukten in het leefmilieu gestort. Het criterium voor het al dan niet aanvaarden van chlorering zou moeten gebaseerd zijn op de potentiële vorming van trihalomethanen (VP-THM) en vooral van de totale hoeveelheid gechloreerde produkten (TOX) in het ruwe water. Bij wijze van voorbeeld geeft afb. 6 THM-waarden voor de Maas te Tailfer.

3.5. Diverse lozingen

3.5.1. Volgens de ramingen voor het complex van Chooz kunnen de zwevende stoffen met een factor van maximaal 1,7 worden vermeerderd in het geloosde water. Zoals de gebruikers van het natuurlijke water doen, bijv. bij de drinkwaterbehandeling, zou men de vaste stoffen of het slib afkomstig van de zuiveringsoperaties dienen te concentreren, te stabiliseren en buiten het complex af te zetten.

3.5.2. Andere lozingen behelzen het gepulseerde gebruik van ferrosulfaat voor de passivering van de gesloten koelcircuits (met bijv. doses van ongeveer 5 mg/m³ Fe, 1 uur per dag) en de dosering van hydrazineverbindingen in het gesloten secundaire circuit.

3.5.3. Ingeval gebruik wordt gemaakt van chromaten als passivemiddelen, moeten die produkten worden gerecycled of

behandeld door uitvloeking door middel van kaliumferrocyanide.

4. Lozing van radioactieve afvalstoffen

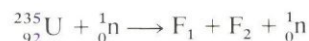
Dit thema werd reeds uitvoerig besproken door mijn medewerker R. Goossens [29] tijdens de Benelux-studiedagen 1982 te Den Haag. Volgende commentaar is als aanvulling bedoeld.

4.1. PWR-centrale

In een PWR-centrale worden vier soorten van radioactieve stoffen ontwikkeld: splijtprodukten, transuranen, neutronen-activeringsprodukten en het bijzondere geval van tritium.

4.1.1. Splijtprodukten

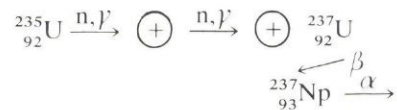
In een reactor op basis van $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ wordt een complex mengsel van 300 verschillende nucliden opgewekt. Minstens drie families kunnen worden onderscheiden, nl. op basis van: ^{238}U , ^{235}U en ^{232}Th . Sommige gevormde isotopen, zoals ^{239}Pu , zijn zelf ook splijtbaar. De splijtreactie is als volgt:



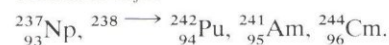
Voor het milieuwater zijn de belangrijkste splijtprodukten ^3H , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs en ^{141}Ce , evenals de andere isotopen van dezelfde elementen. Belangrijke gasvormige splijtprodukten zijn tritium, ^{85}Kr , ^{131}I en, in bijkomende mate, ^{133}Xe .

4.1.2. Transuranen

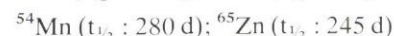
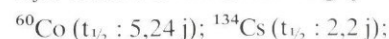
Voor Neptunium bijvoorbeeld verloopt de reactie als volgt:



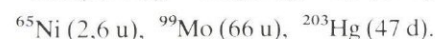
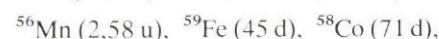
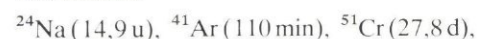
De belangrijkste voor de kernenergie-centrales zijn:



4.1.3. De activeringsprodukten afkomstig van de werking van de neutronenflux op stoffen in afkoelingsfluida en structuurlegeringen. Onder de activeringsprodukten zijn, behalve tritium, de belangrijkste:



en ook een reeks isotopen met een kortere levensduur:



4.1.4. Tritium en de isotoop ^{14}C

4.1.4.1. In PWR-reactoren wordt tritium op verschillende manieren gevormd:

– via tertiaire splijting (één splijting op 10.000) van uranium 238 geeft 12 tot 26 Ci/MW(th)/jaar);

– via de activering van ^{10}B , dat gebruikt wordt als regulator onder de vorm van boorzuur in de primaire vloeistof. Het geeft door transmutaties tritium volgens onderstaande reacties:



– via lithiumhydroxide, toegevoegd aan het primaire fluïdium als corrosievertrager:



Deze twee laatste bronnen geven ongeveer 1 Ci/MW(th)/jaar of 700 Ci per ton uranium. Men gaat ervan uit [13, 14] dat van de gevormde 20-25 Ci/MW(th)/jaar, maximum 10% in de primaire vloeistof wordt opgenomen. Door het beperken van de diffusie uit de splijtbare elementen van moderne installaties ligt dat percentage nu steeds lager dan 5% en de EdF maakt zich sterk dat ze minder dan 1% van het geproduceerde tritium in de natuur loost.

Het grootste deel wordt dus afgevoerd naar de brandstofopwerkingscentra. Dank zij de verhoging van het isolatierendement van de brandstof vermindert de totale lokale lozing van tritium waardoor het relatief aandeel activering van B en Li in betekenis toeneemt. Het geval van tritium verdient echter een heel bijzondere aandacht, omdat het niet wordt geëlimineerd, noch door conventionele waterbehandeling, noch door specifieke behandelingsmethoden zoals distillatie en ionenuitwisseling.

4.1.4.2. ^{14}C wordt in de reactoren gevormd volgens:



Een reactor van 1.000 MW(e) zou tot 60 Ci van ^{14}C per jaar produceren, waarvan 8 Ci via

gasvorming afvalstof wordt geloosd. Op grond van in de BRD verrichte metingen denkt men dat de lokale lozingen kunnen schommelen tussen 1 en 10 Ci/jaar voor 1.000 MW(e) [28]. Er moet evenwel op worden gewezen dat over dat onderwerp weinig kwantitatieve gegevens gepubliceerd zijn. Op het eerste gezicht schijnt het gevaar van ^{14}C gering, omdat die isotoop een β -straler is met een gemiddelde energie van slechts 50 KeV. Zijn halfwaardetijd bedraagt evenwel 5.730 jaar. Hij kan zich dan ook ophopen en door organische stof worden opgenomen.

4.1.5. Het jaarverbruik van een PWR-reactor van 1.000 MW(e), die gedurende 6.800 uren/jaar onder volle belasting werkt, belooft 140 t natuurlijke uranium. De aanrijking tot splijting à 3% brengt 50.000 tot 100.000 t afval voort, dat 50 Ci ^{226}Ra bevat en 3-5.10⁵ m³ effluent waarin 0,5 Ci ^{226}Ra zit. De toegelaten concentratie van radium voor de gehele bevolking is vastgesteld op 10 n Ci/m³.

De latere raffinage geeft hoofdzakelijk vaste afvalstoffen af met geringe radioactiviteit, maar van de familie van plutonium (zie op tabel III over de lokale productie van een PWR-centrale).

4.2. Reglementeringen

4.2.1. De toelaatbare globale stralingsdosis voor het menselijke lichaam van 5 Rem in 30 jaar wordt gefractioneerd in 500 Rem/jaar [15, 16]. Voor de bevolking in het algemeen dient die dosis te worden teruggebracht tot 1/3 of 170 mREM/jaar. Voor elke nuclide bepaalt de wetgeving MTW's (maximaal toegelaten waarden) volgens tabel III.

Voor water dat een mengsel van isotopen bevat, bekomt men, door eenvoudige optelling:

$$\frac{C_1}{(\text{CMA})_1} + \frac{C_2}{(\text{CMA})_2} + \frac{C_3}{(\text{CMA})_3} \dots 1$$

In kerncentrales wordt geloosd water gebruikt voor de verdunning van het radioactieve afvalwater. In de Belgische centrales wordt het effluent, in de praktijk, vóór lozing driemaal gecontroleerd, waarvan ten minste eenmaal door een continu werkende

TABEL III – Indicatieve cijfers (in Ci/jaar) voor de voortgebrachte activiteit van een PWR-centrale van 1.000 MW(e).

Aard	Primair fluïdium	(Lokale) lekken	(Lokaal) afvalwater	Totaal
Edelgassen	7,410 ⁴	1,200	2,010 ³ (g)	360 10 ³
Jodiumisotopen en halogenen	2,510 ³	0,1	1	0,35
Tritium	1.000	50 – 100	150 (g) 1.000 (l)	25 10 ³ (*)
Splijtingsprodukten	2,510 ³	} (2,8)	} 10 – 50	} 1.000 (**)
Activeringsprodukten	5,5			
(Lokale) vaste afvalstoffen	–	–	(≤ 10 ⁴)	3,510 ⁵

(*) Lokaal afvalwater van de opwerkingscentra.

(**) Metallurgie van de brandstof: afvalwater ^{226}Ra : 0,5-2 Ci; afvalstoffen ^{226}Ra : 50 Ci; + Rn gas.

analysator. Om redenen van veiligheid (bijvoorbeeld te Doel) is er een reserve-bekken (eventueel twee) van minimum 30.000 m³ per eenheid van 1.000 MW(e), om in onvoorziene omstandigheden voor verdunning te zorgen.

4.2.2. Een van de evaluatieprincipes van een 'aanvaardbaar risico' is het aannemen dat, voor de gehele bevolking, genoemd risico gelijk is aan het dubbele van de straling van natuurlijke herkomst.

De straling waaraan de mensheid van nature blootstaat is van kosmische, aardse en inwendige oorsprong. De respectieve doses worden op de volgende waarden geschat (in mRem/jaar):

Kosmische straling	44
^{235/238} U en dochterprodukten, alsook ⁴⁰ K in de grond	40
Inwendige bronnen ⁴⁰ K, ¹⁴ C	18

De gemiddelde natuurlijke stralingsdosis beloopt dus ongeveer 100 mRem/jaar, maar het is bekend dat er schommelingen bestaan van 80 mRem/jaar aan zee tot 200 mRem/jaar in het hooggebergte. Plaatselijk werd reeds een dosis van 800 mRem/jaar opgetekend. Sommige doses van natuurlijke radioactiviteit kunnen door menselijke activiteit worden verhoogd. Een voorbeeld daarvan is het radon, waarvan 20 tot 50 nCi/m³ in aardgas zit en dat in de verbrandingsgassen te vinden is.

De medische apparatuur voor radiografie en radiotherapie is thans de voornaamste bron van kunstmatige straling. De doses bereiken 50 tot 100 mRem/jaar in de geïndustrialiseerde landen. Neerslag van kernexplosies kunnen nog eens voor een dosis van 5 tot 10 mRem/jaar zorgen. Volgens UNO-deskundigen zouden kerncentrales een dosis afstralen van dezelfde grootte als de neerslag van experimentele kernexplosies, hetzij 4 mRem/jaar.

4.2.3. De opstapeling van isotopen in het leefmilieu in ruime zin kan overkomen als een zorgwekkend probleem op langere termijn. Toch dient te worden opgemerkt dat de radioactiviteit exponentieel afneemt en dat elke ophoping dus nieuwe lozingen van hetzelfde type vergt. Men neemt als een eerste benadering [6, blz. 167] aan dat een stationaire toestand I_t kan worden bekomen via constante inbreng van een isotoop, waarvan wordt verondersteld dat hij op homogene wijze in het heelal verspreid is:

$$I_t = I_o(t) e^{-\lambda t}$$

$$I_o(t) = \alpha t$$

$$I_t = \alpha t e^{-\lambda t} = \alpha n t_{1/2} e^{-n \lambda t_{1/2}}$$

$$= \alpha n t_{1/2} e^{-n \times 0,69}$$

$$n e^{-0,69 n} = \frac{n}{1 + 0,69 n + \frac{(0,69 n)^2}{2}}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f'(n)}{g'(n)} \quad (\text{Regel van de L'Hospital})$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1 + 0,69 n} \approx \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{0,69} \approx 1,44$$

$I_t = 1,44 \times \alpha \times t_{1/2}$

waarin α de jaarlijkse inbreng en $t_{1/2}$ de halfwaardetijd zijn.

In tabel IV worden enkele aspecten van potentiële ophoping op lange termijn [3] verduidelijkt. Voor de optie 4.300 GW(e) (vooruitzicht 2.000) worden twee hypothesen vooropgezet: de ene is de veralgemening van de cijfers uit de literatuur die gebaseerd zijn op technologieën die in de toekomst kunnen worden aangewend, de andere (waarden tussen haakjes) is een evaluatie waarbij enkel rekening wordt gehouden met de huidige PWR-technologie. De cijfers tonen de belangrijkheid van opslagtechnieken voor afval aan. Bij de interpretatie van de gegevens van tabel IV moet er rekening worden mee gehouden dat het totale volume van onze hydrosfeer $13,7 \times 10^{17} \text{ m}^3$ bedraagt, waarvan ongeveer 0,002%, zijnde $27,4 \times 10^{14} \text{ m}^3$, binnenwateren zijn.

4.3. Directe lokale weerslag

4.3.1. Tabel V geeft, aan de hand van het voorbeeld van de Maas in België, de lokale actieve lozingen aan. Voor die lozingen is er een dossier ingediend voor machtiging door het Ministerie van Volksgezondheid. Hierbij wordt onder andere rekening gehouden met artikel 37 van het Euratom-verdrag, dat steunt op het principe van de risico/nut-balans en op mogelijke gevaren.

Wat de Franse wetgeving betreft, zal men rekening moeten houden met de voorwaarden bepaald door twee decreten van 10 augustus 1976 [17].

Uit die decreten vloeien bijvoorbeeld de gemeenschappelijke Frans-Belgische reglementeringen voort voor de huidige SENA-centrale te Chooz [18].

De fluctuaties van de totale jaarlozingen zijn van het grootste belang voor de gebruiker van het afwaartse water. De concentraties of volumes ervan zouden best in de machtingen worden ingelast, zoals, bijvoorbeeld, voor Tihange I: ³H max. 3.500 nCi/m³ – (tritium uitgezonderd).

Frankrijk past het concept van het week-gemiddelde toe, maar het laat de mogelijkheid open voor pieken die deze gemiddelden vijfmaal overschrijden. Gassen worden doorgaans geloosd na wassen en een veroudering via 45 tot 60 dagen opslag.

4.3.2. Voor vloeibaar effluent is het mogelijk de lokale lozingen te verminderen tot 10 à 20% van de aanvankelijke radio-activiteit via een voorbehandeling door ionenuitwisseling zoals te Chooz. Bovendien worden de vloeistoffen eerst in een bekken opgeslagen. Afb. 10 geeft de bestaande installaties te Chooz (SENA) weer. Voor een procédé van Franse inspiratie [20] hebben alle bekkens voor een centrale van 1.000 MW(e) een capaciteit van 500 m³ (te Doel zijn het reservoirs van 1.000 m³). De concentratielimiet van het geloosde effluent is vastgesteld op 100 nCi/m³. De specifieke USA-limiet (1971) voor tritium ($\leq 10.000 \text{ nCi/m}^3$) werd niet weerhouden [21].

In Italië worden globale criteria gehanteerd in de vorm van formules, bijv.

TABEL IV – Potentiële ophoping van isotopen met lange levensduur geproduceerd door kerncentrales.

Nuclide	MTW drinkwater Ci/m³	Gemiddelde levensduur 1,44 x t _{1/2}	Optie 4.300 GW(e) (jaar 2000) 10 ⁶ Ci		Optie 400 TW(e) (3) 10 ⁶ Ci	
			Gepro-duceerd/j	Stationair	Gepro-duceerd/j	Stationair
⁹⁰ Sr	4 x 10 ⁻⁶	40,4	2.900 (10 ⁹)	117.000 (40 x 10 ⁹)	267.000	10,8 x 10 ⁶
¹³⁷ Cs	2 x 10 ⁻⁴	43,2	4.000 (13 x 10 ⁶)	173.000 (560 x 10 ⁶)	372.000	16,1 x 10 ⁶
¹²⁹ I	2 x 10 ⁻⁶	2,5 x 10 ⁷	0,0015 (4.000)	37.500 (10 x 10 ¹⁰)	0,13	3,3 x 10 ⁶
⁸⁵ Kr	?	15,2	410 (15 10 ⁵)	6.250 (230 x 10 ⁵)	38.000	578.000
³ H	3 x 10 ⁻²	17,7	26 (8,6 x 10 ⁴)	460 (150 x 10 ⁴)	2.400	42.500
¹⁴ C	8 x 10 ⁻³	8,310	(0,26)	(2,160)	?	?
⁹⁹ Tc	3 x 10 ⁻³	3 x 10 ⁶	0,5	1,5 x 10 ⁶	50	150 x 10 ⁶
²³⁸ Pu	5 x 10 ⁻⁵	128	3,9	500	360	46.000
²³⁹ Pu	5 x 10 ⁻⁵	35,200	0,06	2,100	6	226.000
²⁴⁰ Pu	5 x 10 ⁻⁵	9,750	0,17	1,660	16	156.000
²⁴¹ Am	4 x 10 ⁻⁵	660	6,7	4.400	620	409.000
²⁴³ Am	4 x 10 ⁻⁵	11.000	0,7	7.700	62	6 ²⁴⁴ Cm
	7 x 10 ⁻⁵	26,1	2,400	8.600	224.000	

TABEL V – Radioactieve lozingen van de aan de Maas gevestigde centrales (*).

Lokalisatie	Chooz (SENA)	Tihange I	Tihange II	Tihange III	Chooz EdF (ontwerp)
MW (th)	1.040	2.260	2.700	3.000	4 x 4.300
Exploitatie	1971 →	1977 →	1982 →	1984 →	1988 → 1992
Volume van de lozingen (m ³ /jaar)					
– hoge activiteit	1.200 – 1.800	3.000	?	?	4 x 4.750
– lage activiteit	30.000	1.000.000	?	?	4 x 16.000
Maximale machtigingen:					
³ H vloeistof	3.000	1.330 3.990	1.330	1.330	4 x 1.850
β – γ vloeistof	100 (1967) → 5 (1980)	8	8	8	4 x 12
³ H gassen	400	?	?	?	4 x 700
Edelgassen	7.000	40.000 20.000	20.000	20.000	4 x 100.000 4 x 40.000
Halogenen	0,2	0,2	0,1	0,1	4 x 6 4 x 1
Waargenomen lozingen in Ci/jaar					
(β – γ) 1978	0,89	1,94			
1979	0,92	0,94			
1980	0,33	1,4			
³ H 1978	1.804				
1979	2.810				
1980	2.986				

(*) Sommige waarden zijn cijfers uit dossiers die nog door de bevoegde instanties worden onderzocht.

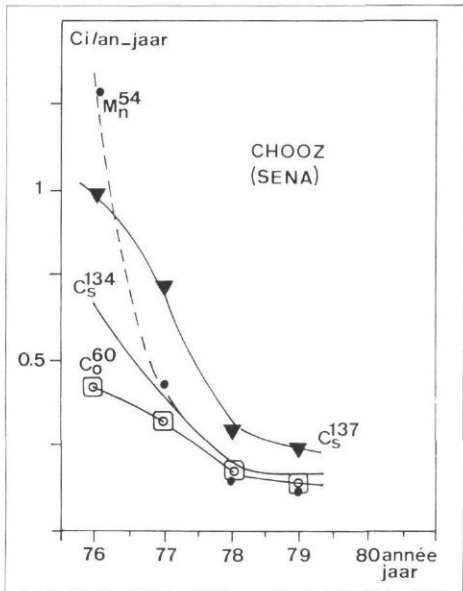
– voor de centrale te Latina (Estuarium), 150 MW(e):

$$\frac{{}^3\text{H}}{10^4} + \frac{{}^{239}\text{Pu}}{0,5} + \frac{{}^{90}\text{Sr}}{10} + \frac{({}^{134}\text{Cs} + {}^{137}\text{Cs})}{20} + \frac{(\beta \gamma)}{3} + \frac{\beta}{100} + \alpha \leq 1 \text{ Ci/jaar}$$

– voor Garigliano (op de rivier Garigliano), 150 MW(e):

$$\frac{{}^3\text{H}}{5 \times 10^3} + \beta + \frac{(0,5 \times {}^{137}\text{Cs}) + {}^{134}\text{Cs} + (0,1 \times {}^{58}\text{Co}) + (0,3 \times {}^{60}\text{Co}) + (2 \times {}^{131}\text{I})}{25}$$

Afb. 7 - Effect van de voorbehandeling op de lozing van actief effluent.



$$+ \frac{(\beta \gamma)}{2} + \alpha \leq 1 \text{ Ci/jaar}$$

– voor Trino (op de Po), 250 MW(e):

$$\frac{{}^3\text{H}}{10^4} + \frac{{}^{131}\text{I}}{15} + \frac{{}^{137}\text{Cs}}{15} + \frac{{}^{90}\text{Sr}}{0,1} + \frac{\gamma}{50} \leq 1 \text{ Ci/jaar}$$

De uitgeputte brandstof wordt opgeslagen in subkritische bekkens (de inwendige t van de elementen wordt op < 1.400 °C gehouden om diffusie doorheen de splijtbare stof te vermijden), en brengt praktisch alleen zwevende stoffen onder de vorm van actieve oxyden voort. Deze worden zoals de andere afvalstoffen verhard en in vaten opgeslagen [22].

4.3.3. Vastgestelde gevolgen

In de tabellen VI en VII worden de gevolgen van de lozingen van de SENA te Chooz op de gemiddelde activiteit van het Maaswater samengevat. Zoals wij reeds hebben vermeld, worden de lozingsvergunningen meestal in termen van jaargemiddelden in plaats van in momentconcentraties vastgesteld. Dit laatste zou evenwel beter zijn vermits dan de lozingen zouden kunnen gemoduleerd worden volgens het Maasdebiet.

De afb. 8 en 9 illustreren de spectra bekomen met Maaswater te Tailfer. Uit de tot nog toe opgedane ervaring blijkt dat de conventionele behandelingsketen voor drinkwater 40 tot 80% van de radioactiviteit uitschakelt. Deze laatste is hoofdzakelijk gebonden op de zwevende stoffen [23] en kent dan ook pieken, die bepaald

worden door het transport in de rivier van de zwevende stoffen [19]. Afb. 10 geeft de wijze waarop het afvalwater te Chooz wordt geloosd.

Tabel VIII illustreert de binding van de radioactieve stoffen op de zwevende stoffen (gegevens van het IHE – Min. Volksgezondheid (België)).

Wij hebben aangetoond dat zelfs de lozingen van getritieerd water pieken vertonen en dit wegens lokale neerslag of als gevolg van uitlozing van terreinen waarop zich gasvormige afvalstoffen hebben neergeslagen [24]. Een ander belangrijk probleem is de bioaccumulatie van de geloosde isotopen. Het schijnt dat ¹³⁷Cs zich ophoopt in de spieren van de vissen [25], bij baarzen in het bijzonder. Het gaat hier over een zuiver synthetische isotoop die in de natuur niet voorkomt. Tritium wordt ook in de organische stof opgenomen [26, 27] en vergt derhalve onze bijzondere aandacht. Bovendien het jaargemiddelde, wordt er bij de lozingen naar gestreefd zich te houden aan de kwaliteitscriteria voor het drinkwater, die steunen op de in 4.2. 1. uiteengezette concepten.

5. Besluit

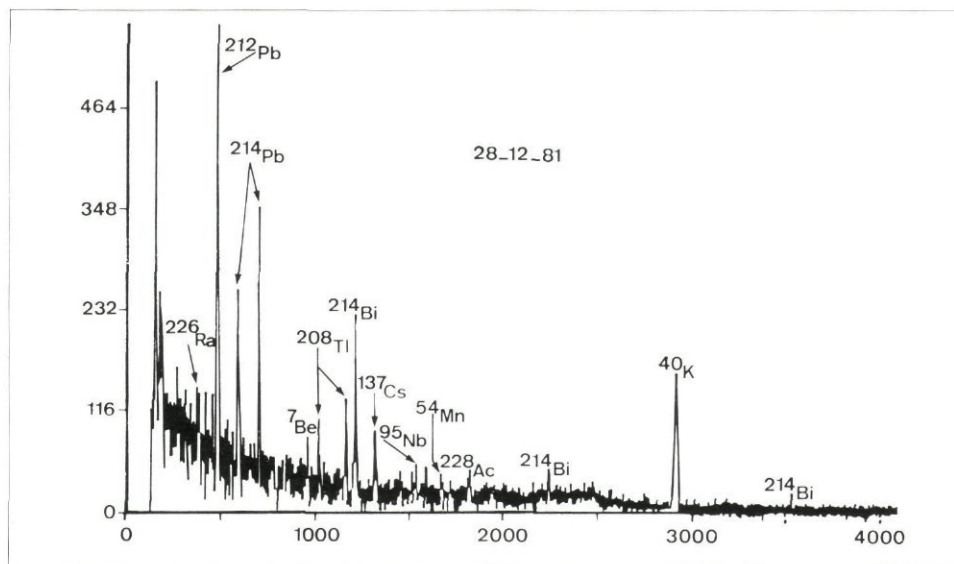
• Het belangrijkste gevolg van de vestiging van kernenergieparken langs binnenwateren is de vermindering van het beschikbare debiet en dit vooral in periodes van lage waterstand. De omvang van die parken maakt dan ook de aanwending van gesloten koelsystemen en koeltorens noodzakelijk. Toch zullen de waterverliezen zowat 0,75 m³/s per eenheid van 1.000 MW(e) blijven bedragen.

TABEL VI – Door de SENA-centrale te Chooz geloosde activiteit (in Ci/jaar).

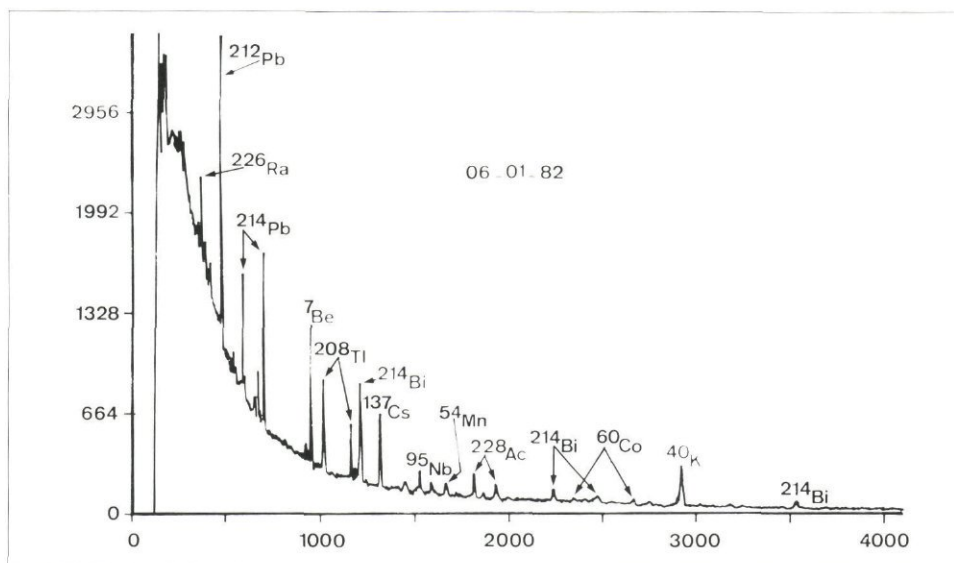
element	Jaar	1977	1978	1979
⁵⁴ Mn		0,440	0,167	0,144
⁵⁸ Co		0,061	0,024	0,066
⁶⁰ Co		0,318	0,160	0,153
⁹⁰ Sr		0,106	0,013	0,018
⁹⁵ Nb		0,011	0,001	?
¹³⁴ Cs		0,404	0,147	0,118
¹³⁷ Cs		0,707	0,285	0,238
¹³¹ I		0,100	0,006	0,010
⁴⁰ K		0,139	0,045	?
¹⁴⁴ Ce		0,100	0,040	?
⁵⁹ Fe		0,003	0,002	?
¹⁰³ Ru		?	?	0,090
¹³⁸ Cs		?	?	0,019
¹⁴¹ Cs		?	?	0,013
⁹⁵ Zr		?	?	0,015

TABEL VII – Gemiddelde radioactiviteit van het Maaswater te Hastiere (resultaten in pCi/liter).

Jaar	α	β	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	⁹⁰ Sr	HTO
1976	0,7	12	3	0,04	0,49	1,450
1977	0,8	8	3	0,07	0,32	600
1978	—	5	3	0,05	0,26	800
1979	0,43	5	3	0,06	0,30	1,090
1980	0,46	5	2,5	0,06	0,20	750



Afb. 8 - γ -Spectrum van de zwevende stoffen in het Maaswater.

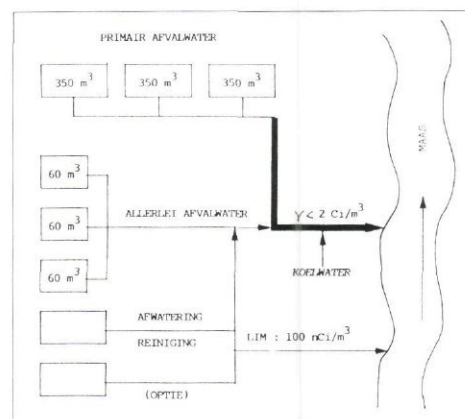


Afb. 9 - γ -Spectrum van het residueel slib na de waterbehandeling in het station van Tailfer.

• Afhankelijk van het beschikbare debiet en van de omvang van het park, heeft dit debietverlies een concentratie tot gevolg van de terug geloosde zouten en zwevende stoffen in de rivier. Voor de Bovenmaas in België zou die factor 1,7 kunnen bereiken. Tijdens periodes van lage waterstand zouden de concentraties in de rivier met 30 tot 40% kunnen toenemen. Bij elke vestiging moet dan ook absoluut rekening worden gehouden met het scheppen van bijkomende water-volumes die nodig zijn om een voldoende

waterkwaliteit te behouden voor verder gebruik.

• Onder de opgeloste zouten waarvan de concentratie in belangrijke mate kan toenemen moet vooral het sulfaatgehalte worden vermeld, dat soms de hoogst toelaatbare concentraties voor het drinkwater kan benaderen. In het bijzondere geval van de Maas zou afwaarts van Chooz soms een concentratie van 145 tot 285 g/m³ bereikt worden. Anderzijds zou de alkaliteit aanzienlijk kunnen dalen en zou het water



Afb. 10 - Wijze waarop de activiteit van het afvalwater van de SENA-centrale te Chooz wordt geloosd.

een bijkomende mineralisatiecyclus kennen. Die potentiële gevaren kunnen worden vermeden door gebruik te maken van geheel gesloten koelcircuits of door alternatieve ketelsteenoplostechieken voor de circuits uit te werken. Daarbij dienen de gewenste sanitaire garanties te worden geboden.

• Via verschillende schattingen blijkt dat de stijging van de watertemperatuur klein is over een voldoende thermische relaxatieafstand. Zo zou de invloed te Tailfer, dat 49 km van Chooz verwijderd ligt, minder dan 1 °C bedragen. Het probleem komt dus neer op de beheersing van de gevolgen die niet door de afstand worden beïnvloed. Dit hangt trouwens samen met de ondersteuning van een minimumdebiet via een opgeslagen watervolume dat niet te rijk is aan sulfaten.

• Het probleem van de radio-activiteits-lozingen moet in zijn geheel worden beschouwd, en dit zowel wat de verschillende bronnen als de ophoping van isotopen op wereldvlak betreft. De problematiek is belangrijk, zeker als men bedenkt dat, volgens de vooruitzichten, tegen het einde van deze eeuw kernenergiecentrales tot een vermogen van 4.300 GW(e) zouden gebouwd worden. Men lost ter plaatse weinig radioactiviteit in de binnenrivieren, want de opgelegde normen blijven binnen de limieten van de MTW voor het drinkwater. Toch is meer waakzaamheid geboden voornamelijk voor het beheersen van de proportionele modulatie van de lozingen in functie van het debiet van de ontvangende rivier. Elke vergunning zou een model van het materie-transport afwaarts van de lozingsplaats moeten omvatten.

• Er dient te worden gewezen op het feit dat tritium, ondanks zijn schijnbare onschadelijkheid, niet uit het oog mag verloren worden. In het jaar 2000 zal de jaarproductie gestegen zijn met een factor 7 en de gecumuleerde activiteit met een factor 8. Het is wenselijk

TABEL VIII - Activiteit gebonden op de sedimenten van de Bovenmaas in België.
Hastiere: radioactiviteit van de sedimenten (pCi/100 g droge afzetting).

Jaar	⁷ Be	⁵⁴ Mn	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹⁴⁶ Ce	¹⁴⁴ Ce
1976	≤ 391	981	≤ 94	689	≤ 80	≤ 68	≤ 65	≤ 149	343	660	≤ 108	≤ 168
1977	≤ 734	69	≤ 203	268	≤ 266	≤ 306	≤ 74	≤ 241	136	354	≤ 99	≤ 376
1978	≤ 564	116	≤ 13	136	≤ 21	≤ 170	≤ 29	≤ 103	51	205	≤ 66	≤ 268
1979	≤ 460	142	≤ 26	143	≤ 43	≤ 87	≤ 10	≤ 97	57	193	≤ 12	≤ 184
1980	≤ 363	≤ 24	≤ 7	31	≤ 18	≤ 12	≤ 6	≤ 28	18	75	≤ 11	≤ 18

dat de normen betreffende de activiteit in de geloosde volumes (maximum 10.000 nCi/m³) en een voor rivierwater geplande limiet-volumeconcentratie worden behouden.

- In de literatuur zijn slechts weinig elementen te vinden betreffende de produktie van ¹⁴C door de PWR-centrales. Onderzoekingswerk ter zake loont hier zeker de moeite.

- Alle sterk actieve lozingen van een centrale van 1.000 MW(e) bevinden zich op een gegeven ogenblik in een volume afvalwater dat minder dan 3.600 m³ bedraagt. Voor de bescherming van de rivieren zou aan een afvoer buiten de zone van de centrale kunnen worden gedacht.

- Op te merken valt dat volgens de vergunningsdossiers de lokale gasvormige lozingen belangrijker worden in verhouding tot de vloeibare lozingen.

- De waterdiensten die afwaarts van de kerncentrales water afnemen, moeten voortaan de controle van de radioactiviteit beschouwen als een operationele parameter voor de behandelingsstations. De ervaring te Tailfer heeft ons geleerd dat die controle minstens de meting van de globale γ -activiteit (0,1 - 1,4 MeV of 0 - 2 MeV) als aanwijzing moet omvatten, evenals van tritium en enkele belangrijke nucliden zoals ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ¹³⁴Cs.

- Essentieel, ten slotte, zijn – zoals de ondervinding heeft aangetoond – de goede verstandhouding en de vertrouwelijke relaties tussen de uitbaters van de centrales en de afwaartse drinkwaterbehandelaars.

Bibliografie

1. Grathwohl, G. Kernforschungszentrum Karlsruhe. Publikation KFK-Ext. 4/73-36.
2. *Evaluation de l'Impact sur l'Environnement des Rejets à l'Atmosphère des Installations de l'IRE à Fleuries*. Uitg. CEN (1971).
3. Weinberg, A. M. and Hammond, P. Ph. (1970). Am. Scientist, 58, p. 412.
4. Levesque, L. (1980). *Les Rejets d'eaux chaudes des centrales thermiques*. Etude de synthèse AFEE.
5. Buck, J. D. and Rankin, J. S. (1972). J. Wat. Pol. Contr. Fed., 44, p. 47.
6. Glasstone, S. and Jordan, W. H. (1980). *Nuclear Power and its Environmental Effects*. Ed. Am. Nuclear Soc.
7. *Technical Reports Series N° 155*. IAEA, Wenen.
8. Mosse, G. (1963). Trib. Cebedeau, 237, p. 389.
9. Valiron, F. (1977). TSM-L'Eau, 72, p. 195.
10. Garrels, R. M., MacKenzie, F. T. and Hunt, C. (1975). *Chemical Cycles and the global Environment*. Uitg. W. Kaufmann.
11. *USA-Code of Federal Regulations*. Part 423, Title 40.
12. Savoir, R., Romnee, L. et Masschelein, W. J. *L'Eau et l'Industrie* (in druk).
13. Bonka, H. (1977). IAEA-SM 223/12, bl. 105, in: 'Behaviour of Tritium in the Environment'. IAEA, Wenen.
14. Gueben, M. et Beguin, Ph. (1975). Journal belge de Radiologie, 58, p. 167.

15. Eisenbud, M. (1973). *Environmental Radioactivity*. Academic Press.

16. Rodier, J. et Chassany, J. P. (1974). *Manuel de Radioprotection pratique*. Uitg. Maloine, Paris.

17. *Dekreet* (Fr.) van 12 september 1976.

18. *Dekreet* (Fr.) van 9 januari 1980.

19. Masschelein, W. J. (1982). *Proceedings of the Congress IAWPR at Cape Town*.

20. Pellerin, P. (1980). *Annales des Mines*. Juni (Fr.).

21. Martin, J. J. (1975). Radioprotection, 10, p. 229.

22. Bruyne, P. de (1982). Electricité, 174, p. 13.

23. Masschelein, W. J., Genot, J. et Halleux, R. (1982). Techn. de l'Eau, 421, p. 5.

24. Masschelein, W. J. et Goossens, R. (1980). Techn. de l'Eau, 407, p. 9.

25. Genin-Meurisse, M. et Micha, J. C. (1980). Revue des question scientifiques, 151, p. 221.

26. Moghissi, A. A. (1980). IAEA - SM - 332/65, bl. 501, uitg. IAEA, Wenen.

27. IAEA, Wenen (1981). *Technical Reports Series*, p. 207.

28. Luyckx, F. and Fraser, G. (1978), bl. 7 in: 'Radioactive Effluents from nuclear power stations'. Uitg. CEC.

29. Goossens, R. (1983). H₂O (16), nr. 1, pag. 2.

● ● ●

Hoogleraar voorlichtingskunde dr. ir. A. van den Ban pleit voor veelzijdigheid in voorlichting, ook over fluoridering

In zijn afscheidscollege op 3 november heeft prof. dr. ir. Anne van den Ban aan de Landbouwhogeschool in Wageningen gepleit voor een voorlichting die alle aspecten van een probleem belicht en die de voorgelichte personen – cliënten, noemt hij die – zelf een keuze laat maken.

Van den Ban definieert voorlichting als 'bewust gegeven hulp bij menings- of besluitvorming door middel van communicatie'. Om deze hulp te kunnen geven moet de voorlichter beschikken over voldoende kennis zowel van het probleemgebied (bijvoorbeeld landbouw, gezondheid, voeding, overheid, wetenschap) als van de voorlichtingskunde. 'Een voorlichtingskundige', aldus Van den Ban, 'is per definitie allergisch voor situaties waarin beslissingen worden genomen op basis van onjuiste of onvolledige inzichten'. Een voorlichter moet streven naar 'een samenleving waarin besluiten worden genomen op basis van een zo goed mogelijk inzicht in de te verwachten gevolgen hiervan'.

Dat dit niet zo eenvoudig te bereiken is, heb ik wel geleerd van de ervaringen met de fluoridering van het drinkwater, aldus de scheidende hoogleraar. 'Daar werd heel duidelijk niet aan deze eis voldaan. Men wilde hier dan ook voorlichting over gaan geven, zag dat in de landbouw veel ervaring was opgedaan met voorlichting en vroeg mij daarom advies. Later heeft men ook op allerlei andere terreinen dergelijke adviezen gevraagd.

Goed onderzoek had aangetoond dat mensen veel minder cariës krijgen als zij geïmmeriseerd drinkwater drinken. In tal van onderzoeken was geen enkele aanwijzing gevonden dat dit nadelige effecten op de gezondheid kon hebben. Uiteraard is het nooit geheel uitgesloten dat dergelijke effecten in de toekomst ook niet gevonden zullen worden. Toch waren er om verschillende redenen grote weerstanden tegen deze fluoridering. Eén van deze redenen was de angst voor de gezondheid. Opmerkelijk is dat men daarbij alleen dacht aan de mogelijke gevolgen van fluoridering. De kans, dat ook niet fluorideren van het drinkwater nadelen voor de gezondheid zou kunnen hebben, bleef bij zeer velen volledig buiten de gezichtskring. Toch krijgen de mensen dan meer vullingen en kunstgebitten. De bewijzen dat daarvoor nooit ongezond materiaal gebruikt zal gaan worden, is zeer veel zwakker dan het bewijs dat fluoridering van het drinkwater niet nadelig is. Als men fluoride gaat gebruiken in de vorm van tabletten of van tandpasta, is de kans dat sommigen te veel gaan gebruiken ook groter dan bij toevoeging aan het drinkwater. We zien hier, zoals vaak gebeurt, dat bij beslissingen alleen wordt gedacht aan mogelijke gevolgen van veranderingen en niet aan gevolgen van niet veranderen. Men realiseert zich niet dat de beslissing niet te veranderen ook een beslissing is. Ons parlement heeft besloten het drinkwater niet te fluorideren. Vanaf het begin van deze eeuw tot omstreeks 1960 was de cariës in Nederland zeer sterk toegenomen. Na 1960 is deze cariës bij kindergebitten echter drastisch verminderd. Niemand weet waarom. Er is wel verondersteld dat dit komt door de discussies over fluoridering van het drinkwater. Daardoor zou de verantwoordelijkheid van Nederlanders voor hun eigen gebitsgezondheid zijn toegenomen, zodat kinderen minder snoepen, hun tanden vaker poetsen e.d. Deze gedragsveranderingen zijn echter niet nauwkeurig gemeten. Bovendien kunnen ook nog allerlei andere veranderingen een rol spelen. Deze vermindering van de cariës zonder fluoridering van het drinkwater was in 1960 niet door deskundigen voorspeld. Dit illustreert dat deze deskundigen niet altijd zo deskundig zijn als we eerst wel denken'.

Van den Ban heeft zijn hoogleraarschap in de voorlichtingskunde op zijn 55e neergelegd om zich in die zin nog een aantal jaren te kunnen wijden aan voorlichtingskundig werk ten behoeve van landen in ontwikkeling. Terwijl hij lid blijft van 'zijn' vakgroep voorlichtingskunde is hij als hoogleraar inmiddels opgevolgd door dr. Niels Røling.

● ● ●