

Annalen
van
de Belgische Vereniging
voor
Stralingsbescherming

VOL. 4 N° 1

1979

Driemaandelijke
uitgave

Publication
trimestrielle

Annales
de
l'Association Belge
de
Radioprotection

Hoofdredacteur

Dr M.H. FAES

Rédacteur en chef

Redactiesecretariaat

Mme Cl. STIEVENART

Secrétaire de rédaction

14, Juliette Wytsmanstraat

14, rue Juliette Wytsman

1050 BRUSSEL

1050 BRUXELLES

INHOUD

SOMMAIRE

Voorwoord	4
Préface	5
O. SEGAERT :	
Si-Eenheden en afgeleide eenheden in de radiologie en radioprotectie	7 - 40
F.P. RAES, A.J. POFFIJN en R.R. BOURGOIGNIE :	
Berekeningsmethode voor de distributie van radioisotopen in het lichaam na een eenmalige opname	41 - 51
R.R. BOURGOIGNIE, P.L. LEJEUNE, A.J. POFFIJN, F.P. RAES, O.J. SEGAERT :	
Bepaling van de $(MTC)_w$ -waarde voor ^{222}Rn in drinkwater, ingenomen in evenwicht met zijn dochterprodukten.	53 - 77

Van de ene uitgever tot de andere

Onze Vereniging gesticht in 1963 heeft er vanaf het begin aan gehouden de verhandelingen van haar vergaderingen en debatten te publiceren. Hierin blijft zij getrouw aan haar statuten waarin onder meer gezegd wordt :

"De Vereniging mag in een orgaan, dat zij als aangepast beschouwt, "het verslag van de vergadering, de werken en de mededelingen publiceren die in de vergadering werden voorgelegd"

In de eerste jaren, heeft onze toegewijde Oud-Voorzitter P. De Plaen ervoor gezorgd dat de uiteenzettingen onder vorm van een bijvoegsel verschenen in het Journal Belge de Radiologie. Mettertijd is het aantal te publiceren teksten voldoende gestegen om de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming toe te laten haar eigen Annalen te publiceren.

Onder het dynamisch impuls van onze uitgever O. Segaert worden deze Annalen tegenwoordig in het buitenland verspreid en kunnen teruggevonden worden in meerdere academische bibliotheken.

De veelvuldige wetenschappelijke en academische activiteiten van onze uitgever laten hem niet meer toe de redactie van de Annalen waar te nemen.

In deze taak die ik op heden overneem, wens ik de Annalen te behouden op het peil waar zij door mijn voorgangers gebracht werden. Ik ben overtuigd dat ik op de leden van onze Vereniging zal mogen rekenen om dit doel te bereiken.

D'un éditeur à l'autre ...

Notre Association, fondée en 1963, a depuis ses débuts tenu à publier les compte rendus de ses réunions et débats. En cela elle est fidèle à ses statuts qui stipulent entre autres :

"L'Association pourra publier, dans un organe qu'elle jugera approprié, le compte rendu des séances et les travaux et communications qui auraient été présentés devant l'Assemblée..."

En un premier temps, les exposés étaient publiés sous forme de supplément au Journal Belge de Radiologie, par les soins de notre dévoué ex-Président P. De Plaen.

L'abondance des textes a permis à l'Association Belge de Radioprotection de publier ses propres Annales.

Sous l'impulsion dynamique de notre éditeur O. Segaeert, ces Annales sont à présent diffusées à l'étranger et ont pris place dans plusieurs bibliothèques académiques.

Les multiples activités scientifiques et académiques de notre éditeur ne lui permettent plus d'assurer la rédaction de la revue.

Dans la tâche qui m'échoit aujourd'hui, je souhaite pouvoir maintenir les Annales au niveau où elles ont été portées par mes prédécesseurs. Je suis convaincu de pouvoir compter sur les membres de l'Association pour atteindre ce but.

Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming Vol.4 n°1

SI-EENHEDEN EN AFGELEIDE EENHEDEN IN DE RADIOLOGIE EN RADIOPROTECTIE

O. SEGAERT

Laboratorium voor Natuurkunde, Groep II

Fakulteit van de Geneeskunde RUG

K.L. Ledeganckstraat, 35, B-9000 Gent

SAMENVATTING

De indeling van grootheden in onafhankelijke en afhankelijke grootheden, de keuze van basisgrootheden, de relatie tussen eenduidig gedefinieerde groothedenvergelijking, getalwaardevergelijking en eenhedenvergelijking zijn de basis in de structuur van het Internationaal Stelsel van Eenheden (Système International d'Unités).

Grondeenheden, bijkomende eenheden en afgeleide eenheden vormen er een coherent, interdisciplinair hanteerbaar geheel dat de willekeurig gekozen incoherente eenheden vervangt. Aansluitend besteedt het artikel aandacht aan afgeleide SI-eenheden in gebruik bij radiologie en radioprotectie.

INLEIDING

De beschrijving van rechtstreekse of onrechtstreeks waargenomen verschijnselen in de dode of levende natuur vergt het invoeren van begrippen en grootheden om de vaststellingen inzake de individuele en collectieve gedragingen van deze systemen voor progressieve studie en tot uitbreiding van kennis te benutten.

Het uitdrukken van wetmatigheden vergt een nauwkeurige definitie van grootheden zoals lengte, tijd, massa, snelheid, arbeid, energie, dosis en zovele andere, waaraan niet louter een intuïtieve betekenis kan worden toegekend. De mogelijkheid tot nauwkeurige definitie bestaat wanneer ondubbelzinnig een werkwijze is vastgelegd volgens dewelke de grootheid kwantitatief kan gemeten worden; men spreekt dan van een "operationele definitie".

Metten betekent het vergelijken van een grootheid met een referentiegrootheid. Zulks gaat meestal gepaard met het uitvoeren van een aantal laboratoriumexperimenten en een aantal wiskundige berekeningen. Het meetresultaat is dan uitgedrukt onder de vorm van een numerieke waarde : "de getalwaarde", gebonden aan een gekozen "eenheid". Metten is het bepalen van de verhouding

$$\frac{\text{grootheid } X}{\text{gekozen eenheid } [X]} = \text{resulterende getalwaarde } \{X\}$$

De getalwaarde $\{X\}$ is de verhouding tussen de grootheid X en een andere grootheid van dezelfde soort die tot eenheid is gekozen en voorgesteld als $[X]$. Is $\{X\}$ de "getalwaarde" van X uitgedrukt in de eenheid $[X]$ dan geldt algemeen

$$\begin{aligned} X &= \{X\} [X] \\ \text{grootheid} &= \text{getalwaarde} \times \text{eenheid} \end{aligned} \quad (1)$$

Som of verschil van gelijksoortige grootheden leveren dezelfde groothedensoort. Het product van grootheden of van positieve of negatieve machten van grootheden levert een nieuwe groothedensoort.

GROOTHEDENSOORTEN

Men onderscheidt onafhankelijke en afhankelijke groothedensoorten. Deze indeling is arbitrair. "Onafhankelijke grootheden", bijvoorbeeld : lengte l , massa m , tijd t , zijn niet gedefinieerd met behulp van andere grootheden. Ze zijn onafhankelijk van elkaar. Hun aantal is beperkt tot het minimum aantal dat nodig is om alle andere grootheden ondubbelzinnig te beschrijven. De "afhankelijke grootheden", bijvoorbeeld : snelheid v , versnelling a , kracht F , volume V , geabsorbeerde dosis D enz. zijn dan te beschrijven met behulp van de onafhankelijke grootheden. Grootheden van dezelfde soort zijn door meting met elkaar vergelijkbaar.

De betrekking

$$X = f A^a B^b C^c \dots$$

is op te vatten als een "groothedenvergelijking", met dewelke een nieuwe afhankelijke grootheid X wordt ingevoerd uitgaande van reeds bekende grootheden A, B, C, \dots

In de voornoemde betrekking zijn a, b, c, \dots meestal positieve of negatieve gehele getallen alhoewel ze ook niet geheel kunnen zijn.

In de vergelijkingen

$$S_{\text{cirkel}} = \Pi R^2 \quad \text{en} \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m l^2 t^{-2}$$

zijn respectievelijk $X =$ oppervlakte, $f =$ getalfactor Π , $A =$ lengte R (onafhankelijk), $a =$ exponent 2

en $X =$ energie, $f =$ getalfactor $1/2$, $A =$ lengte (onafhankelijk),

$B =$ tijd (onafhankelijk), $a =$ exponent 2, $b =$ exponent -2.

De groothedenvergelijking

$$X = f A^a B^b C^c \dots \quad (2)$$

is op te splitsen

in

$$X = \{X\} [X]$$

een "getalwaardevergelijking"

een "eenhedenvergelijking"

$$\{X\} = f \{A\}^a \{B\}^b \{C\}^c \dots \quad (3)$$

$$[X] = [A]^a [B]^b [C]^c \dots \quad (4)$$

zodanig dat in de eenhedenvergelijking geen van 1 verschillende factor optreedt; - de getalwaardevergelijking (3) en groothedenvergelijking (2) zijn gelijkkluidend

- de eenheden die voldoen aan de eenhedenvergelijking (4) noemt men "coherent" met de groothedenvergelijking (2).

Is $X = [X]$ dan is de grootheid X gelijk aan de coherente eenheid $[X]$, hiertoe moet voldaan zijn aan de voorwaarde dat haar getalwaarde $\{X\} = 1$. Deze voorwaarde is uit te drukken onder de vorm

$$f \{A\}^a \{B\}^b \{C\}^c \dots = 1$$

Met terugblik op de aangehaalde voorbeelden kan als eenheid van oppervlak gesteld worden : de oppervlakte van een cirkel met straal $R = \pi^{-\frac{1}{2}}$.

Immers $X = \pi R^2$; $\{X\} = \pi(\pi^{-\frac{1}{2}})^2 = 1$ en $[X] = m^2$.

Anderzijds kan als eenheid van energie gesteld worden : de kinetische energie van 2 kg massa in beweging met een snelheid van een meter per seconde.

Immers $X = \frac{1}{2} m v^2$; $\{X\} = \frac{1}{2} (2)(1)^2 = 1$ en $[X] = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$.

Het behoud van coherentie tussen eenhedenvergelijkingen en groothedenvergelijkingen bij optellen of aftrekken van gelijksoortige grootheden en bij vermenigvuldigen en delen van grootheden in het algemeen, impliceert het behoud van coherentie bij differentiëren en integreren.

Keuze van Basisgrootheden en Grondeenheden

De voornoemde beschrijving en de studie van verschijnselen in de diverse takken van de wetenschap vergt het invoeren van een aantal n groothedensoorten die in een nagenoeg onbeperkt aantal vergelijkingen en wetmatigheden kunnen optreden. Is m het aantal gekozen onafhankelijke hoofdvergelijkingen dan blijkt steeds m kleiner te zijn dan n , zodat m grootheden uit te drukken zijn als functie van $(n-m)$ vrij te kiezen grootheden.

Het verschil ($n-m$) is de orde van het stelsel onafhankelijke vergelijkingen, het bepaalt het aantal te kiezen "basisgrootheden". De overige grootheden zijn "afgeleide grootheden".

De eenheden van de basisgrootheden zijn de "grondeenheden". De definitie van de grondeenheden is gebonden aan een natuurlijke of kunstmatige standaard of aan een model (prototype).

De keuze van een standaard moet beantwoorden aan twee noodzakelijke vereisten : de toegankelijkheid en de invariabiliteit.

1.- de standaard moet toegankelijk zijn; dit betekent : moet de mogelijkheid bieden een directe vergelijkende meting uit te voeren, of nog, een vergelijkende meting volgens indirecte methoden toelaten (bijvoorbeeld afstanden op atomaire of op astronomische schaal).

2.- belangrijker nog is de invariabiliteit ten overstaan van steeds hogere eisen en mogelijkheden op gebied van meetnauwkeurigheid.

Eenheden van het SI

Het Internationaal Stelsel van eenheden (Système International d'Unités) is een uitbreiding van het MKSA-stelsel (meter-kilogram-seconde-ampère stelsel). Het SI telt zeven basisgrootheden en heeft bijgevolg zeven grondeenheden", bovendien werden twee "bijkomende eenheden" en meerdere "afgeleide eenheden" opgenomen. Het SI maakt gebruik van een reeks voorvoegsels die toelaten decimale veelvouden of onderverdelingen van de eenheden te vormen.

Grondeenheden

De grondeenheden zijn als volgt gedefinieerd :

meter

De meter is de lengte gelijk aan 1.650.763,73 golflengten, in het luchtledige, van de straling, overeenkomend met de overgang tussen de toestanden $2 p_{10}$ en $5 d_5$ van het atoom krypton 86.

Opmerking : Als oorspronkelijke definitie werd vóór 1961 aanvaard : de meter is 1/10.000 ste van de afstand tussen pool en evenaar langs de meridiaan door Parijs; de standaard was destijds een staaf uit een platina-iridium legering, de hoogst mogelijke nauwkeurigheid was beperkt tot 1 deel in 10^7 . Met de huidige standaard werd de meetnauwkeurigheid opgevoerd tot 1 deel in 10^9 .

kilogram

Het kilogram is de eenheid van massa; het is gelijk aan de massa van het prototype van platina-iridium, dat door de 3e Algemene Conferentie voor Maten en Gewichten tot standaard voor de eenheid van massa is verklaard.

seconde

De seconde is de tijdsduur van 9.192.631.770 perioden van de straling, overeenkomend met de overgang tussen de twee hyperfijn-niveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133.

Opmerking : Principeel kan elk periodiek verschijnsel worden aangewend voor tijdmeting; het volstaat een aantal herhalingen van het verschijnsel te tellen en dit als maatstaf voor de tijdmeting te aanvaarden. Onder de talrijke mogelijkheden werd achtereenvolgens de voorkeur gegeven aan : de rotatie van de aarde, de oscillatiebeweging van atomen in een kristalstructuur, het golfverschijnsel bij het uitzenden van een karakteristieke stralingsovergang in een bepaald atoom. Vandaar de oorsprong en bestaansredenen van

- a) de "Universele tijd"-rekening met als burgerlijke standaard de seconde, gelijk gesteld aan 1/86.400 ste deel van een zonnedag, zijnde de gemiddelde omwentelingsduur van de aarde om haar as, ten opzichte van de zon;
- b) de "Ephimeris tijd" waarbij de seconde werd gelijk gesteld aan 1/31.556.925,9747 ste deel van het tropisch jaar 1900, zijnde een welbepaalde duur van de aardrotatie om de zon ten opzichte van een vaste ster.

Door de referentiekeuze te verleggen naar de atomaire oscillatie in een kwartskristal werd de meetnauwkeurigheid opgevoerd tot één deel in 10^{10} .

De keuze van de huidige SI-eenheid en referentie-standaard verhoogt de meetnauwkeurigheid tot één deel in 10^{11} .

ampère

De ampère is de constante elektrische stroom die, indien hij geleid wordt door twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders per meter lengte een kracht van 2×10^{-7} newton zou veroorzaken.

kelvin

De kelvin is de thermodynamische temperatuur die gelijk is aan het 1/273,16 gedeelte van de thermodynamische temperatuur van het tripelpunt van water.

Opmerking :

1. Buiten de thermodynamische temperatuur (symbool T), uitgedrukt in kelvin gebruikt men ook de celsiustemperatuur (symbool t) bepaald door de vergelijking $t = T - T_0$ waarin, per definitie, $T_0 = 273,15$ K. De celsiustemperatuur wordt gewoonlijk in graad celsius uitgedrukt (symbool °C). De eenheid "graad celsius" is dus gelijk aan de eenheid "kelvin" en een interval of een verschil van temperatuur mag zowel in kelvin als in graad celsius uitgedrukt worden.
2. Bij het tripelpunt zijn de drie fazen gas, vloeistof en vaste stof in de unieke evenwichtstoestand, waar overgang van de ene fase in beide andere mogelijk is. Dit referentiepunt werd gekozen omwille van de eënduidigheid.

candela

De candela is de lichtsterkte in loodrechte richting van een oppervlakte gelijk aan het 1/600.000 gedeelte van een vierkant met zijden van 1 meter van een integrale straler bij de stollingstemperatuur van platina onder een druk van 101.325 newton per vierkante meter.

mol

De mol is de hoeveelheid stof van een systeem dat evenveel elementaire entiteiten bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram koolstof 12. Wanneer men de mol gebruikt, moeten de elementaire entiteiten gespecificeerd worden, die atomen, moleculen, ionen, elektronen, andere deeltjes of bepaalde groepen van dergelijke deeltjes kunnen zijn.

Tabel I : Basisgrootheden en grondeenheden van het SI

basisgrootheid	symbool	grondeenheid	symbool
lengte	ℓ	meter	m
massa	m	kilogram	kg
tijd	t	seconde	s
elektrische stroom	I	ampère	A
thermodynamische temperatuur	T	kelvin	K
lichtsterkte	I	candela	cd
hoeveelheid stof	-	mol	mol

Bijkomende eenheden

De bijkomende eenheden van het SI en de bijbehorende grootheden zijn :

radiaal

De radiaal is de hoek tussen twee stralen van een cirkel, welke op de omtrek een boog afsnijden, die in lengte gelijk is aan de straal.

steradiaal

De steradiaal is de ruimtehoek binnen een kegeloppervlak, die op een bol, waarvan het middelpunt samenvalt met de top van de kegel, een oppervlakte uitsnijdt, die gelijk is aan die van een vierkant dat de straal van de bol als zijde heeft.

Tabel II : Bijkomende eenheden en bijbehorende grootheden van het SI

grootheid	symbool	bijkomende eenheid	symbool
hoek	α	radiaal	rad
ruimtehoek	Ω	steradiaal	sr

De definities zijn toegelicht in figuur I, a en b.

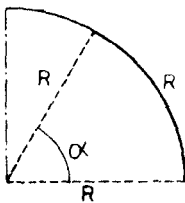


fig. I.a : $\alpha = 1$ radiaal

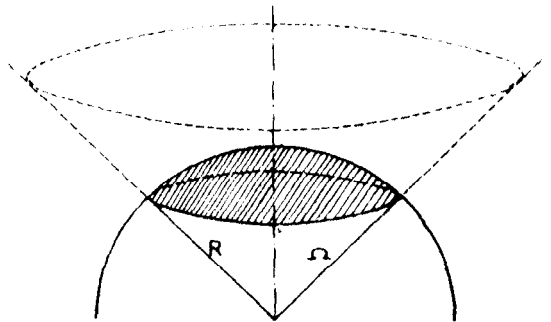


fig. I.b : $\Omega = 1$ steradiaal
(mits oppervlak bolkap = R^2)

Afgeleide eenheden

De afgeleide eenheden van het SI volgen uit de definities van de afhankelijke grootheden als producten van machten van grondeenheden.

Algemeen is in het SI stelsel een afgeleide eenheid van de gedaante

$$[X] = m^a \cdot kg^b \cdot s^c \cdot A^d \cdot K^e \cdot cd^g \cdot mol^h$$

Hierin zijn a, b, c, ... meestal positief of negatief, geheel of gelijk aan nul. In sommige gevallen bevat het product ook machten van de bijkomende eenheden rad en sr.

De afgeleide eenheid

$$[X] = m^a \cdot kg^b \cdot s^c \cdot A^d \cdot K^e \cdot cd^g \cdot mol^h \cdot rad^i \cdot sr^j$$

behoort bij de afhankelijke grootheid

$$X = f \cdot l^a \cdot m^b \cdot t^c \cdot I^d \cdot T^e \cdot I^g \cdot \alpha^i \cdot \Omega^j$$

Aan een aantal afgeleide eenheden wordt een eigen naam en een eigen symbool toegekend. Deze naam vervangt dan de overeenkomstige samenstelling van namen van grondeenheden; hetzelfde geldt voor de symbolen. De ingevoerde nieuwe symbolen en benamingen voor de afgeleide eenheden zijn opnieuw hanteerbaar in combinatie met de symbolen en benamingen van de grondeenheden.

Tabel III bevat de afgeleide eenheden waaraan een speciale naam en symbool zijn toegekend.

Tabel III : Afhankelijke grootheden en afgeleide eenheden van het SI

grootheid	eenheid	symbool	eenhedenvgl.
frekwentie	hertz	Hz	s^{-1}
kracht	newton	N	$m.kg.s^{-2}$
druk	pascal	Pa	$N.m^{-2}$
arbeid; energie; hoeveelheid warmte	joule	J	N.m
vermogen; energiestroom	watt	W	$J.s^{-1}$
(elektrische) lading; hoeveelheid elektriciteit	coulomb	C	A.s
(elektrische) spanning; potentiaalverschil	volt	V	$W.A^{-1}$
(elektrische) weerstand	ohm	Ω	$V.A^{-1}$
(elektrische) geleidbaarheid	siemens	S	$A.V^{-1}$
(elektrische) capaciteit	farad	F	$C.V^{-1}$
magnetische flux	weber	Wb	V.s
magnetische inductie; magnetische fluxdichtheid	tesla	T	$Wb.m^{-2}$
inductantie	henry	H	$Wb.A^{-1}$
lichtstroom, lichtflux	lumen	ℓ_m	cd.sr
verlichtingssterkte	lux	ℓ_x	$\ell_m.m^{-2}$
Celsius temperatuur	graad Celsius	$^{\circ}C$	K
geabsorbeerde dosis; geabsorbeerd dosis index kerma; specifieke afgestane energie	gray	Gy	$J.kg^{-1}$
activiteit	becquerel	Bq	s^{-1}

Decimale voorvoegsels

Bij het gebruik van de grondeenheden, de bijkomende en de afgeleide eenheden van het SI stelsel komt het voor dat deze eenheden zeer groot of zeer klein zijn ten overstaan van de grootte van de gemeten grootte. Om in dergelijke gevallen te komen tot een hanteerbare getalwaarde aanvaardt het SI het gebruik van de zestien decimale voorvoegsels opgenomen in Tabel IV. De omlijste voorvoegsels passen niet in het patroon van de overige, ze volgen niet de 10^3 of 10^{-3} multiplicatieregels zoals de andere.

In wetenschappelijke kringen bestaat de neiging om het gebruik van de omlijste voorvoegsels te vermijden. Het SI bevat uitsluitend grondeenheden, bijkomende eenheden en afgeleide eenheden die een coherent geheel vormen. Het gebruik van voorvoegsels leidt enkel tot een veelvoud of een onderdeel van een SI eenheid. De eenheden gevormd bij middel van de voorvoegsels zijn niet op te vatten als SI eenheden.

Tabel IV : Decimale voorvoegsels van het SI

voorvoegsel	symbool	factor	voorvoegsel	symbool	factor
exa	E	10^{18}	deci	d	10^{-1}
peta	P	10^{15}	centi	c	10^{-2}
tera	T	10^{12}	milli	m	10^{-3}
giga	G	10^9	micro	μ	10^{-6}
mega	M	10^6	nano	n	10^{-9}
kilo	k	10^3	pico	p	10^{-12}
hecto	h	10^2	femto	f	10^{-15}
deca	da	10^1	atto	a	10^{-18}

- Samengestelde decimale voorvoegsels worden niet gebruikt.
Voorbeeld : gebruik picofarad, pF (niet micromicrofarad, $\mu\mu\text{F}$)
- De SI voorvoegsels zijn zonder gebruik van verbindingstekens rechtstreeks verbonden met de namen van de eenheden.
Voorbeeld : noteer kiloampere (niet kilo-ampere)
- De SI voorvoegsel symbolen zijn zonder gebruik van verbindingstekens of tussenruimte geplaatst voor de eenhedensymbolen.
Voorbeeld ; MPa, megapascal.

Niet coherente eenheden

In het SI stelsel is

$$[X] = m^a \cdot kg^b \cdot s^c \cdot A^d \cdot K^e \cdot cd^g \cdot mol^h \cdot rad^i \cdot sr^j$$

de coherente eenheid voor de grootheid

$$X = f \cdot \ell^a \cdot m^b \cdot t^c \cdot I^d \cdot T^e \cdot I^g \cdot N^h \cdot \alpha^i \cdot \Omega^j$$

De grootheid $X = \{X\}[X]$ is er gelijk aan de eenheid $[X]$ op voorwaarde dat de getalwaarde

$$\{X\} = f \{ \ell \}^a \cdot \{ m \}^b \cdot \{ t \}^c \cdot \{ I \}^d \cdot \{ T \}^e \cdot \{ I \}^g \cdot \{ N \}^h \cdot \{ \alpha \}^i \cdot \{ \Omega \}^j = 1$$

De niet coherente eenhedenvergelijking voor de incoherente eenheid $[Z]$ bevat naast het product van machten van SI-grondeenheden en bijkomende eenheden een numerieke factor $\{Y\}$

$$X = \{X\} \cdot [X] = \frac{\{X\}}{\{Y\}} \cdot \{Y\} \cdot [X] = \frac{\{X\}}{\{Y\}} \cdot [Z] = \{Z\} \cdot [Z]$$

De coherente SI-eenheid $[X]$ en een willekeurig gekozen incoherente eenheid $[Z]$ zijn verbonden door de betrekking

$$[Z] = \{Y\} \cdot [X] \quad \text{of} \quad \{1\} [Z] = \{Y\} [X]$$

Hierin betekent $\{Y\}$ een aangepaste conversiefactor; $\{Y\}$ is de getalwaarde van de incoherente eenheid in SI-eenheden.

De getalwaarde $\{X\}$ van de grootheid X uitgedrukt in SI-eenheden $[X]$ en de overeenkomstige getalwaarde $\{Z\}$ van de grootheid X uitgedrukt in de niet coherente eenheid $[Z]$ zijn verbonden door de betrekking

$$\{Z\} = \frac{1}{\{Y\}} \cdot \{X\}$$

Acht niet coherente eenheden kennen in het dagelijks leven een zulkdanig uitgebreid en gevestigd gebruik dat de "Conference générale des poids et mesures" CGPM deze incoherente eenheden heeft geadopteerd voor algemeen gebruik samen met de SI-eenheden.

Tabel V : Geadopteerde niet coherente eenheden

grootheid X	geadopteerde eenheid	symbool [Z]	getalwaarde in SI-eenheden {Y} [X]
tijd	minuut	min	60 s
	uur	h	3600 s
	dag	d	86400 s
vlakke hoek	graad	°	$\pi/180$ rad
	minuut	'	$\pi/10800$ rad
	seconde	"	$\pi/648000$ rad
volume	liter	ℓ	10^{-3} m^3
massa	ton	t	1000 kg

Een aantal in Tabel V opgenomen niet coherente eenheden waarvan de erkenning is geëindigd op 31 december 1977, genieten een beperkte verlenging in gebruiksduur.

Tabel VI : Niet coherente eenheden (erkend tot 31 december 1977) met beperkte verlenging in gebruiksduur

grootheid	niet coherente eenheid	symbool [Z]	getalwaarde in SI-eenheden {Y} [X]
lengte	ångstrom	Å	10^{-10} m
oppervlakte	barn	b	10^{-28} m^2
versnelling	gal	Gal	$0,01 \text{ m.s}^{-2}$
kracht	dyne	dyn	10^{-5} N
dynamische viscositeit	poise	P	$0,1 \text{ Pa.s}$
kinematische viscositeit	stokes	St	$10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
arbeid, energie	erg	erg	10^{-7} J
activiteit	curie	Ci	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$
exposie	rontgen	R	$2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$
geabsorbeerde dosis	rad	rad of rd	$0,001 \text{ J.kg}^{-1}$
equivalente dosis	rem	rem	$0,01 \text{ J.kg}^{-1}$

Radiologische grootheden en eenheden

Bij de grootheden behorende tot het gebied van de radiologie en de radio-protectie zijn de vroegere incoherente eenheden te vervangen door SI-eenheden. Op aanbeveling van de ICRU ("International Commission on Radiation Units") is het gebruik van de SI-eenheid "gray" beperkt tot de grootheden geabsorbeerde dosis, kerma, geabsorbeerde dosis-index en specifieke afgestane energie. De benaming "sievert" en het bijbehorend symbool Sv zijn in het SI nog niet aanvaard als specifieke naam en symbool voor de SI-eenheid "joule per kilogram" bij meting van de grootheid dosisequivalent.

De SI-eenheden van de hierna gedefinieerde radiologische grootheden zijn opgenomen in Tabel VII (cf. ICRU 19).

Afgestane energie, door ioniserende straling aan materie in een volume is

$$\epsilon = \sum \epsilon_{in} - \sum \epsilon_{ex} + \sum Q$$

waarbij aan de symbolen de volgende betekenis wordt toegekend

$\sum \epsilon_{in}$ = de som van de energie (uitgezonderd rustenergie) van alle rechtstreeks en onrechtstreeks ioniserende deeltjes die het volume binnentreden

$\sum \epsilon_{ex}$ = de som van de energie (uitgezonderd rustenergie) van alle rechtstreeks en onrechtstreeks ioniserende deeltjes die het volume verlaten

$\sum Q$ = de som van de vrijkomende energie min de som van de opgeslorpte energie bij nucleaire of elementaire deeltjestransformaties die optreden binnen het beschouwde volume.

Geabsorbeerde dosis, D , is het quotient $d \langle \epsilon \rangle$ gedeeld door dm , hierbij betekenen $d \langle \epsilon \rangle$: de gemiddelde (door ioniserende straling) afgestane energie in een volume-element

dm : de massa van het volume-element

$$D = \frac{d \langle \epsilon \rangle}{dm}$$

Geabsorbeerd dosistempo, \dot{D} , is het quotient van de deling van dD door dt , hierbij betekent dD : de toename van het geabsorbeerde dosis gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Deeltjesfluentie of fluentie, Φ , is het quotient van de deling van dN door da ; hierin betekent :

dN : het aantal deeltjes dat een bol met doorsnedeoppervlakte da binnentreedt

Opmerking : Φ is dezelfde grootte als de grootte nvt die gebruikelijk is in de neutronenfysica

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

Fluxdichtheid of deeltjesfluentietempo, $\dot{\phi}$, is het quotient van deling van $d\Phi$ door dt ; hierbij betekent :

$d\Phi$: de toename van de deeltjesfluentie gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{\phi} = \frac{d\Phi}{dt}$$

Energiefluentie, Ψ , van deeltjes is het quotient van dE_{fl} gedeeld door da ; hierbij betekent :

dE_{fl} : de som van alle energiebijdragen, uitgezonderd de rustenergie, van alle deeltjes die een sfeer met doorsnedeoppervlakte da binnentreden

$$\Psi = \frac{dE_{fl}}{da}$$

Energiefluxdichtheid of energiefluentietempo, $\dot{\psi}$, is het quotient van de deling van $d\Psi$ door dt ; hierbij betekent :

$d\Psi$: de toename van de energiefluentie gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{\psi} = \frac{d\Psi}{dt}$$

Kerma, K , is het quotient van de deling van dE_{tr} door dm ; hierbij betekenen :

dE_{tr} : de som van de initiële kinetische energie van alle geladen deeltjes, vrijgemaakt door onrechtstreeks ioniserende deeltjes in een volume-element van een bepaald materiaal

dm : de massa van de materie in het beschouwde volume-element

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

Kermatempo, \dot{K} , is het quotient van de deling van dK door dt ; hierbij betekent :

dK : de toename van kerma gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

Exposie, X , is het quotiënt van de deling van dQ door dm ; hierbij betekent

dQ : de absolute waarde van de totale lading van de ionen van hetzelfde teken gevormd in lucht wanneer alle electronen (positonen en negatonen) vrijgemaakt door fotonen in een volume-element met massa dm , in lucht volledig tot stilstand worden gebracht

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Exposietempo, \dot{X} , is het quotiënt van de deling van dX door dt ; hierbij betekent :

dX : de toename van de exposie gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

Massieke verzwakkingscoëfficiënt of verzwakkingscoëfficiënt per massadichtheid, $\frac{\mu}{\rho}$, van een materiaal voor onrechtstreeks ioniserende deeltjes met welbepaalde energie is het quotiënt van de bewerking $\frac{dN}{N}$ gedeeld door $\rho d\ell$; hierbij betekent :

$\frac{dN}{N}$: de fractie van de deeltjes die interacties ondergaan bij het doorlopen van een afstand $d\ell$ in een medium met dichtheid ρ

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{d\ell}$$

Massieke energieoverdrachtcoëfficiënt of massa energieoverdrachtcoëfficiënt, $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$, van een materiaal voor onrechtstreeks ioniserende deeltjes met welbepaalde energie is het quotiënt van de bewerking $\frac{d E_{tr}}{E}$ gedeeld door $\rho d\ell$; hierbij betekent :

$\frac{d E_{tr}}{E}$: het aandeel van de invallende deeltjesenergie (uitgezonderd de rustenergie) dat wordt omgezet in kinetische energie van geladen deeltjes door interacties bij het doorlopen van een afstand $d\ell$ in een medium met dichtheid ρ

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho E} \frac{d E_{tr}}{d\ell}$$

Massieke energieabsorptiecoëfficiënt of massa energieabsorptiecoëfficiënt, $\frac{\mu_{en}}{\rho}$, van een materiaal voor onrechtstreeks ioniserende deeltjes met welbepaalde energie is het product van de massieke energieoverdrachtcoëfficiënt bij die energie, met de factor $(1-g)$; hierbij betekent :

g : de fractie van de energie van de secundair gevormde geladen deeltjes die in het materiaal verloren is gegaan onder de vorm van remstraling

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g)$$

Massiek energieverlies of lineiek energieverlies per massadichtheid, $\frac{S}{\rho}$,

voor geladen deeltjes in een materiaal is het quotient van de deling van dE door ρdl , hierbij betekent :

dE : de energie die de geladen deeltjes met welbepaalde energie verliezen bij het doorlopen van een afstand dl in het medium met dichtheid ρ

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$$

Lineieke energieoverdracht of beperkt lineiek energieverlies door botsing,

L_{Δ} , van geladen deeltjes in een medium is het quotient van de deling van dE door dl, hierbij zijn :

d l : de afstand afgelegd door het deeltje

dE : het energieverlies door botsingen met energieoverdracht kleiner dan een gespecificeerde waarde Δ

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta}$$

Activiteit, A, van een hoeveelheid van een radioactieve nuclide is het quotient van dN gedeeld door dt; hierbij betekent :

dN : het aantal spontane nucleaire transformaties die zich in die hoeveelheid voordoen binnen een tijdsinterval dt

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Specifieke exposietempoconstante, Γ_{δ} , van een radioactieve nuclide die fotonen uitzendt, is het quotient van de bewerking $l^2 \left(\frac{dX}{dt} \right)_{\delta}$ gedeeld door A, hierbij betekent :

$\left(\frac{dX}{dt} \right)_{\delta}$: het exposietempo te wijten aan fotonen met energie groter dan δ op een afstand l van een puntbron van deze nuclide met een activiteit A

$$\Gamma_{\delta} = \frac{l^2}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right)_{\delta}$$

Dosisequivalent, H, op een beschouwde plaats in weefsel is het product van factoren D, Q, N; hierbij betekenen :

D : de geabsorbeerde dosis op de beschouwde plaats

Q : de kwaliteitsfactor

N : het product van om het even welke noodzakelijke correctiefactoren

$$H = D Q N$$

Dosisequivalenttempo, \dot{H} , is het quotient van de deling van dH door dt, hierbij betekent :

dH : de toename van het dosisequivalent gedurende het tijdsinterval dt

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt}$$

Tabel VII : Radiologische grootheden en eenheden

Grootheid Grandeur Quantity	Symbool Symbole Symbol	SI-eenheid Unité SI SI-unit	Incoherente eenheid Unité incoherente Incoherent unit (= equivalent)
Afgestane energie Energie communiquée Energy imparted	ϵ	J (joule)	grad = 10^{-5} J
Geabsorbeerde dosis Dose absorbée Absorbed dose	D	Gy (gray) = J kg ⁻¹	rad = 10^{-2} Gy = 10 mGy
Geabsorbeerd dosistempo Débit de dose absorbée Absorbed dose rate	\dot{D}	Gy s ⁻¹	rad s ⁻¹ = 10^{-2} Gy s ⁻¹
Deeltjesfluentie Fluence de particules Fluence	Φ	m ⁻²	
Fluxdichtheid of fluentietempo Densité de flux ou débit de fluence Fluxdensity or fluencerate	ϕ	m ⁻² s ⁻²	
Energiefluentie Fluence énergétique Energy fluence	Ψ	J m ⁻²	
Energiefluxdichtheid of energiefluentietempo Densité de flux énergétique ou débit de fluence énergétique Energy flux density or energy fluence rate	ψ	J m ⁻² s ⁻¹	
Kerma	K	J kg ⁻¹	rad = 10^{-2} J kg ⁻¹

Tabel VII : Radiologische grootheden en eenheden (vervolg)

Grootheid Grandeur Quantity	Symbool Symbole Symbol	SI-eenheid Unité SI SI-unit	Incoherente eenheid Unité incoherente Incoherent unit (= equivalent)
Kermatempo Débit de kerma Kerma rate	\dot{K}	$J \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$\text{rad s}^{-1} = 10^{-2} \text{ Jkg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Exposie Exposition Exposure	X	$\text{Askg}^{-1} = \text{Ckg}^{-1}$	Roentgen $R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1}$
Exposietempo Débit d'exposition Exposure rate	\dot{X}	Akg^{-1} $= \text{Ckg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$\text{Rs}^{-1} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Akg}^{-1}$
Massiche verzwakkingscoëfficiënt Coefficient d'atténuation massique Mass attenuation coefficient	$\frac{\mu}{\rho}$	$\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$	
Massieke energieoverdrachtcoëfficiënt Coefficient de transfert d'énergie massique Mass energy transfer coefficient	$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$	$\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$	
Massieke energieabsorptiecoëfficiënt Coefficient d'absorption d'énergie massique Mass energy absorption coefficient	$\frac{\mu_{en}}{\rho}$	$\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$	
Massiek energieverlies Pouvoir d'arrêt massique Total mass stopping power	$\frac{S}{\rho}$	$\text{Jm}^2 \text{ kg}^{-1}$	

Tabel VII : Radiologische grootheden en eenheden (vervolg)

Grootheid Grandeur Quantity	Symbool Symbole Symbol	SI-eenheid Unité SI SI-unit	Incoherente eenheid Unité incoherente Incoherent unit (= equivalent)
Lineaire energieoverdracht Transfert d'énergie linéique Linear energy transfer (LET)	L	Jm^{-1}	$(\text{keN})\mu\text{m}^{-1}$
Activiteit Activité Activity	A	Becquerel $\text{Bq} = \text{s}^{-1}$	Curie $\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ $\text{Ci} = 37 \text{ G Bq}$
Specifieke exposietempoconstante Constante spécifique de débit d'exposition Exposure rate constant	Γ	$\text{As m}^2 \text{kg}^{-1}$ $= \text{C m}^2 \text{kg}^{-1}$	$\text{R m}^2 \text{h}^{-1} \text{Ci}^{-1}$ $= 1,937 \cdot 10^{-18} \text{ Cm}^2 \text{kg}^{-1}$
Dosisequivalent Equivalent de dose Dose equivalent	H	$\text{J kg}^{-1} (\star)$	$\text{rem} = 10^{-2} \text{ J kg}$
Dosisequivalenttempo Débit d'équivalent de dose Dose equivalent rate	H	$\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ $(\star\star)$	$\text{rem s}^{-1} = 10^{-2} \text{ Jkgs}^{-1}$

(\star) De ICRP (International Commission on Radiological Protection) formuleerde het voorstel om aan de SI-eenheid van dosisequivalent, Jkg^{-1} , de benaming "Sievert" en het symbool "Sv" toe te kennen.

($\star\star$) De ICRP (International Commission on Radiological Protection) formuleerde het voorstel om aan de SI-eenheid van dosisequivalenttempo, $\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$, de benaming "Sievert per seconde" en het symbool "Sv s⁻¹" toe te kennen.

PANEELDISCUSSIE OVER HET GEBRUIK VAN DE RADIOLOGISCHE EENHEDEN NAAR AANLEIDING VAN DE LEZING VAN PROF. O. SEGAERT OVER HET STELSEL VAN SI-EENHEDEN.

Leden van het paneel :

Voorzitter : A. LAFONTAINE.

J. BOUQUIAUX, G. CANTILLON, M. FAES, P. HUBLET, R. NUYTS, O. SEGAERT, H. VOORHOF, A. WAMBERSIE.

Antwoorden op interventies :

J. BOUQUIAUX :

L'arrêté royal belge du 4.10.1977 limite l'emploi des anciennes unités périmées au 31 décembre 1977 ou au 31 décembre 1979. Certaines anciennes unités pourront éventuellement être prorogées après le 31 décembre 1977 (activité, exposition, dose absorbée).

Qu'on le veuille ou non, nous sommes donc tenus par la réglementation à utiliser les nouvelles unités dans tous les actes officiels.

Pour atténuer la confusion qui pourrait résulter de l'emploi simultané de plusieurs systèmes d'unités, la période d'installation de la réforme doit, à mon avis, être aussi courte que possible.

P. HUBLET :

J'estime que l'usage du système d'unités S.I. apportera certainement une grande simplification dans le domaine scientifique et qu'il est par conséquent très souhaitable qu'il soit mis en application.

Il convient toutefois de remarquer que des états importants, notamment du continent latino-américain n'ont pas encore pris position sur ce sujet alors que la Belgique s'y est résolument engagée. A cet égard, il convient d'attirer l'attention sur le fait que le Sievert, unité dont l'emploi sera très nécessaire dans le domaine de la radioprotection, ne figure pas dans le nouveau système de métrologie S.I décrit dans les dispositions réglementaires belges (arrêté royal du 4 octobre 1977).

Les réticences des États-Unis d'Amérique à s'engager dans le système S.I sont désagréables compte tenu de l'importance de leur apport dans la technologie nucléaire (notamment dans la production et dans la vente d'appareillage, dans les publications à caractère scientifique et technique).

Par ailleurs, bien qu'il soit recommandé d'effectuer le passage des anciennes unités aux nouvelles au cours d'une période relativement brève en prévoyant une préparation intensive des utilisateurs, il faut s'attendre à ce que dans la pratique, cette période soit beaucoup plus longue dans les disciplines de la radiobiologie et de la radioprotection.

En effet, l'utilisation d'appareils de mesure gradués et étalonnés selon les anciennes unités sera source de difficultés.

Etant donné le fait que les doses individuelles reçues par les travailleurs exposés aux radiations ionisantes sont comptabilisées durant leur vie professionnelle et conservées dans les tableaux d'irradiation et dans les fiches d'irradiation, il s'imposera de continuer pendant longtemps à maîtriser parfaitement la signification du "rem" (le rad équivalent pour l'homme) quel que soit le sort qu'il lui sera réservé dans l'avenir.

R. NUYS :

Ik ben de mening toegedaan dat de overgang naar S.I.-eenheden voornamelijk in wetenschappelijke kringen zeer nuttig is en ongetwijfeld grote voordelen heeft ten overstaan van het huidig eenhedenstelsel.

Ik waarschuw evenwel voor overhaasting en leg er de nadruk op dat met de aanpassing van de bestaande wetgeving inzake de bescherming tegen de gevaren van ioniserende stralen, zeer voorzichtig moet worden tewerkgegaan. Het hoofddoel van deze laatste wetgeving, namelijk *de bevordering van de veiligheid, hygiëne en gezondheid bij het omgaan met radioactieve stoffen en met apparaten die radioactieve straling teweegbrengen*, mag niet uit het oog worden verloren.

Dit hoofddoel zou volgens mij in het gedrang kunnen worden gebracht bij een overhaastige overgang. Vorgissingen inzake eenheden kunnen hier zeer ernstige gevolgen hebben en bovendien ongepaste reacties vanwege sommige leefmilieukringen uitlokken.

Ik meen dat de betreffende reglementaire bepalingen pas moeten worden aangepast inzake de nieuwe S.I.-eenheden nadat de betrokken personen en milieu's, in ruime zin, voldoende vertrouwd zijn geworden met de nieuwe eenheden.

Om dit te bereiken heeft het Ministerie van Nationale Opvoeding en het

Ministerie van Economische Zaken nog een grote informatietaak voor zich. Ik wens te onderstrepen dat totnutoe en zolang er geen wijziging is gekomen aan de hogeraangehaalde wetgeving, er geen wettelijke verplichting bestaat de nieuwe S.I-eenheden in het kader van die wetgeving te hanteren.

In dit verband is te benadrukken dat de SIEVERT nog niet voorkomt in de reglementaire bepalingen (K.B. van 4 oktober 1977) uitgevaardigd door het Ministerie van Economische Zaken betreffende de meeteenheden en dat volgens die bepalingen de verlenging van erkenning na 31 december 1979 van de thans gehanteerde eenheden te verwachten is.

H. VOORHOF :

1. De vragen en reacties die tijdens het rondetafelgesprek werden geuit ten aanzien van de verantwoordelijkheid en de besluitvorming van de Metrologische Dienst van het Ministerie van Economische Zaken, met betrekking op de wetgeving over de meeteenheden, kunnen als volgt worden samengevat :

1.1. Op welke manier en op welke basis werd overgegaan tot de wettelijke vastlegging van de meeteenheden ?

1.2. Op welke basis werd, meer in het bijzonder, beslist tot het invoeren van de nieuwe radiologische eenheden en tot het buiten gebruik stellen van de actueel gehanteerde eenheden ?

1.3. Is bij deze besluitvorming inspraak mogelijk geweest vanuit radiologische kringen ?

1.4. Welke zijn de tijdslijmieten, zowel voor de invoering als voor de afschaffing van deze eenheden ?

1.5. Welke zijn de inspanningen van officiële zijde geweest teneinde de wettelijke eenheden op zo ruim mogelijke schaal te laten bekend worden ?

1.6. Onder welke omstandigheden is het gebruik van wettelijke eenheden verplicht en wat zijn hiervan de gevolgen ten aanzien van de meetinstrumenten ?

2. De beantwoording der vragen en reacties is onderstaand, op schematische wijze weergegeven :

2.1. Het beleid inzake meeteenheden gebeurt niet meer op zuiver nationa-

le basis. Inderdaad behoeft de Belgische Wetgeving terzake zich te schikken naar de bepalingen van EEG-richtlijnen. Deze EEG-richtlijnen komen tot stand na gezamenlijk overleg van de officiële instanties die in de verschillende lidstaten der Europese Gemeenschappen hieromtrent de wettelijke bevoegdheid hebben. Zo is het actueel van kracht zijnde Koninklijk Besluit van 4 oktober 1977 (Belgisch Staatsblad van 20 oktober 1977) in overeenstemming met de Richtlijn 76/770/EEG " Richtlijn van de Raad van 27 juli 1976 tot wijziging van de Richtlijn 71/354/EEG inzake de onderlinge aanpassing der wetgevingen der Lid-Staten op het gebied van de meeteenheden ".

Bij het vaststellen van de eenheden op EEG-vlak worden overigens de resoluties gevolgd van de " Algemene Conferentie voor Maten en Gewichten " zodat men zelfs kan gewagen van een wereldomvattende concertatie op dat gebied.

2.2. Bij het invoeren van de " nieuwe " radiologische eenheden de " becquerel " (Bq), de " gray " (Gy) en de " coulomb per kilogram " (C/kg) ter respectievelijke vervanging van de " oude " radiologische eenheden de " curie " (Ci), de " rad " (rd) en de " röntgen " (R) werden eveneens de hoger vermelde resoluties gerespecteerd, meer in het bijzonder deze van de 15e " Algemene Conferentie voor Maten en Gewichten " van 1975.

Bovendien werd in de 87e vergadering van de " Internationale Commissie voor Maten en Gewichten " (september 1978) besloten tot het weerhouden van de " sievert " (Sv) ter vervanging van de " rem ". Deze aanbeveling zal aan de 16e " Algemene Conferentie van 1979 ter goedkeuring worden voorgelegd. Inmiddels heeft de Europese Commissie de sievert reeds opgenomen in haar nieuw ontwerp tot wijziging van de huidige Richtlijn. Bij inwerkingtreding dezer dienst overeenkomstig de nationale wetgeving te worden aangepast.

2.3. Radiologische middens zijn terdege bij de besluitvorming betrokken geweest, althans op internationaal vlak, daar het zelfs op aanbeveling van de " International Commission on Radiation Units and Measurements " (ICRU) (juli 1974) is geweest dat de " gray " en de " becquerel " werden geïntroduceerd bij de " Algemene Conferentie voor Maten en Gewichten ". De " sievert " werd aanbevolen door de " International Commission on Radiological Protection " (ICRP) (januari 1977).

2.4. Overeenkomstig het huidig Koninklijk Besluit van 4 oktober 1977 zijn de " becquerel " en de " gray " wettelijke eenheden geworden op de dag van hun verschijnen in het Belgisch Staatsblad, nl. op 20 oktober 1977.

Overeenkomstig dit zelfde besluit vervallen de curie, de röntgen, de rad en de rem in principe op 31 december 1979, maar wordt tevens voorzien in een mogelijke verlenging.

In het recente voorstel tot wijziging van de EEG-Richtlijn 76/770/EEG wordt als uiterste datum voor het verdwijnen van deze eenheden de datum van 31.12.1985 weerhouden.

Deze datum zal dus eveneens in de Belgische wetgeving worden opgenomen na goedkeuring van de nieuwe richtlijn. De datum van 1985 werd weerhouden omdat in 1975 tijdens de 15e " Algemene Conferentie " een periode van 10 jaar als algemeen haalbaar werd geacht. In België werd door het Koninklijk Besluit van 14 september 1970, over de eenheden, overigens reeds voorzien in het buiten gebruik stellen van deze niet met het SI-stelsel coherente eenheden.

2.5. De Metrologische Dienst heeft actief meegewerkt aan het tot stand komen van Belgische normen over eenheden en grootheden.

Deze normen worden in hun ontwerpvorm behandeld door de Commissie " Grootheden, Eenheden en Symbolen " van het Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN). In deze commissie zetelen deskundigen, ondermeer afkomstig van professionele organisaties en van het onderwijs. Door de betrokkenheid van deze milieus komt er een vrij brede informatiestroom tot stand. Bovendien werd door de Dienst meegewerkt aan televisieprogramma's over het onderwerp en werden voordrachten gehouden.

2.6. De omstandigheden waaronder de wettelijke eenheden verplicht gebruikt moeten worden zijn weergegeven in de kaderwet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, de meetstandaarden en de meetwerktuigen (Belgisch Staatsblad van 2 september 1970).

Samengevat komt dit neer op een verplicht gebruikt in acten uitgaande van openbare machten; in geschriften opgemaakt bij de uitoefening van een beroep, een bedrijf of een handel; bij handelsverrichtingen; bij de bepaling van de vergoeding van diensten; in facturen, reclames, op te koop aangeboden goederen, enz.... Tevens moeten wettelijke eenheden gebruikt worden bij deze meetinstrumenten die aan de ijkplicht onderworpen zijn.

Deze categorie betreft momenteel vooral de instrumenten die in het economisch circuit voor meting worden aangewend (o.a. balansen).

Dubbele aanduiding op goederen of uitrustingen, d.w.z. wettelijke met niet wettelijke eenheden samen, worden toegelaten. Het ontwerp tot wijziging van Richtlijn 76/770/EEG voorziet in het verbieden van de dubbele aanduiding na 31 december 1985.

A. WAMBERSIE :

A propos des notions de " Grandeurs et Unités ", une certaine confusion naît quelquefois du fait que l'on ne distingue pas nettement les notions de grandeur et d'unité.

Restons dans le domaine de la radiologie et de la radioprotection qui nous intéresse aujourd'hui. Notre problème n'est pas pour le moment de remettre en question les grandeurs : la dose absorbée, l'exposition, l'activité, l'équivalent de dose. Ces grandeurs ont été définies dans le rapport 19 de l'ICRU ("Radiation Quantities and Units").

La discussion d'aujourd'hui porte uniquement sur le choix des unités.

Il y a quelques années, quand en radiothérapie "on est passé du R au rad", c'étaient les grandeurs qui étaient en cause. Cependant, le passage s'est fait "relativement aisément" parce que, compte tenu du choix des unités, le nombre exprimant l'exposition était (dans les conditions habituelles) voisin du nombre exprimant la dose absorbée.

Le problème du passage du rad au gray semble soulever plus de discussion parce qu'il implique l'introduction d'un facteur 100 (ou 0,01) dans les nombres exprimant la dose absorbée. Notons que le facteur de conversion est encore plus complexe dans le cas du passage du curie au becquerel ($3,7 \cdot 10^{10}$).

Dans l'unité de Radiothérapie des Cliniques St. Luc à l'UCL, nous avons pris l'option de passer aux unités SI au 1er janvier 1979.

Toutefois, durant une période transitoire, dans les comptes rendus de radiothérapie, nous exprimons la dose absorbée en centigrays (cGy) de manière précisément à ne pas modifier les valeurs numériques.

En ce qui concerne l'exposition, l'ICRU n'a pas recommandé de donner un nom spécial à l'unité d'exposition SI.

Dans le système SI, l'exposition doit être exprimée en coulomb par kilogramme (C/kg). On a :

$$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Le fait qu'un nom spécial n'ait pas été recommandé pour l'unité d'exposition SI traduit la tendance actuelle de ne plus utiliser l'exposition dans les comptes rendus de radiothérapie et de limiter son utilisation aux laboratoires de métrologie.

Avant d'imposer le passage au système SI et de proposer des nouvelles unités, a-t-on suffisamment consulté les milieux scientifiques et professionnels concernés.

En ce qui concerne le domaine particulier de la radiologie et de la radioprotection (c'est-à-dire le gray, le becquerel, le Sievert), il faut rappeler que les décisions de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) ont été prises sur proposition expressede l'ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). De son côté, avant de faire des propositions concrètes, l'ICRU a longuement discuté la question et a largement consulté le monde de la radiologie et de la radioprotection (Organisations Nationales et Internationales, Grands Centres, etc...). En particulier, plusieurs enquêtes importantes ont été réalisées.

Dans un souci de prudence, l'ICRU a recommandé l'abandon progressif des unités rad, R, Ci, rem. Cet abandon progressif devrait se faire sur une période de 10 ans. En fait, ces unités devraient être définitivement abandonnées en 1985.

A. LAFONTAINE :

Comment appliquer les unités SI dans les professions médicales et la radioprotection ?

Conclusions d'une table ronde.

La publication récente du Système International d'unités (SI) mis au point par la Conférence Générale des Poids et Mesures, l'adhésion donnée en mai 1977 par la Trentième Assemblée Mondiale de la Santé à leur emploi en médecine, les mesures réglementaires édictées par le Ministère des Affaires Economiques nous obligent à considérer le passage au nouveau système dans les meilleures conditions tant sur le plan sanitaire et médical que sur le

plan métrologique et scientifique. Il est souhaitable que nous contribuions à la création d'un langage métrologique véritablement international et à l'aplanissement des gênes qui nuisent encore parfois à l'échange mondial d'informations dans le domaine de santé.

Il est tout aussi souhaitable que le passage d'un système à l'autre se fasse sans heurts et surtout sans erreurs pouvant avoir des conséquences très pénibles voire mortelles. Il est enfin nécessaire que les facteurs de conversion des unités anciennes aux unités SI soient accessibles à tous les membres du corps médical et des professions apparentées comme le sont les spécialistes en radioprotection, à tous les niveaux (practiciens, biologistes, techniciens, infirmières etc.).

Peut-être, il est bon de rappeler pour ceux qui nous liront que le SI est essentiellement une version développée du système métrique en usage depuis 1901 et qu'il comporte trois types d'unités : les unités de base, les unités dérivées et les unités supplémentaires.

Les unités de base sont au nombre de 7 : le mètre (m) pour la longueur, le kilogramme (kg) pour la masse, la seconde (s) pour le temps, l'ampère (A) pour l'intensité de courant électrique, le kelvin (K) pour la température thermodynamique, la candela (cd) pour l'intensité lumineuse, la mole (mol) pour la quantité de matière.

Les unités dérivées sont obtenues en multipliant une unité de base par elle-même (le mètre carré, par exemple, pour la superficie) ou en associant deux unités de base (comme le mètre par seconde pour la vitesse) ou davantage (comme la mole par mètre cube pour la concentration de quantité de matière) par une simple multiplication ou une simple division.

Nous y retrouvons des unités qui nous intéressent particulièrement :

le newton (N) pour la force ($m \cdot kg \cdot s^{-2}$), le pascal (Pa) pour la pression (N/m^2), le joule (J) pour le travail ou l'énergie (Nm), le coulomb (C) pour la quantité d'électricité (As). En ce qui concerne la radioprotection nous citons le gray (Gy ou J/kg) pour la dose absorbée, le kerma, l'indice de dose absorbée, le becquerel (Bq) ou s^{-1} pour l'activité des rayonnements ionisants.

En outre, certaines unités hors SI sont si largement utilisées qu'elles font en quelque sorte partie de la vie quotidienne, qu'il a été décidé de maintenir huit de ces unités, qui seront utilisées avec le SI. Ce sont la minute (60 s), l'heure (3600 s) et le jour (86.400 s) pour le temps;

le litre (1 dm^3 ou 10^{-3} m^3) pour le volume; la tonne (1000 kg) pour la masse; le degré ($\pi/180$ radian), la minute ($\pi/10,800$ radian), la seconde ($\pi/648,000$ radian) pour l'angle plan.

Enfin, sept autres unités sont admises temporairement et elles intéressent particulièrement les professions de santé. Ce sont l'ångström (Å) qui équivaut à 10^{-10} m ; le barn (b) qui équivaut à 10^{-28} m^2 ; le bar (bar) qui équivaut à 100.000 Pa; l'atmosphère normale (atm) qui équivaut à 101.325 Pa; la curie (Ci) qui équivaut à $3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$; le röntgen (R) qui équivaut à $2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$, et le rad (rd) qui équivaut à 10^{-2} Gy .

Cette introduction, un peu longue, reprenant en les résumant les exposés de cette réunion, nous est apparue utile et bien que le nombre de nouvelles unités qui apparaissent à la suite du passage au système international soit faible dans la pratique médicale et dans la pratique de la radioprotection, leur application pratique soulève un certain nombre de problèmes importants sur divers plans.

En ce qui concerne les unités utilisées en radioprotection nous pouvons espérer qu'elles entreront relativement facilement dans les usages quotidiens mais nous souhaitons vivement dans ce cas que la décision des services de métrologie soit l'objet d'une application progressive portant sur une dizaine d'années avec utilisation pendant ce temps des deux systèmes (l'ICRU avait en 1975 espéré que la modification aurait été opérée pour 1985).

En principe, le joule par kilogramme remplacera le rad et le rem tandis que le coulomb par kilogramme remplacera le röntgen.

Toutefois pour suivre en cela le souhait exprimé en 1975 par la Commission Internationale des unités et des mesures des rayonnements (ICRU), le Gray (Gy) a été adopté comme nom spécial du joule par kilogramme pour la mesure de la dose absorbée : ce même gray peut également être utilisé pour d'autres grandeurs physiques dans le domaine des rayonnements qui s'expriment en joule par kilogramme si bien que l'indice de dose absorbée, le kerma, l'énergie communiquée massique ne s'exprimeront plus en rad mais bien en gray.

De même la mesure de l'activité s'exprime en Becquerel (Bq), nom spécial de l'inverse de la seconde.

Le rem (rad equivalent to man) était antérieurement l'unité utilisée pour l'équivalent de dose.

A l'heure actuelle nous proposons de ne pas l'abandonner trop vite et d'exprimer les équivalents de doses en joule par kilogramme.

Nous pensons peut être prématuré de recourir au Sievert qui a été proposé comme unité mais n'a pas été approuvé jusqu'à présent par la Conférence Générale des Poids et Mesures.

Il est peut être utile pour fixer les idées de donner le tableau des correspondances et de le commenter par quelques exemples :

ANCIENNE UNITE	UNITE SI	FACTEUR DE CONVERSION Anc. Unité → Nouv. Unité
1 rad	10^{-2} gray	0,01
1 rem	10^{-2} J/kg ou 10 mJ/kg (ou 10 millisievert)	0,01
1 curie	$3,7 \times 10^{10}$ Bq	$3,7 \times 10^{10}$
1 röntgen	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	$2,58 \times 10^{-4}$

En ce qui concerne les applications en médecine et en chimie biologique, le problème est plus complexe lorsqu'il s'agit d'utiliser le pascal pour mesurer la tension sanguine, d'utiliser la mole pour exprimer la quantité de matière ou le joule en matière de nutrition.

Le passage au pascal pour la mesure des pressions sera nécessairement progressif. L'Assemblée Mondiale de la Santé a d'ailleurs demandé que les instruments de mesure de la pression tels que les sphygmomanomètres soient gradués à la fois en kilopascals et en millimètre de mercure "en attendant que l'emploi du pascal se soit généralisé dans d'autres domaines" :

1 mm Hg = 133,3 Pascal ou 0,133 3 kilopascal;
 1 cm H₂O = 98,07 Pascal ou 0,09807 kilopascal;
 1 kilopascal = 7,5 mm Hg.

En d'autres termes, une tension de 12 cm de mesure correspond à 16 kilopascal.

Pour la nutrition, l'unité utilisée était en fait habituellement la kilocalorie thermochimique souvent appelée erronément calorie ou parfois plus

correctement grande calorie.

L'introduction du joule pourra corriger cette difficulté mais encore une fois il faut y aller progressivement puisque les tables diététiques donnant les valeurs en joules sont encore loin d'être répandues.

Il nous paraît là aussi préférable de donner simultanément les valeurs en calories thermochimiques et en mégajoules (ou en kilojoules).

1 kcal thermochimique = 4,184 kJ = 0,004184 MJ

Par exemple, $1.360 \text{ kcal}_{th} = 5,69 \text{ MJ}$ ou 5.690 kJ.

Le problème devient encore plus ardu lorsqu'on en arrive à la mole. Tout en reconnaissant que cette unité de quantité de matière doit être préférentiellement utilisée pour toutes les substances dont on connaît la masse moléculaire relative, appelée antérieurement poids moléculaire, et qu'elle doit remplacer chaque fois que possible les unités de masse telles le gramme et le milligramme, il importe de signaler les conséquences éventuellement catastrophiques de certaines confusions que le personnel médical et paramédical pourra commettre.

Nous sommes convaincus que là aussi il faut y aller progressivement en utilisant simultanément les anciennes unités et les nouvelles .

Nous pensons qu'il est peut-être bon dans le domaine des rapports de biologie clinique de préciser que le problème des unités, des symboles et dans certains cas des grandeurs à utiliser n'est qu'un élément du problème. Pour exprimer clairement et sans ambiguïté un résultat, il nous paraît aussi important de standardiser la manière de présenter les résultats que d'utiliser la mole, la concentration de matière, la concentration massique. Les rapports devraient toujours donner les renseignements suivants :

- a) le système (par exemple le malade, le sang total, le plasma, le sérum, l'urine);
- b) le constituant dosé (le glucose, l'urée, la créatine, les triglycérides);
- c) la grandeur mesurée (par exemple la concentration de quantité de matière);
- d) la valeur numérique;
- e) l'unité.

Par exemple : plasma du patient à jeun,

glucose, concentration de matière = 6,0 mmol/l ou 108 mg/dl.

Il est apparu comme conclusion que dans ces cas, le système SI apportera lorsqu'il sera bien connu et bien employé des avantages nets quant à la précision et quant à l'absence d'ambiguïté.

Il importe toutefois d'y aller aussi progressivement et de tenir compte des habitudes et des faits : pas plus que le Britannique n'abandonne du jour au lendemain l'usage du mile ou du yard, pas plus le praticien ou l'infirmière ne comprendra de suite que 10 mg/dl de calcium correspond à 2,50 mmol/l et 10 mmol/l de cholestérol correspond à 387 mg/dl.

Il faut donc introduire progressivement le système SI et tenir compte des habitudes. Cette utilisation peut être immédiate au niveau des jeunes et un effort doit être fait dès l'école primaire pour qu'il soit utilisé et devienne une habitude. Il faut l'enseigner dès maintenant au niveau des études secondaires et universitaires avec toutefois, dans ce cas, l'introduction des tables d'équivalence. Enfin progressivement il faut y habituer les praticiens au niveau de la "base", c'est-à-dire dans les activités médicales et en radioprotection. Dans ce dernier cas, le document publié par l'Organisation Mondiale de la Santé peut être très précieux (le SI pour les professions de la Santé - Organisation Mondiale de la Santé - Genève 1977).

Les étapes préconisées sont nécessaires pour que le SI soit réellement une amélioration et non une source supplémentaire de confusion quel que soit l'enthousiasme de ceux qui veulent l'introduire aussi rapidement que possible mais qui, même au niveau de leur propre laboratoire, utilisent encore le rem, le rad ou les mg/l. Du côté des autorités, un appel doit être lancé pour que d'une part les services de métrologie prolongent le délai avant l'application obligatoire des nouvelles unités sinon on risque de se trouver devant des confusions éventuelles ou des contestations juridiques, et qu'ils fassent un considérable effort d'information de tous les utilisateurs intéressés : il ne suffit pas de réglementer, il faut aussi informer et éduquer.

Pour l'information des enfants et des adolescents, des contacts devront avoir lieu avec l'Education Nationale pour que le SI soit introduit dès l'école primaire et que l'on abandonne par étapes le cm de Hg et le mg/dl.

On arrive plus facilement à éduquer la génération montante tout en ayant le moins possible d'incidents à déplorer.

Enfin, du côté des autres autorités et en particulier en ce qui nous intéresse, le département de la Santé Publique et de l'Environnement et celui de l'Emploi et du Travail devraient introduire le SI dans les réglementations et prescriptions. Nous pensons toutefois que cela ne peut aboutir qu'après un certain délai en évitant qu'un perfectionnisme hâtif n'entraîne des difficultés voire des accidents.

La pharmacopée exprimera-t-elle dès demain en mole par litre les concentrations de matière des solutions médicamenteuses pour perfusion ?

N'est-il pas sage que la modification se fasse par étapes en pleine coordination et avec bon sens ?

SI-EENHEDEN EN AFGELEIDE EENHEDEN IN DE RADIOLOGIE EN RADIOPROTECTIE

SAMENVATTING

De indeling van grootheden in onafhankelijke en afhankelijke grootheden, de keuze van basisgrootheden, de relatie tussen eenduidig gedefinieerde groothedenvergelijking, getalwaardevergelijking en eenhedenvergelijking zijn de basis in de structuur van het Internationaal Stelsel van Eenheden (Système International d'Unités).

Grondeenheden, bijkomende eenheden en afgeleide eenheden vormen er een coherent, interdisciplinair hanteerbaar geheel dat de willekeurig gekozen incoherente eenheden vervangt. Aansluitend besteedt het artikel aandacht aan afgeleide SI-eenheden in gebruik bij radiologie en radioprotectie.

RESUME

La répartition des grandeurs en grandeurs indépendantes et grandeurs dépendantes, le choix des grandeurs de base, la relation entre les équations aux grandeurs, les équations aux valeurs numériques et les équations aux unités, définies de manière univoque, sont la base de la structure du Système international d'unités.

Les unités fondamentales, les unités supplémentaires et les unités dérivées forment un ensemble cohérent, utilisable par toutes les disciplines et qui remplace les unités non-cohérentes, choisis arbitrairement.

La dernière partie de cet article est consacrée aux unités SI dérivées, employées en radiologie et en radioprotection.

ABSTRACT

The distribution of quantities into independant and dependant quantities, the choice of the basic quantities, the relation between univocally defined quantities equations, numerical values equations and units equations are the basis of the International System of Units.

Basic units, supplementary units and derived units constitute a coherent whole, to be used in the various fields, that replaces the non-coherent arbitrarily chosen units, previously used. The article ends with the derived SI-units used in radiology and radiation protection.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Einteilung von Grössen in unabhängige und abhängige Grössen, die Wahl der Grundgrössen, die Beziehung zwischen eindeutig definierten Grössenvergleich, Zahlenwertvergleich und Einheitenvergleich formen die Basis der Struktur des internationalen Einheiten Systems.

Grundeinheiten, ergänzende Einheiten und abgeleitete Einheiten bilden eine kohärente, interdisziplinär anwendbare Ganzheit, die die Willkürlich gewählten inkohärenten Einheiten ersetzen.

Anschliessend weist der Artikel auf abgeleitete SI-Einheiten hin, die in der Radiologie und im Strahlenschutz benutzt werden.

Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming vol. 4 nr 1
 BEREKENINGSMETHODE VOOR DE DISTRIBUTIE VAN RADIOISOTOPEN IN HET LICHAAM
 NA EEN EENMALIGE OPNAME

F.P. RAES, A.J. POFFIJN en R.R. BOURGOIGNIE
 Laboratorium voor Natuurkunde, groep II, Ledeganckstraat 35
 RIJKSUNIVERSITEIT GENT.

SAMENVATTING

Een werkwijze is voorgesteld om de activiteit van een radioactief isotoop in verschillende organen van het lichaam te bepalen na een eenmalige opname van dit isotoop in het lichaam. De methode wordt uitgebreid tot het geval dat het isotoop deel uitmaakt van een radioactieve keten.

INLEIDING

Om de stralingsbeschadiging van een orgaan als gevolg van de inname van een radioisotoop te bepalen, moet het biologisch gedrag van dit isotoop in het beschouwde orgaan gekend zijn. Daartoe moet een functie $A_j(t)$ gekend zijn die op elk ogenblik t de activiteit van het isotoop in het orgaan j bepaalt. Over het algemeen kan deze functie $A_j(t)$ niet rechtstreeks gemeten worden, doch kan men wel een functie $A(t)$ meten die de activiteit van het isotoop in het ganse lichaam weergeeft. Om dan van een enkel orgaan toch een dosis te bepalen wordt de functie $A(t)$ vermenigvuldigd met een constante, f_2 , die de verhouding is van de hoeveelheid van het isotoop in het beschouwde orgaan tot de totale hoeveelheid in het ganse lichaam. Deze constanten, f_2 , zijn bepaald voor vele organen en voor vele isotopen.⁽¹⁾ Er dient opgemerkt⁽²⁾ dat deze werkwijze alleen bruikbaar is om een schatting te maken van de activiteit van een radioisotoop in een orgaan na een langdurige inname van het isotoop. Dit is dus nadat er zich een evenwicht heeft ingesteld tussen de hoeveelheden in het ganse lichaam en in het beschouwde orgaan. De werkwijze is niet toepasbaar in het geval van een eenmalige opname omdat de verdeling van het isotoop over de onderscheiden organen dan snel verandert in de tijd. Anders gezegd is f_2 tijdsafhankelijk, meestal beginnend bij de waarde nul, toenemend tot een maximum om daarna af te nemen met een snelheid bepaald door de retentiefunctie $R_j(t)$ van het orgaan voor het beschouwde isotoop.

In het geval van een eenmalige opname is :

$$A(t) = \lambda \cdot q(0) \cdot R(t) \cdot e^{-\lambda \cdot t} , \quad (1)$$

waarbij λ de radioactieve vervalconstante is van het isotoop, $q(0)$ de op $t = 0$ ingenomen hoeveelheid en $R(t)$ de retentiefunctie van het ganse lichaam voor dit isotoop. Soms is het mogelijk uit de retentiefunctie voor het ganse lichaam, $R(t)$, een term benaderend te identificeren met de retentiefunctie, $R_j(t)$, voor een enkel orgaan j . De functie $A_j(t)$ kan dan eveneens benaderend gelijkgesteld worden aan :

$$A_j(t) = \lambda \cdot q(0) \cdot R_j(t) \cdot e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Wanneer de vermelde identificatie niet mogelijk is, wordt de retentiefunctie voor het gehele lichaam doorgaans geïdentificeerd met deze voor het orgaan. Dit leidt tot een overschatting van de dosis en tot een conservatieve MTC-waarde.

In wat volgt wordt een methode geschetst om uitgaande van de retentiefunctie $R(t)$ een uitdrukking voor te stellen voor het verloop van de activiteit van het isotoop in de verschillende organen van het lichaam, dit na een eenmalige opname van het isotoop in een van deze organen. De methode wordt vervolgens uitgebreid tot het geval dat het radioisotoop aanleiding geeft tot de opbouw van een radioactieve keten waarvan de dochterisotopen eveneens de verschillende organen kunnen belasten.

GEVAL VAN EEN EENMALIGE OPNAME VAN EEN RADIODISOTOOP

Onderstellen we dat op het tijdstip $t = 0$ een hoeveelheid, $q(0)$, van een bepaald radioisotoop, N , ergens in het lichaam wordt opgenomen. Naast het feit dat het isotoop radioactief vervalst met een vervalconstante λ zal het zich volgens een bepaald kinetiek verdelen over verscheidene organen, j , van het lichaam. Op het tijdstip t kan de hoeveelheid, $q_j(t)$, van het isotoop in een orgaan, j , van het lichaam geschreven worden als⁽³⁾ :

$$q_j(t) = \int_0^t I_j(\tau) \cdot R_j(t-\tau) \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\tau)} \cdot d\tau, \quad (3)$$

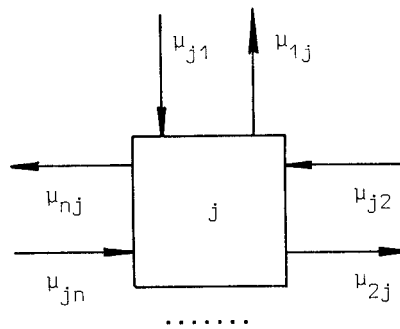
waarbij $I_j(t)$ een functie is die aangeeft hoeveel isotopen per tijdseenheid in het orgaan j toekomen en $R_j(t)$ de fractionele retentiefunctie is van het orgaan j voor het beschouwde isotoop. De activiteit $A_j(t)$ voor het isotoop in het orgaan j wordt dan gegeven door :

$$A_j(t) = \lambda \cdot q_j(t) . \quad (4)$$

In het beschouwde geval van opname van één enkel isotoop, N, kan de hoeveelheid ervan in een orgaan slechts toenemen door biologische toevoer uit andere organen, hetgeen we noteren door :

$$I_j(t) = I_{\text{bio},j}(t) \quad . \quad (5)$$

De functies $I_{\text{bio},j}(t)$ en $R_j(t)$ zijn de onbekenden in het probleem. In de meeste praktische gevallen zijn deze onbekenden moeilijk of zelfs niet te bepalen. Om toch een gedaante ervoor te kunnen voorstellen kan als volgt worden te werk gegaan. Vooreerst wordt, de fysiologie van de betrokken organen en de fysische en chemische eigenschappen van het beschouwde isotoop in acht nemend, een compartimentenmodel opgesteld dat het transport van het isotoop in het lichaam beschrijft. Hierbij wordt elk orgaan of deel van het lichaam dat door het isotoop kan bereikt worden als een compartiment voorgesteld waarbij men aanneemt dat het transport van het isotoop van een compartiment, i, naar een ander compartiment, j, een zuiver exponentieel dalend verloop volgt met vervalconstante of transportcoëfficiënt μ_{ji} . De toevoer van het isotoop naar een compartiment j en de afvoer ervan uit het compartiment j is schematisch voorgesteld in onderstaande figuur.



De verdeling van de hoeveelheden van het isotoop over de n compartimenten van een model wordt beschreven door een stelsel van n lineaire differentiaalvergelijkingen van de gedaante :

$$\frac{d Q_j(t)}{dt} = \sum \mu_{ji} \cdot Q_i(t) - Q_j(t) \cdot \sum \mu_{ij} \quad , \quad (6)$$

waarbij men sommeert over i , ($i = 1, 2, \dots, n$) met $i \neq j$.

Hierbij is $Q_j(t)$ de hoeveelheid van het isotoop in het compartiment j op het tijdstip t , indien het biologisch transport maar niet het radioactief verval van het isotoop in rekening wordt gebracht.

De uitdrukkingen $Q_j(t)$ zijn steeds van de gedaante

$$Q_j(t) = q(0) \cdot \sum_{i=1}^n C_{ji} \cdot e^{-\mu_i \cdot t}, \quad (7)$$

waarbij zowel de voorcoëfficiënten C_{ji} als de tijdsconstanten μ_i functies zijn van de biologische transportcoëfficiënten.

Met behulp van de functies $Q_j(t)$ kan de uitdrukking voor de retentiefunctie voor het gehele lichaam, $R(t)$, voor het isotoop afgeleid worden :

$$R(t) = \frac{1}{q(0)} \cdot \sum_{j=1}^n Q_j(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n C_{ji} \cdot e^{-\mu_i \cdot t}. \quad (8)$$

In de meeste gevallen is de functie $R(t)$ of een hiervan afgeleide functie wel te bepalen zodat door aanpassing van (8) aan de resultaten van een experiment optimale waarden voor de parameters μ_{ji} kunnen bekomen worden waaruit waarden volgen voor μ_i en C_{ji} .

Belangrijk is dat de functie $Q_j(t)$ kan geschreven worden als de convolutie van de functies $I_{\text{bio},j}(t)$ en $R_j(t)$:

$$Q_j(t) = \int_0^t I_{\text{bio},j}(\tau) \cdot R_j(t-\tau) \cdot d\tau. \quad (9)$$

De gevolgde gedachtengang is dezelfde als in (3) met dit onderscheid dat er geen rekening wordt gehouden met het radioactief verval van het isotoop.

De functie $I_{\text{bio},j}(t)$ is bij bepaling de afgeleide naar de tijd van de functie die de hoeveelheid van het isotoop in het compartiment j beschrijft voor het geval dat er geen ontsnappingsmogelijkheid zou zijn uit het compartiment. Deze laatste functie kan derhalve gevonden worden door in het stelsel (6) de transportcoëfficiënten μ_{ij} ($i = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n$) nul te stellen en vervolgens het stelsel te integreren. Eenmaal de functie $I_{\text{bio},j}(t)$ gekend, kan $R_j(t)$ bepaald worden uit (9). Daartoe gebruikt men de convolutie-eigenschap uit de theorie van de Laplace-transformatie :

$$\mathcal{L} [Q_j(t)] = \mathcal{L} [I_{\text{bio},j}(t)] \cdot \mathcal{L} [R_j(t)], \quad (10)$$

zodat

$$R_j(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ \mathcal{L} [Q_j(t)] / \mathcal{L} [I_{\text{bio},j}(t)] \}, \quad (11)$$

Door substitutie van $I_{\text{bio},j}(t)$ en $R_j(t)$ in (3), volgt $q_j(t)$.

Voor het bijzonder geval dat het compartiment j dit is waar het isotoop oorspronkelijk geïntroduceerd wordt (we stellen dan $j=1$), is :

$$q_j(0) = Q_1(0) = q(0) \quad \text{en} \quad I_{\text{bio},1}(t) = q(0) \cdot \delta(t), \quad (12)$$

waarbij $\delta(t)$ de Dirac-delta functie is.

Verder volgt dan uit (9) :

$$R_1(t) = \frac{1}{q(0)} \cdot Q_1(t), \quad (13)$$

en uit (3) :

$$q_1(t) = q(0) \cdot R_1(t) \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad (14)$$

Voor de andere compartimenten van het model zijn de functies $I_{\text{bio},j}(t)$ steeds te schrijven als reeksen van exponentieel dalende functies en is de integratie in (3) eenvoudig door te voeren.

GEVAL VAN EEN EENMALIGE OPNAME VAN EEN RADIOACTIEVE KETEN

Beschouwen we een radioactieve keten met opeenvolgende elementen $N^{(1)}$, $N^{(2)}$, ... $N^{(k)}$ met respectievelijke vervalconstanten $\lambda^{(1)}$, $\lambda^{(2)}$, ... $\lambda^{(k)}$ en onderstellen we dat op het tijdstip $t = 0$ respectievelijke hoeveelheden $q^{(1)}(0)$, $q^{(2)}(0)$, ... $q^{(k)}(0)$ van deze isotopen in een zelfde plaats van het lichaam worden opgenomen.

De hoeveelheid van een isotoop $N^{(k)}$ die op het tijdstip t in een orgaan j van het lichaam aanwezig is kan opnieuw beschreven worden door een uitdrukking zoals (3) doch waarin we de grootheden van het beschouwde isotoop specificeren door een lopende index (k) .

Aldus wordt (3) :

$$q_j^{(k)}(t) = \int_0^t I_j^{(k)}(\tau) \cdot R_j^{(k)}(t-\tau) \cdot e^{-\lambda^{(k)} \cdot (t-\tau)} \cdot d\tau \quad (15)$$

Voor elk dochterisotoop $N^{(k)}$ van de keten kan de hoeveelheid ervan in een orgaan j op twee wijzen aangroeien : door biologische toevoer uit andere organen en door radioactief verval van het isotoop $N^{(k-1)}$ in het beschouwde orgaan j . Deze processen zijn onafhankelijk van elkaar zodat kan gesteld worden :

$$I_j^{(k)}(t) = I_{\text{bio},j}^{(k)}(t) + I_{\text{rad},j}^{(k)}(t) . \quad (16)$$

Voor elk isotoop $N^{(k)}$ van de keten moeten nu vooreerst de functies $I_{\text{bio},j}^{(k)}(t)$ en $R_{\text{bio},j}^{(k)}(t)$ bepaald worden. Daartoe wordt de werkwijze aangevend zoals eerder toegelicht bij het geval van de opname van één radioisotoop.

Vervolgens bepaalt men $q_j^{(1)}(t)$ met behulp van (15). Voor het moederisotoop is $I_{\text{rad},j}^{(1)} = 0$, zodat de berekeningen analoog zijn als in het geval van één enkel isotoop.

Vervolgens berekent men $q_j^{(2)}(t)$. Hierbij is :

$$I_{\text{rad},j}^{(2)}(t) = \lambda_j^{(1)} \cdot q_j^{(1)}(t) . \quad (17)$$

De integratie in (15) kan dus doorgevoerd worden door gebruik te maken van het resultaat van de vorige berekening. Zo kan voor elk isotoop $N^{(k)}$, $q_j^{(k)}(t)$ bepaald worden, steeds van het resultaat van de vorige berekening gebruik makend daar

$$I_{\text{rad},j}^{(k)}(t) = \lambda_j^{(k-1)} \cdot q_j^{(k-1)}(t) . \quad (18)$$

In het geval het orgaan j , het orgaan is waar de elementen van een radioactieve keten oorspronkelijk werden ingebracht is zoals voorheen (opnieuw $j = 1$) :

$$I_{\text{bio},1}^{(k)}(t) = q_1^{(k)}(0) \cdot \delta(t) , \quad (19)$$

$$\text{en} \quad R_1^{(k)}(t) = \frac{1}{q_1^{(k)}(0)} \cdot Q_1^{(k)}(t) . \quad (20)$$

Het resultaat van de uitwerking van (15) kan in dit geval in een algemene gedaante geschreven worden, toepasbaar op elk isotoop van de keten :

$$q_1^{(\kappa)} = \sum_{\xi=1}^{\kappa} q_{(0)}^{(\xi)} \cdot \prod_{\mu=\xi}^{\kappa-1} \lambda^{(\mu)} \cdot \sum_j c_{j(\xi)}^{(\xi)} \cdot c_{j(\xi+1)}^{(\xi+1)} \cdots c_{j(\kappa)}^{(\kappa)} \cdot \frac{\sum_{s=\xi}^{\kappa} e^{-(\lambda^{(s)} + \mu_{j(\xi)}^{(s)}) \cdot t}}{\prod_{\substack{r=\xi \\ r \neq s}}^{\kappa} (\lambda^{(r)} + \mu_{j(r)}^{(r)} - \lambda^{(s)} - \mu_{j(s)}^{(s)})} \quad (21)$$

Hierbij is $\sum_{j(\xi)} c_{j(\xi)}^{(\xi)} \cdot e^{-\mu_{j(\xi)}^{(\xi)} \cdot t} = R_j^{(\xi)}(t)$. (22)

Voor de overige organen zijn we er niet in geslaagd de uitdrukking voor $q_j^{(\kappa)}(t)$ in een algemene gedaante zoals (21) te schrijven. Wel is er een systematiek te herkennen bij het opstellen van de uitdrukkingen voor $q_j^{(\kappa)}(t)$; zoals blijkt uit de expliciete uitdrukking voor het geval $q_j^{(3)}(t)$, gepresenteerd in de appendix. Deze systematiek, samen met (21) is verwerkt in een algemeen computerprogramma ter berekening van de activiteit van een willekeurig isotoop van de keten in een willekeurig orgaan.

APPENDIX : BEREKENING VAN DE HOEVEELHEID VAN HET 3° ISOTOOP VAN EEN KETEN IN EEN ORGAAN j, VERSCHILLEND VAN DAT VAN OPNAME.

$$q_j^{(3)}(t) = q^{(1)}(0) \lambda^{(2)} \lambda^{(1)} \sum_{i(1)} \sum_{j(1)} \sum_{j(2)} \sum_{j(3)} b_{i(1)}^{(1)} a_{j(1)}^{(1)} a_{j(2)}^{(2)} a_{j(3)}^{(3)} \times$$

$$\left\{ \frac{e^{-v_{i(1)}^{(1)} t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{(\lambda^{(1)} + \mu_{j(1)}^{(1)} - v_{i(1)}^{(1)}) (\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)} - v_{i(1)}^{(1)}) (\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - v_{i(1)}^{(1)})} \right.$$

$$- \frac{1}{(\lambda^{(1)} + \mu_{j(1)}^{(1)} - v_{i(1)}^{(1)}) (\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)} - v_{i(1)}^{(1)})} \cdot \frac{e^{-(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)}) t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - \lambda^{(2)} - \mu_{j(2)}^{(2)})}$$

$$+ \frac{1}{(\lambda^{(1)} + \mu_{j(1)}^{(1)} - v_{i(1)}^{(1)})} \cdot \frac{1}{(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)} - \lambda^{(1)} - \mu_{j(1)}^{(1)})} \left(\frac{e^{-(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)}) t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - \lambda^{(2)} - \mu_{j(2)}^{(2)}} \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-(\lambda^{(1)} + \mu_{j(1)}^{(1)}) t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - \lambda^{(1)} - \mu_{j(1)}^{(1)}} \right\}$$

$$+ q^{(2)}_{(0)} \lambda^{(2)} \sum_{i(2)} \sum_{j(2)} \sum_{j(3)} b_{i(2)}^{(2)} a_{j(2)}^{(2)} a_{j(3)}^{(3)} \times$$

$$\left\{ \frac{e^{-v_{i(2)}^{(2)} t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)} - v_{i(2)}^{(2)}) (\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - v_{i(2)}^{(2)})} - \frac{1}{(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)} - v_{i(2)}^{(2)})} \cdot \frac{e^{-(\lambda^{(2)} + \mu_{j(2)}^{(2)}) t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - \lambda^{(2)} - \mu_{j(2)}^{(2)})} \right\}$$

$$+ q^{(3)}_{(0)} \sum_{i(3)} \sum_{j(3)} b_{i(3)}^{(3)} a_{j(3)}^{(3)} \frac{e^{-v_{i(3)}^{(3)} t} - e^{-(\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)}) t}}{\lambda^{(3)} + \mu_{j(3)}^{(3)} - v_{i(3)}^{(3)}}$$

Op te merken is dat de uitdrukking voor $q_j^{(3)}(t)$ met $j \neq 1$ drie groepen termen bevat. De eerste groep geeft de hoeveelheid aan van het derde isotoop die ontstaan is door het radioactief verval van de oorspronkelijk ingenomen hoeveelheid van het eerste isotoop. De tweede en derde groep termen zijn op analoge wijze te interpreteren. De structuur van de groepen zoals te herkennen is in de vorige formule laat toe de uitdrukking te schrijven voor de hoeveelheid $q_j^{(\kappa)}(t)$ van een willekeurig dochterisotoop (κ) in de keten. Deze structuur is ook te herkennen in (21).

REFERENTIES

- (1) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 2 : Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation (1959) : tabel 12.
- (2) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 10 : Report of Committee IV on Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure (1968)
- (3) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 10A : Assesement of Internal Contamination Resulting from Recurrent or Prolonged Uptakes (1969).

DANKWOORD

We bedanken Prof. Dr. O. Segaert "Diensthoofd van het Laboratorium voor Natuurkunde, groep II van de Faculteit van de Geneeskunde van de R U G" voor zijn belangstelling en aanmoediging.

SAMENVATTING

Een werkwijze is voorgesteld om de activiteit van een radioactief isotoop in verschillende organen van het lichaam te bepalen na een eenmalige opname van dit isotoop in het lichaam.

De methode wordt uitgebreid tot het geval dat het isotoop deel uitmaakt van een radioactieve keten.

RESUME

Une méthode est proposée pour déterminer l'activité d'un isotope radioactif dans les organes du corps humain après une introduction singulière. La méthode est généralisée pour le cas où l'isotope fait partie d'une chaîne radioactive.

ABSTRACT

A method is proposed to determine the activity of a radioactive isotope in the different organs of the human body after a single uptake of the isotope.

The method is extended to the case where the isotope is part of a radioactive chain.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Methode wird vorgeschlagen, um die Aktivität eines Isotops in verschiedenen Organen des Körpers zu bestimmen, und zwar nach einer einmaligen Aufnahme dieses Isotops im Körper.

Die Methode wird auf den Fall ausgedehnt, in dem das Isotop Teil einer radioaktiven Zerfallskette ausmacht.

BEPALING VAN DE $(MTC)_w$ -WAARDE VOOR ^{222}Rn IN DRINKWATER,
INGENOMEN IN EVENWICHT MET ZIJN DOCHTERPRODUKTEN

R.R. BOURGOIGNIE, P.L. LEJEUNE[‡], A.J. POFFIJN, F.P. RAES en O.J. SEGAERT

Laboratorium voor Natuurkunde, groep II, Rijksuniversiteit te Gent.

[‡]Instituut voor Hygiëne en Epidemiologie, Ministerie voor Volksgezondheid en van het Gezin, Brussel.

SAMENVATTING

Uit de meting van de excretiecurve voor ^{222}Rn in drinkwater - ingenomen in evenwicht met zijn dochterprodukten - wordt een 5-compartmenten model voorgesteld voor het transport van ^{222}Rn in het lichaam. Combinatie van dit model met fysiologische beschouwingen en mogelijke kinetiek voor de dochterisotopen, leidt tot de voorstelling van een $(MTC)_w$ -waarde van 4,64 Bq/ml (0,12 $\mu\text{Ci/l}$) met de maag als referentieorgaan.

INLEIDING

Talrijke auteurs hebben de aandacht gevestigd op het probleem van het bepalen van een $(MTC)_w$ -waarde voor ingenomen radon*. De ontoereikende kennis omtrent het biologisch gedrag van ^{222}Rn en zijn dochterisotopen $\text{RaA}(^{218}\text{Po})$, $\text{RaB}(^{214}\text{Pb})$ en $\text{RaC}(^{214}\text{Bi})$ is er wellicht de oorzaak van dat er geen algemeen aanvaarde waarde is vooropgesteld**.

Bij deze studie wordt het transport van radon in het lichaam onderzocht door de experimenteel bepaalde differentiële excretiekromme van uitgeademde radon te onderwerpen aan een compartimentenanalyse. Aan het resulterend model wordt een bevredigende fysiologische interpretatie gegeven. De met het

* Maximale Toegelaten Concentratie in water.

** De halveringstijd voor $\text{RaC}'(^{214}\text{Po})$ is zo klein dat deze α -emitter kan vereenzelvigd worden met $\text{RaC}(^{214}\text{Bi})$. De halveringstijd voor $\text{RaD}(^{210}\text{Pb})$ is voldoende groot om bij deze studie RaD als eindprodukt te beschouwen.

radon ingenomen dochterisotopen leveren een belangrijke bijdrage tot de resulterende dosis zodat ze bij de bepaling van een $(MTC)_w$ -waarde in rekening moeten gebracht worden. De vaststelling dat deze isotopen niet op dezelfde manier in het lichaam getransporteerd worden als het inerte gas radon leidt tot het vooropstellen van een afzonderlijk biologisch model. Een methode is ontwikkeld ⁽¹⁾ om, rekening houdend met hun verschillend biologisch transport, de respectievelijke activiteiten van de isotopen in de betrokken organen te berekenen. Uit de bepaling van de resulterende dosissen volgt de keus van de maag als referentieorgaan, en een $(MTC)_w$ -waarde ten bedrage van 4,64 Bq/ml (0,12 μ Ci/l) voor radon in de limiet van 3 mSv (0,3 rem) per week als criterium.

LITERATUURSTUDIE

Daar de keus van de meettechniek en van de mathematische analyse steunt op een kritische studie van de gegevens uit de literatuur is het aangewezen vooraf een bondig overzicht te geven van de gevolgde methode door enkele auteurs.

1. De bepaling van de $(MTC)_w$ -waarde in het N.B.S.-Handbook 52 ⁽²⁾ volgt uit de keus van een model waarbij de gastro-intestinale tractus "ondergedompeld" is in radonhoudend water. Deze waarde wordt aanzien als een ultraconservatieve limiet en is niet weerhouden in het N.B.S.-Handbook 69 ⁽³⁾ noch in de ICRP-Publication 2 ⁽⁴⁾.

2. J.B. Hursh et al. ⁽⁵⁾ berekenen de radonactiviteit in uitgeademde lucht uit de RaC-meting op een aan het masker vastgehechte actieve kooltrap. Verder wordt op geregelde tijdstippen de radonactiviteit in het bloed bepaald en het verloop van de RaC-activiteit in het gehele lichaam gevolgd.

De bekomen retentiekrommen voor radon in het lichaam en in het bloed worden geïnterpreteerd als sommen van drie, respectievelijk twee exponentiële functies.

3. Bij de theoretische analyse van de radonmetingen van J. Harley et al. ⁽⁶⁾ door W. Von Döbeln en B. Lindell ^(7,8) zijn de gastro-intestinale tractus, het bloed, de extracellulaire vloeistoffen, de intracellulaire vloeistoffen en de vetten opgenomen in een vijf-compartimenten model. Een langdurige retentie wordt toegeschreven aan de opname in de vetten.

4. A. Fernau en H. Smereker ⁽⁹⁾ maken gebruik van gegevens van S. Meyer ⁽¹⁰⁾ en vinden een retentiekromme voor radon die geïnterpreteerd wordt als

een som van twee exponentiële functies. De voorkomende vervalconstanten worden gekoppeld aan de eliminatie van radon uit de gastro-intestinale tractus en uit het bloed.

5. M. Suomela en H. Kahlos ⁽¹¹⁾ stellen een $(MTC)_w$ -waarde voorop aan de hand van de bepaling van RaC met een "whole body counter". De retentiekromme voor radon wordt voorgesteld als één exponentiële functie waarbij de vervalconstante een gamma van waarden doorloopt om al de experimentele resultaten te beschrijven.
6. I.Ö. Andersson en I. Nilsson ⁽¹²⁾ maken gebruik van RaC-metingen met een "whole body counter" en stellen een uitdrukking met één exponentiële functie voorop als retentiekromme voor radon.

Bij dit overzicht van de literatuur dienen nog de volgende overwegingen gemaakt :

- Op één na, deze van J.B. Hursh et al., berusten alle vermelde studies op de detectie van het dochterproduct RaC.
- De adsorptie van radon op actieve kool is afhankelijk van de temperatuur waarop de actieve kool zich bevindt ⁽¹³⁾. Hieruit volgt dat het wellicht weinig efficiënt is, zoals bij de metingen van J.B. Hursh et al., ademstoten met een gemiddeld debiet van 8 tot 10 l/min. zonder verwijdering van H₂O-dampen en CO₂, rechtstreeks op actieve kool bij kamertemperatuur op te vangen.
- In tegenstelling tot de vermelde auteurs lijkt het ons niet voor de hand liggend dat de retentie voor radon in de maag kan vereenzelvigd worden met de retentie in het totale lichaam, genomen over een tijdsperiode van één uur. Bovendien is bij de berekening van de dosis voor de maag geen rekening gehouden met de activiteit van de ingenomen RaB en RaC-isotopen.
- De waarnemingen van J. Harley et al. hebben betrekking op de retentie van ingeademde radon en niet van ingenomen radon.
- In het fysiologisch model voorgesteld door W. Von Döbeln en B. Lindell is niet in overweging genomen de gedeeltelijke rechtstreekse ontsnapingsmogelijkheid voor radon via de slokdarm naar de mondholte, zonder transport via het bloed.

MEETMETHODE

Een glazen fles met stop erop is tot aan de rand gevuld met radonhoudend bronwater. De fles blijft voldoende lang staan om seculair radioactief

evenwicht te bekomen. Voorafgaandelijk is het bronwater onderzocht en is uitgemaakt dat het geen noemenswaardige hoeveelheid radium bevat. Als referentie wordt 250 ml radonhoudend bronwater uit de glazen fles overgebracht in een maatglas en onmiddellijk daarna vergoten in een hermetisch gesloten emanatiefles ⁽¹⁴⁾ die reeds 250 ml zuiver water bevat. Dit staal is achteraf onderzocht en blijkt 117 Bq (3155 pCi) radon te bevatten. Dezelfde hoeveelheid radonhoudend bronwater wordt uit dezelfde fles in hetzelfde maatglas gegoten en in zittende houding opgenomen door de proefpersoon met ledige maag.

Met een masker dat toelaat kamerlucht in te ademenen wordt de uitgeademde lucht opgevangen in een captatiesysteem. Dit captatiesysteem bestaat in hoofdzaak uit glasleidingen met ijskoeling die voeren naar een aantal neopreenzakken, elk met een volumecapaciteit van 30 l. Per neopreenzak is de gechronometreerde captatieduur drie minuten.

In een autonoom collectieapparaat wordt de lucht, uit elke zak afzonderlijk, met constant volumedebiet (40 l/h) gepompt. Hierbij wordt het geleid door H₂O- en CO₂-weerhoudende middenstoffen en tenslotte gevoerd door radonweerhoudende actieve kool in een vat dat omringd is met een koudmakend mengsel van alcohol en vast CO₂.

De uiteindelijke bepaling van de radonconcentratie gebeurt door een variante van de gekende alpha-scintillatietechniek ontwikkeld door E. Di Ferrante ⁽¹⁵⁾ na overbrengen van de radon uit de koolstoftrap in een klokje van Lucas ⁽¹⁶⁾.

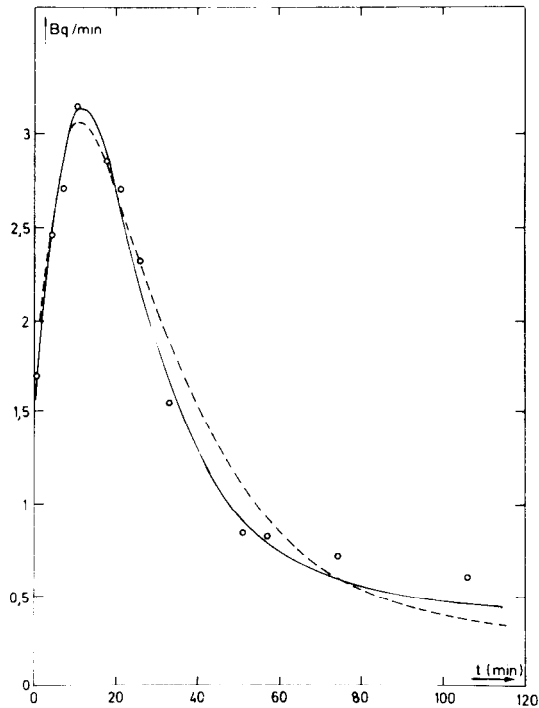
Het detectievermogen van het systeem is bepaald met een NBS-standaard oplossing. Voor een meer uitvoerige beschrijving van de apparatuur verwijzen we naar de literatuur ⁽¹⁴⁾.

Figuur 1 illustreert de "differentiële excretiefunctie"; dit is de per minuut uitgeademde radonactiviteit in functie van de tijd. Elke waarde is aangeduid in het midden van het meetinterval.

Voor verdere interpretatie moeten correcties uitgevoerd worden voor de gemeten radonactiviteit die door de proefpersoon wordt uitgeademd zonder inname van het radonhoudend water (background) alsook voor het radioactief verval tijdens het tijdsinterval tussen inname en uitademen.

De proefpersoon is een man van 53 jaar oud, weegt 80 kg, is 1,68 m groot en is een roker.

De excretiefunctie zou kunnen bekomen worden door grafische integratie van de functie in figuur 1 voorgesteld, na doorvoering van vermelde correcties.



Figuur 1 : Differentiële excretiefunctie
 cirkeltjes : experimentele waarden
 streeplijn : theoretisch verloop volgens
 het basismodel
 volle lijn : theoretisch verloop volgens
 het vijf-compartmenten model

MATHEMATISCHE ANALYSE

De analyse van de meetresultaten steunt op een compartimenten model voor het transport van radon in het lichaam.

De gevolgde methode wordt elders grondig besproken ⁽¹⁾. Het volstaat hier te vermelden dat de uitdrukkingen $Q_j^k(t)$ die bekomen worden voor het verloop van de hoeveelheden van de verschillende isotopen k in elk compartiment j , als men enkel biologisch verval in rekening brengt, steeds van de volgende gedaante zijn :

$$Q_j^K(t) = Q_1^K(0) \cdot \prod_1 C_{j1}^K \exp(-\mu_1^K t) , \quad (1)$$

waarbij zowel de voorcoëfficiënten C_{j1}^K als de tijdsconstanten μ_1^K functie zijn van de biologische transportcoëfficiënten μ_{ji}^K .

Aan de hand van (1) kan men dan de uitdrukkingen voor de retentiefuncties $R^K(t)$ voor het gehele lichaam bekomen en de hoeveelheden $q_j^K(t)$ berekenen, waarbij radioactief verval in acht wordt genomen.

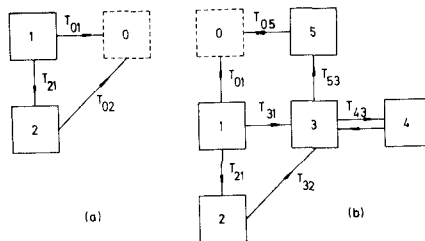
De optimale waarden van de parameters μ_{ji}^1 en dus van μ_1^1 en C_{j1}^1 zijn bekomen door, rekening houdend met het radioactief verval (λ_{Rn}) voor radon en met de gemeten background (b), de berekende differentiële excretiefunctie :

$$\frac{d A^1}{dt} = A_1^1(0) \cdot \frac{d}{dt} [1-R^1(t)] \cdot \exp(-\lambda_{Rn} \cdot t) + b , \quad (2)$$

te toetsen aan de meetpunten.

Met deze waarden worden de tijdsafhankelijke distributies van radon in de verscheidene compartimenten j van het beschouwde model berekend, waaruit na een fysiologische betekenis te hebben gehecht aan elk compartiment, de dosissen vanwege radon kunnen bepaald worden.

Een groot aantal modellen werden onderzocht. Een open lineair model van meer dan twee compartimenten is niet weerhoudbaar. Een duidelijke verbetering van de aanpassing wordt echter wel vastgesteld indien men vanuit het eerste compartiment een tweede ontsnappingsmogelijkheid toelaat. Dit leidt tot een reeks modellen waarvan wij er twee zullen bespreken. De structuren ervan zijn afgebeeld in figuur 2 (a en b) waarbij de radon oorspronkelijk in het compartiment 1 ingebracht is en waar 0 het captatiesysteem voorstelt.



Figuur 2 : (a) basismodel voor radon
(b) weerhouden model met vijf compartimenten

BASISMODEL VOOR RADON

Het model voorgesteld in a van figuur 2 leidt tot een differentiële excretiefunctie van de gedaante :

$$\frac{d A^1(t)}{dt} = A_1^1(0) \cdot B \cdot [\exp(-\mu_1 \cdot t) - \exp(-\mu_2 \cdot t)] \cdot \exp(-\lambda_{Rn} \cdot t) + b, \quad (3)$$

waarbij $A^1(t)$ de uitgeademde radonactiviteit is op het tijdstip t en $A_1^1(0)$ de oorspronkelijk ingenomen radonactiviteit.

Verder zijn : $B = 0,0536 \text{ min}^{-1}$, $\mu_1 = 0,0399 \text{ min}^{-1}$ en $\mu_2 = 0,1346 \text{ min}^{-1}$.

De functie, $d A^1(t)/dt$ is in figuur 1 voorgesteld door de streeplijn. Bij het negende meetpunt bedraagt de afwijking + 30%, bij het twaalfde meetpunt is ze - 40%.

Verder vinden we de halfwaardetijden $T_{01} = 94 \text{ min}$, $T_{21} = 21 \text{ min}$ en $T_{02} = 5 \text{ min}$.

De compartimenten 1 en 2 werden respectievelijk geïnterpreteerd als representatief voor de gastro-intestinale tractus en de extracellulaire vloeistoffen waaronder het bloed.

Hierbij geldt de interpretatie dat een gedeelte van de ingenomen radon het lichaam verlaat via de slokdarm. Uit $T_{01} = 94 \text{ min}$ volgt dat de excretie langs deze weg veel trager is dan langs het traject 1-2-0.

De afwijkingen rechts van de piek in figuur 1 duiden op tekortkomingen van dit eenvoudig model ondermeer op het ontbreken van een retentieelement.

MODEL VOOR RADON MET VIJF COMPARTIMENTEN

Dit model, afgebeeld in b van figuur 2 is uiteindelijk weerhouden ter bepaling van de bijdrage tot de dosis vanwege radon omdat het leidt tot de beste benadering van de meetresultaten en het best beantwoordt aan de fysiologie van het lichaam.

In het computerprogramma treden voor dit model acht transportcoëfficiënten μ_{ji}^1 op als parameters. Het programma laat tevens toe de ingenomen radonactiviteit $A_1^1(0)$ als parameter te behandelen.

Als beste aanpassing vinden we voor $A_1^1(0)$ de waarde 122 Bq (3288 pCi) zodat $\pm 4\%$ meer radon wordt uitgeademd dan aanwezig is in de emanatiefles, hoeveelheid die als referentie moest dienen : 117 Bq (3155 pCi).

Deze afwijking kan verantwoord worden door de fouten gemaakt bij het tweemaal overgieten.

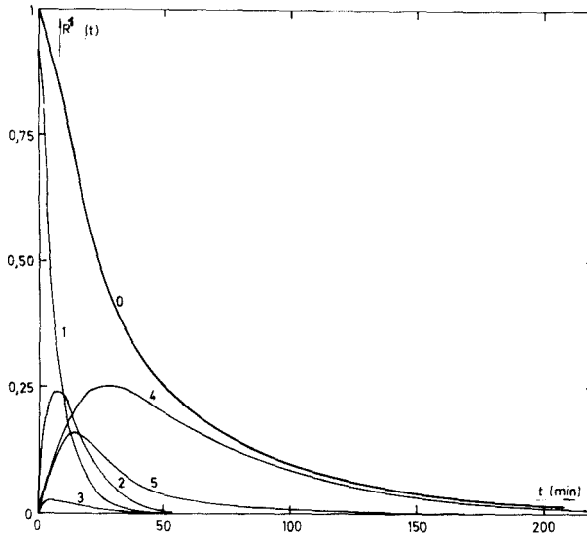
De optimale waarde voor de halfwaardetijden zijn in dit geval :

$T_{21}=7,8$ min, $T_{31}=20,6$ min, $T_{32}=5,2$ min, $T_{43}=1$ min, $T_{34}=25$ min, $T_{53}=0,7$ min,
 $T_{05}=5$ min en $T_{01}=60$ min.

Duidelijk te herkennen is het snelle traject 1-2-3-5-0 met een retentie ter hoogte van 4.

De berekende waarden voor C_{j1}^1 en μ_1^1 zijn gegeven in tabel I.

Het verloop van de functies $Q_j^1(t)/Q_1^1(0)$ en $R^1(t)$ is afgebeeld in fig. 3.



Figuur 3 : Functies $Q_j^1(t)/Q_1^1(0)$ voor $j = 1, 2, 3, 4$ en 5 ,
 en de functie $R^1(t)$, de "whole body" retentie
 voor radon.

De afgeleide optimale differentiële excretiekromme is in figuur 1 voorgesteld door de volle lijn.

De afwijkingen bij het negende, respectievelijk twaalfde punt bedragen nog 6%, resp. -26%.

De compartimenten zullen geassocieerd worden aan: 1 de maag, 2 de darmen, 3 extracellulaire vloeistoffen, 4 de lever en lichaamsvetten en 5 de longen.

Tabel I : Waarden voor μ_1^1 en C_{ji}^1 in het vijf-compartmenten model van radon

	1	2	3	4	5
μ_1^1 (min ⁻¹)	0,1337	0,1321	0,1386	1,8020	0,0165
C_{11}^1	1	0	0	0	0
C_{21}^1	-56,0578	56,0578	0	0	0
C_{31}^1	-3,9361	3,9447	0	-0,0163	0,0075
C_{41}^1	26,1795	-26,6534	0	0,0059	0,4680
C_{51}^1	-877,3780	662,2492	215,0551	0,0096	0,0641
$\sum_{j=1}^5 C_{ji}^1$	-910,1924	695,5985	215,0551	-0,0008	0,5396

FYSIOLOGISCHE INTERPRETATIE VAN HET VOORGESTELDE MODEL VOOR RADON

Bij het weerhouden van een bepaald mathematisch model dat het best de differentiële excretiekromme weergeeft dient in acht genomen de kinetiek waarmee de maag zich in de dunne darm ledigt, het transport van het inerte gas door het bloed met de mogelijkheid van retentie in de weefsels van diverse organen en tenslotte de eliminatie van dit gas door de longen.

Het proces van het ledigen van de gastro-intestinale tractus na opname van zuiver water of van diverse oplossingen is onderzocht door D. Linsmaux et al. (17).

Als waarde voor de halfwaardetijd $T_{1/2}$, vindt deze auteur 18,2 min voor water. Er dient nochtans opgemerkt dat de gegevens weinig reproduceerbaar zijn zelfs voor één en dezelfde proefpersoon. Daarenboven kan de meetmethode geen onderscheid maken tussen het normaal ledigen van de maag in het duodenum en de absorptie ter hoogte van het duodenum, verschijnselen die essentieel verschillend zijn.

Het weerhouden mathematisch model geeft voor de halfwaardetijd voor de overgang van de maag naar het darmstelsel, $T_{21}=7,8$ min en voor deze van de overgang van dunne darm naar de extracellulaire vloeistoffen, $T_{32}=5,3$ min.

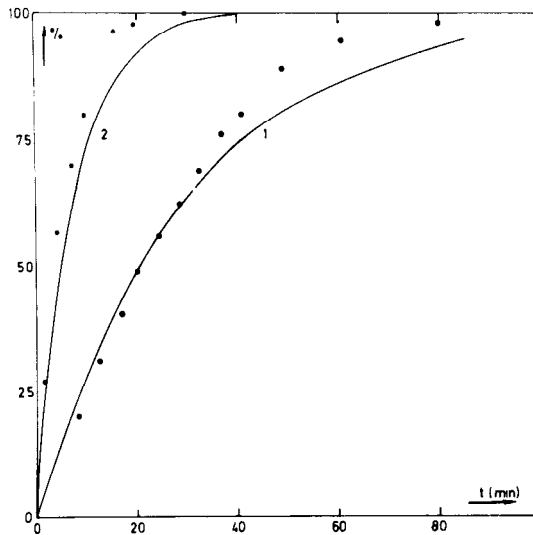
Uit $T_{21}=7,8$ min en $T_{31}=20,6$ min volgt dat de halveringstijd voor de

maag $T=5,66$ min bedraagt zodat na één uur nog slechts 0,6% Rn in de maag aanwezig is, wat in overeenstemming is met de vermelding van I.S. Eve ⁽¹⁸⁾ die één uur aanvaardt als tijd nodig om de maag te ledigen.

De absorptie van water grijpt eerder plaats in de dunne darm dan in de maag. Dit wordt bevestigd door het verschil $T_{31}=20,6$ min en $T_{32}=5,3$ min.

H.W. Davenport ⁽¹⁹⁾ deelt mede dat als 50 g D_2O in het bovengedeelte van de dunne darm geplaatst wordt, 50% ervan het bloed bereikt in 2 tot 3 minuten en 95% in 3 tot 11 minuten. Ons model leidt tot een halfwaardetijd $T_{32}=5,3$ min. Verder vindt Davenport voor de overgang van maag naar bloed een halfwaardetijd van 22,5 min, daar waar ons model voor T_{31} de waarde 20,6 min geeft.

In figuur 4 is de absorptie voor radon uit de compartimenten 1 en 2 procentueel voorgesteld ter vergelijking met de absorptie van D_2O uit resp. de maag en de dunne darm (voor het hypertonisch geval) naar H.W. Davenport.



Figuur 4 : Procentuele absorptie van D_2O uit de maag (●) en uit de dunne darm (○) naar het bloed volgens H. Davenport in vergelijking met de excretie van radon uit de compartimenten 1 en 2

De overeenstemming pleit er voor aan de compartimenten 1 en 2 respectievelijk de betekenis van maag en darmstelsel toe te kennen.

De omloopstijd voor portaal bloed (rectum naar long) is 11 tot 25 sec en

veronderstelt noodzakelijkerwijze de doorgang door de lever.

Volgens J.B. West ⁽²⁰⁾ zal bij een gezonde volwassene meer dan 95% van een fysiologisch inactief gas zoals stikstof en xenon, en door assimilatie derhalve ook radon, het bloed verlaten via de pulmonaire alveolen bij de eerste doorgang van het bloed langs de longen. De alveole-capillaire diffusie is geen limiterende factor.

Volgens Kety ⁽²¹⁾ en Behnke et al. ⁽²²⁾ is de hoeveelheid inert gast die door de weefsels weerhouden wordt en achteraf progressief wordt vrijgelaten afhankelijk van de samenstelling en de natuur van de weefsels alsook van het metabolisme van het betrokken individu.

Wordt bij een gezonde man een zoutoplossing van ^{133}Xe ingespoten in een ader van de arm dan blijkt er minstens 15 min nodig te zijn vooraleer 95% van de ingespoten xenon uitgedemd is (Bell et al. ⁽²³⁾).

Indien derhalve, zoals West het voorstelt, 95% van de ingespoten xenon in de alveole lucht komt bij de eerste doorgang van het bloed door de longen, dan moet aangenomen worden dat een aanzienlijk gedeelte van diezelfde xenon terug opgelost wordt in het verse arterieel bloed, terug in de bloedkring komt en aldus de lichaamsweefsels bereikt.

Door toepassing van de "curve-stripping" techniek vindt Bell dat de hoeveelheid uitgedemde ^{133}Xe na veneuse inspuiting kan gegeven worden door een som van vijf exponentiële functies die elk een biologische halfwaardetijd zouden kenmerken. Deze zijn resp. minder dan 1 min, 1 min, 20 min, 1 tot 2 uren en 8 tot 9 uren.

De optredende afwijkingen, afhankelijk van de proefpersoon, worden toegeschreven aan de hoeveelheid vetten. Daarenboven dient onderscheid gemaakt tussen enerzijds het geheel van vetstoffen dat goed doordrongen wordt, het "native fat", en anderzijds de vetstoffen van het type "obese", die slecht doordrongen worden (Wilson N.L. ⁽²⁴⁾). Deze tweede groep vetten zal minder ^{133}Xe weerhouden maar veroorzaakt een verdeling van het bloed in een grotere massa weefselmateriaal en vermindert volgens Behnke aldus de hoeveelheid bloed die door de goed doordringbare weefsels komt. De doordringbaarheid per eenheid van adipose materiaal vermindert aanzienlijk met toenemende obesiteit. Dit heeft voor gevolg dat de halfwaardetijden in obese vetten vergroten.

Na inspuiting van ^{133}Xe treden de afwijkingen in het uitademen vooral op in de eerste drie minuten. De vertraging bij het uitademen veroorzaakt door de goed doordrongen vetten kan tot 15 min bedragen.

Het voorgestelde model leidt tot aanneembare gevolgen in vergelijking met de fysiologische gegevens over de ademhaling en in vergelijking met wat gekend is over de retentie van een inert gas door vetstoffen.

Het gedrag van compartiment 4 blijkt overeen te stemmen met wat fysiologisch verwacht wordt vanwege de lever en de vetten. Het radon fixeert zich zeer snel in dit compartiment. Deze snelheid komt overeen met $T_{43}=1$ min, hetgeen ongeveer de omloopstijd is van het bloed.

De retentie van het inerte gas radon in de vetten zou fysiologisch tot een vertraging van de orde van 15 min moeten leiden. Ons model geeft hiervoor 25 min. De overeenstemming is aanneembaar indien men de betrekkelijke zwaarlijvigheid van de proefpersoon in acht neemt.

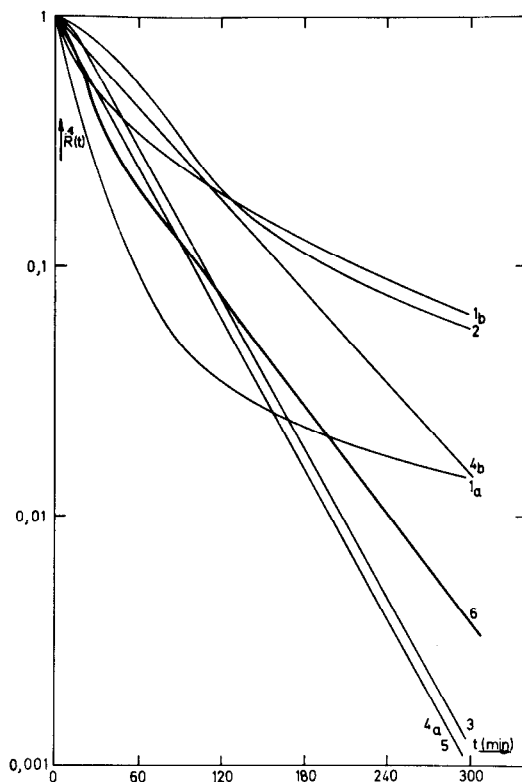
Alhoewel ons experiment met opname van radon via de maag fundamenteel verschillend is van een experiment van opname van een inert gas via de longen lijkt het ons toch mogelijk dat bij een eerste circulatie van het bloed door de longen niet al het radon afgestaan wordt aan de lucht. Deze overweging verdient verder onderzoek.

$T_{01}=60$ min beantwoordt aan een "wash-out" verschijnsel van de bovenste luchtwegen vanwege hun verbinding met de digestieve wegen.

VERGELIJKING MET DE GEGEVENS UIT DE LITERATUUR

Retentie van radon

In figuur 5 wordt de genormeerde retentiekromme $R^1(t)$ getoond voor radon zoals berekend met het vijf-compartimenten model. In het algemeen is er goede overeenstemming met de functies gegeven door andere auteurs. In tegenstelling nochtans met de meeste van deze resultaten vinden we bij $t=12$ min een buigpunt overeenkomend met het maximum in de differentiële excretiekromme (figuur 1). Op het voorkomen van dergelijk maximum was reeds gewezen door S. Meyer.

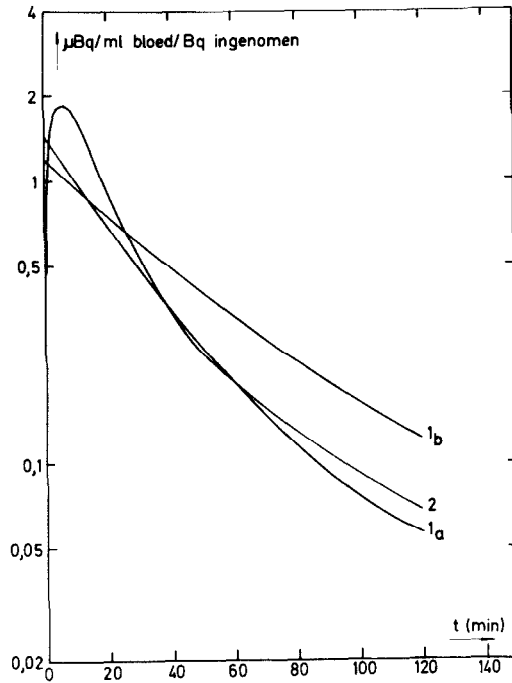


Figuur 5 : Genormeerde retentie van het lichaam voor radon :

1. J. Hursh et al. (a) "lege maag"
(b) "volle maag"
2. J. Harley volgens W. Von Döbeln en B. Lindell
3. A. Fernau en H. Smereker volgens W. Von Döbeln en B. Lindell
4. M. Suomela en H. Kahlos met grenzen 4a en 4b
5. I. Andersson en I. Nilsson (valt practisch samen met 4a)
6. Berekend naar het voor te stellen model.

Radon in het bloed

Figuur 6 toont het verloop van de radonactiviteit in het bloed vergeleken met de gegevens naar Hursh et al. De getekende functie is afgeleid uit de hoeveelheid $q_3^1(t)$, rekening houdend met het feit dat het bloed ongeveer 35% uitmaakt van de extracellulaire vloeistoffen ⁽²⁵⁾.



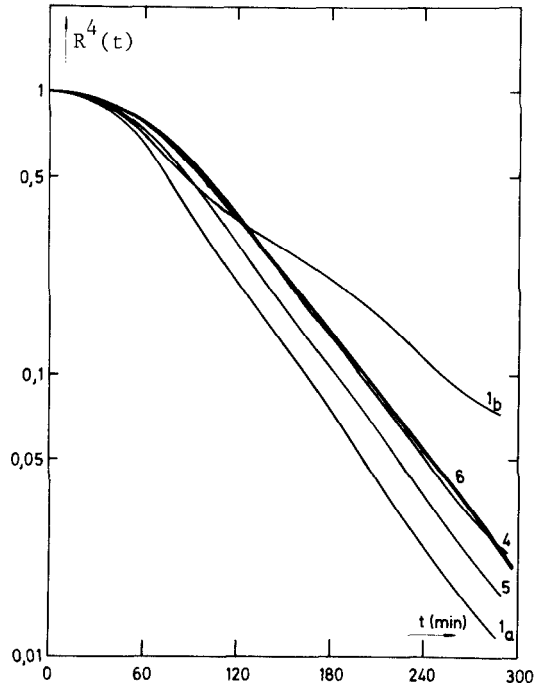
Figuur 6 : Radonactiviteit in het bloed
 1. J. Hursh voor lege maag (a) en volle maag (b)
 2. Berekend naar het voorgesteld model

Lichaamsretentie voor RaC

De RaC-retentie voor het ganse lichaam is berekend in de onderstellingen dat bij de inname het radon in radioactief evenwicht is met zijn dochterisotopen (seculair evenwicht), dat er geen excretie is van deze dochterprodukten en dat het inerte gas radon zelf het lichaam verlaat volgens een kinetiek bepaald door het besproken mathematisch model. Het verloop van deze retentie is getoond in figuur 7, in vergelijking met de resultaten van "whole body" metingen vermeld in de literatuur. Onze resultaten komen het best overeen met deze van M. Suomela en H. Kahlos (experiment 10) ⁽¹¹⁾. Deze auteurs leiden uit bepalingen van RaC met een "whole body counter" een retentiefunctie voor radon af van de gedaante :

$$R^1(t) = e^{-\lambda \cdot t} \text{ met } 0,014 \text{ min}^{-1} < \lambda < 0,023 \text{ min}^{-1} \text{ of } 30,1 \text{ min} < T_{1/2} < 49,5 \text{ min.}$$

In de voorwaarden van ons model en met de interpretatie van de betrokken compartimenten komt met deze waarde van de halveringstijd, de waarde $T=42$ min overeen. Deze waarde is een welbepaalde combinatie van T_{43} , T_{34} en T_{53} .

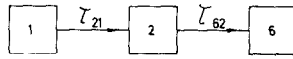


Figuur 7 : Genormeerde retentiekromme voor RaC (gehele lichaam)
 1. J. Hursh et al. (a) lege maag, (b) volle maag
 4. M. Suomela en H. Kahlos (exp. 10, $T_{1/2}=30$ min voor Rn)
 5. I. Andersson en I. Nilsson
 6. Berekend naar het voorgesteld model

DISTRIBUTIE VAN DE DOCHTERISOTOPEN VAN RADON IN HET LICHAAM

Er dient duidelijk vermeld dat het mathematisch model alleen de distributie van het inerte gas radon bepaalt en dat de dochterproducten niet dezelfde biologische kinetiek volgen. Het blijkt immers dat slechts een uiterst kleine fractie van deze isotopen de extracellulaire vloeistoffen, waaronder het bloed, kan bereiken vanuit de gastro-intestinale tractus (26), (27).

Hieruit volgt dat bij latere berekeningen van de dosis in de compartimenten 3, 4 en 5 er geen bijdragen zijn vanwege de oorspronkelijk ingenomen hoeveelheden RaA, RaB en RaC, noch vanwege de isotopen die door fysisch verval in de compartimenten 1 en 2 ontstaan uit Rn. Het was ons niet mogelijk het gedrag van RaA, RaB of RaC experimenteel te bestuderen. Teneinde de kinetiek van deze isotopen door een fysiologisch aanvaardbaar model te beschrijven hebben we ons derhalve gebaseerd op gegevens uit de literatuur. De structuur van het aangewend model is getoond in figuur 8.



Figuur 8 : Biologisch model voor het transport van de dochterisotopen van radon : 1 de maag, 2 de dunne darm, 6 de dikke darm

I.S. Eve (18) vermeldt dat de inhoud van de maag exponentieel vermindert en dat de maag leeg is na gemiddeld 1 uur. Daarenboven is de inhoud van de dunne darm na 4 uur in de dikke darm overgebracht. Daarom stellen we voorop dat beide overgangen op een exponentiële wijze verlopen met respectievelijk halfwaardetijden : $\tau_{21}=8,6$ min en $\tau_{62}=34,3$ min. De combinatie van dit biologisch model met het model voor radon is toegepast bij de berekeningen van de dosissen.

De distributies van RaA, RaB en RaC in de compartimenten 1, 2 en 6 worden beschreven door functies bepaald door formule (1). Hierbij duidt de index j het compartiment aan (1, 2 of 6) en komen de gevallen RaA, RaB en RaC respectievelijk overeen met $\kappa=2, 3$ en 4.

De waarden van μ_1^κ en C_{j1}^κ , die dezelfde zijn voor de dochterisotopen ($\kappa=2, 3$ en 4), zijn gegeven in tabel II .

Tabel II : Waarden voor μ_1^κ en C_{j1}^κ ($\kappa=2, 3, 4$)

	1	2	6
$\mu_1^\kappa (\text{min}^{-1})$	0,0809	0,0202	0
C_{11}^κ	1	0	0
C_{21}^κ	-1,3328	1,3328	0
C_{61}^κ	0,3328	-1,3328	1

DOSISBEPALING

Bij de bepaling van de dosis voor een orgaan j is het nodig het verloop van de activiteit van radon en van elk dochterisotoop in dit orgaan te kennen. De algemene methode zoals ontwikkeld in ref.(1) laat toe deze activiteiten $A_j^K(t)$ onmiddellijk te berekenen.

Bij inname van 1 Bq radon in evenwicht met zijn dochterisotopen is het dosis-equivalent voor het orgaan j over een tijdsinterval $0-t_{\max}$ (min) gegeven door :

$$H_j \text{ (mSv)} = (DF)_j \frac{600}{6,24 \cdot 10^7 \cdot m_j} \sum_{\kappa=1}^4 E^K \cdot (QF)^\kappa \int_0^{t_{\max}} A_j^K(t) dt, \quad (4)$$

waarbij $A_j^K(t)$ de activiteit van het isotoop κ in het orgaan j is, E^K de energie (in MeV) , $(QF)^\kappa$ de kwaliteitsfactor van de straling, $(DF)_j$ een geometriefactor en m_j de massa van het beschouwde orgaan.

Ter vergelijking van de bijdragen tot de dosis vanwege de beschouwde isotopen, zijn in figuur 9, 10, 11 en 12 de functies dosis-snelheid uitgezet voor de maag, de dunne darm, de extracellulaire vloeistoffen en de vetten. Hierbij is ondersteld dat er 1 GBq Radon in evenwicht met zijn dochterisotopen in de maag is ingenomen en dat $(DF)_j$ steeds 0,5 is, overeenkomend met een 2π -geometrie.

Als waarde voor de energie E^K en $(QF)^\kappa$ werd steeds genomen :

$$E^1=5,48 \text{ MeV}; E^2=6,00 \text{ MeV}; E^3=0,62 \text{ MeV}; E^4=7,68 \text{ MeV},$$

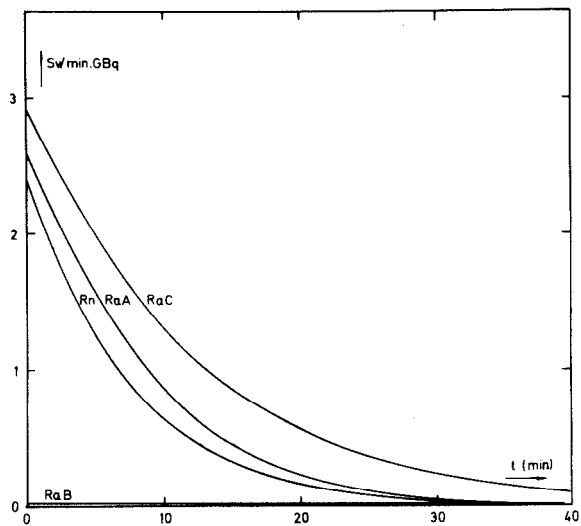
$$\text{en : } (QF)^1=14; (QF)^2=13,5; (QF)^3=1; (QF)^4=12,$$

terwijl voor m_j de waarden zoals opgegeven voor de "Standard Man"⁽²⁹⁾ werden gebruikt :

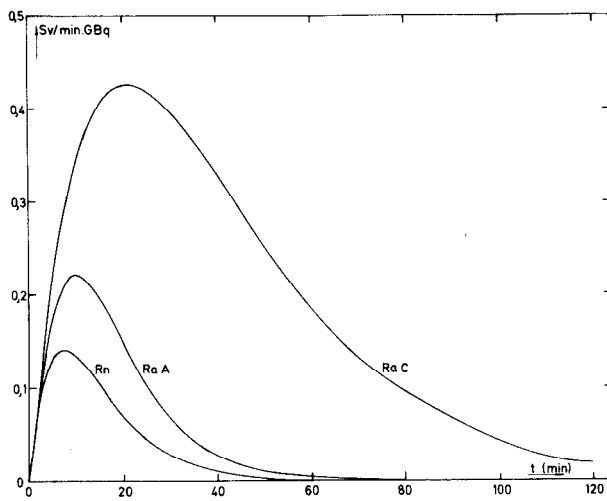
$m=150$ g voor de maag; $m=640$ g voor de dunne darm;

$m=17.500$ g voor de extracellulaire vloeistoffen en

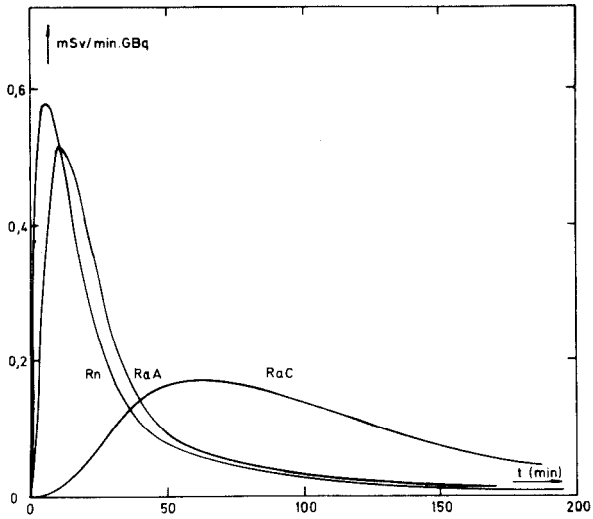
$m=13.500$ g voor de vetten.



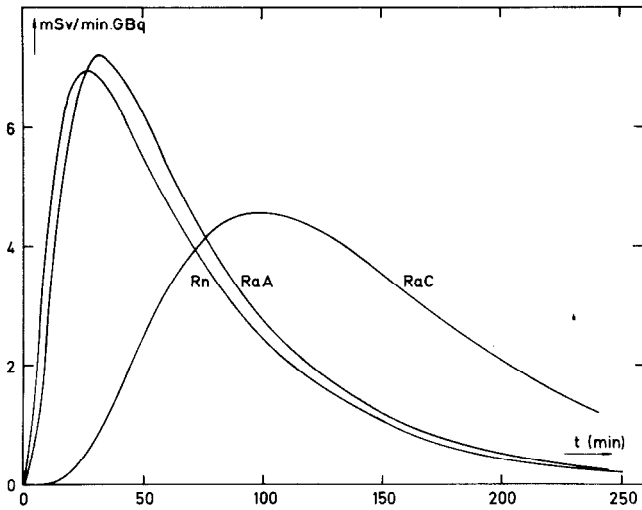
Figuur 9 : Dosis-snelheid voor de maag



Figuur 10 : Dosis-snelheid voor de dunne darm



Figuur 11 : Dosis-snelheid voor de extracellulaire vloeistoffen



Figuur 12 : Dosis-snelheid voor de vetten

Opvallend is de grote bijdrage vanwege RaC.

De berekeningen van een dosis voor het hele lichaam met de uitdrukking (4) is van weinig betekenis. Neemt men in (4) voor m_j de waarde 70 kg ⁽²⁹⁾, dan onderstelt men dat de straling elk punt van het lichaam kan bereiken hoewel werd vastgesteld dat RaA, RaB en RaC, die het meest tot de dosis bijdragen, in de gastro-intestinale tractus blijven. De bijdrage tot de dosis vanwege radon zelf is relatief klein omdat ondanks het feit dat het door heel het lichaam getransporteerd wordt, er slechts een zeer kleine fractie in het lichaam vervalft.

Dosisbepaling voor maag, dunne darm, extracellulaire vloeistoffen en vetten

Uit de functies $q_1^K(t)$ voor radon en zijn dochterisotopen ⁽¹⁾ zijn de overeenstemmende activiteiten berekend, waarbij $A_1^K(0)=1$ Bq wordt gesteld.

In tegenstelling tot de zienswijze van Hursh et al. wordt aldus de straling vanwege de dochterisotopen wel in rekening gebracht. Het lijkt ons meer realistisch te stellen dat het ingenomen water niet onmiddellijk gemengd wordt met de maaginhoud, doch vrij vlug langs kanaaltjes in het maagslijm (maagstraatjes) van de maagwand naar het darmenstelsel doorstroomt.

Met de waarden van de parameters zoals gebruikt bij figuur 9 en met $t_{\max} = \infty$ bekomt men dan als waarde voor H_1 :

$$H_1 = 77 \text{ Sv/GBq (285 mrem/}\mu\text{Ci) .}$$

De dosisbepaling voor de dunne darm, de extracellulaire vloeistoffen en de vetten gebeurt op analoge manier. Hierbij is vanzelfsprekend $A_j^K=0$ voor $j \neq 1$. De aldus bekomen waarden voor de dosissen, alsook de bijdragen hiertoe vanwege de verscheidene isotopen zijn samengebracht in tabel III.

Tabel III : Bijdragen tot de dosis (Sv/GBq)

	maag	dunne darm	extracellulaire vloeistoffen	vetten
Rn	18,4	2,9	0,02	0,61
RaA	22,7	5,3	0,02	0,65
RaB	0,2	0,1	0,00	0,01
RaC	35,7	24,2	0,02	0,73
totaal	77,0	32,5	0,06	2,0

VOORSTELLING VAN EEN $(MTC)_w$ -WAARDE

Uit tabel III volgt reeds duidelijk dat we de maag als referentieorgaan moeten weerhouden.

Bij de bepaling van een $(MTC)_w$ -waarde onderstellen we dat de dagelijkse inname van drinkwater 1200 ml bedraagt en dat de maximale toegelaten wekelijkse belasting vastgesteld is op 3 mSv (0,3 rem). In deze onderstelling vinden we als uitdrukking voor $(MTC)_{w,j}$:

$$(MTC)_{w,j} = \frac{3 \cdot 10^6}{7 \cdot 1200 H_j} \text{ Bq/ml} . \quad (5)$$

Met de waarden voor H_j uit tabel III bekomen we dan de $(MTC)_w$ -waarden voor de beschouwde organen.

Tabel IV : $(MTC)_w$ -waarden (Bq/ml)

	maag	dunne darm	extracellulaire vloeistoffen	vetten
$(MTC)_w$	4,64	11	6160	180

We kunnen dus besluiten dat bij inname van radon in evenwicht met zijn dochterisotopen de maag het referentieorgaan is en dat de maximaal toegelaten concentratie 4,64 Bq/ml (10^{-4} $\mu\text{Ci/ml}$) bedraagt.

In tabel V worden onze conclusies vergeleken met deze van de besproken auteurs.

We moeten tenslotte ook opmerken dat voor het geval van bestraling van een bevolking die niet beroepshalve is blootgesteld, de maximale belasting per week vastgesteld is op 0,1 mSv (0,01 rem) waarmee een $(MTC)_w$ -waarde overeenkomt van 0,2 Bq/ml ($6 \cdot 10^{-6}$ $\mu\text{Ci/ml}$).

Tabel V : Dosis-equivalenten en voorgestelde (MTC)_w-waarden van ²²²Rn in evenwicht met dochterproducten.

Auteur	Referentieorgaan	Gestelde dosis-equivalent Sv/GBq (mrem/ μ Ci)	Gestelde dosislimiet mSv/week (mrem/week)	Gedronken water m ℓ /dag	(MTC) _w Bq/ml (μ Ci/ml)
NBS Handbook 52	maag		3 (300)		0,074 ($2 \cdot 10^{-6}$)
J.B. Hursh et al.	maag	55,7 vol (206) 59,5 ledig (220)	3 (300)	1200	7,4 ($2 \cdot 10^{-4}$)
W. Von Döbeln en B. Lindell (J.Harley)	maag	54 (200)	3 (300)	2200	3,7 (10^{-4})
W. Von Döbeln en B. Lindell	maag	54 (200)	3 (300)	2200	3,7 (10^{-4})
A. Fernau en H. Smereker	whole body	0,54 (2)	1 (100)		111 ($3 \cdot 10^{-3}$)
M. Suomela en H. Kahlos	maag	64,9 vol (240) 102,7 ledig (380)	3 (300)	1200	3,7 (10^{-4})
I.Ö. Andersson en I. Nilsson	whole body	1,9 (7)	1 (100)	2200	33,3 ($9 \cdot 10^{-4}$)
deze studie	maag	77 (285)	3 (300)	1200	4,64 (10^{-4})

REFERENTIES

- (1) Raes F.P., Poffijn A.J. en Bourgoignie R.R. : Berekeningsmethode voor de distributie van radioisotopen in het lichaam na een eenmalige opname; Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming (te verschijnen 1979).
- (2) National Committee on Radiation Protection (U.S.), Maximum permissible amounts of radio-isotopes in the human body and maximum permissible concentration in air and water; National Bureau of Standards, Handbook 52, Washington (1953).
- (3) Maximum permissible body burdens and maximum permissible concentrations of radionuclides in air and in water for occupational exposure; National Bureau of Standards, Handbook 69 (1959).
- (4) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 2, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, New York (1959).
- (5) Hursh J.B., Morken D.A., Davis T.P. and Lovaas A. : The fate of radon ingested by man; Health Physics 11, 465-476 (1965).
- (6) Harley J.H., Jetter E. and Nelson N. : Elimination of radon from the body; Analytical Branch Health and Safety Division, Report n° 3, New York's Operations Office (1951).
- (7) Lindell B. : Ingested radon as a source of human radiation exposure; Proc. IRPA Congress Roma, p. 719 (1966).
- (8) Von Döbeln W. en Lindell B. : Some aspects of radon contamination following ingestion; Arkiv für Fysik, Stockholm, 27, p. 531 (1965).
- (9) Fernau A. and Smereker H. : Über des Verbleiben radioaktiver Substanz im Organismus bei Radium-Emanationstrinkkuren; Strahlentherapie 46, 365-373 (1933).
- (10) Meyer S. : Physikalische Grundlagen von Emanationskuren; Strahlentherapie 58, 656-663 (1937).
- (11) Suomela M. and Kahlos H. : Studies of the elimination rate and the radiation exposure following ingestion of ^{222}Rn rich water; Health Physics 23, 641-652 (1972).
- (12) Andersson I.Ö. and Nilsson I. : Exposure following ingestion of water containing radon 222; IAEA Symposium on Assessment of Radioactive Body Burdens in Man, Heidelberg, vol. II, 317-326 (1964).
- (13) Stenhey A.F., Morris W.P., Lucas H.F. Jr. and Johnston W.H. : A method for measuring the rate of elimination of radon in breath; Am. J. Roentgenology & Radium Therapy, 73, 774-784 (1955).
- (14) Bourgoignie R.R. et al. : Bepaling van de concentratie aan ^{222}Rn opgelost in water en in uitgeademde lucht; Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming (te verschijnen 1979).
- (15) Di Ferrante E. : Study on natural concentrations of ^{226}Ra ; C.E.N.-S.C.K. report Mol-Donk, Belgium, oct. 1965.
- (16) Lucas H.F. : Improved low-level alpha-scintillation counter for radon; Rev. Sci. Instr., vol. 28, 680-683 (1957).
- (17) Linsmaux D., Brassinne A. et Merchie G. : Mesure de la vitesse d'évacuation gastrique à la scinticamera au moyen de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA ou $^{133\text{m}}\text{In}$ -DTPA; Communication Soc. Belge de Médecine Nucléaire (1978).
- (18) Eve I.S. : A review of the physiology of the gastro-intestinal tract in relation to radiation doses from radioactive materials; Health Physics 12¹, 131-161 (1966).
- (19) Davenport H.W. : Physiology of the digestive tract; Year Book Medical Publishers, 3rd ed.1971; Chicago, chap. 14 p. 173.
- (20) West J.B. : Distribution of blood and gas in lungs; Phys. Med. Biol. II 357-370 (1966).

- (21) Kety S.S. : The theory and applications of the exchange of inert gas at the lungs and tissues; *Pharmacol. Rev.* 3, 1-41 (1951).
- (22) Behnke A.R. and Wilmon T.L. : Gaseous nitrogen and helium elimination from the body during rest and exercise; *Am. J. Physiol.*, 131, 619-626 (1941).
- (23) Bell C.M.J. et al. : Problems in the interpretation of the in vivo measurement of calcium by the argon-37 method : An investigation of inert gas elimination in humans ; *J. Nucl. Med.* 19, 54-60 (1978).
- (24) Wilson N.L., ed. : *Obesity*; F.A. Davis Company, Philadelphia (1969).
- (25) Hoste P. : *Begrippen over voedingsleer*; Aurelia Books, Brussel (1975).
- (26) Underwood E. : *Trace elements in human and animal nutrition*; Academic Press, Chap. 17 (1977).
- (27) Djudzman R. : The determination of bismuth in biological mediums and the resorption study of "insoluble" bismuth salts; *Doctoraatsverhandeling, Fak. Farm. Wet., R.U.G.* (1978).
- (28) ICRP Publication 21 : *Data for protection against ionizing radiation from external sources*; Pergamon Press, New York (1973).
- (29) Report of the Task Group on Reference Man; ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975).

DANKWOORD

Wij danken het personeel van de Centrale Dienst voor Fysische Controle van de Rijksuniversiteit te Gent voor de verleende hulp, in het bijzonder de heren R. Jacobs en H. Demuyneck.

RESUME.

L'analyse des activités de ^{222}Rn mesurées, après ingestion en équilibre avec ses produits de filiation, conduit à un modèle à 5 compartiments décrivant le transport de ^{222}Rn dans le corps humain. Sur base de ce modèle, tenant compte des faits physiologiques concernant le transport des produits de filiation du ^{222}Rn , une valeur de 4,64 Bq/ml (0,12 $\mu\text{Ci/l}$) est proposée comme $(\text{MPC})_{\text{w}}$ dans la limite de 3 mSv/semaine (300 mrem/semaine), l'estomac étant l'organe critique.

ABSTRACT.

The analysis of the exhalation measurements, after oral intake of ^{222}Rn in water and in equilibrium with its daughters, leads to a 5 compartment model describing the transport of ^{222}Rn in the human body. Based upon this theoretical model and taking into account the possible different kinetics of the daughter isotopes, as results from physiological data, a value of 4,64 Bq/ml (0,12 $\mu\text{Ci/l}$) is proposed as $(\text{MPC})_{\text{w}}$ for ^{222}Rn in drinking water in the limit of 3 mSv/week (300 mrem/week), with the stomach as critical organ.

ZUSAMMENFASSUNG.

Basierend auf der Messung der Exhalationskurve für ^{222}Rn im Trinkwasser - eingenommen im Gleichgewicht mit seinen Tochterprodukten - wird ein 5-Abteilungs-Model für den Transport von ^{222}Rn im Körper vorgestellt. Die Kombination dieses Modells mit physiologischen Überlegungen und der möglichen Kinetik der Tochterisotopen, führt zu dem Vorschlag eines $(\text{MZK})_{\text{w}}$ - Wertes von 4,64 Bq/ml (0,12 $\mu\text{Ci/l}$) mit dem Magen als Bezugsorgan.