



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gammastralingsniveau en neutronendosismetingen bij de terreingrens van COVRA-VOG in 2021

RIVM-briefrapport 2022-0044
P.J.M. Kwakman | P.P. Bosch



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gammastralingsniveau en neutronendosistempomelingen bij de terreingrens van COVRA-VOG in 2021

RIVM-briefrapport 2022-0044
P.J.M. Kwakman | P.P. Bosch

Colofon

© RIVM 2022

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van haar producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2022-0044

P.J.M. Kwakman (auteur), RIVM
P.P. Bosch (auteur), RIVM

Contact:

P.J.M. Kwakman
Centrum Veiligheid, Stralingsincidenten, Monitoring en Analyses
Pieter.kwakman@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming in het kader van project Site Monitoring Straling

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Gammastraling- en neutronendosistempometingen bij de terreingrens van COVRA-VOG in 2021

Het RIVM heeft extra metingen van het gamma- en neutronendosistempo bij de COVRA uitgevoerd. Dit is in opdracht van de ANVS gedaan. Deze metingen zijn aanvullingen op metingen die COVRA vaker doet.

COVRA en het RIVM meten allebei een iets hoger gamma- en neutronendosistempo aan het hek bij het verarmd uranium opslag gebouw (VOG), aan de rand van het terrein. Die verhoging is ten opzichte van het van nature aanwezige stralingsniveau. De meetwaarden van het neutronendosistempo van COVRA en RIVM komen goed overeen.

De gammadosismetwaarden van COVRA en het RIVM verschillen, omdat zij andere grootheden meten: COVRA meet de effectieve dosis en het RIVM de omgevingsdosis. Een andere belangrijk verschil is de correctie voor de bijdrage aan de gammadosis van de achtergrond. COVRA maakt gebruik van metingen uit de tijd dat COVRA werd gebouwd; het RIVM gebruikt actuele metingen aan de terreingrens vlak bij het afvalverwerkingsgebouw.

De extra metingen zijn door het RIVM uitgevoerd in augustus 2021 naar aanleiding van een ANVS-inspectie bij de COVRA op 16 april 2021. Reden was een wijziging van de bestemming van het terrein dat aan het COVRA-terrein grenst.

Tijdens deze inspectie is specifiek ingegaan op de terreingrensdosis op 2 locaties aan het hek nabij het VOG. Doel is om gamma- en neutronendosistempo te meten dat COVRA heeft toegevoegd aan de natuurlijke waarde in de omgeving (achtergrondwaarde).

Kernwoorden: COVRA terreingrens bij VOG, gammadosistempo, neutronendosistempo, Reuter Stokes

Synopsis

Gamma dose rate and neutron dose rate measurements at the boundary of COVRA-VOG in 2021

RIVM was commissioned by the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS) to conduct measurements of the gamma dose rate and the neutron dose rate at COVRA. These measurements were in addition to regular COVRA measurements.

COVRA and RIVM both measured a slight increase in the gamma and neutron dose rate at the fence of the Depleted Uranium Storage Building (VOG), near the boundary of the COVRA site. This increase is relative to the natural background radiation. The neutron dose rate data measured by COVRA and RIVM coincided well.

There were some discrepancies in the gamma dose rate data from COVRA and RIVM due to the use of different measurement quantities. COVRA measures the effective dose and RIVM the ambient dose. Furthermore, an important difference is caused by the correction for the background contribution. COVRA uses data from the early building years and RIVM uses contemporary data measured at the boundary next to the waste processing facility.

These additional measurements were conducted in August 2021 as a follow-up of an ANVS inspection at COVRA on 16 April 2021, which was prompted by changes to the terrain next to the COVRA site boundary.

During this inspection, special attention was paid to monitoring the site boundary dose rate on two locations near the VOG fence. The aim was the measurement of the gamma and neutron dose rates that COVRA adds to the local background rates.

Keywords: COVRA boundary, gamma dose rate, neutron dose rate, Reuter Stokes

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding en doel — 11

1.1 Aanleiding en opdracht — 11

2 Apparatuur en meetmethoden — 13

2.1 Gemeten grootheden — 13

2.2 Apparatuur — 13

2.2.1 Gammadosisequivalenttempo met Reuter Stokes — 13

2.2.2 Bitt monitor en autonome Saphymo monitor van MONET meetnet — 14

2.2.3 Biorem neutronenmonitor type FHT 752 (BF₃) — 14

2.2.4 Meting van het gammaspectrum met de Falcon-5000 — 14

3 Uitvoering van de metingen — 17

3.1 Plattegrond en meetlocaties bij COVRA — 17

3.2 Meetwaarden van COVRA in kwartaalrapportages — 18

3.3 Planning van de metingen in april en augustus 2021 — 18

3.4 Achtergrondmeting op locatie MONET-31 en MONET-32 — 19

4 Meetresultaten — 21

4.1 RIVM metingen 15 + 16 april 2021 — 21

4.2 RIVM en COVRA metingen 5+6 augustus, en 2+3 september 2021 — 22

4.3 Meting gammaspectrum met Falcon-5000 op locatie 22 en 22A. — 23

5 Discussie — 25

5.1 Gammadosisestempo bij meetlocatie VOG (22) en Heerema (22A) — 25

5.2 Neutronendosisestempo bij VOG (22) en Heerema (22A) — 28

6 Conclusies en aanbevelingen — 29

6.1 Conclusies — 29

6.2 Aanbeveling — 30

Bijlage 1 VSL kalibratiecertificaten van de Reuter Stokes — 31

Samenvatting

Het RIVM heeft in opdracht van de ANVS aanvullende terreingrensmetingen bij de COVRA uitgevoerd. Reden was de ANVS-inspectie die is uitgevoerd bij de COVRA op 16 april 2021 als gevolg van het wijzigen van de bestemming van de terreingrens van de COVRA.

Tijdens deze inspectie is specifiek ingegaan op het monitoren van de terreingrensdosis op 2 locaties aan het hek nabij VOG-1. Doel is om het door COVRA toegevoegde gamma- en neutronendosis tempo te meten.

Op meetlocatie VOG-1 (22) komen Reuter Stokes-metingen van de ruwe exposie door COVRA en RIVM zeer goed overeen. De door COVRA berekende effectieve dosis E wijkt af van het door RIVM gerapporteerde omgevingsdosisequivalenttempo $H^*(10)$. Dat is geheel verklaarbaar vanwege de verschillende grootheden die door COVRA en RIVM gemeten worden.

Op meetlocatie Heerema (22A) komen Reuter Stokes-metingen van de ruwe exposie door COVRA en RIVM goed overeen, maar het netto exposietempo niet. Dit is verklaarbaar door de afwijkende achtergrondcorrectie die COVRA en RIVM beiden hanteren. COVRA past 'oude' Reuter Stokesmetingen toe voor de bijdrage van terrestrische straling, en COVRA gebruikt CARI-6 berekeningen voor de bijdrage van de kosmische straling. RIVM gebruikt een achtergrondmeting op locatie MONET-32 vanwege de constante en lage meetwaarde.

Het is niet helder welke wijze van correctie voor de bijdrage van terrestrische en kosmische straling het meest correct is.

RIVM beveelt aan om op de locaties 22 en 22A de bijdrage van de terrestrische en kosmische straling grondig in kaart te brengen, inclusief de bijbehorende onzekerheden.

De neutronenmetingen kenmerkten zich door lage telsnelheden en lange teltijden, vaak 8 uur of overnacht. De statistische onzekerheid in de metingen is dan ook groot, afhankelijk van het teltempo. Hiermee rekening houdend zijn de COVRA en RIVM neutronendosis tempi goed met elkaar in overeenstemming.

1 Inleiding en doel

1.1 Aanleiding en opdracht

Het RIVM voert in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) reguliere terreingrens-metingen uit bij de Centrale Organisatie voor Radioactief Afval (COVRA) met het MONET-meetnet¹.

Op basis van de meetdata van het gamma- en neutronendosistempo in de kwartaalrapportages van COVRA heeft RIVM op 15 en 16 april 2021 een serie metingen uitgevoerd aan het gammadosistempo en neutronendosistempo. Reden was een gelijktijdige inspectie uitgevoerd door de ANVS bij de COVRA als gevolg van het wijzigen van de bestemming van de terreingrens van belendende industrie (ABC factor 0,2) naar weg binnen industrieterrein (ABC factor 0,01)².

Tijdens deze inspectie is specifiek ingegaan op het monitoren van de terreingrensdosis op 2 locaties aan het hek nabij het VOG. Doel is om het door COVRA aan de achtergrondstraling toegevoegde gamma- en neutronendosistempo te meten.

De meetresultaten waren niet geheel in lijn met de resultaten in de COVRA kwartaalrapportages. Er is besloten om deze meetserie simultaan met de COVRA te herhalen op dezelfde plaats en tijd en met de uitbreiding van gammaspectrummetingen; dit heeft op 5 en 6 augustus 2021 plaatsgevonden, met nog extra neutronen achtergrondmetingen op 2 en 3 september 2021.

Doel van deze meetserie is toetsen of de door de COVRA toegepaste methodiek correct is.

In dit rapport worden de door COVRA en RIVM gemeten en berekende dosistemporen gegeven. Hiervoor is van belang welk achtergrondniveau wordt gebruikt voor de correctie van het bruto stralingsniveau. Dit wordt in deze rapportage uitvoerig besproken. De omrekening van effectieve dosis naar Actuele Individuele Dosis en de toetsing aan de vergunde jaarlijkse limiet valt buiten deze opdracht van de ANVS aan het RIVM.

¹ Gammastralingsniveaumetingen aan de terreingrens van COVRA N.V. te Borsele in 2020 met het MONET-meetnet, RIVM Briefrapport 2021-0155, C.P. Tanzi.

² Zie www.overheid.nl "ANVS verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming"

2 Apparatuur en meetmethoden

2.1 Gemeten grootheden

De in dit rapport beschreven meetapparaten meten verschillende stralingsgrootheden. Hier wordt per grootheid een definitie gegeven.

Exposie :

het aantal ionisaties dat gammastraling in lucht veroorzaakt. 1 Röntgen is gelijk aan $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg. Deze grootheid heeft als voordeel dat hij makkelijk te meten is door bijvoorbeeld de Reuter Stokes.

Effectieve dosis

De effectieve stralingsdosis is een maat voor de dosis aan inwendige en uitwendige straling die een individu ontvangt. De totale effectieve dosis E voor een individueel persoon wordt verkregen door de resultaten van alle organen en weefsels bij elkaar te tellen:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Hierin is:

w_T = weefselweegfactor voor weefsel T

H_T = equivalente dosis voor weefsel T

w_R = stralingsweegfactor voor straling R

$D_{T,R}$ = geabsorbeerde dosis D (in Grays) door weefsel T ten gevolge van straling R

Omgevingsdosis $H^(10)$*

Het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ is de equivalente dosis die bij een evenwijdig stralingsveld aanwezig is op 10 mm diepte in een weefsel-equivalente bol (de zogenaamde ICRU-bol).

2.2 Apparatuur

2.2.1 *Gammadosisequivalenttempo met Reuter Stokes*

De Reuter Stokes RS-S131-200 van het RIVM is een hoge druk ionisatiekamer met vlakke respons over een breed energiebereik. De meetperiode bedraagt steeds 1 minuut. De Reuter Stokes is gekalibreerd door VSL; het kalibratiecertificaat is weergegeven in Bijlage 1. De Reuter Stokes meet ionisaties in een hoge druk Argon-gasgevulde bol en is equivalent aan de hoeveelheid ionisaties die in lucht zouden plaatsvinden. De eenheid is doorgaans micro-Röntgen per uur ($\mu\text{R/h}$). Correcter is het om de ionisaties uit te drukken in Coulomb per massa, C/kg.

Dataverwerking

De exposie data van de Reuter Stokes worden omgerekend naar Gray (Gy = J/kg). De omrekenfactor is een fysische constante: 1 Röntgen is gelijk aan 8,77 mGy; of 1 Gray is gelijk aan 115 Röntgen.

Voor gammastraling hangt de omrekening van Gray naar Sievert af van de gewenste grootte E (effectieve dosis) of $H^*(10)$, de omgevingsdosis. Dit is ook afhankelijk van de energie van de gammastraling.

2.2.2

Bitt monitor en autonome Saphymo monitor van MONET meetnet

De metingen van $\dot{H}^*(10)$ van het MONET-meetnet worden uitgevoerd met twee type monitoren: Bitt RS03/X proportionele telbuis en autonome Bertin (voorheen Saphymo) GammaTRACER XL2. De energierespons van beide type monitoren is zodanig dat de uitlezing overeenkomt met het omgevings-dosisequivalenttempo. De monitoren hebben elk een verschillende hoekafhankelijkheid en een verschillende gevoeligheid voor kosmische straling. Deze monitoren geven zowel op 1 minuut als elke 10 minuten een gammadosistempo ($\mu\text{Sv/h}$).

Dataverwerking gammadosistempo

Op de locaties 22 en 22A zijn er door de COVRA en RIVM beide met een Reuter Stokes en door RIVM tevens met een autonome Saphymo gammadosistempomaten gemeten. Het RIVM heeft ervoor gekozen om de Reuter Stokes zodanig te laten justeren door VSL dat de omrekening van μR naar $H^*(10)$ automatisch door de Reuter Stokes wordt uitgevoerd. Met deze justering kan RIVM de ruwe data in $H^*(10)$ van de Reuter Stokes terugrekenen naar $\mu\text{R/h}$. Deze ruwe data ($\mu\text{R/h}$) komen zeer goed overeen met de ruwe data van COVRA. Het uiteindelijke verschil zit in de achtergrondcorrectie en de omrekening van $\mu\text{R/h}$ naar E , de effectieve dosis, of naar $H^*(10)$, het omgevingsdosisequivalent.

2.2.3

Biorem neutronenmonitor type FHT 752 (BF_3)

Op de locaties 22 en 22A zijn er door de COVRA en RIVM beide met een identieke Biorem 752 FHT neutronendosistempomaten gemeten. De Biorem FHT752 neutronendetector bestaat uit een proportionele counter, een polyethyleen-moderator, hoogspanning en voorversterker. De detector is gevuld met $^{10}\text{BF}_3$ gas en heeft een bereik van 1 nSv/h – 400 mSv/h.

De detector heeft een gevoeligheid van 2,20 $\mu\text{Sv/h}$ per $\text{count}\cdot\text{s}^{-1}$ voor een ^{252}Cf -neutronen-bron en is zeer ongevoelig voor gammastraling ($< 0,01$ cps bij 100 mSv/h voor een ^{137}Cs -bron).

Dataverwerking

COVRA registreert de counts en deelt door de totale teltijd. COVRA hanteert als omrekening de kalibratiefactor 2,20 $\mu\text{Sv/h}$ per $\text{count}\cdot\text{s}^{-1}$. RIVM heeft een ingebouwde (gekalibreerd door Thermo) omrekening van counts naar $H^*(10)$; de omrekening is vrijwel identiek, 2,26 $\mu\text{Sv/h}$ per count/s .

2.2.4

Meting van het gammaspectrum met de Falcon-5000

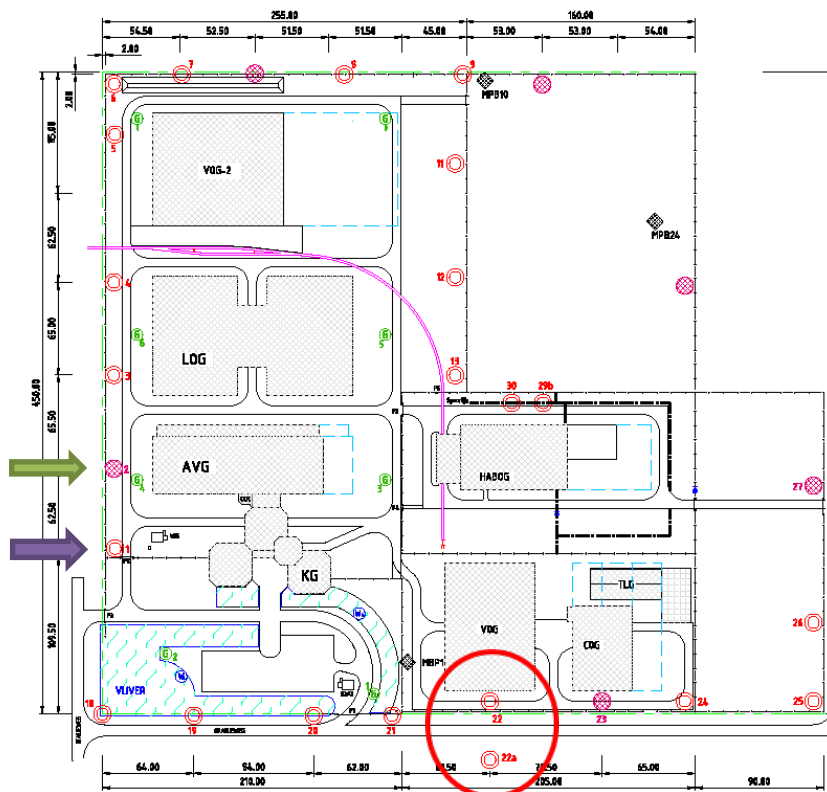
De Falcon 5000 is een draagbare gammaspectrometrie meetopstelling met een high-purity Germanium detector (www.mirion.com; voorheen Canberra). De Falcon 5000 is elektrisch gekoeld en kan minimaal 6 uur continu meten voordat batterijen verwisseld moeten worden. De energierange beslaat 20 keV tot 3 MeV over maximaal 8192 kanalen. Data worden geanalyseerd met de gebruikelijke Genie 2000 software van Mirion.

De gammaspectra hebben niet als doel dat er gammastralers geïdentificeerd moeten worden, maar een beoordeling van het gehele gammaspectrum. Waar ligt het zwaartepunt van het spectrum en komt dat overeen met de omrekening van Gray naar Sievert ?

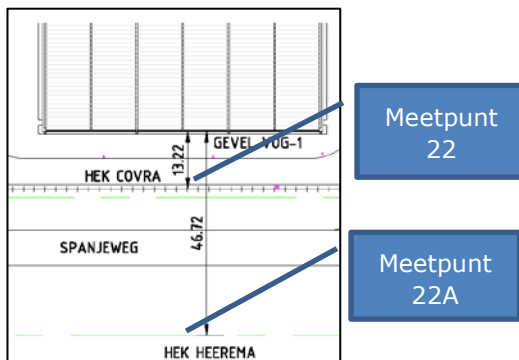
3 Uitvoering van de metingen

3.1 Plattegrond en meetlocaties bij COVRA

In Figuur 1a en 1b zijn de locaties van de uitgevoerde metingen weergegeven: in de rode cirkel de locaties 22 en 22A. Rechts naast de groene pijl locatie MONET-31 en naast de paarse pijl locatie MONET-32.



Figuur 1a Plattegrond van COVRA met midden-onder VOG-1 en de meetpunten 22 en 22A in de cirkel. Achtergrondmeting van 16 april is uitgevoerd bij MONET-31 (paarse pijl); de achtergrond van 6 augustus en 2/3 september is bepaald bij MONET-32 (groene pijl).



Figuur 1b Afstand van gevel van VOG-1 naar het hek van COVRA (meetpunt 22; 13,2 m) en het hek van Heerema (meetpunt 22A; 46,7 m).

3.2 Meetwaarden van COVRA in kwartaalrapportages

In de kwartaalrapportages van COVRA staan de gammastralingsniveaus en de neutronendosistemporen aan de terreingrens vermeld. Op locatie VOG-1 (meetpunt 22) en locatie Heerema (meetpunt 22A) zijn beide stralingsniveaus verhoogd ten opzichte van de lokale achtergrond.

Tabel 1 Gamma- en neutronendosistemporen (netto) zoals vermeld in COVRA 4e kwartaalrapportage 2020; min-max waarden (nSv/h)

Dosistemporen in 2021	Locatie VOG (22)	Locatie Heerema (22A)
Gammadosistemporen (nSv/h)	45 – 54	2,2 – 8,9
Neutronendosistemporen (nSv/h)	31 – 34	9,8 – 13,8

Zie Figuur 1b voor de afstanden vanaf de gevel van VOG-1 naar het hek naast VOG-1 (13,2 m; meetpunt 22) en het hek van Heerema (46,7 m; meetpunt 22A). De gevel van VOG-1, met de er binnen gestapelde verarmde uraan vaten, is zo breed (ca. 50 m) dat de afname van het gamma- en neutronendosistemporen niet de gangbare kwadratenwet volgt.

3.3 Planning van de metingen in april en augustus 2021

In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de planning van de uitgevoerde metingen in 2021.

Tabel 2 Datum en tijd van uitgevoerde metingen in 2021

15 + 16 april 2021	Meetlocatie COVRA-VOG (22)	Meetlocatie Heerema (22A)	Achtergrond MONET-31
Reuter Stokes (gamma)	15/4 15:00 tot 16/4 9:00 uur	16/4 9:15 – 15:00 uur	16/4 15:15 – 16:15 uur
Saphymo (gamma)			
Biorem-752 (neutronen)			
5 + 6 aug 2021 tegelijk met COVRA*	Meetlocatie COVRA-VOG (22)	Meetlocatie Heerema (22A)	Achtergrond MONET-32**
Reuter Stokes* (gamma)	5/8 17:15 tot 6/8 9:00 uur	5/8 11:00 – 17:00 uur	6/8 9:00 – 16:00 uur
Saphymo (gamma)			
Biorem-752* (neutronen)			
Falcon-5000 (gammaspectrometrie)			
2+3 sept 2021* tegelijk met COVRA*			Achtergrond MONET-32
Biorem-752 neutronen			2/9 15:30 tot 3/9 10:00 uur

* Op 5+6 augustus heeft COVRA tegelijk met RIVM het gammadosistemporen gemeten met de Reuter Stokes; op 2 en 3 september het neutronendosistemporen met de Biorem-752.

** Er is op 5+6 augustus gekozen voor meetlocatie MONET-32 omdat op dat punt ook een lange historie van Reuter Stokes controlemetingen van COVRA bekend is (COVRA meetpunt 2). De Bitt-monitor van MONET-32 geeft langjarig een constant en laag niveau dat verondersteld wordt representatief te zijn voor de lokale achtergrond³.

3.4 Achtergrondmeting op locatie MONET-31 en MONET-32

In de eerste meetsessie van 15+16 april 2021 is gekozen voor MONET-31 als een representatieve achtergrondlocatie. MONET-31 is een redelijke keus vanwege het stabiele en lage gammadosistempo nabij de Bitt monitor van MONET-31³. In de tweede meetserie van 5+6 augustus is echter gekozen voor de locatie van MONET-32, en wel omdat daar tevens een Bitt-monitor van COVRA staat, en omdat daar de maandelijks meetlocatie is (meetpunt-2) van de COVRA Reuter Stokes controlemetingen.

De achtergrondmeting van de neutronendosis op vrijdag 6 augustus vertoonde echter dermate vreemde en aflopende resultaten dat deze achtergrondmeting is herhaald op 2+3 september op locatie MONET-32 en wel tegelijk met een meting door de COVRA. Het neutronenachtergrond dosistempo van 9,2 nSv/h komt goed overeen met de waarde van 9,3 – 9,7 nSv/h in eerdere langdurige metingen uitgevoerd door de COVRA.

4 Meetresultaten

4.1 RIVM metingen 15 + 16 april 2021

In Tabel 3 staat een overzicht van de eerste serie meetresultaten van RIVM van 15 en 16 april 2021. Als een representatieve achtergrond is locatie MONET-31 gekozen omdat deze locatie al langjarig een zeer constant en laag gammadosistempo laat zien³.

Tabel 3 RIVM eerste serie meetresultaten voor effectieve dosis (gamma- plus neutronendosistemp) op locatie 22 en 22A op 15 en 16 april 2021.

Gammadata	VOG-1 (22)	Heerema (22A)	Locatie "MP31" (=achtergrond)
Reuter Stokes (nSv/h)	148,6 ± 2,4	92,2 ± 2,1	68,7 ± 2,1
Netto toegevoegd (nSv/h)	79,9 ± 3,2	23,4 ± 3,0	-
Netto gamma dosis (microSv/a)	700 ± 28	205 ± 26	
Saphymo (nSv/h)	156,2 ± 10,2	99,2 ± 8,4	76,6 ± 7,8
Netto toegevoegd (nSv/h)	79,6 ± 12,8	22,6 ± 11,4	
Netto gamma dosis (microSv/a)	697 ± 113	198 ± 100	
Neutronendata*	Meettijd 18 uur	Meettijd 6 uur	Covra achtergrond
Biorem 752 (nSv/h)	46,4 ± 7,0	28,3 ± 7,0	9,4 ± 0,7
Netto toegevoegd (nSv/h)	37 ± 7,0	18,9 ± 7,1	-
Netto effectieve dosis (microSv/a)	324 ± 61	165 ± 62	

* Voor de neutronen achtergrond is de COVRA meetwaarde van 9,4 nSv/h toegepast vanwege de veel langere meettijd. De neutronenmeting door RIVM bij MP31 is te kort voor een representatieve achtergrond.

³ Gammastralingsniveaumetingen aan de terreingrens van COVRA N.V. te Borsele in 2020 met het MONET-meetnet. C.P. Tanzi, RIVM Briefrapport 2021-0155.

4.2 RIVM en COVRA metingen 5+6 augustus, en 2+3 september 2021

In Tabel 4 staat een overzicht van de meetresultaten van COVRA en RIVM. Een belangrijk verschil is dat COVRA de correctie voor de achtergrond baseert op een Reuter Stokes meting uit 1994. RIVM meet op dezelfde dag als de metingen bij COVRA VOG een (veronderstelde) representatieve achtergrond op locatie van meetpost MONET-32. De details van deze werkwijzen worden besproken in hoofdstuk 5.

Tabel 4 COVRA en RIVM data van Reuter Stokes (RS), Saphymo en Biorem (neutronen) aan het hek VOG-1 (punt 22) en bij Heerema (punt 22A) d.d. 5+6 augustus 2021

	COVRA	RIVM	COVRA	RIVM
Meetlocatie	VOG-1 (22)	VOG-1 (22)	Heerema (22A)	Heerema (22A)
RS ruwe data $\mu\text{R}/\text{uur}$	14,4	$14,4 \pm 0,2$	8,8	$8,7 \pm 0,2$
Kosmische bijdrage $\mu\text{R}/\text{uur}$	3,7	nvt	3,6	nvt
Achtergrond $\mu\text{R}/\text{uur}$	3,5	$6,8 \pm 0,2$ = MONET-32	4,7	$6,8 \pm 0,2$ = MONET-32
Netto $\mu\text{R}/\text{uur}$	$14,4-3,7-3,5$ = 7,3	$7,6 \pm 0,3$	$8,8-3,6-4,7$ = 0,5	$2,0 \pm 0,3$
Factor R/Gy	115	115	115	115
Factor Sv/Gy =Eff dosis E/Kerma voor 200 keV fotonen vrij in lucht, ROT	0,85	-	0,85	-
Factor Sv/Gy Conversie $H^*(10)/\text{Kerma}$ voor 662 keV gamma in lucht	-	1,2	-	1,2
RS Eff dosis E (nSv/h)	53,9	-	3,5	-
RS Eff dosis E ($\mu\text{Sv}/\text{a}$)	472	-	30,9	-
RS $H^*(10)$ (nSv/h)	-	$80,0 \pm 3,4$	-	$20,8 \pm 3,1$
RS $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv}/\text{a}$)	-	702 ± 30	-	183 ± 27
Saphymo bkg MP-32 (nSv/h)		$84,6 \pm 2,8$		$84,6 \pm 2,8$
Saphymo bruto (nSv/h)		$159,8 \pm 3,9$		$104,2 \pm 2,9$
Saphymo netto (nSv/h)		$75,1 \pm 4,8$		$19,6 \pm 4,0$
Saphymo netto ($\mu\text{Sv}/\text{a}$)		659 ± 42		172 ± 35
Neutronen				
bruto data neutronen (nSv/h)	45,0	$49,0 \pm 1,4$	21,4	$23,5 \pm 1,6$
Achtergrond* neutronen (nSv/h)	9,3	$9,2 \pm 0,6$	9,7	$9,2 \pm 0,6$
$H^*(10)$ neutronen (nSv/h)	35,7	$39,8 \pm 1,5$	11,7	$14,3 \pm 1,7$
$H^*(10)$ neutronen ($\mu\text{Sv}/\text{a}$)	313	349 ± 13	103	125 ± 15

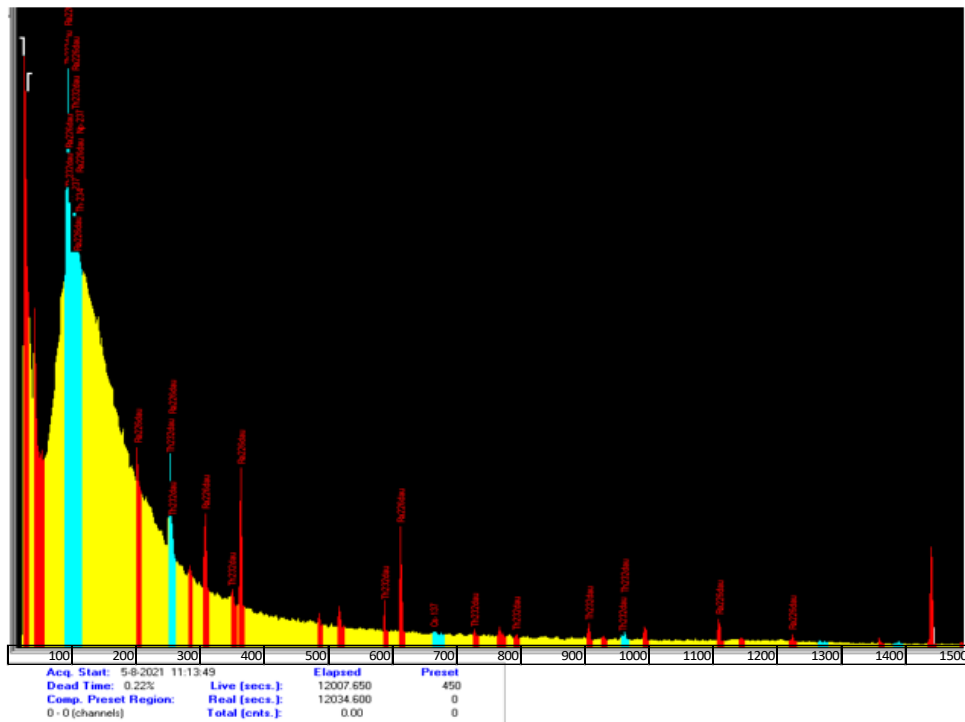
* . Biorem (neutronen) achtergrond meting van 2+3 sept 2021.

4.3 Meting gammaspectrum met Falcon-5000 op locatie 22 en 22A.

RIVM heeft op locatie 22 en 22A een gammaspectrum opgenomen. De vorm van spectra voor de locaties 22 en 22A zien er identiek uit. Uit beide spectra is duidelijk te zien dat het een verstrooid spectrum betreft zonder grote individuele gammapijken. Het grootste deel van het spectrumoppervlak ligt onder de 500 keV en neemt onder de 100 keV sterk af.

De COVRA past in de omrekening van de ruwe Reuter Stokes meetdata (R/h) de factor 0,85 toe. Dit is de omrekening van de Kerma voor 200 keV fotonen vrij in lucht, 'ROT' orientatie, naar de effectieve dosis E. Dit komt redelijk overeen met het zwaartepunt van het spectrum rond 150 keV.

*Falcon-5000 gammaspectrum op locatie 22A (5-8-2021; 12000 seconden).
De lijn geheel rechts is van K-40 bij 1460 keV.*



Figuur 2 Gammaspectrum opgenomen met de Falcon-5000 op 5-8-2021 op locatie 22A. Het spectrum is niet gecorrigeerd voor de bijdrage van de achtergrond.

5 Discussie

5.1 Gammadosis tempo bij meetlocatie VOG (22) en Heerema (22A)

In tabel 5 is een korte samenvatting gegeven van de gammadosis tempo die door COVRA en RIVM gerapporteerd worden. Wat direct opvalt zijn de goede overeenkomst tussen de RIVM Reuter Stokes en RIVM Saphymo data, en de verschillen tussen de COVRA en RIVM data. Op locatie 22 is het RIVM resultaat ongeveer een factor 1,4 hoger. Op locatie 22A is het RIVM resultaat echter ongeveer een factor 6 hoger.

Tabel 5 Vergelijking van COVRA en RIVM gammadosis tempo

Gammadosis tempo	COVRA	RIVM	COVRA	RIVM
Meetlocatie	VOG-1 (22)	VOG-1 (22)	Heerema (22A)	Heerema (22A)
RS [#] Eff. dosis E (μSv/a)	472	-	30,9	-
RS H*(10) (μSv/a)	-	702 ± 30	-	183 ± 27
Saphymo (μSv/a)		659 ± 42		172 ± 35

RS = Reuter Stokes

De berekening van de totale toegevoegde dosistempo door RIVM en COVRA bevat drie essentiële punten :

1. de omrekening van exposie (μR/h) naar dosis (nSv/h); zie H 2.
2. de correctie voor terrestrische en kosmische straling.
3. de toepassing van een omrekenfactor van exposie naar dosis op basis van de Cs-137 energie of op basis van een gemiddeld 200 keV spectrum.

1 De omrekening van Exposie (μR/h) naar dosis (nSv/h)

De RS-exposiewaarden (R/h) van RIVM zijn teruggerekend aan de hand van de gemeten H*(10) waarden en de omrekenfactor 0,01056 Sv/R, die het resultaat is van de VSL justering. De RS-ruwe data in exposie-eenheden μR/h van COVRA en RIVM komen zeer goed met elkaar overeen. Er is een echter principieel verschil in de omrekening van nGy/h en vervolgens naar nSv/h door COVRA en RIVM.

De factor 115 R/Gy is een fysische constante (= 0,0087 Gy/R).

De factor Sv/Gy is afhankelijk van fotonenergie, oriëntatie (ROT) en omrekening naar effectieve dosis E. COVRA gebruikt 0,85 Sv/Gy (gamma-energie ongeveer 200 keV; oriëntatie ROT), RIVM gebruikt 1,2 Sv/Gy H*(10). Het verschil is dus een factor 1,2 / 0,85 = 1,41. Dit verklaart de factor van 1,5 (=702/472) tussen de effectieve dosis door COVRA en H*(10) door RIVM op locatie 22.

Het netto meetresultaat op locatie 22A van RIVM, 2,0 μR/h, is 4 keer groter dan het netto meetresultaat van COVRA, 0,5 μR/h. In de omrekening naar dosis (E of H*(10)) wordt dit verschil verder uitvergroot; het netto effectieve dosistempo gemeten door COVRA is ongeveer een factor 6 lager dan de H*(10) gemeten door RIVM Dit wordt hoofdzakelijk bepaald door de correctie van de bruto meetwaarden voor de terrestrische en de kosmische straling; zie 2.

2 Achtergrondcorrectie COVRA metingen

De achtergrondstraling die gemeten wordt door een Reuter Stokes hoge druk ionisatiekamer bestaat voor het grootste deel twee bijdragen: de terrestrische straling afkomstig van uraan, thorium en K-40 in de bodem; en kosmische straling afkomstig van hoogenergetische deeltjes die via interacties in de atmosfeer leiden tot secundaire ionisaties⁴. De berekening van de netto gammadosis bij locatie 22A door COVRA is als volgt : de bruto Reuter Stokes meetwaarde van 8,8 $\mu\text{R/h}$ minus 3,6 $\mu\text{R/h}$ (kosmische straling) en minus 4,7 $\mu\text{R/h}$ (terrestrische straling) resulteert in een netto bijdrage van 0,5 $\mu\text{R/h}$.

De meting van de *terrestrische straling* dateert van Reuter Stokesmetingen door COVRA uit de jaren '90 toen er gestart werd met de bouw van de COVRA opslaglocaties. Het is onduidelijk in hoeverre deze historische Reuter Stokesmeting nog steeds geldig is door alle terreinaanpassingen bij COVRA en bij Heerema. Deze aanpassingen bestaan uit de uitbreiding van het COVRA terrein, de bouw van extra opslag gebouwen, en veranderingen bij de naburige industrie.

De berekening van de *kosmische straling* voert COVRA uit met het programma CARI-6 (inmiddels opgevolgd door CARI-7)⁵. De berekeningen in CARI-6 zijn gebaseerd op weegfactoren volgens ICRP-60; de berekeningen in CARI-7 volgens ICRP-103.

Kosmische straling wordt enigszins beïnvloed door de zonneactiviteit. Vandaar dat in CARI-6 of CARI-7 de zonneactiviteit als variabele ingevoerd moet worden, samen met de hoogte ten opzichte van zeeniveau, en de luchtdruk. CARI-7 schrijft het grootste aandeel van de effectieve dosis toe aan neutronen, en niet aan muonen: van de totale effectieve dosis is volgens CARI-7 ongeveer 44% afkomstig van neutronen, 35% van muonen, bijna 8% van fotonen, bijna 6% van protonen en bijna 7% van elektronen en positronen⁴.

Het is niet geheel duidelijk in hoeverre de Reuter Stokes een deel van de kosmische neutronen direct of indirect via secundaire ionisaties, waarneemt. Dit is overigens niet van belang indien de Reuter Stokes op dezelfde dag een lokale achtergrondmeting uitvoert waarmee de bijdrage van de kosmische straling verrekend wordt. De berekende correctie voor kosmische straling is dus alleen van toepassing voor de COVRA metingen, maar niet voor de RIVM metingen.

2c Achtergrondcorrectie RIVM metingen

RIVM heeft in de jaren '90 geen achtergrondmetingen uitgevoerd aan het hek van COVRA voorafgaand aan de bouw van de opslaglocaties. RIVM hanteert daarom noodgedwongen een praktische achtergrondcorrectie. De achtergrondmeting van het gammastraling- en neutronendosistempo op locatie MONET-32 is gebruikt om de bruto meetwaarden op locatie 22 en 22A te corrigeren voor terrestrische en kosmische straling.

Op de locatie van MONET-32 is het gammadosistempo stabiel laag; in de orde van 74-75 nSv/h³. RIVM neemt aan dat de bijdrage van de terrestrische straling ongeveer hetzelfde is aan het hek van het COVRA terrein bij MONET-32 en het VOG (meetpunt 22 en 22A), en dat de

⁴ RIVM-rapport 2021-0032, Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland, R. Smetsers, P. Bekhuis, zie pagina 27-38.

⁵ CARI is een veelgebruikt programma dat wordt verstrekt en onderhouden door de U.S. Federal Aviation Administration (FAA). www.faa.gov. De meest recente en geavanceerde versie is CARI-7A.

kosmische straling op dezelfde dag gelijk is voor het hele COVRA terrein. Dit heeft in de Reuter Stokes en Saphymometingen van het gammadosistempo op locatie 22 en 22A tot vergelijkbare meetwaarden geleid.

Het is duidelijk dat de gesommeerde onzekerheden in de bruto Reuter Stokes meting en de kosmische en terrestrische bijdragen kunnen leiden tot een zeer grote onzekerheid in de netto bijdrage. Er is geen schatting van de onzekerheden door COVRA opgesteld.

RIVM beveelt aan om op de locaties 22 en 22A de bijdrage van de terrestrische en kosmische straling grondig in kaart te brengen, inclusief de bijbehorende onzekerheden.

3 Reuter Stokes respons: op basis van Cs-137 of op basis van een gemiddeld 200 keV spectrum ?

De Reuter Stokes die is gebruikt door RIVM verrekent automatisch de gemeten exposie in $\mu\text{R/h}$ naar $H^*(10)$ met een factor behorend bij de energie van de Cs-137 (662 keV). De gemeten exposie-waarde in R/h wordt vermenigvuldigd met 0,01056 Sv/R. Deze waarde volgt uit de justering van de Reuter Stokes van RIVM door VSL.

COVRA hanteert in de berekening van de effectieve dosis de aanname dat de gammastraling een fotonenergie van 200 keV betreft. Dan mag bij de oriëntatie ROT een factor 0,85 toegepast worden voor de omrekening E/K_a (Sv/Gy). Uit het gammaspectrum blijkt dat het zwaartepunt van het spectrum zich tussen 100 en 150 keV bevindt. De omrekeningsfactor E/K_a voor 100 keV is 0,96 en voor 150 keV 0,89⁶. Dit zou betekenen dat de omrekening van exposie naar E bij 150 keV een factor $0,89/0,85$ (4,5%) hoger wordt, en bij 100 keV een factor $0,96/0,85$ (11,5%) hoger. De overeenstemming tussen E (COVRA) en $H^*(10)$ van RIVM wordt daarmee wat beter .

VSL heeft de kalibratie van de Reuter Stokes uitgevoerd bij een aantal Röntgenenergielijnen en bij een Cs-137 bron van bekende activiteit; zie Bijlage 1. Beter dan de enkele energielijn van Cs-137 (662 keV) zou een gewogen VSL responsfactor zijn, samengesteld uit de diverse Röntgen-energiegebieden, zie Bijlage B2. In elk energiedeelgebied is de fractie aan netto counts in dat deel van het spectrum vermenigvuldigd met de door VSL bepaalde responsie (de responsie is ratio tussen het aangeboden dosistempo en het gemeten dosistempo). Zie Tabel 6.

⁶ AJJ Bos, FS Draaisma, WJC Okx, Inleiding tot de stralingshygiëne (2007), Bijlage E Dosisconversiecoëfficiënten voor externe blootstelling, pag. 387.

Tabel 6 VSL responsie gewogen naar energiedeelgebied in het netto gammaspectrum opgenomen op locatie 22A.

VSL ref.	Energie keV	Spectrum ROI keV	Netto counts*	Fractie	VSL responsie Sv.Sv ⁻¹	Gewogen respons
N-80	65	50-75	60927	15%	0.5	0.073
N-100	83	75-91	48535	12%	1.01	0.117
N-120	100	91-109	49542	12%	1.19	0.141
N-150	118	109-141	70689	17%	1.22	0.207
N-200	165	141-186	65686	16%	1.10	0.173
N-250	207	187-228	38451	9%	1.04	0.096
N-300	248	229-270	21348	5%	0.97	0.050
Cs-137	662	270-668	62265	15%	1.00	0.149
Totaal			417443	100%		1.01

* het spectrum opgenomen op locatie MONET-32 heeft gediend als achtergrond

Optellen van de VSL responsie, gewogen naar deelenenergiegebied, leidt naar een gewogen gesommeerde responsiefactor van 1,01. Dit betekent dat een Cs-137 gekalibreerde Reuter Stokes H*(10)-meting aan een verstrooid spectrum niet significant afwijkt van een H*(10)-meting aan een Cs-137 bron.

5.2 Neutronendosistempo bij VOG (22) en Heerema (22A)

In tabel 7 staat een overzicht van de neutronendosistempi die door COVRA en RIVM gemeten zijn. De meetonzekerheden van de dosistempi bevinden zich in de orde van 15-25 % afhankelijk van de meettijd van een dag (8 uur) of een nacht (16 uur). Binnen de meetonzekerheden komen de neutronendosistempi van COVRA en RIVM goed met elkaar overeen.

Tabel 7 Neutronendosistempi gemeten door COVRA en RIVM op locatie 22 en 22A.

Neutronendosistempo	VOG-1 (22)		Heerema (22A)	
	COVRA	RIVM	COVRA	RIVM
H*(10) (μSv/a)	313	349 ± 13	103	125 ± 15

Energierespons van de Biorem FHT 752

Zowel COVRA als RIVM gebruiken een Biorem FHT 752 met een ¹⁰Bf₃ detector. Beide detectoren zijn in Mol (B) gekalibreerd en hebben voor de omrekening van counts per minuut naar H*(10) vrijwel gelijke kalibratiefactoren.

Uit de literatuur (Kralik et al.⁷) blijkt dat de Biorem FHT 752 bij een gemodereerd neutronenspectrum een overrespons van een factor 2 kan geven. Het is erg lastig om te bepalen welke deel van het neutronenspectrum inderdaad tot dat gemodereerde deel behoort. Onzekerheden in de neutronendosisbijdrage liggen in de orde van 30 tot 50 % (ruw geschat).

⁷ M. Kralik et al. Dosimetry at an interim storage for spent fuel. Rad. Prot. Dos., 2007, p. 1-6.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In Tabel 7 zijn de meetresultaten van COVRA en RIVM op meetlocaties VOG-1 (22) en Heerema (22A) samengevat.

Tabel 7 Vergelijking van COVRA en RIVM gamma- en neutronendosistempo op locaties 22 en 22A ($\mu\text{Sv/a}$)

Gammadosis	COVRA	RIVM	COVRA	RIVM
Meetlocatie	VOG-1 (22)	VOG-1 (22)	Heerema (22A)	Heerema (22A)
RS* Eff dosis E ($\mu\text{Sv/a}$)	472	-	31	-
RS H*(10) ($\mu\text{Sv/a}$)	-	702 \pm 30	-	183 \pm 27
Saphymo ($\mu\text{Sv/a}$)		659 \pm 42		172 \pm 35
Neutronendosis				
H*(10) ($\mu\text{Sv/a}$)	313	349 \pm 13	103	125 \pm 15

* RS = Reuter Stokes

Gammadosismetingen

- Op meetlocatie VOG-1 (22) komen Reuter Stokes-metingen van de ruwe exposie door COVRA en RIVM zeer goed overeen. De door COVRA berekende effectieve dosis E wijkt af van het door RIVM gerapporteerde omgevingsdosis-equivalenttempo $H^*(10)$. Dat is verklaarbaar vanwege de verschillende grootheden, E en $H^*(10)$, die door COVRA en RIVM gemeten en gerapporteerd worden.
- Op meetlocatie Heerema (22A) komen Reuter Stokes-metingen van de netto exposie door COVRA en RIVM niet overeen. Dit is verklaarbaar door de afwijkende achtergrondcorrectie die COVRA en RIVM beiden hanteren. COVRA past 'oude' Reuter Stokes-metingen toe voor de bijdrage van terrestrische straling, en COVRA gebruikt CARI-6 berekeningen voor de bijdrage van de kosmische straling. RIVM gebruikt een achtergrondmeting op locatie MONET-32 vanwege de constante en lage meetwaarde. Hierbij is aangenomen dat op locatie MONET-32 de terrestrische straling plus de kosmische straling gelijk is aan meetlocatie (22) en (22A). Het is niet helder welke wijze van correctie voor de bijdrage van terrestrische en kosmische straling het meest correct is. Voor beide methoden is wat te zeggen.
- De $H^*(10)$ meetwaarden van RIVM, gemeten met de Reuter Stokes en de Saphymo, komen goed overeen. In beide gevallen is gecorrigeerd voor de achtergrond door een meting op locatie MONET-32.
- De Reuter Stokes van RIVM is door VSL gekalibreerd op basis van de energie van Cs-137 (662 keV). De VSL responsiefactoren in een aantal Röntgenenergiegebieden resulteren in een gewogen deel-responsiefactor in elk energiedeelgebied van het gammaspectrum (opgenomen op locatie 22A). Optellen van de

deel-responsie, gewogen naar deelenergiegebied, leidt naar een gewogen gesommeerde responsiefactor van 1,01. Dit betekent dat een $H^*(10)$ -meting met een Cs-137 gekalibreerde Reuter Stokes aan een verstrooid spectrum, zoals opgenomen op locatie 22A, niet significant afwijkt van een $H^*(10)$ -meting aan een Cs-137 bron.

Neutronendosismetingen

1. De COVRA en RIVM neutronendosismetingen zijn goed met elkaar in overeenstemming. Neutronenmetingen kenmerken zich door lage telsnelheden en lange teltijden, vaak 8-10 uur. De statistische onzekerheid in de metingen is dan ook groot, afhankelijk van het teltempo.
2. De door COVRA en RIVM gebruikte Biorem 752 monitoren zijn identiek waardoor een eventuele systematische fout wegvalt. Uit de literatuur⁷ blijkt dat de Biorem 752 bij een gemodereerd neutronen-energiespectrum een overrespons kan geven van maximaal een factor 2. Het is echter praktisch erg lastig om het neutronenenergiespectrum te bepalen. Alleen PTB (D) en NPL (UK) beheersen deze complexe meettechniek met Bonner spheres.

6.2 Aanbeveling

RIVM beveelt aan om op de locaties 22 en 22A de bijdrage van de terrestrische en kosmische straling grondig in kaart te brengen, inclusief de bijbehorende onzekerheden. RIVM is bereid om in opdracht van de ANVS een plan op te stellen voor het bepalen van de terrestrische en kosmische straling.

Bijlage 1 VSL kalibratiecertificaten van de Reuter Stokes

B1 De responsie van de RS-131 bij diverse ^{137}Cs en ^{60}Co dosistemp.

M is gecorrigeerd voor de bijdrage van de achtergrondstraling en voor de nulwaarde. Tijdens de kalibratie was deze bijdrage: $(93 \pm 2) \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$. De onzekerheid in M is enkel gebaseerd op de statistische spreiding. De responsie, R , is de ratio tussen M en het aangeboden omgevingsdosisequivalenttempo, $H^*(10)$.

Nuclide	SDD	Bundel- grootte	Aangeboden		M	R	Relatieve afwijking
	cm		$H^*(10)$	$\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$			
^{137}Cs	418	63		$100 \text{ n} \pm 7 \%$	$93 \text{ n} \pm 6,0 \%$	$0,93 \pm 10 \%$	-7
^{137}Cs	266	40		$250 \text{ n} \pm 7 \%$	$240 \text{ n} \pm 1,8 \%$	$0,96 \pm 8 \%$	-4
^{137}Cs	292	44		$2,50 \mu \pm 5 \%$	$2,47 \mu \pm 0,5 \%$	$0,99 \pm 5 \%$	-1
^{137}Cs	503	75		$90,0 \mu \pm 5 \%$	$89,5 \mu \pm 0,1 \%$	$0,99 \pm 5 \%$	-1
^{137}Cs	228	34		$450 \mu \pm 5 \%$	$442 \mu \pm 0,1 \%$	$0,98 \pm 5 \%$	-2
^{137}Cs	446	67		$20,0 \text{ m} \pm 5 \%$	$20,0 \text{ m} \pm 0,7 \%$	$1,00 \pm 5 \%$	0
^{60}Co	228	34		$70,0 \mu \pm 5 \%$	$71,5 \mu \pm 0,1 \%$	$1,02 \pm 5 \%$	+2
^{60}Co	230	34		$650 \mu \pm 5 \%$	$660 \mu \pm 0,0\%$	$1,02 \pm 5 \%$	+2

B2 De responsie van de RS-131 bij diverse Röntgenenergieën

De responsie, R , is de ratio tussen M en het aangeboden omgevingsdosisequivalenttempo, $H^*(10)$.

Referentie	Hoog- spanning	E_{mean}	1^e HVD	Aangeboden		M	R	Relatieve afwijking
	kV			keV	mm			
N-60	60	48	0,24	Cu	$1,96 \pm 5 \%$	$0,11 \pm 0,1 \%$	$0,05 \pm 5 \%$	-95
N-80	80	65	0,58	Cu	$2,00 \pm 5 \%$	$0,99 \pm 0,0 \%$	$0,50 \pm 5 \%$	-50
N-100	100	83	1,11	Cu	$1,99 \pm 5 \%$	$2,00 \pm 0,1 \%$	$1,01 \pm 5 \%$	+1
N-120	120	100	1,70	Cu	$1,99 \pm 5 \%$	$2,36 \pm 0,0 \%$	$1,19 \pm 5 \%$	+19
N-150	150	118	2,35	Cu	$1,92 \pm 5 \%$	$2,34 \pm 0,0 \%$	$1,22 \pm 5 \%$	+22
N-200	200	165	3,96	Cu	$1,96 \pm 5 \%$	$2,16 \pm 0,0 \%$	$1,10 \pm 5 \%$	+10
N-250	250	207	5,14	Cu	$1,95 \pm 5 \%$	$2,02 \pm 0,1 \%$	$1,04 \pm 5 \%$	+4
N-300	300	248	6,07	Cu	$1,98 \pm 5 \%$	$1,93 \pm 0,1 \%$	$0,97 \pm 5 \%$	-3

Conclusies:

1. De Reuter Stokes geeft voor ^{137}Cs een onderrespons van maximaal 2 %; voor ^{60}Co een overrespons van maximaal 2 %.
2. De Reuter Stokes geeft voor energieën < 83 keV een onderrespons die zelfs kleiner dan 5 % kan worden voor energieën < 48 keV. In het energiegebied 100-200 keV is sprake van een overrespons. Aangenomen wordt dat de onderrespons en de overrespons elkaar enigszins uitmiddelen

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag