



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

**Metingen van het gamma- en
neutronendosis tempo aan de terreingrens
van de Hoge Flux Reactor en bij de
Stekhal van NRG te Petten in 2018.**

RIVM-briefrapport 2020-0081
(Revisie van rapport 2018-0182)
P.J.M. Kwakman | C.P. Tanzi



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu

*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Metingen van het gamma- en
neutronendosis tempo aan de terreingrens
van de Hoge Flux Reactor en bij
de Stekhal van NRG te Petten in 2018.**

RIVM-briefrapport 2020-0081
(Revisie van rapport 2018-0182)
P.J.M. Kwakman | C.P. Tanzi

Colofon

© RIVM 2020

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.

DOI 10.21945/RIVM-2020-0081

P.J.M. Kwakman (auteur), RIVM
C.P. Tanzi (auteur), RIVM

Contact:

P. Kwakman
Centrum Veiligheid
Pieter.kwakman@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) ten laste van het project M/390020/18/SM, in het kader van Algemene Ondersteuning Inspectie/straling, kenmerk opdrachtbrief "H-190686-01-PAR" van 7 dec 2017.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Metingen van het gamma- en neutronendosis aan de terreingrens van de Hoge Flux Reactor en bij de Stekhal van NRG te Petten in 2018.

Revisie van rapport 2018-0182.

Op het terrein van de Onderzoekslocatie Petten heeft het RIVM in 2018 gemeten hoeveel de Hoge Flux Reactor (HFR) bijdroeg aan de dosis gamma en neutronen in de omgeving. De hoogst gemeten dosis bedraagt 33 microsievert per jaar. De bijdrage van neutronen, mogelijk afkomstig van de Hoge Flux reactor, is verwaarloosbaar.

In dezelfde periode is ook naast de ingang van de Stekhal, eveneens op de Onderzoekslocatie Petten, de omgevingsdosis gemeten. De hoogste dosis is daar 7 microsievert per jaar. Transporten van radioisotopen door Curium ter hoogte van het hek nabij de HFR leveren een jaardosis van 4,4 microsievert.

In de dosis is de blootstellingscorrectiefactor verwerkt. Deze factor brengt in rekening hoe lang iemand daadwerkelijk per jaar aan de terreingrens verblijft. Het RIVM heeft de metingen eenmalig in de eerste helft van 2018 uitgevoerd in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

Kernwoorden: Hoge Flux Reactor, Stekhal, omgevingsdosis, neutronen dosis, NRG Petten.

Synopsis

Measurements of the ambient dose and neutron dose at the fence of the High Flux Reactor and at the Stekhal of NRG, Petten, in 2018.

Revision of report 2018-0182.

In 2018, RIVM determined the ambient dose and the neutron dose at the fence of the High Flux Reactor at the research location Petten. The highest ambient dose is 33 microsievert per year. The contribution of neutrons, possibly originating from the High Flux reactor, is negligible.

At the entrance of the Stekhal, situated in the same location, the highest ambient dose is 7 microsievert per year. Transport of radioisotopes by Curium results in an ambient dose of 4.4 microsievert per year at the fence near the HFR. In the ambient dose the actual exposure correction factor is taken into account. This factor is based on the actual time in a year in which a person stays at the fence.

RIVM carried out these measurements in the first half of 2018. The work was commissioned by the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS).

Keywords: High Flux reactor, Stekhal, ambient dose, neutron dose, NRG Petten.

Inhoudsopgave

Samenvatting – 9

1 Inleiding – 11

- 1.1 De aanleiding – 11
- 1.2 De opdracht van de ANVS – 11
- 1.3 Uitvoering van de opdracht – 11
- 1.4 Revisie – 12

2 Apparatuur en methodes – 13

- 2.1 Plattegrond met de plaatsing van de monitoren – 13
- 2.1.1 Gammadosisequivalenttempo met autonome Saphymo monitoren – 14
- 2.1.2 Gammadosisequivalenttempo met Reuter Stokes – 15
- 2.1.3 Gammaspectroscopische meting – 16
- 2.1.4 Neutronendosis tempo metingen – 16
- 2.2 Productiecycli van de HFR – 17
- 2.3 Kwaliteitssysteem – 17

3 Meetresultaten – 19

- 3.1 Algemeen – 19
- 3.1.1 Eigenschappen van Ar-41, N-16 en Na-24 – 19
- 3.2 Meetresultaten van de gammamonitoren 91, 92 en 95 naast de HFR – 19
- 3.3 Meetresultaten van de gammadosis tempo monitoren 93 en 94 naast de Stekhal. – 22
- 3.4 Gammadosis tempo bepaald op 9 november 2018 met de Reuter Stokes ionisatiekamer – 24
- 3.5 Bijdrage van neutronen op 9 november 2018 bepaald met de Biorem 752FHT – 25
- 3.6 Meting van het gammaspectrum op 9 november 2018 met de Falcon 5000 – 26

4 Bepaling van het omgevingsdosis tempo van de achtergrond – 29

- 4.1 Bepaling van de achtergrond met NMR-1006 – 29
- 4.2 Vergelijking monitoren 94 en 95 met NMR-1006 op 25 juli 2018 – 29

5 Dosisberekeningen en onzekerheden – 31

- 5.1 Dosis berekeningen – 31
- 5.2 Onzekerheden in de berekening van de jaarlijks toegevoegde dosis – 33

6 Conclusies en aanbevelingen – 35

7 Bijlage A Bepaling dosisbijdrage van Curium-transporten – 37

8 Bijlage B Toegevoegde omgevingsdosis bij gebouw 28 (Stekhal). – 39

9 Bijlage C Revisie van rapport 2018-0182 inhoudelijke en redactionele wijzigingen – 41

10 Referenties – 43

Samenvatting

Metingen van het gamma- en neutronendosis aan de terreingrens van de Hoge Flux Reactor en bij de Stekhal van NRG te Petten in 2018.

Revisie van rapport 2018-0182.

Op het terrein van de Onderzoekslocatie Petten heeft het RIVM in 2018 gemeten hoeveel de Hoge Flux Reactor (HFR) bijdroeg aan de dosis gamma en neutronen in de omgeving. De hoogst gemeten dosis bedraagt 33 microsievert per jaar. De bijdrage van neutronen, mogelijk afkomstig van de Hoge Flux reactor, is verwaarloosbaar.

In dezelfde periode is ook naast de ingang van de Stekhal, eveneens op de Onderzoekslocatie Petten, de omgevingsdosis gemeten. De hoogste dosis is daar 7 microsievert per jaar. Transporten van radioisotopen door Curium ter hoogte van het hek nabij de HFR leveren een jaardosis van 4,4 microsievert.

In de dosis is de blootstellingscorrectiefactor verwerkt. Deze factor brengt in rekening hoe lang iemand daadwerkelijk per jaar aan de terreingrens verblijft. Het RIVM heeft de metingen eenmalig in de eerste helft van 2018 uitgevoerd in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

Dit rapport is in een eerste en vertrouwelijke versie uitgebracht in 2019 en januari 2020 besproken met de opdrachtgever en met een inhoudelijk deskundige van NRG. Op basis van aanvullende informatie en openstaande vragen is besloten om dit rapport uit te brengen als revisie van het eerste rapport 2018-0182.

1 Inleiding

1.1 De aanleiding

De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (hierna: ANVS) heeft RIVM verzocht om in 2018 aan het hek nabij de HFR en nabij de Stekhal (onderdeel van gebouw 28) van NRG, op het onderzoeksterrein te Petten metingen van het omgevingsdosistempo te verrichten [1]. Het betreft de bepaling van de toegevoegde dosis als gevolg van gammastraling en neutronen. De redenen daarvoor waren dat uit de rapportages van NRG is gebleken dat op enkele locaties nabij de HFR de toegestane jaarlimiet benaderd wordt en dat de dosis aan de terreingrens bij de Stekhal in 2017 de maximale toegestane waarde had overschreden.

1.2 De opdracht van de ANVS

De opdracht van de ANVS [1] betreft het uitvoeren van dosisequivalenttempometingen, met autonome Saphymo-monitoren, op twee locaties aan de inrichtingsgrens van NRG te Petten; zie Figuur 1.

1. De twee locaties zijn locatie 1, de inrichtingsgrens ter hoogte van de Stekhal van gebouw 28 (Fermigebouw). En locatie 2, de gemeenschappelijke inrichtingsgrens met Curium (Mallinckrodt Medical B.V.) ter hoogte van de HFR.
2. Het uitvoeren van dosisequivalenttempometingen op dezelfde locatie voor het bepalen van het achtergrondstralingsniveau.
3. Een inschatting van de Actuele Individuele Dosis (AID) ten gevolge van handelingen door NRG voor zowel locatie 1 als 2.
4. Een inschatting van de bijdrage als gevolg van transporten door Curium ter hoogte van locatie 2 en een inschatting van de bijdrage van transporten van en naar de HFR bij locatie 2.
5. Onderscheid tussen een continue bijdrage van gebouw 28 op locatie 1 en de bijdrage ten gevolge van logistieke activiteiten (laden en lossen) in en nabij gebouw 28.

1.3 Uitvoering van de opdracht

RIVM heeft in 2018 op twee locaties het volgende onderzoek uitgevoerd:

- Op locatie 1 (nabij Stekhal) is in de periode 12 januari tot 24 juli 2018 het gammadosisequivalenttempo bepaald met autonome Saphymo monitoren nr 93 en 94.
- Op locatie 2 (aan het hek nabij HFR) is in dezelfde periode het gammadosisequivalenttempo bepaald met autonome Saphymo monitoren nr 91, 92 en 95.
 - Op locatie 2 zijn op 9 november 2018 tussen 11 en 14 uur drie aanvullende metingen verricht. Dit betrof :
 - Een meting van het gammaspectrum ;
 - Bepaling van het gammadosisequivalenttempo met de Reuter Stokes hoge druk ionisatie kamer, inclusief het bepalen van het dosistempo op een representatieve achtergrondlocatie;
 - Bepaling van het neutronendosistempo.

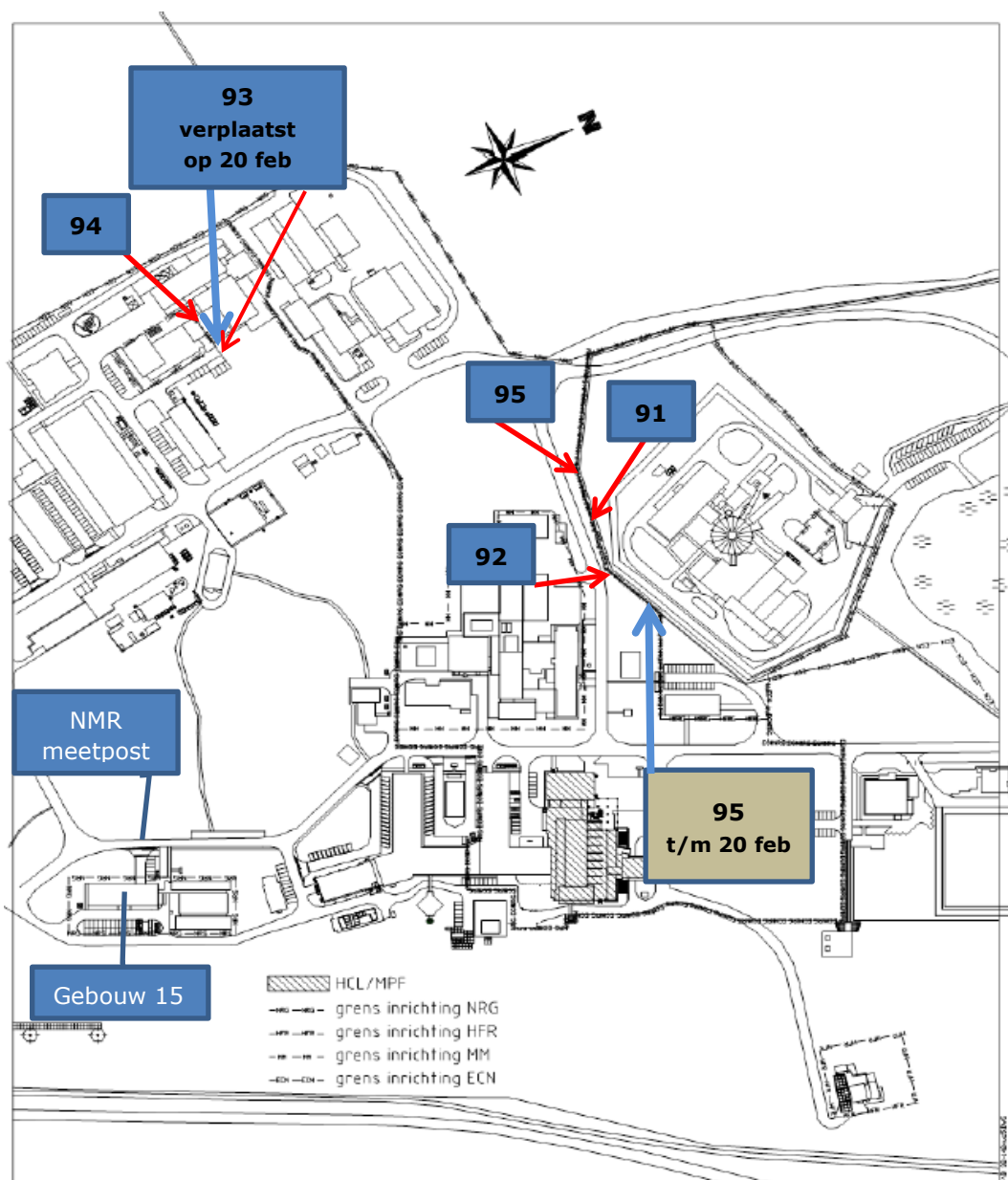
1.4 Revisie

Dit rapport is in een eerste en vertrouwelijke versie uitgebracht in 2019 en januari 2020 besproken met de opdrachtgever en met een inhoudelijk deskundige van NRG. Op basis van aanvullende informatie en openstaande vragen is besloten om dit rapport uit de brengen als revisie van het eerste rapport 2018-0182.

2 Apparatuur en methodes

2.1 Plattegrond met de plaatsing van de monitoren

In figuur 1 is een plattegrond die laat zien waar de autonome Saphymo monitoren zijn geplaatst tussen januari en juli 2018.



Figuur 1 Schematische weergave van de locatie van de draagbare monitoren tussen 13 januari en 24 juli 2018 op het terrein van onderzoekslocatie Petten. De blauwe pijl laat de locatie van monitoren 93 en 95 zien tussen 13 januari en de verplaatsing op 20 februari 2018. De rode pijlen geven de locaties voor alle monitoren aan vanaf 21 februari 2018.

2.1.1

Gammadosisequivalenttempo met autonome Saphymo monitoren

De ingezette autonome gammamonitoren zijn van het type Saphymo Gamma-TRACER XL2 [2] (Geiger-Müller telbuis). Deze monitoren geven gedurende de hele meetperiode van ca. 6 maanden zowel op 1 minuut als elke 10 minuten een gammadosis tempo ($\mu\text{Sv/h}$).

De Saphymo monitoren vertonen lichte onderrespons onder de 100 keV. Tevens een overrespons in de energierange > 1000 keV. Hier wordt nader op ingegaan bij de bespreking van de resultaten van het gamma-energiespectrum, opgenomen met de Falcon 5000.

Hetzelfde type monitoren is in 2017 tijdelijk operationeel geweest aan het hek van de kerncentrale Borssele [3]. Van hetzelfde type zijn vier van de twaalf monitoren operationeel bij de terreingrens van COVRA [4].



Figuur 2 Saphymo autonome gammamonitor.

2.1.2

Gammadosisequivalenttempo met Reuter Stokes

De Reuter Stokes RS-S131-200 is een hoge druk ionisatiekamer met vlakke respons over een breed energiebereik voor gammaenergie boven 100 keV. De meetperiode bedraagt telkens 30 sec waardoor er gedurende ongeveer 2 uur ongeveer 240 meetwaarden zijn verzameld. Tevens is de respons snel, minder dan 10 s, waardoor een passerend transport van Curium goed te detecteren is. Op 9 november 2018 is de Reuter Stokes op dezelfde locatie geplaatst waar Saphymo meetpost 95 heeft gestaan tussen 21 februari en 24 juli 2018.



Figuur 3 Reuter Stokes RS-S131 hoge druk ionisatiekamer

De Reuter Stokes ionisatiekamer vertoont een onderrespons voor energieën < 100 keV. Hier wordt nader op ingegaan bij de bespreking van de resultaten van het gamma-energiespectrum, opgenomen met de Falcon 5000.

2.1.3 *Gammaspectroscopische meting*

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.



Figuur 4 Falcon 5000 draagbare gammaspectrometrie opstelling

2.1.4 *Neutronendosis tempo metingen*

De neutronen dosis tempo metingen zijn verricht met gebruikmaking van een Thermo Biorem FHT752 neutronendetector. 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 $(0,49 \pm 0,04)$ cps per $\mu\text{Sv/h}$ voor een ^{252}Cf -neutronen-bron en is zeer ongevoelig voor gammastraling ($< 0,01$ cps bij 100 mSv/h voor een ^{137}Cs -bron).



Figuur 5 Biorem FHT752 neutronenmonitor met $^{10}\text{BF}_3$ detector.

2.2 Productiecycli van de HFR

Er zijn met de gammamonitoren continu metingen verricht van het gammadosistempo tijdens de eerste zeven maanden van 2018, van 12 januari rond 13 uur t/m 25 juli rond 13 uur. De analyse van de meetdata wordt op de dagen 13 jan t/m 24 juli uitgevoerd. Tijdens die periode was de HFR gedurende vijf cycli in bedrijf.

De door HFR gemelde aan/uit periodes volgens de planning in 2018 zijn in onderstaand tabel gegeven. Over het jaar 2018 is er een totaal van 265 dagen met HFR in vol vermogen ("HFR aan") gepland. Vanwege ongepland onderhoud in oktober 2018 is het totaal aantal dagen met "HFR aan" in 2018 minder dan de geplande 265 dagen geweest, namelijk 254 dagen. Voor de schatting van de toegevoegde dosis wordt er conservatief van uitgegaan dat er volgens schema 265 dagen productie is geweest.

Tabel 1 Geplande cycli van de HFR "AAN" en "UIT" in de eerste helft van 2018.

Periode in 2018	begin	Einde	"HFR aan" (dagen)	"HFR uit" (dagen)
Cyclus01	11-01	11-02	31 [28 tijdens metingen]	
Onderhoud01	11-02	01-03	(20-02 verplaatsing #93 en #95)	18
Cyclus02	01-03	01-04	31	
Onderhoud02	01-04	05-04		4
Cyclus03	05-04	06-05	31	
Onderhoud03	06-05	17-05		11
Cyclus04	17-05	17-06	31	
Onderhoud04	17-06	22-06		4
Cyclus05	22-06	22-07	31	
Onderhoud05	22-07	25-07 (ophaal)		[3 tijdens metingen]

Het aantal meetdagen met "HFR aan" beslaat 152 dagen; dus 57% van het totaal aan geplande dagen. Voor de schatting van het toegevoegde $dH^*(10)/dt$ voor het hele jaar 2018, voor de monitoren 91 en 92 met zicht op de HFR, wordt een vermenigvuldigingsfactor van $(265/152 =) 1,75$ toegepast op de metingen. Omdat monitor #95 op 20 februari verplaatst is, worden voor deze monitor de metingen vanaf 21 februari verrekend. Dit betekent 124 dagen met "HFR aan" en een factor van $(265/124 =) 2,14$ voor de schatting van het hele jaar 2018.

Voor de monitoren 93 en 94 naast de Stekhal is de invloed van de HFR (aan/uit) verwaarloosbaar. De vermenigvuldigingsfactor wordt dan gegeven door het aantal meetdagen t.o.v. het hele jaar.

2.3 Kwaliteitssysteem

Het Centrum Veiligheid van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM/VLH) is voor een aantal verrichtingen geaccrediteerd door de RvA volgens NEN-EN-ISO-17025 (registratienummer L153). Deze verrichtingen hebben betrekking op monsternamen en metingen die worden uitgevoerd in het kader van het toezicht op nucleaire installaties (ANVS), het Nationaal Meetnet Radioactiviteit en milieumonitoring ter uitvoering van het EURATOM Verdrag.

De metingen zoals beschreven in dit rapport vallen onder standaard verrichtingen voor wat betreft de metingen met het Nationaal Meetnet radioactiviteit met Saphymo monitoren; Verrichting NMR Omgevingsdosistempometingen.

De metingen die uitgevoerd zijn met de Reuter Stokes en met de neutronenmonitor Biorem FHT752 vallen daar niet onder.

Waar mogelijk is echter in overeenstemming met de standaard procedures voor kwaliteitsborging gewerkt, in het bijzonder ten aanzien van validatie van de kwantitatieve aspecten.

3 Meetresultaten

3.1 Algemeen

De Saphymo monitoren 91, 92 en 95 hebben in de ca 6 maanden durende meetperiode duidelijk twee zaken geregistreerd:

1. Het aanzetten van de HFR leidt tot een continue verhoging van de drie monitoren. Op die continue verhoging is een repeterende zaagtaand-achtige structuur waarneembaar.
2. De transportpieken van Curium zijn het hoogst gemeten door monitor 92 die nabij de laad- en losplaats staat. Deze transporten vinden dus ook plaats als de HFR uit staat.

3.1.1 *Eigenschappen van Ar-41, N-16 en Na-24*

Ar-41 wordt gevormd door neutronenactivering van Ar-40 in de lucht; buitenlucht bevat van nature 0,94 % Ar-40. Het is aannemelijk dat de koepel van de HFR tijdens de productietijd gevuld is met een gering percentage Ar-41. Bij het uitschakelen van de HFR, bijvoorbeeld bij de start van een onderhoudsperiode, vervalt Ar-41 met een halveringstijd van 1,83 h met het uitzenden van een gammafoton van 1293 keV.

N-16 wordt gevormd door neutronenactivering (n,p) van ¹⁶O in het primaire circuit en in het koelwater. N-16 vervalt zeer snel (halveringstijd van 7,1 s) met uitzenden van een gammafoton van 6,1 MeV.

Na-24 wordt gevormd door neutronenactivering van Na-23. Na-24 vervalt snel (halveringstijd van 14,96 h) met het uitzenden van twee gammafotonen; van 1368 en van 2754 keV.

3.2 Meetresultaten van de gammamonitoren 91, 92 en 95 naast de HFR

In Figuur 7 zijn de 10-minuutdata weergegeven van de Saphymo monitoren 91, 92 en 95. Duidelijk is te zien dat monitor 92, die het dichtst bij de laad- en losplaats van Curium staat, de hoogste Curium-transportpieken laat zien. Monitor 95 staat niet het dichtst bij de HFR, maar heeft wel een gunstigere "kijkhoek" naar het dichtstbij zijnde gebouw, het primair pompgebouw.

Bij alle drie de monitoren is de invloed van de HFR productiestatus "aan/uit" duidelijk waarneembaar. Bij de monitoren is de 'baseline', ofwel het gammadosistempo als de HFR uit staat, ongeveer 70-75 nSv/h. Als de HFR aangezet wordt neemt het dosistempo toe, en wel bij monitor 91 (geel) naar ca. 200 nSv/h, bij monitor 92 (groen) naar ca. 130 nSv/h, en bij monitor 95 (bruin) naar ca. 250 nSv/h. Zie Bijlage A.

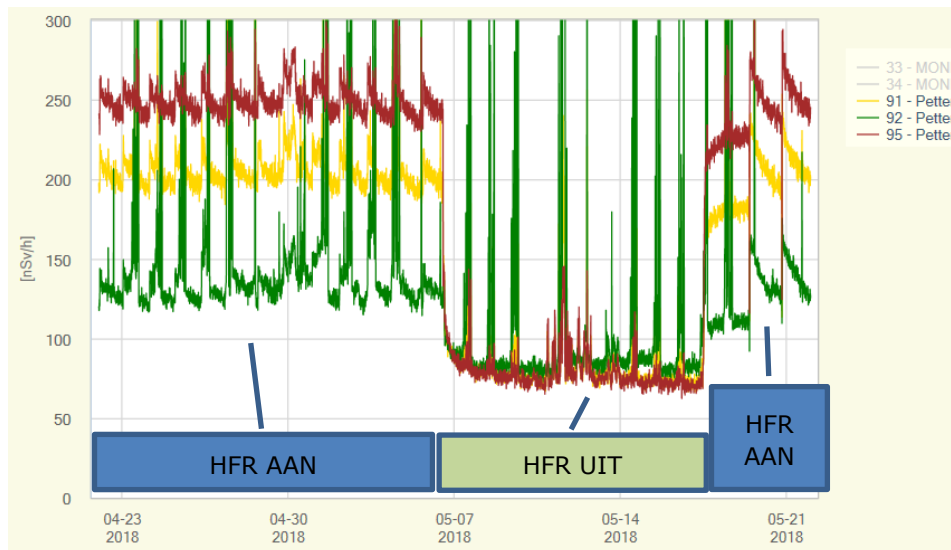
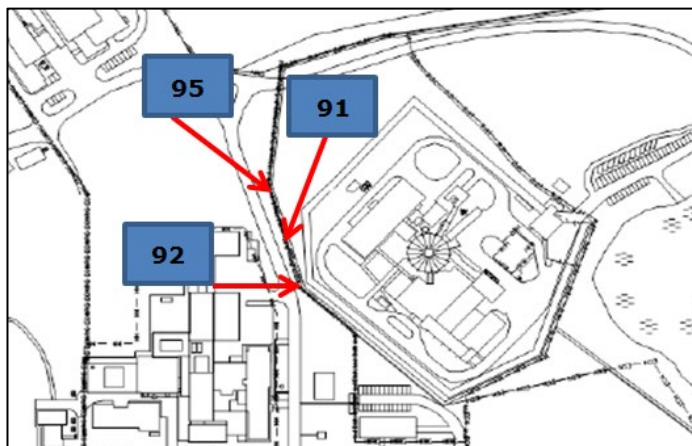


Fig 7 Voorbeeld van HFR aan en uit (6 mei) voor de monitoren 91 (geel), 92 (groen) en 95 (bruin). De Curium-transportpieken vinden onafhankelijk van de HFR plaats en vallen ruim buiten de schaal.

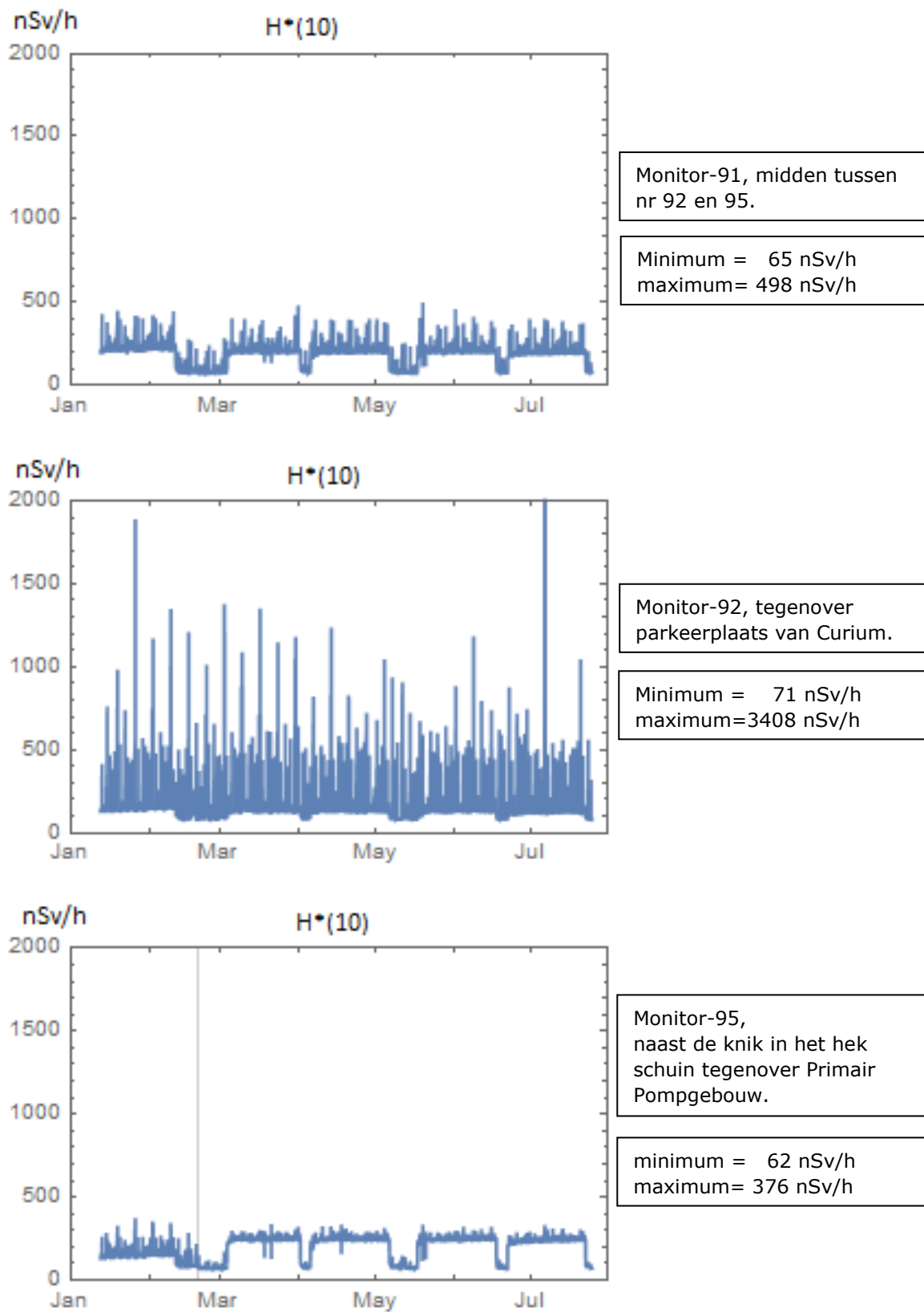
In Figuur 8a zijn de locaties gegeven van de monitoren 91, 92 en 95 aan het hek nabij de HFR. Duidelijk is dat monitor 92, tegenover het parkeerterrein van de Curium-transporten, de laagste toename meet als gevolg van het aanzetten van de HFR, maar ook de hoogste Curium-transportpieken registreert.

Verder meet monitor 95 de hoogste toename in omgevingsdosistempo in de productietijd van de HFR.



Figuur 8a Locaties van de monitoren 91, 92 en 95 aan het hek nabij de HFR (monitor 95 vanaf 21-2-2018)

In Figuur 8b is de totale meetperiode gegeven voor de monitoren 91, 92 en 95 op de schaal waar de meeste transportpieken ook op passen; de y-as is identiek in de drie figuren.



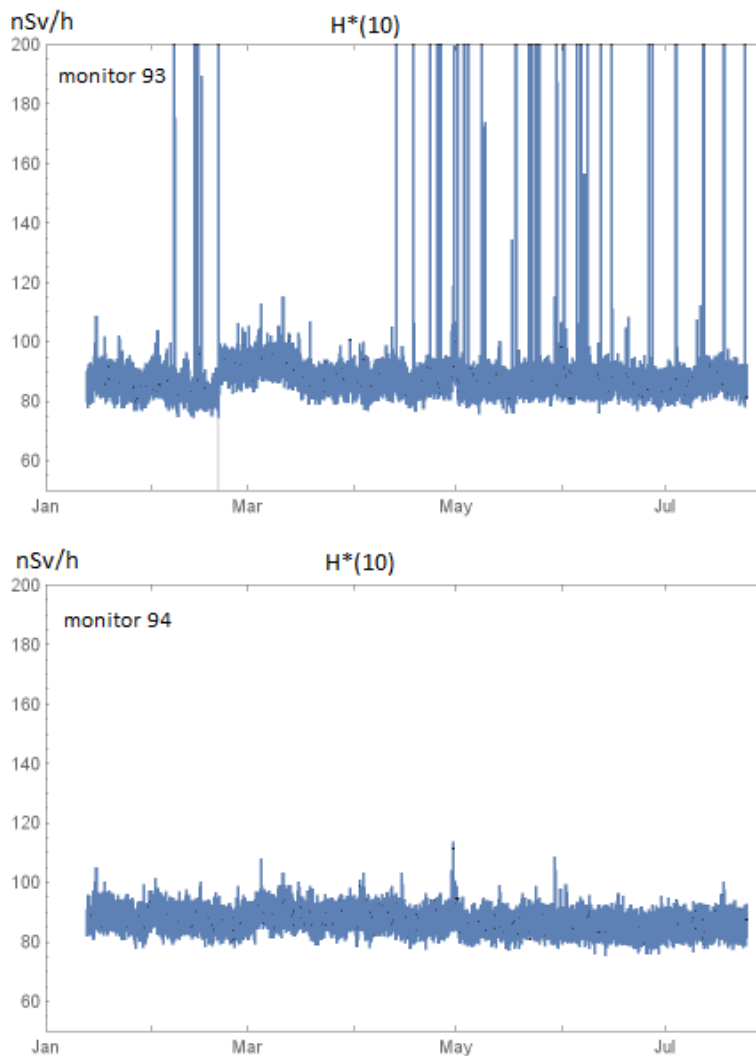
Figuur 8b Monitoren 91, 92 en 95; 10 min sampling. Monitor 95 is op 20 februari 2018 verplaatst (aangegeven door de verticale lijn).

Voor een realistische backgroundcorrectie is gekozen voor de NMR meetpost 1006 die ook op het terrein van NRG staat, aan de overkant van de weg tegenover gebouw 15.

De 'NMR-1006' achtergrond bedraagt gemiddeld 66,6 nSv/h. Voor de bepaling van deze achtergrond zijn de transportpieken, die ook bij NMR-1006 waarneembaar zijn, uitgefilterd, zie Tabel 3. Door het brutostralingsniveau van de monitoren 91, 92 en 95 te verminderen met 66,6 nSv/h wordt het *toegevoegde* stralingsniveau bepaald.

3.3 Meetresultaten van de gammadosistempommonitoren 93 en 94 naast de Stekhal.

Onderstaande figuren laten de metingen zien (10 min sampling) van de monitoren 93 en 94 naast de Stekhal. Op 20 februari 2018 is monitor 93 enkele meters verplaatst om een betere 'kijkhoek' te hebben naar de ingang van de Stekhal. De verticale lijn laat de datum van de verplaatsing zien (20 februari 2018).



Figuur 9 Monitoren 93 (boven) en 94 (onder) naast de Stekhal. Monitor 93 is op 20 februari verplaatst (verticale lijn), 10 min meetwaarden (nSv/h).

Uit Figuur 9 blijkt duidelijk dat monitor 93 alle laad- en losactiviteiten waarneemt en monitor 94 vrijwel niet. Uit de metingen naast de Stekhal kan het toegevoegde stralingsniveau veroorzaakt door laad- en losactiviteiten op twee manieren berekend worden (zie Bijlage B):

1. Het verschil tussen monitor 93 en monitor 94 (minus offset t.o.v. NMR-1006)
2. De som van alle metingen van monitor 93 minus het gemiddelde van monitor 93 [na uitfiltering van de metingen hoger dan het gemiddelde + 2σ]

De twee berekeningswijzen overlappen enigszins in de benaderingen. De berekende toegevoegde omgevingsdosis uitsluitend door laad- en losactiviteiten bij monitor 93 bedraagt tussen 22,9 en 24,6 μSv tijdens de meetperiode van 154 dagen. Zouden deze activiteiten evenredig over het hele jaar plaatsvinden, dan kan een schatting worden gegeven met een vermenigvuldigingsfactor van (365/154). Dit geeft een schatting van een dosis tussen 54,3 en 58,3 μSv als gevolg van laad- en losactiviteiten.

In tabel 2 zijn de geschatte jaardoses gegeven voor de vijf monitoren 91-95. Van alle monitoren is de achtergrond, bepaald met NMR-1006, afgetrokken. Bij de schattingen van de jaardosis aan het hek nabij de HFR wordt er conservatief van uitgegaan van 265 productiedagen. Dat is voor het jaar 2018 een overschatting omdat er eind oktober 2018 een korte periode met ongepland onderhoud heeft plaatsgevonden [5].

Tabel 2 Totale omgevingsdosis over de meetperiode 13 januari tm 24 juli 2018 (193 dagen) voor #94, #91 en #92 en 21 februari tm 24 juli 2018 (154 dagen) voor #93 en #95, op basis van de 10 min metingen

Locatie	Monitor	Periode (d) / HFR aan (d)	Totaal over periode (μSv)	Achtergrond (μSv) tijdens meetperiode op basis van 66,6 nSv/h	Toegevoegde dosis in meetperiode (μSv)	Factor voor het jaar 2018 (μSv)	Berekende dosis in 2018 (μSv)*
HFR hek-mid	91	193 / 152	838,5	308,6	529,9	265/152*	924
HFR Curium	92	193 / 152	665,5	308,6	356,9	265/152	622
HFR	95	154 / 124	778,7	246,2	532,6	265/124	1138
Geb. 28 Stekhal	93	154	344,2	246,2	98,1	365/154	232**
Geb. 28	94	193	404,2	308,6	95,7	365/193	181

* Alle geschatte toegevoegde doses zijn inclusief alle bijdragen (HFR, Curium-transporten of logistieke activiteiten); zie Tabel 1. Toelichting op de periodes : 265 = aantal operationele dagen van de HFR in 2018; 152 = aantal dagen met HFR-AAN tijdens periode van 193 dagen; 154 = aantal dagen dat monitor-93 en monitor-94 op één plek hebben gestaan; 124 = aantal dagen HFR-AAN voor monitor-95 tijdens 154 dagen periode, na verplaatsing.

** De metingen van monitor 94 kunnen gezien worden als representatief voor de continue bijdrage op locatie 1 bij de Stekhal; deze bedraagt dus 181 $\mu\text{Sv/a}$. Het verschil tussen monitor 93 en 94 is toe te wijzen aan de logistieke activiteiten en bedraagt ca. 51 $\mu\text{Sv/a}$. (vervolg Tabel 2). Dit komt redelijk overeen met de bovengenoemde resultaten na filtering (54,3 - 58,3 μSv). Hierbij is aangenomen dat de continue bijdrage voor monitor 93 en 94 ongeveer gelijk is. Tevens is aangenomen dat het aantal logistieke activiteiten in de meetperiode representatief is voor het hele jaar.

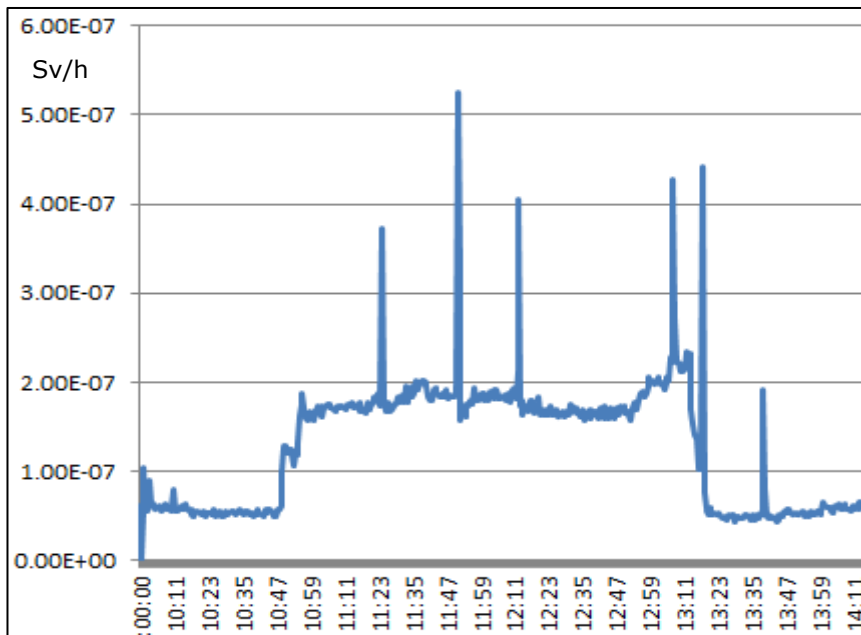
Opvallend is verder dat monitor 92, die aan het hek staat tegenover het parkeerterrein van de Curium radionuclide-transporten, de hoogste transportpieken meet, maar in totaal de laagste jaardosis waarneemt van de monitoren 91, 92 en 95. De tijdsduur van de transportpieken is blijkbaar zo kort dat ze slechts weinig bijdragen aan de totale jaardosis. Oftewel, de totale jaardosis wordt hoofdzakelijk bepaald door de productietijd van de HFR.

3.4 Gammadosis tempo bepaald op 9 november 2018 met de Reuter Stokes ionisatiekamer

Op 9 november 2018 heeft RIVM tussen 11:00 uur en 14:00 uur enkele verschillende metingen uitgevoerd. In Figuur 10 staan de gammadosis-tempometingen van de Reuter Stokes op dezelfde locatie als monitor 95 in de periode januari-juli. De Reuter Stokes geeft elke 30 sec een meetwaarde (zie Figuur 10).

Resultaat:

Het bruto dosistempo, waar de transportpieken vanaf zijn getrokken, bedraagt 179 ± 15 nSv/h. De onzekerheid in dit getal is de standaarddeviatie (1σ) over alle metingen; zie Figuur 10.



Figuur 10 Gammadosis tempometing met de Reuter Stokes op 9 november 2018 van ca. 10:50 tot 13:10 uur. Locatie van meetpost 95 ; 30 sec meting (y-as = Sv/h).

Elders op het terrein, naast het parkeerterrein tegenover het restaurantgebouw, is een achtergrond gemeten van 56 ± 7 nSv/h boven zandgrond. Het netto gammadosis tempo voor de situatie dat de HFR in productie is, bedraagt dan : 123 ± 17 nSv/h.

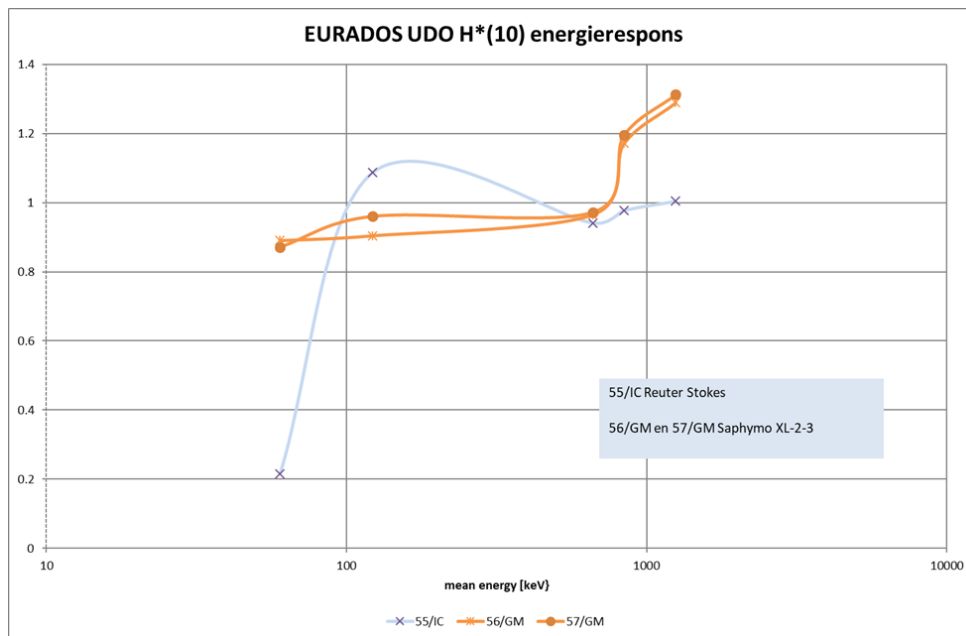
Dit netto gammadosis tempo is lager dan in de eerste 6 maanden is gemeten met Saphymo monitor 95 op dezelfde locatie (ca. 182 nSv/h tijdens productie van de HFR). In de Reuter Stokes gammadosis tempometingen in Figuur 10 zijn verder nog zes Curium-transportpieken waarneembaar. De tijdsduur van deze zes transporten

is zo kort dat de bijdrage aan de dosis als gevolg van de HFR verwaarloosbaar is.

Verder is het dosistempo zeker niet constant, maar vertoont een 'zaagtand' -achtig patroon. Hierdoor is de meetperiode met de Reuter Stokes van 3 uur zeker niet representatief. Voor een exacte vergelijking van de dosistempi van de Reuter Stokes en de Saphymo moet er op dezelfde plaats en tijd een meting van minimaal 3-4 uur plaatsvinden.

Vergelijking van Saphymo respons met Reuter Stokes respons

In het langjarige Eurados onderzoek is een vergelijking gemaakt van omgevingsdosistempo-monitoren^[1], waaronder de Saphymo (GM-buis) en de Reuter Stokes (ionisatiekamer); zie Figuur 11.



Figuur 11 Relatieve respons van de Saphymo en Reuter Stokes bij een energie van ca. 80 keV tot 1200 keV; genormaliseerd ten opzichte van een Cs-137 bron.

Het energiespectrum dat met de Falcon 5000 gemeten is (zie par. 3.6) vertoont een aanzienlijk deel aan strooistraling met een energie lager dan 100 keV. Uit figuur 11 blijkt dat de Reuter Stokes onder de 100 keV een duidelijk lagere respons vertoont dan een Saphymo. Dit is hoogstwaarschijnlijk de verklaring voor het verschil in gemeten gammadosistempo tijdens productie van de HFR; de Saphymo (nr 95) meet netto 182 nSv/h en de Reuter Stokes 123 nSv/h op dezelfde plek.

3.5 Bijdrage van neutronen op 9 november 2018 bepaald met de Biorem 752FHT

Op 9 november 2018 zijn in 4 periodes van 30 minuten neutronen gemeten met de Biorem 752FHT met ¹⁰Bf₃ detector. Volgens de opgave van Curium was het cyclotron in die periode niet in bedrijf. Het gemiddelde bruto dosistempo bedroeg $13,8 \pm 2,1$ nSv/h. De

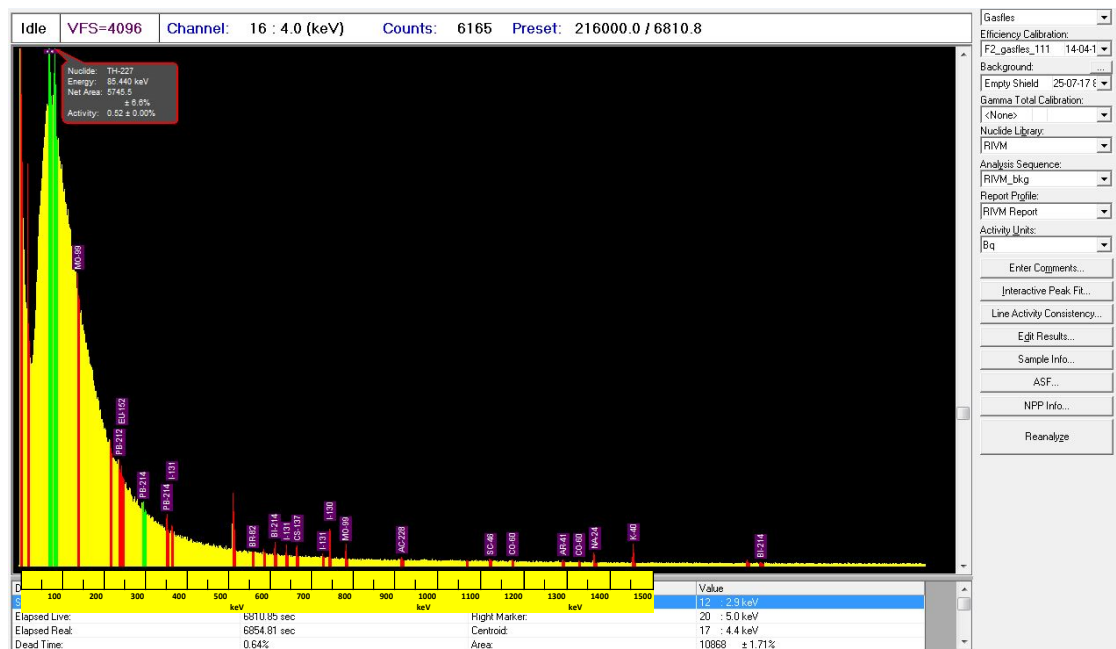
¹ The second Eurados intercomparison of national network systems used to provide early warning of a nuclear accident, JC Saez-Vergara et al, Rad.Prot.Dos, 123 (2007), p. 190-208.

achtergrond, die 24 uur lang in meetperiodes van 30 min gemeten is in Bilthoven op 1,5 m hoogte boven zandgrond, was (onafgerond) $8,8 \pm 3,7$ nSv/h. Het netto resultaat is dan 5 ± 4 nSv/h. De bijdrage van neutronen aan de totale dosis is hoogst onzeker en nauwelijks hoger dan de natuurlijke achtergrond. Op basis hiervan is besloten om de bijdrage van neutronen te verwaarlozen.

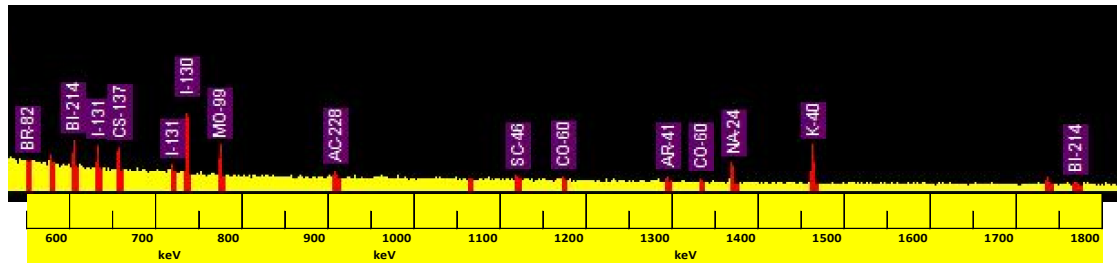
3.6 Meting van het gammaspectrum op 9 november 2018 met de Falcon 5000

Op dezelfde locatie als monitor 95 en op ongeveer 1,5 m afstand van de Reuter Stokes, is met de Falcon 5000 (draagbare gammaspectrometrie) gedurende bijna 2 uur een gammaspectrum opgenomen.

In het spectrum (zie Figuur 12a) was duidelijk een flinke bijdrage van strooiestraling zichtbaar. Er waren enkele pieken waar te nemen: met name de natuurlijke nucliden uit de uraan en thoriumreeksen, en verder ^{60}Co , ^{24}Na , ^{40}K , en ^{41}Ar (Figuur 12b). De veronderstelde grote piek van ^{41}Ar is echter niet waargenomen. ^{16}N valt door de hoog-energetisch gamma van 6,1 MeV ver buiten de horizontale energieschaal van deze detector.



Figuur 12a Gammaspectrum opgenomen op 9 november 2018 met de Falcon 5000 op locatie van monitor 95; meettijd 2 uur.



Figuur 12b Detail van gammaspectrum opgenomen op 9 november 2018 met de Falcon 5000 op locatie van monitor 95; meettijd 2 uur.

Het piekje van ^{41}Ar is nauwelijks hoger dan de achtergrond. De vorm van het spectrum geeft aan dat de strooiestraling hoogstwaarschijnlijk van hoger energetische gamma-stralers afkomstig is. Welke gammastralers dat zijn is met de gebruikte detector met een energierange tot ca. 3000 keV niet vast te stellen.

4 Bepaling van het omgevingsdosistempo van de achtergrond

4.1 Bepaling van de achtergrond met NMR-1006

Het (terrestrisch) gammastralingsniveau is boven zandgrond in de duinen lager dan het landelijk gemiddelde. Het gemiddelde voor heel Nederland (van de dagelijks gemiddelden) van 153 NMR stations in Nederland in 2017 is 81,1 nSv/h [6].

De metingen met de Saphymo monitor bij de NMR locatie 1006, op het terrein van Onderzoekslocatie Petten, kan een goede schatting van het achtergrondstralingsniveau geven. De meetpost NMR-1006 registreert echter ook deels transportpieken door radiofarmaca. Voor een juiste correctie van de achtergrond moeten de transportpieken bij NMR-1006 uitgefilterd worden. Dit is uitgevoerd met dezelfde '>2 σ ' methode die ook bij kerncentrale Borssele is toegepast [3].

In het kort : eerst wordt het gemiddelde en de standaard deviatie bepaald, vervolgens worden de meetwaarden boven het gemiddelde + twee keer de standaard deviatie buiten beschouwing gelaten (=gefilterd). Van de resterende meetwaarden wordt opnieuw het gemiddelde en standaard deviatie bepaald. Het resultaat is een achtergrond van $66,6 \pm 2,9$ nSv/h, zie Tabel 3.

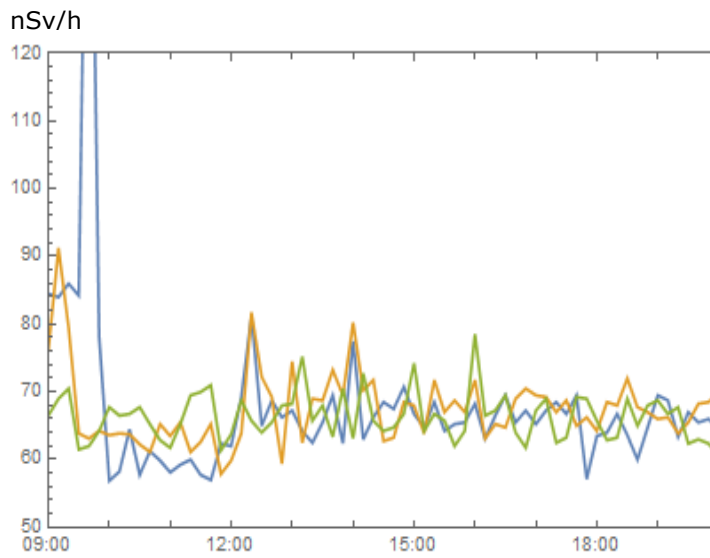
Tabel 3 Analyse van de meetperiode 13 januari 2018 tm 24 juli 2018 (193 dagen)

Locatie	Sampling	Gemiddelde (nSv/h)	1 σ (nSv/h)	aantal pieken > [gem + 2 σ]	Gemiddelde na uitfiltering (nSv/h)	St.dev. (1 σ) na uitfiltering (nSv/h)	Totaal over periode (μ Sv)
NMR-1006	10 min	67,1	4,5	907	66,6	2,9	309

4.2 Vergelijking monitoren 94 en 95 met NMR-1006 op 25 juli 2018

Op 25 juli 2018 zijn om 12:00 UTC (14:00 CET) de monitoren #94 en #95 naast NMR-1006 geplaatst. Deze metingen laten zien dat de monitoren in goede overeenstemming zijn en dat de keuze om NMR-1006 als achtergrond te kiezen voor de monitoren 94 en 95 terecht is.

De piek die Saphymo nr 94 registreert rond 9.30 – 10 uur heeft te maken met de verplaatsing van de Stekhal naar de locatie van NMR meetpost 1006, tegenover gebouw 15.



25 juli 2018 (h)

Figuur 13 Metingen op 25 juli 2018: de monitoren #94 (blauw) en #95 (oranje) zijn vlakbij de meetpost NMR-1006 (groen) op het OLP terrein geplaatst. Op de x-as de uren op 25 juli, de y-as in nSv/h.

5 Dosisberekeningen en onzekerheden

5.1 Dosis berekeningen

Autonome Saphymo monitoren

Op verzoek van de ANVS zijn tussen 12 januari en 25 juli 2018 met autonome Saphymo gammamonitoren metingen van het gammadosistempo verricht aan het hek bij de HFR.

In Tabel 2 is al een overzicht gegeven van de totale berekende dosis *inclusief* transportbijdrage, over de meetperiode zowel voor de 3 monitoren bij de HFR als de 2 monitoren bij de Stekhal.

In Tabel 4 wordt de jaardosis als gevolg van de HFR berekend door de totale dosis in Tabel 2 te verminderen met de transportbijdrage (zie Bijlage A, Tabel A1).

De hoogste jaardosis bij de HFR is op de locatie van monitor 95: rekening houdend met de meetperiode en de geplande productiedagen in 2018 wordt een jaardosis berekend van 1115 μSv . Dit levert met een Actuele Blootstellingen Correctiefactor (ABC-factor) van 0,03 een AID op van 33 μSv ten gevolge van de HFR, zonder transportbijdrage, zie Tabel 4.

Tabel 4 Overzicht van de berekende dosis (zonder bijdrage van transportpieken) tussen 12 januari en 24 juli 2018 op basis van 10-min metingen, de geschatte jaardosis, en de AID over 2018.

Locatieen monitornr.	Aantal dagen	Dosistempo inclusief achtergrond (nSv/h)	HFR operationele dagen in 2018	Dosis tgv transport; Tabel A1 ($\mu\text{Sv/a}$)	Dosis tgv HFR = totaal minus transport (μSv)	AID** tgv HFR (μSv)
HFR hek oost (91)	193	207,9	265	33,7	890	27
HFR Curium (92)	193	136,8	265	147	475	14
HFR hek west (95)	152	249,4	265	22,5	1115	33
Nabij Stekhal						AID tgv Stekhal (μSv)
			aantal dagen	jaardosis min transport		
Geb. 28 Ingang (93)	154	93,1	365*	-	232*	7,0
Geb. 28 hoek west (94)	193	87,2	365*	-	181*	5,4
OLP (NMR 1006)	continu	66,6		-	-	-

* Bij de monitoren 93 en 94 was de invloed van de HFR niet meetbaar.

** De AID tgv de HFR is berekend door de totale dosis over 2018 (μSv) te verminderen met de transportbijdrage en daarna de AID te berekenen met een factor van 0,03.
Voorbeeld : uit Tabel 2 (mp91) Totale dosis = 924 μSv - 33,7 = 890 μSv x 0,03 = 27 μSv .
N.b. het aantal geplande operationele dagen van de HFR is 265 in 2018.

Bijdrage aan de totale dosis als gevolg van Curium-transporten

De bijdrage van de Curium radionuclide-transporten kan berekend worden door de meetwaarden van monitor 92 te filteren volgens de ' $> 1\sigma$ ' methode. Hiervoor zijn drie cycli (02, 03 en 04) geselecteerd waarin de HFR aan stond en een vlak gammastralingsniveau te zien gaf; zie ook Bijlage A. Het resultaat voor monitor 92 is een berekende jaardosis als gevolg van transporten van 147 μSv . De waarden volgen uit de spreiding van alle meetwaarden van monitor 92 en de extrapolatie van de berekende dosis in de gekozen 3 productiecycli naar een jaardosis. Zie Bijlage A.

Bijdrage bij de Stekhal (gebouw 28) – continue bijdrage en bijdrage als gevolg van logistieke handelingen

Monitor 94 registreert de logistieke handelingen niet en geeft een continu dosistempo van 87,2 nSv/h. Dit levert een netto bijdrage aan de jaardosis van 181 μSv en aan de AID van 5,4 $\mu\text{Sv/a}$.

Aan de ingang van de Stekhal (gebouw 28) wordt een jaardosis berekend van 232 μSv , gemeten met monitor 93; een dosistempo van 93,1 nSv/h. Dit levert een AID op van 7,0 $\mu\text{Sv/a}$. Deze AID betreft de som van de continue bijdrage van de Stekhal + de dosis ten gevolge van de logistieke handelingen bij de ingang. De jaardosis is een schatting omdat de logistieke handelingen bij de Stekhal in de meetperiode niet representatief hoeven te zijn voor de rest van het jaar.

Reuter Stokes – gammadosistempo, en neutronendosistempo

Op 9 november 2018 zijn er gedurende enkele uren aanvullende metingen verricht, met een ionisatiekamer (Reuter Stokes), en neutronen dosistempometingen met de Biorem. In Tabel 5 staat een overzicht van de meetresultaten.

Tabel 5 Overzicht van de meetresultaten van de aanvullende metingen met HFR-aan op 9 november 2018; locatie is van monitor 95 aan hek HFR.

Monitor	Dosistempo	Sampling periode	Sampling duur	Gemeten dosistempo, HFR-aan (nSv/h)	Background	Netto dosistempo (nSv/h)
Reuter Stokes	Gamma	30 s	2 uur	179 \pm 15	56 \pm 7	123 \pm 17
Biorem	neutronen	30 min	2 uur	13,8 \pm 2,1	8,8 \pm 3,7	5 \pm 4

Uit Tabel 5 blijkt dat het netto gammadosistempo, gemeten met de Reuter Stokes gedurende een meetperiode van ongeveer 2,5 uur op 9 november, veel lager is dan het netto dosistempo van Saphymo monitor nr 95 gedurende ongeveer 6 maanden.

Meest waarschijnlijke verklaring is het verschil tussen de energierespons van de Saphymo en de Reuter Stokes voor energieën lager dan 100 keV. Dit is al eerder besproken in paragraaf 3.4.

5.2 Onzekerheden in de berekening van de jaarlijks toegevoegde dosis

Het berekenen van een jaarlijks toegevoegde AID op basis van een meetperiode van ongeveer een half jaar bevat enkele onzekerheden. Hieronder worden deze onzekerheden aangegeven.

- 1 *Onzekerheid in juistheid van energierespons.*
 Het energiespectrum, gemeten met de Falcon 5000, vertoont duidelijk een strooistraling-verdeling met de grootste bijdrage tussen 0 en 400 keV. Voor een gamma energie tussen 60 - 100 keV vertoont een Saphymo monitor een lichte onderrespons van ca. 0,9 (waar 1,0 een perfecte respons zou zijn). Aangezien het gehele spectrum zich hoofdzakelijk onder 400 keV bevindt geeft een Saphymo een systematische onderschatting van het dosistempo van ongeveer 5-10 %.
 De Reuter Stokes vertoont een grote onderrespons die afloopt naar 0,2 bij 60 keV. Dit wordt echter enigszins gecompenseerd door een geringe overrespons boven 100 keV. Vergelijken we de Reuter Stokes meetwaarden met die van de Saphymo dan zien we een onderschatting van ca. 33 %.
 Samenvattend : in deze situatie aan het hek nabij de HFR geeft de Saphymo, vergeleken met de Reuter Stokes, een betrouwbaardere weergave van het omgevingsdosistempo; echter wel met een onderschatting van ca. 5-10%.
- 2 *Zaagtandpatroon.*
 Het dosistempo veroorzaakt door een operationele HFR vertoont een zaagtand-achtig patroon; zie Figuur 7. Bovenop deze zaagtand zijn smalle en hoge transportpieken waarneembaar. Voor het vaststellen van een gemiddeld door de HFR toegevoegde AID (Tabel 4), worden eerst de transportpieken uitgefilterd. Vervolgens worden de resterende 10-minuut meetwaarden over de hele periode gesommeerd en naar verhouding met het aantal operationele dagen omgerekend tot een AID. Het uitfilteren van de transportpieken heeft een geschatte relatieve onzekerheid van $\pm (7-12)\%$; zie Tabel A1. Dit heeft echter bij monitor 95 veel minder invloed dan bij monitor 92, waar de bijdrage van de transportpieken veel groter is en de HFR bijdrage het laagst.
- 3 *Keuze van representatieve HFR cycli*
 De meetperiode besloeg vijf HFR operationele cycli. Het gedrag van de vijf cycli was echter niet identiek; er waren naast de operationaliteit van de HFR en de transportpieken ook enkele langere variaties in gammadosistempo waarneembaar. Deze hadden wellicht ook te maken met bouwactiviteiten op een naburig terrein of met atmosferische bijdragen. Dit heeft tot gevolg gehad dat alleen de cycli-02, 03 en 04 (zie Tabel 1 en Bijlage A) met een relatief rustig "basislijngedrag" gebruikt zijn voor het uitfilteren van transportpieken. De extra onzekerheid die verbonden is aan de keuze van de drie HFR-cycli en de mate van representativiteit voor het hele jaar is onbekend.
- 4 *Representativiteit van de meetperiode* voor het gehele jaar
 Op basis van gegevens van NRG is uitgegaan van een operationele HFR periode van 265 dagen. Er is echter een korte stop van ongeveer een week geweest in oktober 2018. Correctie

voor deze stop zal de geschatte AID een factor ($1-258/265 = 2,7\%$) lager doen uitkomen.

- 5 *De productie en het transport van medische radioisotopen* in de betreffende meetperiode is waarschijnlijk representatief voor het hele jaar. Het is echter niet geheel helder of de transporten tot en met 31 december doorgang hebben gevonden. Correctie hiervoor zal de AID enigszins veranderen om dezelfde redenen als onder punt 1.

Op basis van de gevolgde berekeningen, de variatie in de omgevingsdosistempometingen, het uitfilteren van de transportpieken, de achtergrondcorrectie en vermenigvuldiging voor het aantal operationele dagen per jaar wordt de totale onzekerheid in de AID ruw geschat op **minimaal** 10-15 %. Dit is hoofdzakelijk gebaseerd op afwijking van de ideale energierespons onder 100 keV, en de standaarddeviatie van het gemiddelde gammadosistempo na uitfiltering van de transportpieken. De overige onzekerheden zijn hoogstwaarschijnlijk kleiner en zullen niet zwaar meetellen in de kwadratische som van alle onzekerheden.

6 Conclusies en aanbevelingen

Zoals omschreven in de opdracht van de ANVS heeft RIVM meetseries uitgevoerd op locatie 1, aan gebouw 28, en aan het hek langs de weg tussen Curium en de HFR, locatie 2. Op basis van deze metingen kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

1. Het bepalen van omgevingsdosistemetingen op locatie nabij gebouw 28 en aan het hek aan de weg langs de parkeerplaats van Curium heeft geresulteerd in bruto dosistemp (incl. achtergrond en exclusief transportpieken) van 87 tot 249 nSv/h. Voor het bepalen van het achtergrondstralingsniveau is NMR meetpost 1006 gebruikt; deze bedroeg 66,6 nSv/h. De Actuele Individuele Dosis (AID) is berekend door de netto dosistemp over het hele jaar te berekenen en te vermenigvuldigen met een ABC-factor van 0,03. De AID bedroeg minimaal 5,4 μ Sv/a aan gebouw 28 en 33 μ Sv/a aan het hek van de HFR. Hierbij zijn de transportpieken uit de meetperiode januari-juli 2018 als representatief voor heel 2018 verrekend.
2. De transporten door Curium ter hoogte van locatie 2 (hek nabij HFR) leveren een AID op van maximaal 4,4 μ Sv/a.
3. De continue bijdrage van gebouw 28 op locatie 1 gemeten door monitor 94 bedraagt 181 μ Sv/a (ABC-factor=0,03; AID = 5,4 μ Sv/a).
De continue bijdrage plus de bijdrage ten gevolge van logistieke activiteiten nabij gebouw 28, gemeten door monitor 93, bedraagt 232 μ Sv/a, waarvan 56 μ Sv/a door logistieke activiteiten worden gegeven. De AID ten gevolge van deze logistieke activiteiten bedraagt 1,7 μ Sv/a.
4. Meetonzekerheden in de berekening van de jaarlijks toegevoegde dosis bedragen minimaal 10 - 15 % en zijn grotendeels afhankelijk van de energierespons en de spreiding van de gammadosistemetingen.

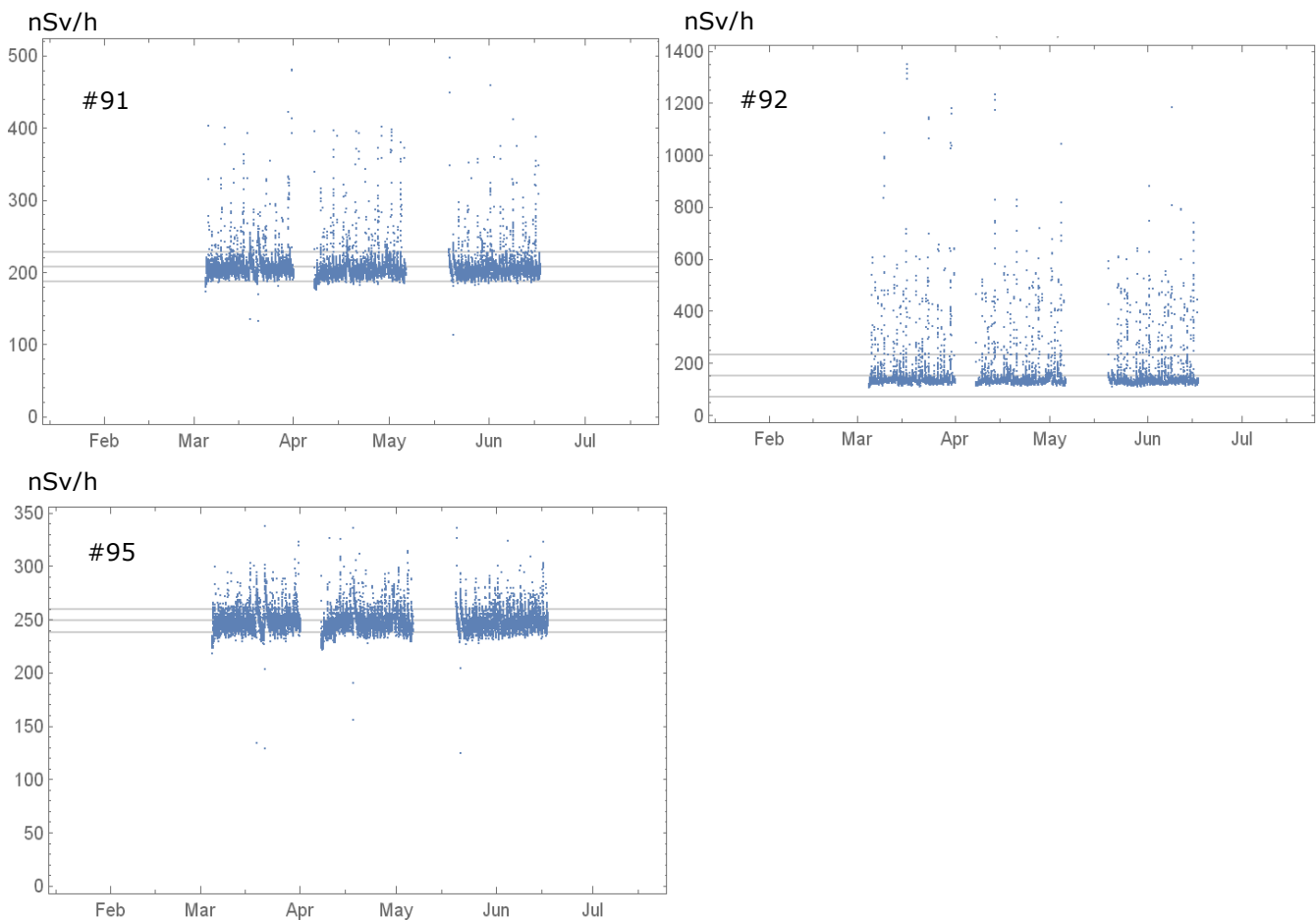
De meetserie op 9 november 2018, de HFR was op die dag in productie, heeft duidelijk gemaakt dat neutronen nauwelijks bijdragen aan de totale dosis.

De metingen van het omgevingsdosistempo, uitgevoerd met de Reuter Stokes op 9 november, kwamen niet overeen met de meetwaarden die door de autonome Saphymo monitor 95 op dezelfde locatie is uitgevoerd tussen januari en juli. De Reuter Stokes kwam tot 123 ± 17 nSv/h, waar de Saphymo tot 180 ± 10 nSv/h kwam. Het verschil in de energierespons van beide monitoren voor gammaenergie lager dan 100 keV is hier hoogstwaarschijnlijk de oorzaak.

RIVM beveelt aan om op een nieuwe meetsessie een autonome Saphymo monitor gelijktijdig naast de Reuter Stokes aan het hek te plaatsen waar monitor 95 heeft gestaan. Deze meetsessie zou bij voorkeur minimaal 4 uur moeten duren zodat voldoende meetgegevens verzameld kunnen worden om de data van beide meetapparaten te kunnen vergelijken.

7 Bijlage A Bepaling dosisbijdrage van Curium-transporten

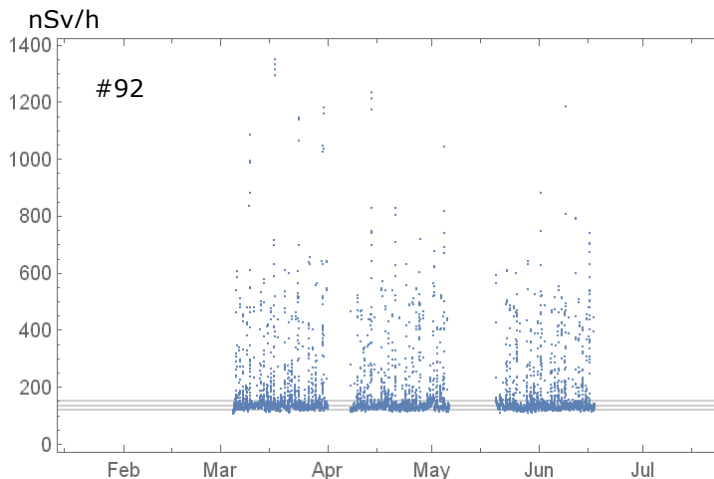
De bijdrage van Curium-transporten op de locatie van monitor 91, 92 en 95, wordt berekend in drie cycli met "HFR aan"; cyclus-02, cyclus-03 en cyclus-04 in 2018. De reden is dat in deze drie cycli de basislijn in de situatie "HFR aan" vlak is zonder lange termijn hobbels. In totaal beslaat dit een periode van 84,5 dagen (de steile toename, met een duur van 60 uur, bij het begin, en afname bij het eindperiode van een cyclus wordt niet meegenomen). Deze worden in de onderstaande figuren weergegeven. Voor elke monitor wordt het gemiddelde en de standaard deviatie berekend.



Figuur A1 Voor de periodes met het HFR op vol vermogen (cyclus-02, cyclus-03 en cyclus-04), $dH^(10)/dt$ voor monitor 91, 92 en 95, inclusief het gemiddelde en standaard deviatie.*

Het gemiddelde dosistempo minus het dosistempo van NMR-1006 geeft een schatting van de toename in dosistempo door de HFR. De bijdrage van alle pieken boven het gemiddelde ± 1 sigma geeft een schatting van de dosistoename door transport, zie Tabel A1. Bij monitor 92 (nabij parkeerplaats van Curium) worden de hoogste pieken door transporten geregistreerd. De normale berekeningswijze van gemiddelde en

standaard deviatie zou een onterecht grote standaard deviatie opleveren van 153 ± 81 nSv/h (1σ).



Figuur A2 Herberekening van het gemiddelde en standaard deviatie van monitor 92 uit Figuur A1.

Een betere werkwijze is om de transportpieken eerst uit te filteren, en vervolgens het gemiddelde en standaard deviatie opnieuw te berekenen. Dit resulteert in een schatting van de bijdrage door transport van $34 \mu\text{Sv}$ bij monitor 92 (HFR Curium) in deze periode. Deze schatting wordt overgenomen in onderstaande Tabel A1.

Tabel A1 Voor iedere monitor het gemiddelde dosistempo en de standaard deviatie. De som van de pieken groter dan [gemiddelde + 1 sigma] geven een schatting van de transportbijdrage; voor monitor 92 is [gemiddelde + 1 sigma] herberekend na het weglaten van de pieken.

Monitor	Gemiddelde "HFR aan" (nSv/h)	1σ (nSv/h)	Gemidd. "HFR aan" minus achtergrond van 66,6 (nSv/h)	Transport ($\mu\text{Sv}/84,5$ d)	Jaardosis door transport ($\mu\text{Sv}/a$)
91	207,9	20,6 (9,9%)	141,3	7,8	33,7
92	136,8	16,8 (12%)	70,2	34	147
95	249,4	18,9 (7,6%)	182,9	5,2	22,5

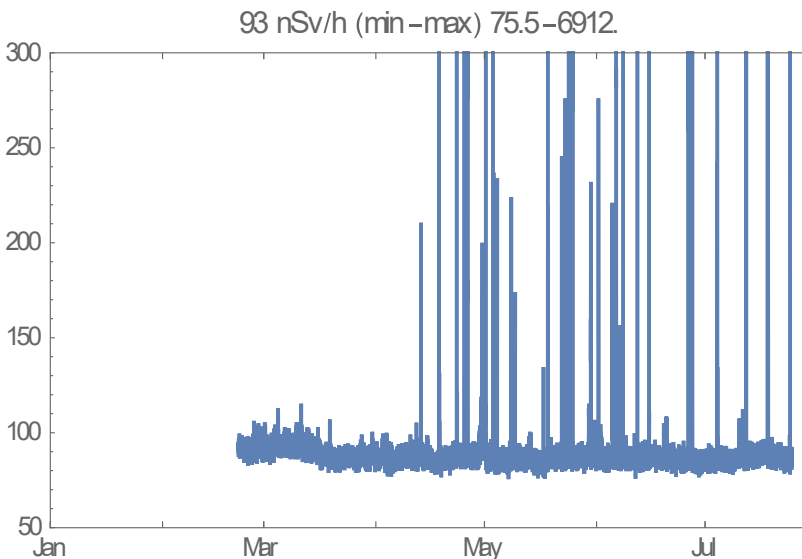
Conclusie

De toegevoegde dosis door transportactiviteiten is het hoogst bij monitor 92 die bij de ingang van Curium is geplaatst: de bijdrage wordt geschat op $34 \mu\text{Sv}$ over 84,5 dagen. Aangenomen dat de transporten altijd met dezelfde patroon plaatsvinden, komt dit overeen met afgerond ($34 \times 365/84,5 =$) $147 \mu\text{Sv}$ in het jaar 2018.

8 Bijlage B Toegevoegde omgevingsdosis bij gebouw 28 (Stekhal).

Toegevoegde omgevingsdosis gemeten door monitor 93, gebouw 28.

Bij de metingen van monitor #93 zijn er piekvormige verhogingen zichtbaar die door logistieke activiteiten worden veroorzaakt. De totaal gemeten $H^*(10)$ in de 154 dagen na de verplaatsing op 20 februari is $344,3 \mu\text{Sv}$, inclusief achtergrond (uit Tabel 1).



Figuur B1 Omgevingsdosistempo (nSv/h) gemeten door monitor 93 aan de ingang van de Stekhal tussen 21 februari en 24 juli 2018. De hoogste 10-minuut-waarde bedroeg 6900 nSv/h .

Om het effect van logistieke activiteiten te kunnen bepalen kunnen de metingen van monitor 94 gebruikt worden. Dat kan met twee verschillende benaderingen.

Methodie 1 – verschil monitor 93 en monitor 94 t.o.v. achtergrond

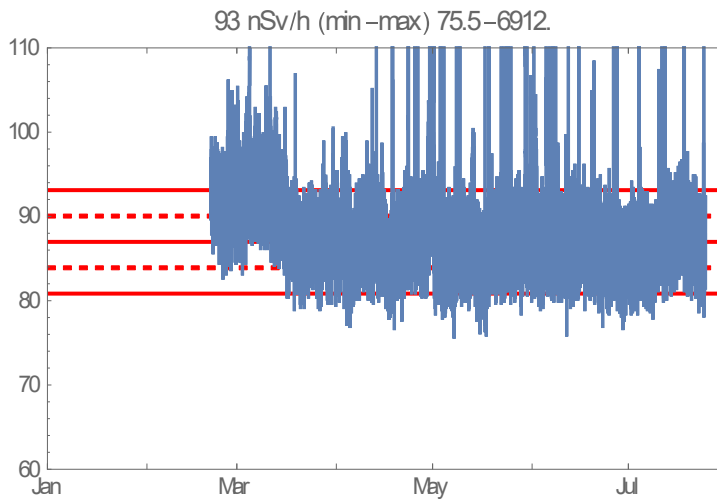
Het verschil in $dH^*(10)/dt$ tussen monitor 94 en de uitgefilterde NMR-1006 is $20,35 \text{ nSv/h}$ (berekend uit Tabel B2: $86,97 \text{ nSv/h} - 66,62 \text{ nSv/h}$). Deze toegevoegde $H^*(10)$ wordt veroorzaakt door zowel bestrating, bebouwing, en het specifiek gebruik ervan. Dat komt overeen met een toegevoegde $H^*(10)$ van $75,2 \mu\text{Sv}$ over de 154 dagen vanaf 21 februari.

De toegevoegde dosis van monitor 93 (t.o.v. de uitgefilterde NMR-1006) is $98,1 \mu\text{Sv}$ over de 154 dagen vanaf 21 februari. Het verschil ($98,1 \mu\text{Sv}$ van monitor 93 minus de $75,2 \mu\text{Sv}$ van monitor 94) levert een schatting voor de bijdrage van de logistieke activiteiten van $22,9 \mu\text{Sv}$ over de 154 dagen vanaf 21 februari.

Indien deze dosis wordt opgeschaald naar het hele jaar met het aantal meetdagen ($365/154$), levert dit een schatting van $54,3 \mu\text{Sv/a}$ voor logistieke activiteiten.

Methode 2 –monitor 93, som van alle pieken [$>$ gemiddelde + 2σ]

Methode 2, zie Figuur B2, gebruikt de som van alle metingen (nSv/h) van monitor 93, die, na een eerste uitfiltering van de pieken, hoger zijn dan het gemiddelde + twee sigma (93,11 nSv/h). Dit resulteert in 24,6 μ Sv in 154 d. Opgeschaald naar het hele jaar met het aantal meetdagen (365/154), levert dit 58,3 μ Sv/a voor logistieke activiteiten.



Figuur B2 Omgevingsdosistempo (nSv/h) gemeten door monitor 93, het gemiddelde, 1σ (gestippelde lijn) en 2σ .

Conclusie

De toegevoegde $H^*(10)$ door logistieke activiteiten bij het Fermi gebouw (locatie 1) is met twee verschillende rekenmethodes bepaald op minimaal 22,9 en maximaal 24,6 μ Sv tijdens de meetperiode van 154 dagen; respectievelijk 54,3 μ Sv/a en 58,3 μ Sv/a in het jaar 2018.

9 Bijlage C Revisie van rapport 2018-0182 inhoudelijke en redactionele wijzigingen

Op het overleg waarbij dit rapport is besproken met ANVS en NRG zijn een aantal redactionele en inhoudelijke opmerkingen gemaakt. Hier wordt in het kort weergegeven wat er is aangepast in deze revisie.

Tabel C1 Redactionele en inhoudelijke wijzigingen in de revisie

Pagina / paragraaf	Redactioneel / inhoudelijk	Wijziging
P 5; par 1.2	red	Verduidelijken twee locaties (niet 5 plekken)
P 7; fig1	red	pijlen goedzetten naar gebouw 15. En naar monitoren 93 - 94
P 8; par 2.1.1	inh	korte discussie over energierespons bij lage en hoge energieën. Verschil Saphymo en Reuter Stokes voor respons bij lage energieën.
P 11; par 2.2	inh	265 dagen gepland voor de HFR; daadwerkelijk 254 dagen gedraaid.
P 14; fig 7	inh	Fysische oorzaak van zaagtand wordt nagegaan door NRG (FD). Expansievat en waterniveau ? Verval na uitzetten HFR lijkt niet door Ar-41, maar eerder door Na-24 en/of N-16 veroorzaakt te worden.
P 14; fig 8a	inh	Indien cyclotron aan, dan ook neutronen afkomstig van Curium ? Zie p. 19.
P 15; fig 8b	red	Plaatjes vergroot. Ook de lange variaties zichtbaar maken. In header niet 91, 92 en 95. Dat is het meetpostnr.
P 17; Tab 2	red	# ook als voetnoot bij tabel
P 19	inh	bijdrage aan neutronen door cyclotron - nee
P 20	red	2000 keV veranderen in 3000 keV
P 22	red	Afschrift van fig. 13 (24 in 25 juli corrigeren)
P24/25	inh inh	Als onzekerheid ook de energierespons bij lage energieën opvoeren en inschatten. Bij punt 2 oorzaak van lange variaties ?
P 25	red	H5 hernoemd naar " Dosisberekeningen en onzekerheden"
P29	red	Par 5.3 hernoemd naar H6 Conclusies en aanbevelingen
P 27	inh	Meer over verschil Reuter Stokes en Saphymo.
P 33	red	Fig B1: omgevingsdosis ipv stralingsdosis

10 Referenties

1 Opdrachtbrief ANVS met kenmerk "H-190686-01-PAR" van 7 dec 2017.

2 Manual GammaTRACER XL2, Saphymo, version 08/2012 (<https://www.bertin-instruments.com/product/environmental-radiation-monitoring-systems/gammatracer/>).

3 C.P. Tanzi, Stralingsniveaumetingen aan de terreingrens van de EPZ kerncentrale Borssele in 2017. RIVM briefrapport 2018-0116.

4 C.P. Tanzi, Gamma radiation level measurements around the site of COVRA N.V. at Borsele with the MONET network in 2017, RIVM Briefrapport 2018-0126

5 "Hoge Flux Reactor weer in bedrijf met goedkeuring toezichthouder" , Nieuwsbericht NRG, 25-10-2018 (<https://www.nrg.eu/over-nrg/nieuws-pers/detail/artikel/hoge-flux-reactor-weer-in-bedrijf-met-goedkeuring-toezichthouder-127.html>).

6 Environmental Radioactivity in The Netherlands. GJ Knetsch Ed. Results in 2016, RIVM report 2018-0162.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag