

Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC

examendatum: 10 mei 2021
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Dit examen omvat 12 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 10 pagina's. Controleer dit!**
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen dient u in te leveren.
- ❑ Vermeld **alleen uw examenummer** op de uitwerkbladen (dus niet uw naam en adres).
- ❑ Het is geoorloofd boeken, persoonlijke aantekeningen en ander documentatiemateriaal te raadplegen voor het beantwoorden van de vragen.
- ❑ Met nadruk wordt erop gewezen dat u ook dient aan te geven via welke **berekeningsmethode** en/of volgens welke **beredenering** u tot de oplossing komt.
- ❑ Indien u een onderdeel van een vraagstuk niet kunt uitrekenen en het antwoord nodig is voor het oplossen van de rest van het vraagstuk, mag u uitgaan van een fictief antwoord.
- ❑ Voor sommige vraagstukken behoeven niet alle gegevens noodzakelijkerwijs te worden gebruikt.
- ❑ In totaal kunt u 61 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
 - Vraagstuk 1: 15 punten
 - Vraagstuk 2: 18 punten
 - Vraagstuk 3: 16 punten
 - Vraagstuk 4: 12 punten
- ❑ U bent voor dit examen geslaagd als u minstens 55% van het totaal aantal punten hebt behaald. Dit komt overeen met een score van ten minste 33,5 punten.

Vraagstuk 1: Inwendige besmetting met I-131 [15 punten]

In een isotopenlaboratorium op B-niveau worden bereidingen van therapeutische hoeveelheden ^{131}I uitgevoerd. Uit de risico-inventarisatie en -evaluatie is gebleken dat bij voorziene onbedoelde gebeurtenissen een aanzienlijke dosis als gevolg van inwendige besmetting kan worden opgelopen. Daarom worden maandelijks schildkliermetingen bij de blootgestelde werknemers uitgevoerd. De metingen worden gedaan op maandagochtend, voordat nieuwe bereidingen worden uitgevoerd. Hierbij wordt een detector op 10 centimeter afstand van de schildklier gehouden om het teltempo vast te stellen. Bij één van deze metingen wordt bij een werknemer een netto teltempo van 89 cps gemeten. Verondersteld wordt dat deze inwendige besmetting is ontstaan door inhalatie van I_2 -damp.

Gegevens:

- **Bijlage blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 164 en 165, gegevens ^{131}I .
- **Bijlage blz. 5:** Weefselweegfactoren (w_T) ICRP-60 en ICRP-103.
- Detectierendement met detector op 10 cm afstand van de schildklier: 9,5 cps/kBq ^{131}I .

Vraag 1.1 [4 punten]

Bereken de effectieve volg dosis voor de werknemer, als de besmetting met I_2 -damp op de vrijdagochtend van de voorgaande week – aan het begin van de werkdag – heeft plaatsgevonden.

De effectieve dosis volg dosis voor de werknemer wordt vrijwel volledig veroorzaakt door de activiteit in de schildklier.

Vraag 1.2a [2 punten]

Maak met behulp van een berekening een schatting van de geabsorbeerde dosis in de schildklier, uitgaande van de situatie uit vraag 1.1 en de weefselweegfactoren uit ICRP-60.

Vraag 1.2b [2 punten]

Beargumenteer of de geabsorbeerde dosis uit vraag 1.2a kan leiden tot schadelijke weefselreacties.

De effectieve dosiscoëfficiënten in het Handboek Radionucliden zijn gebaseerd op de weefselweefactoren uit ICRP-60. In vraag 1.3 wordt gekeken hoe groot de effectieve volg dosis zou zijn als deze met de nieuwe weefselweefactoren uit ICRP-103 wordt berekend.

In het geval van inhalatie van $^{131}\text{I}_2$ -damp kan dit relatief eenvoudig, omdat vrijwel de gehele effectieve volg dosis wordt bepaald door de activiteit in de schildklier en omdat de effectieve volg dosiscoëfficiënt hoofdzakelijk wordt gewijzigd door de wijziging van de weefselweefactor van de schildklier. De voor ^{131}I relevante stralingsweefactoren zijn niet veranderd.

Vraag 1.3 [2 punten]

Bereken wat de waarde zou zijn van de effectieve volg dosiscoëfficiënt voor inhalatie van I_2 -damp, gebaseerd op de weefselweefactoren uit ICRP-103.

In het handboek staan geen gegevens voor een besmetting die meer dan 7 dagen geleden is opgetreden. Wel staan er gegevens van het metabool model.

Ga er voor de volgende vraag vanuit dat de besmetting 30 dagen geleden is opgetreden en er nu een netto teltempo van 89 cps wordt gemeten.

Vraag 1.4 [5 punten]

Bereken zo goed mogelijk de effectieve volg dosis voor de werknemer.

Vraagstuk 2: Risicoanalyse kernfysisch experiment [18 punten]

Een stralingsbeschermingsdeskundige beschouwt de stralingshygiënische risico's van een kernfysisch experiment. Het gaat om een experiment aan één van de bundellijnen van een Van-de-Graaff-versneller, waarbij een trefplaatje bestaande uit een legering van selenium en thallium (molecuulformule: SeTl) wordt bestraald met protonen die zijn versneld tot een energie van 5,9 MeV.

Bij het bestralen van het trefplaatje met protonen komen neutronen vrij door de kernreactie $^{80}\text{Se}(p,n)^{80\text{m}}\text{Br}$. De experimentator wordt alléén blootgesteld aan de neutronenstraling die hierbij ontstaat.

Het experiment duurt 7 dagen en voor de berekeningen gaan we er vanuit dat alle handelingen door één experimentator worden uitgevoerd.

Er zijn twee kritieke handelingen:

- Handeling 1: uitlijnen van de protonenbundel
- Handeling 2: vervangen van het stikstofvat

Omschrijving handeling 1: uitlijnen van de protonenbundel

Eens in de 8 uur moet de protonenbundel opnieuw worden uitgelijnd. Hierbij bevindt de experimentator zich op een gemiddelde afstand van 50 cm van het trefplaatje.

Gegevens handeling 1:

- Tijdens het uitlijnen van de bundel geeft de bewakingsmonitor in de hal een netto omgevingsdosis-equivalenttempo ten gevolge van neutronen aan van $H^*(10) = 0,1 \mu\text{Sv/h}$ (alarmfase "groen").
- De bewakingsmonitor bevindt zich op 15 meter van het trefplaatje waarin de neutronenstraling ontstaat.
- Het uitlijnen van de protonenbundel duurt gemiddeld 30 minuten.
- $H^*(10)$ is een goede schatter van de effectieve dosis.

Vraag 2.1 [2 punten]

Bereken de effectieve dosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het uitlijnen van de protonenbundel.

Tijdens het uitlijnen kijkt de experimentator gemiddeld 10 minuten naar het trefplaatje via een kijkvenster. Om de equivalente oogdosis ten gevolge van neutronenstraling te berekenen, moet de neutronenproductie in deze tijd worden berekend.

Hiervoor geldt de formule: $N_n = N_p \cdot N_{Se} \cdot \sigma \cdot yield$, waarin:

N_n = het aantal geproduceerde neutronen

N_p = het aantal protonen dat het trefplaatje treft

N_{Se} = het aantal seleniumatomen per cm^2 in het trefplaatje

σ = de werkzame doorsnede voor de kernreactie in cm^2

$yield$ = de opbrengst in aantal neutronen per kernreactie

Aanvullende gegevens handeling 1:

- De massieke dikte van het trefplaatje is $1,2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$.
- De molecuulmassa van SeTI bedraagt 284 gram per mol.
- Het getal van Avogadro is $N_{\text{Avogadro}} = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
- De bundelstroom $I = 50 \text{ nA}$.
- De elementaire lading is $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$.
- $1 \text{ Ampère} = 1 \text{ C/s}$.
- Tijdens de bestraling vindt de kernreactie $^{80}\text{Se}(p,n)^{80\text{m}}\text{Br}$ plaats. U mag ervan uitgaan dat dit de enige kernreactie is die optreedt.
- **Bijlage blz. 6:** Werkzame doorsnede van de kernreactie $^{80}\text{Se}(p,n)^{80\text{m}}\text{Br}$.

Vraag 2.2a [6 punten]

Bereken het aantal neutronen dat in het trefplaatje wordt geproduceerd, terwijl de experimentator door het kijkvenster kijkt.

Indien u het antwoord op vraag 2a schuldig bent gebleven mag u verder rekenen met $5 \cdot 10^7$ neutronen.

Extra aanvullende gegevens handeling 1:

- Neem aan dat de neutronen isotroop vanuit het trefplaatje worden uitgezonden.
- De afstand tussen trefplaatje en oog lens bedraagt 5 cm.
- De afschermdende werking van het kijkvenster mag worden verwaarloosd.
- Voor de betreffende neutronen geldt voor de conversie van fluentie naar omgevingsdosisequivalent (ontleend aan fig. 6.14 uit Bos et al.): $H^*(10) / \Phi_n = 500 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$, met Φ_n de neutronenfluentie (in cm^{-2}).
- Verondersteld mag worden dat $H^*(10)$ een goede schatter is van de equivalente oog lensdosis.

Vraag 2.2b [3 punten]

Toon door berekening aan dat de equivalente ooglensdosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het uitlijnen van de protonenbundel ongeveer 80 μSv is.

Omschrijving handeling 2: vervangen van het stikstofvat

Tweemaal per dag moet een vat met vloeibaar stikstof bij de versneller worden vervangen. Daarbij wordt het oude, lege vat afgekoppeld en het nieuwe, volle vat aangekoppeld.

Gegevens handeling 2:

- In de buurt van de versneller geeft de daar aangebrachte bewakingsmonitor een netto omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van neutronen aan van $H^*(10) = 110 \mu\text{Sv/h}$ aan (alarmfase "rood"). Dit dosistempo geldt als gemiddelde voor handeling 2.
- $H^*(10)$ is een goede schatter van de effectieve dosis.
- Zowel het af- als het aankoppelen van een stikstofvat duurt gemiddeld 15 seconden.
- Het verplaatsen van het stikstofvat van de toegangsdeur naar het koppelpunt duurt per keer gemiddeld 60 seconden en het wegrijden van het lege vat duurt per keer gemiddeld eveneens 60 seconden.

Vraag 2.3 [2 punten]

Bereken de effectieve dosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het vervangen van het stikstofvat.

Dit in totaal zeven dagen durende experiment wordt zes keer per kalenderjaar uitgevoerd door dezelfde experimentator. Deze persoon ondergaat verder geen beroepsmatige blootstelling.

Vraag 2.4 [5 punten]

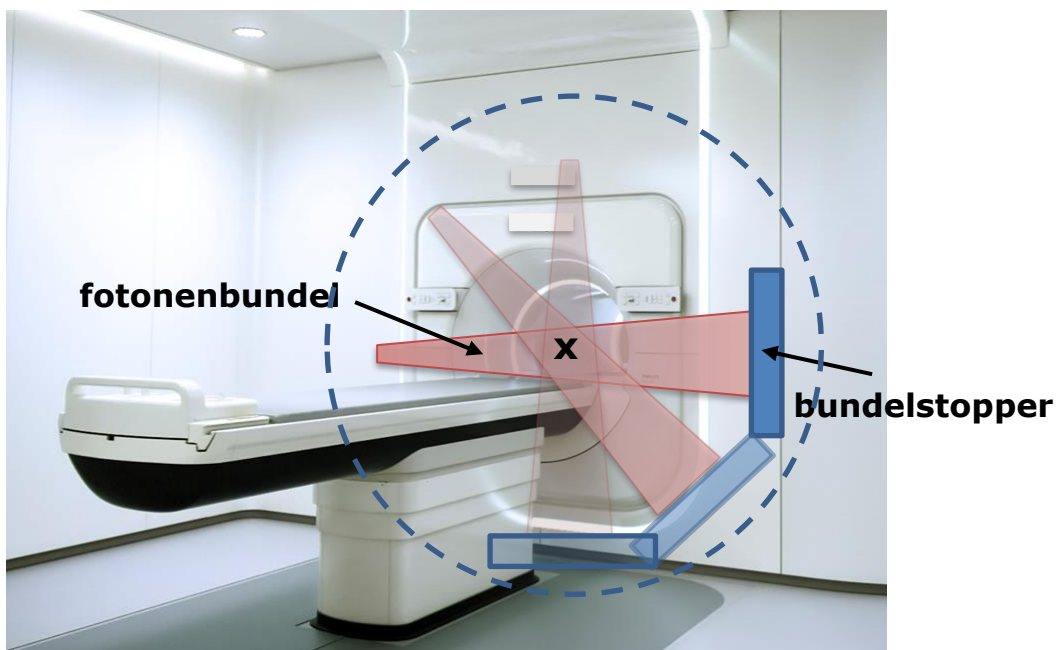
Concludeer op basis van een berekening van de jaarlijkse effectieve dosis en de equivalente ooglensdosis of de experimentator ingedeeld dient te worden als blootgestelde werknemer, en zo ja, in welke categorie.

Vraagstuk 3. Afscherming bij een MRI-versneller [16 punten]

Op een afdeling Radiotherapie wordt een MRI-versneller in een bestralingsbunker geplaatst. Een MRI-versneller is een combinatie van een lineaire versneller (bestralingstoestel) met een MRI. Hiermee is het mogelijk om met behulp van MRI-beelden nauwkeurig een tumor met een fotonenbundel te bestralen. De maximale energie van de fotonen in de bundel bedraagt 6 MeV.

Een stralingsbeschermingsdeskundige wil berekenen of de afschermende werking van de betonnen muren en de stalen deur voldoende is.

De fotonenbundel van de MRI-versneller kan 360° rondom het isocentrum X roteren. Recht tegenover de bundel, bevindt zich een 'bundelstopper'. Deze bundelstopper is een 30 cm dikke stalen plaat die ervoor zorgt dat de uittredende bundel (nagenoeg) volledig wordt geabsorbeerd, zie Figuur 3.1.

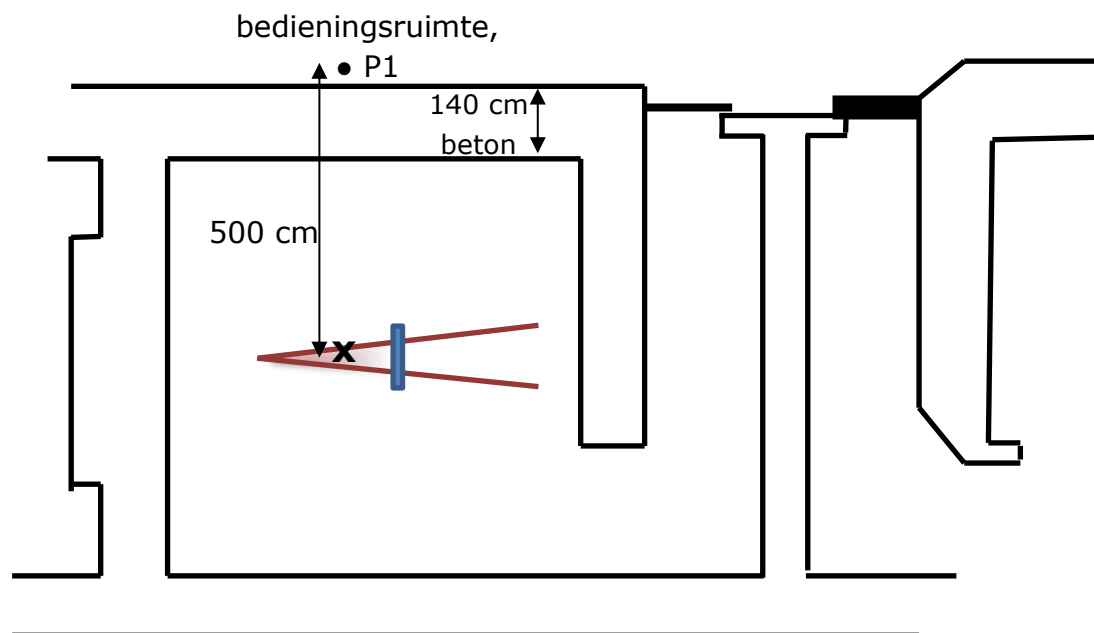


Figuur 3.1 – MRI-versneller met schematische weergave fotonenbundel en bundelstopper.

De fabrikant van de MRI-versneller heeft meetgegevens aangeleverd over de luchtkerma in lucht als gevolg van de hoeveelheid lek- en strooistraling die tijdens de bestraling rondom het toestel wordt gemeten.

Gegevens:

- De geabsorbeerde dosis in het isocentrum = 20 Gy per patiënt.
- Op 1 meter van het isocentrum X, wordt in lucht 0,1% van de geabsorbeerde dosis in de patiënt gemeten.
- Ga er voor alle berekeningen vanuit dat het isocentrum de oorsprong van de rondom het toestel gemeten straling is.
- De workload = 8 patiënten per dag, 250 dagen per jaar.
- De afstand van het isocentrum X tot aan het punt P1 in de bedieningsruimte is 5 meter.
- Figuur 3.2: plattegrond van de bestralingsbunker.
- De dikte van de betonnen muur tussen bestralings- en bedieningsruimte is 1,4 meter.
- **Bijlage blz. 7:** Transmissie van fotonen in brede-bundelgeometrie door beton (ontleend aan ICRP-33).
- $H^*(10)/K_a = 1$ voor het fotonenspectrum bij een versnelspanning van 6 MV.
- De $H^*(10)$ is een goede schatter van de effectieve dosis in deze situatie.

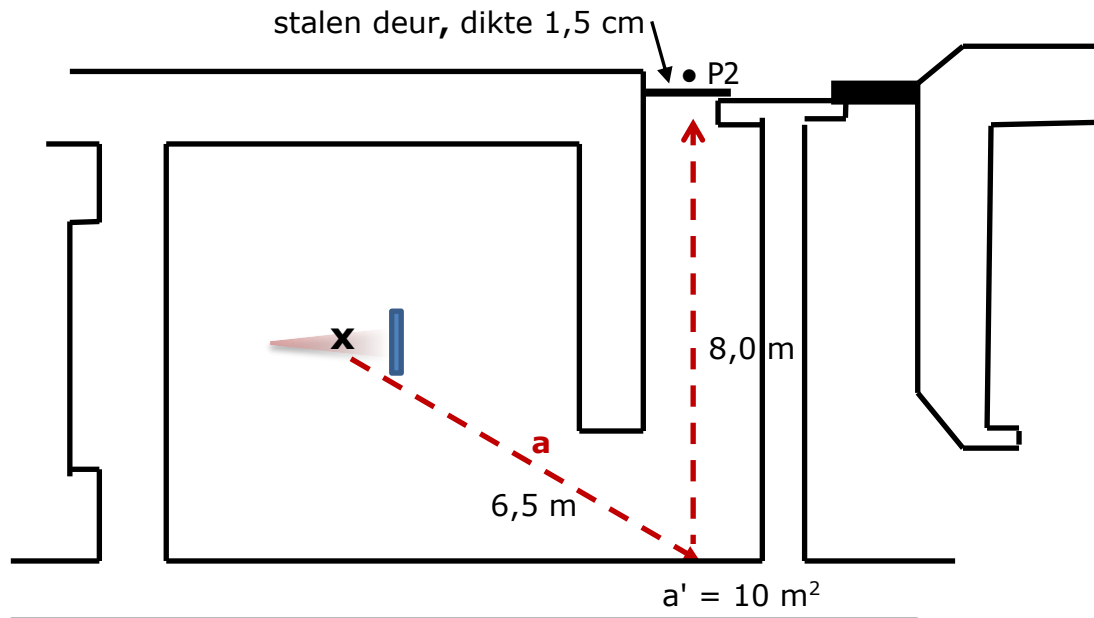


Figuur 3.2 – Plattegrond van de bestralingsbunker.

Vraag 3.1 [5 punten]

Bereken het jaarlijkse omgevingsdosisequivalent in punt P1.

De stralingsbeschermingsdeskundige wil de dosisbijdrage in punt P2 via route a berekenen. **Figuur 3.3** laat deze route zien.



Figuur 3.3 – Plattegrond bestralingsbunker; dosisbijdrage punt P2 via route a.

Aanvullende gegevens:

- **Bijlage blz. 8:** Verstrooiingspatronen van divergente bundels röntgen- en gammabundels bij loodrechte inval op een vlakke betonmuur (ontleend aan ICRP-33).
- Voor het aflezen van de fractie verstrooide straling mag de grafiek van **bijlage blz. 8** worden gehanteerd, ook al vallen de verstrooide fotonen niet loodrecht in.
- Punt P2 bevindt zich direct achter een stalen deur; dikte stalen deur = 1,5 cm.
- De transmissie van de verstrooide fotonen door 1,5 cm staal = 0,5.
- Reken met een verstrooiend oppervlak van 10 m^2 ter hoogte van a' .
- Reken met een fotonenenergie van 6 MeV voor de verstrooide straling.
- De verstrooiingshoek is 120 graden.

Vraag 3.2 [6 punten]

Bereken het jaarlijks omgevingsdosisequivalent in punt P2 via route a.

Voor de risico-inventarisatie en -evaluatie beschouwt de stralingsbeschermingsdeskundige de volgende gebeurtenis: een medewerker bevindt zich nog in de bunker als het toestel wordt gestart. Doordat de fout snel wordt ontdekt en de bestraling direct wordt onderbroken, blijft de effectieve dosis voor de medewerker beperkt tot 1,5 mSv. De stralingsbeschermingsdeskundige schat in dat deze gebeurtenis zich maximaal eens per 20 jaar voordoet.

Vraag 3.3a [3 punten]

Beargumenteer op basis van de totale blootstelling of deze medewerkers ingedeeld dienen te worden als blootgestelde werknemers en zo ja, in welke categorie.

Ondanks alle maatregelen vindt bovengenoemde onbedoelde gebeurtenis daadwerkelijk plaats, waarbij de exacte blootstellingsduur niet bekend is. De stralingsbeschermingsdeskundige moet nu besluiten of hij de gebeurtenis als incident meldt bij de Autoriteit. Voor deze beslissing bestudeert hij kritisch de definitie van een stralingsincident.

De definitie van een stralingsincident, zoals die in bijlage 1 van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming is beschreven, luidt:

“onbedoelde gebeurtenis of situatie of ongewilde verspreiding waarbij gevaar bestaat, dan wel gevaar is opgetreden voor:

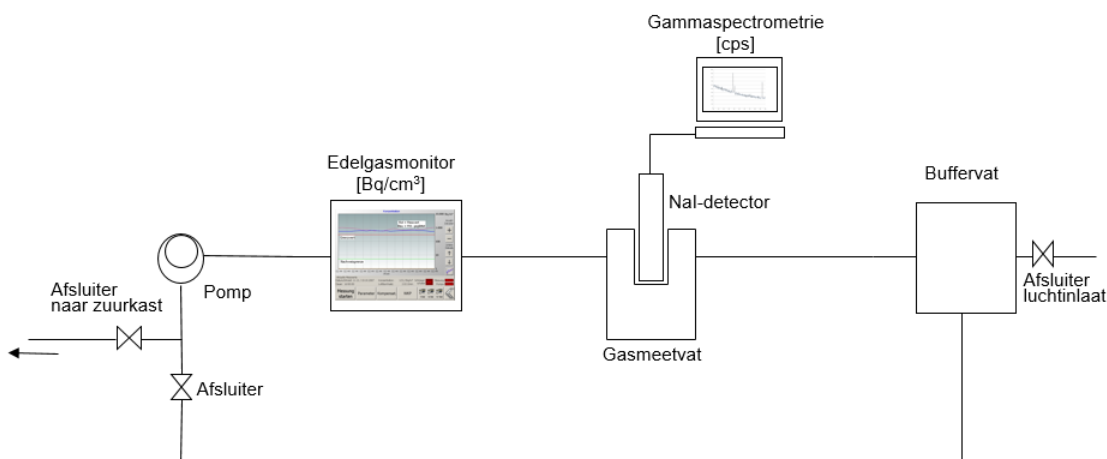
- *een blootstelling aan ioniserende straling van leden van de bevolking van meer dan 0,1 millisievert,*
- *een lozing op of in de bodem, in het riool, in het oppervlaktewater of in de lucht boven een door Onze Minister vastgestelde waarde, of*
- *een blootstelling aan ioniserende straling van werknemers van meer dan 2 millisievert;”*

Vraag 3.3b [2 punten]

Beargumenteer op basis van de definitie van een stralingsincident of de stralingsbeschermingsdeskundige de gebeurtenis als incident moet melden bij de Autoriteit.

Vraagstuk 4: Edelgasmonitor [12 punten]

In een radionuclidenlaboratorium wordt met behulp van het edelgas ^{41}Ar de respons van een edelgasmonitor onderzocht bij verschillende concentraties van ^{41}Ar in lucht. Het meetsysteem bestaat onder andere uit een gasmeetvat met een NaI-detector (cps), een edelgasmonitor (Bq/cm^3), een buffervat en diverse slangen. Zie voor een schematische weergave van het meetsysteem figuur 4.1. Het systeem bevat een volume van 33,3 liter. Voor dit vraagstuk mag de achtergrondstraling volledig worden verwaarloosd.



Figuur 4.1: het meetsysteem.

Gegevens ^{41}Ar :

- **Bijlage, blz. 9-10:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 40-41, gegevens ^{41}Ar .

Met de NaI-detector wordt ^{41}Ar in de lucht van het gesloten systeem gemeten. In het totale volume van 33,3 liter wordt 4,0 MBq ^{41}Ar gebracht. Op $t=0$ is de activiteit gelijkmatig (homogeen) verdeeld binnen het systeem.

Gedurende ongeveer 7,5 uur worden de nettowaarden van de ^{41}Ar fotonpiek door de NaI-detector geregistreerd. De metingen duren steeds 1 minuut. Zie de nettowaarden in tabel 4.1.

Het systeem blijkt een beetje lek, want uit de metingen met de NaI-detector blijkt het ^{41}Ar sneller te verdwijnen dan wordt verwacht op basis van fysisch verval.

T (h)	cps
0,000	1756
0,084	1696
0,167	1648
0,251	1586
0,334	1530
0,417	1491
...	...
2,754	587
2,838	567
2,921	552
3,004	532
3,088	516
3,171	497
...	...
7,093	97
7,177	95
7,260	92
7,344	90
7,427	86
7,511	83

Tabel 4.1: meetwaarden NaI-detector

Het systeem is bewezen lek wanneer het op $t = 3,004$ uur gemeten teltempo meer dan 2 standaarddeviaties afwijkt van het teltempo dat je zou verwachten op basis van fysisch verval na 3,004 uur.

Vraag 4.1 [4 punten]

Bewijs met een berekening dat het systeem lek is.

Net als radioactief verval (gekaracteriseerd door de fysische vervalconstante λ_{fys}) kan de verwijdering van de ^{41}Ar activiteit uit het vat door lekkage worden beschreven met een verwijderingsconstante λ_{lek} . De totale, effectieve verwijderingsconstante die de algehele afname van de ^{41}Ar -activiteit in het vat beschrijft, wordt gegeven door: $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{fys}} + \lambda_{\text{lek}}$.

Vraag 4.2 [3 punten]

Bepaal met behulp van de laatste meetwaarde de effectieve verwijderingsconstante (h^{-1}) van het meetsysteem.

Vraag 4.3 [2 punten]

Toon met een berekening aan dat de kalibratiefactor, voor het gasmeetvat op basis van de meting op $t=0$, gelijk is aan $0,068 \text{ Bq/cm}^3$ per cps.

Na 7,5 uur wordt de inhoud van het meetsysteem gedurende 10 minuten gespoeld in een tempo van $33,3 \text{ L/min}$. Het argon-luchtmengsel wordt gedurende deze verdunning via een zuurkast geloosd.

Vraag 4.4 [3 punten]

Bereken met de kalibratiefactor van vraag 4.3 wat de edelgasmonitor direct voor en na deze verdunning (in Bq/cm^3) moet aangeven; verwaarloos het radioactief verval tijdens het spoelen.