

## Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

---

NRG PALLAS  
Technische Universiteit Delft  
Rijksuniversiteit Groningen  
Radboudumc

NRG PALLAS  
TUD  
RUG  
RUMC

---

examendatum: 8 december 2025

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

<b>Instructie:</b>
--------------------

- ❑ **Dit examen omvat 11 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 15 pagina's. Controleer dit!**
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Maak voor elk vraagstuk gebruik van een apart, bij dat vraagstuk horend uitwerkblad. Lever ook alle niet gebruikte uitwerkbladen in.
- ❑ 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.
- ❑ Geef aan via welke **berekeningsmethode** en/of volgens welke **beredening** 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.
- ❑ Besteed aandacht aan het vermelden en juist toepassen van grootheden én eenheden.
- ❑ In totaal kunt u 65 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
  - Vraagstuk 1: 15 punten    Vraagstuk 2: 15 punten
  - Vraagstuk 3: 18 punten    Vraagstuk 4: 17 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 35,75 punten.

## Vraagstuk 1 – Inhalatie van $^{35}\text{S}$

[15 punten]

In een radionuclidenlaboratorium is door een defect ventilatiesysteem een luchtbesmetting met  $^{35}\text{S}$  (zwavel) ontstaan. Een analist is twee uur in de bewuste ruimte aan het werk geweest voordat het defect wordt ontdekt en gaat naar de stralingsbeschermingsdeskundige voor hulp. Deze vraagt de analist krachtig zijn neus te snuiten in een tissue. Met een meting wordt vastgesteld dat het snuitsel 1,2 kBq  $^{35}\text{S}$  bevat.

Op basis van navraag naar de handelingen die kort daarvoor in het laboratorium zijn uitgevoerd, wordt verwacht dat de luchtbesmetting bestaat uit aerosolen van een anorganische zwavelverbinding (geen sulfide) met een AMAD van 5  $\mu\text{m}$ .

### Gegevens:

- **Bijlage blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S Keverling Buisman (3e druk 2015), blz. 36 en 37, gegevens  $^{35}\text{S}$
- **Bijlage blz. 5:** Tabel met depositiefracties (in procent) van geïnhaleerde activiteit voor twee AMAD-waarden
- Het ademvolumetempo van de analist bedraagt 1,2 m<sup>3</sup>/uur
- De urine-uitscheiding van de analist mag worden gesteld op 1,4 liter/dag
- Het snuitsel bevat 50% van de in het ET<sub>1</sub> aanwezige activiteit

### Vraag 1.1 [4 punten]

Noem drie detectiemethodes waarmee  $^{35}\text{S}$  is te detecteren en geef aan welke detectiemethode het meest geschikt is om de activiteit van het snuitsel vast te stellen. Beargumenteer uw antwoord.

### Vraag 1.2 [3 punten]

Bereken uit de activiteit van het snuitsel hoeveel activiteit is ingeademd.

Men besluit aansluitend aan het incident de 24-uurs-urine van de analist te verzamelen om een urine-analyse uit te voeren. De urine blijkt een activiteitsconcentratie van 2,1 Bq/mL  $^{35}\text{S}$  te bevatten.

### Vraag 1.3 [4 punten]

Bereken nogmaals de ingeademde activiteit, maar nu uit de analyse van de 24-uurs-urine.

**Vraag 1.4a [2 punten]**

Geef voor beide berekeningen ten minste één factor die de betrouwbaarheid van de uitkomsten beïnvloedt. Beargumenteer uw antwoord.

**Vraag 1.4b [2 punten]**

Bereken de effectieve volgdozis ten gevolge van dit incident.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 1</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1.1	4
1.2	3
1.3	4
1.4a	2
1.4b	2
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

## Vraagstuk 2 – Transport van een $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron [15 punten]

U wordt gevraagd een potje met een strontium-90/yttrium-90 ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ )-bron voor verzending klaar te maken. Het potje wordt daarbij in een afscherming met een dikte van 1 cm geplaatst. Bij dit afschermingsmateriaal heeft u de keuze uit aluminium en lood. Uit de literatuur zijn voor zowel aluminium als lood waarden bekend voor de effectieve dosistempoconstante ten gevolge van remstraling, geldend voor de situatie waarin de dikte van de afscherming precies voldoende is om alle door de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron uitgezonden bètadeeltjes tegen te houden.

### Gegevens

- De  $^{90}\text{Sr}$ -activiteit in de bron bedraagt 740 MBq, en is in evenwicht met de  $^{90}\text{Y}$ -activiteit
- **Bijlage blz. 6:** Tabel met dikte van de benodigde afscherming van bètadeeltjes en bijbehorende effectieve dosistempoconstanten ten gevolge van remstraling voor aluminium en lood
- **Bijlage blz. 7:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (3e druk 2015), blz.104, gegevens  $^{90}\text{Sr}$
- De afschermende werking van het potje zelf mag verwaarloosd worden
- De  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron mag als puntbron worden opgevat

### Vraag 2.1 [3 punten]

Verifieer door berekening dat de maximale dracht van de door de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron uitgezonden bètadeeltjes in aluminium ongeveer 0,4 cm is.

### Vraag 2.2 [2 punten]

Geef een verklaring voor de verhouding tussen de verschillende effectieve dosistempoconstanten in de tabel in de bijlage blz. 6.

De afscherming met het potje wordt in het centrum van een kubusvormige doos geplaatst. In het vervolg van deze opgave mag gebruik gemaakt worden van de in vraag 2.2 bedoelde effectieve dosistempoconstanten.

### Aanvullende gegevens

- Alle ribben van de doos hebben een lengte van 30 cm
- **Bijlage blz. 6:** Tabel met transmissie van remstraling geproduceerd door bètadeeltjes uit een  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron in verschillende diktes aluminium en lood

**Vraag 2.3 [4 punten]**

Bepaal met behulp van de gegevens uit de tabellen welk afschermingsmateriaal met een dikte van 1 cm tot het laagste effectieve dosistempo op het oppervlak van het collo leidt, en bereken dit dosistempo.

U beschikt nu over alle benodigde gegevens om de transportverpakking in orde te maken.

**Aanvullende gegevens**

- De  $A_1$ - en  $A_2$ -waarde voor het transport van  $^{90}\text{Sr}$  bedraagt in beide gevallen 0,3 TBq
- De maximaal toegestane activiteit die in een vrijgesteld collo respectievelijk een type-A verpakking mag worden vervoerd bedraagt  $0,001 \times A_1$  of  $0,001 \times A_2$  respectievelijk  $1 \times A_1$  of  $1 \times A_2$
- Er hoeft geen rekening met de  $^{90}\text{Y}$ -activiteit te worden gehouden
- **Bijlage blz. 8:** Etikettering Klasse 7
- **Losse bijlage:** Invulblad met etiketten klasse 7

**Vraag 2.4a [2 punten]**

Geef aan of de verpakking een vrijgesteld collo, een type A- of een type B-verpakking dient te zijn.

**Vraag 2.4b [4 punten]**

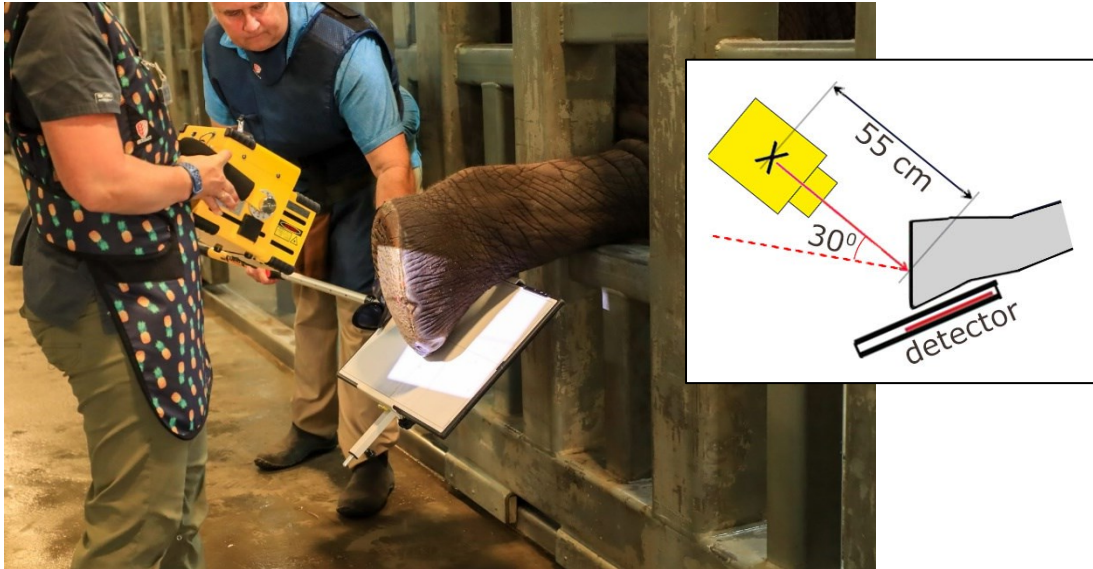
Kies het juiste etiket op de **losse bijlage** en vul hierop de benodigde gegevens in. Beargumenteer uw antwoord.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 2</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
2.1	3
2.2	2
2.3	4
2.4a	2
2.4b	4
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

### Vraagstuk 3 – Röntgenonderzoek van olifantspotten [18 punten]

Bij olifanten komt relatief vaak artrose voor, wat stijfheid en pijn in de pootgewrichten veroorzaakt. Daarom worden in reservaten de voetgewrichten van olifanten nauwlettend in de gaten gehouden door middel van een jaarlijks röntgenonderzoek met een mobiel röntgentoestel.



**Figuur 3.1:** Een assistent maakt een röntgenfoto van de voet van een olifant in een dierentuin.

#### Gegevens:

- De belichtingsparameters bij deze foto's zijn:
  - buisspanning: 120 kV
  - buisstroom  $\times$  belichtingstijd: 16 mA·s
  - bestraald huidveld 324 cm<sup>2</sup>
  - filter: 3 mm aluminium
  - focus-huid-afstand: hiervoor mag worden uitgegaan van 55 cm
- **Bijlage blz. 9:** Output luchtkermatempo van röntgentoestellen met verschillende filters en buisspanningen
- **Bijlage blz. 10:** Percentage van het luchtkermatempo als gevolg van verstrooiing van röntgenstraling voor verschillende kV en hoeken op een weefselfantoom
- Gebruik als conversiefactor  $E/K_{\text{lucht}}$  voor de verstrooide röntgenstraling: 1,35 Sv/Gy
- Ga ervan uit dat een loodschoot de effectieve dosis met een factor 5 verlaagt

**Vraag 3.1 [4 punten]**

Bereken de luchtkerma vrij in lucht in de primaire bundel per foto, op 55 cm afstand van het focus.

Bij het maken van de röntgenfoto houdt de assistent het röntgentoestel tegen het loodschort. De kortste afstand tussen de assistent en het bestraalde huidveld is 65 cm, waarbij de primaire bundel wordt verstrooid over een hoek van 150 graden.

**Vraag 3.2 [4 punten]**

Bereken de luchtkerma vrij in lucht per foto door strooistraling.

In het reservaat zijn 18 olifanten aanwezig die eenmaal per jaar een röntgenonderzoek aan alle vier de poten ondergaan. Hierbij worden twee foto's per poot gemaakt. Gemiddeld moet 10% van de foto's worden overgemaakt vanwege het niet goed stilstaan van de olifant. De assistent draagt een loodschort en verricht geen andere handelingen met ioniserende straling.

(Mocht u bij 3.2 geen antwoord hebben gevonden ga dan uit van 50  $\mu\text{Gy}$  per foto.)

**Vraag 3.3a [4 punten]**

Bereken voor de risico-inventarisatie en -evaluatie (RI&E) de reguliere jaarlijkse effectieve dosis voor de assistent.

Voor de risico-inventarisatie en -evaluatie (RI&E) wordt de volgende onbedoelde gebeurtenis voorzien:

- De assistent vergeet zijn loodschort te dragen bij het onderzoek van één olifant.

**Vraag 3.3b [2 punten]**

Bereken de effectieve dosis die de assistent kan ontvangen bij de hierboven beschreven voorziene onbedoelde gebeurtenis.

**Vraag 3.3c [2 punten]**

Moet de assistent volgens de huidige Nederlandse regelgeving worden ingedeeld als blootgestelde werknemer, en zo ja, in welke categorie?

Vanwege de vereiste diagnostische informatie is het niet mogelijk de belichtingsparameters of het aantal foto's te reduceren.

**Vraag 3.4 [2 punten]**

Beschrijf een andere optimalisatiemaatregel en geef aan welke reductie in dosis u hierbij verwacht. Onderbouw uw verwachting.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 3</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
3.1	4
3.2	4
3.3a	4
3.3b	2
3.3c	2
3.4	2
<b>Totaal</b>	<b>18</b>

## Vraagstuk 4 – Lozing van geactiveerd gas in lucht

### [17 punten]

In een onderzoeksreactor worden stukjes reactorvatwand van andere reactoren bestraald om de levensduur van die reactoren te voorspellen. De stukjes reactorvatwand worden in een speciaal daarvoor ontworpen houder in een stralingspositie in de reactorkern gebracht. Daar worden ze aan een hoge dosis neutronen- en gammastraling blootgesteld.

Met behulp van gas wordt de temperatuur in de houder binnen een acceptabele bandbreedte gehouden. Het gas moet vanwege opwarming incidenteel worden vervangen. Het gas is een mengsel van 70% helium (He) en 30% neon (Ne). Dit gasmengsel is door neutronenstraling geactiveerd en vervalt in een vervaltdank voorafgaand aan de lozing in lucht.

#### Gegevens:

- **Bijlage blz. 11:** Activiteit van de belangrijkste radionucliden in het bestraalde gasmengsel direct na het vervangen van het gas
- **Bijlage blz. 12:** Uitsneden van de nuclidenkaart rondom helium en neon.
- **Bijlage blz. 13-14:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3<sup>e</sup> druk 2015), gegevens  $^3\text{H}$
- $^{23}\text{Ne}$  ontstaat o.a. uit de vangstreactie:  $\text{Ne-22}(n,\gamma)\text{Ne-23}$
- De activiteit van  $^{23}\text{Ne}$  is een evenwichtsactiviteit, omdat de halveringstijd veel korter is dan de bestralingstijd
- De evenwichtsactiviteit  $A$  van  $^{23}\text{Ne}$  wordt gegeven door  $A = N\phi\sigma$ , waarin
  - $N$  het aantal  $^{22}\text{Ne}$ -atomen in het bestraalde materiaal is,
  - $\phi$  het neutronenfluentietempo (in  $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en
  - $\sigma$  de werkzame doorsnede (in  $\text{m}^2$ ) voor neutronvangst
- In het gasmengsel zit 9,89 mmol neon
- Ga ervan uit dat zowel de afname van  $^{22}\text{Ne}$  door activering als de productie van  $^{22}\text{Ne}$  vanuit  $^{20}\text{Ne}$  en  $^{21}\text{Ne}$  te verwaarlozen is

#### Vraag 4.1 [2 punten]

Geef de twee reactievergelijkingen die horen bij de twee werkzame doorsnedes die op de nuclidenkaart zijn vermeld in het vakje He-3.

### Vraag 4.2 [5 punten]

Bereken het neutronenfluentietempo ter plaatse van het experiment.

#### Aanvullende gegevens:

- Het gasmengsel wordt op 0,3 m afstand van de vervaltdank gemeten met een dosistempomonitor die alarmeert vanaf  $H^*(10) = 100 \mu\text{Sv/h}$
- Ga uit van een puntbrongeometrie
- De omgevingsdosisequivalenttempoconstante ( $h$ ) van natrium-24 ( $^{24}\text{Na}$ ):  $0,49 \mu\text{Sv/h}$  per MBq op 1 meter afstand
- De transmissie van de relevante gammafotonen door de wand van de stalen vervaltdank tot de dosistempomonitor bedraagt 93%
- De afstand tussen het lozingspunt en terreingrens is 45 m

### Vraag 4.3a [2 punten]

Geef twee argumenten waarom  $^{24}\text{Na}$  het enige relevante nuclide is voor het bepalen van de benodigde tijd om onder de alarmwaarde te komen.

### Vraag 4.3b [4 punten]

Bereken de benodigde tijd om onder de alarmwaarde te komen.

Vanuit ALARA-oogpunt wordt een dusdanig ruime vervaltdank aangehouden dat voor de lozing en de daarmee gepaard gaande milieubelasting alleen het nuclide tritium ( $^3\text{H}$ ) van belang is.

#### Aanvullende gegevens:

- **Bijlage blz. 15** Berekening maximale jaarlijkse lozing van radionucliden in lucht
  - Toetsingswaarden voor de jaarlijkse lozing in lucht ( $L_{SN}$ ).
  - Waarde van de effectiviteitsparameter ( $s$ ) voor de effectiviteit van het filtersysteem voor het beschouwde nuclide
  - Correctiefactoren voor lozing van radionucliden ( $CR_L$ ), afhankelijk van de fysische halveringstijd  $t_{1/2}$  van het nuclide
- Voor de verspreidingsparameter  $p$  mag voor directe lozing de waarde  $-4$  gebruikt worden
- Er is geen filtersysteem in het lozingskanaal aanwezig
- De noodzaak om het gasmengsel in de houder te vervangen ontstaat maximaal vijf keer per jaar
- Er vinden geen andere lozingen plaats

**Vraag 4.4 [4 punten]**

Controleer met een berekening of de maximale jaarlijkse lozing in lucht het secundair niveau kan overschrijden.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 4</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
4.1	2
4.2	5
4.3a	2
4.3b	4
4.4	4
<b>Totaal</b>	<b>17</b>