



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

Onderzoek bij Urenco naar emissies na incident met koolfilter op 27 augustus 2015

RIVM Briefrapport 2015-0169
P.J.M. Kwakman|K. Tukker



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

Onderzoek bij Urenco naar emissies na incident met koelfilter op 27 augustus 2015

RIVM Briefrapport 2015-0169
P.J.M. Kwakman|K. Tukker

Colofon

© RIVM 2015

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.

P.J.M. Kwakman (auteur), RIVM
K. Tukker (auteur), RIVM

Contact:
Pieter.kwakman@rivm.nl
RIVM / VLH Monitoring en Meten

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

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

Publiekssamenvatting

Onderzoek naar emissies bij Urenco na incident met koelfilter op 27 augustus 2015

Op 27 augustus 2015 heeft 's nachts bij de uraniumverrijkingsfabriek Urenco een incident plaatsgevonden met een koelfilter. Daardoor is via de dakventilatie uranium in de buitenlucht vrijgekomen. Het is niet aannemelijk dat de besmetting buiten het Urenco-terrein is gekomen. Daarom zijn omwonenden ook niet blootgesteld aan de besmetting en levert deze geen extra risico voor de gezondheid van de omwonenden.

Urenco heeft in de daaropvolgende uren metingen uitgevoerd op het dak en in het ventilatiesysteem van de fabriek. Het RIVM heeft deze metingen geverifieerd en zelf aanvullende metingen verricht. De resultaten daarvan komen redelijk tot goed overeen. Zowel het RIVM als Urenco heeft vervolgens de uitstoot geschat, en ook deze bevindingen stemmen met elkaar overeen.

Er zijn verschillende scenario's voor het verloop van het incident onderzocht. Die geven schattingen voor hoeveel uranium er kan zijn vrijgekomen, uiteenlopend van minimaal 0,4 tot maximaal 40 gram uranium, met 6 gram als meest waarschijnlijke waarde. Als in de worst case-situatie daadwerkelijk de maximale schatting van 40 gram zou zijn vrijgekomen, dan zou dat 1,5 procent van de vergunde jaarlimiet betekenen. In werkelijkheid zal het minder zijn geweest.

De zuidwestenwind tijdens het incident heeft de lozing precies in de lengterichting van het dak vervoerd. Door het incident met het koelfilter kan de uraniumactiviteit aan fijne kooldeeltjes zijn gebonden, of zich als een soort nevel hebben verspreid. In beide gevallen is de radioactiviteit stofgebonden en zal die snel neerslaan, in dit geval op het dak. Ongeveer tien meter vanaf de ventilatiepijp is geen enkele radioactiviteit meer aangetroffen op het dak. Zeer waarschijnlijk zijn de uraniumdeeltjes niet verder gekomen dan deze tien meter.

Kernwoorden: koelfilterincident, Urenco, uraniumlozing, ventilatiesysteem, veegtesten, lozingsschatting

Synopsis

Investigation of emissions at Urenco NL after carbon filter incident on August 27th, 2015

On August 27th, 2015, an incident with a carbon filter took place at night at the Urenco uranium enrichment plant (Almelo, The Netherlands). This resulted in a discharge of uranium via the ventilation system. It is unlikely that any contamination ended up off-site. Therefore, people living close to the site have not been exposed to the contamination, and their health has not been at risk because of this incident.

In the hours following the incident, Urenco have carried out measurements on the roof and in the ventilation system of the plant. RIVM have verified these measurements and performed additional measurements. The results agreed reasonably well. Next, both RIVM and Urenco have estimated the emissions, and again the findings were in agreement with each other.

Various scenarios for the course of the incident have been investigated. These resulted in estimates for the amount of uranium discharged, ranging from a minimum of 0,4 to a maximum of 40 grammes of uranium, with 6 grammes being the most likely value. In case that Urenco would have emitted the maximum, worst case estimate of 40 grammes, this would mean 1.5 % of the annually permitted amount. In reality, the emission must have been lower.

Due to the south-west wind during the incident, the ventilation air discharge was carried exactly along the length of the roof. As a result of the carbon filter incident, the uranium activity was discharged either adsorbed to small carbon particles or as a kind of haze. In both cases, the radioactivity is dust-bound and will be deposited quickly, in this case on the roof. At about ten metres downwind from the ventilation exit, no radioactivity could be found any more. Most likely, the uranium particles did not travel further than these ten metres.

Keywords: Carbon filter incident, Urenco, uranium discharge, ventilation system, wipe assays, estimation of emissions

Inhoudsopgave

Samenvatting—9

1 Inleiding—11

- 1.1 Doel van het rapport—11
- 1.2 Beschrijving van het incident bij Urenco—11
- 1.3 De opdracht van de ANVS—12
- 1.4 Gebruikte eenheden en begrippen—12

2 Situatieschets van locatie in take-off hal 4 van SP5—15

- 2.1 Situatieschets—15

3 Werkaanpak en gebruikte apparatuur—17

- 3.1 Werkaanpak—17
- 3.2 Monstername en metingen nabij ventilatietoren van hal 4—17
 - 3.2.1 Veegtesten en metingen door Urenco—17
 - 3.2.2 Veegtesten door RIVM—17
 - 3.2.3 Watermonsters door Urenco op het dak—18
- 3.3 Werkwijze monstername en metingen in de ventilatieruimte van de gebouwventilatie van hal 4—18
 - 3.3.1 Meting door RIVM met de Berthold LB 124 handmonitor—18
 - 3.3.2 Veegtesten door Urenco en RIVM in de ventilatieruimte—19
 - 3.3.3 Meting aan gebouwfilters van CSB, RCC, SP4 en SP5—19
- 3.4 Gebruikte apparatuur bij Urenco door RIVM—19

4 Resultaten en discussie—21

- 4.1 Veegtesten—21
 - 4.1.1 Toetsing aan limieten voor oppervlaktebesmetting—21
 - 4.1.2 Resultaten van veegtesten door RIVM en Urenco—21
 - 4.1.3 Vergelijking van RIVM veegtesten met de resultaten van Urenco—22
 - 4.1.4 Meting en berekening van oppervlaktebesmetting—22
 - 4.1.5 Onzekerheden bij het uitvoeren van veegtesten—22
- 4.2 Watermonsters—23
 - 4.2.1 Monstername door Urenco—23
 - 4.2.2 Gammaspectrometrie aan de watermonsters van het dak van hal 4—24
- 4.3 Metingen van gebouwfilters van RCC, CSB, SP4 en SP5 in wk 35—25
 - 4.3.1 Beoordeling van analyses uitgevoerd door Urenco—26

5 Schatting van vrijzetting van Uranium naar de omgeving—27

- 5.1 Opsomming van relevante feiten—27
- 5.2 RIVM schatting van de vrijzetting met de beschikbare feiten—27
- 5.3 Vergelijking van Urenco schattingen met RIVM schatting—29
- 5.4 Conclusie over de gemaakte schattingen van de emissie—30

6 Conclusies—31

7 Bijlage A Meteogegevens van KNMI weerstation Twente—33

8 Bijlage B Meetgegevens en berekening van de veegtesten—35

9	Bijlage C Onzekerheden in veegtesten volgens ISO FDIS 7503-1—37
10	Bijlage D Schattingen door Urenco van vrijgekomen uranium—39
10.1	Besmetting op het dak—39
10.1.1	Onzekerheidsanalyse—40
10.2	Bepaling op basis van HF-vrijzetting—40
10.2.1	Onzekerheidsanalyse—41
10.3	Bepaling op basis van kooldeeltjes—41
10.3.1	Onzekerheidsanalyse—42
10.4	Discussie van benaderingen—42
11	Referenties—45

Samenvatting

Door een incident met een koolfilter is er op 27 augustus 2015 door Urenco uranium geloosd via de dakventilatie. De schattingen lopen uiteen van minimaal 0,4 tot maximaal 40 gram, met 6 gram als meest waarschijnlijke waarde. De door Urenco uitgevoerde schattingen van de emissie zijn door RIVM vergeleken met eigen schattingen. Er is acceptabele overeenstemming geconcludeerd.

Urenco heeft op het dak en in het ventilatiesysteem van de verrijkingsfabriek metingen uitgevoerd. RIVM heeft deze metingen geverifieerd, en aanvullend zelf metingen uitgevoerd tegelijk met Urenco in het ventilatorhuis. Hier lagen de meetresultaten binnen de (grote) onzekerheden dicht bij elkaar in de buurt.

In vijf watermonsters heeft RIVM een contra-expertise op de uraniumbepaling van Urenco uitgevoerd. Ondanks de verschillende meetmethoden (gammaspectrometrie door RIVM en ICP-MS door Urenco) kwamen de resultaten redelijk overeen.

RIVM is van oordeel dat de bemonstering en de analyses goed zijn uitgevoerd door Urenco.

Zou Urenco de maximale schatting van 40 gram daadwerkelijk vrijgezet hebben dan zou dat 1,5 % van de vergunde jaarlimiet betekenen. In werkelijkheid zal de vrijzetting lager zijn geweest.

De zuidwestenwind tijdens het incident heeft de lozing precies in de lengterichting van het dak vervoerd. Op basis van de metingen beschreven in dit rapport is het aannemelijk dat er geen besmetting van het Urenco terrein af is gekomen naar de terreingrens in noordoostelijke richting.

Door de aard van het incident met het koolfilter is de uraniumactiviteit gebonden aan fijne kooldeeltjes of als een niet-vluchtig aerosol afgeventileerd. Dergelijke stofgebonden activiteit slaat snel neer. Op het dak is na ongeveer 10 meter benedenwinds geen enkele oppervlakteactiviteit meer aangetroffen.

1 Inleiding

1.1 Doel van het rapport

Het doel van dit rapport is tweeledig:

- A. een beoordeling geven van de monsternamen en de metingen die door Urenco zijn uitgevoerd.
Dit is uitgevoerd door zo goed als mogelijk op enkele locaties een contra-expertise uit te voeren op de veegtesten, en op de wateranalyses die door Urenco zijn uitgevoerd. Zie hiervoor hoofdstuk 3 en 4.
- B. zo goed als mogelijk nagaan of, en zo ja: waar en hoeveel radioactieve stoffen in de omgeving zijn terecht gekomen.
RIVM heeft op basis van de beschikbare feiten een schatting van een vrijzetting naar het milieu gemaakt en deze vergeleken met een schatting van Urenco. Zie hoofdstuk 5.

Doel van dit rapport is niet om een uitspraak te doen over de oorzaak van het incident. Dit behoort niet tot de expertise van het RIVM.

1.2 Beschrijving van het incident bij Urenco

In de vroege ochtend van 27 augustus 2015 om ongeveer 04:14 uur heeft op het terrein van Urenco NL B.V. te Almelo een incident plaatsgevonden in *take-off* hal 4 van de verrijkingsfabriek SP5. Bij het aankoppelen van een *product container* worden door middel van een *product venting trap* de vluchtige dampen afgezogen door een filterpakket met ca. 13,6 kg actieve kool voor het afvangen van uranium-fluor verbindingen, gevolgd door een Al_2O_3 pakket voor afvangen van HF. Door drukopbouw is het filterpakket "geploft" waarbij het deksel tegen een ventilatiekanaal is gebotst en daarin is blijven steken. De gehele koelfilterinhoud is verspreid in de *take-off* hal.

Opmerking

Gezien het feit dat de oorzaak van het incident bij het schrijven van dit rapport nog niet is vastgesteld, is het wellicht niet juist om van een 'explosie' te spreken. Om nu toch nog weer te geven wat er is gebeurd wordt in dit rapport de term 'plof' en dus ook 'geploft' gebruikt.

Uit het onderzoek naar het incident is gebleken dat de ruimteventilatie van de *take-off* hal naar buiten nog ongeveer 7 minuten heeft gefunctioneerd voordat deze handmatig werd uitgeschakeld.

De ruimteventilatie van de *take-off* hal gaat via het dak vrijwel ongehinderd naar buiten. Op 27 augustus heeft Urenco op het dak een groot aantal veegproeven genomen ($N=76$), waarvan bij ongeveer 6 veegtesten een lichte verhoging tot $3,6 \text{ Bq.cm}^{-2}$ aan alfa besmetting is aangetroffen. Tevens is op het dak op 10 plekken een waterplas bemonsterd. Daarvan is op één locatie tweemaal een lichte verhoging van $10 - 32 \mu\text{g.l}^{-1}$ aan uranium aangetroffen.

Voor een uitleg over de gebruikte eenheden zie paragraaf 1.4.

1.3 De opdracht van de ANVS

Naar aanleiding van het incident bij Urenco op donderdag 27 augustus 2015 heeft de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) aan RIVM verzocht een plan te maken voor controlemetingen bij Urenco. Het doel van de metingen is om zo goed als mogelijk na te gaan of, en zo ja: waar en hoeveel radioactieve stoffen in de omgeving zijn terecht gekomen. Deze opdracht is onderverdeeld in de onderstaande deelopdrachten.

- Controle van de reeds door Urenco genomen en gemeten monsters van uitlaat, dak en omgeving (indien die nog beschikbaar zijn).
- Zelf nemen van een aantal monsters van het dak, de bodem op het terrein en mogelijk uit regenwaterafvoer en deze meten.
- Zo goed als mogelijk vaststellen hoe de windrichting ten tijde van het incident was.
- Indien qua planning realiseerbaar: samen met de inspecteur van ANVS aanwezig zijn als Urenco het horizontale deel van het ventilatiesysteem gaat bemonsteren. Ook zal RIVM zelf monsters nemen en analyseren.
- Controleren van de ventilatiefiltermonsters van SP5: (1MA5 en 2MA5) en van CSB (2M6) en van het inlaatfilter van CSB uit de periode van de mogelijke lozing.

1.4 Gebruikte eenheden en begrippen

In dit rapport worden diverse begrippen gebruikt afhankelijk van de situatie, gram, Becquerel en Radiotoxiciteitseenheid (RE). Hieronder wordt omwille van de duidelijkheid precies aangegeven wat er mee bedoeld wordt.

Tabel 1 Begrippen en eenheden in dit rapport

Begrip/eenheid	Toepassing	Toelichting
Gram (g)	Bij een reconstructie van de gebeurtenissen in het filtermateriaal, de verspreiding in de ruimte en het afzuigen van aerosolen door het ventilatiesysteem wordt gerekend in gram.	Het betreft de massa aan koolkorrels of aerosolen die via de ventilatie-schacht zijn vrijgezet. Of een uranium-bepaling met ICP-MS in µg/l in het regenwater aangetroffen op het dak.
Becquerel (Bq); kerndesintegraties per seconde	Het bepalen van een oppervlaktebesmetting wordt getoetst aan de limiet van 0,4 Bq/cm ² voor totaal-alfa en 4 Bq/cm ² voor totaal-beta besmetting	Zie toelichting 1 en 2. Oppervlakteactiviteit in Bq/cm ² wordt bepaald met een veegtest van neergeslagen uranium dat vrijgekomen is na het incident. Zie toelichting 2
Radiotoxiciteits-equivalent (RE). Dit is de hoeveelheid Bq die een equivalente dosis van 1 Sv oplevert.	In de Kernenergiewet vergunning van UNL staat een jaarlijkse lozingslimiet van 130 RE naar lucht en 1,7 RE naar het riool.	De dosisconversiefactor voor een radionuclide wordt uitgedrukt in Sv/Bq. Een RE is de omgekeerde waarde (Bq/Sv). Zie toelichting 3.

Toelichting bij Tabel 1

1. Het koolfiltermateriaal bedroeg ongeveer 13,6 kg kool met een ca. 12,1 kg gewichtstoename aan uranium-fluorverbindingen en mogelijk F₂, HF en koolstof-fluorverbindingen.
2. Natuurlijk uranium heeft een activiteit van ca. 25 kBq/g aan totale activiteit, dat wil zeggen de som van de activiteit van ²³⁴U, ²³⁵U en ²³⁸U. Door het verrijken van natuurlijk uranium van 0,7 % (massaprocent) naar 4,55 % aan ²³⁵U verandert ook de hoeveelheid activiteit per gram:
4,55 % verrijkt uranium komt ongeveer overeen met 100 kBq/g = 0,1 MBq/g aan totale activiteit (Bron: Urenco).
3. Voor uraniumisotopen komt 1 RE_{inh} (Bq/Sv) overeen met ;
1 RE_{inh} ²³⁴U = 1,8 MBq (type F; > 17 jaar); DCC_{inh} = 5,6.10⁻⁷ Sv/Bq
1 RE_{inh} ²³⁵U = 1,9 MBq (type F; > 17 jaar); DCC_{inh} = 5,2.10⁻⁷ Sv/Bq
1 RE_{inh} ²³⁸U = 2,0 MBq (type F; > 17 jaar); DCC_{inh} = 5,0.10⁻⁷ Sv/Bq

(Bron: Uitvoeringsregel Stralingsbescherming, Bijlage 1.4, Onderdeel D, tabel 2.)

De jaarlijkse lozingslimiet van 130 RE komt dus overeen met

130 RE/jaar * (1,8-2,0) MBq/RE = 234 - 260 MBq/jaar.

Dit komt overeen met (234 - 260) MBq / 0,1 MBq/g = 2340 - 2600 g = 2,3 - 2,6 kg/jaar.

(In het bovenstaande voorbeeld is de lozingslimiet omgerekend naar het maximaal te lozen gewicht aan 4,55 % verrijkt uranium).

In verrijkt uranium is de onderlinge verhouding van de uraniumisotopen uiteraard gewijzigd ten opzichte van natuurlijk uranium. In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de massa- en activiteitsverhouding van 4,55 % verrijkt uranium.

Tabel 2 Massa- en activiteitsverhouding van uraniumisotopen bij een 4,55 % verrijkingsgraad.

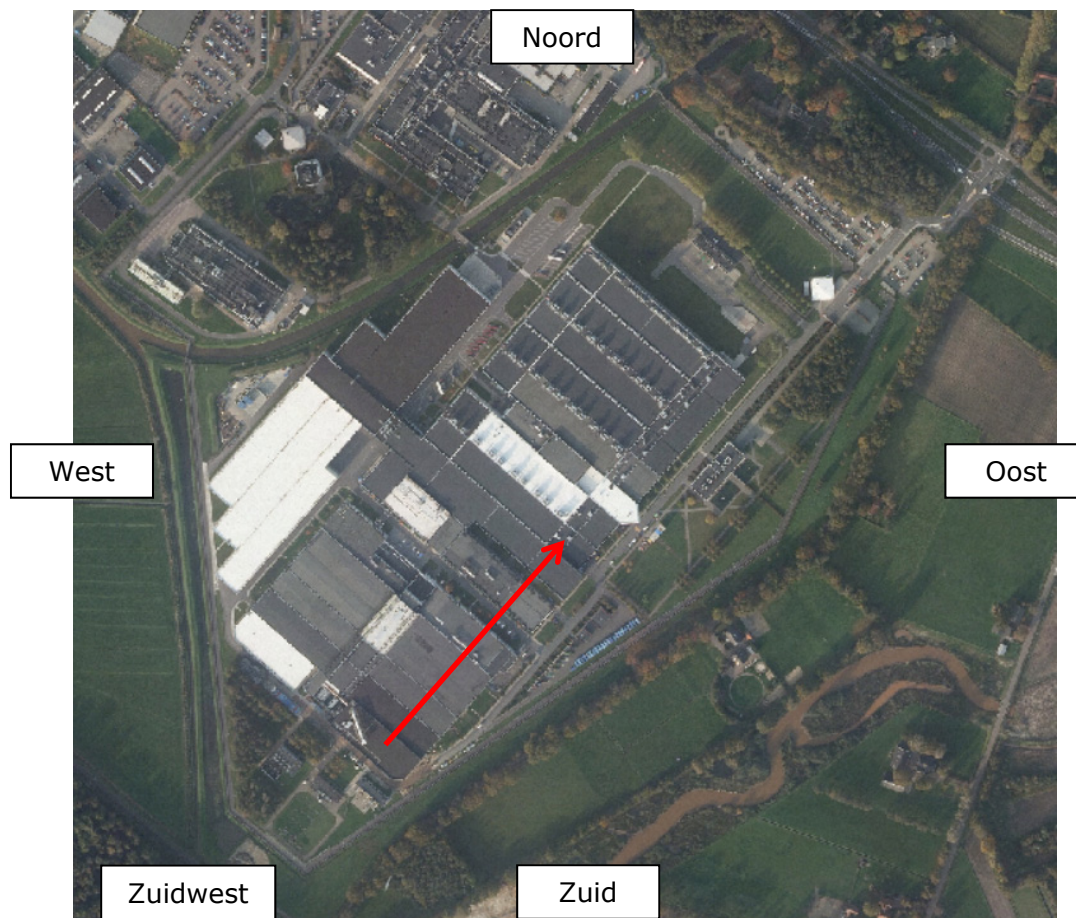
	Massa (%)	Bq/g	Bq (%)
U-238	95.409	1.19E+04	10.8%
U-235	4.55	3.64E+03	3.3%
U-234	0.041	9.48E+04	85.9%
som		1.10E+05	

Uit Tabel 2 blijkt duidelijk dat de massa van ²³⁸U nog steeds meer dan 95% van het totaal uitmaakt, maar dat de activiteit voor het grootste deel wordt bepaald door ²³⁴U.

2 Situatieschets van locatie in take-off hal 4 van SP5

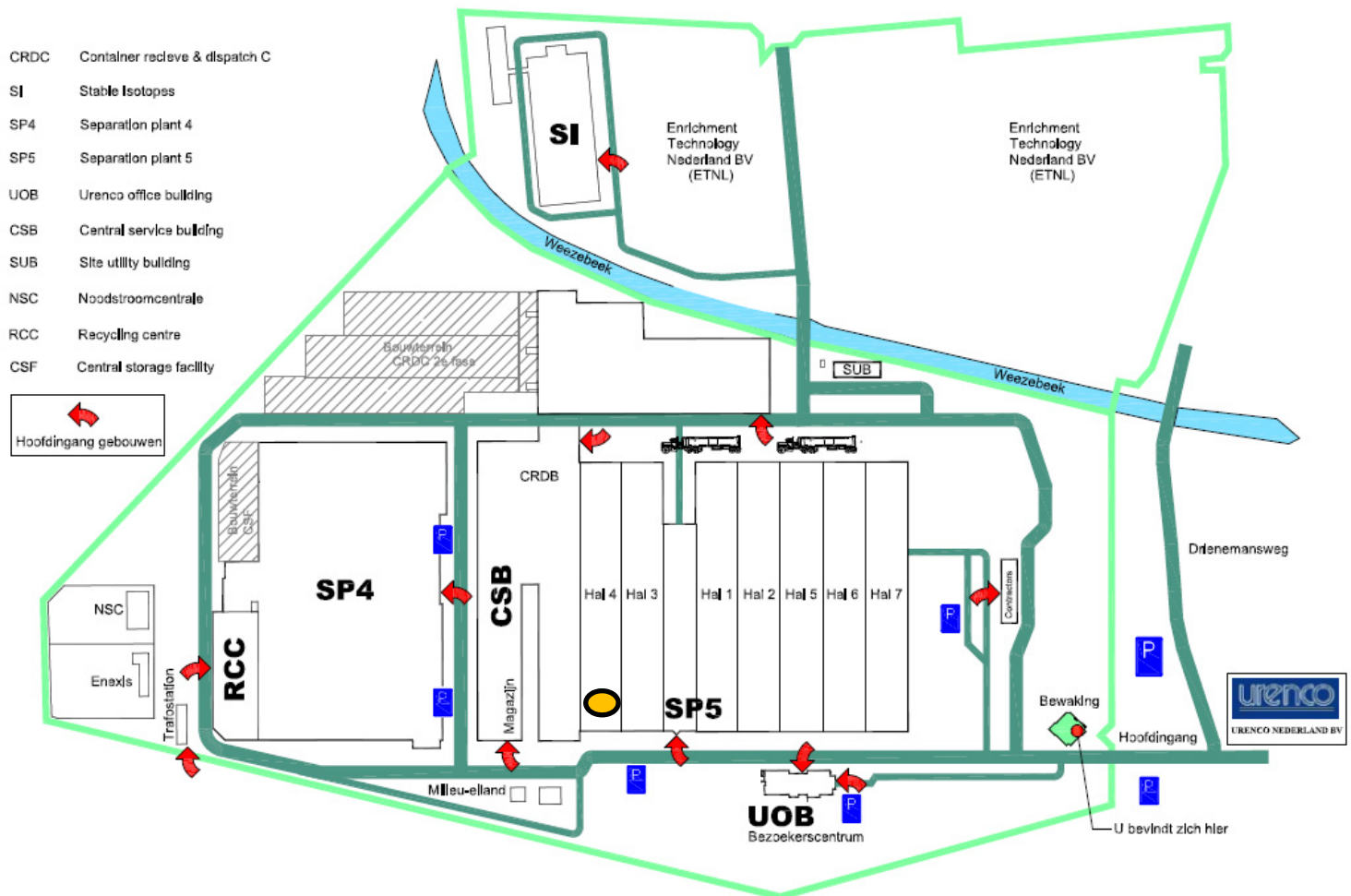
2.1 Situatieschets


In Figuur 1 is een foto van het Urenco terrein te Almelo van bovenaf weergegeven. Tijdens het incident heerste een zuidwestelijke windrichting met een windsnelheid van ca. 5-7 m.s-1. Zie de meteorologische gegevens in Bijlage 1.



Figuur 1 Ligging van de verrijkingshallen ten opzichte van Noord-Zuid richting (bron : gisopenbaar.overijssel.nl). Het lozingspunt ligt exact aan het eind van de pijlpunt.

Het incident heeft plaatsgevonden op 27 augustus 2015, om 4:14 uur in de take-off hal van hal 4 van SP5. Zie figuur 2.



Figuur 2 Plattegrond van de verrijkingshallen van Urenco. Het incident heeft plaatsgevonden onderaan hal 4 van SP5; informatie van Urenco. Zie de locatie aangegeven met .

3 Werkaanpak en gebruikte apparatuur

3.1 Werkaanpak

Op 16 september 2015 heeft de ANVS een inspectiebezoek gebracht bij Urenco te Almelo. RIVM is op verzoek van de ANVS hierbij aanwezig geweest om ter plaatse monsters te kunnen nemen en metingen uit te kunnen voeren.

Bij aanvang van het inspectiebezoek is er eerst overleg geweest tussen vertegenwoordigers van Urenco, ANVS en RIVM. Doel van dit overleg was het beter begrijpen van de aard van het incident, en het krijgen van een overzicht van de al door Urenco uitgevoerde metingen met de bijbehorende meetresultaten.

De volgende handelingen zijn overeengekomen:

- Beschouwing van de ventilatietoren van hal 4 op het dak. Ter plaatse veegtesten uitvoeren door RIVM van nog niet schoongemaakte oppervlakken en uitvoeren van metingen met een oppervlaktebesmettingsmonitor (indien het oppervlak dit toelaat). Zie onder bij 3.2.3.
- Uitvoeren van veegtesten in het ventilatieruimte van Hal 4. Hierin is een deel van de afgeventileerde kool-aerosolen neergeslagen. Zie 3.3.1 en 3.3.2.
- Het selecteren van enkele watermonsters voor het op het laboratorium in Bilthoven uitvoeren van een contra-expertise. Deze monsters zijn door Urenco op het dak genomen later op de dag van het incident.

Bij alle handelingen waren vertegenwoordigers van Urenco aanwezig.

3.2 Monsternamen en metingen nabij ventilatietoren van hal 4

3.2.1 *Veegtesten en metingen door Urenco*

Urenco heeft op 27 augustus 2015 op het dak nabij de ventilatietoren in noordoostelijke richting op ca. 76 plekken veegtesten uitgevoerd.

Urenco heeft slechts op een gering aantal plekken (ca. 5 à 10) een verhoging ten opzichte van de achtergrond aangetroffen. Dit betrof de nabijheid van de ventilatietoren met waarden tot $\sim 1\text{--}2 \text{ Bq.cm}^{-2}$ voor totaal-alfa en $\sim 4 \text{ Bq.cm}^{-2}$ voor totaal-beta besmetting.

Na 27 augustus heeft Urenco het dak schoongemaakt. Ook heeft het in de dagen na het incident flink geregend; op 30 augustus viel er 29,7 mm, zie Bijlage A.

3.2.2 *Veegtesten door RIVM*

Op 16 september heeft RIVM in aanwezigheid van de ANVS op het dak getracht niet schoongemaakte oppervlakken alsnog door middel van een veegtest te controleren op een besmetting. De gebouwventilatie op het dak van hal 4 bestaat uit een vierkante uitlaat van ca. $3 \times 3 \times 2 \text{ m}$ (l x b x h). De uitgaande lucht wordt aan de verticale zijkanten door schuine lamellen neerwaarts geventileerd en wel zo dat regen niet naar binnen kan slaan. De bovenzijden van de lamellen zijn na het incident door Urenco schoongemaakt.

Zie voor de monstergegevens en de meetwaarden van alle hieronder beschreven veegtesten in tabel 3, paragraaf 4.1.2.

RIVM heeft een veegtest van de bovenzijde van de lamellen uitgevoerd aan de noordoostzijde van de ventilatiestroom (nr. 1A). Tevens heeft RIVM een veegtest uitgevoerd aan de achterzijde van dezelfde lamellen (nr 1B). Hierbij is aangenomen dat de achterzijde niet schoongemaakt is door Urenco.

Opmerking

De ventilatiekoker is in zijn geheel ingepakt door Urenco, met als doel dat deze geheel verwijderd zou worden en vervolgens gedecontamineerd.

Op een afstand van ca. 10 m van de ventilatie uitgang stond in de noordoostrichting op het dak een rand op ca. 0,5 m hoogte die was afgedekt door kunststof. Hier heeft RIVM een veegtest uitgevoerd aan de onderzijde van deze kunststof rand (nr. 1C).

Op ruime afstand zijn controle-veegtesten genomen van de gebouwventilatie-uitlaat van hal 2. Deze controle-veegtesten zijn bedoeld als achtergrondwaarde. Volgens waarneming van Urenco zijn er geen besmette oppervlakken op die afstand van hal 4. Gelijk aan hal 4 heeft RIVM zowel de bovenzijde van de lamellen geveegd (nr. 2A) als de onderzijde (nr. 2B).

3.2.3 Watermonsters door Urenco op het dak

Urenco heeft daags na het incident enkele ondiepe regenplasjes van het dak door absorptie met tissues overgebracht in 1 L polyethyleen flessen. Deze tienwatermonsters zijn door Urenco door middel van ICP-MS geanalyseerd op uraniumgehalte.

RIVM heeft 5 monsterflessen van het chemisch lab van Urenco meegenomen voor contraexpertise. Uit alle monsters is een deelmonster van 250 ml genomen, in een teldoos overgebracht en gegeleerd door middel van het toevoegen van een gelvormend poeder. Deze monsters zijn vervolgens gammaspectrometrisch onderzocht met een meettijd van 60.000 seconden (bijna 17 uur).

3.3 Werkwijze monsternamen en metingen in de ventilatieruimte van de gebouwventilatie van hal 4

3.3.1 Meting door RIVM met de Berthold LB 124 handmonitor

Op de vloer van het ventilatiesysteem, op de zolder boven hal 4, is met de Berthold LB124 een oppervlaktebesmetting gemeten van 14-16 cps aan totaal alfa besmetting.

Met een geschatte alfa-efficiëntie van 10 % voor een (homogeen) besmette vloer en een detectoroppervlak van 12 x 14 cm wordt een oppervlakte besmetting van $\sim 1 \text{ Bq.cm}^{-2}$ aan totaal-alfa berekend. Dit komt goed overeen met de $1,7 \text{ Bq.cm}^{-2}$ aan totaal-alfa die door middel van een veegtest is bepaald; zie tabel 3, veegtest 3F.

In praktijk is de Berthold LB124 (zie 3.4) bedoeld voor het meten van een oppervlakte-besmetting aan een glad en vlak oppervlak;

bijvoorbeeld een tafel- of een vloeroppervlak. Is het oppervlak echter afwijkend, zoals de lamellen van de ventilator op het dak, of het inwendige van het ventilatiesysteem, dan is de Berthold LB 124 feitelijk ongeschikt. Dit komt omdat de afstand van het besmette oppervlak tot de detector te groot is of omdat de detector qua afmetingen niet in een deel van het ventilatiehuis past.

3.3.2 *Veegtesten door Urenco en RIVM in de ventilatieruimte*

Het ventilatiesysteem op de zolder van hal 4 is door Urenco verzegeld na het incident. Pas in de aanwezigheid van de ANVS is het ventilatiesysteem op 16 september geopend om de mate van besmetting vast te kunnen stellen. Een meettechnicus van Urenco en twee vertegenwoordigers van RIVM/VLH hebben in beschermende kleding en voorzien van adembescherming in het ventilatiesysteem een aantal veegtests genomen.

In de schoepen van de ventilator (3A), aan de buitenkant (3B), op de as (3D), en aan het uiteinde van de as (3C) was duidelijk zeer fijnkorrelig zwart poeder waarneembaar. Veegtests van de bovengenoemde plekken waren dan ook zwart. De geluidsdemp-doekfilters (3E) aan de linkerzijde van de deur en de vloer (3F) naast de ventilator zijn ook door middel van veegtests bemonsterd. Deze tests waren duidelijk minder zwart, eerder grijs van kleur.

In tabel 3 staan de resultaten van deze veegtests verzameld.

3.3.3 *Meting aan gebouwfilters van CSB, RCC, SP4 en SP5*

In opdracht van de ANVS voert het RIVM jaarlijks een contra expertise uit op de metingen die de nucleaire installaties zelf uitvoeren op hun lozingen naar lucht en water. Er wordt een vooraf afgesproken aantal lozingsmonster van afvalwater opgehaald en geanalyseerd. Zo worden er jaarlijks bij Urenco acht monsters afvalwater en ventilatielucht opgehaald; deze acht monsters zijn bij normaal bedrijf min of meer toevallig over het jaar verdeeld. In dit geval is er sprake van een nucleair incident en dan worden juist uit die betreffende week (2015, week 35) de ventilatieluchtfilters en het afvalwater opgehaald.

De ventilatieluchtfilters zijn geheel volgens de normale procedures gemeten met een gasdoorstroomteller op totaal-alfa en totaal-beta activiteit.

3.4 **Gebruikte apparatuur bij Urenco door RIVM**

Oppervlaktebesmetingen : Berthold LB 124

De Berthold LB 124 is een oppervlaktebesmettingsmonitor met een meetoppervlak van 12 x 14 cm (= 168 cm²).

De alfa background is doorgaans 0-1 cpm en de beta background is ca. 10-15 cpm. De telefficiëntie voor een referentiebron bedraagt ca. 21 % voor alfa's (²⁴¹Am) en 44 % voor beta's (³⁶Cl).

Veegtestmeting : RadEye HEC

De RadEye HEC (HandEcount) is een samplecounter systeem voor het gelijktijdig meten van veegtesten op de aanwezigheid van bèta en alfa straling. De Hand-E-count bevat een 2-inch fosfor scintillator gekoppeld aan een schuifbare samplelade. De veegsamples (filters) met een diameter tot 2 inches (50 mm) kunnen in de samplelade geplaatst

worden. De alfa background is doorgaans 0-1 cpm en de beta background varieert van 30-40 cpm. De telefficiëntie voor een referentiebron bedraagt ca. 35 % voor alfa's (^{241}Am) en 22 % voor beta's (^{99}Tc).

4 Resultaten en discussie

4.1 Veegtesten

4.1.1 Toetsing aan limieten voor oppervlaktebesmetting

De vigerende grenswaarde voor het vrijgeven van een laboratoriumbesmetting bedraagt 0,4 Bq.cm⁻² voor totaal-alfa en 4 Bq.cm voor totaal-beta [1]. Dit is een grenswaarde voor vrijgave die in de jaren '90 in de Richtlijn Radionucliden-laboratoria is opgenomen. Deze richtlijn was destijds als bijlage toegevoegd aan de KEW. Urenco hanteert een grenswaarde voor onvoorwaardelijke vrijgave die een factor 10 lager is; dit geldt ook op het dak. Dus 0,04 Bq.cm⁻² voor totaal-alfa en 0,4 Bq.cm⁻² voor totaal-beta.

4.1.2 Resultaten van veegtesten door RIVM en Urenco

In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de oppervlaktebesmettingen.

Tabel 3 Oppervlaktebesmetting bepaald door RIVM op het dak van hal 4 en hal 2, en door RIVM en Urenco in ventilatieruimte van hal 4.

Omschrijving	Bq/cm2	Bq/cm2		
Ventilatieunit op dak van hal 4	alfa	beta		
1A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.2	0.15		
1B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.2	0.11		
1C Rand op dak op ca. 5 m van ventilatiehuis in NO-richting	0.03	0.10		
Ventilatieunit op dak van hal 2				
2A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.01	0.1		
2B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.00	0.03		
Ventilatiehuis van gebouwventilatie Hal 4	RIVM Bq/cm2	RIVM Bq/cm2	Urenco Bq/cm2	Urenco Bq/cm2
	alfa	beta	alfa	beta
3A Schoepen in ventilator	1.0	0.3	0.6	0.5
3B Buitenrand ventilatorhuis	2.3	2.2	2.0	6.9
3C As-einde aan buitenkant	2.8	2.3	0.6	1.2
3D As aan binnenkant	1.1	0.5	0.6	0.8
3E Doekfilters linkerzijde	1.2	0.5	1.4	1.0
3F vloer voor de ventilator	1.7	0.9	3.2	3.9

In Bijlage 2 is een overzicht gegeven van alle meetwaarden en aannames die hebben geleid tot de oppervlaktebesmettingen in tabel 3.

Conclusie over de oppervlaktebesmettingsmetingen

De oppervlaktebesmettingen op het dak zijn kleiner dan de grenswaarden van 0,4 en 4 Bq.cm⁻² voor totaal-alfa, respectievelijk, totaal-beta besmetting.

De totaal-alfa oppervlaktebesmettingen in het ventilatiesysteem voldoen echter allen *niet* aan de limietwaarde van 0,4 Bq.cm⁻². De totaal-beta waarden voldoen allen wel aan de limietwaarde van 4 Bq.cm⁻².

Opmerking.

In natuurlijk uranium is de totaal-alfa activiteit ongeveer gelijk aan de totaal-beta activiteit. Bij verrijkt uranium is de bijdrage van totaal-alfa hoger dan van totaal-beta. Dit komt omdat de verrijking van ²³⁵U ook leidt tot de verrijking van ²³⁴U. En ²³⁴U is een zuivere alfa-straler zonder beta-activiteit.

4.1.3 *Vergelijking van RIVM veegtesten met de resultaten van Urenco*

De veegtesten die Urenco en RIVM beiden uitgevoerd hebben in het besmette ventilatiesysteem op de zolder van hal 4 zijn met elkaar vergeleken in tabel 3.

Gegeven de onzekerheden die samenhangen met het nemen en analyseren van veegtests (zie 4.1.5) komen de meetresultaten redelijk tot goed overeen. Alle totaal-alfa meetwaarden overschrijden de limiet van 0,4 Bq.cm⁻². Opmerkelijk is dat in vier gevallen bij Urenco de totaal-beta waarde hoger is dan de totaal-alfa waarde. Dit zou te maken kunnen hebben met een overschatting van de totaal-alfa telefficiëntie; de overige variabelen zijn namelijk gelijk in hetzelfde veegfilter.

4.1.4 *Meting en berekening van oppervlaktebesmetting*

Bij het berekenen van een oppervlaktebesmetting aan de hand van veegtests is gebruik gemaakt van de volgende uitgangspunten:

- 1 De netto telsnelheden voor totaal-alfa en totaal-beta zijn gemeten met de Hand-Ecount vanwege de hoge gevoeligheid en lage achtergrond.
- 2 Een realistische schatting van het geveegde oppervlak. Dit is nauwkeuriger dan standaard uitgaan van 300 cm².
- 3 Een realistische schatting van het veegrendement. Door het vegen van zwart poedermateriaal is redelijk in te schatten dat ca. 50 % van het materiaal is geveegd. De lamellen van de gebouwventilatie op het dak waren relatief schoon. Daar is het veegrendement conservatief op 20 % geschat.
- 4 Een realistische schatting van de telefficiëntie. Dat wil zeggen dat de telefficiëntie van 35 % voor een alfa-referentiebron wordt gecorrigeerd voor een koolpoedermmonster: een telefficiëntie van 20 % voor alfa's wordt gehanteerd. De beta-telefficiëntie van ca. 22 % wordt eveneens afgerond naar 20 %.

4.1.5 *Onzekerheden bij het uitvoeren van veegtesten*

Het uitvoeren van veegtesten is bedoeld voor het *kwalitatief* aantonen van een oppervlaktebesmetting, en niet voor een exacte uitkomst. Er zijn immers een groot aantal variabelen die van invloed zijn op de

uiteindelijk bepaalde oppervlaktebesmetting [2]. In Bijlage C is een voorbeeld gegeven van algemene onzekerheden die in de laatste versie van ISO FDIS 7503-1 vermeld staan. Hieronder staat een overzicht van de onzekerheden bij de veegtesten op de diverse locaties bij Urenco:

- 1 Het type veegfilter: droog of nat; of een droog veegfilter op een vochtig oppervlak.
- 2 Het veegrendement: standaard 10 % of is er meer informatie?
- 3 De aard van het geveegde oppervlak: glad of ruw, vies of vochtig
- 4 De druk die tijdens de veegactie is uitgeoefend
- 5 Het oppervlak: hoeveel cm² was het exact?
- 6 De nuclidenamenstelling en de overeenkomst met het kalibratienuclide
- 7 De homogeniteit van de besmetting over het geveegde deeloppervlak
- 8 De aard van de besmetting: gedeponeerde aerosolen, (ingedroogde) vloeistof, poedermateriaal, e.d.
- 9 Nauwkeurigheid van de achtergrondmeting ter plaatse: bij Urenco varieerde de beta-achtergrond op het dak sterk.

Al deze variabelen zijn vooraf moeilijk in te schatten en zullen in elke besmettingssituatie apart beoordeeld moeten worden. Het is soms mogelijk om een schatting te geven van het veegrendement door voor en na een veegactie met een handmonitor te meten.

In het algemeen zijn de onzekerheden bij veegtesten groot [2]. Bij ervaren analisten, en een relatief glad veegoppervlak zijn de verschillen minimaal in de orde van 10-30 %. Bij onregelmatige oppervlakken, deels vies van aard, met een poederig neerslag dat lokaal inhomogeen is gedeponeerd kunnen de verschillen al snel tot een factor 3-10 oplopen.

Opmerking

Aangenomen wordt dat er geen 'ongebonden' uraniumisotopen zijn geweest, maar dat alle uraan-activiteit aan koolaerosolen gebonden is geweest.

In de stralingshygiënische praktijk is het gebruikelijk om het veegrendement conservatief te schatten als 0,1; dat wil zeggen dat 90 % van de oppervlaktebesmetting niet afgeveegd zou worden. In dit specifieke geval van een gedeponeerd zwart poeder is het echter visueel waar te nemen dat de besmetting voor een veel groter deel dan 0,1 wordt afgeveegd. In de berekening van de oppervlaktebesmetting in het ventilatiesysteem heeft RIVM een veegrendement van 0,5 toegepast, en op de lamellen van de gebouwventilatie op het dak een veegrendement van 0,2. Urenco past standaard een factor 0,1 toe met als doel een conservatieve schatting van de werkelijke waarde.

4.2

Watermonsters

4.2.1

Monsternamen door Urenco

Op 27 augustus heeft Urenco op het dak op een aantal plaatsen water bemonsterd door met tissue 'regenplas-water' te absorberen en over te brengen in een 1 L polyethyleen-monsterfles. Zo is er op 10 plaatsen een watermonster genomen. Deze monsternamen zijn uitgevoerd voor de schoonmaak van het dak.

Urenco heeft met ICP-MS de concentratie aan uranium bepaald in $\mu\text{g.l}^{-1}$. In twee van de tien monsters heeft Urenco een concentratie van 32 en 10 $\mu\text{g.l}^{-1}$ aangetoond. Aangenomen dat 1 g (4,55%) verrijkt uranium overeen komt met ~ 100 kBq (zie tabel 1, toelichting 2) volgt voor de massaconcentratie van 32 $\mu\text{g.l}^{-1}$ een activiteitsconcentratie van 3,2 Bq.l^{-1} aan uranium.

4.2.2

Gammaspectrometrie aan de watermonsters van het dak van hal 4
RIVM heeft op 16 september op het radiologische laboratorium van Urenco vijf van de 10 watermonsters geselecteerd voor een gammaspectrometrische contra-expertise. Het betrof de watermonsters met de nummers 5, 8, 9, 10a en 10b. Van alle monsters is 250 mL gegeleerd om het uitzakken van vaste bestanddelen te voorkomen, en vervolgens in een standaardgeometrie van 250 ml geanalyseerd. In tabel 4 staat een overzicht van de gammaspectrometrische analyse van de watermonsters.

Tabel 4 Activiteitsconcentratie in watermonsters, genomen door Urenco op het dak van hal 4; gammaspectrometrie resultaten voor U-235 van RIVM, ICP-MS resultaten voor uranium van Urenco.

Monsternr.	RIVM* ^{235}U Bq.l^{-1}	Urenco** $\mu\text{g.l}^{-1}$ / Bq.l^{-1}	Opmerkingen
5	< 0,4	2,2 / 0,22	Zichtbare zwarte korreltjes /vlokjes in de gel en op de bodem.
8	< 0,5	< 2 / < 0,2	
9	< 0,4	< 2 / < 0,2	
10a	< 0,5	10 / 1,0	
10b	0,4 \pm 0,1	32 / 3,2	

* De gammaspectrometrische bepaling gaf aan dat er in monster 10b met een grote onzekerheid (± 60 %) ook ^{238}U aanwezig was door middel van de gammalijn van de dochter ^{234}Th ; deze kwalitatieve bepaling komt neer op $1,2 \pm 0,7$ Bq.l^{-1} voor ^{238}U .

** De ICP-MS resultaten van Urenco zijn omgerekend naar activiteitsconcentraties met de omrekening 1g uranium (4,55% verrijkt) = 100 kBq totaal-alfa; 1 μg U komt dus overeen met 0,1 Bq aan totaal-alfa.

Discussie van de resultaten in de watermonsters

De ICP-MS techniek is voor uranium in water vele malen gevoeliger dan gammaspectrometrie.

De gammaspectrometriresultaten voor ^{235}U van RIVM, verkregen in een gegeleerd deelmonster van 250 ml, kunnen omgerekend worden naar een activiteitsconcentratie voor 4,55 % verrijkt uranium met de verhoudingen die vermeld staan in tabel 2 op pag. 10. Hieruit zou een totale activiteit aan uranium van $0,4 + 1,2 + 9,7$ Bq voor, respectievelijk, $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} + ^{234}\text{U} \approx 11$ Bq volgen. Dit is een ruime factor 3 hoger dan de activiteitsconcentratie die Urenco heeft bepaald. Het monster is echter aantoonbaar inhomogeen. Het feit dat er koolachtig materiaal op de bodem van de teldoos voor de gammaspectrometriemeting ligt kan (deels) verklaren waarom de gammameting veel hoger uitkomt. Verder is de onzekerheid in deze gammameting relatief groot (± 30 %) omdat er ook altijd uraniumlijnen in het achtergrondspectrum van de meetopstelling aanwezig zijn. Zo beschouwd komt de activiteitsconcentratie van 0,4 Bq.l^{-1} voor ^{235}U en 3,2 Bq.l^{-1} voor uranium, aangetroffen door respectievelijk RIVM en Urenco in monster 10b, acceptabel met elkaar overeen.

4.3 Metingen van gebouwfilters van RCC, CSB, SP4 en SP5 in wk 35

In tabel 5 staan de totaal-alfa en totaal-beta resultaten van de filters van CSB, RCC, SP4 en SP5 uit week 35 (23-30 augustus 2015).

De activiteit op de filters van RCC, SP4 en SP5 vertonen geen verhoging ten opzichte van de overige filters in 2015. Bij RCC en SP5 worden slechts detectiegrenzen gerapporteerd; de meetwaarden van SP4 in week 35 verschillen niet van de meetwaarden in de week van 19-26 juli. Het filter van CSB is echter duidelijk verhoogd in de totaal-alfa en totaal-beta activiteit. De totaal-alfa activiteit is daarbij ongeveer 3 maal hoger dan de totaal-beta activiteit. Dit is een gebruikelijke verhouding bij 4,5 % verrijkt uranium.

Tabel 5 Totaal-alfa en totaal-beta meetresultaten aan SP5, SP4, CSB en RCC ventilatieluchtfilters van Urenco in week 35 van 2015.

Plant	Begin Periode	Eind Periode	Sampler weeknr	Alfa RIVM			Beta RIVM		
				< (mBq/m ³)	± (mBq/m ³)	fout	< (mBq/m ³)	± (mBq/m ³)	fout
SP5	23-aug-15	30-aug-15	1MA5	<	0.03		<	0.08	
	23-aug-15	30-aug-15	2MA5	<	0.04		<	0.12	
SP4	23-aug-15	30-aug-15	35	0.019	±	0.003	0.188	±	0.015
CSB	23-aug-15	30-aug-15	35	1.47	±	0.10	0.48	±	0.03
RCC	23-aug-15	30-aug-15	35	<	0.01		<	0.02	

Urenco heeft in het CSB filter van week 35 vergelijkbare activiteitsconcentraties aangetroffen: 2,41 mBq.m⁻³ voor totaal-alfa en 0,5 mBq.m⁻³ voor totaal-beta. Voor RCC, SP4 en SP5 zijn slechts detectiegrenzen gevonden. Dit komt goed overeen met de RIVM meetwaarden in tabel 5.

Met een roosterionisatiekamer is het mogelijk om het energiespectrum van een alfastraler te meten. Dit is uitgevoerd aan het CSB filter van week 35. Kanttekening is echter dat een bestoft filter door de zelfabsorptie van de alfadeeltjes geen fraai spectrum oplevert. In veel gevallen is er alleen iets te zeggen over de maximum energie en is de rest van het spectrum vervormd.

Uit de meting van het alfa spectrum aan het CSB-deelfilter met de roosterionisatiekamer bleek een maximum alfa energie van 4,8 MeV. Dit bevestigt de aanwezigheid van ²³⁴U ($E_{\max} = 4,77$ MeV).

Volgens Urenco heeft de take-off hal van SP5 gedurende enkele minuten via de CRDB ruimte in verbinding gestaan met CSB. Door het sluiten van de deuren is die verbinding gesloten. Er is dus een deel van de, aan filtermateriaal gebonden, uraniumactiviteit in de CSB ruimte terechtgekomen en via de ventilatiefilters van CSB naar buiten geventileerd.

4.3.1 *Beoordeling van analyses uitgevoerd door Urenco*

Daags na het incident heeft Urenco een groot aantal veegtesten (> 70) uitgevoerd op het dak vanaf de ventilatietoren, waarbij de nadruk werd gelegd op delen van het dak die met wind mee in noordoostelijke richting gelegen waren. Slechts een klein aantal veegtesten in de directe nabijheid van de ventilatietoren gaf een meetbaar resultaat. De overige metingen betroffen alleen detectiegrenzen.

In het ventilatiehuis van hal 4 is gelijktijdig door Urenco en RIVM een aantal veegtesten gedaan aan zwart koolpoeder dat neergeslagen was in de ventilator. De meetresultaten van Urenco en RIVM komen redelijk tot goed overeen; zie tabel 3.

Bij de analyses van de watermonsters, genomen op het dak, betreft het twee totaal verschillende detectiemethodes; gammaspectrometrie (RIVM) en ICP-MS (Urenco). Ook hier komen de meetresultaten redelijk overeen.

De totaal-alfa en totaal-beta metingen uitgevoerd door Urenco en RIVM aan de gebouwfilters van CSB, RCC, SP4 en SP5 komen eveneens goed overeen.

Conclusie

Urenco heeft op een groot aantal plekken veegtesten uitgevoerd en watermonsters geanalyseerd. In veel gevallen lagen de meetresultaten onder de detectiegrens. Er zijn verspreid over het terrein diverse metingen door Urenco uitgevoerd die geen besmetting hebben vastgesteld.

In vijf watermonsters, genomen op het dak, heeft RIVM een contra-expertise op de uraniumbepaling van Urenco uitgevoerd. Ondanks de verschillende meetmethode (gammaspectrometrie door RIVM en ICP-MS door Urenco) kwamen de resultaten redelijk overeen.

In het ventilatorhuis is door Urenco en RIVM tegelijk een aantal veegtesten uitgevoerd. Hier lagen de meetresultaten binnen de (grote) onzekerheden dicht bij elkaar in de buurt.

Samenvattend is het oordeel dat de bemonstering en de analyses door Urenco correct zijn uitgevoerd.

5 Schatting van vrijzetting van Uranium naar de omgeving

In de onderstaande paragraaf wordt een opsomming gegeven van waarnemingen en feiten omtrent het incident met het koolfilter.

5.1 Opsomming van relevante feiten

Bij het incident met het koolfilter op 27 augustus 2015 is een hoeveelheid van totaal ca. 25 kg aan besmet koolfiltermateriaal in de take-off ruimte van hal 4 terechtgekomen.

Door het incident is er niet alleen besmet koolfiltermateriaal verspreid, maar is er ook HF gevormd. Dit is door de HF-monitor direct gedetecteerd.

Direct na het incident zijn automatische brandmelders aangesproken en zijn de branddeuren gesloten. Na circa 7 minuten is door een handmatig ingrijpen de ventilatie gestopt.

In de minuten dat het ventilatiesysteem nog werkte is een deel van het in de lucht zwevende koolfiltermateriaal aangezogen. In de ventilatieschachten en in de ventilatieruimte is een deel van dat aangezogen en zwevende materiaal achtergebleven. Dit is zowel door Urenco als RIVM aangetoond in het ventilatorhuis op de zolder van hal 4.

De resterende fractie van het koolfiltermateriaal is via het ventilatiesysteem buiten op het dak terechtgekomen. Deze vrijzetting heeft ongeveer 7 minuten geduurd.

De windrichting ten tijde van de vrijzetting was zuidwest, zie Bijlage A. Dit is precies in de lengterichting van het dak.

Er is in de nabijheid van de ventilatietoren door Urenco op enkele plekken een lichte oppervlaktebesmetting van maximaal 4 Bq.cm^{-2} aan totaal-alfa door Urenco aangetroffen. Verder dan 10 meter van de ventilatietoren met de wind mee is in ca. 70 veegtesten geen enkele activiteit aangetoond.

In twee van in totaal 11 watermonsters, genomen op het dak nabij de ventilatietoren, is een lichte verhoging van Uranium aangetoond. Maximale waarde is $32 \mu\text{g.l}^{-1}$ ($= 3,2 \text{ Bq.l}^{-1}$ totaal-alfa) in één monster. Er zijn dus wateroplosbare uraniumverbindingen, zoals bijvoorbeeld UO_2F_2 , op het dak terechtgekomen.

5.2 RIVM schatting van de vrijzetting met de beschikbare feiten

Urenco heeft via drie mogelijke routes getracht een schatting te maken van de hoeveelheid aan koolfiltermateriaal dat naar buiten is vrijgezet. In Bijlage D wordt in detail uiteengezet welke aannames hebben geleid tot de schattingen.

Samenvattend geeft Urenco een schatting met een range die loopt van 0,4 tot 40 gram aan uranium.

RIVM heeft niet de bedrijfstechnische kennis om een vergelijkbare schatting te maken op basis van de registratie van de HF monitor, of op basis van de koolkorrelgrootteverdeling. Er moeten daarvoor aannames gemaakt worden waarvoor technische kennis van het ventilatiesysteem nodig is.

RIVM kan echter wel op basis van de aangetroffen besmetting op het dak een schatting maken. De vrijzetting van uranium naar het milieu wordt immers het best benaderd door de aangetroffen besmetting op het dak. Er is op korte afstand (2 m) van de ventilatietoren een oppervlaktebesmetting aangetroffen van maximaal 4 Bq.cm^{-2} . De breedte van de ventilatietoren is ca. 3 m. Er ligt dus op korte afstand van de ventilatietoren $4 \text{ Bq.cm}^{-2} * 1.10^4 \text{ cm}^2 / \text{m}^2 * 6 \text{ m}^2 = 240 \text{ kBq}$ aan totaal-alfa activiteit.

Volgens Urenco komt 1 g uranium bij een verrijkingsgraad van 4,55 % overeen met 100 kBq. Er ligt dus op korte afstand van de ventilatietoren $\sim 2,4 \text{ g}$ aan uranium.

Metingen van Urenco geven aan dat er na 10 m vrijwel geen activiteit meer waarneembaar is boven de $0,4 \text{ Bq.cm}^{-2}$. Als we ruwweg aannemen dat elke 2 m de uranium depositie halveert in oppervlakte besmetting, maar wel per 2 m in een telkens 1 m bredere 'pluim' gedeponeerd wordt dan komen we op een totaal van 6 g aan uranium; zie tabel 6.

Tabel 6 Schatting van oppervlaktebesmetting op het dak.

Afstand	Oppervlakte besmetting Bq.cm^{-2}	Oppervlak m^2	Vrijgezet uranium g	Totaal g
0-2 m	4	$2 \times 3 = 6$	2,4	
2-4 m	2	$2 \times 4 = 8$	1,6	
4-6 m	1	$2 \times 5 = 10$	1,0	
6-8 m	0,5	$2 \times 6 = 12$	0,6	
8-10 m	0,25	$2 \times 7 = 14$	0,4	6

Onzekerheden in de berekening van de oppervlaktebesmetting

In de schatting gemaakt in tabel 6 zijn slechts twee factoren van belang:

- de bepaling van de oppervlaktebesmetting
- het vaststellen van het totale besmette oppervlak.

Een oppervlaktebesmetting wordt vastgesteld door middel van veegtesten waarbij een oppervlak van ca. 300 cm^2 wordt afgeveegd. Met behulp van een detector die tegelijk totaal-alfa en totaal-beta activiteit kan meten wordt de activiteit op het geveegde oppervlak vastgesteld. Hoe goed het oppervlak geveegd is, ofwel hoeveel besmetting blijft er achter, blijft een onbekende factor. Daarom wordt er in de stralingsbescherming conservatief een veegrendement van 10% gehanteerd waarbij wordt aangenomen dat er 90 % blijft zitten. Urenco heeft in de berekening van de oppervlaktebesmetting een veegrendement van 10 % toegepast, terwijl het oppervlak op het dak glad was en goed afveegbaar was. Het veegrendement van het gedeponeerde koolfiltermateriaal zou zelfs in de buurt van 50 % kunnen

liggen. Dat houdt in dat de oppervlaktebesmetting door Urenco een factor 5 overschat zou zijn. Dit betekent dat de schatting van 6 g in tabel 6 teruggebracht zou worden naar 1,2 g.

Bij de vaststelling van het besmette oppervlak zijn er minder grote onzekerheden. De besmetting op het dak is immers door 76 veegtesten goed in kaart gebracht. Het minimale oppervlak lijkt simpel de breedte van de ventilatietoren vermenigvuldigd met een afstand waarover een verhoging is vastgesteld, waardoor het oppervlak dan $3 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 30 \text{ m}^2$ is. Dit resulteert met dezelfde berekening in tabel 6 in een totaal van 4,7 g.

Zou het maximale oppervlak in tabel 6 (totaal 50 m^2) geheel besmet zijn met de hoogste oppervlaktebesmetting van 4 Bq.cm^{-2} dan resulteert dat in $50 \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 4 \text{ Bq.cm}^{-2} = 2000 \text{ kBq}$. Dat komt overeen met een maximale schatting van 20 g uranium; 4,55 % verrijkt.

Dit is echter duidelijk een forse overschatting omdat de hoogste oppervlaktebesmetting alleen maar in de directe nabijheid van de ventilatietoren is aangetroffen.

Het RIVM komt dus op basis van de besmetting op het dak tot een schatting van 1,2 tot 20 g aan vrijgezet uranium, met 6 g als meest waarschijnlijke waarde.

Onbekend blijft echter de fractie aan zich als gas gedragende aerosolen die niet op het dak zijn neergeslagen, maar direct in de lucht zijn verspreid. Volgens Urenco is 0,2 massa-% van de koolkorrels $< 38 \text{ }\mu\text{m}$. Daarvan zou 25 % kleiner zijn dan $15 \text{ }\mu\text{m}$ en zich gedragen als 'gasvormige' aerosolen. Van het totaal aan ca. 3 kg uranium in het koolfilter zou dat overeenkomen met maximaal 1,5 g. Slechts een fractie wordt echter daadwerkelijk door het ventilatiekanaal afgeventileerd naar buiten; zie Bijlage D, par. 10.3. Het lijkt dan ook realistisch dat de bijdrage van de 'gasvormige' aerosolen niet meer dan ca. 1 g bedraagt.

5.3 Vergelijking van Urenco schattingen met RIVM schatting

In een interne notitie [3] heeft Urenco op basis van drie benaderingen een schatting gemaakt van de vrijzetting; zie bijlage D. Alle benaderingen bevatten aannames die een redelijke schatting van de onbekende werkelijke situatie proberen weer te geven. In tabel 7 wordt een overzicht gegeven van de schattingen door Urenco en RIVM.

Tabel 7 Overzicht van gemaakte schattingen van uranium vrijzetting

Uitgangspunt	Schatting Urenco (best guess)	Schatting RIVM (best guess)	Opmerkingen
1. Bepaling van de besmetting op het dak	1 - 20 g (5 g)	1,2 - 20 g (6 g)	Besmette oppervlak ruw ingeschat
Gasvormige aerosolen	-	(< 1 g)	Fractie van naar de lucht afgeventileerde gasvormige aerosolen is onbekend.
2. Bepaling op basis van de HF monitor	2 - 40 g (10 g)	-	Er zijn meer chemische reacties mogelijk die er toe leiden dat HF in het

Uitgangspunt	Schatting Urenco (best guess)	Schatting RIVM (best guess)	Opmerkingen
3. Bepaling op basis van de korrelgrootte van de aangetroffen kooldeeltjes	0,4 - 30 g (3,3 g)	-	<p>koolfilter aanwezig is.</p> <p>Toepassing van Wet van Stokes geldt voor evenwichtsituaties. Dat was het in de eerste minuten na het incident zeker niet.</p>

De besmetting op het dak is in feite de enige waarneming die direct een aanwijzing is voor de vrijzetting naar het milieu. De andere twee benaderingen van Urenco zijn indirect en hebben meerdere aannames nodig om tot een vrijzetting te komen. Zo registreert de HF monitor niet alleen maar HF dat door hydrolyse van UF_6 is ontstaan, maar ook HF dat door diverse chemische reacties in het koolfilter vooraf al aanwezig was. De uitslag van de HF monitor is dus altijd een overschatting van de hoeveelheid vrijgezet UF_6 .

De korrelgrootteverdeling die door een extern laboratorium is vastgesteld geeft ruwweg aan dat 0,2 massa-% van de korrels < 38 μm . De wet van Stokes gaat echter pas goed op voor 'luchtgedragen' deeltjes die zich als gas gedragen. Dat geldt volgens Urenco zelf bij deeltjes < 15 μm . Hier is een veilige overschatting gehanteerd door Urenco.

5.4 Conclusie over de gemaakte schattingen van de emissie

De schattingen die gemaakt zijn door Urenco en door RIVM op basis van de besmetting op het dak volgt dezelfde benadering: een realistische beoordeling van de veegproeven en het geschatte besmette oppervlak. Het is dan ook niet zo vreemd dat die schattingen van Urenco en RIVM goed overeenkomen. In beide gevallen komt er een 'best guess' uit van 5-6 g met een range van 1-20 g.

De fractie aan 'gasvormige' aerosolen zal niet door metingen bevestigd kunnen worden. Men kan slechts een schatting maken op basis van de verwachte korrelgrootteverdeling. RIVM komt hier tot een maximale vrijzetting van 1 g. Dit valt geheel in de onzekerheid van de totale schatting.

De schattingen die Urenco heeft gemaakt op basis van de HF vrijzetting en op basis van de korrelgrootteverdeling bevatten beide enkele aannames met onzekerheden die kunnen leiden tot een maximale of en minimale vrijzetting. Desondanks vallen de geschatte minimale en maximale vrijzettingen goed samen met de schatting op basis van de dakmeting. Samenvattend schat RIVM dat er minimaal 0,4 en maximaal 40 g uranium is vrijgezet.

Er is, gezien de lengte (>> 100 m) van het dak in noordoostelijke richting, en het feit dat er na ca. 10 m geen oppervlaktebesmetting meer is aangetroffen, slechts een zeer geringe kans dat een fractie van de uranium-besmetting voorbij het dak aan het hek bij de terreingrens terecht is gekomen.

6 Conclusies

Bij een incident met een koelfilter van een *product venting trap* is in de *take-off* ruimte van hal 4 van op 27 augustus 2015 een onbekende hoeveelheid UF₆ en uranium gebonden aan koelfiltermateriaal vrijgekomen. De gebouwventilatie heeft nog ca. 7 minuten gewerkt voordat de ventilatie handmatig is afgeschakeld.

Urenco heeft op een groot aantal plekken veegtesten uitgevoerd en watermonsters geanalyseerd. In vijf watermonsters heeft RIVM een contra-expertise op de uraniumbepaling van Urenco uitgevoerd. Ondanks de verschillende meetmethoden (gammaspectrometrie door RIVM en ICP-MS door Urenco) kwamen de resultaten redelijk overeen.

In het ventilatorhuis is door Urenco en RIVM tegelijk een aantal veegtesten uitgevoerd. Hier lagen de meetresultaten binnen de (grote) onzekerheden dicht bij elkaar in de buurt. RIVM is van oordeel dat de bemonstering en de analyses door Urenco goed uitgevoerd zijn.

RIVM en Urenco hebben een schatting gemaakt van de mogelijke vrijzetting van uranium, gebaseerd op metingen en een aantal (realistische) aannames. De meest aannemelijke schatting ligt in de buurt van 6 g. De schatting van de vrijzetting varieert binnen een bandbreedte van minimaal 0,4 tot 40 gram aan uraniumisotopen. Urenco heeft volgens de vergunning een maximaal toegestane jaarlimiet van 130 RE (zie toelichting bij tabel 1). Dit komt alleen voor ²³⁸U overeen met 2600 g. Een lozing van 40 g zou dus overeenkomen met 1,5 % van de jaarlimiet.

Ondanks de zuidwesten wind, geheel in de lengterichting van het dak, is er geen depositie van koolstofgebonden uranium verder op het dak aangetroffen. Tevens is er op het lager gelegen gedeelte van het dak van hal 4, aan de kant van de weg, geen besmetting aangetroffen. Er is, gezien de lengte (>> 100 m) van het dak in noordoostelijke richting, slechts een zeer geringe kans dat een fractie van de uranium-besmetting voorbij de rand van het dak en dus het hek bij de terreingrens terecht is gekomen. Er zijn verspreid over het terrein van Urenco diverse metingen uitgevoerd die geen besmetting buiten het dak hebben vastgesteld.

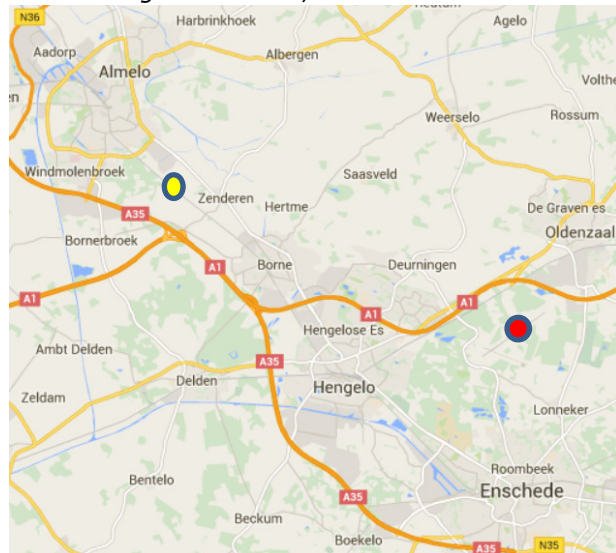
7 Bijlage A Meteogegevens van KNMI weerstation Twente

Tabel A1 Uurgegevens van 27 augustus 2015

Label A1 - Bargegegevens van 27 augustus 2015								
Twente			windsnelheid	temp	regenduur	uursom	druk	
Station	Datum	Tijd (h)	wind richting	0,1 m/s	0,1 oC	0,1 h	0,1 mm	0,1 hPa
290	27-08-15	1	170	30	185	3	1	10071
290	27-08-15	2	200	50	189	0	0	10069
290	27-08-15	3	200	50	190	0	0	10067
290	27-08-15	4	220	70	192	0	0	10072
290	27-08-15	5	230	50	185	0	0	10077
290	27-08-15	6	230	50	177	0	0	10085
290	27-08-15	7	220	40	173	0	0	10089
290	27-08-15	8	220	40	172	0	0	10096
290	27-08-15	9	190	40	173	0	0	10097
290	27-08-15	10	190	50	179	0	0	10096
290	27-08-15	11	200	40	177	6	1	10102
290	27-08-15	12	210	50	171	10	2	10102
290	27-08-15	13	230	40	162	10	3	10105
290	27-08-15	14	210	50	148	10	7	10107
290	27-08-15	15	220	40	147	10	5	10107
290	27-08-15	16	210	30	142	10	9	10108
290	27-08-15	17	200	30	143	9	3	10104
290	27-08-15	18	210	40	141	0	0	10106
290	27-08-15	19	190	30	140	10	8	10108
290	27-08-15	20	200	40	139	8	6	10110
290	27-08-15	21	200	40	137	0	0	10115
290	27-08-15	22	210	40	138	0	0	10120
290	27-08-15	23	210	30	136	0	0	10120
290	27-08-15	24	220	40	136	0	0	10124

Windrichting ; 90 = oost, 180 = zuid, 270 = west, 360 = noord.

Locatie Vliegveld Twente; Coördinaten : 52° 17' NB, 06° 53' OL



Ligging van Urenco (●) ten opzichte van vliegveld Twente (●).

Tabel A2 Uurgegevens van 28 augustus 2015

Twente			windsnelheid		temp	regenduur	uursom	druk
Station	Datum	Tijd (h)	wind richting	0,1 m/s	0,1 oC	0,1 h	0,1 mm	0,1 hPa
290	28-08-15	1	210	40	134	0	0	10129
290	28-08-15	2	220	30	135	0	0	10133
290	28-08-15	3	210	30	135	0	0	10136
290	28-08-15	4	200	30	136	0	0	10141
290	28-08-15	5	220	30	134	0	0	10147
290	28-08-15	6	220	40	134	0	0	10154
290	28-08-15	7	210	30	137	0	0	10161
290	28-08-15	8	210	30	140	0	0	10164
290	28-08-15	9	230	30	149	0	0	10171
290	28-08-15	10	220	40	160	0	0	10175
290	28-08-15	11	230	50	181	0	0	10178
290	28-08-15	12	210	30	194	0	0	10178
290	28-08-15	13	230	50	208	0	0	10181
290	28-08-15	14	210	40	201	0	0	10182
290	28-08-15	15	240	50	194	0	0	10186
290	28-08-15	16	280	20	198	0	0	10189
290	28-08-15	17	250	20	194	0	0	10190
290	28-08-15	18	210	20	174	0	0	10197
290	28-08-15	19	240	10	147	0	0	10202
290	28-08-15	20	170	10	133	0	0	10210
290	28-08-15	21	180	10	121	0	0	10214
290	28-08-15	22	180	10	113	0	0	10217
290	28-08-15	23	130	10	103	0	0	10219
290	28-08-15	24	0	0	111	0	0	10221

Windrichting ; 90 = oost, 180 = zuid, 270 = west, 360 = noord.

8 Bijlage B Meetgegevens en berekening van de veegtesten

Tabel B1 Totaal-alfa en totaal-beta oppervlaktebesmetting gemeten bij Urenco door RIVM en Urenco

Omschrijving	Geschat opp cm ²	Eff alfa cps/Bq	Eff beta cps/Bq	Veeg rend
Ventilatieunit op dak van hal 4				
1A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	100	0.2	0.2	0.2
1B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	100	0.2	0.2	0.2
1C Rand op dak op ca. 5 m van ventilatiehuis in NO-richting	100	0.2	0.2	0.2
Ventilatieunit op dak van hal 2				
2A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	100	0.2	0.2	0.2
2B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	100	0.2	0.2	0.2
Ventilatiehuis van gebouwventilatie Hal 4				
3A Schoepen in ventilator	100	0.2	0.2	0.5
3B Buitenrand ventilatorhuis	50	0.2	0.2	0.5
3C As-einde aan buitenkant	50	0.2	0.2	0.5
3D As aan binnenkant	40	0.2	0.2	0.5
3E Doekfilters linkerzijde	50	0.2	0.2	0.5
3F vloer voor de ventilator	100	0.2	0.2	0.5

Tabel B1 (vervolg)

Omschrijving	Bq/filter alfa	Bq/cm2 alfa	Bq/filter beta	Bq/cm2 beta		
Ventilatieunit op dak van hal 4						
1A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	3.3	0.2	2.9	0.15		
1B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	3.7	0.2	2.3	0.11		
1C Rand op dak op ca. 5 m van ventilatiehuis in NO-richting	0.6	0.03	2.0	0.10		
Ventilatieunit op dak van hal 2						
2A Bovenzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.2	0.01	1.4	0.1		
2B Onderzijde van de lamellen aan de noord-oostzijde	0.0	0.00	0.6	0.03		
Ventilatiehuis van gebouwventilatie Hal 4		RIVM Bq/cm2 alfa		RIVM Bq/cm2 beta	Urenco Bq/cm2 alfa	Urenco Bq/cm2 beta
	3A Schoepen in ventilator	48	1.0	16	0.3	0.6
	3B Buitenrand ventilatorhuis	56	2.3	56	2.2	2.0
	3C As-einde aan buitenkant	69	2.8	56	2.3	0.6
	3D As aan binnenkant	23	1.1	10	0.5	0.6
	3E Doekfilters linkerzijde	29	1.2	13	0.5	1.4
	3F vloer voor de ventilator	86	1.7	46	0.9	3.2

9 Bijlage C Onzekerheden in veegtesten volgens ISO FDIS 7503-1

In de recente revisie van ISO 7503 part 1-3 is uitgebreide aandacht besteed aan onzekerheden [4]. Onzekerheden in het veegrendement zijn 'an order of magnitude larger than other uncertainties in the measurement'.

Deze ISO standards zijn nog niet gepubliceerd, maar circuleren in het laatste stadium als Formal Draft International Standard (FDIS). Na de laatste tekstuele goedkeuringronde wordt een FDIS definitief gemaakt.

10.4 Wipe test uncertainties

The uncertainties in assessing the levels of contamination from wipe tests are great. Reference [1] gives a clear indication of the problems. The wipe efficiency, that is the percentage of contamination removed by a single wipe of the surface, is affected by many factors including, but not limited to the following:

- the type of wipe used;

Licensed to: Kwakman, P.J.M. Dhr.
Downloaded: 2015-09-21

Single user licence only, copying and networking prohibited

© ISO 2015 – All rights reserved

14

ISO/FDIS 7503-1:2015(E)

- the pressure applied by the person when making the wipe;
- the area wiped;
- the contamination distribution;
- accuracy of the background measurement;
- the porosity, chemical composition, texture and cleanliness of the surface.

Reference [1] demonstrates wipe efficiencies can vary enormously and are almost impossible to assess accurately and the uncertainties in the wipe efficiency are an order of magnitude larger than other uncertainties in the measurement. Consequently, it has become common practice to allocate a value of 10 % to the wipe efficiency. This percentage of efficiency was taken as the most likely fraction removed in a single wipe.

10 Bijlage D Schattingen door Urenco van vrijgekomen uranium

(bron: Urenco, d.d. 15-12-2015 [3])

Op diverse manieren is geprobeerd om een schatting te maken van de mogelijke vrijzetting van uranium. Dit document is bedoeld om een overzicht te geven van de verschillende gebruikte benaderingen en de verschillen te bediscussiëren.

De diverse benaderingen zijn:

1. Bepaling van de besmetting op het dak,
2. Bepaling van de hoeveelheid uranium op basis van de vrijzetting van HF,
3. Bepaling van de hoeveelheid uranium op basis van de korrelgrootte van aangetroffen kooldeeltjes,

Eerst bespreken we kort de verschillende benaderingen en de uitkomsten. Daarna worden deze in een tabel vergeleken en worden de voors en tegens besproken.

10.1 Besmetting op het dak

Op het dak is rond de uitblaastoren een besmettingsverhoging gevonden. Met name vlak rond deze toren is deze besmetting hoog (tot maximaal 3,6 Bq/cm²). Op kleine afstand reeds is deze besmetting al flink afgenomen. Om een schatting te maken van de vrijzetting is deze hoogste besmetting genomen (afgerond naar 4 Bq/cm²), en vermenigvuldigd met een schatting van het oppervlak waarop deze besmetting is aangetroffen (25.000 cm²). De besmetting bedraagt dan 100 kBq. Bij een verrijkingspercentage van 4,5% is de specifieke activiteit 100 kBq/g, zodat deze 100 kBq met 1 gram materiaal overeenkomt.

Een verdere verfijning kan gevonden worden door alle gemeten verhogingen over het dak te vermenigvuldigen met een (schatting van) het oppervlak waarover deze besmetting zich heeft verspreid. De genomen veegproeven zijn genomen van de luchtuitlaten en -inlaten van de ruimteventilatie op het dak, en op een strook dakbeplating op een opstaande rand. Uit deze veegproeven blijkt dat vlakbij de ventilatietoren er een duidelijke verhoging is, en deze verhoging over een zekere afstand door de wind is meegevoerd. Benedenwinds is de besmetting over een groter oppervlak verspreid dan bovenwinds. De geconstateerde besmetting liggen in een strook ongeveer in de lengterichting van het gebouw (ZW-NO)

Er is niets bekend over op welke afstand loodrecht op deze richting de besmetting verspreid is. We nemen aan dat de vastgestelde waarde zich verspreid heeft over een strook van gemiddeld 3 m breedte. Door telkens de gemeten waarde te vermenigvuldigen met de afstand tussen de meetwaardes en deze 3 m, kan de totale besmetting bepaald worden. De schatting van de vrijzetting komt dan op 4,8 g afgerond 5 g.

10.1.1 Onzekerheidsanalyse

In deze beschouwing zitten twee belangrijke onzekerheden, te weten de breedte van de strook waarover de besmetting zich verspreid heeft en het afwrijfrendement. Omdat het een glad oppervlak betreft en de depositie kort daarvoor heeft plaatsgevonden, zou het afwrijfrendement wel een factor 2 hoger kunnen liggen, en daarmee de vrijzetting een factor 2 lager. Anderzijds is het niet onmogelijk dat een deel van de vrijzetting niet is neergeslagen, maar zich verspreid geeft. Als onzekerheid kunnen we meenemen dat de daadwerkelijke vrijzetting een factor 2 hoger kan zijn. Bovendien kan de besmetting zich over een grotere (of kleinere) strook dan de 3 m hebben verspreid. We nemen aan dat deze strook ook een factor 2 groter of kleiner kan zijn. In totaal levert dit een onzekerheid op van een factor 4, zodat als range van onzekerheid voor dit model 1 tot 20 gram volgt.

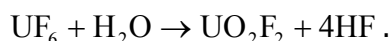
10.2 Bepaling op basis van HF-vrijzetting

Er is geschat dat 63 gram HF vrijgekomen. Dit is gedaan op basis van de HF-concentratie die gemeten is in de schoorsteen van hal 1 t/m 4 (gezamenlijke schoorsteen). De exacte piek-concentratie is niet vastgesteld (wel dat deze boven de 10 mg/m³ lag, gedurende ongeveer 1 minuut). Doordat ten gevolge van het incident de GEVS afzuiging nabij de pompkar is afgescheurd zal de weerstand van de afzuiging in hal 4 zeer laag zijn en derhalve nagenoeg alle afgezogen lucht afkomstig zijn uit dit afzuigpunt. Het is dus een redelijke schatting dat deze concentratie van 10 mg/m³ een redelijke schatting is van de concentratie nabij de pompkar.

De ruimteafzuiging zit op een grotere hoogte en verder van de locatie waar het filter heeft gestaan. Hierdoor zal een verdunning optreden van de HF concentratie. We nemen aan dat toch gemiddeld een concentratie van 10 mg/m³ gedurende 1 minuut is vrijgezet. De overige tijd is de concentratie beneden de 1 mg/m³ geweest.

De ventilatie heeft tot 7 minuten na het incident aangestaan. Als we aannemen dat gedurende de eerste minuut er een concentratie van 10 mg/m³ in de ruimte heeft gehangen, en daarna 6 minuten een concentratie van 1 mg/m³, en deze zelfde concentratie ook is geventileerd door de ruimteafzuiging (54000 m³/h), dan zal de totale lozing $10/1000 \cdot 54000/60 \cdot 1 + 1/1000 \cdot 54000/60 \cdot 6 = 9 + 5,4 = 14$ gram HF bedragen.

Deze HF is (grotendeels) ontstaan via de reactie:



Een deel van deze HF zal op het filter geadsorbeerd zijn geweest, door een reactie die eerder heeft plaatsgevonden. Als we aannemen dat de helft van deze HF afkomstig is van Uranium dat bij deze reactie betrokken is geweest is vrijgezet, kan de vrijzetting van uranium als volgt bepaald worden.

$14/2 = 7$ gram HF komt overeen met $7/20,01 = 0,34$ mol HF. Volgens bovenstaande reactie is de vrijgekomen hoeveelheid uranium dan $0,34/4 = 0,085$ mol UO₂F₂. Bij een atoommassa van 238, betekent dat

$0,085 \cdot 238 = 20$ gram uranium. Het zware UO_2F_2 zal veel minder snel dan het HF worden afgezogen en ook gedeeltelijk neerslaan in het ventilatiekanaal. Als we aannemen dat toch nog de helft hiervan naar buiten komt, komen we op een vrijzetting van 10 gram uranium.

10.2.1 Onzekerheidsanalyse

Er is aangenomen dat de helft van het HF dat in de ruimte is gedetecteerd, afkomstig is van uranium dat is vrijgezet en de rest al als HF aanwezig was in het filter. Om een maat te vinden voor de gevoeligheid van deze aanname, kunnen we aannemen dat er geen HF in het filter aanwezig is, waardoor de vrijzetting een factor 2 hoger kan komen te liggen. Aan de andere kant kunnen we ook aannemen dat er meer HF op het filter aanwezig is, een factor twee hoger, waardoor de vrijzetting een factor 2 lager komt te liggen.

Verder is aangenomen dat de helft van het UO_2F_2 wordt vrijgezet. Voorzichtigheidshalve kunnen we aannemen dat alle UO_2F_2 is vrijgezet. Anderzijds is het ook goed mogelijk dat er minder dan de helft van het UO_2F_2 vrijkomt. Als we aannemen dat dit ook een factor 2 minder kan zijn, komt de totale range van dit model uit op 2 tot 40 gram.

10.3 Bepaling op basis van kooldeeltjes

Het uranium dat is vrijgekomen, zat geadsorbeerd aan actief kool. Dit zijn overwegend nog grote korrels geweest, maar een deel zijn kleine korrels, tot zelfs stof. Er is kort na het incident vastgesteld wat de verdeling was van de korrelgrootte van het actiefkool. Hieruit blijkt dat 0.2 massa% van de kool kleiner is dan $38 \mu\text{m}$.

Grote korrels zullen snel neerslaan, alleen de kleine stofdeeltjes zijn licht genoeg om meegevoerd te worden op de luchtstroom. Om daarvan een inschatting te maken, gebruiken we de volgende beschouwing:

1. De gemiddelde opwaartse snelheid in de ruimte is $0,011 \text{ m/s}$ (op basis van debiet ventilatie en oppervlakte ruimte).
2. Deeltjes worden meegevoerd als de valsnelheid kleiner is dan deze opwaartse snelheid.
3. De valsnelheid van vaste deeltjes kan worden bepaald met de

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_f)}{9\mu} g R^2$$

wet van Stokes:

waarbij:

ρ_p =dichtheid deeltje ($=400 \text{ kg/m}^3$),

ρ_f =dichtheid lucht ($=1,3 \text{ kg/m}^3$),

μ =viscositeit van lucht ($=1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$)

g =valconstante ($=9,81 \text{ m/s}^2$)

R =straal van deeltjes

V =valsnelheid

4. Bij een straal van $15 \mu\text{m}$ is de valsnelheid gelijk aan de gemiddelde opwaartse snelheid. Vanwege de ietwat grove benadering, nemen we aan dat alle deeltjes met een grootte kleiner dan $38 \mu\text{m}$ worden meegevoerd.

5. Uit monsternamen van de deeltjes in hal 4 blijkt dat er op het filter 3,0 kg uranium aanwezig was. Van deze massa zit 0,2% op kool dat luchtgedragen is, dus 6 gram.
6. We nemen aan dat deze kool zich uniform verspreidt over de ruimte van de take-off van 11424m^3 .
7. Gedurende 7 minuten heeft de ventilatie aangestaan, zodat 6300m^3 geventileerd is, dus is $6300/11424 \times 6 = 3,3$ gram uranium vrijgezet

10.3.1 Onzekerheidsanalyse

Een van de onzekerheden in deze analyse betreft de deeltjesgrootteverdeling. Dat 0,2 massa-% van de deeltjes kleiner is dan $38\text{ }\mu\text{m}$ is vastgesteld met een zeef. Bij niet-ronde deeltjes kunnen ook deeltjes met een groter volume (en dus massa) door de zeef komen, zodat in werkelijkheid minder dan 0,2 massa-% kleiner is dan $38\text{ }\mu\text{m}$. Dit blijkt ook uit een nadere analyse door een gespecialiseerd laboratorium die van de deeltjes die door de zeef zijn gekomen een gedetailleerde deeltjesgrootteanalyse heeft gemaakt.

Uit de analyse met de wet van Stokes blijken deeltjes met een diameter kleiner dan $15\text{ }\mu\text{m}$ luchtgedragen zijn onder de bovengenoemde aannames. Uit de analyse van het gespecialiseerde laboratorium blijkt dat van het materiaal dat is opgestuurd (de 0,2 massa% dat door het filter is gekomen), ongeveer 25% een diameter $<15\text{ }\mu\text{m}$ heeft. De aanname dat 0,2 massa-% luchtgedragen is, zorgt dus voor een overschatting met een factor 4. Als we aannemen dat inderdaad alleen deeltjes met een diameter kleiner dan $15\text{ }\mu\text{m}$ vrijgezet worden, wordt de schatting van de vrijzetting 0,8 gram.

In de bepaling van de deeltjesgrootte die luchtgedragen is, is uitgegaan van de dichtheid van actiefkool. Deeltjes waar een aanzienlijke hoeveelheid uranium op zit, zullen zwaarder zijn en daardoor verhoudingsgewijs minder worden meegevoerd. Hierdoor zal de ondergrens nog wat omlaag gebracht kunnen worden, mogelijk tot rond de 0,4 gram.

Anderzijds is aangenomen dat de gemiddelde opwaartse snelheid bepalend is voor welke deeltjes meegevoerd worden. Als vanwege de heftigheid van de vrijzetting uit het filter, een deel van de inhoud vlakbij de afzuiging is terecht gekomen, waar de afzuigsnelheid groter is, kan een wat groter deel toch in de afzuiging terechtgekomen zijn. Een gedeelte hiervan zal in het ventilatiekanaal neerslaan (omdat het niet echt luchtgedragen is), maar een inschatting hiervan is moeilijk te maken gezien alle onzekerheden. Als we voorzichtigheidshalve aannemen dat de vrijzetting dan een factor 10 hoger ligt, komen we op een schatting van 30 gram. Dit derde model komt dus uit op een range van 0,4 tot 30 gram.

10.4 Discussie van benaderingen

De volgende benaderingen van Urenco zijn in de vorige sectie besproken, zie tabel D1.

Tabel D1 Vrijzetting van uranium geschat door Urenco via drie verschillende benaderingen

Paragraaf + Benadering	Vrijzetting range*	Vrijzetting 'best guess'	Re ¹
10.1 Besmetting dak	1 - 20 g	5 g	0,3
10.2 Vrijzetting HF	2 - 40 g	10 g	0,5
10.3 Kooldeeltjes	0,4 - 30 g	3,3 g	0,2

* De range is berekend met een minimum en een maximum schatting van de input variabelen.

Aangezien de totale inhoud van het koolfilter zo'n 3 kg uranium is geweest en verreweg het grootste deel van het actiefkool zich verspreid heeft over de omgeving waar de 'product venting trap' gestaan heeft, lijken deze schattingen niet onrealistisch. De uitkomsten passen qua orde grootte ook goed bij elkaar, hoewel de benaderingen zeer verschillend zijn. Toch hebben alle gebruikte modellen wel een mate van onzekerheid, zoals ook in de tekst al is aangegeven.

Besmetting op het dak

De benadering op basis van de besmetting op het dak en de deeltjesgroottes van het kool kent enkele onzekerheden. Zo zal een deel van de besmetting mogelijk luchtgedragen zijn en dus niet vast te stellen als besmetting op het dak. Bovendien is er wat onzekerheid over het totale oppervlak, een schatting van de onzekerheid voor dit model komt op 1 tot 20 gram.

Vrijkomen van HF

De schatting op basis van de HF vrijzetting geeft een range van 2 tot 40 gram, met name vanwege de onzekerheid over hoeveel uranium er precies is vrijgezet, bij vrijzetting van 1 gram HF.

Deeltjesgrootte van het koolfiltermateriaal

De zeer lichte deeltjes zullen ook niet meer aan te treffen zijn in het monster van het actiefkool, omdat deze al verdwenen zijn. Hoe groot deze fractie is, is moeilijk vast te stellen. Het feit dat de besmetting in de ruimte zich beperkt tot met name hal 4 en dat de besmetting in hal 3 en het CRDB zeer beperkt in omvang is, is mogelijk een maat hiervoor. Bij een groter aandeel lichtere deeltjes zal de besmetting zich over een veel groter oppervlak verspreid hebben. Dit pleit er dus voor dat het aandeel lichte deeltjes zeer beperkt is.

Uitgaande van de meetresultaten van de deeltjesgrootte komen we voor dit model op een vrijzetting van 0,8 gram (mogelijk slechts 0,4 gram als meegenomen wordt dat deeltjes met daarop uranium in verhouding zwaarder zijn), maar omdat er nogal wat onzekerheden in dit model zitten, gaan wij er van uit dat een betere schatting van de vrijzetting 3 gram is. Bovendien kan de vrijzetting nog wat groter zijn doordat deeltjes door de heftigheid van de vrijzetting vlakbij de afzuiging zijn

¹ Hierbij is gerekend met de inhalatiedosiscoëfficiënt voor de bevolking ouder dan 17 jaar, voor ²³⁸U in een snel door het lichaam opgenomen verbinding, wat geldt voor UO₂F₂. Deze waarde is volgens "Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ" gelijk aan 5·10⁻⁷.

terecht gekomen en daardoor afgezogen zijn. De werkelijke vrijzetting zou een factor 10 hoger kunnen liggen, zodat dit model een range van 0,4 gram tot 30 gram geeft.

Verhouding van geschatte vrijzetting tot vergunde jaarlimiet

De benaderingen 1 t/m 3 geven waardes die in dezelfde orde grootte liggen. 'Het gemiddelde daarvan zit dicht bij 6 gram. Dit lijkt dan ook de beste en meest realistische schatting die gegeven kan worden op basis van de beperkte informatie die beschikbaar is. Alle foutmarges in ogenschouw nemend, vallen alle verschillende modellen binnen een range van ongeveer 0,4 gram tot 40 gram. Een vrij grote range, veroorzaakt door de grote onzekerheden in de verschillende modellen. Desondanks is de vrijzetting beperkt tot ver onder de vergunningslimiet voor lozing (130 Re/jaar). Zelfs als de meest conservatieve overschatting wordt meegenomen, is de lozing nog beperkt tot 2 Re, oftewel 1,5% van de jaarlimiet.

11 Referenties

- 1 Regeling van de Minister van Economische Zaken, de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en de Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport van 18 oktober 2013, nr. WJZ/12066857, tot vaststelling van de uitvoeringsregeling voor stralingsbescherming van de Minister van Economische Zaken (Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ). Staatscourant november 2013, nr 32478.
- 2 Jung H., Kunze J.F., Nurrenbern J.D. Consistency and efficiency of standard swipe procedures taken on slightly radioactive contaminated metal surfaces. Health Phys. 2001 May, 80 pp. S80–S88
- 3 Persoonlijke communicatie van Urenco aan RIVM; d.d. 15-12-2015.
- 4 ISO FDIS 7503 Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination.
Part 2: Test method using wipe samples.



RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag