

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

VOORWOORD

Naar de opdrachtgever heeft het Directoraat Groenland Kwaliteitsbeoordeling van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat van ECN gevraagd een onderzoek uit te voeren naar het verarmd uranium bij het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer. De opdracht is verlopen op basis van een lening van de Staat aan ECN.

Onderzoek verarmd uranium

Naar de opdrachtgever heeft de Stichting Laka (documentatie- en onderzoekscentrum, kernenergie) er om verzocht een aantal aanvullende informatie over de omvang en de aard van het onderzoek te verzamelen.

vliegtuigongeval Bijlmermeer

ECN is verantwoordelijk voor de realisering van de Raad voor Amsterdam, de afdeling Engineering & Maintenance van de KLM en de Raad voor de Luchtmacht.

VOORWOORD

Medio 1998 heeft het Directoraat-Generaal Rijksluchvaartdienst van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat aan ECN gevraagd een onderzoek uit te voeren naar het verarmd uranium bij het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer. De opdracht is verleend per brief met kenmerk LI/VZ/98.160919. ECN projectnummer is 810297. Het project is uitgevoerd in het cluster Decommissie, Afval en Milieu van ECN-Nucleair Onderzoek.

Naast de opdrachtgever heeft de Stichting Laka (documentatie en onderzoekscentrum kernenergie) er zorg voor gedragen dat eerder verzamelde informatie over de ramp en toepassingen van verarmd uranium voor het ECN onderzoek beschikbaar kwam en heeft zij advies gegeven over de richting van het onderzoek.

ECN is erkentelijk voor de medewerking van de Brandweer Amsterdam, de afdeling Engineering & Maintenance van de KLM en de Raad voor de Luchtvaart.

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het vliegtuig van El Al dat op 4 oktober 1992 in de Bijlmermeer verongelukte, bevatte balansgewichten van verarmd uranium. De gewichten waren aangebracht in drie van de zes stuurvlakken in de staart en voorzien van een nikkel-cadmium beschermingslaag. Volgens opgave van producent Boeing en El Al bevatte het vliegtuig in totaal circa 282 kg uranium. Circa 152 kg balansgewicht is na de ramp niet teruggevonden: het is onzeker wat er met dit deel is gebeurd. Eén van de mogelijkheden is dat het uranium tijdens of na de brand is verstoven. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen, heeft de Rijksluchtvaartdienst ECN opdracht gegeven deze mogelijkheid uit te zoeken aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

1. *Bij welke temperatuur gaat verarmd uranium (metaal) verstuiven, dat wil zeggen bij welke temperatuur komt verarmd uranium metaal vrij in een verspreidbare vorm?*
2. *Bij welke temperatuur treedt verbranding van verarmd uranium (metaal) op?*
3. *Wat is de kans dat verarmd uranium (metaal) verstuijft onder omstandigheden zoals die zich tijdens het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer hebben voorgedaan?*

Conform de opdracht heeft ECN zich bij onderzoeksvragen 1 en 2 beperkt tot een analyse van literatuurgegevens. Deze gegevens hebben betrekking op onderzoek aan uranium metaal zonder nikkel-cadmium beschermingslaag.

vraag 1. Bij temperaturen tot circa 300 °C vindt slechts oppervlakkige oxidatie van uranium metaal plaats (corrosie). Door stevig over de corrosielaag te wrijven zal een weinig uraniumoxide op de hand kunnen achterblijven. Bij verhitting in lucht tot temperaturen boven 300 °C zal een stuk uranium metaal min of meer gelijkmatig oxideren. Bij dit proces komt tussen 350-600 °C uraniumoxide als fijn poeder in verspreidbare vorm vrij. Bij temperaturen van 650-850 °C blijft het oxide grotendeels aan het oppervlak vastzitten; bij (heftige) wrijvingsbewegingen kan het oxide echter wel loskomen. Bij nog hogere temperaturen blijft de beschermende oxidelaag stevig vastzitten.

vraag 2. Naast de hier boven beschreven (geleidelijke) oxidatie, kan uranium metaal bij verhitting in lucht ontbranden (zelfontbranding). Bij welke temperatuur dat gebeurt, is afhankelijk van de verhouding van het oppervlak en het gewicht van het stuk uranium. Uit extrapolatie van experimenten kan worden afgeleid dat een stuk uranium met de afmetingen van de balansgewichten bij temperaturen hoger dan 700-800 °C tot zelfontbranding kan komen. Indien dit proces optreedt, kan het metaal binnen korte tijd volledig "verbranden" tot verspreidbare deeltjes uraniumoxide.

vraag 3. Voor de beantwoording van de derde onderzoeksvraag heeft ECN naast literatuuronderzoek gesprekken gevoerd met ooggetuigen, en de schriftelijke rapportages bestudeerd omtrent de ramp en daarop volgende bergingsactiviteiten. Gaande deze fase van het onderzoek werd duidelijk dat de feiten die nodig zijn om met enige zekerheid tot een uitspraak te komen niet meer kunnen worden achterhaald. Het onderstaande heeft dan ook een sterk speculatief karakter.

Om de kans vast te stellen dat het niet teruggevonden uranium bij het ongeval daadwerkelijk is verstoven dient rekening te worden gehouden met factoren als: de exacte locatie waar het metaal terecht is gekomen tijdens de inslag, de hoogte van de temperatuur waaraan het werd blootgesteld en de duur van die blootstelling, het

vochtgehalte, de aanwezigheid van zuurstof of kooldioxide, de mate van turbulentie, de conditie waarin balansgewichten verkeerden (intact, of in grotere of kleinere stukken), en de conditie van de nikkel-cadmium beschermingslaag. Tijdens en na de ramp is niet op deze factoren gelet: de feiten zijn dus onbekend, noch kunnen zij met enige zekerheid worden gereconstrueerd.

Globaal zijn er drie scenario's denkbaar:

- Het niet-teruggewonden metaal is buiten de brandhaard terecht gekomen. Gezien het zeer hoge soortelijk gewicht is het aannemelijk dat de stukken tijdens de inslag diep zijn ingeslagen. Het metaal is dan deels slechts oppervlakkig gecorrodeerd, bij de berging van de wrakstukken of het ruimen van het puin niet als uranium herkend (daar werd ook niet op gelet) en vervolgens afgevoerd naar stortplaats of schroothandel. In dit scenario is geen verstuiving opgetreden: wel kan huidcontact met uraniumoxide hebben plaatsgevonden.
- Het metaal is in of zeer nabij de brand terecht gekomen, deels geoxideerd, waarbij een deel van de oxides wellicht is verstoven of in het puin terecht is gekomen. De vaste restanten zijn niet herkend en afgevoerd. Ook hier is huidcontact mogelijk geweest.
- Het metaal is (langdurig) blootgesteld geweest aan temperaturen boven de 700-800 °C en is volledig verbrand en daarbij geheel of gedeeltelijk verstoven.

Indien er daadwerkelijk uraniumoxide is verstoven, zullen de deeltjes zich met de wind mee hebben verspreid en zijn neergeslagen op een afstand die varieert tussen enkele tientallen en enkele honderden meters van de ongevalsplek. Uit de literatuur is bekend dat minder dan 10% van deze deeltjes zo klein is dat deze bij inademing in de longen kunnen komen (respirabele fractie).

Hoewel het niet mogelijk is vast te stellen of, en zo ja hoeveel oxide is verstoven zijn er enkele indirecte gegevens bekend die kunnen worden opgevat als een indicatie dat de kans op verstuiving gering moet worden geacht. Zo duurde de kerosinebrand, waarin een temperatuur is opgetreden die tot ontbranding had kunnen leiden, zeer kort (minder dan 1 minuut). Deze brand ontwikkelde zich als een opstijgende vuurbal: het kan worden uitgesloten dat het uranium zich in deze vuurbal heeft bevonden. Eerder uitgevoerd bodemonderzoek toonde geen verhoogde concentratie uranium aan. Dit was overigens ook niet te verwachten, aangezien het eventueel neergeslagen oxide volledig zou wegvallen tegen de natuurlijke concentratie uranium in de bodem. Voorts werd in isotopenonderzoek van bodemonsters geen verarmd uranium aangetoond. De brandweer heeft tijdens de brand geen "wit vuur" waargenomen dat zou kunnen duiden op een uraniumbrand. Sommige teruggewonden balansgewichten waren weliswaar gebroken, maar de beschermingslaag was grotendeels intact en niet door het vuur aangetast.

Al met al heeft ECN - in lijn met eerdere uitspraken- de indruk dat er tijdens de brand weinig tot geen uraniumoxide in de atmosfeer is vrijgekomen. Wegens gebrek aan kennis over de feitelijke omstandigheden, kan gedeeltelijke of volledige oxidatie echter niet met 100% zekerheid worden uitgesloten.

INHOUD

1. INLEIDING	7
1.1. Achtergrond	7
1.2. Aanpak van het onderzoek	8
2. BEHANDELING VAN DE VRAGEN	9
2.1. Hoe kan verarmd uranium uit uranium balansgewichten vrijkomen?	9
2.2. In welke fase van de ramp kan verarmd uranium zijn vrijgekomen ?	11
2.3. Zijn er aanwijzingen dat verarmd uranium is vrijgekomen ?	13
3. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	15
LITERATUUR	17
LIJST MET FIGUREN	18
BIJLAGE 1: De verarmd uranium balansgewichten	19
BIJLAGE 2: Oxideren en vrijkomen van verarmd uranium	23

1. INLEIDING

1.1. Achtergrond

Op 4 oktober 1992 verongelukte het vliegtuig van El Al vlucht 1862 in de Bijlmermeer. Het vliegtuig was een Boeing 747-258F met registratienummer 4X-AXG en serienummer 21737. In drie van de zes stuurvlakken in de staart van dit vliegtuig bevonden zich balansgewichten in de vorm van wigvormige staven van verarmd uranium metaal. De staven waren voorzien van een beschermende laag bestaande uit een nikkel-cadmium plating en een groenkleurige verflaag. Voor de details van de afmetingen en gewichten van de balansgewichten wordt verwezen naar Bijlage 1.

Volgens een recente opgave van Boeing was bij aflevering in dit vliegtuig maximaal 717 lbs (325 kg) verarmd uranium metaal aanwezig in de balansgewichten¹. Later is ca. 94 lbs (43 kg) van deze balansgewichten door El Al vervangen door gewichten van wolfram (tungsten). Dit zou betekenen dat zich ten tijde van het ongeval 282 kg verarmd uranium metaal in het vliegtuig bevond. Slechts een deel van dit uranium, circa 130 kg, is na het ongeval teruggevonden². Er heerst onzekerheid over de bestemming van het niet teruggevonden deel. Het gaat om maximaal 152 kg. Eén van de mogelijkheden is dat het verarmd uranium na de inslag van het vliegtuig tijdens het ongeval is verstoven.

Om over de mogelijke bestemming van het niet-teruggevonden verarmd uranium meer duidelijkheid te verkrijgen, heeft het Directoraat-Generaal Rijksluchtvaartdienst aan ECN de opdracht gegeven uit te zoeken in hoeverre verstuiving van het verarmd uranium tijdens het ongeval heeft kunnen plaatsvinden. Aan ECN zijn drie onderzoeksvragen gesteld:

1. *Bij welke temperatuur gaat verarmd uranium (metaal) verstuiven, dat wil zeggen bij welke temperatuur komt verarmd uranium metaal vrij in een verspreidbare vorm ?*
2. *Bij welke temperatuur treedt verbranding van verarmd uranium (metaal) op ?*
3. *Wat is de kans dat verarmd uranium (metaal) verstuijft onder omstandigheden zoals die zich tijdens het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer hebben voorgedaan ?*

Dit rapport tracht een antwoord te geven op deze vragen en beschrijft het daartoe uitgevoerde onderzoek. De wijze waarop het onderzoek is uitgevoerd, is beschreven in paragraaf 1.2. De behandeling van de vragen is beschreven in hoofdstuk 2, dat wordt gevolgd door "Samenvatting en conclusies" in hoofdstuk 3. In twee bijlagen van het rapport worden de bij de analyse gebruikte gegevens toegelicht. Hierbij wordt verwezen naar literatuurgegevens over het oxideren van verarmd uranium onder verschillende omstandigheden en naar documentatie over het ongeval in de Bijlmermeer. Deze documentatie is aangevuld met verslagen van gesprekken met ooggetuigen die in het kader van dit onderzoek zijn gevoerd.

¹ Voordat de massa van de balansgewichten, behorend bij het serienummer van het verongelukte vliegtuig, op 23 juli 1998 bij de RLD beschikbaar was (opgave is 689 - 717 lbs), werd in de documentatie over het ongeval uitgegaan van 940 lbs verarmd uranium. Dit getal was gebaseerd op eerder door Boeing verstrekte algemene informatie over dit type vliegtuig.

² Volgens opgave van KLM, COVRA en ECN. Het eerder gemelde gewicht van 163 kg betrof het bruto gewicht van het verarmd uranium, d.w.z. inclusief het gewicht van de vaten waarin het verarmd uranium, voor transport en opslag bij COVRA, was verpakt.

1.2. Aanpak van het onderzoek

De problematiek van de drie onderzoeksvragen kan worden verwoord in de volgende driefvoudige probleemstelling:

- I. Hoe kan verarmd uranium uit uranium balansgewichten vrijkomen?**
- II. Tijdens welke fasen van de Bijlmer-ramp kan dit zijn gebeurd?**
- III. Zijn er aanwijzingen dat verarmd uranium is vrijgekomen ?**

Deze vragen sluiten tevens goed aan op de vele vragen die door de bij de ramp betrokken personen in de loop van de tijd zijn gesteld.

Voor de behandeling van probleemstelling I zijn gegevens uit de literatuur onderzocht die betrekking hebben op het chemisch en fysisch gedrag van uranium metaal [1, 2]. Daarnaast zijn voor het onderzoek vooral van belang de experimenten van Mishima et al. en van Megaw met oxidatie en verbranding van uranium metaal, gepubliceerd in [3]. Ook werd gebruik gemaakt van documentatie die door de Stichting Laka in het kader van hun adviseringstaak bij het onderzoek [4] is aangedragen. Overeenkomstig de opdracht is geen experimenteel onderzoek uitgevoerd. Er is nagegaan hoeveel verarmd uranium oorspronkelijk in de balansgewichten van het El Al vliegtuig aanwezig was [5, 6, 7, 8] en hoeveel daarvan is teruggevonden [5, 9]. Bij het bepalen van de vorm van vrijkomen van uranium bij verhitting, was informatie over de vorm en samenstelling van de balansgewichten noodzakelijk [7, 8].

Voor de behandeling van probleemstelling II zijn gegevens over de omstandigheden tijdens de ramp onderzocht, aangevuld met ooggetuigenverslagen. Deze verslagen zijn in een besprekingsverslag vastgelegd. Hierbij is gezocht naar metingen en waarnemingen die meer zekerheid zouden kunnen geven over de omstandigheden tijdens en na het ongeval. Hierbij is ook de invloed van de wind en de bluswerkzaamheden op de verspreiding van uranium onderzocht. Tenslotte is onderzocht waar en wanneer uranium zou zijn vrijgekomen. Hierbij is ook de verontreiniging van de lucht en de bodem berekend, die zou zijn ontstaan indien het ontbrekende deel van het uranium volledig zou zijn verbrand en daarbij ook volledig in de lucht zou zijn vrijgekomen.

Voor de behandeling van probleemstelling III zijn de tot nu toe verrichte metingen van uranium in de bodem geïnterpreteerd [12, 13].

Na behandeling van de bovengenoemde probleemstellingen wordt getracht aan de hand van de hierbij verzamelde informatie een antwoord te geven op de drie onderzoeksvragen. Tevens worden enkele scenario's beschreven die het zoekraken van een deel van de uranium balansgewichten kunnen verklaren.

Toelichtingen op de bij het onderzoek gebruikte gegevens zijn te vinden in de twee bijlagen bij dit rapport.

2. BEHANDELING VAN DE VRAGEN

2.1. Hoe kan verarmd uranium uit uranium balansgewichten vrijkomen?

Onder vrijkomen wordt hier verstaan de verspreiding van uranium uit de balansgewichten in de een of andere vorm naar bodem, water of lucht.

Uranium uit een metalen staaf kan als uraniumoxide vrijkomen door oxidatie of door verdamping. Bij oxidatie van uranium metaal moet onderscheid worden gemaakt tussen zogenaamde **zelfontbranding** van uranium metaal in lucht, waarbij de door de reactie ontstane warmteproductie niet volledig naar de omgeving kan worden afgevoerd en waarbij sprake is van een zichzelf onderhoudende uraniumbrand, en het meer geleidelijke **oxidatieproces** van uranium in lucht, koolmonoxide, kooldioxide of water, waarvoor een continue warmtetoever vanuit de omgeving noodzakelijk is. Zowel het zelfontbrandingsproces als het oxidatieproces worden beïnvloed door het blootgestelde specifieke oppervlak van het uranium metaal.

Voor de behandeling van de eerste probleemstelling is een goed inzicht noodzakelijk in de chemische en fysische omstandigheden waaraan de balansgewichten kunnen hebben blootgestaan tijdens het ongeval. Dit inzicht is in het onderhavige onderzoek slechts in beperkte mate verkregen, met name omdat er geen, voor dit onderzoek relevante, metingen zijn verricht tijdens het ongeval en alleen kan worden beschikt over ooggetuigenverslagen. Ook is een nauwkeurige beschrijving van de afmetingen en chemische samenstelling van de balansgewichten noodzakelijk. In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de balansgewichten zijn vervaardigd uit zuiver verarmd uranium metaal (bevat minder dan 1% verontreiniging) [8]. Het uranium wordt tegen oxidatie beschermd door een cadmium-nikkel plating waarover een groenkleurige verflaag is aangebracht. Bij verhitting van onbeschadigde balansgewichten hoger dan 321 °C smelt de cadmium plating. De hoogsmeltende nikkelplating is waarschijnlijk te dun (< 0,1 mm) om daarna oxidatie van het uranium metaal te verhinderen. De rol van de cadmium-nikkel plating en de verflaag bij zelfontbranding en het geleidelijk oxidatieproces van het uraniummetaal wordt, voorzover ons bekend, in de literatuur niet beschreven.

Bij het onderzoek zijn de volgende chemisch-fysische processen te onderscheiden waardoor uranium kan vrijkomen:

Corrosie

Vanaf kamertemperatuur tot temperaturen lager dan circa 300 °C zal vormgegeven uranium metaal in lucht oppervlakkig oxideren. Hierbij ontstaat een beschermende oxidelaag die verdere oxidatie sterk afremt [1, 3]. Dit proces wordt corrosie genoemd. De bij corrosie gevormde oxidelaag is, afhankelijk van de temperatuur en vochtigheid waarbij het wordt gevormd, geel, groen of zwart van kleur. Het gevormde uraniumoxide is een vaste laag en kan alleen geforceerd worden verwijderd.

Snelle oxidatie

Dit proces treedt op bij temperaturen hoger dan 300 °C. In dit proces wordt een onbeschermd oppervlak min of meer gelijkmatig geoxideerd. Bij dergelijke temperaturen smelt de cadmiumplating en is de nikkelplating waarschijnlijk te dun om voldoende bescherming te bieden. Bij temperaturen tussen de 350 en 600 °C ontstaat uraniumoxide dat als fijn poeder loskomt. Volgens [3] worden bij temperaturen tussen 600 en 700 °C relatief veel kleine oxidedeeltjes gevormd. Bij hogere temperaturen, in het gebied tussen

650 en 850 °C, blijft de oxidelaag grotendeels aan het oppervlak vastzitten, door een soort sintering van de oxidedeeltjes. Slechts door de uitoefening van grote extensieve wrijvingskrachten kan het materiaal loskomen. Bij temperaturen hoger dan 900 °C blijft de beschermende oxidelaag stevig vastzitten [3].

Om de fractie te berekenen die bij verhitting in lucht oxideert, moeten het oppervlak per gewichtshoeveelheid, het zogenoemd specifiek oppervlak, en de oxidatiesnelheid bekend zijn. De balansgewichten hebben een specifiek oppervlak dat varieert tussen 0,05 - 0,15 cm²/gram (zie Bijlage 1). Volgens het literatuuronderzoek van ref. [3] bedraagt in het temperatuurtraject tussen 600 en 1000 °C, de oxidatiesnelheid van uranium in lucht circa 1 g/cm² per uur. Bij hoge graad van turbulentie bedraagt het maximum bij hetzelfde temperatuurbereik 4 g/cm² per uur. Bij temperaturen lager dan 600 °C wordt de oxidatiesnelheid kleiner; bij 400 °C is de oxidatiesnelheid circa 0,2 g/cm² per uur. Bij een specifiek oppervlak van 0,2 cm²/gram zou bij verhitting in lucht gedurende één uur, circa 4% (bij 400 °C) tot 20% (600 - 1000 °C) van een balansgewicht kunnen oxideren. Bij een hoge graad van turbulentie in de toegevoerde lucht zou bij circa 800 °C, zelfs 80% kunnen oxideren.

Bij oxidatie van uranium metaal zal een deel van het gevormde uraniumoxide in een verspreidbare vorm in de lucht kunnen vrijkomen, als zogenaamde aerosolen. De deeltjes moeten daarbij voldoende klein zijn; kleiner dan circa 0,2 mm. Bij snelle oxidatie van een stuk metaal, zonder dat sterke luchtstromen (hoge mate van turbulentie) aanwezig zijn, komt volgens de literatuurgegevens niet meer dan 1% daarvan in de lucht vrij [3]. Indien wel een hoge mate van turbulentie aanwezig is, kan 30% van het gevormde loszittende uraniumoxide in de lucht vrijkomen. Dan komen ook relatief grote oxidedeeltjes vrij. Alleen deeltjes met afmetingen kleiner dan 0,02 mm kunnen over afstanden groter dan 1 kilometer in de lucht worden verspreid. Deeltjes met afmetingen kleiner dan 0,01 mm kunnen bij inademing in de longen komen en vormen de zogenaamde respirabele fractie. Uit experimenten waarbij verarmd uranium werd verhit, blijkt dat minder dan 10% van het in de lucht vrijgekomen uraniumoxide respirabel is. Ook blijkt dat deze respirabele fractie het grootst is bij temperaturen rond 600 °C.

Zelfontbranding

Uranium is een sterk pyrofoor materiaal en verbranding van uraniumpoeder in lucht is reeds mogelijk bij kamertemperatuur. Bij zelfontbranding van het uranium worden uraniumoxide-deeltjes gevormd. Zelfontbranding van uranium is herkenbaar aan een 'witte' vlam. In de literatuur wordt de verspreiding van uraniumoxide tijdens zelfontbranding niet beschreven. Vooralsnog moet worden aangenomen dat het uraniumoxide hierbij volledig in de lucht wordt verspreid.

De balansgewichten van het El Al vliegtuig bestonden niet uit poeder, maar uitsluitend uit vormgegeven stukken metaal. Het is niet aannemelijk dat door de inslag het uranium van de balansgewichten is versplinterd tot een poedervormige stof, omdat zowel intacte als delen van balansgewichten na het ongeval zijn teruggevonden.

De temperatuur waarbij zelfontbranding van een stuk uranium metaal optreedt hangt af van het specifiek oppervlak (zie Bijlage 1.) Het specifiek oppervlak van de uranium balansgewichten van de Boeing 747 varieert per balansgewicht, maar is voor alle balansgewichten kleiner dan 0,153 cm²/g. Bij het schatten van de temperatuur waarbij zelfontbranding van de balansgewichten uit de El Al Boeing kan optreden, is uitgegaan van een specifiek oppervlak van 0,153 cm²/gram. Bij een dergelijk klein specifiek oppervlak is de temperatuur waarbij zelfontbranding optreedt hoger dan 700 °C (zie Bijlage 2.)

Verdamping

Behalve door oxidatie zouden bij zeer hoge temperaturen uranium (kookpunt is 3818 °C) en uraniumverbindingen direct in dampfase kunnen zijn vrijgekomen. Dergelijke temperaturen zijn tijdens de brand (maximaal 1200 °C bij een kerosinebrand) niet bereikt. De verspreiding van uranium metaal, uraniumoxides of hydroxides via de dampfase tijdens het ongeval in de Bijlmermeer wordt om deze reden uitgesloten.

Tabel 1 geeft een overzicht van de drie bovengenoemde oxidatie processen.

Tabel 1: Oxidatie van uranium metaal in lucht

Benaming proces	Temperatuur waarbij deze vorm van oxidatie plaatsvindt	Vorm waarin het uranium kan vrijkomen
Corrosie	20 - 300 °C	slecht afwrijfbaar uraniumoxide
Snelle oxidatie	hoger dan 300 °C: 350 - 600 °C 650 - 850 °C	uraniumoxide oppervlak als: - loszittend fijn poeder/aerosolen - gesinterd poeder dat afschilfert
Zelfontbranding	Hoger dan 700 °C	uraniumoxide aerosolen

2.2. In welke fase van de ramp kan verarmd uranium zijn vrijgekomen ?

Bij de beantwoording van deze probleemstelling is informatie over het ongeval nodig. Deze informatie is als volgt samen te vatten ([10],[14],[15]):

Het vliegtuig is vanaf een hoogte van 1500 ft bij een snelheid van 260 knopen snel gedaald en daarbij om 18:35 vrijwel loodrecht tegen de hoek van de flats Groeneveen en Kruitberg aangeslagen. Delen van het staartstuk, echter zonder de balansgewichten, bevonden zich vlak bij de plaats van inslag, zie Figuur 8 in de Bijlagen. Bij de inslag explodeerde de in de vleugels aanwezige kerosine in de vorm van een vuurbal. Binnen een halve minuut was deze vuurbal verdwenen. De temperatuur van deze vuurbal heeft mogelijk een waarde van 1200 °C bereikt, de maximale temperatuur die tijdens een kerosine brand kan worden bereikt. Na het verdwijnen van de vuurbal bleef de puinhoop van wrakstukken en het beton van de weggeslagen appartementen branden. Behalve de puinhoop bleef ook een deel van de overige appartementen doorbranden. Deze waren door de vuurbal in brand gezet. Volgens een ooggetuige die deskundig is op chemisch gebied en ca. 15 minuten na de inslag bij de flats arriveerde, brandde de puinhoop op een wijze die niet afweek van een woningbrand. Hij heeft geen walmende vlammen gezien zoals die bij een kerosinebrand optreden. De tijdens de brand heersende stevige noordoosten wind had volgens zijn waarneming geen zichtbare invloed op de vlammen van de vuurhaard. Wel waaide de rook tussen de flats zodat men aan de voorzijde tijdens de bluswerkzaamheden hiervan hinder ondervond. De brand in de puinhoop heeft bijna een uur gewoed (gedurende ongeveer een halfuur werd water op de puinhoop gespoten, drie kwartier na het ongeval werd met schuim geblust).

Eén van de grote wrakstukken dicht bij de brandende puinhoop, een deel van de staart, was door de brand zichtbaar aangetast, maar er waren geen delen gesmolten.

Waarschijnlijk was de temperatuur naast de puinhoop tijdens de brand, lager dan de smeltemperatuur van aluminium (670 °C).

Afgezien van de twee brandende flats en de puinhoop tussen deze twee flats, brandde ook een groot deel van de lading van het vliegtuig. Deze lading was tijdens de inslag uit het vliegtuig geslingerd en daarbij over een groot gebied achter de flats verspreid. Evenals bij de brandende puinhoop werd het vuur van de brandende lading met schuim en water gedoofd. De brandende flats en de verspreide brandhaarden in de omgeving van de flats, zijn met water geblust.

Uit bovenstaande blijkt dat het vliegtuig tijdens de inslag over de grond verspreid is geraakt en dat zich vrijwel gelijktijdig boven de grond een kerosine explosie heeft voorgedaan. Op grond hiervan kan blootstelling van uit het vliegtuig afkomstig uranium aan deze kerosine brand worden uitgesloten. Tijdens het onderhavige onderzoek zijn drie scenario's naar voren gekomen, waarbij uranium mogelijk is vrijgekomen. Deze scenario's zijn onderscheiden naar de lokaties waar het uranium zich na het neerstorten van het vliegtuig kan hebben bevonden.

a. Uranium in de puinhoop en blootgesteld aan temperaturen hoger dan 700 °C

Onder dit scenario wordt verstaan dat het uranium zich bevond in de brandende puinhoop van wrakstukken en puin en daarbij is blootgesteld aan temperaturen hoger dan 700 °C. Het chemisch-fysisch proces waarbij uranium dan kan vrijkomen is zelfontbranding. Er zijn door de brandweer geen witte vuurverschijnselen waargenomen; dergelijke karakteristieke vuurverschijnselen zouden in verband kunnen worden gebracht met de zelfontbranding van uranium. Het karakteristiek licht van aardgasverbranding is wel tijdens de brand waargenomen. Hoewel er geen waarnemingen zijn die erop duiden dat zelfontbranding van het uranium heeft plaatsgevonden, kan niet met 100% zekerheid worden uitgesloten dat uranium balansgewichten tijdens de brand in de puinhoop lagen en uranium door zelfontbranding in uraniumoxide is overgegaan.

b. Uranium in of bij de puinhoop en blootgesteld aan temperaturen lager dan 700° C

Dit scenario houdt in dat het uranium zich bevond in of nabij de brandende puinhoop van wrakstukken en puin en daarbij is blootgesteld aan temperaturen lager dan 700 °C. De balansgewichten die in het vuur hebben gelegen, zijn hierbij niet ontbrand, maar geoxideerd. Er was tijdens de brand geen zichtbare invloed van de wind op de vlammen boven de puinhoop. Het is daarom onwaarschijnlijk dat een sterke luchtstroom langs de brandende puinhoop stroomde. Volgens het literatuuronderzoek in [3], zou onder deze condities tijdens oxidatie bij hoge temperaturen minder dan 1% van het uranium in de lucht vrijkomen in de vorm van aerosolen van uraniumoxide. De respirabele fractie van deze aerosolen is minder dan 10% [3].

Bij balansgewichten, die zich tijdens de brand tussen of onder het puin hebben bevonden, is tijdens de brand geen sterke luchtstroom aanwezig geweest. In het onwaarschijnlijke geval dat een dergelijke sterk turbulente luchtstroom wel aanwezig was, zou zoals in paragraaf 2.1 reeds opgemerkt, bij oxidatie van een balansgewicht 30% van het gevormde uraniumoxide in de lucht kunnen zijn vrijgekomen.

Het deel van het zo gevormde uraniumoxide dat niet tijdens de brand in de lucht als aerosolen is vrijgekomen, kan in de directe omgeving van het geoxideerde balansgewicht zijn terecht gekomen, zijn afgespoeld tijdens het blussen van de brand of zijn blijven vastzitten als een laag op het balansgewicht. Het mogelijk weggespoelde deel van het oxide zou kunnen zijn terechtgekomen in de bodem, tussen het puin of de wrakstukken. Tijdens de ruimingswerkzaamheden of bij het sorteren in hangaar 8 te Schiphol, kan het uraniumoxide zijn vrijgekomen (besmetten van handen en inademen van opgedwarrelde stof). Tijdens de werkzaamheden in hangaar 8 (vanaf 5 oktober 1992) zijn stofmaskers en handschoenen gedragen.

c. Uranium ver van de puinhoop

In dit scenario is het uranium niet aan hoge temperaturen blootgesteld. Het kan dan hoogstens zijn gecorrodeerd. Na de brand kan deze corrosielaag alsnog zijn vrijgekomen tijdens ruimingswerkzaamheden, omdat hierbij waarschijnlijk met zware werktuigen is geopereerd, waarbij het uraniumoxide aan grote krachten kan zijn onderworpen. Bij deze operaties kan een geringe hoeveelheid uraniumoxide in de grond zijn terechtgekomen.

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de theoretisch mogelijke wijzen voor het vrijkomen van uranium tijdens de verschillende fasen van het ongeval.

Tabel 2: Mogelijke scenario's voor het vrijkomen van uranium tijdens het ongeval. De rijen hebben betrekking op de mogelijke lokatie van het uranium, de kolommen op de tijd.

Oorspronkelijke plaats gewicht	Tijdens de brand	Tijdens blussen	Tijdens het ruimen	In hangaar 8
In de puinhoop bij temperaturen > 700 °C	Verspreiding in lucht na zelfontbranding	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
In of naast de puinhoop bij temperaturen < 700 °C ^{b)}	Een deel van het gevormde oxide verspreidt zich als aerosolen met de rook	Oxidedeeltjes spoelen af	Fijnste deeltjes verstuiven, grove deeltjes afwrijfbaar	Fijnste deeltjes verstuiven, grove deeltjes afwrijfbaar
Ver van de puinhoop ^{b)}	Corrosie tot vastzittend oxide.	-	Oxide is moeilijk afwrijfbaar	Oxide is moeilijk afwrijfbaar

^{a)} Indien zelfontbranding heeft plaatsgevonden, wordt aangenomen dat het uranium hierbij volledig wordt verstoven.

^{b)} Oxidatie in lucht is alleen mogelijk nadat de beschermde cadmium-nikkelverflaag is beschadigd. Cadmium heeft een smeltpunt van 321 °C. Nikkel heeft een smeltpunt van 1452 °C. Waarschijnlijk is de laag nikkel (plating), waarvan wordt aangenomen dat deze dunner is dan 0,1 mm, niet in staat om na het wegsmelten van het cadmium toetreding van lucht tot het uraniummetaal te verhinderen.

2.3. Zijn er aanwijzingen dat verarmd uranium is vrijgekomen ?

De vraag is in hoeverre de tot nu toe uitgevoerde metingen uitsluitsel kunnen geven over het vrijkomen van uranium in de omgeving. Allereerst wordt daartoe nagegaan welke hoeveelheden uranium in het theoretisch slechtst denkbare geval in de omgeving kunnen zijn verspreid. De maximale uranium concentraties ontstaan als al het vermiste uranium, zijnde 152 kg, tijdens de brand op de centrale puinhoop na zelfontbranding is verspreid.

Daartoe is een verspreidingsberekening uitgevoerd [16]. Hierbij is verondersteld dat in 1 uur tijds 152 kg uranium als uraniumoxide aerosolen is vrijgekomen. De veronderstelde windsnelheid boven de vuurhaard tijdens de verspreiding is 9,25 m/s, de stabiliteitsklasse van het weertype D3. Deze gegevens zijn ontleend aan [10]. Met de afmetingen van het

gat tussen de twee flatgebouwen is rekening gehouden. De verspreidingsberekening levert de gedeponeerde hoeveelheid uranium in de omgeving. Deze resultaten kunnen worden vergeleken met de gemeten hoeveelheden uranium in de bodem en met de van nature in de bodem aanwezige uraniumconcentraties.

Zo blijkt de over één uur gemiddelde concentratie van uraniumoxide op 40 m van de vuurhaard te kunnen worden geschat op maximaal 0,9 milligram uranium/kubieke meter lucht. Op 1 km van de vuurhaard is de concentratie in lucht een factor 160 lager dan op 40 m. Een deel van de aerosolen slaat tijdens de verspreiding neer op de bodem. De hierdoor veroorzaakte verontreiniging van het bodemoppervlak bedraagt maximaal 30 milligram verarmd uranium per vierkante meter op 40 m van de vuurhaard. Indien deze verontreiniging volledig in de bovenste laag van 10 cm dringt, zou dit leiden tot een maximale lokale bodembesmetting van 0,1 milligram verarmd uranium per kilogram grond. Deze verhoging van het uraniumgehalte is moeilijk aan te tonen omdat de concentratie van het van nature aanwezige uranium in de in Nederland voorkomende bodems, varieert tussen de 0,1 en 7,7 milligram per kilogram grond. Meting van de isotopische samenstelling van het aanwezige uranium, zou wel toevoeging van verarmd uranium kunnen aantonen.

In opdracht van het Stadsdeel Amsterdam-Zuidoost zijn destijds een groot aantal uraniumgehalte metingen uitgevoerd in bodemmonsters afkomstig van het vermoedelijke oppervlak van depositie [12, 13]. Daarbij zijn tevens metingen van de isotopische samenstelling van het uranium in bodemmonsters uitgevoerd [13]. Deze metingen gaven eenduidig aan dat in de monsters geen (d.w.z. < 1 %) sprake is geweest van toevoeging van verarmd uranium. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze monsters niet afkomstig waren van de mogelijk meest besmette grond, dat wil zeggen de grond die is afgegraven onder de puinhoop.

De metingen van het uraniumgehalte kunnen echter geen uitsluitsel geven over de vraag in hoeverre de 152 kg verarmd uranium op de onderzochte lokaties zou zijn gedeponerd.

- Niet alle plaatsen waar depositie kan hebben plaatsgevonden, zijn bemonsterd. Alleen de bodem is bemonsterd, terwijl uraniumoxide ook op vegetatieonderdelen en gebouwen kan zijn gedeponerd.
- De van nature in de bodem aanwezige gehalten natuurlijke uranium (de zogenaamde natuurlijke achtergrond), gemeten in ophoogzand elders in de Bijlmermeer, blijken zeer variabel. Er lijken namelijk tenminste twee partijen ophoogzand met verschillend uranium gehalte te zijn gebruikt bij de aanleg van de Bijlmermeer.
- Van de op de plaats van de ramp genomen bodemmonster toonde één monster een mogelijk verhoogd uraniumgehalte. Dit monster was genomen op 10-40 cm diepte. De elders uitgevoerde achtergrondmetingen zijn uitgevoerd in de toplaag van de bodem op 0-10 cm diepte. Hierdoor is het niet goed mogelijk een uitspraak te doen over de significantie van de verhoogde uraniumconcentratie.
- De zich onder de puinhoop bevindende grond was al vóór de monsterneming afgegraven en ter verwerking afgevoerd naar een stortplaats. Van monsters afkomstig van deze stortplaats is alleen het uraniumgehalte bepaald.

Bovenstaande resultaten geven geen aanwijzing dat verarmd uranium is vrijgekomen tijdens het vliegtuigongeval in de Bijlmeer. Echter, op grond van deze resultaten kan anderzijds ook niet worden uitgesloten dat tijdens het vliegtuigongeval uranium is verstoven.

3. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het vliegtuig van El Al dat op 4 oktober 1992 in de Bijlmermeer verongelukte, bevatte balansgewichten van verarmd uranium. De gewichten waren aangebracht in drie van de zes stuurvlakken in de staart en voorzien van een nikkel-cadmium beschermingslaag. Volgens opgave van producent Boeing en El Al bevatte het vliegtuig in totaal circa 282 kg uranium. Circa 152 kg balansgewicht is na de ramp niet teruggevonden: het is onzeker wat er met dit deel is gebeurd. Eén van de mogelijkheden is dat het uranium tijdens of na de brand is verstoven. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen, heeft de Rijksluchtvaartdienst ECN opdracht gegeven deze mogelijkheid uit te zoeken aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

1. *Bij welke temperatuur gaat verarmd uranium (metaal) verstuiven, dat wil zeggen bij welke temperatuur komt verarmd uranium metaal vrij in een verspreidbare vorm?*
2. *Bij welke temperatuur treedt verbranding van verarmd uranium (metaal) op ?*
3. *Wat is de kans dat verarmd uranium (metaal) verstuift onder omstandigheden zoals die zich tijdens het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer hebben voorgedaan ?*

Conform de opdracht heeft ECN zich bij onderzoeksvragen 1 en 2 beperkt tot een analyse van literatuurgegevens. Deze gegevens hebben betrekking op onderzoek aan uranium metaal zonder nikkel-cadmium beschermingslaag.

vraag 1. Bij temperaturen tot circa 300 °C vindt slechts oppervlakkige oxidatie van uranium metaal plaats (corrosie). Door stevig over de corrosielaag te wrijven zal een weinig uraniumoxide op de hand kunnen achterblijven. Bij verhitting in lucht tot temperaturen boven 300 °C zal een stuk uranium metaal min of meer gelijkmatig oxideren. Bij dit proces komt tussen 350-600 °C uraniumoxide als fijn poeder in verspreidbare vorm vrij. Bij temperaturen van 650-850 °C blijft het oxide grotendeels aan het oppervlak vastzitten; bij (heftige) wrijvingsbewegingen kan het oxide echter wel loskomen. Bij nog hogere temperaturen blijft de beschermende oxidelaag stevig vastzitten.

vraag 2. Naast de hier boven beschreven (geleidelijke) oxidatie, kan uranium metaal bij verhitting in lucht ontbranden (zelfontbranding). Bij welke temperatuur dat gebeurt, is afhankelijk van de verhouding van het oppervlak en het gewicht van het stuk uranium. Uit extrapolatie van experimenten kan worden afgeleid dat een stuk uranium met de afmetingen van de balansgewichten bij temperaturen hoger dan 700-800 °C tot zelfontbranding kan komen. Indien dit proces optreedt, kan het metaal binnen korte tijd volledig "verbranden" tot verspreidbare deeltjes uraniumoxide.

vraag 3. Voor de beantwoording van de derde onderzoeksvraag heeft ECN naast literatuuronderzoek gesprekken gevoerd met ooggetuigen, en de schriftelijke rapportages bestudeerd omtrent de ramp en daarop volgende bergingsactiviteiten. Gaande deze fase van het onderzoek werd duidelijk dat de feiten die nodig zijn om met enige zekerheid tot een uitspraak te komen niet meer kunnen worden achterhaald. Het onderstaande heeft dan ook een sterk speculatief karakter.

Om de kans vast te stellen dat het niet teruggevonden uranium bij het ongeval daadwerkelijk is verstoven dient rekening te worden gehouden met factoren als: de exacte locatie waar het metaal terecht is gekomen tijdens de inslag, de hoogte van de temperatuur waaraan het werd blootgesteld en de duur van die blootstelling, het

vochtgehalte, de aanwezigheid van zuurstof of kooldioxide, de mate van turbulentie, de conditie waarin balansgewichten verkeerden (intact, of in grotere of kleinere stukken), en de conditie van de nikkel-cadmium beschermingslaag. Tijdens en na de ramp is niet op deze factoren gelet: de feiten zijn dus onbekend, noch kunnen zij met enige zekerheid worden gereconstrueerd.

Globaal zijn er drie scenario's denkbaar:

- Het niet-teruggevonden metaal is buiten de brandhaard terecht gekomen. Gezien het zeer hoge soortelijk gewicht is het aannemelijk dat de stukken tijdens de inslag diep zijn ingeslagen. Het metaal is dan deels slechts oppervlakkig gecorrodeerd, bij de berging van de wrakstukken of het ruimen van het puin niet als uranium herkend (daar werd ook niet op gelet) en vervolgens afgevoerd naar stortplaats of schroothandel. In dit scenario is geen verstuiwing opgetreden: wel kan huidcontact met uraniumoxide hebben plaatsgevonden.
- Het metaal is in of zeer nabij de brand terecht gekomen, deels geoxideerd, waarbij een deel van de oxides wellicht is verstoven of in het puin terecht is gekomen. De vaste restanten zijn niet herkend en afgevoerd. Ook hier is huidcontact mogelijk geweest.
- Het metaal is (langdurig) blootgesteld geweest aan temperaturen boven de 700-800 °C en is volledig verbrand en daarbij geheel of gedeeltelijk verstoven.

Indien er daadwerkelijk uraniumoxide is verstoven, zullen de deeltjes zich met de wind mee hebben verspreid en zijn neergeslagen op een afstand die varieert tussen enkele tientallen en enkele honderden meters van de ongevalsplek. Uit de literatuur is bekend dat minder dan 10% van deze deeltjes zo klein is dat deze bij inademing in de longen kunnen komen (respirabele fractie).

Hoewel het niet mogelijk is vast te stellen of, en zo ja hoeveel oxide is verstoven zijn er enkele indirecte gegevens bekend die kunnen worden opgevat als een indicatie dat de kans op verstuiwing gering moet worden geacht. Zo duurde de kerosinebrand, waarin een temperatuur is opgetreden die tot ontbranding had kunnen leiden, zeer kort (minder dan 1 minuut). Deze brand ontwikkelde zich als een opstijgende vuurbal: het kan worden uitgesloten dat het uranium zich in deze vuurbal heeft bevonden. Eerder uitgevoerd bodemonderzoek toonde geen verhoogde concentratie uranium aan. Dit was overigens ook niet te verwachten, aangezien het eventueel neergeslagen oxide volledig zou wegvallen tegen de natuurlijke concentratie uranium in de bodem. Voorts werd in isotopenonderzoek van bodemonsters geen verarmd uranium aangetoond. De brandweer heeft tijdens de brand geen "wit vuur" waargenomen dat zou kunnen duiden op een uraniumbrand. Sommige teruggevonden balansgewichten waren weliswaar gebroken, maar de beschermingslaag was grotendeels intact en niet door het vuur aangetast.

Al met al heeft ECN - in lijn met eerdere uitspraken- de indruk dat er tijdens de brand weinig tot geen uraniumoxide in de atmosfeer is vrijgekomen. Wegens gebrek aan kennis over de feitelijke omstandigheden, kan gedeeltelijke of volledige oxidatie echter niet met 100% zekerheid worden uitgesloten.

Literatuur

- [1] E.H.P. Cordfunke, *The Chemistry of Uranium, Topics in Inorganic and General Chemistry, Monograph 13*, Elsevier, 1969 (Amsterdam).
- [2] F. Weigel, *Uranium*, in: *The Chemistry of the Actinide Elements, Second Edition, Volume 1* (J.J. Katz, G.T. Seaborg, L.R. Morss, eds.), Chapman and Hall, London, 1986, pp 169-442.
- [3] J. Mishima et al., *Potential Behavior of Depleted Uranium Penetrators under Shipping and Bulk Storage Accident Conditions*, (1985), Pacific Northwest Laboratory, PNL-5415, contract DE-AC06-76RLO 1830.
- [4] Advies Stichting Laka over het onderzoek betreffende verbranding van uranium bij de Bijlmerramp, van 4 juni 1998.
- [5] Rapport van de RLD (LI-Dir.97.00157) "Verslag reconstructie verarmd uranium".
- [6] Info stichting Laka dd. 19 juni 1998; artikel uit *Uranium Battlefield* van maart 1993, p.135; *Industrial Uses of Depleted uranium* van P. Loewenstein; een kopie van een aanvraag van Boeing bij de USNRC (ook nikkel-cadmium coating van depleted uranium counterweights(1983).
- [7] Informatie over posities en afmetingen balansgewichten; telefax van KLM van 15 juni 1998.
- [8] Informatie van Boeing over 'Depleted Uranium Balance Weights-El Al 747 4X-AXG Accident at Amsterdam- 4 October 1992. Fax aan de RLD van 23 juli 1998 met referentie B-B600-16459-ASI. Deze fax is een antwoord op een fax van de RLD d.d. 23 juni 1998.
- [9] Faxbericht van de COVRA over de wijze van aanbieden van vaten met radioactieve delen van het El Al vliegtuig, 1998.
- [10] Aircraft accident report 92-11 van de Raad voor de Luchtvaart: "EL AL Flight 1862, Boeing 747-258F 4X-AXG, Bijlmermeer Amsterdam, oktober 1992.
- [11] Aangehaalde informatie in de notitie ".. en als het toch verbrand is...?", van de stichting Laka, april, 1998.
- [12] "Vliegcrash Bijlmermeer: eindrapportage uranium, Stadsdeel Amsterdam Zuidoost, sektor beheer en milieu, 4 oktober 1994.
- [13] Rapportage Beheer en Milieu van Stadsdeel Amsterdam Zuidoost; bijlage Isotopen onderzoek, rapportage januari en maart 1995.
- [14] "Informatie toestand wrakdelen na Bijlmerramp", besprekingsverslag bijeenkomst Bureau vooronderzoek ongevallen en incidenten, ECN notitie no. 810297/NUC/JvH/mh/014617 van 12 juni 1998.
- [15] "Ooggetuigenverslag brandbestrijding", ECN notitie no. 810297/NUC/JvH/ak/015027 van 30 juni 1998.

[16] Richtlijnen PSA-3: Onderzoek naar methoden en modellen voor het uitvoeren van een probabilistische consequentie-analyse, ECN-C--92-040, juni 1992.

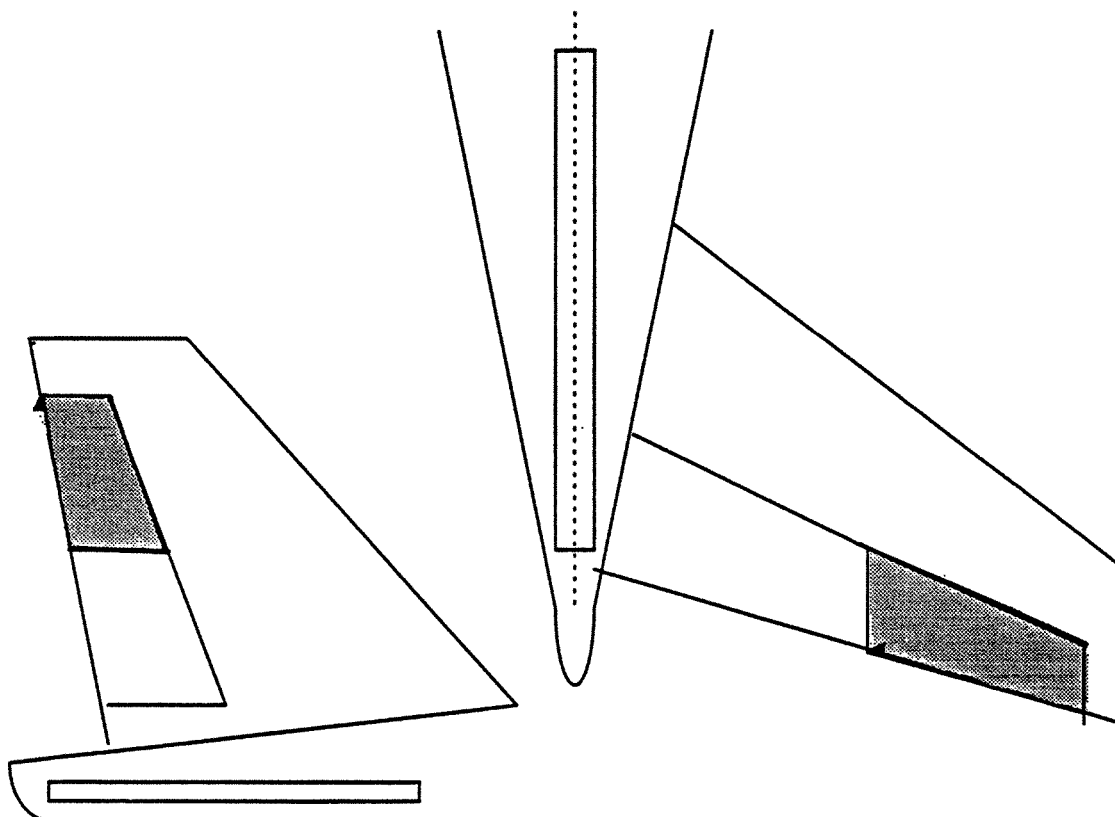
LIJST VAN FIGUREN

- Figuur 1:** Staartdeel van een Boeing 747 met daarin aangegeven de stuurvlakken die verarmd uranium balansgewichten bevatten.
- Figuur 2:** Details van twee van de drie stuurvlakken waaraan de balansgewichten van ongelegeerd verarmd uranium metaal zijn bevestigd.
- Figuur 3:** Dependence of uranium ignition on specific area (Baker, Schnizlein and Bingle, 1966) uit ref. [3]).
- Figuur 4:** Oxidatie van verarmd uranium in lucht bij verschillende temperaturen (ontleend aan ref. [3]).
- Figuur 5:** Oxidatie van verarmd uranium in kooldioxide bij verschillende temperaturen (ontleend aan ref. [3]).
- Figuur 6:** Massa van de aerosolen die vrijkomen bij oxidatie in lucht/kooldioxide als percentage (%) van de oorspronkelijk massa van het brokstuk (hier een penetrator van verarmd uranium). Figuur is ontleend aan ref. [3].
- Figuur 7:** Massa van de aerosolen met een diameter van 10 μm of kleiner (deze deeltjes kunnen bij inademing in de longen komen) die vrijkomen bij oxidatie in lucht/kooldioxide als percentage (%) van de oorspronkelijke massa van het brokstuk (hier een penetrator van verarmd uranium). Figuur is ontleend aan ref. [3].
- Figuur 8:** Overzicht van het rampterrein met daarin aangegeven vindplaatsen van delen van het staartdeel van het vliegtuig.

BIJLAGEN

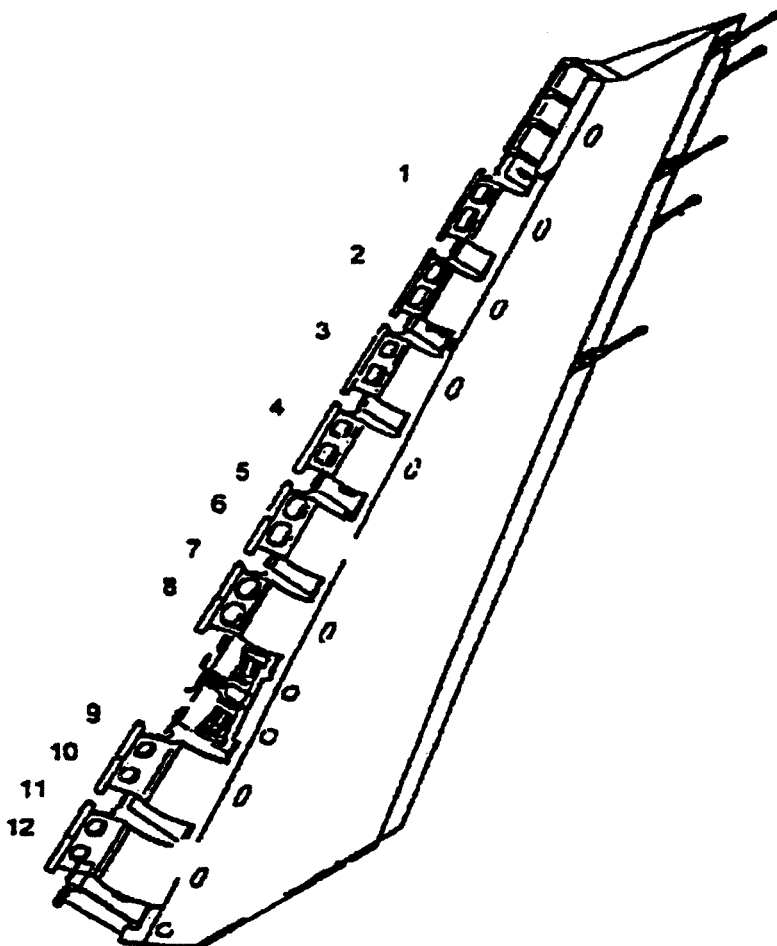
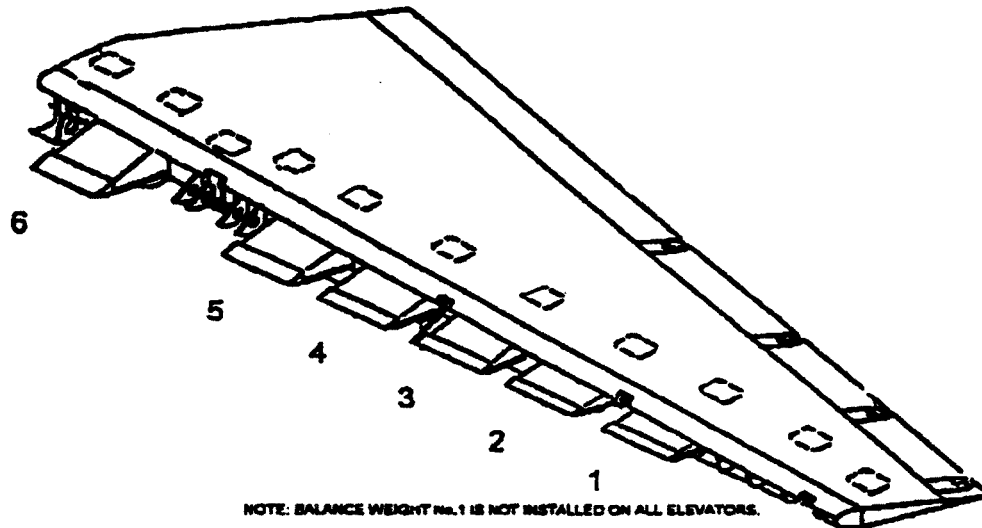
BIJLAGE 1: De verarmd uranium balansgewichten

Het vliegtuig van EL AL vlucht 1862 was een Boeing 747-258F met registratie 4X-AXG en serienummer 21737. Met behulp van deze informatie was het mogelijk vliegtuig type specifiek informatie over de balansgewichten te verkrijgen [8]. Hieronder wordt een schets van een deel van het staartstuk van een Boeing 747 getoond met daarin aangegeven de rechter outboard elevator, de rechter inboard elevator, de upper rudder en de lower rudder. De linker inboard en outboard elevator zijn gelijk van vorm maar gespiegeld aan respectievelijk de rechter inboard en outboard elevator.



Figuur 1: Staartdeel van een Boeing 747 met daarin aangegeven de stuurvlakken die verarmd uranium balansgewichten bevatten. Links is het staartvlak getoond met de rudders, rechts de rechterstaartvleugel met de elevators.

Figuur 2: Details van twee van de drie stuurvlakken waaraan de balansgewichten van verarmd uranium metaal zijn bevestigd. De bovenste figuur toont de rechter outboard elevator (gearceerd in Figuur 1, rechts), de onderste figuur toont de upper rudder (gearceerd in Figuur 1, links).



De balansgewichten zijn wigvormige staven van zwaar metaal, meestal verarmd uranium, waarvan de lengte varieert tussen 23 en 54 cm. De breedte van deze staven varieert tussen de 4 en 12 cm en het gewicht varieert tussen 5,5 en 33 kg.

El Al Boeing type 747-258F, registratie 4X-AXG, serienummer 21737 bevatte volgens opgave van de fabrikant en El Al twee soorten balansgewichten, respectievelijk vervaardigd van verarmd uranium met een totaal gewicht van 282 kg en vervaardigd van wolfrام met een totaal gewicht van 43 kg. Het uranium metaal bevatte volgens de opgave van Boeing weinig verontreinigingen (minder dan 1%, waaronder minder dan 700 ppm koolstof). Het uranium metaal is voorzien van een beschermende laag nikkel en een cadmium plating. Hoewel door Boeing geen specifieke gegevens zijn verstrekt omtrent de dikte van de plating, wordt bij het onderzoek uitgegaan van een laagdikte van minder dan 0,1 mm, hetgeen in de platingtechniek gebruikelijke waarden zijn. De cadmium plating is voorzien van een groenkleurige verflaag.

Voor het onderhavige onderzoek was het noodzakelijk inzicht te verkrijgen in de dimensies van de uranium balansgewichten. De daartoe benodigde detailgegevens van El Al Boeing, type 747-258F, registratie 4X-AXG, serienummer 21737 waren niet beschikbaar. Daarom is voor dit onderzoek gebruik gemaakt van gegevens van een ander vliegtuig van hetzelfde type als de El Al Boeing [7]. Dit vliegtuig verschilt ten aanzien van de balansgewichten van de verongelukte El Al Boeing, omdat alle balansgewichten uitgevoerd zijn in uranium metaal met een totaal gewicht van 328 kg. Zoals hierboven vermeld bevatten de balansgewichten van de verongelukte El Al Boeing in totaal 282 kg verarmd uranium metaal.

Versneld oxideren en zelfontbranding van de uranium balansgewichten wordt mede bepaald door de verhouding tussen oppervlak en gewicht, het zogenaamde specifieke oppervlak [3]. Voor de Boeing 747 van Tabel 3 geldt dat het specifiek oppervlak van het merendeel van de balansgewichten circa 0,05 [cm²/gram] bedraagt. Voor de lange dunne balansgewichten, die het laagste gewicht hebben, geldt een waarde van circa 0,15 [cm²/gram]. Indien na de inslag van de verongelukte El Al Boeing de bevestigingsbouten in de balansgewichten zijn blijven zitten, is een waarde van maximaal 0,15 [cm²/gram] voor het specifiek oppervlak van de balansgewichten van toepassing.

Tabel 3 toont het overzicht met de afmetingen van deze andere Boeing. De vermelde massa's zijn afgeronde getallen waardoor het totaal gewicht van alle balansgewichten niet gelijk is aan de door Boeing opgegeven 717 lbs [8]. Op basis van afmetingen en gewichten van balansgewichten in de drie stuurvlakken is het specifiek oppervlak van de uranium balansgewichten bepaald [7]. Het gewicht van een balansgewicht is lager dan het soortelijk gewicht van uranium metaal vermenigvuldigd met het uitwendig volume, doordat er bevestigingsgaten in de balansgewichten zijn aangebracht.

Indien conservatief wordt verondersteld dat na de inslag van het verongelukte vliegtuig de bevestigingsbouten uit de balansgewichten zijn verdwenen, dan wordt het totale oppervlak van een balansgewicht groter dan het oppervlak bepaald uit de afmetingen van het balansgewicht. Indien ook rekening wordt gehouden met het binnenoppervlak van de gaten is de geschatte maximum waarde van het specifiek oppervlak gelijk aan 0,2 [cm²/gram]. Deze waarde is gebruikt bij de analyse in Bijlage 2.

Tabel 3: Dimensies van een Boeing 747. Dit type Boeing 747 is vergelijkbaar met, maar niet identiek aan de neergestorte El Al Boeing 747-258. Betekenis der symbolen: L is de lengte van een balansgewicht staaf; B is de breedte van de staaf (afstand tot punt van de wig); H is de breedte van het basisvlak.

Balansgewichten B747 Classic							
Stuurvlak	Positie	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Gewicht [kg]	Oppervlak [cm ²]	Spec. oppervlak [cm ² /gram]
upper rudder	1	540	40	40	6	715	1.19E-01
	2	530	60	50	9	984	1.09E-01
	3	520	60	50	10	966	9.66E-02
	4	490	70	60	12	1082	9.02E-02
	5	250	80	60	8	625	7.82E-02
	6	250	80	60	8	625	7.82E-02
	7	250	80	70	10	668	6.68E-02
	8	220	80	70	8	594	7.43E-02
	9	230	90	80	11.5	709	6.17E-02
	10	250	90	80	13	764	5.88E-02
	11	250	100	80	15	819	5.46E-02
	12	250	80	80	15	711	4.74E-02
	Totaal				126	9263	
L-outboard elevator	1	490	60	40	5.5	840	1.53E-01
	2	490	50	30	7	674	9.62E-02
	3	490	70	50	10	1008	1.01E-01
	4	460	50	80	18	997	5.54E-02
	5	460	100	65	28	1331	4.75E-02
	6	485	120	75	33	1673	5.07E-02
	Totaal				102	6524	
R-outboard elevator	1	490	60	40	5.5	840	1.53E-01
	2	490	50	30	7	674	9.62E-02
	3	490	70	50	10	1008	1.01E-01
	4	460	50	80	18	997	5.54E-02
	5	460	100	60	28	1297	4.63E-02
	6	490	110	80	32	1627	5.08E-02
	Totaal				100.5	6442	
Grand totaal					328	22229	

BIJLAGE 2: Oxideren en vrijkomen van verarmd uranium

Deze bijlage bespreekt aan de hand van een aantal figuren de belangrijkste resultaten van het "Batelle rapport" [3] en zijn consequenties voor een mogelijke verstuiwing van verarmd uranium tijdens het vliegtuigongeval in de Bijlmermeer.

Snelle oxidatie van uranium

Dit proces treedt op bij temperaturen hoger dan 300 °C. Hierbij wordt een onbeschermd uraniumoppervlak min of meer gelijkmatig geoxideerd. Aangenomen wordt dat bij dergelijke temperaturen de beschermende cadmium-nikkel- verlaag geen bescherming meer biedt.

De oxidatiesnelheid, uitgedrukt in milligram geoxideerd uranium per blootgesteld oppervlak en per tijdseenheid (gram/cm² per uur) is zeer sterk een functie van temperatuur zoals weergegeven in figuur 4 (milligram/cm² per uur bij oxidatie in lucht) en figuur 5 (milligram/cm² per uur bij oxidatie in kooldioxide). De gemiddelde oxidatiesnelheid (in lucht) bij temperaturen tussen 600 en 800 °C is circa 1 g/cm² per uur [3]. Bij hoge turbulentie neemt de oxidatie toe tot circa 4 g/cm² per uur. Bij oxidatie in kooldioxide (gevormd bij brand van het restant van de kerosine en andere organische producten) kunnen waarden tot 8 g/cm² per uur worden bereikt. Toegepast op de situatie tijdens de Bijlmerramp kan het volgende worden gezegd. Bovenop en tussen de puinhoop waar de brand woedde was er voldoende zuurstof voor oxidatie van uranium. Diep in het puin waar minder lucht doordringt zou oxidatie door kooldioxide van belang kunnen zijn geweest. Daar lucht op die plaatsen niet kon toetreden, werd verspreiding van het daar gevormde uraniumoxide naar buiten echter bemoeilijkt. Op basis van oxidatie in lucht zou bij een specifiek oppervlak van 0,2 cm²/g en een brandduur van één uur, 4 tot 80% van een balansgewicht kunnen oxideren, afhankelijk van de heersende turbulentie tijdens de oxidatie.

Vrijkomen van uraniumoxide in lucht.

Uit de literatuur [3] blijkt ook dat, wanneer tenminste geen sprake is van geforceerde luchtventilatie of explosies (na oxidatie), de atmosferische verspreiding van de gevormde uraniumoxide deeltjes is beperkt tot minder dan 1% van de oorspronkelijke hoeveelheid uranium [3]. Een klein deel van het uraniumoxide dat in de atmosfeer is terecht gekomen zal bij inademen in de longen kunnen komen (deeltjes kleiner dan 0,01 mm). Dit deel is kleiner dan 10% van het totaal in de atmosfeer vrijgekomen uraniumoxide. Dit is af te leiden uit figuren 6 (massa van in de lucht vrijgekomen deeltjes) en figuur 7 (massa van de in lucht vrijgekomen deeltjes die kleiner zijn dan 0,01 mm). Bij hoge turbulentie tijdens oxidatie kan een veel groter fractie dan 1% van het verarmd uranium in de lucht vrijkomen. Uit experimenten bleek, dat bij sterke toevoer van lucht, 30% van het uraniumoxide poeder dat was aangebracht op brandbaar materiaal, in de lucht kon verstuiwen. Bij verbranden van uranium metaal zijn deze grote fracties niet waargenomen, zie figuur 6. De conclusies van [3] op basis van het verhitten van stukken uranium in een houtvuur zijn dat maximaal 85% van het uranium oxideert (gedurende 20 uur en bij temperaturen hoger dan 600 °C); daarvan komt minder dan 0,1% als respireerbare fractie in de lucht terecht.

Toelichting bij zelfontbranding

De temperatuur waarbij zelfontbranding van een stuk uranium metaal optreedt hangt af van het specifiek oppervlak van dat stuk (cm²/gram). Het specifiek oppervlak van de uranium balansgewichten van de Boeing varieert per balansgewicht. Het balansgewicht met het kleinste specifiek oppervlak heeft een waarde van 0,15 cm²/g. De experimentele resultaten in het diagram van figuur 3 gaan tot 0,2 cm²/g. Deze experimenten zijn

uitgevoerd met zuiver uranium metaal (zie Baker, Schnizlein and Bingle 1966 in ref.[3]). Uit het diagram is dan af te lezen dat de ontstekings temperatuur voor balansgewichten waarschijnlijk boven 700- 800 °C moet hebben gelegen. Extrapolatie in deze figuur naar een specifiek oppervlak significant kleiner dan 0,2 cm²/g is dubieus (logaritme schaal, géén experimentele gegevens bij hoge temperaturen). Enkele onderzoekers zijn van mening dat bij munitiebranden de 'penetrators' van verarmd uranium niet tot zelfontbranding zullen overgaan [3]. Deze penetrators zijn echter gefabriceerd van uranium-legeringen (bijvoorbeeld een legering van uranium met titaan) waardoor de chemische eigenschappen van penetrators verschillen van de eigenschappen van de balansgewichten van puur uranium. Op dit moment kan daarom niet met 100% zekerheid worden uitgesloten dat (enkele van) de niet-teruggevonden stukken uranium tijdens de brand hebben blootgestaan aan temperaturen boven 700 - 800 °C en daarbij zijn ontbrand.

Toelichting bij interpretatie van literatuurgegevens

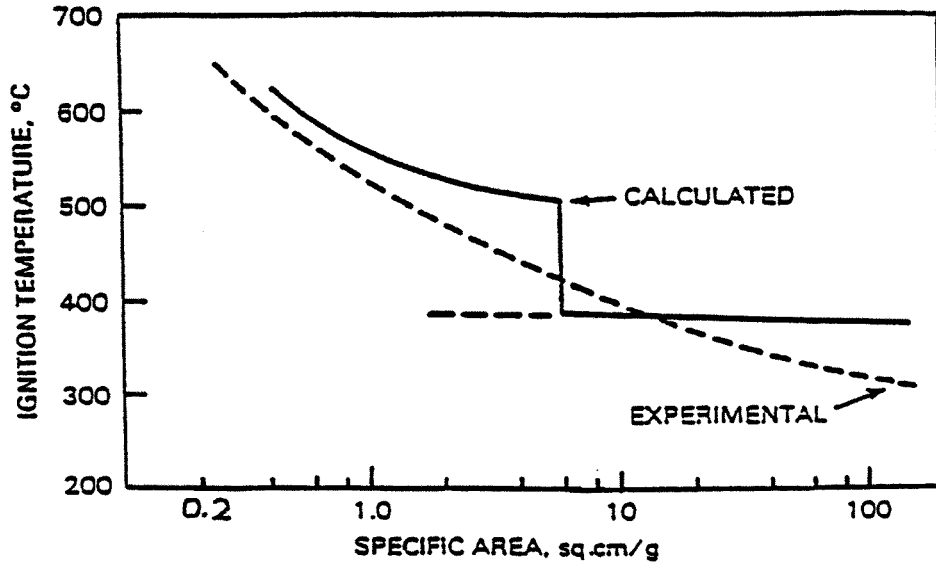
Veel van de in referentie [3] aangehaalde gegevens zijn verkregen onder redelijk gecontroleerde, bekende experimentele condities. Vertaling van deze gegevens naar de Bijlmeraanval moet daarom altijd met grote voorzichtigheid gebeuren. Essentiële gegevens m.b.t. de Bijlmeraanval ontbreken, in het bijzonder een nauwkeurige schatting van de temperatuur condities als functie van plaats (horizontaal, verticaal) en tijd.

Belangrijke verschillen tussen het experimenteel onderzoek in referentie [3] en de Bijlmeraanval betreffen:

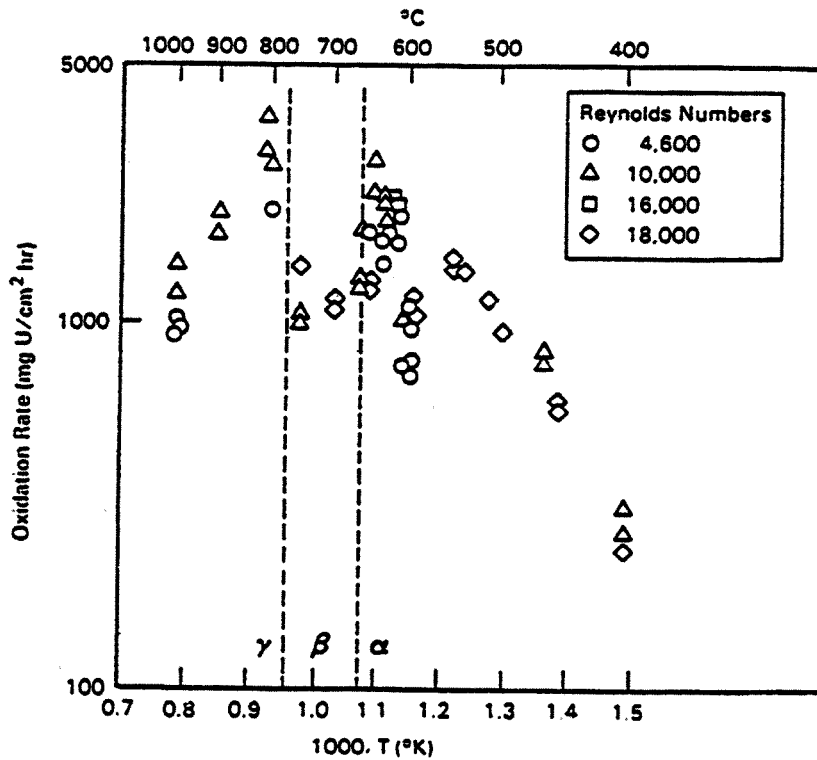
- De relatief hoge impuls van de balansgewichten tijdens de inslag ten opzichte van de andere delen van het vliegtuig maakt het waarschijnlijk dat deze vlak bij de plaats van de inslag zijn terecht gekomen en niet ver zijn weggeslingerd. Niet uitgesloten kan worden dat de balansgewichten hierbij in de wrakstukken en in de grond zijn gedrongen. In dat geval zullen ze niet zijn blootgesteld aan de vuurhaard. Dit zou kunnen verklaren waarom het oppervlak van de teruggevonden balansgewichten nauwelijks was beschadigd en zeker niet (zichtbaar) aan hoge temperaturen was blootgesteld geweest gezien de nog intact zijnde verflaag. Wel waren enkele balansgewichten gebroken. Wat betreft indringen in de bodem moet men hier denken aan enkele decimeters (volgens experimentele ervaring is de indringdiepte van projectielen die met een hoge snelheid de bodem inslaan, minder dan een halve meter). Uit de constatering dat de teruggevonden balansgewichten niet door brand zijn beschadigd kan men niet de conclusies trekken dat de andere ook niet zijn beschadigd, immers de plaats waar deze onbeschadigde balansgewichten zijn neergekomen is niet bekend. Dat wrakstukken kunnen zijn afgeschermd van het vuur, wordt bewezen door de vondst van veel vliegtuigonderdelen, inclusief organische materialen, die onverbrand nabij de plek van de inslag zijn teruggevonden. Overigens waren staartdelen net buiten de centrale brandhaard terecht gekomen, zie Figuur 8. Dit kan betekenen dat de balansgewichten in de centrale brandhaard dan wel vlak daarbij zijn terecht gekomen.
- Het blussen met water respectievelijk schuim. Bekend is dat de oxidatie van uranium wordt versneld in aanwezigheid van vocht bij temperaturen tussen 300-400 °C. Daarboven is het effect van luchtvochtigheid op de oxidatiesnelheid afwezig. Dit wordt verder niet gekwantificeerd. Voor de in referentie [3] vermelde experimenten werd geen gebruik gemaakt van blussen met water. Bekend is dat circa een halfuur na het ongeval water op en nabij de brandende puinhoop werd gespoten (circa een kwartier) voordat met schuim werd geblust.
- Het uranium van de balansgewichten was bekleed met een cadmium-nikkel plating en voorzien van een verflaag. Deze laag zou bescherming moeten bieden tegen corrosie en, beneden de smelttemperatuur van cadmium, ook tegen snelle oxidatie.

- Uranium is een zeer reactief metaal. Door de aanwezigheid van andere, reactieve materialen zoals aluminium kan niet worden uitgesloten dat chemische reacties van uranium, anders dan oxidatie, zullen optreden. De reactie tussen uranium en aluminium verloopt bijvoorbeeld zeer snel bij circa 400 °C [1]. De reactieproducten kunnen dan verspreiden, bijvoorbeeld via het regen- en bluswater.

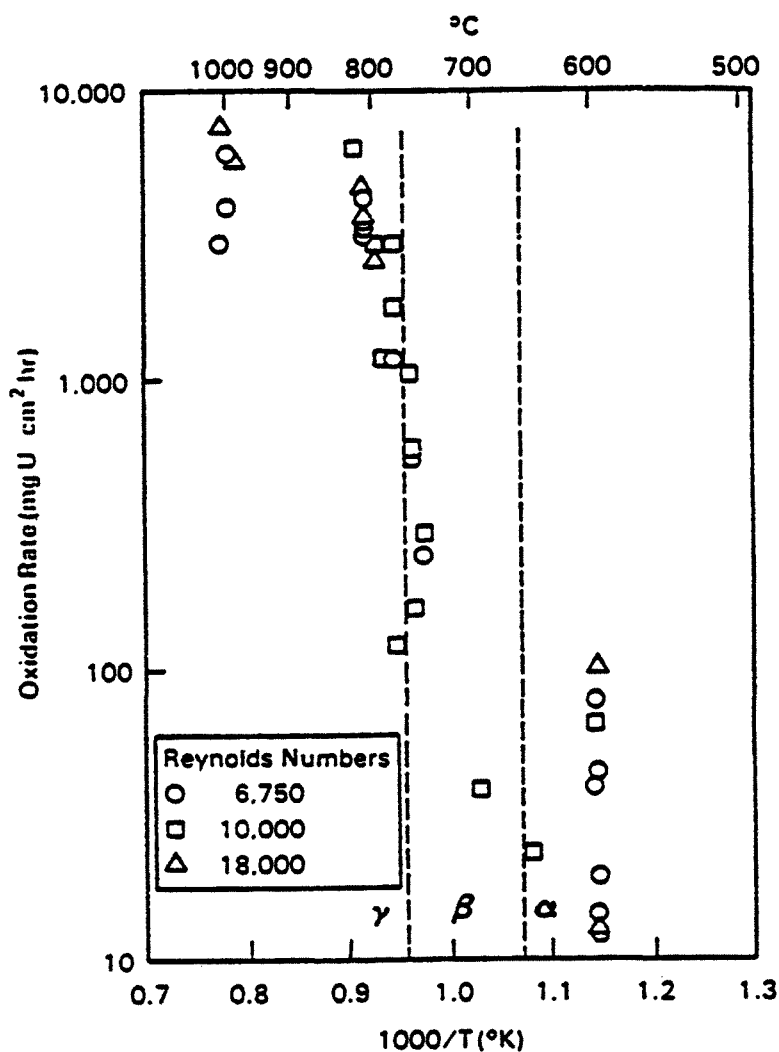
DIAGRAMMEN VAN DE OXIDATIESNELHEID VAN VERARMD URANIUM



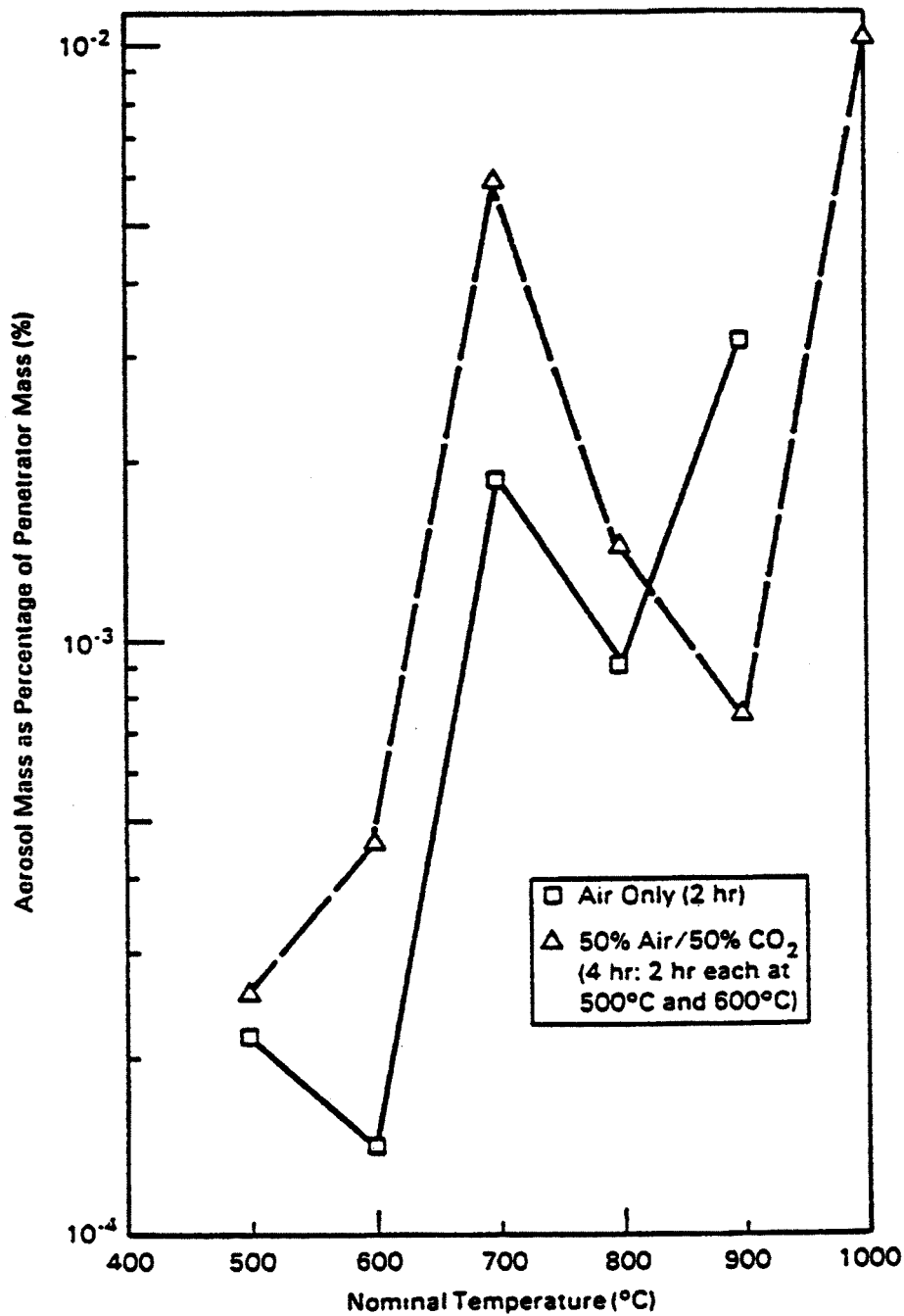
Figuur 3: Afhangelijkheid van uranium ontbranding van het specifieke oppervlak (Baker, Schnizlein and Bingle, 1966) uit ref. [3]. Bij een specifiek oppervlak kleiner dan 0,2 cm²/gram ligt de ontstekingstemperatuur boven de 700 °C.



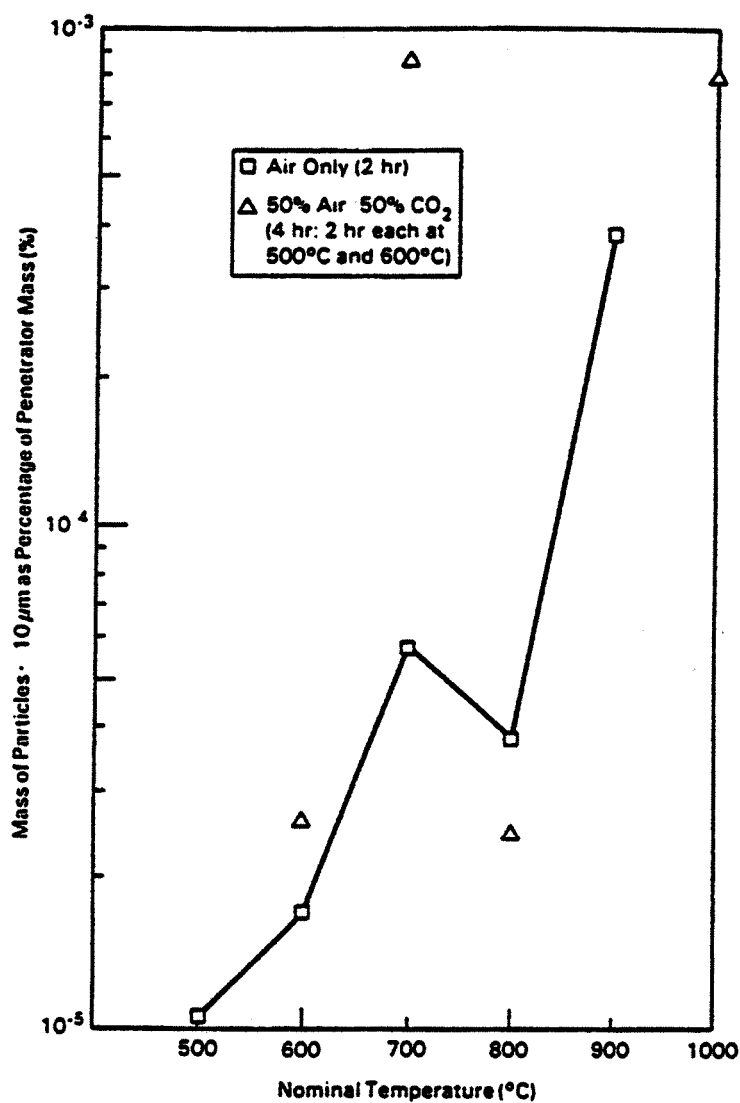
Figuur 4: Oxidatie van uranium in lucht bij verschillende temperaturen (ontleend aan ref. [3]). Voor toelichting zie figuur 5.



Figuur 5: Oxidatie van uranium in kooldioxide bij verschillende temperaturen (ontleend aan ref. [3]). De mate van oxidatie is weergegeven als de hoeveelheid verarmd uranium [mg] die per oppervlakte eenheid [cm^2] in één uur oxideert bij blootstelling aan kooldioxide. De meetgegevens zijn verkregen bij verschillende temperaturen (600 - 1000 $^\circ\text{C}$) en bij verschillende mate van turbulentie tijdens de oxidatie. De mate van turbulentie is aangegeven met het getal van Reynolds. In vergelijking met lucht, zie figuur 4, oxideert uranium bij hoge temperaturen sneller in kooldioxide.



Figuur 6: Massa van de aerosolen die vrijkomen bij oxidatie in lucht en lucht-koolstofdioxide als functie van de temperatuur tijdens de oxidatie. De massa is weergegeven als percentage (%) van de oorspronkelijk massa van het brokstuk (hier een penetrator van verarmd uranium). De figuur is ontleend aan Elder en Tinkle (1980), zie ref. [3].



Figuur 7: Massa van de aerosolen met een diameter van 10 μm of kleiner die vrijkomen bij oxidatie in lucht en lucht-koolstofdioxide als percentage (%) van de oorspronkelijke massa van het brokstuk (hier een penetrator van verarmd uranium). Deeltjes met een diameter van 10 μm of kleiner kunnen bij inademing in de longen terecht komen. De figuur is ontleend aan Elder en Tinkle (1980), zie ref. [3]. Vergelijking met de massa van alle aerosolen, aangegeven in figuur 6, laat zien dat minder dan 10% van de aerosolmassa een diameter heeft van 10 μm of kleiner.

