

Ongewone weersomstandigheden in combinatie met vuurwerk leiden tot extreme situaties

Door Cees van der Goot*, Marco Nolet* en Erik Noordijk# (*KNMI; #RIVM)

Het weer tijdens de jaarwisseling van 1992/1993 vertoonde een aantal kenmerken die plaatselijk tot extreme situaties zouden leiden. Er was een sterke en lage inversie en er was vrijwel geen wind. De verspreiding van luchtverontreinigende stoffen, vrijkomend bij het afsteken van vuurwerk, was hierdoor zeer gering. Een ander bijzonder fenomeen tijdens de jaarwisseling was het optreden van uitzonderlijk dichte mist. Lokaal was het zicht slechts enkele meters. Mogelijk was er een verband tussen deze dichte mist en de luchtverontreiniging. In dit artikel, gebaseerd op het resultaat van een onderzoek van het RIVM en het KNMI, wordt nader ingegaan op de meteorologische situatie, de samenstelling van vuurwerk en de te verwachten gevolgen van het afsteken van vuurwerk onder deze omstandigheden.

De grootschalige meteorologische situatie

Gedurende de laatste dagen van december werd het weerbeeld in grote delen van het vasteland van West-Europa in hoofdzaak bepaald door krachtige en omvangrijke hogedrukgebieden. De weerkaart van oudejaarsdag 13 uur toont twee hogedrukcentra; één in de omgeving van de Azoren, het andere boven het Ladogameer in noordwest Rusland (figuur 1). Beide drukcentra zijn verbonden door een as van hoge luchtdruk die over ons land liep en vrijwel niet van plaats veranderde. Een zwak koufront was aanwezig boven de Noordzee. Dit verplaatste zich vrijwel niet en vertoonde ook geen noemenswaardige activiteit. De weerkaart van een dag later was nauwelijks anders.

Als gevolg van de langdurige aanwezigheid van het hogedrukgebied had zich in de onderste lagen van de atmosfeer een sterke subsidentie-inversie gevormd, een karakteristiek kenmerk van een aanhoudende hogedruksituatie. Doordat de as van hoge luchtdruk over

ons land liep, waren de drukverschillen nihil en was er nauwelijks wind. De geostrofische wind, gemiddeld over oudejaarsdag, was in de randstad 1,5 meter per seconde uit noordelijke richting. Op nieuwjaarsdag was deze gemiddeld 3 meter per seconde uit oost-zuidoostelijke richting.

Aanvoer van verontreinigde lucht

In de dagen rond de jaarwisseling was er sprake van verhoogde concentraties van luchtverontreinigende stoffen. De lucht die over de grenzen werd aangevoerd was verontreinigd. De berekende trajectoriën geven aan dat tijdens de jaarwisseling de lucht op leefniveau afkomstig was uit het oosten, waaronder het grensgebied van Polen, Tsjechië en de voormalige DDR (figuur 2). Uit deze streken wordt in de regel geen zui-vere lucht aangevoerd.

Geringe verspreiding van luchtverontreiniging

De verspreiding van luchtverontreinigende stoffen wordt in deze situatie voornamelijk bepaald door de windsnelheid en de hoogte van de menglaag. Door het heldere vriesweer werd op oudejaarsavond een sterke temperatuursinversie op enkele tientallen meters boven het aardoppervlak gevormd (tabel 1, figuur 3). In de uren rond de jaarwisseling was de windsnelheid zeer gering, minder dan 1 meter per seconde, met enige voorkeur voor oostelijke richtingen (figuur 4). De windsnelheid boven de inversie was eveneens gering; 1 tot 2 meter per seconde. De concentraties van luchtverontreinigende stoffen, afkomstig van het afsteken van vuurwerk, konden hierdoor oplopen tot uitzonderlijk hoge waarden.

Extreem dichte mist

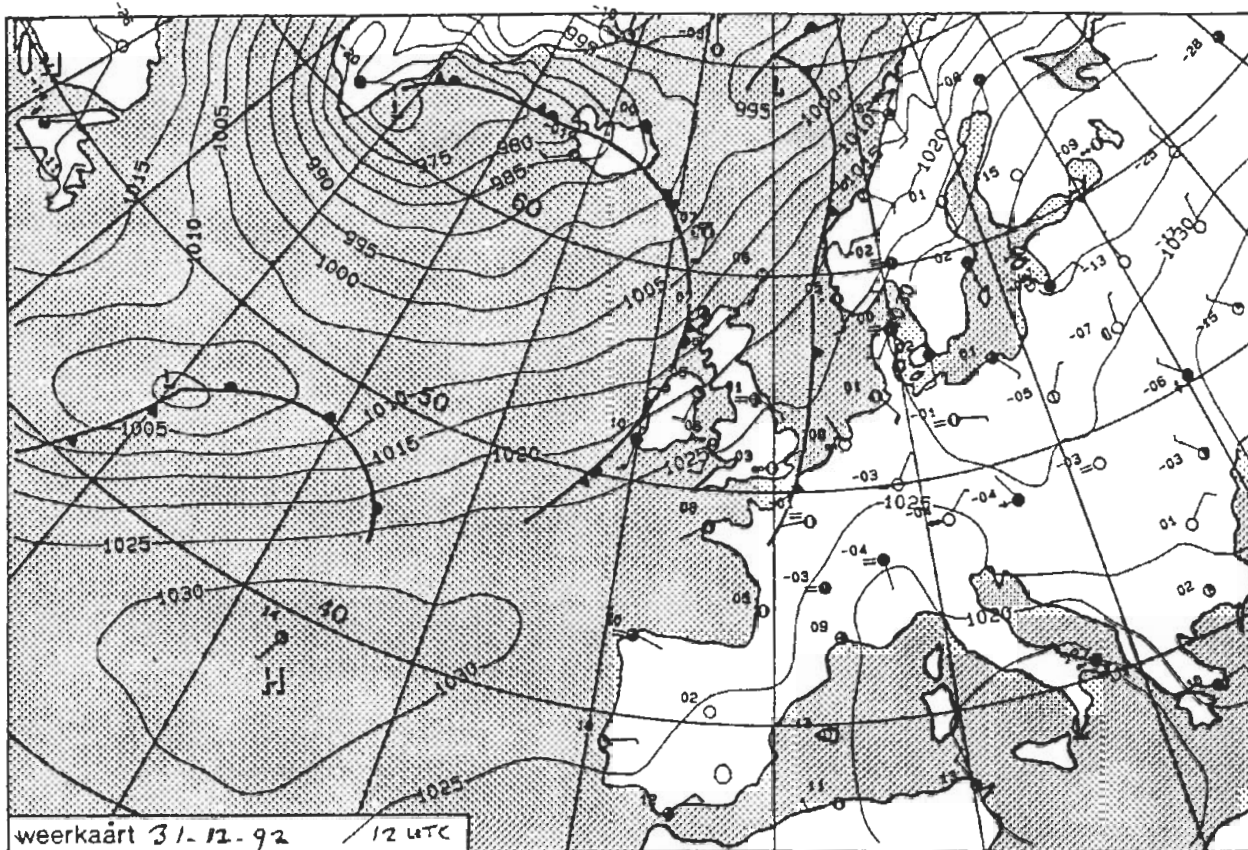
Het optreden van zeer hoge concentraties van luchtverontreinigende stoffen was niet het enige bijzondere van deze jaarwisseling. Meteorologisch gezien was de jaarwisseling zeker zo uitzonderlijk. Op grote schaal trad zeer dichte mist op met voor het verkeer fatale gevolgen; 9 doden, 400 gewon-

den en meer dan 2000 voertuigen met schade.

In de middag van 31 december draaide de wind tijdelijk naar westelijke richtingen en kon vochtiger lucht vanaf de Noordzee binnenstromen. Als gevolg hiervan ontstond in de avond mist. Rond 20.00 uur kwamen de eerste meldingen binnen uit Zuid-Holland en Utrecht. Nog voor middernacht kwam in het hele land verspreid mist voor. Plaatselijk was het zicht al teruggelopen tot minder dan 10 meter. Na middernacht verslechterde de situatie. De mist werd nog dikker en er kwamen meldingen binnen van zicht onder de vijf meter; "sommige bestuurders kunnen de neus van hun eigen auto niet meer zien", aldus een melding van de Algemene Verkeersdienst. Interessant is nu de vraag in hoeverre de uitzonderlijk hoge concentraties van luchtverontreinigende stoffen de mistvorming hebben beïnvloed. Duidelijk is dat er zonder het afsteken van vuurwerk ook mist was opgetreden, want voor middernacht was al op grote schaal mist aanwezig. Wel is het denkbaar dat de mist zo extreem dicht kon worden door de aanwezigheid van de luchtverontreiniging.

Zichtvermindering door vuurwerk

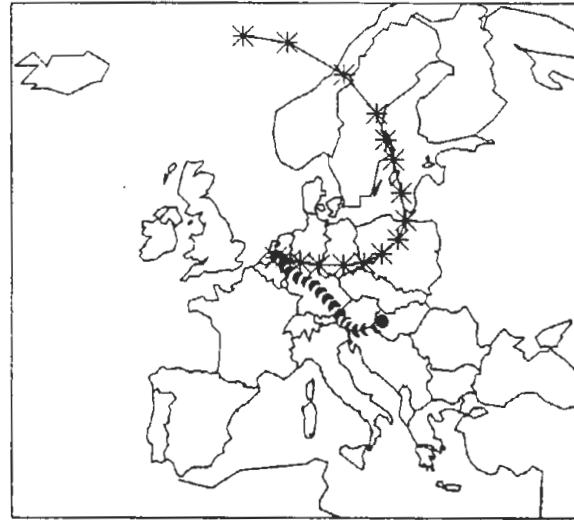
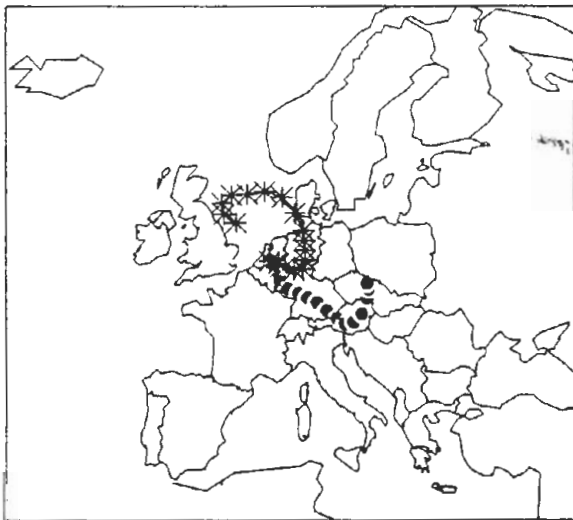
Het afsteken van vuurwerk kan op verschillende manieren voor gezichtsbeperking zorgen. Zo kan van waterdamp oververzadigde lucht alleen condenseren wanneer er voldoende condensatiekernen in de lucht aanwezig zijn. Door het afsteken van vuurwerk wordt het aantal condensatiekernen aanzienlijk vergroot. Het is niet aannemelijk dat dit effect een grote rol kan hebben gespeeld omdat er vrijwel altijd voldoende condensatiekernen aanwezig zijn. Bij het afsteken van vuurwerk komen grote hoeveelheden fijn stof vrij. Dit fijne stof beperkt het zicht. In de VS beschikt men over een ruimer assortiment spectaculaire vergezichten dan in ons land. Daar is de zichtbeperking door stofdeeltjes, afkomstig van menselijk handelen, een onderwerp met een politieke lading vergelijkbaar met die van zure regen.



Figuur 1. De weerkaart van oudejaarsdag 13 uur (12 uur utc). Aangegeven zijn de isobaren en temperaturen van dit tijdstip.

Oudjaar

Nieuwjaar



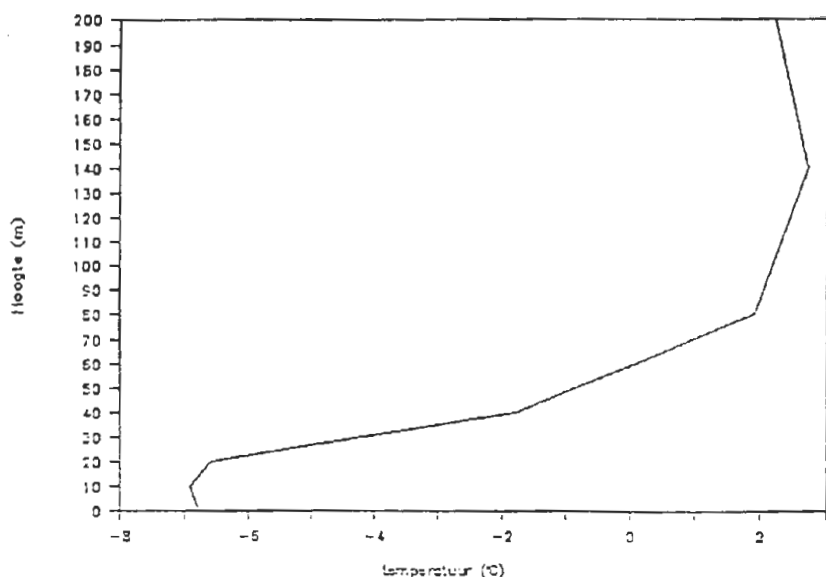
Figuur 2. De herkomst van de lucht die op oudjaar en nieuwjaar in het midden van Nederland aanwezig was. Terugwaartse trajectoriën over 96 uur (puntjes: luchtpakket op 1000 hPa (nabij het aardoppervlak); sterretjes: luchtpakket op 850 hPa (hogere luchtdruk)).

Verder is het mogelijk dat de van vuurwerk afkomstige deeltjes extra afkoeling in de onderste luchtlagen hebben veroorzaakt doordat zij infrarode straling uitzenden. Onder normale omstandigheden, wanneer de lucht vrij schoon is, gebeurt dit alleen aan het

aardoppervlak. Om meer over de zichtvermindering door vuurwerk te kunnen zeggen moeten de concentraties van de luchtverontreinigende stoffen bekend zijn. Deze worden in de volgende onderdelen geschat.

Grondstoffen van vuurwerk

Er worden jaarlijks enkele duizenden tonnen vuurwerk (legaal) geïmporteerd, waarbij de totale omzet een duidelijke stijging vertoont. In 1991 bedroeg de totale geregistreerde omzet van vuurwerk 3800 ton. Ongeveer 900 ton hier-



Figuur 3. Temperatuurprofiel van Cabauw van 00 uto, 1 jan 1993.

van is buskruit [Terwel, 1991]. Naar schatting wordt hiernaast ongeveer 1000 ton illegaal vuurwerk geïmporteerd.

De emissie van luchtverontreinigende stoffen door vuurwerk wordt bijna volledig bepaald door de reactieproducten van buskruit met de toevoegingen die voor licht- of kleureffecten zorgen. Buskruit bestaat voor bijna 75% uit KNO₃, waaraan ongeveer 15% houtskool en 10% zwavel is toegevoegd [Menke, 1978] [Conkling, 1981] [Stout, 1990]. Verder bevat het geregistreerde (sier)vuurwerk ook metalen, chloorverbindingen en andere organische stoffen, voornamelijk ten behoeve van lichteffecten. Er zijn verschillende schattingen gemaakt van de hoeveelheden van deze stoffen in vuurwerk. Een schatting op basis van "expert judgement" resulteerde in een bijdrage van enkele tientallen tonnen metaalzouten, waarbij barium- en strontiumzouten domineren [Mul 1993]. De voorlopige resultaten van een literatuuronderzoek naar de toegepaste recepturen leverde een veel grotere hoeveelheid van ongeveer 500 ton metaalzouten op.

Volgens deze schatting zullen dit vooral zouten van barium, aluminium en magnesium zijn.

Chemische reacties

De luchtverontreiniging volgend op het afsteken van vuurwerk wordt niet alleen bepaald door de grondstoffen die zijn gebruikt, maar ook door de wijze waar-

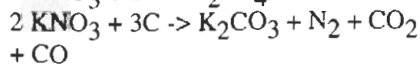
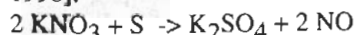
op de chemische reacties tijdens de verbranding/explosie zijn verlopen.

Het in buskruit aanwezige zwavel en koolstof wordt geoxideerd door zuurstof, afkomstig van kaliumnitraat. In eerste benadering zou men verwachten dat hierbij SO₂ en CO₂ vrijkomen, en dat kaliumnitraat reageert tot stoffen als NO_x, N₂ en kaliumcarbonaat [Groothuizen, 1985] [Onderdelinden, 1990].

Bij nader inzien blijken vrij veel chemische reacties tijdens de explosieve verbranding van buskruit een rol te spelen. Er is niet voldoende nitraat aanwezig om een volledige verbranding van koolstof en zwavel te bewerkstelligen; zuurstof uit de omringende lucht speelt bij deze explosieve reacties geen rol van betekenis.

De reacties zijn in grote lijnen samen te vatten als [Menke, 1978] [Van Zuylen,

1990]:



Uiteindelijk komt er bij de explosieve reactie van buskruit per kg ongeveer 600 gram vaste stof en ruim 3000 liter gassen vrij [Conkling, 1981] [Stout en Ten Boer 1990]. Dit (fijne) stof bestaat, indien zuiver buskruit wordt ontstoken, voornamelijk uit K₂CO₃, K₂SO₄, K₂S₂O₃, K₂S, KSCN en (NH₄)₂CO₃. De vrijkomende gassen zijn dan samengesteld uit N₂, CO₂, CO, CH₄, H₂S en H₂. Door het tekort aan zuurstof wordt slechts weinig NO₂ en SO₂ gevormd.

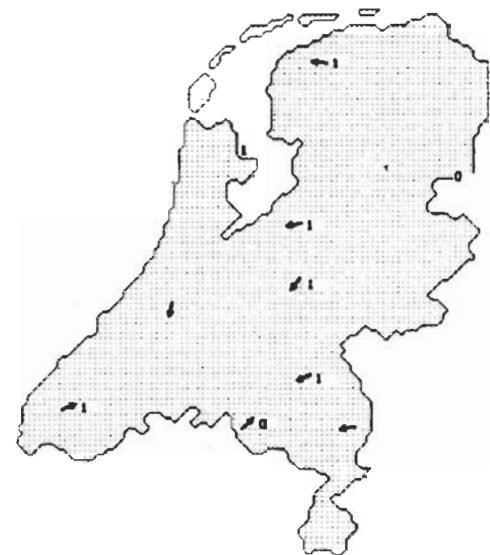
Emissieschatting

Het lijkt aannemelijk dat er in totaal ongeveer 900 ton buskruit werd ontstoken, waaruit ongeveer 500 ton fijn stof kon ontstaan. Veel onzekerder is de schatting van de metaalzouten die vrijkomen. De emissie van metalen wordt via het literatuuronderzoek naar de recepturen hoog ingeschat; 500 ton metaalzouten worden dan geëmitteerd, voornamelijk als fijn stof. De globale inschatting van Mul levert daarentegen een emissie op van 20 ton metalen, voornamelijk barium en strontium. Gezien de chemische reacties die waarschijnlijk optreden, zijn de emissies van SO₂ en H₂S beperkt tot enkele tonnen. De hoeveelheden NO, NO₂ en CO die vrijkomen, lijken gering te zijn ten opzichte van hetgeen continu door onder andere het verkeer en de industrie in de atmosfeer wordt geloosd.

Er lijken geen grote hoeveelheden voor de gezondheid schadelijke stoffen te worden geëmitteerd die hier nog niet zijn vermeld.

Tabel 1. Temperatuurmetingen van Cabauw voor drie verschillende tijdstippen (oudejaarsdag).

hoogte (m)	temperatuur (°C) om 1800 uto	temperatuur (°C) om 2100 uto	temperatuur (°C) om 2400 uto
200	2,1	2,7	2,2
140	1,9	2,9	2,7
80	1,7	2,0	1,9
40	0,3	0,2	-1,8
20	-0,7	-5,8	-6,6
10	-1,5	-7,2	-6,9
2	-5,2	-7,2	-6,8
0,6	-6,1	-7,1	-6,8



Figuur 4. De windsnelheid (m/s) en windrichting in het eerste uur van 1993

Geschatte concentraties in woonwijken

Op basis van de verwachte emissies en het weer kan een schatting worden gemaakt van de uurgemiddelde concentraties direct na de jaarwisseling. De verspreiding van de luchtverontreiniging door vuurwerk wordt, zoals eerder gesteld, voornamelijk bepaald door de windsnelheid en de hoogte van de inversie. De emissies door vuurwerk worden hier verondersteld in het eerste uur van 1993 plaats te vinden in de onderste laag van de atmosfeer boven woonwijken. In steden zal de menglaaghoogte groter zijn dan op het platteland door de invloed van bebouwing en de warmteontwikkeling in steden. Hier wordt uitgegaan van een menglaaghoogte boven woonwijken van 50 meter. Gezien de geringe windsnelheid wordt aanvoer van minder verontreinigde lucht gedurende het eerste uur verwaarloosd. In dorpen en aan de rand van steden kan dus, door aanvoer van lucht van buitenaf, de concentratie duidelijk lager zijn dan hier berekend. In nauwe straten en op plaatsen waar veel vuurwerk wordt afgestoken, kunnen de concentraties veel hoger zijn dan hier berekend.

De schatting van de uurgemiddelde concentratie van fijn stof loopt van 5000 tot 10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afhankelijk van de toegepaste emissieschatting van metalen. De concentraties van barium en strontium variëren, afhankelijk van de geschatte emissies, van ongeveer

200 tot 1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De concentraties van CO, SO₂, H₂S, NO en NO₂ zullen gemiddeld over woonwijken enkele tientallen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn. In het volgende artikel zullen metingen gepresenteerd worden die deze schattingen verder onderbouwen.

De stofconcentratie ligt jaargemiddeld op ongeveer 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tijdens perioden met verhoogde luchtverontreiniging worden concentraties tussen 100 en 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ waargenomen. De hier geschatte concentraties van fijn stof zijn dus extreem hoog. In een volgend artikel zal ingegaan worden op de resultaten van metingen aan de luchtverontreiniging rond de jaarwisseling.

Zichtvermindering door fijn stof

De grote hoeveelheden fijn stof zullen, doordat de deeltjes het licht verstrooien, tot zichtvermindering hebben geleid. De zichtreductie door andere oorzaken wordt hier gemakshalve buiten beschouwing gelaten. Aan de hand van empirische relaties tussen stofvormige luchtverontreiniging en zicht is een schatting te geven van deze zichtvermindering [Diederer, 1985]:

$$V = 3,9 / b$$

waarin V =zicht [km] en b =verstrooiingscoëfficiënt van de deeltjes [km^{-1}]. Voor b is het volgende verband met de concentratie fijn stof bepaald:

$$b = -0,04 + 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot FS$$

waarin FS =concentratie van fijn stof [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Bij deze berekening worden relaties gebruikt die zijn gebaseerd op voor Nederland normale deeltjesconcentraties, een normale deeltjesgrootteverdeling en een gemiddelde luchtvochtigheid, zodat de resultaten voor deze extreme situatie met voorzichtigheid moet worden geïnterpreteerd.

Het zicht is als functie van de deeltjesconcentratie berekend met de hier gegeven relaties. Voor de geschatte gemiddelde concentratie in steden van 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, volgt voor gemiddelde atmosferische condities een zicht van honderd meter. Het aanwezige vocht in de lucht zal echter condenseren op deze deeltjes, waardoor het zicht verder terugloopt. Als de lucht vrij vochtig was geweest zonder dat er mistvorming optrad, dan zou het zicht in steden waar-

schijnlijk niet meer zijn geweest dan enkele tientallen meters. Omdat er een sterke plaatselijke spreiding in door feestvreugde veroorzaakte verontreiniging wordt verwacht, kan lokaal het zicht een aantal malen minder zijn geweest.

Deze schatting is in goede overeenstemming met hetgeen na de jaarwisseling is waargenomen. Voor 12 uur 's nachts trad er reeds mist op. Vlak na twaalf uur was het zicht plaatselijk tot minder dan vijf meter gereduceerd.

Conclusies

Door de lage windsnelheid en de geringe hoogte van de menglaag tijdens de jaarwisseling konden zeer hoge concentraties van luchtverontreinigende stoffen voorkomen. Ook was het zicht tijdens deze nacht bijzonder gering. Het ontstaan van de mist is het gevolg van het binnenstromen van vochtiger lucht in de middag van oudejaarsdag.

Al voor middernacht was er op veel plaatsen zeer dichte mist aanwezig. Op dat moment was er nog weinig vuurwerk afgestoken.

Na middernacht werd het zicht echter extreem slecht. Er bevonden zicht toen, als gevolg van het afsteken van vuurwerk, hoge concentraties fijn stof in de lucht.

Indien de lucht niet oververzadigd was geweest aan vocht, zouden deze deeltjes naar schatting een zichtvermindering in en nabij woonwijken tot enkele tientallen meters hebben veroorzaakt, met plaatselijk nog veel sterkere zichtreducties.

De extreme zichtreductie tijdens de jaarwisseling lijkt hiermee het gevolg te zijn geweest van de combinatie van het aanwezige vocht in de afkoelende lucht met de hoge concentraties van fijn stof door het afsteken van vuurwerk.

Referenties

Conkling, J.A.: Chemistry of fireworks. Chemical and Engineering News, pp 24-32, June (1981).

Diederer, H.S.M.A.: Guicherit and R., Hollander, J.C.T. Visibility reduction by air pollution in the Netherlands. Atmospheric Environment 19,2 pp 377-383 (1985).

Groothuizen, Th.M.: Vuurwerk. Chemische feitelijkheden, actuele chemische encyclopedie

1985-033. Koninklijke Nederlandse
Chemische Vereniging
(1985).

Menke, K.: Die Chemie der
Feuerwerkskörper. *Chemie in unserer
Zeit* 1 pp 12-22 (1978).

Dhr. Mul. TNO Rijswijk: persoonlijke
mededeling (1993).

Onderdelinden, D.: Vuurwerk verdrie-
voudigt NOx- en SO₂-emissie.
Ingenieurskrant 26/27 (1990).

Stout, G. en Ten Boer: Explosiechemie;
kruit en kneedbom. *Natuur en techniek*,
58, 12 (1990).

Terwel, L.: Keuringsdienst van waren,
Rotterdam.

Schriftelijke mededeling
(1991).

Van Zuylen, A.: Chemie van gillende
keukenmeiden.
Chemisch magazine,
pp 634-635,
december (1990). ◊
