

**M S N P**

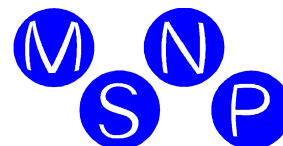
Technische projekt-  
realisatie en advisering

# **Eindrapport Onderzoek naar de Vuurwerkcramp in Enschede**

27 februari 2001

Bas van den Heuvel

Dave Boers



## Inhoudsopgave

1: Inleiding.....	3
1.1: Aanleiding.....	3
1.2: Onderzoeksvragen.....	3
1.3: Inventarisatie feitenmateriaal .....	3
1.4: Overzicht belangrijke wijzigingen ten opzichte van de vorige versie .....	4
2: Reconstructie gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks op 13 mei 2000. ....	5
2.1: Volgorde gebeurtenissen .....	5
2.2: Formulering additionele onderzoeksvragen.....	6
3: Analyse .....	7
3.1: Beeldmateriaal .....	7
3.2: Consultatie van wetenschappers en deskundigen .....	7
3.3: Literatuuronderzoek .....	7
3.4: Gesprekken met getuigen .....	7
3.5: Analyse voor het beantwoorden van complementaire onderzoeksvragen .....	8
4: Resultaten.....	9
4.1: Interpretatie van de gebeurtenissen aan de hand van de analyse.....	9
4.2: Causale keten van de gebeurtenissen aan de hand van dit onderzoek.....	10
4.3: Schade aan de woonwijk .....	11
4.4: Mechanisme van een massa-explosie.....	11
4.5: Berekningen van de energie van de laatste en voorlaatste explosie .....	12
4.6: Interpretatie details van de laatste explosie.....	13
5: Conclusies en aanbevelingen.....	15
5.1: Hoofdonderzoeksvragen .....	15
5.2: Additionele onderzoeksvragen.....	15
5.3: Aanvullende onderzoeksvragen.....	16
5.4: Welke omstandigheden zijn cruciaal geweest voor het verloop van de gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks? .....	16
5.5: Regelgeving en toezicht.....	16
5.6: Bestuurlijke en juridische aspecten.....	16
6: Referenties.....	17
Bijlage:	
Kaart omgeving SE Fireworks van de Inspectie Brandweezorg en Rampenbestrijding, aug. 2000....	18

# 1: Inleiding

## 1.1: Aanleiding

Op 16 november 2000 is op verzoek van de Belangenvereniging Slachtoffers Vuurwerkkramp Enschede (BSVE) een tussenrapportage<sup>1</sup> opgesteld, die is gebaseerd op ons lopende onderzoek naar de vuurwerkkramp in Enschede. Met de voorliggende rapportage presenteren wij onze eindresultaten. Deze eindresultaten komen overeen met de voorlopige resultaten van 16 november, doch zijn op onderdelen verder gepreciseerd. In paragraaf 1.4 zijn belangrijke wijzigingen aangegeven ten opzichte van de vorige versie.

Op 15 januari zijn de rapportages van de inspecties [24] openbaar gemaakt. De feitenreconstructie en de analyse in onderdeel 3: "Onderzoek naar het brandweeroptreden tot en met de fatale explosie, Van proactie tot en met repressie" wijken opvallend af van onze voorlopige analyse van 16 november. Het betreft hier zowel de plaats, volgorde en tijdstippen van de gebeurtenissen, als de causale relaties tussen deze gebeurtenissen. Dit is voor ons aanleiding geweest om het feitenmateriaal aan een voortgezet onderzoek te onderwerpen en de hypothesen in de rapportage van de inspectie expliciet te toetsen. Dit heeft ons geen aanleiding gegeven van onze voorlopige analyse af te wijken. Deze onderzoeken hebben wel een nauwkeuriger plaatsaanduiding van de gebeurtenissen opgeleverd.

## 1.2: Onderzoeksvragen

Onderstaande vragen vormden uitgangspunten voor het onderzoek:

1. Wat is binnen de inrichting van SE Fireworks gebeurd tijdens en direct voor de explosies die hebben plaats gevonden op 13 mei 2000?
2. Is het mogelijk de explosies en de energie die vrij kwam bij de explosies, te verklaren met materiaal dat redelijkerwijs aanwezig was of had kunnen zijn binnen de inrichting van SE Fireworks?
3. Hoe is uit deze gebeurtenissen de schade aan de woonwijk te verklaren?
4. Welke omstandigheden zijn cruciaal geweest voor het verloop van de gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks?
5. Aanvullende onderzoeksvragen naar aanleiding van de voorlopige analyse.

### 1.2.1: Aanvullende onderzoeksvragen naar aanleiding van de voorlopige analyse

1. Is het mogelijk een nadere analyse te maken van de gebeurtenissen in en bij E2?
2. Is het mogelijk een exactere indicatie van de plaats van de explosies te verkrijgen?
3. Is het mogelijk aan de hand daarvan de sequentie van de gebeurtenissen te bepalen?
4. Is het mogelijk de kracht van de voorlaatste explosie te bepalen?

## 1.3: Inventarisatie feitenmateriaal

1. Feitenmateriaal over de situatie voorafgaand aan de ramp;
2. Feitenmateriaal over de situatie tijdens de ramp;
3. Feitenmateriaal over de situatie na de ramp;
4. Overig feitenmateriaal.

### 1.3.1: Feitenmateriaal over de situatie voorafgaand aan de ramp

- Een luchtfoto van 9 mei gemaakt in opdracht van de Topografische Dienst te Emmen ten behoeve van de kartering van Enschede;
- Twee opeenvolgende luchtfoto's van 13 mei 12:00 uur eveneens gemaakt in opdracht van de Topografische Dienst te Emmen ten behoeve van de kartering van Enschede;
- Kadastrale kaarten van de omgeving van SE Fireworks;
- Bouwtekeningen van de gebouwen binnen de inrichting van SE Fireworks;
- De vergunningssituatie over SE Fireworks zoals geïnventariseerd door het COT in Leiden [14].

<sup>1</sup> Voorlopige analyse van de vuurwerkkramp in Enschede, 16 november 2000

### **1.3.2: Feitenmateriaal over de situatie tijdens de ramp**

- 1 videoband genomen vanaf de Bamshoeve door Gerrit Poort;
- 1 videoband genomen vanaf de Bamshoeve door Jack Huygens;
- 1 videoband genomen vanaf de kruising Roomweg en Tollensstraat door Danny de Vries;
- Foto's genomen op het binnenterrein door Reinier van Willigen;
- Foto's genomen vanuit een vliegtuig rond 16:00 uur op 13 mei;
- De rapportage van het KNMI ten aanzien van de seismologische en akoestische metingen [20].

### **1.3.3: Feitenmateriaal over de situatie na de ramp**

- Een foto van het terrein van SE Fireworks genomen op zondag 14 mei;
- Een luchtfoto van het terrein van SE Fireworks genomen op woensdag 17 mei;
- Een filmopname gemaakt vanuit een vliegtuig op zondag 14 mei;
- Voorlopig deskundigenrapport van het Nederlands Forensisch Instituut 27-07-2000 [19].

### **1.3.4: Overig feitenmateriaal**

- Fotomateriaal dat verzameld is op <ftp://relativity.student.utwente.nl/>;
- Fotomateriaal dat verzameld is op <http://www.evenoverdieramp.nl/>;
- De reconstructie van de inspecties die is vrijgegeven op vrijdag 9 november [18];
- De rapportages van de inspecties [24];
- Brandweertekening van de vergunde situatie;
- Interviews met ooggetuigen.

## **1.4: Overzicht belangrijke wijzigingen ten opzichte van de vorige versie**

- Enkele tijdstippen zijn aangepast op basis van de inspectierapporten;
- De locaties van de voorlaatste en laatste explosie zijn nauwkeuriger bepaald;
- De sequentie van gebeurtenissen en de bijbehorende causale verbanden zijn aangegeven;
- Een nieuwe verklaring voor het opendraaien van de rechter deur van zeecontainer E2;
- De energieverhouding tussen de laatste en voorlaatste explosie is bepaald (pagina 12);
- Een energiewaarde voor de voorlaatste explosie is bepaald (pagina 12);
- De omrekening van de energie bij de explosies naar een TNT-equivalentie is nader toegelicht (pagina 13).

## 2: Reconstructie gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks op 13 mei 2000<sup>2</sup>.

### 2.1: Volgorde gebeurtenissen

#### Fase 1: de initiële brand in het bunkercomplex

- 15:02 Eerste brandmelding. Er zijn explosies te horen;
- 15:08 Eerste brandweereenheid ter plaatse;  
Brand in de ompak/werkruimte C2 van het centrale bunkercomplex;  
Er zijn veel kleine explosies en er wordt vuurwerk uitgeworpen (aan de beide zijden en mogelijk via de lichtkoepels). De deuren van de ompakruimte zijn niet meer aanwezig;  
Er is vuurwerk uitgeworpen buiten het terrein;  
Rondom de locatie ontstaan kleine secundaire brandjes. Er zijn ook brandjes op de MAVO-boxen, showroom en gebouw G;
- 15:18 De brandweer opent het naast de ompakruimte gelegen compartiment C3 en spuit naar binnen. Er is in compartiment C3 geen rook en geen vuur;
- 15:21<sup>3</sup> Het blijkt dat compartiment C4 in brand staat. Er is veel rook en het is niet mogelijk erin te kijken;
- 15:27 Volgens de brandweer is de brand nog beheersbaar.

#### Fase 2: de brand en explosies in zeecontainer E2

- 15:28<sup>4</sup> Eerste ladder wordt geplaatst achter MAVO-box 6;
- 15:28 Brandweer stelt vanaf ladder vast dat alle (groene) deuren van bunkercompartimenten dicht zijn en dat er rook tussen zeecontainers E2 en E15 vandaan komt;
- 15:28 Lichte explosie in het naast de ompakruimte gelegen compartiment C4. Er ontstaan diverse nieuwe brandjes op het terrein;
- 15:30 Vanaf zeecontainer E1 wordt door de AP 1 van TS645 een hogedruk straal ingezet op de ruimte tussen E2 en E15;
- 15:30 Tweede ladder wordt geplaatst achter MAVO-box 1;
- 15:32 Er wordt nu door de AP 2 van TS 645 vanaf MAVO-box 7 geblust in C4 (met lagedruk).

De met een \* gemarkeerde tijdstippen zijn verkregen uit de tijdcodes van de videobanden van Gerrit Poort en Jack Huygens. Voor de tijdcorrectie van deze codes is als referentiepunt het tijdstip (15:35:46) van de laatste grote explosie genomen zoals berekend door het KNMI. De met een \* gemarkeerde tijdstippen zijn nauwkeurig binnen 1 seconde.

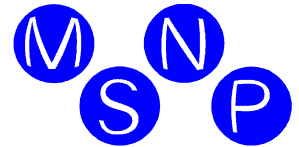
- 15:33:09\* Start opname Jack Huygens vanaf de Bamshoeve;
- 15:33:09\* De AP 1 van TS645 verkent de voorzijde van zeecontainer E2;
- 15:33:10\* De AP 1 van TS645 verkent de achterzijde van zeecontainer<sup>5</sup> E2;
- 15:33:17\* Vuurwerk wordt vanuit de richting van het bunkercomplex geworpen naar zeecontainers E2 en E15;
- 15:33:19\* De AP 2 van TS645 op MAVO-box 7 knielt, maar blijft blussen in de richting van C4;
- 15:33:19\* Begin rookontwikkeling bij E2 en E15;
- 15:33:23\* Sterke rookontwikkeling bij E2 en E15;
- 15:33:30\* Start opname Gerrit Poort vanaf de Bamshoeve;

<sup>2</sup> De vermelde tijdstippen zijn afkomstig uit reconstructies van de inspecties. Voor een overzichtstekening waarop de nummering van de objecten binnen de inrichting van SE Fireworks is aangegeven, verwijzen wij naar de bij referentie [18] gevoegde tekening.

<sup>3</sup> Dit tijdstip is niet eenduidig vastgesteld.

<sup>4</sup> Gewijzigd n.a.v. inspectierapport

<sup>5</sup> De AP 1 van TS 645 geeft niet aan dat extra inzet in de buurt van E2 nodig is.



- 15:33:33\* De AP 2 van TS645 op MAVO-box 7 zet spuit uit;  
15:33:34\* De rook trekt op bij E2 en E15;  
15:33:37\* Op de zeecontainer E2 is een gevarensticker behorende bij de vuurwerkklassse 1.4 zichtbaar. De zeecontainer E2 is afgesloten met sluitstangen;  
15:33:39\* Een tak veert op van het zeecontainerdak van E2 en stof komt vrij van de linker voorzijde van de container. Het sluitmechanisme van de linker zeecontainerdeur schiet los;  
15:33:42\* De AP 1 van TS645 is mogelijk zichtbaar aan de achterzijde van zeecontainer E2;  
15:33:43\* De rechterdeur van zeecontainer E2 draait open en er beweegt zich rook naar buiten, initieel in twee duidelijk onderscheidbare richtingen, namelijk recht omhoog en voor de linkerdeur langs. Er is ook rook zichtbaar aan de achterzijde van de containers;  
15:33:55\* Steekvlam uit E2.

### **Fase 3: de voorlaatste zware explosie**

- 15:34:40 Deze explosie is een reeks explosies. Er zijn twee duidelijke explosiekernen zichtbaar. Verder is te zien dat brokstukken wegschieten uit een derde bron. In het beeldmateriaal is een schokgolf zichtbaar. Een van de brokstukken wordt gevolgd door een stofkolom.

### **Fase 4: de laatste zware explosie**

- 15:35:46 Een van de zeecontainers in het gebied E8-E11 explodeert met grote snelheid. Dit gebeurt 0.04 seconden voor de massa-explosie die begint in het bunkercomplex. Bij de massa-explosie zijn verschillende objecten verspreid over het terrein geëxplodeerd binnen 0,02 seconden.

## **2.2: Formulering additionele onderzoeksvragen**

De inventarisatie van het feitenmateriaal heeft aanleiding gegeven tot het formuleren van enkele additionele onderzoeksvragen. Deze zijn:

### **Fase 1: de initiële brand in het bunkercomplex**

1. Hoe is de brand ontstaan in de ompakruimte (compartiment C2)?
2. Wat was aanwezig in de ompakruimte dat kon branden en exploderen?
3. Hoe heeft de brand in de ompakruimte zich kunnen uitbreiden naar het naastgelegen compartiment C4?

### **Fase 2: de brand en explosies in zeecontainer E2**

1. Hoe zijn de brand en de explosies ontstaan in zeecontainer E2?
2. Hoe kan de rechter zeecontainerdeur opendraaien?
3. Hoe is de richting van de rook te verklaren die uit zeecontainer E2 komt?

### **Fase 3: de voorlaatste zware explosie**

1. Waarom zijn er gelijktijdig twee explosiekernen te zien?
2. Hoe kan deze explosie zo krachtig zijn?

### **Fase 4: de laatste zware explosie**

1. Hoe kunnen meerdere explosies zo in tijd samenvallen dat deze als één explosie wordt ervaren?
2. Hoe kan deze explosie zo krachtig zijn?

## **3: Analyse**

### **3.1: Beeldmateriaal**

#### **3.1.1: Onderlinge vergelijking**

Al het beschikbare relevante beeldmateriaal is onderworpen aan een onderlinge vergelijking om gemeenschappelijke elementen en cruciale details te isoleren.

#### **3.1.2: Opwaarderen videomateriaal**

Tijdens het onderzoek is gebleken dat veel complotverhalen zijn ontstaan door het gebruik van beeldmateriaal van lage kwaliteit. Dit is aanleiding geweest tot de geruchten over een 'raket' die te zien zou zijn op de film van Gerrit Poort. Uit nadere analyse bleek dat het hier om een rookkolom gaat. Het belang van het gebruik van beeldmateriaal van de hoogst beschikbare kwaliteit is evident. In dit kader zijn bijvoorbeeld de videobanden van Gerrit Poort en Jack Huygens digitaal uitgelezen op maximale beeldresolutie. De opnametechniek van de band van Gerrit Poort stond toe om de gebeurtenissen op meer momenten in de tijd te reconstrueren dan de momenten waarop er beeldjes naar de band geschreven zijn. Op deze manier zijn de gebeurtenissen in de tijd vastgelegd met een twee maal zo grote nauwkeurigheid dan het oorspronkelijke beeldmateriaal toestond. Door deze opwaardering in de tijd zijn de beelden eveneens scherper geworden omdat snel bewegende objecten dankzij de hogere beeldbemonsteringssnelheid minder vertekenen.

#### **3.1.3: Het maken van een kaart**

Voor de bepaling van de schaal waarop gebeurtenissen plaats hebben gevonden, is het van doorslaggevend belang om een zeer nauwkeurige kaart van de omgeving van SE Fireworks te hebben. Deze kaart is gedurende de analyse geconstrueerd met behulp van diverse luchtfoto's en kadastrale kaarten.

### **3.2: Consultatie van wetenschappers en deskundigen**

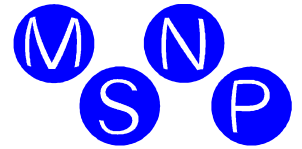
Er is gesproken met wetenschappers op vakgebieden als verbrandingsprocessen, schokgolven en explosies. Verder is er gesproken met deskundigen op vakgebieden als brandbestrijding, explosieven-opslag, explosievenopruiming, pyrotechnische materialen en videobewerking. Met de deskundigen en wetenschappers is, waar mogelijk samen, het cruciale beeldmateriaal doorgenomen. Op deze manier is een grote hoeveelheid nuttige opmerkingen verzameld dat mede vorm heeft gegeven aan het onderzoek.

### **3.3: Literatuuronderzoek**

Om een zo goed mogelijk overzicht te verkrijgen van de bestaande kennis over explosies en schokgolven is literatuuronderzoek gedaan. De meest relevante literatuur over de fysica van explosies, de fysica van schokgolven en de chemische technologie van explosieven en pyrotechnische mengsels is verzameld. Tevens is er literatuur verzameld uit diverse vaktijdschriften waarin explosies van vuurwerkfabrieken, proefnemingen met consumentenvuurwerk in zeecontainers en proefnemingen met diverse soorten evenementenvuurwerk zijn gedocumenteerd. Zie de referentielijst voor een overzicht.

### **3.4: Gesprekken met getuigen**

Gesprekken met verschillende getuigen hebben geleid tot belangrijke aanwijzingen voor het onderzoek.



### **3.5: Analyse voor het beantwoorden van complementaire onderzoeksvragen**

Om een nadere analyse te kunnen maken van de gebeurtenissen, waaronder de gebeurtenissen in en rond E2, is de volgorde van de beeldbewerking aangepast. Hierbij zijn niet alleen de beide videofilms in het geheel *ge-deinterlaced*, maar er is ook een beeldverbetering gerealiseerd door een andere vorm van beeldcompressie te kiezen. Dit resulteert in een factor 4 scherper beeldmateriaal dan dat wij voor de eerste analyse hebben gebruikt en een maximale onafhankelijkheid in kleur en beeld tussen de verschillende afzonderlijke frames.

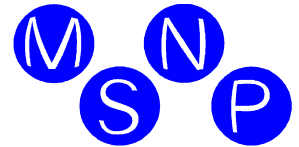
Voor het nauwkeurig bepalen van de locaties van de verschillende explosies binnen de inrichting van SE Fireworks is de beeldinformatie uit de videobeelden gecombineerd met de diepte-informatie uit de luchtfoto's van de Topografische Dienst in Emmen. Door op de luchtfoto lijnen te trekken tussen karakteristieke locaties (objecten en de cameraposities) kunnen nauwkeurig de locaties worden vastgesteld.

De cameraposities zijn verkregen uit zowel interviews met Gerrit Poort en Jack Huygens (de videofilms op de Bamshoeve), als uit de analyse van het videomateriaal. Informatie uit deze interviews wordt bevestigd, doordat op de videobeelden van beide filmers hun locaties maar ook de locatie van de andere videofilmer eenduidig te bepalen zijn. Deze locaties in combinatie met de tijdcodes van de videobanden geven de sequentie van gebeurtenissen.

De kracht van de voorlaatste explosie kan worden afgeleid uit de relatie tussen de berekende energie van de laatste explosie en de verhoudingen tussen de grondbewegingen van de laatste en voorlaatste explosie, zoals deze zijn geregistreerd door seismische stations van het KNMI [20].

Op basis van de energie van de voorlaatste explosie en het model dat een beschrijving geeft over de relatie tussen tijd, plaats en energie van een explosie [21] is het tijdstip van het ontstaan van de schokgolf bij de voorlaatste explosie uitgerekend.





## 4: Resultaten

### 4.1: Interpretatie van de gebeurtenissen aan de hand van de analyse

Deze interpretatie is tot stand gekomen met behulp van de reconstructie van de inspecties [18], door analyse van het beeldmateriaal en door gesprekken met getuigen.

#### 4.1.1: De interpretaties van de luchtfoto's

- Op de luchtfoto's zijn, behalve de zeven MAVO-boxen en het bunkercomplex, 12 zeecontainers en 4 iets grotere objecten zichtbaar;
- Tevens is een afdak zichtbaar tussen MAVO-box 1 en de loods;
- Binnen de inrichting van SE Fireworks worden geen zichtbare activiteiten ontplooid;
- Op de twee opeenvolgende luchtfoto's genomen om 12:00 uur op 13 mei in opdracht van de Topografische Dienst te Emmen is achter MAVO-box 7 op de schutting een wit stipje zichtbaar. Omdat dit stipje zichtbaar is op de beide luchtfoto's is dit geen vertekening op een individuele foto. Uit bewegingen van voertuigen en personen op de luchtfoto's wordt duidelijk dat er enige tijd gezeten moet hebben tussen het nemen van de beide foto's. Omdat de plek van het stipje op beide luchtfoto's hetzelfde is, is het *niet* waarschijnlijk dat dit stipje overeenkomt met een persoon die over de schutting probeert te klimmen.

#### 4.1.2: Fase 1: de initiële brand in het bunkercomplex

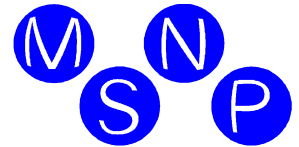
- In de ompakruimte is brand (bunkercompartiment C2);
  - Gelet op de afwezigheid van de deuren en de getuigenverklaringen moet de brand in de ompakruimte zijn begonnen tussen 14:30 uur en 14:45 uur;
  - In deze ruimte was vuurwerk opgeslagen.
- Rond 14:45 uur worden door getuigen explosies gehoord die mogelijk afkomstig zijn van het terrein van SE Fireworks;
- Het bunkercompartiment C2 heeft geen deuren meer;
- Om 15:21 uur wordt brand geconstateerd in bunkercompartiment C4;
  - De brandweer constateert dat de waterstraal niet terugkaatst van de deur van bunkercompartiment C4;
  - Dit duidt erop dat de deuren op dat moment afwezig zijn.
- Het uitgeworpen vuurwerk veroorzaakt kleine brandjes in en om de inrichting.

#### 4.1.3: Fase 2: de brand en explosies in zeecontainer E2

- De AP 1 en AP 2 van TS645 constateren rook tussen E2 en E15;
- De AP 1 van TS 645 zet vanaf zeecontainer E1 een hogedruk straal in tussen E2 en E15;
- De AP 1 van TS 645 moet aanleiding hebben gehad tot een verkenning van zeecontainer E2, ondanks dat explosies in bunkercompartiment C4 van het bunkercomplex optreden;
- In zeecontainer E2 vindt een kleine explosie plaats (videobeeld met de tak GP);
- In zeecontainer E2 vindt een tweede kleine explosie plaats, waardoor de rechter zeecontainer deur opengaat en het dak aan de achterzijde openscheurt (videoband GP);
- De beweging van de rook aan de voorzijde van zeecontainer E2 duidt op een explosie dieper in de container. Dit is consistent met het openscheuren van het dak van E2 aan de achterzijde;
- In zeecontainer E2 vinden enkele kleine explosies plaats en er ontstaat een steekvlam over de grond, waarbij explosies te horen zijn (videoband GP). Hierbij wordt vuurwerk uitgeworpen;
- Analyse van het geluidsspoor duidt op explosies van individuele stukken vuurwerk.

#### 4.1.4: Fase 3: de voorlaatste zware explosie (15:34:40 tijdstip uit de reconstructie van de inspecties)

- De reeks explosies wordt geïnitieerd door een explosie van beperkte omvang in zeecontainers E15 en mogelijk E16. Dit is de linker zichtbare explosiekern;



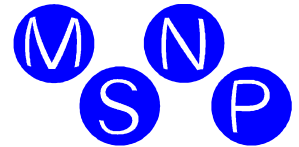
- Vrijwel tegelijkertijd ontstaat de rechter explosiekern, die hoogst waarschijnlijk bestaat uit uitgeworpen inhoud van E15 en mogelijk E16 dat tegen het bunkercomplex tot stilstand kwam;
- 0.08 tot 0.10 seconden later explodeert MAVO-box 7 en mogelijk MAVO-box 6. Deze explosie veroorzaakt een zichtbare vrijwel bolvormige schokgolf en is daarom duidelijk de zwaarste van de drie deelexplosies. De kern van de bolvormige schokgolf lijkt te liggen in de buurt van MAVO-box 7;
- Bij deze explosie in MAVO-boxen 6-7 worden brokstukken weggeworpen. Een van deze brokstukken lijkt vanuit het camerastandpunt van Gerrit Poort verticaal weggeworpen te worden met een snelheid groter dan die van het geluid. Achter het hete brokstuk ontstaat een condensspoor en een lagedruk kolom waarin rook, stof en puin omhoog worden gezogen;
- Ook is gelijktijdig op de video van Danny de Vries het puin te zien dat omhoog komt bij de explosie van MAVO-boxen 6-7;
- De cameramensen op de Bamshoeve worden getroffen door de drukgolf van de explosie van MAVO-boxen 6-7;
- Het beeldmateriaal van de voorlaatste explosie (videobanden GP en DV) geeft geen aanleiding te vermoeden dat de overige MAVO-boxen zijn mee geëxplodeerd.

#### **4.1.5 Fase 4: de laatste zware explosie (15:35:46 tijdstip uit de reconstructie van de inspecties)**

- Het bunkercomplex staat na de voorlaatste explosie in brand. Tevens is brandend vuurwerk terechtgekomen bij en tussen de zeecontainers E3-E14;
- De laatste explosie wordt voorafgegaan door een explosie in een zeecontainer (E8-E11) met E10 als meest waarschijnlijke zeecontainer. Deze explosie is sneller dan de andere explosies op het terrein. Het is waarschijnlijk dat brokstukken van deze explosie de massa-explosie in het bunkercomplex inleiden;
- Het centrum van de laatste explosie ligt aan de oostzijde van het bunkercomplex (videoband GP en luchtfoto naderhand);
- Bij het op gang komen van de explosie in het bunkercomplex ontstaat een sterke schokgolf. Deze sterke schokgolf neemt de overige binnen de inrichting gelegen objecten mee, waaronder hoogst waarschijnlijk de resterende MAVO-boxen (meest linker explosiekern tijdens de laatste explosie);
- De grondgolf raakt de Bamshoeve;
- Uit het beeldmateriaal blijkt dat de schokgolf binnen de inrichting van SE Fireworks een zogenaamde "sterke schokgolf" moet zijn geweest;
- De sterke schokgolf gaat op een afstand van ongeveer 55 meter over in een zwakke schokgolf;
- De zwakke schokgolf raakt de cameramensen op de Bamshoeve.

#### **4.2: Causale keten van de gebeurtenissen aan de hand van dit onderzoek**

- Brand in C2, oorzaak onbekend;
- Brand in C4, doorgeslagen vanuit C2;
- Explosie in E2, als gevolg van branddoorslag door een brand tussen E2 en E15;
- De inhoud van E2 wordt uitgeworpen, ten gevolge van een explosie in E2;
- Explosie van E15-E16 (inleiding op de voorlaatste explosie), waarschijnlijk ontstaan door branddoorslag van de brand tussen E2 en E15;
- Bij deze explosie komt uitgeworpen inhoud tegen het bunkercomplex tot stilstand en explodeert;
- Explosie van MAVO-boxen 6-7, waarschijnlijk veroorzaakt door brokstukken of hittestraling uit de explosie van E15-E16 of de uitgeworpen inhoud hiervan;
- Brand in het bunkercomplex en voor en tussen de zeecontainers, als gevolg van de explosies;
- Explosie van een zeecontainer (E8-E11) (inleiding op laatste explosie), waarschijnlijk veroorzaakt door branddoorslag;
- Ontwikkeling explosie in de oostzijde van het bunkercomplex, waarbij een sterke schokgolf ontstaat. Waarschijnlijk wordt deze explosie veroorzaakt door brokstukken van de zeecontainer explosie die hieraan voorafgaat, mogelijk ook door de brand in het bunkercomplex;
- De zeecontainers en resterende MAVO-boxen exploderen, als gevolg van de massa-explosie.



### **4.3: Schade aan de woonwijk**

Ten aanzien van de schade aan de woonwijk zijn er twee aspecten van belang:

1. Het schadebeeld is erg vertekend door de brand naderhand;
2. De grote asymmetrie.

Met name in het binnengebied is het erg moeilijk om aan de hand van beeldmateriaal vast te stellen welk gedeelte van de schade direct het gevolg is van de schokgolf en welk gedeelte het gevolg is van de brand achteraf.

De grote asymmetrie in het schadebeeld kan slechts gedeeltelijk verklaard worden uit het verloop van de brand na de laatste grote explosie. Er is asymmetrie in de glasschade en in de brandschade. Ten aanzien van de brandschade kan deze asymmetrie deels verklaard worden uit de windrichting op 13 mei. Ten aanzien van de glasschade is er globale asymmetrie, ook op plaatsen waar in principe niet op grote schaal brand heeft gewoed.

Het is waarschijnlijk dat de asymmetrie in het schadebeeld verklaard kan worden uit asymmetrie in de schokgolf. Mogelijk is een dergelijke asymmetrie gerelateerd aan de volgorde waarin de bunkercompartimenten zijn geëxplodeerd bij de laatste zware explosie.

### **4.4: Mechanisme van een massa-explosie**

Er is sprake van een massa-explosie van vuurwerk indien een grote hoeveelheid vuurwerk vrijwel gelijktijdig explodeert.

Uit het literatuuronderzoek en de consultatie van wetenschappers en deskundigen blijkt dat het zeer waarschijnlijk is, dat verpakt evenementenvuurwerk zich massa-explosief zal gedragen wanneer het wordt geraakt door een sterke schokgolf [1, 2, 5, 16, 17]. Dit is dus ook mogelijk bij verpakt evenementenvuurwerk dat zich bij een gewone brand in principe niet massa-explosief gedraagt.

Een sterke schokgolf is een relatief grote discontinuë sprong in thermodynamische grootheden, zoals druk en temperatuur, die zich sneller dan het geluid beweegt ten opzichte van het medium waarin de schokgolf zich voortplant. Bij een zwakke schokgolf is de sprong in thermodynamische grootheden relatief klein. Zwakke schokgolven bewegen zich bij benadering met de geluidssnelheid voort. Na verloop van tijd gaat een sterke schokgolf over in een zwakke schokgolf, om uiteindelijk te veranderen in een akoestische drukgolf. Relevant zijn [1, 2, 3, 21, 22].

Wanneer een sterke schokgolf zich beweegt door een explosief mengsel en de sprong in de temperatuur groot genoeg is om de chemische explosie-reactie te laten plaatsvinden, dan zal deze reactie in de meeste gevallen ook plaatsvinden en zich voortplanten met de snelheid van de schokgolf. De energie die bij de exotherme explosie-reactie vrijkomt kan de schokgolf versterken.

De relevante mogelijkheden voor het creëren van een sterke schokgolf in lucht bestaan in deze context uit zeer snel verlopende chemische reacties. Dat kan met behulp van:

1. Sommige pyrotechnische mengsels onder de juiste omstandigheden;
2. Springstof (is ontworpen om een sterke schokgolf te produceren).

Uit Amerikaans onderzoek in 1985 [13] is gebleken dat sommige soorten verpakt zwaar *evenementenvuurwerk*, in het bijzonder saluutknallen met flash powder (kalium perchloraat houdende mengsels met aluminium en/of titaan), onder bepaalde omstandigheden een explosie kunnen veroorzaken die snel genoeg is om een sterke schokgolf te produceren.

Hoewel bij poedervormige explosieve mengsels de snelheid van de explosie-reactie aanzienlijk lager ligt dan bij explosie-reacties in springstoffen, is het in uitzonderingsgevallen mogelijk om met sommige poedervormige explosieve mengsels een sterke schokgolf te produceren. Behalve een verschil in reactie-snelheid worden bij de explosie van pyrotechnische mengsels over het algemeen minder gasvormige producten geproduceerd dan bij springstoffen [5].

Hoewel voor het construeren van de causale keten de aanwezigheid van springstoffen niet noodzakelijk is, kan evenwel de aanwezigheid ervan ook niet worden uitgesloten op basis van dit onderzoek. Sporenonderzoek moet duidelijkheid verschaffen over de eventuele aanwezigheid van springstoffen.

In de oostzijde van het bunkercomplex is een snelle explosie waarschijnlijk de oorzaak geweest van het ontstaan van een sterke schokgolf die met grote snelheid de overige bunkercompartimenten en een aantal zeecontainers en MAVO-boxen heeft doen mee-exploderen.

Overigens is uit Amerikaans onderzoek in 1983 [13] gebleken dat *consumentenvuurwerk*<sup>6</sup> opgeslagen in zeecontainers geen massa-explosie kan inleiden.

#### **4.5: Berekeningen van de energie van de laatste en voorlaatste explosie**

Op basis van het opgewaardeerde videobeeldmateriaal van de schokgolf uit de film van Gerrit Poort en de luchtfoto's, is het gedrag van de schokgolf bij de laatste explosie gereconstrueerd en zijn hieraan berekeningen uitgevoerd. Hierover is apart gepubliceerd in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde [21].

Het blijkt dat de schokgolf zich ontwikkelt van een sterke naar een zwakke schokgolf. Uit de berekening met een ruw model [21] voor het gedrag van de schokgolf is een schatting verkregen voor de energie die nodig is geweest om de schokgolf te produceren. Deze energie bedraagt ongeveer 75 GJ.

##### **4.5.1: De energieverhouding tussen de explosies**

Door het KNMI zijn de beide explosies geregistreerd [20]. Het KNMI geeft voor de voorlaatste en laatste grondbewegingen een magnitude van respectievelijk  $M_l$  1.4 en 1.8. Bij seismische metingen zoals deze door het KNMI zijn gedaan [20], wordt de mate van grondbeweging geregistreerd (de  $M_l$ ). Deze grondbeweging wordt primair veroorzaakt door de zwaarste explosiekern. Dit is voor de laatste explosie het bunkercomplex (C11 en omstreken) en bij de voorlaatste explosie zijn het de MAVO-boxen 6-7.

Onder enkele additionele aannames kan op basis van de verhouding tussen de grondbewegingen bij de voorlaatste en laatste explosie een uitspraak gedaan worden over de verhouding tussen de kracht van de laatste en voorlaatste explosie. Op basis daarvan kan, opnieuw met een additionele aanname, vervolgens een uitspraak gedaan worden over de verhouding tussen de hoeveelheden materiaal (het kruitgewicht) van de beide explosies.

De redenering gaat als volgt: onder de aanname dat beide explosies vergelijkbaar zijn (vergelijkbaar materiaal, vergelijkbare snelheid, etc), is het redelijk om te veronderstellen dat de verhouding tussen het gedeelte van de vrijgekomen energie dat de grondbeweging veroorzaakt en het gedeelte dat de schokgolf veroorzaakt ongeveer vergelijkbaar is bij beide explosies. In dat geval is de verhouding tussen de grondbewegingen een maat voor de verhouding van de totale energie van de explosies.

Wanneer men eveneens aanneemt dat bij de laatste en voorlaatste explosies vergelijkbare explosieve materialen betrokken zijn, is de verhouding tussen de totale energie van de explosies een maat voor de verhouding tussen de betrokken hoeveelheden materiaal bij de voorlaatste en laatste explosie.

Op basis van de door het KNMI bepaalde magnitudes 1.4 en 1.8 kan de energieverhouding tussen de grondbewegingen bij de voorlaatste en laatste explosie worden uitgerekend via de formule [25]:

$$3 \times 10^{(1.8-1.4)} = 7.5$$

<sup>6</sup> Het gaat hier om consumentenvuurwerk dat in de VS legaal verkrijgbaar is. Het vuurwerk in deze testen was van Chinees en Amerikaans fabrikaat en viel in de destijds geldende klasse C.

Op basis van deze energieverhouding en bovengenoemde aannames is de schatting van de energie van de voorlaatste explosie 10 GJ (75 GJ / 7.5). Dit geeft, opnieuw binnen bovenvermelde aannames, een indicatie voor de verhouding tussen de hoeveelheden vuurwerk die bij de laatste en voorlaatste explosies betrokken zijn geweest. Het kruidgewicht van de laatste primaire massa-explosie (bunkercomplex) is in deze benadering dus ongeveer 7.5 keer meer dan het kruidgewicht van de voorlaatste primaire massa-explosie (MAVO-boxen 6-7).

#### 4.5.2: De omrekening van energie naar TNT-equivalentie

De totale hoeveelheid energie die wordt vrijgemaakt bij de explosie van TNT is afhankelijk van de toevoer van zuurstof (de reactieproducten na detonatie kunnen nog reageren met zuurstof uit de lucht). Deze twee verschillende chemische reacties leiden tot twee verschillende waarden voor de vrijgekomen energie.

Strikt genomen komt tijdens het detonatieproces van TNT 4.23 MJ / Kg vrij. Deze waarde, die de detonatiewarmte genoemd wordt, wordt in de internationale literatuur veelvuldig gebruikt als definitie van een energieschaal voor processen als (atoom)explosies, meteorietinslagen etc. Op deze waarde zijn ook de eenheden megaton en kiloton TNT gebaseerd. Deze waarde wordt eveneens gebruikt bij de onderlinge vergelijking van de effectiviteit van verschillende springstoffen en andere explosieve stoffen.

Wanneer men echter daadwerkelijk een hoeveelheid TNT zou laten exploderen (in lucht) is het onvermijdelijk dat de verbrandingsreactie optreedt. Hoewel de energie van deze verbrandingsreactie gedeeltelijk langzamer vrijkomt dan de detonatie-reactie, is op grote afstand geen onderscheid meer te maken tussen de relatieve bijdragen van de detonatie-warmte en de verbrandingswarmte van de restproducten. De totaal vrijgekomen energie (de **totale** verbrandingswarmte van TNT) bedraagt 15.02 MJ / Kg. Bij relatief lichte explosies is het in de literatuur soms gebruikelijk om het begrip TNT-equivalentie te baseren op de verbrandingswarmte in plaats van op de detonatiewarmte.

Dit geeft aanleiding voor het naast elkaar bestaan van twee verschillende begrippen TNT-equivalentie die beide onder dezelfde naam in de literatuur bekend zijn. Omdat dit aanleiding kan zijn voor verwarring worden hier beide TNT-equivalenties van de vuurwerkexplosies expliciet naast elkaar vermeld.

Grondslag voor TNT-equivalentie	Energiewaarde
Detonatiewarmte	4.23 MJ / Kg
Verbrandingswarmte	15.02 MJ / Kg

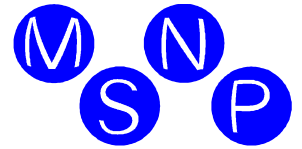
Energieschaal	Voorlaatste explosie	Laatste explosie
Joules	10 GJ	75 GJ
Massa TNT gebaseerd op detonatie	2.4 ton TNT	17.7 ton TNT
Massa TNT gebaseerd op detonatie en verbranding van restproducten	0.67 ton TNT	5.0 ton TNT

Hierbij moet worden opgemerkt, dat een analyse van de kracht van een explosie op basis van beeldmateriaal ongebruikelijk is. De conventionele aanpak is gebaseerd op het gebruik van piekdrukken. Voor zo'n aanpak is het glasschadebeeld de gebruikelijke insteek. [5, 16, 17].

#### 4.6: Interpretatie details van de laatste explosie

Deze explosie is een gecompliceerde sequentie van gebeurtenissen.

Zoals reeds uitgewerkt in paragraaf 4.5.1: De energieverhouding tussen de explosies, is de verhouding tussen de hoeveelheden materiaal een factor 7.5. Het is dus aannemelijk dat de voorlaatste explosie een aanzienlijk beperktere omvang had dan de laatste.



Op basis van lijnen, ingetekend in de luchtfoto tussen karakteristieke objecten en het camerastandpunt, zijn de locaties van de beide explosiekernen en de bron van de brokstukken vastgesteld. Dit geldt ook voor de video van Danny de Vries.

Het model van de schokgolf, zoals dat bleek te passen bij de laatste explosie [21], is gebruikt om een schatting te maken van de tijdsduur tussen het moment waarop de cameramensen op het dak van de Bamshoeve worden geraakt door de drukgolf en het moment waarop de schokgolf moet zijn ontstaan. In het model uit [21] is hiertoe de energiewaarde 10 GJ ingevuld. Op deze manier werd duidelijk dat de explosie in MAVO-boxen 6-7 zo'n 0.08 tot 0.10 seconden later ontstond dan de linker explosiekern bij zeecontainer E15-E16. Deze timing wordt bevestigd door het zichtbare verloop van de schokgolf in de videobeelden.

## 5: Conclusies en aanbevelingen

### 5.1: Hoofdonderzoeksvragen

Ten aanzien van de hoofdonderzoeksvragen is het volgende vastgesteld:

1. Er is een reconstructie gemaakt van de gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks dat consistent is met de gebruikte informatiebronnen. Deze reconstructie is in hoofdstuk 2 beschreven, de interpretatie in hoofdstuk 4.
2. Het is mogelijk om de inleiding van de massa-explosies te verklaren met pyrotechnische materialen. De aanwezigheid daarvan was redelijkerwijs te verwachten bij een vuurwerkopslag. Het is zeer waarschijnlijk dat evenementenvuurwerk, dat wordt blootgesteld aan de gevolgen van een snelle explosie die een sterke schokgolf creëert, zich massa-explosief kan gedragen.
3. De schade aan de woonwijk is redelijk consistent met de kracht van de explosies en met de omvang en intensiteit van de brand naderhand.
4. Verderop in de conclusies zal worden aangegeven welke omstandigheden ons inziens cruciaal zijn geweest voor het verloop van de gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks.

### 5.2: Additionele onderzoeksvragen

Ten aanzien van de additionele onderzoeksvragen is het volgende vastgesteld:

#### Fase 1: de initiële brand in het bunkercomplex

1. Er is geen verklaring gevonden voor de initiële brand in de ompakruimte (compartiment C2).
2. In de ompakruimte was vuurwerk opgeslagen.
3. In de ompakruimte (compartiment C2) heeft gedurende langere tijd een brand gewoed. De aanwezigheid van vuurwerk in deze ruimte kan een zeer felle brand tot gevolg hebben gehad. De kracht van de kleine explosies in deze ruimte heeft mogelijk tot structurele schade aan het gebouw geleid. De branddoorslag tussen compartiment C2 en C4 is mogelijk versneld door de aanwezigheid van leidingdoorvoeren (zie [14, bijlage]). De combinatie van deze factoren vormt een aannemelijke verklaring voor de doorslag van de brand van compartiment C2 naar C4. Waarschijnlijk heeft de verdeling van het vuurwerk in de ompakruimte en het nathouden van de inhoud van compartiment C3 branddoorslag naar dit compartiment voorkomen.

#### Fase 2: de brand en explosies in zeecontainer E2

1. Het is aannemelijk dat door uitgeworpen vuurwerk uit compartiment C4 brand is ontstaan tussen de zeecontainers E2 en E15. Waarschijnlijk heeft branddoorslag plaats kunnen vinden naar de inhoud van zeecontainer E2, voordat deze brand kon worden geblust.
2. De rechter zeecontainerdeur draait open t.g.v. een explosie in zeecontainer E2. Een normaal gesloten zeecontainerdeur is een van de sterkste punten van een zeecontainer. Op de laatste versie van het beeldmateriaal zijn sluitstangen zichtbaar op zeecontainer E2. Ook is zichtbaar dat door de explosie in E2, waarbij de tak omhoog komt, schade ontstaat aan het sluitmechanisme van de container en dat de zeecontainer aan de linker voorzijde ontzet raakt. Het is derhalve waarschijnlijk dat ook de sluitstangen van de rechter zeecontainer deur zijn beschadigd en hun functie hebben verloren.
3. De richting van de rook uit zeecontainer E2 is te verklaren door aan te nemen dat de rook wordt veroorzaakt door een brand dieper / achter in de zeecontainer.

#### Fase 3: de voorlaatste zware explosie

1. Behalve E2 is ook E15 opgewarmd door de brand tussen deze zeecontainers. Hierdoor explodeert deze zeecontainer;
2. De linker explosiekern initieert de rechter explosiekern;
3. Bij een voldoende snelle explosie, die een sterke schokgolf produceert, bestaat het risico van massa-explosie van verpakt evenementenvuurwerk.

#### **Fase 4: de laatste zware explosie**

1. De explosies kunnen in tijd vrijwel samenvallen als het overdrachtsmechanisme een sterke schokgolf is, die zich met een snelheid veel hoger dan de geluidssnelheid in lucht voortplant.

#### **5.3: Aanvullende onderzoeksvragen**

1. Waarschijnlijk is door de eerste explosie in E2 (het takje) het sluitmechanisme van de zeecontainer ernstig beschadigd. De inhoud van zeecontainer E2 kwam niet overeen met de aanduiding 1.4 zoals op de container was aangegeven;
2. Zie de nadere invulling in paragraaf 4.1: Interpretatie van de gebeurtenissen aan de hand van de analyse;
3. Zie paragraaf 4.2: Causale keten van de gebeurtenissen aan de hand van dit onderzoek
4. De energie van de voorlaatste explosie is bij benadering 10 GJ (zie paragraaf 4.5.1: De energieverhouding tussen de explosies).

#### **5.4: Welke omstandigheden zijn cruciaal geweest voor het verloop van de gebeurtenissen binnen de inrichting van SE Fireworks?**

1. De opslag van vuurwerk in de ompakruimte;
2. De afwezigheid van branddetectie met automatische doormelding naar de brandweer;
3. De afwezigheid van een automatische sprinklerinstallatie;
4. Het onjuist informeren van de brandweer in fase 1 van de gebeurtenissen;
5. De aanwezigheid van gevarenstickers 1.4 die een onjuiste indicatie gaven van het aanwezige risico aan de brandweer;
6. Het niet tijdig blussen van de brand tussen E2 en E15;
7. De opslag van vuurwerkdozen tegen de wanden van de constructies binnen de inrichting van SE Fireworks;
8. De aanwezigheid van en mogelijk onjuiste opslag van pyrotechnische mengsels en/of springstoffen die een massa-explosie kunnen inleiden;
9. De aanwezigheid van grote hoeveelheden zwaar evenementenvuurwerk die door een massa-explosie tot ontbranding kunnen worden gebracht.

#### **5.5: Regelgeving en toezicht**

Het is van belang bij de beoordeling van het risico van vuurwerk niet alleen af te gaan op de standaard indeling van vuurwerk (de classificatie), maar nadrukkelijk aandacht te besteden aan de invloed van de chemische samenstelling van de pyrotechnische mengsels op de mogelijkheid van massa-explosie en op de mogelijkheid om een massa-explosie in te leiden.

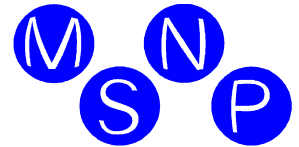
De operationele c.q. populaire tekstversie van de VN-richtlijnen t.a.v. de standaard indeling van vuurwerk (de classificatie) wijken onderling en ten opzichte van de oorspronkelijke richtlijnen regelmatig af, met name op de indelingsaspecten t.a.v. massa-explosie. Dit werkt een onjuiste classificatie in de hand en draagt bij aan een onjuiste risico-inschatting.

Verder is van belang dat wanneer er sprake is van samenladingen van materiaal van een lagere classificatie dan 1.1 met materiaal dat wel van de classificatie 1.1 is, de gehele lading kan reageren als zijnde van classificatie 1.1. Een juiste wijze van compartimentering van de opslag is in zo'n geval gewenst. De compartimentering dient er dan op ontworpen te zijn om een sterke schokgolf zoals die bij de explosie van materiaal van classificatie 1.1 kan ontstaan te dempen voordat deze het materiaal in andere compartimenten kan ontsteken.

#### **5.6: Bestuurlijke en juridische aspecten**

Bij de beoordeling van de bestuurlijke verantwoordelijkheid en strafrechtelijke aspecten dient onderscheid te worden gemaakt tussen de gebeurtenissen tot en met de brand in zeecontainer E2 enerzijds en de explosies en brandontwikkeling die hier het gevolg van waren anderzijds.





## 6: Referenties

- [1] Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, vol I & II, Academic Press, London, 1966.
- [2] E.M. Lifshitz, L.P. Pitaevskii, *Fluid Mechanics*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1987.
- [3] R.J. LeVeque, *Numerical Methods for Conservation Laws*, 2nd ed., Birkhauser Verlag, Basel, 1992.
- [4] J.A. Conkling, *Pyrotechnics*, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, vol. 20, 4th ed., p. 680-697.
- [5] V. Lindner, , *Explosives and Propellants*, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th ed., vol. 10, p. 1-125.
- [6] Y. Horie, A.B. Sawaoka, *Shock Waves*, in Encyclopedia of Applied Physics, Vol. 18, VHC Publishers Inc., 1997.
- [7] W.J. Nellis, *Dynamic High-Pressure Effects in Solids*, in Encyclopedia of Applied Physics, vol. 18, VHC Publishers Inc., 1997.
- [8] D. Lohse, *Fysica van vloeistoffen, een probleem van de 19<sup>e</sup> eeuw als uitdaging voor de 21<sup>e</sup> eeuw*, Oratie d.d. 7 oktober 1999, Universiteit Twente.
- [9] U.S. Navy, *Handbook on Explosives*, 1970.
- [10] G. Kyte, *Oklahoma Fireworks Plant Explosion kills 21, Injures 5*, Fire Journal, July 1986, p. 49.
- [11] *US Experience with Fireworks Accidents*, Fire Journal, September 1986, p. 58.
- [12] J.A. Conkling, J.C. Robertson, *The Federal Class C Fireworks Regulations*, Fire Journal, September 1986, p. 52.
- [13] *Fireworks Manufacturing*, Fire Journal, September 1986, p. 41.
- [14] *Feitenoverzicht rond de vergunningverlening aan S.E. Fireworks*. COT Universiteit Leiden, 21 september 2000.
- [15] Ph. van Dongen, *Veiligheidsadvies met betrekking tot het bedrijf Haarman Vuurwerk te Enschede*, TNO-PML, 30 augustus 2000.
- [16] W.P.M. Mercx, *TNO Defensieonderzoek naar de explosie van de vuurwerkfabriek 'MS Vuurwerk' te Culemborg*. April 1991.
- [17] H.H. Kodde, *Explosie-effecten van enkele soorten groot vuurwerk ontstoken door een externe brand*, TNO Defensieonderzoek, februari 1992.
- [18] Ministerie van BZK, *Reconstructie van de gebeurtenissen van de vuurwerkkramp: Deelreconstructie clusters 1-14*, 10 november 2000.
- [19] P.C.A.M. de Bruyn, *Voorlopig deskundigenrapport*, Ministerie van Justitie: Nederlands Forensisch Instituut, 14 juni 2000.
- [20] L.G. Evers, H.W. Haak, *Seismo-akoestische analyse van de explosies bij S.E. Fireworks Enschede, 13 mei 2000*, KNMI sectie Seismologie, september 2000.  
[http://www.knmi.nl/onderzk/seismo/home\\_n/education/nederland/enschede/rapport.pdf](http://www.knmi.nl/onderzk/seismo/home_n/education/nederland/enschede/rapport.pdf)
- [21] D.J. Boers, *Enschedese schokgolf: analyse per video*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde maart 2001 pag: 74-77.
- [22] L.I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, 4th ed., Academic Press, 1959.
- [23] M.P. Brenner & H.A. Stone, *Modern Classical Physics Through the Work of G.I. Taylor*, Phys. Today, 53 (5) 30-35, mei 2000.
- [24] De rapportages van de rijksinspecties inzake het onderzoek naar de vuurwerkkramp in Enschede, 15 januari 2001.
- [25] o.a. <http://www.knmi.nl/onderzk/seismo/>, <http://www.gns.cri.nz/earthact/earthquakes/faq.html>, <http://geology.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-98-0767>

**Bijlage: Kaart omgeving SE Fireworks van de Inspectie Brandweertzorg en Rampenbestrijding, aug. 2000**

**S. E. Fireworks, Tollensstraat te Enschede  
Inzet brandweer op 13 mei 2000  
tussen 15.10 en 15.36 uur**

