

Enschedese schokgolf: analyse per video

Op 13 mei 2000 deden zich in Enschede een hevige brand en enkele zware explosies voor die een hele wijk verwoestten en sindsdien onder de naam vuurwerkramp bekend staan. Deze explosies, die zich op het terrein van een vuurwerkopslagplaats voordeden, zijn vastgelegd door (digitale) videocamera's. Door deze unieke videobeelden te gebruiken als meetinstrument is het gedrag van de schokgolf van de laatste explosie nauwkeurig in kaart te brengen. Met behulp van een dimensie-analyse en enkele eenvoudige resultaten uit de hydrodynamica is een ruw model te maken van de laatste explosie van de vuurwerkramp in Enschede. Dit model past binnen de nauwkeurigheidsgrenzen goed bij de videoaarnemingen. Op basis van dit model wordt duidelijk dat de totale energie die bij de explosie vrijkomt ongeveer 75 GJ bedraagt. *Dave Boers*

EXPLOSIES EN SCHOKGOLVEN

Een schokgolf is een oppervlak van discontinuïteit in een medium. Op dit oppervlak maken thermodynamische grootheden zoals temperatuur, dichtheid, druk en entropie een sprong. Met behulp van energiebehoud, impulsbehoud en massabehoud op het oppervlak is het mogelijk om schokgolven algemeen te karakteriseren [2], [3].

Voor sterke schokgolven (waarbij de sprong in thermodynamische grootheden relatief groot is) geldt dat ze aanzienlijk sneller dan de geluidssnelheid in het medium waarin ze zich voortplanten kunnen lopen. Zwakke schokgolven daarentegen verplaatsen zich in eerst-ordebenadering met de geluidssnelheid (in feite net iets sneller).

Schokgolven kunnen op diverse manieren ontstaan. Sterke schokgolven kunnen bijvoorbeeld ontstaan door zuigers die sneller dan het geluid bewegen of door sterke explosies (waar-

bij de energie veel sneller vrijkomt dan de relaxatietijd van het gas). Zwakke schokgolven kunnen ontstaan uit sterke schokgolven, maar kunnen ook uit drukgolven (geluid) ontstaan als gevolg van de niet-lineaire processen in een medium.

Zonder naar de details van het proces te kijken kunnen we een sterke explosie opvatten als een grote hoeveelheid energie die in een klein volume vrijkomt in zeer korte tijd. In het geval waarin de energie bij benadering vrijkwam in een punt zal een sterke bolvormige schokgolf ontstaan waarvan de discontinuïteit in druk zo groot is, dat de invloed van de omgevingsdruk verwaarloosd kan worden.

In dat geval zit er geen karakteristieke tijdschaal of ruimteschaal meer in het (bolsymmetrische) probleem en zijn de enige variabelen die overblijven om de beweging van het schokfront $R(t)$ te bepalen de dichtheid ρ_0 van het onverstoorde medium en de energie E die vrijkwam. Met deze variabelen (ρ_0 ,

E , R en t) kan door enkel een dimensie-analyse uniek het volgende verband worden bepaald:

$$R(t) \propto \left(\frac{Et^2}{\rho_0} \right)^{1/5}. \quad (1)$$

In de benadering van een polytroop gas (waarin de warmtecapaciteit onafhankelijk van de temperatuur mag worden verondersteld) kan men in lucht de dimensieloze schaafactor berekenen met als resultaat 1,033 (zie bijvoorbeeld [2], § 106). Deze oplossing werd onafhankelijk gevonden door G.I. Taylor (1941), L.I. Sedov (1946) en door J. von Neumann (1947).

Taylor heeft in het begin van de jaren '50 dit model getest door het uitrekenen van de energie die vrijkwam bij de eerste atoomexplosie in New Mexico in 1945. Foto's, genomen door J.E. Mack en vrijgegeven door de Amerikaanse overheid, boden hem de mogelijkheid om de radius van de schokgolf op verschillende (equidistante) tijdstippen

Vuurwerkkramp Enschede – 13 mei 2000 – laatste explosie 15:35:46



Beelden: G. Poort

Beeldbewerkingen en compilatie door D. J. Boers, MSNP

Figuur 1 Frames uit de videobeelden van de laatste explosie. De beelden rechts van boven naar beneden geven de sequentie weer. De uitvergroting is van een moment vlak voor het onderste beeld rechtsonder. Op de daken op de voorgrond is door opwolkende stofdeeltjes de turbulentie te zien die het gevolg is van het passeren van de schokgolf.

nauwkeurig te bepalen. De energie die bij de explosie vrijkwam bleek 71,9 TJ te bedragen [4].

Van de gebeurtenissen rond deze analyse zijn diverse gemythologiseerde versies in omloop [1]. De energie van de explosie zou geheim zijn gehouden door de Amerikaanse overheid en Taylor zou hen in verlegenheid hebben gebracht door het uitrekenen van de energie aan de hand van vrijgegeven fotomateriaal. In werkelijkheid kreeg Taylor in 1940 de opdracht van de Engelse overheid om het mechanische effect van een sterke explosie te beschrijven. Na de oorlog verifieerde hij zijn model met de foto's van de nucleaire explosie in New Mexico en het model bleek zeer goed te voldoen.

Het gedrag volgens (1) geldt alleen in het geval de tegendruk van de omgeving verwaarloosd mag worden, met andere woorden, alleen wanneer de schokgolf voldoende sterk is, zoals dat bij een sterke explosie het geval is. Na verloop van tijd neemt de overdruk

af door de expansie, wordt de schokgolf zwakker en gaat de omgevingsdruk een grotere rol spelen. De zwakke schokgolf zal dan met ongeveer de geluidssnelheid blijven bewegen om uiteindelijk over te gaan in een gewone drukgolf. Bij een relatief zwakke explosie (zoals de vuurwerkexplosie in Enschede blijkt te zijn) is dit laatste gedrag veel nadrukkelijker van belang. Een ruw, semi-fenomenologisch model hiervoor is het volgende:

$$R(t) = \begin{cases} 1,033 (Et^2/\rho_0)^{1/5} & t \leq t_1 \\ ct & t > t_1 \end{cases} \quad (2)$$

waarbij c de geluidssnelheid is en t_1 het tijdstip waarop de snelheid van de schokgolf $\dot{R}(t)$ volgens (1) gelijk wordt aan de geluidssnelheid.

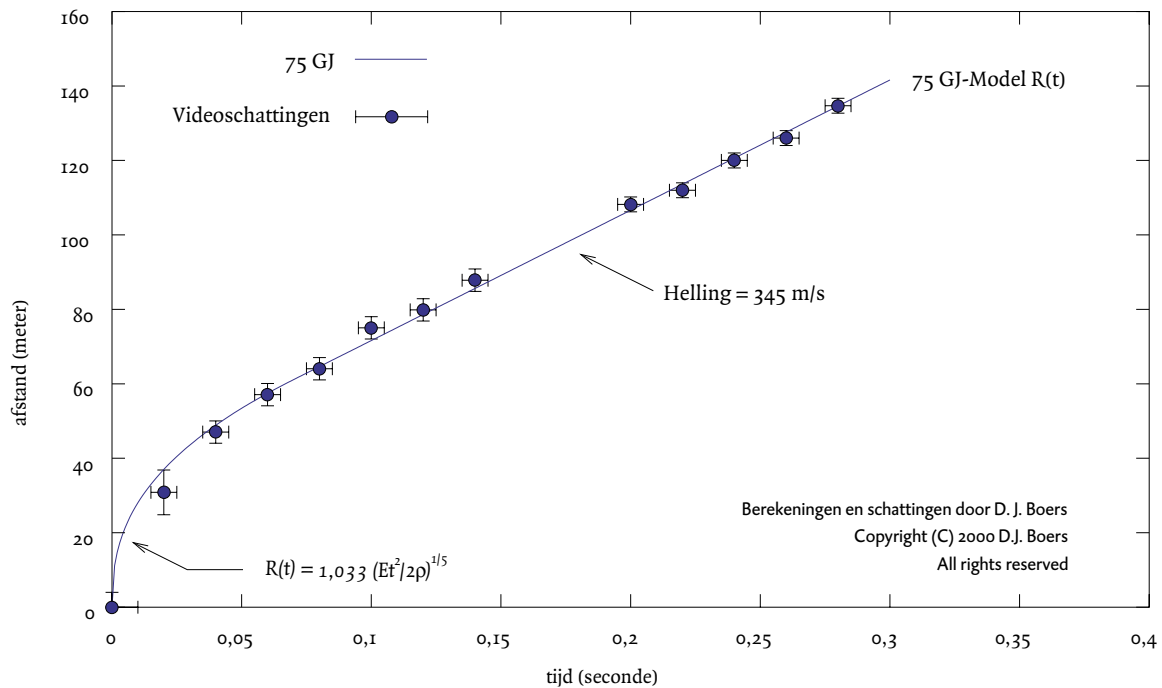
Strikt genomen is het model (1) niet geldig in het domein rond $t = t_1$; het overgangsdomein tussen sterk en zwak. Toch zal het werkelijke gedrag niet veel verschillen van (2) omdat het

gedrag voor $t \ll t_1$ en voor $t \gg t_1$ vast ligt. De overgang van sterk naar zwak zal geleidelijker gaan en uitdrukking (2) is dus een bovenafschatting. In het geval van een explosie op de grond is de bolsymmetrie verbroken. De grond zal een groot deel van de schokgolf reflecteren omdat de dichtheid van de grond veel groter is dan die van lucht (in de limiet van oneindige dichtheid is de reflectie perfect). Als we de energie die de grond in verdwijnt (en een oppervlaktégolf veroorzaakt) verwaarlozen in vergelijking met de totale energie van de explosie dan geldt voor een grond-explosie ook vergelijking (2), echter met $E^* = E/2$, met andere woorden, de halve energie is voldoende om dezelfde schokgolf te produceren.

METEN MET EEN VIDEOCAMERA

De vuurwerkexplosie heeft natuurlijk niet onder gecontroleerde experimentele omstandigheden plaatsgevonden. Dat betekent dat we het moeten doen

Vuurwerk explosie: voortplanting van schokgolf



Figuur 2 Meetpunten en model van de positie van het schokgolffront bij de laatste vuurwerk-explosie in Enschede op 13 mei 2000 om 15:35:46. De foutgebiedjes geven de ordegrrootte van de meetonnauwkeurigheid aan.

met de videobeelden die geregistreerd zijn door de camera van dhr. G. Poort (de brandweerman die de explosies filmde en die zo vriendelijk was zijn beelden ter beschikking te stellen). Deze beelden leveren met wat handigheid nog aardig veel informatie op. De beelden van de laatste explosie zijn opgenomen door een draagbare videocamera die per seconde 50 maal zijn *ccd*-chip uitleest. Bij een normaal videosignaal worden hiervan slechts 25 beeldjes per seconde afgebeeld die worden opgebouwd door steeds twee opeenvolgende beeldjes te combineren. Met gespecialiseerde apparatuur kunnen alle beeldjes van de digitale band worden uitgelezen en is de tijdsmonstering dus 50 maal per seconde. De band is digitaal uitgelezen op maximale beeldresolutie. Hierbij is het digitale formaat zodanig dat elk beeldje afzonderlijk wordt opgeslagen in plaats van het bij sommige beeldformaten gebruikelijke opslaan van alleen de verschillen tussen de opeenvolgende beeldjes. In dit geval is ieder beeldje dus onafhankelijk van het vorige en daarom is, zelfs wanneer lossy (op afgekapte *wavelet*-transforms gebaseerde)

compressie wordt gebruikt voor de opslag, elk beeldje een onafhankelijke meting.

Op elk van de beelden waarop de schokgolf te zien is, is zo goed mogelijk vastgesteld waar het front zich op dat moment bevond. Doordat de lucht achter de schokgolf aanzienlijk heter is dan ervoor is aan de optische vervorming duidelijk te zien waar het schokfront is. Verder is opwolkend stof van de daken van gebouwen een goede indicator. Op elk van de beelden is een duidelijk kenmerkend object gezocht als indicatie voor de plek van het schokgolffront (bomen, lantaarns, ruiten, etc). Dit object is op zijn beurt opgezocht op een nauwkeurige luchtfoto van de omgeving die op 13 mei omstreeks 12:00 uur gemaakt is in opdracht van de Topografische Dienst in Emmen. Met behulp van deze luchtfoto is de afstand bepaald tussen het object en de plek waar achteraf het centrum van de grootste krater werd vastgesteld (aan de oostzijde van het centrale bunkercomplex).

Op deze wijze is een reeks meetpunten bepaald die de verplaatsing van de schokgolf in kaart brengt. De aldus be-

paalde onafhankelijke meetpunten zijn weergegeven als paarse stippen in figuur 2. Elk meetpunt correspondeert met een afzonderlijke *videoframe*, een beeldje uit de video-opname. Op $t = 0,16$ s ontbreekt een meting omdat op dat moment geen karakteristiek object te vinden is om de plek van het schokfront nauwkeurig te bepalen. Aan de hand van het patroon van de meetpunten wordt al snel een heleboel duidelijk.

DE EXPLOSIE INTERPRETEREN

Een van de eerste dingen die opvalt is het lineaire verband in de meetpunten vanaf $t = 0,06$ s. De helling is 345 m/s, dus net iets boven de geluidssnelheid (de schokgolf bewoog namelijk tegen de wind in). Uit deze helling blijkt dat de tijdschaal klopt en dat er geen videoframes ontbreken (een bekend probleem bij het uitlezen van videobeelden).

Wat verder opvalt is dat hoewel de metingen onnauwkeurig worden in de buurt van $t = 0$ de snelheid van de schokgolf aanzienlijk groter dan 345 m/s moet zijn geweest, wat duidt op de aanwezigheid van een sterke

schokgolf op (en buiten) het terrein van SE Fireworks. De sterke-explosie-theorie geldt tot ongeveer 0,06 s, wat overeenkomt met een afstand van ongeveer 55 meter, de zwakke-explosie-theorie daarna.

Deze overwegingen waren de aanleiding tot het vormen van het simpele model (2) om de metingen te begrijpen en een uitspraak te doen over de orde-grootte van de energie die bij de explosie vrij kwam.

Door de meetpunten in figuur 2 is een curve getekend die overeenkomt met het model van vergelijking (2) voor een energiewaarde $E^* = 75$ GJ, voortgezet met voor de rechte een snelheid van 345 m/s. Dit is het model dat het best bij de meetpunten past.

De meetpunten voor grotere tijden zijn nauwkeuriger dan die voor korte tijden

omdat (a) het schokfront dichtter bij de camerapositie was en (b) de afmetingen van de bunker relatief steeds kleiner worden in vergelijking met de afstand. Helaas is alleen met de eerste meetpunten (het sterke schokgolfgebied) eenvoudig een schatting te maken van de energie volgens (1). Door het gebruik van (2) worden de nauwkeurige metingen indirect bij de berekening betrokken doordat de rechte een dubbele randvoorwaarde vormt (afgeleide en positie) voor de familie van functies (1) die de sterke schokgolf beschrijven.

Bij de laatste explosie kwam dus grofweg 75 GJ energie vrij. Uit figuur 2 blijkt dat zelfs het simpele model (2) kwalitatief en kwantitatief vrij goed overeenkomt met de waarnemingen.

REFERENTIES

- 1 M. P. Brenner & H. A. Stone, Modern Classical Physics Through the Work of G. I. Taylor, *Phys. Today* **53** (5) 30-35, mei 2000.
- 2 L. D. Landau & E.M. Lifshitz (Lifshitz & Pitaevskii), *Fluid Mechanics*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1987.
- 3 Ya. B. Zel'dovich & Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, vol. I & II, Academic Press, London, 1966.
- 4 L.I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, 4th ed., Academic Press, 1959.
- 5 D. Lohse, *Fysica van vloeistoffen, een probleem van de 21e eeuw*, Oratie d.d. 7 oktober 1999, Universiteit Twente.
- 6 B.H. van den Heuvel & D.J. Boers, *Voorlopige analyse van de vuurwerkramp in Enschede*.

Dave Boers is medewerker onderzoek bij adviesbureau MSNP en bijna afgestudeerd aan de Universiteit Twente bij de faculteit Technische Natuurkunde in de vakgroep Computational Optics. Het onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van het vuurwerkramp-onderzoek van MSNP. De gesprekken met prof. dr. D. Lohse (UT) zijn bijzonder inspirerend en waardevol geweest