

Seismo-akoestische analyse van de explosies bij

S.E. Fireworks Enschede, 13 mei 2000

L.G. Evers en H.W. Haak

KNMI Technisch Rapport (TR) - 227

ISBN: 90-369-2179-1

September 2000



Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Sectie Seismologie

Contents

1	Samenvatting	3
2	Introductie	4
3	Registraties en lokalisatie	5
3.1	Registraties door de seismometers	5
3.2	Registraties door het akoestische array	7
4	Data-analyse	10
4.1	Looptijdcurven	10
4.2	Het anomale karakter van DIA	10
4.3	De seismische energie op WTSP	11
4.4	De explosie-tijden	11
5	Conclusies	12
6	Referenties	13

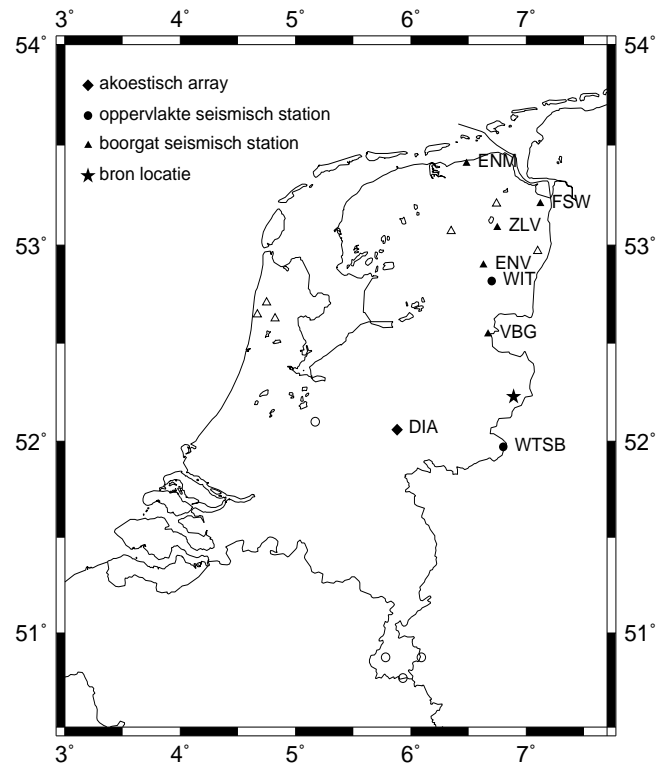
1 Samenvatting

De explosies bij S.E. Fireworks te Enschede op 13 mei 2000 zijn geregistreerd door instrumenten van de afdeling Seismologie van het KNMI. Dergelijke grote explosies sturen zowel energie de atmosfeer als de bodem in. Seismometers en akoestische sensoren hebben deze energie gedetecteerd. Met behulp van de aankomsttijden van de energie in de verschillende stations zijn de exacte explosie-tijden berekend. Hierbij moet een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende paden waarlangs drukgolven gereisd hebben. De eerste explosie blijkt plaats gevonden te hebben om 13u34m40.0 \pm 0.9 s en de tweede zwaardere explosie om 13u35m46.0 \pm 1.8 s GMT.

Dit rapport beschrijft deze bevindingen in detail en gaat in op de analyse van de geregistreerde signalen waarmee tot bovengenoemde explosie-tijden gekomen is.

2 Introductie

De afdeling Seismologie van het KNMI beschikt over een netwerk van seismometers verspreid over Nederland. Seismometers zijn onder andere gevoelig voor groundbewegingen ten gevolge van aardbevingen. Naast aardbevingen kan de grond ook door akoestische bronnen in de atmosfeer in beweging gebracht worden. Om akoestische bronnen te kunnen onderscheiden van seismische bronnen zijn akoestische sensoren in gebruik. In figuur 2.1 staan de instrumenten weergegeven die de explosies op 13 mei 2000 van S.E. Fireworks te Enschede geregistreerd hebben.



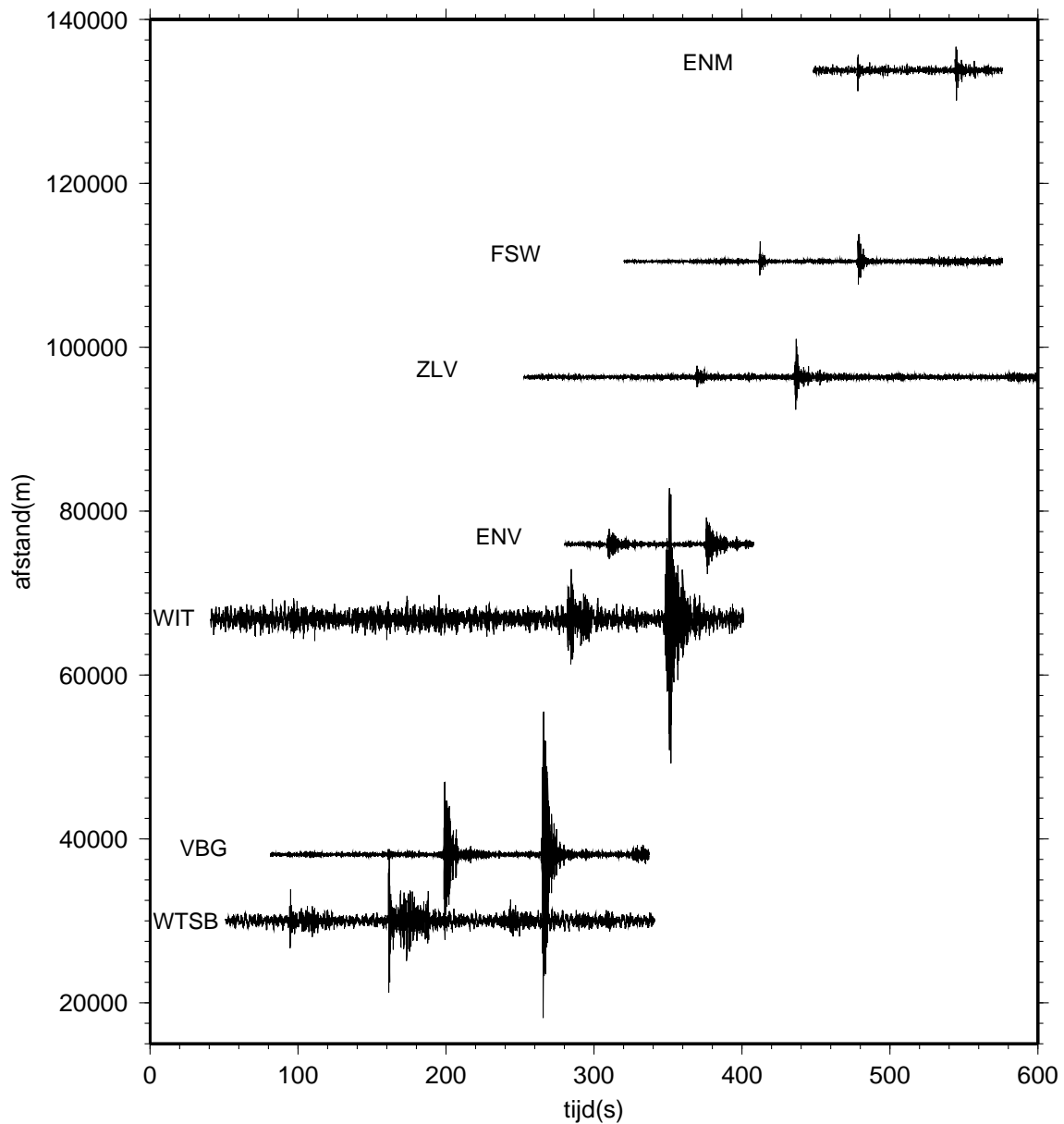
Figuur 2.1: *Locaties van seismische stations en akoestisch array die de explosies gedetecteerd hebben (zwarte symbolen). De open symbolen geven de stations weer die geen of slechte registraties van de explosies hebben.*

Zes seismometers ten noorden en één seismometer ten zuiden van de bron hebben energie van de explosies gedetecteerd. Daarnaast is energie naar het westen gereisd en waargenomen op een serie microbarografen in Deelen (DIA). Door de enorme kracht van de explosies is zowel akoestische als seismische energie gegenereerd. Hoewel de microbarografen akoestische energie geregistreerd hebben, kunnen de seismometers beide soorten energie opgenomen hebben. Zeker instrumenten nabij de bron zullen gevoelig blijken voor de groundbewegingen opgewekt door de explosies.

3 Registraties en lokalisatie

3.1 Registraties door de seismometers

In figuur 3.1 staan de registraties van de explosies op de seismische instrumentatie weergegeven. De tijd-as begint om 13u33m14.0s en loopt tot 13u43m14.0s GMT. De registraties zijn georderend op afstand; de aankomsttijd van de energie van de explosies neemt met de afstand toe.

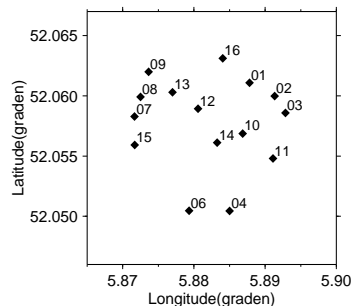


Figuur 3.1: De registraties van de explosies op seismische instrumentatie. De tijd-as loopt van 13u33m14.0s tot 13u43m14.0s GMT.

Alle stations hebben twee explosies geregistreerd. De grotere amplitude van de tweede explosie geeft aan dat deze de zwaarste was (ongeveer 2 maal zwaarder dan de eerste explosie). In alle stations is de tweede explosie 66 s na de eerste waargenomen. In de boorgatstations (VBG, ENV, ZLV, FSW en ENM) zien we een afname van de amplitude met de afstand. Zowel geometrische spreiding als demping van de energie liggen aan deze afname ten grondslag. Station WTSB heeft de energie anomaal vroeg geregistreerd (zie paragraaf 4.3).

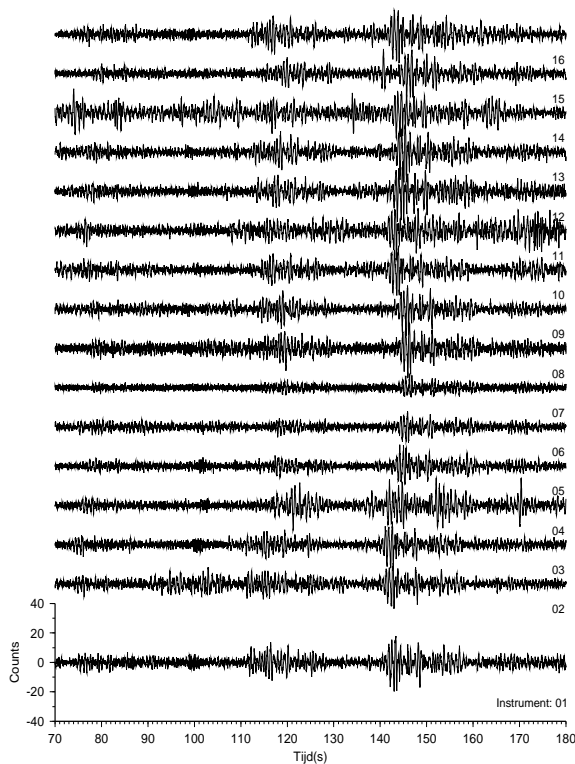
3.2 Registraties door het akoestische array

Het akoestisch array, het Deelen Infrasound Array (DIA), bestaat uit 16 microbarografen. Een array is een serie van instrumenten in een dusdanige configuratie dat de bron van het geluid gelokaliseerd kan worden. In figuur 3.2 is de configuratie van microbarografen weergegeven.



Figuur 3.2: *De configuratie van DIA*

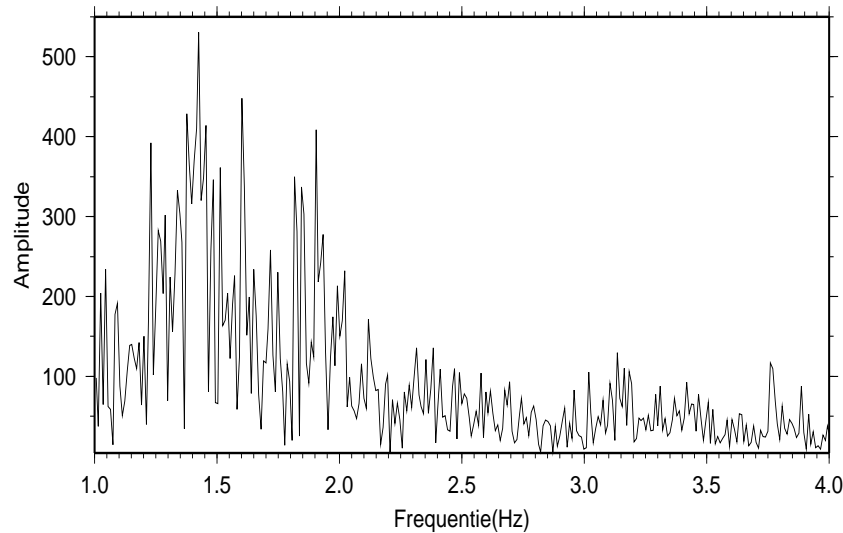
De microbarografen zijn gevoelig voor laag-frequente luchtdrukvariaties tussen 0.002 en 20 Hz. Dit frequentie interval bevat geluid wat voor de mens niet waarneembaar is en wordt daarom infrageluid genoemd. Bronnen van infrageluid zijn onder andere (kern)explosies. Figuur 3.3 toont de registraties van de atmosferische drukvariaties ten gevolge van de explosies.



Figuur 3.3: *Infrageluid registraties door de 16 microbarografen van DIA. De tijd-as loopt van 13u38m32s tot 13u40m22s GMT.*

De tijd-as representeert 110 seconden data geregistreerd tussen 13u38m32s en 13u40m22s GMT. Gelijkvormige of coherente golven zijn zichtbaar tussen 70 en 80, 110 en 120 en tussen 140 en 150 seconden. Uit de hoge amplitude van de signalen tussen 140 en 150 s, komt duidelijk naar voren dat de laatste explosie de zwaarste was. De totale diameter van het array is 1.5 km hierdoor heeft infrageluid 4.5 s nodig om over het array te reizen. Vergelijking van de aankomsttijden van de coherente energie per microbarograaf laat deze looptijdverschillen zien.

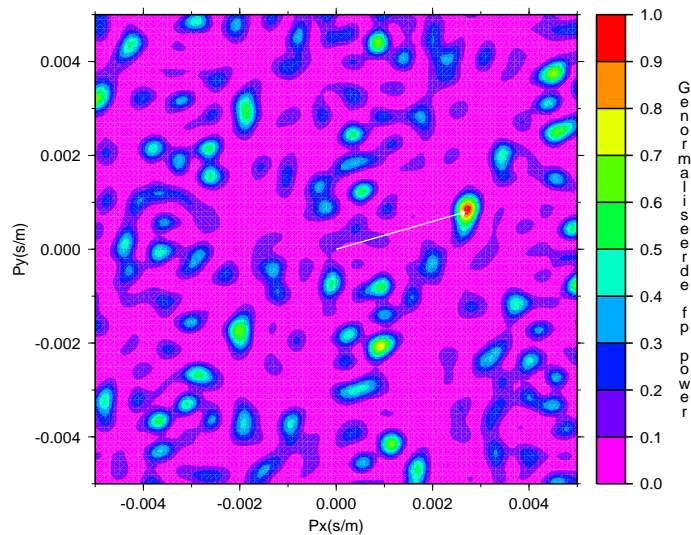
In figuur 3.4 wordt de gemiddelde frequentie-inhoud van de infrageluidgolf ten gevolge van de explosie weergegeven. De totale bandbreedte van het gegeneerde infrageluid ligt tussen de 1.0 en 2.0 Hz. Het spectrum heeft een maximum amplitude rond de 1.4 Hz. Deze spectrale piek zal gebruikt worden om karakteristieken van de bron te achterhalen.



Figuur 3.4: *Gemiddelde frequentie inhoud van het infrageluid.*

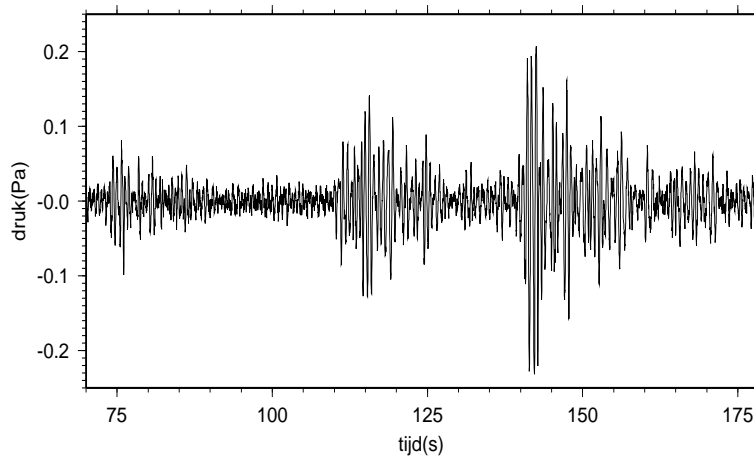
Infrageluid geregistreerd door DIA wordt gelokaliseerd op basis van de "frequentie-slowness" analyse (fp analyse). Een gedetailleerde beschrijving van de fp analyse wordt gegeven in [Haak and Evers, 2000]. De reistijdverschillen van de coherente golven, zoals zichtbaar in figuur 3.3, worden in het frequentiedomein als faseverschillen gebruikt. Zodoende kan de richting (azimut) waarvan het infrageluid komt bepaald worden. Tevens kan de schijnbare geluidssnelheid, dit is de projectie van de geluidssnelheid op het horizontale vlak, berekend worden. De slowness vector wordt gekarakteriseerd door zowel dit azimut als de schijnbare snelheid. In figuur 3.5 staat het resultaat van de frequentie-slowness analyse voor de spectrale piek van 1.4 Hz. De witte slowness-vector wijst naar het maximum van het zogenaamde power-spectrum. De lengte van de vector lost een schijnbare snelheid van 355 m/s op. Het geluid komt uit een richting van 73.5 graden ten opzichte van het array. Dit is de hoek die de slowness-vector met de vertikaal maakt en ook het azimut van DIA naar Enschede.

De amplitudes van de signalen zijn evenredig met de opgetreden drukvariaties. Nu zowel de richting als de schijnbare snelheid berekend zijn kan een beste oplossing voor de vorm van de infrasonische golf bepaald worden. Deze oplossing representeert de golf die over het array gereisd heeft zo goed als de resolutie van het array toelaat.



Figuur 3.5: Lokalisatie volgens de frequentie-slowness analyse [Haak and Evers, 2000]

In figuur 3.6 staat de beste oplossing voor de gegenereerde drukgolf weergegeven. De amplitude is vertaald in termen van druk met als eenheid Pascal (Pa). De drukvariaties zijn laag, de laatste (zwaarste) explosie rond 140 s heeft nog slechts een maximale druk van 0.2 Pa ter plaatse van DIA. Voortplanting van infrageluid door de atmosfeer is afhankelijk van de wind- en temperatuuropbouw. Een logaritmische toename van de windsnelheid met de hoogte kan leiden tot het terugbuigen van geluid naar het aardoppervlak. De heersende wind voldeed hier niet aan en verklaart de lage drukvariaties gemeten in DIA.

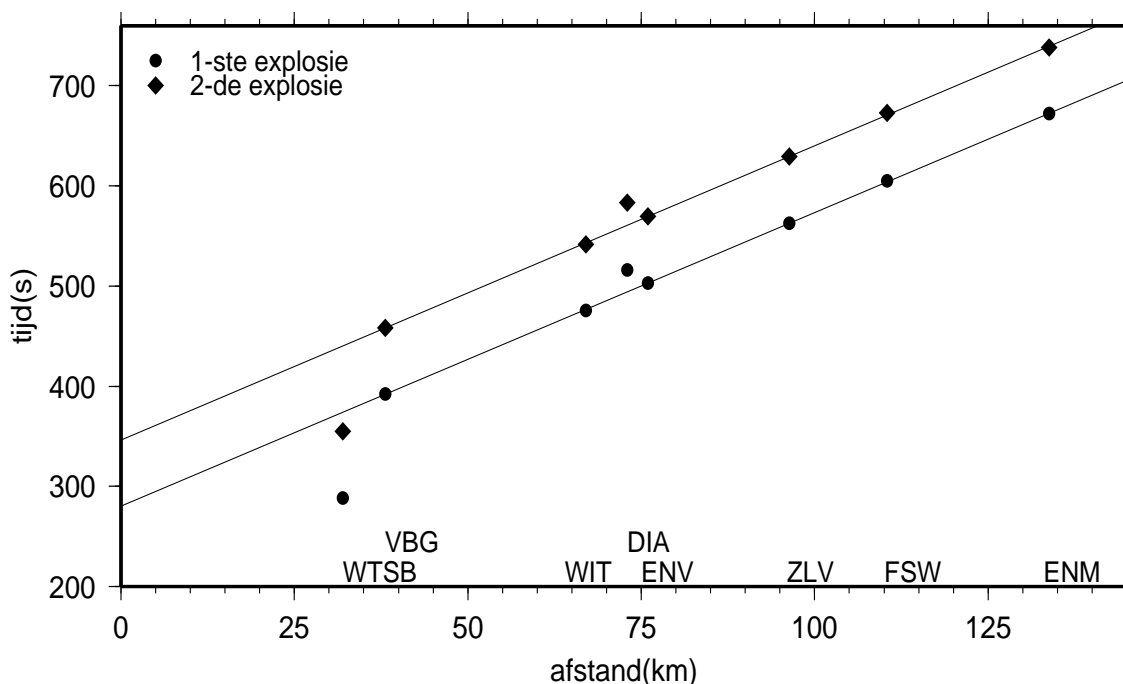


Figuur 3.6: Beste oplossing voor het geluid dat over DIA gereisd heeft.

4 Data-analyse

4.1 Looptijdcurven

In figuur 4.1 zijn de aankomsttijden in de stations als functie van de afstand uitgezet. De tijd-as geeft de tijd sinds 13u30m0.0s GMT weer. Alle stations hebben de twee explosies geregistreerd, deze worden door cirkels en ruiten aangegeven voor respectievelijk de eerste en tweede explosie.



Figuur 4.1: Aankomsttijden sinds 13u30m0.0s GMT in de verschillende stations als functie van de afstand. De cirkels representeren de eerste explosie en de ruiten de tweede explosie. De doorgetrokken lijnen zijn de kleinste kwadraten oplossingen voor de aankomsttijden zonder de stations WTSB en DIA.

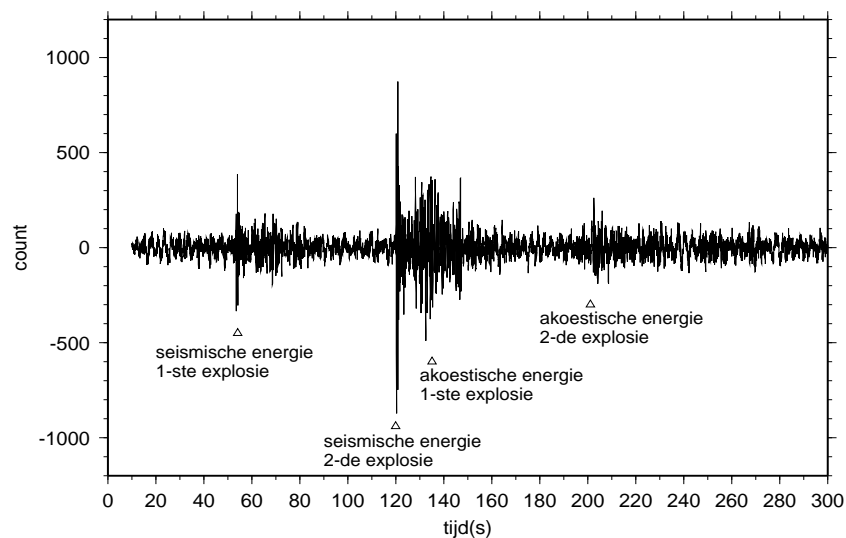
4.2 Het anomale karakter van DIA

De voortplanting van geluidsgolven is afhankelijk van de wind en temperatuur opbouw van de atmosfeer. De voortplantingssnelheid neemt toe bij toenemende temperatuur en wind. Daarentegen zullen een "wind tegen" situatie en lage temperaturen de voortplanting van geluidsgolven vertragen. De seismische stations (VBG, WIT, ENV, ZLV, FSW en ENM) bevinden zich ten noorden van de bron. Het akoestische array DIA bevindt zich ten westen van de bron. De paden waarover de geluidsgolven gereisd hebben verschillen dus sterk, zo ook de geluidssnelheden. Zoals reeds afgeleid is uit de lage amplitude van de signalen in DIA (zie paragraaf 3.2), is de voortplanting van het geluid westwaards ongunstig geweest. In figuur 4.1 wordt dit zichtbaar door de bovengemiddeld late aankomst van de golven in DIA. Het is daarom dat de kleinste kwadraten oplossingen (de doorgetrokken lijnen) zonder de aankomsttijden in DIA berekend zijn. De wind en temperatuur karakteristieken

van de atmosfeer maakten dat DIA zich op 13 mei in de schaduwzone, betreffende geluidsvoortplanting, bevond. Gelaagdheid in de stratosfeer kan leiden tot verstrooiing van het geluid waardoor toch een weinig energie geobserveerd wordt in de schaduwzone. De gevonden schijnbare snelheid, het uitgesmeerde (niet impulsieve) karakter van het signaal en de lage amplitude worden verklaard met deze verstrooiingstheorie.

4.3 De seismische energie op WTSB

In paragraaf 3.1 is reeds de lage amplitude van het signaal in WTSB opgemerkt. In figuur 4.1 valt WTSB opnieuw op door de vroege aankomsttijden ten opzichte van de andere stations. Een vroege aankomst correspondeert met een hoge snelheid. Op basis van de lage amplitude en de vroege aankomst blijkt de energie die in WTSB arriveert door de aarde gereisd te zijn (een weinig seismische energie is ook in VBG waargenomen). Elastische golven door de aarde planten zich met een veel hogere snelheid voort dan akoestische golven in de lucht (respectievelijk ongeveer 5 km/s versus 330 m/s).



Figuur 4.2: De registratie van station WTSB met de verschillende soorten aankomsten van energie. De tijd-as begint om 13u33m55s GMT. De akoestische energie van de eerste explosie is niet direct zichtbaar.

In figuur 4.2 is de data weergegeven zoals die door station WTSB geregistreerd zijn. De tijd-as begint om 13u33m55s GMT. Naast de twee seismische aankomsten is er een weinig akoestische energie van de tweede explosie rond 200 s zichtbaar. De akoestische energie van de eerste explosie verdwijnt in de coda van de seismische energie rond 135 s.

De magnitudes van de eerste en tweede explosie zijn respectievelijk: $M_l=1.4$ en 1.8.

4.4 De explosie-tijden

De hellingshoeken van de lijnen, in figuur 4.1, geven de snelheid waarmee de golven gereisd hebben. Deze snelheid is 340 m/s en is een acceptabele waarde voor de geluidssnelheid. De explosie-tijden volgen uit figuur 4.1. Op een afstand van 0 km ofwel ter plaatse van de bron, vindt de eerste explosie na 280.0 seconden en de tweede na 346.0 seconden plaats. Hieruit volgen explosie-tijden van 13u34m40.0 \pm 0.9 s en 13u35m46.0 \pm 1.8 s GMT.

5 Conclusies

Seismometers en microbarografen van de afdeling Seismologie van het KNMI hebben de explosies bij S.E. Fireworks te Enschede op 13 mei 2000 geregistreerd. De explosies hebben zowel energie de aarde als energie de atmosfeer in gestuurd. De akoestische en seismische energie zijn geregistreerd en gebruikt om de explosie-tijden te berekenen.

Station WTSB heeft met name seismische energie geregistreerd en een weinig akoestische energie. De aankomsten in de andere stations zijn akoestisch.

Heersende wind en temperatuur condities in de atmosfeer zijn bepalend voor de reistijd van akoestische golven. De stations ten noorden van de bron hebben onder vergelijkbare condities de drukgolven geregistreerd. DIA ten westen van de bron heeft duidelijk afwijkende aankomsttijden. Tegenwerkende wind en temperatuur condities hebben tot een lagere geluidssnelheid geleid en dus tot relatief late aankomsten in DIA.

Door zowel de aankomsttijden in DIA als WTSB te negeren, zijn explosie-tijden van $13\text{u}34\text{m}40.0 \pm 0.9$ s en $13\text{u}35\text{m}46.0 \pm 1.8$ s GMT, voor respectievelijk de eerste en tweede explosie, berekend.

6 Referenties

Evers, L.G. and H.W. Haak, The Deelen Infrasound Array: On the detection and identification of infrasound, *Tech. Rep. TR-225*, 26 pp., Royal Neth. Meteo. Inst., de Bilt, the Netherlands, 2000.