

# Drukgolven in Nederland na de eruptie in Tonga op 15 januari 2022

Jelle Assink (KNMI), Fred Bosveld (KNMI), Jan Fokke Meirink (KNMI), Frank Selten (KNMI), Wouter Mol (WUR)

**Op 15 januari 2022 vond een explosieve uitbarsting plaats van de vulkaan Hunga in Tonga. De drukgolven die door de explosie werden opgewekt zijn vastgelegd door diverse sensoren op de aarde en vanuit de ruimte. Over de gehele wereld werden drukgolven met amplitudes van enkele hectopascal gemeten. Dit zijn zogenaamde Lamb-golven die kunnen ontstaan bij grote explosies zoals vulkaanuitbarstingen. Metingen in Nederland laten zien dat de Lamb-golf tenminste drie keer om de aarde heeft gecirkeld. Na de passage van de Lamb-golf werd ook hoogfrequent infrage-luid gemeten, wat uitzonderlijk is voor deze propagatieafstand. Uit onze analyse volgt dat de Lamb-golf gepaard ging met een variatie in de windsnelheid van 0.36 m/s.**

## De uitbarsting

Op 15 januari 2022 vond omstreeks 04:15 UTC een krachtige uitbarsting plaats van de vulkaan Hunga, in de eilandengroep Tonga. De explosie markeerde de climax van een uitbarstingsfase die op 20 december 2021 was begonnen, na enkele jaren van rust. De explosie was de grootste sinds de uitbarsting van de Filipijnse vulkaan Pinatubo in 1991. Over de gehele wereld werden drukgolven met amplitudes van enkele hectopascal gemeten. Dit zijn zogenaamde Lamb-golven die kunnen ontstaan bij grote explosies zoals vulkaanuitbarstingen (Press en Harkrider, 1962), meteoorexplosies (Brown et al., 2013) en nucleaire testen (Donn et al., 1963).

Hunga maakt deel uit van de zeer actieve vulkanische boog van de Tonga-Kermadec-eilanden, een subductiezone die zich uitstrekt van het noordoosten van Nieuw-Zeeland tot Fiji. De vulkaan bevindt zich grotendeels onder water, met uitzondering van de twee eilanden Hunga Tonga en Hunga Ha'apai die deel uitmaken van de noordwestelijke rand van de caldera. Sinds de vorige eruptiefase in 2014 – 2015 waren de twee eilanden met elkaar verbonden, maar sinds 15 januari zijn de eilanden weer los van elkaar.

De uitbarsting heeft een ontwrichtend effect gehad op mens en samenleving, zelfs tot op grote afstanden van de

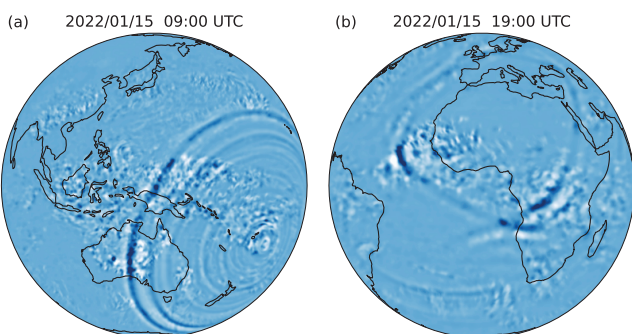
vulkaan. De aspluim, die tot ver in de stratosfeer reikte, sloeg deels neer op de omliggende eilanden. Door de waterverplaatsing ten gevolge van de vulkaanuitbarsting ontstonden tsunami's die met name in Tonga, maar ook elders rondom de Stille Oceaan voor schade zorgden. Ook ontstonden (kleinere) meteo-tsunami's in het Caribisch gebied en de Middellandse Zee ten gevolge van de atmosferische drukgolf.

Nog nooit zijn drukgolven van een dergelijke explosie zo uitgebreid vastgelegd op digitale sensornetwerken aan het aardoppervlak en vanuit de ruimte. Metingen laten zien dat de golven tenminste drie keer om de aarde zijn getrokken. De uitbarsting van de Krakatau in 1883 heeft vergelijkbare golven opgewekt die minstens vier keer de aarde over zijn gegaan. Dit artikel gaat verder in op dit fenomeen en beschrijft de observaties in Nederland in het bijzonder.

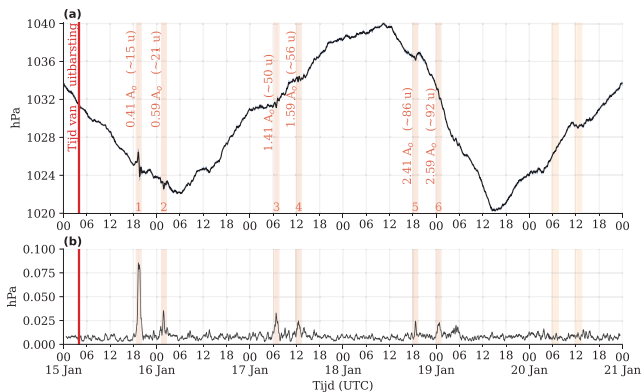
## Meteorologische golven

Een scala aan atmosferische golven kan zich voortplanten door de atmosfeer na opgewekt te zijn door een verstoring, zoals een explosieve vulkaanuitbarsting. Vlak bij de bron worden schokgolven opgewekt, die sneller dan het geluid propageren. Op grotere afstand ontstaan hieruit zwaartegolven en akoestische golven. Het verschil tussen akoestische golven en zwaartegolven is het mechanisme waardoor de verplaatste lucht in de golven weer teruggedreven wordt naar de evenwichtspositie. Voor akoestische golven is dit de drukkracht als gevolg van het samendrukken van de lucht, voor pure zwaartegolven is dit de balans tussen zwaartekracht en drijfvermogen. De voortplantingssnelheid van geluidsgolven in de lucht, bepaald door de temperatuur en de horizontale wind in de voortplantingsrichting, is een orde van grootte hoger dan die van zwaartegolven.

Akoestische-zwaartegolven (AGW) zijn drukgolven die zowel eigenschappen van zwaartegolven als akoestische golven hebben, met een trillingstijd van een uur tot enkele minuten. De Lamb-golf (Lamb, 1911) is een speciale AGW die zich langs het aardoppervlak voortplant, met een snelheid van ongeveer 310 m/s. De Lamb-golf wordt opgewekt door bronnen dicht bij de grond en dempt nauwelijks omdat de verspreiding enkel langs het aardoppervlak gaat en de absorptie te verwaarlozen is. De golf strekt zich in verticale richting uit waarbij de drukamplitude afneemt met de hoogte. Voor frequenties boven de 10 mHz wordt



*Figuur 1. Visualisatie van golven in de atmosfeer op basis van geostationaire satellietbeelden: (a) opname van Himawari-8 ongeveer vijf uur na de uitbarsting; (b) opname van Meteosat-11 op het moment dat de Lamb-golf voor het eerst Nederland bereikt. De afbeeldingen tonen de tweede afgeleide van de helderheidstemperatuur gemeten in het ozon-absorptiekanaal rond 9.7  $\mu\text{m}$ , dat behalve voor de (lage) troposfeer ook gevoelig is voor de stratosfeer. Verstoringen door de Lamb-golf, in de orde van 0.1 K, zijn naar voren gehaald door toepassing van een low-pass filter.*



**Figuur 2.** Luchtdrukobservaties van meetveld De Veenkampen (Wageningen Universiteit) op 51.981 °N, 5.620 °E met gemarkeerde passages van de drukgolf. (a) toont de luchtdruk op zeeniveau, met daarin per passage de afgelegde afstand en verstreken tijd. De afstand is uitgedrukt in  $A_0$  (omtrek Aarde: 40.103 km), en tijd in uur na uitbarsting. (b) toont de absolute luchtdrukafwijking (20 minuten gemiddeld) ten opzichte van de 60 minuten gemiddelde luchtdruk, dit om meteorologische variatie te filteren. Passages 7 en 8 komen bij dit station niet boven de ruis uit, maar de geschatte timing is wel gemarkeerd ter referentie.

de invloed van de zwaartekracht op de voortplanting van AGWs verwaarloosbaar. De onhoorbare geluidsgolven tussen de 10 mHz en 20 Hz worden infrageluid genoemd.

### Metingen van de drukgolf vanuit de ruimte

De Lamb-golven van de uitbarsting zijn met geostationaire weersatellieten goed te volgen. De drukvariaties veroorzaken kleine temperatuurvariaties, die zich vertalen in de hoeveelheid infrarood licht die deze satellieten meten. Opnames van de Japanse satelliet Himawari-8 (Figuur 1a) laten zien hoe de drukgolven zich in cirkels uitbreiden vanuit het punt waar de uitbarsting plaatsvindt. Het beeld van Meteosat-11 in Figuur 1b, zo'n 15 uur na de eruptie, toont de golf die op dat moment aan het convergeren is richting het noorden van Afrika. Daar bevindt zich de zogenoemde antipode, het punt dat ten opzichte van Tonga precies aan de andere kant van de aarde ligt. Boven de zuidelijke Atlantische Oceaan en de Indische Oceaan zijn ook andere golven zichtbaar.

Vanuit de antipode vervolgt de golf zijn weg terug naar de locatie van de vulkaan om vervolgens aan een tweede ronde te beginnen. Op satellietbeelden zijn sporen te vinden van vijf rondgangen. Tijdens elke ronde passeert de golf dus tweemaal ons land, eenmaal op weg naar de antipode, en

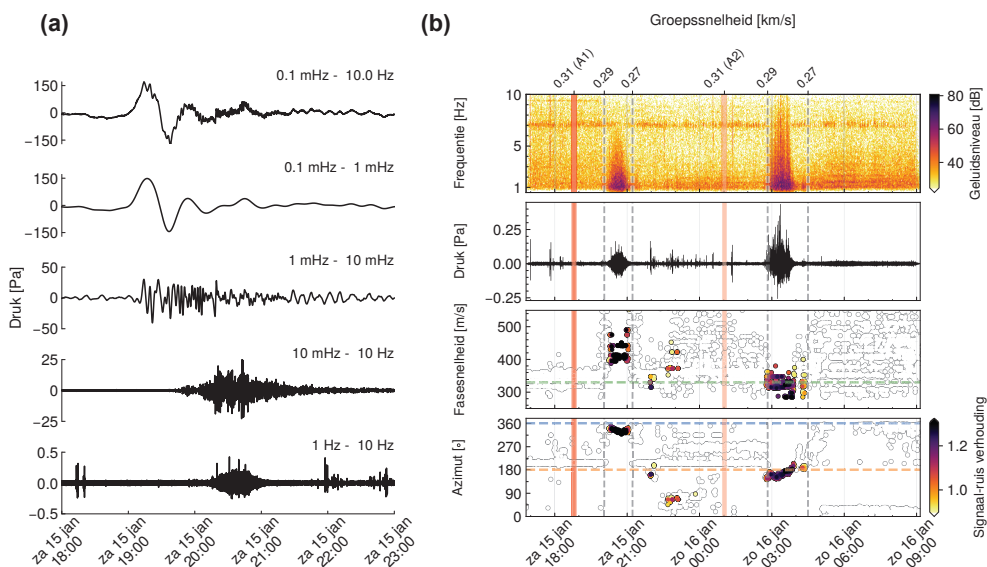
een tweede maal op de weg terug richting zijn oorsprong in Tonga.

### (Micro)barometer observaties Nederland

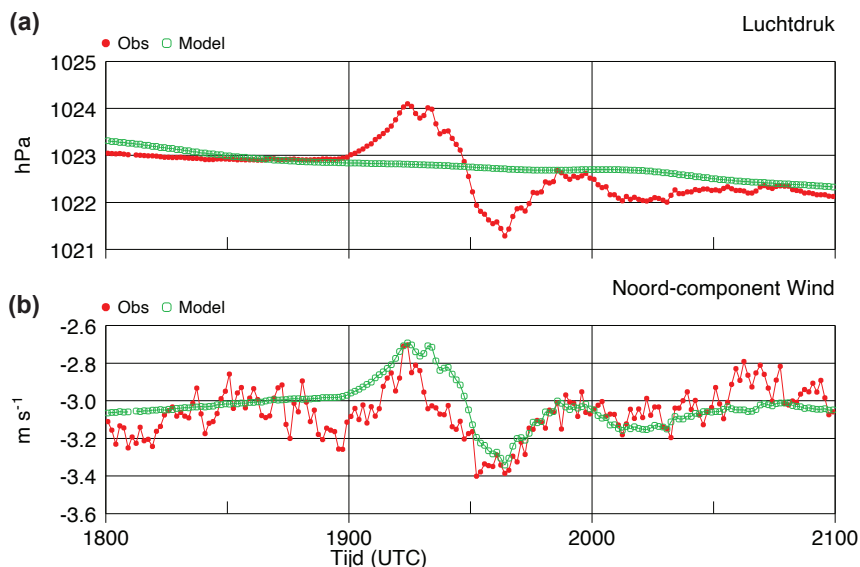
Na 16.400 km afgelegd te hebben via de Noordpool trok de Lamb-golf zaterdag even na 20.00 uur (lokale tijd) vanuit het noorden over Nederland, waar de golf op barometers werd gemeten. Ongeveer zes uur later volgde een zwakkere passage van de golf die via de antipode was gereisd. Deze eerste passages zijn ook goed waargenomen op amateurweerstations, met bijvoorbeeld meldingen vanuit het WOW-NL netwerk van het KNMI.

Figuur 2 geeft de barometerregistraties van alle passages weer op de Veenkampen, het meetveld van de Wageningen Universiteit. De roze balkjes komen overeen met een golfsnelheid van ongeveer 310 m/s. Door het filteren van meteorologische variaties in luchtdruk (Figuur 2b) kunnen zes passages van de Lamb-golf beter zichtbaar worden gemaakt tijdens de eerste drie ronden van de golf. De passages van de vierde ronde worden niet meer waargenomen.

De drukgolf kan verder worden bestudeerd met een microbarometer, een gevoelige barometer waarmee zeer kleine drukverstoringen kunnen worden gemeten (Mentink en Evers, 2011). Figuur 3a laat de gemeten drukgolf zien in verschillende frequentiebanden op een microbarometer op het terrein van het KNMI. De bovenste golfvorm (0.1 mHz – 10 Hz) laat een samengesteld signaal zien dat naast de Lamb-golf ook uit hogere frequenties bestaat. Door het signaal te filteren in verschillende banden wordt een karakteristieke dispersie zichtbaar (Press en Harkrider, 1962). In de 0.1 – 1.0 mHz band is de Lamb-golf het beste zichtbaar als een sinusvormig signaal met een amplitude van ongeveer 1.5 hPa. Hogere frequentieban-



**Figuur 3.** (a) Microbarometer-registraties in verschillende frequentiebanden waarin de dispersie te zien is van de Lamb-golf en het hoogfrequentere infrageluid. (b) Beamform analyse van infrageluid na de eerste twee Lamb-golf aankomsten (A1, A2). De coherente signalen zijn gekleurd als functie van signaal-ruis verhouding (SNR). Het infrageluid reist met groepssnelheden tussen 270 en 290 m/s (grijze stippellijnen) en is coherent tot 10 Hz. Het gemeten azimuth wijkt iets af van de theoretische waarden (blauwe en oranje stippellijnen voor resp. A1 en A2) door horizontale refractie. De variaties in fasesnelheid zijn gerelateerd aan variaties in de temperatuur en horizontale wind met hoogte. De groene stippellijn geeft de geluidssnelheid op de grond aan (~ 333 m/s).



**Figuur 4.** (a) Landelijk gemiddelde en gesynchroniseerde luchtdruk (23 stations). (b) Noordcomponent van de windsnelheid, gemiddeld over 37 stations. De referentiedruk zonder Tonga-event is bepaald met het atmosferisch model RACMO. Op basis van het luchtdrukverschil is de verwachte windsnelheidsvariatie berekend zoals weergegeven in (b). Deze schatting is -3 m/s verschoven om te kunnen vergelijken met de geobserveerde wind. De wind boven Nederland was zuidelijk wat resulteert in een gemiddelde noordcomponent die negatief is.

den bevatten coherente golfvormen met lagere amplitudes en latere aankomsttijden, relatief tot de Lamb-golf.

Omdat er meerdere microbarometers op de grond staan opgesteld, kan met een beamform analyse (Evers, 2008) de horizontale invalshoek (azimut) en horizontale fasesnelheid van het infrageluid worden bepaald (Figuur 3b). De horizontale fasesnelheid is een maat voor de verticale invalshoek. Na de eerste twee Lamb-golfaankomsten (A1, A2) wordt infrageluid gemeten met een groepssnelheid tussen 270 en 290 m/s. De groepssnelheid geeft de snelheid van het gehele golfpakket aan. Voor het infrageluid is de groepssnelheid lager dan de geluidssnelheid omdat het infrageluid verticaal voortbeweegt tussen de grond en de stratopauze en daarom een langer pad heeft. Het gemeten azimut wijkt iets af van de grootcirkel voor de aankomst die over de noordpool aankomt (A1). Dit is te verklaren doordat het infrageluid horizontaal afbuigt door de sterke polaire vortex in de stratosfeer (Smets et al., 2016). De variaties in fasesnelheid zijn gerelateerd aan de verticale invalshoek en worden bepaald door temperatuur- en windvariaties in de voortplantingsrichting (Assink et al., 2019). De relatief hoogfrequente signalen zijn verrassend voor deze enorme propagatie-afstanden.

### Verandering in de wind

We verwachten dat de Lamb-golf ook een effect op het windveld heeft. Uit de Navier-Stokes-vergelijking leiden we af dat de het geïnduceerde windveld parallel staat aan de voortplantingsrichting van het geluid, en dat de windsnelheid op ieder moment evenredig is met de drukverstoring, waarbij de evenredigheidsconstante 0.24 m/s per hPa bedraagt. De Lamb-golf komt uit het noorden en start met een toename van de druk. De geassocieerde wind zal dus in eerste instantie vanuit het noorden komen. We verwachten een windamplitude van ongeveer 0.36 m/s, gezien de gemeten drukgolf in Nederland.

Het blijkt dat natuurlijke lokale variaties in de wind te groot zijn om op basis van één meetstation het gezochte effect te vinden. Daarom kijken we naar windmetingen op meerdere locaties. Het idee is dat door middeling van de lokale variaties in de tijd het kleine gezochte signaal boven de resterende ruis uitkomt. In het landelijk meetnet van het KNMI wordt op 23 locaties de luchtdruk en op 37 locaties de 10-m-wind gemeten.

Op basis van 1-minuutwaarnemingen kunnen we de windmetingen synchroniseren op het tijdstip van binnenkomst van de drukgolf, die in 15 minuten tijd van noord naar zuid over Nederland loopt. Figuur 4 laat de gesynchroniseerde luchtdruk en noordcomponent van de wind zien, gemiddeld over respectievelijk 23 en 37 stations. Ondanks de sterke middeling blijven er allerlei variaties zichtbaar in de wind, maar er is een duidelijke respons te zien die synchroon verloopt met de drukvariatie geïnduceerd door de Tonga-eruptie.

Om de te verwachten windvariatie te kunnen schatten, moeten we bepalen welk deel van de waargenomen drukvariatie hoort bij de Lamb-golf. Daarvoor gebruiken we het drukveld zoals dat door het atmosferische model RACMO is berekend. We zien in Figuur 4a dat deze modelrun afgezien van de Lamb-golf behoorlijk dicht bij de waarnemingen ligt. Met behulp van de evenredigheidsfactor van 0.24 m/s per hPa kan nu het verwachte windsignaal berekend worden. Hoewel er afgezien van de passage van de Lamb-golf afwijkingen tot 0.2 m/s te zien zijn, lijkt er toch een door de golf geïnduceerde windvariatie zichtbaar met de juiste timing, het juiste teken en de verwachte amplitude.

### Dankwoord

Met dank aan Wiel Wauben (KNMI) voor het beschikbaar maken van de 1-minuutgegevens van het landelijk meetnet, Erik van Meijgaard (KNMI) voor de RACMO-drukgegevens en Sander Tijm (KNMI) voor HIRLAM-drukgegevens.

### Referenties

- Assink J. et al. (2019) Advances in Infrasonic Remote Sensing Methods. In: Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (eds) Infrasonic Monitoring for Atmospheric Studies. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_18).
- Brown, P. G., and Coauthors, 2013: A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503 (7475), 238–241, doi:10.1038/nature12741.
- Donn, W. L., R. L. Pfeffer, and M. Ewing, 1963: Propagation of air waves from nuclear explosions. *Science*, 139 (3552), 307–317, doi: 10.1126/science.139.3552.307.
- Evers, L., 2008: The inaudible symphony: On the detection and source identification of atmospheric infrasound. 160 pp.
- Lamb, H., 1911: On atmospheric oscillations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 84 (574), 551–572, doi:10.1098/rspa.1911.0008, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1911.0008>.
- Mentink, J. H., and L. G. Evers, 2011: Frequency response and design parameters for differential microbarometers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130 (1), 33–41, doi:10.1121/1.3596718.
- Press, F., and D. Harkrider, 1962: Propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 67 (10), 3889–3908.
- Smets, P. S., J. D. Assink, A. le Pichon, and L. G. Evers, 2016: ECMWF SSW forecast evaluation using infrasound. *Journal of Geophysical Research*, 121 (9), 4637–4650, doi:10.1002/2015JD024251.

Contact: jelle.assink@knmi.nl