

Eruptie van Anak Krakatau in 2008. Wikimedia Commons, public domain.

AFBEELDING 1. | Zeedieptekaart uit 1922-1923, geprojecteerd op een (Landsat 8) satellietbeeld van de Krakatau eilandengroep van 20 december 2018, twee dagen voor de grote eruptie van Anak Krakatau. Duidelijk is de positie van AK te zien op de noordoostelijke rand van de oude Krakatau caldera en de steile zuidwestelijke helling naar de caldera-bodem (bathymetrie naar gegevens van Neumann van Padang, 1933; satellietbeeld van Wikimedia Commons onder Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License).



De chronische instabiliteit van vulkaaneiland Anak Krakatau (Indonesië)

FLIP KIPS
FLIP.KIPS@CHELLO.NL

Op 22 december 2018 vond er een catastrofale uitbarsting plaats van Anak Krakatau, vulkaaneiland in de Sunda Straat tussen Java en Sumatra (Indonesië). Daarbij zakte de zuidwestelijke helling volledig in en verloor de vulkaan de helft van zijn hoogte en oppervlak. De gebeurtenissen leidden tot een tsunami waarbij op de kusten van West-Java en Zuidoost Sumatra meer dan 430 doden vielen. Hoe heeft dit flankfalen kunnen gebeuren? Recent onderzoek geeft veel antwoorden, maar voorspellen blijft lastig. Het probleem is de instabiele voet van Anak Krakatau op de steile rand van de caldera die de oude Krakatau heeft achtergelaten.





AFBEELDING 2. | Naar boven langs de oostelijke helling van Anak Krakatau, 2 augustus 1980. Her en der liggen vulkanische bommen (foto: Flip Kips).

Anak Krakatau heeft al sinds de jaren 1980 mijn belangstelling, toen ik als bodemkundige in Indonesië werkte. Mijn veldwerkgebied was in Lampung in Zuidoost Sumatra (CSR, 1983), niet ver van Anak Krakatau. In augustus 1980 bezochten wij het eiland. In 2017 beschreef Henk Duyverman in dit blad zijn reis (wanneer?) naar het eiland in twee reiscolumns. Toen ik die prachtige verslagen las realiseerde ik mij dat wij, mijn vrouw en ik, dit net zo hadden meegemaakt, maar met één verschil: tijdens ons bezoek begon Anak Krakatau te werken! Dankzij satellietbeelden, seismische en akoestische registraties, en nieuw bathymetrisch (zeebodem) onderzoek, is veel bekend over wat zich precies heeft afgespeeld in december 2018. Tijd voor een terugblik op de ontwikkeling van Anak Krakatau sinds zijn ontstaan in 1928.

De oude Krakatau

Over de hele wereld heeft Krakatau een ontzagwekkende klank; een van de meest desastreuze vulkaanuitbarstingen sinds mensenheugenis. Met een VEI (vulkanische-explosiviteits-index) van 6 ('kolossaal') behoort de Krakatau catastrofe uit 1883 echter niet tot de grootste vulkaanuitbarstingen ter wereld. Daartoe behoort wel

de veel minder bekende eruptie van de Tambora in Oost-Indonesië in 1815 met VEI 7 ('super-kolossaal') en meer dan 100.000 doden (Dröge, 2015). Het verschil is dat de ontploffing van de Krakatau de eerste was die wereldwijde publiciteit kreeg door de beschikbaarheid van de elektrische telegraaf. Aan het onderzoek van de Krakatau en het verslag van de gebeurtenissen van 1883 is vooral de naam verbonden van de geoloog R.D.M. Verbeek, een pionier in de geologische verkenning van de Indonesische archipel. Uitbarstingen vanuit de vier vulkaankegels van Krakatau, Rakata (820 m), Danan (tweelingvulkaan, 450 m) en Perbuwatan (120 m), waren al begonnen op 20 mei van dat jaar, maar het was op 27 augustus toen met donderend geweld een meer dan 30 m hoge vloedgolf de kusten van West-Java en Zuidoost Sumatra bereikte, een dodental veroorzakend van bijna 36.500 zielen. Even daarvoor was een aantal oorverdovende explosies tot op 3000 km afstand hoorbaar geweest. De Krakatau was ontploft en in elkaar gezakt.

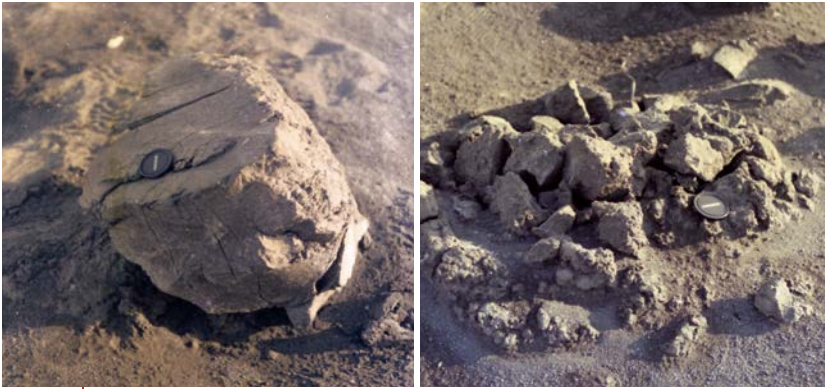
Een gangbare theorie is dat er een scheur ("lek") in de vulkaan ontstaan was, waardoor zeewater bij het hete magma kon komen, wat een enorme stoomdruk veroorzaakte. De resulterende pyroklastische golven (*surges*) reikten 40 km ver. De invloed van de tsunami werd zelfs geregistreerd in het getijverschil aan de Engelse westkust. De as die tot in de stratosfeer naar boven werd geperst, heeft het klimaat wereldwijd nog jarenlang beïnvloed.

Vandaag is er van de oude Krakatau alleen een rest over, het eiland ('Pulau') Rakata. De vulkanen Perbuwatan en Danan werden bij de uitbarsting van 1883 geheel vernietigd. Van Rakata bleef de helft intact (Afb. 1). De twee andere eilanden van de Krakatau eilandengroep, Pulau Sertung ('Verlaten Eiland') en Pulau Panjang ('Lang Eiland'), zijn geen resten van de oude Krakatau. Zij behoren tot een nog eerdere, antieke Krakatau, die in de 3e of 4e eeuw door instorting een eerste caldera vormde tussen deze eilanden en (een voorganger van) Rakata, met een diameter van zo'n 7 km (GVP, 1993). Te midden van deze eilanden ligt Anak ("kind van") Krakatau, de nieuwe vulkaan, geboren in 1928.

Naar Anak Krakatau

Het werd een onvergetelijk weekend, maar achteraf had het slechter kunnen aflopen. Er zijn genoeg voorbeelden waar het mis is gegaan, zoals de desastreuze





AFBEELDING 3. | Detail van de vulkanische bommen op de oostelijke helling van Anak Krakatau, links tufsteen, rechts uiteengevallen tufsteen (diameter lensdop 6 cm; foto: Flip Kips).



AFBEELDING 4. | Uitbarsting van Anak Krakatau in de vroege ochtend van 3 augustus 1980. Vulkanische as en rook schieten omhoog. Foto genomen in westelijke richting vanaf de tufkring op ca. 150 m hoogte boven zeeniveau. De hoogte van de krater is 200 m, de afstand tufkring - krater is ca. 500 m (foto: Flip Kips).

afloop van een op zich vergelijkbare expeditie van Australische toeristen en hun gidsen naar de vulkaan White Island (Nieuw-Zeeland) op 9 december 2019, waarbij 22 mensen het leven lieten. Een brief van mijn vrouw Marjan (op blauw luchtpostpapier) aan mijn ouders vanuit Bogor, Indonesië, gedateerd maandag 4 augustus 1980, geeft een sfeerbeeld van ons avontuur:

Afgelopen donderdag kwam Flip's collega, Australiër IH, bij ons langs of we zin hadden komend weekend mee te gaan naar het vulkaaneiland Anak Krakatau. Natuurlijk! De vulkaan ligt in de Sunda Straat tussen Java en Sumatra. Onze groep uit Bogor bestond uit drie Australiërs, de Indonesische gids S en wij twee. IH had een busje gehuurd en vrijdagmiddag om 2 uur vertrokken we naar de westkust, waar we onze intrek namen in een strandhotel. De volgende ochtend naar het vissersplaatsje Labuan, waar we een kleine vissersboot met bemanning wisten te charteren. Inmiddels was ons gezelschap uitgebreid met twee vrouwen uit Bandung, die ook naar het eiland wilden. Om 9 uur vertrokken we. Het was een prachtige tocht, veel dolfijnen gezien, af en toe kwamen ze met twee of drie naar boven langs de boot, en dan doken ze weer onder. Na vijf uur varen waren we er; een houten kont van het zitten, maar dat was het zeker waard.

De vulkaan, een heuvel van zo'n 200 meter hoog, was rustig. Het zand van het strand was zwart en aan de andere kant van de heuvel zagen we sporen van lava. Aan onze kant stonden een paar bomen, een teken dat er hier de laatste tijd geen lava meer naar beneden was gekomen. De boot kon niet helemaal tot op het strand aanleggen door de wind en de golfslag. De mannen hebben eerst de bagage en foto-toestellen aan land gebracht, waarna wij vrouwen het water in moesten springen om op het strand te komen. Je kon gelukkig staan. Wel nat geworden maar het droogt zo snel en je frist meteen op. Op een plekje achter de bomen stonden staken van een kampje van vorige bezoekers, daar hebben we zeil overheen gespannen, voor als het mocht gaan regenen. Bagage en proviand onder het zeil gelegd en toen de heuvel op gelopen (Afb. 2). Dat was een hele klim, omdat het behoorlijk steil was en het vulkaangruis rul. Boven aangekomen op de buitenste krater rand hadden we zicht op een binnenste heuvel met de eigenlijke krater. Uit de krater kwam wat rook. Veel foto's gemaakt, onder andere van vulkanische bommen (Afb. 3), en weer naar beneden



gegaan. Toen gezwommen en daarna het kampje verder ingericht, en gegeten. Vroeg in de avond een kampvuur aangelegd. Het was gezellig, de gids vermaakte ons met goocheltrucs. Om 8 uur zijn we gaan slapen onder het zeil. Het was helder die nacht. 's Morgens (zondag dus) om kwart voor 6 opgestaan. De mannen en de twee vrouwen uit Bandung zijn opnieuw naar boven gegaan om de zonsopgang te zien. Ik ben met de Australische beneden gebleven, had niet de moed nog een keer de heuvel op te sjokken. Nu, ze waren nog niet boven of daar begon de krater te rommelen en kwam er een kolom zwarte rook en as omhoog, met stenen. De wind stond gelukkig de goede kant op, dat wil zeggen in de rug (richting Sumatra) en zo konden ze volop foto's nemen (Afb. 4). Wij konden het spektakel vanaf beneden ook goed aanschouwen. Het gerommel van de krater konden we goed horen en we zagen lichtflitsen in de opstijgende askolom. En dan kwam er weer zo'n aswolk omhoog, het was een fantastisch gezicht. Eigenlijk was het te gek dat we op dit eiland konden verblijven, zó dicht bij een zó gevaarlijke vulkaan. Afgelopen september 1979 was Anak Krakatau nog fors uitgebarsten en sindsdien was hij erg onrustig, maar de laatste tijd

was er geen activiteit. Tot vandaag dus, zondag 3 augustus 1980. Na een half uur was iedereen weer beneden, de krater bleef maar doorspuwen en de askolom werd almaar hoger. Wat een oerkracht, dit zal ik mijn hele leven niet vergeten.

Om half 8 kwam de vissersboot ons weer ophalen. De bemanning was onrustig, we moesten zo snel mogelijk vertrekken. Ook op de heenvaart, zaterdag, werden zij gaandeweg steeds onrustiger. Zij komen niet graag in de buurt van de vulkaan. Voor deze vissers is de geologische uitleg van de big bang van 1883 niet meer dan hoogdravende kletspraat, alsook de statistische waarschijnlijkheid van een volgende. Zij geloven meer in een vergelding van de zeegoden voor het bevissen van deze wateren. Na twee uur varen konden we de vulkaan achter ons nog steeds zien en was de uitbarsting nog gaande (Afb. 5). De boot sneed door het water en weer waren daar de dolfijnen.

Hete luchtballon

Een ronduit spectaculair verslag is dat van geoloog Anne Fortuin die (met gezin) Anak Krakatau bezoekt in 1993. Ook dan is er een plotselinge uitbarsting en Fortuin is bang geraakt te worden door een vulkanische bom. Hij vraagt de gids nog naar de precieze plek op de vulkaan waar twee weken eerder een Amerikaanse toerist om het leven was gekomen door zo'n projectiel, maar dan klinkt het parool "wegwezen". In zijn relaas geeft hij de bezochte locaties op het eiland aan op een afbeelding van een 100 Rupiah biljet. Laat ik nu in 2020 precies zo'n zelfde briefje vinden op een zondagmarkt in Frankrijk (Afb. 6)! Fortuin slaat de spijker op de kop als hij het geluid van de asontlading kenschetst als "een geraas alsof er een mega heteluchtballon aan de opstijging begint".

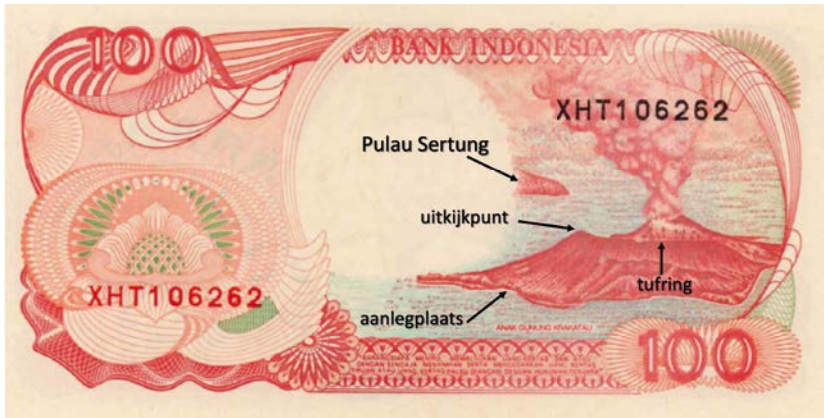
Geotektonische setting

De geotektoniek van de Sunda Straat is meest recent beschreven door Nishimura et al. (1992). Java en Sumatra zijn geologisch een eenheid, met aan beide zijden dezelfde typen gesteenten. Beide eilanden zijn onderdeel van de 'Ring van Vuur', de ring van vulkanen rondom de Stille Oceaan. Op 250 km ten zuiden en



AFBEELDING 5. | De uitbarsting van Anak Krakatau op 3 augustus 1980, gezien vanaf de boot in noordwestelijke richting. Rook en as drijven af in de richting van Sumatra. Op de voorgrond links een lavaveld en rechts de zuidelijke buitenste flank van de tufring met erosiegeulen (foto: Flip Kips).



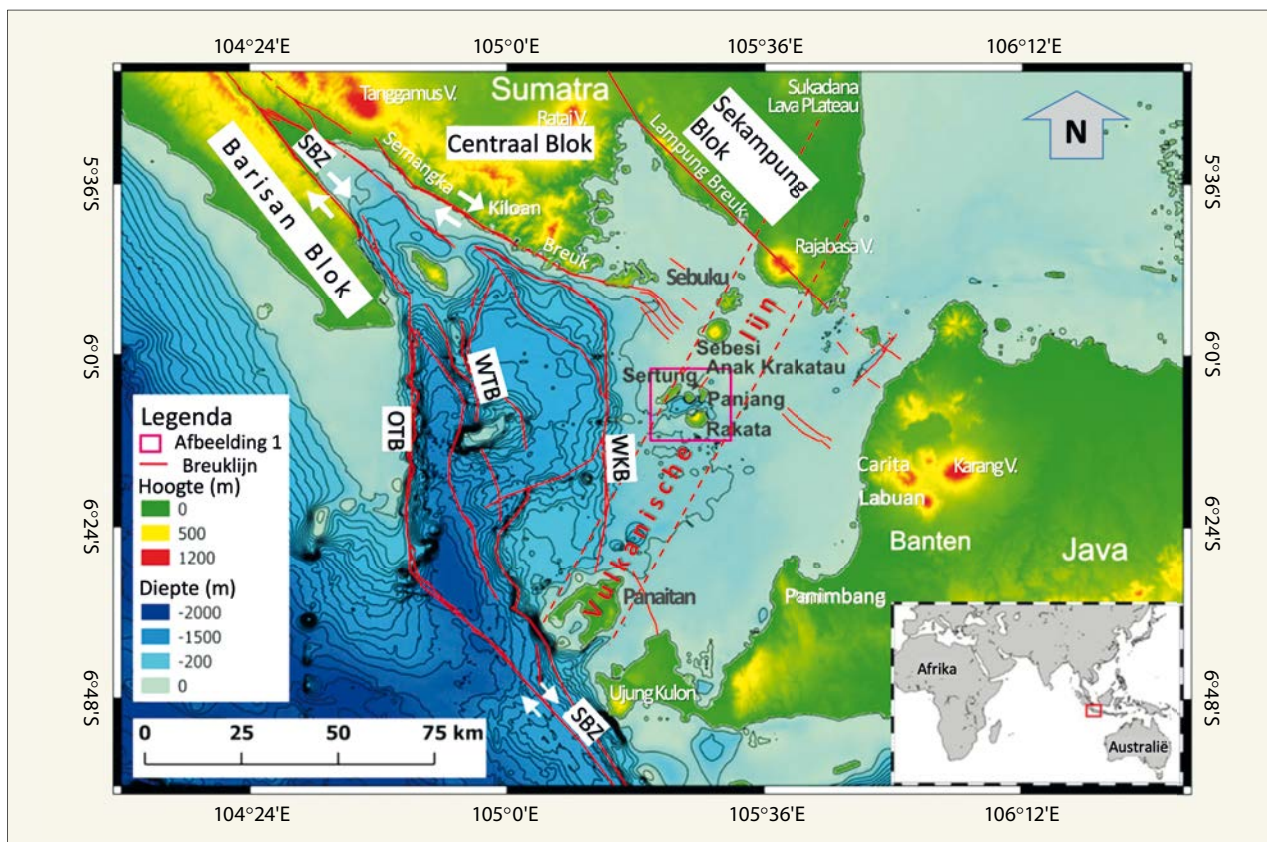


AFBEELDING 6. | Biljet van 100 Rupiah uit 1993 met afbeelding van Anak Krakatau zoals het eiland er uit zag in de jaren 1980 ('ANAK GUNUNG KRAKATAU' betekent 'kind van de berg Krakatau'). Duidelijk is de tufing te zien met daarbinnen de vulkanische kegel met krater.

zuidwesten van Java en Sumatra bevindt zich in de Indische Oceaan de Javatrog (7500 m diep), waar de oceanische korst van de Australische Plaat in NNO-NO richting onder de Aziatische Plaat schuift. Deze subductie is 7-10 miljoen jaar geleden gestart. De Sunda eilandenboog (waaronder Java en Sumatra) is hier het gevolg van en dit verklaart ook de vulkanische activiteit op de eilanden zelf, gelegen boven de subductiezone. In de loop van de tijd is het eiland Sumatra gescharnierd in noordoostelijke richting, waardoor er een opening kwam tussen Java en Sumatra. Zo is de Sunda Straat gevormd, met een smalle opening aan de N-zijde en breed uitlopend in de richting van de Indische Oceaan. Deze rotatie (met de klok mee) is ca. 2 miljoen jaar geleden begonnen en duurt voort tot vandaag.

Breuken en blokken

De structuur van de eilanden Java en Sumatra bestaat uit een aantal parallelle tektonische blokken in de lengterichting van de eilanden, ontstaan door opheffing en breukvorming boven de subductiezone. De vulkanen zijn langs de breuklijnen gevormd. Anak Krakatau maakt deel uit van de tektoniek van Sumatra maar heeft ook zijn eigen dynamiek. Het eiland ligt in een seismisch actieve zone met een NNO-ZZW oriëntatie, met alkali-basaltische extrusies. Hiervan maken deel uit het Sukadana lava gebied en de Rajabasa Vulkaan in Lampung, de Sebuku en Krakatau eilandengroepen, en het eiland Panaitan (Afb. 7). Deze zone grenst aan een slenkengebied (tot 1500-2000 m diep) tussen de West Krakatau Breuk (WKB) en de Sumatra Breuk Zone (SBZ). Deze breuken staan in verbinding met de NW-ZO georiënteerde breuklijnen van de tektonische blokken van Sumatra- Lampung, waaronder de Semangka Breuk. Net als de SBZ is dit een *strike-slip* breuk met horizontale verplaatsing.



AFBEELDING 7. | Bathymetrie en hoogtekaart van het gebied van de Sunda Straat. OTB=Oost Tabuan Breuk; WTB=West Tabuan Breuk; WKB=West Krakatau Breuk; SBZ=Sumatra Breuk Zone (aangepast naar Priyanto et al., 2021, onder Creative Commons Attribution License CC BY, en aangevuld met gegevens van Nishimura et al., 1992 en Verstappen, 1973).

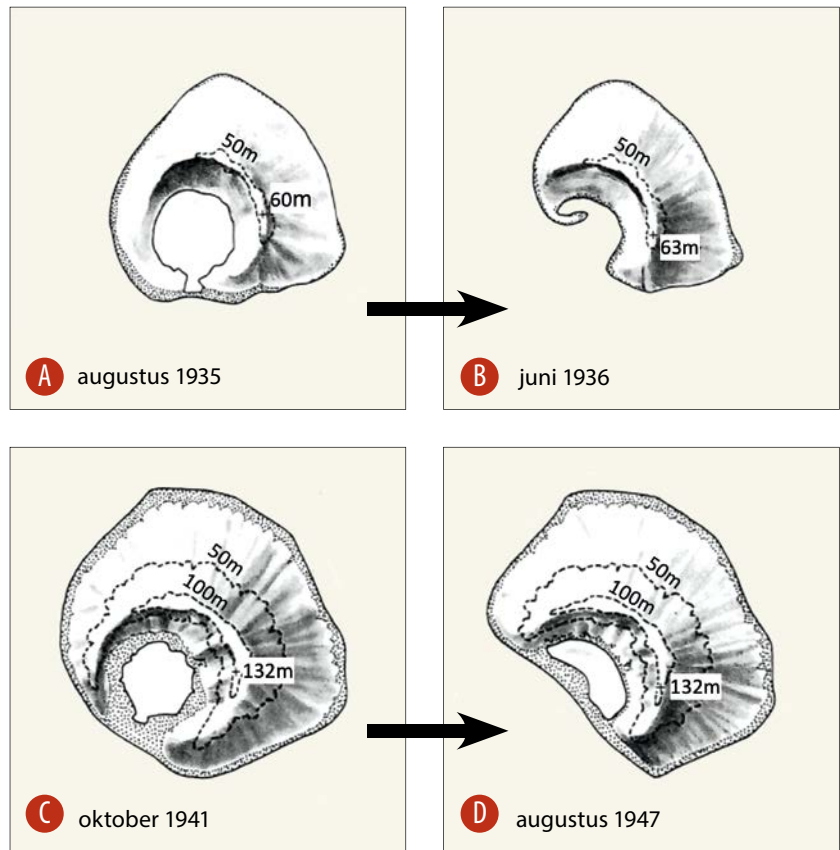


Ontstaan en ontwikkeling van Anak Krakatau

Tijdens de verwoestende uitbarsting van de oude Krakatau in 1883 werd door inzakking een caldera gevormd waarvan de bodem op ca. 270 m beneden zeeniveau ligt, zo blijkt uit lodingen die in 1928 zijn uitgevoerd (zie Afb. 1). Op de noordoostelijke rand van deze caldera, ten westen van Pulau Panjang, is in januari 1928 Anak Krakatau ontstaan.

Worstelend bovenkomen

Het nieuwe vulkaanlichaam dat boven water kwam zag eruit als de rug van een gigantische walvis, 3 m hoog en 175 m lang. De ontwikkelingen werden op de voet gevolgd (Neumann Van Padang, 1933). In februari van dat jaar was dit eilandje alweer verzwolgen door de golven en de branding. Tijdens een volgende periode van vulkanische activiteit kwam in januari 1929 Anak Krakatau II boven water. Door opeenvolgende zware erupties groeide dit eiland snel. In februari 1929 was het 275 m lang en 38 m hoog. Maar ook dit eiland werd door de golven en de branding afgebroken en begin juli 1929 was het weer verdwenen. Een jaar later herhaalde dit proces zich en werd Anak Krakatau III gevormd om te blijven. Begonnen weer als een walvisrug, groeide het eiland uit tot een herkenbare vulkaan met krater (hoogste punt op ca. 90 m) en kratermeer (op zeeniveau) in 1933. Voskuil (1983) heeft in 21 puike geomorfologische kaartjes de opeenvolgende stadia in de ontwikkeling van Anak Krakatau in de periode 1930-1981 weergegeven, gebaseerd op topografische opnames van de Vulkanologische Dienst van Nederlands Indië en Indonesië. Wat opvalt is dat het eiland altijd asymmetrisch is geweest met de krater aan de ZW-zijde. Alleen aan de NO-zijde vormde zich een glooiende iets concave vulkaanhelling. In de ontwikkeling van het eiland zijn er verschillende perioden geweest van groei door pyroklastische en lava afzettingen (voornamelijk andesiet, Camus *et al.*, 1987), afgewisseld door perioden van vulkanische rust, waarin het eiland slonk. Dan zorgden de golven, de branding en de zeestromingen (in overwegend ZW-NO richting) voor afkalving van de kustlijn en werd het ronde kratermeer meer dan eens gereduceerd tot een sikkelsee met opening naar zee of met een lage wal



AFBEELDING 8. | Opbouw en afbraak van Anak Krakatau in de periode 1935-1936 (A en B) en in de periode 1941-1947 (C en D). + = hoogste punt; puntarcing = zandstrand (aangepast naar Voskuil, 1983; gepubliceerd met toestemming van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap).

aan de instabiele ZW-kant, langs de steile rand van de oude caldera. Te oordelen naar de kaartjes hebben dergelijke veranderingen in de morfologie van het eiland zich minstens twee keer voorgedaan in de periode 1930-1981, namelijk in 1935-36 en 1941-1947 (Afb. 8). We moeten ervan uit gaan dat er in deze situaties sprake is geweest van afschuivingen (*landslides*) naar het caldera-bekken. Hunt *et al.* (2021) merken op dat de steile sikkelvormige krater in 1949 (Afb. 9) opvallend veel lijkt op de geometrie van het eiland na de ineenzakking van december 2018, maar van mogelijke tsunami's uit die jaren zijn geen meldingen bekend. Alleen in oktober 1981 is een kleine tsunami geregistreerd (ca. 2 m hoog), die het eiland Rakata bereikte (Camus *et al.*, 1987).

Tufring

Tijdens ons bezoek aan Anak Krakatau in augustus 1980 is de vulkaan ca. 200 m hoog. Er is een binnenste en een buitenste krater. De binnenste krater is vanaf ca. 1952 ontwikkeld binnen de grotere krater waarvan de rand (ook wel 'tufring' genoemd) als een hoefijzer aanwezig is met de open kant aan ZW-zijde en met een hoogte van ca. 150 m. In 2018 is de vulkaan uitgegroeid tot een echte berg, een kegel van ca. 300 m hoogte. De tufring is nauwelijks nog zichtbaar, vrijwel de gehele depressie tussen de binnenste en buitenste krater is opgevuld met vulkanisch materiaal door de periodieke uitbarstingen en is er een doorgaande helling omhoog. De berg is steil en onstabiel aan de ZW-kant (Walter *et al.*, 2019). Flankfalen door oversteilte (*oversteepening*) gevolgd door correctie naar een stabiele helling door erosie en massabewegingen, is een algemeen voorkomend verschijnsel bij vulkanen, maar in dit geval hebben we te maken met een extra onzekere situatie, gezien de specifieke positie van Anak Krakatau op de steile calderarand.

De voorspelling

In 2012 verschijnt er een studie van Giachetti *et al.* waarin zij aandacht vragen voor de potentiële instabiliteit van Anak Krakatau aan de ZW-zijde, met name





AFBEELDING 9. | *Anak Krakatau op 27 juni 1949. De steile sikkelvormige krater bevat een meer op zeeniveau, dat aan de ZW-zijde door een ca. 40 m brede lage wal is afgesloten van de zee. Het hoogste punt van de kraterwand ligt op 155 m boven zeeniveau. Binnen deze tuftring zal in later jaren een vulkanische kegel tot ontwikkeling komen. Op de achtergrond een deel van het eiland Panjang (luchtfoto van Photo Verkennings Afdeling Militaire Luchtvaart; topografische informatie afgeleid van Voskuil, 1983).*

het risico van flankfalen door oversteilde van deze helling en gerelateerde aardverschuiving en tsunami. Zij noemen de actieve fase van de vulkaan in 1980 (!), wat aanleiding was om een permanente observatiepost te installeren in Pasauran op de westkust van Java (even ten noorden van Labuan), op ongeveer 50 km OZO van de vulkaan. Zij voeren een simulatie uit van het flankfalen op basis van een digitaal hoogte model (DEM) dat verkregen wordt door het samenvoegen van ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) topografie (resolutie ca. 30 m) en bestaande bathymetrische kaarten. De simulatie wordt uitgevoerd met *VolcFlow* voor de aardverschuiving (*landslide*) alsook de resulterende tsunami. Logischerwijs nemen zij aan dat het glijvlak van de falende flank op de grens van de hoefijzervormige tuftring en de daarboven gelegen vulkanieten van de jonge krater aanpikt, een breedte heeft van 1,9 km en een helling van $8,2^\circ$ met als basis de oude 1883 calderabodem op ca. 270 m diepte. De onthoofding zou de hoogte van AK reduceren van ca. 300 m naar ca. 65 m en een aardverschuiving en puinlawine (*debris avalanche*) tot gevolg hebben met een volume van $0,28 \text{ km}^3$. De destabilisatie zou een initiële vloedgolf van 43 m hoogte veroorzaken die de andere eilanden van de Krakatau eilandengroep in minder dan een minuut zou bereiken met een golfhoogte van 15 tot 30 m. Vervolgens zou de tsunami na 35–45 minuten de westkust van Java bereiken met een golfhoogte van 2,9 m (Carita-strand) en 3,4 m (Labuan-strand). Deze golfhoogtes zijn belangrijk kleiner dan die van de grote 1883 Krakatau tsunami met een gemiddelde golfhoogte van 15 m. Het enige wat de onderzoekers niet kunnen voorspellen is wanneer het flankfalen zal optreden. Zij pleiten voor snelle detectie door de observatiepost, tezamen met een efficiënt waarschuwingssysteem langs de kust, teneinde slachtoffers te voorkomen. Een punt hierbij is dat de nabije kusten van West-Java en Sumatra (Lampung) dichtbevolkt zijn.

Al vrij snel, in december 2018, worden hun zorgen bewaarheid en blijken hun simulaties en berekeningen behoorlijk precies.

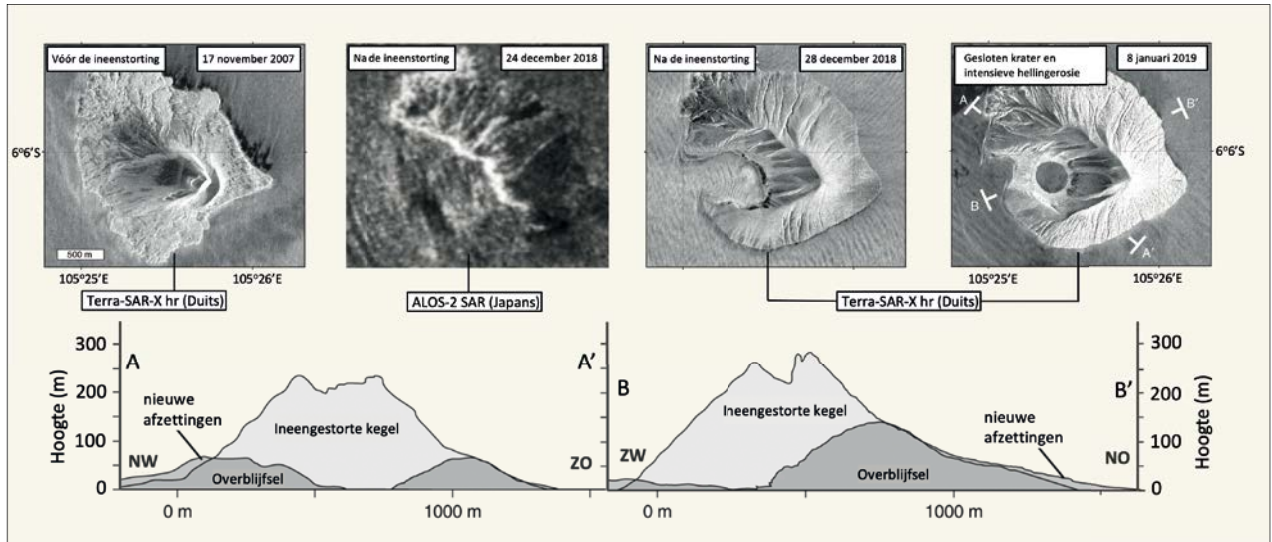
De gebeurtenissen van december 2018

Anak Krakatau is gedurende heel 2018 al actief. Vanaf juni wordt een sterk verhoogde activiteit gemeten door de thermische sensors (infrarood data) van de (NASA) satelliet-gemonteerde MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) die vrijwel dagelijks data verzamelt. Dit is de tot dan toe actiefste fase sinds de start van de systematische dataregistratie van de vulkaan in 2000 (Walter *et al.*, 2019). De geregistreerde thermische activiteit wordt vergezeld door aanhoudende erupties, voornamelijk van het *Stromboli*-type. Deze eruptiefase gaat 175 dagen door, tot de avond van 22 december, als de vulkaan wordt onthoofd door flankfalen en in elkaar zakt.

Flankfalen

Het flankfalen wordt geregistreerd in ongeëvenaard detail door satellietbeelden (Afb. 10), vooral de radarregistraties van de Duitse TerraSAR-X en de Europese SAR Sentinel 1 satellieten. Ook zijn er waarnemingen van meerdere seismische stations, naast infrageluid (laagfrequente, onhoorbare geluidsgolven) en hydroakoestische (hydrofoon) registraties van stations in de Indische Oceaan en in Australië. Uit de gepubliceerde reconstructies, zoals door Walter *et al.* (2019), Ye *et al.* (2020), Perttu *et al.* (2020) en Rose & Matoza (2021), komt het volgende beeld naar voren. Op zaterdag 22 december om 20:56 uur lokale tijd glijdt de ZW-flank van Anak Krakatau af en wordt de vulkaan onthoofd. Om 20:54 uur wordt al een eerste trilling opgevangen, wat aanleiding geeft om te veronderstellen dat er twee aardverschuivingen kort na elkaar hebben plaatsgevonden, eerst de steile ZW-flank zelf en daarna de onthoofding van de top inclusief de krater. Een ander rapport (Williams *et al.*, 2019) spreekt van een relatief beperkte aardverschuiving, gevolgd door explosieve freato-magmatische erupties (gloedwolken). Er zijn ook onderzoekers die dit eerste signaal interpreteren als het begin van in principe één en-masse aardverschuiving (Grilli *et al.*, 2019; Perttu *et al.*, 2020). Het probleem is dat door de enorme rook- en stofont-





AFBEELDING 10. | *Veranderingen in morfologie van Anak Krakatau door de flank instorting van 22 december 2018. De TerraSAR-X satelliet radarbeelden zijn in hoge resolutie (hr), het ALOS-2 SAR radarbeeld van 24 december heeft een lagere resolutie, maar suggereert dat bij het flankfalen van twee dagen daarvoor ca. 50% van het eiland is ingezakt. Na de inzakking wordt de oude tufkring weer duidelijk zichtbaar, waar de flankafglijding vermoedelijk heeft aangepikt. In januari 2019 (rechter beeld) vormt zich een gesloten krater op zeeniveau. Doorsneden A-A' en B-B' zijn geconstrueerd op basis van TanDEM-X data en camera drone data. (aangepast naar Walter et al., 2019, onder Creative Commons Attribution 4.0 International License; ALOS-2 SAR beeld uit Xiang et al., 2022, onder Creative Commons Attribution CC BY License).*

wikkeling de satellietwaarnemingen vlak na de catastrofe niet eenduidig zijn.

Freato-magmatische erupties

De beving van 20:56 uur heeft een seismische kracht (momentmagnitude) van M_w 5,1. De onthoofding en aardverschuiving hebben tot gevolg dat de vulkaan ca. 50% van zijn oppervlak verliest (Grilli *et al.*, 2019; Omira & Ramalho, 2020; Perttu *et al.*, 2020) terwijl zijn hoogte met de helft gereduceerd wordt. De krater is open aan de ZW-zijde en bevindt zich nu op zeeniveau. Er volgen zware vulkanische erupties in de dagen daarna, door de drukontlasting. De erupties zijn van het *Surtseyan*-type met een puls iedere 50 seconden en soms van wat langere duur. Deze hebben een explosief karakter onder invloed van zeewater dat in de actieve kraterpijp komt. Het zijn stoom-gedreven freato-magmatische explosies onder hevige trillingen. Met wat onderbrekingen houdt dit regime aan tot 8 januari 2019. Op 22 en 23 december worden er significante emissies SO_2 gemeten in de rookpluim boven de krater die uiteindelijk tot 16 km hoogte reikt (Afb. 11). De SO_2 wordt gelinkt aan de onthoofding van de vulkaan en is kenmerkend voor de daaropvolgende ontgassing van het hydrothermale systeem. De kraterrand is vanaf 8 januari weer gesloten en bevindt

zich aan de ZW- kant van het eiland. Zeewater kan de krater niet meer in en er breekt een rustiger periode aan. In de maanden en jaren daarna zijn er van tijd tot tijd weer de “vertrouwde” *Stromboli*-type uitbarstingen, wat tot gevolg heeft dat de vulkaan snel in hoogte groeit, maar opnieuw op asymmetrische wijze. Recente grotere erupties (die de krant hebben gehaald) dateren van april 2020, en februari en april 2022.

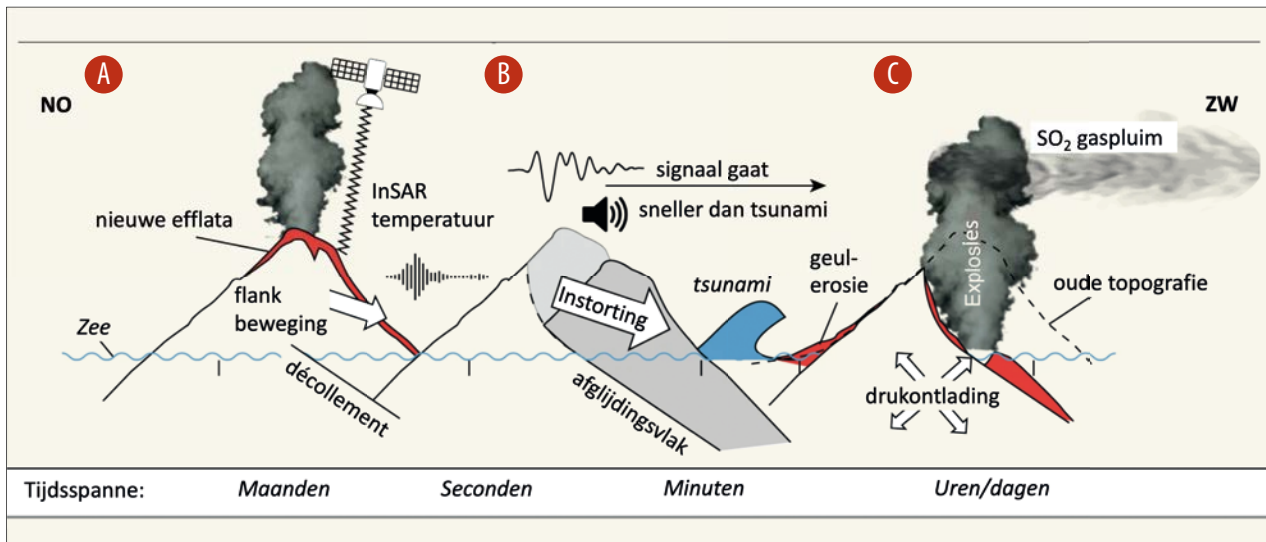
Tsunami

Ongeveer een half uur na de aardverschuiving, dus rond 21:30 uur lokale tijd, bereikt een tsunami de kusten van de Sunda Straat. Er komen 437 mensen om het leven, er zijn duizenden gewonden, tienduizenden ontheemden en er is veel materiële schade. Ooggetuigen nemen een eerste vloedgolf waar en een tweede, nog heftigere golf. In de periode na de ramp wordt onderzoek gedaan naar de dynamiek van de vloedgolf, op basis van ooggetuigenverslagen, geregistreerde getijhoogtes, inundatielengtes en oploophoogtes. Deze laatste zijn af te lezen uit de verwoestingen, markeringen van waterniveaus op de muren van huizen en uit ontstane vegetatie trimlijnen. Deze gegevens zijn belangrijk om het tsunami-gevaar beter te begrijpen en de voorspelbaarheid van een dergelijke catastrofe te verbeteren. Gebeurtenissen zoals flankfalen en partiële inzakking (*sector collapse*) van vulkanen zijn weliswaar bekend in de geologische geschiedenis, maar zijn een zeldzaamheid in de moderne instrumentele waarneming. De gebeurtenissen van 2018 bieden de gelegenheid om het mechanisme van een belangrijke vulkaan-gegenereerde tsunami te bestuderen, die een grote impact op de gemeenschap heeft.

Oploophoogtes

De oploophoogtes zijn het grootst op de (gelukkig onbewoonde) eilanden direct rondom Anak Krakatau. Op Rakata is de hoogte van de vloedgolf 25 m en de oploophoogte ca. 50 m. Gemeten peilniveaus aan de kusten van Sumatra en Java geven getijhoogtes aan van 0,32 tot 1,33 m (Omira & Ramalho, 2020) met golfsnelheden vanaf de bron van 30 tot 60 minuten. Het verschil in golfhoogtes dichtbij en verderaf van de bron, heeft te maken met het verlies aan energie van de zich verspreidende tsunami. Op het Cipenyu strand (nabij Tanjung Lesung) in West-Java worden oploophoogtes tot 13 m gemeten, op de andere kusten van Banten zijn de oploophoogtes maximaal ca. 5 m, en in Lampung maximaal 7 m (Takebatake *et al.*, 2019).





AFBEELDING 11. | Synthese van de gebeurtenissen voor, tijdens en na het flankfalen van Anak Krakatau op 22 december 2018. A. Voortekenen: toenemende hellingafwaartse massabeweging (kruip) in de Z- en ZW-flank in de maanden voorafgaand aan het flankfalen, alsmede verhevigde erupties, zoals vastgesteld met satellietbeelden (thermisch, optisch). Een naar het zuidwesten hellende proto-schuyfzone (décollement) ontwikkelt zich in de vulkaanflank, maar van afglijding is nog geen sprake. 2 Minuten voor de instorting van de flank wordt een seismische uitslag geregistreerd. B. Instorting van de vulkaanflank langs het gevormde afglijdingsvlak (failure plane), geregistreerd door een 1-2 minuten durend laagfrequent seismisch signaal. Infrageluid meetinstrumenten registreren het flankfalen vóórdat de tsunamigolven de kusten van West-Java en Sumatra (Lampung) bereiken. De flank instorting onthooft het eiland. C. Heftige freato-magmatische explosies vinden plaats direct na de ineenstorting, gepaard gaand met ontgassing (waaronder SO_2) door drukontlasting. Erosie op de vulkaanhelling slijpt diepe geulen uit in de verse as en tefra (aangepast naar Walter et al., 2019, onder Creative Commons Attribution 4.0 International License).

Early warning werkt niet

Alhoewel de gebeurtenissen door seismische en infrageluidstations in de buurt van de vulkaan en op grotere afstand worden geregistreerd, blijkt dat er geen waarschuwing is afgegeven vóór de komst van de tsunami. In de kustgebieden van Sumatra en Java langs de Sunda Straat wordt geen aardbeving gevoeld, de meeste mensen worden gewaarschuwd via de televisie, maar dat is nadat de tsunami de kusten al heeft bereikt. Er is in Indonesië een relatief hoog bewustzijn van tsunamigevaar vanwege eerdere tsunami's. Nog in september 2018 was er een eveneens "onaangekondigde" tsunami geweest die de kust van het eiland Sulawesi trof, waarbij meer dan 4000 slachtoffers te betreuren waren.

Verkeersopstoppen

De evacuatieorders worden opgevolgd, wat leidt tot verkeersopstoppen (Takabatake et al., 2019). Zelfs de volgende ochtend zijn de autoriteiten er nog niet uit of er nu sprake is geweest van een tsunami of een uitzonderlijk hoog springtij (het is volle maan die dagen). Dit heeft te maken met het specifieke karakter van de signalen, die moeilijk te interpreteren blijken. Het Indonesische tsunami waarschuwingssysteem is vooral ingesteld op hoogfrequente seismiek, die wordt geproduceerd bij aardbevingen (steen op steen), waaronder zeebevingen die een groot tsunami risico met zich meebrengen. Laagfrequente uitslagen zijn kenmerkend voor (grote) aardverschuivingen (ongeconsoleerd materiaal op ongeconsoleerd materiaal), zoals door flankfalen, maar die zijn minder frequent. De langere golflengten (dus met een lage frequentie) geven een sterk signaal te zien en wijzen op een aardverschuiving. Ook de bron kan worden vastgesteld: Anak Krakatau (Ye et al., 2020). Breedband seismische stations hebben de trillingen duidelijk geregistreerd en binnen 8 minuten na de afglijding zijn alle data beschikbaar, dus ruim voor de tsunami de kusten bereikt. Door de berekeningen te automatiseren zou het waarschuwingssysteem binnen tien minuten kunnen bepalen wat en waar de precieze bron is. Er waren dan in theorie nog 20 minuten geweest om mensen te waarschuwen en te evacueren. Het Indonesische meteorologische agentschap BMKG biedt in de loop van de dag na de ramp excuses aan voor het aanvankelijke advies kalm te blijven.

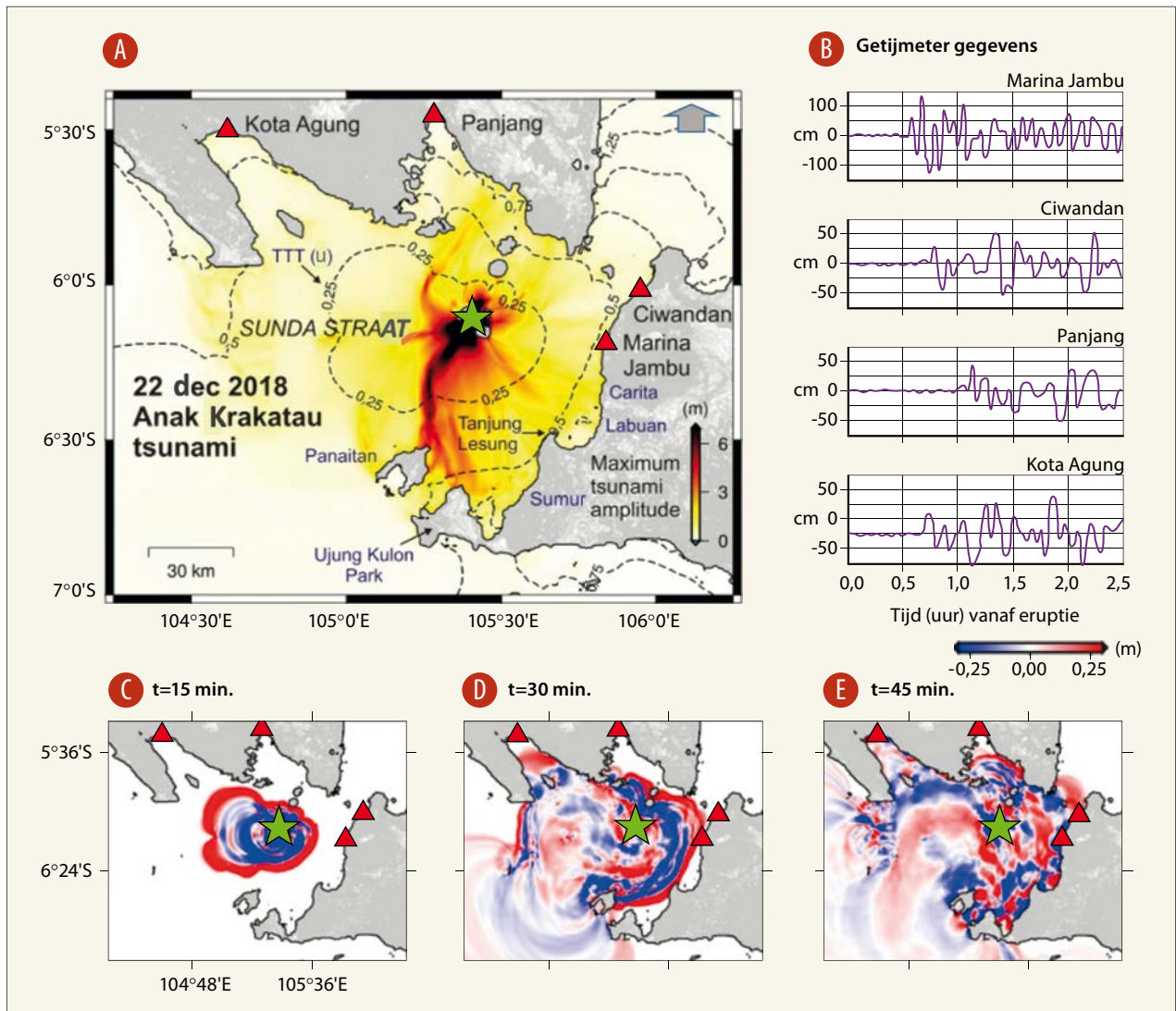
Kruip

Achteraf blijkt dat er nog andere indicaties zijn geweest van een op handen zijnde catastrofe, naast de alarmerende voorspeling van Giachetti et al. (2012). Walter et al. (2019) tonen aan op basis van InSAR Sentinel satellietbeelden dat er in de loop van 2018 al kruip- (creep-)achtige vervormingen te zien zijn van de ZW- en Z-flank van de vulkaan. InSAR staat voor *Interferometric Synthetic Aperture Radar* en is een bewezen techniek voor het meten van bewegingen op de grond op basis van het combineren van satellietbeelden. Thermische anomalieën treden later dat jaar op, de ZW- en Z-flank kleuren steeds roder op de beelden (Sentinel 2 bandcombinaties) als gevolg van de toenemende erupties, als ook de vervormingen stapsgewijs toenemen. Er is sprake van een toenemende instabiliteit van Anak Krakatau.

Simulaties

Een aantal onderzoekers probeert de Anak Krakatau tsunami te reconstrueren met behulp van numerieke simulatiemodellen van aardverschuivingen (zoals FUNWAVE, NHWAVE en AVELANCHE), digitale hoogtemodellen (zoals TanDEM en DEMNAS), seismische en akoestische





AFBEELDING 12. | A. Verspreidingsbeeld van gemodelleerde maximale tsunami golfamplitudes. De stippellijnen geven de tsunami reistijden aan in decimale schaal: 0,25, 0,5, 0,75, 1 en 1,25 uur (interval is 15 minuten). De groene ster is Anak Krakatau, als bron van de tsunami. De rode driehoeken zijn de getijdenstations. B. Getijmetingen op de kusten van Java en Sumatra. C-E. Momentopnames van de uitbreiding van de tsunami, respectievelijk na 15, 30 en 45 minuten (naar Heidarzadeh et al., 2020, onder Creative Commons Attribution 4.0 International License).

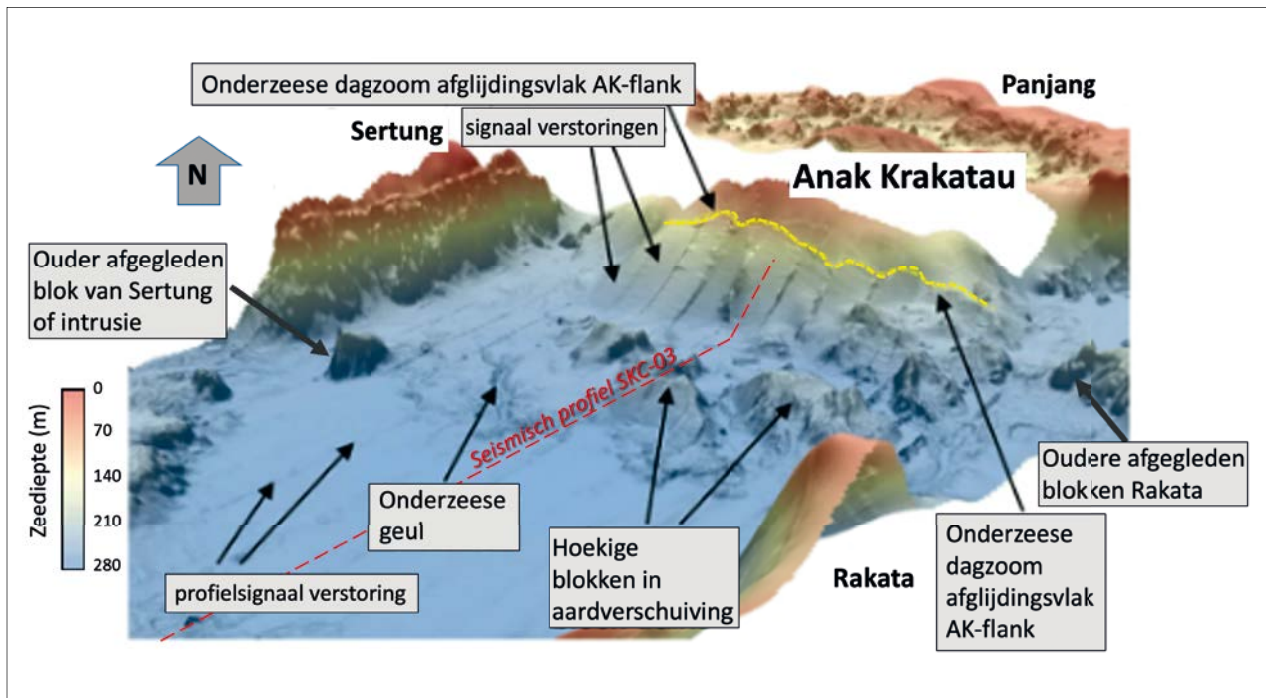
data, aangevuld met veldwerkgegevens en ooggetuigenverslagen. De reconstructies zijn meer of minder succesvol, afhankelijk van het afgeleide of aangenomen volume van de aardverschuiving en andere aannames. Grilli *et al.* (2019) komen met bevredigende resultaten op basis van een met satellietbeelden bepaald volume van de aardverschuiving van 0,22–0,30 km³. Dit leidt bij de aanname van een en-masse aardverschuiving (dus niet in fases) tot een tsunami die binnen ca. 30 minuten de kusten bereikt. Het meest waarschijnlijke scenario gaat uit van een verplaatst volume van 0,27 km³ (en een granulaire reologie van de afglijdende massa), waarbij de tijdseries en golfhoogtes goed overeenkomen met de gemeten waarden. De aankomst-

tijden van de tsunami verschillen slechts 30–100 seconden (op 32–57 minuten totaal tijd vanaf de bron). Walter *et al.* (2019) wagen zich niet aan een schatting van het volume, omdat de zeebodembtopografie na de catastrofe nog niet onderzocht is.

Twee aardverschuivingen

Omira & Ramalho (2020) rekenen met twee opeenvolgende aardverschuivingen, op basis van satellietbeelden en ooggetuigenverslagen die spreken van meer dan één vloedgolf. De eerste verschuiving betreft de oversteile ZW-flank, de tweede leidt tot de onthoofding en inzakking van de vulkaan. De eerste gebeurtenis brengt een vloedgolf in beweging van 25 m hoogte, de tweede een vloedgolf van 45 m hoogte. Het totale volume van de twee aardverschuivingen wordt geschat op 0,135 km³ en hiermee worden de geobserveerde tsunami data behoorlijk goed gereproduceerd, ondanks enkele verschillen in aankomsttijd en golfhoogte van de tsunami. Het model geeft vertragingen van 1 minuut in Kota Agung en 2,3 minuten in Ciwandan. Bij het getijdenstation Panjang (Lampung) is de berekende golfhoogte 0,15 m, versus een gemeten hoogte van 0,34 m. Dit wordt toegeschreven aan de geringere invloed van golfrefracties in de V-vormige inham aldaar (Baai van Lampung) dan het model aanneemt. Heidarzadeh *et al.* (2020) presenteren een tsunami model op basis van een *best fit* tussen observaties en simulaties van getijmetingen, oploophoogtes en inundatielengtes (Afb. 12).





AFBEELDING 13. | 3D beeld van de bathymetrie rond Anak Krakatau in 2019. Opvallend zijn de hoekige megablokken in de onderzeese aardverschuiving aan de voet van AK. De geel gestippelde lijn parallel aan de helling geeft de vermoedelijke 'dagzoom' aan van het afglijdingsvlak van de ZW-flank op ca. 150 m diepte (aangepast naar Hunt et al., 2021, onder Creative Commons Attribution 4.0 International License).

Zij komen tot een initiële tsunami golfhoogte van 100–150 m met een golflengte van 1,5–2 km. Het bijbehorende volume van de aardverschuiving wordt berekend op 0,18–0,33 km³.

Gloedwolk

Ye *et al.* (2000) schatten het volume van de aardverschuiving op ca. 0,2 km³ op basis van InSAR Sentinel satellietbeelden en uitwerking van breedband seismische gegevens. Ren *et al.* (2020) simuleren twee mogelijke triggers van de tsunami, een pyroklastische stroom (gloedwolk) gedurende 60 seconden, of een aardverschuiving. Zij gebruiken verschillende volume inschattingen; 0,2 en 0,4 km³ voor de vulkanische eruptie, en 0,1, 0,2 en 0,3 km³ (gebaseerd op Grilli *et al.*, 2019) voor de aardverschuiving (boven water deel). Wat betreft de vulkanische eruptie onderschat het model bij 0,2 km³ volume de hoogte van de vloedgolf bij Kota Agung, Marina Jambu en Ciwandan. Bij 0,4 km³ onderschat het model de tsunami-hoogte in Marina Jambu en Ciwandan. Betere resultaten worden verkregen met de aardverschuiving als trigger. Bij een volume van 0,3 km³ zijn de reistijden van de tsunami overeenkomstig de metingen. Bij dit volume zijn de golfhoogtes bij Kota Agung, Marina Jambu en Ciwandan dicht bij de gemeten hoogtes. Alleen in Panjang is de getijhoogte beduidend lager dan de meting, net als bij Omira & Ramalho (2020). Zij concluderen dat een aardverschuiving en niet een gloedwolk verantwoordelijk is geweest voor de tsunami, en dat een verplaatst volume van 0,3 km³ een goede maat is voor verdere tsunami simulatie en risicoanalyse.

Veldwerk

Esteban *et al.* (2021) voeren een grofmazig bathymetrisch onderzoek uit rond de Krakatau eilandengroep en komen tot een verplaatst volume tussen ca. 0,3 en bijna 0,6 km³. In het veld doen zij nauwkeurige metingen van de oploophoogtes op de eilanden Rakata (47–49 m), Panjang (82–83 m) en Sertung (40 m) en concluderen dat deze waarden goed overeenkomen met de simulaties van Grilli *et al.* (2019), behalve voor Panjang eiland, waar Grilli *et al.* (2019) een duidelijk lagere oploophoogte berekenen (15–25 m), door golfrefractie rond de vulkaan. Panjang eiland ligt als het ware in de luwte, NNW van Anak Krakatau en achter zijn ingezakte ZW-helling. De DEM modellen laten bijna allemaal zien

dat de top van Anak Krakatau verlaagd wordt door de inzinking van bijna 300 m naar ca. 150 m (o.a. Walter *et al.*, 2019; Esteban *et al.*, 2021).

Impact vooral lokaal

De onderzoekers stellen dat de zwaktes in hun modellen te maken hebben met de slecht bekende morfologie (en ruwheid) van de zeebodem, die van invloed is op reistijden en golfhoogtes. Ook speelt mee dat de eilanden direct rondom Anak Krakatau (Rakata, Sertung en Panjang) natuurlijke barrières zijn en een beschermende en dempende werking hebben op de tsunami in zijn verdere gang naar de kusten van Java en Sumatra. Mede door bijkomende golfinterferenties maakt dit de reconstructies lastiger. Alle simulaties bevestigen dat de impact van de tsunami voornamelijk lokaal was, beperkt tot de kusten van de Sunda Straat, en veel minder regionaal. Dit past bij de veel kortere golflengtes (en hogere golf frequenties) van tsunami's veroorzaakt door aardverschuivingen, in vergelijking tot (onderzeese) aardbevingen, zoals de verwoestende tsunami van 2004 als gevolg van een zeebeving voor de kust van Noord-Sumatra (Aceh), die alle kusten van de Indische Oceaan bereikte tot aan Oost Afrika.



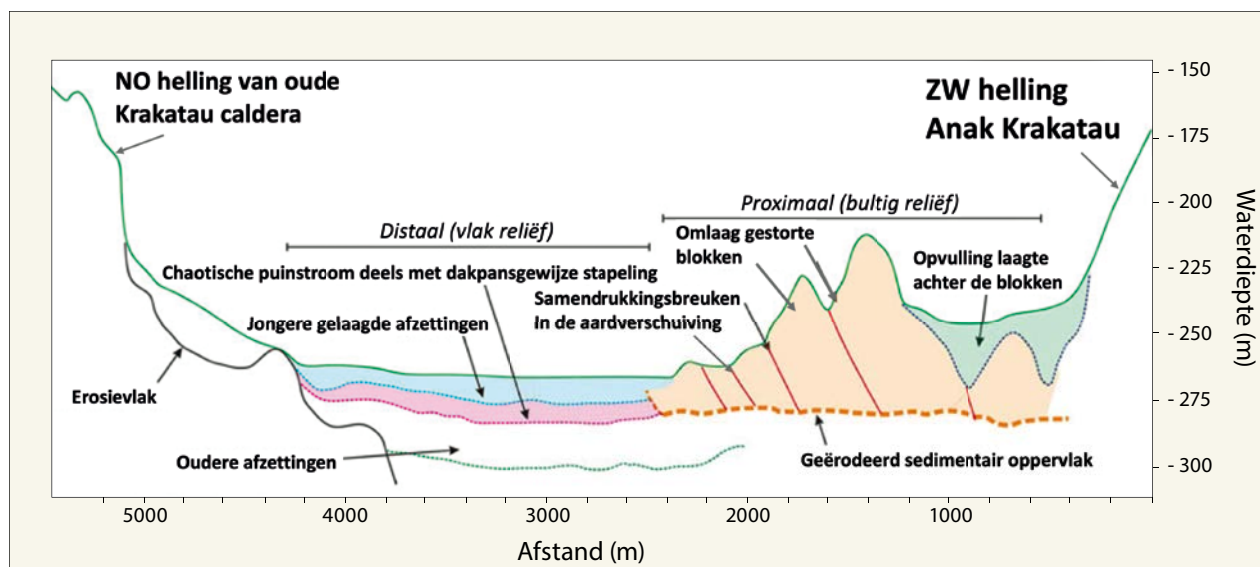
Grootschalig bathymetrisch onderzoek

Een nieuwe gedetailleerde bathymetrische kartering en ondiep seismisch onderzoek van de Krakatau eilandengroep en het caldera-bekken worden uitgevoerd in 2019 en gerapporteerd in 2021 (Hunt *et al.*, 2021; Priyanto *et al.*, 2021). De zeebodem topografie van de vorige survey uit 2017 vormt de basis en daarmee kan het volume van de aardverschuiving van 2018 vrij nauwkeurig worden bepaald. Vergelijking van de seismische gegevens van 2017 en 2019, waarvan de contrasten duidelijk verschillen, geeft inzicht in het afzettingsproces. De 2017 kartering geeft een vlakke zeebodem te zien met een afzettingssequentie van horizontale lagen. De submariene afzetting van de aardverschuiving daarboven heeft een proximaal (dichtbij) en een distaal (verderaf) deel. Het proximale deel wordt gekenmerkt door grote scheefgestelde rigide driehoekige blokken met een dikte tot ca. 70 m, die in de ondergrond steken (Afb. 13). Deze worden als inzakingsblokken (*collapse blocks*) van de vulkaan geïnterpreteerd. Het geheel geeft een bultige (*hummocky*) aanblik. Het gedeelte direct langs de kust van Anak Krakatau is opgevuld (*backfilled*) met fijnere gelaagdheid. De proximale zone strekt zich uit tot ca. 1,6 km vanaf Anak Krakatau. Het distale deel van ca. 1,4 km bestaat uit een vlakke topografie met sub-horizontale gelaagd-

heid zonder vulkanische blokken of specifieke structuren (en wordt geïnterpreteerd als turbidiet afzettingen), bovenop meer onregelmatige gelaagdheid, die als puinlawine (*debris avalanche*) wordt gezien (Afb. 14). Het distale deel reikt tot aan de ZW-zijde van het caldera-bekken, de gehele caldera wordt dus in zekere mate opgevuld. Volgens Priyanto *et al.* (2021) meet het totale oppervlak van de aardverschuiving ca. 7 km² en het totale volume van de ineenzakking ca. 0,298 km³. Dit volume moet gezien worden als maximum, omdat sedimentatie tussen 2017 en de ineenzakking eind 2018 hierin is meegenomen, alsook hernieuwde sedimentatie als gevolg van de zware erupties na de instorting. Hunt *et al.* (2021) komen tot een 'netto' volume van ca. 0,214 km³ (waarvan 0,098 km³ sub-areaal en 0,116 km³ submarien). Dit getal is vergelijkbaar met waar Grilli *et al.* (2019) en Ye *et al.* (2020) toe komen en binnen de range die Heidarzadeh *et al.* (2020) aangeven. De bathymetrie kan geen uitsluitsel geven of er nu een, twee of meerdere fases zijn geweest in het flankfalen, of zoals Williams *et al.* (2019) voorstellen, een beperkte aardverschuiving, gevolgd door heftige freato-magmatische erupties die de onthoofding van de vulkaan teweegbrengen, maar niet bijdragen aan de tsunamivorming. De volume-inschatting van 0,1 km³ van Williams *et al.* (2019) voor de aardverschuiving blijkt te klein om de gemeten tsunami-impact teweeg te brengen (Priyanto *et al.*, 2021).

Conclusie

Er was sprake van 6 maanden van helling destabilisatie voordat het flankfalen en de onthoofding van Anak Krakatau plaatsvond. In 2012 was er al een voorspelling dat het flankfalen zou optreden met mogelijk ernstige tsunami-impact tot gevolg. Toch kwam deloedgolf op 22 december 2018 als een verrassing, omdat deze niet de seismische signatuur had van een aardbeving. De vulkaan ligt op de steile rand van de oude Krakatau caldera en daardoor is zijn ZW-flank chronisch instabiel. De caldera vloer is door de gebeurtenissen van december 2018 verder opgevuld, maar de steile ZW-helling van Anak Krakatau is er nog steeds. Die zal pas stabiel worden als de caldera geheel zal zijn opgevuld. Daarvoor zijn nog vele uitbarstingen van Anak Krakatau nodig. Door hernieuwde erupties en groei zal de ZW-helling in de toekomst opnieuw oversteil raken en inzakken, getriggert door een periode van heftige erupties en met tsunami's tot gevolg. De onderzoekers pleiten voor gedetailleerde monitoring van de vulkaan, waaronder specifieke seismische, akoestische en platform (satelliet) registraties, gekoppeld aan een effectief tsunami waarschuwingssysteem en een passend evacuatieplan. Zo kunnen tijdig maatregelen worden genomen bij de aankondiging van een nieuwe catastrofe.



AFBEELDING 14. | Interpretatie van seismisch profiel SKC-03 door het Krakatau caldera-bekken met de positie van de hoekige megablokken in het proximale deel van de aardverschuiving en de bijbehorende sedimentlagen die zijn afgezet gedurende de gebeurtenissen op en vlak na 22 december 2018. Voor de positie van het profiel zie Afb. 13 (aangepast naar Priyanto *et al.*, 2021, onder Creative Commons Attribution License CC BY, en Hunt *et al.*, onder Creative Commons Attribution 4.0 International License).



REFERENTIES

- Camus, G., Gourgaud, A. & Vincent, P.M., 1987. Petrologic evolution of Krakatau (Indonesia); implications for a future activity. *J. Volc. And Geotherm. Res.* 33, 299-316. doi.org/10.1016/0377-0273(87)90020-5.
- CSR, 1983. Detailed reconnaissance land resources survey of the Sekampung Watershed, Lampung, Sumatra; Part B: Explanatory note to the land unit map scale 1:100,000. Centre for Soil Research/FAO-UNDP, Bogor, Indonesia, Technical Note 32c, 101 pp.
- Dröge, Ph., 2015. De schaduw van de Tambora, de grootste natuurramp sinds mensenheugenis. *Dwarstligger, Unieboek/Het Spectrum*, 489 pp.
- Esteban, M., Takabatake, T., Achiari, H., Mikami, T., Nakamura, R., Gelfi, M., Panalaran, S., Nishida, Y., Inagaki, N., Chadwick, C., Oizumi, K. & Shibayama, T., 2021. Field survey of flank collapse and run-up heights due to 2018 Anak Krakatau tsunami. *J. Coast. and Hydraul. Struct.* 1, 14 pp. doi.org/10.48438/jchs.2021.001.
- Fortuin, A., 1993. Op het kind van Krakatau. *Geoscoop, magazine IvA VU Amsterdam* 6, nr. 1, 7-11.
- Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K. & Ontowirjo, B., 2012. Tsunami hazard related to flank collapse of Anak Krakatau volcano, Sunda Strait, Indonesia. *Geological Society of London Special Publications* 361, 79-90. doi.org/10.1144/SP361.7.
- Grilli, S.T., Tappin, D.R., Carey, S., Watt, S. F. L., Ward, S.N., Grilli, A.R., Engwell, S.L., Zhang, C., Kirby, J.T., Schambach, L. & Muin, M., 2019. Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Sci. Rep.* 9, 11946, 13 pp. doi.org/10.1038/s41598-019-48327-6.
- GVP, 1993. Report on Krakatau (Indonesia) (Venzke, E., ed.). *Bulletin of the Global Volcanism Program Network*, 18:7. Smithsonian Institution. doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199307-262000.
- Heidarzadeh, M., Putra, P.S., Nugroho, S.H. & Rashid, D.B.Z., 2020. Field survey of tsunami heights and runups following the 22 December 2018 Anak Krakatau Volcano Tsunami, Indonesia. *Pure Appl. Geophys.* 177, 4577-4595. doi.org/10.1007/s00024-020-02587-w.
- Hunt, J.E., Tappin, D.R., Watt, S.F.L., Susilohadi, S., Novellino, A., Ebmeier, S.K., Cassidy, M., Engwell, S.L., Grilli, S.T., Hanif, M., Priyanto, W.S., Clare, M.A., Abdurrachman, M. & Udreck, U., 2021. Submarine landslide megablocks show half of Anak Krakatau islands failed on December 22nd, 2018. *Nature Commun.* 12:2827, 15 pp. doi.org/10.1038/s41467-021-22610-5.
- Neumann van Padang, M., 1933. De Krakatau voorheen en thans. *De Tropische Natuur XXII-8*, 137- 150.
- Nishimura, S., Harjono, H. & Suparka, S., 1992. The Krakatau islands: the geotectonic setting. *GeoJournal* 28, 87-98.
- Omira, R. & Ramalho, I., 2020. Evidence-calibrated model of December 22, 2018, Anak Krakatau flank collapse and tsunami. *Pure Appl. Geophys.*, 13 pp. doi.org/10.1007/s00024-020-02532-x.
- Perttu, A., Caudron, C., Assink, J.D., Metz, D., Taitpied, D. & Perttu, B., Hilbert, C., Nurfani, D., Pilger, C., Muzli, M., Fee, D., Anderson, O.L. & Taisne, B., 2020. Reconstruction of the 2018 tsunamigenic flank collapse and eruptive activity at Anak Krakatau based on eyewitness reports, seismo-acoustic and satellite observations. *Earth Planet Sci. Lett.* 541, 116268, 12 pp. doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116268.
- Priyanto, W.S., Hunt, J.E., Hanif, M., Tappin, D.R., Permana, H., Susilohadi, Cassidy, M. & Yulianto, E., 2021. Bathymetry and shallow seismic imaging of the 2018 flank collapse of Anak Krakatau. *Frontiers in Earth Science* 8, 577448, 13 pp. doi:10.3389/feart.2020.577448.
- Ren, Z., Wang, Y., Wang, P., Hou, J., Gao, Y. & Zhao, L., 2020. Numerical study of the triggering mechanisms of the 2018 Anak Krakatau tsunami: eruption or collapsed landslide? *Natural Hazards* 102, 13 pp. doi.org/10.1007/s11069-020-03907-y.
- Rose, K.M. & Matoza, R.S., 2021. Remote hydroacoustic-infrasonic detection and characterization of Anak Krakatau eruptive activity leading to, during, and following the December 2018 flank collapse and tsunami. *Bull. of Volcanology* 83:50, 17 pp. doi.org/10.1007/s00445-021-01468-x.
- Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Achiari, H., Nurisman, N., Gelfi, M., Tarigan, T.A., Kencana, E.R., Fauzi, M.A.R., Panalaran, S., Harnantaryari, A.S. & Kyaw, T.O., 2019. Field survey and evacuation behaviour during the 2018 Sunda Strait Tsunami. *Coastal Engineering J.* 61, 423-443. doi.org/10.1080/21664250.2019.1647963.
- Verstappen, H.Th., 1973. A geomorphological reconnaissance of Sumatra and adjacent islands (Indonesia). *Verhandelingen KNAG, Wolters-Noordhoff Publishing, Groningen*, 183 pp.
- Voskuil, R.P.G.A., 1983. Vormveranderingen en groei van het vulkaaneiland Anak Krakatau sinds haar ontstaan in 1928. *KNAG Geogr. Tijdschr.* XVII, 224-230.
- Walter, T.R., Haghshenas Haghighi, M., Schneider, F.M., Coppola, D., Motagh, M., Saul, J., Bebeyko, A., Dahm, T., Troll, V.R., Tilmann, F., Heimann, S., Valade, S., Triyono, R., Khomarudin, R., Kartadinata, N., Laiolo, M., Massimetti, F. & Gaebler, P., 2019. Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. *Nature Commun.* 10, 4339, 11 pp. doi.org/10.1038/s41467-019-12284-5.
- Williams, R., Rowley, R. & Garthwaite, M.C., 2019. Reconstructing the Anak Krakatau flank collapse that caused the December 2018 Indonesian tsunami. *Geology* 47, 973-976. doi.org/10.1130/G46517.1.
- Xiang, J., Guo, S., Shi, X., Yu, D., Wei, G., Wen, N., Chen, C. & Dai, K., 2022. Revealing the Morphological Evolution of Krakatau Volcano by Integrating SAR and Optical Remote Sensing Images. *Remote Sensing* 14 (6), 1399, 11 pp. doi.org/10.3390/rs14061399.
- Ye, L., Kanamouri, H., Rivera, L., Lay, T., Zhou, Y., Sianipar, D & Satake, K., 2020. The 22 December 2018 tsunami from flank collapse of Anak Krakatau volcano during eruption. *Sci. Adv.* 6, eaaz1377, 9 pp. doi:10.1126/sciadv.aaz1377.

