



Wat weten we 35 jaar na dato over de oorzaak van de dodelijke gas- eruptie van het Nyos- meer (Kameroen)?

FLIP KIPS
FLIP.KIPS@CHELLO.NL

Dit jaar is het 35 jaar geleden dat bij een plotselinge ontgassing van het vulkanische Nyosmeer in Kameroen in een 'klap' 1746 mensen stierven door verstikking. De wereld stond versteld, dit was een onbekend verschijnsel: geen lava, geen as, geen schade aan huis of haard, alleen dode mensen en dood vee. Alsof er een neutronenbom was afgegaan. Hulpacties kwamen op gang, en vulkanologen haastten zich ter plaatse om onderzoek te doen naar het fenomeen. Frank Westerman schreef er een geweldig verslag over, zijn boek 'Stikvallei' werd een bestseller. Vooral de controverse over hoe de ontgassing tot stand was gekomen, tussen de Franse delegatie onder aanvoering van de beroemde vulkanoloog Dr. Haroun Tazieff, en de Amerikaanse delegatie onder leiding van Dr. John Lockwood, was onderhoudende literatuur. Maar hoe is de ramp werkelijk ontstaan? Wat was de 'trigger'? Daarover is tegenwoordig meer bekend. Het onderwerp interesseert mij bijzonder, want het Nyosmeer lag midden in mijn karteringsgebied en de ramp vond plaats tijdens de vijf jaar (1983-1987) dat ik daar bodemkundig veldwerk deed.

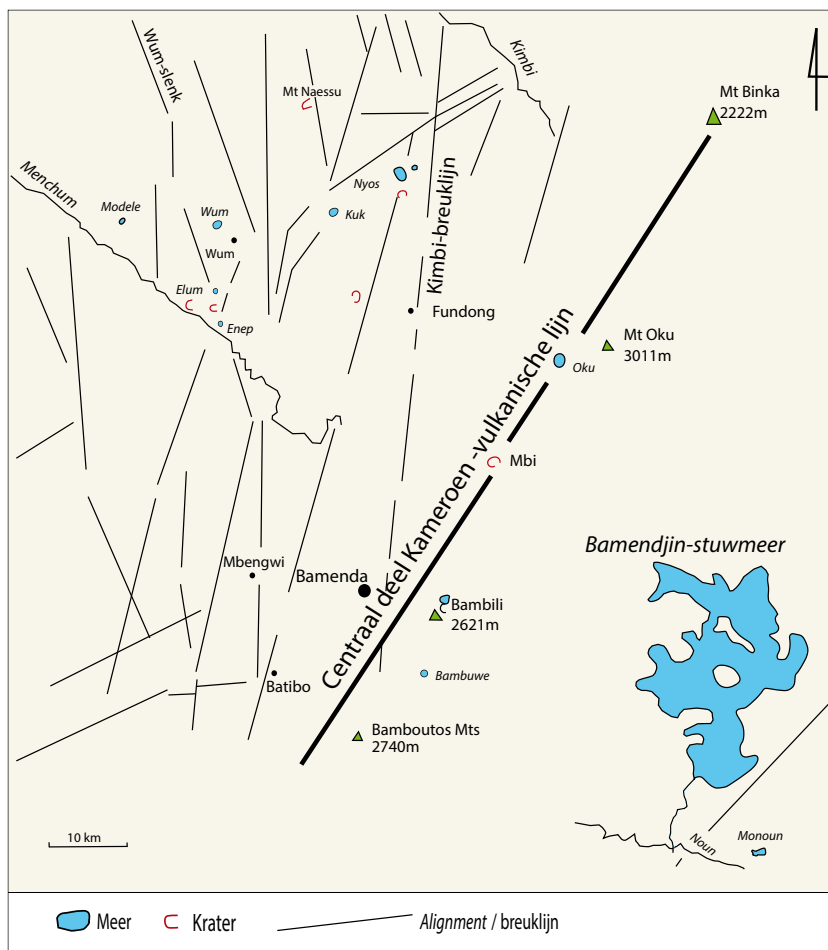


Met andere woorden, ik ken het gebied als mijn broekzak (Afb. 1). Wij waren als gezin op verlof tijdens de ramp die plaatsvond op donderdag 21 augustus 1986, even na 9 uur in de avond (het was al donker). Die week was ik in Hamburg, op een internationaal bodemkundig congres. We hadden onze vakantie in Nederland daaraan vastgeplakt. Augustus is midden in het regenseizoen, die maand valt er gemiddeld 430 mm regen in het Nyosgebied. De totale Noord-west Regio is in de regentijd bijna niet toegankelijk, er zijn nauwelijks verharde wegen. Dus is augustus de tijd om op verlof te gaan.

Het nieuws van de ramp kwam onwerkelijk over. Hoe kon dat? Ik was er in maart nog geweest, niets aan de hand. Zaterdags belde een goede vriendin, die als verslaggever bij Het Parool werkte. “North-west Province, daar werk jij toch?”, vroeg zij. Klopt. “Hoe kan zoiets gebeuren?”. Goeie vraag. Het Nyosmeer is een maar (explosiekrater) en ik herinnerde mij dat ik een kaartje had gemaakt van de breuklijnen en *alignments* in het gebied op basis van een satellietbeeld (Afb. 2). Ik vertelde haar dat vermoedelijk een kleine aardbeving de vulkanische gaseruptione had getriggert. Dat lag immers voor de hand. Die maandag stond het in de krant. Inmiddels weten we dat de oorzaak van de ramp geen vulkanisme was.

De Kameroen lijn

Kameroen wordt wel ‘mini-Afrika’ genoemd omdat het van noord naar zuid bijna alle tropische klimaat- en vegetatiezones beslaat, van de droge Sahel in het noorden bij het Tsjaadmeer, tot het tropisch regenwoud in het zuiden op de grens met Equatoriaal Guinea, Gabon en de Democratische Republiek Congo.



AFBEELDING 2. | *Breuklijnen en alignments in het Nyosgebied*
(gebaseerd op Landsat MSS satellietbeeld van november 1978).

Het westelijk deel van Kameroen tegen de grens met Nigeria is bergachtig en vulkanisch (*Western Highlands*, ook wel *Grassfields* genoemd). Het gebied maakt deel uit van de zg. Kameroen vulkanische lijn (CVL, Afb. 3), een geologische zwaktezone in de oksel van West-Afrika, met vulkanen van Cenozoïsche ouderdom en een slenk-dal (*rift valley*) met o.a. de Benue-trog. Het is het enige actief vulkanische gebied in West-Afrika en goed vergelijkbaar, qua type vulkanisme en landschap, met het Centraal Massief (Auvergne) in Frankrijk. Beide gebieden worden gekenmerkt door plateaubasalten en askegels. De Kameroenlijn is vermoedelijk ontstaan als frictiezone bij het uiteendrijven van Zuid-Amerika en Afrika (splittings van het Gondwana-continent) in het Krijt (145-66 miljoen jaar geleden).

De Kameroenlijn telt circa 40 kratermeren, waaronder het Nyosmeer. De grootste vulkaan op de lijn is Mount Cameroen (4070 m) in het zuidwesten, een strato-schildvulkaan. Andere vulkanen op de lijn zijn stratovulkanen, zoals Mount Manenguba (2396 m), Bamboutos Mountains (2740 m) en Mount Oku (3011 m).

Geologie en landschap

De bodemkartering van de Noord-west Provincie van Kameroen op schaal 1:200.000 (Kips *et al.*, 1987) was een grote opdracht van MIDENO (*North-west Development Authority*). Het gebied meet 18.000 km² en is bijna zo groot als half Nederland. Hoe karteer je zo'n immens gebied? We hebben het over een zg. *detailed reconnaissance survey*, en al snel werd duidelijk dat de geologie een goed uitgangspunt was voor de kaartenheiden. We karteerden dus in feite de oppervlakte-geologie (een bruikbare geologische basiskaart was er niet) en daarbinnen de verschillende bodemeenheden (Afb. 4).

Het Nyosmeer ligt in een sterk versneden graniet-landschap aan de rand van vlakkere en hogere basalt en trachietplateaus (>1700 m) ten zuiden van het meer (Afb. 5). Het meer is vergeleken met andere kratermeren in Kameroen relatief groot, het meet 1,6 km in de lengte (N-Z) en 1,2 km in de breedte, en beslaat een oppervlakte van ca 1,6 km². De diepte van het meer is 210 m. Het meer wordt aan de



west- en oostkant begrensd door steile kliffen, waarvan de hoogste (aan de westkant) 1214 m boven zeeniveau reikt. Het meerniveau ligt ca 125 m lager (1090 m boven zeeniveau). Aan de noordwestzijde ligt een lage smalle (45 m brede) natuurlijke dam van geconsolideerde (verkitte) pyroklastische afzettingen (as en tefra). Aan de zuidzijde loopt de oever langzaam op, en daar komen drie stroompjes in het meer uit. Het smalle, rechte en steile Nyos-Subumdal (met daarin het dorp Lower Nyos) ligt op 2 km ten noorden van het meer op een hoogte van ca 900 m. Het veel bredere dal van de Kimbirivier ligt op ca 8 km ten oosten van het meer op een hoogte van 850 m. De dalen volgen de diaklazen en breuken in de kristallijne sokkel. Aan de oostzijde heeft het Nyosmeer een tweelingmeer, het veel kleinere Njupimeer.

Geologische opbouw

De oudste gesteenten (behorend tot de Precambrische kristallijne sokkel) zijn grofkorrelige granieten en leucocratische gesteenten (licht-getinte gesteenten met minder dan 30-35% donkere mine-ralen). Ze bestaan voornamelijk uit kwarts, veldspaat, veldspatoïden en muscoviet. Daarnaast bestaat de sokkel uit fijnkorrelige migmatiet en mesotype gesteenten. Deze bestaan uit min of meer gelijke hoeveelheden licht- en donkergekleurde mineralen. De meeste van deze gesteenten zijn fijnkorrelige gneiss met muscoviet, microclien en variabele hoeveelheden plagioklaas en biotiet.

De vulkanische gesteenten in het gebied zijn plateautrachiet en plateau-basalt, ze liggen op de kristallijne sokkel. De eerste vulkanische erupties in het gebied dateren uit het Krijt, en gingen door in het Tertiair. Trachiet is een zuur vulkanisch gesteente, met een lichtgrijze kleur. Typisch is de porfierische structuur met fenocrysten van sanidine (een kaliveldspaat) in een fijnkorrelige matrix van microlieten, bestaande uit verschillende alkali-veldspaten, sanidine en albit. Daarnaast bevat het trachiet ook wat kwarts, biotiet en augiet. Trachiet komt in het gebied ook voor als aders en kleine gangen (*dykes* in het Wum-gebied) en als vulkanische pluggen (Kimbi-gebied). Het basalt heeft een basalto-andesitische samenstelling, met fenocrysten van olivijn en augiet

in een fijnkorrelige matrix van microlieten van oligoklaas, olivijn en vulkanisch glas. Het gesteente is donkergrijs tot zwart van kleur. Basalten vormen de hoge lavaplateaus in het gebied, boven 1400 m.

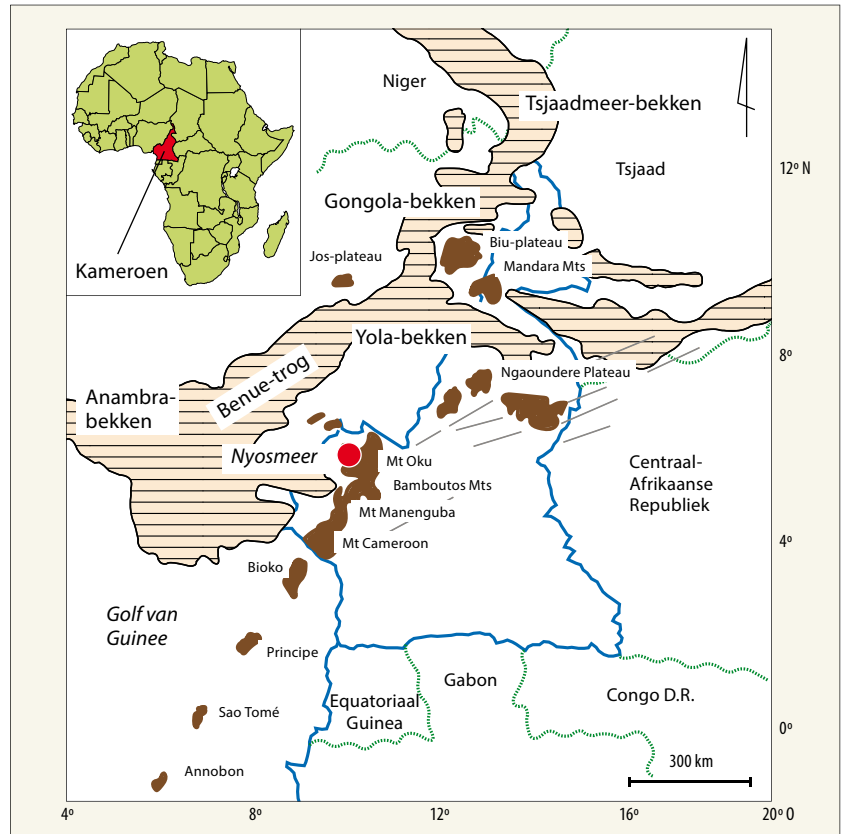
De jongere afzettingen bestaan uit vulkanische as (tefra) en scoria. Dit zijn Kwartaire formaties vanuit verschillende eruptiecentra in het gebied. Niet alleen zijn dit de bestaande meren Nyos, Kuk, Wum, Enep en Elum, maar ook de askegels in het gebied zonder kratermeer, waaronder Mount Naessu (1088 m). Grofzandige en fijn-gelaagde tefra ligt als deken over de bestaande topografie (Afb. 6). Scoria-lava met onregelmatige topografie en met veel puimfragmenten bevindt zich in het Nyos-Subumdal en het Kimbidal. De jongste formaties zijn alluviale en colluviale afzettingen in de dalen. Dit zijn grof- tot fijnkorrelige sedimenten.

Ontstaan en ouderdom van het Nyosmeer

Het Nyosmeer maakt deel uit van het Oku vulkanische veld binnen de Kame-roenlijn, en is ontstaan als maar-diatrema (explosiekrater met ondergrondse eruptiezuil) door een basaltische freatisch-magmatische eruptie (Lockwood en Rubin, 1989). De ouderdom van het meer is bepaald op 8750 ± 500 jaar op basis van gemeten ^{230}Th - ^{238}U en ^{226}Ra - ^{230}Th verhoudingen in de vulkanische gesteenten rondom het meer en vergelijking met zeer recente lava's van Mount Cameroon (Aka en Yokoyama, 2013). Het Nyosmeer is dus van Holocene ouderdom.

De ramp van 21 augustus 1986

De regen was even gestopt die avond toen de ramp plaatsvond. In korte tijd kwam een enorme hoeveelheid CO_2 -gas vrij uit het meer, geschat wordt zo'n $0,17 \text{ km}^3 \text{ CO}_2$ (Evans *et al.*, 1994). Omdat CO_2 zwaarder is dan lucht (een factor 1,54 zwaarder), zakt de gasbel naar beneden in het 200 m lager gelegen nauwe Nyos-Subumdal waar de bel zich splitst; richting Lower Nyos naar het noordoosten en verder naar Subum; en richting Cha naar het westen en verder



AFBEELDING 3. | De Kameroen vulkanische lijn (CVL) en de Benue-trog (donkerbruin: vulkanisch; beige-gearceerd: West en Centraal Afrika Rift Systeem) (samengesteld op basis van diverse bronnen).



naar Fang via het bovenstroomse dal van de Katsina Alarivier. Het gas verspreidt zich over een gebied van 29 km². Tot op 10 km van het meer vallen er slachtoffers (Tuttle *et al.*, 1987).

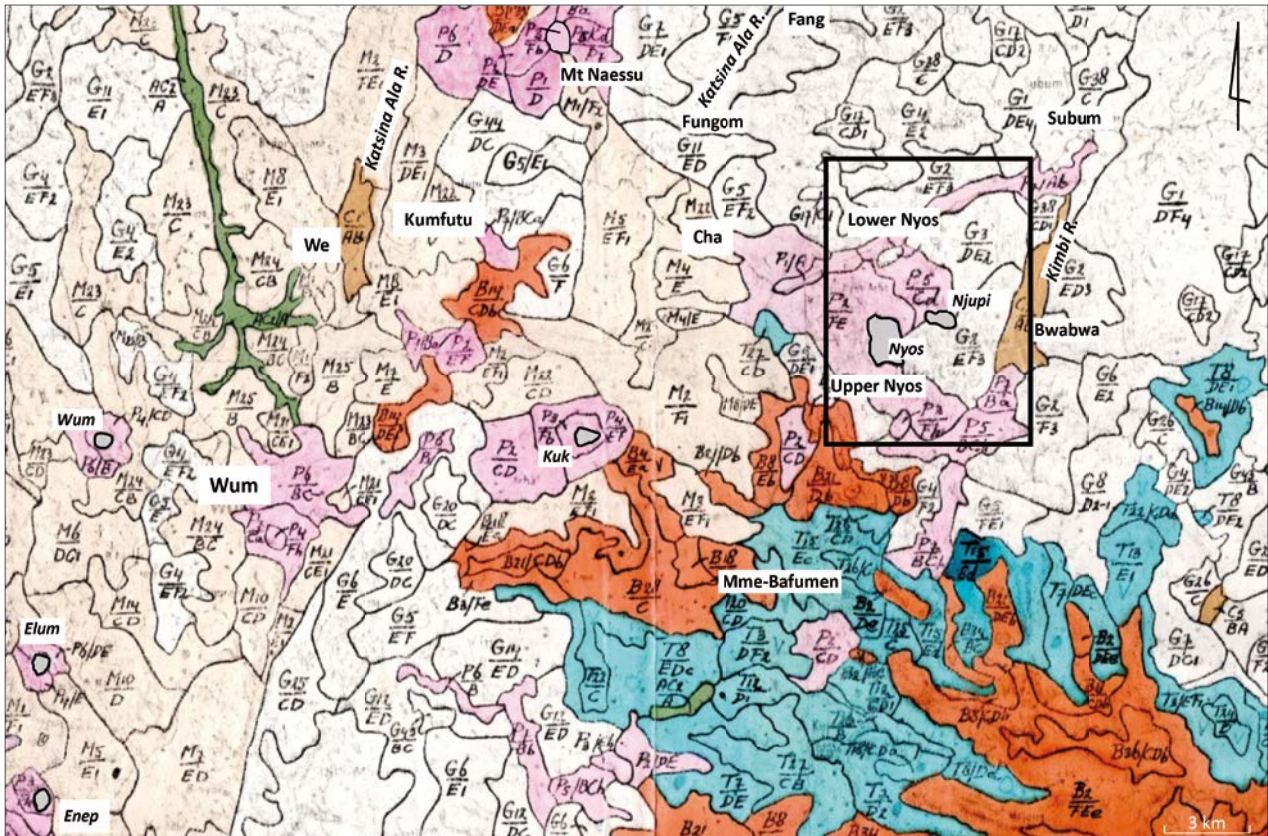
Het was marktdag geweest in Lower Nyos die donderdag, en in het dorp was het nog aardig druk, drukker dan op een gewone dag. De mensen in het dal hadden geen schijn van kans. De normale concentratie CO₂ in lucht is 0,039%, bij een concentratie van meer dan 6-10% raakt een mens in coma, bij 20% stikt een mens vrijwel direct. Het was een vrijwel geruisloze overrompeling door het gas. Slechts vier tot zes van de ca 1200 mensen in Lower Nyos overleefden de ramp. In totaal waren er 1746 doden te betreuren, er waren 874 gewonden (Afb. 7). De dorpen Lower Nyos, Cha en Subum werden het ergst getroffen. Ook vond 3500 stuks vee de dood. In totaal moesten er 4434 mensen gehuisvest worden. In allerijl werden er vluchtelingenkampen ingericht (Afb. 8).

Onderzoek van de ramp

Al gauw verzamelden zich verschillende onderzoeksteams in het gebied, onder andere uit Frankrijk, Japan, de Verenigde Staten, Italië en Engeland. De vraag was, wat was dit voor fenomeen, een vulkaanuitbarsting van alleen maar gas, zonder as of lava. De Fransen gingen uit van een ‘gewone’ freatische vulkanische eruptie (*phreatic steam eruption*), vanuit een kraterpijp onder het meer, vergelijkbaar met de gaseruption op het Diengplateau op Java in 1979 waarbij 147 mensen om het leven gekomen waren (Tazieff, 1989). Aanvankelijk waren de andere onderzoekers ook die mening toegedaan, gezien de schaal van de ramp en de brandwonden die op de slachtoffers gevonden waren. Het was hete zure vulkanische gas geweest, en de H₂S en/of SO₂ component daarin had de brandwonden veroorzaakt.

Maar al snel gingen de Amerikanen uit van koud CO₂-gas, dat zich had opgehoopt onder in het meer. Weliswaar van oorsprong magmatisch en van grote diepte (later bevestigd middels isotopen onderzoek door Nagao *et al.*, 2010),

maar het gas bevond zich al tientallen jaren en wellicht langer ‘passief’ in de onderste waterlaag (hypolimnion) van het meer. Bij een freatische eruptie zou deze waterlaag nog langere tijd warm zijn gebleven, toch minstens 40 °C. Maar dat was niet zo, vlak na de ramp was het hypolimnion 25 °C. De Amerikanen spraken van een ‘limnische uitbarsting’ (*limnic eruption*), d.w.z. een plotselinge ontgassing van het meer zelf. Een andere term die hiervoor wordt gebruikt is *lake overturn*, wat uitdrukt dat de oorspronkelijke watergelaagdheid in het meer op zijn kop gezet wordt en de hele waterkolom gemixt. Vóór de uitbarsting had zich in het hypolimnion een steeds grote hoeveelheid CO₂ opgehoopt vanuit CO₂-bronnen (mineraalwater) op de bodem van het meer. Die CO₂ was aanwezig in opgeloste vorm (als koolzuur, H₂CO₃) onder de druk van bovengelegen CO₂-arme waterlagen, die als een “dop op de fles” fungeerden (Spa Rood is immers zwaarder dan Spa Blauw). Onder hogere druk kan meer CO₂ worden opgelost. Zo ontstond langzamerhand een labiel evenwicht en was een externe verstoring genoeg om een



AFBEELDING 4. | Geologische schetskaart. Wit: graniet en leucocratische gesteenten (sokkel), licht beige: migmatiet en mesotype gesteenten (sokkel); blauw: trachiet; oranje: basalt; violet: pyroklastische afzettingen (tefra en scoria); bruin: colluviale afzettingen; groen: alluvio-colluviale afzettingen. Venster geeft het gebied van de luchtfoto aan in afbeelding 5 (uit Kips *et al.*, 1987).



AFBEELDING 6. | As en tefra afzetting op graniet-verwerings-profiel, omgeving Lower Nyos.

opstijging van dit CO₂-rijke water te bewerkstelligen. Dit opstijgende water overschreed vervolgens het verzadigingspunt van CO₂ door drukontlasting naar boven toe, waardoor CO₂-bubbels ontstonden. De Amerikanen legden het op hun manier uit: je neemt een flesje cola, je schut het flesje, doet de dop eraf en pssst, daar spuit de cola eruit door de agitatie van het mengsel en de daaropvolgende drukontlasting.

Mechanisme van de gaseruption

Middels modellering heeft men kunnen nagaan hoe de ontgassing precies heeft plaatsgevonden (Faivre Pierret *et al.*, 1992; Evans, *et al.*, 1994; Kling *et al.*, 1994; Zhang, 1996; Kling *et al.*, 2005). Veel meetgegevens van vóór de ramp waren er niet, er was een monster van het oppervlaktewater van het meer uit 1985 (Tuttle *et al.*, 1987) en een monster van een lagergelegen mineraalwaterbron op 1,5 km ten noorden van het meer uit de jaren 1970 (Le Maréchal, 1976). Vermoed wordt dat dit bronwater op aanzienlijke diepte uit het meer lekt (Evans *et al.*, 1994) en de data van deze bron worden als representatief gezien voor de chemie van het hypolimnion vóór de ontgassing. De gelaagdheid in het meer wordt gekenmerkt door verschillen in CO₂-gehalte, dichtheid en TDS (gehalte aan totaal opgeloste stof). De waarden nemen toe met de diepte, maar onregelmatig. Op ca 50 m diepte bevindt zich een chemocline (sterke verticale gradiënt in de

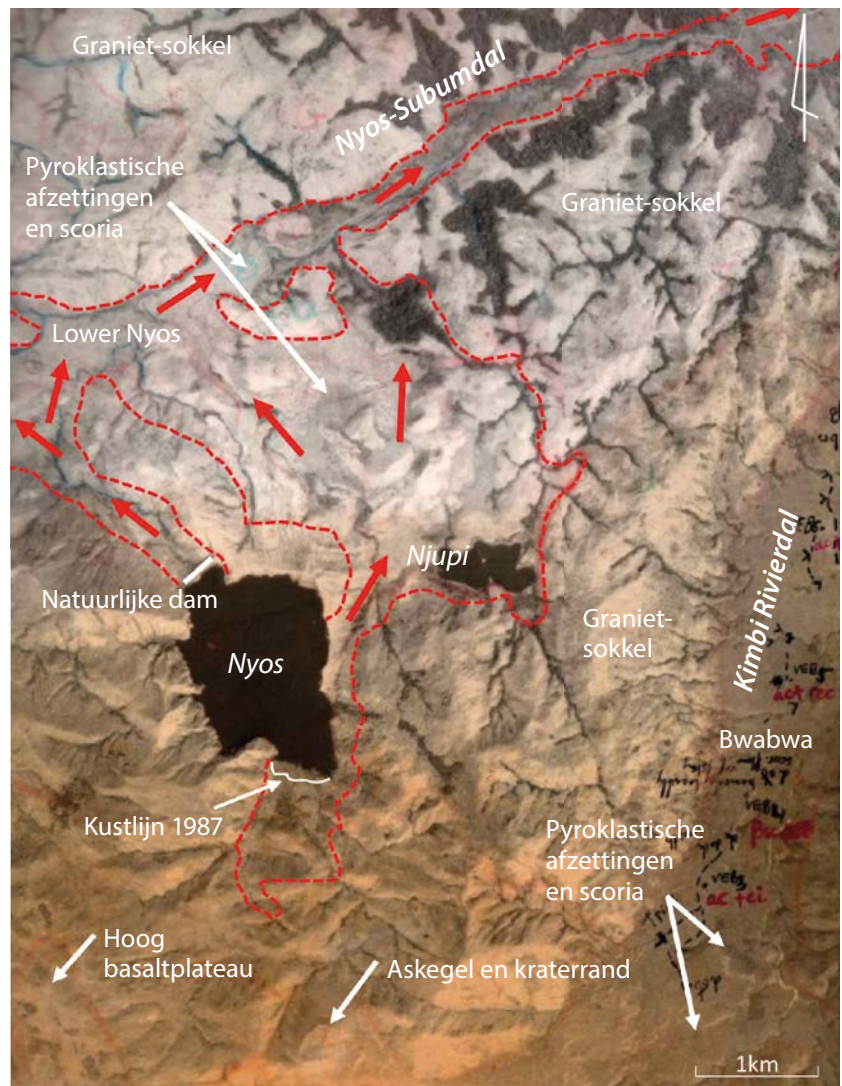
chemische samenstelling van het water), waarbij het CO₂-gehalte sprongsgewijs toeneemt en daarmee ook de dichtheid (hoe meer opgelost CO₂ hoe hoger de waterdichtheid). De chemocline gaat de verticale mixing van waterlagen tegen en zorgt zo voor een stabiele gelaagdheid. Een tweede chemocline bevindt zich op ca 180 m diepte, als begrenzing van de onderste zone met zeer hoge CO₂-concentraties.

Fasen van ontgassing

De reconstructie van de gebeurtenissen onderscheidt vier fasen I t/m IV (Afb. 9).

Fase I - Door een of andere trigger komt er een stroming op gang en wordt een deel van de bovenste chemocline ("de dop op de fles" op 50 m diepte) omhoog gedrukt. Dit heeft tot gevolg dat de waterlaag 'F' net onder deze chemocline boven zijn verzadigingspunt komt, op ca 23 m diepte (overeenkomend met een CO₂-concentratie van ca 110 mmol/kg). De schuine CO₂-verzadegingslijn, die de relatie aangeeft tussen diepte (d.w.z. waterdruk) en de maximale hoeveelheid opgelost CO₂ (en dus in feite de oplosbaarheid aangeeft per diepte) wordt hier doorbroken en dit heeft bubbelvorming (in feite precipitatie) van het CO₂ tot gevolg. De hoeveelheid gas die vrijkomt in de zo ontstane oppervlakkige circulatie is niet voldoende om een geprononceerde fontein te vormen, en dit proces verloopt daarom vrijwel geluidloos.

Fase II - Door frictie met onderliggende waterlagen verdiept de doorgaande circulatie zich en zorgt ervoor dat de waterlagen 'F' en 'A' zich mengen tot



AFBEELDING 5. | Het Nyosmeer en directe omgeving. Rode pijlen geven de verspreiding van het CO₂-gas aan; rode stippellijn geeft de begrenzing van de verspreiding aan (luchtfoto van december 1958, NSC-Ekona, Kameroen).





AFBEELDING 7. | Verlaten dorp Lower Nyoos, ghost town, november 1986, drie maanden na de ramp.



AFBEELDING 8. | Vluchtelingenkamp bij Wum, november 1986.

waterlaag 'C' vanaf het oppervlak. Doorgaande drukontlasting zorgt ervoor dat steeds diepere waterlagen omhoog en tot ontgassing (bubbelvorming) komen. Het groter wordende circulatiepatroon trekt nu water met opgelost CO_2 aan vanuit het gehele dwarsprofiel van het meer maar de ontgassing naar boven vindt plaats in een waterkolom van beperkte diameter (ca 100 m), anders zou dit systeem zichzelf niet in stand kunnen houden. Ook waterlaag 'G' op de diepe chemocline (op 180 m diepte) wordt nu in de circulatie betrokken en in de waterkolom omhooggestuwd.

Fase III - Doorgaande verdieping van de circulatie onder de diepe chemocline heeft een versnelling van de ontgassing tot gevolg, omdat nu waterlaag 'E' wordt getapt met een veel hogere CO_2 -concentratie, onder zeer hoge hydrostatische druk. Hierbij schiet in een korte periode door de enorme ontgassing een bubbelende, violente gas-waterfontein omhoog, met bijbehorende vloedgolf. De duur van deze explosieve ontgassing was vermoedelijk minder dan 1 minuut en de fontein was ten minste 100 m hoog. Deze fase met de hoogste energie ging met

veel geluid gepaard, en leidde door de enorme turbulentie tot de volledige afbraak van de diepe chemocline en mixing van de totale waterkolom van het meer. Als oorzaak voor de abrupte stop van de ontgassing wordt genoemd de heftige verstoring van het wateroppervlak en de turbulentie in het systeem wat verhinderde dat zich een stabiele fontein kon vormen. Ook wordt genoemd dat de fontein zich niet in het centrum (diepste deel) van het meer bevond, maar meer naar de rand (meerdiepte van ca 150 m), zodat het diepste deel van het meer niet of slechts ten dele getapt kon worden en de catastrofale ontgassing van dit diepste deel al snel tot stilstand kwam.

Fase IV - Omdat fase III maar zo kort duurde kon niet alle CO_2 uit de onderste waterlaag 'E' als bubbels ontsnappen. Veel van het CO_2 werd gemixt met de bovenliggende waterlaag 'C' zonder verdere ontgassing. Als onderste waterlaag blijft een deels ontgaste waterlaag 'D' over.

Verspreiding van het gas

Het opgehoopte gas van de initiële ontgassing verzamelde zich boven het meer en stroomde uiteindelijk over de *spillway* (de natuurlijke dam, het laagste punt in de kraterwand). Via het achterliggende vrij steile dal in noordwestelijke richting bereikte het gas Lower Nyoos waar volgens de weinige overlevenden niets van enig naderend onheil gehoord werd. Dit past in de geluidloze initiële fasen I en II van de ontgassing. De snelheid van de gaswolk over de *spillway* was maximaal 19 m/sec en deze snelheid zal aanzienlijk zijn afgenomen in het vlakke dal richting Subum, op 10 km van Lower Nyoos. Het kan uren geduurd hebben voor dit gas Subum bereikte (Evans *et al.*, 1994). In Subum zijn getuigenverklaringen opgetekend van een rommelend geluid uit de richting van het meer, vlak voor het gas daar arriveerde. Dit zou passen in de violente, explosieve fase van de ontgassing (fase III), vanonder de diepe chemocline. De verticale kracht van de fontein en de vloedgolf hebben de reeds gevormde gaslaag op het meer verstoord en een ervoor gezorgd dat het gas nu ook over lage punten in de kraterwand aan de noord- en oostzijde de omgeving en het Nyoos-Subumdal instroomde.



Dit is consistent met de geregistreerde doden bij het Njupi meer. Gas dat naar boven werd gestuwd in de fontein werd verdund in de atmosfeer, en dreef af richting Upper Nyos en andere dorpen in de hogere delen rondom het meer.

Risico's

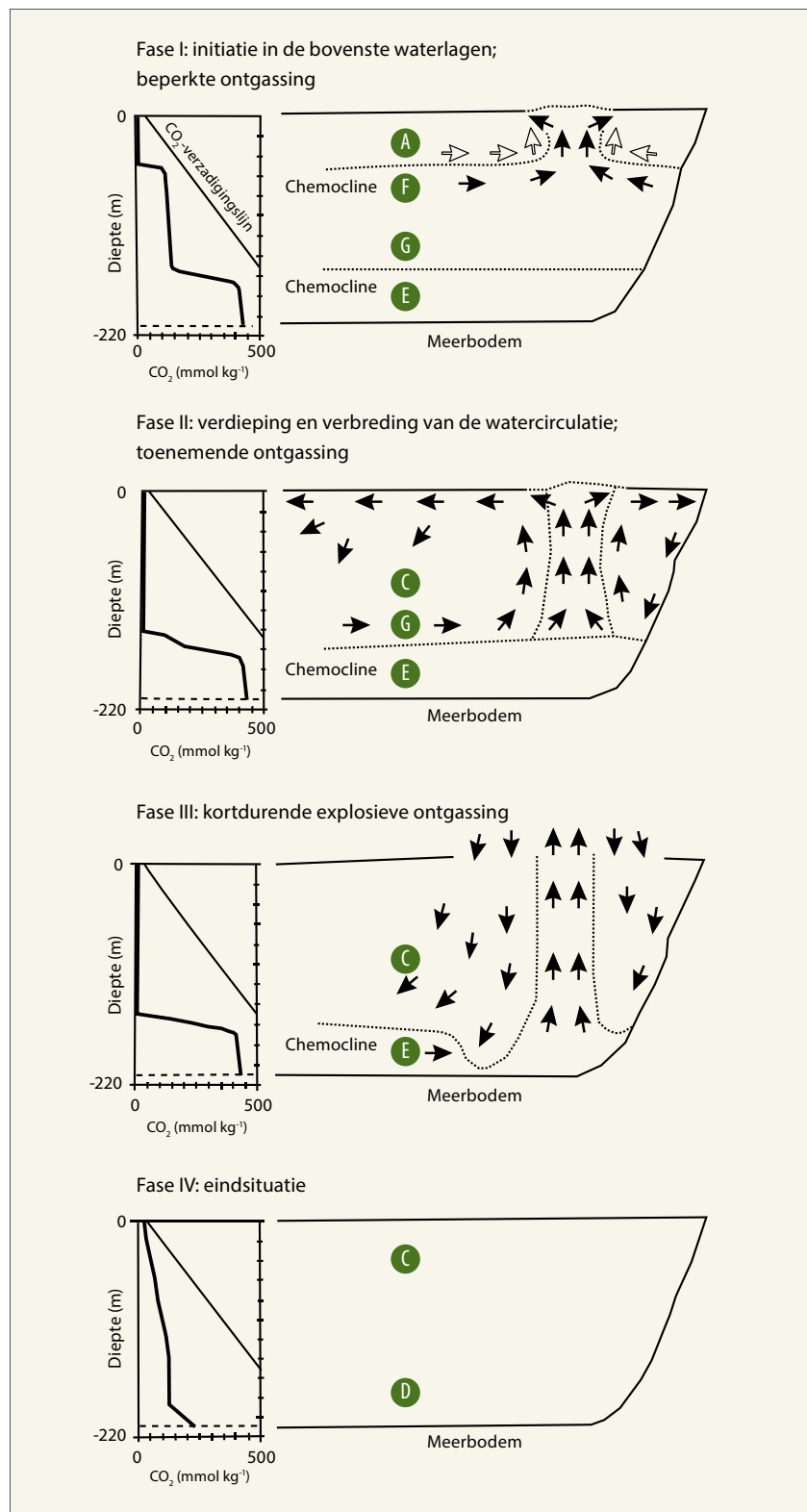
Het concept van de limnische ontgassing houdt ook in dat het meer een tijdbom is, die eens in de zoveel jaar tot 'ontploffing' komt als de gasdruk onder in het meer te hoog wordt, terwijl een freatische vulkanische eruptie meer een *one-off* gebeurtenis is, of in ieder geval veel lastiger te voorspellen. In het eerste geval, door de gasdruk in het meer te monitoren, zou een nieuwe ontgassing gemakkelijk kunnen worden voorspeld. Dit fundamentele verschil in inschatting van het risico en het mechanisme van de ramp groeide uit tot een controverse en op de grote conferentie over de Nyosramp, belegd door de Kameroense overheid in maart 1987 (MESRES, 1987; Sigvaldason *et al.*, 1989), kwam het tot een clash tussen de Franse en de Amerikaanse school, zoals prachtig beschreven door Frank Westerman in 'Stikvallei'. Dat kwam nooit meer goed, was de verwachting. Maar met het overlijden van Dr. Tazieff in 1998 had de Franse school zijn belangrijkste pleitbezorger verloren.

Een bijkomend risico diende zich aan: de twijfelachtige stabiliteit van de lage smalle natuurlijke dam aan de noordwestzijde van het meer. Het gevaar van een dambreuk zou zelfs een groter risico vormen dan ontgassing (Schmid *et al.*, 2006). Bij hoge meerstanden fungeert het laagste deel van de dam namelijk als overloop (*spillway*) en het neerstortende water achter de dam had geleid tot achterwaartse erosie en gedeeltelijke ondergraving (Lockwood *et al.*, 1988). Een dambreuk zou een gigantische vloedgolf tot gevolg hebben met overstromingen tot over de grens in Nigeria, en zou een veel hoger dodental eisen dan de gasramp.

Onderzoek van de andere kratermeren in het gebied, Njupi, Kuk, Wum, Elum en Enep wees uit dat deze geen grote hoeveelheden opgelost CO_2 bevatten, dus die vormden geen acuut risico (Kling *et al.*, 1989).

Ontgassingspijpen

Na experimenten in de jaren 1990 (Halbwachs en Sabroux, 2001) hebben de Amerikanen, de Fransen en de Kameroense overheid in een gezamenlijke inspanning in 2001 een ontgassingspijp geïnstalleerd in het meer, als een rietje in het flesje cola (Afb. 10). In 2011 en 2012 zijn er twee ontgassingspijpen bijgeplaatst teneinde het gas sneller weg te kunnen halen en als back-up. De drie



AFBEELDING 9. | Hypothetisch model van de ontgassing van het Nyosmeer in vier fasen. Letters A, C, D, E, F en G geven de verschillende waterlagen aan met specifiek CO_2 -gehalte (vereenvoudigd naar Evans *et al.*, 1994).



pijpen zijn gemaakt van PE, ze zijn elk ca 200 m lang en hebben een binnendiameter van 145 mm. De start van de geforceerde ontgassing leidde (opnieuw) tot een hoge gas-waterfontein, waarbij het meer rood kleurde (als tomatensoep) door ijzeroxides, ontstaan door beluchting van het ijzerrijke water. Met de tijd en de doorgaande drukontlasting werden de fontein lager en verdween de roodkleuring.

Ontgassing was nodig omdat duidelijk werd dat er een *recharge* van CO₂ gaande was in het meer met een alarmerende snelheid van ca 1,26 x 10⁸ mol/jaar, waardoor de CO₂-druk in het hypolimnion opnieuw opliep, tot 15,6 bar in 2001, resulterend in een CO₂-verzadiging van het water tot 97%. Er waren twijfels of de gecontroleerde ontgassing zou leiden tot een verstoren van de herstelde evenwichtssituatie van de waterlagen en dus tot een nieuwe 'spontane' ontgassing, maar dat bleek na het plaatsen van de eerste ontgassingspijp niet het geval, de waterkolom bleef stabiel en werd zelfs stabiel door het terugbrengen van de gashoeveelheden met ca 15% (Kling *et al.*, 2005). Doel was de gas *recharge* van het meer gelijke tred te laten houden met de ontgassingshoeveelheden. Uiteindelijk is door de plaatsing van de pijpen het gevaar van een cyclische ontgassing van het meer weggenomen.

Grouting

De natuurlijke pyroklastische 'stuwdam' bleek bij nader onderzoek stabiel dan gedacht (Aka *et al.*, 2008). Toch werd versteviging van de dam nodig geacht om het risico van een dambreuk hoe dan ook uit te sluiten. Daarom werd in de periode 2010-2016 een dubbele rij van 290 *jet groutings* (cementmengsel) geïnjecteerd in de dam, variërend in diepte van 20 tot 50 meter, met verankering in de granietondergrond.

Trigger van de ramp

Maar de vraag was nog altijd, wat is nu de trigger geweest die tot de agitatie van het meerwater en de ontgassing leidde. Het kon een kleine aardbeving geweest zijn, of een windvlaag en de vorming van een staande golf, koude regen, of mogelijk een aardverschuiving (*landslide*). Maar er werden geen harde bewijzen gevonden. Het dichtstbijzijnde seismische station (Kumba) had geen aardbeving geregistreerd voor of op 21 augustus, en er was geen schade opgetreden aan huizen in het gebied. Een windvlaag of valwind kon niet geregistreerd worden want er was geen weerhut in het gebied. Kusakabe *et al.* (1989) beweren dat als normale regenval de trigger zou zijn, er eerdere ontgassingingen geweest moeten zijn, maar daar waren geen aanwijzingen voor. Kling (1987) geeft aan dat in de 1980-er jaren de luchttemperaturen in het gebied gemiddeld lager waren dan de

langtijdgemiddelden, en dit zou door periodiek inzakkend relatief koud water tot een verzwakking van de watergelaagdheid en stabiliteit van de chemocline hebben kunnen leiden. In een groot samenvattend artikel opteert Kusakabe (2017) voor 'spontane' ontgassing (*spontaneous exsolution*); puur de CO₂-drukopbouw zou voldoende zijn om door de CO₂-verzadigingslijn heen te breken en bubbelvorming te krijgen. Dit zou op ca 110 m diepte gebeurd moeten zijn. Maar ook in die situatie is een externe trigger nodig, meent hij, wil het hele proces van explosieve ontgassing tot stand komen. Hij suggereert dat deze labiele situatie door CO₂-drukopbouw ongeveer eens in de honderd jaar optreedt, wachtend op een externe trigger.

Na de ramp is geconstateerd dat de opstaande wanden aan de west- en oostzijde van het meer gestript waren van vegetatie, door een met de explosieve ontgassingsfase gepaard gaande vloedgolf. Deze vloedgolf was 80 meter hoog aan de zuidzijde van het meer, getuige de vegetatietrimlijn op die hoogte ter plaatse van een uitstekende 'kaap' in het meer (Afb. 11). Aan de noordzijde van het meer was de vloedgolf 20 m hoog. Dit wijst erop dat de explosieve gas-waterfontein zich aan de zuidkant van het meer bevond. De lage oever aan de zuidzijde, waar ook de drie stroompjes in het meer uitmonden, was sterk verstoord door de vloedgolf, die hier vanwege het lage, langzaam hellende terrein ver het land op kon lopen. Voor een mogelijke massale aardverschuiving als trigger voor de ramp was geen aanwijzing gevonden, ook was er geen anomalie geconstateerd in het meerbodem-oppervlak (Kling *et al.*, 1987). Vergelijking van de beschikbare luchtfoto van het meer uit 1958 met een Landsat satellietbeeld uit 1987, leert dat de lage zuidkust zich ca 200 m heeft teruggetrokken. Dat valt goed te rijmen met de eroderende werking van de vloedgolf hier. Dit is de enige verandering in de kustlijn die ik kon identificeren, ik vond nergens anders aanwijzingen voor een teruggeweke kustlijn als teken van massabewegingen.

In een email uitwisseling (december 2020) legt Dr. William Evans mij uit dat in een situatie waarin het meer-



AFBEELDING 10. | Eerste ontgassingspijp in het Nyosmeer, geplaatst in 2001; de fontein is ca 40 m hoog, er komt geen pomp aan te pas (foto uit 2006 in noordwestelijke richting met de lage natuurlijke dam in de verte, USGS, van Wikimedia Commons).



water CO₂-verzadiging nadert, zeer kleine verticale waterbewegingen de ontgassing kunnen triggeren. Hij stuurt mij een foto van een relatief klein litteken van een verse *rockslide* (bergafglijding), dat vlak na de ramp werd geïdentificeerd in de kraterwand aan de zuidwestzijde. In een email-contact met Dr. John Lockwood (december 2020) stelt deze dat in principe iedere verstoring de gasramp kan hebben getriggerd. Alles overziend lijkt deze bergafglijding van relatief beperkte omvang de meest waarschijnlijke trigger die de stroming en circulatie in de waterlaag net onder de bovenste chemocline in gang gezet heeft, met een desastreuze kettingreactie tot gevolg. Dit is ook wat Dr. Kling en Dr. Evans suggereren in een pakkende BBC documentaire uit 2002. Een bergafglijding of vergelijkbaar hellingproces valt goed te matchen met het feit dat het die dag veel geregend had, eigenlijk regende het al dagenlang, zoals dat kan tijdens de regentijd. Dit type hellingprocessen kan dan optreden bij volledige verzadiging en verzwaring van de bodem door regenwater. Maar op een andere foto, genomen net na de ramp, zijn op twee andere plekken langs de westelijke kraterwand vergelijkbare kleine verse littekens van bergafglijdingen te zien. Het ligt dan voor de hand te veronderstellen dat deze ontstaan zijn als gevolg van de vloedgolf bij de ontgassing, en niet de trigger geweest zijn. Zo blijft de Nyosramp gedeeltelijk een mysterie.

Brandwonden?

En de geconstateerde brandwonden bij sommige slachtoffers, zouden die niet duiden op hete en zure vulkanische gassen zoals SO₂ (en afgeleid H₂SO₄), H₂S en HCl? Deze hypothese was onwaarschijnlijk want dan zou de kleding van de slachtoffers ook beschadigd zijn, wat niet het geval was. Bovendien zijn er nooit duidelijke sporen gevonden van deze gassen, ook niet in watermonsters uit het meer vlak na de ramp (Kusakabe *et al.*, 1989). Uit nader medisch onderzoek (Baxter *et al.*, 1989) bleek dat de wonden en blaren veroorzaakt waren door 'doorliggen' van in coma geraakte slachtoffers, waarbij een sterk verminderde bloedsomloop en daarmee een gebrekkige zuurstofcirculatie naar de huid, leidde tot versterving en het ontstaan van blaren. En de ver-

halen van overlevenden over de geur van rotte eieren en kruitdamp? Die worden verklaard uit het hallucinerende effect dat verhoogde CO₂-concentraties kunnen hebben.

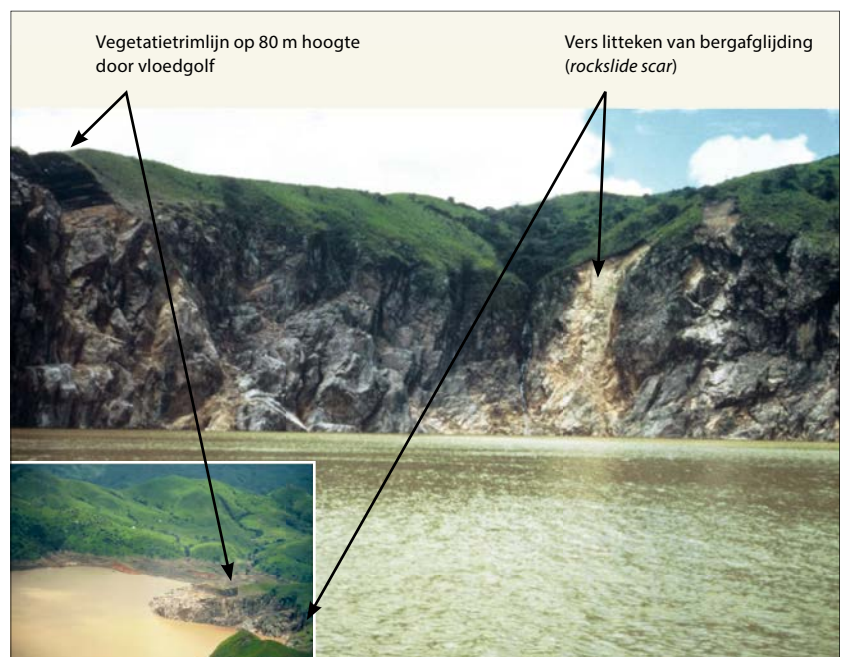
Andere gevaarlijke vulkaanmeren

Twee jaar voor de Nyosramp kwamen 37 plantagewerkers om het leven bij een vergelijkbare gasruptie van het Monounmeer, op ca 100 km ten zuiden van het Nyosmeer: ook een in oorsprong vulkanisch meer, ook in augustus, tijdens de piek van de regentijd. Veronderstelde oorzaak: een aardverschuiving (Sigurdsson *et al.*, 1987). Ongeveer tegelijkertijd met de ontgassingspijpen in het Nyosmeer zijn ook twee ontgassingspijpen in het Monounmeer geplaatst.

Hoewel het Nyos- en het Monounmeer grote bekendheid kregen vanwege hun unieke limnische ontgassingshistorie, zijn er nog andere vulkaanmeren op de wereld met dezelfde dodelijke potentie. Informatie over vulkanische meren is sinds 2013 beschikbaar in de VOLADA-database (2013). Er zijn negen CO₂-rijke vulkanische meren bekend. Daarvan is het Kivumeer, op de grens van Rwanda en de Democratische Republiek Congo, veruit het gevaarlijkst. De diepere waterlagen van dit meer bevatten naast CO₂ het explosieve CH₄ (methaan). Het CH₄-gas wordt met pijpen omhoog gebracht en wordt gebruikt als energiebron. Het Kivumeer is 1700 maal groter dan het Nyosmeer en er wonen zo'n 2 miljoen mensen langs het meer. Het meer, gelegen in de Oost-Afrikaanse rift, grenst langs de noordzijde aan een zeer actief vulkanisch gebied. In 2002 was hier een uitbarsting van de Nyiragongo (4370 m), waarbij de lava de straten van de stad Goma, aan de oever van het meer, binnenschoof, maar net niet het meer bereikte. Het is duidelijk dat dit in potentie een trigger is die kan zorgen voor *lake overturn* zoals bij het Nyos- en Monounmeer, maar dan met veel meer slachtoffers. Onderzoek van de bodemsedimenten suggereert dat het Kivu meer in de recente geologische geschiedenis meerdere ontgassingengekend heeft (Haberyan en Hecky, 1987). Het Kivumeer wordt tegenwoordig nauwgezet gemonitord.

Conclusie

De geëvacueerde bevolking uit het Nyosgebied is nog niet terug naar de dorpen. Dat heeft alles te maken met bureaucratie en het ontbreken van voldoende geld en middelen. De natuurlijke bevolkingstoename in de kampen (van 4.500 naar meer dan 20.000), en het gebrek aan landbouwgrond rond de



AFBEELDING 11. | Vegetatietrimlijn op 80 m boven het meer die de hoogte van de vloedgolf aangeeft en bergafglijding (rockslide) in het zuidwestelijke deel van de kraterwand; (foto's Dr. J. Lockwood, augustus 1986).



kampen, heeft een aantal bewoners doen besluiten toch terug te keren naar hun dorpen, alhoewel dit formeel nog verboden is. Het gasgevaar en het dambreukgevaar zijn onder controle en het meer en de dam worden permanent gemonitord. Volgens de deskundigen kunnen de ontheemden veilig terug naar hun dorpen, naar het gebied van hun voorvaderen, een lang gekoesterde wens.

Dankwoord

Dank aan Dr. William Evans, Dr. John Lockwood en Emmanuel Awah MSc. voor het delen van informatie en foto's.

LITERATUUR

- Aka, F.T. & Yokoyama, T., 2013. Current status of the debate about the age of Lake Nyos dam (Cameroon) and its bearing on potential food hazards. *Nat. Hazards* 65, 875-885.
- Aka, F.T., Yokoyama, T., Kusakabe, M., Nakamura, E., Tanyileke, G., Ateba, B., Ngako, V., Nnange, J. & Hell, J., 2008. U-series dating of Lake Nyos maar basalts, Cameroon (West Africa); Implications for potential hazards on the Lake Nyos dam. *J. Volc. Geoth. Res.* 176, 212-224.
- Baxter, P.J., Kapila, M. & Mfonfu, D., 1989. Lake Nyos disaster, Cameroon 1986; the medical effects of large scale emission of carbon dioxide? *British Med. J.* 298, 1437-1441.
- BBC World, 2002. Killer Lakes. <https://www.dailymotion.com/video/x2260gi>
- Evans, W.C., White, L.D., Tuttle, M.L., Kling, G.W., Tanyileke, G. & Mitchel, R.L., 1994. Six years of change at Lake Nyos, Cameroon, yield clues to the past and cautions for the future. *Geochem. J.* 28, 139-162.
- Faivre Pierret, R.X., Berne, P., Roussel, C., Le Guern, F., 1992. The Lake Nyos disaster: model calculations for the flow of carbon dioxide. *J. Volc. Geoth. Res.* 51, 161-170.
- Haberyan, K.A. & Hecky, R.E., 1987. The Late Pleistocene and Holocene stratigraphy and paleolimnology of lakes Kivu and Tanganyika. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 61, 169-197.
- Halbwachs, M. & Sabroux, J.-C., 2001. Removing CO₂ from Lake Nyos in Cameroon. *Science* 292, 436.
- Kips, Ph.A., Faure, P., Awah, E.T., Moukouri Kuoh, H., Sayol, R. & Tchuenteu, F., 1987. Soils, Land use and Land Evaluation of The North-West Province Cameroon. Vol. Ia: Explanatory Report to the Detailed-Reconnaissance Soil Map of the Ring-Road Area, Scale 1:200,000. Institute of Agricultural Research, National Soils Centre; Northwest Development Authority (MIDENO); FAO/UNDP Soil Resources Project Technical Report 37, 265 pp.
- Kling, G.W., 1987. Seasonal mixing and catastrophic degassing in tropical lakes, Cameroon, West Africa. *Science* 237, 1022-1024.
- Kling, G.W., Clark, M.D., Compton, H.R., Devine, J.D., Evans, W.C., Humphrey, A.M., Koenigsberg, E.J., Lockwood, J.P., Tuttle, M.L. & Wagner, G.N., 1987. The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science* 236, 169-175.
- Kling, G.W., Evans, W.C., Tanyileke, G., Kusakabe, M., Ohba, T., Yoshida, Y. & Hell, J.V., 2005. Degassing Lake Nyos and Monoun; Defusing certain disaster. *PNAS* 102, 14185-14190.
- Kling, G.W., Evans, W.C., Tuttle, M.L. & Tanyileke, G., 1994. Degassing of Lake Nyos. *Nature* 368, 405-406.
- Kling, G.W., Tuttle, M.L. & Evans, W.C., 1989. Safety of Cameroonian lakes. *Nature* 337, 215.
- Kusakabe, M., 2017. Lakes Nyos and Monoun gas disasters (Cameroon) - Limnic eruptions caused by excessive accumulation of magmatic CO₂ in crater lakes. *Geochem. Monogr. Ser.* 1, 1-50.
- Kusakabe, M., Ohsumi, T. & Aramaki, S., 1989. The Lake Nyos gas disaster: chemical and isotopic evidence in waters and dissolved gasses from three Cameroonian crater lakes, Nyos, Monoun and Wum. *J. Volc. Geoth. Res.* 39, 167-185.
- Le Maréchal, A., 1976. Géologie et Géochimie des Sources Thermominérales du Cameroun. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* 59, 176 pp.
- Lockwood, J.P., Costa, M., Tuttle, L. & Tebor, G., 1988. The potential for catastrophic dam failure at Lake Nyos maar, Cameroon. *Bull. Volcanol.* 50, 340-349.
- Lockwood, J.P. & Rubin, M., 1989. Origin and age of the Lake Nyos maar, Cameroon. *J. Volc. Geoth. Res.* 39, 117-124.
- MESRES, 1987. Rapport de la Conférence Internationale sur la Catastrophe du Lac Nyos, Yaoundé, 16-22 Mars 1987. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Yaoundé, Cameroun, 55 pp.
- Nagao, K., Kusakabe, M., Yoshida, Y. & Tanyileke, G., 2010. Noble gases in Lakes Nyos and Monoun, Cameroon. *Geochem. J.* 44, 519-554.
- Schmid, M., Halbwachs, M. & Wüest, A., 2006. Simulation of CO₂ concentrations, temperature, and stratification in Lake Nyos for different degassing scenarios. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7, 14 pp.
- Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Presser, T.S., Pringle, M.K., & Evans, W.C., 1987. Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *J. Volc. Geoth. Res.* 31, 1-16.
- Sigvaldason, G.E., 1989. International conference on Lake Nyos disaster, Yaoundé, Cameroon, 16-20 March 1987: Conclusions and recommendations. *J. Volc. Geoth. Res.* 39, 97-107.
- Tazieff, H., 1989. Mechanism of the Nyos carbon dioxide disaster of so-called phreatic steam eruption. *J. Volc. Geoth. Res.* 39, 109-116.
- Tuttle, M.L., Clark, M.D., Compton, H.R., Devine, J.D., Evans, W.C., Humphrey, A.M., Kling, G.W., Koenigsberg, E.J., Lockwood, J.P. & Wagner, G.N., 1987. The 21 August 1986 Lake Nyos Gas Disaster, Cameroon. Final Report of the U.S. Scientific Team to the Office of U.S. Foreign Disaster Assistance of the Agency for International Development, Department of the Interior, U.S. Geological Survey, open-file report 87-97, 58 pp.
- VOLADA, 2013. <https://vhub.org/resources/2822>
- Westerman, F., 2013. Stikvallei. Eerste druk, De Bezige Bij, Amsterdam, 319 pp.
- Zhang, Y., 1996. Dynamics of CO₂ driven lake eruptions. *Nature* 379, 57-59.

