

Laacher See-vulkanudbruddet og effekten på klimaet

Felix Riede, Laboratory for Past Disaster Science, Afdeling for Arkæologi og Kulturarvsstudier, Aarhus Universitet
Christian Tegner, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
Claudia Timmreck og Ulrike Niemeier, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamborg
Anja Schmidt, Departments of Chemistry og Department of Geography, Cambridge University
Clive Oppenheimer, Department of Geography, Cambridge University, og
Anke Zernack, School of Agriculture and Environment, Massey University

For omkring 13.000 år siden, hen imod afslutningen af den sidste istid, gik Laacher See-vulkanen i det vestlige Tyskland i udbrud. Udbruddet er blandt de største, vi kender siden istiden, med en udbrudssøjle af aske og gas, der sandsynligvis nåede op i 20 og måske endda 40 kilometers højde og påvirkede datidens planter, dyr og mennesker i store dele af Europa, inklusive Danmark. Vi beskriver her nye undersøgelser, der ser på udbruddets klimaeffekter ved hjælp af sofistikerede modelberegninger.

Vulkanudbrud kommer i alle størrelser – de kan være små, blide og uden store farer for os mennesker, men de kan også være kraftige, spektakulære og ødelæggende. Store, eksplosive vulkanudbrud kaster store mængder af partikler og gasser ud i atmosfæren og kan således have indflydelse på klodens klima. I Europa kender vi mest vulkanudbrud fra fjernsynet – på det seneste fra det fjerne Hawaii og Indonesien – eller nu og da fra Italien og Island.

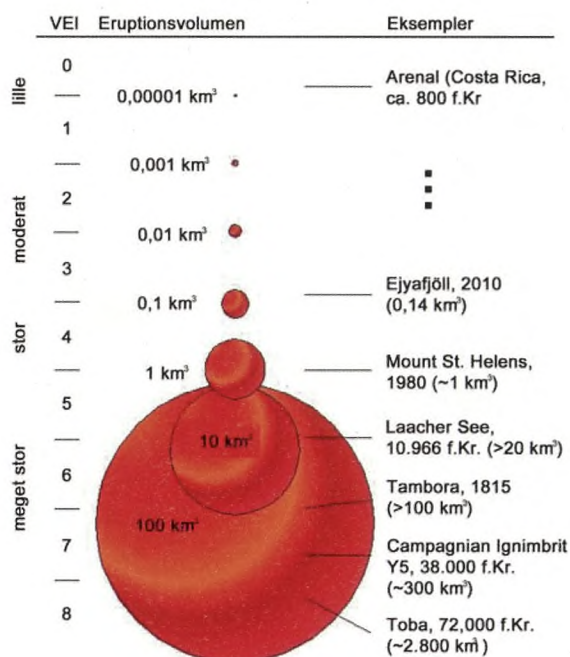
De islandske vulkanudbrud og de dertilhørende aske- og svovlpartikler, som vindene kan bringe til det europæiske kontinent, fyldte fx meget i medierne i 2010. Her var det Eyjafjallajökull-udbruddet, der lammede flytrafikken i store dele af verden. Det på trods af, at Eyjafjallajökull-udbruddet var forholdsvis begrænset, hvis man betragter mængden af vulkansk udbrudsmateriale.



Figur 1. Laacher See-vulkanen, set fra en drone. Det runde vulkankrater er i dag fyldt med vand. Afgasning af CO₂-bobler i vandet viser, at vulkanen stadig er aktiv.

For omtrent 13.000 år siden gik Laacher See-vulkanen – i dag en smuk sø i det vestlige Tyskland – i voldsomt udbrud (figur 1). Dette udbrud var mange gange større end Eyjafjallajökull. Laacher See-vulkanen er en del af Eifel-vulkanzonen, som har været aktiv i de sidste 700.000 år. Vulkanismen er her drevet af varmt opstigende kappemateriale dybt under Jordens skorpe, et såkaldt hotspot, i kombination med sprækkesystemer i den europæiske skorpe, som fx har skabt Rhin-dalen. Igennem forskellige følgevirkninger på dyr, planter og klima medførte udbruddet sandsynligvis store demografiske og kulturelle ændringer blandt datidens jægersamlerfolk i Europa og især i Skandinavien [1]: Traditionelle migrationsruter blev lukket, folk blev isolerede, og deres redskaber ændrede sig. Måske skete der endda

et tab af bue- og pileteknologien. Hvorvidt klimaet blev påvirket af Laacher See-udbruddet, og hvorvidt disse klimaændringer eventuelt også påvirkede stenalderssamfundet, er dog endnu ikke afklaret.



Figur 2. Vulkanisk eksplosivitetsindeks med angivelse af nogle kendte udbrud fra nyere, historisk og forhistorisk tid.

Vulkanudbrud måles på det såkaldte vulkanske eksplosivitetsindeks (Volcanic Explosivity Index eller VEI), som er nogenlunde magen til den mere kendte Richter-skala for jordskælv, idet den tager højde for en blanding af kvantitative målinger og kvalitative iagttagelser og desuden er logaritmisk: Et udbrud målt til VEI = 6 er således ti gange større end et udbrud målt til VEI = 5 (figur 2).

Pinatubo-udbruddet som casestudie

For bedre at kunne forstå datidens vulkanudbrud og deres mulige indflydelse på klimaet er det afgørende at starte med et robust casestudie. I 1991 eksploderede Pinatubo-vulkanen i Filippinerne (figur 3). Takket være opmærksomme videnskabsfolk, effektiv overvågning

og et hurtigt beredskab, var der kun ganske få dødsfald på trods af, at udbruddet var voldsomt (figur 4).



Figur 3. Vulkanen Pinatubo i udbrud i 1991 [2].

I forhold til vores evne til at undersøge og modellere ældre vulkanudbruds potentiale til at påvirke klimaet på lokal, regional eller endda global skala, repræsenterer begivenheden en enestående mulighed. Udbruddet blev beskrevet og dokumenteret særdeles godt, og mængden af aske og aerosoler blev fx målt løbende. Partiklernes transport igennem troposfæren (<10 km højde) og også i den overliggende stratosfære (10-50 km højde) blev fulgt – især via satellitmålinger (figur 5). Og det er netop igennem partikelinjektionen i stratosfæren, at vejr og klima på regional og global skala bliver påvirket.

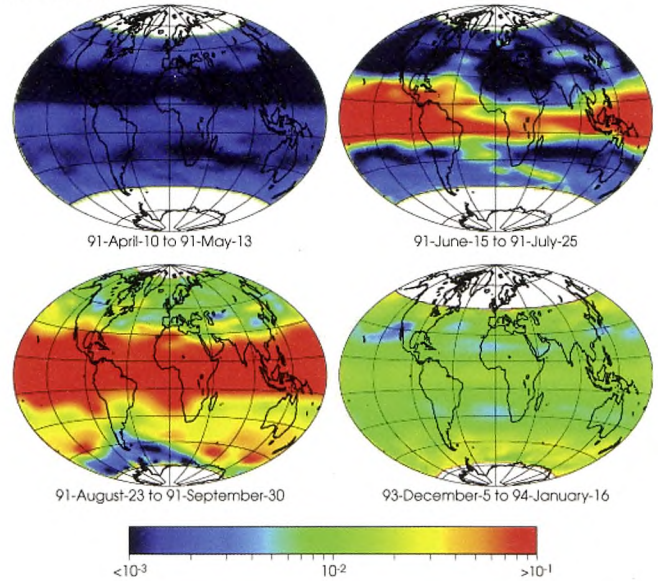


Figur 4. Ødelæggelser i kølvandet af Pinatubo-udbruddet: Tage kollapsede i hobetal, og vulkanaske blandet med regnvand førte til meget destruktive mudderstrømme, såkaldte lahars [2].

Injektionshøjden – altså hvor højt op i stratosfæren partiklerne når – samt mængden af især svovl og dens kemiske derivater er afgørende for et vulkanudbruds indflydelse på klimaet. Injektionshøjden har størst betydning, da der ikke findes skyer – og dermed heller ikke regn – i luftlagene over 10 kilometers højde. Partiklerne er derfor længe om at blive vasket ud igen, og de kan således forblive i cirkulation længe og over store afstande på global skala. Mængden af svovl (S) er afgørende, fordi svovl omdannes til svovldioxid (SO_2) og svovlsyre (H_2SO_4). Svovlsyren danner så aerosoler – små luftbårne partikler eller dråber – og disse kan sprede sig og forblive i stratosfæren i lang tid (1–3 år). Sådanne aerosoler kan have en betydelig indflydelse på solindstrålingen til jordoverfladen og påvirker både

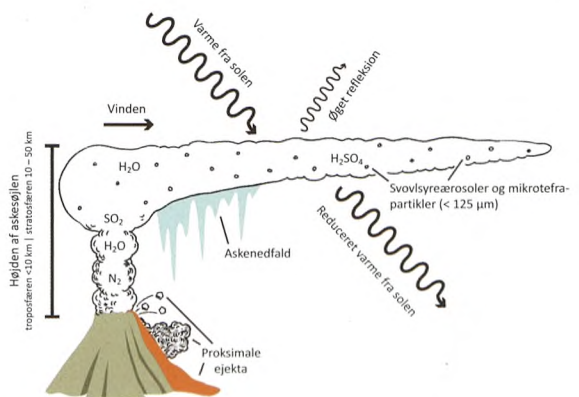
direkte og indirekte. Den direkte påvirkning skyldes, at aerosolerne spreder, reflekterer eller absorberer Solens stråler, samt reflekterer den infrarøde stråling fra jordoverfladen (figur 6).

SAGE II 1020 nm Optical Depth



Figur 5. Aerosol-partiklernes fordeling i stratosfæren i tiden efter Pinatubo-udbruddet. Bemærk den globale spredning og hvor længe partiklerne forbliver i omløb [3].

I tiden efter udbruddet kunne satellitterne måle intensiteten af dette partikeldække i stratosfæren og dets formørkelseseffekt, den såkaldte aerosol-optiske tykkelse (*aerosol optical thickness*). At partikelfanen havde en klimaeffekt, ses i globale temperaturmålinger fra årene efter Pinatubo-udbruddet, som viser, at begivenheden medførte en gennemsnitlig global nedkøling på omkring $0,25^\circ\text{C}$ i de første to år efter udbruddet [4].



Figur 6. Model over et vulkanudbruds påvirkning af klimaet.

Tilbage til Laacher See

Lad os nu vende tilbage til perioden omkring sidste istids afslutning og udbruddet af Laacher See-vulkanen. Hvis vi vil forstå vulkanens mulige påvirkning af klimaet i Europa, skal vi have robuste estimater af askesøjlets højde samt den svovlmængde, som udbruddet frigjorde. Udbruddet var meget intensivt og eksplosivt takket være en vedvarende interaktion mellem vand (grund- og regnvand) og magma (smeltet bjergartsmasse, der bliver

til lava og aske ved udbrud). Vulkanske aflejringer fra denne ene begivenhed, som varede fra nogle uger til få måneder, tårner sig i dag op i et lag på op til 50 meter omkring kratersøen (figur 7). Ledende vulkanologer – frem for alt den tyske vulkanologkoryfæ Hans-Ulrich Schmincke – anfører, at højden af askesøjlen muligvis nåede 40 km. Andre og mere konservative estimater ligger omkring de 20 km med minimumsestimater omkring 10 km. I alle tilfælde vil udbrudspartiklerne kunne sprede sig i stratosfæren.

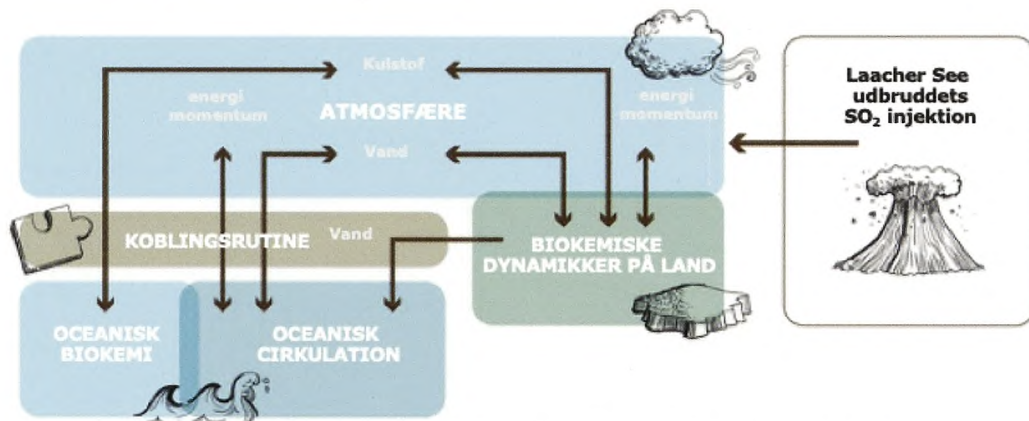


Figur 7. Laacher See-askeflejringerne i nærheden af krateret. Manden i den blå jakke er medforfatter Christian Tegner som målestok.

En nøje estimering af den dertil knyttede svovlmængde er ligeledes udfordrende. Skønt man kan måle svovlindholdet i uafgassede magmabobler fanget i afkølede vulkansten ved hjælp af petrologiske metoder, så er det kendt, at netop denne metode kraftigt underestimerer den reelle svovlmængde, der frigives. Det blev klarlagt ved Pinatubo-udbruddet.

Her målte man fx blot 0,11 megaton (Mt) af SO_2 via den petrologiske metode, mens satellitmålinger peger på, at den egentlige mængde SO_2 , der blev frigivet, var hele 17 Mt. Dette misforhold kan forklares med afgang af svovl fra magma i store kamre under vulkanen. I Laacher See-askeflejringerne indikerer den petrologiske metode, at ca. 1,9 Mt SO_2 blev frigivet og dermed et tilsvarende real-estimat på 150 Mt SO_2 eller deromkring, hvis afgangningen fra Pinatubo kan bruges som en analogi. Disse værdier kan bruges til at beregne den mulige klimapåvirkning af Laacher See-udbruddet. Modellerne for og beregningerne af globale og regionale klimadynamikker er modulære, ret komplicerede og i den grad krævende i forhold til regnekraft (figur 8). Ved Max-Planck-Institutet for Meteorologi i Hamborg har man opbygget en af de mest avancerede klimamodeller, der findes, som tager højde for ikke blot atmosfærens dynamikker, men også dynamikkerne over land og hav [5]. Og vigtigst af alt for os, er det muligt i denne model at tilføje effekten af aske og svovl fra vulkanudbrud.

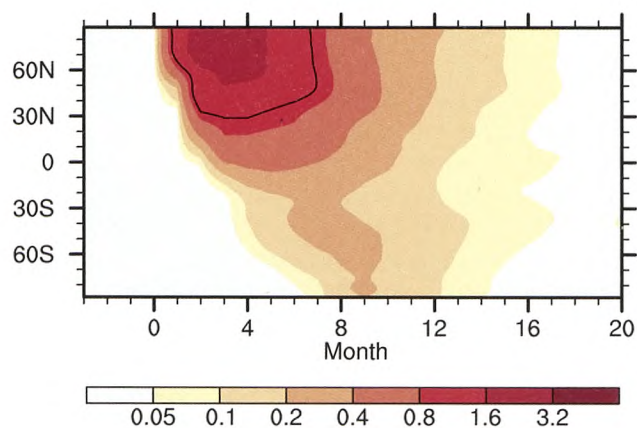
I de første nye beregninger af Laacher See-udbruddets klimaeffekt antog vi en udbrudsvarighed på kun 10 timer – udbruddet varede sandsynligvis flere måneder, dog med stærkt skiftende intensitet. Vi antog også, ganske konservativt, en askesøjle på kun 10 kilometers højde, en SO_2 -mængde på 150 Mt og et udbrudstidspunkt i begyndelsen af maj. Netop det sidste parameter kan vi faktisk estimere ganske godt, da askelaget har bevaret planterester og spor af dyr, som alle peger i retning af et udbrud i det sene forår eller tidlige sommer. Vores foreløbige beregninger antyder klart, at Nordeuropa blev mere eller mindre mørklagt – dag og nat – i tiden efter udbruddet (figur 9). Denne stærke atmosfæriske formørkelse vil utvivlsomt have påvirket temperaturen i et vist omfang. Præcist hvor stor denne effekt var, og hvilken indflydelse de enkelte parametre har for størrelsesordenen af effekterne, vil fremtidige beregninger vise. Lignende undersøgelser af vulkanudbrud de sidste knap 1500 år viser ligesom vore beregninger for Laacher See-vulkanen, at også vulkanudbrud uden for troperne kan have markante klimaeffekter [6]. Vore nye beregninger bekræfter tidligere og noget simplere udregninger, som også pegede på klimatiske effekter af Laacher See-udbruddet [7]. Vi



Figur 8. Skema over Max-Planck-Institutets klimamodel, dens modulære opbygning og sammenkobling.

forventer således, at vore kommende beregninger med mere realistiske antagelser for udbrudsperioden samt udbrudssøjlets højde, og foretaget under mere realistiske klimamodelleringsparametre, vil påvise en kraftigere klimapåvirkning end hidtil antaget.

Den formodede klimaeffekt af udbruddet kan fx ses i træer fra Centraleuropa, der er næsten fossilerede, og hvor meget tynde træringe fra denne tid tyder på dårlige vækstforhold. Udbruddet og de efterfølgende klimafluktuationer påvirkede sandsynligvis også datidens jæger-samlerfolk. I sammenspil med andre – og for det meste negative – følgevirkninger af udbruddet og askenedfaldet havde begivenheden en mangesidig indvirkning på datidens samfund. Vejret opførte sig mærkeligt, dyrene og planter blev påvirket, landskabet ændrede sig, og mørket varede i flere måneder. Vi ved fra vulkanudbrud i nyere tid, at det er både de klimatiske og økologiske såvel som de emotionelle effekter, som får folk til at reagere. Der ses almindeligvis øget stress-respons, men også i høj grad migrationer. Det matcher meget godt et scenarium, man kunne forestille sig i tiden efter udbruddet for 13.000 år siden.



Figur 9. Den aerosol-optiske tykkelse (*aerosol optical thickness*) i perioden efter Laacher See-udbruddet for et udbrud med en SO₂-mængde på 150 Mt. Den vandrette akse angiver tiden i måneder, hvor 0 markerer udbrudstidspunktet. Den lodrette akse angiver breddegrader. Desto rødere markeringen, desto mørkere er det. En værdi på 1 – markeret af den sorte streg – afspejler meget disede forhold. Ved en værdi på 4 kan Solen ikke ses midt på dagen.

Skal vi frygte et fremtidigt udbrud ved Laacher See?

Udgør Laacher See-vulkanen en reel trussel i vores tid? Vulkanen har ikke været i udbrud i lang tid, men kuldioxid (CO₂) bobler stadig op til søens overflade flere steder i krateret og tyder derfor på fortsat aktivitet. Desuden peger nye målinger af såkaldte dybe lavfrekvens-jordskælv i området på, at magma bevæger sig i kammeret under vulkankrateret. Alt dette tyder på, at det vulkanske system i Eifel-egnen endnu ikke er udsukt, men blot “slumrer”. Nye udbrud vil derfor sandsynligvis finde sted i fremtiden. Laacher See-vulkanen er dog ikke på listen over verdens farligste vulkaner, så det er nok ikke den, vi skal holde mest øje med her og nu. At store vulkaner generelt udgør en trussel er dog en kendsgerning; udbrud af størrelse

6 på eksplosivitetsskalaen eller derover vil alt andet lige medføre markante effekter på det globale klima, på økonomi, på moderne infrastruktur, som i den grad er sårbar over for askenedfald, samt på flytrafik og den dertil knyttede logistik [8]. Fra fortiden ved vi ligeledes, at vulkanudbrud og deres klimatiske effekter gennem forskellige årsagssammenhænge kan have indflydelse på geopolitiske og kulturelle processer.

Litteratur

- [1] Riede, F. (2017) “Splendid isolation. The eruption of the Laacher See volcano and southern Scandinavian Late Glacial hunter-gatherers”, Aarhus Universitetsforlag.
- [2] vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Philippines/Pinatubo/framework.html.
- [3] earthobservatory.nasa.gov/images/1510/global-effects-of-mount-pinatubo.
- [4] Schmidt, A., Mills, M.J., Ghan, S., Gregory, J.M., Allan, R.P., Andrews, T., Bardeen, C.G., Conley, A., Forster, P.M., Gettelman, A., Portmann, R.W., Solomon, S. og Toon, O.B. (2018) “Volcanic Radiative Forcing From 1979 to 2015”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, bind **123**, side 12,491–12,508.
- [5] Stier, P., Feichter, J., Kinne, S., Kloster, S., Vignati, E., Wilson, J., Ganzeveld, L., Tegen, I., Werner, M., Balkanski, Y., Schulz, M., Boucher, O., Minikin, A. og Petzold, A. (2005) “The aerosol-climate model ECHAM5-HAM”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, bind **5**, side 1125-1156.
- [6] Toohey, M., Krüger, K., Schmidt, H., Timmreck, C., Sigl, M., Stoffel, M. og Wilson, R. (2019) “Disproportionately strong climate forcing from extratropical explosive volcanic eruptions”, *Nature Geoscience*, bind **12**, side 100–107.
- [7] Graf, H.-F. og Timmreck, C. (2001) “A general climate model simulation of the aerosol radiative effects of the Laacher See eruption (10,900 B.C.)”, *Journal of Geophysical Research*, bind **106**, side 14747–14756.
- [8] Donovan, A. og Oppenheimer, C. (2018) “Imagining the Unimaginable: Communicating Extreme Volcanic Risk”, i C.J. Fearnley, D.K. Bird, K. Haynes, W.J. McGuire og G. Jolly (red.) “Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication”, Cham: Springer International Publishing, side 149–163.



Felix Riede er professor i klimaarkæologi og leder af Laboratory for Past Disaster Science ved Aarhus Universitet. Han har modtaget Danmarks Frie Forskningsfonds Sapere Aude-elitestipendium i to omgange, og senest har han modtaget et Consolidator Grant fra European Research Council (ERC).



Christian Tegner er professor i geologi ved Aarhus Universitet og er med i ledelsen af Earth System Petrology-forskergruppen.



Anja Schmidt er lektor i interdisciplinær klimamodellering i en stilling delt mellem Department of Chemistry og Department of Geography, Cambridge University.



Claudia Timmreck er leder af forskningsgruppen Stratospheric Forcing and Climate ved Max-Planck-Institut für Meteorologie i Hamborg.



Clive Oppenheimer er professor i vulkanologi ved Department of Geography, Cambridge University.



Ulrike Niemeier er forsker i Stratospheric Forcing and Climate-gruppen ved Max-Planck-Institut für Meteorologie i Hamborg.



Anke Zernack er vulkanolog og tidligere postdoc ved Aarhus Universitet. Hun er nu Research Officer i Volcanic Risk Solutions Group ved Massey University i New Zealand.

Hæderspris til Kristine Niss



Figur 1. Professor Kristine Niss, RUC.

Kif-prisen for 2018 er blevet uddelt til professor Kristine Niss ved RUC. Kif-prisen uddeles én gang om året og har skiftende fokus. I 2018 skulle prisen gives til en

kvinde, som arbejder inden for de fysiske fag (fysik, ingeniørvidenskab), og som optræder som rollemodel for andre kvinder inden for fysik.

Mette Grage, der er næstformand for Kif, fortæller, at “der var et stærkt indstillingsfelt med særdeles dygtige og velrenommerede fysikere. Valget faldt på Kristine, og hun er i sandhed en rollemodel for mange såvel kvinder som mænd: inden for sit forskningsfelt, på universitet og i sin undervisning, som populærvidenskabelig formidler på Videnskab.dk og Videnskabsfestivalen samt i Det Unge Akademi, som hun har været formand for. Desuden er hun sin opgave som rollemodel bevidst og har tidligere også lagt et stort arbejde i Netværk for Kvinder i Fysik, og hun virker til stadighed aktivt i det danske fysikermiljø. Hun er en fantastisk rollemodel med sit faglige engagement, sin nysgerrighed og sit overskud.”

Bedømmelsesudvalget bestod af en ekstern komite med professor Jan Thomsen, KU, professor Stine Korreman, AU og lederen af IP management i GEA Group, Karin Nordström Dyvelkov, som medlemmer.