

Foto: Tonga Geological Services. Tilpasset fra Wikimedia Commons (CC BY 3.0).

Hunga var aktiv fra slutningen af december 2021, men det største udbrud var den 15. januar 2022. Billedet her er taget dagen før.

Et vulkanudbrud, der ikke opførte sig som de andre

Hunga-vulkanudbruddet i 2022 gav ny indsigt i stratosfærens kemi.

Af Freja Chabert Østerstrøm,
lektor i atmosfærisk modellering,
Institut for Miljøvidenskab,
Aarhus Universitet

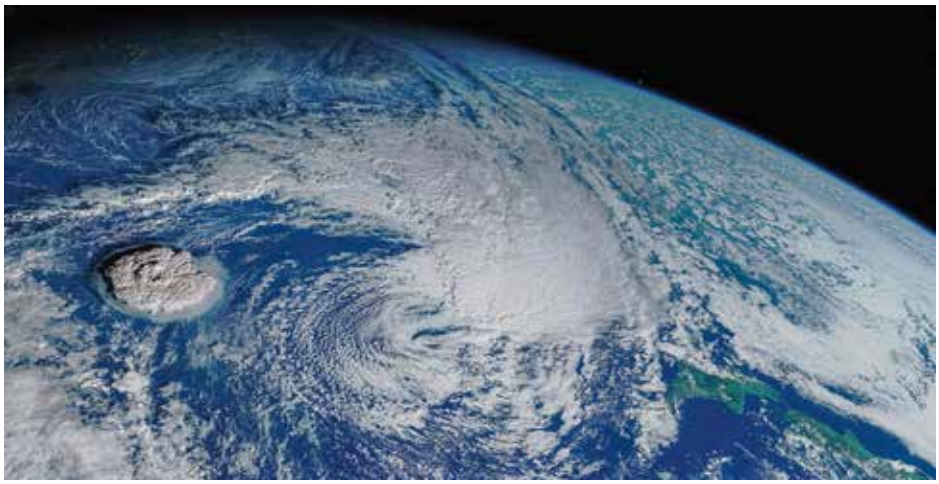
I januar 2022 producerede den undersøiske vulkan Hunga det største vulkanudbrud siden Mount Pinatubo i 1991. Modsat tidligere store vulkanudbrud var Hunga usædvanligt vandrigt og transporterede rekordstore mængder vanddamp (H_2O) højt op i stratosfæren, sammen med en mindre mængde svovldioxid (SO_2). Observationer og modelstudier viser, at vanddampen forårsagede usædvanlige ændringer i stratosfærens kemi, temperatur og cirkulation i flere år efter udbruddet, herunder midlertidig regional ozonnedbrydning og en afkøling af stratosfæren [1].

Samtidig viser Hunga, at effekterne af H_2O og sulfataerosoler ikke kan beskrives hver for sig, men skyldes et komplekst samspil mellem kemi, aerosoler og atmosfærisk cirkulation. Hunga-udbruddet demonstrerer derfor, at vandrige vulkanudbrud kan påvirke atmosfæren på fundamentalt anderledes måder end svovlrige vulkanudbrud. På trods af de hidtil usete kemiske forstyrrelser var den samlede påvirkning af den globale ozon relativt lille.

Største vulkanudbrud på Jorden siden Mount Pinatubo-udbruddet i 1991

Hunga er det største vulkanudbrud, vi har haft på Jorden i omkring 30 år. Det forrige var udbruddet af Mount Pinatubo på Fillipinerne i 1991. Hunga ligger i Stillehavet i øriget Tonga og er en undersøisk vulkan. Stratosfæren fik med Hunga-udbruddet ~150 megaton H_2O, svarende til 10 procent af hele stratosfærens vandindhold, sammen med en mindre mængde SO_2, ~0,5-1 megaton [1,2].

I stratosfæren bliver SO_2 omdannet til sulfataerosoler, efter hydrolyse til svovlsyre (H_2SO_4), hvilket er den mest ▶



NASA/NOAA, taget fra vejrsatellitten GOES-17, CC-BY-SA. Billedet af askeskyen set fra rummet den 15. januar, hvor New Zealand ses i højre side af billedet. Tropospausen (adskillelsen mellem troposfæren og stratosfæren) ses med den laveste del af skyen, der har størst omkreds.

almindelige type af aerosoler i stratosfæren. Aerosolerne observeret efter Hunga blev dannet hurtigere og blev større end forventet baseret på mængden af SO_2, en effekt af tilstedeværelsen af H_2O. Toppen af skyen fra udbruddet nåede rekordhøjt op, 58 kilometer over jordoverfladen, hvilket er i mesosfæren [1]. Så længe vi har haft satellitter, er hverken denne højde eller mængden af vand, der har nået stratosfæren, blevet observeret før. Dette understreger det usædvanlige og uventede ved dette udbrud.

Katalytisk nedbrydning af ozon

Ozonlaget i stratosfæren dannes og nedbrydes naturligt gennem en række fotokemiske reaktioner (faktaboks 1). Ozon (O_3) kan imidlertid også nedbrydes katalytisk af blandt andet klor-, brom-, hydrogen- og nitrogenoxider (ClO_x, BrO_x, HO_x, og NO_x). Et enkelt kloratom (Cl) kan gennem sådanne reaktionskæder nedbryde tusindvis af ozonmolekyler (faktaboks 1).

Denne forståelse blev afgørende for forklaringen af ozonhullet over Antarktis og førte til reguleringen af CFC-gasser gennem Montrealprotokollen. Over tid bliver CFC-koncentrationerne mindre, og dermed mindskes en kilde til halogen (Cl og Br) i atmosfæren. Vulkanudbrud, med potentiale til at udlede saltsyre (HCl) til stratosfæren sammen med SO_2, er ikke set i moderne tid, men ville kunne føre til dramatisk ozonnedbrydning på global skala [3].

Kemiske reaktioner på aerosolernes overflade

Heterogene reaktioner foregår mellem flere faser. I stratosfæren er der flere reaktioner mellem gasser og aerosoler, som spiller en vigtig rolle for ozon (faktaboks 2). Ved de ekstremt lave temperaturer, typisk for de polare områder af stratosfæren på begge halvkugler, dannes polære stratosfæriske skyer, som bidrager til sæsonbestemt nedbrydning af ozon. Disse består oftest af vandholdige dråber af salpetersyre (HNO_3) og H_2SO_4.

Reaktion 7-12 tjener både til (1) at flytte klor og brom fra passive reservoirformer til mere aktive former, der let kan fotolyseres og dermed frigive Cl- og Br-atomer, der nedbryder ozon, og (2) flytte nitrogen til den langlivede reservoirform HNO_3 og dermed reducere NO_x. De fleste heterogene reaktionshastigheder, der involverer Cl (alle undtagen 10 og 11), er ekstremt temperaturafhængige. Alle de nævnte reaktioner bliver forstærkede (dog ikke nødvendigvis til stor stratosfærisk betydning), når sulfatoverfladetætheden øges, for eksempel efter et vulkanudbrud.

Mere vand i stratosfæren ændrer kemisk sammensætning, temperatur og cirkulation

Den ekstra vanddamp fra Hunga forstærkede ClO_x- og HO_x-drevne ozonnedbrydende reaktioner og forårsagede en lokal ozonnedbrydning på omkring 5 procent inden for to uger efter udbruddet, og regional ozonnedbrydning maksimalt helt op til 14 procent [2,4,5,6]. I de følgende måneder førte udbruddet til store ændringer i fordelingen af vigtige atmosfæriske forbindelser, herunder H_2O, HCl, HNO_3, ClO og O_3.

Meget af den kemisk drevne ændring i O_3 var gennem hydrolysen af dinitrogenpentoxid (N_2O_5) på sulfataerosoler (reaktion 10), som i praksis reducerer koncentrationen af reaktivt NO_x og dermed mindsker tabet af O_3 [2,4]. Den samlede påvirkning af den globale ozon var dog relativt lille, og der blev ikke identificeret nye kemiske mekanismer eller observeret meget store ozonhuller over polerne; de observerede effekter kan forklares ved kendt atmosfærekemi, der opererede under helt usædvanlige fugtige stratosfæriske forhold (se figuren) [1,2,4].

Hunga-udbruddet ændrede mere end atmosfærekemi: Det ændrede også temperaturen og cirkulationen i stratosfæren. Den enorme mængde vanddamp, der blev ført op til den øvre atmosfære, spredte sig over hele kloden i løbet af de første år efter udbruddet. Først fra 2024 begyndte mængden af Hunga-vanddamp at falde og forventes først at have forladt stratosfæren omkring år 2029 [1,7].

Vandet forårsagede en vedvarende afkøling af stratosfæren, hvilket sænkede den stratosfæriske temperatur med cirka 0,5-1°C i flere år [1]. Denne effekt er usædvanlig, fordi store vulkanudbrud normalt opvarmer stratosfæren gennem aerosolernes refleksion af lys, hvilket resulterer i en nedkøling af jordoverfladen. Temperatureffekten på jordoverfladen efter Hunga var til gengæld ikke stor nok til at kunne adskilles fra den naturlige variation. Udbruddet forstyrrede desuden også atmosfærisk cirkulation på stor skala, især på den sydlige halvkugle, hvor ændringer i vinde og transportmønstre blev observeret. Selvom klimamodeller gengiver mange af disse cirkulationsændringer, undersøges det stadig, hvor meget af de observerede ændringer, som direkte kan tilskrives udbruddet og ikke naturlig variation [1].

H_2O og SO_2 virker ikke uafhængigt af hinanden

For at forstå processerne bag observationerne og den relative indflydelse H_2O

Faktaboks 1: Chapman-mekanismen og katalytisk ozonnedbrydning

Chapman-mekanismen:

$O_2 + h\nu \rightarrow 2\ O$ (1)

$O_2 + O \rightarrow O_3$ (2)

$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ (3)

Eksempel på katalytisk ozonnedbrydning via ClO_x:

$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$ (4)

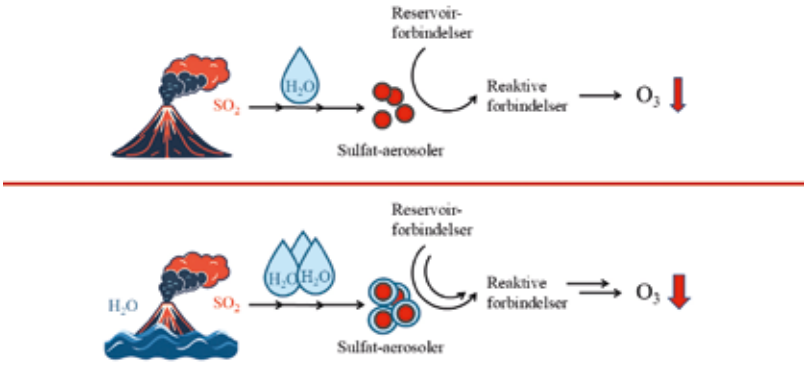
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$ (5)

Net reaction (4+5): $O_3 + O \rightarrow 2\ O_2$ (6)

Faktaboks 2: Heterogene reaktioner i stratosfæren, der er vigtige for ozon

Vigtige heterogene reaktioner på aerosoloverflader relevante for ozon i stratosfæren inkluderer:

$HCl + HOCl \rightarrow Cl_2 + H_2O$ (7)
$HCl + ClONO_2 \rightarrow Cl_2 + HNO_3$ (8)
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HNO_3$ (9)
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\ HNO_3$ (10)
$BrONO_2 + H_2O \rightarrow HOBr + HNO_3$ (11)
$HOBr + HCl \rightarrow BrCl + H_2O$ (12)



Mekanisme for ozonnedbrydning gennem heterogene reaktioner på overfladen af sulfataerosoler. Reaktionerne omdanner passive reservoirforbindelser til reaktive klor- og bromforbindelser, som efterfølgende kan deltage i katalytisk nedbrydning af ozon. Øverst den hidtidige mekanisme med vulkansk SO_2, der alene transporteres op i stratosfæren, og nederst en illustration af ændringerne i denne proces, når SO_2 udledes sammen med H_2O til stratosfæren.

og SO_2 har haft på stratosfæren efter Hunga, har vi brugt en kemi-klima-model til at undersøge, hvad der sker, når disse to gasser transporteres op i stratosfæren henholdsvis sammen og hver for sig [7].

Vi finder forskelle i både kemiske og dynamiske mekanismer fra de tre forskellige injektionsscenarier, hvor hovedkonklusionen er, at virkningerne af den kombinerede injektion af H_2O og SO_2 ikke kan forudsiges blot ved at lægge virkningerne af hver gas alene sammen. Udviklingen af både vanddamp og sulfat-aerosoler er nødvendig at inkludere for at kunne modellere begge dele. Scenariet med SO_2 alene viser de sædvanlige ændringer efter et vulkanudbrud, hvor kemien er drevet af heterogene reaktioner med ClO_x og NO_x, samt en stigning af den stratosfæriske temperatur.

Med tilførslen af vand sammen med SO_2, suppleres disse reaktioner med større ændringer relateret til HO_x-dreven gasfasekemi og et fald i temperaturen. Dette viser, at fremtidige studier af vulkanudbrud skal tage hensyn til interaktionerne mellem tilførte vulkanske gasser og ikke blot se på dem separat for at forklare de observerede påvirkninger.

E-mail:
Freja Chabert Østerstrøm:
freja@envs.au.dk

Referencer

1. APARC, 2025: The Hunga Eruption Atmospheric Impacts Report [Yunqian Zhu, Graham Mann, Paul A. Newman, William Randel (Eds.)]. APARC Report No. 11, WCRP Report No. 10/2025, DOI: 10.34734/FZJ- 2025-05242, available at https://aparc-climate.org/publications/aparc-report-no-11/.
2. ilmouth, D.M., Østerstrøm, F.F., Smith, J.B., Anderson, J.G., Salawitch, R.J. (2023). 'Impact of the Hunga Tonga volcanic eruption on stratospheric composition'. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **120**, e2301994120. doi: 10.1073/pnas.2301994120.
3. Østerstrøm, F.F., Klobas, J.E., Kennedy, R.P., Cadoux, A., Wilmouth, D.M. (2023). 'Sensitivity of stratospheric ozone to the latitude, season, and halogen content of a contemporary explosive volcanic eruption'. *Scientific Reports* **13** (6457), 6457. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32574-9.
4. Østerstrøm, F.F., Santee, M.L., Chipperfield, M.P., Evan, S., Smale, D., Wargan, K., Wilmouth, D.M., Wohltmann, I., Bednarz, E.M., Dhomse, S., Fleming, E.L., Frith, S.M., Manney, G.L., Millán, L.F., Zhang, J., Zhou, X. (2025). 'Effects of the Hunga eruption on stratospheric ozone and related trace gases'. In APARC, 2025: The Hunga Eruption Atmospheric Impacts Report [Yunqian Zhu, Graham Mann, Paul A. Newman, William Randel (Eds.)]. APARC Report No. 11, WCRP Report No. 10/2025, DOI: 10.34734/FZJ- 2025-05242, available at https://aparc-climate.org/publications/aparc-report-no-11/.
5. Zhu, Y., Akiyoshi, H., Aquila, V., Asher, E., Bednarz, E.M., Bekki, S., Brühl, C., Butler, A.H., Case, P., Chabrillat, S., Chiodo, G., Clyne, M., Falletti, L., Colarco, P.R., Fleming, E., Jörimann, A., Kovilakam, M., Koren, G., Kuchar, A., Lebas, N., Liang, Q., Liu, C.-C., Mann, G., Manyin, M., Marchand, M., Morgenstern, O., Newman, P., Oman, L.D., Østerstrøm, F.F., Peng, Y., Plummer, D., Quaglia, I., Randel, W., Rémy, S., Sekiya, T., Steenrod, S., Sukhodolov, T., Tilmes, S., Tsigaridis, K., Ueyama, R., Visioni, D., Wang, X., Watanabe, S., Yamashita, Y., Yu, P., Yu, W., Zhang, J., Zhuo, Z. (2025). 'Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Impact Model Observation Comparison (HTHH-MOC) Project: Experiment Protocol and Model Descriptions'. *Geosci. Model Dev.* **18**, 17, 5487-5512, DOI: 10.5194/gmd-18-5487-2025.
6. Bednarz, E.M., Aquila, V., Butler, A.H., Colarco, P., Fleming, E., Østerstrøm, F.F., Plummer, D., Quaglia, I., Randel, W., Santee, M.L., Sekiya, T., Tilmes, S., Wang, X., Watanabe, S., Yu, W., Zhang, J., Zhu, Y., Zhuo, Z. (2026). 'Multi-model assessment of impacts of the 2022 Hunga eruption on stratospheric ozone and its chemical and dynamical drivers'. *Atmos. Chem. Phys.* **26**, 11355-11370, DOI: 10.5194/acp-26-11355-2026.
7. Østerstrøm, F.F., Golja, C.M., Klobas, J.E., Anderson, J.G., Wilmouth, D.M. (2026). 'Attributing the stratospheric impacts from the water-rich explosive Hunga volcanic eruption of 2022'. *JGR Atmos.* **131**, e2026JD046985. https://doi.org/10.1029/2026JD046985



HUSK

Dansk Kemi kan også læses online

Få besked hver gang en ny udgave er tilgængelig.

Tilmeld dig på TechMedia.dk

Nyttig viden fra TechMedia