



Samband mellan vulkanutbrott och klimatförändringar

Analys och värdering av teorier om vulkanisk aska och
gasers påverkan på det globala klimatet

Eva Johansson

Eva Johansson
Teoretisk geoekologi 15 hp
Rapporten godkänd: 15 januari 2015
Handledare: Rolf Zale

Förord

Studien genomfördes under kursen Teoretisk geoekologi 15 hp vid Umeå universitet, institutionen för Ekologi, Miljö och geovetenskap.

Som en följd av den pågående klimatdebatten och diskussionen kring huruvida vulkanutbrott har en signifikant påverkan på det globala klimatet har jag valt att fördjupa mig i de studier som gjorts om vulkanism och eventuella efterföljande climateffekter. Eftersom jag har ett personligt intresse för vulkanism har jag särskilt fokuserat på utbrottens direkta påverkan samt vilka faktorer som styr dess effekter.

Jag vill även tacka min handledare Rolf Zale som bidragit med synpunkter och förslag på hur litteraturstudien kunnat utvecklas och förbättrats.

Connections between volcano eruptions and climate changes

Analysis and evaluation of theories on effects of volcanic ash and gases on the global climate

Abstract

This literature review analyses and discusses different theories and results regarding impact of volcanic eruptions on climate change in Earth's history. Present global warming has been attributed to anthropogenic emissions of greenhouse gases, mainly carbon dioxide, however changes in global temperatures have occurred before the onset of anthropogenic emissions. Certain prehistoric climate changes are thought to be caused by emissions of volcanic gases to the atmosphere. Many studies have investigated the connection between volcanic events and subsequent changes in global temperatures. A majority have concluded that volcanic sulfur dioxide is the main direct and indirect climate forcing gas influencing temperatures over time. Increased volcanic activity over the last 15 years is thought to be an inhibiting factor on present global warming. This is supported by evidence of past volcanic events preceding global cooling and warming periods during Holocene and prehistoric times. Further, there are indications that factors such as geographical position, season, gas composition, magnitude and duration of an eruption influences the extent of the climate forcing. Records of climate such as ice cores and tree growth rings and isotopic characterization have made it possible to identify volcano eruptions over time and determine the identity of the erupting volcano. Past and present data from these can be used to gain a better understanding of past climate changes as well as making predictions about future changes as a result volcanic eruptions. However, accuracy regarding temporal and spatial resolution of these records is of great importance for the validity of the results.

Keywords: Sulfur dioxide, volcanic gases, climate forcing, stratosphere, volcanoes

Innehållsförteckning

| | |
|---|----|
| 1 Inledning | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.1.1 Typer av vulkanutbrott..... | 1 |
| 1.1.2 Vulkaniska partiklar och gaser..... | 4 |
| 1.2 Syfte | 5 |
| 2 Material och metod | 5 |
| 3 Resultat | 5 |
| 3.1 Askteorin | 5 |
| 3.2 Koldioxid- och vattenångateorin | 6 |
| 3.3 Svaveldioxidteorin - kylande effekt | 7 |
| 3.4 Svaveldioxidteorin - värmande effekt | 9 |
| 4 Diskussion | 10 |
| 4.1 Brister i mätdata | 10 |
| 4.2 De tre teorierna och klimateffekter | 11 |
| 5 Slutsats | 13 |
| 6 Referenser | 14 |

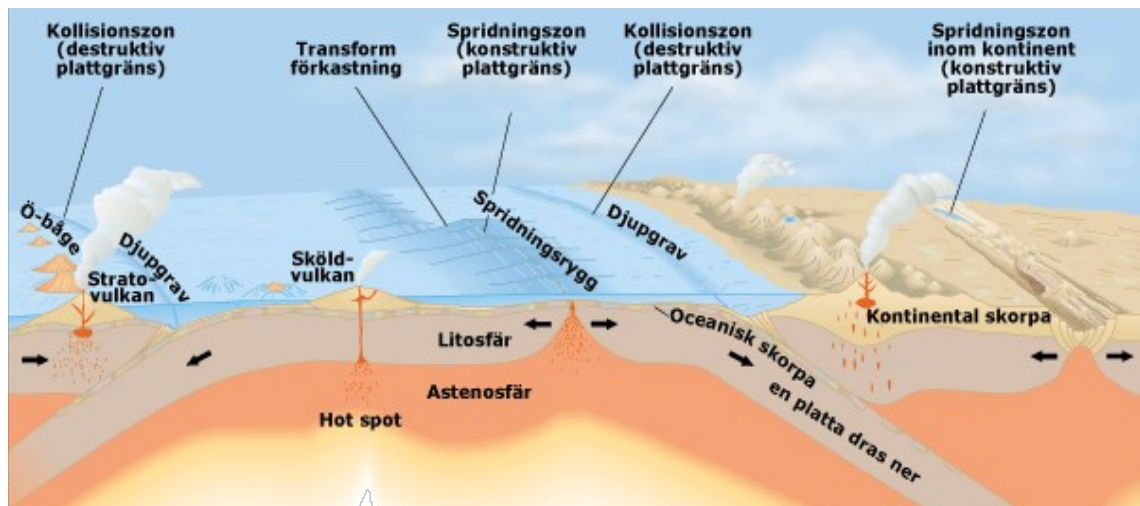
1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vulkaner har fascinerat människor i alla tider och kända utbrott som t.ex. Vesuvius utbrott 79 AD som ödelade den Italienska staden Pompeji har haft omvälvande effekter på mänskliga samhällen och kulturer. Vulkanutbrott har dock inte enbart haft en direkt effekt på mänskligheten i form av asknedfall, superheta gaser och lavaflöden utan även mer globala effekter på klimatet på jorden. Större utbrott som t.ex. Laki i Island 1783 - 84 släppte ut stora mängder partiklar och gaser som transporterades med vindar in över Europa och Nordamerika med en märkbar global klimatpåverkan i form av en temperatursänkning på 1,3 °C grader under en period av 2 - 3 år vilket ledde till mycket kalla efterföljande vintrar och missväxt (Thordarson et al. 2003). Betydligt större utbrott i förhistorisk tid tros ha haft allvarliga konsekvenser för det globala klimatet vilket bl.a. kan ha lett till massutdöd och initiering av istider (Kamo et al. 2003). Ett nutida vulkanutbrott av den storleken skulle kunna få katastrofala följder för mänskligheten. Under senare årtionden har samband mellan antropogena utsläpp av växthusgaser och en ökning av den globala temperaturen kunnat påvisas medan nutida vulkanutbrott inte haft någon dokumenterad långvarig påverkan på de globala temperaturerna. Emellertid har ökad vulkanisk aktivitet under de senaste 15 åren huvudsakligen antagits vara orsak till att den globala uppvärmningen minskat i hastighet, men dessa effekter är dock kortvariga (Santer et al. 2015).

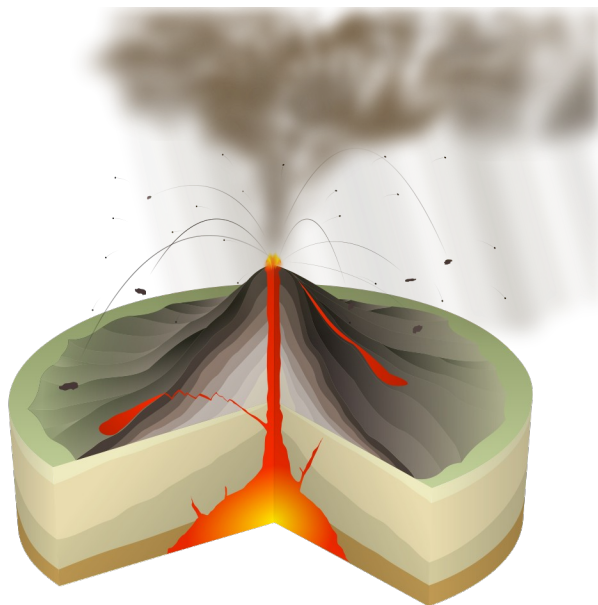
1.1.1 Typer av vulkanutbrott

En vulkan brukar definieras som en öppning eller en spricka i jordskorpan ur vilken lava, tefra och gaser frisätts. Oftast återfinns vulkaner vid gränsen mellan tektoniska plattor som kan vara av två typer, 1) kontinentalplattor vilka utgör våra kontinenter samt tillhörande kustområden och 2) oceaniska plattor som utgör havsbotten (Figur 1). Då dessa plattor rör sig uppstår s.k. subduktionszoner där en platta glider in under en annan eller spridningszoner två plattor glider isär. Vid subduktionszoner kan t.ex. en oceanplatta pressas ner under en kontinentalplatta mot den hetare manteln och smälta. Smältan blandas med havsvatten vilket leder till att densiteten minskar och smältan stiger mot skorpan genom vilken den tränger upp och vulkaner bildas (Loberg 2004). Den s.k. Eldringen i Stillahavsområdet är ett exempel på en subduktionszon (USGS 2014). Vid en spridningszon bildas sprickor i skorpan då plattorna glider isär och genom dessa tränger magma upp. Island är ett exempel på hur land kan bildas genom vulkanisk aktivitet orsakad av rörelser i en spridningszon, den s.k. Mittatlantiska ryggen (USGS 1999).



Figur 1. De processer som pågår i jordskorpan som en följd av de tektoniska plattornas rörelser. Spridningszonen och subduktionszonen (här kollisionszon) är områden där vulkanutbrott kan ske (SGU 2015).

Den mest kända huvudtypen av vulkan är stratovulkaner som oftast har ett konformat utseende och byggs upp av lavaflöden, asknedfall och andra typer av vulkaniskt material i kontinuerliga lager (Figur 2). Dessa kan bli mycket höga som t.ex. Nevados Ojos del Salado (Sydamerika) vars nuvarande höjd är 6887 m (Smithsonian 2013). Utbrotten hos stratovulkaner är ofta explosiva vilket innebär att då det uppbyggda trycket inne i vulkanen frigörs slungas gaser och andra typer av vulkaniskt material s.k. terfa upp i atmosfären. Ett mått på hur explosivt ett utbrott är graderas enligt en logaritmisk skala, VEI (Vulkaniskt Explosivitetets Index) (se Tabell 1), mellan 0 och 8 som beskriver mängden aska och annat



Figur 2. En stratovulkan uppbyggd av vulkaniskt material i olika lager (grått) och med en magmakammare (rödorange) samt en magmakanal (röd) (Wikipedia 2007).

vulkaniskt material som slungas ut samt hur högt utbrottsmolnet når i atmosfären. Rent teoretiskt skulle VEI-skalan kunna överstiga värdet 8, men inget utbrott av sådan storlek har ännu dokumenterats. Eyafjallajökuls utbrott 2010 hade ett VEI på 4 vilket innebär att mängden utkastat material ligger mellan 0,1 - 1 km³ och nådde en höjd på 4 till 10 km upp i atmosfären. Den här typen av utbrott sker i snitt vart 10:e år, men det kan variera. Större utbrott som t.ex. Mt Pinatubos utbrott 1991 har ett VEI på 6 vilket motsvarar 10-100 km³ utkastat material och en molnhöjd på 32km. Än större utbrott som t.ex. Tambora (1815) antas ha ett VEI på 7 (100-1000 km³, molnhöjd okänd) medan utbrott av apokalyptisk storlek som t.ex. Toba för ca 74 000 år sedan uppskattas ha haft ett VEI på 8 (1000-10 000 km³, höjd okänd) (Sigurdsson et al. 2015).

Tabell 1. Kategorier för Vulkaniskt Explosivitets Index (VEI). Från Sigurdarsson et al. (2015).

| VEI | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Bulkvolym, tefra (m ³) | <10 ⁴ | <10 ⁶ | <10 ⁷ | <10 ⁸ | <10 ⁹ | <10 ¹⁰ | <10 ¹¹ | <10 ¹² | >10 ¹² |
| Molnhöjd (km) | <0,1 | 0,1 - 1 | 1 - 5 | 3 - 15 | 10 - 25 | >25 | | | |
| Beskrivning | Lugn/mild | Effusivt | Explosivt | | Kataklysmiskt | -" | -" | -" | -" |
| Stratosfäriskt utsläpp | Nej | Nej | Nej | Ibland | Ja | -" | -" | -" | -" |
| Andel (%) kända utbrott under de senaste 10 000 åren | 13 | 16 | 49 | 14 | 5 | 2 | <1 | <0,1 | 0 |
| Regelbundenhet | Dagar/veckor | | | 0,3 år | 3 år | 20 år | 80 år | 500 år | 7*10 ⁵ år |

Hur högt utbrottsmolnen når i atmosfären har också visat sig vara av betydelse för det globala klimatet samt det lokala vädret. Utbrott som når till stratosfären, ett luftlager mellan ca 18 och 50 km från jordytan (Figur 3) (SMHI 2013), kan påverka bl.a. spridning och reflektion av solinstrålningen samt absorption av värmestrålning vilket kan ha konsekvenser för yttemperaturen på jorden. Troposfäriska utbrott, d.v.s. utbrott där utbrottsmaterialet når till en maximal höjd på ca 18 km i atmosfären, påverkar däremot framförallt det lokala vädret t.ex. i form av ökad nederbörd, men kan i vissa fall även påverka de globala klimatförhållandena (Mather et al. 2003). Dock kan den övre gränsen för troposfären variera beroende på latituden och vilken tid på året det är. Vid ekvatorn är höjden ca 16-18 km och i polarområdena ca 8-10 km och under vintern är den tunnare medan den är något tjockare under sommaren (Bogren et al. 1999, SMHI 2013 och).

Utöver stratovulkaner finns det även s.k. sköldvulkaner. Dessa bildas då lågviskös lava flyter ut från en vulkankrater eller andra öppningar och bildar ett flackt lågt berg. Utbrotten är vanligtvis inte explosiva, men de kan släppa ut stora mängder vulkangaser under längre utbrottsperioder via sporadiska större utbrott. Ett exempel är Mauna Loa som med sina 4170 m ö.h. är en av de största aktiva sköldvulkanerna på jorden och har varit aktiv i ca 700 000 år (USGS 2006). Mauna Loas VEI ligger normalt på 0, men åtminstone ett bekräftat utbrott 1868 hade ett VEI på 2. Vulkaner som Mauna Loa har således inte stratosfäriska utbrott, utan utbrottsmolnet når endast till troposfären och påverkar luftlager närmast jordytan och kan t.ex. orsaka surt regn (Sutton et al. 1997).

1.1.2 Vulkaniska partiklar och gaser

Stora explosiva utbrott kan släppa ut vulkaniskt material som t.ex. aska och gaser åtskilliga kilometer upp i atmosfären vilken syns som en gråaktig molnplåre som reser sig från vulkanens topp upp i de högre luftlagren (Figur 3). En del av materialet faller ner och deponeras på t.ex. marken och på växter i det aktuella området. Utbrottsmolnet kan även transporteras i rådande vindriktning hundratals eller tusentals kilometer från utbrottsplatsen innan det faller ner och deponeras. Uppehållstiden för de olika komponenterna i utbrottsmolnet varierar beroende på deras kemiska och fysikaliska egenskaper samt meteorologiska förhållanden och utbrottsstorleken vid ett utbrott (Pausata et al. 2015). Storleken på utbrottspartiklarna kan variera från några mikrometer till ett par meter. (Sigurdsson et al. 2015). Storleken hos t.ex. aska är mindre än 2 mm och dess uppehållstid är några dagar eller månader vilket är relativt kort i jämförelse med gaser som kan



Figur 3. Pinatubos (Filippinerna) utbrott 1991. Utbrottsmolnet reser sig högt över markytan och når stratosfären över 30km upp i atmosfären. (USGS 1997).

stanna i atmosfären i flera månader (USGS 2009). Den vanligaste gasen som frigörs vid ett utbrott är vattenånga (H_2O), följt av koldioxid (CO_2) och svaveldioxid (SO_2) samt vätesulfid (H_2S_2). Även vätgas (H_2), kolmonoxid (CO), väteklorid (HCl) och vätefluorid (HF) samt vissa ädelgaser som helium (He) och argon (Ar) släpps ut i mindre mängder. Vattenånga och koldioxid är två av de viktigaste växthusgaserna och har kända effekter på den globala uppvärmningen i form av stigande temperaturer med ökade utsläpp. Vattenånga från både antropogena och vulkaniska utsläpp kan absorbera utgående värmestrålning från jorden och bidra till uppvärmningen. Koldioxid från antropogena källor har en direkt dokumenterad påverkan på klimatet. De årliga utsläppen av koldioxid sedan 1750-talet är ca 100 ggr högre än från vulkaner vilket anses bidra till den globala uppvärmningen i betydligt större utsträckning än vulkanutbrott. Det genomsnittliga koldioxidutsläppet från vulkaner under ett år ligger på $130 \cdot 10^6$ till $440 \cdot 10^6$ ton. Svaveldioxid kan stanna en längre tid i atmosfären där den reagerar med vattenånga och bildar svavelsyra (H_2SO_4) som sedan kondenserar till svavelaerosoler. Dessa reflekterar strålning från solen och kylvärmer därigenom den lägre delen av atmosfären d.v.s. troposfären samt absorberar värmestrålning från jorden och värmer stratosfären. Svavelaerosolerna kan även reagera med klor och kväveföreningar vilket tillsammans med klorfluorkarbonater (CFC) förstör ozon. Utsläppsmängden svaveldioxid

från vulkaner ligger på ca $1,3 \cdot 10^6$ ton per år. De övriga gaserna har antingen relativt små eller indirekta effekter på klimatet (Gerlach 2011, Sigurdsson et al. 2015).

1.2 Syfte

Litteraturstudien är gjord i syfte att sammanställa, analysera och diskutera hypoteser och resultat gällande vulkanutbrotts påverkan på det globala klimatet. Det är framförallt vulkaniska gasers, och då specifikt svaveldioxidens, påverkan på den globala temperaturen som står i fokus. Dessutom diskuteras och värderas de faktorer som styr huruvida en global uppvärmning eller nedkylning sker efter vulkanutbrott. Svaveldioxidens samverkan med andra gaser diskuteras utifrån de teorier som nämns i litteraturen samt vad eventuella framtida utbrott skulle kunna innebära för det globala klimatet.

2 Material och metod

Studien bygger på en sammanställning av tidigare publicerat material samt analys och utvärdering av resultaten från dessa. Ingen praktisk studie med exkursion eller laboratoriearbete har gjorts under arbetets gång. Huvudparten av materialet har inhämtats från litteratur i form av artiklar och böcker samt databaser. Internetbaserat material har framförallt inhämtats med hjälp av Google Scholar och Web of Science samt sökfunktionen för Umeå universitetsbibliotek. Det är framförallt information från forskningsartiklar och U.S Geological Surveys hemsida som ligger grund för uppsatsen samt kompletterande information från läroböcker och databaser.

3 Resultat

Studier visar att den globala temperaturen har varit i ständig förändring som en följd av vulkanaktivitet under miljontals år. Även om antropogena utsläpp av växthusgaser är den största nutida klimattvingande orsaken spelar vulkanutbrotten fortfarande en klimattvingande roll. Aska, koldioxid, vattenånga och svaveldioxid är de utsläppsprodukter som florerar i litteraturen som klimattvingande komponenter och de är dessa som presenteras nedan. Resultaten är uppdelade efter validiteten hos hypoteserna där forskningsresultat ställs mot varandra för att bekräfta eller vederlägga dessa samt nyansera bilden av komponenternas klimattvingande effekter.

3.1 Askteorin

1783 fick vulkanen Laki i Island ett utbrott som skulle få konsekvenser för det globala klimatet i form av sänkta vintertemperaturer i USA och Europa och sänkta sommartemperaturer i Island och Sibirien (Ward 2009) under 1783/84. Utbrottet uppskattades hade ett VEI på 6 och askpelaren nådde ca 13 km upp i atmosfären. Den efterföljande temperatursänkningen antogs bero på askpartiklarnas förmåga att blockera instrålning från solen och därmed kyla klimatet. I en studie från 1982 av Rampino och Self bekräftas delvis askans kylande effekt på klimatet då suspenderade partiklar faktiskt blockerar en del av instrålningen från solen, men effekterna av detta blir inte särskilt långvariga. Orsaken är att askan faller ner efter en relativt kort tid, via torrdeposition eller via nederbörd, några dagar eller månader efter utbrottet och förklarar därmed inte hur nedkylning av klimatet kunde hålla i sig i ett par år (Robock 1981). En av de första satelliterna som sköts upp för att övervaka bl.a. atmosfären var TOMS-satelliten, 1978, vilket möjliggjorde regelbundna mätningar av vulkanmolnets sammansättning och spridning (USGS 2008). I kombination med den nya mättekniken gjordes även direkta mätningar av temperaturskillnader vid jordytan. Resultaten från dessa mätningar tydde på att askan

visserligen hade en klimattvingande effekt, men att den var kortvarig och lokal i sin natur. Vidare studier av tre stora explosiva utbrott 1) Tambora (1815), 2) Krakatau (1883) och 3) Agung (1963) där mängden utbrottsmaterial i stratosfären skilde sig mellan de tre utbrotten medan temperaturförändringarna var likartade tydde på att askmängd och temperaturförändringar inte nödvändigtvis var proportionellt relaterade. Mängden aska jämfördes med bl.a. mängden svaveldioxid som släppts ut i stratosfären vid de tre utbrotten och svaveldioxiden visade sig ha en längre uppehållstid än askan som avlägsnades från atmosfären på några månader. Temperaturförändringen som följde på utbrotten låg mellan 0,18 och 1,3 °C (Rampino et al. 1982). Lakis utbrott genererade förhållandevis lite aska då utbrottsmaterialet visade sig huvudsakligen bestå av lava och gaser (Thordarsson och Self 2003).

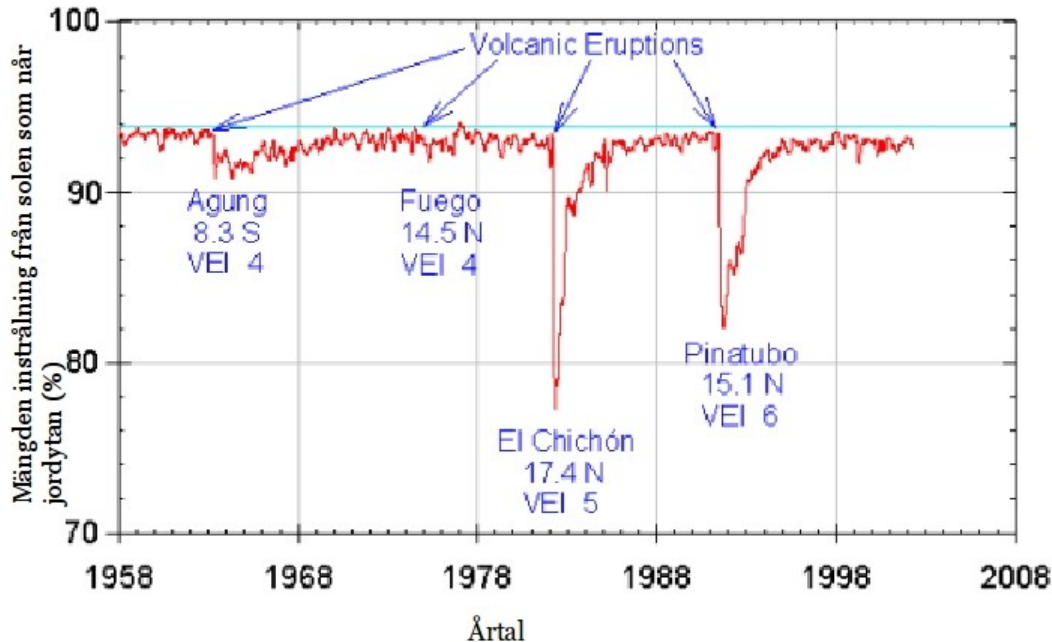
3.2 Koldioxid- och vattenångateorin

Koldioxid och vattenånga är potenta växthusgaser som har väl dokumenterade effekter på den globala uppvärmningen (IPCC 2007). I atmosfären släpper de igenom den kortvågiga instrålningen från solen d.v.s. synligt ljus och UV-strålning som når jordytan. Därifrån återstrålas energin som långvågig värmestrålning vilken absorberas av gaserna i de lägre luftlagren, vilket i sin tur leder till att den globala temperaturen ökar. Antropogena utsläpp från t.ex. förbränning av fossila bränslen når sällan de övre luftlagren i atmosfären d.v.s. stratosfären eller den övre delen av troposfären utan ansamlas nära jordytan. Vid vulkanutbrott slungas däremot gaserna upp i troposfären och stratosfären där värmestrålningen är betydligt lägre jmf med vid jordytan. Det innebär att vulkanisk koldioxid och vattenånga har begränsad betydelse för den globala uppvärmningen i de högre luftlagren (Graf et al. 1998). Emellertid kan vissa vulkaner som t.ex. Mauna Loa på Hawaii släppa ut stora mängder koldioxid i de lägre luftlagren och därmed bidra till den globala uppvärmningen (Keeling et al. 2009). I dagsläget släpper Mauna Loa ut ca 1000 ton per år vilket är relativt litet i jmf med de antropogena utsläppen som är 100 ggr större (NASA 2010). Således bidrar vulkaner som Mauna Loa med en förhållandevis liten mängd koldioxid i jämförelse med de antropogena och dess bidrag till den globala uppvärmningen är därför förhållandevis liten. Pinatubos utbrott släppte ut ca 2,5 - 14 ggr mer koldioxid och 29 - 54 ggr mer vattenånga än t.ex. svaveldioxid vilket motsvarar koldioxidmängder på ca $50 \cdot 10^6$ - $280 \cdot 10^6$ ton samt $580 \cdot 10^6$ - $1\,080 \cdot 10^6$ ton vattenånga. Trots detta ökade inte den globala temperaturen efter utbrottet. Däremot registrerades en temperaturminskning med 0,5°C (Stowe et al. 1992). Analys av isborrkärnor har visat att uppvärmningsperioder i historisk tid har förekommit i samband med ökad vulkanisk aktivitet. Exempel på detta är den sk medeltida uppvärmningsperioden (950 AD - 1250 AD) och preboreal värmeperiod (9700 BC - 8500 BC) (Björck et al. 1997 och Vollweiler et al 2006) där sulfatavvikelse i isborrkärnor anger ökad vulkanisk aktivitet vid ca 850AD och 9300 BC (Ward 2009). Det har emellertid visat sig att koldioxidnivåerna har börjat öka efter att en temperaturökning redan inletts. Det hände bl.a. för 19 000 till 17 000 år sedan vid slutet av den senaste istiden. Då ökade havstemperaturen med ca 2°C (Stott et al. 2007).

Soden et al. (2002) undersökte hur vattenånga påverkar det globala klimatet genom att använda en modell för att simulera luftfuktigheten i atmosfären efter ett utbrott. Pinatubos utbrott låg till grund för den simuleringen eftersom utbrottet möjliggjorde direkt mätning av minskningar både i den globala temperaturen och av luftfuktigheten i atmosfären. Modellen visade att sänkt luftfuktighet kunde förstärka en temperaturförändring genom en feedbackmekanism. Detta innebär att då temperaturen sjunker efter ett utbrott kommer även luftfuktigheten att minska som resultat av minskad avdunstning (Kiehl et al. 1997 och Cubasch et al. 1990) från t.ex. hav och sjöar vilket leder till mindre vattenånga vid jordytan och således en minskning av mängden växthusgas (vattenånga) vilket ytterligare förstärker den redan pågående temperatursänkningen. Den vulkaniska vattenångan har således inte en direkt effekt på klimatet utan snare en indirekt effekt genom feedbackmekanismen.

3.3 Svaveldioxidteorin - kylande effekt

Vid Lakis utbrott 1783 observerades en blåaktig dimma som spred sig över Island och vidare in över bl.a. Europa. Denna dimma bestod av svavelaerosoler bildades ur svaveldioxid som släppts ut av Laki (USGS 2008). I atmosfären oxideras svaveldioxid med vattenånga och bildar svavelsyra som därefter kondenserar till svavelaerosoler. För varje SO_2 -molekyl krävs det en OH^- -molekyl och tre vattenmolekyler för bildningen av svavelaerosoler. Processen sker olika snabbt beroende på var svaveldioxiden befinner sig i atmosfären. I stratosfären tar processen flera veckor till månader och i troposfären bara några dagar (Warnecke 2000). Delvis beror detta på mängden vattenånga som skiljer sig mellan de två luftlagren d.v.s. stratosfären är torrare än troposfären (Kunzig 2008). Resultatet blir att aerosolerna reflekterar och sprider instrålning från solen, vilket leder till en minskad mängd strålning som träffar jordytan. Flera kända utbrott i modern tid har lett till minskad instrålning som ett resultat av svavelaerosolernas förmåga att sprida och reflektera den inkommande strålningen (Figur 4). Den minskade instrålningen leder till en temperatursänkning i troposfären medan en liten mängd värmestrålning från jorden absorberas och värmer stratosfären. I troposfären är uppehållstiden för svavelaerosolerna kort, bara några dagar, eftersom molnbildning med efterföljande regn, som avlägsnar aerosolerna, kan bildas. I stratosfären är den längre, veckor eller månader eftersom det är torrare d.v.s. aerosolerna avlägsnas inte via nederbörd. Upphållstiden för svavelaerosolerna är emellertid förhållandevis kort, vare sig de befinner sig i stratosfären eller troposfären, vilket leder till korttidsförändringar i klimatet (Robock 2000). Pinatubos (Filipinerna) utbrott 1991 började den 2 april, med ett mindre utbrott som senare övergick i ökad aktivitet och kulminerade med explosiva utbrott den 13 och 14 juni där askmolnet nådde en höjd på 24 km d.v.s. till stratosfären och stora mängder svaveldioxid släppts ut i atmosfären. Den efterföljande temperaturminskningen, $0,5^\circ\text{C}$, höll i sig tre år för att sedan återgå till normala temperaturer (Gerlach et al. 1996 och Oman et al. 2006).



Figur 4. Vulkanutbrott som minskar mängden solinstrålning som når jordytan. Utbrottens VEI (Volcanic Explosivity Index) och vulkanernas latituder (N eller S) anges även (NOAA 2015).

Svaveldioxidens kvantitativa effekter på klimatet kan uppskattas med olika modeller t.ex. den sk energi-balansmodellen där data från paleoregister används för att modulera responsen hos klimatet på eventuella utbrott. Registren innehåller data från olika proxys t.ex. isborrkärnor från Grönland och Arktis vilka representerar relativt högupplösta tidsserier och i vilka klimattvingande stratosfäriska utbrott kan spåras. (Cole-Dai 2010). Analys av årsringar är en annan typ av paleodata som kan bidra till kartläggning av när vulkanutbrott har skett och vilka klimateffekter de haft. Ett kallare klimat leder t.ex. till reducerad tillväxt hos träd d.v.s. tjockleken och tätheten i årsringarna påverkas samt att sk frostringar kan uppstå då celler fryser under tillväxtsången (Jones et al. 1995). De flesta större stratosfäriska utbrott under vår tid har lett till en kortvarig nedkylning av klimatet under några år. Därefter har klimatet återhämtat sig. Pinatubos utbrott 1991 ledde till en temperatursänkning på ca 0,5 - 0,6 °C mellan 1992 och 1993 (Robock 2000), El Chichons utbrott 1982 ledde till temperaturminskningar på ca 0,3- 0,5 °C under ett par år (Sigurdsson et al. 2015) och Krakatuas utbrott 1883 följdes av en temperaturminskning med 1,2 °C och återgick till det normala först fem år senare (Bradley 1988). Dessa utbrott skedde vid låga latituder, men även utbrott på högre latituder har visat sig kunna kyla klimatet som t.ex. Lakis utbrott där medeltemperaturer för vinter och sommar sjönk med flera grader under ca tre år (Sigurdsson et al. 2015). Vidare har en studie (Kravitz et al. 2011) visat att utbrott under olika tidpunkter på året kan resultera i olika effekter på klimatet. Simuleringar av höglatitudutbrott visade att utsläpp under $3 \cdot 10^6$ ton svaveldioxid i stratosfären inte gav signifikanta effekter på klimatet medan nivåer över detta upp till $5 \cdot 10^6$ ton gav signifikanta resultat d.v.s. nedkylning. Under juni visade sig effekten från ett stratosfäriskt höglatitudutbrott ($3 - 5 \cdot 10^6$ ton) orsaka en större temperaturminskning i jmf med augusti, december och mars. Solinstrålningen till jorden varierar under året med högre instrålning under sommarmånaderna och lägre under vintermånaderna, vilket inverkar på svaveldioxidens effekter på instrålningen d.v.s. utbrott under juni uppvisade större påverkan på instrålningen än augustiutbrotten. Dock var effekterna begränsade till norra halvklotet samt kortvariga.

Analys av isborrkärnor från Grönland (GISP2) (Zielinski et al. 1995) samt dammdata från Antarktis har används för att kartlägga vulkanutbrott under en period på ca 110 000 år. Resultaten indikerade långtidseffekter av vulkanutbrott på klimatet. Det antyder att det finns ett samband mellan långvariga klimattförändringar vulkanism (Bay et al. 2004). Bay et al. registrerade asklager i isen vid samma tidpunkt som en tusen år lång nedkylningperiod började. Dock har andra studier av iskärnor som t.ex. Epica Dome C ice core, ett register som täcker en tidsperiod på ca 45 000 år ej kunnat stödja sambandet mellan vulkanism och långtidseffekter på klimatet (Castellano et al. 2004). Däremot har resultat från modelleringar av sk feedbackmekanismer indikerat att effekten av ett enda utbrott i t.ex. Arktis skulle kunna förlänga korttidseffekter (Schneider et al. 2009) och därmed ha en indirekt påverkan på långvariga temperaturskillnader. Mycket stora utbrott med ett VEI på 7 eller åtta har antagits kunna orsaka nedisningsperioder då mängden utslungat material i stratosfären kraftigt överstigit de i nutid mindre dokumenterade utbrotten. Ett sådant stort utbrott som skedde under Kvartär (från 2,6 miljoner år till nutid) var Tobas utbrott för ca 74 000 år sedan där $60 \cdot 10^6$ ton svavel frisattes i atmosfären. Efter detta utbrott följde en period som tros ha präglats av en kraftig reduktion vad gäller den mänskliga populationsmängden som eventuellt orsakades av en långvarig köldperiod där temperaturen sjönk med 3°C (Ambrose et al. 1998). Bevis för själva utbrottet finns i form av en stor caldera på Sumatra i Indonesien (Chesner et al. 1991) samt vulkaniskt svavel i iskärnor från Grönland (Zielinski et al. 1996). Även asklager i havssediment stöder teorin om ett kraftig utbrott vid den här tidpunkten med klimattvingande effekter som följd (Huang et al. 2001). I en studie (Robock et al. 2009) användes 6 olika klimatmodellsimuleringar för att testa Tobautbrottets klimateffekter och då särskilt svaveldioxidens påverkan. Resultaten visade att även om Tobas utbrott mycket väl skulle kunna ha haft en förödande effekt på mänskligheten i form av s.k. vulkanvinter med

kraftigt reducerade temperaturer, skulle dock inte effekten ha varit långvarig d.v.s. klimatet skulle ha återhämtat sig efter bara några årtionden (Robock et al. 2009).

Utbrott med långtidseffekter på den globala temperaturen har dock påvisats som ett resultat av positiva feedbackmekanismer med is- och snötäcken i Arktis där t.ex. mellanstore utbrott i tropiska regioner resulterat i långvarig nedkylning. Dessa har dock varit begränsade till Arktis (Schneider et al. 2009). "Lilla Istiden" tros vara ett resultat av sådana utbrott vilket ledde till nedkylning av området kring Nordatlanten under 1200-talet (Grove 2001 och Anderson et al. 2008). Katmais utbrott i Alaska 1912 hade t.ex. inte någon påvisbar direkt effekt på den globala temperaturen trots att utbrottet var relativt stort (VEI 6) och släppte ut stora mängder svaveldioxid (Stothers 1996). Aerosolmolnet från Katmai var också begränsat till ett område ovanför 30°N (Stothers 1996). Det här tydde på att höglatitudbrott inte hade någon större påverkan på det globala klimatet. Simuleringar med klimatmodeller har dock visat att större utbrott på höga latituder skulle kunna ha en påvislig effekt på klimatet under en längre tid, >50 år (Pausata et al. 2015). Perioder med låg vulkanisk aktivitet har också visat sig leda till nedkylning av klimatet. Kobashi et al. 2007 daterade en temperaturminskning på 3,3°C på Grönland till 6225 BC. Kallperioden höll i sig i ca 60 år för att sedan successivt återhämta sig under ca 70 år. Analyser av GISP2 visar på en kraftig minskning av svavelnivåerna ca 6250 BC. Samtidigt registrerades en 15%-ig minskning av CH₄-nivåerna. När svaveldioxidnivåerna är låga kan atmosfären oxidera mindre reaktiva gaser som t.ex. CH₄ samtidigt som mängden UV-ljus som tar sig ner till jordytan ökar. Tillsammans med ozon bildar UV-ljus OH-radikaler som vidare bidrar till att atmosfärens oxiderande kapacitet ökar vilket leder till en nedkylning av klimatet (Ward 2009). Även om enskilda stora utbrott delvis tros vara orsaken till vissa nedkylningsperioder är frekvensen av utbrott under en sammangående period något som visat sig kunna leda inleda glacialer d.v.s. istider. Mellan 37 och 27 Ma, inträffade en serie kraftiga vulkanutbrott vilket ledde till två nedkylningsperioder på ca 40 000 år. Resultatet var bl.a. ökad isvolym i Arktis vid ca 23,7*10⁶ år (Prothero et al. 2005 och Coxall 2005) och minskade temperaturer ca 8 °C över Nordamerika (Zanassi et al. 2007). Simuleringar av serier med vulkanutbrott där tiden mellan utbrotten legat någonstans mellan 1 och 10 år har gjorts och resultaten från dessa har visat på en minskning av havens temperatur så pass mycket att en glacial skulle kunna resultera (Church et al. 2005).

3.4 Svaveldioxidteorin - värmande effekt

Trots att svaveldioxidens effekt på det globala klimatet huvudsakligen innebär en sänkning av den globala temperaturen har, som nämnts ovan, vulkanutbrott visat sig kunna ha en värmande effekt på klimatet. Enligt koldioxid- och vattenångateorin är ingen av dessa vulkaniska gaserna direkt orsak till uppvärmningen utan snarare sekundära, men fortfarande viktiga drivkrafter vid klimatförändringar i samband med vulkanutbrott. En viktig förmåga hos atmosfären är dess kapacitet att oxidera svaveldioxid (Thompson 1992). Hydroxyl (OH⁻) är tillsammans med ozon (O₃) och väteperoxid (H₂O₂) de mest reaktiva oxidanterna i atmosfären. Av dessa är OH⁻ den viktigaste och kan oxidera ca 90*10⁶ ton svaveldioxid per år (Ehhalt 1999). OH⁻ och H₂O₂ bildas via fotodissociation av O₃ medan O₃ bildas då syrgas (O₂) reagerar med UV-ljus. Om stora mängder svaveldioxid successivt släpps ut under en sammanhängande period finns risken att atmosfärens oxiderande kapacitet överstigs. Det i sin tur leder till att svavelsyra inte längre bildas och den kylande effekten upphör samt att en ökning av temperaturen sker (växthusgaserna absorberar fortfarande värmestrålning). Den efterföljande temperaturökningen ger bl.a. effekten att mindre koldioxid löses i vatten (hav, sjöar och andra vattendrag), vattenavdunstningen ökar samt att oxidation av metan inte längre sker i samma utsträckning. Ökningen av koldioxid, vattenånga och metan främjar absorption av värmestrålning vilket ytterligare spär på temperaturökningen. En orsak till att nutida stora utbrott inte lett till ökade globala temperaturer är att de sker vid enstaka tillfällen med ca 80 års mellanrum (Ward 2009). Analys av tre stalagmiter

(Spannaghelgrottan, Österrike) och GISP2 har visat på höga nivåer av isotopen ^{18}O och vulkansikt svavel. Dessa tyder på hög vulkanisk aktivitet och sammanfaller bl.a. med redan nämnda medeltida uppvärmningsperioden och romerska värmeperioden, men även med holocen klimatoptima (7050 BC till 3050 BC). Liknande isotoptoppar vid 1750 BC, 3250 BC, 9350 BC och 7550 BC (Vollweiler et al. 2006) har registrerats. Alla dessa har föregåtts av en ökad frekvens av vulkanisk aktivitet. Det samma gäller för ovan nämnda preboreal värmeperiod för ca 9000 år sedan då uppvärmningen, som påbörjats 100 år tidigare, snabbt ökade (Ward 2015). I en studie av Björck et al. (1997) undersöktes lager från isborrkärnor mellan 9342BC och 9279BC i vilka stora mängder svavel återfanns. Mängden svavel indikerar en utbrottsfrekvens på ca ett utbrott var sjunde månad (Björck et al. 1997).

Under de senaste 360 miljoner åren har perioder med massutdöd inträffat. Dessa präglas av en utbredd och snabb decimering av artantalet på jorden. Dessa har även sammanfallit med mycket stora basaltutbrott och efterföljande globala uppvärmningsperioder (Courtillet et al. 2003). I Sibirien finns de s.k. Sibiriska Trapporna som består av ca 3 miljoner km^3 basalt. Utbrottet som släppte ut basaltlavan inträffade för ca 249,2 miljoner år sedan och pågick i över 300 000 år. Utbrottet var 200 000 ggr större än Lakis utbrott i Island 1783, vilket frisatte ca 120 miljoner ton svaveldioxid i atmosfären. Det innebär att utbrottet i Sibirien släppte ut över $2,4 \cdot 10^{12}$ ton svaveldioxid under en längre period. Den här perioden har kopplats till den massdöd som initierades i slutet av Perm och början Trias (Black et al. 2012).

4 Diskussion

4.1 Brister inom mätdata

Vulkanutbrott under dokumenterad mänsklig tid har varit relativt lågfrekventa, även om vissa större utbrott orsakat stor förödelse för människor och påverkat både väder- och ekosystem under flera år. Att vulkanutbrott haft en klimatpåverkan har dock varit klart under flera århundraden, men problem med t.ex. datering samt bristen på regelbundna och systematiskt nedtecknade observationer har gjort det svårt att avgöra om det funnits ett direkt samband samt förklara hur detta samband fungerar. Vissa av de register som funnits tillgängliga bygger delvis på historisk dokumentation gjord av individer som ej tillhört vetenskapliga samfund eller organisationer. Sådan dokumentation, som bygger på individuella observationer, kan vara bristfällig vad gäller exakta tidsangivelser för specifika utbrott. Vidare kan tidsangivelserna variera då exakt tidsmätning eller datumbestämmelse inte sett likadan ut i olika delar av världen. Detta leder till osäkerhet när resultat som bygger på dessa observationer ska tolkas och slutsatser dras. Vidare kan antalet dokumenterade vulkanutbrott vara underskattat då vissa har skett i områden där människor inte kunnat observera utbrotten och således inte nedtecknat händelserna vilket också kan bidra till osäkerhet i äldre data. Först under modern tid blev det möjligt att registrera och dokumentera utbrott t.ex. med hjälp av satelliter och temperaturmätningar vid jordytan (USGS 2008) och på så sätt få bättre, regelbunden och högupplöst data med avseende på tid, plats och omfattning hos individuella utbrott. Dessutom kunde proxys som t.ex. iskärnor, havssediment och träårsringar ge en god temporal upplösning av historisk tid. Detta är något som flera av studierna använder sig av och baserar sina resultat på, även om det naturligtvis föreligger viss osäkerhet i dessa. Andra typer av problem med mätdata kan vara otillräckliga fältstudier av vulkanområden som gett information om t.ex. pyroklastiska flöden, askdjup och lavatyper vilket kan innebära viss osäkerhet i insamlat data och t.ex. leda till en underskattning av utbrottsfrekvensen under en tidsperiod i historisk tid. Något som bl.a. Ward (2009) påpekar i sin artikel. De resultat som härleds m.h.a. klimatmodeller bygger uteslutande på det data som används vid simuleringar. Detta innebär att bristande överensstämmelse och exakthet i data kan ge missvisande resultat. Olika hypoteser har

framlagts och testats, men det kan vara svårt att avgöra huruvida de rådande hypoteserna om vulkaners påverkan på klimatet är riktiga eftersom de baseras på mätdata från nutida utbrott som sedan används för att verifiera utbrott och efterföljande klimateffekter från historiska utbrott. Viss förskjutning av temporala skalor kan leda till misstolkning av t.ex. sulfatnivåer i islager från Antarktiska och Grönländska iskärnor (Ward 2009). Vidare kan t.ex. bristen på nutida högfrekventa utbrott samt bristen på riktigt stora basaltutbrott i modern tid göra det svårt att verifiera de resultat som klimatsimuleringar ger. Ett utbrott av den magnitud och varaktighet som inträffade i Sibirien för 250 miljoner år sedan och gav upphov till de Sibiriska trapporna har inte inträffat under mänsklig tid. Några av studierna har använt sig av ett utbrott som kontroll när simuleringar av t.ex. både låg- och höglatitudeutbrott samt större utbrott i historisk tid gjorts. Soden et al. 2002 använde t.ex. Pinatubos utbrott som enda kontroll, vilket kan innebära att osäkerheten i resultaten kan bli stora. Det här skulle kunna avhjälpas om fler kontroller användes. Det kan även finnas en risk med att extrapolera effekterna av nutida utbrott till historiska utbrott eftersom klimatförhållandena varierar med tid p.g.a. av t.ex. variationer i solinstrålning vilket beror på tidsmässiga oregelbundenheter i jordbanan (Milankovitchcykler) (Cole-Dai 2010). Det kan få konsekvenser för hur klimatet svarar på ett simulerat utbrott. I Robock et al. (2011) extrapoleras resultaten för hög- och låglatitudeutbrott trots att studien gjorts under en kortare period (ca ett år). Vidare tas inte heller stratosfärisk- och troposfärisk cirkulation med i modellen något som kan påverka resultaten då lokala variationer i luftströmmar kan förekomma och inverka på hur vulkaniska partiklar och gaser sprids i atmosfären. Dessutom kan faktorer som har indirekt påverkan på klimatet påverka resultaten från simuleringar t.ex. vissa feedbackmekanismer, El Niño och La Niña-liknande företeelser osv. Det är viktigt att ta hänsyn till dessa faktorer och avlägsna deras påverkan från modellsimuleringarna. Trots viss osäkerhet i mätdata har denna successivt minskats under årens lopp genom t.ex. isotopdatering och samordning av olika vulkanregister. I Wards (2009) artikel bygger delar av de resultat han fått fram på analyser av syreisotoper vilket kunna ge en bättre temporal upplösning, men även en säkrare bestämning av huruvida ett vulkanutbrott skett vid denna tidpunkt eller ej. Vidare har samarbetsinitiativ som t.ex. Smithsonian Institution - Global Volcanism Program, NASA och NOAA möjliggjort öppna databaser med information om tidpunkt, plats, magnitud o.s.v. för åtskilliga utbrott både under mänsklig tid och historisk tid. Genom att samla alla observationer och mätdata från t.ex. satelliter kan tidigare avsaknad av utbrott i vissa register fyllas i.

En annan aspekt av hur mätdata behandlas är hur vi definierar vissa begrepp. I vissa av studierna nämns temperaturminskningar och temperaturökningar på bara ett par grader. Pinatubos utbrott ledde till en temperaturminskning på 0,5 grader och efter Krakatuas utbrott sjönk medeltemperaturen med 0,4 till 0,7 grader medan Tobas utbrott för ca 74 000 år sedan minskade temperaturen med ca 3 grader. Dessa anses vara signifikanta temperaturskillnader medan Mt St Helens utbrott 1980, som var minst 3 ggr mindre än El Chichons utbrott 1982 (0,3 - 0,5 grader) inte ansågs resultera i en signifikant temperaturskillnad. Den globala medeltemperaturen kan visserligen variera med vulkanutbrott, men vad som anses vara en signifikant temperaturskillnad är något som kan diskuteras.

4.2 De tre teorierna och klimateffekter

De sammanställda resultaten från olika artiklar och böcker i den här litteraturstudien ger en bild av de effekter som vulkaniska utsläpp av partiklar och gaser kan ha på klimatet d.v.s. på den globala temperaturen. Utsläpp av aska d.v.s. askhypotesen, som avfärdades redan i början av 1980-talet som orsak till global nedkyllning har visserligen effekt på det lokala klimatet då den lokala instrålningen från solen minskar p.g.a. att askan förmörkar himlen i området nära utbrottet, men de effekterna är mycket kortvariga d.v.s. bara några dagar eller veckor. Utsläppen av antropogent koldioxid, som angivits som den största orsaken till nutida

global uppvärmning, är betydligt större än de nutida vulkaniska utsläppen. De vulkaniska koldioxidutsläppen anses därför för små för att orsaka någon betydande temperaturförändring i nutid. Visserligen har det ifrågasatts av klimatskeptiker som hävdar att förhistoriska stora utbrott, med relativt stora koldioxidutsläpp, har orsakat global uppvärmning. Det här är delvis sant, men med tanke på att studier visat att förhöjda nivåer av koldioxid och vattenånga i vissa fall inträffat först efter att en temperaturökning redan påbörjats är det här påståendet generellt inte riktigt. Enligt svaveldioxidteorin blir rollen hos koldioxid och vattenånga som klimattvingande faktorer aktuella först när svavelaerosolerna antingen minskar den totala mängden instrålning som når jordytan (vilket i sin tur leder till att mindre värmeinstrålning absorberas av växthusgaser) eller då den oxiderande kapaciteten hos atmosfären överstigs av höga svaveldioxidnivåer (vilket leder till att den avkylande effekten avtar). Koldioxid och vattenånga är potenta växthusgaser, men den effekt de har på klimatet regleras i viss utsträckning av mängden svaveldioxid i stratosfären. Det här är något som de flesta av studierna också stöder. Svaveldioxidens effekter på klimatet kan, enligt resultaten i litteraturen, delas in i två huvudkategorier:

- 1) Nedkylning av det globala klimatet
- 2) Uppvärmning av det globala klimatet

Vilken av dessa två kategorier som blir resultatet av svaveldioxidutsläppen har visat sig styras av ett antal faktorer. Faktorerna styr huruvida en mätbar effekt på de globala temperaturerna kan registreras eller ej samt hur omfattande effekterna blir. Fem av dessa faktorer är:

- a) Hur högt utbrottsmolnet når i atmosfären d.v.s. hur många kilometer upp i troposfären och stratosfären vulkanpartiklar och gaser når.
- b) Den geografiska positionen d.v.s. på vilka breddgrader utbrottet sker (hög- eller låg latituder).
- c) Sammansättningen av vulkanmolnet d.v.s. de ingående partiklarna och gaserna.
- d) Varaktigheten och frekvensen på utbrottet d.v.s. den totala tiden för gas- och partikelutsläppen.
- e) Vilken tid på året utbrottet sker d.v.s. under vilken årstid.

De flesta studier av svaveldioxidens kylande förmåga fokuserar på stratosfäriska utbrott d.v.s. de utbrott där gaser och andra partiklar når över 18 km höjd. Här är luftfuktigheten låg och svaveldioxiden oxideras till svavelsyra med vatten. Vattenångan som släpps ut vid vulkanutbrottet blir således en viktig komponent för att svavelaerosoler ska kunna bildas och därmed sprida strålningen i stratosfären. I vissa fall kan dock svaveldioxid i troposfären svepas med vindar upp i stratosfären och därmed bidra till nedkylningen. Det skulle kunna innebära att även troposfäriska utbrott kan ha viss klimatpåverkan. Det har emellertid endast nämnts översiktligt, men det skulle eventuellt vara en god idé att undersöka huruvida vissa troposfäriska utbrott skulle kunna ha en signifikant påverkan på de globala temperaturerna.

Vad gäller studier av hög- respektive låglatitudutbrott råder konsensus om att låglatitudutbrott s.k. tropiska explosiva utbrott har en mätbar påverkan på de globala temperaturerna. Det har dock förekommit relativt få stora utbrott d.v.s. utbrott med ett VEI större än 4 under de år som gått sedan TOMS-satelliten sköts upp. Det gör att det finns få kontroller och därmed ett begränsat urval av mätdata för simuleringar av låglatitudutbrott

och nästan inga alls för höglatitudutbrott. De studier som har gjorts av de klimattvingande effekterna från höglatitudutbrott baseras i princip uteslutande på simuleringar.

Även om mängden svaveldioxid i ett utbrottsmoln är avgörande för hur stor klimatpåverkan blir, finns det ingen exakt angiven mängd för detta. Visserligen nämner Kravitz et al. (2011) att simuleringar visat att ett stratosfäriskt utbrott på 5Tg under juni skulle kunna ha signifikanta effekter på temperaturen, men eftersom antalet kontroller är få så behöver inte den angivna svaveldioxidmängden gälla generellt. Instrålningen under sommaren är högre än i jämförelse med vintern på högre breddgrader. Eftersom svaveldioxiden påverkar instrålningen från solen och därmed nedkylningen skulle ett stratosfäriskt utbrott kunna orsaka en större påverkan under sommaren än på vintern. Detta stöds också av resultaten från Kravitz et al. 2011.

I Wards artikel från 2009 diskuteras svaveldioxidens värmande effekt på klimatet. Ward tillskriver dessa effekter huvudsakligen till frekvensen och storleken på utbrott under historisk och mänsklig tid och relaterar också en ökad utbrottsfrekvens till efterföljande värmeperioder. Ward tar dock inte med alla de fem ovan nämnda faktorerna och hävdar t.ex. att stora stratosfäriska utbrott kan spåras i iskärnor från Grönland och Antarktis vilket i sig är sant, men enligt vissa studier har den geografiska positionen för utbrottet en betydande roll för huruvida utbrottet ger klimateffekter eller ej. Om ett stratosfäriskt utbrott sker på högre breddgrader skulle det, enligt Kravitz et al. (2011) ge en hemisfärisk effekt på klimatet t.ex. skulle nedkylning av Arktis skulle registreras, men med Wards teori skulle tolkningen av de resultaten kunna leda till att den hemisfäriska nedkylningen tolkades som global nedkylning. I Wards artikel diskuteras även huruvida en förhöjd frekvens av utbrott skulle kunna förstärka redan pågående nedkylning eller uppvärmning och leda till glacialer eller värmeperioder. Resultat från flera studier antyder ett sådant samband, men med tanke på att den temporala upplösningen blir sämre ju längre bakåt i tiden vulkanutbrotten skett finns det en osäkerhet vad gäller inledning och avslut på glacialer respektive värmeperioder. Tobas utbrott brukar anges med en skillnad på ca 3000 år d.v.s. i vissa artiklar står det t.ex. 71 000 år medan det i andra står 74 000 år (Zielinski et al. 1996). 3000 år är en relativt lång tid och det kan mycket väl ha inträffat andra händelser under den perioden som kan ha haft klimattvingande effekter.

5 Slutsats

Vulkanutbrott har en dokumenterad påverkan på klimatet. Dock är de kylande och värmande effekterna av utsläppen av aska, koldioxid och vattenånga samt svaveldioxid i hög grad styrda av specifika faktorer. Det är huvudsakligen instrålningen från solen som påverkas av svavelaerosoler vilka framförallt sprider, men även reflekterar instrålningen och det är också påverkan av svaveldioxiden som har mest stöd i litteraturen, medan koldioxid och vattenånga anses ha indirekta effekter på klimatet bl.a. genom positiva feedbackmekanismer. Den temporala upplösningen i paleoregister innan mänsklig tid bör förbättras för att resultat som rör värmeperioder respektive glacialer samt simuleringar av framtida utbrott ska bli så tillförlitliga som möjligt. Vidare behövs även mer ingående studier av icke-explosiva utbrott d.v.s. effusiva utbrott samt höglatitudutbrott påverkan på klimatet eftersom huvudfokus i den nuvarande forskningen ligger på stratosfäriska explosiva utbrott och konsekvenser för det globala klimatet. Sammanfattningsvis kan man säga att trots att de antropogena utsläppen av växthusgaser och svaveldioxid överstiger de vulkaniska utsläppen per år spelar vulkanutbrott fortfarande en viktig roll i regleringen av den globala temperaturen. Dessutom kan framtida stora utbrott få liknande konsekvenser för klimatet som de haft i historisk tid. Det är således viktigt att förståelsen för de samband som styr hur vulkanutbrott påverkar klimatet förbättras genom fortsatt forskning.

6 Referenser

- Ambrose, Stanley H. 1998. Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans. *Journal of Human Evolution*. 34: 623-651.
- Anderson, Rebecca K., Miller, Gifford H., Briner, Jason P., Lifton, Nathaniel A. och DeVogel, Stephen B. A millennial perspective on Arctic warming from 14C in quartz and plants emerging from beneath ice caps. *Geophysical Research Letters*. 35 (1), L01502.
- Bay, Ryan C., Bramall, Nathan och Price, Buford P. 2004. Bipolar correlation of volcanism with millennial climate change. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*. 101:6341-6345.
- Black, Benjamin A., Elkins-Tanton, Linda T., Rowe, Michael C. och Ukstins Peate, Ingrid. 2012. Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps. *Earth and Planetary Science Letters*. 317-318: 363-373.
- Björck, Svante, Rundgren, M., Ingolfsson, O. och Funder, S. 1997. The Preboreal oscillation around the Nordic Seas: Terrestrial and lacustrine responses. *Journal of Quaternary Science*. 12(6): 455.
- Bogren, Jörgen, Gustavsson, Torbjörn och Loman, Göran. 1999. *Klimatologi, meteorologi*. Lund: Studentlitteratur. Libris.
- Bradley, Raymond S. 1988. The Explosive Volcanic Eruption Signal in Northern Hemisphere Temperature Records. *Climatic Change*. 12: 221-243.
- Brown, Sarah Krystyna, Croweller, Helen Sian, Sparks, Robert Stephen John, Cottrell, Elizabeth, Deligne, Natalia Irma, Siebert, Lee och Takarada, Shinji. 2014. Characterization of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*. 3(5): 1-22.
- Castellano, E., Becagli, E., Jouzel, J., Migliori, A., Severi, M., Steffensen, J.P., Traversi, R. och Udisti, R. 2004. Volcanic eruption frequency over the last 45 ky as recorded in Epica Dome C ice core (East Antarctica) and its relationship with climatic changes. *Global Planetary Change*. 42 (1-4): 195-205.
- Chesner, Craig A. och Rose, William I. 1991. Stratigraphy of the Toba Tuffs and the evolution of the Toba Caldera Complex, Sumatra, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*. 53:343-356.
- Church, John A., Whitte, Neil J. och Arblaster, Julie M. 2005. Significant decadal-scale impact of volcanic eruptions on sea level and ocean heat content. *Nature*. 438: 74-77.
- Cole-Dai, Jihong. 2010. Volcanoes and climate. Advanced Review. *WIREs Climate Change*. John Wiley and Sons, Ltd. Vol 1: 824-839.
- Courtillot, Vincent E. och Renne, Paul R. 2003. On the ages of flood basalt events/Sur l'âge des trapps basaltiques. *Comptes Rendus Geoscience*. 335 (1): 113-140.
- Coxall, Helen K., Wilson, Paul A., Pälike, Heiko, Lear, Caroline H., och Backman, Jan. 2005. Rapid stepwise onset of Antarctic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*. 433: 53-57.
- Cubasch, Ulrich och Cess, R. 1990. Processes and Models in Climate Change: *The IPCC Scientific Assessment*. John T., Houghton, Jenkins, G.J. och Ephraums, J.J. Cambridge: Cambridge University Press: 69-92.

- Ehhalt, Dieter H. 1999. Photooxidation of trace gases in the troposphere. *Physical Chemistry. Chemical Physics*. 1: 5401-5408.
- Gerlach, Terry. 2011. Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 92 (24):201-202.
- Gerlach, Terry, Westrich, Henry och Symonds, Robert. 2002. Preerupton vapor in magma of the climatic Munt Pinatubo eruptoin: Source of the giant stratospheric sulfur dioxide cloud i *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall, C.G. och Punongbayan, R.S (Eds.). Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press. 1-151.
- Graf, Hans F., Langmann, Bärbel och Feichter, Johann. 1998. The contribution of Earth degassing to the atmospheric sulfur budget. *Chemical Geology: Elsevier*. 147 (1-2): 131-145.
- Grove, J.M. 2001. The initiation of the "Little Ice Age" in regions round the North Atlantic. *Climate Change*. 48 (1): 53-82.
- Huang, Chi-Yue, Zhao, Meixun, Wang, Chia-Chun och Wei, Ganjian. 2001. Cooling of the South China Sea by the Toba eruption and correlation with other climate proxies similar to 71,000 years ago. *Geophysic Research Letters*. 28 (20):3915-3918.
- IPCC .2007. Climate Change - The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jones, P.D., Briffa, K.R och Schweingruber, F.H. 1995. Tree-ring evidence of the widespread effects of explosive volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*. 22 (11):1333-1336.
- Kamo, Sandra L., Czamanske, Gerald K., Amelin, Yuri, Fedorenko, Valeri A., Davies, DW och Trofimov VR. 2003. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*. 214 (1-2): 75-91.
- Keeling, Ralph, Piper, Steve och Bollenbacher, Alane. 2009. Atmospheric CO2 records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.* doi: 10.3334/CDIAC/atg.035. <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.html> (Hämtad 2015-12-20).
- Kiehl, Jeffrey T. och Trenberth, Kevin E. 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin American Meteorological Society*. 78 (2): 197-208.
- Kobashi, Takuro, Severinghaus, Jeffrey P., Brook, Edward J, Barnola, Jean-Marc och Grachev, Alexi M. 2007. "Precise timing and characterization of abrupt climate change 8,200 years ago from air trapped in polar ice". *Quaternary Science Reviews*. **26**: 1212–1222.
- Kravitz, Ben och Robock, Alan. 2011. Climate effects of high-latitude volcanic eruptions: Role of the tmie of year. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 116, D01105.
- Kunzig, Robert. 2008. A Sunshade for Planet Earth. *Science*. 299(5): 46-55.
- Loberg, Bengt. 2004. *Geologi - Material, processer och Sveriges berggrund*. 6. uppl.

Stockholm: Bokförlaget Prisma.

- Mason, Ben G., Pyle, David M., och Oppenheimer, Clive. 2004. The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth. *Bulletin of Volcanology*. 66:735-748.
- Mather, TA., Pyle, DM. och Oppenheimer, C. 2003. *Tropospheric Volcanic Aerosol. Monophysical Geograph*. 139: 189-212.
- Newhall, Christopher G. och Self, Stephen. 1982. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*. 87 (C2): 1231-1238.
- NOAA. 2015. Solar and Infrared Radiation.
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/programs/esrl/solar/solar.html>
(Hämtad 2015-12-28).
- Oman, Luke, Robock, Alan, Stenchikov, Georgiy, Thordarson, Thorvaldur, Koch, Dorothy, Schindell, Drew och Gao, Chaochao. 2006. Modeling the distribution of the volcanic aerosol cloud from the 1783–1784 Laki eruption. *Journal of Geophysics Research: Atmospheres*. 111 D: 12209.
- Pausata, Francesco S.R., Chafik, Leon, Caballero, Rodrigo och Battists, David S. 2015. Impacts of high-latitude volcanic eruptions on ENSO and AMOC. *PNAS*. 112 (45):13784-13788.
- Prothero, Donald R. och Emry, Robert J. 2005. *The Terrestrial Eocene–Oligocene Transition in North America*. Cambridge University Press.
- Rampino, Michael R. och Self, Stephen. 1982. Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact. *Quaternary Research*. 18 (2): 127–143.
- Robock, Alan, Ammann, Caspar M, Oman, Luke, Schindell, Drew, Levis, Samuel och Stenchikov, Gregoriy. 2009. Did the Toba volcanic eruption of ~ 74 ka B.P. produce widespread glaciation. *Journal of Geophysical Research*. 114: D10107
- Robock, Alan. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Review of Geophysics. American Geophysical Union*. 38 (2): 191-219.
- Robock, Alan. 1981. The Mount St. Helens volcanic eruption of 18 May 1980: minimal climatic effect. *Science*. 212: 1383-1384212.
- Santer, Benjamin D., Solomon, Susan, Bonflis, Céline, Zelinka, Mark D., Painter, Jeffrey F., Beltran, Fransisco, Fyfe, John C., Johannesson, Gardar, Mears, Carl, Ridley, David A., Vernier, Jean-Paul och Wentz, Frank J. 2015. Observed multivariable signals of late 20th and early 21st century volcanic activity. *Geophysical Research Letters*. 42 (2): 500-509.
- Siebert, Lee. och Simkin, Tom. 2010. Volcanoes of the world: an Illustrated Catalogue of Holocene Volcanoes and their Eruptions. Smithsonian Institution, *Global Volcanism Program Digital Information Series*, GVP-3. <http://volcano.si.edu/> (Hämtad 2015-12-29).
- Schneider, David P., Ammann, Caspar M., Otto-Bliesner, Bette L. och Kaufman, Darrell S. 2009. Climate response to large, high-latitude and low-latitude volcanic eruptions in the Community Climate System Model. *Journal of Geophysical Research*. 114, D15101.
- Sigurdsson, Haraldur, Houghton, Bruce, McNutt, Steven R., Rymer, Hazel och Stix, John. 2015. *Climatic Impacts of Volcanic Eruptions. The Encyclopedia of VOLCANOES*. 2. uppl. London: Elsevier, 935-938.

- SMHI. 2013. Atmosfärens olika lager. <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/atmosfarens-olika-lager-1.5838> (Hämtad 2015-11-20).
- Smithsonian Institution National Museum of Natural History Global Volcanism Program. 2013. Volcanoes of the world. http://volcano.si.edu/search_eruption.cfm (Hämtad 2016-12-22).
- Soden, Brian J., Wetherald, Richard T., Stenchikov, Georgiy L. och Robock Alan. 2002. Global Cooling After the eruption of Mount Pinatubo: A Test of Climate Feedback by Water Vapor. *Science*. 296:727-730.
- Stothers, Richard. 1996. Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: pyrhelio- metric period, 1881–1960. *Journal of Geophysical Research*. 101 (D2): 3901-3920.
- Stott, Lowell, Timmermann, Axel och Thunell, Robert. 2007. Southern Hemisphere and Deep-Sea Warming Led Deglacial Atmospheric CO₂ Rise and Tropical Warming. *Science*. 318 (5849): 435-438.
- Stowe, L.L, Carey, R.M. och Pellegrino, P.P. 1992. Monitoring the Mt. Pinatubo aerosol layer with NOAA/11 AVHRR data. *Journal of Geophysical Research Letters*. 19 (2): 159-162.
- Sutton, Jeff, Elias, Tamar, Hendley, James W., och Stauffer, Peter H. 1997. Volcanic Air Pollution - A Hazard in Hawaii. U.S. *Geological Survey Fact Sheet 169*.
- Thompson, Anne M. 1992. The Oxidizing Capacity of the Earth's Atmosphere: Probable Past and Future Changes. *Science*. 256 (5060): 1157-1165. (Tryckt tidskrift).
- Thordarson, Thorvaldur och Self, Stephen. 2003. Atmospheric effects of the 1783-1784 Laki eruption: A review and reassessment. *Journal of Geophysical Research*. 108 (1): 1-29.
- SGU. 2015. Seismisk aktivitet. <http://www.sgu.se/om-geologi/jordklotets-uppbyggnad/seismisk-aktivitet/>
- USGS. 1999. *Plate tectonics and people*. <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/tectonics.html> (Hämtat 2016-01-04).
- USGS. 2006. Mauna Loa: Earth's Largest Volcano. <http://hvo.wr.usgs.gov/maunaloa/> (Hämtat 2015-12-10).
- USGS. 2008. Volcanic Sulfur Aerosols Affect Climate and the Earth's Ozone Layer. <https://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/so2aerosols.php> (Hämtad 2015-11-15).
- USGS. 2009. Volcanic hazards: Tephra, including ash. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/tephra/index.php> (Hämtad 2015-11-20).
- USGS. 2014. Understanding plate motions. <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html> (Hämtad 2016-01-04).
- USGS. 2015. Seismisk aktivitet. <http://www.sgu.se/om-geologi/jordklotets-uppbyggnad/seismisk-aktivitet/> (Hämtad 2015-12-21).
- Vollweiler, N., Scholz, D., Mühlinghaus, C., Mangini, C. och Spötl, C. 2006. A precisely dated climate record for the last 9 kyr from three high alpine stalagmites, Spannagel Cave, Austria. *Quaternary Science Reviews* 25 (9): 1127-1136.
- Ward, Peter L. 2015. *WHAT REALLY CAUSES GLOBAL WARMING?* Greenhouse gases or Ozone Depletion? Morgan James Pub. 268.
- Ward, Peter L. 2009 Sulfur dioxide initiates global change in four ways. *Thin Solid Films*.

517 (11): 3188-3203.

Warnecke, Peter. 2000. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. 2 uppl. San Diego, Ca. Academic Press.

Wikipedia. 2007. Vulkan. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Vulkan> (Hämtad 2015-12-28).

Zanassi, Alessandro, Kohn, Matthew J., MacFadden, Bruce J. och Terry, Dennis O. 2007. Large temperature drop across the Eocene-Oligocene transition in central North America. *Nature*. 445: 639-642.

Zielinski, G.A, Mayewski, Paul A., Meeker, L.D, Whitlow, S. och Twicler M.S. 1996. Potential atmospheric impact of the Toba mega-eruption ~71,000 years ago. *Journal of Geophysical Research Letters*. 23 (8): 837-840.

Zielinski, Grehory A. (1995). Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice cores. *Journal of Geophysical Research Letters*. 100 (D10): 20937-20955.



Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG)
901 87 Umeå, Sweden
Telefon 090-786 50 00
Texttelefon 090-786 59 00
www.umu.se