
Modellering av vulkanaske i norsk luftrom

Pkt. 1.3 Enkle forbedringer av
utslippsestimat

Nina Iren Kristiansen



Oppdragsrapport

Prosjekt målinger/modellering av vulkanaske i norsk luftrom

Rapportering av prosjektspesifikasjonens pkt 1.3:

1.3 Enkle forbedringer av utslippsestimat

Sammendrag

Ved et vulkanutbrudd er det nødvendig å varsle spredning av vulkanaske for å angi områder der askekonsentrasjoner overstiger gitte grenseverdier for operasjonell lufttrafikk. Transportmodellene som benyttes til slik varsling er avhengig av gode estimat for utslippet av aske ved vulkanen for å kunne varsle spredningen på en mest mulig korrekt måte. Slike utslippsestimat er ikke tilgjengelig gjennom direkte målinger men må beregnes ved indirekte metoder. Dette kan være fra enkle metoder som gir et grovt utslippsestimat (for eksempel fra empiriske forhold mellom målbare variable og utslippsmengde, eller gjennom manuell analyse av satellittdata) til mer avanserte og tidkrevende metoder (for eksempel inversjonsteknikk).

En rekke metoder for beregning av askeutslipp har blitt gjennomgått og evaluert i forhold til tilgjengelighet, brukervennlighet, tidsressurs med mer. Eksempelvis er det lagt vekt på hvor raskt etter utbruddet metoden kan anvendes og hvilke metoder som er kan/bør brukes i de ulike faser under et vulkanutbrudd. Per dags dato er standard utslippsestimat definert og brukt for operasjonelle spredningsvarsel hos Meteorologisk institutt. De samme utslippsestimat blir brukt i spredningsvarsel hos NILU dersom et utbrudd oppstår (ikke i operasjonell modus). Disse spredningsvarslene er basert på enkle utslippstabeller fra US Geological Survey (USGS) og som er den metoden som er mulig å benytte for daglige simuleringer av potensielle utbrudd. I en reell situasjon kan dette utslippsestimatet avvike stort fra realiteten slik at det bør justeres med oppdaterte utslippsestimat fra andre metoder for å få et mest mulig reelt spredningsvarsel. Det er foreslått 3 ulike evalueringsfaser av et utbrudd der forbedringer av utslippsestimat og spredningsvarsel anses som mulig.

Det er blitt utarbeidet en arbeidsbeskrivelse der forbedrede askeutslippsestimat i hovedsak kan bli utarbeidet av NILU blant annet ved manuell analyse av satellittdata. Slike analyser krever at fagpersonell er tilgjengelig og kan dermed ikke automatiseres. Det er således avhengig av at NILU har tilgjengelige ressurser og fagpersonell på jobb ettersom NILU ikke innehar noen operasjonell kriseberedskap. De oppdaterte utslippsestimatene vil så bli gjort tilgjengelig for Meteorologisk institutt slik at spredningsvarsel er i mer overensstemmelse med satellittobservasjoner enn det standard spredningsvarsler gir. Dersom Meteorologisk institutt har kapasitet i en reell situasjon vil forbedrede askeutslippsestimat også bli utarbeidet der. Dette vil sikre at beste mulige utslippsestimat benyttes i de ulike fasene under et utbrudd. Dette er også spesielt nyttig i prosjektperioden da inversjonsmetoder blir uttestet hos Meteorologisk institutt og resultater fra dette sannsynligvis ikke vil være klare i en reell askesituasjon. Dette vil bidra til at det i prosjektperioden er sikret at beste mulige metoder benyttes i en reell askesituasjon.

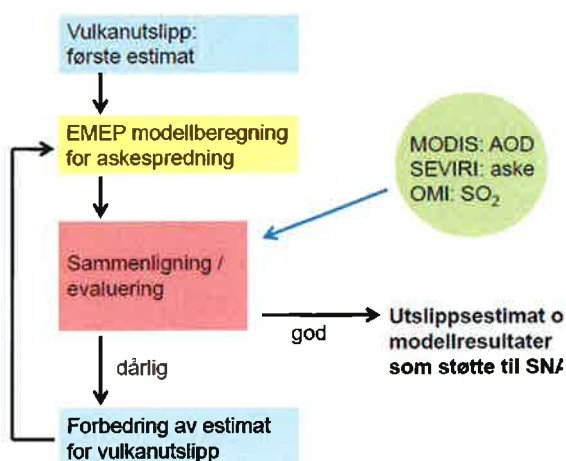
Beskrivelse av delprosjekt 1.3

”Enkle forbedringer av utslippsestimat”

Det er mulig å gjøre et grovt estimat av askeutslippet direkte ved manuell analyse av satellittdata (dvs. ikke automatisert ved inversjonsmetodikk). Det vil bli utarbeidet en prosedyre for manuell analyse av satellittdata av eksperter innenfor fagfeltet, for å gi et grovt anslag av askeutslippet som dernest benyttes i en modellsimulering. Dette kan så tas med i evalueringen av askesituasjonen hvor modellsimuleringen basert på det anslåtte utslippsestimatet sammenlignes med både askevarsel fra VAAC og satellittobservasjoner. Denne metoden krever fagpersoner tilgjengelig i en askesituasjon, og analysene kan ikke automatiseres.

Dette manuelle utslippsestimatet kan sammenlignes med estimat som baserer seg på offentlig tilgjengelige utslippstabeller fra ”US Geological Survey” (USGS), hvor typiske utslippstall er angitt for ulike typer vulkaner over hele verden. Ved å sammenligne modellert askefordeling som er basert på slike utslippsestimater, med observerte data for aske og svoveldioksid fra ulike satellittinstrument som MODIS, SEVIRI og OMI, så kan avviket mellom modell og observasjon gi grunnlag for et nytt og forbedret utslippsestimat, som kan brukes i en gjentatt modellkjøring. Dette er en såkalt manuell inversjonsmetodikk der modellen tilpasses observasjoner manuelt ved visuelle analyser.

For å kunne gjøre en iterativ bestemmelse av utslippsrater er det nødvendig med pålitelig informasjon fra observasjoner (satellitter) i sann tid. Det er ikke klart enda hvor raskt etter et utbrudd det er mulig å utføre en slik utslippsestimering, og som en del av dette prosjektet vil Meteorologisk institutt/NILU utrede hva som bør gjøres i de ulike fasene under et utbrudd (sannsynligvis vil man måtte gjøre et første estimat basert på tilgjengelig informasjon om vulkantype etc. fra USGS i påvente av informasjon fra satellitt).



Figur 1 Forbedring av utslippsestimater ved hjelp av EMEP-modellen og observasjoner fra satellittinstrumenter som MODIS, SEVIRI og OMI.

Enkle forbedringer av askeutslippsestimat til bruk i spredningsvarsel

Som en del av dette prosjektet har Meteorologisk institutt og NILU utredet hva som kan og bør gjøres i de ulike fasene under et utbrudd med hensyn til oppsett, bruk og kvalitet av spredningsvarsling. En rekke metoder for beregning av askeutslipp har blitt gjennomgått og evaluert i forhold til tilgjengelighet, brukervennlighet, tidsressurs med mer (Appendiks II, se spesielt Tabell 1). Eksempelvis er det lagt vekt på hvor raskt etter utbruddet metoden kan anvendes og hvilke metoder som er bør/kan brukes i de ulike fasene under et vulkanutbrudd. Det er foreslått 3 ulike evalueringstider av et utbrudd der forbedringer av utslippsestimat og spredningsvarsel anses som mulig. Tidsrammene som er indikert for hver enkelt evalueringstid er beste mulige tilfelle og kan måtte forlenges betraktelig dersom utbrudd skjer på ugunstig tid (nattestid/helligdag/ferie) eller dersom utbruddet er av en særs kompleks karakter slik at analyser vil ta lengre tid enn antatt.

Utbruddets evalueringstider:

1. Fase 1 (initialt, ~1-2 timer)

Per dags dato er standard utslippsestimat definert og brukt for operasjonelle spredningsvarsel hos Meteorologisk institutt. De samme utslippsestimat blir brukt i spredningsvarsel hos NILU dersom et utbrudd oppstår (ikke i operasjonell modus). Disse spredningsvarslene er basert på enkle utslippstabeller fra US Geological Survey (USGS) og som er den metoden som er mulig å benytte for daglige simuleringer av potensielle utbrudd. Dette vil også danne grunnlag for de aller første spredningsvarsel ved et nytt utbrudd i den fasen da ingen eller svært lite informasjon om utbruddet eller askeutslippene er tilgjengelig.

2. Fase 2 (~2-12 timer)

I en reell situasjon kan utslippsestimatet brukt i Fase 1 avvike stort fra realiteten slik at det bør justeres med oppdaterte utslippsestimat fra andre metoder for å få et mest mulig reelt spredningsvarsel.

I fase 2 vil det bli gjort en innsamling av all tilgjengelig informasjon. Eksempelvis:

- Nøyaktig starttid for utbrudd/utslipp
- Askeskyhøyder observert av bl.a. radar eller lignende
- Komposisjon av aske fra bakke-/flymålinger
- Satellittdata. Spesielt SEVIRI satellittprodukter for vulkanaske er tilgjengelig hvert 15 minutt. Med tid for prosessering/overføring osv kan disse nå tas med i evalueringen.

All slik informasjon vil bli evaluert og tatt med i oppsettet til et nytt spredningsvarsel. For utbrudd fra Islandske vulkaner vil slik informasjon primært være tilgjengelig gjennom Islandske Meteorologiske institutt (IMO) og/eller London VAAC/UK MetOffice. Både Meteorologisk institutt og NILU har kontakter på disse instituttene og informasjon vil bli søkt

gjennom en samlet innsats. All samlet informasjon vil gjøres tilgjengelig for både Meteorologisk institutt og NILU.

Det vil i tillegg, om mulig, bli foretatt en manuell analyse av satellittdata for enkel forbedringer av utslippsestimat slik at spredningsvarsel er i noenlunde overensstemmelse med observasjoner. En arbeidsbeskrivelse for slike manuelle analyser er beskrevet i Appendix I.

3. Fase 3 (~12-24 timer)

En mer avansert teknikk for beregning av askeutslipp er basert på en inversjonsteknikk som blir utviklet og uttestet i løpet av prosjektperioden. Denne metoden vil sannsynligvis ikke være klar og tilgjengelig under prosjektperioden men om mulig vil det gjøres enkle inversjoner under et nytt utbrudd dersom systemet er klart i tilstrekkelig grad.

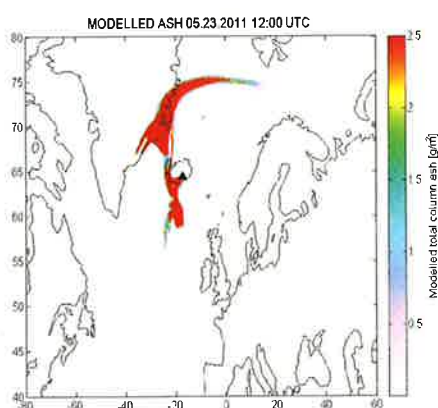
Appendiks I:

Arbeidsbeskrivelse for manuell analyse av satellittdata for enkle forbedringer av askeutslippsestimat til bruk i spredningsvarsel

Det er blitt utarbeidet en arbeidsbeskrivelse der forbedrede askeutslippsestimat i hovedsak kan bli utarbeidet av NILU blant annet ved manuell analyse av satellittdata. Slike analyser krever at fagpersonell er tilgjengelig og kan dermed ikke automatiseres. Det er således avhengig av at NILU har tilgjengelige ressurser og fagpersonell på jobb ettersom NILU ikke innehar noen operasjonell kriseberedskap. De oppdaterte utslippsestimatene vil så bli gjort tilgjengelig for Meteorologisk institutt slik at spredningsvarsel er i mer overensstemmelse med satellittobservasjoner enn det standard spredningsvarsler gir. Dersom Meteorologisk institutt har kapasitet i en reell situasjon vil forbedrede askeutslippsestimat også bli utarbeidet der. Det vil sikre at beste mulige utslippsestimat benyttes i de ulike fasene under et utbrudd. Arbeidsbeskrivelsen har 5 punkter som skal følges sekvensielt.

1. Standard spredningsvarsel

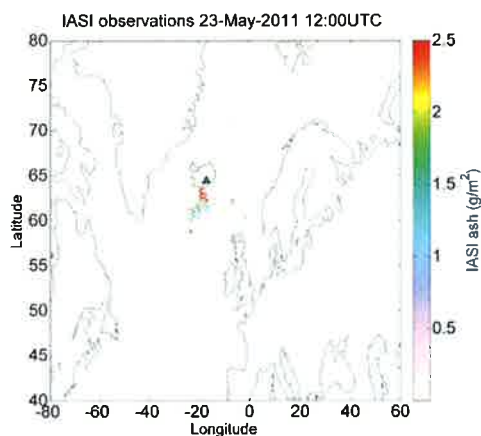
- 1.1. Spredningsmodellene kjøres med "standard" oppsett (fra Fase 1) i henhold til utslippsestimat fra USGS (*Mastin m. fl., 2009a*) eller Mastins ligning (*Mastin m. fl., 2009b*) som beskrevet i Appendiks II. Slike spredningsvarsel kjøres pr d.d. operasjonelt på Meteorologisk institutt med EEMEP modellen og kan settes i gang manuelt på NILU med FLEXPART modellen.
- 1.2. Askekart fra disse modellkjøringene (EEMEP/FLEXPART) produseres. Disse kartene skal vise "total kolonne" aske (g/m^2) som vist i Figur 1.1. Ettersom disse kartene i neste punkt vil bli sammenlignet med satellittmålinger er det nyttig om disse modelldataene om mulig skaleres med satellittsensitiviteter (se for eksempel Figur 1 i *Stohl m. fl., 2011*), men det er ikke strengt nødvendig i første fase. På Meteorologisk institutt kan slike modellerte askekart produseres gjennom visualiseringsverktøyet Diana og på NILU av ulike visualiseringsverktøy (matlab/python/Diana).



Figur 1.1: Modellert askesky fra standard spredningsvarsel gitt i enhet "total kolonne" g/m^2

2. Produsering av satellittkart

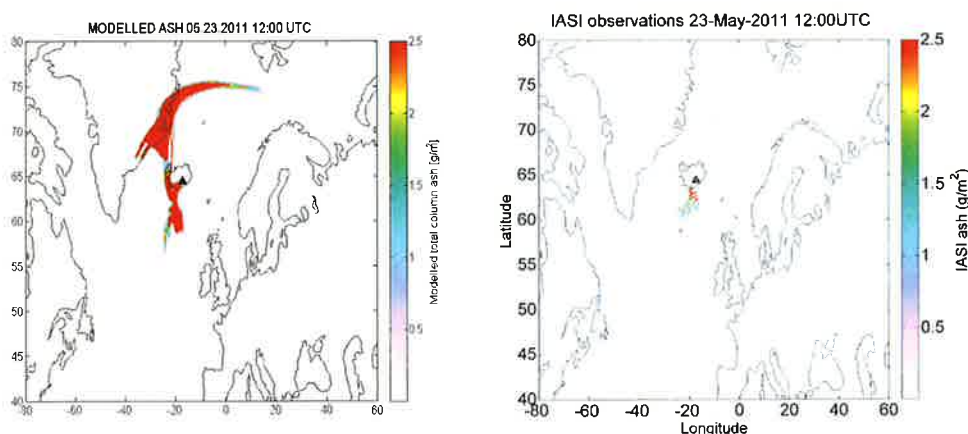
- 2.1. Askekart fra satellittprodukter for vulkanaske visualiseres på tilsvarende måte som for de modellerte askekartene som vist i Figur 2.1. Satellittbaserte vulkanaskeprodukter (kalt VOLE) er tilgjengelig på NILU via EUMETCAST systemet og blir derfra gjort tilgjengelig for Meteorologisk institutt. Satellittproduktene viser "total kolonne" aske (g/m^2). Fortrinnsvis skal disse satellittbaserte askekartene produseres med samme fargeskala som kartene fra modellene. På Meteorologisk institutt kan slike modellerte askekart produseres gjennom visualiseringsverktøyet Diana og på NILU av ulike visualiseringsverktøy (matlab/python/Diana).



Figur 2.1: Satellittobservert askesky gitt i enhet "total kolonne" g/m^2

3. Visuell sammenligning av standard spredningsvarsel og satellittdata

- 3.1. Askekartene fra spredningsmodellene og satellitten legges side om side og sammenlignes direkte som vist i Figur 3.1.

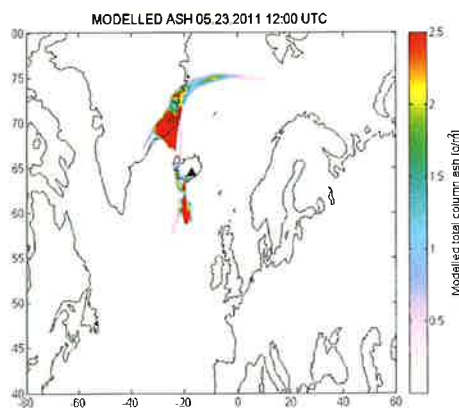


Figur 3.1: Sammenligning av modellert askesky (venstre) og satellittobservert askesky (høyre).

4. Beregning av forbedret utslippsestimat

- 4.1. Verdiene i det modellerte askekartet skaleres slik at de er i noenlunde overensstemmelse med de observerte verdiene. Dette gjøres ved *en enkelt skaleringsfaktor*. For eksempel skaleres alle verdiene med en faktor 10. Det må prøves og feiles inntil best overensstemmelse oppnås. Et eksempel på et skalert askekart er vist i Figur 4.1.

Det er viktig å være klar over at en slik skaleringsfaktor vil variere fra modell til modell ettersom modellene beskriver utvasking/avsetning av aske osv på ulike måter slik at askekonsentrasjonene i ulike modeller ikke vil være 100 % sammenlignbare selv om identiske utslippsestimat er brukt. Dermed vil skaleringsfaktoren nødvendigvis ikke vil være den samme for EMEP og FLEXPART modellene. Derfor må en satellitt-modell sammenligning gjøres for hver modell og skaleringsfaktoren brukes kun for den bestemte modellen.



Figur 4.1: Modellert askesky hvor verdiene er skalert med en faktor 10 slik at det er bedre overensstemmelse med satellittverdiene.

- 4.2. Utslippsestimatet som var brukt initialt i standard spredningsvarsel blir så skalert med tilsvarende skaleringsfaktor. Slik er et forbedret utslippsestimat beregnet.

5. Forbedret spredningsvarsel

- 5.1. De skalerte askekartene fungerer som et forbedret spredningsvarsel for de tidspunkt det allerede er utstett varsel for.
- 5.2. Videre spredningsvarsel som går utover perioden for forrige varsel, skal bruke de forbedrede utslippsestimat.

Appendiks II:

Oversikt over noen tilgjengelige metoder for beregning av vulkanske utslipp

En rekke metoder for beregning av vulkanske utslipp har blitt gjennomgått og evaluert i forhold til tilgjengelighet, brukervennlighet, tidsressurs med mer. Eksempelvis er det lagt vekt på hvor raskt etter utbruddet metoden kan anvendes og hvilke metoder som er kan/bør brukes i de ulike faser under et vulkanutbrudd. Kun metoder som er egnet til bruk i en semi-operasjonell sammenheng er tatt i betraktning. De ulike metodene er oppsummert i Tabell 1 hvor det er foreslått 3 ulike evalueringsfaser av et utbrudd der forebedringer av utslippsestimat anses som mulig.

1) Offentlig tilgjengelige utslippstabeller

Standard vulkanparametre er angitt i oppslagstabeller fra U.S. Geological Survey (*Mastin m. fl., 2009a*). I alt 11 typer vulkanutbrudd er definert med utslippsparemetre for aske (utslippshøyde (km), utslippsrate (kg/s), utslippsvolum (km³), varighet (t), fin aske andel) og over 1500 vulkaner er klassifisert. Parametrene er basert på kartlegging og karakterisering av askeavsetninger fra et begrenset antall vulkaner. Utslippshøyde og utslippsvarighet er fra historiske beretninger. Eksempelvis er noen islandske vulkaner klassifisert som under:

NAVN	PLASSERING	BREDDEGRAD	LENGDEGRAD	M.O.H.	TYPE	VARIGHET	UTBRUDDSTYPE
Eyjafjöll	Iceland-S	63.63	19.62	1666	Stratovolcano	D3	S0
Grímsvötn	Iceland-NE	64.42	17.33	1725	Caldera	D1	M0
Hekla	Iceland-S	63.98	19.70	1491	Stratovolcano	D1	S2
Katla	Iceland-S	63.63	19.05	1512	Subglacial	D2	M0

Hvor utslippsparemetrene for noen av de ulike utbruddstypene er definert som under:

UTBRUDDSTYPE	UTSLIPPSHØYDE (km)	UTSLIPPSRATE (kg/s)	VOLUME (km ³)	VARIGHET (t)	ANDEL FIN ASKE (m63)
M0: Standard mafic magma type	7	1x10 ⁵	0.01	60	0.05
S0=S2: standard silicic magma type	11	4x10 ⁶	0.015	3	0.4

Utbruddstype er definert blant annet ut ifra hva slags type magma vulkanen inneholder. "S" angir "silicic" magma (f.eks. andesitt, ryolitt eller andre typer magma med høy viskositet, "seigtflytende") som typisk gir eksplosive utbrudd. "M" angir "mafic" magma (eksempelvis basalt eller andre type magma med lav viskositet, "tyntflytende") som typisk gir utbrudd av mindre eksplosiv karakter.

I følge utslippstabellene skulle Eyjafjallajökull-utbruddet i 2010 gi høyere utslippshøyde, større utslippsrate og andel fin aske men være mer kortvarig enn Grímsvötn-utbruddet i 2011 som skulle ha lengre varighet med lavere utslippshøyde, mindre utslippsrate og andel fin aske. Dette var ikke

slik disse to utbruddene utartet seg. Blant annet varte Eyjafjallajökull-utbruddet i 40 dager mens Grimsvötn varte i 7 dager samt med høyere utslippshøyder. Lignende forskjeller (M0 og S0) vil man forvente for utbrudd fra Hekla og Katla vulkanene.

Metoden gir ingen estimat for den vertikale fordeling i askekolonnen.

Per dags dato er standard utslippsestimat definert ut ifra disse USGS tabellene og brukt for operasjonelle spredningsvarsel hos Meteorologisk institutt. De samme utslippsestimat blir brukt i spredningsvarsel hos NILU dersom et utbrudd oppstår (ikke i operasjonell modus). Dette er en av få metoder som er mulig å benytte for daglige simuleringer av potensielle utbrudd hvor ingen observasjonsdata er tilgjengelig men hvor utbruddsparametrene er basert på historiske observasjoner og dermed ikke er ren gjetning.

Ved et nytt reelt utbrudd er denne metoden nyttige i de aller første tidsperiodene slik at spredningsberegninger av askeutslipp kan settes i gang nærmest umiddelbart. Disse tabellbaserte utslippparametrene kan likevel avvike stort fra realiteten slik at parametrene må justeres ved hjelp av observasjoner for det aktuelle utbruddet så snart slike data er tilgjengelig (dette v.h.a. videre metoder).

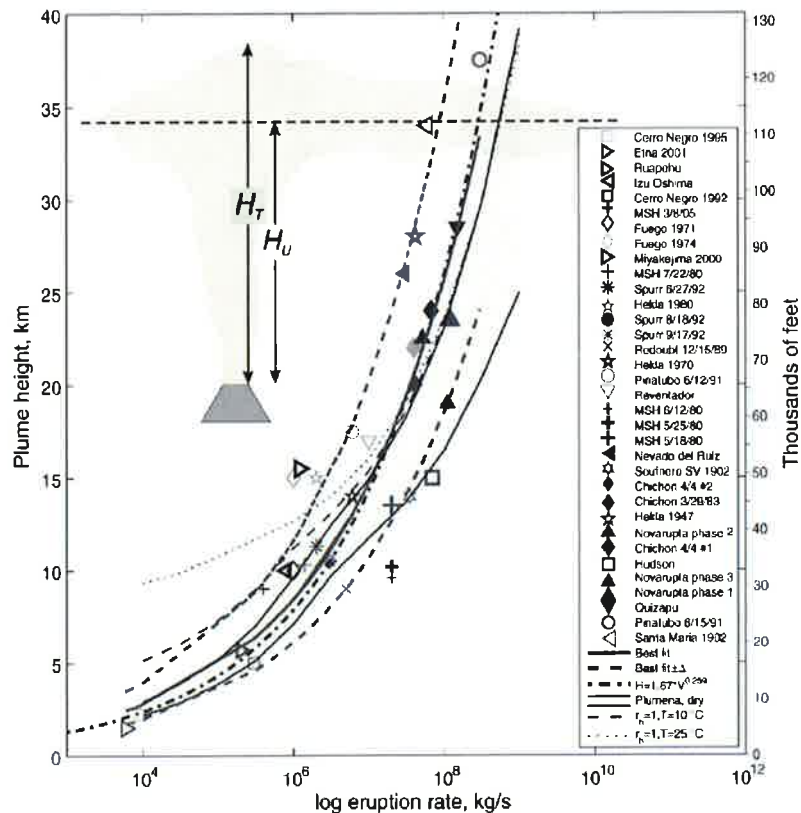
2) Empiriske forhold

Det finnes en rekke studier som gir en estimert relasjon mellom mengde aske som slippes ut fra vulkanen (utslippsrate) og utslippshøyde (høyden på askeskyen i kolonnen over vulkanen). Relasjonene er basert på historiske observasjonsdata og kan brukes til å beregne utslippsrate dersom man har observasjoner eller indikasjoner på høyden på askekolonnen.

Mastin m. fl. (2009b) gir et slikt empirisk relasjonsestimat hvor utslippsrate M (kg/s) og observert høyde H (km) på askeskyen henger sammen ved ligningen $H = 2.00 \times (M/\rho)^{0.241}$ hvor ρ er tetthet av askepartikler (2500-3000 kg/m³). Forholdet mellom H og M er vist i Figur 1.

For bruk i modeller og til bruk i spredningsvarsel må det i tillegg gjøres en antakelse om hvor stor andel av M er "fin aske" (små partikler, opp til ca 50 micrometer diameter). Vanligvis er andelen fin aske 1-10 % men den kan variere fra 0.1% opp til 50%. Andelen fin aske brukes så om utslippsestimat i modellen.

Metoden gir ingen estimat på den vertikale fordeling i askekolonnen.



Figur 1: Forhold mellom utslippsrate M (kg/s) (x-akse) og observert høyde H (km) (y-akse) for vulkanske askeskyer basert på observasjoner fra utbruddene indikert i den innfalte rammen.

Det finnes i tillegg en rekke videreutviklede empiriske forhold som tar hensyn til atmosfæriske forhold som vind eller luftfuktighet (*Degruyter and Bonadonna, 2012; Woodhouse m. fl., 2013*).

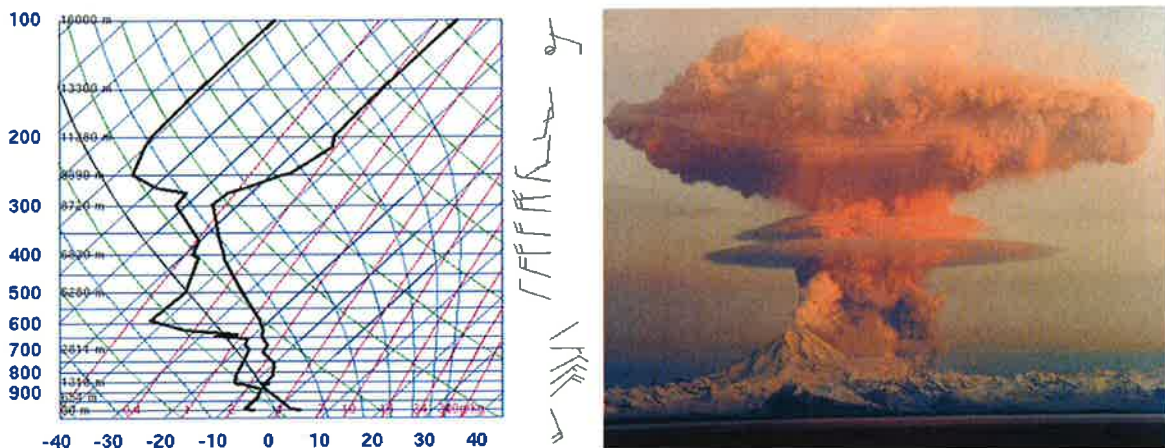
Det påpekes at metoden kan ha store usikkerheter først og fremst ut fra to faktorer. Den første er at for relativt små utbrudd (utslippshøyde under 10-12 km) så er relasjonen som er vist i Figur 1 basert på veldig få historiske observasjoner samt at spredningen i observasjonene går over en størrelsesorden. Den andre faktoren er andelen fin aske som må antas for å brukes i spredningsvarsel. Da denne kan variere stort vil det ha stor effekt på de varslede askekonsentrasjonene.

Denne metoden er nyttig dersom observasjonsdata er tilgjengelig for utslippshøyde fra for eksempel radar. Utslippssparametrene kan likevel avvike stort fra realiteten ettersom andelen fin aske kan variere stort fra utbrudd til utbrudd og er vanskelig å definere. Metoden gir en forbedret beregning av askeutslippet ved at observasjoner for høyden på askekolonnen er tatt i betraktning, men utslippsrate har stor usikkerhet.

3) Begrenset utslippshøyde ved tropopausehøyde

Tropopausen fungerer som en barriere slik at utslippene fra eksplosive utbrudd er ofte begrenset til denne høyden (Durant og Rose, 2009). Radiosondedata (Figur 2, venstre) eller andre meteorologiske data (evt. fra værvarselmodell) kan bli brukt til å estimere tropopausehøyde og askeutslippene kan bli fordelt fra vulkanen opp til denne høyden. Selve utslippsrate vil måtte bli beregnet fra metode 1 (USGS) eller 2 (Mastin) mens da utslippshøyde begrenses av denne metoden.

Eksplosive utbrudd danner ofte en "paraplyform" (se Figur 2, høyre) slik at mer masse slippes ut ved toppen enn ved bunnen av askekolonnen. Det er derfor hensiktsmessig og benytte en slik vertikal fordeling for askeutslippene i et spredningsvarsel.



Figur 2: Venstre: Radiosondedata fra Keflavik værstasjon på Island som viser temperatur og vanninnhold plottet mot trykk og gir informasjon om den vertikale strukturen av atmosfæren. Atmosfærisk temperatur er vist av den svarte kurven til høyre og duggpunktstemperatur av kurven til venstre. En temperaturinversjon ved 8.7 km tilsvarende nivået til tropopausen. (Dataene er fra <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science). Høyre: Utbruddssøyle som viser en "paraplyform" over Redoubt vulkanen i Alaska.

Denne metoden er nyttig dersom meteorologiske data er tilgjengelig, samt et estimat for utslippsrate. Metoden kan gi en forbedret beregning av høyden til utslippene ved at meteorologiske observasjoner tas i betraktning. Metoden vil kun være brukbar for eksplosive utbrudd som er kraftige nok til å sende utslipp relativt høyt og hvor antakelsen om at de blir bremsede av tropopausen er gyldig.

4) Numeriske plume-modeller

Det finnes en rekke numeriske modeller som kan beregne dynamiske faktorer i en utbruddssøyle. PLUMERIA modellen (*Mastin, 2007*) er en 1-dimensjonal numerisk modell som kan brukes til å beregne oppadgående hastighet, plumetetthet, radius, temperatur og andre parametere for vulkanske askeskyer som en funksjon av høyden. Spesielt nyttig er estimat på den vertikale fordelingen av aske i kolonnen over vulkanen. Modellen bruker (reelle eller statiske) atmosfæriske forhold spesifisert fra inputparametre.

Modellen er offentlig tilgjengelig fra USGS

(<http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/Mastin/Publications/G3Plumeria/framework.html>) og er blitt testet på NILU. Det krever videre uttesting før metoden kan benyttes i en reell askesituasjon.

PLUMERIA modellen bruker visse parametre som input.

Eksempel på input for Eyjafjallajökull vulkanen er gitt under:

Vent diameter (m): 25.0

Vent elevation (m): 1666.0

Initial velocity (m/s): 100.0

Magma temperature (c): 900.

Weight fraction gas: 0.030

Magma specific heat, (J/kg K): 1000.0

Magma density, (kg/m³): 2500.0

Mass fraction water added: 0.000

Mass flux, (kg/s): 0.245E+06

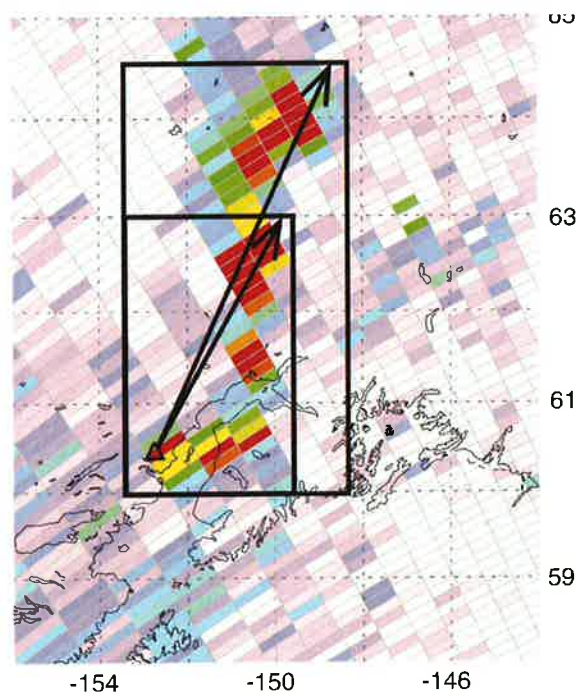
Estimat på utslippsrate (masseflux, kg/s) kan tas fra metode 1 eller 2 beskrevet over, hvorpå PLUMERIA modellen vil gi et estimat på den vertikale fordelingen av asken i kolonnen over vulkanen som så kan brukes i spredningsvarslingen. Det er også mulig å benytte en versjon av modellen hvor man ikke trenger som input et estimat på utslippsrate, men hvor man optimerer utslippsraten til å matche observerte plumehøyder. Dette gjøres ved å bruke estimat på "vent radius" (r_0) og "exit velocity" (u_0) og så beregnes utslippsrate ved hjelp av $\pi \cdot r_0^2 \cdot \text{tetthet} \cdot u_0$. Man itererer så (ved hjelp av å justere r_0) inntil utslippsraten resulterer i den observerte plumehøyden. Slike beregninger ble gjort for analyser av Eyjafjallajökull-utslippene (*Stohl m. fl., 2011*).

Det finnes også ulike andre plume-modeller, som BENT/PUFFIN (*Bursik, 2001*) og Active Tracer High-resolution Atmospheric Model (ATHAM; *Oberhuber m. fl., 1998*) som kan brukes til å beregne askeutslipp ved hjelp av ulike antakelser og inputparametre. Noen av disse modellene er mer regnekraftig tunge.

Denne metoden er nyttig dersom estimat på utslippsrate og/eller plumehøyde samt meteorologiske data er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av askeutslippet ved at den vertikale fordelingen av asken i kolonnen over vulkanen er estimert.

5) Boksmetode for evaluering av satellittdata

Enkle beregninger for utslippsrate kan gjøres ved å evaluere satellittdata alene. En av de enkleste metodene for å utlede utslippsrate fra satellittdata er å evaluere den totale observerte massen innenfor en sirkel eller en boks som har dimensjoner som tilsvarer avstanden vulkanskyen transporteres på en dag (se Figur 3). Denne avstanden og dimensjonene kan bestemmes ved hjelp av en trajektorie-modell eller vinddata fra radiosondedata. Den daglige utslippsraten (kg/dag) er da rett og slett beregnet ved å dividere massen innenfor boksen på en dag. Teknikken er spesielt fokusert mot utslipp av svoveldioksid (SO_2) og er mer komplisert dersom den skal anvendes for vulkanaske.



Figur 3: Satellittbilde fra 6. juni 2009 som viser en SO_2 sky fra Redoubt vulkanen i Alaska. Den korte sorte pilen indikerer avstanden skyen ble transportert i en periode på 24 timer og massen innenfor den lille boksen brukes til å beregne en daglig SO_2 -utslippsrate. (Fra Lopez m. fl., 2012)

Teknikken er videre basert på massekonserveringsprinsippet ved at et satellittbilde innhentet på en gitt tid gjenspeiler budsjettet av utslipp (kilde) og tap siden starten av utslippet. Man bør derfor også ta hensyn til tapsprosesser som har forekommet mellom tiden for utslippet til observasjonstidspunktet. Dermed må man korrigere den estimerte utslippsraten for tapsprosesser. For SO_2 kan dette forenkles ved en passende levetid (eksempelvis 10 dager for en SO_2 -sky i noen kilometers høyde, som betyr at tap av SO_2 kan anses som neglisjerbar nær vulkanen for tidsskalaer på 1 dag) mens for aske er tapsprosessene mer kompliserte og varierende fra utbrudd til utbrudd (for eksempel avhenger dette sterkt av utvasking ved nedbør).

Lopez m. fl. (2012) og *Theys m. fl. (2013)* har brukt denne metoden for å beregne daglige utslippsrater for SO₂ fra ulike vulkanutbrudd, og sammenlignet resultatene med andre metoder.

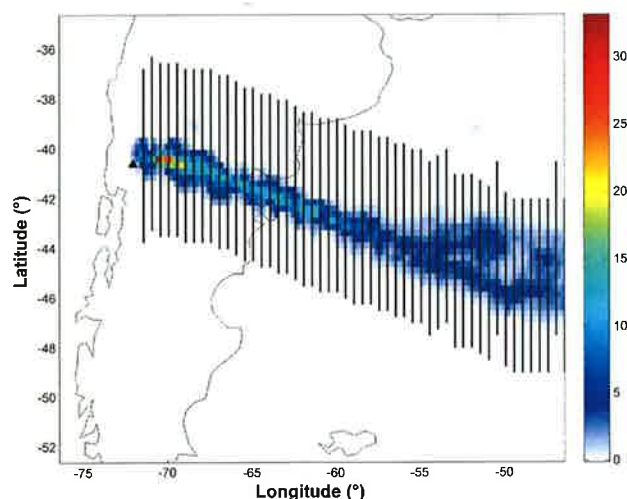
For aske er metoden mindre uttestet og har usikkerheter relatert til tapsprosesser. Metoden er også vanskelig å benytte for vulkanskyer som transporteres i mange ulike retninger og hvor man ikke klart kan definere en sirkel eller en boks som har dimensjoner som tilsvarer avstanden vulkanskyen transporteres på en dag.

Denne metoden er nyttig dersom satellittobservasjoner og meteorologiske data er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av utslippet ved at satellittobservasjoner danner grunnlag for utslippsrateberegningen. Metoden gir kun en grov tidsoppløsning på utslippsestimatet og har flere relativt store usikkerheter, spesielt for askeutslippsberegninger.

6) Tverrsnitt av satellittdata

Enkelte analyser kan også gjøres ved å evaluere satellittdata samt meteorologiske data. Fra ett enkelt satellittbilde som vist i Figur 4 kan man estimere tidsserier for utslippsrate med høyere tidsoppløsning enn metoden i 5. Teknikken er spesielt fokusert mot utslipp av SO₂ og er mer komplisert dersom den skal anvendes for vulkanaske.

Prinsippet for metoden er det enkle forholdet mellom fart (v), strekning(s) og tid(t): $t=s/v$. Først definerer man den dominerende transportretningen for vulkanskyen. Så beregnes den totale mengden aske/SO₂ i ulike tverrsnitt av den satellittobserverte vulkanske skyen i ulike avstander fra vulkanen (se Figur 4 svarte vertikale linjer).



Figur 4: Satellittobservert SO₂-sky for 6. juni 2011. Utslipp fra Puyehue-Cordon Caulle vulkanen i Chile. De svarte vertikale linjene viser ulike tverrsnitt gjennom skyen i ulik avstand fra vulkanen som brukes til å beregne utslippsrate. En skyhøyde på 13 km er antatt. (Fra Theys m. fl., 2013)

Ved hjelp av meteorologiske data fra modell eller observasjoner kan man så evaluere vindhastighet og beregne tidspunktet for utslipp for de ulike tverrsnittene ved hjelp av prinsippet mellom fart, strekning og tid. Dette krever en antakelse om i hvilken høyde vulkanskynen ligger for så å evaluere vindhastighet i denne høyden (som man vanligvis antar konstant). Har man observasjoner av utslippshøyde fra for eksempel radar kan dette benyttes. For SO₂-skyen i Figur 4 er en skyhøyde på 13 km antatt.

Den totale mengden aske/SO₂ i de ulike tverrsnittene føres så tilbake til utslippstidspunkt og man kan rekonstruere tidsserier for utslippsrate. Dette kan gjøres fra ett enkelt satellittbilde.

Man kan videre gjøre forbedringer ved å ta hensyn til tapsprosesser og bruke massekonserveringsprinsippet. Den totale mengden som er observert i ulike tverrsnitt reflekterer budsjettet for kilde (utslipp) og tapsprosesser (inkludert spredning og diffusjon) siden starten av utslippet. Man kan korrigere de estimerte utslippsratene for tapsprosesser. For SO₂ kan dette forenkles ved en passende levetid (eksempelvis 10 dager) mens for aske er tapsprosessene mer kompliserte og varierende fra utbrudd til utbrudd (for eksempel avhenger dette sterkt av utvasking ved nedbør).

Merucci m. fl. (2011) og *Theys m. fl. (2013)* og flere har analysert denne metoden for utslipp av SO₂ for flere vulkanutbrudd og funnet godt samsvar med andre metoder og med uavhengige observasjoner.

For aske er metoden mindre uttestet og har usikkerheter relatert til tapsprosesser. Metoden er også vanskelig å benytte for vulkanskyer som transporteres i mange ulike retninger og hvor man ikke klart kan definere en dominerende transportretning.

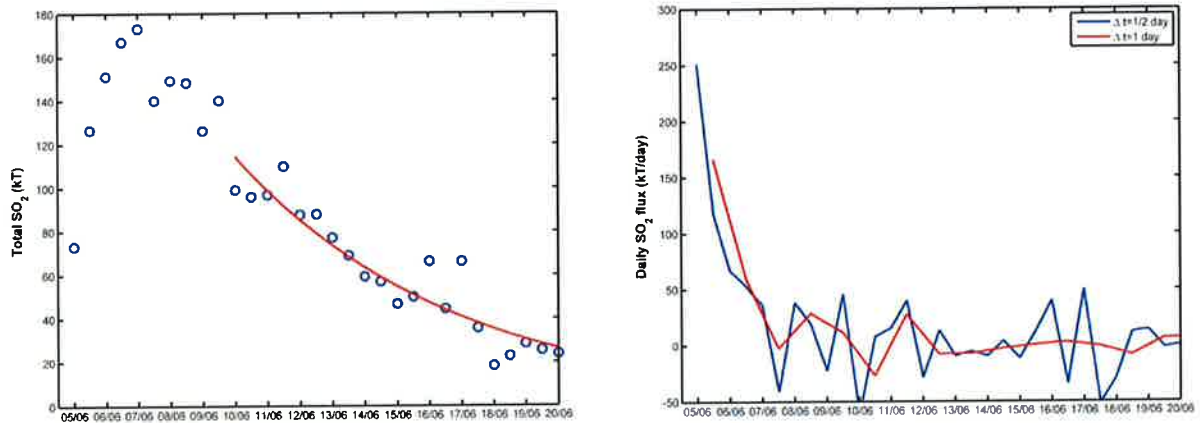
Denne metoden er nyttig dersom satellittobservasjoner og meteorologiske data er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av utslippet ved at satellittobservasjoner danner grunnlag for utslippsrateberegningen. Metoden har usikkerheter i forhold til antakelser om høyden på vulkanskynen og for tapsprosesser.

7) Tidsserieanalyse for satellittdata

Tidsserier fra satellittdata kan analyseres for å beregne utslippsrate for vulkanske utslipp. Teknikken er spesielt fokusert mot utslipp av SO₂ og er mer komplisert dersom den skal anvendes for vulkanaske. Metoden trenger ikke input fra meteorologiske data slik som de to foregående metodene (5 og 6) beskrevet tidligere.

Metoden tar i bruk tidsserier av total observert SO₂ masse observert av etterfølgende satellittmålinger. Den totale mengden SO₂ som er observert på et gitt tidspunkt er et resultat av "gammel" SO₂ som henger igjen fra tidligere tidsperioder, "ny" SO₂ som er sluppet ut fra forrige satellittmåling inntil nåværende tidspunkt, samt SO₂ som er fjernet i samme tidsperiode. Ved å se på

daglige variasjoner i observert total SO_2 masse og estimere eller anta tapsrate(r) er det mulig å summere opp all "ny" SO_2 for alle tidsperiodene av utbruddet og således beregne en utslippsrate (se Figur 5).



Figur 5: (Venstre) Tidsserier av observert total masse (blå prikker) målt fra satellitt for 2011-utbruddet av Puyehue-Cordon Caulle i Chile. Den røde kurven er en eksponentiell funksjon som er tilpasset dataene og som gir en tapsrate på 6,8 dager. En skyhøyde på 13 km er antatt. (Høyre) Daglige utslippsrater beregnet ved analyser av tidsserier for den totale massen beregnet på en halv- og daglig basis. (Fra Theys m. fl., 2013).

Metoden avhenger av gode antakelser eller estimat på tapsrate (eller levetid) for SO_2 . Ved å tilpasse en analytisk funksjon til massetidsserien av observert SO_2 kan man oppnå et estimat på tapsraten for SO_2 som vist på Figur 5. Metoden er også helt avhengig av satellittmålinger hvor hele vulkanskynen er dekket av observasjonene.

Metoden kan teoretisk sett brukes også for aske men å beregne tapsrate for aske er mye mer kompleks enn for SO_2 . Tapsmekanismene for aske involverer blant annet gravitasjonskrefter og våtavsetning som i stor grad er styrt av tilstedeværelse av regn, noe som er svært varierende.

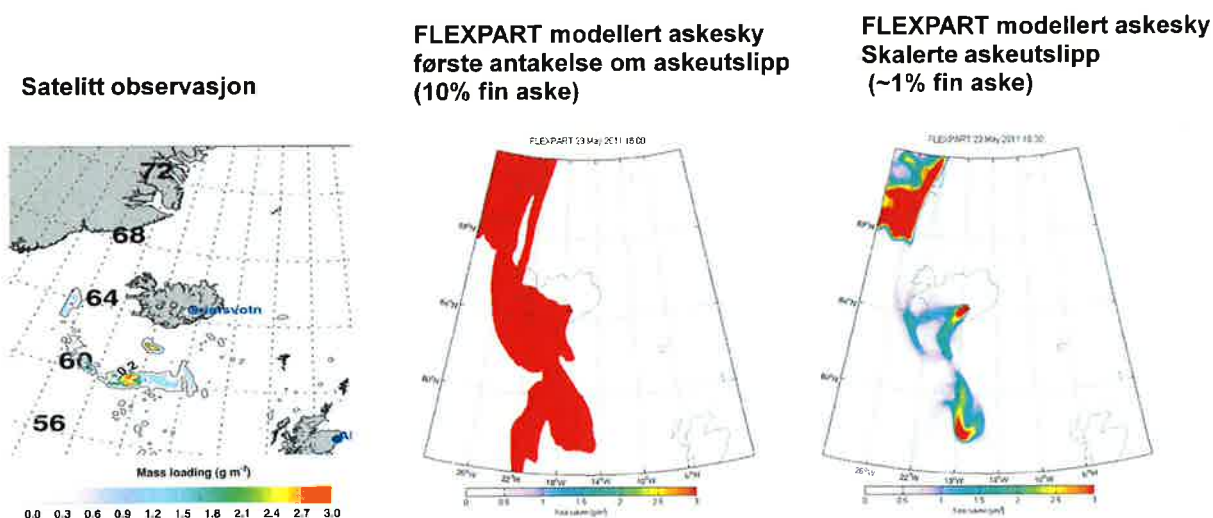
Krueger m. fl. (1996) og *Theys m. fl. (2013)* har testet denne metoden for SO_2 -utslipp fra ulike utbrudd og sammenlignet resultatene med andre metoder. Metoden er ikke godt uttestet for aske.

Denne metoden er nyttig dersom mange sekvensielle satellittobservasjoner er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av utslippet ved at satellittobservasjoner danner grunnlag for utslippsrateberegningen. Metoden har usikkerheter og begrensninger i forhold til antakelser eller estimat av tapsrater og at hele vulkanskynen må være observert. Metoden er uavhengig av meteorologiske data.

8) Manuell inversjon vha satellittdata

Ved å sammenligne modellert askefordeling som er basert på utslippsestimater fra en eller flere av de foregående metodene, med observerte data for aske fra ulike satellittinstrument, så kan avviket mellom modell og observasjon gi grunnlag for et nytt og forbedret utslippsestimat, som kan brukes i en gjentatt modellkjøring. Dette er en såkalt manuell inversjonsmetodikk der modellen tilpasses observasjoner manuelt ved visuelle analyser.

Under utbruddet fra Grimsvötn i 2011 ble slike manuelle inversjoner foretatt på NILU ved å sammenligne FLEXPART modell resultater og observasjoner fra SEVIRI satellitt instrumentet som vist i Figur 6. En mer grundig arbeidsbeskrivelse av en slik manuell inversjon er gitt i Appendiks I. Man ser at kun en grov overensstemmelse med satellittobservasjonene oppnås ved bruk av denne metoden (med kun en enkelt skaleringsfaktor). Enkelte deler av de modellerte askeskyene er ikke observert av satellitten og kan ikke enkelt begrenses ved denne metoden. For slike forbedringer må mer avanserte metoder, som avanserte inversjonsmetodikk (se punkt 9) tas i bruk.



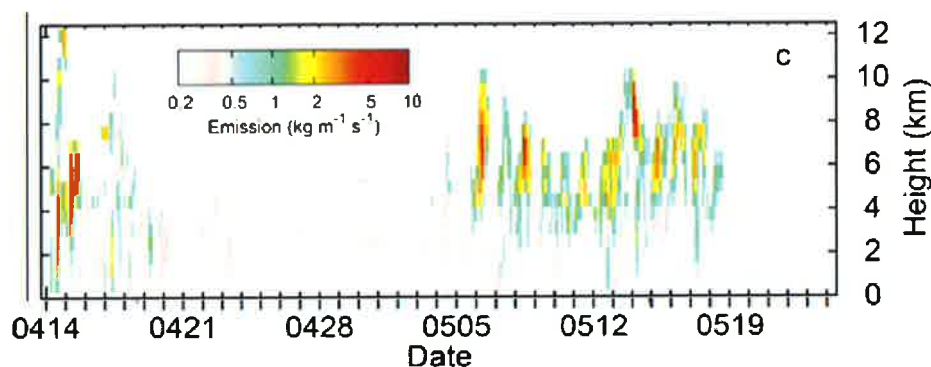
Figur 6: Sammenligning av observert (venstre) og modellerte askeskyer (midten og høyre) for Grimsvötn utbruddet i 2011. De modellerte verdiene ble skalert med en faktor 10 (fra simuleringen i midten til den vist til høyre) for å oppnå bedre samsvar med observasjonene. Tilsvarende ble så utslippsrate justert med samme skaleringsfaktor.

Denne metoden er nyttig dersom første modellresultater og satellittobservasjoner er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av askeutslippet ved at modellresultatene justeres til å være i bedre overensstemmelse med observasjoner. Kun grove justeringer er mulig med kun en enkelt skaleringsfaktor.

9) Avansert inversjonsteknikk

Metoden beskrevet i punkt 8 (manuell inversjon) kan automatiseres og avanseres ved hjelp av ulike algoritmer. Prinsippet er fremdeles at modellert askefordeling optimaliseres slik at de er i best mulig overensstemmelse med satellittobservasjoner. Inversjonsalgoritmer gjør slike optimaliseringsberegninger og kan brukes til å estimere utslippsrate og hvordan denne varierer med høyde og med tid utover i utbruddsperioden.

Stohl m. fl. (2011) har brukt en slik inversjonsalgoritme for å beregne askeutslippene fra Eyjafjallajökull-utbruddet i 2010. Både høyden på utslippene og utslippsrate kan beregnes som vist i Figur 7. Metoden bruker som input: modellerte askeskyer (basert på meteorologiske data), satellittdata og en a priori (første antakelse) om askeutslippet.



Figur 7: Utslippshøyde (høyre y-akse) og utslippsrate (fargeskala) estimert for ulike tidsperioder (x-aksen) under Eyjafjallajökull-utbruddet i 2010. Beregningene er fra inversjonsalgoritmen beskrevet i *Stohl m. fl., (2011)* hvor satellittdata er brukt til å begrense utslippene.

Denne metoden er nyttig dersom satellittobservasjoner og input-modellberegninger er tilgjengelig. Metoden gir en forbedret beregning av askeutslippet ved at utslippsrater med høy romlig og tidsmessig oppløsning beregnes. Dette krever datasystem for å prosessere observasjons- og modelldata samt å kjøre inversjonssystemet.

10) Andre metoder

Det finnes flere metoder for å estimere vulkanske utslipp. Noen er bedre egnet til å estimere utslippsrate og andre utslippsparametre for historiske vulkanske utbrudd som har et godt observasjonsgrunnlag.

For eksempel *Pouget m. fl. (2013)* beskriver en metode for å beregne parametre for vulkanske utslipp ved å analysere hvordan paraply-formen for eksplosive utbrudd, eller spredningen av askeskyen i en lengre avstand fra vulkanen, utvikler seg over tid. De har sett på en rekke utbrudd og samlet observasjoner og antakelser for å estimere enkelte utslippsparametre.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Utslipps- tabeller: USGS	Empiriske forhold: Mastin	Tropopause- begrenset utslipp	Plume modeller: PLUMERIA	Boks metode for satellittdata	Tverrsnitt av satellittdata	Tidsserie analyse av satellittdata	Manuell inversjon v/ satellittdata	Avansert inversjons- teknikk
Gir utslippsrate (kg/s)	Ja	Ja	Nei, antakelse fra 1, 2	Ja, men også som input	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Gir utslippshøyde (km)	Ja	Nei	Ja	Ja, men også som input	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
Gir andel fin aske	Nei, antakelse	Nei, antakelse	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja, indirekte	Ja, indirekte
Gir vertikal fordeling	Nei	Nei	Ja, grovt	Ja	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
Bruk av observert utslippshøyde	Nei	Ja, eller antakelse	Nei	Ja, eller antakelse	Nei	Nei, men mulig	Nei	Nei	Mulig men ikke krav
Bruk av meteorologiske data	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja	Ja
Bruk av satellittdata	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Brukervennlighet	Enkel	Enkel	Enkel	Noe avansert	Noe avansert	Noe avansert	Noe avansert	Noe avansert	Mer avansert
Tilgjengelighet	Offentlig, data i tabellform	Offentlig, ligning fra publikasjon	Krever inget spesielt beregnings-verktøy	Offentlig, modell må nedlastes	Beregnings-metode må settes opp fra publikasjon	Beregnings-metode må settes opp fra publikasjon	Beregnings-metode må settes opp fra publikasjon	Krever inget spesielt beregnings-verktøy	Metode utvikles og settes opp på met.no/NILU
Fordeler	Enkle utslipps-parametre. Også for potensielle utbrudd.	Enkel bruk av observasjonsdata	Enkel bruk av observasjonsdata	Gir vertikal fordeling ved bruk av observasjonsdata	Enkle analyser av satellittdata	Analyser fra ett enkelt satellittbilde	Enkelt estimat fra sekvensielle satellittmålinger, krever ikke meteorologiske data	Enkel og direkte sammen-ligning observasjon og modell	Avansert sammen-ligning observasjon-modell + optima-lisering
Begrensninger	Kun grove antakelser om utslipp. Store usikkerheter.	Høydeestimat må være tilgjengelig eller antas. Store usikkerheter.	Utslippsrate må antas/være kjent. Store usikkerheter.	Antakelser om parametre for vulkan, samt meteorologiske data på bestemt format.	Vanskelig definisjon av boks til-svarende transport for en dag. Grov tidsoppløsning for utslipps-beregninger.	Antakelser om taps-prosesser, høyde på vulkanskøy og konstant vindhastighet.	Antakelser/ estimat på tapsrater, hele vulkanskøyen må være observert.	Kun grove justeringer av utslipp mulig. Varierer med ulike modeller.	Krever et mer avansert system for analyser av modell og beregninger.
Best for fase av utbrudd	Fase 1 Initialt (Muligens ~1-2 timer)	Fase 1	Fase 2	Fase 2	Fase 2	Fase 2	Fase 2	Fase 2 (Muligens ~2-12 t)	Fase 3 (Muligens ~12-24 t)
Referanse	Mastin m. fl., 2009a	Mastin m. fl., 2009b	Durant og Rose, 2009	Mastin, 2007	Lopez m. fl. (2012)	Merucci m. fl. (2011)	Krueger m. fl. (1996)	Ingen	Stohl m. fl., 2011

Tabell 1. Oversikt over ulike metoder for beregning av vulkanske utslipp. Metodene markert i grått er de som vil tas i bruk i fasene 1-3 dersom en ny reell vulkanaskesituasjon oppstår. En arbeidsbeskrivelse for den valgte metoden for Fase 2 er beskrevet i Appendiks I.


Referanser

- Bursik, M. (2001) Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, *28*, 3621-3624. doi:10.1029/2001GL013393.
- Degruyter, W., Bonadonna, C. (2012) Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L16308. doi:10.1029/2012GL052566.
- Durant, A.J., Rose, W.I. (2009) Sedimentological constraints on hydrometeor-enhanced particle deposition: 1992 Eruptions of Crater Peak, Alaska. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *186*, 40-59. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.02.004.
- Krueger, A.J., Schnetzler, C.C., Walter, L.S. (1996) The December 1981 eruption of Nyamuragira volcano (Zaire), and the origin of the 'mystery cloud' of early 1982. *J. Geophys. Res.*, *101*, 15191-15196. doi: 10.1029/96JD00221.
- Lopez, T., Carn, S., Werner, C., Fee, D., Kelly, P., Doukas, M., Pfeffer, M., Webley, P., Cahill, C., Schneider, D. (2012) Evaluation of Redoubt Volcano's sulfur dioxide emissions by the Ozone Monitoring Instrument. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *259*, 290-307. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.03.002.
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Ewert, J.E., Spiegel, J. (2009a) Preliminary spreadsheet of eruption source parameters for volcanoes of the world. Reston, VA, U.S. Geological Survey (Open-File Report 2009-1133, v. 1.2). URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2009/1133/> [accessed 14 August 2013].
- Mastin, L.G., Guffanti, M., Servranck, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J.W., Neri, A., Rose, W.I., Schneider, D., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupper, A., Volentik, A., Waythomas, C.F. (2009b) A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *186*, 10-21. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Merucci, L., Burton, M.R., Corradini, S., Salerno, G.G. (2011) Reconstruction of SO₂ flux emission chronology from space-based measurements. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *206*, 80-87. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.07.002.
- Oberhuber, J., Herzog, M., Graf, H., Schwanke, K. (1998) Volcanic plume simulation on large scales. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *87*, 29-53. doi:10.1016/S0377-0273(98)00099-7.
- Pouget, S., Bursik, M., Webley, P., Dehn, J., Pavolonis, M. (2013) Estimation of eruption source parameters from umbrella cloud or downwind plume growth rate. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *258*, 100-112. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.04.002.

Stohl, A., Prata, A.J., Eckhardt, S., Clarisse, L., Durant, A., Henne, S., Kristiansen, N.I., Minikin, A., Schumann, U., Seibert, P., Stebel, K., Thomas, H.E., Thorsteinsson, T., Tørseth, K., Weinzierl, B. (2011) Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions for quantitative ash dispersion modeling: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.*, *11*, 4333-4351. doi:10.5194/acp-11-4333-2011.

Theys, N., Campion, R., Clarisse, L., Brenot, H., van Gent, J., Dils, B., Corradini, S., Merucci, L., Coheur, P.-F., Van Roozendaal, M., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Tait, S., Ferrucci, F. (2013) Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS. *Atmos. Chem. Phys.*, *13*, 5945-5968. doi:10.5194/acp-13-5945-2013.

Woodhouse, M.J., Hogg, A.J., Phillips, J.C., Sparks, R.S.J. (2013) Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, *118*, 92-109. doi:10.1029/2012JB009592.

RAPPORTTYPE OPPDRAGRAPPORT	RAPPORT NR. OR 23/2013	ISBN: 978-82-425-2645-8 (trykt) 978-82-425-26465 (elektronisk) ISSN: 0807-7207	
DATO 06/02/2014	ANSV. SIGN. 	ANT. SIDER 21	PRIS NOK 150,-
TITTEL Modellering av vulkanaske i norsk luftrom Pkt. 1.3 Enkle forbedringer av utslippsestimat		PROSJEKTLEDER Nina Iren Kristiansen	
		NILU PROSJEKT NR. O-112109	
FORFATTER(E) Nina Iren Kristiansen		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAUGSGIVERS REF.	
KVALITETSSIKRER: Kjetil Tørseth			
OPPDRAUGSGIVER Samferdselsdepartementet og Avinor AS			
STIKKORD Vulkanaske	Utslippsestimat	Modellering	
REFERAT Rapporten beskriver hvordan en transportmodell brukes til å simulere utslipp av aske fra vulkanutbrudd og hvordan askeutslippene kan beskrives i modellen. En rekke metoder for beregning av askeutslipp er presentert og utarbeidelse av forbedrede askeutslippsestimat ved manuell analyse av satellittdata er presentert.			
TITLE Simple improvements of volcanic emission estimates by manual analysis of satellite data			
ABSTRACT The report describes how a transport model is used to simulate the emission of ash from volcanic eruptions and how the ash emissions can be described in the model. A number of methods for calculating ash emissions are presented and the development of improved ash emissions estimates by manual analysis of satellite data is presented.			

* Kategorier

A	Åpen – kan bestilles fra NILU
B	Begrenset distribusjon
C	Kan ikke utleveres

REFERANSE: O-112109
DATO: JANUAR 2014
ISBN: 978-82-425-2645-8 (trykt)
978-82-425-26465 (elektronisk)

NILU – Norsk institutt for luftforskning er en uavhengig stiftelse etablert i 1969. NILUs forskning har som formål å øke forståelsen for prosesser og effekter knyttet til klimaendringer, atmosfærens sammensetning, luftkvalitet og miljøgifter. På bakgrunn av forskningen leverer NILU integrerte tjenester og produkter innenfor analyse, overvåkning og rådgivning. NILU er opptatt av å opplyse og gi råd til samfunnet om klimaendringer og forurensning og konsekvensene av dette.