
Modellering av vulkanaske i norsk luftrom

Pkt. 2.3.1 Sammenligning av modeller for askeberegninger for bedre å forstå usikkerheter

Nina Iren Kristiansen, Birthe Marie Steensen, Heiko Klein, Hilde Fagerli, Jerzy Bartnicki



Prosjekt målinger/modellering av vulkanaske i norsk luftrom

Rapportering av prosjektspesifikasjonens pkt. 2.3.1:

2.3.1 Sammenligning av modeller for askeberegninger for bedre å forstå usikkerheter

Av

*Nina Iren Kristiansen (NILU), Birthe Marie Steensen (MET), Heiko Klein (MET),
Hilde Fagerli (MET) og Jerzy Bartnicki (MET)*



Sammendrag

Ved 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 viser erfaringsmessig ulike resultater. Dette skyldes ulike utslippsestimat, ulike værprognosedata for modellene, og ulike beskrivelser av fysiske prosesser som påvirker askepartiklene i modellene.

For å forstå de nasjonale modellenes evne til å simulere askespredning, og for å forstå grunnen til ulikhetene mellom modellene, har de tre modellene EEMEP, SNAP og FLEXPART alle simulert askespredning fra Eyjafjallajökull utbruddet i 2010. Alle modellene har blitt kjørt med identisk kildeledd, og modellresultatene har blitt sammenlignet i detalj. Spesielt har de ulike værprognosedata for modellene blitt studert, og de ulike modellenes beskrivelse av småskala prosesser som for eksempel våtavsetning og gravitasjon har blitt sammenlignet. Resultatene fra dette studiet gir en forbedret forståelse av hvilke ulikheter man kan forvente mellom modellene ved neste vulkanutbrudd, og et bedre grunnlag for å forstå usikkerheter i varslene.

De tre modellene simulerer spredning av vulkanaske og askekonsentrasjonsnivå for Eyjafjallajökull utbruddet relativt likt, spesielt for horisontal spredning og plassering av askeskyene men med noe mer variasjon i vertikal spredning. Dette er fordi modellene har brukt identisk utslipp og også relativt like værprognosedata. De mindre forskjellene man kan se mellom de ulike modellresultatene kommer hovedsakelig fra forskjeller i beskrivelsen av fysiske prosesser. For eksempel mangler EEMEP-modellen sedimentering, noe som sannsynligvis er årsaken til en gjennomgående noe høyere konsentrasjon i EEMEP-modellen i forhold til SNAP og FLEXPART. EEMEP-resultatene kan derfor sees på som 'konservative estimat'. Alle modellene gir resultater i godt samsvar med satellittdata (og flymålinger), og forskjellene mellom de ulike modellene er ikke større enn forskjellen mellom de ulike satellittdataene (SEVIRI og IASI).

Ved en reell askesituasjon vil meteorologiske data som brukes for modellene med stor sannsynlighet avvike mer fra hverandre. Spesielt gjelder dette værprognosedata frem i tid som har større usikkerhet og variasjon. Mindre forskjeller i bruk av utslippsestimat (for eksempel vertikal fordeling i

utbruddssøylen) mellom modellene er også sannsynlig. Derfor vil modellresultater for reelle fremtidige askesituasjoner sannsynligvis være mer ulike enn vist i denne rapporten.

Evalueringen i denne rapporten gir ingen grunnlag for å si at en modell er bedre enn de andre. Per i dag går EMEP-modellen i pre-operasjonell drift ved Meteorologisk institutt, og konklusjonene i denne rapporten tilsier ikke at valg av modell skal endres.

Innhold

1	Beskrivelse av delprosjektet	4
2	Modellene EMEP, SNAP og FLEXPART.....	4
3	Sammenligning av modellresultater for Eyjafjallajökull	4
	Modelloppsett.....	4
	Modellresultater og sammenligning med målinger.....	5
	Sammenligning av modellresultater og evaluering mot satellittdata fra SEVIRI og IASI ..	5
	Sammenligning med vertikalprofil fra lidar på fly	11
	Sammenligning med bakkemålinger fra Jungfraujoch.....	17
4	Diskusjon av årsaker til ulikheter mellom modellene.....	20
	Kildeledd	20
	Meteorologisk inputdata	20
	Resultaters oppløsning og midling	22
5	Konklusjon	22
	Referanser.....	23

1 Beskrivelse av delprosjektet

2.3.1 "Sammenligning av modeller for askeberegninger for bedre å forstå usikkerheter"

En gjennomgåelse av de ulike spredningsmodellene er nødvendig for å forstå de ulike modellens evne til å beskrive utslipp, spredning og avsetning, og årsaker til ulikheter som erfaringsvis oppstår mellom forskjellige modeller. En sammenligning av modellresultater fra de ulike modellene som EEMEP, SNAP og FLEXPART, kjørt på ulike værprognosedata og for ulike askeutslipp, danner grunnlag for et usikkerhetsestimert for modellerte askekonsentrasjoner. Videre vil modellenes beskrivelse (eller mangel på beskrivelse) av småskala fysiske prosesser som avsetning, aggregering og oppvirvling bli evaluert for å estimere effekten og verifisere modellens beskrivelse av disse prosessene. NILU bruker modell FLEXPART, mens Meteorologisk institutt bruker SNAP- og EEMEP-modellen. Modellene vil bli kjørt med identisk kildeledd for utbruddet på Eyjafjallajökull. Vurdering av pilotmodell under 2.3.2 avhenger bl.a. av resultatet av modellsammenligningene som gjøres her.

2 Modellene EEMEP, SNAP og FLEXPART

EEMEP- og SNAP-modellene brukes på Meteorologisk institutt for simuleringer av spredning av blant annet vulkansk aske. EEMEP har en vulkanaske-modul hvor utslipp, partikkelstørrelsesklasser m. m er utviklet spesielt for vulkansk aske. EEMEP-modellen kjøres operasjonelt to ganger daglig på Meteorologisk institutt, med et standardoppsett for fire potensielle vulkanutbrudd. SNAP ble i utgangspunktet utviklet for operasjonelle beregninger av kjernefysiske ulykker og eksplosjoner og 'ad hoc'-modifisert for vulkanutbrudd. Senere ble den brukt som en foreløpig operasjonell modell for dette formålet. FLEXPART-modellen på NILU har over flere år blitt brukt til å simulere et titalls vulkanutbrudd, både for utslipp av svoveldioksid og vulkansk aske. NILU har også tilgang til koden for modellen NAME som brukes på UK Met Office, men modellen er ikke satt opp til bruk hos NILU pr. d.d.

3 Sammenligning av modellresultater for Eyjafjallajökull

Modelloppsett

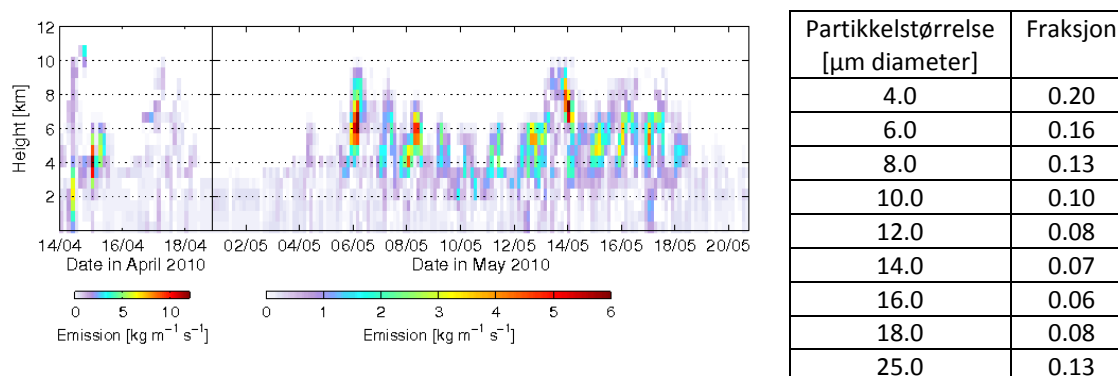
Modellene EEMEP, SNAP og FLEXPART har simulert askespredning fra Eyjafjallajökull utbruddet i 2010. Alle modellene har blitt kjørt med identisk aske-kildeledd fra Stohl m. fl (2011), men med ulike værprognosedata. Modellresultatene har 1-timesmidlede askekonsentrasjoner med $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ horisontal oppløsning. Vertikal oppløsning i EEMEP og SNAP varierer med modell-lagene, mens FLEXPART har 250 m vertikal oppløsning.

Meteorologi

FLEXPART-modellen er kjørt på 3-timers meteorologisk data fra European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) analyser med $0.18^{\circ} \times 0.18^{\circ}$ horisontal oppløsning, og 91 vertikale nivå. EEMEP er kjørt på 3-timer ECMWF hindcast data med $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ horisontal oppløsning og 60 vertikale lag hvorav 42 benyttes, SNAP-modellen kjører på 3-timers data fra HIRLAM 12 med $0.216^{\circ} \times 0.216^{\circ}$ horisontal oppløsning og 60 vertikale lag.

Kildeledd

Aske-kildeleddet vist i **Figur 1** er brukt av alle modellene. Dette kildeleddet ble beregnet av Stohl et al. (2011) ved hjelp av en inversjonsmetode og satellittdata fra SEVIRI og IASI satellitt-instrumentene. Totalt askeutslipp for hele utbruddsperioden er 8.6×10^9 kg. Beregningen for å estimere utslippene bruker FLEXPART-modellsimuleringer, det betyr at utslippene i Figur 1 er optimalisert til å «passe best» med FLEXPART-modellen. Meteorologi og avsetningsprosessene slik de er i FLEXPART vil gjenspeiles i utslippsestimatet. Dersom EEMEP og SNAP har svært ulik beskrivelse av disse prosessene vil ikke kildeleddet være optimalt for disse modellene.



Figur 1: Kildeleddet for aske, samt partikkelstørrelsesfordeling, som brukt av alle modellene.

Modellresultater og sammenligning med målinger

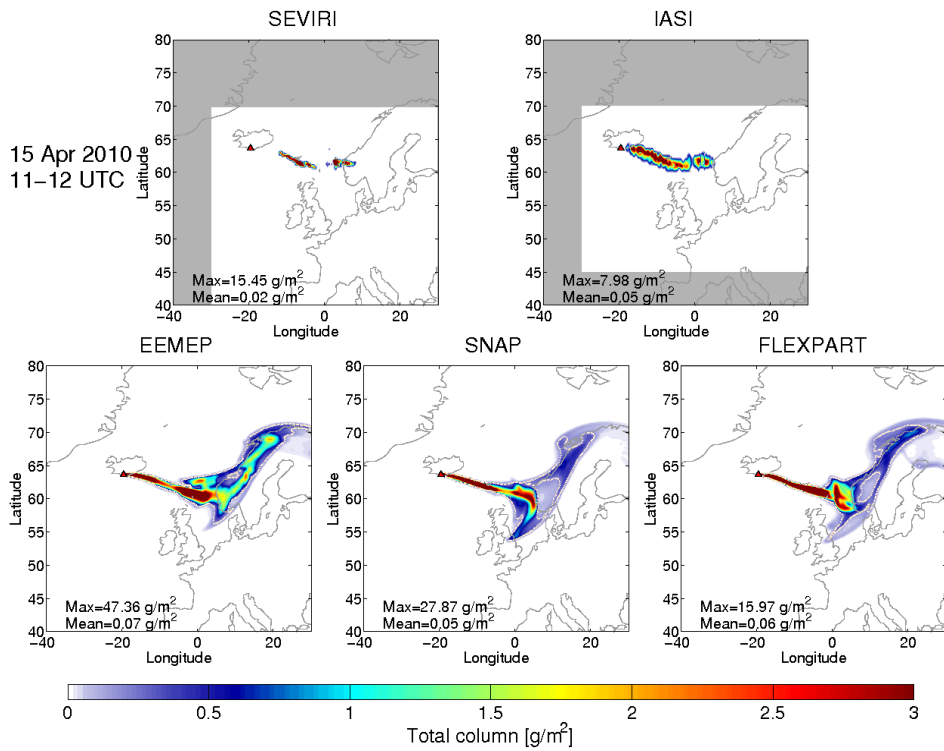
Modellsimuleringene er evaluert på ulike måter, både modell mot modell for å evaluere likheter og ulikheter mellom simuleringene, og modell mot observasjoner for å verifisere modellresultatene. Flere måledatasett er tilgjengelig for å evaluere modellsimuleringene, bl.a. måledata fra tre ulike forskningsfly, satellittmålinger og bakkemålinger i form av partikkelkonsentrasjoner. Kristiansen et al. (2012) har evaluert FLEXPART modellresultatene med ulike målinger. Vi har her tatt med EEMEP og SNAP for noen utvalgte måledataanalyser.

Sammenligning av modellresultater og evaluering mot satellittdata fra SEVIRI og IASI

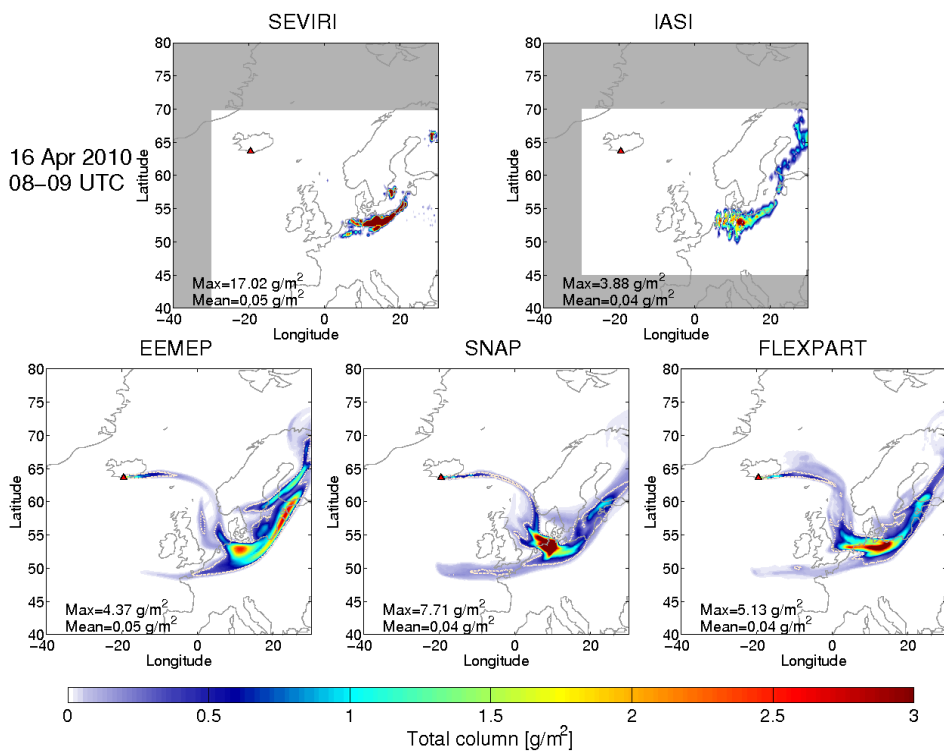
Vi sammenligner de modellerte askeskyene fra EEMEP-, SNAP- og FLEXPART-modellene mot hverandre for ulike tidspunkt i april og mai 2010, og mot satellittobservasjoner fra SEVIRI og IASI. Disse satellittdataene er brukt i inversjonen sammen med FLEXPART-modellen for å estimere kildeleddet, det er dermed ikke en fullverdig uavhengig verifisering av modellresultatene, men likevel en nyttig sammenligning. Som nevnt tidligere, er kildeleddet som er benyttet av alle modellene, optimalisert til å «passe best» med FLEXPART-modellen. Vi forventer derfor at FLEXPART samsvarer bedre med satellittobservasjonene enn EEMEP- og SNAP-modellene. Bemerk også at satellittobservasjonene har stor usikkerhet (se rapport for delprosjekt 1.4.5 av A. Kylling, 1. april 2014) og ved flere anledninger, spesielt i april 2010, var det mange meteorologiske vann- og isskyer tilstede. Dette gjorde satellittobservasjoner av askeskyene vanskelig. Dersom en meteorologisk sky er plassert over askeskyen, vil ikke askeskyen være synlig for satellittinstrumentene. I tillegg har satellitt-observasjonene en nedre grense for hvor mye aske som kan observeres: hvis mengden aske er under ca. $0,2 \text{ g/m}^2$ (Prata & Prata, 2012), vil ikke satellitt-instrumentet kunne detektere denne asken. Det er derfor sannsynlig at det til tider var mer aske tilstede enn det satellittene observerte

under Eyjafjallajökull, og vi forventer derfor at modellene vil vise mer aske enn satellittdataene siden modellene simulerer aske også under 0.2 g/m^2 og under vanlige meteorologiske skyer. Noen utvalgte situasjoner med ulike askeskystrukturer og satellittgrunnlag er videre diskutert med referanse til **figurene 2-7** under. De lyse stiplede linjene på figurene viser de modellerte grensene for $0,2 \text{ g/m}^2$.

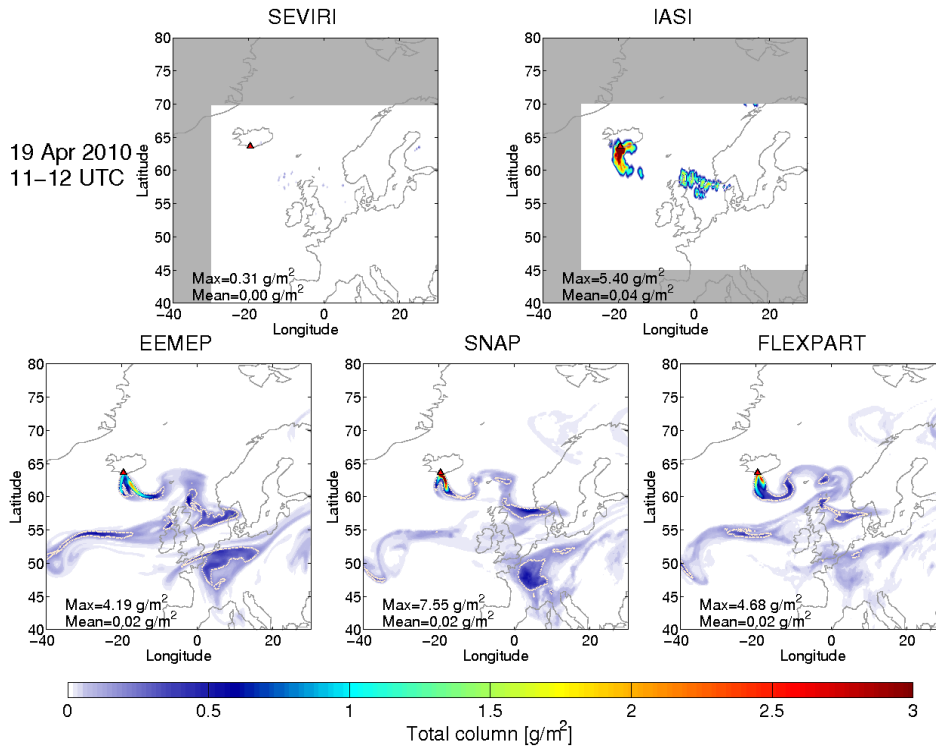
- **15. april 2010 12 UTC:** Observerte og modellerte askeskyer transporteres sørøstover mot Norge og Danmark. Det er generelt god overenstemmelse mellom satellittobservasjoner og alle modeller med hensyn til plassering av askeskyen og modellerte verdier. EEMEP viser noe høyere verdier i askeskyen som ligger langs kysten av Norge.
- **16. april 2010 09 UTC:** Askeskyen er lokalisert hovedsakelig over Tyskland og Polen og strekkes mot nordøst og vestover i en bue-lignende form. Alle modellene viser lignende struktur som satellittobservasjonene.
- **19. april 2010 12 UTC:** Satellittobservasjonene fra SEVIRI viser lite aske og kan være påvirket av meteorologiske skyer. IASI satellittobservasjonene viser noe aske nær vulkanen og vest for Norge. Modellene viser tynne askeskyer over store deler av Europa som stort sett er under deteksjonsgrensene til satellittobservasjonene på 0.2 g/m^2 (slike verdier ville dermed ikke kunne observeres fra satellitt). Alle tre modeller samsvarer tålelig bra med observasjonene.
- **6. mai 2010 21 UTC:** Satellittobservasjonene viser en mer aktiv utbruddsfase etter en stille periode i slutten av april. Askeskyen transporteres sørøstover og er lokalisert hovedsakelig vest og nord for de Britiske øyer. Alle modellene viser stor overenstemmelse med observasjonene.
- **10. mai 2010 12 UTC:** Strukturen på askeskyene er svært kompleks etter å ha blitt transportert i en spirallignende retning av et passerende høytrykk. Alle modellene har denne strukturen.
- **16. mai 2010 12 UTC:** Satellittobservasjoner og modeller viser askeskyer sørøst for Island og over Storbritannia. Det er også her tålelig bra overenstemmelse mellom satellitt og de ulike modellene. EEMEP viser noe høyere askekonsentrasjoner enn de to andre modellene.



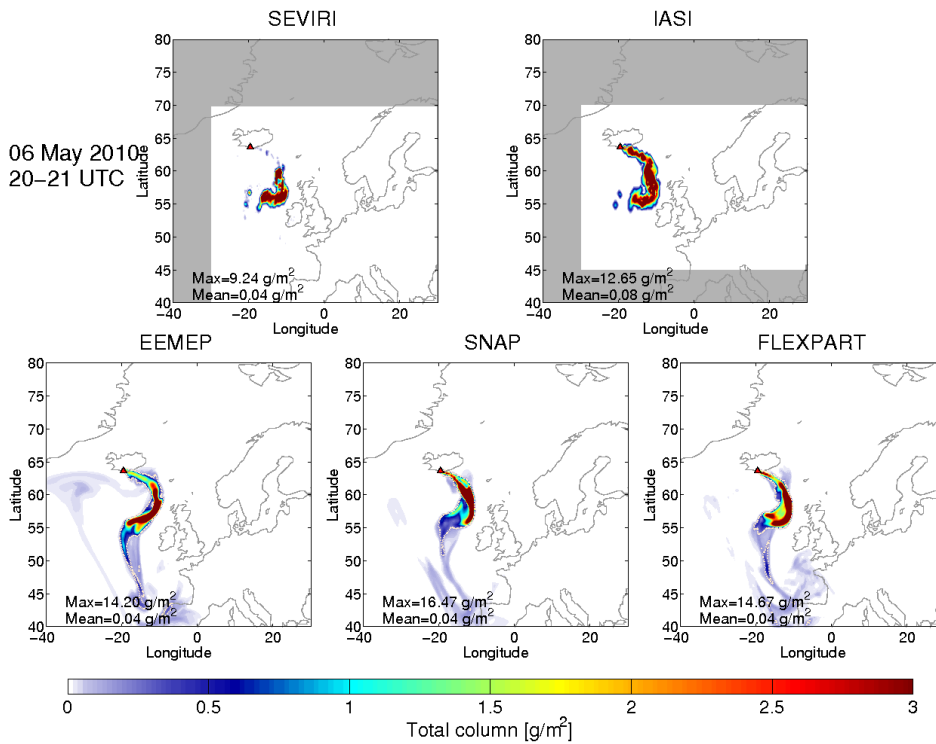
Figur 2



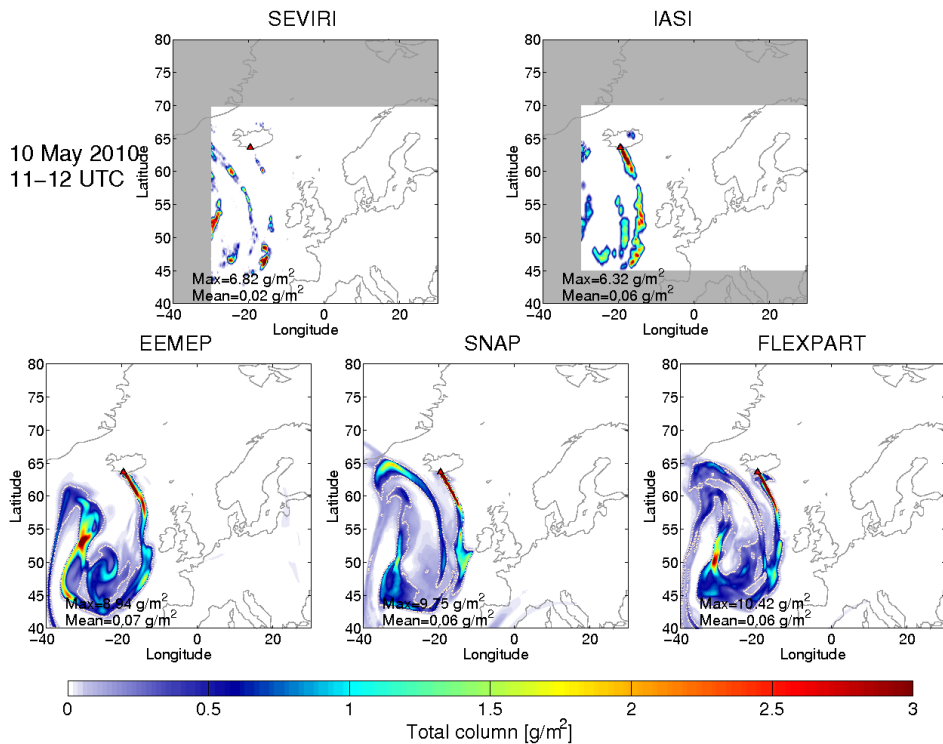
Figur 3



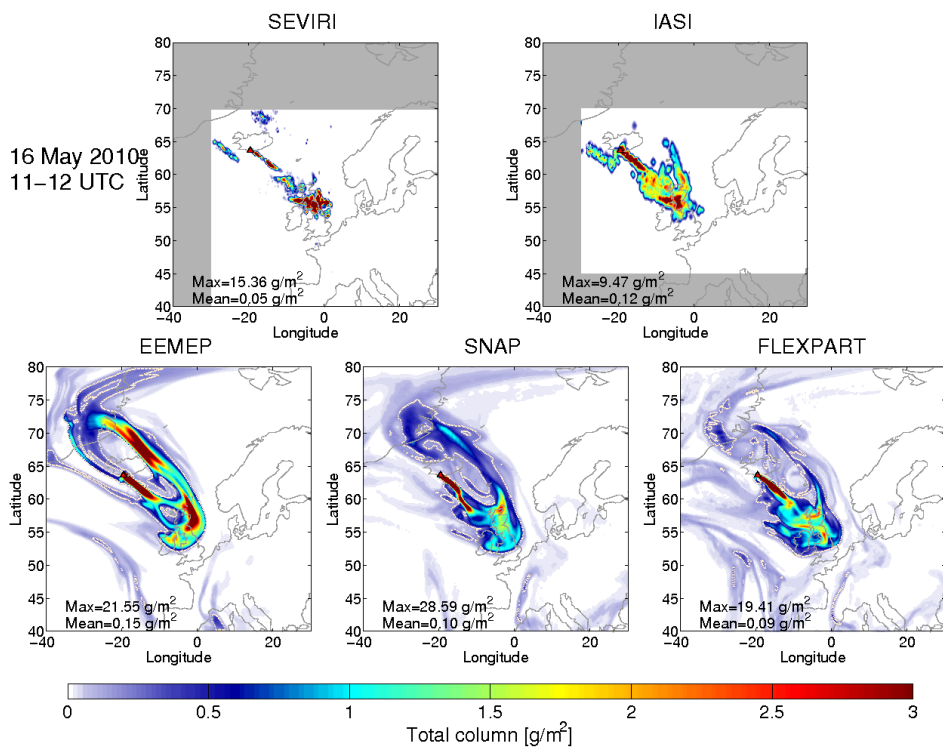
Figur 4



Figur 5



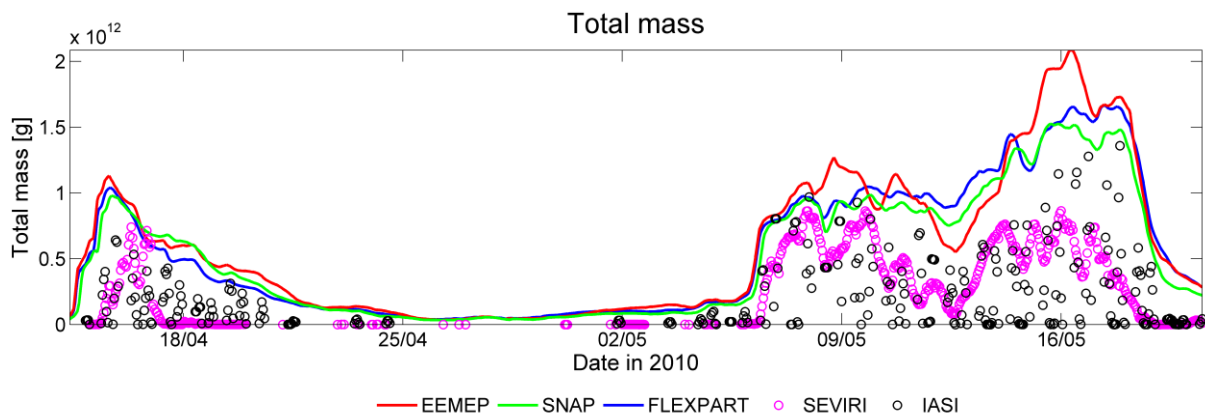
Figur 6



Figur 7

Figur 2-7: Satellittobserverte (SEVIRI og IASI) og modellerte (EEMEP, SNAP og FLEXPART) askeskyer for seks ulike tidspunkt i april og mai 2010. De lyse stiplede linjene markerer 0.2 g/m² (typisk deteksjonsgrense for satellittmålingene).

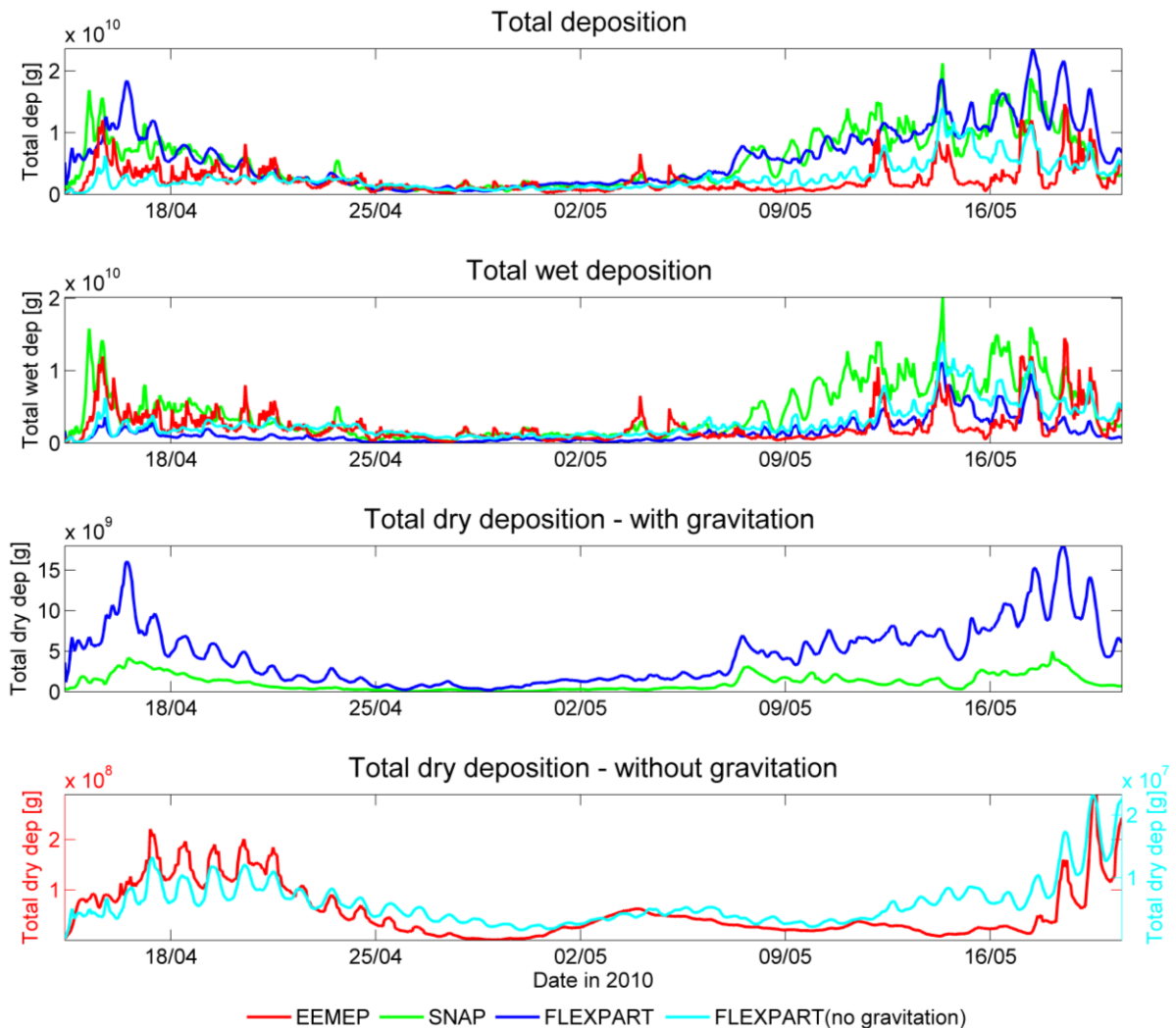
Videre ser vi på den totale massen aske i simuleringene og i satellittdataene over tid. **Figur 8** under viser en tidsserie av mengden aske i atmosfæren innenfor det samme begrensede geografiske område for alle modeller og satellittdatasett. Generelt viser modellene (EEMEP: rød kurve, SNAP: grønn kurve, FLEXPART: blå kurve) til enhver tid større total masse aske i atmosfæren enn satellittobservasjonene (SEVIRI: lilla prikker, IASI: sorte prikker). Dette er forventet grunnet satellittobservasjonenes nedre deteksjonsgrense på ca. $0,2 \text{ g/m}^2$, samt problemer dersom vanlige meteorologiske vann- og is-skyer er tilstede. Vi ser av figuren at variasjonen i den totale massen i modellene i stor grad følger variasjonen i satellittdataene, med høye verdier i starten av utbruddet 14.-18. april, og to perioder med høye verdier igjen rundt 9. mai og 16. mai. Videre ser vi at FLEXPART (blå kurve) og SNAP (grønn kurve) modellene viser omtrentlig like verdier, mens EEMEP (rød kurve) stort sett viser noe høyere verdier som hovedsakelig er grunnet at EEMEP-modellen ikke inkluderer sedimentasjon/gravitasjon noe de to andre modellene inkluderer.



Figur 8: Total mengde aske i atmosfæren over tid (fra 14. april til 20. mai 2010), innenfor det samme geografiske område 30° vest til 30° øst og 40° nord til 70° nord, for de tre ulike modellsimuleringene (EEMEP, SNAP og FLEXPART) og de to ulike satellittdatasettene (SEVIRI og IASI).

Det er videre interessant å se på de modellerte mengdene aske som er avsatt av tapsprosessene våt- og tørravsetning over tid for å prøve å forstå hvor forskjellene i den totale mengden aske som vist i Figur 8 kommer fra. I **Figur 9** vises en tilsvarende tidsserie for mengden aske som er fjernet fra atmosfæren fra våtavsetning (nedbørsrelatert) og/eller tørravsetning (inkludert eksklusiv sedimentering/gravitasjon av partikler). Vi ser at total avsetning (både våt- og tørravsetning) stemmer bra mellom SNAP (grønn) og FLEXPART (blå), men er noe lavere i EEMEP (rød) (se første figur fra toppen). SNAP har generelt mer våtavsetning enn EEMEP og FLEXPART (andre figur fra toppen). FLEXPART har mer tørravsetning (inkludert gravitasjon) enn SNAP (tredje figur fra toppen), noe som kan ha sammenheng med at SNAP har gravitasjon kun for partikler større enn $10 \mu\text{m}$. EEMEP har en størrelsesorden lavere tørravsetning (fjerde figur fra toppen) enn SNAP og FLEXPART, noe som sannsynligvis skyldes at EEMEP ikke simulerer gravitasjon av partikler. Vi ser derfor videre på hvor stort bidraget fra gravitasjon er på tørravsetningen i FLEXPART-modellen fra en tilleggs-simulering der gravitasjon er skrudd av (turkise linjer i figuren). Figuren viser at bidraget fra gravitasjon i FLEXPART er veldig stort (tørravsetning uten gravitasjon har størrelsesorden 10^7 mens med gravitasjon har størrelsesorden 10^9). Ettersom SNAP har mindre tørravsetning (men mer våtavsetning) enn FLEXPART, kan det tyde på at bidraget fra gravitasjon i SNAP er mindre enn i

FLEXPART. Man kan dermed ikke generalisere noe ut fra kun en modell, men bidraget fra gravitasjon sees som en signifikant tapsprosess som bør inkluderes i EEMEP-modellen.



Figur 9: Total mengde aske som er avsatt av tapsprosessene våt- og/eller tørravsetning over tid (fra 14. april til 20. mai 2010), innenfor det samme geografiske område 30° vest til 30° øst og 40° nord til 70° nord, for de fire ulike modellsimuleringene (EEMEP, SNAP og FLEXPART, samt en tilleggssimulering med FLEXPART der gravitasjon/sedimentering av partikler er ekskludert).

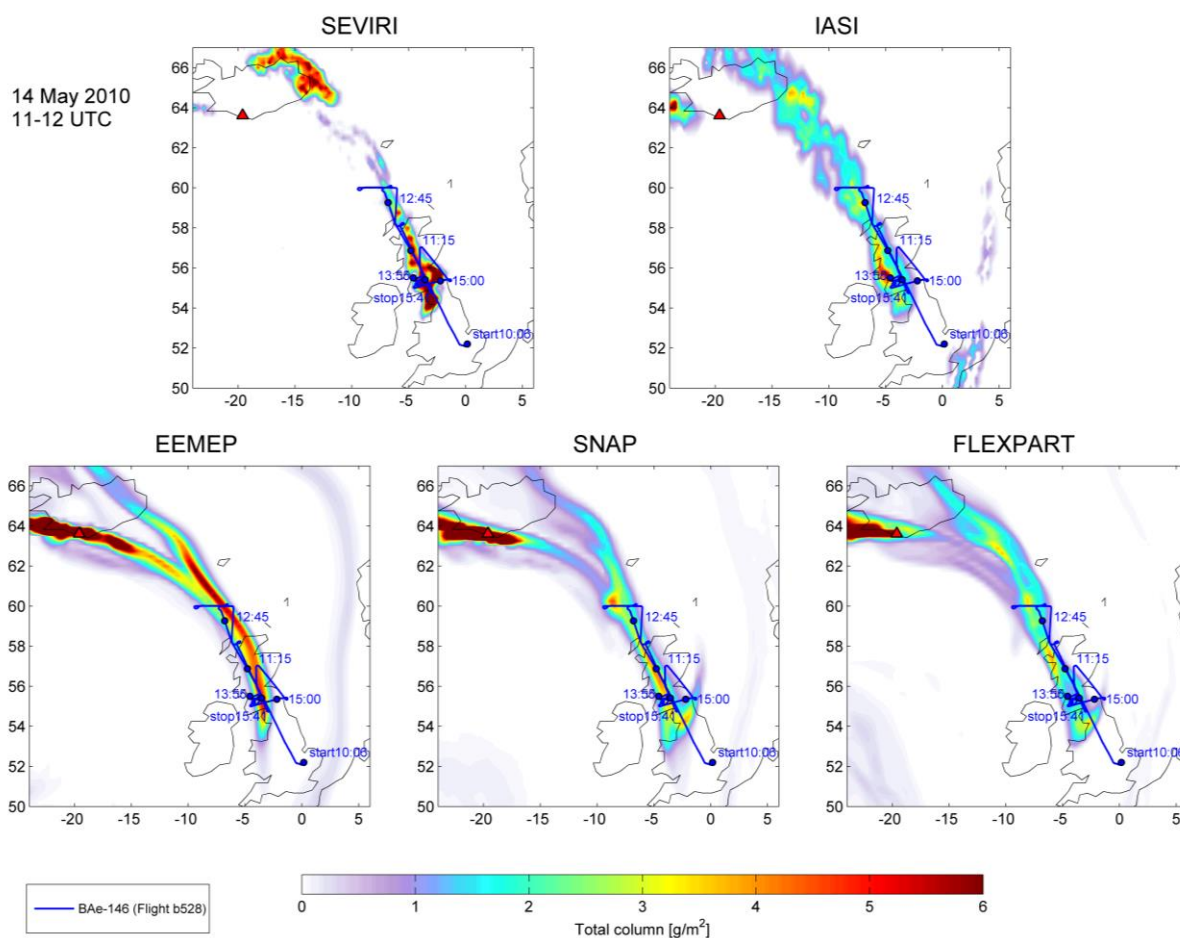
Sammenligning med vertikalprofil fra lidar på fly

Det britiske forskningsflyet FAAM BAe-146 og det tyske forskningsflyet Falcon foretok en rekke målinger av Eyjafjallajökull-askeskyen under utbruddet i 2010. Områdene for målingene var over Storbritannia og over sørlige deler av Nordsjøen (se figur 10 og 12). Målingene består av in situ-målinger av askekonsentrasjoner samt partikkelstørrelsesfordelinger, og vertikale profiler av askeskyen målt fra en lidar om bord på flyene som scannet høydelagene under flyhøyde. I figurene 11 og 13 under sammenligner vi de målte vertikale profilene fra BAe-146-lidaren den 14. mai 2010 over Storbritannia og den 17. mai 2010 over de sørlige delene av Nordsjøen, mot tilsvarende

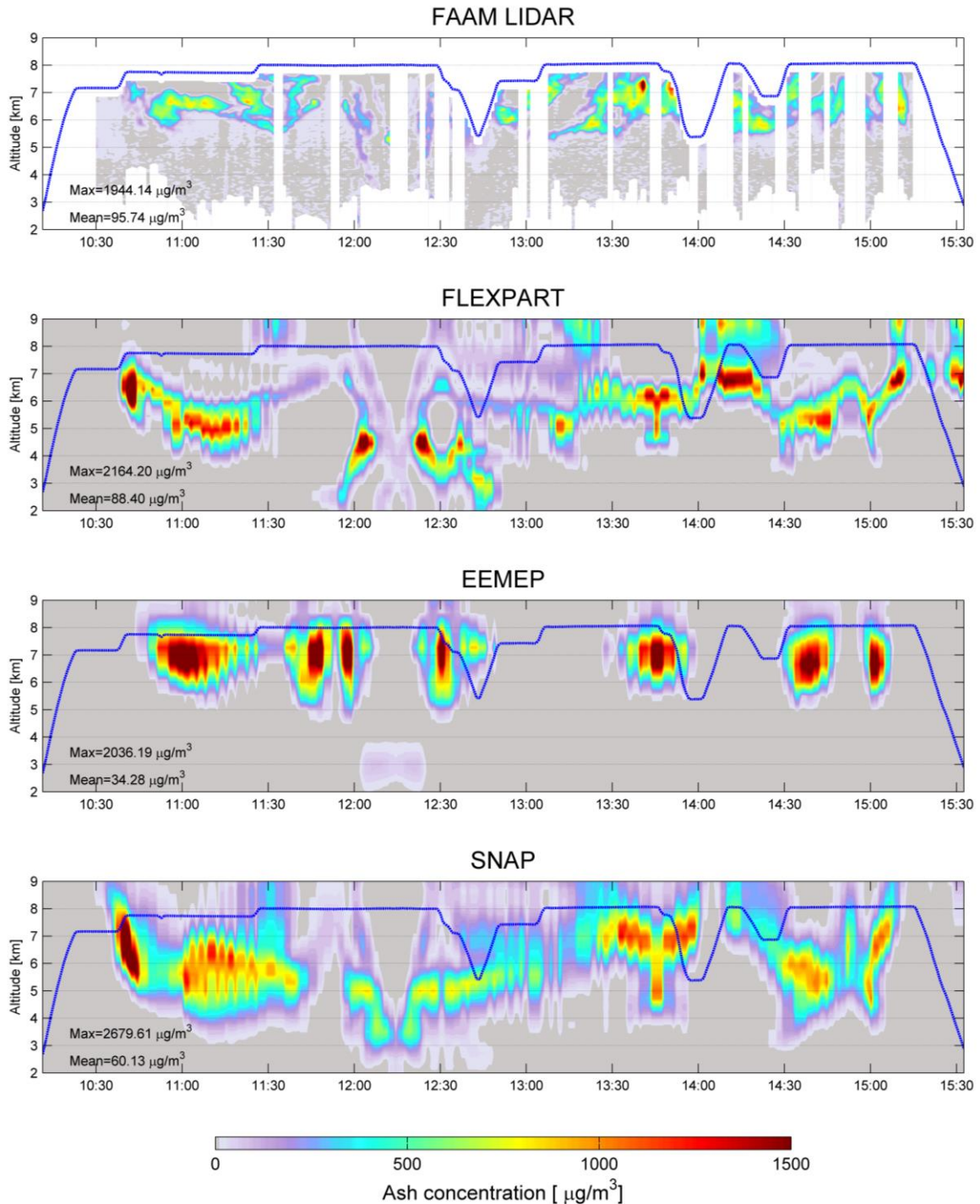
modellerte vertikale profiler fra de ulike modellene. De blå linjene viser flyhøyde, og målingene er kun tilgjengelig under flyhøyde, mens de modellerte profilene vises for alle høydeler. For modellresultatene er askepartikler med størrelse 4-12 μm diameter tatt med i sammenligningene da lidar-målinger ikke er sensitive til større partikler.

Den **14. mai 2010** var en langstrakt askesky lokalisert over Storbritannia, sett både fra satellitt-observasjoner og simulert av de tre modellene (**figur 10**). FAAM BAe-146 foretok målinger i denne delen av askeskyen. Askekonsentrasjoner opp mot 6 mg/m^3 ble målt (Kristiansen et al., 2012), noe som overstiger «no-fly»-grenseverdien satt for operasjonell luftfart. Lidarmålingene viser at askeskyen var omtrent 2 km tykk og lokalisert mellom 5-7,5 km høyde (**figur 11**). Alle modellene viser høye askekonsentrasjoner i omtrent samme tidsrom som høye målte konsentrasjoner, men generelt viser modellene høyere verdier og tykkere askeskyer enn målingene. FLEXPART har noe tynnere askeskyer og EEMEP har askeskyene noe høyere som samsvarer best med målingene, noe som kan være grunnet et EEMEP ikke simulerer gravitasjon av partikler. Det er en generell tendens at modellerte askeskyer er tykkere enn observerte askeskyer, noe som er vist i en rekke publikasjoner fra Eyjafjallajökull-utbruddet.

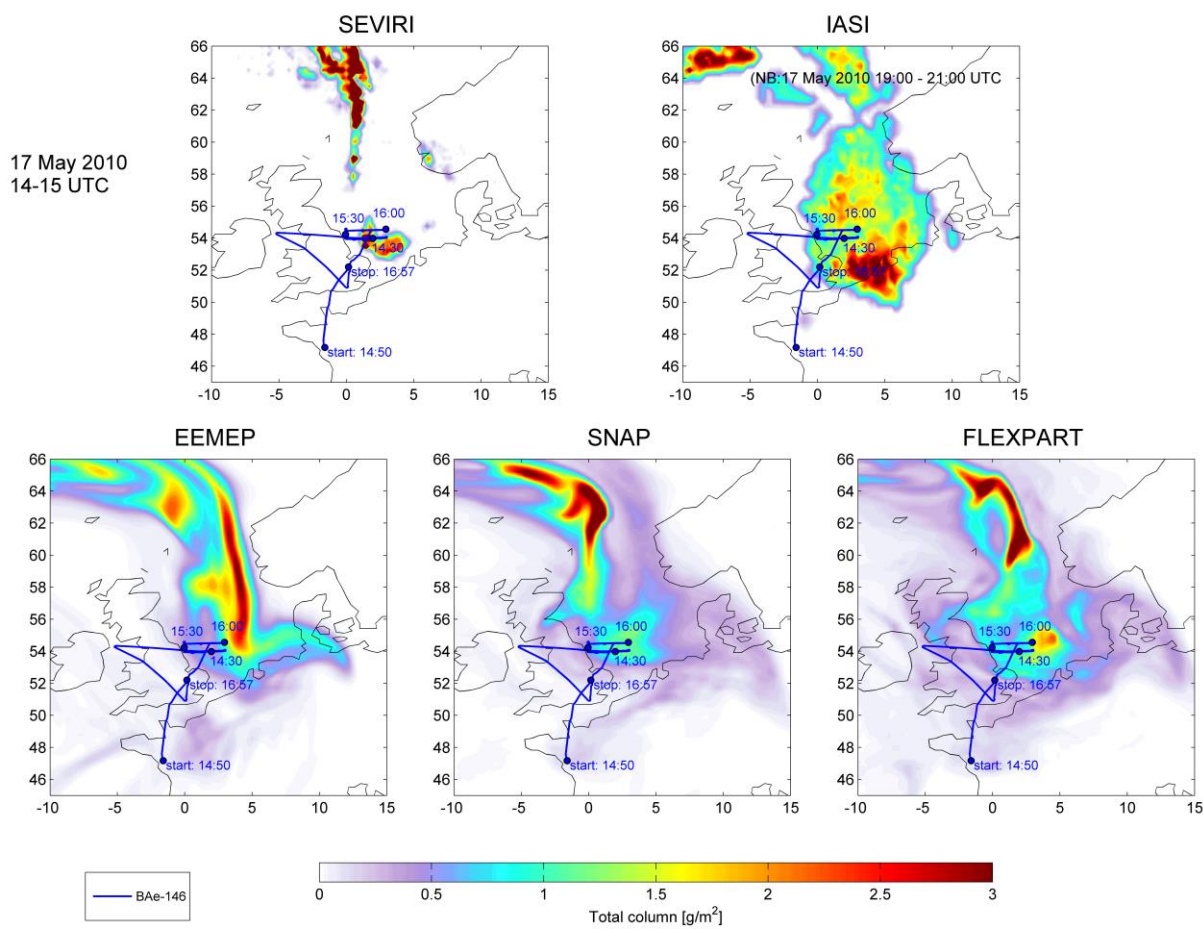
Den **17. mai 2010** var askeskyen lokalisert i Nordsjøen øst for Storbritannia (**figur 12**). Satellitt-observasjonene fra SEVIRI og IASI var problematiske i denne perioden og viser at askeskyen forsvinner og dukker opp igjen timer senere, dette er ikke reelt og indikerer at det til tider var meteorologiske skyer som blokkerte for askeskyen slik at det ikke var mulig å detektere den fra satellitt. Av den grunn viste IASI ingen aske i det aktuelle området rundt kl 15 mens en kraftig askesky dukket opp igjen mellom kl 19 og 21, og derfor er dette tidspunktet vist i figur 12. De tre modellene viser alle at askeskyen er lokalisert i Nordsjøen men strukturen på askeskyen er noe ulik i modellene, spesielt i området der flymålingene ble tatt. Lidarmålingene fra FAAM BAe-146 viste at askeskyen var ca. 2 km tykk og lå i 4-6 km høyde (**figur 13**). Alle modellene simulerer høye askekonsentrasjoner i omtrentlig samme tidsrom som målingene. FLEXPART-modellen viser en relativt konsentrert askesky fra 2-5 km høyde, noe lavere og enkelte steder med noe høyere konsentrasjon enn målingene. EEMEP har maksimumskonsentrasjon noe lavere enn målingene, og mindre aske i de laveste lag sammenlignet med FLEXPART. SNAP viser mer homogene vertikale profiler som har større vertikal utstrekning.



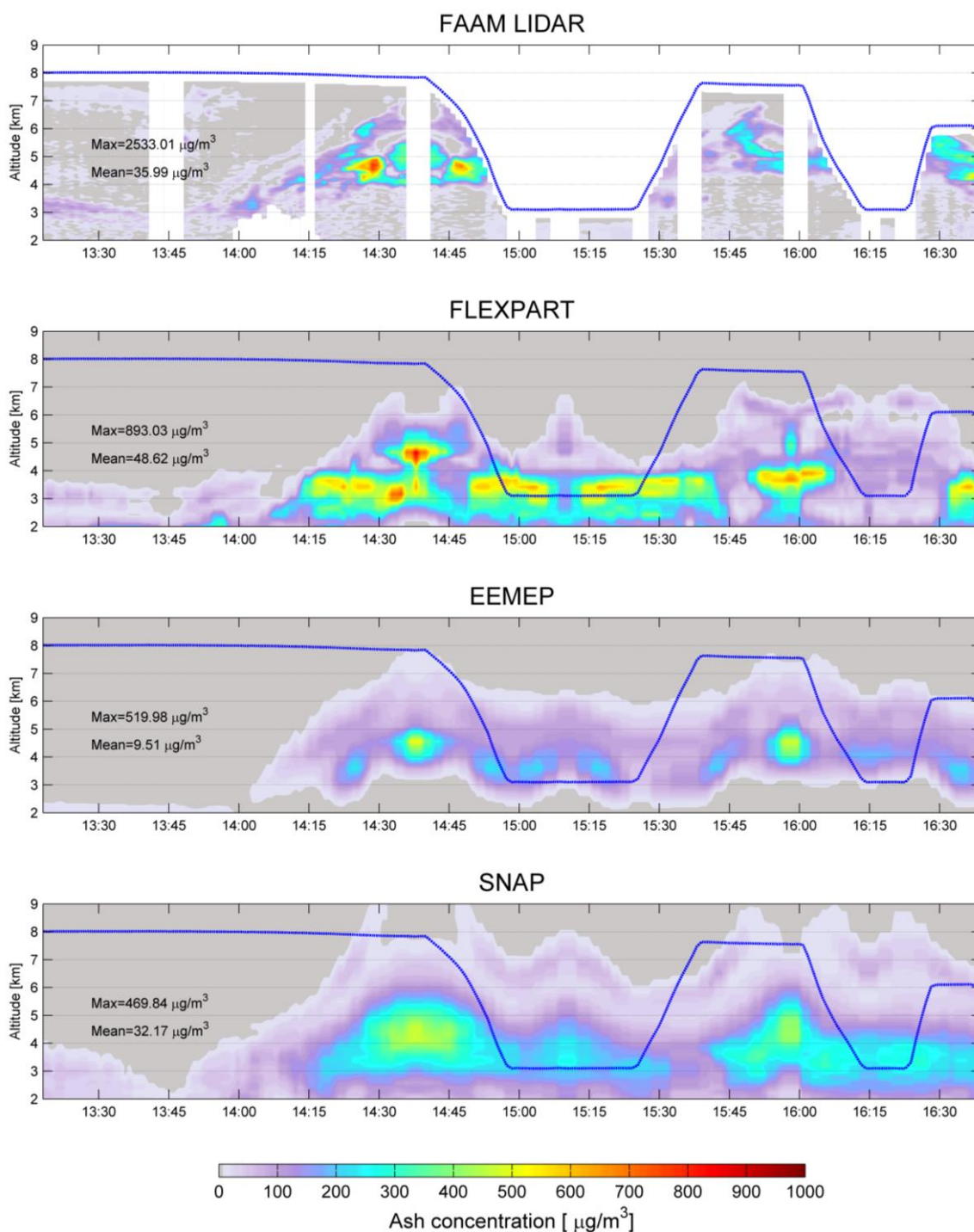
Figur 10: Observerte (SEVIRI og IASI) og modellerte (EEMEP, SNAP og FLEXPART) askeskyer **14. mai 2010** kl 12. De blå linjene viser hvor FAAM BAe-146-forskningsflyet foretok målinger.



Figur 11: Vertikale profiler av askeskyen målt over Storbritannia av FAAM BAe-146-forskningsflyet, og modellert av FLEXPART-, EEME-P og SNAP-modellene, **14. mai 2010**. Den blå linja viser flyhøyde. Hvite områder markerer ingen observasjonsdata, dette gjelder over flyhøyde, samt vertikale profiler for enkelte tidspunkt.



Figur 12: Satellittobserverte (SEVIRI og IASI) og modellerte (EEMEP, SNAP og FLEXPART) askeskyer for 17. mai 2010 kl 15. De blå linjene viser hvor FAAM BAe-146-forskningsflyet foretok målinger. Bemerk at IASI satellittdataene er vist for et senere tidspunkt grunnet problematiske IASI satellittdata rundt kl 15.



Figur 13: Vertikale profiler av askeskyen målt over Nordsjøen av FAAM BAe-146-forskningsflyet, og modellert av FLEXPART-, EEMEP- og SNAP-modellene, **17. mai 2010**. Den blå linja viser flyhøyde. Hvite områder markerer ingen observasjonsdata, dette gjelder over flyhøyde, samt enkelte vertikale profiler (f.eks. rundt kl 13:45 og 14:15).

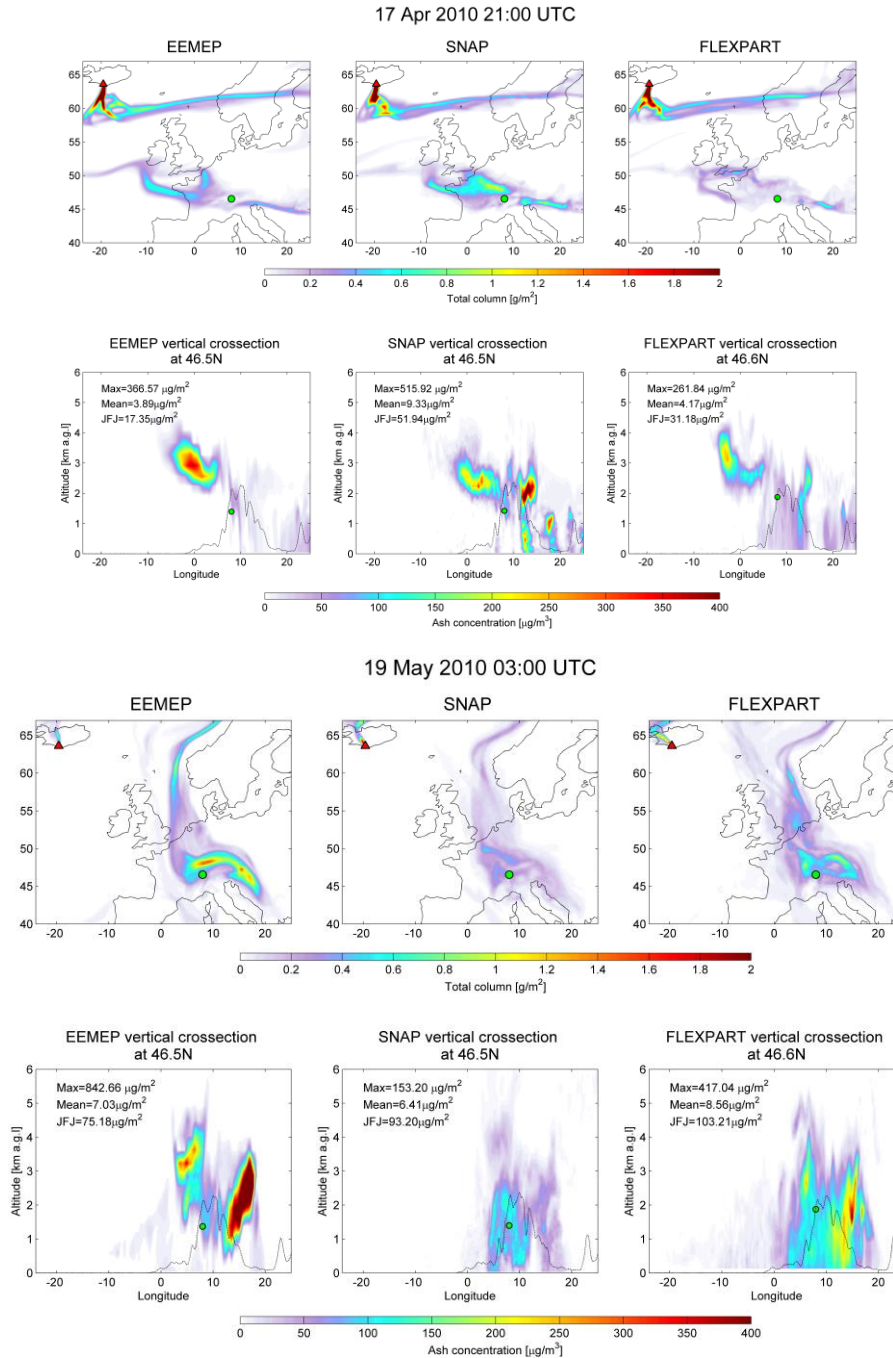
Sammenligning med bakkemålinger fra Jungfrauoch

Jungfrauoch-målestasjonen (46.55°N, 7.99°Ø, 3580 m.o.h) målte økte verdier av partikkelkonsentrasjoner (PM₁₀) i april og mai 2010 som ble analysert ved hjelp av korrelasjon til målte SO₂-verdier, og konkludert at økningen i PM₁₀-verdiene stammet fra utslipp fra Eyjafjallajökull-utbruddet.

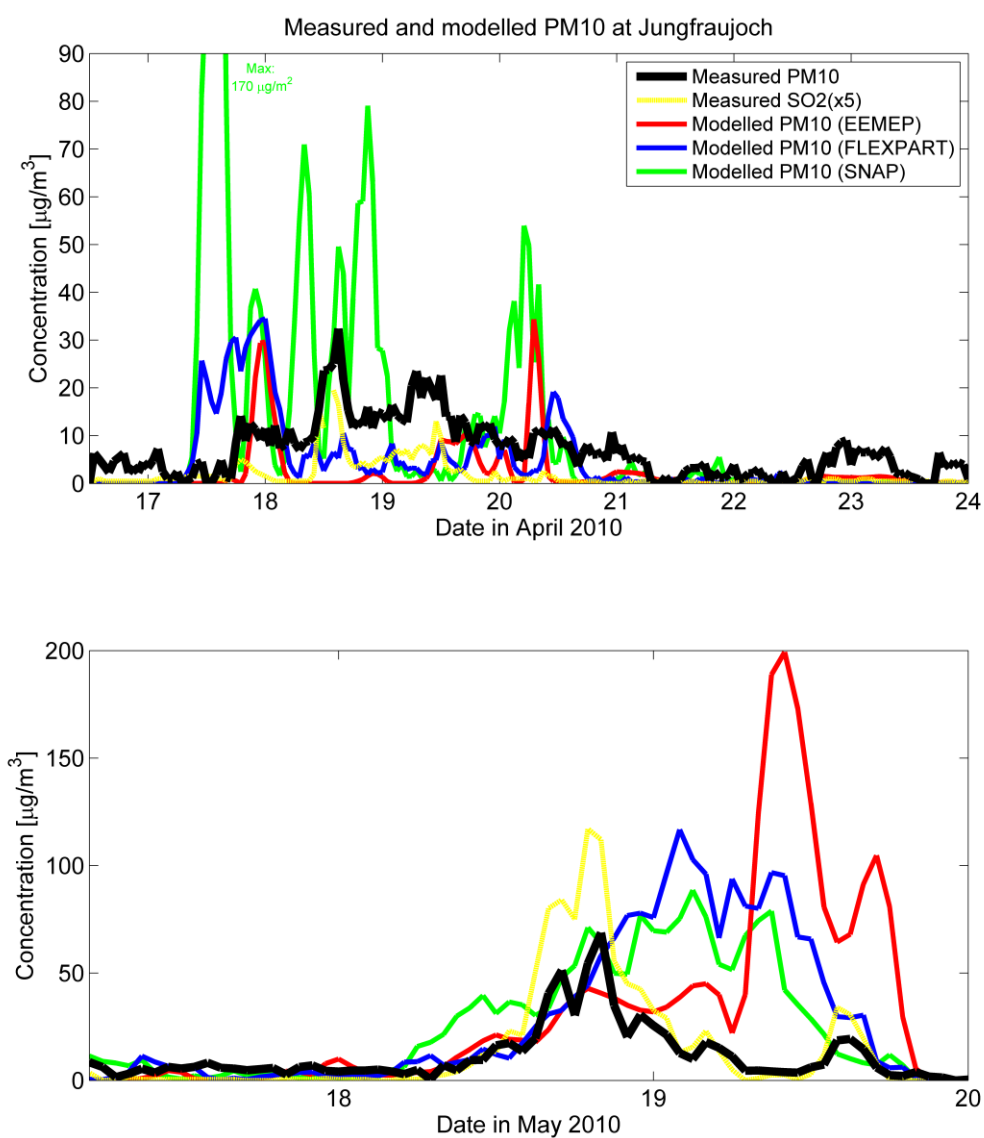
Målestasjonen ligger 3580 m.o.h, mens i modellene er høyden til målestasjonen bestemt av den horisontale oppløsningen på meteorologien som modellene kjører på. Med en horisontal oppløsning på rundt 0.2°×0.2° blir topografien glattet ut og høyden til målestasjonen i modellene dermed lavere: FLEXPART: 1780 m.o.h, SNAP: 2180 m.o.h, EEMEP 2125 m.o.h. For å sammenligne målinger og modell kan man enten trekke ut modellerte konsentrasjoner i modellens laveste lag (bakkelaget, dvs. ved de rapporterte høydene over) eller i det modellerte laget hvor målestasjonen i virkeligheten befinner seg (3580 m.o.h). Vi har valgt det siste og har trukket ut målte askekonsentrasjoner for askepartikler opp til 10 µm (~PM₁₀) i det laget der den reelle høyden til stasjonen ligger. Disse modellerte PM₁₀-tilsvarende konsentrasjonene er så sammenlignet med målte PM₁₀-konsentrasjoner.

Figurene 14 under viser de modellerte askeskyene som simulert av EEMEP, SNAP og FLEXPART, og spesielt interessant er vertikale tverrsnitt av de modellerte askeskyene langs breddegraden der målestasjonen befinner seg. Det er her ikke sammenlignet med satellittdata da SEVIRI og IASI observerte lite eller ingen aske i det aktuelle området grunnet at askekonsentrasjonene her stort sett var under satellittenes deteksjonsgrense. Den **17. april 2010 kl 21** var deler av askeskyen plassert over Europa og ble transportert over målestasjon. Det er mulig å følge askeskyen i satellittdataene (ikke vist) i dagene før dette aktuelle tidspunktet i det den nærmer seg området hvor målestasjonen befinner seg. Spesielt IASI viser noe aske nord og vest for Jungfrauoch (ikke vist) som er delen av askeskyen som senere blir transportert over stasjonen, men som da har konsentrasjoner under satellittens deteksjonsgrensen. De vertikale tverrsnittene av de modellerte askeskyene viser at askeskyen var plassert i en høyde mellom 0-4 km over bakken og det er relativt lik struktur på de modellerte askeskyene. Under en episode i mai ble askeskyene igjen transportert over målestasjonen. Den **19. mai 2010 kl 03** ligger en askesky over Sør-Europa og modellene viser askeskyen i 0-5 km høyde. Forskjellene mellom modellene er her større enn for april-episoden.

De målte og modellerte PM₁₀-konsentrasjonene for stasjonen er vist i **Figur 15**. Alle modellene viser økte PM₁₀-tilsvarende verdier ved både april- og mai-episoden. I **april** viser målingene økte PM₁₀-verdier mellom 10-30 µg/m³ i perioden 17.-21. april. Modellene viser økte PM₁₀-verdier i omtrentlig samme tidsrom, noe som bekrefter tidspunktet for når askeskyen traff stasjonen. FLEXPART simulerer PM₁₀-tilsvarende verdier rundt 5-35 µg/m³, noe for høye verdier i starten av episoden, og noe for lave verdier senere i episoden. EEMEP simulerer verdier fra 0-45 µg/m³, med starttidspunkt for økningen nesten identisk med målingene, noe for lave verdier i midten av episoden og for høye verdier i slutten av episoden. SNAP viser stort sett høyere verdier enn målingene opp mot 170 µg/m³, noe man også kan se på det vertikale tverrsnittet av askeskyen som viser askeskyen i noe lavere lag enn de to andre modellene. I **mai** viser målingene økte PM₁₀-verdier opp mot 60 µg/m³ mellom 18.-19. mai. Alle modellene viser en forsinkelse i episoden, og simulerer maksimumskonsentrasjoner noe høyere enn målingene (spesielt for EEMEP) omtrent 12 timer etter den målte maksimumskonsentrasjonen.



Figur 14: Askeskyer simulert av EEMEP, SNAP og FLEXPART 17. april 2010 kl 21 (øverst) og 19. mai kl 03 (nederst). Øverste rad i hver figur viser horisontal utstrekning av askeskyene, de grønne markørene viser plasseringen til Jungfrauoch-målestasjonen. Nederste rad i hver figur viser vertikale tverrsnitt av askeskyene langs breddegraden der Jungfrauoch-målestasjonen er lokalisert (46.5°N). De sorte tynne linjene viser topografien langs denne breddegraden i de enkelte modellene, mens de grønne markørene viser plasseringen over bakken der målestasjonen befinner seg i hver enkelt modell (dette tilsvare ikke bakkenivå som forklart i teksten).



Figur 15: Målte og modellerte partikkelkonsentrasjoner (PM_{10}) ved Jungfrauoch-målestasjonen i april (øverst) og mai (nederst) 2010.

4 Diskusjon av årsaker til ulikheter mellom modellene

Transportmodellene som benyttes til askevarsling viser erfaringsmessig ulike resultater. Dette skyldes ulike utslippsestimat (kildeledd), ulike meteorologisk værprognosedata for modellene, og ulike beskrivelser av fysiske prosesser som påvirker askepartiklene i modellene. Her er disse årsakene diskutert i mer detalj.

Kildeledd

For Eyjafjallajökull-simuleringene har alle modellene brukt samme utslipp. Dermed er ikke dette hovedårsak til ulikheter mellom modellene. Men utslippene som er brukt er tilpasset FLEXPART-modellen gjennom inversjonsalgoritmen (Stohl et al., 2011). Det vil si at både meteorologi og beskrivelse av småskala fysiske prosesser som brukt i FLEXPART, gjenspeiles i utslippsestimatet. Dermed er ikke disse utslippene nødvendigvis de mest optimale for de andre to modellene EEMEP og SNAP, og man kan derfor forvente at FLEXPART-simuleringene generelt stemmer bedre overens med SEVIRI- og IASI-satellitdataene enn EEMEP- og SNAP-simuleringene.

Meteorologisk inputdata

Både FLEXPART og EEMEP har benyttet ECMWF-meteorologi for simuleringene (henholdsvis analyse og hindcast), mens SNAP har benyttet HIRLAM. Imidlertid er HIRLAM-meteorologien beregnet med pådriv fra ECMWF på rendene, slik at storskalastrukturen vil være relativt lik. Dette betyr at meteorologien som er benyttet i de tre ulike simuleringene er relativt lik. Dette, sammen med identisk kildeledd, er hovedårsakene til at resultatene fra de tre modellene er relativt like.

I en reell askesituasjon kan man forvente at ulikhetene i meteorologi vil være større siden de da vil være basert på «prognosemeteorologi» som i mindre grad tar hensyn til assimilasjon av observasjoner etc., og dermed har større variasjon og usikkerhet. I tillegg vil FLEXPART-modellen kjøre med GFS-værprognosedata ved et eventuelt utbrudd (fordi for NILU som et privat forskningsinstitutt er ECMWF værprognosedata svært kostbart, og GFS er et rimeligere og bra alternativ), mens i denne analysen er det ECMWF som er benyttet til å drive modellkjøringene.

Beskrivelse av fysiske prosesser i modellene

En oversikt over fysiske prosesser slik de er beskrevet i modellene, f.eks. karakterisering av partiklene, tørravsetning, våtavsetning, osv. er inkludert i **Tabell 1** under. Det er forskjeller i hvordan askepartiklene karakteriseres i de ulike modellene, spesielt med hensyn til våtavsetning og tørravsetning. Sedimentering (gravitasjon) er inkludert i FLEXPART og SNAP (kun for partikler over 10 μm), men ikke i EEMEP.

Tabell 1. Oversikt over de ulike modellene EEMEP, FLEXPART og SNAP; input, beregning og beskrivelse av småskala fysiske prosesser som påvirker vulkanaskepartikler.

MODELL	EEMEP	FLEXPART	SNAP
Type modell	Eulersk	Lagransk	Lagransk
Meteorologi input	Daglige kjøringene blir drevet av ECMWF IFS med 1°×1° horisontal oppløsning med 137 vertikale nivåer (hvor 20 blir brukt.) og 3 times intervall. Kan tilpasse gridet til andre vertikale og horisontale oppløsninger. For Eyjafjallajökull ble ECMWF data brukt med oppløsning på 0.5°×0.5° og 60 lag, hvor 42 ble brukt. 3 times intervall.	GFS (i varslingsmodus) med 0.5°×0.5° oppløsning, 26 vertikale lag og 3-timers intervall. <i>eller</i> ECMWF (for post-analyser) normalt med 1°×1° oppløsning, 137 vertikale lag og 3-timers intervall. For Eyjafjallajökull var ECMWF data med oppløsning på 0.18°×0.18° og 91 vertikale nivå tilgjengelig.	Hirlam12 med 12km oppløsning og 60 vertikale nivåer og 1-timers (surface) og 3-timers model-input data i operasjonell oppsett. ECMWF brukes for randverdier. EraInterim-Nora10 med 10km oppløsning, 40 model-lag og 3-timers intervall for historiske scenarier (1980-2012). ECMWF som for EEMEP
Karakterisering av askepartikler	Kan bruke et hvilket som helst ønsket antall partikler. Partiklene er bestemt ut ifra molekylær vekt og avsetning.	Et brukerdefinert antall (typisk 1-25) partikkel-kategorier kan brukes. En kategori angir en bestemt partikkelstørrelse [μm diameter] og en bestemt partikkeltetthet [kg/m^3]. Alle partikler er antatt sfæriske.	Et brukerdefinert antall (typisk 1-36) partikkel-kategorier kan brukes. En kategori angir en bestemt partikkelstørrelse [μm diameter] og en bestemt partikkeltetthet [kg/m^3]. Alle partikler er antatt sfæriske.
Våtavsetning	Våtavsetningsparametere avhenger av nedbørintensiteten gitt i meteorologien og er satt forskjellig i skyen og under skyen. Partiklene er gitt forskjellig parametere for utvasking for begge prosesser. Per i dag brukes kun to ulike størrelsesklasser for utvasking av aske.	Avhenger av nedbørintensitet [mm/h] som hentes fra meteorologifeltene. Ulike koeffisienter settes for utvasking (under sky) og våtavsetning (inni sky). Det skilles også mellom småskala (konvektiv) og storskala nedbør. Algoritmen er til oppgradering pr mai 2014 da det ansees at den gjeldende algoritmen gir for mye våtavsetning. Våtavsetning er den samme for alle partikler, dvs. uavhengig av partikkelstørrelse.	Avhenger av nedbørintensitet [mm/h] som hentes fra meteorologifeltene. Ulike koeffisienter settes for utvasking (under sky) og våtavsetning (inni sky). Det skilles også mellom småskala (konvektiv) og stor-skala nedbør. Våtavsetning er også avhengig av partikkelstørrelse, dvs. det er ulike våtavsetningskoeffisienter for ulike partikkelstørrelser.
Tørravsetning	Tørravsetning er kun i det laveste laget i modellen. Det blir gjort hensyn til forskjellig avsetning over forskjellig land typer, skog og vann.	Tørravsetningshastigheter for partikler er basert på Stokes lov for sedimentering/gravitasjon (se under) og temperaturavhengig dynamisk viskositet for luft.	Tørravsetning er bare i det laveste laget i modellen, og baseres på avsetningshastigheter beregnet fra motstander.
Gravitasjon/ Sedimentering	Ikke inkludert	Hver partikkel blir gitt en sedimenterings-hastighet som er sterkt avhengig av angitt partikkelstørrelse og tetthet. Typiske sedimenteringshastigheter for partikler med tetthet 2600 kg/m^3 og diameter 1 μm er -2.4E-06 m/s, 10 μm diameter: -8.8E-03 m/s og 100 μm : -2.0 m/s. Dvs. at store partikler ($\gg 10 \mu\text{m}$) avsettes hovedsakelig av sedimentering.	Hver partikkel blir gitt en sedimenterings-hastighet som er sterkt avhengig av angitt partikkelstørrelse og tetthet and meteorologiske betingelser (temperatur, trykk, fuktighet). For partikler $< 10 \mu\text{m}$ brukes ikke gravitasjon.
Aggregering	Ikke inkludert	Ikke inkludert	Ikke inkludert.
Oppvirvling	Ikke inkludert	Ikke inkludert	Ikke inkludert.
Referanse	Simpson m. fl. (2012)	Stohl m. fl. (2005)	Bartnicki et al., 2010

Resultaters oppløsning og midling

I denne rapporten er alle modellresultatene postprosessert til samme romlig og tidsmessig oppløsning (1-timesmidlede askekonsentrasjoner med $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ horisontal oppløsning). I en reell askesituasjon kan man forvente at ulikhetene mellom modeller vil være større også på grunn av ulik oppløsning i modellresultatene. En modell som viser 6-timers midlede askekonsentrasjoner vil være ulik en modell som viser 1-timers midlede askekonsentrasjoner. Tilsvarende vil en modell som viser askekonsentrasjoner midlet over 5 km høyde, være ulik modellresultater som har 0,5 km midlede askekonsentrasjoner. Det er dermed viktig i en askesituasjon at postprosesseringen av resultatene fra de ulike modellene bør være av en slik karakter at resultatene i størst mulig grad er direkte sammenliknbare (dvs. like i tid- og rom-oppløsning).

5 Konklusjon

Transportmodellene som benyttes til varsling av vulkanaske i luftrommet viser erfaringsmessig ulike resultater. Dette skyldes ulike utslippsestimat, ulike værprognosedata for modellene, og ulike beskrivelser av fysiske prosesser som påvirker askepartiklene i modellene. I denne rapporten har vi analysert tre ulike transportmodeller (EEMEP, SNAP og FLEXPART) som har simulert spredning av vulkanaske fra Eyjafjallajökull-utbruddet. Alle modellene har benyttet identisk utslippsestimat, og to av modellene (EEMEP og FLEXPART) er også kjørt med nesten samme meteorologi (ECMWF). Vi ser at de tre modellene simulerer spredning av vulkanaske og askekonsentrasjonsnivå relativt likt, spesielt for horisontal spredning. Det er noe mer variasjon i vertikal spredning og plassering av askeskyene.

Forskjellene mellom de ulike modellresultatene beskrevet i denne rapporten kommer hovedsakelig fra forskjeller i beskrivelsen av fysiske prosesser. For eksempel mangler EEMEP-modellen sedimentering, noe som sannsynligvis er årsaken til en gjennomgående noe høyere konsentrasjon i EEMEP-modellen i forhold til SNAP og FLEXPART.


Alle modellene gir resultater i godt samsvar med satellittdata (og flymålinger). Det er verdt å merke seg at forskjellen mellom de ulike satellittdataene (SEVIRI og IASI) er vel så stor som ulikhetene mellom modellene, eller ulikhetene mellom modell og satellitmålinger. Evalueringen i denne rapporten gir ingen grunnlag for å si at en modell er bedre enn de andre. Per i dag går EEMEP i pre-operasjonell drift ved Meteorologisk institutt. Resultatene fra denne rapporten gir ingen grunn til å endre dette. Som nevnt ovenfor, gir EEMEP-modellen noe høyere konsentrasjoner enn de to andre modellene, og resultatene kan derfor sees på som 'konservative estimat'.

Ved en reell askesituasjon, vil meteorologiske data som brukes for modellene sannsynligvis avvike mer fra hverandre. Spesielt gjelder dette værprognosedata frem i tid som har større usikkerhet og variasjon. FLEXPART-modellen vil også benytte en annen meteorologi enn vist i denne rapporten for nær sanntids-varsling (GFS i stedet for ECMWF) og dermed vil sannsynligvis EEMEP- og FLEXPART-varslene avvike mer fra hverandre enn for analysene beskrevet her. Det er også sannsynlig at de ulike modellene ikke vil benytte helt identiske utslippsestimat for reelle askesituasjoner. For

eksempel er den vertikale fordelingen av aske i utbruddssøylen ikke en del av standardutslipp og kan dermed variere noe. Derfor vil forskjeller mellom modellresultater for reelle fremtidige askesituasjoner skyldes både ulike utslippsestimat, ulike værprognosedata og ulike beskrivelser av fysiske prosesser i modellene.

Referanser

- Bartnicki J., Haakenstad, H., Hov, Ø. (2010) Volcano version of the SNAP model. Oslo, Norwegian Meteorological Institute (Met.no report No. 15/2010).
- Kristiansen, N.I., Stohl, A., Prata, F., Bukowiecki, N., Dacre, H., Eckhardt, S., Henne, S., Hort, M., Johnson, B., Marengo, F., Neiningen, B., Reitebuch, O., Seibert, P., Thomson, D., Webster, H., Weinzierl, B. (2012) Performance assessment of a volcanic ash transport model mini-ensemble used for inverse modelling of the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *J. Geophys. Res.*, *117*, D00U11, doi:10.1029/2011JD016844.
- Prata, A.J., Prata, A.T. (2012) Eyjafjallajökull volcanic ash concentrations determined using Spin Enhanced Visible and Infrared Imager measurements. *J. Geophys. Res.*, *117*, 1-24, doi:10.1029/2011JD016800.
- Simpson, D., Benedictow, A., Bergen, H., Bergström, R., Fagerli, H., Hayman, G.D., Gauss, M., Jonson, J.E., Jenkin, M.E., Richter, C., Semeena, V.S., Tyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., Wind, P. (2012) The EMEP MSC-W Chemical Transport Model: Model Description. *Atmos. Chem. Phys.*, *12*, 7825–7865, doi:10.5194/acp-12-7825-2012.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., Wotawa, G. (2005) Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.*, *5*, 2461-2474, doi:10.5194/acp-5-2461-2005.
- 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.

RAPPORTTYPE OPPDRAGSRAPPORT	RAPPORT NR. OR 35/2014	ISBN: 978-82-425-2702-8 (trykt) 978-82-425-2703-5 (elektronisk) ISSN: 0807-7207	
DATO 11/08/2014	ANSV. SIGN. 	ANT. SIDER 23	PRIS NOK 150,-
TITTEL Modellering av vulkanaske i norsk luftrom Pkt. 2.3.1 Sammenligning av modeller for askeberegninger for bedre å forstå usikkerheter		PROSJEKTLEDER Nina Iren Kristiansen NILU PROSJEKT NR. O-112109	
FORFATTER(E) Nina Iren Kristiansen, Birthe Marie Steensen, Heiko Klein, Hilde Fagerli, Jerzy Bartnicki		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAGSGIVERS REF.	
KVALITETSSIKRER: Kjetil Tørseth			
OPPDRAGSGIVER Samferdselsdepartementet og Avinor AS			
STIKKORD Vulkanaske	Utslippsestimat	Modellering	
REFERAT De tre transportmodellene EEMEP, SNAP og FLEXPART har simulert askespredning og avsetning fra Eyjafjallajökull utbruddet i 2010. Alle modellene har blitt kjørt med identisk kildeledd, og modellresultatene har blitt sammenlignet i detalj opp mot hverandre og opp mot observasjoner. Dette gir en økt forståelse av modellenes evne til å simulere askespredning, og av ulikhetene mellom modellresultater som ofte oppstår, spesielt under en askesituasjon i nær sanntid.			
TITLE Model inter-comparison for ash dispersion for better understanding of uncertainties			
ABSTRACT The 3 transport models EEMEP, SNAP and FLEXPART have simulated ash dispersion and deposition from the Eyjafjallajökull eruption in 2010. All models have been run with identical source term, and the model results have been compared in detail against each other and against observations. This provides a better understanding of the models' ability to simulate ash dispersion, and of the differences between model results that often occur, especially during an ash situation in near real time.			

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

REFERANSE: O-112109
DATO: AUGUST 2014
ISBN: 978-82-425-2702-8 (trykt)
978-82-425-2703-5 (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.