

# Vulkanudbruddet på Island

Af N. Hansen, J. Sørensen og T. Madsen, DMI

Tidligt om morgenen torsdag d. 15. april 2010 modtager vi i Vejrtjenesten på DMI et telegram fra London VAAC - det vulkanske askevarslingscenter i London. Af telegrammet fremgår det, at askeskyen fra Eyjafjallajökull er på vej ind i dansk luftrum, og den forventes i dagens løb at brede sig til hele luftrummet. Den information skal vi have ud til vores luftfartsbrugere i form af en SIGMET, som er et vejrvarsel til det flyvende folk - og gerne så hurtigt som muligt. Men hvordan er det nu lige, at vi gør det? Rutinen i forbindelse med varsling af vulkansk aske var på det tidspunkt begrænset, så vi måtte finde vores produktbeskrivelser frem og læse på, hvordan den korrekte syntaks er i en sådan SIGMET for vulkansk aske. I løbet af kort tid kunne vi sende det første varsel af sted til luftfartsbrugere i Danmark, og senere på dagen ligger dette varsel til grund for lukningen af dansk luftrum. Vi kunne næsten fornemme suset i gennem hele det flyvende samfund.

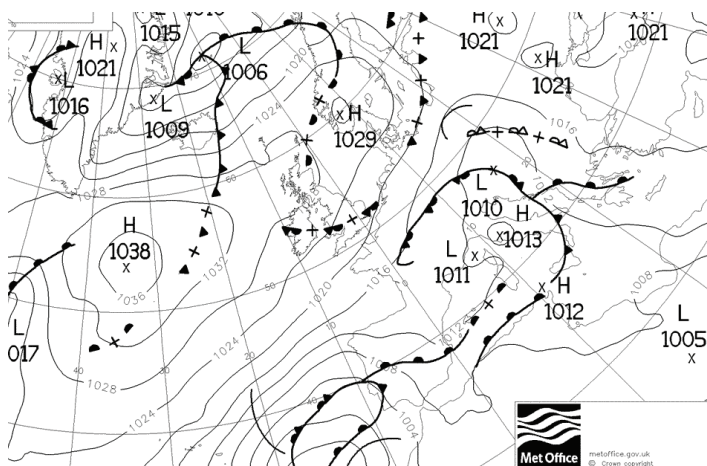
## Hvorfor blev det så slemt?

Set i forhold til andre vulkanudbrud i historisk og nyere tid var udbruddet fra Eyjafjallajökull forholdsvist beskedent i om-

fang. Alligevel påvirkede udbruddet lufttrafikken i det meste af Europa, og Nordvesteuropa i særdeleshed, i et hidtil uset omfang, og forklaringen på det forhold skal findes i atmosfærens strømningsforhold i den periode, hvor udbruddet stod på.

Udbruddet begyndte om morgenen onsdag d. 14. april 2010, og de første askemængder blev spyet til vejs i en koldluftmasse umiddelbart vest for en koldfront, som få timer tidligere passerede forbi Eyjafjallajökull. På figur 1, der viser den synoptiske situation kl. 06 UTC om onsdagen, ser vi, at strømningsmønstret omkring Island på dette tidspunkt er styret af et højtryk sydvest for Island og et lavtryk nær Jan Mayen med et trug ud til en sekundær cirkulation sydvest for Scoresbysund, og tilsammen

giver det en vestlig strømning over Island. Asken bliver derved ført mod øst i de lavere niveauer af atmosfæren og følger nogenlunde koldfronten i sin videre færd, ligeledes mod øst. Askesøjlen rækker imidlertid helt op i ca. 10 kilometers højde, så vi må kigge op over atmosfærens grænselag til den frie atmosfære for at få et retvisende billede af askens bevægelse. Strømningen i 700 hPa, som svarer til ca. 3 km, er vest-sydvestlig, og bevæger vi os op til ca. 9 kilometers højde i trykniveauet 300 hPa, er strømmingen næsten ren sydvestlig. Vinden 'bakker' altså med højden, og den del af askesøjlen, som ligger over grænselaget, blæser i en mere og mere nordøstlig retning, jo højere vi kommer op. At vinden bakker med højden er i øvrigt et tegn på, at vi har



Figur 1. Analysekort fra UK MetOffice, som viser den synoptiske situation kl. 06 UTC onsdag d. 14. april 2010.

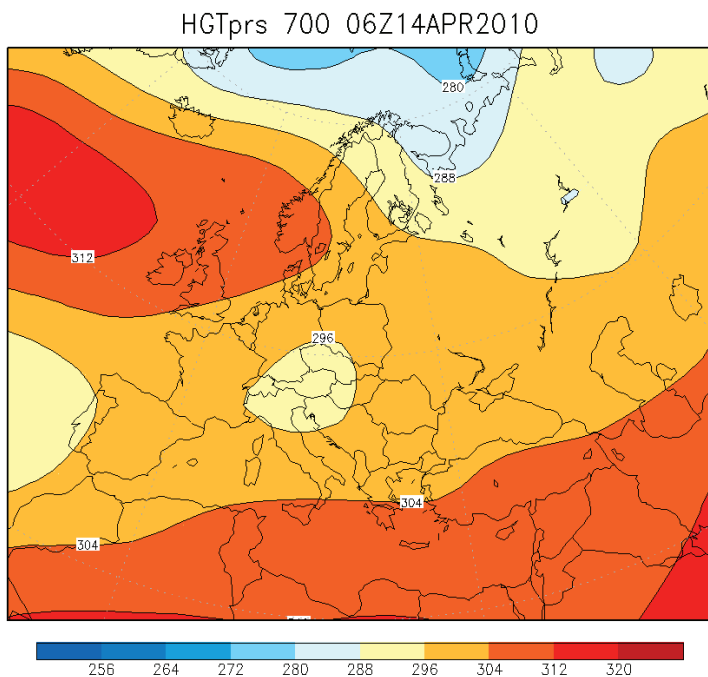
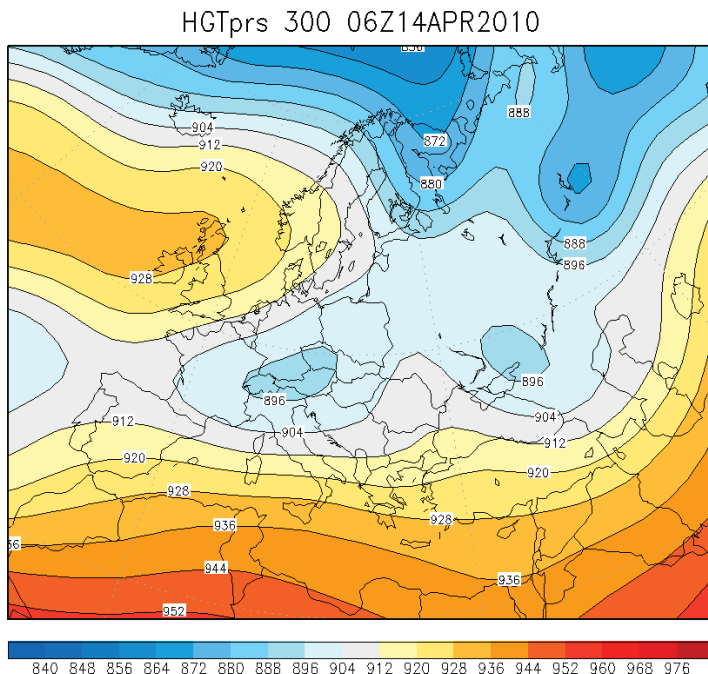
Figur 2. Højden af 700 og 300 hPa-fladen kl. 06 UTC onsdag d. 14. april 2010. Højden er angivet i geopotentielle dekametre og er med meget god tilnærmelse lig med tiere af metre over middel havniveau.

kuldeadvæktion, og det hænger meget godt sammen med, at vi ligger i en koldluftmasse umiddelbart bag en koldfront, hvor vi typisk finder den største grad af kuldeadvæktion.

Som dagen går, bevæger koldfronten sig videre mod øst, og kl. 18 UTC har den netop passeret Færøerne. Højtrykket er nu rykket tættere på Island, og vi ser en tendens til rygdannelse vest for Eyjafjallajökull. Strømningen drejes derved op i en mere nordvestlig retning i grænselaget, og asken i de lavere niveauer har nu kurs direkte mod Færøerne. Oppe i den frie atmosfære ser vi samme tendens; et øvre trug har passeret Island, og strømningen er nu vestlig i det meste af luftsøjlen. Den initiale askemængde, som slap ud på nedstrømsiden af det øvre trug, fortsætter sin bevægelse mod nordøst, mens de efterfølgende askeskyer nu driver mod øst oppe i højden.

I løbet af natten til d. 15. april drejer vinden yderligere mod nordvest og tiltager i styrke i det meste af troposfæren. Således er vinden i grænselaget kl. 12 UTC nordvestlig med en styrke på ca. 20 knob, og oppe i 3 til 9 kilometers højde blæser vinden fra 280 grader med en styrke på 80 til 100 knob - eller ca. 170 km/t. Med en afstand på 2.000 km ned til Danmark giver det os en rejsetid på omtrent 12 timer for en luft- eller askepartikel.

De første askepartikler viser sig i dansk luftrum i løbet af mor-



gentimerne d. 15. april, og i dagens løb breder asken sig videre mod nordøst, så vi ved aftenstide har dækket hele det danske luftrum med askeforekomster, som

overskrider fastsatte grænser for varsling til luftfarten. Luftrummet lukkes derfor for al flyvning kl. 18 UTC torsdag d. 15. april 2010.

## Et uheldigt møde med aske i 1982

British Airways Flight 9 er den 24. juni 1982 på vej fra London til Auckland på New Zealand med stop i bl.a. Kuala Lumpur. Flyet er et firemotors Boeing 747-200 med 248 passagerer og 15 besætningsmedlemmer ombord. Flyvningen har forløbet regelmæssigt, indtil alle fire motorer uden noget klart varsel og på mindre end to minutter gennemgår en serie af *kompresorstalls* og efterfølgende *flameouts*, hvorved flyet omdannes til en meget tung svæveflyver. Flyet befinder sig på det tidspunkt ca. 180 kilometer sydøst for Jakarta i Indonesien. Glidetallet for en Boeing 747 er 1:15, og det betyder, at for hver kilometer flyet synker, bevæger det sig 15 kilometer fremad. Fra en marchhøjde på ca. 11 km havde flyet derved en mulighed for at svæve ca. 170 km, før det måtte nå overfladen, så det var tvivlsomt, om flyet kunne nå helt frem til Jakarta. Ikke desto mindre sættes kursen mod den indonesiske hovedstad.

Da flyet er nået ned i 13.500 fod lykkes det piloterne at starte en af motorerne, og ved hjælp af dennes fremdrift kan de begrænse synket, hvorved de får mulighed for at gennemføre startproceduren for de resterende motorer. Det lykkes at få gang i alle fire motorer, men den ene er beskadiget i så høj grad, at den må lukkes ned igen. Med tre fungerende motorer indleder piloterne indflyvningen til Jakarta, hvor vejrforholdene er fine og som sådan tillader en visuel anflyvning. Vinduerne i cockpittet er imidlertid fuldstændigt matte, da de har gennemgået en sandblæ-

sende effekt af askepartiklerne i skyen, som flyet gennemfløj blot få minutter tidligere. Kaptajnen bliver derfor nødt til at foretage en instrumentanflyvning, som gennemføres helt efter bogen. Først da flyet er sikkert nede på jorden, giver de sandblæste vinduer reelle problemer, da det viser sig svært at navigere rundt på lufthavnsområdet uden at kunne se ud af forruderne.

Syv år senere gennemgår et Boeing 747-fly fra KLM en næsten tilsvarende hændelse over Alaska, hvor det også lykkes piloterne at genstarte motorerne i lav højde og foretage en sikker landing i Anchorage - dog også med sandblæste vinduer i cockpittet.

## Oprettelse af VAAC-centre

På baggrund af hændelserne med de to Boeing 747-fly, som kunne have kostet adskillige hundreder af menneskeliv, træffes i 1990'erne en beslutning om at nedsætte en række askevarslingscentre (på engelsk: *Volcanic Ash Advisory Centres*, VAAC) for at forbedre forudsigelsen af askeskyers udbredelse. Ved hjælp af askevarslingscentrenes varsler får piloter mulighed for at undgå gennemflyvning af områder med kendte askeforekomster, og derved skulle flystyrt og tab af menneskeliv pga. vulkansk aske kunne undgås.

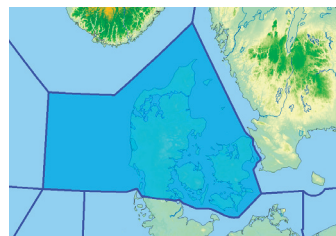
VAAC-centrene nedsættes i ICAO-regi og placeres i de respektive vejrtjenester i de lande, hvor centrene konsolideres. I vores nærrområde er de to VAAC-centre placeret hos henholdsvis UK *MetOffice* i Exeter og *MeteoFrance* i Toulouse. ICAO er den internationale civile luft-

fartsorganisation under FN, og her arbejder man på at fastsætte ensartede regler og bestemmelser for den civile luftfart i alle FN's medlemslande.

## Ansvarsfordeling i DK

I Danmark er *Trafikstyrelsen* (det tidligere SLV, Statens Luftfartsvesen) myndigheden inden for det aeronautiske område, og er det organ, hvor ICAO's love og bestemmelser administreres på nationalt plan. *Flyvesikringstjenesten Naviair* leverer lufttrafik-tjeneste efter de retningslinjer, som Trafikstyrelsen udstikker, og *DMI's sektion for civil luftfart* leverer meteorologisk service i dansk luftrum efter de internationale love og regler beskrevet af ICAO og forvaltet af Trafikstyrelsen.

Sektionen for civil luftfart på DMI fungerer som meteorologisk overvågningskontor i dansk luftrum, og en af de vigtigste opgaver er at holde et konstant opsyn med vejrforholdene i området med henblik på at udstede varsler, hvis der skulle indtræde signifikante meteorologiske forhold, som kunne være til fare for flyvesikkerheden. Vulkansk aske hører til de fænomener, som skal varsles over for luftfarten, og i praksis gøres det ved et udstede en SIGMET, som er et specialvar-



Figur 3. København FIR, som er navnet på Danmarks luftrum. Bemærk, at Bornholm ikke ligger i dansk luftrum.

sel til luftfarten. I en SIGMET for vulkansk aske fortælles om den vertikale og horisontale udbredelse af askepartikler inden for luftrummet ved hjælp af linjer og polygoner, og den forventede bevægelsesretning angives sammen med et bud på askeskyens placering seks timer efter udstedelsestidspunktet.

Som reglerne var på tidspunktet for vulkanudbruddet på Island, medførte en SIGMET for vulkansk aske nærmest per automatik et flyveforbud i de påvirkede områder. Da vi i sektionen for civil luftfart udstedte den første SIGMET om morgenen d. 15. april 2010, gav det således anledning til, at Trafikstyrelsen skulle iværksætte en gradvis nedlukning af dansk luftrum. Man anlagde en konservativ tilgang til nedlukningen og valgte at udstede et totalt flyveforbud, når

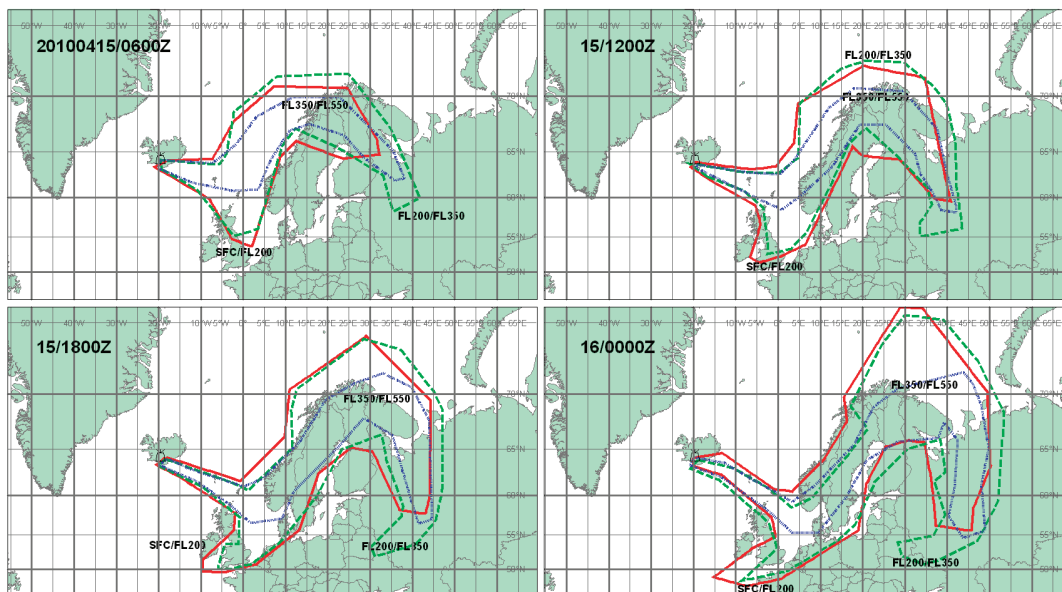
asken forventedes hen over et givent område. Kl. 1800 UTC d. 15. april var hele det danske luftrum således lukket for al flyvning.

Lukningen som sådan blev effektueret af Naviair i samarbejde med DMI, hvis rolle var at levere prognoser for askeskyens udbredelse i en højere tidslig opløsning end dem, som London VAAC leverede, og efterfølgende videreformidle i form af SIGMETs. Efterspørgslen fra Naviairs side på højere tidsopløsning bundede i et ønske om at gennemføre en gradvis nedlukning af luftrummet i takt med askeskyens bevægelse østpå. På den måde kunne man undgå at lukke sektorer i luftrummet, som endnu ikke var påvirkede af den vulkanske aske.

Kigger vi på figur 4, kan vi se, at askeskyen kl. 06 UTC

var umiddelbart vest for dansk luftrum, kl. 12 UTC inde over Nordvestjylland og kl. 18 UTC over stort set hele luftrummet. Men hvornår er asken fx over Billund? Det fremgår ikke af kortet pga. den grove tidsopløsning på seks timer, og her er det, at vi på DMI bliver behjælpelige for Naviair. Lineær interpolation kan give et godt første estimat på, hvornår askeskyen passerer en given lokalitet, men hvad nu hvis vindhastigheden ændrer sig i den periode vi interpolerer hen over? Ja, så bliver vi nødt til at kigge på de forventede vindforhold og give vores bedste estimat på den baggrund.

Vejrdata fra DMI's vejrmodel HIRLAM er tilgængelige for meteorologerne i 1-times-opløsning og præsenteres grafisk i det nye visualiseringssystem NinJo, som også tillader, at man overlejer



VA ADVISORY  
DTG: 20100415/0600Z  
VAAC: LONDON  
VOLCANO:  
EYJAFJALLAJOKULL  
PSN: N6338 W01937  
AREA: ICELAND

SUMMIT ELEV: 1666m  
ADVISORY NR: 2010/005  
INFO SOURCE: ICELAND MET SERVICE  
AVIATION COLOUR CODE: UNKNOWN  
ERUPTION DETAILS: PLUME FROM VOLCANO  
WITH MAIN HEIGHTS 6KM, OCCASIONALLY  
11KM

RMK: NIL  
NXT ADVISORY: 20100415/1200Z

vejrdata med vilkårlige polygoner. VAAC-centrets grafiske produkt, som vist i figur 4, suppleres også med koordinatsæt på de polygoner, som beskriver askeskyens udbredelse. Disse koordinatsæt kunne vi indsætte i NinJo og på den måde visualisere askeskyen sammen med vores meteorologiske data, og det gjorde os i stand til at levere det bedst mulige bud på askeskyens bevægelse hen over det danske luftrum. Den teknik benyttede vi os af i hele perioden, hvor der var askeforekomster hen over Danmark, og DMI var på den måde Naviar behjælpelig med at træffe de bedste beslutninger i forhold til åbning og lukning af sektorer i det danske luftrum.

Søndag d. 23. maj 2010 erklæres udbruddet ved Eyjafjallajökull for ophørt, og hele det europæiske luftrum er atter åbent for flyvning.

### Island – en nordisk vulkanø

Eyjafjallajökull er faktisk en stor gletsjer på 78 kvadratkilometer i det sydlige Island, vest for gletsjeren Mýrdalsjökull og 150 kilometer sydøst for Reykjavik. Gletsjeren ligger direkte ovenpå den nu langt mere kendte 1.651 meter høje stratovulkan med det samme legendariske navn, som dog blot betyder noget i retning af *ø-bjerg-iskappe*.

*Figur 4. Et grafisk produkt fra London VAAC. Figurene viser den forventede udbredelse af askeskyen til henholdsvis kl. 6, 12, 18 UTC d. 15. april og kl. 00 UTC d. 16. april. Højder er angivet i flyveniveauer, som er hektofod over middel havniveau i ICAO's standardatmosfære. FL200 står således for 20.000 fod over middel havniveau. SFC betyder overfladen.*

Stratovulkaner er vulkaner, som børn tegner dem - de er stejlest tæt på toppen og fladere uden på siderne. På den måde kan de nemt kendes fra skjoldvulkaner, som 'kurver den anden vej'. Stratovulkaner er bygget op af skiftende lag af lava og aske. Ud over de islandske vulkaner, så er f.eks. Mount St. Helens i USA og Fuji Yama i Japan kendte stratovulkaner.

Men hvorfor er der overhovedet vulkaner på Island? Det er der, fordi Island ligger på den midatlantiske højderyg. Højderyggen er det, geologerne kalder en spredningszone, hvor Jordens enorme skorpeplader glider fra hinanden med årligt godt og vel to centimeter under dannelsen af ny vulkansk havbund. I dette tilfælde udgør højderyggen grænsen mellem den euroasiatiske og den nordamerikanske plade i nord og den afrikanske og den sydamerikanske plade i syd.

Den normale dybde for den midatlantiske ryg er mellem 1.000 og 2.000 meter under havoverfladen. Island udgør en undtagelse ved at ligge over havoverfladen. Andre øer på højderyggen, som ret beset er verdens længste bjergkæde, er f.eks. Jan Mayen, Azorerne, Ascension og Tristan da Cunha.

Eyjafjallajökull har tidligere været i udbrud, mens Island har været beboet; seneste i perioden 1821-1823.

### Jordens overtryksventiler

Når der er for meget magma under for højt tryk et sted tæt under jordskorpen, opstår helt naturligt en vulkan - eller en eksisterende går i udbrud igen.

Der er vulkaner på alle konti-

nter inklusiv Antarktis. Rent geografisk er fordelingen dog meget uensartet. Hovedparten af Jordens vulkaner ligger tæt på grænserne mellem de forskellige skorpeplader, der som et puslespil dækker kloden, og den tætteste forekomst findes rundt om Stillehavet i den såkaldte ildring.

Vulkaner kommer i mange størrelser og former. Nogle er ikke meget mere end en sprække i jorden, mens andre bygger op over millioner af år og ender som f.eks. sydamerikanske Ojos del Salado, der med næsten 6.900 meter er verdens højeste kontinentale vulkan. Den allerstørste er Mouna Kea, Hawaii: en over 10.000 meter høj skjoldvulkan på bunden af Stillehavet.

Vulkanens bankende hjerte er et magmakammer med kontakt til Jordens varme og delvist smeltede indre. Fra magmakammeret fører en eller flere kanaler - kaldet piber - op til krateret eller kraterne. Når magma kommer ud af vulkanen, er det et sted mellem 1000 og 1200 °C varmt, og det bliver ved med at være flydende, til det er kølet ned til omkring 800 °C.

### Asken fra ilden

Vulkansk aske er faktisk slet ikke aske i traditionel forstand. Normalt, når vi taler om aske, mener vi 'det, som er tilbage', når noget organisk er brændt, og den definition omfatter ikke det, som kommer ud af vulkaner i store skyer og f.eks. generer luftfarten. Når vi alligevel kalder det fineste materiale fra vulkaner for aske, så skyldes det, at det i allerhøjeste grad ligner og opfører sig som rigtig aske, men det dannes på



Figur 5. Vulkanudbruddet fra Eyjafjallajökull d. 17. april 2010. Ref.: [http://da.wikipedia.org/wiki/Eyjafjallajökulls\\_vulkanudbrud\\_i\\_2010](http://da.wikipedia.org/wiki/Eyjafjallajökulls_vulkanudbrud_i_2010).

en helt anden måde.

Når magma baner sig vej opad fra magmakammeret mod krateret, udsættes det for lavere og lavere tryk fra omgivelserne. Det betyder, at gasser som under højt tryk er opløst i magmaet frigives som bobler. Præcis, som når du åbner en rystet sodavand. Boblerne i magmaet vokser på vejen mod overfladen og bliver flere og flere. Til sidst kan de udgøre en større del af magmaet end den smeltede stenmasse.

Når magmaet til sidst kommer ud, sker et sidste voldsomt trykfald. Herved afgasser de sidste gasser pludseligt samtidigt med, at magmaet køler lynhurtigt ned. Den proces forløber nærmest

som en kontinuerlig række af mikroskopiske eksplosioner, der skaber et fint, størknet pulver ud fra den flydende magma. Det er det pulver, vi kalder aske.

Den fineste del af asken kan løftes helt op i 20 kilometers højde med den søjle af varm, opstigende luft, som skabes over den glohede vulkan.

Der er stor forskel på, hvor meget aske forskellige typer vulkaner danner. Generelt vil vulkaner med meget sejtflydende magma eller magma med et meget højt indhold af gasser danne mere aske end vulkaner, hvor magmaet flyder let eller indeholder lidt gas. Stratovulkaner som Eyjafjallajökull starter ofte deres udbrud

netop med en eksplosiv periode og producerer derfor store mængder aske i processen.

### Udbruddet fra Eyjafjallajökull

Eyjafjallajökull er som nævnt en stor gletsjer. Den højeste af de omkringliggende fjeldspidser ligger 1.666 meter over havet. Under den ligger stratovulkanen, men uden et egentlig navn.

Vulkanen ved Eyjafjallajökull kom for alvor i udbrud d. 14. april 2010. Der havde siden december 2009 været registreret forøget seismisk aktivitet i området, og om aftenen d. 20. marts 2010 begyndte et lille udbrud uden særlig betydning for flyvningen. Men det større udbrud, som varede fra

midt i april til sidst i maj, havde store konsekvenser for luftfarten. D. 15. april blev luftrummet over Danmark, Norge og Færøerne, samt Storbritannien og Irland lukket på grund af vulkansk aske i luftrummet, og flyvning blev først åbnet delvist igen d. 21. april. Som vulkanudbrud betragtet var dette udbrud trods alt ikke noget særligt, men det fik alligevel store konsekvenser for det meget befærdede luftrum over Europa. Da udbruddet var på sit højeste, nåede asken skyen et stykke op i stratosfæren. På grund af askeskyen fra udbruddet var der i perioden en række forsinkelser og aflysninger af flytrafikken i Belgien, Danmark, Færøerne, Grønland, Finland, Frankrig, Irland, Island, Holland, Norge, Polen, Rusland, Spanien, Storbritannien, Sverige og Tyskland, og millioner af passagerer strandede verden over. Mere end 100.000 flyvninger blev aflyst, og 313 lufthavne lukkede. Det skønnes, at vulkanudbruddet har kostet forskellige aktører op mod to milliarder euro i alt, men heldigvis ingen menneskeliv. Siden d. 23. maj 2010 er der ikke registreret vulkansk aktivitet i krateret.

Der er fare for, at et udbrud fra Eyjafjallajökull kan fremprovokere et udbrud i den langt større vulkan Katla, der kun ligger omkring 30 km derfra. De tre foregående udbrud af vulkanen under Eyjafjallajökull er nemlig alle blevet fulgt af væsentligt mere eksplosive udbrud fra Katla. Det skete ikke denne gang – endnu...

Det nordiske vulkanologiske center NordVulk ved Islands Universitet har målt og beregnet, at Jordens overflade ved vulka-

nen på sit højeste punkt er vokset opad med op til 82 meter som følge af udbruddet og dermed har opnået en højde på i alt 1.067 meter over havets overflade, og at området er dækket af et mellem ti og tyve meter tykt lag af lava. I alt blev omkring 200 millioner kubikmeter aske spyt ud af vulkanen, svarende til 500 millioner tons.

### Hvorfor er en askesky farlig?

Et vulkanudbrud er selvfølgelig farligt for mennesker og dyr, der opholder sig i nærheden af vulkanen, da udbruddet medfører udsendelse af lava, forskellige gasser og vulkansk aske. Men en sky af aske (også kaldet tefra) fra vulkanudbrud er også meget farlig for fly selv på store afstande af vulkanen, da asken kan sandblæse forruden, ødelægge navigationsudstyr og sætte sig i motorerne, hvilket i værste fald kan medføre motorstop. I Finland fik to jagerfly således skader på motorerne efter at have passeret gennem vulkansk aske under en flyvning d. 15. april. Vulkansk aske er skadelig også ved så lave koncentrationer, at piloten ikke

kan se skyen, og da flyenes radarer ikke kan registrere en askesky, er der en alvorlig risiko for, at fly vil passere gennem en sky af aske – med mindre skyen er blevet varslet. Det vides desværre ikke præcist, hvor meget aske der skal til, før en motor beskadiges, men tærskelværdien af koncentrationen af aske i luften forventes at ligge omkring 2 mg/m<sup>3</sup>. Aske består væsentligst af silikater, der har et smeltepunkt omkring 1400 °C. Asken vil derfor, hvis den føres gennem en jetmotor, smelte pga. temperaturerne i denne på op til 2500 °C, og smeltet aske vil derefter kunne sætte sig på rotorbladene. Rotorens vinger er konstrueret med huller, så køleluften kan passere gennem dem. Men når kølehullerne bliver blokeret af smeltet aske, vil bladene hurtigt varme op og fejle, hvilket vil føre til motorfejl. I øvrigt vil svovldioxid, som også spyes ud af vulkaner, forårsage korrosion.

I de seneste 20 år har mere end 80 rutefly oplevet at gennemflyve vulkansk aske. I syv af disse tilfælde medførte asken, at jetmotorer satte ud. Som nævnt tidligere i artiklen satte alle fire



Figur 6. Rotor med belægning af vulkansk aske i jetmotoren på den British Airways Boeing 747, som nødlandede i Jakarta i 1982 efter at have oplevet komplet motorstop på grund af flyvning i vulkansk aske. Ref.: <http://en.keilir.net/static/files/conferences/ejjaaviation/session5/patemmott-rollsroyce.pdf>.

motorer ud på en British Airways Boeing 747 i juni 1982 på grund af vulkansk aske over Indonesien, se figur 6. Der har siden 1982 været i alt fire episoder, hvor flymotorer er standset på grund af vulkansk aske.

Ud over sikkerhedsrisikoen er det meget bekosteligt for luftfartselskaberne at omlægge flyruter for at undgå kontakt med asken. Det er således af stor værdi at have præcise informationer om udbredelsen af skyen af aske, herunder bl.a. fra modelberegninger.

Vulkansk aske indeholder fluorforbindelser, som er giftige for dyr og mennesker. DMI har derfor også assisteret de veterinære beredskabschefer myndigheder i Danmark, Færøerne og Grønland med beregninger af askenedfald. Nedfaldet kan nemlig have konsekvenser via fødeindtaget for græssende drøvtyggere, ligesom

dyr, der drikker overfladevand, risikerer at få en dosis af fluor. Udbruddet fra Eyjafjallajökull havde dog kun sådanne konsekvenser i nærområdet af vulkanen på Island.

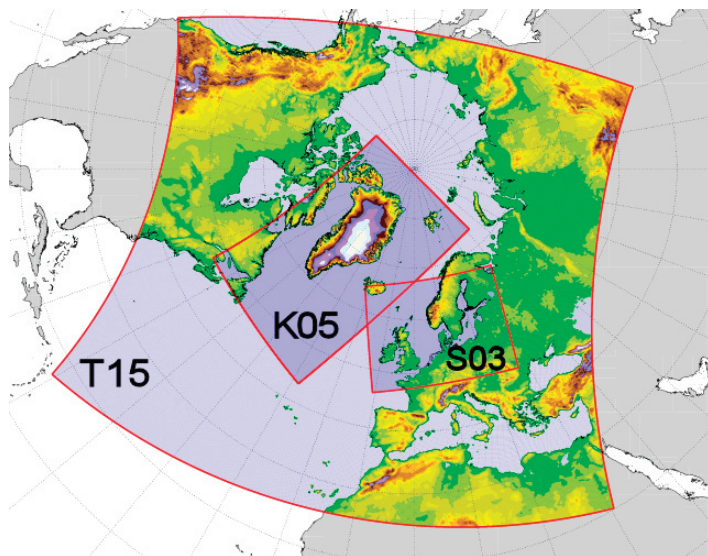
### Modelberegning

Parallelt med varslingerne fra London Volcanic Ash Advisory Centre (VAAC) afviklede også DMI sin egen atmosfæriske spredningsmodel til simulering i sand tid af den atmosfæriske spredning af asken fra Eyjafjallajökull. Simuleringerne benyttes dels til understøttelse af Vejr tjenestens flyvemeteorologers arbejde, og dermed Trafikstyrelsen og Naviair, dels til information til Fødevarestyrelsen og Beredskabsstyrelsen.

Beregningerne blev foretaget med den atmosfæriske spredningsmodel *Danish Emergency Response Model of the Atmos-*

*phere* (DERMA), som er udviklet ved DMI (Sørensen et al., 2007a). Modellen blev i 2004 anvendt til i sand tid at simulere skyen af aske fra det seneste udbrud af vulkanen Grímsvötn, som ligger under gletsjeren Vatnajökull på Island (Sørensen et al., 2005a og b). DERMA anvendes operationelt i det danske atomberedskab til simulering af radioaktive udslip fra kernekraftværker, ligesom den bruges i det kemiske katastrofeberedskab i tilfælde af udslip af store mængder giftig gas eller røg fra brand. Desuden anvendes modellen i det veterinære beredskab i forbindelse med udbrud af luftbårne dyresygdomme (Sørensen et al., 2007b). Under mund- og klovesyggeepidemien i England i 2001 assisterede DMI de britiske veterinære myndigheder, og her blev modellen anvendt i sand tid til at simulere spredningen af virus (Gloster et al., 2003). DERMA er endvidere blevet benyttet til at simulere intrusion af stratosfærisk ozon i forbindelse med tropopausefoldninger (Nielsen og Sørensen, 1996; Sørensen og Nielsen, 2001).

Som det ses af figur 7, dækker T15-versionen af DMI's numeriske vejrprognosemodel HIRLAM det berørte område af et vulkanudbrud på Island vældig godt. Desuden har vi adgang til resultaterne af den globale vejrprognosemodel, som afvikles ved det europæiske center ECMWF 'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts' (ECMWF). DERMA, som udnytter resultaterne af vejrprognosemodellerne, blev sat op til at køre automatisk fire gange i døgnet efter opdaterede HIRLAM-prognoser, og to



Figur 7. Geografiske områder dækket af DMI's operationelle versioner af den numeriske vejrprognosemodel HIRLAM. VModelversion T15 svarende til det største område har en horisontal opløsning på ca. 15 km, K05 ca. 5 km og S03 ca. 3 km.



gange i døgnet, når nye data fra ECMWF var klar.

Beskrivelsen af kilden, dvs. udsendelsen af vulkansk aske, er indtil prognosens start baseret på løbende oplysninger fra Island. Hver tredje time fik vi en melding fra Islands meteorologiske institut (IMO), og desuden modtog vi dagligt rapporter fra både IMO og NordVulk. I tidsrummet efter den senest modtagne rapport dækket af de meteorologiske prognoser måtte vi antage, at udbruddet fortsatte uændret. DERMA blev desuden afviklet interaktivt efter behov, hvis de nye oplysninger fra Island nødvendiggjorde dette.

De atmosfæriske spredningsmodeller, der anvendes til simulering af spredningen af aske fra vulkanudbrud, anvender som udgangspunkt (initialtilstand af askefordelingen) en beskrivelse af askesøjlen nær vulkanen, initialtilstanden af askefordelingen. Modellerne forsøger (af gode grunde) ikke at modellere selve vulkanudbruddet. Askesøjlen beskrives ved den tidsafhængige højde af søjlen over vulkanen og udslipsraten af aske samt størrelsesfordelingen og tætheden af askepartiklerne.

Højden af askesøjlen estimeres vha. observationer fra vejrradar (hvor dette er muligt, hvilket fx kræver, at det ikke er overskyet) og pilotrapporter. Den vertikale fordeling af aske i søjlen observeres almindeligvis ikke, og vi antager ligesom VAAC-centrene en jævn fordeling. Søjlen højde er naturligvis meget vigtig for dynamikken af den atmosfæriske spredning, og højden er heldigvis normalt bestemt med god nøjagtighed – dette gælder

bl.a. for udbruddet fra Eyjafjalajökull.

Udslipsraten af aske er almindeligvis den væsentligste kilde til usikkerhed. VAAC-centrene benytter her en empirisk, og temmelig usikker, sammenhæng mellem udslipsraten og højden af askesøjlen. Den estimerede udslipsrate er desuden udtryk for gennemsnitlige forhold og tager ikke højde for variationer på kort tidsskala, den pulserende natur af vulkanudbrud.

Fragmenter fra vulkanudbrud varierer i størrelse fra flere meter i diameter til brøkdeler af en mikrometer. Derimod er tætheden relativt veldefineret ( $2500 \text{ kg/m}^3$ ). De store partikler falder selvfølgelig hurtigt til jorden som følge af gravitation, men de små partikler af diameter mindre end ca. 50 mikrometer kan holdes svævende i mange dage, og det er disse små partikler, som er af betydning for lufttrafikken. Størrelsesfordelingen, som afhænger af udbruddets type, kan vurderes ved indsamling af aske, og behøver derfor ikke bidrage væsentligt til den generelle usikkerhed.

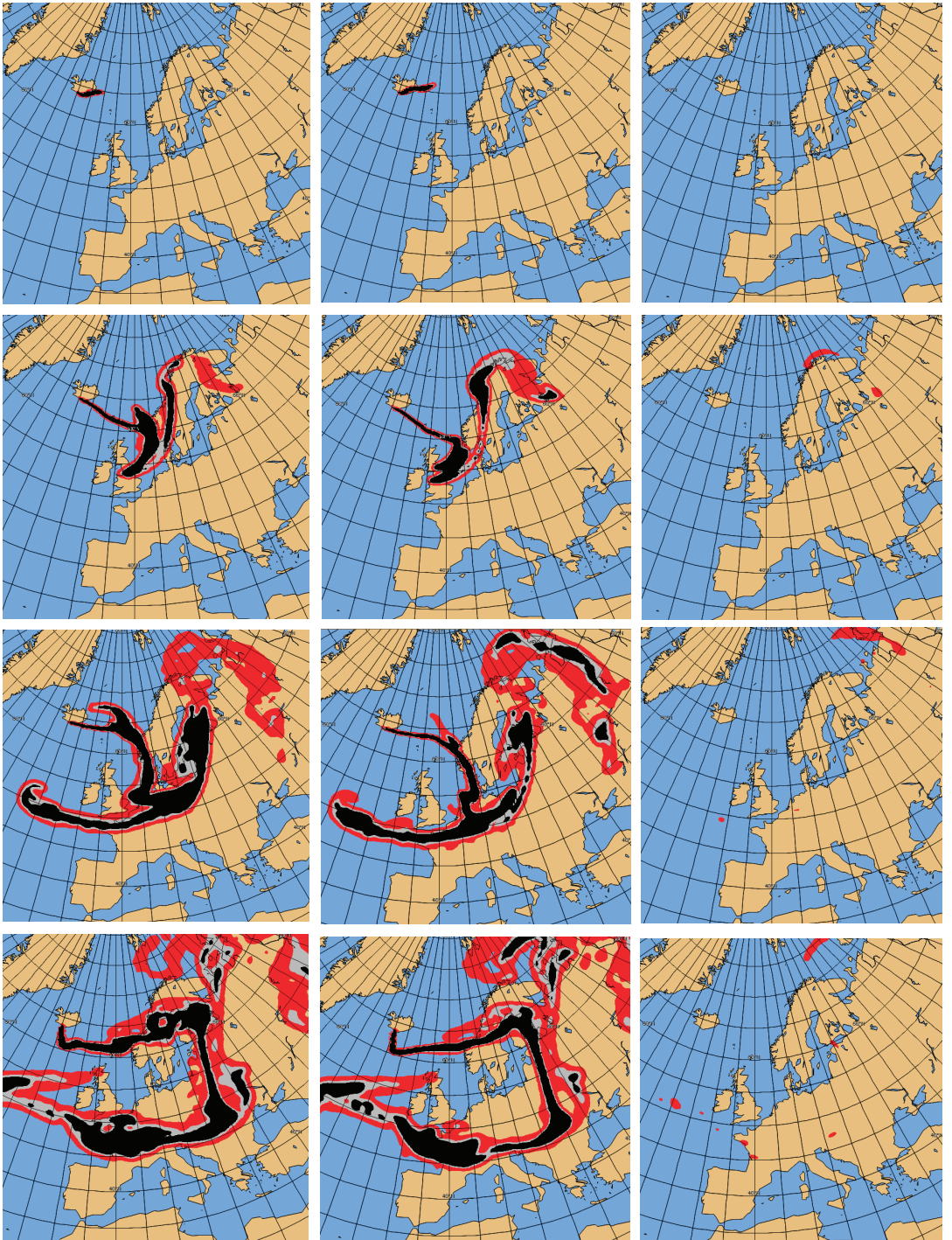
I figur 8 er vist den beregnede koncentration af vulkansk aske i løbet af den første uge af udbruddet. Askekonzentrationen er angivet i enheder af  $\text{mg/m}^3$ . Som det fremgår, blev store dele af det europæiske luftrum hurtigt berørt af asken.

Skyen af vulkansk aske blev observeret ved en række forskellige metoder. Skyen kunne bl.a. iagttages på satellitbilleder (figur 9, se også Vejret nr. 123, side 24-25), der blev sendt propelfly udstyret med aerosolmonitører gennem skyen, visse radiosonder blev specielt udstyret med

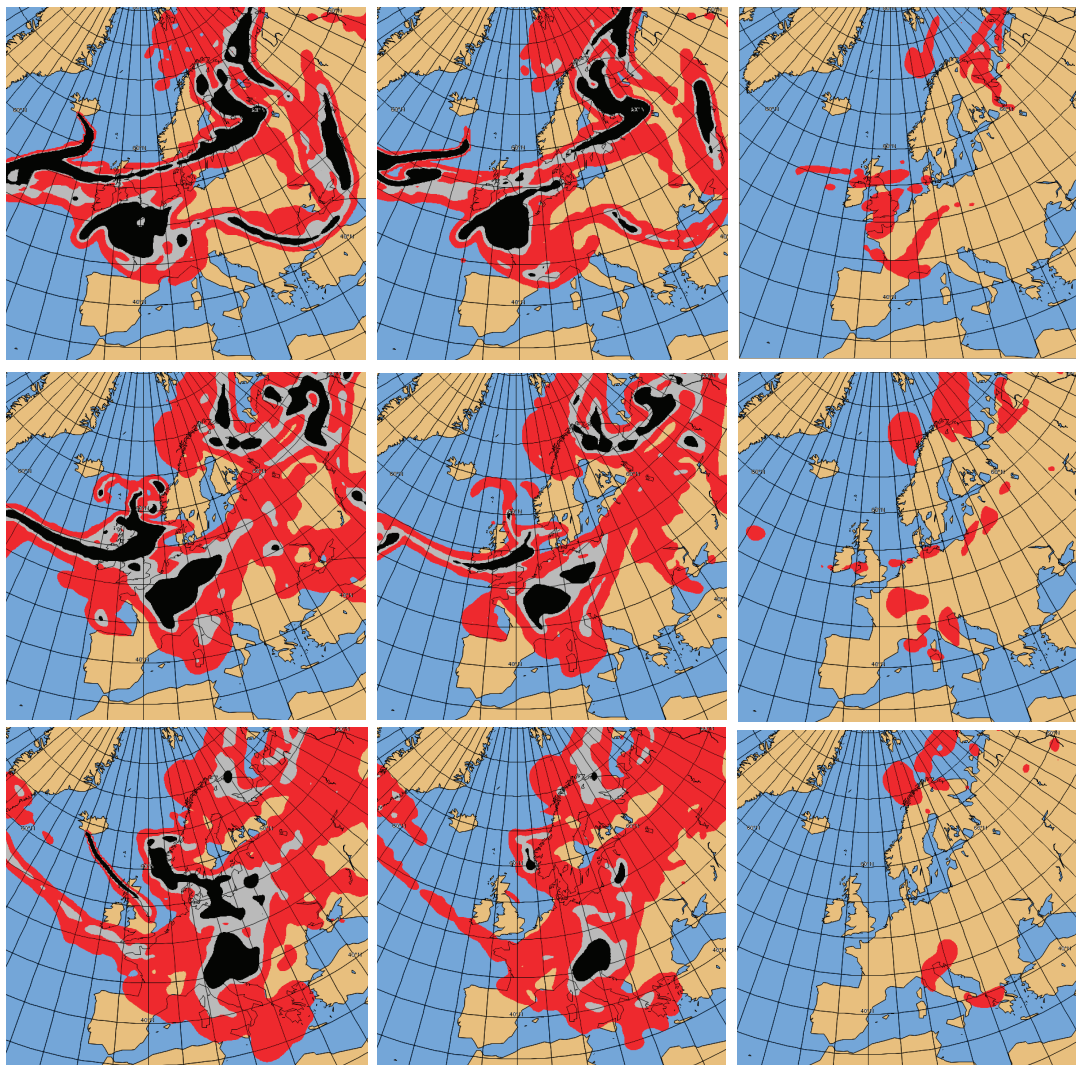
letvægts-aerosolmålere, og et større antal Lidar-systemer i Europa blev vendt opad, så laserstrålen kunne reflekteres fra askeskyen. DERMA's resultater blev løbende sammenlignet med disse observationer, efterhånden som de kom til vores kendskab. I vindenergiafdelingen ved Risø-DTU benytter Torben Mikkelsen og Sven-Erik Gryning en Lidar til bl.a. turbulensmålinger i forbindelse med udvikling af vindmøller, og også dette instrument, der er opstillet i Høvsøre i det nordvestlige Jylland, scannede himlen i denne periode. Vi var i nær kontakt med Torben og Sven-Erik dels for at sammenligne deres målte profiler med forekomsten af almindelige skyer, som også reflekterer Lidar-signalet, dels for at sammenligne med resultaterne af DERMA.

Usikkerheden ved selve spredningsmodelberegningen, herunder beregningen af afsætning af aske på Jordens overflade, er relativt velkendt, nogenlunde som for de numeriske vejrprognosemodeller. Men usikkerheden forbundet med beskrivelsen af kilden er væsentligt større. Det dynamiske forløb af askeskyens bevægelse er nogenlunde godt beskrevet via observationerne af den tidlige udvikling i askesøjlehøjden, men koncentrationsværdierne i absolutte termer er væsentligt mere usikre.

De europæiske internationale luftfartsmyndigheder opererer med en tærskelværdi af askekoncentration på  $2 \text{ mg/m}^3$  for sikker flyvning. Men i løbet af udbruddet indførte man i England og nogle få andre lande (ikke Danmark) endnu en tærskelværdi på  $4 \text{ mg/m}^3$ , således



Figur 8. Koncentration af vulkansk aske i 'flightlevel' 130, 200 og 350 svarende til højderne 4, 6 og 11 km over Jordens overflade til tidspunktet 12 UTC hhv. den 14., 15., ..., 20. april 2010 (hver linie svarer til en fortløbende dato; øverst på denne side er den 14. april og den 20. april ses nederst på næste side). Rød farve angiver koncentrationensværdier i intervallet 0.2–mindre end 2 mg/m<sup>3</sup>, grå i intervallet 2–4 mg/m<sup>3</sup> og sort over 4 mg/m<sup>3</sup>.



at flyvning i England blev tilladt også i intervallet 2-4 mg/m<sup>3</sup> under særlige omstændigheder. Det kan diskuteres, om denne findeling giver god mening set i lyset af de usikkerheder, der er forbundet med prognoserne for askekoncentration, og man kan nok med rette spørge, om forsigtighedsprincippet "better safe than sorry" kom under pres.

### Fremtiden

Efter det længerevarende udbrud fra Eyjafjallajökull er der internationalt sat forskellige tiltag i værk med henblik på i fremtiden at blive bedre til at varsle for vulkansk aske i atmosfæren. En af planerne består i at etablere et operationelt system til observation af vulkansk aske. En del af observationerne af askeskyen

under udbruddet, eksempelvis med Lidar, blev foretaget på ad hoc-basis og kunne sættes bedre i system. Der er desuden på Island planer om at etablere et mobilt radarsystem til bedre estimering af højden af askesøjlen over en vulkan. Flyindustrien er også på banen med henblik på at opnå en mere præcis forståelse af, hvordan jetmotorer påvirkes

af vulkansk aske. Målet er bedre tærskelværdier for koncentration af aske, eller måske snarere påvirkningen heraf på jetmotorer. Endelig eksperimenteres der med at udstyre fly med egne Lidar-systemer, således at piloten vil kunne detektere og undvige en askesky. Et problem her er den forholdsvis begrænsede rækkevidde af Lidar-signalet.

Vi vil gerne rette en tak til kolleger i DMI's Forskningsafdeling og Vejrteneste, som bidrog i en hektisk periode, og en særlig tak til Thomas Lorenzen i Teknikafdelingen, som var til stor hjælp med det computertekniske.

## Referencer

J. Gloster, H. J. Champion, J. H. Sørensen, T. Mikkelsen, D. B. Ryall, P. Astrup, S. Alexandersen and A. I. Donaldson. Airborne transmission of foot-and-mouth disease virus from Burnside Farm, Heddon-on-the-Wall, Northumberland, during the 2001 epidemic in the United Kingdom. *Vet. Rec.* 152 (2003) 525–533.

N. W. Nielsen and J. H. Sørensen. Tropopausefolden over Danmark den 21. marts 1994. *Vejret* 1996–4 (1996) 1–15.

J. H. Sørensen, S. Alexandersen, P. Astrup, K. E. Christensen, T. Mikkelsen, S. Mortensen, T. S. Pedersen, S. Thykier-Nielsen, 2007. The VetMet veterinary decision support system for airborne animal diseases. *Proceedings of the 29th NATO/SPS International Technical Meeting on*



Figur 9. Satellitbillede af askeskyen spredt over Atlanterhavet d. 17. april 2010. Ref. [http://da.wikipedia.org/wiki/Eyjvafjallajökulls\\_vulkanudbrud\\_i\\_2010](http://da.wikipedia.org/wiki/Eyjvafjallajökulls_vulkanudbrud_i_2010).

Air Pollution Modelling and its Application, 24–28 September 2007, Aveiro, Portugal.

J. H. Sørensen, A. Baklanov and S. Hoe. The Danish Emergency Response Model of the Atmosphere. *J. Envir. Radioactivity* 96 (2007) 122–129.

J. H. Sørensen and N. W. Nielsen. Intrusion of stratospheric ozone to the free troposphere through tropopause folds – a case study. *Phys. Chem. Earth* 26 (2001) 801–806.

J. H. Sørensen, E. Sturkell and F. Holm. Grímsvötn – farer og forebyggelse – nyt udbrud i november 2004. *Geologisk Nyt* 4, august 2005, 10–17.

J. H. Sørensen, E. Sturkell and F. Holm. Udbruddet fra vulkanen Grímsvötn november 2004. *Vejret* 2005–2, 6–18.

J. H. Sørensen, E. Sturkell and F. Holm. Grímsvötn – farer og forebyggelse – nyt udbrud i november 2004. *Geologisk Nyt* 4, august 2005, 10–17.