

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
GÖTEBORGS UNIVERSITET

RYMD- OCH GEOVETENSKAP
Göteborg

Studera askmoln med GNSS
Kandidatarbete

Författare:

Björnborg Nguyen
nguyenb@student.chalmers.se
Mattias Sjöberg
matsjob@student.chalmers.se
Henrik Gårdh
gusgardh@student.gu.se

Handledare:

Rüdiger Haas
rudiger.haas@chalmers.se
Johan Löfgren
johan.lofgren@chalmers.se

19 maj 2014

Sammanfattning

I denna rapport har tekniken att observera vulkaniska askmoln i atmosfären med hjälp av SNR-data (signal-brusförhållande) från GNSS-stationer (Global Navigation Satellite System) undersökts. Metoden har bekräftats fungera genom att studera askmoln från vulkaner i tre områden: Island, Sicilien och Indonesien. För dataanalys skrevs ett antal program. Tidpunkten och riktningen för de observerade detektionerna för Eyjafjallajökulls utbrott (2010) visade sig stämma med data från andra detektionstekniker. I Indonesien (jan-feb, april 2014) fanns aska i atmosfären från flera relativt samtidiga utbrott från bland annat vulkanerna Sinabung, Kelut, Merapi. Ett stort antal askmolnsdetektioner kunde således observeras. Genom kombination av data från flera satelliter och mottagare kunde information erhållas om askmolnens utbredning. Fördelarna med denna teknik är bland annat dess förhållandevis låga kostnad och dess potential till kontinuerliga och omfattande observationsmöjligheter. Det finns goda möjligheter för observation av SNR-data från GNSS-stationer att kunna fungera som komplement till nuvarande detektionstekniker.

Abstract

In this report the technique of observing volcanic ash in the atmosphere by analyzing SNR data (Signal-to-Noise Ratio) from GNSS (Global Navigation Satellite System) stations was investigated. The functionality of the method was confirmed by studying volcanic plumes from three areas: Iceland, Sicily and Indonesia. A number of programs were written for data analysis. The timing and direction of the observed detections for Eyjafjallajökull (2010) and Etna (2006) proved to fit with data from other detection techniques. During early 2014 several volcanoes (i.a. Sinabung, Kelut and Merapi) in Indonesia were erupting relatively simultaneously. A large number of volcanic plumes could therefore be detected there. By combining data from several satellites and receivers information about the location of the volcanic ash plumes could be obtained. The advantages of this technique include its relatively low costs and its potential for continuous and comprehensive observation opportunities. In the future there are good opportunities for SNR data analysis from GNSS stations to function as a complement to current detection techniques.

Innehåll

1	Introduktion	1
2	Teori	4
2.1	Vulkanism	4
2.2	Elevation och azimut	5
2.3	Global Navigation Satellite System	5
2.4	SNR: Signal-brusförhållande hos GNSS	10
3	Metod	11
3.1	Beräkningsmetoder	14
3.1.1	Borttagning av data vid låga elevationer	14
3.1.2	Detektering och beräkning av avvikelse i SNR	14
3.2	Positionsbestämning av askmoln	18
4	Detektering av askmoln	18
4.1	Eyjafjallajökull	19
4.2	Etna	20
4.2.1	Askmolnets höjd	23
4.3	Indonesien	24
5	Diskussion	27
6	Slutsats	31
A	Filformatet RINEX	33
	Bibliografi	34

1 Introduktion

Under våren 2010 hade vulkanen Eyjafjallajökull på Island ett utbrott som spred stora mängder aska med vinden över Europa [1]. Det utsöndrade askmolnet skapade stora problem, dels i form av en hälsorisk för befolkningen nära vulkanen och dels genom de enorma områden som tvingades stängas för flygtrafik. Under cirka en veckas tid var stora delar av Europas flygtrafik helt utslagen, miljontals människor blev strandsatta och många företag förlorade stora summor pengar [2].

En annan incident då flygtrafik påverkats av vulkanaska var "Airways Fligh 9" (känd som Jakartaincidenten) som den 24:e juni 1982 flög mellan London Heathrow, Storbritannien och Auckland, Nya Zeeland [3]. Flygplanet passerade genom ett askmoln utsöndrat av vulkanen Galunggung i Indonesien. Samtliga av flygplanets motorer hade inom loppet av några minuter upphört fungera och piloten tvingades segelflyga i cirka 10 minuter tills dess att planet lämnat askmolnet och motorerna gick att starta igen. Vid landningen upptäckte besättningen att sikten genom flygplanets främre fönsterrutor var kraftigt försämrade. På grund av detta fick landningen ske utan möjlighet att se genom fönsterrutorna och istället fick piloterna förlita sig på flygplanets instrument kombinerat med instruktioner från flygledningen i kontrolltornet [3]. Utredningen av incidenten fastställde att askan från vulkanen hade smält i motorerna och täppt igen dem så att de stannat. Detta skedde på grund av att en motor på ett jetflygplan har högre arbetstemperatur än askpartiklarnas smälttemperatur [4]. Flygplanets främre rutor hade blivit nerslipade av askan så att det inte gick att se genom dem [5]. Anledningen till att man inte undvek askmolnet var att den väderradarteknik som användes, visade en klar himmel och inte ett askmoln [3].

Dessa är exempel på de stora problem som askmoln från vulkanutbrott skapar världen över. Förmågan att kunna samla in information om hur snabbt de utbereder sig och i vilken riktning de rör sig är mycket viktigt, så att varningar kan utfärdas och problem undvikas.

En av de tekniker som idag används för att studera askmoln från vulkanutbrott är radar (eng. **radio detection and ranging**). Information kan exempelvis erhållas genom att låta radarinstrument utsända radiovågor mot ett askmoln för att sedan detektera dem efter reflektion mot askan, vilket kan ge information om avståndet. Tiden det tar från att signalen skickas tills den återvänder används för att beräkna avståndet mellan instrument och askmoln [7].

En annan radardetektionsteknik för att få information om ett askmoln är att använda doppler-radar. Tekniken bygger på dopplereffekten och beräknar hastigheten på ett objekt genom att jämföra den utskickade radiovägens

frekvens mot frekvensen på den signal som återvänder till instrumentet efter reflektion mot objektet [6] [7].

De radarinstrument som används vid askmolnsdetektion är både stationerade på marken, luftburna med hjälp av flygplan och placerade på satelliter. Dessa kan ge information om askmolnets höjd och utbredning på högre altituder (altitud i betydelsen höjd över havet) [7], [8].

Det finns ett antal nackdelar med radardetektionsmetoderna för askmoln. De flygplansbaserade teknikerna har svårt att kontinuerligt observera askan under en längre tid. Det tar dessutom tid att få upp ett flygplan i luften. Instrumenten som doppler-radar använder är idag otympliga, tunga och är ofta monterade i bilar för att lättare kunna förflyttas vid behov [7]. Detta medför kostnader för fordon och personal, men också risker för den personal som ska placera ut mätutrustningen på marken i närheten (ca 0,2-12 km) av vulkanen [7].

Organisationerna CNES (Centre National d'Études Spatiales, Frankrike) och NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) har ett samarbete rörande en satellit med namnet CALIPSO (eng. Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) vars syfte är att observera luftföroreningar [9]. En del av detta samarbete är dedikerat till undersökning av askmoln från vulkanutbrott. Satelliten är utrustad med bland annat lidar (eng. light detection and ranging). Instrument i CALIPSO skickar ut en signal som färdas mot det mål på jorden man vill undersöka. När ljuset reflekteras från målet, exempelvis ett askmoln, förändras ljusets våglängd på grund av bakåtspridning [10]. Hur våglängden förändras beror på vad det reflekteras mot; vilket resulterar i att det ljus som färdas tillbaka till satelliten CALIPSO kan tolkas, baserat på de olika våglängderna. För tillfället finns det dock bara en CALIPSO-satellit och tekniken kan omöjligt täcka alla de områden där askmoln kan förekomma samtidigt [11]. Andra sätt att följa ett askmolns utbredning innefattar observationer via satellitbilder samt modeller baserade på vindriktning och vindstyrka. Satellitgruppen Meteosat används för att detektera askmoln. Huvuduppdraget för satelliterna är att ta bilder i det synliga och infraröda spektra och ge meteorologisk data för att kunna förutsäga vädret. Tack vare flera algoritmer som genomsöker de infraröda bilderna efter avvikande data så är det möjligt att detektera askmoln [12]. Det som algoritmerna letar efter är bland annat askmolnsliknande molnformationer, men även att molnet ska spridas längs vindriktningen från närheten av en vulkan. Molnet som undersöks ska också ha en högre temperatur än omgivningen [12]. Systemet är dock inte helt optimalt och vid testkörningar upptäcktes i genomsnitt två av tre askmoln. Dessutom ger den ungefär 1-2 falsklarm per dag [12].

I tidigare studier [13] påvisas möjligheten att använda data från GNSS-

stationer (eng. **Global Navigation Satellite System**) för att undersöka askmoln i atmosfären. GNSS infattar flera olika satellitnavigationssystem, till exempel det amerikanska GPS (eng. **Global Positioning System**) och det ryska GLONASS (rys. **G**lobalnaya **N**avigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema).

Detekteringstekniken i detta arbete bygger på att de utskickade signalerna från GNSS-satelliterna påverkas på ett mätbart sätt då de passerar genom askmoln. Under signalernas färd genom atmosfären mot markbaserade mottagare kan en tydlig förändring i dess SNR (eng. **S**ignal-to-**N**oise **R**atio, sv. signal-brus förhållande) uppmätas, då de passerar genom askmoln [13]. Detta i kontrast till väderförändringar, som endast påverkar signal-brusförhållandet marginellt [14]. Analys från markstationer av GNSS-signaler kan alltså utnyttjas för att identifiera askmolnen, dess position och dess utbredning [13].

Det finns ett flertal nätverk som ansvarar för grupper av GNSS-mottagare på jorden. De observerar kontinuerligt GNSS-signalerna i olika syften [15] [16], exempelvis studier av kontinentalplattornas rörelser, eventuella landhöjningar och atmosfärisk fjärranalys.

Eftersom ett stort antal GNSS-mottagare redan finns utplacerade över jorden skulle ett nyttjande av dessa i askmolnsdetektionssyfte vara relativt billigt och redan idag klara att användas [13]. Många GNSS-stationer finns dessutom redan placerade i närheten av vulkaner och används huvudsakligen för att upptäcka deformationer i marken [13]. Dessa (och samtliga GNSS-mottagare) skulle gå att använda för att detektera askmoln utan att utföra några större förändringar på dem. De samlar in data dygnet runt vilken ofta finns tillgänglig för vem som helst att använda.

I en tidigare studie [13] undersöktes två vulkaner, Mt. Redoubt och Okmok (båda i Alaska) genom analys av SNR-data (med en samplingsfrekvens på 30 s) från närliggande stationer [13]. Resultaten i artikeln innefattar hur snabbt askmolnet steg från Mt. Redoubt; 180 s efter utbrottet började så steg askmolnet med 32-40 m/s.

I denna rapport presenteras en vidare undersökning av denna teknik, att studera SNR-data från markbaserade GNSS-mottagare för detektion av askmoln i atmosfären. Förutom att, som i tidigare studier, studera störningar på GPS-signaler inkluderas även GLONASS-signaler i undersökningarna för att kunna tillgå mer data. Betydelsen av att använda GNSS-stationer med högre samplingsfrekvens för SNR-data än vad som tidigare observerats, undersöks. Metoder för automatisk genomsökning av SNR-data efter indikationer på aska presenteras. Det redogörs även för möjligheten att använda dessa metoder för att följa askmolns utbredning genom kombination av data från flera mottagare. Data från stationer i tre områden har undersökts: vid vulkanen Eyjafjallajökull på Island, vid Etna i Italien samt vid vulkanerna Kelut, Merapi och Sinabung i Indonesien.

2 Teori

2.1 Vulkanism

Vulkanism uppstår där kontinentalplattorna rör sig i förhållande till varandra. Under ett vulkanutbrott stiger smälta bergarter (magma) upp ur jordens inre. När magman når jordytan kan den vara mer eller mindre förödande, beroende på dess struktur och egenskaper [17]. Vulkanism kan även uppstå om jordskorpan belastas av en magmaström från jordens inre. Trycket tillsammans med värmen får jordskorpan att spricka upp vilket leder till bildandet av en så kallad het fläck (eng. hotspot) [18]. De geografiska områden där vulkaner uppstår är till exempel där den Indisk-Australiska plattan möter den Euroasiatiska- och Pacifiska plattan. Detta område innefattar länder som Singapore, Indonesien och Malaysia. Ett exempel på en plats där heta fläckar uppstått är Hawaii, där öar i ögruppen består av stelnad magma från gamla vulkanutbrott. Genom att den Pacifiska plattan där Hawaii ligger förflyttat sig medan den heta fläcken behållit sin position, har en kedja av öar uppstått [18]. Hawaii ligger relativt centralt på sin kontinentalplatta och inte nära ett område där två plattor möts.

Trycket inuti jordens inre är högre än det i atmosfären och när magma stiger mot jordens yta kommer den utsättas för en tryckskillnad. Den hastighet som magman börjar stiga med genom vulkanen är relativt låg [19]. De gaser som tidigare varit komprimerade och inlåsta i magman kommer nu att börja expandera och bilda fickor av gas (bubblor). När trycket minskar ännu mer kan detta leda till att bubblorna spricker, vilket skapar explosioner. Detta accelererar magman och den börjar fragmenteras, det vill säga delas upp i mindre partiklar. Magman har en väldigt hög hastighet när den lämnar vulkanen, en hastighet som kan variera mellan 100-600 m/s beroende på vulkanens egenskaper [19]. Partiklarna som kastas ut ur vulkanen kan nå en höjd på flera hundra meter upp i luften och när partiklarna lämnat vulkanen börjar de stelna till aska [19]. Askan blir till slutligen finkornigt pulver bestående av mineraler och vulkaniskt glas, där partiklarna är cirka 2 mm i diameter [20].

Den tunga askan bromsas snabbt in efter att ha lämnat vulkanen, men den luft som befinner sig i närheten blandas med den varma askan, värms upp och börjar stiga. Densiteten i jordens atmosfär avtar dock med höjden över havet vilket leder till att då askmolnet har samma densitet som atmosfären slutar det att stiga. Hur högt molnet stiger beror på förhållandet mellan luften och askan. Till exempel kommer ett moln med mindre aska per volymenhet att ha lägre densitet och därmed stiga högre eftersom det har färre tunga partiklar i sig, och ett varmare askmoln kommer att expandera mer än ett

kallare [19].

När askan når sin högsta höjd kommer den börja breda ut sig i sidled eftersom den inte längre stiger, men fortfarande fylls på med mer aska underifrån. Askmoln kan bli så höga som 30 km [19]. Detta ger upphov till ett svampmoln av typen pyrocumulus. Vindar börjar sedan transportera bort askmolnet från vulkanen. Detta kan bland annat ske på den höjd där vinden förflyttar sig mest effektivt (tropopausen), där luftströmmarna rör sig snabbt med relativt konstant hastighet och på så sätt sprids över stora områden [19].

Det är just tropopausen som största delen av den kommersiella flygtrafiken befinner sig [21]. Askmolnet kommer sakta men säkert att svalna av, vilket leder till att dess densitet ökar och det börjar falla tillbaka ner mot jorden [19]. Det betyder att askmoln som har en högre altitud än den zon där de kommersiella flygen befinner sig, kommer att falla ner till denna zon innan den lägger sig på marken.

2.2 Elevation och azimut

Två begrepp som ofta förekommer i denna rapport är elevation och azimut. Dessa är koordinater i det så kallade horisontella koordinatsystemet som beskriver ett föremåls position på himlen, sedd från en specifik plats på jordytan.

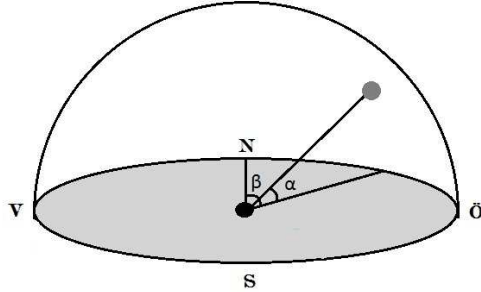
Elevation definieras som den vinkel en punkt på himlen bildar med den för observatören lokala horisonten. Den anges som en vinkel mellan 0° - 90° , där 90° är rakt ovan observatören och 0° är mot horisonten [22].

Azimut är den vinkel längs horisonten som en punkt på himlen bildar med en linje dragen längs jordytan åt norr. Den anges som en vinkel mellan 0° - 360° , där 0° och 360° är riktningen mot norr och 180° är rakt söder ut [23]. Se figur 1 för illustration av elevation (α) och azimut (β).

2.3 Global Navigation Satellite System

Global Navigation Satellite System (GNSS) är ett samlingsnamn för ett antal satellitbaserade navigationssystem vars primära uppgift är att på en världsomfattande skala möjliggöra noggrann positionsbestämning. De två mest etablerade och använda GNSS-systemen är det amerikanska GPS-systemet och det ryska GLONASS-systemet [13]. Nedan följer en beskrivning av GPS-systemet, men större delen av beskrivningen är även applicerbar på GLONASS [24].

GPS utvecklades för militära syften, exempelvis för att följa trupperenheter i realtid, av det amerikanska försvarsdepartementet och drivs fortfarande av denna organisation. I dagsläget har systemet dock i viss



Figur 1: Här ses elevationsvinkeln α och azimut β sedd från en GNSS-stations position (den centerade punkten i det horisontalplanet). Elevationen är vinkeln mellan punkten på himlen och det skuggade planet sett från stationen. Azimut är vinkeln mellan Nordpolen och satellitens position i horisontalplanet.

mån gjorts tillgängligt för allmänheten vilket lett till ett stort antal civila applikationer som exempelvis trafiknavigation, mätningar av kontinentalplattornas rörelser och fjärranalys av atmosfären [25].

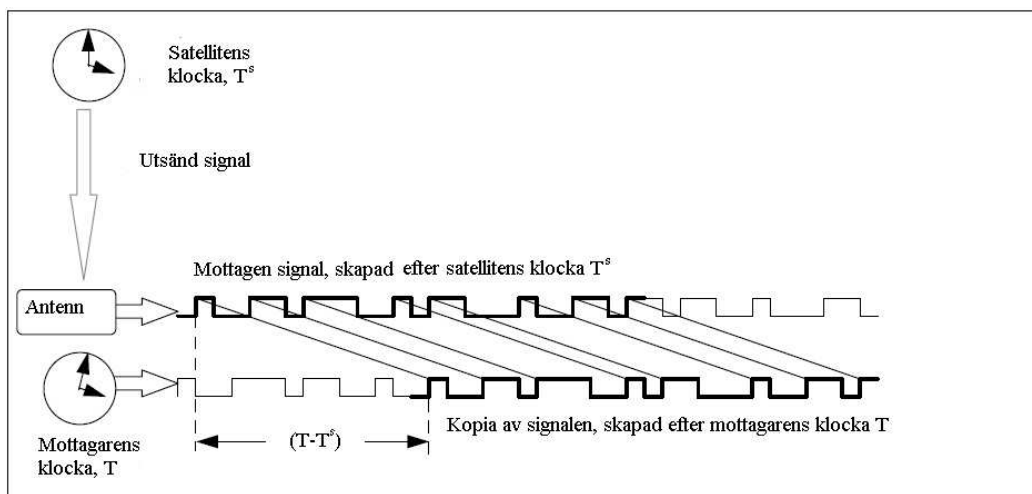
GPS-positionering bygger i grunden på trilateration som är en form av triangulering, en metod för positionsbestämning genom att mäta avståndet till punkter med kända koordinater [26]. Dessa punkter är GPS-satelliterna, vars utsända signaler bland annat innehåller information om satelliternas positioner. Positionerna ges i ett koordinatsystem definierat som följande: origo i jordens mittpunkt, Z-axeln pekande mot nordpolen, X-axeln pekande mot ekvatorn longitud 0° (rakt söderut från Greenwich, Storbritannien), Y-axeln i en rät vinkel mot X- och Z-axeln, pekande mot longitud 90° [26].

Signalerna som används för positionsbestämning markeras kontinuerligt med dess utsändningstid och det genereras som en kod enligt en känd algoritm. En mottagare på jorden genererar en egen kopia av signalen (koden) enligt samma algoritm, och vet därmed hur signalen ska se ut vid en given tidpunkt. Eftersom den av mottagaren mottagna GPS-signalen är något fördröjd (cirka 0,07 s på grund av avståndet signalen måste färdas) finns en skillnad i den modulerade koden mellan signalen och kopian som svarar mot den tid det tagit för signalen att färdas till mottagaren, se figur 2. Denna tidsskillnad, mellan att signalen utsänds tills den mottages, är den för mottagaren fundamentala observabeln. Genom att multiplicera ljushastigheten med tidsskillnaden kan det så kallade pseudavståndet till satelliten beräknas.

Pseudoavstånd definieras som

$$R_p = c\Delta t \quad (1)$$

där c är ljushastigheten och Δt tidskillnaden från då signalen sändes tills den mottogs [26]. Pseudoavståndet skiljer sig från det faktiska avståndet mellan satellit och mottagare genom att det innehåller de felaktigheter som bland annat uppstått på grund av brist på synkronisering av klockorna på satellit och mottagare [26].



Figur 2: Förskjutningen mellan den mottagna signalen från satelliten och den lokalt genererade kopian svarar mot den tid signalen färdats innan den mottagits. Originalbild från [26].

Detta sätt att beräkna en GNSS-mottagares position, där man tittar på skillnaden Δt i den modulerade koden från satellit och mottagare, ger en noggrannhet på några meter och är den teknik som används i mobiltelefoner och bilnavigation [25].

För att erhålla en större noggrannhet behöver även fäsen på signalen observeras. Då fäsen för den inkommande signalen jämförs med fäsen för signalkopian hos mottagaren finns dock en komplikation. Beräkningen blir osäker med ett antal våglängder (osäkerheten kallas fas-tvetydighet, eng. phase ambiguity) eftersom en fasförskjutning med hela våglängder ej kan detekteras. Antalet våglängder mellan satellit och mottagare måste uppskattas genom andra observationer, bland annat pseudoavståndet. Fas-tvetydigheten förbi samma så länge satellit-mottagarpåret upprätthåller kontakt med varandra, vilket innebär att en ny uppskattning av fas-tvetydigheten endast behöver

genomförs varje gång mottagaren förlorat kontakt med satelliten (då signalen tillfälligt blockerats av exempelvis ett träd) [25]. Fasmätningarna kan beskrivas som följande [27]:

$$\lambda\Phi_A^j = \rho_A^j + c_0(\tau_A - \tau^j) + Z_A^j - I_A^j + \lambda N_A^j + \epsilon \quad (2)$$

där

- $\lambda\Phi_A^j$ är signalens våglängd multiplicerat med det observerade antalet fasykler och anges i enheten meter
- ρ_A^j är det faktiska avståndet mellan satellit och mottagare
- $c_0 = 299792458$ m/s är ljusets hastighet i vakuum
- τ_A och τ^j är synkroniseringsfelen i mottagarens respektive satellitens klockor
- Z_A^j är den troposfäriska fördröjningen
- I_A^j är den jonosfäriska fördröjningen
- N_A^j är fas-tvetydigheten
- ϵ innehåller övriga störningar, exempelvis den effekt som uppkommer då signalen når mottagaren på flera olika vägar (genom t.ex. reflektioner), så kallade flervägsfel (flervägsreflektioner). Även brus i mottagaren
- indexen j och A står för satellit respektive mottagare

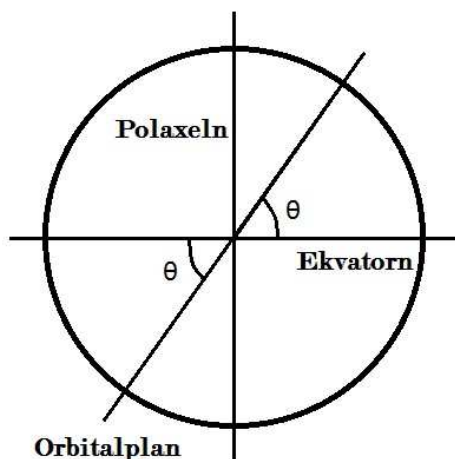
För att den uppmätta tidsskillnaden ska motsvara den faktiska propageringstiden mellan satellit och mottagare hade klockorna behövt vara perfekt synkroniserade, vilket praktiskt sett är mycket svårt att åstadkomma. På grund av detta måste tidsfelen, både för kod- och fasmätningar, uppskattas med hjälp τ_A och τ^j . Tiden på satelliterna mäts med atomur för att vara så exakt som möjligt. Synkroniseringsfeltermerna inkluderar även de relativistiska effekter som påverkar tiden på grund av stora hastighetsskillnader och skillnad i gravitationsfältet [28].

Troposfären är den del av atmosfären som är närmast jordytan. Den definieras som det område från jordytan och uppåt (till cirka 10-16 km höjd) där temperaturen sjunker med en ökning i altitud. I GNSS-sammanhang menas dock oftast området från jordytan till 50 km höjd. Den troposfäriska fördröjningen, Z_A^j , innebär att fasan ej fortplantar sig med c_0 och uppkommer på grund av dipoler hos molekylerna i troposfären [27] [29].

Jonosfären är den övre delen av jordens atmosfär (cirka 50-1000 km höjd). Detta område karakteriseras av närvaron av fria elektroner på grund av joniserande strålning från solen. Dessa leder till de förskjutningar av fasen i signalen som beskrivs i I_A^j -termen [25].

Teoretiskt sett behövs avståndet till tre punkter för att bestämma en position i rummet med trilateration, men på grund av att det som mäts av en GNSS-mottagare är pseudoavståndet krävs minst fyra punkter [30]. För att bestämma sin faktiska position behövs därmed observationer till fyra satelliter göras, så att fyra parametrar kan bestämmas: de tre rumsliga koordinaterna samt klockfelen [26].

På grund av detta är satelliternas banor utformade så att det alltid finns minst fyra stycken synliga på himlen ovan varje plats på jordytan [26]. Totalt finns det omkring 32 stycken GPS-satelliter (denna siffra varierar något då nya skjuts upp och gamla stängs av). GPS-satelliterna är fördelade i sex omloppsbanor med en definierad inklinationsvinkel mellan sig och ekvatorn, på 55° ; se figur 3. Detta betyder att en GPS-satellit aldrig passerar direkt över nordpolen och elevationen aldrig överskrider 55° [26].



Figur 3: Vinkeln θ mellan orbitalplanet och ekvator är 55° och kallas inklinationsvinkel.

GPS-satelliterna har omloppsbanor med en radie på cirka 26600 km (ungefär fyra jordradier), de rör sig med en hastighet på cirka 4 km/s relativt jordens centrum och har en nästintill cirkulär bana (excentriciteten är 0.02) [26]. Detta innebär att två varv runt jorden tar cirka 23 timmar och 56 minuter. Från en observatör på jorden betyder detta att en satellits position på himlen vid en given tid på dagen förskjuts med fyra minuter varje dygn. Att omloppsbanorna utformats på detta sätt beror på att 23h 56 min är samma

tid som det tar för jorden att snurra 360° [26]. Det är ej samma tid som ett 24-timmarsdygn eftersom jorden även snurrar runt solen vilket ändrar solens position på himlen med $1/365,24$ dygn ≈ 4 minuter varje 360° .

GLONASS-systemet skiljer sig från GPS-systemet på en rad punkter. Förutom att ett annat system för koordinater, tid och kodstruktur används så är omloppsbanorna annorlunda utformade. De 24 GLONASS-satelliterna är fördelade på tre orbitalplan med $64,8^\circ$ som inklinationsvinkel. Deras avstånd från jordytan är något mindre än GPS-satelliternas, cirka 19100 km. Till skillnad från GPS-systemet återkommer inte en satellit till (nästan) samma position på himlen efter ett dygn. Istället är omloppsbanorna utformade så att satelliterna övertar varandras positioner. Om en GLONASS-satellit observeras passera över en viss punkt, kommer en annan satellit passera där nästa dygn vid samma klockslag [25]. Tidsangivelserna skiljer sig något mellan GPS och GLONASS. GLONASS följer UTC (Coordinated Universal Time) medan GPS följer den så kallade GPS-tiden. GPS-tiden har sin startpunkt 6:e januari 1980 och tar ej hänsyn till skottsekunder, vilket gör att den för tillfället ligger 16 sekunder före UTC. [31]

2.4 SNR: Signal-brusförhållande hos GNSS

På senare tid har GNSS-mottagare låtit sparat SNR-data (eng. **S**ignal to **N**oise **R**atio, signal-brusförhållande). Denna innehåller information om hur stark den mottagna signalen är i förhållande till mottagarens brusnivå, det vill säga bruset i det band som mottagaren tar emot på. SNR-data ger ingen information som kan användas i positionsbestämningssyfte och har därför ofta ignorerats vid behandling av data. På senare tid har det dock insetts att denna information kan användas i ett antal olika tillämpningar, bland annat fjärranalys [13]. Ett exempel på detta är att om signalen passerar genom ett askmoln i atmosfären så kommer den delvis att dämpas och spridas och således ha mindre styrka än annars, då den når en mottagare [13]. I denna studie utnyttjas den effekten.

Mer specifikt så definieras SNR som det förhållande som finns mellan signaleffekt och bruseffekt i en given bandbredd

$$SNR = S - N \quad (3)$$

där S och N är signal- respektive bruseffekten, givet i decibel/milliwatt (dBm) [32].

SNR påverkas endast marginellt av väder. En viss påverkan kan dock möjligen ses i mätningarna, vilket tycks vara en lite dämpad och svagare SNR-data, jämfört mot en dag med klar himmel. Under ett antal timmar ett

sådant dygn ses att hela SNR-data är något förskjuten nedåt, vilket skulle kunna ha sitt ursprung i väderpåverkan. En störning från askmoln yttrar sig dock på ett annat sätt, där signal-brusförhållandet påverkas betydligt kraftigare.

De väderstörningar i allmänhet som finns för GNSS-systemet brukar gå att dela upp i två komponenter. Den hydrostatiska störningen som innefattar att signalerna störs av de torra gaser som finns i atmosfären, så som kväve (N_2), syre (O_2) och argon (Ar) [14]. Den hydrostatiska störningen varierar med den lokala temperaturen och lufttrycket. Störningen ändrar sig dock väldigt lite, med mindre än 1 % över några timmar[14]. Den andra komponenten av störningar, behandlar de störningar som beror på mängden vatten i atmosfären (eng. wet delay), i form av vattenånga och kondenserad luft (moln) [14]. Denna störning varierar mycket oftare och snabbare än den hydrostatiska, är svårare att förutse och är slumpmässig. Däremot störningen i sig är mindre än den hydrostatiska [14].

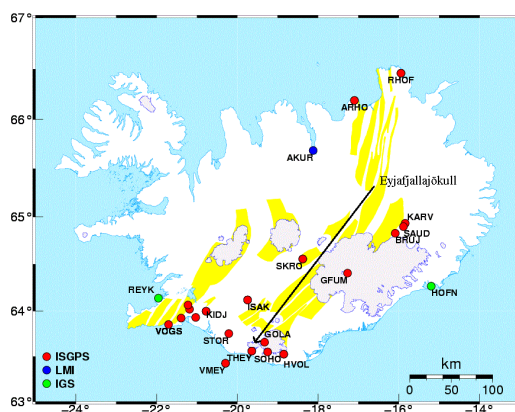
3 Metod

Data från GNSS-mottagare är i stor utsträckning tillgänglig på internet. Genom att uppsöka olika mottagarnätverks databaser kunde data från utvalda områden och tidpunkter laddas ned. Data har hämtats från IGS (**I**nternational **G**NSS **S**ervice) och SONEL (**S**ystème d'**O**bservation du **N**iveau des **E**aux **L**ittorales). Datafilerna innehåller information som för detta arbetes syften är ointressant, exempelvis den data som används för positionsbestämning. Se appendix för beskrivning av filformatet som data är sparad i. Med hjälp av ett inläsningsprogram kunde all data förutom de intressanta SNR-mätningarna sällas bort.

Det är möjligt att beräkna satelliternas position utifrån det nedladdade data, men detta är förhållandevis komplicerat och det finns enklare metoder. Nätverken som tillhandahåller GNSS-data erbjuder även datafiler i formatet .14n som innehåller satellitpositionerna. Men det visade sig att GLONASS-satelliternas positionsinformation endast sparades i filformatet .sp3 vilket gav kompatibilitetssvårigheter och därför valdes det att helt gå över till .sp3. Det medförde även bättre noggrannhet i satelliternas position, från en precision på 1 m till 3 cm [33]. Samtliga .sp3-filer hämtades från NASA-nätverkets databas [34]. Databehandlingen i denna rapport har gjorts i MATLAB.

I det tidiga skedet av projektet valdes askmoln från vulkanerna Eyjafjallajökull på Island 2010 och Etna på Sicilien 2006 som de primära objekten att studera. Utbrottet på Island 2010 valdes på grund av dess stora uppmärksammande i både internationell och svensk media.

Eyjafjallajökull har ett flertal GNSS-stationer i sin närhet vilket tycktes vara lovande, se figur 4. Det visade sig dock att av dessa stationer var det endast en som sparade SNR-data och befann sig i ett område där askmoln passerade [35], nämligen stationen HOFN på sydöstra kusten.



Figur 4: I denna karta över Island är att antal GNSS-stationer (röda, blå och gröna prickar) samt vulkanen Eyjafjallajökull (där pilen pekar) markerade. ISGPS, IGS och LMI är tre olika nätverk av GNSS-mottagare. ISGPS-mottagarna visade sig inte spara SNR-data [36].

Etna hade ett relativt stort utbrott och släppte ut stor mängder aska under augusti 2006 [37]. Ett antal GNSS-stationer i närheten av vulkanen fanns att tillgå, se figur 5. Stationen EIIV i staden Catania, sydöst om Etna, sparar SNR och befinner sig på en lämplig position i förhållande till askplymens utbredningsriktning [38]. Längre söder ut finns en station på Malta, MALT, som även den är placerad i rätt riktning i förhållande till vulkanen, om än på ett större avstånd.

Mätningarna från dessa stationer användes för att bekräfta teknikens funktionalitet och för att göra analyser om askmolnens position. En begränsande faktor var dock att data endast kunde erhållas från en station per vulkan, både till följd av hur askmolnen rört sig och att många stationer inte sparade SNR-data. För att kunna göra mer utförliga analyser av askmolnspositioner valdes det att även betrakta data från Indonesien, där ett flertal GNSS-stationer som sparade SNR fanns och att flera vulkaner hade utbrott under det observerade tidsintervallet (jan-feb och april 2014) [49]. De mest aktiva vulkanerna var Kelut och Sinabung, men askutsöndring skedde även från ytterligare ett antal vulkaner så som Barren Island [39], Slamet [40] och Merapi [41]. Se figurerna 6a och 6b för GNSS-stationerna NTUS, BAKO, PBRI, PBR2 och JOG2s positioner i förhållande till vulkanerna Kelut och Sinabung.

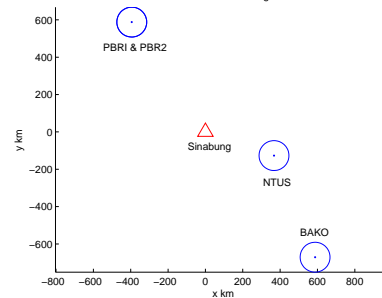


Figur 5: I denna karta är GNSS-stationerna nära Etna, tillhörande nätverket SONEL markerade som kvadrater. Av dessa uppfyllde två stationer, EIIV och MALT, kraven på att befinna sig i rätt område och spara SNR-data. Etna befinner sig precis norr om EIIV i figuren. Originalbild från [42].



(a) Geografisk bild

En schematisk bild över vulkanen och stationer runt omkring med SNR-observationer dag 25 (2014)



(b) Schematisk bild

Figur 6: I figur [htbp] Kelut och Merapi) utmarkerade. I figur (b) syns en schematisk bild över vulkanen Sinabung (röd triangel) och fyra stationers positioner (punkter). De stationer som använts i denna rapport är PBRI, PBR2, NTUS, BAKO och JOG2. De blå cirklarna representerar toleransnivån för respektive station. I den schematiska bilden visas inte JOG2 då vulkanen Sinabung undersöktes på grund av dess stora avstånd till vulkanen. Originalbilderna i 6a kommer från [43].

3.1 Beräkningsmetoder

3.1.1 Borttagning av data vid låga elevationer

Generellt sett uppvisar SNR-data snarlika mönster vid olika dagar. SNR börjar observeras vid låga elevationer [13] för att sedan, med tiden, öka mot ett maximum och sedan avta. I många fall tar de skepnad som parabler, se exempel i figur 7. SNR-datas elevationsberoende beror delvis på att den sträcka som signalen färdas genom atmosfären är längre vid låga elevationer, vilket innebär mer dämpning av signalen och förhållandevis mer brus. Därför är signalen som starkast i förhållande till bruset då satelliten är som högst på himlen. GNSS-antennerna är dessutom ofta designade för att dämpa signaler från låga elevationer för att motverka flervägsfel [44]. I figur 8 ses hur förstärkningen varierar i förhållande till elevationsvinkeln hos en typisk modern geodetisk GNSS-antenn. Vid 0° i figuren, rakt ovan antennen, är förstärkningen som störst.

Vid de lägre elevationerna syns en högre brusnivå samt oscillationer i signalen, se figur 9 som visar SNR som funktion av satellitelevation. Dessa har sitt ursprung i markreflektioner och störningar nära jordytan. Oscillationerna kan användas för en rad applikationer som exempelvis mätning av snödjup eller havsnivå [13], men är för detta arbetes ändamål ointressanta. Effekten på SNR-data från flervägsreflektionerna avtar med ökande elevation. Eftersom oscillationerna och störningarna kan misstas som aska i atmosfären kommer SNR-data under 20° elevation att ignoreras. Markstörningarna sträcker sig emellertid ibland upp till elevationer över 20° , men genom att ha eliminerat de värsta kan de separeras från askmolnsstörningarna.

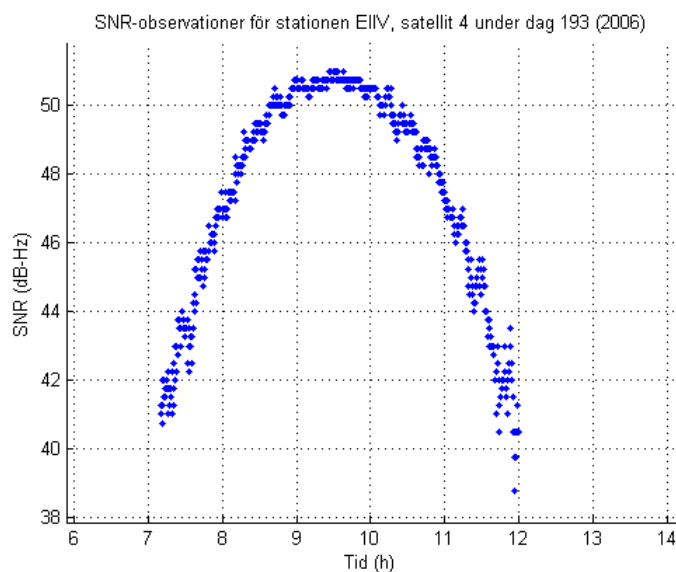
3.1.2 Detektering och beräkning av avvikelse i SNR

En stor del av den observerade SNR-data (som funktion av tiden) tar, som tidigare nämnts, formen av en parabel. För att finna störningar anpassas ett fjärdegradspolynom till varje båge av SNR-data med hjälp av minsta kvadratmetoden. På detta sätt finner man en minsta kvadratanpassning till data, med så lite fel som möjligt. I figur 10 illustreras ett exempel på en mätning där en anpassad kurva markerats. I figuren är SNR-data blå och approximationen röd.

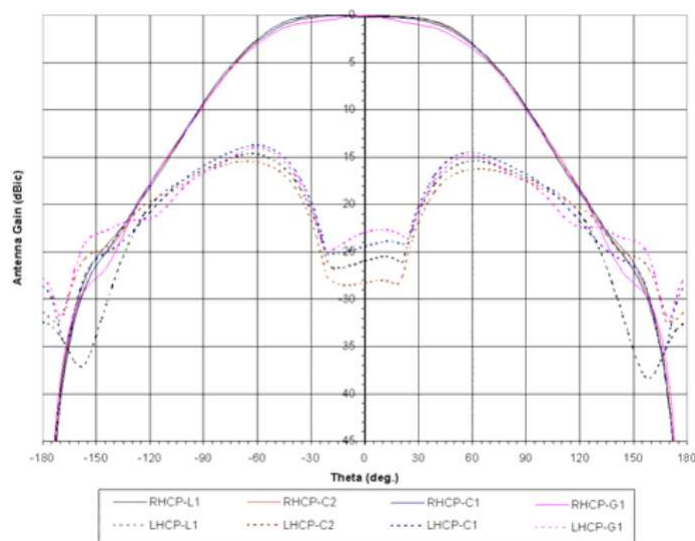
För att sedan detektera störningarna så studeras hur mycket de faktiska mätpunkterna, SNR-data, skiljer sig från kurvanpassningen enligt

$$\Delta SNR = SNR_{\text{mätvärde}} - SNR_{\text{approximerad}} \quad (4)$$

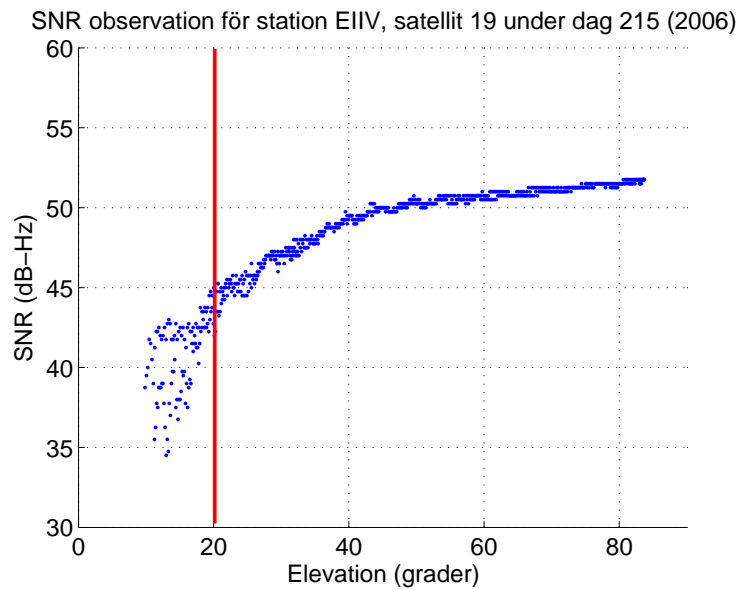
Ekvationen illustreras med SNR-data från en satellitobservation i figur 11, där skillnaden mellan datan och minsta kvadratanpassningen från figur 10



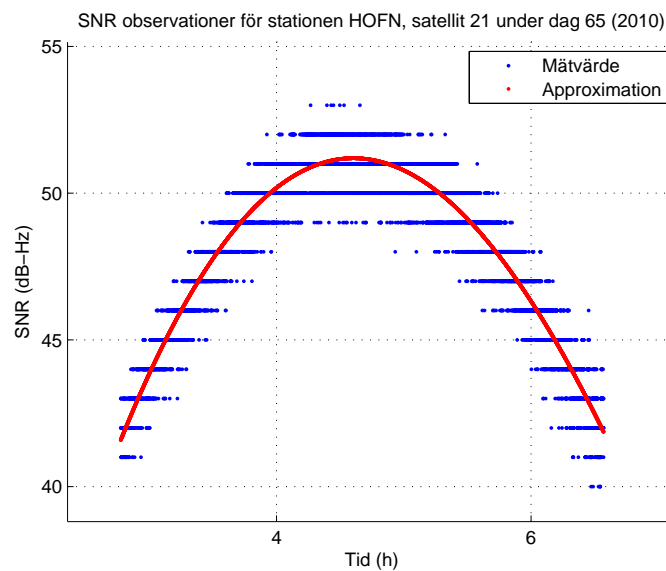
Figur 7: SNR-data som funktion av tiden för GNSS-stationen EIIV i staden Catania, Italien. Ett typiskt exempel på hur SNR-data ser ut under en satellits färd över himlen. SNR följer en parabollik funktion.



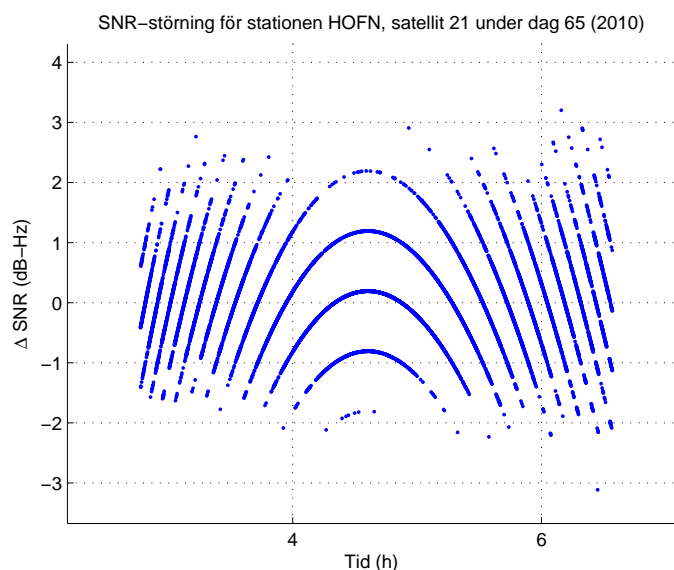
Figur 8: Detta diagram visar hur en typisk modern geodetisk GNSS-antenn, Leica AR25, varierar sin förstärkning i förhållande till elevationsvinkel. X-axeln visar vinkel från zenit (0° rakt ovan antennen). 90° är således horisonten och 180° rakt bakom antennen. Y-axeln visar antennens förstärkning. Förstärkningen är som störst vid höga elevationer och blir lägre vid låga elevationer, detta för att reducera flervägsreflektioner [45].



Figur 9: Här ses ett exempel på hur SNR förhåller sig till elevationsvinkeln. Värt att notera är att SNR ökar med elevationen samt att oscillationer från markreflektioner och störningar syns vid låga elevationer. För att utesluta markreflektionerna ignoreras SNR-data vid elevationer mindre än 20° .



Figur 10: Visar en observation av SNR-data och en anpassning av data till en parabelfunktion med hjälp av minsta kvadratmetoden som finner en lösning med så lite fel som möjligt.



Figur 11: Figuren visar hur mycket de faktiska mätvärdena skiljer sig från den anpassade funktionen av mätningen i figur 10. Under denna observationsdag sker det inga speciella händelser.

visas.

För att upptäcka abnormaliteter sattes toleransen så att ekvationen

$$P(|\Delta SNR| < 3\sigma) = 99,8 \% \quad (5)$$

uppfylls, där P är sannolikheten för att finna felet inom intervallet, σ standardavvikelsen av normalfördelningen för mätningen av ΔSNR under en normal dag. Detta innebär att, i teorin, borde endast 0,2% av all SNR-data som inte har passerat genom ett askmoln ge falsklarm. Det vill säga två falsklarm på 1000 dagar, vilket motsvarar ett ungefärligt snitt på två falsklarm under en tre år. Toleransnivån sattes enligt $|\Delta SNR| \leq 3\sigma$ och då σ låg runt 0,50-1,33 dB beräknades toleransnivån till ungefär 1,5-4 dB. Standardavvikelsen beror på vilken station man observerar och måste därför undersökas för varje station. Eftersom SNR-data inte har hög prioritet, har stationerna ofta olika precision av just SNR vilket påverkar valet av toleransnivå. Av de i denna rapport observerade GNSS-stationerna har samtliga en precision på 0,25 dB förutom HOFN som har 1 dB. Detta innebär att toleransnivån för HOFN sattes till 4 dB och toleransnivån för de andra sattes till ≈ 2 dB.

Vid stora störningar under längre tidsperioder blir anpassningsmetoden mindre exakt då den förutsätter en relativt liten störning så att datan fortfarande är parabellik. Den anpassade funktionen blir allt mer felaktig vilket

försvårar detekteringen. I vissa fall ses kurvorna få alltmer godtyckliga former vilket gör polynomanpassningen svårare.

3.2 Positionsbestämning av askmoln

Den information som erhålles av SNR-data, för en viss satellit och tidpunkt, som uppvisar askmolnsstörningar är begränsad. Slutsatsen som kan dras är att ett askmoln funnits någonstans på den linje som GNSS-signalen färdats längs, under sin färd mot mottagaren. Denna information, ensam, säger ingenting om askmolnets utbredning, höjd eller färdriktning. För att kunna uttala sig om detta behöver data från flera satelliter och mottagare kombineras. Om flera signaler visar askmolnsstörningar samtidigt i samma område, kan punkterna där signalerna korsar varandra observeras för noggrannare bestämning av askmolnets position.

Genom att vid en tidpunkt där någon störning detekterats hos en satellit betrakta alla satelliter med tillräckligt stor elevation ($> 20^\circ$) kan askmolnets utbredning avgränsas. Vid de horisontella koordinater där ingen störning finns kan askmolnets närvaro uteslutas och vid de koordinater där störningar detekterats, finns askmolnet. Genom att dessutom betrakta data från flera närliggande GNSS-stationer kan molnets utbredning avgöras.

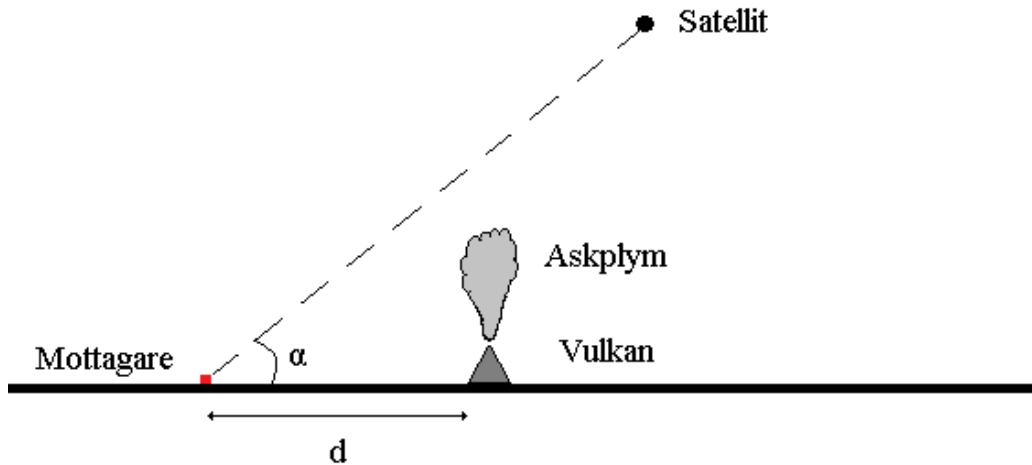
Om en GNSS-signal passerar rakt ovan en vulkan (det vill säga att satellitens azimut är samma som vulkanens, sett från mottagaren) är det teoretiskt möjligt att beräkna askplymens stigningshastighet, förutsatt att utbrottets starttidpunkt är känd. Med hjälp av trigonometri kan den höjd ovan vulkanen som signalen passerar vulkanen med erhållas. Se figur 12 för illustration av detta. Tidsskillnaden mellan utbrott och detektionsögonblick ger då den tid det tagit för askplymen att nå denna höjd. Stigningshastigheten erhålles av

$$v_{stig} = \frac{s_{höjd}}{t_{skillnad}}. \quad (6)$$

För att söka indikationer om ett askmolns färdriktning kan tidpunkterna för detektioner hos olika mottagare jämföras.

4 Detektering av askmoln

Syftet med denna rapport är att detektera vulkaniska askmoln genom att analysera störningar i SNR-data från GNSS-mottagare. För genomförandet av detta behöver verifiering av metodens funktionalitet göras, vilket sker genom jämförelse med andra källor. Eftersom positionen för satelliterna som sänd de störda signalerna är kända kan slutsatser dras angående askmolnets position.

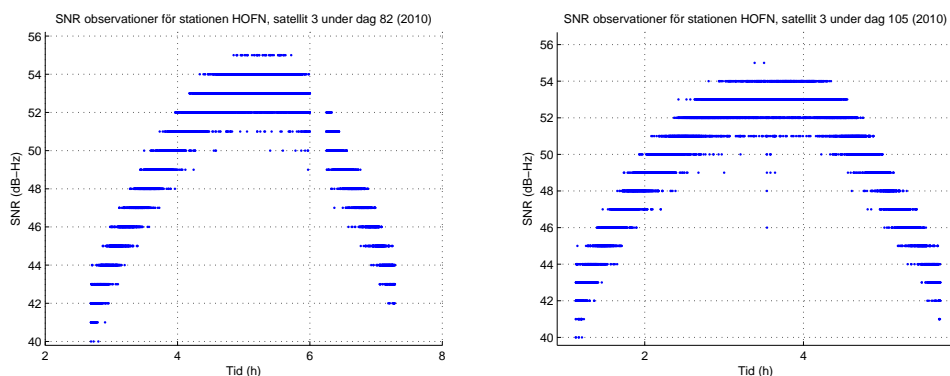


Figur 12: Då signalen från en satellit passerar rakt ovan en vulkan kan den höjd där askplymen passerar (och stör) signalen beräknas. Eftersom avståndet d mellan GNSS-mottagare och vulkan samt elevationsvinkeln α är kända ges höjden av $d \tan \alpha$

4.1 Eyjafjallajökull

Vid undersökningen av askmolnet från Eyjafjallajökull betraktades data från GNSS-stationen HOFN. Askan blåste österut, in över Europa [35], därmed passerade inte den större delen av molnet nära stationen då den ligger i kanten av det området som täcktes av askmolnet [35]. HOFN sparar SNR-data med en samplingsfrekvens på en mätning per sekund, vilket är den högsta som funnits att tillgå i detta arbetes mätningar. Detta gav en något ökad precision i tidsbestämningen för detektionsögonblicket och ökade sannolikheten för detektion av temporära störningar.

Vid analys av SNR-datan, se kapitel 3.1.2, från HOFN hittades störningar den 15:e och 23:e april 2010 (dag 105 och 113) i observationer från en satellit. En jämförelse mellan en normal dag den 25:e mars samma år (dag 84), utan några störningar, och en dag då askmoln befann sig vid stationen den 15:e april (dag 105) kan ses i figur 13a (referensobservation) och 13b (askmolnsobservation). En tydlig störning syns kl. 03:40 i SNR-observationerna från satellit 3, se figur 13b. Vid samma tidpunkt är det tydligt från information [46] från London Volcanic Ash Advisory Centres (VAAC) [47], den organisation som ansvarar för att utfärda varningar om askmoln i atmosfären i området, att askan som befann sig nära HOFN-stationen gav ett tydligt



(a) SNR-data den 25:e mars 2010 (dag 84) (b) SNR-data den 15:e april 2010 (dag 105)

Figur 13: SNR-data för den 25:e mars (a) och 15:e april (b) 2010 (dag 84 och 105) för stationen HOFN som är placerad nordöst om vulkanen Eyjafjallajökull på Island. I det senare fallet kan man skåda en tydlig störning ungefär där signalen är som starkast. Detta tyder på att ett askmoln mellan satellit och station stört signalen. Ungefär en månad tidigare kan ostörd SNR-data ses, vilket syns i figur (a).

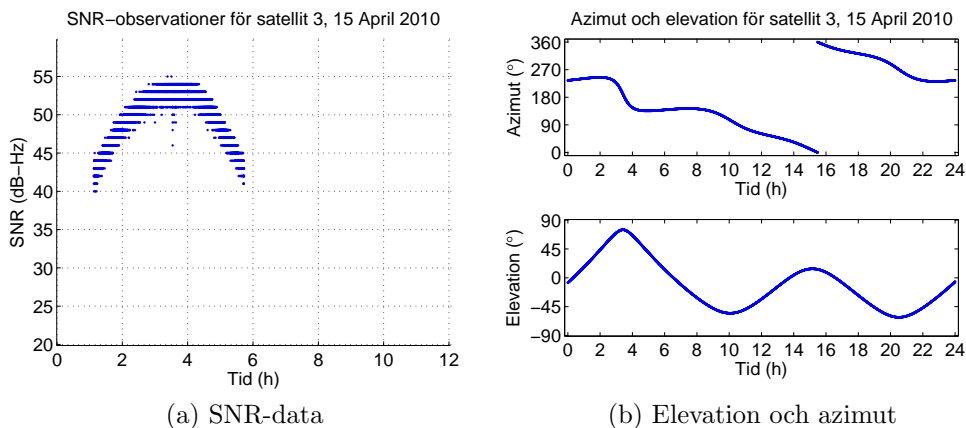
utslag i SNR-data.

Som ett exempel finns SNR-data och satellitens horisontella koordinater för 15:e april 2010 (dag 105) att beskåda i figur 14. Störningen detekterades vid $177,1^\circ$ azimuth, det vill säga i sydlig riktning. De andra satelliterna med en hög elevation vid denna tidpunkt har azimuth $62,6^\circ$, $64,0^\circ$, $120,6^\circ$, $138,3^\circ$, $249,6^\circ$ och $275,5^\circ$ det vill säga andra riktningar än söderut. Vid dessa vinklar detekterades alltså ingen askstörning vilket stämmer väl med London VAAC-informationen. I figur 15 kan vulkanen, stationen HOFN och den riktning där störningar detekterats ses.

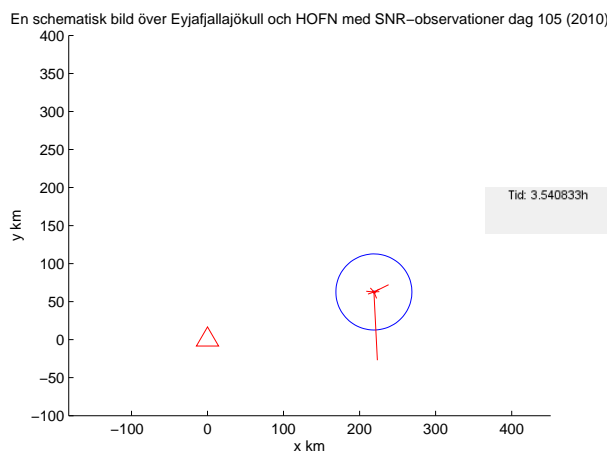
Att askmolnet skulle befinna sig över HOFN vid denna tidpunkt kan bekräftas av andra källor, till exempel Met Office [35]. Figur 16 illustrerar askmolnets position och höjd mellan kl. 00:00-05:59 (UTC) den 15:e april 2010 (dag 105) [35]. Höjden är angiven i flygnivå (FL, eng. **F**light **L**evel) som beror på trycket och det är bestämt att medeltrycket vid havsnivån är 101,32 kPa. Höjden anges i antalet hundra fot över havsnivån, t.ex. FL250 motsvarar 25000 fot (7,62 km) över medeltrycket vid havsnivån [48].

4.2 Etna

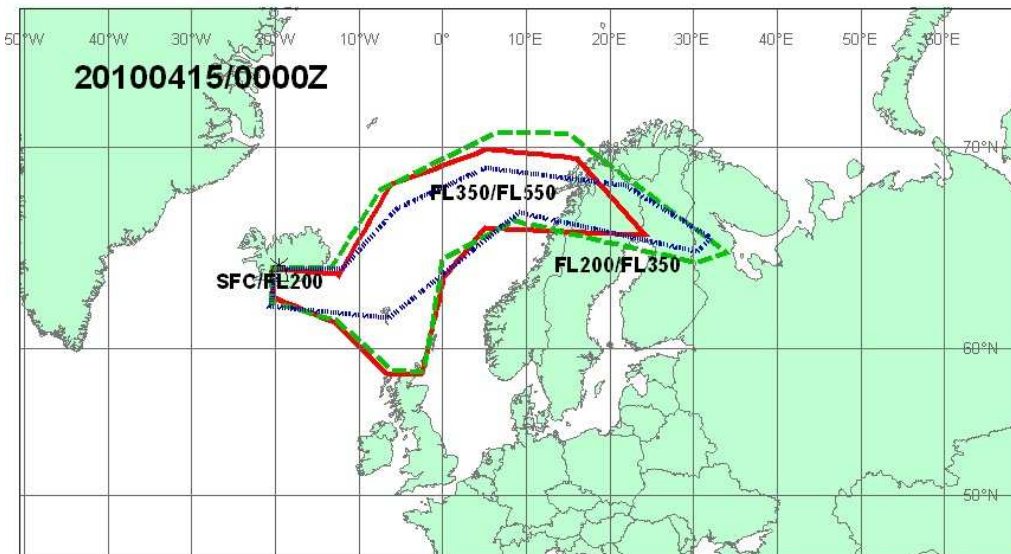
Vid Etnas utbrott 2006 studerades data från GNSS-stationen EIIV i Catania, cirka 28 kilometer från vulkanen. EIIV uppvisar störningar den 3:e augusti



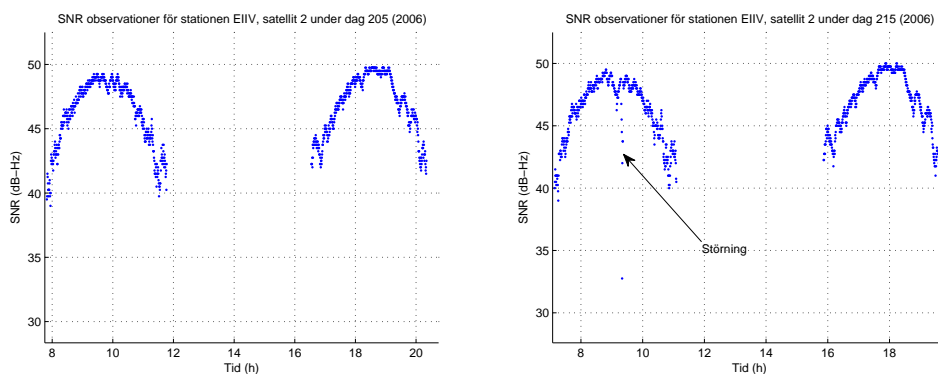
Figur 14: SNR observerat från stationen HOFN som funktion av tiden (a) samt elevation och azimutvinkel för satellit 3 den 15:e april 2010 (dag 105). En störning på SNR-data syns vid klockan 03:40. Vid denna tidpunkt är satellitens azimut $177,1^\circ$ och dess elevation $74,42^\circ$.



Figur 15: En schematisk bild över det geografiska läget för vulkanen Eyjafjallajökull och GNSS-stationen HOFN. Den röda triangeln representerar vulkanen och pricken representerar stationen. Linjerna utgående från stationen visar azimut för satelliterna som skickat signaler till stationen vid detta klockslag. Längden på linjerna är proportionella mot storleken på respektive signals störning. Störningen som HOFN detekterade den 15:e april, har en sydlig riktning (azimut $177,1^\circ$). Den blå ringen runt stationen representerar toleransnivån för vad som anses vara askstörningar i detektionsalgoritmen och är satt till 4 dB enligt sektion 3.1.2 om detektering av askmoln.



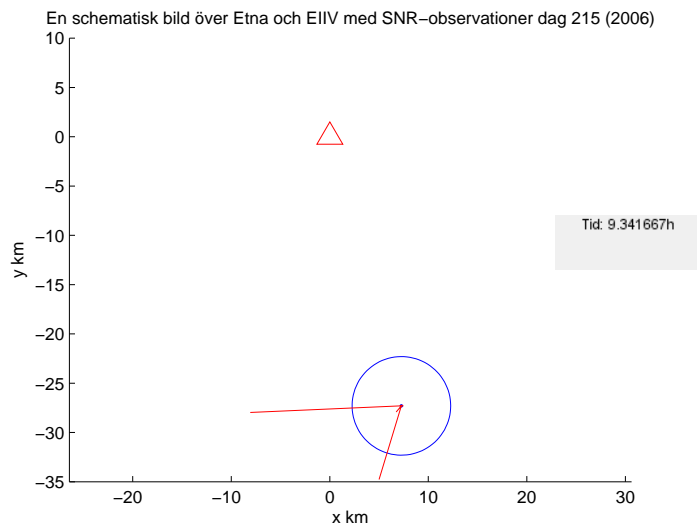
Figur 16: 15:e april 2010 (dag 105), askan sprider sig från vulkanutbrottet från Eyjafjallajökull över norra Europa från vulkanutbrottet. De olika färgerna kategoriserar vilken höjd som askmolnet befinner sig på med hjälp av flygnivå, röd: 0-6100 m, grön: 6100-10700 m, blå: 10700-16800 m. Originalbild från den 15:e april 2010 [35]. Contains public sector information licensed under the Open Government Licence v1.0.



(a) EIIV:SNR-data för den 24:e juli 2006 (dag 205) (b) EIIV:SNR-data för den 3:e augusti 2006 (dag 215)

Figur 17: Visar skilladen i SNR-data för två olika dagar för stationen EIIV som är placerad söder om vulkanen Etna på Sicilien. (a) innehåller en dag utan störningar i SNR-data. (b) En annan dag när vulkanen Etna hade ett utbrott. Under denna dag detekteras störningar i SNR-data.

2006 (dag 215) kl. 09:21 (UTC) på två satelliter. I figur 17 syns en jämförelse mellan en normal dag störningen för den ena satelliten. Samplingsfrekvensen för EIIV var två mätningar per minut. I figur 18 ses riktningen för de två satelliterna vid detektionerna, i förhållande till EIIV och Etna. Bland de satelliter med tillräckligt hög elevation är det endast dessa två, som befinner sig väster och sydväst om EIIV, som givit utslag. Detta antyder att askmolnet har rört sig väster om EIIV. Vindriktning stämmer överens med arkiverad väderdata som härstammar Catanias flygplats [38], som säger att vinden var riktad åt sydväst. Detta stämmer med riktningen på de observerade SNR-störningarna. Stationen MALT visar inga störningar i SNR-data under denna dagen som indikerar att aska skulle vara närvarande. Det beror på att vinden inte haft rätt riktning för att stationen ska haft möjlighet att detektera askmolnet [38].



Figur 18: Illustrerar riktningen och storleken på de SNR-störningar som finns för signaler som mottagits av EIIV-stationen, den 3 augusti 2006 (dag 215), då Etna hade ett utbrott. Linjerna utgående från GNSS-mottagaren svarar för riktningen och den relativa storleken på störningarna. Cirkeln är den relativa toleransnivå för algoritmen som har valts för att definera en askmolnsstörning (i detta fall valt till 2 dB).

4.2.1 Askmolnets höjd

Då flera satelliter ger utslag samtidigt är det möjligt att använda deras horisontella koordinater för att räkna på askmolnets utbredning. Vid observation

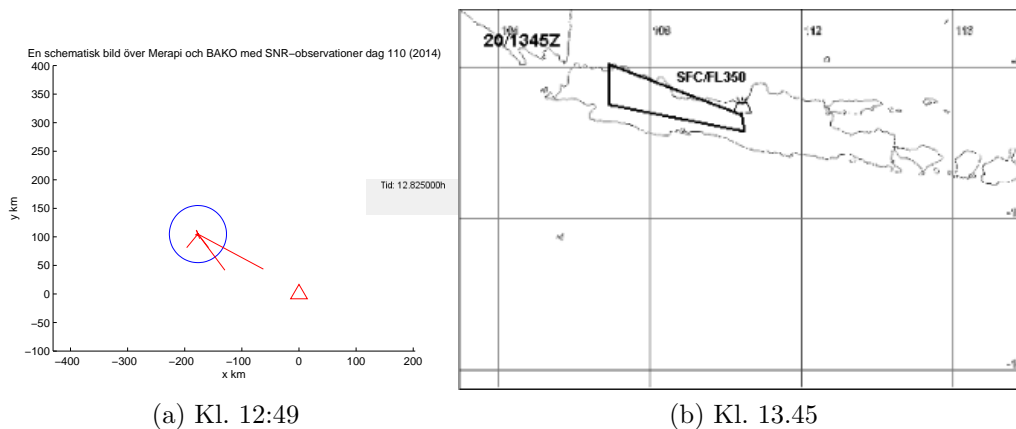
Tabell 1: Data tagen ur mättillfället som illustreras i figur 18 vilket är vid kl. 09:21 (UTC) den 3:e augusti 2006 (dag 215) för stationen EIIV som är belägen i staden Catania på Sicilien. Stationen befinner sig cirka 28 km i sydöstlig riktning från vulkanen Etna. Beräkningarna för avståndet mellan stationen och askmolnet samt askmolnets höjd sker under antagandet att askmolnet utbereder sig i sydvästlig riktning [38]. Signalerna från satelliterna 4, 8, 13 och 27 har inte tillräckligt stor störning för att överstiga toleransnivån på 2 dB. Därför finns det ingen beräkning för sträckan till askmolnet eller dess höjd för dem.

Satellit	$ \Delta SNR $ [dB-Hz]	Azimut [°]	Elevation [°]	Sträcka till askmoln [km]	Askmolnets höjd [km]
2	6,18	267,5	37,8	10,1	6,2
4	0,33	220,7	35,2		
8	0,15	211,8	57,7		
13	0,05	54,4	46,5		
24	3,12	196,9	24,6	39,1	16,3
27	0,09	88,5	87,4		

av data från EIIV den 3:e augusti 2006 (dag 215) hittades sådana utslag, se figur 18. Vinden var vid detta tillfälle nordöstlig [38] och om ett antagande görs att askmolnet följde vindriktningen kan en höjdberäkning göras. Informationen om satelliternas positioner och mottagarens position användes för att beräkna azimut och elevation för observationerna. Dessa vinklar användes sedan för att beräkna det detekterande askmolnets position. Beräkningarna gav att askmolnet befann sig på 6,2 km höjd och på avståndet 10,1 km från EIIV i riktning mot satellit 2, för satellit 24 beräknades att höjden var 16,3 km och avståndet 39,1 km från EIIV. Ytterligare resultat från samma beräkning kan ses i tabell 1. Om askmolnet antas vara sammanhängande kan slutsatsen dras att det åtminstone utbreder sig mellan dessa två punkter. Det finns två satelliter som inte detekterar askmoln, vars azimut, $211,8^\circ$ och $220,7^\circ$, är mellan de två azimut där aska detekteras. Observationerna ger information om att askmolnet befinner sig mellan dessa satelliters elevation, under elevationen $57,7^\circ$ för azimut $211,8^\circ$ och över elevationsvinkeln $35,2^\circ$ för azimut $220,7^\circ$.

4.3 Indonesien

Ett antal vulkaner i Indonesien har utsöndrat aska i atmosfären under 2014 [49]. De mest aktiva har varit vulkanerna Merapi, Kelut och Sinabung. Genomsökning av SNR-data från olika stationer i området visar ett stort antal

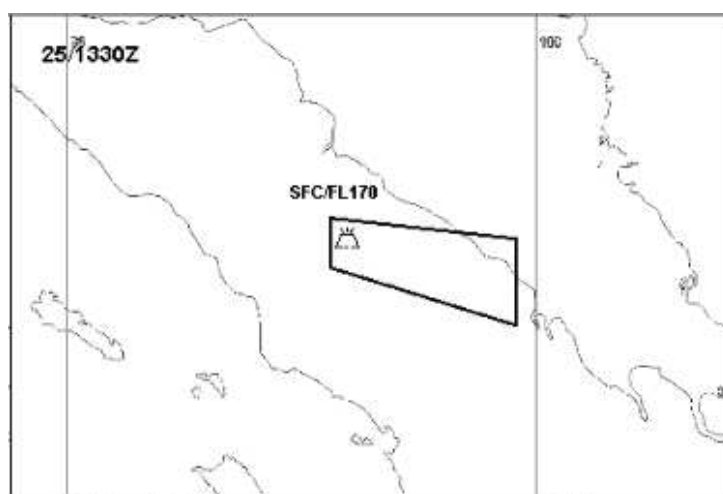


Figur 19: Askmoln och detektioner från den 20:e april 2014 i området nära vulkanen Merapi. I (a) syns askmolnets utbredning baserat på satellitbilder från Darwin VAAC och i (b) syns riktning och storlek för SNR-störningar på signaler som mottogs av BAKO-stationen (pricken) den 20:e april 2014 (dag 110) kl. 12:49. Vulkanen Merapi representeras av den röda triangeln. Cirkeln är den relativa toleransnivå som valts för vad som räknas som en askmolnsstörning (i detta fall valt till 1,5 dB).

störningar på en mängd olika dagar. Ett exempel på detta är den 20:e april 2014 (dag 110), där störningar från flera satellitsignaler kan ses på stationen BAKO, se 19a för exempel. Detta stämmer väl med information från Darwin Volcanic Ash Advisory Centre, organisationen ansvarig för att utfärda varningar för flygtrafiken i området, som bekräftar (från satellitbilder) att vulkanen Merapi, belägen öster om BAKO, utsände aska i riktning mot stationen, se figur 19b [49].

Ett exempel på hur ett askmolns utbredning har kunnat följas med SNR-störningsmätningar följer här. Vulkanen Sinabung hade ett utbrott den 25:e januari 2014 och utsöndrade aska i sydostlig riktning, se figur 20. Den svarta linjen i figuren visar det område som vid denna tidpunkt uppskattats innehålla askmoln enligt Darwin VAAC. Askmolnet var delvis täckt av ett molntäcke och man fick stundvis förlita sig på modeller baserade på vindriktning för att förutsäga vart askan borde befinna sig [50].

Två GNSS-mottagare (NTUS och BAKO) befann sig i askmolnets riktning och i figurerna 21a, 21b och 21c ses azimuth för de satellitsignaler som uppvisat SNR-störningar vid olika tider. En trend gick att urskilja i data där det till en början huvudsakligen syns störningar till väster om NTUS och mellan NTUS och BAKO (det vill säga mellan -200 km och unit[-600]km i y-led i figuren). När tiden går börjar störningar synas i alla riktningar runt



Figur 20: En karta över området i närheten av vulkanen Sinabung kl. 13:30 den 25:e januari 2014 (dag 25). Den svarta linjen visar det område som vid denna tidpunkt uppskattats innehålla askmoln enligt Darwin Volcanic Ash Advisory Centre, organisationen ansvarig för att utfärda varningar för flygtrafiken i området. Det pågående utbrottet observerades med kameror i närheten av vulkanen, men ett molntäcke skymde sikten för satellitbilder. I bilden ses uppskattningen på utbredningsriktningen baserat på vinddata [50]. Originalbild från [50].

BAKO, vilket antyder att askmolnet rört sig söder ut. Värt att notera här är att störningar på PBRI och PBR2 (stationerna långt norr om Sinabung) uppvisar störningar senare under dygnet. Med tanke på vindriktning kan dessa störningar ej komma från Sinabung utan kommer troligen från ett annat utbrott. Samtliga använda GNSS-stationer i Indonesien hade en samplingsfrekvens på två mätningar per minut.

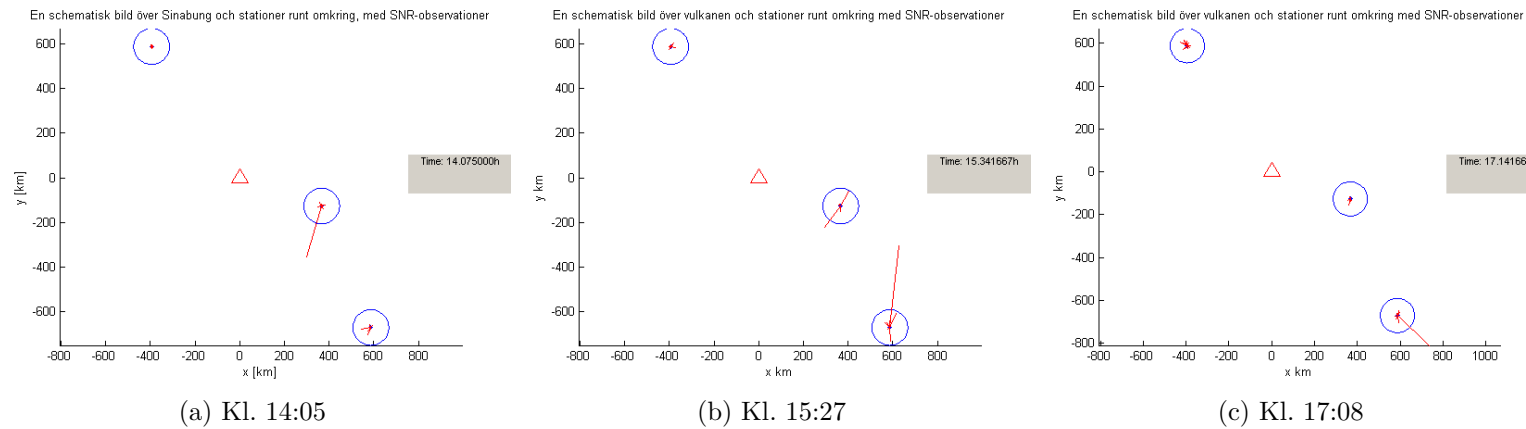
I tabell 2 ses en sammanställning av de detektioner som gjordes under timmarna kl. 12:00-18:00 (UTC) den 25:e januari 2014 (dag 25) för stationerna BAKO, NTUS, PBRI och PBR2. Vi kan se att varje station visar sina största detektioner vid ungefär samma riktning, vilket antyder att askmolnet passerat stationen i denna riktning. Ett högre medelvärde tyder på större störningar och troligen mer aska. Bara de satellit-stations-par som har fler än 10 detektioner över toleransnivån 1,5 dB-Hz mellan kl. 12:00-18:00 visas i tabellen.

5 Diskussion

Det finns mycket som talar för att analys av SNR-data fungerar som askdetektionsmetod. De störningar som härstammar från askmoln har ett utseende som enkelt kan urskiljas från normala väderförändringar. Genom kombination av data från flera satelliter och mottagare kan information erhållas om var askmolnen befinner sig. Tekniken fungerar lika bra även vid molniga förhållanden och på natten, där sikten kan vara skymd för satellitbilder. Metoden bör kunna fungera som ett komplement till de tekniker som idag används för identifiering och observation av askmoln.

Ett återkommande problem vid nyttjandet av denna teknik är att långt ifrån alla GNSS-stationer sparar SNR-data. Askmoln passerar ofta områden där ett stort antal stationer finns, som ej kan utnyttjas i detektionssyfte på grund av detta. Både i observationerna av askmolnen från Eyjafjallajökull och Etna hittades endast enstaka stationer som funnits på rätt platser och sparat SNR-data. I projektets inledande skede antogs att det enkelt skulle kunna hittas mycket data från många olika stationer men det upptäcktes snart att de flesta GNSS-stationer ej sparar SNR. Det skulle vara enkelt att ställa in stationerna att göra detta, vilket kraftigt skulle förbättra möjligheterna till detektioner.

Om de stationer som sparar SNR-data skulle göra det med en högre SNR-upplösning, skulle detta ge data med större exakthet, som i sin tur skulle ge en mer exakt toleransnivå. Detta går att observera om man jämför hur toleransnivåerna för HOFN och EIIV påverkas av upplösningen av SNR-data, för HOFN var toleransnivån $|\Delta SNR| = 4$ dB-Hz till skillnad mot EIIV som



Figur 21: SNR-detektationer för området kring vulkanen Sinabung under den 25:e januari 2014. Figur (a), (b) och (c) visar störningar vid tidpunkterna 14:05, 15:27 respektive 17:08 (UTC) och används för att illustrera den trend i data som antyder hur askmolnet utbreder sig under denna tidsperiod. Triangeln visar positionen för Sinabung och punkterna visar mottagarpositionerna. Riktningen på de röda linjerna pekar mot de olika satelliterna. Längden på linjerna är proportionella mot storleken på störningarna. De blå cirklarna runt stationerna är den gräns som dragits för vad programmet ska detektera som en askdetektion, i detta fall 2 dB. Varje linje som är längre än en cirkelradie tolkas alltså som en askmolnsstörning. Trenden som kan urskiljas antyder att askmolnet rör sig söder ut. Bilderna som visas skall ses som stillbilder ur en film, där denna trend kan ses med tidsutvecklingen.

Tabell 2: Tabellen visar data under timmarna kl. 12:00-18:00 (UTC) den 25:e januari (dag 25) år 2014 för stationerna BAKO, NTUS, PBRI och PBR2. Endast de som har fler än 10 detektioner under den observerade tiden visas i tabellen. Medelvärdet som visas i tabellen är beräknat enbart från amplituden SNR-störningen som är större än toleransnivån, vilket innebär att allt under toleransen ignoreras. Azimut och elevation är tagna vid tidpunkten då störningen är som störst. Värt att notera är att GLONASS-satelliterna har satellitnummer 33-56.

Station	Satellit	Antal detektioner	Största störning(dB-Hz)	Medelvärde(dB-Hz)	Azimut(°)	Elevation(°)
BAKO						
	3	13	9,21	3,67	6,2	43,7
	6	13	3,11	2,10	24,2	32,6
	19	12	2,63	2,06	0,3	62,4
	32	25	5,10	2,45	132,9	20,9
	34	18	6,15	2,99	299,9	28,0
	53	14	3,52	2,15	89,8	25,0
NTUS						
	1	11	6,23	3,58	186,8	35,3
	11	25	6,67	2,93	200,4	30,7
	20	20	4,13	2,50	219,8	30,6
	32	33	11,75	3,53	166,3	27,7
	33	13	2,69	2,05	202,6	38,4
PBRI						
	13	10	2,59	1,95	119,8	33,9
	20	30	3,23	2,18	145,3	38,0
	44	13	2,66	2,12	86,9	37,2
	54	23	5,76	2,70	137,1	39,4
PBR2						
	1	18	6,63	2,84	192,1	30,2
	11	17	6,44	2,97	206,5	24,7
	20	64	9,37	3,58	179,8	31,9
	23	16	7,45	3,06	177,0	36,7
	32	15	3,21	2,25	185,3	34,8
	33	10	6,35	2,41	188,8	28,6
	34	11	9,56	4,28	208,6	23,3
	54	19	5,81	2,24	140,9	37,8
	55	15	3,71	2,13	177,2	34,6

hade $|\Delta SNR| = 2$ dB-Hz.

Vid mätningarna för HOFN i samband med utbrottet för Eyjafjallajökull år 2010 användes data med samplingsfrekvens på 1 Hz. Det visade sig finnas ett antal fördelar med detta. En högre samplingsfrekvens ger större noggrannhet när det kommer till att urskilja när askmolnet börjar och slutar störa signalen. Detta är användbart när man ska beräkna stighastigheter och utbredning, men det förbrukar mer minne vid lagring av informationen och gör genomsökningen av data mer tidskrävande.

En nackdel med observation av SNR-data för askmolnsdetektionssyfte, jämfört med exempelvis radar, är att den ej kan söka av himlen (eng. scanning) för att leta upp askmoln. Det finns en möjlighet att satelliterna inte har rätt position i förhållande till mottagaren så att signalen ej går igenom askmolnet. Detta problem kan minimeras genom att öka antalet mottagare på marken och antalet GNSS-satelliter i omlopp. Eftersom en geodetisk GNSS-mottagare av tillräckligt hög kvalitet både är betydligt billigare och mer portabel än motsvarande radarutrustning [13] är det relativt enkelt att förbättra GNSS-metodens detektionsmöjligheter.

Ett nära relaterat problem med att använda GNSS-stationer för detektion av askmoln är att det inte finns stationer i haven. Såvida stationer ej utplaceras där är tekniken alltså begränsad till att följa askan över land. Flera områden i världen som har vulkanisk aktivitet ligger nära kustområden. Island är beläget i den nordöstra delen av Atlanten, långt ifrån resten av Europa. På denna sträcka kan aska färdas långt innan den ens passerar i närheten av en GNSS-station. Både EU och Kina har egna GNSS-system under utveckling och uppbyggnad vilket leder till att det i framtiden kommer finnas totalt fyra GNSS-system med sammanlagt över 100 satelliter [13]. Detta kommer ge en betydligt bättre förmåga att detektera och följa askmolns rörelser.

En brist i de detektionsprogram som skrivits under projektets gång är att de ej kan upptäcka störningar i realtid. Den kurva som SNR-data bildar med tiden anpassas till och jämförs med en parabel. Ett antal timmar måste därför passera innan programmen kan ge utslag. Ett sätt att förbättra detta skulle kanske vara att anpassa data efter andra funktioner än parabeln, som inte behöver täcka all data från en satellits passage över himlen. Detta skulle då möjliggöra mindre fördröjd analys.

En annan förbättring kan vara att jämföra insamlad data i realtid med data från en tidigare dag, snarare än att endast se på en dag i taget. För att genomföra detta med GPS-satelliterna behöver dock hänsyn tas till hur satelliternas position förskjuts över himlen, dag för dag. För GLONASS-satelliterna måste data från olika satelliter då jämföras, eftersom de övertar varandras positioner med tiden. Problemet med att jämföra en dag mot en

annan är att många andra irregulariteter än askmolnsstörningar skulle kunna ge utslag. Det saknas till exempel ofta data för flera epoker under en dag, vilket skulle kunna påverka mätningarna.

Enligt vissa källor [37] finns det resultat som visar fotografier tagna från marken och IR-bilder från satelliter som säger att askmolnet har varit placerat över Catania (staden där EIIV befinner sig) hösten år 2006. För dessa datum finns det inga detektioner i SNR-mätningar som överstiger den tolerans som har använts för EIIV vid andra mätningar. Anledningen till varför inga detektioner gjorts med SNR-analys skulle kunna vara att GNSS-signalen ej påverkats då den genomgått askmolnet, att molnet var för tunnt och inte störde signalen tillräckligt mycket för att nå över den bestämda toleransnivån på 2 dB-Hz. Att resultaten inte stämmer överens skulle även kunna bero på att satelliterna ej haft rätt positioner vid rätt tidpunkt för att signalen ska passera genom askmolnet och störas.

I framtida studier skulle dessa potentiella realtidsmätningstekniker kunna utforskas. En annan aspekt av SNR-analys som kan undersökas mer ingående är hur storleken på störningarna är relaterade till askmolnets egenskaper. Om en tydlig korrelation kan ses mellan störningsstorleken och askmolnets tjocklek eller uppbyggnad, skulle informationen från mätningarna bli mer innehållrik.

I metodsektionen beskrivs en teknik för beräkning av höjden på ett askmoln. Denna har ej kunnat utnyttjas i praktiken i denna rapport då ingen av de data som undersökts uppfyllt de kriterier som tekniken kräver. För höjdberäkningen behöver GNSS-stationer finnas relativt nära en vulkan så att en signal kan nå mottagaren genom att passera askplymen rakt över vulkanen. Den begränsande faktorn är här, liksom i många andra fall av resultatanalysen, att data från för få stationer finns att tillgå.

6 Slutsats

I denna rapport har tekniken att observera vulkaniska askmoln i atmosfären med hjälp av SNR-data från GNSS-stationer undersökts. Metoden har bekräftats fungera genom att studera askmoln från vulkaner i tre områden: Island, Sicilien och Indonesien. Tidpunkten och riktningen för de observerade detektionerna för Eyjafjallajökulls utbrott i april 2010 kunde bekräftas av information från London VAAC, som figur 16 illustrerar. I Indonesien (som studerades jan-feb, april 2014) fanns aska i atmosfären från flera relativt samtidiga utbrott från olika vulkaner. Ett stort antal askmolnsdetektioner kunde således observeras. Genom kombination av data från flera satelliter och mottagare kunde information erhållas om vart askmolnen befunnit sig. Eftersom

tekniken fungerar lika bra även vid molniga förhållanden och på natten, där sikten kan vara skymd för satellitbilder, finns goda möjligheter för observation av SNR-data från GNSS-stationer att fungera som komplement till nuvarande detektionstekniker.

En fördel med GNSS-observationer är dess möjligheter att kontinuerligt övervaka ett område under en längre tidsperiod. Andra satellitsystem som används för askmolnsobservationer är ej lika omfattande som GNSS och kan inte övervaka hela jorden samtidigt. Med fler GNSS-stationer som sparar SNR-data i jordens vulkaniskt aktiva områden skulle goda möjligheter finnas att uppskatta askmolns position, höjd och storlek.

För detektion av askmolnen utvecklades program som minstakvadratanpassar fjärdegradspolynom till den paraboliska SNR-data. Genom att studera skillnaden mellan anpassningen och data kunde anomalier hittas som motsvarade störningar. Om avvikelser från anpassningen för en dags data överskred tre standardavvikelse ansågs störningen härstamma från askmolnsstörningar. De detektioner som då gjordes kunde verifierades av andra källor. Ett exempel på detta är de detektioner som gjordes av stationen BAKO den 20:e april 2014 där ett stort antal störningar detekterades, som stämde med information från Darwin VAAC angående askmoln från Merapi.

En stor förbättringspotential för tekniken finns eftersom ett större antal GNSS-mottagare som sparar SNR-data kraftigt skulle förbättra detektionsmöjligheterna. Då dessa stationer är förhållandevis billiga, jämfört med exempelvis utökning av radardetektionsmetoder, finns möjligheten att expandera GNSS-nätverkens omfattning. Dessutom finns stora antal GNSS-mottagare som ej lagrar SNR-data. Att ställa in alla stationer som redan finns till att spara SNR -data skulle innebära att betydligt fler askmolnsdetektioner vore möjliga.

Analys av SNR-data från GNSS-stationer fungerar att använda i askmolnsdetektionssyfte och skulle kunna spela en roll i framtida studier av vulkanisk aska i atmosfären.

A Filformatet RINEX

De data från GNSS-mottagarna som analyserats i denna rapport är sparade i det så kallade RINEX-formatet (eng. **R**eceiver **I**ndependent **E**xchange **F**ormat). I RINEX-filerna finns en mängd olika typer av information sparade, bland annat positionsbestämningsdatan och SNR. Vilken information som har valts att sparas av den ansvariga myndigheten eller organisationen beskrivs i Header-avsnittet av varje RINEX-fil. Även mottagarens position, hur hög antennen är och samplingsfrekvensen anges i Header-avsnittet[51].

Dessa RINEX-filer kan bli mycket stora och kräver mycket minne för att lagras. För att minimera filernas storlek så är de komprimerade med den så kallade Hatanaka-kompressionen, utvecklad av Yuki Hatanaka [52]. De RINEX-filer som är Hatanaka-komprimerade indikeras med ett "d" som sista bokstaven i filnamnet.

Varje RINEX-fil är namngiven efter strukturen *NAMNddd0.ÅÅo* där *NAMN* är benämningen på stationen exempelvis HOFN, EIIV eller BAKO. Varje observation är indelad efter dagar på året, det vill sägas att det skapas 365 eller 366 (vid skottår) stycken RINEX-filer per år. Därför är det mer naturligt och smidigt och markera filerna med dagen på året exempelvis skulle 1:a feb bli dag 032 och motsvarar *ddd* i filnamnet. Markeringen *0* indikerar om observationen täcker hela dagen eller om det är enstaka timme till exempel för 00:00-00:59 får markeringen *a*, 01:00-01:59 *b* o.s.v. *ÅÅ* visar vilket år observationen gjordes och är de två sista siffervärdena på året till exempel blir år 2014 bara 14. Slutligen markeras filen antingen med *o* eller *d* för visa om de är komprimerade eller inte enligt Hatanaka-komprimeringen[51]. Som ett exempel skulle filnamnet för stationen HOFN på Island den 19:e maj 2014 (dag 139) (heldagsobservation) med komprimering bli HOFN1390.14d.

Bibliografi

- [1] "Moln av aska efter vulkanutbrottet på Island 2010," *Krisinformation*, 2 augusti 2012 [Online]
Tillgänglig: http://www.krisinformation.se/web/Pages/SubStartPage___72941.aspx [Hämtad: 17 maj 2014].
- [2] Gislason, S.R., Alfredsson, H.A., Eiriksdonpttir, E.S., Hassenkam, T. & Stipp, S.L.S. "Volcanic ash from the 2010 Eyjafjallajokull eruption," *Applied Geochemistry*, vol. 26, ss. S188-S190, jun. 2011.
- [3] S. Nolan, "Volcanic Ash Forces British Airways Flight 9 To Land," *AvStop*, 2014, [Online]
Tillgänglig: http://avstop.com/news/Volcanic_Ash_Forces_British_Airways_Flight_9_To_Land.htm [Hämtad: 15 mars 2014].
- [4] P. Armstrong "Explainer: Why ash cloud endangers aircraft," *CNN*, 16 april 2010, [Online]
Tillgänglig: <http://edition.cnn.com/2010/TRAVEL/04/15/volcanic.ash.aviation.explainer/index.html?hpt=T1> [Hämtad: 3 maj 2014].
- [5] BBC "When volcanic ash stopped a Jumbo at 37,000ft," *BBC*, 15 april 2010, [Online]
Tillgänglig: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/magazine/8622099.stm [Hämtad: 17 mars 2014].
- [6] The Weather Channel, "Weather Glossary D," *The Weather Channel*, 2014, [Online]
Tillgänglig: <http://www.weather.com/glossary/d.html> [Hämtad: 13 maj 2014].
- [7] F. Donnadieu, "Volcanological Applications of Doppler Radars: A Review and Examples from a Transportable Pulse Radar in L-Band," *Doppler Radar Observations: Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, J. Bech & J. L. Chau, Red. Rijeka, Kroatien; InTech Europa, 2012, ss. 409-446.
- [8] Z.J. Przedpelski & M.E. Musolf, "Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety," *U.S. GEOLOGICAL SURVEY & U.S. Department of the Interior*, Washington, USA, U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 2047, ss. 147-149 & 387-390 , 1994.

- [9] NASA, "The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO)," *NASA*, 13 maj 2014. [Online]. Tillgänglig: <http://www-calipso.larc.nasa.gov/> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [10] Space Today Online, "CALIPSO: Aerosols in the Atmosphere," *Space Today*, 2014, [Online] Tillgänglig: <http://www.spacetoday.org/Satellites/TerraAqua/CALIPSOstory.html> [Hämtad: 10 maj 2014].
- [11] NASA, "A-TRAIN CONSTELLATION," *NASA*, 1 november 2012. [Online]. Tillgänglig: <http://www-calipso.larc.nasa.gov/about/atrain.php> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [12] Met Office, "Volcanic eruption detection system," *Met Office*, 22 januari 2013, [Online]
Tillgänglig: <http://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/eruption-detection> [Hämtad: 10 maj 2014].
- [13] K.M. Larson "A new way to detect volcanic plumes," *Geophysical research letters*, vol. 40, ss. 2657–2660. 2013.
- [14] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza & M. Hernández-Pajares, "Tropospheric Delay," *Navipedia*, 2011. [Online].
Tillgänglig: http://www.navipedia.net/index.php/Tropospheric_Delay [Hämtad: 8 maj 2014].
- [15] EUREF Permanent Network, "EUREF Permanent Network," *EUREF Permanent Network* Tillgänglig: <http://www.epncb.oma.be/>[Hämtad: 14 maj 2014].
- [16] Geoscience Australia, "Earth Monitoring and Reference Systems," *Geoscience Australia*, 8 maj 2013, [Online]. Tillgänglig: <http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/gnss-networks.html> [Hämtad: 14 maj 2014].
- [17] SGU, "Vulkanisk aktivitet," *Sveriges geologiska undersökning*, 5 maj 2014, [Online]
Tillgänglig: <http://www.sgu.se/sgu/sv/geologi/tektonik/vulkan.html> [Hämtad: 5 maj 2014].
- [18] NRM, "Vulkaner och vulkanism," *Naturhistoriska riksmuseet*, 22 oktober 2013, [Online]
Tillgänglig: <http://www.nrm.se/faktaomnaturenochrymden/geologi/vulkanerochjordbavningar/vulkanerochvulkanism.1070.html> [Hämtad: 16 mars 2014].

- [19] H.U. Schmincke, *Volcanism*, New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, ss. 157.
- [20] U.S. Geological Survey, "Ash properties & dispersal by wind," *U.S. Geological Survey*, 3 februari 2009, [Online]
Tillgänglig: <http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html>
[Hämtad: 11 maj 2014].
- [21] K.P. Hoinka, "Temperature, Humidity, and Wind at the Global Tropopause," *Monthly Weather Review*, vol.127, nr.10, ss. 2248-2265, oktober 1999.
- [22] C. Clapham, J. Nicholson, *The Concise Oxford Dictionary of Mathematics*, 4 ed. Oxford University Press, 2009.
- [23] S. Dunlop, *A Dictionary of Weather*, 2 ed. Oxford University Press, 2008.
- [24] R. M. Alkan, H. Kamman & M. Sahin. "GPS, GALILEO and GLO-NASS Satellite Navigation Systems & GPS Modernization," *Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space*, Istanbul, Turkiet, 2005.
- [25] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, & J. Collins, *GPS Theory and Practice*, 5 ed., New York: Springer, 2001.
- [26] G. Blewitt, "Geodetic Applications of GPS:Basics of the GPS Technique: Observation Equations," Department of Geomatics, University of Newcastle, United Kingdom, 1997.
- [27] P. J. G. Teunissen, A. Kleusberg, *GPS for Geodesy*, 1 ed. Berlin: Springer, 1996 ss. 117.
- [28] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares, "Clock Modelling," *Navipedia*, 2011. [Online]. Tillgänglig: http://www.navipedia.net/index.php/Clock_Modelling. [Hämtad: 17 maj 2014].
- [29] J. Davis, T. Herring, I. I. Shapiro, A. Rogers, & G. Elgered, , "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length," *Radio Sci.*, vol. 20, nr 6, ss. 1593-1607. dec 1985.
- [30] S. Logsdon "GPS", *Encyclopædia Britannica Inc.*, 2014 [Online] Tillgänglig: <http://www.britannica.com.proxy.lib.chalmers.se/EBchecked/topic/235395/GPS> [Hämtad: 11 april 2014].

- [31] "NAVSTAR GPS USER EQUIPMENT INTRODUCTION" *U.S. COAST GUARD NAVIGATION CENTER*, 1996 [Online] Tillgänglig: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/gpsuser/gpsuser.pdf> [Hämtad: 19 april 2014].
- [32] A. Joseph, "Measuring GNSS Signal Strength," *Inside GNSS*, vol. 5, nr. 8, ss. 20-25, nov/dec 2010.
- [33] International GPS Service, "IGS Products," *IGS*, 2009. [Online]. Tillgänglig: <http://www.igs.org/components/prods.html> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [34] International GPS Service, "Database," *NASA*, 2014. [Online]. Tillgänglig: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [35] MetOffice, "Volcanic Ash Advisory from London - Issued graphics," *MetOffice*, 13 maj 2014. [Online]. Tillgänglig: http://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/vaacuk_vag.html [Hämtad: 17 maj 2014]. "Contains public sector information licensed under the Open Government Licence v1.0"
- [36] ISGPS, "Continuous GPS measurements in Iceland - the ISGPS network," *Icelandic Meteorological Office*, Tillgänglig: <http://hraun.vedur.is/ja/englishweb/gps.html> [Hämtad: 7 maj 2014].
- [37] D. Andronico, C. Spinettib, A. Cristaldia, M.F. Buongiorno "Observations of Mt. Etna volcanic ash plumes in 2006: An integrated approach from ground-based and polar satellite NOAA–AVHRR monitoring system," *Journal of Volcanology and Geothermal Research* nr. 180 ss. 135–147, mars 2009.
- [38] Weatherbase,"CATANIA, ITALY, WEATHER BY HOUR - 3 AUGUST, 2006 ," *Weatherbase*, Tillgänglig: <http://genealogy.about.com/gi/o.htm?zi=1/XJ&zTi=1&sdn=genealogy&cdn=parenting&tm=276&f=00&tt=14&bt=6&bts=25&zu=http%3A/www.weatherbase.com/>. [Hämtad: 13 maj 2014].
- [39] Volcano Discovery, "Barren Island Volcano," *Volcano Discovery*, 17 maj 2014. [Online]. Tillgänglig: http://earthquakes.volcanodiscovery.com/barren_island.html [Hämtad: 17 maj 2014].
- [40] Volcano Discovery, "Slamet Volcano," *Volcano Discovery*, 17 maj 2014. [Online]. Tillgänglig: <http://www.volcanodiscovery.com/slamet.html> [Hämtad: 17 maj 2014].

- [41] Volcano Discovery, "Merapi Volcano," *Volcano Discovery*, 17 maj 2014. [Online]. Tillgänglig: <http://www.volcanodiscovery.com/merapi.html> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [42] Sonel, SONEI, "CATANIA, Station summary," *SONEL*, 5 maj 2014 [Online]. Tillgänglig: <http://www.sonel.org/spip.php?page=gps&idStation=2253> [Hämtad: 10 maj 2014].
- [43] SOPAC, "SOPAC," *SOPAC*, 9 maj 2014, [Online]. Tillgänglig: <http://sopac.ucsd.edu/> [Hämtad: 10 maj 2014].
- [44] J.S. Subirana, et al., "Multipath," Navipedia, 2011 [Online]. Tillgänglig: <http://www.navipedia.net/index.php/Multipath> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [45] L. Bedford, et al., "Leica AR25," Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 2009.
- [46] Met Office London VAAC, "VAG," *Met Office*, 17 nov. 2010 [Online]. Tillgänglig: http://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/data/VAG_150530.png Fil: VAG_150530.png [Hämtad: 6 maj 2014].
- [47] Met Office, "Volcanic Ash Advisory Centres (VAAC)," *Met Office*, 24 dec. 2012 [Online]. Tillgänglig: <http://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/> [Hämtad: 17 maj 2014].
- [48] Skybrary, "Altitude, Flight Level and Height," *Skybrary*, 12 okt. 2011 [Online]. Tillgänglig: http://www.skybrary.aero/index.php/Altitude,_Flight_Level_and_Height [Hämtad: 17 maj 2014].
- [49] Bureau of Meteorology, *Bureau of Meteorology*, 2014 [Online]. Tillgänglig: <ftp://ftp.bom.gov.au/anon/gen/vaac/2014/>
- [50] Darwin Volcanic Ash Advisory Centre, "Volcanic Ash Advisories," *Bureau of Meteorology*, 2014 [Online]. Tillgänglig: <http://www.bom.gov.au/info/vaac/advisories.shtml> [Hämtad: 11 maj 2014].
- [51] W. Gurtner, "RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10," *IGS*, 2007 [Online]. Tillgänglig: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/> Fil: rinex210.txt.
- [52] SOPAC, "Hatanaka and RINEX Format Information," *SOPAC*, 2014 [Online]. Tillgänglig: <http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html> [Hämtad: 26 mars 2014].

Bidragsrapport

Björnborg Nguyen, Henrik Gårdh & Mattias Sjöberg

19 maj 2014

1. Ansvarsområden

- (a) Planering:
Planeringen har skett gemensamt på grund av det lilla antalet gruppmedlemmar.
- (b) Informationsinhämtning/inläsningsdel:
Björnborg hade det största ansvaret gällande inläsningsdelen och engagerade sig mindre gällande informationshämtningen.
Henrik hade det största ansvaret gällande informationshämtning och engagerade sig mindre gällande inläsningsdelen.
Mattias var engagerad i både informationshämtning och inläsning.
- (c) Metoder – val/utveckling:
Val och utveckling av metoder skedde under diskussion mellan alla gruppmedlemmar.
- (d) Genomförande:
Ingen person har burit detta ansvar mer än de andra. Gemensamt ansvar har tagits för genomförandet.

2. Bidrag till problemlösning, syntes och analys

- (a) Problemlösning:
Av de problem av teknisk karaktär som uppstått har Björnborg bidragit mest till lösningarna och gjort det mesta av programmeringen. Mattias bidrog även i viss mån.
- (b) Kreativitet, idérikedom:
Gällande idéer för upplägg och struktur av rapporten har Mattias varit huvudansvarig, men även Henrik har bidragit. Gällande idéer för programmering har Björnborg varit huvudansvarig.
- (c) Skapande av modell:
Samtliga har varit delaktiga i skapandet av modellen.

- (d) Analys av projektrelaterat material:
Mattias har gjort det mesta av analysen.
- (e) Diskussionsbidrag:
Alla har varit delaktiga i detta.
- (f) Slutsatser:
Alla har varit delaktiga i detta.

3. Huvudansvarig författare av avsnitt

- Introduktion: Henrik och i viss mån Mattias
- Vulkanism: Henrik
- Elevation och azimut: Mattias
- GNSS: Mattias
- SNR: Mattias
- Introduktion till metod: Mattias
- Borttagning av data vid låga elevationen: Mattias
- Detektering och beräkning av avvikelse i SNR: Björnberg
- Positionsbestämning av askmoln: Mattias
- Eyjafjallajökull: Mattias
- Etna: Mattias
- Askmolnets höjd: Henrik och Mattias
- Indonesien: Mattias och i viss mån Henrik
- Diskussion: Mattias och Henrik
- Slutsats: Mattias
- RINEX: Henrik
- Björnberg har haft hand om figurer och tabeller gällande databehandling. Henrik och Mattias har gjort de andra egenproducerade bilderna.

Totaltid

- Björnberg: 160.33 h
- Mattias: 203.5 h
- Henrik : 210,2 h