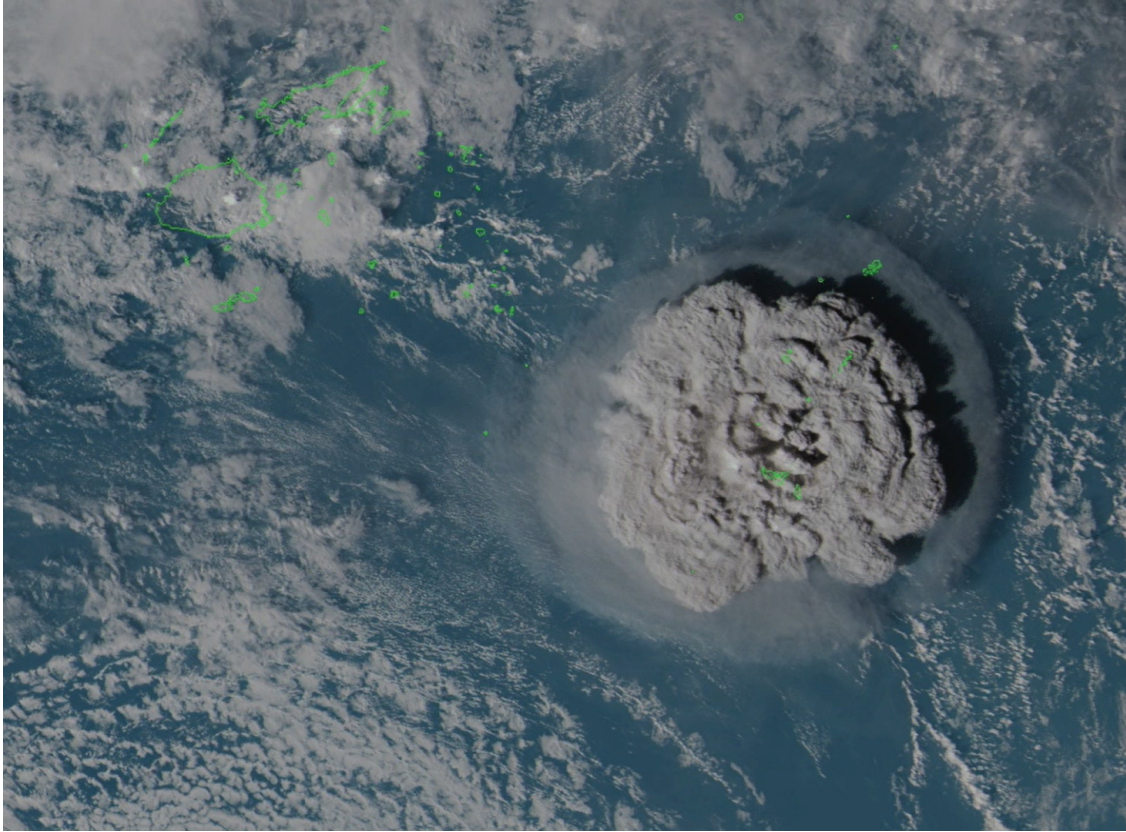




CHALMERS



Studie av jonosfären och troposfärens påverkan av vulkanutbrott med GNSS

Undersökning av hur GNSS-data kan användas för att studera vulkanutbrottet av Hunga Tonga Hunga Ha'apai's påverkan på jonosfären och troposfären

Kandidatarbete

**MATILDA HELLSTRÖM, MOA KALLÉN
EDVIN KARLSSON, AXEL SKOOG**

INSTITUTIONEN FÖR RYMD-, GEO- OCH MILJÖVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2024

www.chalmers.se

Sammanfattning

Den här rapporten utreder möjligheterna att kartlägga utbredningen av en tryckvåg genom att använda GNSS för att betrakta dess påverkan på troposfärens signalfördröjning och elektrontätheten i jonosfären. Metoden har huvudsakligen utgjorts av bearbetning av GNSS- samt tryckdata från stationer geografiskt utspridda kring vulkanen Hunga Tonga Hunga Ha'apai. Vid analys av troposfärsfördröjningen har data bearbetats med mjukvaran GipsyX och till elektrontätheten har data förädlats med Matlabkod utvecklad av Long Tang [1].

Genom att framställa erhållna data för stationerna grafiskt har signalfördröjningen, Zenith Total Delay (ZTD), i troposfären samt den vinklade totala elektrontätheten (STEC) i jonosfären kunnat jämföras och analyseras. Eftersom tryckvariationerna orsakade av tryckvågen långt från utbrottsplatsen inte var stora nog för att ge upphov till en märkbar förändring av ZTD fanns svårigheter att använda detta mått vid analys av stationer mer avlägsna från vulkanen. Vidare förekom avvikelser i ZTD-variationen beroende på huruvida landmassa eller enbart vatten var beläget mellan utbrottsplatsen och mätstationen. Eftersom tryckvariationen föreföll minska i omfattning då vågen propagerade över landmassor. Däremot kunde måttet bekräftas vara användbart för att erhålla hög precision för hastighetsbestämningen i närheten av utbrottsplatsen. STEC visade sig vara mindre avståndberoende jämfört med ZTD men, varför denna bedömdes fungera väl för att bestämma en approximativ tryckvågshastighet, även på längre avstånd. Däremot skedde detta på bekostnad av precisionen.

Med en estimerad tidsstämpel för när vågen bör ha passerat respektive station samt med överensstämmande resultat för både elektrontäthet och signalfördröjning kunde information om tryckvågens propagering genom atmosfären, så som utbredningshastighet, kartläggas tämligen väl. Sammanfattningsvis har studien bekräftat användbarheten av att kombinera analys av både ZTD- samt STEC-data såvida tryckvågsutbredningen orsakad av ett vulkanutbrott ska studeras. Därav bedöms rapportens syfte samt frågeställningar ha besvarats.

Abstract

This report investigates the possibilities of using GNSS to map a volcanic pressure wave propagation in the troposphere and its impact on electron density in the ionosphere. The method consisted of processing GNSS data and pressure data from stations geographically spread around the Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcano using the GipsyX software and Matlab code developed by Long Tang [1].

By graphically presenting the obtained data for the stations, the signal delay, Zenith Total Delay (ZTD), in the troposphere, and the slanted total electron content (STECh) in the ionosphere could be compared and analyzed. Since the pressure variations far from the eruption site caused by the pressure wave were not large enough to cause a noticeable change in ZTD, there were difficulties in using this measurement when analyzing stations further away from the volcano. Furthermore, the deviations in the ZTD depended on whether landmasses or only water was located between the eruption site and the measurement station due to smaller pressure variations when the wave propagated over landmasses. However, the measure could be confirmed to be useful when determining a high precision velocity near the eruption site. STECh was found to be less distance dependent compared to ZTD and thus, it was considered to work better for determining an approximate pressure wave velocity over longer distances compared to the ZTD. The precision of the result was, however, lower for STECh when compared to ZTD.

With an approximate timestamp for when the wave should have passed each station, and with consistent results for both STECh and ZTD, information about the propagation of the pressure wave through the atmosphere, such as propagation velocity, could be mapped. In summary, the study has confirmed the usefulness of combining both ZTD and STECh data when studying pressure wave propagation caused by a volcanic eruption. Hence, the purpose and research questions of the report are considered to have been answered.

Tillkännagivanden

Tack till vår handledare Rüdiger Haas för fantastiskt stöd och hjälp under arbetets gång [2].

Tack till vår examinator Jan Johansson för all hjälp och skriptet till Vidar [3].

Tack till Onsala Rymdobservatorium för tillgång till datorn Vidar.

Tack till Long Tang för utvecklingen av den Matlabmjukvara som använts i projektet för beräkning av den totala elektrontätheten [1].

Tack till NASA och JPL för mjukvaran GipsyX.

Tack till Fackspråk och de studenter som bidragit med respons som underlättat skrivprocessen.

Tack till GMT Steering Committee för The Generic Mapping Tools.

- Matilda Hellström, Moa Kallén, Edvin Karlsson, Axel Skoog, Göteborg, maj 2024

Lista med Akronymer

Nedan följer en lista med de akronymer som används i rapporten.

dSTEC	Förändring i vinklad total elektrontäthet, delta slant Total Electron Content
GLONASS	Rysslands Globala navigationssatellitesystem, GLObalnaya NAvi-gatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GMT	Generiskt kartverktyg, Generic Mapping Tool
GNSS	Globalt navigations satellit system, Global Navigation Satellite Systems
GPS	Globalt Positioneringssystem, Global Positioning System
HTHH	Hunga Tonga–Hunga Ha’apai
IGS	Internationella GNSS tjänsten, International GNSS Service
LP-filter	Lågpas filter, Lowpass Filter
PRN	Pseudoslumpmässigt brus, Pseudo Random Noise
STEC	Vinklad total elektrontäthet, Slant Total Electron Content
STECU	Vinklad total elektrontäthet enhet, Slant Total Electron Content Unit
TEC	Total elektrontäthet, Total Electron Content
TECU	Total elektrontäthet enhet, Total Electron Content Unit
ZHD	Hydrostatisk zenit fördröjning, Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Total zenit fördröjning, Zenith Total Delay
ZWD	Zenit fuktighetsfördröjning, Zenith Wet Delay

Innehåll

Lista med Akronymer	iv
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	2
1.2 Frågeställningar	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	4
2.1 Global Navigation Satellite System	4
2.1.1 Uppbyggnad och funktion	4
2.1.2 Global Positioning System	5
2.1.3 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistem	6
2.1.4 Galileo	6
2.2 Vulkanism	7
2.3 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai	8
2.4 Atmosfär	8
2.4.1 Troposfär	9
2.4.2 Jonosfär	9
2.5 Mjukvara	9
2.5.1 RINEX	9
2.5.2 GipsyX	9
2.5.3 IonKit-NH	10
2.6 Beräkningsmetoder och formler	10
2.6.1 Zenith Total Delay, Zenith Wet Delay och Zenith Hydrostatic Delay	10
2.6.2 Saastamoinens modell	10
2.6.3 Savitzky-Golay filter	11
2.6.4 Förväntad tryckvåg och avståndsbestämning	11
2.6.5 Total Electron Content	12
3 Metod	13
3.1 Datainsamling	13
3.1.1 Val av tidsupplösning	16
3.1.2 Val av elevationsvinkel	16
3.2 Användning av GipsyX	17
3.3 Grafisk framställning av Zenith Total Delay	17

Innehåll

3.4	Beräkning av Total Electron Content	18
3.5	Analys av tryckvågens utbredning	18
3.6	Förväntade värden	19
4	Resultat	20
4.1	Uppmätt Zenith Total Delay	20
4.2	Uppmätt Zenith Total Delay samt lufttryck	23
4.3	Eliminering av Zenith Wet Delay	24
4.4	Total Electron Content för 12 stationer	25
4.5	Total Electron Content för enskilda satelliter	27
5	Diskussion	28
5.1	Zenith Total Delay	28
5.1.1	Zenith Total Delay i kombination med tryckdata	28
5.2	12 mätstationers uppmätta elektrontäthet	29
5.3	Vinklade totala elektrontäthet för respektive station	29
5.4	Datainsamling och felkällor	30
6	Slutsats	32
	Referenser	33
A	Python skript	I
A.1	GMT karta	I
A.2	Distans	II
A.3	ZTD	V
A.4	ZTD och tryck	XII
B	Matlabkod	XV
B.1	Tid- och distanskarta	XV
B.2	dTEC-filer, antalet unika satelliter	XVI
B.3	dTEC filter, alla stationer	XVI
B.4	dTEC, tre satelliter	XIX

1

Introduktion

Att kunna förutse naturkatastrofer möjliggör proaktivt arbete som kan bidra till att minska omfattningen av de problem som drabbade samhällen tvingas konfrontera. I de fall där katastrofer inte lyckas förutsägas i tid riskerar samhällen att bemöta kriser helt utan förberedelser, vilket kan resultera i ansevära katastrofer, decimerad levnadsstandard och ihärdiga ekonomiska problem. Metoder med vilka katastrofer kan förutsägas är följaktligen av yttersta intresse för att garantera säkerhet på likväl individ- som samhällsnivå.

Ett exempel på ett system med vilket exempelvis aktivitet i atmosfären kan detekteras är Global Navigation Satellite System, GNSS [4]. Redan år 1964 detekterades förändringar i jonosfären på grund av en jordbävning i Alaska [5]. I dryga femtio år har naturfenomens inverkan på jonosfären därav kunnat mätas och genom att data insamlas både innan, under och efter katastroferna går det till viss mån att förutsäga uppkomsten av likande skeenden.

Sedan 90-talet har stora datamängder samlats in från mätstationer och satelliter jorden runt med hjälp av GNSS, där majoriteten av alla data publicerats åtkomliga för allmänheten på internet [4]. Insamlade data innehåller information som möjliggör kartläggning av fenomen som kontinentaldrift liksom studier av atmosfären och dess sammansättning [6]. Metoden utnyttjar att det genom analys av uppmätt tidsfördröjning hos en utsänd signal går att dra slutsatser om det medium i vilket signalen propagerar.

Genom att använda satellitdata från ett flertal mätstationer kan information så som utbredningsriktning och -hastighet av vindar eller moln erhållas ur upptagna data, vilket endast är ett av GNSS många användningsområden [4]. I vissa avseenden krävs mer avancerade metoder för analys, varför kraftfull mjukvara för nästintill automatiserad analys av GNSS-data har utvecklats.

GipsyX är ett exempel på en mjukvara som framställts av Jet Propulsion Laboratory (JPL) för underlättad dataanalys. Användningsområdena är många och då mjukvaran använts i studier i över 35 år bedöms tillförlitligheten vara stor [7].

I det här arbetet kommer 2000-talets mest omfattande vulkanutbrott studeras med GNSS-data som finns att tillgå från ett flertal mätstationer belägna på olika avstånd från vulkanen Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) [8]. Med en kombination av Matlabkod samt GipsyX kan både jonosfär och troposfär studeras och jämföras

med tryckdata. Det ger, till skillnad från tidigare studier som vanligen fokuserar på endera atmosfärdelen, en mer omfattande förståelse för skeendena i fråga.

1.1 Syfte

Arbetets syfte är att undersöka huruvida det är möjligt att studera vulkanutbrott med hjälp av GNSS-data. Mer specifikt kommer utbrottet av vulkanen Hunga Tonga Hunga Ha'apai kartläggas med data från ett antal mätstationer geografiskt spridda kring utbrottsplatsen. Studierna baseras på analys av jonosfärens elektrontäthet samt signalfördröjningen i troposfären, vilket möjliggör undersökning av tryckvågens utbredning.

1.2 Frågeställningar

Rapporten kommer att undersöka utbredningen av den tryckvåg som vulkanutbrottet orsakade genom att kartlägga variationer i elektrontäthet samt signalfördröjning. Med utgångspunkt i erhållna resultat kommer följande frågeställningar besvaras.

1. Är det möjligt att med hjälp av den totala elektrontätheten i jonosfären kartlägga när utbrottets tryckvåg passerade respektive station?
2. Vilka faktorer avgör huruvida ZTD eller STEC är lämpligast att använda för analys av tryckvågens utbredning?
3. Är det möjligt att använda GNSS-data för att bestämma tryckvågens utbredningshastighet?

1.3 Avgränsningar

I projektet har data från ett begränsat antal stationer studerats eftersom det medför stora, men hanterbara datamängder för projektets omfattning. De data som analyserats har primärt omfattat den dag då vulkanutbrottet skedde, men i viss utsträckning även dagen innan samt efter utbrottet.

Upplösningen av GNSS-data, som innebär hur ofta markstationen hämtar data från satelliterna, har inte understigit 30 sekunder. Anledningen är att data upptagna varje sekund, inte fanns tillgängliga för samtliga stationer. Vidare har en cut-off vinkel på 7° använts. Lägre elevationvinklar resulterar i att data från en längre sträcka inkluderas, vilket resulterar i ökad mätosäkerhet [9].

Endast data från Galileo, GLONASS och GPS har använts. Ytterligare satellitsystem hade eventuellt komplicerat datainsamlingen och hade sannolikt inte fungerat felfritt vid användningen av GipsyX. Dessutom har datamängderna från de tre systemen varit tillräckliga för ändamålet i fråga.

Troposfären har här valts att starta vid havsnivå och sluta vid 20 km över havet, medan motsvarande gränser för jonosfären har satts från 60 km till 1000 km ovanför havsytan. Eftersom övergången mellan atmosfärens delar är förhållandevis diffusa är gränserna inte allmängiltiga, men av praktiska skäl kommer övergången här behandlas som en skarp gräns.

Vidare har rapporten inte behandlat miljöaspekter så som utsläpp, skador på infrastruktur och byggnader samt eventuella dödsfall. Orsaken till att det uteslutits är dels att det inte kan mätas med GNSS-data, dels att det inte bedöms nödvändigt för att besvara de givna frågeställningarna.

Vid analys av GNSS-data har mätosäkerheter gällande eventuella klockfel från satelliter och markstationer ej behandlats. Det beror på att erhållna satellitdata antas vara tillräckligt korrekt för att uppfylla syftet.

2

Teori

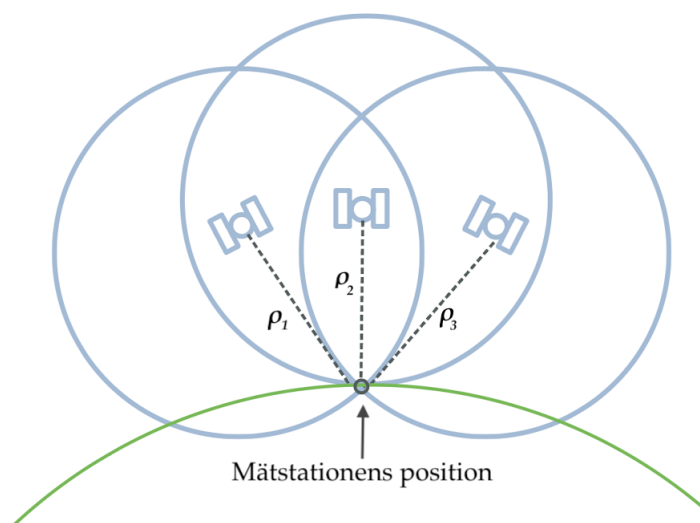
I följande avsnitt presenteras den teoretiska bakgrund som krävs för att tillgodogöra sig resterande del av rapportens innehåll. Inledningsvis ges bakgrund till GNSS, både vad gäller uppbyggnad och funktion, vilket följs av information om vulkanism och vulkanen HTHH. Vidare beskrivs atmosfärens uppbyggnad samt den mjukvara som använts. Avslutningsvis presenteras de beräkningsmetoder och formler som ingår i projektets beräkningar.

2.1 Global Navigation Satellite System

Global Navigation Satellite System, förkortat GNSS, är ett samlingsnamn för satellitbaserade navigationssystem som möjliggör positionsbestämning med hög precision över hela världen [10]. GNSS utgörs av USA:s GPS, Rysslands GLONASS, Europas Galileo och Kinas Beidou. Till GNSS kan också ett fåtal regionala system inräknas. Samtliga av dessa system består av ett flertal satelliter som kretsar runt jorden och skickar ut signaler [11]. I det här avsnittet beskrivs GNSS uppbyggnad och funktion samt systemen GPS, GLONASS och Galileo i närmare detalj.

2.1.1 Uppbyggnad och funktion

Satelliter tillhörandes GNSS kretsar runt jorden i omloppsbanor med en höjd på runt 20 000 km över havsytan. Höjden och formen på omloppsbanan varierar visserligen något från system till system [12]. Satelliterna sänder ut signaler i form av elektromagnetiska vågor i frekvensintervallet 1,2 till 1,6 GHz, vilket är frekvenser som utgör en del av det så kallade L-bandet [11]. Frekvenserna i fråga motsvarar en våglängd mellan ungefär 19 cm och 25 cm och används då våglängder i denna storleksordning kan tränga igenom moln och regn utan större påverkan [13]. För att kompensera för jonosfärens fördröjning skickar respektive satellit dessutom ut minst två olika frekvenser.



Figur 2.1: Skiss över principen för positionsbestämning, där tre satellitsignaler används för att bestämma tidsskillnader, vilka i sin tur ger det så kallade pseudoavståndet.

Större delen av den positionsbestämning som genomförs baseras på så kallad trilateration, där avstånd kan fastställas givet satellitkoordinater [14]. Principen framgår av Figur 2.1 där tre satelliters signaler når en mätstation vars position kan bestämmas. Eftersom avståndsbestämningen är given av produkten av transmissionstiden och ljushastigheten krävs hög stabilitet och noggrann synkronisering av tid [11]. Samtliga satelliter är därav utrustade med atomklockor, vars precision är mycket hög [15].

Genom att använda överlagrade vågor, signalerna med positionsinformation och tidsstämpeln för signalutsändningen, kan så kallad pseudoslumpmässig brus kod (PRN) skapas. Denna binära signal innehåller nödvändig information för att avgöra identiteten på satelliten samt information om satellitens position och omloppsbana [11]. Genom att mottagare på jorden skapar egna kopior av PRN kan de mottagna signalerna jämföras med motsvarigheten som skapats på jorden. De tidsskillnader som observeras ger, såvida de multipliceras med ljushastigheten, det så kallade pseudoavståndet till satelliten i fråga [16]. Mer information om hur beräkningarna realiserats finns att tillgå i Avsnitt 2.6 Beräkningsmetoder och formler.

2.1.2 Global Positioning System

Global Positioning System (GPS) är ett amerikanskt system som hanteras av den amerikanska regeringen. GPS utvecklades i första hand för den amerikanska militären under 1970-talet men gjordes senare tillgängligt för civilt bruk [17]. Systemet består av 31 satelliter varav minst 24 ska vara fungerande och tillgängliga 95 procent av tiden [18]. Samtliga satelliter sänder ut modulerade vågor i samma frekvens där endast PRN varierar mellan satelliterna, vilket möjliggör identifiering av dessa [11]. GPS har en konstellation av 24 satelliter i sex olika cirkulära omloppsbanor lutade

55° mot ekvatorplanet [11]. Resterande sju satelliter fungerar som reserv. Omloppsbanorna har en höjd på 20 180 kilometer över havet, som resulterar i en omloppstid på 11 timmar och 58 sekunder [11]. Denna konstellation resulterar i att fyra till åtta satelliter alltid är i siktlinje 15° ovanför horisonten oavsett position på jordklotet [19].

2.1.3 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistem

Globalnaya Nsvigatsionnaya Sputnikovaya Sistem (GLONASS) är Rysslands motsvarighet till GPS. Den första GLONASS-satelliten kallades Uragan och sköts upp i oktober 1982. Inledningsvis utvecklades systemet för att användas inom militären, men med tiden kom det att göras tillgängligt för delar allmänheten även om det fortfarande styrs under militär kontroll [20]. Efter ytterligare uppskjutningar var systemet fullt funktionellt år 1995 [11]. Till skillnad från GPS sänder alla GLONASS-satelliter ut samma PRN-modulering men på något olika frekvenser. Satelliterna kan därav identifieras givet frekvensen, vilket kan jämföras med GPS-satelliternas PRN [11].

GLONASS består av 24 satelliter jämnt fördelade i tre olika omloppsbanor med en vinkel på ungefär 65° från ekvatorialplanet [11]. Denna konstellation ger, jämfört med andra system, en ökad synlighet över Ryssland [11]. Satelliterna kretsar vidare på en lite lägre höjd, 19 100 kilometer över havet, vilket ger en kortare omloppstid på ungefär 11 timmar och 16 minuter jämfört med GPS [11].

2.1.4 Galileo

Galileo är det europeiska navigationssystemet namngett efter den välkände vetenskapsmannen Galileo Galilei [19]. Det ägs och underhålls av European Space Agency (ESA) och är, till skillnad från GPS och GLONASS, främst avsett för civilt bruk.

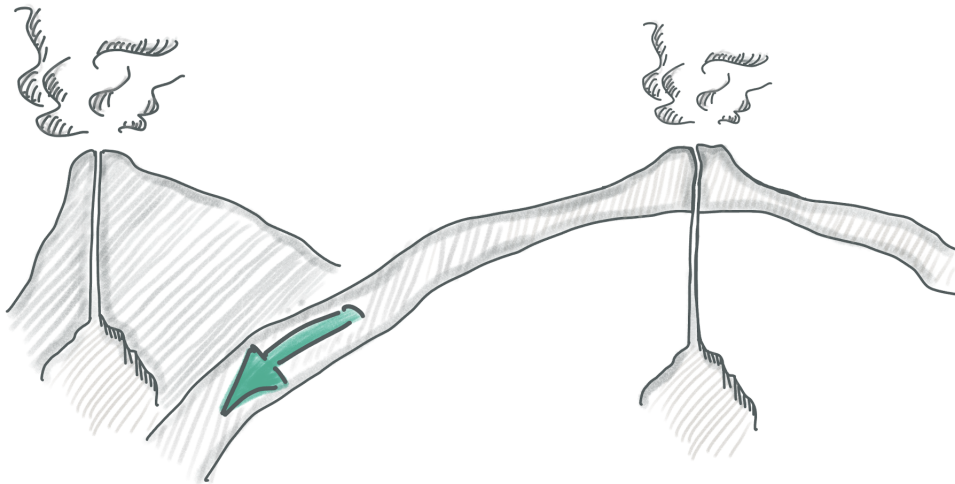
Den första satelliten tillhörandes Galileo sköts upp 2011 och därefter har uppskjutningarna fortsatt kontinuerligt. Den nuvarande uppsättningen av Galileo består av 28 satelliter fördelade i tre olika omloppsbanor [21]. Alla förutom två av dessa ligger i en omlopps bana 23 222 km från jordens yta med en vinkel på 56° från ekvatorialplanet, vilket resulterar i en omloppstid på ungefär 14 timmar och 5 minuter [11]. Resterande satelliter var feluppskjutna och används enbart till Search and Rescue, vilket de andra 26 också gör men då utöver sina primära användningsområden. Search and Rescue innebär att satelliterna kan vidarebefordra en nödsignal till lokala räddnings- och operationscenter [21].

Galileo använder sig av två frekvenser som standard och kan därmed ge en positionsbestämning i realtid med en säkerhet ned till en meter. Liksom GPS används PRN för att identifiera och skicka signalerna [21].

2.2 Vulkanism

En vulkan är en plats med en öppning som möjliggör utströmning av gaser samt fasta och smälta bergarter från jordens inre [22]. Magma kallas den blandning av gaser och smälta mineraler som finns i manteln, delen under jordskorpan. Magma som emanerat från manteln till ovanför jordytan klassificeras som lava [23].

En rad upptäckter runt år 1965 gjorde att den geologiska teorin om att jordens yta består av flera tektoniska plattor i rörelse blev etablerad fakta. Vulkanerna är oftast belägna längs med dessa tektoniska plattors kanter, där plattorna kan verka mot varandra, en konvergent gräns, eller ifrån varandra, en divergent gräns. Av Figur 2.2 framgår hur en gräns kan se ut. Förekomst av vulkaner som är geografiskt placerade innanför kanterna kallas för hot-spots [22].



Figur 2.2: Skiss som redogör för hur plattgränsernas verkan mot varandra kan resultera i rörelse av magma, vilket i sin tur kan mynna ut i ett vulkanutbrott.

Beroende på vad som orsakar ett utbrott kan vulkanerna formas på huvudsakligen två olika sätt. Stratovulkan förekommer oftast vid konvergenta plattgränser och har en spetsigare topp samt ett explosionsartat utbrott. Sköldvulkan uppstår ofta vid hot-spots och vid divergenta plattgränser, där lavan i stället tenderar att flyta ut snabbt och breda ut sig över större ytor. Från en vulkanisk eruption härstammar magma i form av lava, följt av askmoln och gasutsläpp [22].

Det är vanligt att de tektoniska plattgränserna är belägna under havsytan. Vulkaniska processer i form av submarina utbrott, där lava, pyroklastiska flöden och kollaps av jordytan kan orsaka uppkomsten av tsunamier [24]. Pyroklastiska material är fasta partiklar och flytande material som kastas upp ur en vulkankrater i samband med explosionsartade utbrott [25].

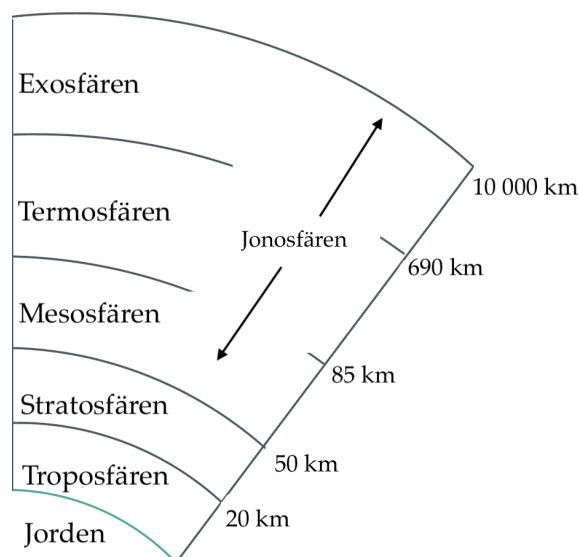
2.3 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai

Hunga Tonga Hunga Ha’apai är en stratovulkan belägen vid den konvergenta plattgränsen mellan Stilla havets och den australienska plattan. Aktivitet hos vulkanen detekterades redan 2009, varefter utbrotten kom att öka i omfattning för att nå sin kulmen den 15 januari 2022 mellan klockan 04 och 05 då flera mycket kraftiga explosioner inträffade [8]. Vulkanutbrottet, vilket kom att bli det mest omfattande som inträffat under 2000-talet, omfattade totalt fem explosioner som gav upphov till en våldsam spridning av stora vattenmängder och en tryckvåg, varav den sistnämnda uppmättes nå jorden runt två gånger [8].

Tack vare GNSS finns stora datamängder från den relevanta perioden tillgängliga, varför utbrottet kan analyseras i detalj. I kombination med utbrottets omfattning är fallet beaktansvärt i en mer generell diskussion, vilket är ytterligare en aspekt som motiverar ämnets relevans.

2.4 Atmosfär

Atmosfären delas in i ett flertal delar beroende på temperatur. I temperaturordning, från högst till lägst, kallas de olika lagren för troposfär, stratosfär, mesosfär, termosfär och allt ovanför termosfär kallas för exosfär [26]. Beaktas andra storheter än temperatur, så som elektrontäthet, brukar distinktionen mellan de kyligare av tidigare nämnda lagren inte vara lika explicit varför dessa går under benämningen jonosfär. I Figur 2.3 framgår de relevanta atmosfärdelarna för projektet.



Figur 2.3: Av figuren framgår hur atmosfären vanligen uppdelas, varav större delen av de tre yttre lagren, exosfären, termosfären samt mesosfären, motsvarar jonosfären. Vilken uppdelning som är att föredra beror på vilka storheter som undersöks, varav den senare uppdelningen är av intresse i detta arbete.

2.4.1 Troposfär

Troposfären är den del av atmosfären som är belägen närmst jordytan, varför lufttrycket är som högst här. Då drygt 75 % av all planetens luft liksom majoriteten av all vattenånga och vattenmolekyler finns i troposfären innesluter denna del av atmosfären majoriteten av allt väder. Det finns inga finita gränser som skiljer atmosfärdelarna åt, i stället fasas de ut och därav är den övre gränsen av troposfären ungefärlig. Troposfären sträcker sig exempelvis ungefär 7 km från jordytan vid polerna respektive 18 km vid ekvatorn [26].

2.4.2 Jonosfär

Den del av atmosfären som utgör jonosfären är belägen mellan drygt 48 km och 985 km över havet [26]. Detta höjdintervall innefattar den så kallade mesosfären, termosfären och exosfären, men såvida det är av intresse att studera elektroner och joner är indelningen i jonosfär att föredra.

Namnet jonosfär kommer av att solens radioaktiva strålning joniserar atomer och molekyler, vilket resulterar i uppkomsten av joner och fria elektroner. Dessa rekombinerar under nattetid, varför processen är cyklisk [26]. Vidare gäller att jonosfären på drygt 1000 km höjd kommer vara fullt joniserad, varför denna del är fullkomligt reflekterande för radiovågor under 40 MHz [27].

2.5 Mjukvara

I det här avsnittet återfinns information om de olika mjukvaror som använts i projektets olika delar. Detta inkluderar både GipsyX, RINEX samt IonKit-NH.

2.5.1 RINEX

Receiver INdependent EXchange (RINEX) är ett standardiserat filformat som ofta används vid GNSS observationer [28]. Standarden föreslogs år 1989 av det Astronomiska Institutet vid universitetet i Bern, Schweiz [29]. Målet var att standardisera datan som samlades in av de olika typer av satellitsystem samt mottagare. Tidigare hade varje tillverkare och system sina egna filformat vilket gjorde det svårt att analysera och jämföra olika data från olika stationer och satelliter [29]. Filformatet används idag vid nästan alla GNSS observationer. RINEX finns i olika versioner och lagrar data i textformat. Filformatet finns i dagsläget i fyra versioner varav version två och tre är vanligast förekommande [29].

2.5.2 GipsyX

GipsyX är en mjukvara utvecklad av JPL, vilket utgör en del av NASA, och grundar sig på över 35 år av utveckling och förfining [7]. Från bland annat GNSS-data kan information förädlas och ge en uppskattning på parametrar som satellitbanor,

klockor, jordens orientering, hastigheten och fördröjningar i troposfären samt jonosfären [30]. Mjukvaran underlättar analys av data från GNSS så som exempelvis GPS, GLONASS och Galileo. Vidare används GipsyX till geofysisk forskning om jordens förändringar, isens utbredning, klimatstudier av troposfär samt jonosfär och GNSS-nätverk. Därtill är den även ett verktyg vid omloppsbestämning av satelliter och flygplanspositionering [7].

2.5.3 IonKit-NH

Den mjukvara som använts för att bearbeta den totala elektrontätheten i jonosfären heter IonKit-NH och är utvecklad av Long Tang. Den består av ett bibliotek med flertalet Matlabkoder, som finns åtkomlig på GitHub [31]. Tidigare har koden använts i två publikationer, varav en avhandlar TEC-analys av jordbävningen i Tohoku år 2011, medan den andra innehåller motsvarande för HTHHs utbrott 2022 [32]. För att göra koden kompatibel med filhanteringen som används på Mac gjordes viss modifikation av koden, men i övrigt är mjukvaran som använts utvecklad av Tang.

2.6 Beräkningsmetoder och formler

I det här avsnittet kommer formler och beräkningsmetoder som använts under arbetets gång presenteras och förklaras. Det som diskuteras är ZTD, olika modeller och filter samt avståndsbestämning och TEC.

2.6.1 Zenith Total Delay, Zenith Wet Delay och Zenith Hydrostatic Delay

I nedre delen av atmosfären kan signalfördröjningen betraktas som en summa av en hydrostatisk fördröjning samt en 'wet delay' som påverkas av lufttrycket respektive fuktigheten i troposfären [33]. Summan ger den totala fördröjningen i troposfären, vilket ger information om atmosfärsinnehåll.

Genom att projicera satellitsignalen på zenit i förhållande till den station som mottager den beaktade signalen ges ZTD. Det här måttet kan därefter delas upp i zenit hydrostatisk fördröjning (ZHD) och zenit fuktighetsfördröjning (ZWD) [33]. ZTD plottas med fördel mot tid, varefter avvikelser i grafen ger information om vad signalen propagerar genom. Är propagationsmediet svårgenomträngligt ges uppmätbar fördröjning av signalen. I fallet med en tryckvåg kan avvikelser i ZTD ge en uppfattning om tryckvågens passage.

2.6.2 Saastamoinens modell

Saastamoinens formel bygger på den totala zenit fördröjningen och den tolkas som det förväntade värdet på ZTD utifrån lufttryck, höjd på markstationen och fuktighet. Uttryckt i andra termer beror ZTD på den hydrostatiska fördröjningen och fuktighetsfördröjningen. Den ges av följande.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (2.1)$$

Saastamoinens formel kan skrivas mer utförligt enligt Ekvation 2.2.

$$ZTD = \frac{0.0022768}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi)} \left(P + \frac{1255}{T_C + 273.15} \cdot 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.269T_C}{T_C + 237.3}\right) \cdot \frac{rh}{100} \right) \quad (2.2)$$

För att beräkna ZHD måste även ZWD bestämmas. ZWD ges enligt följande.

$$ZWD = 0.0022768 \cdot \left(\frac{1255}{T_C + 273.15}\right) \cdot 6.1078 \cdot \exp\left(\frac{17.269T_C}{T_C + 237.3}\right) \cdot \frac{rh}{100} \quad (2.3)$$

Här φ betecknar stationens latitud i radianer, P är det atmosfäriska trycket (hPa) vid den specifika markstationen, T_C är temperaturen ($^{\circ}\text{C}$) vid den specifika markstationen och rh är den relativa luftfuktigheten (%) [34].

2.6.3 Savitzky-Golay filter

Savitzky-Golay filter är ett approximationsfilter som gör en signal med mycket störningar till en slätare signal. Den utvecklades utav Marcel E. Golay och Abraham Savitzky på 1960-talet inom analytisk kemi och används idag flitigt inom signalbehandling och kan tolkas som ett lågpasfilter. Filtringen baseras på två parametrar p samt q . Variabeln p motsvarar här polynomets ordning och q är storleken på det tidsintervall signalen ska filtreras inom. Värdet på q måste vara större än p . Därefter sätts $i(m)$ till den brusiga signalen och $f(m)$ är Savitzky-Golay filtret av ordning av p . Vidare ansätts polynomkoefficienterna $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p$, varvid två ekvationer erhålls. Den första ger ett mått på standardavvikelsen δ , vilket definierar hur filtringen sker. I samma ekvation sker även ett skift till höger där nästa utslätning görs med respektive q tills hela signalen är uppfylld [35].

$$\delta = \sum_{m=\frac{1-q}{2}}^{\frac{q-1}{2}} [f(m) - i(m)]^2 \quad (2.4)$$

Nedan framgår hur $f(m)$ definieras [35].

$$f(m) = \sum_{j=0}^p a_j m^j \quad (2.5)$$

2.6.4 Förväntad tryckväg och avståndsbestämning

Haversine-formeln är en matematisk formel som används till att beräkna avståndet mellan två punkter på en sfär, vanligtvis jordens yta. Det görs med hjälp av longitud och latitud [36]. Formeln är given av Ekvation 2.6.

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{la_2 - la_1}{2} \right) + \cos(la_1) \cos(la_2) \sin^2 \left(\frac{lo_2 - lo_1}{2} \right)} \right) \quad (2.6)$$

där d är avståndet mellan koordinaterna i kilometer, R är klotets radie i kilometer, la_1, la_2 är latitudkoordinater och lo_1, lo_2 är longitudkoordinater.

2.6.5 Total Electron Content

Den totala elektrontätheten i jonosfären, uppmätt från satellit till markstation, är given av följande formel.

$$TEC = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2 + N + \varepsilon) \quad (2.7)$$

Här är A en konstant med värdet $40,3 \text{ m}^3/\text{s}^2$, f_1, f_2 är de olika frekvenserna för respektive satellit, ε är mätstörningar och L_1, L_2 är bärvågsobservationer från respektive satellit. Vidare är N bärvågens osäkerhet givet i meter. Den är konstant och approximeras med hjälp av följande formel.

$$N = \langle L_1 - L_2 - (P_1 - P_2) \rangle, \quad (2.8)$$

där L_1, L_2 är bärvågsobservationer, P_1, P_2 är motsvarande för PRN, vilken genereras av både satellit och markstation för att tidsskillnaden som kan utläsas då signalerna sedan jämförs kan användas för distansbestämning. Beteckningen $\langle \cdot \rangle$ används för att beskriva att den genomsnittliga operationen [1].

3

Metod

I det här avsnittet presenteras de metoder som använts för att analysera data och erhålla de resultat som presenteras i kommande avsnitt. Här behandlas metoden för hur data införskaffades, en redogörelse för hur mjukvaran GipsyX användes samt hur det grafiska resultatet framställdes med hjälp av programmering. Slutligen behandlas framtagandet av förväntade värden baserat på föregående rapporter samt formler.

3.1 Datainsamling

För att bestämma vilka GNSS-mätstationers data som är relevanta att analysera och använda i projektet användes det grafiska verktyget *Network* på den av International GNSS Service ägda hemsidan www.igs.org [4]. Med verktyget lokaliserades mätstationer i närområdet kring HTHH samt ytterligare stationer med längre avstånd till HTHH. Ett krav på samtliga stationer, bortsett från TONG00TON, var att det skulle finnas tillgängliga data från stationerna under de tre dagar projektet valt att behandla. Stationerna som behandlas i rapporten presenteras i Tabell 3.1, där även avstånden från HTHH till respektive station finns med.

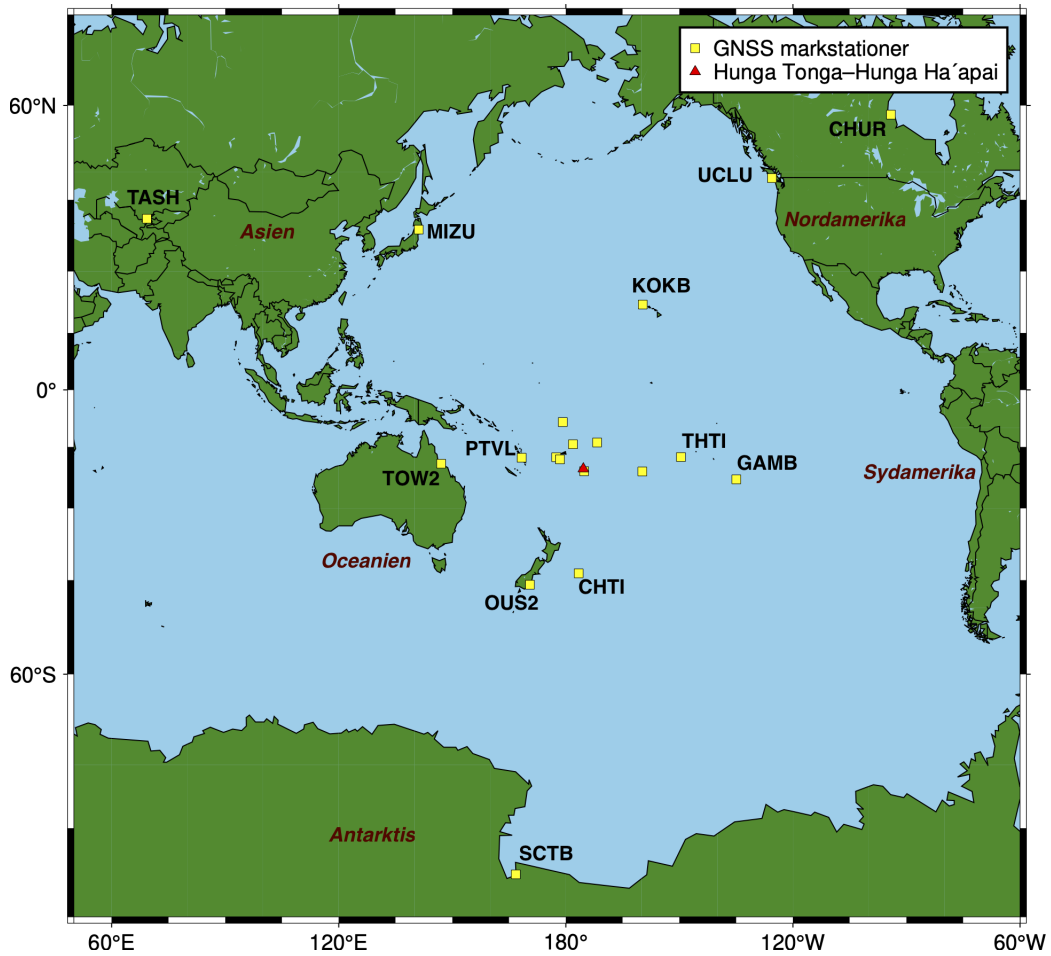
Tabell 3.1: Samtliga stationer vars data har använts samt respektive avstånd till HTHH. Sorterat efter avstånd till HTHH.

Station	Avstånd till HTHH (km)
TONG00TON	70,31
USP100FJI	699,06
FTNA00WLF	751,40
LAUT00FJI	820,06
SAMO00WSM	839,51
TUVA00TUV	1 457,34
CKIS00COK	1 620,83
PTVL00VUT	1 738,51
CHTI00NZL	2 580,98
THTI00PYF	2 727,13
OUS200NZL	3 095,33
TOW200AUS	3 919,84
GAMB00PYF	4 169,45
KOKB00USA	5 042,37
SCTB00ATA	6 443,17
MIZU00JPN	8 028,64
UCLU00CAN	9 162,79
CHUR00CAN	11 463,46
TASH00UZB	13 583,69

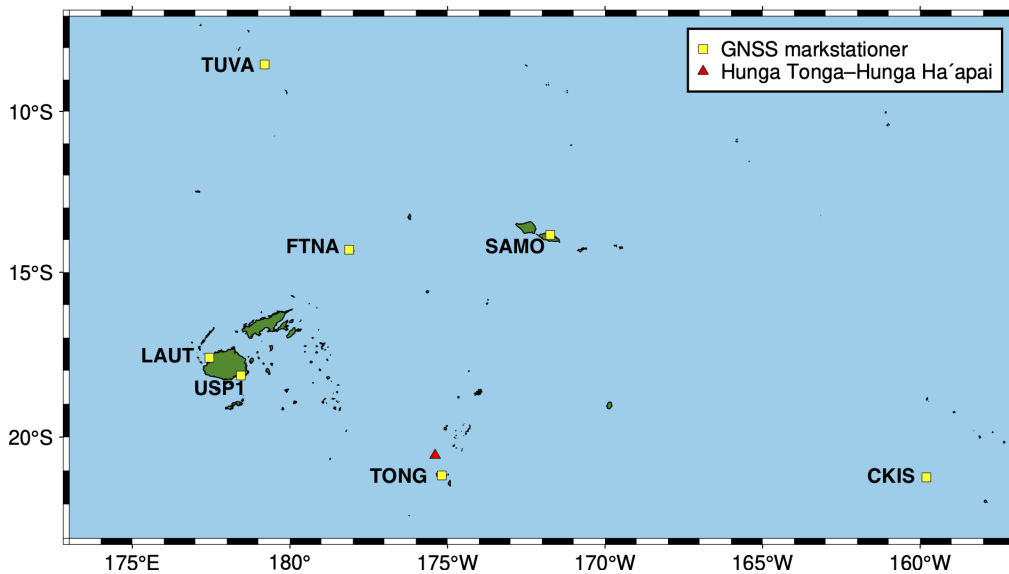
De fullständiga stationsnamnen består av fyra tecken för namnet av stationen i fråga, två siffror och tre tecken som representerar vilket land stationen finns i. Hädanefter kommer endast de fyra första tecknen för det fullständiga stationsnamnet användas i rapporten.

Av Figur 3.1 återfinns en grafisk överblick av alla GNSS-stationer som använts i projektet. I Figur 3.2 framgår en inzoomad bild på de använda stationerna som är belägna i närheten av HTHH. Den grafiska illustrationen är genererad med hjälp av Generic Mapping Tool (GMT) [37]

3. Metod



Figur 3.1: Överblick över samtliga GNSS-markstationer som använts i rapporten.



Figur 3.2: De GNSS-stationer i närheten av HTHH som använts i projektet.

Fastän TONG inte har tillgängliga data från hela den undersökta perioden är statio-

nen inkluderad. Det beror på dess geografiska läge i förhållande till vulkanutbrottet förser analysen med värdefull information om tryckvågens utbredning samt jonosfärens elektrontäthet i närheten av utbrottet.

I fallet med STEC behandlades RINEX-filerna inte i GipsyX. Istället laddades de ned för att behandlas med Matlabkod.

Vidare gäller att data från endast GPS, GLONASS och Galileo användes för samtliga av de listade stationerna. Det beror på att övriga system bedömdes vara antingen otillräckligt testade gentemot GipsyX eller hade ett format som försvårade databehandlingen.

3.1.1 Val av tidsupplösning

Data som upptagits varje sekund fanns inte tillgå för samtliga av de valda stationerna under hela den relevanta perioden. Det resulterade, i kombination med att data upptagna var 30:e sekund gav tillräckliga resultat utan att skilja sig avsevärt med sekundsdata, i att grafer genererades enligt resultatdelen med data från var 30:e sekund.

Vidare fanns enbart tillgängliga tryckdata med en upplösning av vart 30:e sekund. För att erhålla samma upplösning motiverades valet av data från var 30:e sekund ytterligare. Även för STEC-graferna användes 30 sekunders data då det möjliggjorde användning av samma RINEX-filer i fallet med ZTD samt STEC.

För tester och framställning av Pythonkod användes data från stationen ONSA belägen i Onsala, Sverige, från juli 2021. Därefter kördes koden med data upptagna varje 300:e sekund från de utvalda stationerna för att säkerställa kompatibiliteten. Efter framgångsrika tester användes data tagna av stationerna var 30:e sekund, vars resultat framställdes grafiskt. Därpå användes data upptagna varje sekund under de aktuella dagarna, varvid beslutet om att enbart använda 30 sekunders data kunde fattas efter jämförelse av de erhållna resultaten.

3.1.2 Val av elevationsvinkel

På grund av att atmosfären påverkar de data mätstationen insamlar gäller att den vinkel med vilken satelliten står i förhållande till mätstationen måste beaktas. Redan vid 20° är den väg vilken signalen färdas genom atmosfären så lång att det uppkommer ett märkbart fel i förhållande till den modell av troposfären som mjukvaran använder [9].

I detta projekt har elevationsvinkeln 7° valts som gräns för att minska felet i fråga, varför vinklar som underskrider 7° exkluderats. Innan valet av vid vilken vinkel som exklusionen skulle börja genomfördes tester för att undersöka den skillnad valet av 7° kontra 10° resulterade i.

3.2 Användning av GipsyX

Mjukvaran GipsyX användes för databearbetning. Då mjukvaran fanns nedladdad på datorn Vidar tillhörandes Onsala Rymdobservatorium skapades en remoteanlutning till denna och genom att använda ett skript utvecklat av Jan Johansson underlättades användningen av GipsyX ytterligare [3].

Beroende på de nedladdade datafilernas tidsintervall mellan upptagna data tog respektive kommandosekvens olika lång tid att slutföra, där 90 minuter var snittet på tidsåtgången för de filerna med data upptagna varje sekund. Såvida körningarna skedde utan anmärkning lade programskriptet resultaten i en mapp som sedan laddades ned för vidare analys.

3.3 Grafisk framställning av Zenith Total Delay

Med den kod som finns att tillgå i Avsnitt A i Appendix framställdes grafer över de erhållna resultaten för ZTD som funktion av tid. För att underlätta identifiering av vilka avvikelser som sannolikt orsakats av tryckvågen adderades markörer vid de tider explosionernas tryckvågor estimerades passera respektive station. Det gjordes utefter tidigare rapporters resultat på 310-315 m/s för tryckvågshastigheten [38], [8].

För att jämföra de erhållna resultaten med förutsägelser av ZTD plottades meteorologiska prognoser för ZTD i de skapade graferna. Därefter kunde grafernas principiella utseende avläsas och jämföras. Eftersom det enbart fanns förutsägelser av ZTD för var sjätte timme för ett fåtal av de stationer som undersökts var jämförelserna ytterst grova, varför meteorologiska data inte kom att användas i projektet.

Förhoppningen med de framställda graferna där ZTD var plottad som funktion av tid var att urskilja tydliga avvikelser i ZTD. Avvikelserna skulle ge en indikation om hur tryckvågen utbreddes. Eftersom samtliga dagar innehöll avvikelser av annat ursprung än tryckvågen kunde en tydlig passage av tryckvågen inte urskiljas för många stationer, utan primärt för de stationer i närheten av HTHH varför vidare analys genomfördes.

Genom att använda tryckdata för att undersöka och jämföra ZTD i relation till tryck kunde även mindre ZTD-avvikelser urskiljas. Detta på grund av att tryckskillnader och ZTD-variationer korrelerar, varför en tydlig tryckförändring indikerar att ZTD-förändras.

Vidare användes Saastamoinens formel för att beräkna vilken avvikelse i ZTD som kunde förväntas. Beräkningarna, vars resultat plottades som komplement till behandlade data, gjorde det således möjligt att avgöra huruvida det överhuvudtaget är möjligt att urskilja ZTD-förändringen bland brus eller ej, vilket underlättade analysen.

Då tryckvågen inte påverkar ZWD subtraherades den från ZTD för att ge ZHD. Förhoppningen var att kunna urskilja en större skillnad och därav erhålla en tydligare indikation för när tryckvågen passerade.

Data filtrerades även med Savitzky-Golay-filter för att ta bort högfrekventa variationer och brus. Förhoppningen var att erhålla en tydligare och mindre brusig graf.

3.4 Beräkning av Total Electron Content

Användningen av Tangs mjukvara IonKit-NH implementerades genom att tillföra den samma obehandlade RINEX-filer som tillförts GipsyX. Utdata bestod av en fil innehållandes avvikelser i STEC för stationen, delta Slant TEC (dSTEC) [39]. Filerna användes sedan vid framställning av en grafisk illustration, där dSTEC, angivet i STECU (Slant Total Electron Content Unit), plottades som funktion av tid.

Markstationerna som ingår i analysen är totalt 12 stycken, som vidare genererar 12 dSTEC filer. I respektive dSTEC-fil återfanns data för flertalet satelliter, mellan 18-75 stycken, i relation till markstationen vilket framgår av Avsnitt B.2 i Appendix. Genom data från samtliga stationer kunde en omfattande graf framställas, där avvikelser i STEC angavs med hjälp av en färgskala. Matlabkoden för framställningen av grafen finns att tillgå i Avsnitt B.1 i Appendix. Ur grafen framgick hastigheten hos vågen, och genom att testa olika lutning på infogade linjer kunde en approximativ hastighet härledas.

Därefter analyserades alla samtliga dSTEC värden för alla stationer i ytterligare Matlabkod som återfinns i Avsnitt B.3 i Appendix. Det gjordes för att hitta data vid rätt avstånd och tid, som tydligt kan visa en skillnad i dSTEC. Eftersom satelliterna är i ständig rörelse finns ett intervall så att data endast tas från 100-200 km från HTHH. Data valdes här från ett representativt urval satelliter, vars signalkärningspunkter med jonosfären var belägna på olika avstånd från HTHH. Grafisk framställning av dess värden i en gemensam figur gav tydligare och mer lättolkade resultat. Koden som användes för framställningen finns att tillgå i Avsnitt B.4 i Appendix. Ur figuren från graferna kunde även en approximativ hastighet för tryckvågen bestämmas, eftersom tiden för passage samt avståndet till HTHH var givna.

3.5 Analys av tryckvågens utbredning

För att bestämma en utbredning av tryckvågen med hjälp av STEC har data för samtliga stationer framställts grafiskt. Avståndet från HTHH är här givet som funktion av tid. Genom att låta tryckvågens avvikelse vara rödmarkerad, medan ingen avvikelse framgår av gröna markeringar, har en rät linje vars lutning svarar mot utbredningshastigheten kunnat framställas. Av grafen framgår flera räta linjer, där respektive linje representerar de olika explosionerna.

3.6 Förväntade värden

Koordinaterna för varje station har hämtats från International GNSS Service, vilket även är källan satellitdatafilerna hämtats från [4]. Med hjälp av Python-kod, se Avsnitt A.2 i Appendix, beräknades avståndet mellan varje station och HTHH vulkanen med Haversine-formeln.

Avståndet användes vidare för att skapa en förväntad tid för när tryckvågen bör ha nått respektive station. Den estimerade utbredningshastigheten hos tryckvågen är 310-315 m/s, vilket baserat på tidigare studier av HTHH-utbrottet [38], [8]. Med utgångspunkt i att vulkanutbrottet bestod av fem explosioner har fem markerade vertikala intervall lagts till i graferna, vilket ger en estimerad tid för när tryckvågen borde nått respektive mätstation [40].

Saastamoinens formel har använts för att beräkna ZTD med hjälp av tryckdata, varefter resultatet har förts in i samma graf som uppmätt ZTD och använts som en riktlinje för vilken avvikelse i ZTD bör förväntas. Genom att beräkna tryckavvikelsen för respektive estimerad tryckvåg erhålls ett preliminärt värde på avvikelsen i ZTD. Då tryckavvikelserna minskar med ökande avstånd från HTHH är det med denna metod möjligt att avgöra huruvida förändringen av ZTD är urskiljbar bland brus. Detta kan i sin tur användas för att avgöra om det är nödvändigt att inkludera tryckdata för att finna vilka trender i grafen som motsvarar tryckvågens påverkan på signalfördröjningen.

4

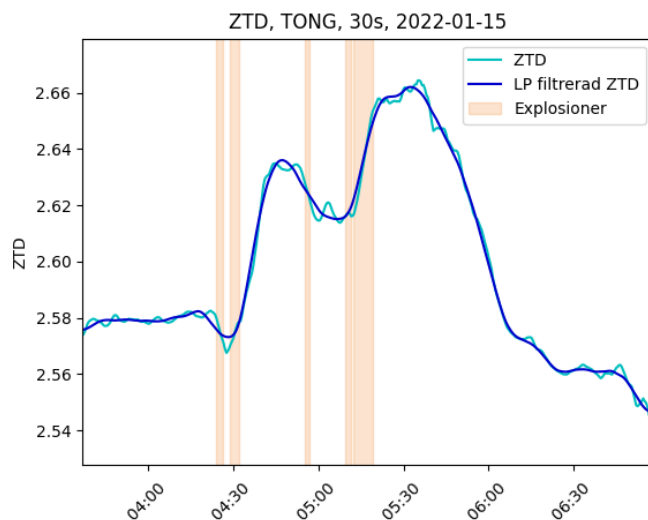
Resultat

Erhållet resultat presenteras i denna del fördelat på fyra delar; resulterande ZTD för stationerna belägna närmast utbrottsplatsen, jämförelse mellan tryckdata samt ZTD för avlägsna stationer, eliminering av ZWD och jonosfärens totala elektrontäthet i vertikalled under den undersökta tidperioden.

4.1 Uppmätt Zenith Total Delay

De stationer vars ZTD undersökts är de sju stationer som ligger närmast HTHH. Stationerna har delats in i tre större avståndsspänn, ca 70 km, 699 – 850 km och 1450 – 1650 km. Explosionerna är markerade med orange streck i figurerna nedan.

I det första intervallet återfinns stationen TONG, vilken ligger 70 km från HTHH. I grafen som återger ZTD, se Figur 4.1, för stationen i fråga framgår att ZTD både ökar och minskar under de estimerade intervallen för tryckvågen. Inledningsvis minskar den, för att sedan öka kraftigt efter andra utbrottet. Därefter en minskning, varpå en markant ökning igen. LP-filtrerad kurvan, är den ZTD-data som inhämtas där en Savitzky-Golay filtrering implementeras där alla mindre avvikelser filtrerar bort och kurvan blir slätare.

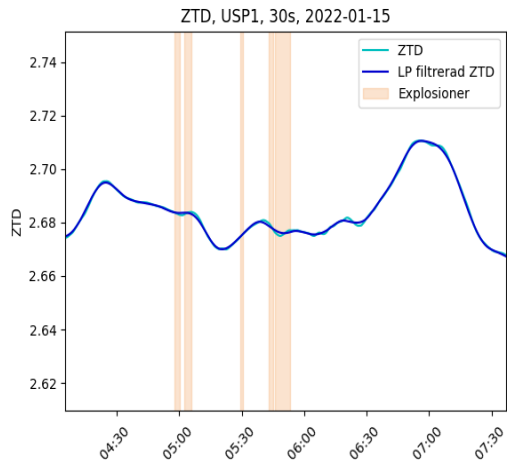


Figur 4.1: ZTD [m] vid stationen TONG, ca 70 km från utbrottet.

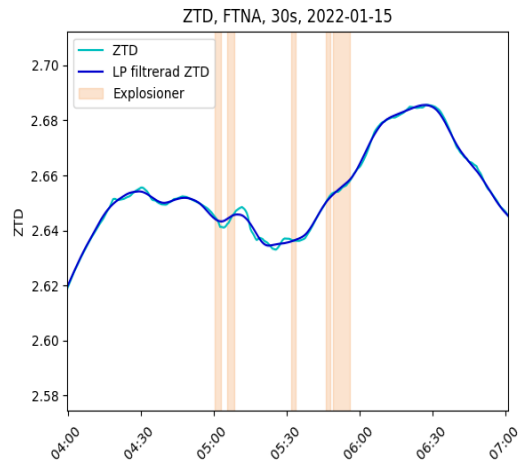
I andra intervallet, 699-850 km, finns stationerna USP1, FTNA, LAUT och SAMO, presenterat i Figur 4.2. För både USP1 och FTNA sker en minskning varpå en ökning vid de första två ankomsterna av estimerad tryckvåg, samt ökning av ZTD vid resterade intervall. I tidsintervallet 04:30 till 07:00 uppmäts ett maximalt värde på ZTD vid 07-tiden för USP1 och vid 06.30-tiden för FTNA. För stationerna LAUT och SAMO sker det en knappt märkbar ökning vid de två första utbrotten. För stationerna längre bort än 800 km är det svårt att urskilja en förändring i ZTD på grund av tryckvågen, då ändringen inte är större än brus och mindre variationer i ZTD.

I det tredje avståndsspannet 1455-1620 km från utbrottet finns stationerna TUVA och CKIS, se Figur 4.2. Gemensamt för dessa är att det inte förekommer några större variationer jämfört med brus.

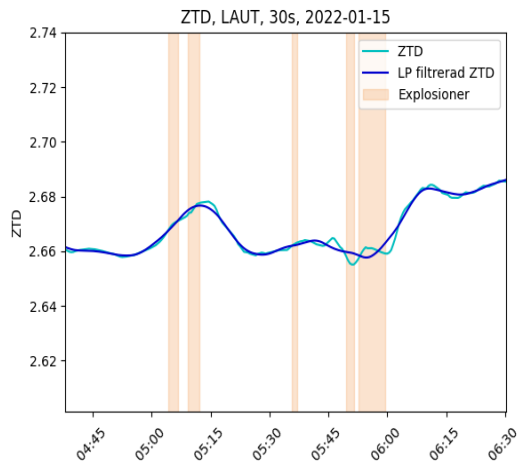
4. Resultat



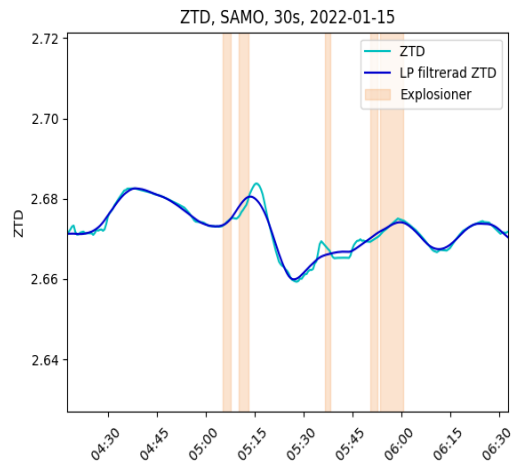
(a) USP1, 699 km



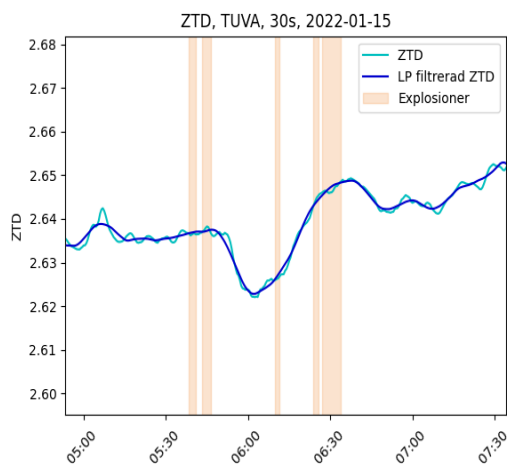
(b) FTNA, 751 km



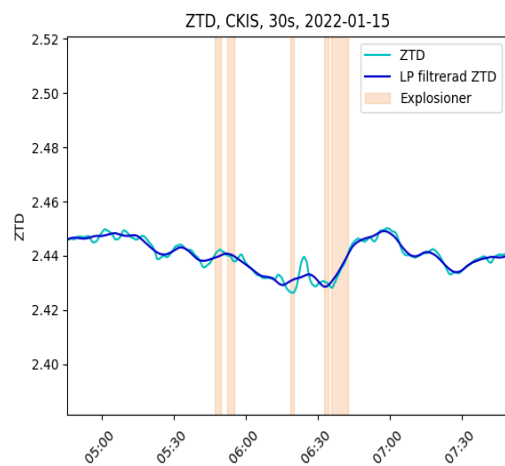
(c) LAUT, 820 km



(d) SAMO, 839 km



(e) TUVA, 1457 km



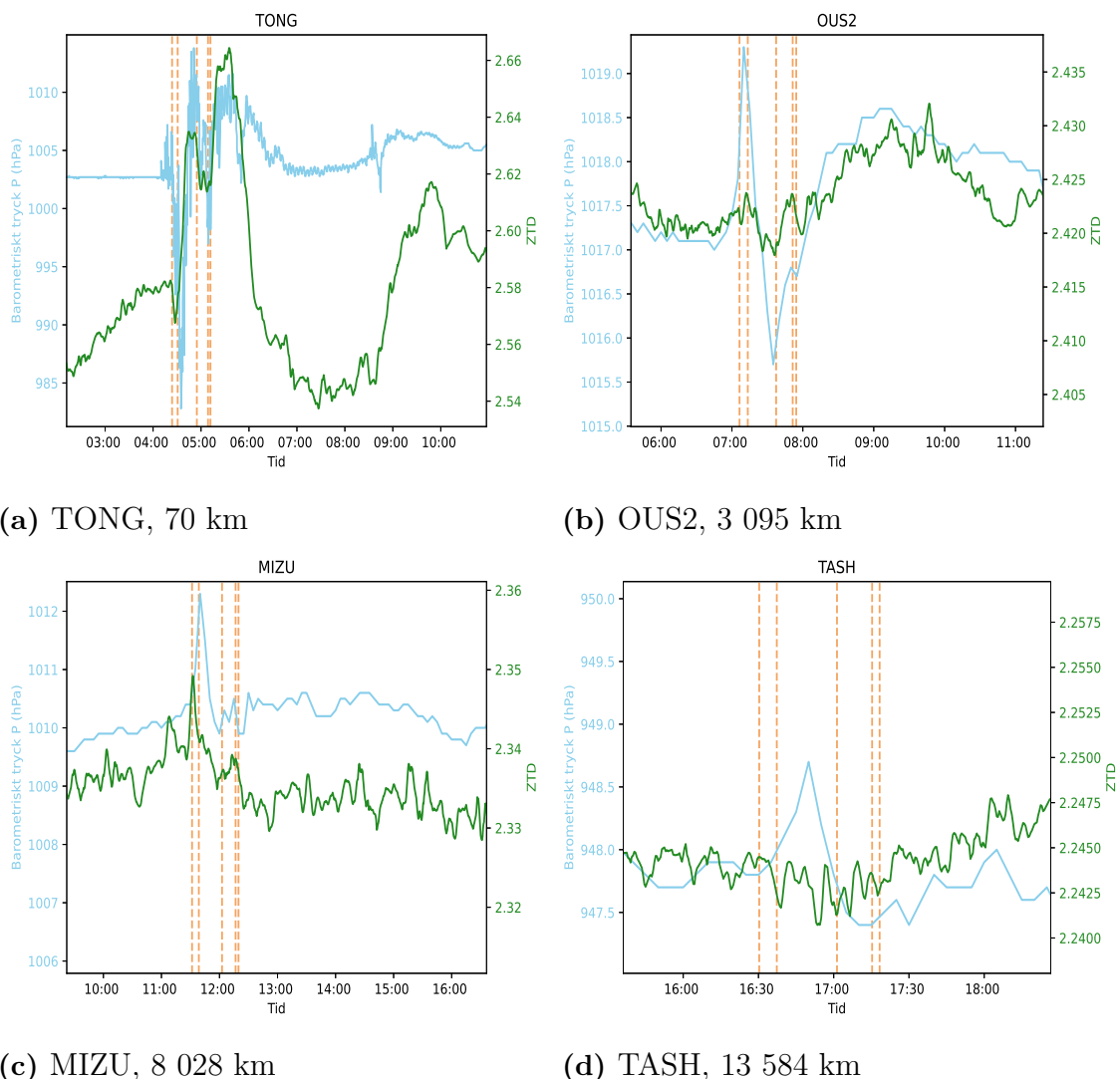
(f) CKIS, 1620 km

Figur 4.2: ZTD [m] för närliggande stationer. Det givna avståndet under varje figur är avståndet från vulkanutbrottet till stationen.

4.2 Uppmätt Zenith Total Delay samt lufttryck

I det här avsnittet presenteras ZTD tillsammans med lufttryck för stationerna TONG, MIZU, OUS2 samt TASH. Den ljusblå grafen motsvarar barometriskt tryck i hPa, medan den mörkgröna svarar mot ZTD. I graferna har även orangea, streckade linjer i vertikalled infogats vid de tidpunkter tryckvågorna estimerats anlända.

Av Figur 4.3a framgår ZTD samt tryck för stationen TONG. Notera hur båda storheter ökar kraftigt med start vid tiden för den första anländande tryckvågen, där någon märkbar fördröjning inte tycks föreligga. För stationerna på längre avstånd från utbrottsplatsen, se Figur 4.3b, 4.3c, 4.3d, kan ingen tydlig trend i förändring av ZTD observeras.



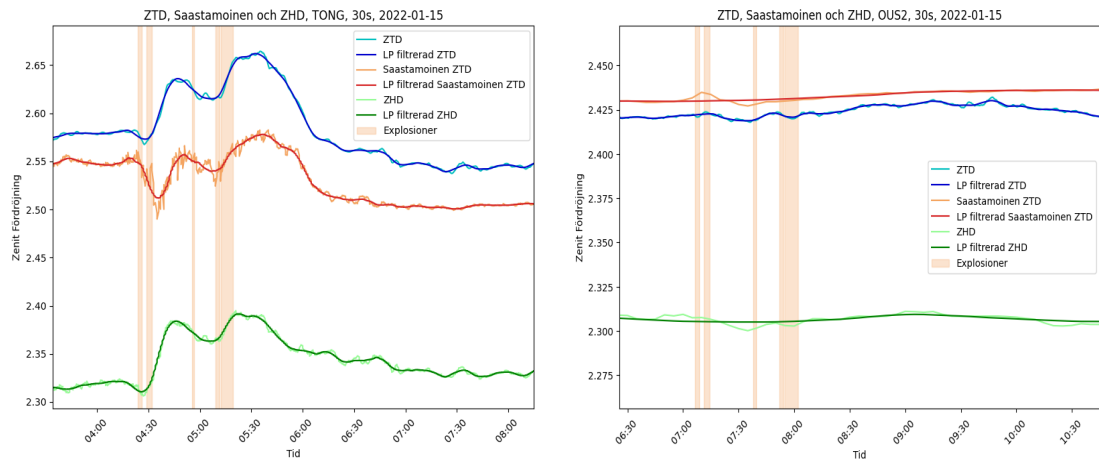
Figur 4.3: ZTD [m] och lufttryck [hPa] för stationer längre från vulkanutbrottet. Avståndet under varje figur är distansen från HTHH till stationen.

4.3 Eliminering av Zenith Wet Delay

Detta avsnitt innehåller de grafer som erhållits då ZWD subtraheras från ZTD, varefter ZHD erhållits. Beräkningarna är gjorda på stationerna TONG, OUS2, MIZU samt TASH och resultatet är sammanställt i Figur 4.4. Av graferna framgår även resultat beräknade med Saastamoinens formel, de lågpasfilterade resultaten samt de tider tryckvågorna för respektive explosion förväntas nå stationen.

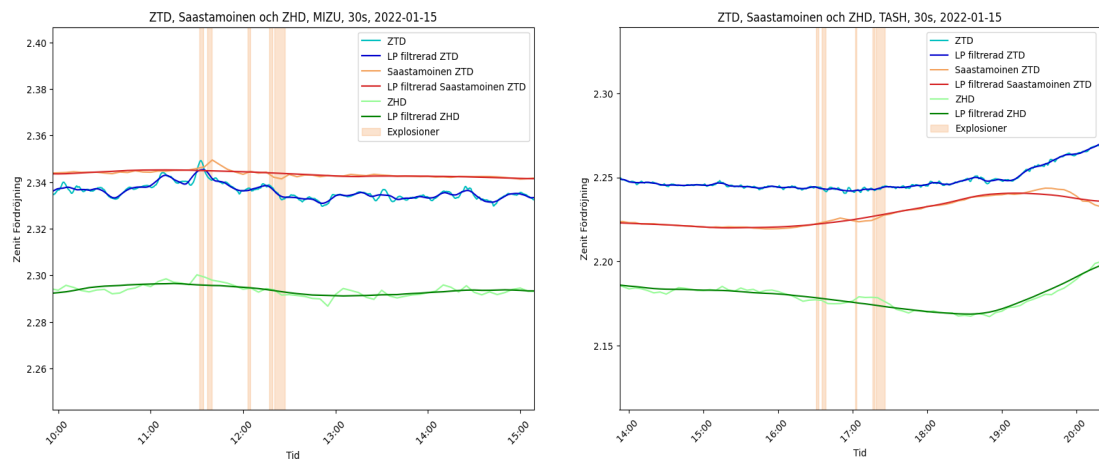
Av graferna för TONG, se Figur 4.4a, framgår att trenderna för ZTD och ZHD är relativt lika. Både ZTD och ZHD varierar därav på liknande, förväntade sätt vid de estimerade tiderna för när tryckvågorna för respektive station ska anlända. Grafen för OUS2, Figur 4.4b, redogör för hur variationen i ZTD samt ZHD båda varierar mycket litet. Notera att OUS2 är belägen 3095 km från HTHH, men att det däremellan förekommer både land samt högre berg. Motsvarande grafer för MIZU, se Figur 4.4c, är desto mer varierande. Värt att notera är att MIZU är belägen 8028~km från HTHH men att ingen landmassa är belägen mellan utbrottsplatsen och mätstationen. Av Figur 4.4d framgår hur avvikelserna för både ZTD och ZHD inte tycks vara stora nog för att enstaka avvikelser ska gå att urskilja.

4. Resultat



(a) TONG, 70 km

(b) OUS2, 3 095 km



(c) MIZU, 8 028 km

(d) TASH, 13 584 km

Figur 4.4: ZTD [m] och ZHD [m] för stationer längre från vulkanutbrottet. Avståndet under varje figur är distansen från HTHH till stationen.

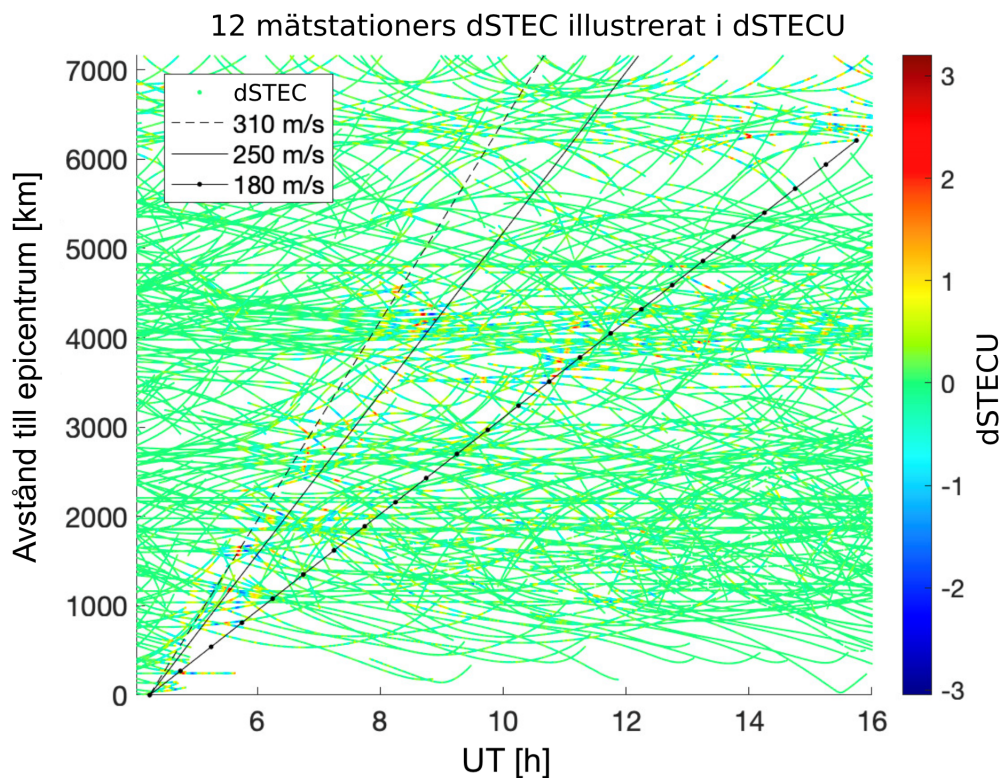
4.4 Total Electron Content för 12 stationer

Den totala elektrontätheten som redovisas har bestämts med data från 12 GNSS-markstationer, vardera med tre stationer i olika riktningar. Efter bearbetning av RINEX filer i mjukvaran IonKit-NH, erhålls 12 filer med information om varje satellits avvikelse i STEC, dSTEC. Notera att avvikelsen inte är projicerad i vertikalled utan i riktning mot satelliten, varför dSTEC erhållits. De stationer som använts och hur många unika satelliter som förekommer i respektive dSTEC-fil presenteras i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: GNSS markstationer som använts, samt hur många satelliter respektive station har dSTEC-data på.

Station	Antal satelliter
TONG	18
CKIS	21
THTI	34
CHUR	50
GAMB	60
PTVL	61
CHTI	67
TOW2	69
UCLU	70
KOKB	70
LAUT	71
SCTB	75

I Figur 4.5 framgår satelliternas banor i förhållande till distans och med tillhörande avvikelser i STEC. Färgvariationerna tycks bilda ett mönster. Notera att tre linjer svarandes mot hastigheterna 180 m/s, 250 m/s respektive 310 m/s har infogats i figuren. Samtliga linjer startar vid kl. 04:25, vilket antas vara tiden för när den största explosionen tog vid [40].



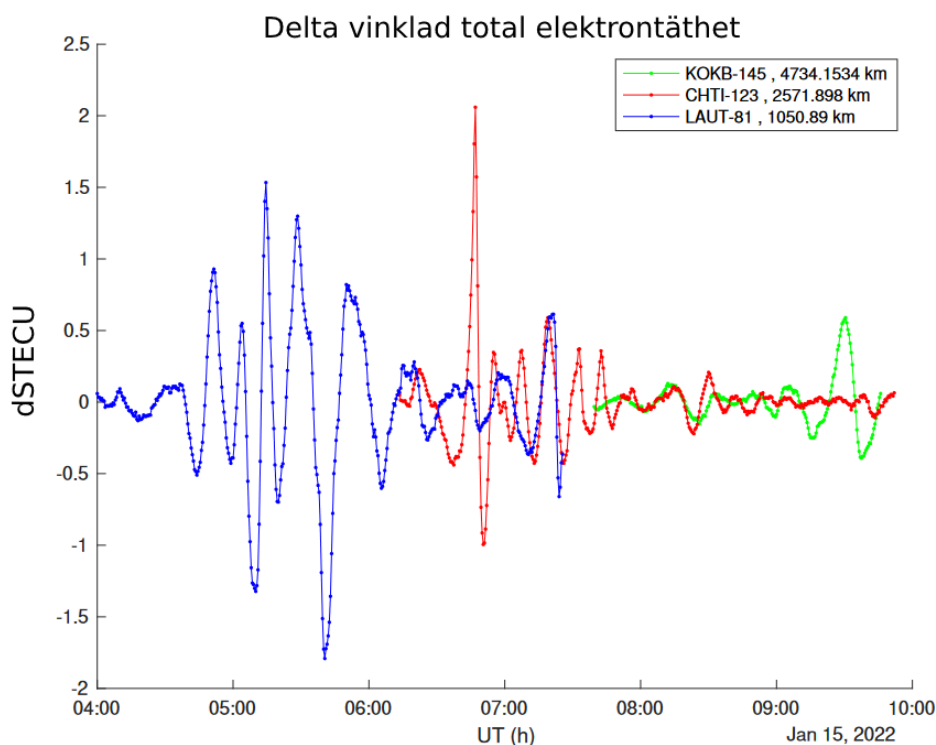
Figur 4.5: Karta över satellitbanornas avvikelser illustrerat i dSTECU. Notera linjerna och de mönster som framgår av färgskalan.

4.5 Total Electron Content för enskilda satelliter

Här visas dSTEC, för ett representativt urval av stationer på olika avstånd från HTHH. Avstånden har beräknats utifrån den longitud och latitud för signalens skärningspunkt med jonosfären.

Av Figur 4.6 framgår tre grafer för uppmätt avvikelse i STEC, vilket är STEC som inte projicerats i vertikal-led utan taget direkt i satellitens riktning. Avvikelsen, dSTECU, varierar kring ett normaliserat värde som här satts till noll. Av figuren framgår även medelvärdet av avståndet från skärningspunkt till utbrottsplats under perioden.

För den första grafen, hörandes till station-satellit kombinationen LAUT-81, där 81 motsvarar R21 (GLONASS satellit 21), ges som tydligast avvikelser efter kl. 05 och under en dryg halvtimme därefter, där den största avvikelsen erhålls vid ungefär 05:45. Detta kan svara mot hastigheter så låga som 180 m/s upp mot 500 m/s. Motsvarande värden för grafen CHTI-123, där 123 motsvarar E03 (Galileo satellit tre), respektive KOKB-145, där 145 motsvarar E25 (Galileo satellit 25), har beräknats uppgå till drygt 300 m/s samt 280 m/s då avvikelserna ges vid kl. 06:47 respektive 09:31.



Figur 4.6: dSTEC för tre satelliter belägna vid olika avstånd från HTHH. Avståndet är angivet i kilometer och dSTEC uppmätt i dSTECU.

5

Diskussion

I det här avsnittet tolkas och diskuteras det resultat som presenterats i föregående avsnitt. Exempelvis kommer ZTD att diskuteras med hjälp av tryckdata och Saastamoinens formel, varefter STEC analyseras och diskuteras. Vidare avhandlas de felkällor som kan ha påverkat det resultat som erhållits.

5.1 Zenith Total Delay

Resultatet talar för att ZTD går att använda för att undersöka utbrottet av HTHH, men att det primärt fungerar för de mätstationer som är belägna nära utbrottsplatsen. Av observationen framgår hur förändringen av ZTD vid den estimerade tiden för tryckvågens ankomst tycks variera som kraftigast för TONG, medan motsvarande resultat för övriga stationer är mindre explicit. Som exempel varierar ZTD för CKIS, se Figur 4.2f, mellan 2,43 m och 2,45 m medan motsvarande värden är cirka 2,56 m och 2,66 m för TONG.

Att variationen är mindre för mer avlägsna stationer är ett förväntat resultat då tryckvariationerna i atmosfären blir mindre med ökande avstånd från utbrottsplatsen, varför detsamma gäller ZTD-variationen. Det resultatet erhöles tämligen tidigt under projektets gång, varpå metoden kom att utökas med analys av tryckdata.

5.1.1 Zenith Total Delay i kombination med tryckdata

De avstånds begränsningar som präglar ZTD framgår även av figurerna i Avsnitt 4.2. Figurerna redogör för hur trenderna i framtagna tryckdata i varierande grad efterföljs av ZTD, tämligen omedelbart. Vid jämförelse av stationerna vars tryckdata och ZTD plottats går det att observera att ju längre en station är belägen från utbrottsplatsen, desto mindre uttalade är likheterna mellan trenderna för tryck respektive ZTD.

Tryckdata och ZTD för stationen TONG, vilket framgår i Figur 4.3a, uppvisar en mycket likartad förändring strax innan, under och efter de estimerade tiderna för vågens ankomst. Motsvarande mönster för OUS2 som är belägen 3095 km från vulkanen är avsevärt mindre utpräglad. Värt att notera i det här fallet är att motsvarande graf för MIZU visar på ett resultat där trenderna återigen är tydliga. Genom att betrakta mätstationernas geografiska lägen framgår att OUS2 först nås av tryckvågen efter att den passerat större landmassor, däribland bergskedjor som skärmar

mätstationen från vågen. Att avvikelser i ZTD är tydligare för MIZU är således väntat, eftersom stationen nås av tryckvågen efter att den passerat öppet hav.

Vid beräkning av förändringen i ZTD med Saastamoinens formel framgår att resultatet är förväntat. Det beror på den tryckförändring den annalkande vågen kommer orsaka resulterar i en ZTD-förändring som inte går att särskilja från de variationer som förekommer på grund av vädervariationer i troposfären, ZWD-delen av ZTD, liksom brus.

För att eliminera påverkan av ZWD inhämtades meteorologiska data. Att subtrahera dessa data från ZTD-data tycktes däremot inte göra trenderna tydligare. Som exempel kvarstod de många brusliknande förändringarna, varför arbetet med att urskilja tryckvågens passage inte förenklades. Därav undersöktes möjligheterna att använda meteodata inte ytterligare.

5.2 12 mätstationers uppmätta elektrontäthet

Med färgskala har 12 mätstationers uppmätta dSTEC framställts grafiskt som funktion av både tid och avstånd från utbrottets epicentrum. Av resultaten framgår att ett antal linjeliknande former kan observeras ur färgskalan. Tre linjer med olika lutning 310 m/s, 250 m/s och 180 m/s har lagts till grafen, vilket var olika hastigheter som genom prövning visades överensstämma bäst med de erhållna STEC-linjerna. Då tidigare studier erhållit ett motsvarande värde på drygt 300-320 m/s bedömdes resultatet rimligt. Däremot skulle även hastigheter så låga som 180 m/s kunna bedömas giltiga, varför resultaten är svårtolkade.

5.3 Vinklade totala elektrontäthet för respektive station

Genom att bestämma den vinklade totala elektrontätheten för ett flertal satelliter med olika avstånd för skärningsplatsen med jonosfären kunde STEC användas för analys av tryckvågen. Av Figur 4.6 framgår ett representativt urval av de grafer som erhöles. Med ett estimerat värde för tidsintervallet då vågen passerade respektive punkt kunde ett approximativt värde för dess hastighet bestämmas. Genom att iterera hastighetsbestämningen för ett flertal punkter gavs en approximativ hastighet inom intervallen cirka 180-500 m/s. Det stämmer delvis överens med de linjer som approximerades efter de mönster som kunde observeras i dSTEC-avvikelsen. Troligen är hastigheterna över 300 m/s feluppmätta på grund av att det var synnerligen svårt att finna ett tillvägagångssätt där avvikelser för rätt exponering kunde urskiljas.

Vidare framgår av Figur 4.6 hur kartläggning av tryckvågen även är möjligt på större avstånd jämfört med ZTD. dSTEC förefaller således vara att föredra för analys av tryckvågen vid avlägsna stationer. Däremot framgår inte avvikelser i dSTEC orsakade av passage över landmassor eller skärmning av bergskedjor lika explicit som

för ZTD.

Att undersöka dSTEC och hur satellitdata skiljer sig för de fyra väderstrecken i förhållande till en specifik mätstation hade med fördel kunnat göras i framtida studier. Resultaten i fråga hade då kunnat ge ytterligare information om hur tryckvågens utbredning varierar över avstånd och i olika riktningar.

5.4 Datainsamling och felkällor

Enbart data från den 15:e januari är inkluderade i de slutgiltiga resultaten. Att ha exkluderat ZTD för den 14:e och 16:e januari bedömdes berättigat då den tryckförändring den andra passagen av tryckvågen orsakade inte gav en förändring av ZTD stor nog att urskilja bland brus eller lokala förändringar av ZWD.

Värt att notera är att mer väl upplösta data troligen inte hade resulterat i ett tydligare resultat. I stället erhöles endast fler variationer, varför analysen försvårades. Då tidigare studier valt att använda data upptagen var 30:e sekund samt eftersom tillgängliga tryckdata hade en upplösning svarandes mot var 30:e sekund valdes den upplösningen. Valet kan visserligen bidragit till att snabba variationer inte togs i beaktning. Emellertid bedöms felkällan i fråga inte ha kunnat decimera erhållat resultat avsevärt eftersom det primärt är ihållande trender som är av intresse.

Det faktum att tryckvågens hastighet estimerades uppgå till 310 m/s är ytterligare en felkälla att ta i beaktning. Även om tidigare studier, likt omnämnt i teorin, funnit att storleken av hastigheten uppgått till approximativt 310 m/s är det sannolikt att den varierar mellan de fyra väderstrecken, likväl som på olika avstånd från utbrottsplatsen. Att 310 m/s må vara en inkorrekt approximation av utbredningshastigheten i samtliga riktningar innebär att de vertikala linjer som infogats i samtliga grafer kan vara missvisande. Vidare kan hastigheten i troposfären och jonosfären vara olika, varför hastigheten, vilka studierna bestämt i jonosfären, eventuellt är missvisande.

Att variationen i tryckvågens hastighet i jonosfären är förhållandevis stor tros bero på två faktorer. Dels har en elevationsvinkel på 7° använts, vilket tros ha givit upphov till att atmosfärsinnehållet genom vilket signalen passerat ökat mätosäkerheten. Faktorer likt luftfuktighet och lokala tryckvariationer skulle kunna resultera i en stor mätosäkerhet som kan ha decimerat de erhållna resultaten validitet. Att använda en större elevationsvinkel i framtida studier hade därav kunnat ge mindre mätosäkerhet och en mer precis hastighetsbestämning. Det hade visserligen skett på bekostnad av mindre datamängder, varför en avvägning måste göras.

Därtill gäller att metoden som användes vid hastighetsbestämningen i jonosfären var approximativ. Att bedöma vilken avvikelse som korresponderade mot rätt explosion var synnerligen svårt och att fel uppstått under denna procedur är således ytterst sannolikt. Inför framtida studier bör en bättre metod utvecklas eftersom precisionen då förbättras avsevärt. I denna studie har hastighetsbestämningen därav främst genomförts med ZTD och att i framtida studier jämföra hastigheten i troposfären

med motsvarande i jonosfären vore följaktligen av intresse.

Vidare har mätfel för klockor samt mätstationers signalmottagning försumrats. Att fel som antagits vara försumbara haft en signifikant påverkan på det erhållna resultatet är osannolikt, men bör tas i beaktning fastän eliminering av felen är svår genomförbart.

6

Slutsats

I den här rapporten har möjligheterna att undersöka utbredningen av en tryckvåg med GNSS-data avhandlats. Bearbetade GNSS-data har hämtats från mätstationer geografiskt utspridda kring HTHH, som är vulkanen vars utbrott har undersökts. För bearbetningen användes dels med mjukvaran GipsyX, dels Matlabkod utvecklad av Long Tang. Tillsammans gav dessa analyserbara data för jonosfärens elektron-täthet samt signalfördröjningen i troposfären.

De resultat som erhållits påvisar användbarheten av att kombinera både ZTD- samt STEC-data vid analys av tryckvågsutbredning. Erhållna resultat skulle således kunna bidra till att underlätta valet av att använda ZTD eller STEC vid undersökning av vulkanutbrott, eftersom rapporten påvisat hur de är användbara i olika avseenden. STEC är att föredra såvida ett vulkanutbrott ska studeras med data upptagna på ett stort avstånd från utbrottet. Fördelarna kommer av att de tryckvariationer tryckvågen från HTHH orsakade inte var stora nog att ge upphov till en märkbar förändring av ZTD på stora avstånd från utbrottsplatsen. Hade vågen dessutom passerat landmassa innan mätstationen nåddes var variationen ännu svårare att urskilja bland brus. Det var inte fallet för STEC eftersom även små tryckvariationer gav märkbara avvikelser, varför STEC var att föredra på större avstånd eller för stationer som skärmas av landmassa.

Däremot bedömdes ZTD vara användbart för kartläggning av tryckvågens utbredning i närheten av utbrottsplatsen och för hastighetsbestämning med hög precision. Hastigheten hos den tryckvåg HTHH orsakade med ZTD-data kunde fastställas vara drygt 310 m/s. Vid analys av STEC-data erhöles ett tämligen stort intervall för vilken hastighet vågen propagerade med. Med kombinationen av ZTD- samt STEC-analys kunde tryckvågens utbredning kartläggas med hjälp av GNSS, varför syfte och frågeställningar bedöms vara uppfyllda och besvarade.

Referenser

- [1] L. Tang, "IonKit-NH: a MATLAB-based toolkit for ionospheric detection of natural hazard IonKit-NH: a MATLAB-based toolkit for ionospheric detection of," 2023, [Online]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2308071/v2.
- [2] Chalmers Tekniska Högskola, "Rüdiger Haas: Research," [Online]. Tillgänglig: <https://research.chalmers.se/person/rudiger> (hämtad 2024-05-07).
- [3] Chalmers Tekniska Högskola, "Jan Johansson: Research," [Online]. Tillgänglig: <https://research.chalmers.se/person/jmj> (hämtad 2024-05-07).
- [4] International GNSS Service, "Products," [Online]. Tillgänglig: <https://igs.org/products/> (hämtad 2024-02-09).
- [5] E. Astafyeva, "Ionospheric Detection of Natural Hazards," 4, dec. 2019, s. 1265–1288. DOI: 10.1029/2019RG000668.
- [6] S. Madry, "Top Ten Things to Know About GNSS," 2015, s. 99–100. DOI: 10.1007/978-1-4939-2608-4_8.
- [7] National Aeronautics and Space Administration, "GipsyX," [Online]. Tillgänglig: <https://gipsyx.jpl.nasa.gov/> (hämtad 2024-02-19).
- [8] E. Aa, S. R. Zhang, P. J. Erickson m. fl., "Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption," *Space Weather*, årg. 20, nr 7, juli 2022, [Online], ISSN: 15427390. DOI: 10.1029/2022SW003101. (hämtad 2024-02-09).
- [9] H. Donovan, "Reduction of the Minimum Elevation Angle for NASA Satellite Laser Ranging Tracking Operations," Lanham, april 2001, [Online]. Tillgänglig: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/lw12/docs/Donovan_Reduction%20in%20the%20Minimum%20Elevation.pdf (hämtad 2024-02-19).
- [10] European Space Agency for the Space Program, "Whats GNSS?" [Online]. Tillgänglig: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss> (hämtad 2024-02-09).
- [11] P. J. Teunissen och O. Montenbruck, "Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems," 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- [12] National Aeronautics and Space Administration, "CDDIS | | Techniques | GNSS | GNSS Overview," [Online]. Tillgänglig: https://cddis.nasa.gov/Techniques/GNSS/GNSS_Overview.html (hämtad 2024-02-17).

- [13] R. Balasubramaniam och C. Ruf, "Characterization of rain impact on L-Band GNSS-R ocean surface measurements," *mar*s 2020, s. 111 607. DOI: 10.1016/J.RSE.2019.111607.
- [14] Britannica Academic, "Geoid," [Online]. Tillgänglig: <https://academic-eb-com.eu1.proxy.openathens.net/levels/collegiate/article/geoid/36465> (hämtad 2024-04-09).
- [15] European Space Agency, "An intuitive approach to the GNSS positioning," [Online]. Tillgänglig: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=An_intuitive_approach_to_the_GNSS_positioning (hämtad 2024-02-17).
- [16] European Space Agency, "GNSS signal," [Online]. Tillgänglig: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GNSS_signal (hämtad 2024-04-09).
- [17] Lantmäteriet, "GPS," [Online]. Tillgänglig: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/GPS-och-andra-GNSS/GPS/> (hämtad 2024-03-03).
- [18] GPS: The Global Positioning System, "Space Segment," [Online]. Tillgänglig: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> (hämtad 2024-02-09).
- [19] J. Awange, "GNSS Environmental Sensing," 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-58418-8. Tillgänglig: <http://www.springer.com/series/3234>.
- [20] T. S. Logsdon, "GPS," Britannica Academic, [Online]. Tillgänglig: <https://academic-eb-com.eu1.proxy.openathens.net/levels/collegiate/article/GPS/396001> (hämtad 2024-04-15).
- [21] European Space Agency, "ESA - What is Galileo?" [Online]. Tillgänglig: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo (hämtad 2024-03-24).
- [22] F. Dobran, *Volcanic Processes: mechanisms in material transport*, 1. utg. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, vol. 590, s. 1–590. (hämtad 2024-02-12).
- [23] Britannica Academic, "Magma," [Online]. Tillgänglig: <https://academic-eb-com.eu1.proxy.openathens.net/levels/collegiate/article/magma/50002> (hämtad 2024-04-26).
- [24] S. J. Day, "Volcanic Tsunamis," i *The Encyclopedia of Volcanoes*, [Online], Elsevier, 2015, s. 993–1009. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00058-4. (hämtad 2024-03-19).
- [25] Nationalencyklopedin, "Pyroklastiskt material," [Online]. Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/pyroklastiskt-material> (hämtad 2024-03-25).
- [26] National Institute of Water and Atmospheric Research, "Layers of the atmosphere," [Online]. Tillgänglig: <https://niwa.co.nz/education-and-training/schools/students/layers> (hämtad 2024-02-14).
- [27] K.G. Budden, *The propagation of radio waves*, 1. utg. Cambridge University Press, 1985, s. 11–76, ISBN: 0-521-25461-2.

-
- [28] International GNSS Service, "Formats and Standards," [Online]. Tillgänglig: <https://igs.org/formats-and-standards/> (hämtad 2024-05-07).
- [29] M. Chen, "What is RINEX format and its latest version?" [Online]. Tillgänglig: <https://igs.org/formats-and-standards/> (hämtad 2024-05-07).
- [30] W. Bertiger, Y. Bar-Sever, A. Dorsey m. fl., "GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research," *Advances in Space Research*, årg. 66, s. 469–489, 2020, [Online]. DOI: 10.1016/j.asr.2020.04.015. Tillgänglig: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> (hämtad 2025-02-26).
- [31] L. Tang, "IonKit-NH," [Online]. Tillgänglig: <https://github.com/tanggdut/IonKit-NH/tree/main> (hämtad 2024-04-15).
- [32] L. Tang, Z. Li och B. Zhou, "Large-area tsunami signatures in ionosphere observed by GPS TEC after the 2011 Tohoku earthquake," s. 93, 2018, [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0759-1>.
- [33] P. Benevides, J. Catalão, P. Miranda och M. J. Chinita, "Analysis of the relation between GPS tropospheric delay and intense precipitation," 2013, [Online]. DOI: 10.1117/12.2028732.
- [34] A. Sam-Khaniani och R. Naeijian, "Evaluation of modified Saastamoinen ZTD model using ground-based GPS observation over Iran," *Earth Science Informatics*, årg. 16, nr 3, s. 2339–2353, sept. 2023, [Online], ISSN: 18650481. DOI: 10.1007/S12145-023-01033-4/TABLES/4.
- [35] S. Kumar Sunori Mehul Manu Amit Mittal Pradeep Juneja, "Savitzky-Golay Filter Design for Removing Noise from EEG Signal," [Online]. DOI: 10.1109/ICIDCA56705.2023.10100215.
- [36] H. Alkan och H. Celebi, "The Implementation of Positioning System with Trilateration of Haversine Distance," 2019, [Online], s. 1–6. DOI: 10.1109/PIMRC.2019.8904289.
- [37] D. Tian, L. Uieda, W. J. Leong m. fl., *PyGMT: A Python interface for the Generic Mapping Tools*, version 0.12.0, [Online]. DOI: 10.5281/zenodo.11062720. Tillgänglig: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11062720>.
- [38] T. Tonegawa och Y. Fukao, "Mesospheric pressure source from the 2022 Hunga, Tonga eruption excites 3.6-mHz air-sea coupled waves," 2023, [Online]. DOI: 10.1126/sciadv.adg8036.
- [39] L. Tang, "Ionospheric disturbances of the January 15, 2022, Tonga volcanic eruption observed using the GNSS network in New Zealand," *GPS Solutions*, årg. 27, s. 53, 2023. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01395-8> (hämtad 2024-04-15).
- [40] E. Astafyeva, B. Maletckii, T. D. Mikesell m. fl., "The 15 January 2022 Hunga Tonga Eruption History as Inferred From Ionospheric Observations," 10, maj 2022, [Online]. DOI: 10.1029/2022GL098827.

A

Python skript

A.1 GMT karta

```
import numpy as np
import pygmt
import os

# Path to current directory
current_directory = os.path.dirname(os.path.abspath(
    __file__))

# Find coordinates document and variables for latitude and
# longitude
file_cord = os.path.join(current_directory, 'koordinater.
    txt')
file_names = os.path.join(current_directory, '
    koordinater_pos.txt')
data = np.loadtxt(file_cord)
data_names = np.genfromtxt(file_names, dtype='str')
la, lo = data[:, 0], data[:, 1]
names = data_names[:,]

# Honga tunga ha apai coordinates
la_hthh = -20.545
lo_hthh = -175.3925

fig = pygmt.Figure()
fig.coast(
    # Set the x-range (East/West) and the y-range (North/
    # South)
    region="173/203/-23/-7",
    # Set projection to Mercator, and the figure size to
    # 15 centimeters
    projection="M15c",
    # Set the color of the land
    land="forestgreen",
    # Set the color of the water
```

```
    water="skyblue",
    # Display the national borders and set the pen
      thickness to 0.5p
    borders="1/0.5p",
    # Display the shorelines and set the pen thickness to
      0.5p
    shorelines="1/0.5p",
    # Set the frame to display annotations and gridlines
    frame="af",
)

fig.plot(x=lo, y=la, style="s0.2c", fill="yellow", pen="
    black", label = 'GNSS markstationer')
fig.plot(x=lo_hthh, y=la_hthh, style="t0.2c", fill="red",
    pen="black", label = 'Hunga Tonga Hunga Ha'apai ')
fig.legend()
fig.show()
```

A.2 Distans

```
from numpy import sin, cos, arcsin, pi, round, sqrt
import numpy as np
import os

# Path to current directory
current_directory = os.path.dirname(os.path.abspath(
    __file__))

# Find coordinates document and variables for latitud and
  longitud
file = os.path.join(current_directory, 'koordinater.txt')
data = np.loadtxt(file)
la2, lo2 = data[:, 0], data[:, 1]

# Honga tunga ha apai coordinates
la1= -20.545
lo1= -175.3925

# Ground stations name
pos= ['KOKB:',
'UCLU',
'CHUR',
'CKIS',
'THTI',
'GAMB',
```

```
'TONG',
'CHTI',
'SCTB',
'LAUT',
'USP1',
'PTVL',
'TOW2',
'MIZU',
'FTNA',
'SAMO',
'TUVA',
'TASH',
'OUS2'
]

# Degrees to radians
def deg2rad(degrees):
    radians = degrees * pi / 180
    return radians
# Haversive formula
def getDistance(latitude1, longitude1, latitude2,
    longitude2):
    delta_lo = longitude2 - longitude1
    delta_la = latitude2 - latitude1
    r = 6371 # earth radius
    distance = (2 * r * arcsin(sqrt(sin(deg2rad(delta_la
        /2))**2 + cos(deg2rad(la1)) * cos(deg2rad(la2)) *
        sin(deg2rad(delta_lo/2))**2)))
    return round(distance,2) # kilometers

# Stores estimated time it takes for a wave (from HTHH to
    several ground stations)
est_time = []

# Calculating estimated time
for i in range(data.shape[0]): #
    Check the number of rows in data file
    distance = getDistance(la1,lo1,la2,lo2) # Input
        of the cordinates
    p_wave = (((distance[i]*1000)/310) /60)
        # Velocity 310 m/s or 340 m/s.
        /60 because we want minutes.
    est_time.append(p_wave)
    print(pos[i] , 'Avstand:', distance[i], 'km, ljudvag:
        ', p_wave, 'min')
```

A. Python skript

```
# Make a dictionary, to easy copy into other python
  scripts
distance_dict = dict(zip(pos,est_time))

print( '\n', distance_dict, '\n')
print(data.shape[0])
```

A.3 ZTD

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
from scipy.signal import savgol_filter
from scipy.fft import fft
from datetime import datetime, timedelta
from operator import add
import os

# ZTD Stations:
# TONG, OUS2, MIZU, TASH, FTNA, LAUT, SAMO, TUVA, USP1,
  CKIS
# Choose Station:
station = "TONG"

# Settings for plot:
# Enable ZTD Plot:
ztd = True
# Enable Saastamoinen plot. Only available for: TONG,
  OUS2, MIZU, TASH
saastamoinen = False
# Enable Savitzky Golay filter:
savitzky = True
# Enable Errorbars for ZTD:
error_ZTD = False
# Enable explosions estimate:
estimate = True
# Enable png save:
save = False
# Enable ZHD. Only available for: TONG, OUS2, MIZU, TASH
enable_zhd = False

# Dictionary of minutes until pressurewave at 310 m/s:
est_time_dict = {'TONG': 3.7801075268817206, 'LAUT':
  44.08924731182796, 'USP1': 37.58387096774194,
  'MIZU': 431.647311827957, 'FTNA':
  40.39784946236559, 'SAMO':
  45.13494623655914,
  'TUVA': 78.3516129032258, 'TASH':
  730.3059139784946, 'OUS2':
  166.41559139784945,
  'CKIS': 87.14139784946236}

# Convert time tag
```

```
sec = '30s'
def sec2date(sec):
    ref_time = datetime(2000, 1, 1, 12, 0, 0)
    return ref_time + timedelta(seconds=sec)

# Get path
current_directory = os.path.dirname(os.path.abspath(
    __file__))
subfolder_path = os.path.join(current_directory, 'ZTD_'+
    sec+"_ny")

# Save location for plots
autosave_path = os.path.join(current_directory, '
    Autosave_plots' )

# Read contents
file_path = os.path.join(subfolder_path, '2022-01-15_7'+
    station+'.txt')

data = np.loadtxt(file_path)

# Extract time, second column and fourth column. Delta is
    the error
time_raw, column2, delta, column4 = data[:, 0], data[:,
    1], data[:, 2], data[:, 3]

time = list(map(sec2date, time_raw))

# Sum the columns
sum= column2 + column4

# A variable for estimated wave arrival
minutes=0
minutes_est=est_time_dict[station]

# Plot:
plt.figure(1)
if ztd:
    plt.plot(time, sum, label="ZTD ", color='c')
    if savitzky:
        # Low pass filter of ZTD, Saastamoinen ZTD and
            ZHD
        savitzky_sum= savgol_filter(sum, 40, 2)
        plt.plot(time, savitzky_sum, label="LP filterrad
            ZTD", color='mediumblue')
```

```
# Only if Saastamoinen plot is enabled:
if saastamoinen:
    # Gets location of Meteo-Rinex file
    subfolder_path_t = os.path.join(current_directory, '
    Meteo_data')
    file_path_t = os.path.join(subfolder_path_t, station+
    '_meteo_20220115.txt')
    data_t = np.loadtxt(file_path_t) # Reads rinex file
    # Creates lists of the different parameters in Rinex
    file
    year, month, day, hour, minutes, pressure, temp, rhum
    = data_t[:, 0], data_t[:, 1], data_t[:, 2],
    data_t[:, 3], data_t[:, 4], data_t[:, 6], data_t
   [:, 7], data_t[:, 8]
    # Extracts and creates correct date-time format
    time_Meteo = [datetime(year=2022, month=1, day=int(d)
    , hour=int(h), minute=int(m)) for d, h, m in zip(
    day, hour, minutes)]
    # Different coordinates for the different stations
    if station == "TONG":
        phi = -0.369
        height = 0.00563
    elif station == "OUS2":
        phi = -0.8005
        height = 0.00261
    elif station == "MIZU":
        phi = 0.683
        height = 0.0117
    elif station == "TASH":
        phi = 0.721
        height = 0.04397

    i = 0
    # e is a part of the complete Saastamoinen equation
    to simplify the code
    e = []
    for t in temp:
        e.append((6.1078 * math.exp((17.269 * float(t))/(
        float(t) + 273.3))) * (float(rhum[i])/100))
        i = i + 1

    # Calculate the Zenit wet delay
    j = 0
    ZWD_saas = []
    for z in e:
        ZWD_saas.append(0.0022768 * ((0.05 + (1255/(temp[
```

```
        j] + 273.15))) * z) / (1-0.00266 * math.cos(2
        * phi - 0.00028 * height)))
    j = j + 1
# Calculate the Zenit hydrostatic delay
ZHD_saas = []
for p in pressure:
    ZHD_saas.append(0.0022768 * p / (1-0.00266 * math
        .cos(2 * phi) - 0.00028 * height))
# Add Wet delay and Hydrostatic delay to get Total
delay
ZTD_saas = list(map(add, ZWD_saas, ZHD_saas))
# Plot Saastamoinen calculated total delay
plt.plot(time_Meteo, ZTD_saas, label="Saastamoinen
    ZTD", color='sandybrown')

if savitzky:
    # Low pass filter of Saastamoinen ZTD
    savitzky_saas= savgol_filter(ZTD_saas, 40, 2)
    plt.plot(time_Meteo, savitzky_saas, label="LP
        filtrerad Saastamoinen ZTD", color='tab:red')

if error_ZTD:
    plt.fill_between(time, sum - delta, sum + delta,
        alpha=0.3, label='OsÅkerhetsintervall')

# Save PNG file of plot
if save:
    plt.savefig(autosave_path+'/' + station+'.png', format=
        'png')

if enable_zhd == True:
    subfolder_path_t = os.path.join(current_directory, '
        Meteo_data')
# Meteodata from stations is 5 min interval except for
TONG (30 sec)
if station == "TONG":
    subfolder_path_ZTD = os.path.join(
        current_directory, 'ZTD_30s')
else:
    subfolder_path_ZTD = os.path.join(
        current_directory, 'ZTD_300s')
file_path_t = os.path.join(subfolder_path_t, station+
    '_meteo_20220115.txt')
file_path_ZTD = os.path.join(subfolder_path_ZTD, '
    2022-01-15_7'+station+'.txt')
data_t = np.loadtxt(file_path_t)
```

```
data_ZTD = np.loadtxt(file_path_ZTD)
# Data from Meteo
year, month, day, hour, minutes, pressure, temp, rhum
    = data_t[:, 0], data_t[:, 1], data_t[:, 2],
    data_t[:, 3], data_t[:, 4], data_t[:, 6], data_t
   [:, 7], data_t[:, 8]
# Data from ZTD
time_raw, column2, delta1, column4 = data_ZTD[:, 0],
    data_ZTD[:, 1], data_ZTD[:, 2], data_ZTD[:, 3]
# Create the ZTD from the columns
ZTD = column2 + column4

# Time series for ZTD
def sec2date(sec): # Converts time tag
    ref_time = datetime(2000, 1, 1, 12, 0, 0)
    return ref_time + timedelta(seconds=sec)
time_ZTD = list(map(sec2date, time_raw))
# Time series for Meteo
time_Meteo = [datetime(year=2022, month=1, day=int(d)
    , hour=int(h), minute=int(m)) for d, h, m in zip(
    day, hour, minutes)]

# Different parameters for the stations
if station == "TONG":
    phi = -0.369
    height = 0.00563
elif station == "OUS2":
    phi = -0.8005
    height = 0.00261
elif station == "MIZU":
    phi = 0.683
    height = 0.0117
elif station == "TASH":
    phi = 0.721
    height = 0.04397

i = 0
# e is a part of the complete Saastamoinen equation
e = []
for t in temp:
    e.append(((6.1078 * math.exp((17.269 * float(t))/(
        float(t) + 273.3))) * (float(rhum[i])/100))
        i = i + 1
j = 0
# Calculate wet dealy
ZWD = []
```

```
for z in e:
    ZWD.append(0.0022768 * ((0.05 + (1255/(temp[j] +
        273.15))) * z) / (1-0.00266 * math.cos(2 * phi
        - 0.00028 * height)))
    j = j + 1
# Remove the Wet delay from Total delay to get
# Hydrostatic delay
ZHD = []
for k in range(len(ZWD)):
    ZHD.append(ZTD[k] - ZWD[k])
# Plot Hydrostatic delay
plt.plot(time_Meteo, ZHD, label="ZHD", color='
    palegreen')

# Plot Savitzky Golay:
if savitzky:
    # Low pass filter of ZHD
    savitzky_ZHD= savgol_filter(ZHD, 40, 2)
    plt.plot(time_Meteo, savitzky_ZHD, label="LP
        filtrerad ZHD", color='g')

# Estimated time of explosions
est1_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 20, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est1_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 22, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est2_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 25, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est2_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 28, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est3_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 51, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est3_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 53, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est4_start = datetime(2022, 1, 15, 5, 5, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est4_end = datetime(2022, 1, 15, 5, 7, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est5_start = datetime(2022, 1, 15, 5, 8, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est5_end = datetime(2022, 1, 15, 5, 15, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)

# Plot estimated bars
if estimate:
    # Plot vertical bars where the change is expected
```

```
col = 'sandybrown'
plt.fill_betweenx(y=[min(sum)-0.5, max(sum)+0.2], x1=
    est1_start, x2=est1_end,
    color=col, alpha=0.3, label='
    Explosioner')
plt.fill_betweenx(y=[min(sum)-0.5, max(sum)+0.2], x1=
    est2_start, x2=est2_end,
    color=col, alpha=0.3 )
plt.fill_betweenx(y=[min(sum)-0.5, max(sum)+0.2], x1=
    est3_start, x2=est3_end,
    color=col, alpha=0.3 )
plt.fill_betweenx(y=[min(sum)-0.5, max(sum)+0.2], x1=
    est4_start, x2=est4_end,
    color=col, alpha=0.3 )
plt.fill_betweenx(y=[min(sum)-0.5, max(sum)+0.2], x1=
    est5_start, x2=est5_end,
    color=col, alpha=0.3 )

# Window config
plt.ylabel("ZTD")
plt.xlabel("Tid")
plt.title("ZTD, " + station + ', ' + sec + ', ' + "
    2022-01-15")
plt.xticks(rotation=45)
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.
    DateFormatter('%H:%M '))

plt.legend()
plt.show()
```

A.4 ZTD och tryck

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from datetime import datetime, timedelta
import os

# Choose station
station = 'TONG'

# Dictionary of minutes until pressurewave at 310 m/s:
est_tid = {'TONG': 3.7801075268817206, 'MIZU':
          431.647311827957,
          'TASH': 730.3059139784946, 'OUS2':
          166.41559139784945}

# Get estimated minutes for the choosen station
minutes_est = est_tid[station]

# Get path
current_directory = os.path.dirname(os.path.abspath(
    __file__))
subfolder_path_t = os.path.join(current_directory, '
    Tryck_data')
subfolder_path_ZTD = os.path.join(current_directory, '
    ZTD_data')
file_path_t = os.path.join(subfolder_path_t, station+'
    _tryck.txt')
file_path_ZTD = os.path.join(subfolder_path_ZTD, '
    2022-01-15_7'+station+'.txt')

# Read content
data_p = np.loadtxt(file_path_t)
data_ZTD = np.loadtxt(file_path_ZTD)

# Data from file
year, month, day, hour, minutes, pressure = data_p[:, 0],
    data_p[:, 1], data_p[:, 2], data_p[:, 3], data_p[:,
    4], data_p[:, 6]

# Timeline
tidtagg = [datetime(year=2022, month=1, day=int(d), hour=
    int(h), minute=int(m)) for d, h, m in zip(day, hour,
    minutes)]
tidtagg_est = datetime(2022, 1, 15, 5, 0, 0) + timedelta(
    minutes=est_tid[station])
```

```
# Data from ZTD
time1_raw, column2_1, delta1, column4_1 = data_ZTD[:, 0],
    data_ZTD[:, 1], data_ZTD[:, 2], data_ZTD[:, 3]

# Create new array, the sum of second and fourth column
sum = column2_1 + column4_1

# Timeline for ZTD
def sec2date(sec): #
    Transform the time
    ref_time = datetime(2000, 1, 1, 12, 0, 0)
    return ref_time + timedelta(seconds=sec)

time_ZTD = list(map(sec2date, time1_raw))

# Volcanic explosions intervals
est1_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 20, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est1_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 22, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est2_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 25, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est2_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 28, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est3_start = datetime(2022, 1, 15, 4, 51, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est3_end = datetime(2022, 1, 15, 4, 53, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est4_start = datetime(2022, 1, 15, 5, 5, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est4_end = datetime(2022, 1, 15, 5, 7, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est5_start = datetime(2022, 1, 15, 5, 8, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
est5_end = datetime(2022, 1, 15, 5, 15, 30) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
style='dashed'

# Plot figure
fig, ax1 = plt.subplots()
tids_est = datetime(2022, 1, 15, 4, 20, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
plt.axvline(x=tids_est, color='sandybrown', linestyle=
    style, label='Explosioner')
tids_est = datetime(2022, 1, 15, 4, 27, 0) + timedelta(
```

```
    minutes=minutes_est)
plt.axvline(x=tids_est, color='sandybrown', linestyle=
    style )
tids_est = datetime(2022, 1, 15, 4, 51, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
plt.axvline(x=tids_est, color='sandybrown', linestyle=
    style )
tids_est = datetime(2022, 1, 15, 5, 5, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
plt.axvline(x=tids_est, color='sandybrown', linestyle=
    style )
tids_est = datetime(2022, 1, 15, 5, 8, 0) + timedelta(
    minutes=minutes_est)
plt.axvline(x=tids_est, color='sandybrown', linestyle=
    style )

# Plot barometric pressure on the first y-axis
ax1.plot(tidtagg, pressure, label='Barometriskt tryck',
    color='skyblue')
ax1.set_xlabel('Tid')
ax1.set_ylabel('Barometriskt tryck P (hPa)', color='
    skyblue')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='skyblue') # Choose
    color on y-axis

# Create second y-axis based on the first one
ax2 = ax1.twinx()
ax2.plot(time_ZTD, sum, label="ZTD", color='forestgreen')
ax2.set_ylabel('ZTD', color='forestgreen')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='forestgreen')
plt.title(station)
plt.xticks(rotation=45)
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.
    DateFormatter('%H:%M '))
plt.tight_layout()
plt.show()
```

B

Matlabkod

B.1 Tid- och distanskarta

```
clear all; close all;
%-----
% time-distance plot
%-----

dtecfiler='dTEC_12stationer/allstations_12.dte';
data=load(dtecfiler);

x=data(:,2)/3600;    % s-->h
y=data(:,9);        % km
z=data(:,5);        % TECU
%-----

epi=4.25;           % Eruption , time 4.25

xt1=[epi:0.5:16];   % timeline x-axis

% Linear lines representing velocity
yt1=310*(xt1-epi)*3600/1000; % distance in km
yt2=250*(xt1-epi)*3600/1000; % distance in km
yt3=150*(xt1-epi)*3600/1000; % distance in km

figure
hold on
scatter(x,y,1,z, '.', 'DisplayName', 'Satellitdata');
plot(xt1,yt1,'k--', 'DisplayName', '310 m/s')
plot(xt1,yt2,'k-', 'DisplayName', '250 m/s')
plot(xt1,yt3,'k.-', 'DisplayName', '180 m/s')
colormap(jet);
colorbar
xlabel('UT (h)');
ylabel('Epicenter distance (km)');
legend('show');
```

```
set(gca,'FontSize',15)
set(gca,'YLim',[0 10000])
```

B.2 dTEC-filer, antalet unika satelliter

```
clear all; close all;
%-----
% function: Check how many different satellites
%           appearing in a dTEC files.
% input:    dte files
%-----

% Name of GNSS stations
stations = {
    'samo', 'uclu', 'chur', ...
    'ckis', 'thti', 'gamb', ...
    'tong', 'chti', 'sctb', ...
    'laut', 'ptvl', 'tow2'
};

for i = 1:length(stations);
    % Load datafiles
    filename = ['dTEC_12stationer/' stations{i} '0150.22o
        .dte'];
    data = load(filename);
    % Unique values
    [unique_sat] = unique(data(:,3));
    disp([stations{i}, ' ', num2str(length(unique_sat))]
        )
end
```

B.3 dTEC filter, alla stationer

```
clear all; close all;
%-----
% function: Make a figure containing satellite dTEC
%           graphs, based on three distances from
%           satellite to HTHH, from larger dte file from
%           several stations with several satellites.
% input:    dte file
%-----

% Load file
```

```
filename = ['dTEC_12stationer/allstations_12.dte'];
data = load(filename);

% Colors to the graphs
colors = {'b','b','r','g','k','c','m','b','r','g',
         , 'k','c','g','k','c'};
c = 1;

% Set three minimum and maximum distance
min1 = 800;
max1 = 1300;

min2 = 2500;
max2 = 2800;

min3 = 4400;
max3 = 4900;

% Open the plot window
figure;
hold on;

% Three forloops which iterate satellites 1-180 and
% collect data from three
% different distances due to min and max variable.

for i = 1:180;
    % Find all row index to i-number satellite, data
    % before 12.05 pm and
    % distance interval.
    [ii] = find(data(:,3) == i & data(:,2) < 43300 & round
        (data(:,9)) > min1 & round(data(:,9)) < max1 );

    [unique_stn, ~, freq_stn] = unique(data(ii,4));      %
        Unique GNSS stations that appear
    [unique_sat, ~, freq_sat] = unique(data(ii,3));      %
        Unique satellites that appear

    % Want to have longer data series to plot
    if length(ii) > 150;
        date = datetime(num2str(data(ii, 1)), '
            InputFormat', 'yyyyMMdd');
        timetag = date + seconds(data(ii,2));
        if ~isempty(ii);                                % For
            different colors in the plot
            c = c + 1;
        end
    end
end
```

```

end
dis = mean(data(ii,9));
plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'),
      data(ii,5),[colors{c} '-'], 'DisplayName', [
      'St ' num2str(unique_stn(1)) ' ,Sa ' num2str(
      unique_sat(1)) ' Dist ' num2str(dis) ]);
% disp('Unika stationer:');
% disp(unique_stn);
end
end

% ----- 2nd distance
% Satellites from 1 to 180
for i = 1:180;
    % Find all row index to i-number satellite, data
    % before 12.05 pm and
    % distance interval.
    [ii] = find(data(:,3) == i & data(:,2) < 30000 &
               round(data(:,9)) > min2 & round(data(:,9)) < max2
               ); % Find all row index to i-number satellite

    % Want to have longer data series to plot
    if length(ii) > 250 & length(ii) < 350;
        date = datetime(num2str(data(ii, 1)), '
            InputFormat', 'yyyyMMdd');
        timetag = date + seconds(data(ii,2));

        if ~isempty(ii); % For
            different colors in the plot
            c = c + 1;
        end

        [unique_stn, ~, freq_stn] = unique(data(ii,4));
            % Unique GNSS stations that appear
        [unique_sat, ~, freq_sat] = unique(data(ii,3));
            % Unique satellites that appear

        dis = mean(data(ii,9));
        plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'),
              data(ii,5),[colors{c} '-'], 'DisplayName', [
              'St ' num2str(unique_stn(1)) ' ,Sa ' num2str(
              unique_sat(1)) ' Dist ' num2str(dis) ]);

    end
end
end

```

```

%----- 3rd distance

% Satellites from 1 to 180
for i = 1:180;
    % Find all row index to i-number satellite, data
    % before 12.05 pm and
    % distance interval.
    [ii] = find(data(:,3) == i & data(:,2) < 40000 & data
        (:,2) > 21500 & round(data(:,9)) > min3 & round(
        data(:,9)) < max3 ); % Find all row index to i-
        number satellite

    % Want to have longer data series to plot
    if length(ii) > 350 ;
        date = datetime(num2str(data(ii, 1)), '
            InputFormat', 'yyyyMMdd');
        timetag = date + seconds(data(ii,2));

        if ~isempty(ii); % For
            different colors in the plot
            c = c + 1;
        end

        [unique_stn, ~, freq_stn] = unique(data(ii,4));
            % Unique GNSS stations that appear
        [unique_sat, ~, freq_sat] = unique(data(ii,3));
            % Unique satellites that appear

        dis = mean(data(ii,9));
        plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'),
            data(ii,5), [colors{c} '-'], 'DisplayName', [
            'St ' num2str(unique_stn(1)) ',Sa ' num2str(
            unique_sat(1)) ' Dist ' num2str(dis) ]);

    end
end

xlabel('Tid (h)');
ylabel('dTEC');
title(['Delta total electron content, ']);
legend('show');

```

B.4 dTEC, tre satelliter

```
clear all; close all;
```

```
%-----  
% function: Make a figure containing 3 satellite  
%           dTEC graphs, based on three distances from  
%           satellite point to HTHH.  
% input:    dte files  
%-----  
  
% Name of GNSS stations  
station1 = 'laut' ;  
station2 = 'chti' ;  
station3 = 'kokb' ;  
  
% Load datafiles  
filename1 = ['dTEC_12stationer/' station1 '0150.22o.dte'  
            ];  
data1 = load(filename1);  
  
filename2 = ['dTEC_12stationer/' station2 '0150.22o.dte'  
            ];  
data2 = load(filename2);  
  
filename3 = ['dTEC_12stationer/' station3 '0150.22o.dte'  
            ];  
data3 = load(filename3);  
  
% Set the minimum and maximum distance for the satellites  
min1 = 900;  
max1 = 1100;  
  
min2 = 2500;  
max2 = 2700;  
  
min3 = 4300;  
max3 = 4900;  
  
% Colors in the plot  
colors = {'b', 'r', 'g', 'k'};  
  
% Bring up plot window  
figure;  
hold on;  
  
% These following rows below are collecting data index  
%   vectors and plot the data.  
% Its same structure for all satellites so the comments  
%   for the code for satellite 3 is also relevant to the
```

```

other 2.

% ----- Satellite 3 -----

% Satellite number
i_3 = 145;

% ii_3 find index from data3 file which matches the
  satellite number, time before
% 12.05 pm, distance from hthh >min3 and <max3
[ii_3] = find(data3(:,3) == i_3 & data3(:,2) < 43300 &
  round(data3(:,9)) > min3 & round(data3(:,9)) < max3 );
[unique_sat] = unique(data3(ii_3,3));      % Unique
  satellites that appear

date = datetime(num2str(data3(ii_3, 1)), 'InputFormat', '
  yyyyMMdd');      % Get the date
timetag = date + seconds(data3(ii_3, 2));      % Date + get
  the time

dis = mean(data3(ii_3,9));      % Mean distance km
plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'), data3(ii_3
  ,5),[colors{3} '.-'], 'DisplayName', [station3 '-'
  num2str(unique_sat(1)) ' , ' num2str(dis) ' km']);

% ----- Satellite 2 -----

i_2 = 123;

[ii_2] = find(data2(:,3) == i_2 & data2(:,2) < 43300 &
  round(data2(:,9)) > min2 & round(data2(:,9)) < max2 );
[unique_sat] = unique(data2(ii_2,3));
date = datetime(num2str(data2(ii_2, 1)), 'InputFormat', '
  yyyyMMdd');
timetag = date + seconds(data2(ii_2,2));

dis = mean(data2(ii_2,9));
plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'), data2(ii_2
  ,5),[colors{2} '.-'], 'DisplayName', [station2 '-'
  num2str(unique_sat(1)) ' , ' num2str(dis) ' km' ]);

% ----- Satellite 1 -----

i_1 = 81;

[ii_1] = find(data1(:,3) == i_1 & data1(:,2) < 43300 &
  round(data1(:,9)) > min1 & round(data1(:,9)) < max1 );
[unique_sat] = unique(data1(ii_1,3));

```

```
date = datetime(num2str(data1(ii_1, 1)), 'InputFormat', '
    yyyyMMdd');
timetag = date + seconds(data1(ii_1,2));

dis = mean(data1(ii_1,9));
plot(datetime(timetag, 'format', 'hh:mm:ss'), data1(ii_1
    ,5),[colors{1} '-'], 'DisplayName', [station1 '-'
    num2str(unique_sat(1)) ' , ' num2str(dis) ' km']);

% Info labels
xlabel('Tid (h)');
ylabel('dTEC');
title(['Delta total electron content, ' ]);
legend('show');
```

INSTITUTIONEN FÖR RYMD-, GEO- OCH MILJÖVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se



CHALMERS