



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi
Ivar Maalen-Johansen

Hvordan kan InSAR brukes til å finne områder hvor NDH har behov for oppdatering

How can InSAR be used to find areas where NDH
needs updating

Bendik Øverhus Hassel

Geomatikk
Fakultet for realfag og teknologi

Sammendrag

Nasjonal detaljert høydemodell er et kartleggingsprosjekt som nærmer seg slutfasen av en 5 år lang innsamlingsperiode. Prosjektet har benyttet flybåren laserskanning til å samle inn svært detaljerte høydeverdier over nesten hele landet. Prosjektet har vært både tidkrevende og kostbart med en prislapp på 420 millioner kr. Det er derfor viktig for Kartverket at datasettet er oppdatert og at fremtidig vedlikehold skjer på de stedene hvor det trengs mest. Å holde oversikten over dette er ingen lett oppgave.

I oktober 2018 slapp NGU i samarbeid med NVE og Norsk Romsenter «InSAR Norge», en landsdekkende karttjeneste som benytter satellittbåren radar til å måle bevegelser i landskapet. I 4 måneder hvert år samler to satellitter inn data fra hele landet som prosesseres og legges til karttjenesten. I denne oppgaven blir det undersøkt om InSAR kan brukes til å finne områder hvor den nasjonale høydemodellen har deformasjoner og dermed behov for vedlikehold.

For å kunne avgjøre om InSAR kan brukes til dette formålet, måtte nøyaktigheten til datasettet først verifiseres. Siden InSAR viser høydeforandring over tid, ble det nødvendig å utarbeide ut en metode for å oppdrive sammenlignbare data over den samme tidsperioden. Ved å velge ut et sett med kontrollflater i Trondheim og Fredrikstad og bruke høydedifferanser mellom stabile og ustabile områder fra tilgjengelige laserdata sammen med målinger fra feltarbeid, var det mulig å finne en høydeutvikling. Denne utviklingen kunne sammenlignes direkte med hva InSAR viste for den samme kontrollflaten. Deretter ble hele datasettet fra InSAR Norge studert for å se om det kunne brukes som et verktøy for å finne områder hvor NDH har behov for oppdatering. Dette ble gjort ved å destillere datasettet ned til de punktene som kun viste stor høydeendring og som var klynget sammen.

Resultatet fra disse undersøkelsene viser at høydeutviklingen i InSAR datasettet viser en tydelig korrelasjon med verdiene som ble funnet ved å se på høydeendringer fra tilgjengelige laserdata og feltmålinger. Filtringen av datasettet gir også gode resultater ved å fremheve de områdene som har mange punkter over et større område som viste tegn til deformasjon. I tillegg er det lett å visualisere hvor mye et område vil synke over et gitt antall år, noe som kan være et effektivt verktøy for å finne områder hvor NDH vil bli utdatert på sikt.

Abstract

The national detailed elevation model (NDH) is a surveying project that approaches the final phase of a 5-year data collection period. The project is using airborne laser scanning to collect very detailed altitude values covering almost the entire country. The project has been both time consuming and costly with a price tag of 420 million kr. It is therefore important for the national mapping authority (Kartverket) that the elevation data is updated, and that future maintenance takes place where it is needed the most. Keeping track of this is no easy task.

In October 2018, Geological survey of Norway (NGU) collaborated with The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) and the Norwegian Space Agency, released "InSAR Norge", a nationwide map service that uses satellite-borne radar to measure movements in the landscape. For 4 months each year, two satellites collect data from all over the country that are processed and added to the map service. In this task, it is examined whether InSAR can be used to find areas where the national height model has deformations and thus the need for maintenance.

In order to determine whether InSAR could be used for this purpose, the accuracy of the data set had to be verified first. Since InSAR shows elevation change over time, it became necessary to hatch a method to obtain comparable data over the same time period. By selecting a set of control surfaces in Trondheim and Fredrikstad and using height differences between stable and unstable areas from available laser data together with measurements from field work, it was possible to find a height development. This development could be compared directly with what InSAR showed for the same control surface. Then, the entire dataset from InSAR Norway was studied to see if it could be used as a tool to find areas where NDH is outdated. This was done by distilling the data set down to the points that only showed great height change, and which were clustered together.

The results of these studies showed that the height development in the InSAR dataset shows a clear correlation with the values found by looking at altitude changes from available laser data and field measurements. The filtering of the data set also give good results by highlighting the areas that have many points over a larger area that shows signs of deformation. In addition, it is easy to visualize how much an area would sink over a given number of years which could be an effective tool for finding areas where NDH would be outdated in the long term.

Forord

Denne gradsoppgaven markerer slutten på fem års utdannelse innen studieretningen Geomatikk ved Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet i Ås. Oppgaven er diskutert og valgt i møter med Ivar Oveland fra Kartverket og veileder Ivar Maalen-Johansen fra NMBU. Oppgaven er skrevet våren 2019 og utgjør totalt 30 studiepoeng.

Denne oppgaven har gitt meg muligheten til å jobbe med en tematikk som har gjenspeilet bredden av studieretningen og hva jeg har drevet med i de siste 5 årene. Det var også svært vært spennende å få muligheten til å jobbe med InSAR karttjenesten til NGU så tidlig etter lansering.

I løpet av denne våren har jeg vært i kontakt med flere jeg har lyst til å rette en takk til. Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder Ivar Maalen-Johansen ved Fakultet for realfag og teknologi for mange gode samtaler og råd underveis i prosessen.

Jeg vil også takke Ivar Oveland fra Kartverket for å tipse meg om denne oppgaven. En takk rettes også til Yngve Moe og Eivind Kjølberg for hjelp med programmering. Jeg ønsker videre å takke NGU, Trondheim og Oslo kommune for å bistå med datagrunnlag.

Til slutt vil jeg takke alle klassekamerater, venner og bekjente for fem fine og innholdsrike år her på Ås.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 04.05.2019

Bendik Øverhus Hassel

Forkortelser

NDH	Nasjonal Detaljert Høydemodell
SAR	Synthetic Aperture Radar
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
LiDAR	Light Detection- And Ranging
GNSS	Global Navigational Satellite System
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
ESA	European Space Agency
CSV	Comma Separated Value
MB	Mega Byte
GB	Giga Byte
TB	Terra Byte

Innholdsfortegnelse

1.	Innledning	1
1.1.	Bakgrunn.....	1
1.2.	Tema og problemstilling	2
1.3.	Tidligere forskning.....	3
2.	Teori	5
2.1.	Laser.....	5
2.2.	LiDAR	6
2.3.	Flybåren laserskanning.....	7
2.4.	Radar.....	8
2.5.	SAR.....	9
2.6.	InSAR.....	10
3.	Materialer og metode	12
3.1.	Materialer.....	12
3.1.1.	InSAR-datasettet.....	12
3.1.2.	Programvare og filformater.....	14
3.2.	Metode	16
3.2.1.	Gjennomgang av InSAR karttjenesten	16
3.2.2.	Valg av caseområder.....	17
3.2.3.	Caseområder.....	20
3.2.4.	Gjennomgang av historiske LiDAR data	21
3.2.5.	Feltarbeid.....	22
3.2.6.	Etterbehandling av datasett	26
3.2.7.	Fjerne støypunkter fra laserdata	27
3.2.8.	Videre bruk av InSAR data.....	30
3.2.9.	Viderebehandling i CloudCompare.....	32
3.2.10	Finne og isolere cluster.....	33
3.2.11	Hvordan identifisere områder der NDH trenger oppdatering over tid	35
4.	Resultater	36
4.1	Fremstilling av datasett for måleflater	36
4.2	Caseområde 1: Brattøra i Trondheim	40
4.3	Caseområde 2: Fredrikstad.....	43
4.4	Visualisering av data	47
5	Diskusjon.....	51
5.1	Hvor godt stemmer høydeendringen i InSAR overens med Landmåling og LiDAR-data?	51
5.2	Kan InSAR datasettet brukes til å finne områder hvor nasjonal detaljert høydemodell har behov for oppdatering?	53
6	Konklusjon.....	55
6.1	Forslag til videre forskning	56
	Litteraturliste.....	57

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Nasjonal detaljert høydemodell (NDH) er et kartleggingsprosjekt som har som mål å samle inn høydedata fra hele landet. Det er et omfattende prosjekt hvor omtrent 230 000 kvadratkilometer skal skannes med en total kostnad estimert på 420 millioner kroner. Innsamlingen av data begynte i 2014, og har kontinuerlig blitt gjort tilgjengelig på www.hoydedata.no hvor alle interesserte kan laste ned og ta i bruk datasettet gratis.

NDH er forventet å bli ferdigstilt i 2021, men allerede før prosjektet nærmer seg slutten av en 5-årig lang innsamlingsprosess vil det på være utdatert flere steder. Byutvikling, gjengroing og deformasjoner er noen faktorer som etter hvert bidrar til endringer i landskapet. Disse kontinuerlige endringene gjør det nødvendig med vedlikehold for å sørge for at datasettet holder seg oppdatert. Foreløpig er det kun planlagt denne type vedlikehold gjennom lokale Geovekst-prosjekter. Likevel er det antatt at tettbygde strøk blir prioritert ettersom det er her endringene er størst.

Høsten 2018 offentliggjorde NGU nettløsningen insar.ngu.no, en landsdekkende karttjeneste som viser bevegelser i landskapet med målinger fra de siste fire årene. Tjenesten bruker data hentet fra satellittbåren Interferometric SAR (InSAR). Landsdekkende, og med en bakkeoppløsning på 5x20 meter har det vært en stor ressurs i overvåkingen av både snø- og steinskred. NGU oppgir at høydeendringene over tid har nøyaktighet på opptil 1mm/år. Tjenesten samler inn data hele året, men målingene vist i tjenesten er kun hentet fra juni – oktober for å unngå ulike feilkilder i dataene. På sikt vil data fra hele året bli brukt i byområder. En stor fordel med denne teknologien er dets evne til å overvåke små endringer over store områder. Kan denne tjenesten også brukes for å kartlegge hvor NDH har behov for oppdatering?

Bakgrunnen for denne oppgaven er at Kartverket ønsker å se om høydedataene fra InSAR kan brukes som et verktøy for å finne områder med deformasjoner og dermed har behov for vedlikehold. Dersom det er mulig å bekrefte utviklingen som InSAR viser ved å sammenligne med eksisterende laserdata og landmåling, kan InSAR dataene kanskje brukes som et pålitelig grunnlag i denne vurderingen.

1.2. Tema og problemstilling

Målet for denne oppgaven er å undersøke om InSAR løsningen til NGU kan brukes for å finne områder hvor NDH har behov for oppdatering. Det første steget i denne prosessen vil være å verifisere nøyaktigheten til InSAR-dataene gjennom å sammenligne datasettet med tilgjengelige høyder fra landmåling og eksisterende lasermålinger. Dette skal gjøres ved å velge ut og undersøke caseområder som møter en rekke krav som må ligge til grunn for å sikre at de ulike datasettene er pålitelige og sammenlignbare. På disse stedene må det i tillegg være en stor nok lokal endring til at usikkerheten i målingene ikke er større enn selve høydeendringen.

Dataene som blir tatt i bruk vil være eksisterende LiDAR data fra de utvalgte caseområdene sammen med feltarbeid på utvalgte steder. Den første problemstillingen blir som følger:

- *Hvor godt stemmer høydeendringen i InSAR overens med Landmåling og LiDAR-data?*

Dersom utviklingen viser seg å sammenfalle, kan Kartverket med større sikkerhet ta i bruk InSAR datasettet som et verktøy for å finne områder hvor ny nasjonal høydemodell er/blir utdatert. Men med en total størrelse på 1.04 TB fordelt på over 2mrd punkter, må datasettet først gjennomgå en omfattende filtreringsprosess for å kunne brukes i videre analyse. Første oppgave vil være å filtrere ut all overflødig informasjon i datasettet og velge ut de punktene som møter våre kriterier for pålitelighet. Den andre problemstillingen blir da:

- *Kan InSAR-datasettet brukes for å finne områder hvor nasjonal detaljert høydemodell har behov for oppdatering?*

Satellittbasert radar har i hovedsak blitt brukt til å overvåke bakkedeformasjoner i større områder i sammenheng med ras, vulkansk aktivitet eller andre naturlige fenomener, men har i de senere år mer og mer blitt rettet mot urban bruk. Denne studien vil derfor være todelt hvor første del er en kvantitativ analyse av nevnte datasett. Den andre delen vil være en kvalitativ studie som ser på nytteverdien av urban overvåkning opp mot eksisterende LiDAR data ved hjelp av InSAR teknologi.

1.3. Tidligere forskning

Helt siden radiobølger og dets reflekterende egenskaper ble oppdaget på slutten av 1800-tallet har radarteknologien med jevne mellomrom gjort betydelige fremskritt som har åpnet for nye muligheter og bruksområder (Sardar, 1997). Fremgangen har i stor grad vært akselerert av militær forskning i sammenheng med verdenskrigene og den påfølgende kalde krigen. Den amerikanske marinen utviklet den første bakkebaserte radaren som kunne detektere og spore fly og skip i 1930. Videre ble det første praktiske radarsystemet for detektering av fly på en avstand utviklet i England i 1937 og på 50-tallet ble Side Looking Airborne Radar (SLAR) utviklet for å produsere bedre bildekvalitet for militær rekognosering (ibid). I nyere tid har sivil forskning i større grad stått for disse gjennombruddene hvor fokuset har vært på samfunnsnyttige applikasjoner som kartlegging, oseanografi, geologiske applikasjoner etc. (ibid).

Etterhvert som oppløsning og nøyaktighet har blitt bedre har også flere studier med fokus på urbane områder dukket opp. «The dragon project», er en slik studie med mål om å overvåke subsidens, jordskred og deformasjoner skapt av utbygging i Kina (Perissin & Wang, 2011). Med analyser basert på 40 målinger over tidsrommet fra 1993 til 2000, kunne man på noen steder påvise en gjennomsnittlig nedsynking på 40mm/år. En av grunnene til denne store nedsynkingen skyldes at det ble pumpet opp store mengder grunnvann under Shanghai samtidig som byen vokste voldsomt på 90 tallet. Denne utviklingen viste seg å stemme ganske godt overens med målinger gjort med nivelleringsutstyr.

En annen studie sammenligner de mest avanserte måleteknologiene for overvåkning av menneskeskapte byggverk (Sousa et al., 2014). Formålet er å finne teknologien som best kan oppdage endringer i broer og demninger for å unngå ødeleggelser og tap av liv ved å tidlige finne tegn til utvikling/nedbrytning. Her blir InSAR satt opp mot tradisjonelle bakkebaserte målemetoder, (GNSS) og ulike sensorer. Studien påpeker svakheter med InSAR som at det stilles krav til orientering av byggverk og omgivelser for gode målinger (ibid). Fordelene er muligheten for deformasjon i 1-D, 2-D og 3-D samt muligheten for å kunne måle flere byggverk over store områder samtidig (ibid).

Denne studien blir senere fulgt opp med en casestudie som benytter blant annet InSAR teknikker for å se utviklingen på bygninger, en bro og en demning i Slovakia og Tsjekia (Lazecky et al., 2015). Studien konkluderer med at ulike målemetoder har ulike egenskaper og derfor vil være optimale i ulike situasjoner. Det at noen former for bevegelse kan oppdages i et instrument, men ikke et annet gjør at en kombinasjon av flere instrumenter er best. Målinger

gjort med InSAR er enkle å sammenligne med lokale GNSS-målinger og er kostnadseffektivt sammenlignet med fotogrammetri og LiDAR. Samtidig er ikke teknikken avhengig av gode værforhold. Det foreslås derfor å bruke fly/rombåren radar for å finne systematiske avvik. Dersom det oppstår mistenkelige verdier er de tradisjonelle bakkebaserte metodene fortsatt de mest pålitelige når ting skal undersøkes nærmere (ibid).

I en rapport som legges frem av NRS, NVE, NGU, Statens Vegvesen og Jernbaneverket (Oppikofer, 2016), introduseres teknologien og det forklares hvordan radarsatellittdata i dag blir brukt til skredkartlegging i Norge. Rapporten legger vekt på viktigheten av enkel tilgang på data fra ulike satellitter for utvidet bruk. I tillegg oppfordres det til å starte opp forsknings- og utviklingsprosjekt for å finne flere anvendelsesområder og videreutvikle kompetansen ettersom det er få institusjoner i dag som har en god nok faglig kompetanse til å anvende teknologien til overvåkning og kartlegging.

Satellittbasert teknologi er moden	Satellittbasert teknologi i Fou-fase	Satellittbasert FoU er ikke utprøvd
Setninger i urbane områder	Broer	Setninger i vegbane Setninger på jernbane
Bygninger	Permafrost - nedsynking	
Setninger over tunelanlegg	Breer - bredynamikk	
Vannkraft-magasin/damanlegg	Massebalanse	

Figur 1: Utdrag fra rapporten (Oppikofer, 2016) som vurderer modenhetsgraden av anvendelser av InSAR

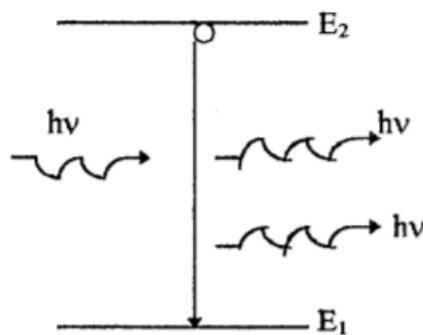
..

2. Teori

Dette kapittelet tar for seg de grunnleggende begrepene og teknologien som ligger til grunn for de ulike teknologiene som tas i bruk i oppgaven.

2.1. Laser

LASER står for «light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», som kan oversettes til «lysförsterkning gjennom stimulert emisjon av stråling. Laser er lys som har samme retning, frekvens og befinner seg i samme fase (Abdalla, 1995). Når et atom i et høyt energinivå treffes av et foton, vil det være en sjans for at atomet faller til et lavere energinivå dersom frekvensen av fotonet tilsvarer energidifferansen mellom atomet i høyt og lavt energinivå (Abdalla, 1995). Når dette skjer vil det samtidig emitteres ut stråling fra atomet i form av to nye fotoner.



Figur 2: Et atom blir truffet av et foton og faller ned et energinivå samtidig som det emitterer to nye fotoner

Disse utstrålte fotonene vil ha den samme frekvensen og fasen som fotonet som traff atomet i utgangspunktet. Vi kan si at fotonene er koherente. Gitt at vi har flere atomer i et lukket miljø, vil disse fotonene videre påvirke nye stoffer som igjen slipper ut flere fotoner med de samme egenskapene. Når dette gjentas mellom to speil vil lyset forsterkes for hver gang det passerer det aktive materialet (atomene). Dette kalles stimulert emisjon og er nødvendig for å oppnå laser lys. Dersom vi gjør et av de to speilene kun delvis reflekterende, kan noe av strålingen bli hentet ut som laser (Abdalla, 1995). De korteste bølglengdene, fra 10 til 400 nanometer (nm), avgir Ultrafiolett lys mens de lengste bølglengdene, fra 700nm til 1mm, kalles infrarødt lys og er usynlig for det menneskelige øyet. Det synlige spekteret av lys ligger mellom 380nm til 740nm og produserer fra fiolett til rødt lys (Wickersham, 2016). Bruksområder for laser dekker i dag alle felt som fysikk, kjemi, biologi, medisin, optisk kommunikasjon, elektronikk, materialprosessering, termonukleær fusjon og militær bruk (Abdalla, 1995).

2.2. LiDAR

LiDAR står for «Light Detection And Ranging» og er en teknikk for å måle avstand ved hjelp av lys. Et lidar system består av en transmitter og en mottaker. Transmitteren sender ut lyspulser mot en målflate. Noe av lyset som treffer overflaten vil reflekteres og finne veien tilbake til mottakeren. Avstanden til denne overflaten kan beregnes ved å bruke lysfarten (Weitkamp, 2006). Et av lysets grunnleggende egenskaper er dets konstante forplantningshastighet i et gitt medium (Vosselman & Maas, 2010). Denne egenskapen gjør det praktisk å måle avstanden mellom lyskilden og målflate.

$$\rho = \frac{c}{n} * \frac{\tau}{2}$$

Formel 1: formel for måling av avstand med et LiDAR system

Formel 1 viser en enkel beregning av avstand hvor c er lyshastigheten i vakuum, n er korreksjonen for lysets fart i luft, τ er pulsens reisetid som må deles på 2

Teknologien er spesielt nyttig fordi den i tillegg til å kunne måle nøyaktige posisjoner over store områder, kan samle inn alt fra tusenvis til millioner av punkter i sekundet (Harrap & Lato, 2010). Punktinformasjonen som blir samlet inn kan brukes kartlegge infrastruktur gjennom «punktskyer».

LiDAR avhenger av to sett med målinger for å generere en sky av punktlokasjoner (ibid). Først må posisjonen og siktevinkelen for laseren være kjent for hver måling. Den andre informasjonen som trengs er avstanden. To kjente metoder for å måle avstanden er «time of flight» og fasebasert LiDAR.

I en «Time of flight»-måling sender laseren en puls, venter og måler tiden pulsen bruker på å returnere. Ved å benytte en veldig presis tidsmåling og lyshastigheten, kan en avstandsmåling beregnes (ibid). Metoden er kun avhengig av å få et returnersignal og kan derfor gjøre målinger over flere kilometer. Den andre metoden er fasebasert LiDAR som benytter en amplitudemodulert kontinuerlig bølgeform laser (AMCW). Når laser strålen interagerer med et objekt blir fasen tilbakestillt og det returnerte endrede signalet blir prosessert for å utlede tid og avstand (Harrap & Lato, 2010). Denne metoden kan måle avstander raskere enn «time of flight» metoden, men har en kortere bruksrekkevidde.

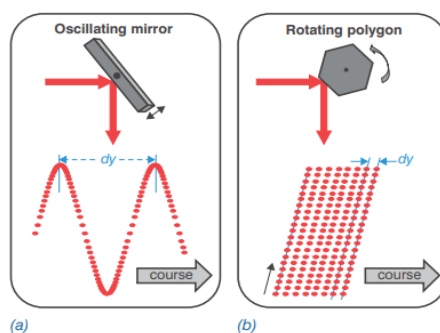
2.3. Flybåren laserskanning

Flybåren laserskanning er avstandsmålinger utført med LiDAR fra fly, helikopter eller drone (Vosselman & Maas, 2010). Teknikken er basert på to hovedkomponenter. Den første komponenten er et skanningssystem som måler avstanden til et punkt på bakken ved hjelp av LiDAR. Den andre komponenten er en kombinasjon av GNSS (Global Navigation Satellite System) og IMU (Inertial Measurement Unit) som henholdsvis kontinuerlig måler systemets nøyaktige posisjon og orientering (ibid). De siste komponentene brukes sammen til å rekonstruere flybanen som i ettertid gir eksakte posisjoner for hele flygningen. Dette er avgjørende for at alle målte punkter kan få en korrekt posisjon i et tredimensjonalt rom.

Den vanligste metoden for flybåren laserskanning er ved bruk av fly. Laserskanneren er plassert på flyets underside og sender ut pulser med laser ned mot bakken. Antall punkter målt per m^2 avhenger først og fremst av måleutstyrets spesifikasjoner, men andre faktorer som flyets hastighet, vinkel og flyhøyde spiller også inn. (ibid) oppgir at dagens utstyr med en høy puls repetisjonsfrekvens (PFR) kan oppnå en punkttetthet på opptil 50 punkter/ m^2 , men nyere laserskannere kan ved ulike teknikker overgå dette.

For å kunne spre laserpulsene utover et større område benyttes flere ulike teknikker.

Hovedprinsippet er at laseren går via en mekanisme som fordeler lyset i ulike mønstre avhengig av hvilken mekanisme som blir brukt. Mange kommersielle flybårne systemer benytter en metode hvor laseren blir rettet mot et oscillerende speil. Pulsene blir reflektert via speilet ned i terrenget og vil danne et sikksakk-mønster (Vosselman & Maas, 2010). Fordelen med denne metoden er at både frekvens og vinkel på speilet kan justeres for å få bedre kontroll over målingene. En annen mekanisme er et roterende polygonspeil. Her vil punktene bli fordelt i parallelle linjer som fører til en mer uniform spredning av punktene enn hos et oscillerende speil.



Figur 3: Skannermekanismene oscillerende- og polygonspeil. Figuren er hentet fra (Vosselman & Maas, 2010)

2.4. Radar

Radar står for «RADio Detection and Ranging» og er en elektromagnetisk sensor for deteksjon og lokalisering av reflekterende objekter (Skolnik, 1970).

En radar er utstyrt med en transmitter som avgir elektromagnetisk stråling som forplanter seg ut i rommet. Noe av den utsendte strålingen blir mottatt av et reflekterende objekt, vanligvis kalt et mål, som er posisjonert i en gitt avstand fra radaren. Strålingen som treffer det reflekterende objektet blir reflektert ut i alle retninger. Noe av den reflekterte energien finner veien tilbake til radarantennen, dette retursignalet blir prosessert hvorpå retning og avstand til objektet kan erverves (Skolnik, 1970).

Radar er en såkalt «aktiv» sensor som betyr at instrumentet har sin egen transmitter for å sende ut signaler i det elektromagnetiske spektrumet. Dette gjør sensoren uavhengig av andre strålingskilder, som i praksis betyr at de kan samle inn data selv om natten. Radar kan oppdage relativt små objekter både nært og langt vekke og måle avstanden med presisjon i alle typer vær. (Skolnik, 1970). Dette er en stor fordel sammenlignet med andre optiske sensorer som er avhengige av lys og klar sikt.

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \sigma \lambda^2 F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

Formel 2: Radarligningen sier hvordan rekkevidden henger sammen med transmitterstyrken.

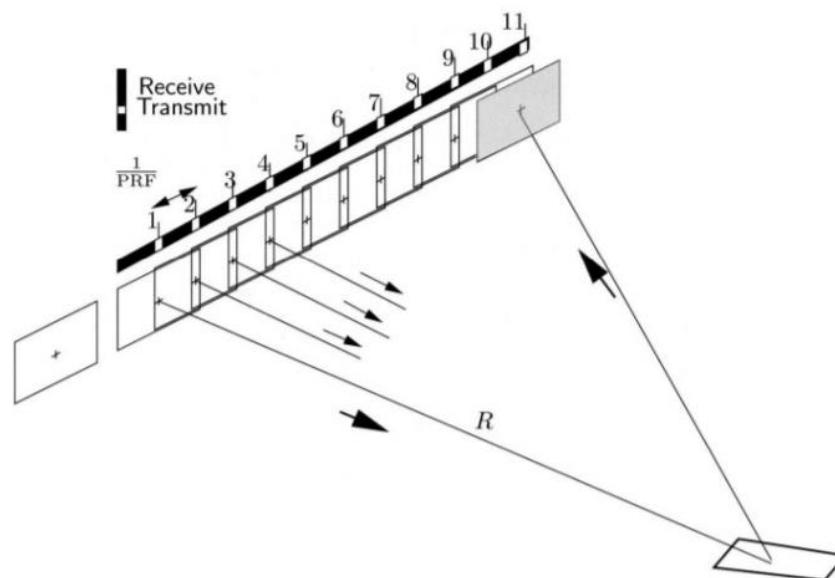
Radar ligningen over viser at rekkevidden til en radar er proporsjonal med fjerderoten av transmitterstyrken. For å doble rekkevidden må man derfor øke styrken med 16. Dette betyr at det ofte er en praktisk og økonomisk grense for hvor mye strøm som må til for å øke rekkevidden (Skolnik, 1970).

2.5. SAR

SAR står for Synthetic Aperture Radar og er en spesifikk klasse av radarsystemer kalt bildedannende radar (Hanssen, 2001). Begrepet «synthetic aperture» kommer av at fartøyet som bærer radaren tar kontinuerlige målinger over en avstand for å kunstig skape, eller «syntetisere» en lang lineær antenne. (SARPart1_11).

En utfordring med RAR (real aperture radar), er hvordan oppløsningen er proporsjonal med størrelsen på antennen og avstanden til objektet som måles. Man kan øke oppløsningen ved å enten flytte radaren nærmere målet eller forlenge størrelsen på antennen. Når avstanden derimot er låst til en fast verdi som for hos eksempel satellitter i bane rundt jorden, får RAR fort problemer fordi den fysiske antennen må være større enn hva som er praktisk mulig.

Istedenfor opererer SAR med en mindre antenne som kontinuerlig gjør målinger mens den forflyttes over en avstand. Denne avstanden blir i realiteten den «syntetiske» antennen til radaren (Skolnik, 1970).

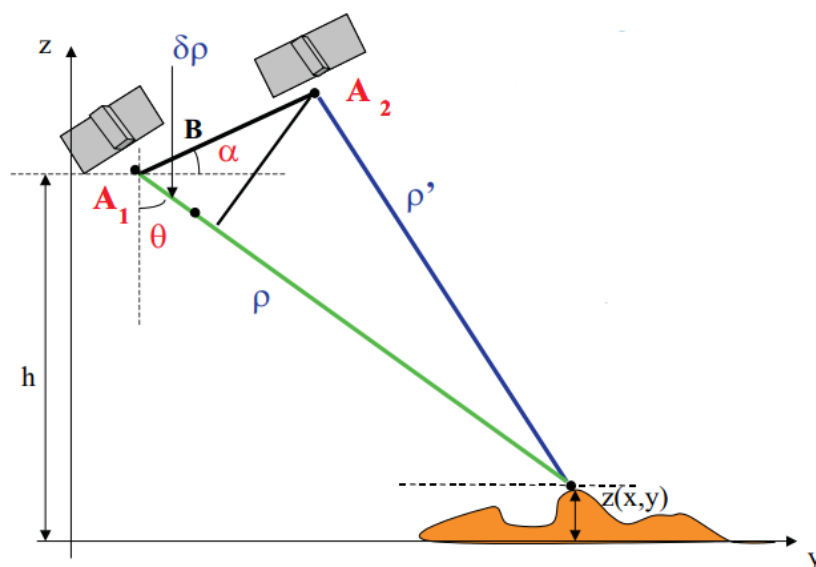


Figur 4: Viser hvordan mange opptak tas over samme overflate og stiftes sammen. Avstanden fra første til siste opptak utgjør lengden på den syntetiske antennen. (Hanssen, 2001)

2.6. InSAR

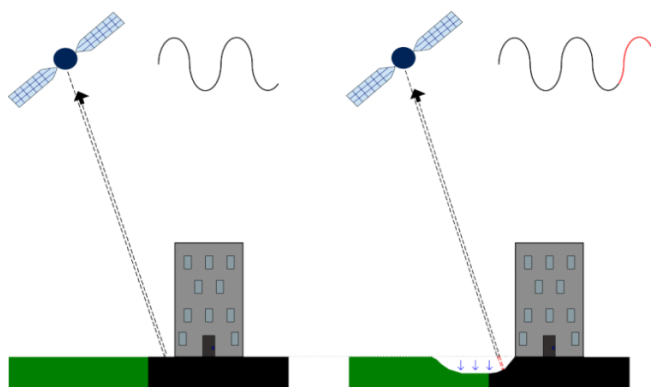
InSAR står for Interferometrisk SAR og er en avansert prosesseringsmetode som utnytter faseforskjellen fra de ulike radarreturene under et SAR-opptak. Denne faseforskjellen inneholder høydeinformasjon om bakkepunktene og blir videre brukt til å lage interferogram. (Tempfli et al., 2009).

Dersom to SAR-bilder av et målområde er tilgjengelig og presist kan bli justert til en brøkdel av en pikselstørrelse, kan den relative fasen for hvert bildepunkt bli bestemt (Bürgmann et al., 2000). Med relativ fasedata hentet fra to bilder hvor innsynsvinkelen så vidt har endret seg mellom opptak, kan informasjon om endring i rekkevidde til objekter på bakken. Dermed kan topografien med oppløsningen til SAR bildet bli uthentet med kunnskap om bildestrukturen. Figur 1 under viser hvor det samme området er målt fra så vidt forskjellige vinkler i posisjon A_1 og A_2 .



Figur 5: Illustrasjon fra InSAR geometri som viser hvordan to opptak fra så vidt forskjellige vinkel brukes. Hentet fra (Tempfli et al., 2009)

Satellitten måler både amplitude og fasen fra det reflekterte radarsignalet fra jordoverflaten. (SkyGeo, u.å.). Amplituden er styrken på signalet målt mens fasen er den fraksjonen av en komplett bølge som når sensoren. Dersom fasen har endret seg mellom to målinger over samme sted, betyr det at noe har endret seg på overflaten. Dette kan sees i figuren under. Dersom en tidligere målt flate har sunket før neste måling blir gjennomført, vil radarsignalet måtte reise lengre for å nå overflaten. Denne ekstra lengden på retursignalet blir målt som faseforskjell.



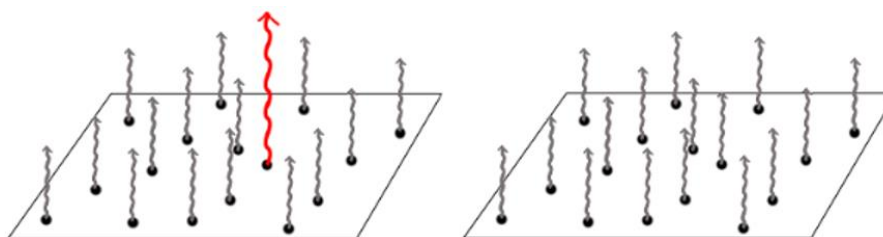
Figur 6: InSAR målinger før og etter deformasjon. Figuren viser hvordan deformasjon fører til en endret fase i signalet som kommer tilbake til satellitten. Hentet fra (SkyGeo, u.å.)

Persistent- og Distributed scatterer

Hvor mange målinger som kan gjøres over et område kommer an på oppløsningen på datasettet (ibid). Dette kan bli sammenlignet med et fotografi; innenfor hver piksel kan det bare måles en verdi. Flere objekter kan likevel reflektere et signal innenfor hver piksel. Dette kalles «scatterer». For å kunne måle disse blir ulike måleteknikker brukt avhengig av refleksjonsegenskapene i de målte objektene. Jo flere objekter innenfor en piksel som reflekterer signal, jo mer forstyrrelse i signalet. De to vanligste type scatterer er Persistent scatterer (PS) og distributed scatterers (DS).

PS er piksler som inneholder objekter med gode refleksjonsegenskaper og som endres lite over lengre tid. Dette fører til konsistente målinger. PS er vanligvis funnet i urbane områder med menneskeskapte objekter som bygninger. Når et objekt i en piksel skiller seg ut ved å avgi en mye «sterkere» refleksjon enn resten, vil de svakere signalene nesten kunne bli neglisjert (ibid).

DS er piksler som inneholder flere objekter med svakere refleksjonsegenskaper. Dersom en piksel blir klassifisert som DS, vil en algoritme søke etter like egenskaper i nærliggende piksler. Hvis dette viser seg å være tilfellet, vil det relativt «svake» signalet bli sett på som pålitelig fordi forholdet mellom signal og støy igjen blir større. Deformasjonen innhentet fra et slikt område vil ikke være fra en enkelt reflektor, men fra et større homogent område (ibid).



Figur 7: Viser PS til venstre med et objekt som reflekterer et sterkt signal og DS vil høyre med flere objekter som avgir et svakt signal. Hentet fra (SkyGeo, u.å.).

3. Materialer og metode

Dette kapitlet er todelt og vil først ta for seg hvilke materialer som er blitt brukt i oppgaven og hvilken metode som er benyttet for å gjennomgå materialet.

Materialdelen vil gå inn på hvilke datagrunnlag som brukes i oppgaven samt hvilket utstyr og programvarer som er benyttet for å prosessere dette grunnlaget. Metod delen tar for seg hvordan data er blitt samlet inn, behandlet og videre brukt for å kunne å svare på problemstillingen.

3.1. Materialer

3.1.1. InSAR-datasettet

Utgangspunktet for oppgaven er datasettet NGU åpnet for offentligheten høsten 2018 gjennom nettjenesten www.insar.ngu.no. Karttjenesten er landsdekkende og viser lokale høydedeformasjoner målt i millimeter. Tjenesten har flere funksjoner som blant annet å kunne se en tidsserie for valgte punkt, bytte mellom ulike datasett og bakgrunnskart samt laste ned data fra et begrenset område ved å bruke et polygonverktøy.

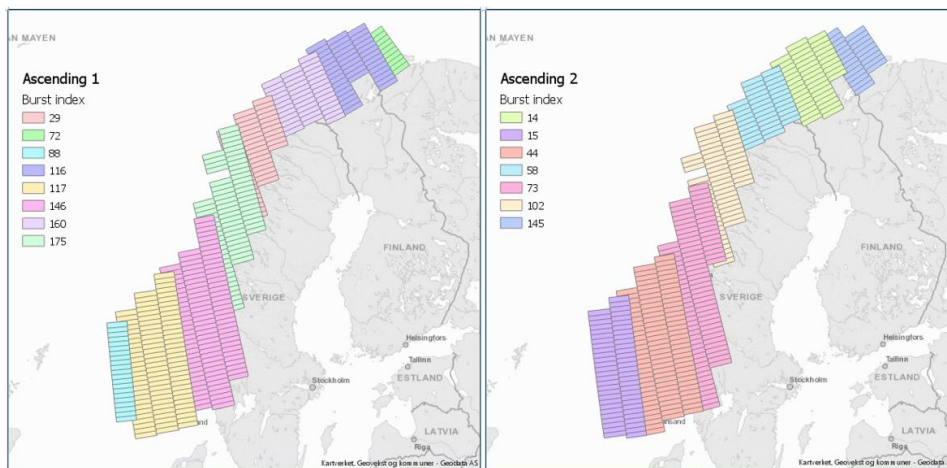


Figur 8: Hele norge i www.insar.ngu.no sin løsning

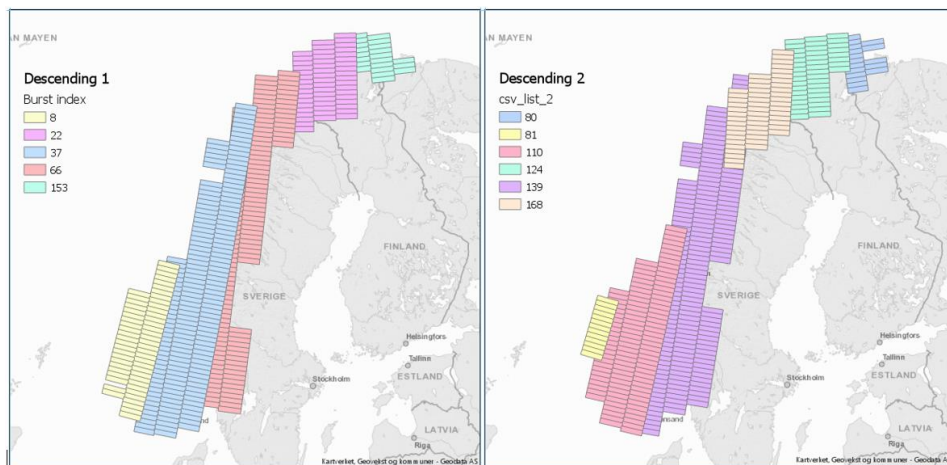
Hele datasettet som ligger oppe på nettsiden ble overlevert fra NGU for denne masteroppgaven. Med litt over 1600 CSV-filer som til sammen utgjør litt over 1TB, er det snakk om store datamengder. I gjennomsnitt er hver CSV fil på 650 MB og inneholder over en million rader med punktinformasjon. Dette betyr at det må gjøres en grundig vask av data for å kunne bruke de i GIS eller andre programvarer for videre analyse.

Datasettet er delt inn i 4 deler; ascending 1, ascending 2, descending 1 og descending 2. Ascending og descending beskriver hvordan satellitten enten er på vei henholdsvis nordover eller sørover i sin polare bane. Jordrotasjonen fører til at samme satellitt kan komme både nord- og sørfra.

I denne oppgaven er det valgt å kun bruke dataene fra ascending 2, noe som utgjør $\frac{1}{4}$ av det totale datasettet. Grunnen til at Ascending 2 blir valgt er fordi dette datasettet har vært utgangspunktet for feltarbeidet gjort i Trondheim. Det ble derfor naturlig å bruke dette datasettet videre.



Figur 9: De to datasettene Ascending 1 og Ascending 2



Figur 10: De to datasettene Descending 1 og Descending 2

3.1.2. Programvare og filformater

Her vil alle programvarer og tilleggsmoduler som brukes for å bearbeide data bli presentert. I tillegg vil alle sentrale filformater bli nevnt.

Programvarer og moduler

CloudCompare

CloudCompare er en åpen kildekode programvare for prosessering og sammenligning av 3D punktskyer. Programvaren ble i originalt designet for å gjøre sammenligninger mellom to tette punktskyer, men har i ettertid utviklet seg til å bli en mer generisk punktsky prosesseringsprogramvare (Girardeau-Montaut, 2011). CloudCompare brukes i denne oppgaven for å utforske, bearbeide og konvertere ulike datasett.

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro er den siste versjonen av GIS software fra ESRI som blant andre funksjoner kan brukes for å visualisere, utforske, analysere, endre og dele kart og geodata (Environmental Systems Research Institute (ESRI), u.å.). ArcGIS Pro brukes i denne oppgaven for å visualisere og gjøre analyser på utvalgte caseområder.

Python

Python er et objektorientert programmeringsspråk basert på åpen kildekode (Foundation, u.å.). I oppgaven blir python 3.6 brukt til å omorganisere store datasett og filtrere ut rader og kolonner som med verdier som ikke er ønskelig å beholde.

Pandas

Pandas er en åpen kildekode modul med lett anvendbare datastrukturer og analyseverktøy for Python (McKinney, 2010).

UTM

UTM er et åpent bibliotek for konverterer koordinater i Python. UTM kan endre koordinater fra geosentriske koordinater til UTM WGS84 og tilbake (Bieniek, 2017).

Filformater

CSV

CSV står for «Comma Separated Values» og er et filformat for utveksling og konvertering av data mellom ulike regneark (Shafranovich, 2005). I denne oppgaven er alle InSAR data overlevert i dette formatet.

PY

Py er filformatet som brukes av Python for å lese inn scripts. Filformatet kan skrives av hvilken som helst teksteditor, men må leses av en python «interpreter» for å fungere.

Shape

Shape eller «shapefile» er et format for GIS (geografiske informasjonssystemer) som inneholder ikke-topologisk geometri og romlige egenskaper (Esri, 1998). Filformatet er utviklet av Esri og har blitt en tilnærmet åpen kildekodebasert standard for flere GIS programvarer.

XYZ

XYZ er et ikke standardisert, ascii-basert sett med filer basert på kartesiske koordinater (x, y, z) (Thomson, u.å.). Formatet kan leses over ulike plattformer, deriblant kjemi, astronomi eller laserprogramvare.

KOF

KOF står for Koordinat- og Observasjonsformat for Feltminner og er et format utviklet av Norkart (Norkart, 2005). Formatet brukes av Norkart sin programvare og en sekvensiell Ascii-fil med definerte regler. I denne oppgaven kommer all data fra landmåling ut i dette formatet.

GeoTIFF

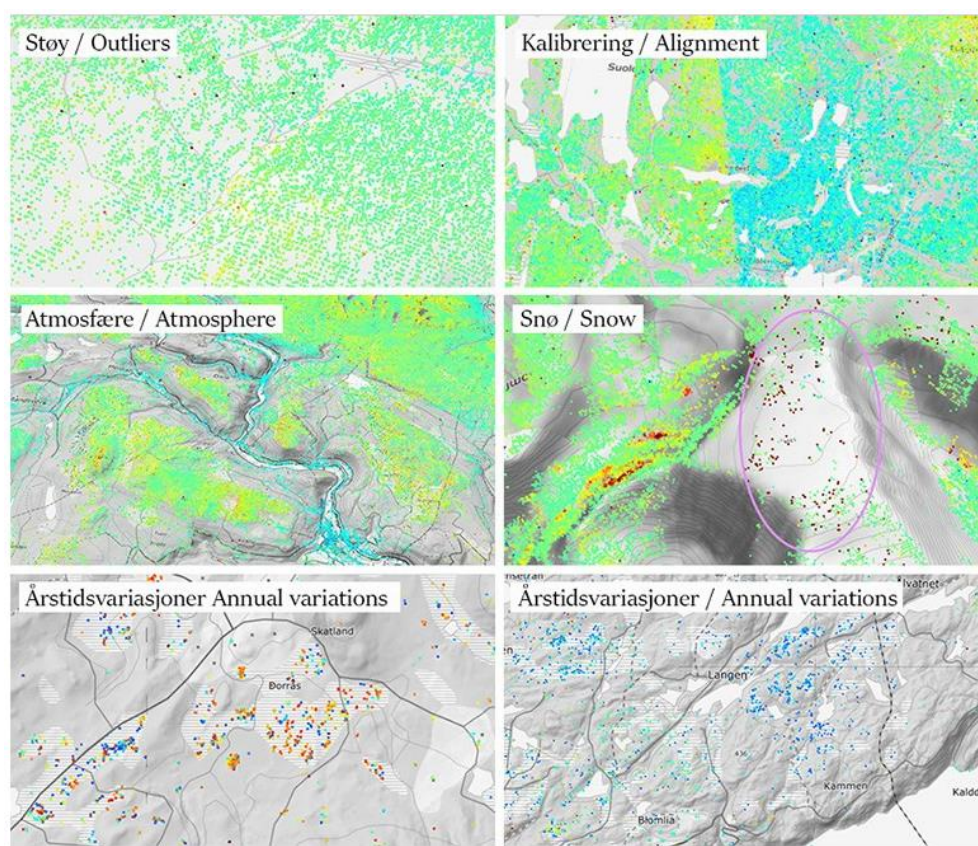
GeoTIFF er et åpent filformat basert på TIFF (Tagged Image File Format) som i tillegg til å visualisere bilder i raster format, har muligheten til å georeferere innholdet i filen. Filformatet har et sett med reserverte tegnsekvenser som inneholder informasjon som koordinatsystem, projeksjonstyper, datum, ellipsoide med mer. (Ritter et al., 2000)

3.2. Metode

3.2.1. Gjennomgang av InSAR karttjenesten

For å finne den beste metoden for sammenligning av høydeutviklingen fra InSAR Norge opp mot historiske LiDAR-data og landmåling, var det nødvendig å bli godt kjent med InSAR karttjenesten og selve datasettet. Med mange avanserte algoritmer og vanskelig teori bak prosesseringen av disse dataene var det derfor viktig å bruke tid på å sette seg inn i datasettet for å oppnå god nok forståelse til å velge ut egnede caseområder for sammenligning.

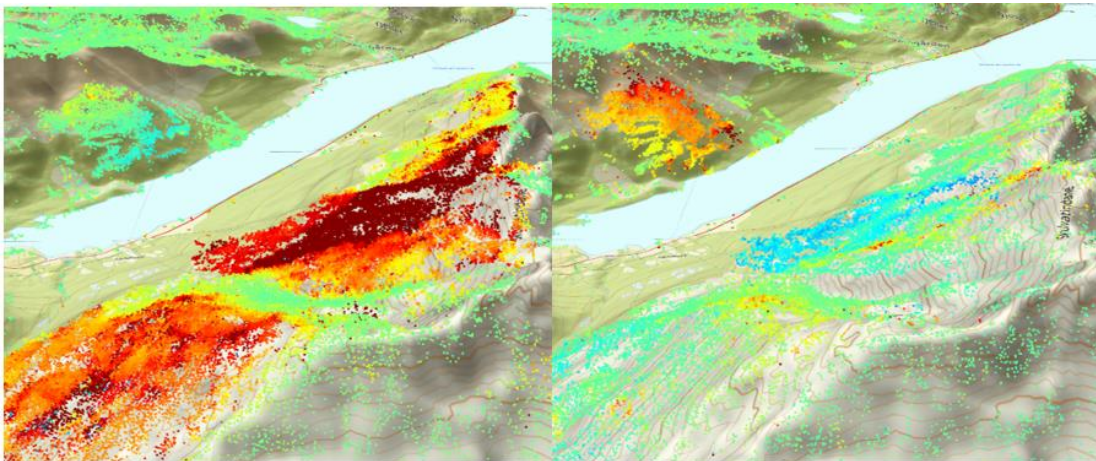
NGU opplyser selv om kjente utfordringer i datasettet (Norges Geologiske Undersøkelse, 2019) som gir grunnlag for å være skeptiske til verdier hentet fra visse områder. Dette kan være atmosfæriske forhold i dalstrøk, snø i høytliggendeområder, årstidsvariasjoner i våtområder og støy.



Figur 11: Kartutsnitt hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse, 2019) som viser kjente problemer med målinger over visse steder.

Dette er ikke den type områder som i utgangspunktet var potensielle kandidater for casestudie, men informasjonen legger grunnlag for en forståelse av hvordan datasettet opptrer som helhet og hva en bør være oppmerksom på.

En av de mer relevante utfordringene er hvordan satellittens to ulike opptakssituasjoner ascending og descending påvirker resultatene som fås ut fra områder i helning. Et godt eksempel på dette er i Sørfjorden rett sør for Tromsø. Fjorden strekker seg sørvest og får derfor fjellsider i sør-øst og nord-vestlig retning. Siden InSAR måler bevegelser i retning av antennens siktevinkel, oppfattes høydeforandringen her forskjellig avhengig om satellitten er på vei nordover eller sørover. Dette kan sees i figur 12 under.



Figur 12: Kartutsnitt fra Sørfjorden i Troms som viser hvor stor forskjell siktevinkelen kan utgjøre. Her vises data fra descending til venstre og ascending til høyre. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)

Dette betyr ikke at data samlet inn i helning ikke kan brukes, tvert imot så har ras og skredfare vært utgangspunktet for tidligere bruk av InSAR i Norge (Oppikofer, 2016). Det stiller heller krav til brukerens forståelse og muligheter til å prosessere datasettet på riktig måte.

3.2.2. Valg av caseområder

Ved sammenligning av høydeverdier ervervet gjennom tre ulike målemetoder, vil summen av usikkerheter være høy. For å kunne påvise en korrelasjon mellom de ulike datasettene, stilles det derfor krav til at den totale usikkerheten i alle tre metoder holdes lavere enn påvist høydeendring. Det var derfor svært viktig å finne caseområder som ga best mulig utgangspunkt for nøyaktige målinger med alle tre metoder.

Siden høydemålinger gjort med både CPOS og LiDAR i stor grad kan ansees som pålitelige metoder med stor nøyaktighet, var målingene gjort med InSAR de vanskeligste å kvalitetssikre. Dette førte til at kravene for caseområde ble satt med satellittbasert radar som utgangspunkt

Stor og stabil høydeendring.

Det første og viktigste kravet var å finne steder med en stor nok vertikal høydeforandring. Som nevnt over må denne forandringen være så stor at det ikke vil være tvil om at usikkerheter i måledata kan forårsake denne utviklingen. I tillegg til stor høydeutvikling må datasettet også ha en jevn og stabil utvikling som viser til at stor høydeforandring kommer av plutselige endringer som endring av selve caseområdet.

Lik utvikling over et større område

Til tross for at det finnes mange enkeltpunkter med stor og stabil deformasjon, er det ikke nok til brukes som grunnlag for en casestudie hvor vi skal kvalitetssjekke store datasett. Vi ser etter deformasjoner som viser de samme tendensene over større flater og er derfor avhengige av et minimum antall punkter med lik deformasjon. Enkeltpunkter vil bli ansett som støy dersom flere punkter i umiddelbar nærhet ikke viser de samme tendensene.

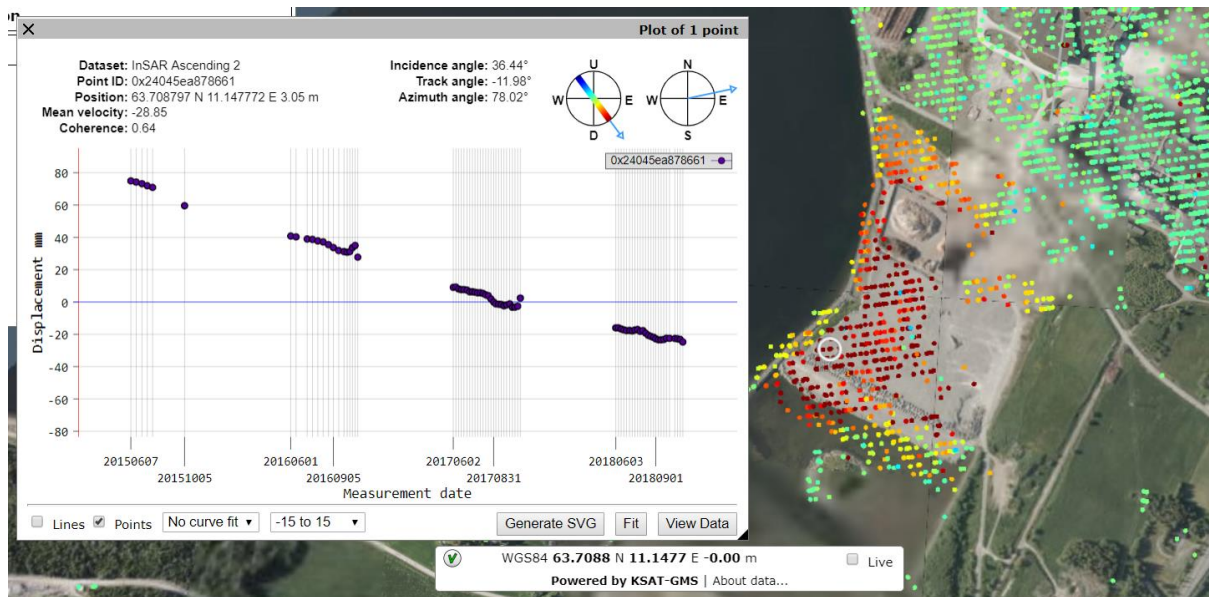
Rett type underlag

Som satellittbasert radar vil ikke InSAR kunne bidra til pålitelige data for alle typer underlag. Det beste utgangspunktet vil være et større horisontalt område med gode reflekterende egenskaper. Harde underlag som asfalt, betong eller hustak er å foretrekke og vil også gjøre det lettere for kontrollmåling gjennom feltarbeid. Alle punkter i vegetasjon vil måtte sees bort ifra. Gruslagte flater har på flere steder utmerket seg med en stor og stabil nedsynking i InSAR dataene. Dessverre vil et så upålitelig grunnlag skape stor usikkerhet i nøyaktigheten på målingene, noe som ikke er ideelt.

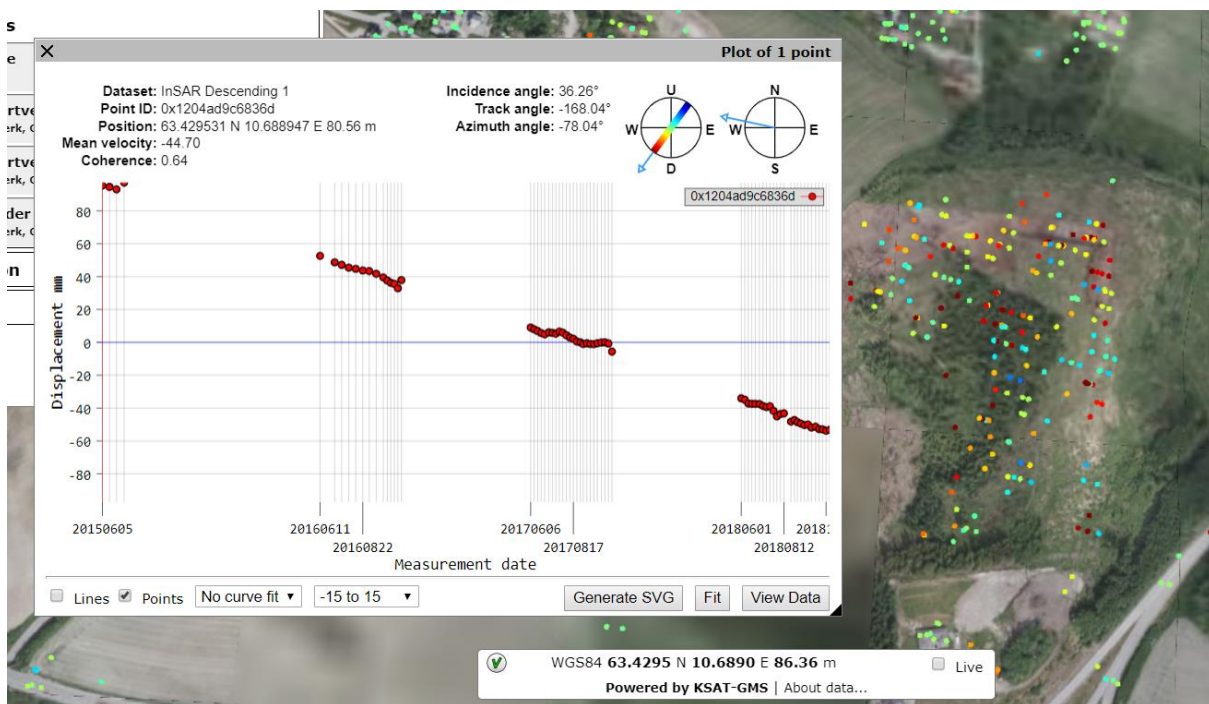
Datagrunnlag og tilgjengelighet

Hustak, veier og tog baner har på flere steder oppfylt kravene nevnt over, men er i praksis vanskelig å få målt. Flyplasser som Værnes lufthavn hadde også vært interessant å sett nærmere på, men vil være umulig med tanke på sikkerhet.

Det siste kravet er et tilstrekkelig godt datagrunnlag for sammenligning. Hvert caseområde må ha minst 2 punktskyer med en god nok georeferering som gjør at de er mulig å sammenligne.



Figur 13: Mange punkter som viser stor og jevn nedsynkning, men på en usikker overflate. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)



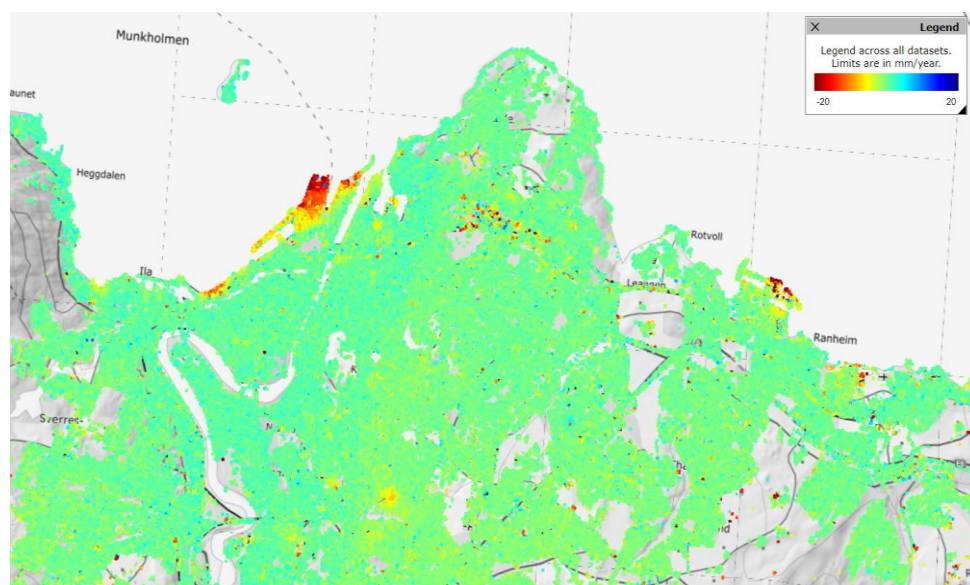
Figur 14: Stor og jevn nedsynkning, men fra et område med svært mange ulike utslag. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)

3.2.3. Caseområder

Tidlig i prosessen ble flere områder valgt ut som potensielle kandidater til å brukes i denne undersøkelsen. Etterhvert som forståelsen for InSAR-dataene ble bedre og tilgjengelige datasett ble undersøkt, viste det seg å ikke være så mange områder som kunne oppfylle kravene som først antatt. Valget falt til slutt på Trondheim og Fredrikstad som på hver sin måte utmerket seg som interessante steder for feltarbeid.

Trondheim

Brattøra er en bydel nede ved Trondheimsfjorden. Besøker man byen i nettjenesten til NGU ser man raskt at dette er et sted som skiller seg ut fra de fleste andre steder i Norge. Størrelsen på høydeendringen, antallet punkter som viser lik utvikling og den gradvise nedgangen i vertikal høydeendring mot fastere grunn er unikt for et urbant område. Omtrent hele Brattøra består av store åpne områder med asfalt og betong som gjør forholdene svært gode for nøyaktige målinger fra både LiDAR og radarmålinger. I tillegg finnes 4 sett med punktskyer fordelt over 7 år (2011, 2013, 2014 og 2017). Dette gir et usedvanlig godt datagrunnlag.



Figur 15: Brattøra skiller seg med mye deformasjon i et konsentrert område som i denne figuren vises med rød farge oppe til venstre. Her vises målinger gjort med alle datagrunnlag. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)

Fredrikstad

I motsetning til Trondheim som har spesielt stor deformasjon konsentrert på ett område, viser Fredrikstad en svakere deformasjon som til gjengjeld finnes over store deler av byen.

Høydeforandringen i InSAR dataene er heldigvis store nok til å kunne brukes. Det som i tillegg gjør Fredrikstad godt egnet er at utviklingen forekommer i avgrensede områder som gradvis går fra større til mindre nedsynking. Et godt tegn. Det finnes dessverre bare 2 tilgjengelige punktskyer i Fredrikstad. Et datasett fra 2011 og det nyeste som kom i sammenheng med NDH i 2015.



Figur 16: Et utsnitt av Fredrikstad viser tegn til deformasjon over store områder.

3.2.4. Gjennomgang av historiske LiDAR data

Samtidig som caseområder ble vurdert ut ifra InSAR tjenesten, ble punktskyer for de potensielle områdene lastet ned fra høydedata.no og undersøkt. Uten minst to gode LiDAR datasett ville det vært umulig å få et godt nok grunnlag for sammenligning. CloudCompare ble brukt for å se nærmere på, og stifte sammen tilgjengelige punktskyer.

Det var ikke mange steder hvor mer enn 2 punktskyer var tilgjengelige, ofte var disse også samlet inn over et stort tidsrom. I urbane områder betydde dette at det ofte var så stor endring i landskapet mellom hver punktsky at en sammenligning med LiDAR ofte ikke var mulig.

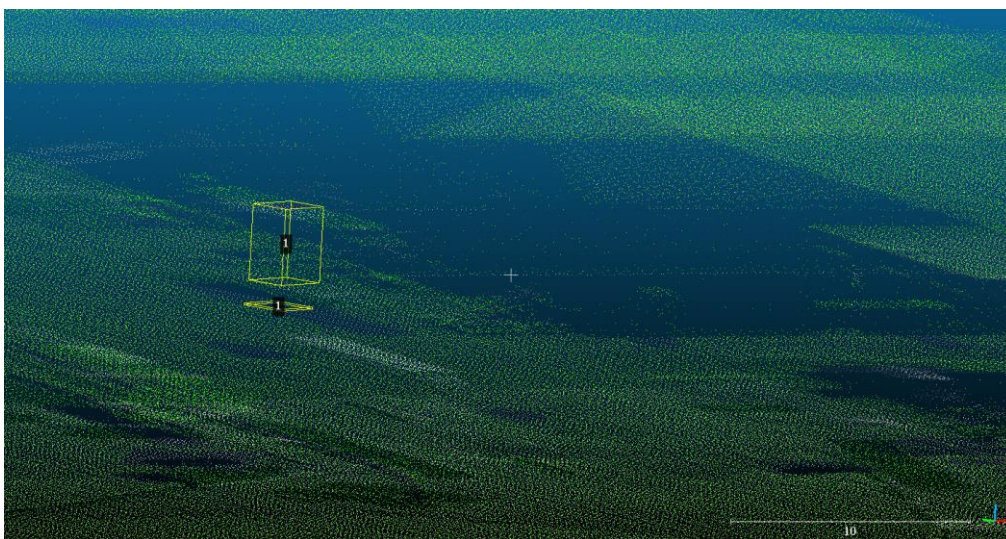
3.2.5. Feltarbeid

3.2.5.1. *Generell fremgangsmåte for feltarbeid*

En utfordring med å bestemme en metode for feltarbeid, var å finne en god metode for å sammenligne målinger gjort med 3 ulike teknologier. Ettersom InSAR kun viser en høydeforandring over en flate, var det ikke nødvendig å måle absolutte høydeverdier under feltarbeidet. For å kunne danne et reelt sammenligningsgrunnlag ble det derfor nødvendig å gjennomføre feltarbeidet på en slik måte at høyder fra landmåling og punktskyer sammen kunne danne en høydeutvikling for den samme flaten som fra InSAR dataene.

Valget falt på å gjennomføre feltarbeidet på en slik måte at resultatet ble så likt laserdataene som mulig. På den måten kunne det konverteres over i LAS-format og sammenlignes direkte med LiDAR dataene i CloudCompare. Videre ville det da bli lettere å slå disse dataene sammen og sette opp mot InSAR. Følgende metode ble utarbeidet for innsamling av høyder fra felt.

I hvert caseområde ble det valgt ut flater på steder med stor påvist høydeforandring i InSAR datasettet og noen fra stabile steder med så liten endring som mulig. Potensielle flater ble sjekket opp mot eksisterende LiDAR datasett for å sikre at flatene var fri for støy i form av store forandringer. Dette kunne være bygninger som ble revet, biler som sto i veien i et av datasettene etc. Til tross for at det ble gjort forberedelser før feltarbeidet, oppsto det likevel noen slike problemer. Et eksempel på en slik type støy er fra LiDAR datasettet på Brattøra i 2017 hvor en trailer er parkert over en av de utvalgte flatene. Dette var dessverre umulig å se da dette datasettet ble overlevert av Trondheim kommune først etter feltarbeidet var gjennomført.

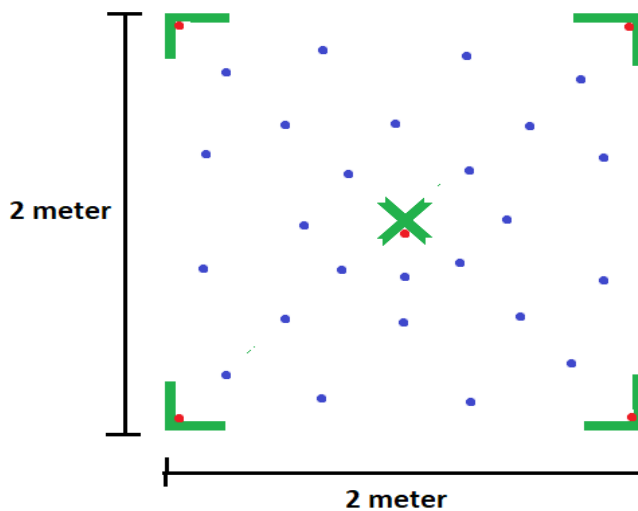


Figur 17: En trailer er parkert over flate 1 på Brattøra i datasettet fra 2017. De to firkantene er representere flate 1 i 2013 (nederst) og i 2017 (øverst).

Flatene ble tegnet opp som et 2x2 meter stort kvadrat ved hjelp av kritt og målebånd. I hver av disse ble en rover brukt til å gjøre 30 statiske målinger over 10 sekunder. Hver flate ble målt 2 ganger slik at det ble totalt målt inn 60 punkter. For å ende opp med en punktsky med jevnt fordelte punkter som ville gi en god representasjon av firkantens høyde, ble det benyttet et fast målemønster med jevnt fordelte punkter. Hjørnepunkter og et sentrumspunkt som vist med rød farge i figur 19 ble forsøkt målt så nøyaktig som mulig for å kunne teste nøyaktigheten opp mot fastmerker i området.

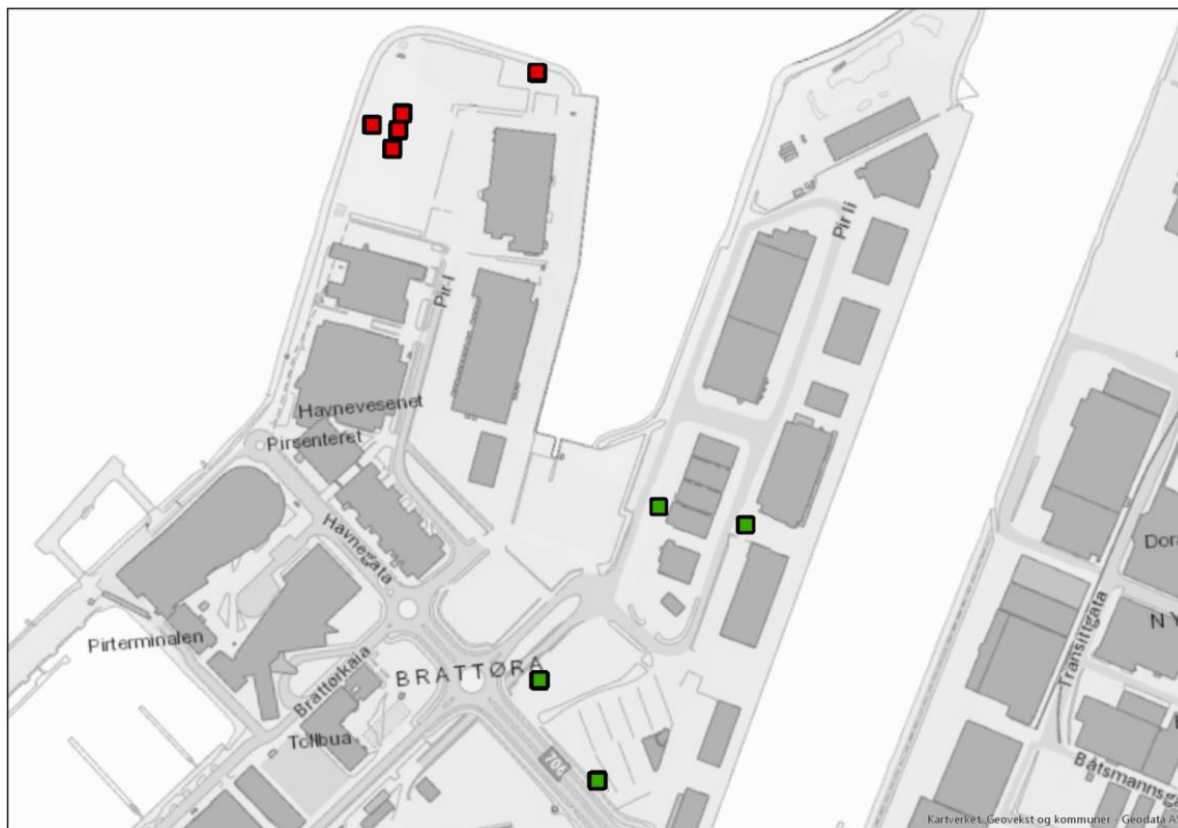


Figur 18: Flatene ble målt med målebånd og tegnet ned med kritt



Figur 19: Alle flater i hvert caseområde målt med samme mønster for jevnest mulig spredning av punkter.

3.2.5.2. Feltarbeid i Trondheim



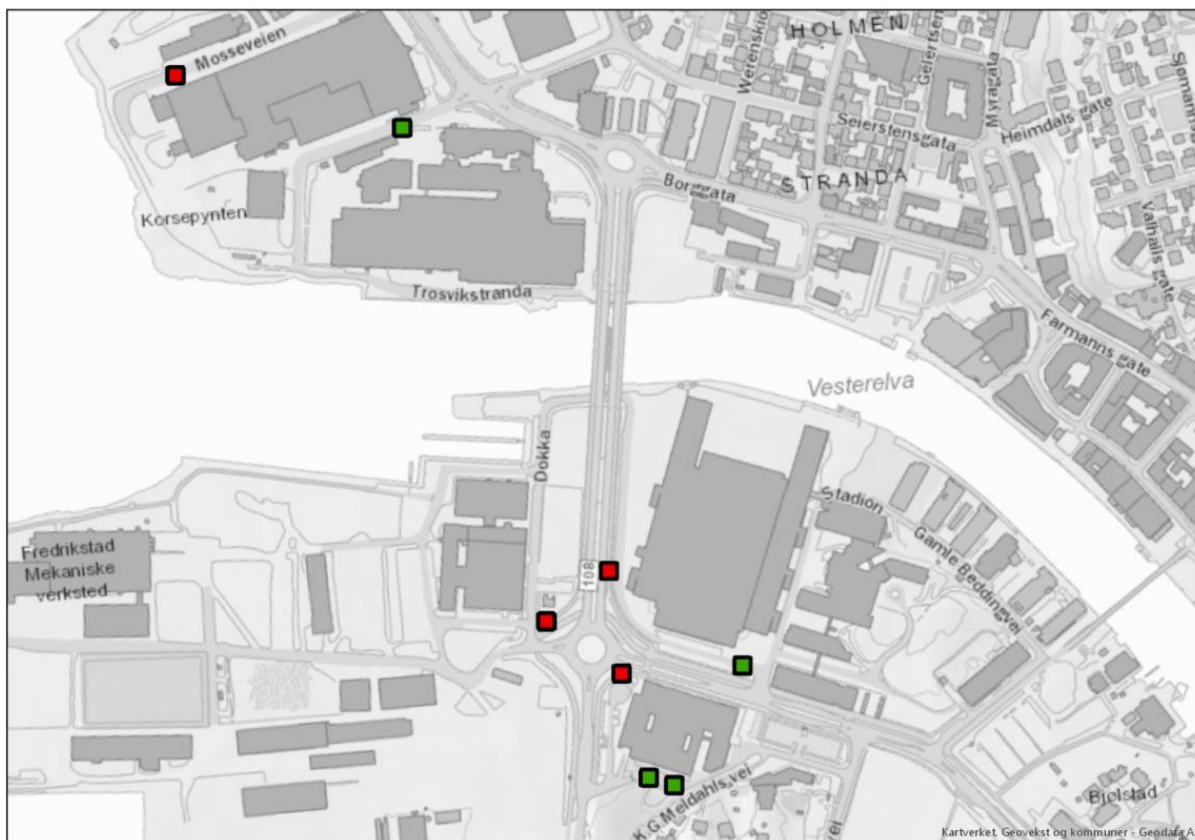
Figur 20: Figuren viser de oppmålte flatene på Brattøra. De grønne firkantene representerer de stabile flatene, mens de røde representerer de ustabile flatene.

Før innmålingen på Brattøra begynte ble tiden brukt til rekognosering av området for å se om de planlagte flatene var frie for snø og andre eventuelle hinder. Til tross for at målingen ble gjort i midten av mars var det heldigvis relativt lite snø og is, men likevel nok til at noen planlagte flater måtte flyttes til nye steder.

Feltarbeidet begynte med å lete etter fastmerker som skulle måles inn for å bidra til nøyaktigheten. Av tilgjengelige fastmerker i nærheten var 2 utilgjengelige bak sperringer, mens de siste 2 ikke var mulig å finne, selv med nøyaktig posisjon. Etter halvannen time med leting, ble en avgjørelse tatt på å begynne målingen uten fastmerker for å rekke å komme gjennom alle punktene.

Ni flater ble målt opp og markert med kritt før noen målinger ble gjort. 5 av disse flatene ble plassert på det området av Brattøra hvor InSAR dataene viste stor nedsynking, mens de 4 andre ble plassert på stabile områder. For hver flate ble det gjort 30 målinger i to omganger slik at sluttresultatet endte på 60 punkter for hver flate. Målingene ble gjort med 2 timers mellomrom for å ha muligheten til å se mer nærmere på nøyaktigheten til punktene ved behov.

3.2.5.3. Feltarbeid i Fredrikstad



Figur 21: Figuren viser de oppmålte flatene på Brattøra. De grønne firkantene representerer de stabile flatene, mens de røde representerer de ustabile flatene.

Fremgangsmåten i Fredrikstad var i stor grad lik som i Trondheim. Det var planlagt 8 flater hvorav 4 var plassert på et stabilt og 4 på ustabil område. Antall målinger per flate ble redusert fra 60 til 40 ettersom 40 målinger viste seg å være mer enn godt nok.

Feltarbeidet begynte med å undersøke utvalgte områder for å se om alle flater var tilgjengelige for måling. Alle flater ble så krittet opp og målingen begynte. Under innmåling ble det opptil flere ganger problemer med å oppnå fix, spesielt på en av flatene befant seg mellom to store blokker. Ved å flytte flaten til et åpnere område ble dette problemet løst.

3.2.6. Etterbehandling av datasett

Punktene fra feltarbeidet ble eksportert over i KOF-format i roveren og deretter overført til datamaskin hvor et Python-script ble brukt til å konvertere disse videre over i CSV-format for lettere uthenting av relevant informasjon.

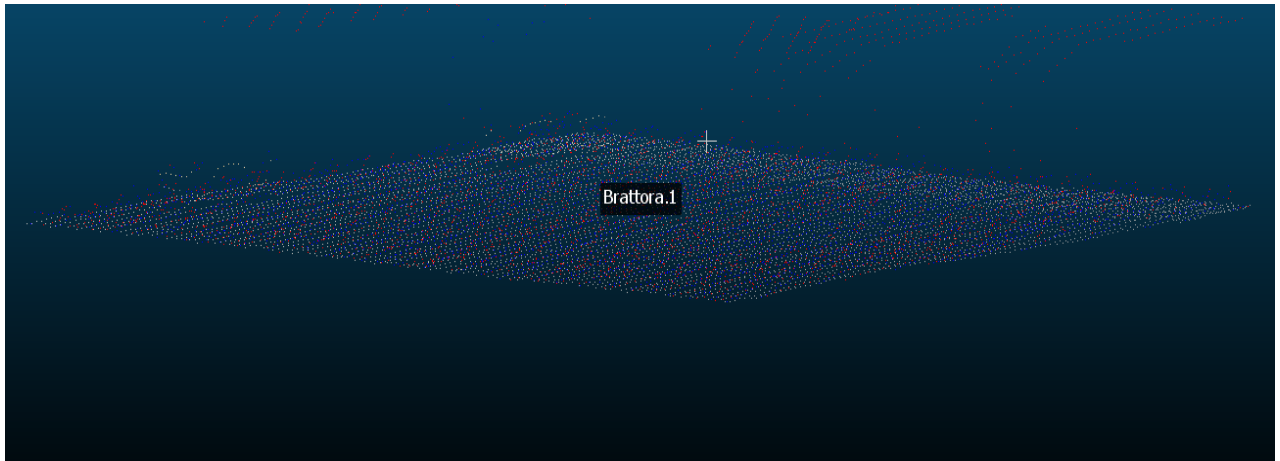
Av tilgjengelige rådata ble kun koordinater og høyder brukt videre. Selv om KOF filene også inneholdt relevant informasjon som standardavvik for hver måling i x, y og z retning, ble ikke disse inkludert i videre beregninger. De tre gjenværende kolonnene ble konvertert til XYZ-format og lagt inn som en punktsky i CloudCompare.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	'point_id'	'datetime'	'euref89u'	'euref89u'	'euref89u'	'vector/pc'	'ecef_x'	'ecef_y'	'ecef_z'	'num_sat'	'pdop'	'pts/epoch'	'meas_me'	's_x'	's_y'	's_z'	's_xx'	's_xy'	's_xz'	's_yy'	's_yz'	's_zz'
2	100	'2019-03-'	7035469	570245.2	2.439	'vector'	0.2705	-7.4887	5.6719	13	1.73	1	'GPS fase	0.0075	0.005	0.011	1	0.26	0.38	1	-0.32	1
3	101	'2019-03-'	7035473	570243.5	2.351	'vector'	-2.8386	-9.6962	7.3019	15	1.53	10	'GPS fase	0.0018	0.0014	0.0036	1	-0.09	0.45	1	-0.38	1
4	102	'2019-03-'	7035473	570242.3	2.377	'vector'	-2.0927	-10.7787	7.0618	14	2.29	10	'GPS fase	0.0014	0.0012	0.0038	1	-0.11	0.4	1	-0.52	1
5	103	'2019-03-'	7035474	570242.8	2.346	'vector'	-3.8573	-10.596	7.8784	14	2.29	10	'GPS fase	0.0015	0.0013	0.004	1	-0.12	0.41	1	-0.52	1
6	104	'2019-03-'	7035474	570244.8	2.404	'vector'	-3.6435	-8.5134	7.6493	13	2.41	10	'GPS fase	0.0016	0.0013	0.0045	1	-0.1	0.44	1	-0.46	1
7	105	'2019-03-'	7035473	570243.8	2.394	'vector'	-3.0465	-9.4258	7.4271	14	2.26	10	'GPS fase	0.0017	0.0015	0.0047	1	-0.12	0.41	1	-0.52	1
8	106	'2019-03-'	7035473	570243	2.384	'vector'	-2.5378	-10.1738	7.2334	14	2.26	10	'GPS fase	0.0018	0.0015	0.0047	1	-0.12	0.41	1	-0.52	1
9	107	'2019-03-'	7035473	570243.8	2.445	'vector'	-2.3584	-9.2765	7.1326	13	2.67	10	'GPS fase	0.0018	0.0015	0.0058	1	-0.12	0.38	1	-0.48	1
10	108	'2019-03-'	7035474	570243.2	2.346	'vector'	-3.3332	-10.1135	7.5762	14	2.25	10	'GPS fase	0.0017	0.0014	0.0044	1	-0.12	0.42	1	-0.51	1
11	109	'2019-03-'	7035473	570242.8	2.357	'vector'	-2.8812	-10.3727	7.3906	13	2.33	10	'GPS fase	0.0019	0.0014	0.0047	1	-0.13	0.47	1	-0.51	1
12	110	'2019-03-'	7035473	570243.3	2.372	'vector'	-2.227	-9.7648	7.0305	12	2.55	10	'GPS fase	0.0021	0.0015	0.0059	1	-0.05	0.54	1	-0.38	1
13	111	'2019-03-'	7035473	570244.3	2.38	'vector'	-2.7987	-8.9154	7.2436	14	2.23	10	'GPS fase	0.0017	0.0014	0.0045	1	-0.12	0.43	1	-0.5	1
14	112	'2019-03-'	7035474	570243.7	2.362	'vector'	-3.4514	-9.6281	7.6085	14	2.21	10	'GPS fase	0.0022	0.0018	0.0058	1	-0.12	0.43	1	-0.5	1
15	113	'2019-03-'	7035473	570242.6	2.361	'vector'	-2.8851	-10.5818	7.4159	14	2.23	10	'GPS fase	0.0021	0.0016	0.0053	1	-0.13	0.47	1	-0.5	1
16	114	'2019-03-'	7035472	570243.3	2.358	'vector'	-2.0809	-9.8186	6.9474	13	2.56	10	'GPS fase	0.0019	0.0013	0.0047	1	-0.04	0.54	1	-0.4	1
17	115	'2019-03-'	7035473	570244.3	2.39	'vector'	-2.6354	-8.8083	7.1648	13	2.4	10	'GPS fase	0.0017	0.0014	0.005	1	-0.11	0.46	1	-0.46	1
18	116	'2019-03-'	7035473	570244.2	2.415	'vector'	-3.0585	-8.9881	7.4169	13	2.41	10	'GPS fase	0.0019	0.0015	0.0051	1	-0.11	0.5	1	-0.46	1
19	117	'2019-03-'	7035474	570243.8	2.382	'vector'	-3.2428	-9.4366	7.5108	13	2.39	10	'GPS fase	0.0015	0.0011	0.0039	1	-0.1	0.5	1	-0.45	1

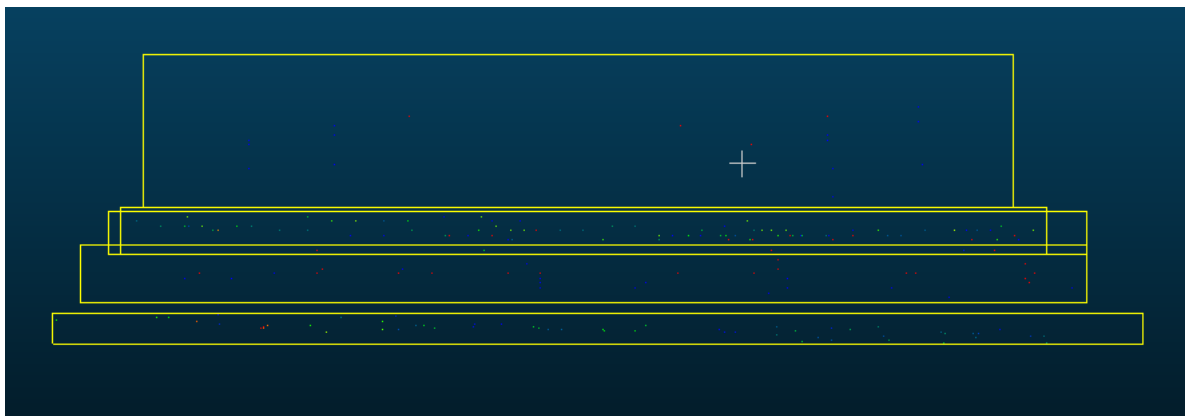
Figur 22: Rådata hentet fra roveren og konvertert fra KOF til CSV ved hjelp av Python.

Med koordinatene fra feltarbeidet lagt inn i CloudCompare ble det mulig å lage et utsnitt rundt de oppmålte flatene og dermed isolere alle punkter som falt innenfor dette utsnittet. På denne måten kunne punkter fra de ulike LiDAR-lagene som falt innenfor flatene markeres, klippes ut og sammenlignes mot hverandre for å finne en høydeforskjell. Til tross for tilgjengelige funksjoner for utregning av høydeforskjell mellom punktstyker i CloudCompare, var dokumentasjonen på hvordan denne verdien ble utregnet dårlig forklart. Det var heller ikke mulig å finne høydeforskjell mellom to ulike flater som viste seg å være nødvendig for å ta høyde for eventuelle offset selve punktstyken.

For å få en bedre kontroll over beregningen av høyder og sammenligning mellom flater ble derfor alle isolerte punktverdier eksportert ut til CSV-format. Dette førte til en mer manuell og tidkrevende prosess, men var til gjengjeld lettere å kontrollere og visualisere.



Figur 23: En av flatene fra feltarbeidet på Brattøra skjært ut med punkter fra flere punktskyer. Hentet fra CloudCompare



Figur 24: 5 sett med høyder fra ulike år. Hver gule boks rommer alle punkter fra et datasett og viser hvordan flaten har sunket over tid. Hentet fra CloudCompare

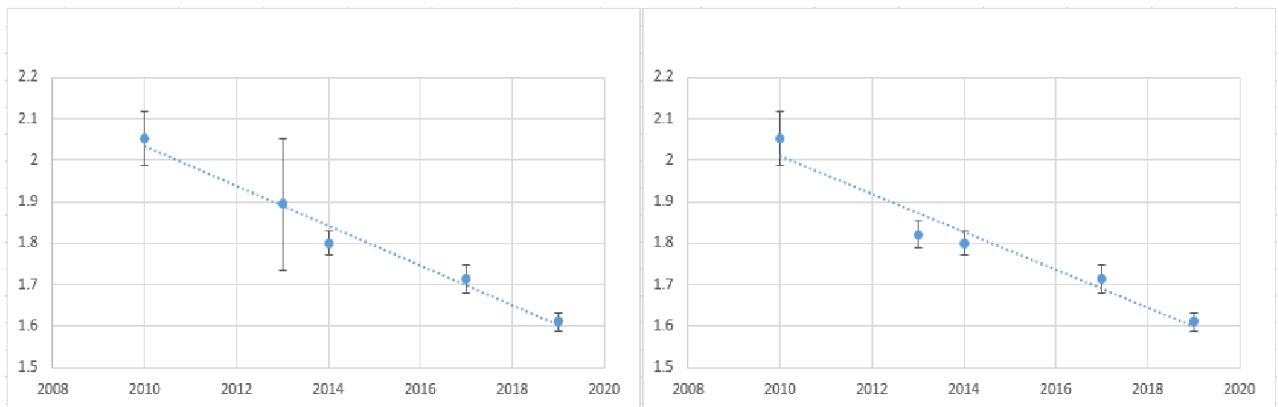
3.2.7. Fjerne støypunkter fra laserdata

Til tross for at det ble gjort forberedelser før feltarbeidet ved å undersøke ortofoto og tilgjengelige punktskyer, oppsto det noen problemer under feltarbeidet. Både i Trondheim og i Fredrikstad ble det nødvendig å finne en eller flere nye flater under selve målingen da det oppsto noen uforutsette utfordringer. På Brattøra var noen flater utilgjengelig på grunn av snø og is, mens i Fredrikstad var noen flater i satellittskygge, noe som førte til problemer med å oppnå en nøyaktig posisjon.

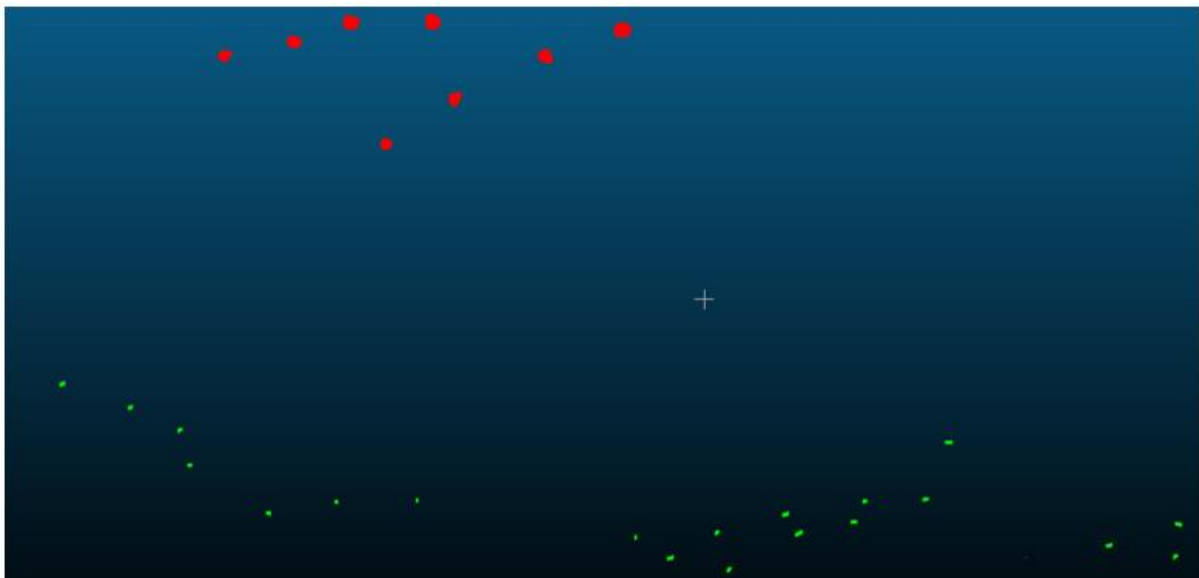
Ved å benytte InSAR karttjenesten til NGU på telefon ble nye flater ble valgt ut, men det var ikke mulig å sjekke punktskyene ute i felt. Resultatet var at noen av de tidligere punktskyene hadde gjenstander plassert slik at det enten delvis eller fullstendig dekket flaten og førte til store avvik. I etterarbeidet med prosessering av flater ble det fort synlig hvilke punktskyer som var

brukbare. Ved å gå tilbake til CloudCompare og undersøke de gjeldende flatene ble det lett å finne syndebykkene.

Ett eksempel på dette er i punktskyen fra 2013 på Brattøra som viser et svært stort standardavvik for en av flatene (figur 25). Ser vi nærmere i CloudCompare, ser vi fort omrisset av en betongkant som har stått inne i flaten. Ved å filtrere ut disse punktene faller standardavviket til et mer normalt nivå

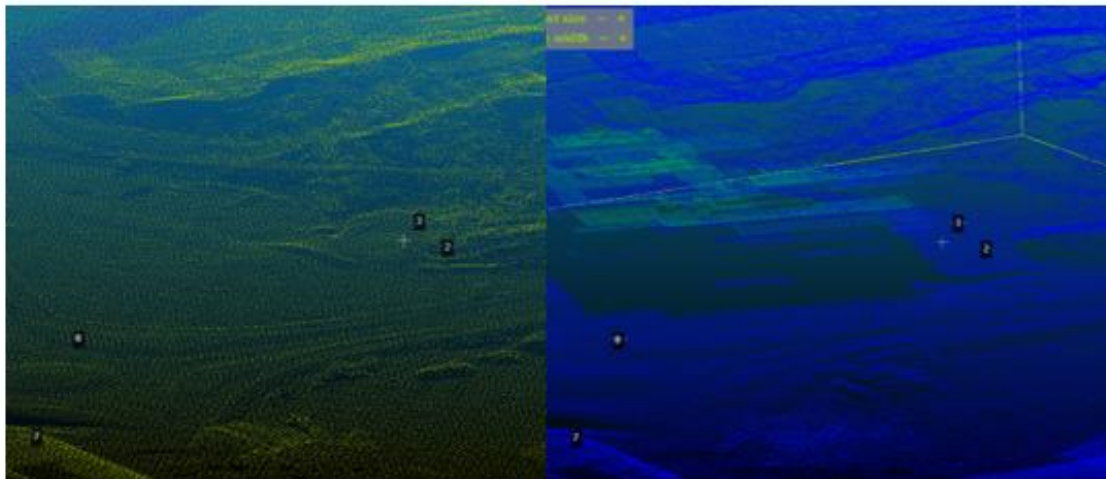


Figur 25: plottet til venstre viser et unormalt stort standardavvik i punktskyen fra 2013. Ved å fjerne støypunkter, ble standardavviket normalt som vist i figuren til høyre.



Figur 26: De røde punktene viser at noe har stått inne i på flaten i punktskyen fra 2013. Prikker er førstørret for å være synlige mot den mørke bakgrunnen. Bildet er hentet fra CloudCompare

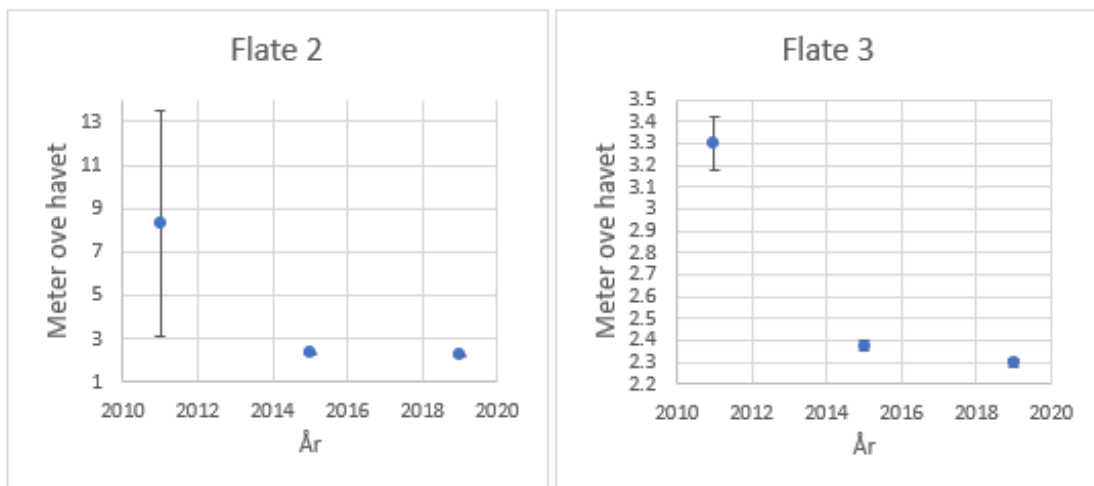
Et annet eksempel er fra Fredrikstad hvor to av de flatene som viste tilnærmet ingen deformasjon. Disse punktene ble valgt under feltarbeidet da to planlagte flater ikke var mulig å måle da instrumentet ikke fikk fix. Det viste seg at dette området ikke var utbygd i 2011 og dermed befant seg i helning/skog.



a)

b)

Figur 27: Laserdata viser store endringer for flate 2 og 3 mellom 2011 og 2015.



a)

b)

Figur 28: Høydene i flate 2 og 3 viser hvordan området i 2010 var en skråning mens det i 2015 har blitt endret i sammenheng med utbygging

3.2.8. Videre bruk av InSAR data

Dersom Kartverket skal kunne ta i bruk InSAR datasettet som et verktøy for å si noe om tilstanden på NDH, må datasettet først forenkles i både størrelse og kompleksitet. Denne delen vil presentere en fremgangsmåte for hvordan filtrere datasettet levert av NGU ved å fjerne overflødige data, punkter og redusere antall filer.

Et forenklet datasett kan videre konverteres til andre formater som gjør videre bruk av mye lettere. Et forslag til hvordan dette kan gjøres vil presenteres ved å gjøre ytterligere filtreringer av datasettet i GIS og til slutt visualisere hvordan NDH kan se ut om 2, 5 og 10 år med utgangspunkt i den høydeendringen vi ser i caseområdene i dag.

3.2.8.1. Filtrering av datasett

Et egenkomponert Python script ble brukt for å effektivt kunne iterere gjennom mange filer og filtrere ut uønsket informasjon og redusere det totale antallet filer. Med så store datamengder ble det likevel nødvendig med en såkalt «splitt og hersk» metode hvor datasettet blir delt opp i mindre deler for lettere behandling.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	pid	track	mode	burst	line	pixel	longitude	latitude	height	mean_vel	temporal	vertical_v	amplitude	incidence	track_ang	los_east	los_north	los_up	20150605	20150607
2	3.79E+14	44 IW3		375	691	22905	10.40519	63.44322	-16.52	-8.99	0.643	-12.82	0.543	45.483	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	20.62	
3	3.79E+14	44 IW3		375	690	22895	10.40487	63.44307	-2.23	-8.38	0.674	-11.95	0.462	45.483	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	17.99	
4	6.33E+14	73 IW1		379	242	10945	10.40509	63.44358	-7.82	-13.71	0.634	-16.48	0.499	33.709	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		28.39
5	6.33E+14	73 IW1		379	236	10938	10.40508	63.44281	-1.01	-10.34	0.824	-12.43	0.644	33.708	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		28.73
6	6.33E+14	73 IW1		379	247	10934	10.40409	63.44412	-0.5	-21.21	0.659	-25.5	0.647	33.707	-12.693	0.5414	0.1219	-0.8319		54.58
7	6.33E+14	73 IW1		379	237	10944	10.40534	63.44297	-6.76	-13.18	0.795	-15.84	0.536	33.709	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		28.56
8	3.79E+14	44 IW3		375	690	22896	10.40484	63.44307	-6.87	-8.11	0.739	-11.57	0.506	45.482	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	16.04	
9	6.33E+14	73 IW1		379	242	10941	10.40466	63.44354	-11.01	-15.61	0.646	-18.77	0.602	33.707	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		34.91
10	6.33E+14	73 IW1		379	244	10931	10.40379	63.44371	-8.46	-17.12	0.704	-20.58	0.656	33.705	-12.693	0.5414	0.1219	-0.8319		38.08
11	6.33E+14	73 IW1		379	244	10932	10.40386	63.44371	-8.89	-16.53	0.715	-19.87	0.594	33.705	-12.693	0.5414	0.1219	-0.8319		43.72
12	6.33E+14	73 IW1		379	240	10945	10.40505	63.44332	-13.22	-10.18	0.666	-12.24	0.54	33.708	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		33.06
13	3.79E+14	44 IW3		375	688	22891	10.40485	63.44282	5.79	-9.5	0.711	-13.54	0.494	45.483	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	19.76	
14	6.33E+14	73 IW1		379	239	10944	10.40511	63.4432	-10.58	-13.81	0.703	-16.6	0.638	33.708	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		37.76
15	6.33E+14	73 IW1		379	246	10935	10.404	63.44398	-8.4	-19.22	0.72	-23.1	0.451	33.706	-12.693	0.5414	0.1219	-0.8319		42.66
16	3.79E+14	44 IW3		375	689	22897	10.40506	63.44296	-1.28	-6.77	0.668	-9.66	0.796	45.483	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	14.27	
17	3.79E+14	44 IW3		375	691	22904	10.40518	63.44322	-13.81	-9.35	0.769	-13.34	0.46	45.483	-9.036	0.7042	0.112	-0.7011	19.18	
18	6.33E+14	73 IW1		379	243	10942	10.40461	63.44366	-13.59	-16.92	0.728	-20.34	0.53	33.707	-12.692	0.5414	0.1219	-0.8319		35.63

Figur 29: De første kolonnene inneholder blant annet punktets posisjon, endringsvektor og informasjon om opptakssituasjonen

Figur 29 viser de 15 første kolonnene i datasettet som blant annet inneholder informasjon om hvert punkts plassering, bevegelse og info om opptakssituasjonen for punktet. Strukturen var heldigvis den samme for alle filer i datasettet, slik at et enkelt script kan fungere på alle filer. Videre kolonner inneholder alle observasjoner for punktet med dato for opptak.

	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	2015-06-03T17:18:10.657677	2015-06-15T17:18:11.426695	2015-06-27T17:18:12.280941	2015-08-02T17:18:13.329562	2015-08-14T17:18:13.958549	2015-08-26T17:18:14.522992	2015-09-07T17:18:14.993061	2015-10-13T17:18:15.735327
2	0.2	0.21	-1.79	-1.2	-1.17	-1.28	-1.79	-4.76
3	2.74	2.71	-1.99	-2.72	-2.15	-2.53	-2.92	-1.82
4	3.05	3.03	-0.32	-0.95	-0.82	-1.24	-1.79	-0.92
5	-2.05	-2.08	2.02	0.62	-0.57	-1.23	-3.21	-4.88
6	2.09	2.08	3.86	2.97	2.09	1.52	-0.87	-1.91
7	-1.23	-1.22	-3.68	-2.9	-0.97	-1.43	-1.28	-2.75
8	-4.53	-4.5	-2.09	-1.61	-2.11	-2.36	-3.45	-5.57
9	-3.26	-3.24	-4.35	-4.41	-4.06	-4.3	-5.57	-4.95

Figur 30: Viser de 8 neste radene som inneholder dato for observasjon i og punktets høydeforandring i antennens sikteretning. Antall observasjoner varierer, men ligger i snitt på 50 +- 20

Første Python script hadde to hovedoppgaver;

1. Forkaste alle uønskede kolonner med som inneholder overflødig informasjon
2. Sveise sammen alle CSV-filer slik at vi sitter igjen med en CSV-fil med våre utvalgte kolonner

Når scriptet er ferdig er det kun 'Latitude', 'longitude' og 'vertical velocity' som er blitt beholdt. Siden denne oppgaven kun ser på potensialet for bruk av den vertikale høydeendringen, var det ikke nødvendig å beholde mer informasjon Et siste pluss med å bare velge ut disse 3 verdiene, er at filen enkelt kan konverteres over til en punktsky ved å sette latitude, longitude og vertikal høydeendring som x, y og z.

Neste steg blir å filtrere ut alle rader hvor den vertikale høydeendringen ikke var stor nok. Parameterne ble her satt til å filtrere vekk alle rader med vertical velocity mellom 4 og -4. I tillegg ble alle verdier over 50 og under -50 også fjernet da så store høydeendringer ble ansett som støy.

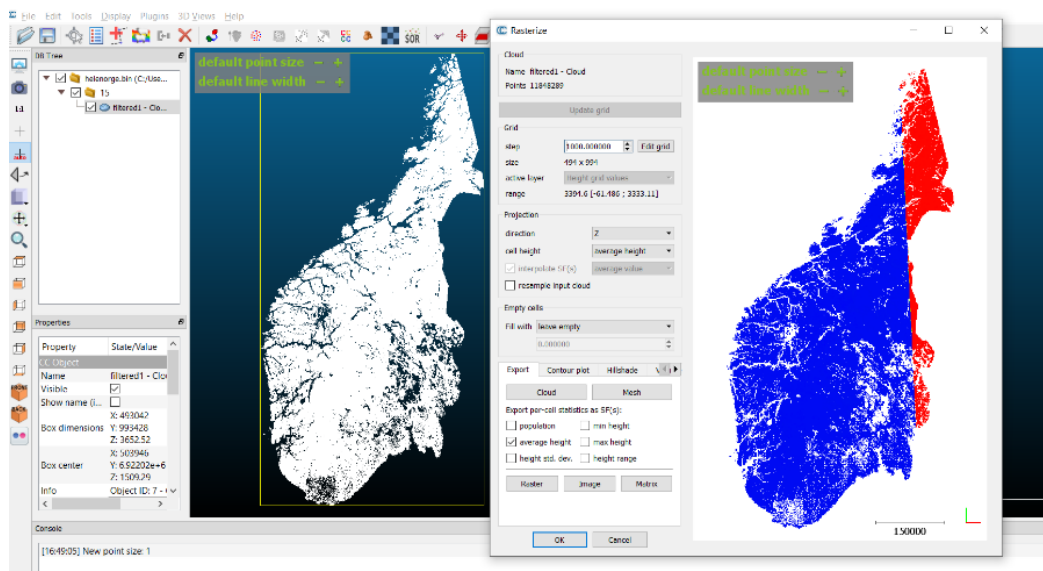
Etter å ha kjørt en av mappene fra datasettet gjennom disse to scriptene, ble 98 filer på totalt 69.5GB redusert ned til 7 filer på 269 MB. Ved å gjenta dette for alle mapper i ascending 2 datasettet ble 347 filer på tilsammen 260 GB redusert ned til 23 filer på 680 MB. Nesten 1/400 av original størrelse.

Ved ytterlige behov for forenkling av data kan det første scriptet kjøres flere ganger for å sitte igjen med så få filer som ønskelig. Ettersom metoden ble utviklet underveis, var imidlertid lettere å håndtere flere små filer enn en stor da det fortsatt var svært mange punkter å håndtere. I begynnelsen ble alle filer konvertert fra CSV til LAS-filer for å kunne brukes i CloudCompare.

Dette ble gjort ved å sette opp en prosess i programvaren FME og transformere filene. Det viste seg etter hvert at CloudCompare også taklet XYZ-formatet godt. Siden en CSV fil kan konverteres til XYZ ved kun å endre filformatet, ble bruken av FME utelatt fra metoden totalt.

3.2.9. Viderebehandling i CloudCompare

Det reduserte datasettet som kom ut av filtreringsprosessen over ble lagt direkte inn i CloudCompare. Fra her kan datasettet lett deles opp og eksporteres ut i ulike formater. De to caseområdene ble klippet ut fra datasettet og eksportert ut i GeoTIFF i et grid på 10x10 meter.



Figur 31: Halve Norge vist i CloudCompare med menyen for rasterisering av datasettet.



Figur 32: figuren til venstre viser Brattøra med 25x25 meter mens figuren til høyre viser 10x10 meter.

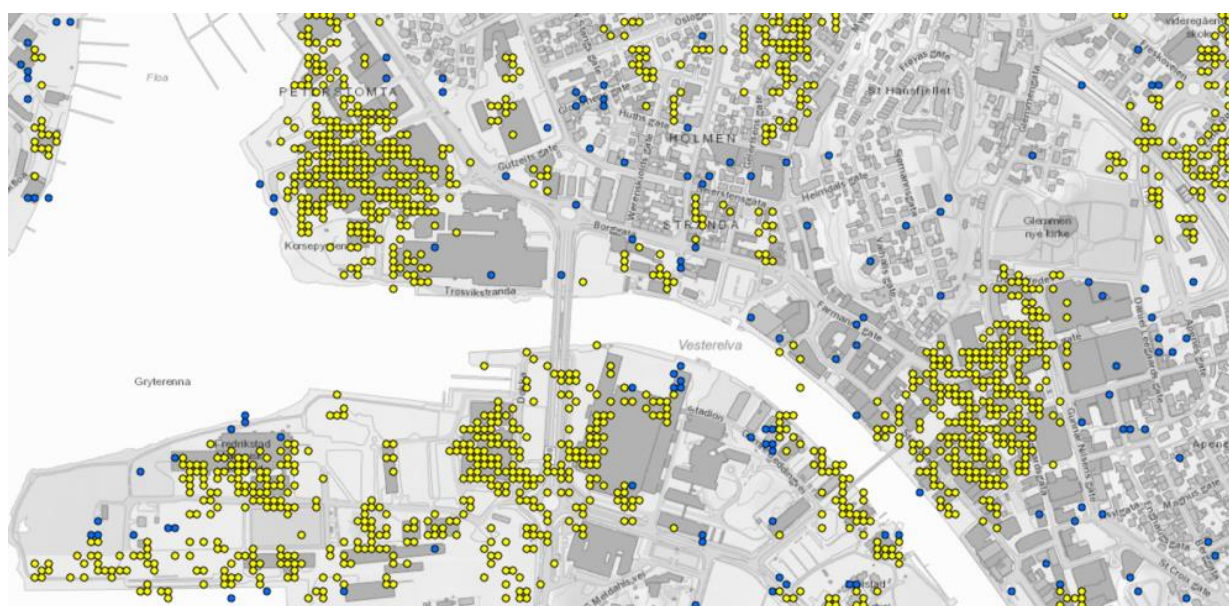
3.2.10 Finne og isolere cluster

Gjennom Python har vi til nå fjernet alle punkter som ikke hadde en høydeendring på mer enn 4mm/år. En siste type filtrering som før nå ikke var mulig var å finne *cluster* i datasettet. Dette går derimot fint an i ArcGIS. En ting som ble synlig i de to utvalgte caseområdene var hvordan punkter klumpet seg sammen i de områdene med stor deformasjon. Dersom en filtreringsprosess kan forkaste alle punkter som ikke befinner seg i umiddelbar nærhet til andre, vil gjenværende punkter med større sannsynlighet være en slik flate.

Én måte å gjøre denne filtreringen på er ved følgende fremgangsmåte: Ved å lage et *tesselation* (rutenett) over caseområdet og benytte funksjonen «summerize within», vil ArcGIS lage en statistikk over hvor mange punkter som faller innenfor hver rute. Dersom alle ruter som inneholder under et gitt antall punkter slettes, kan de punktene som faller utenfor fjernes gjennom «erase point» funksjonen.



Figur 33: Rutenett over Fredrikstad hvor alle ruter som inneholdt 4 eller færre punkter ble slettet



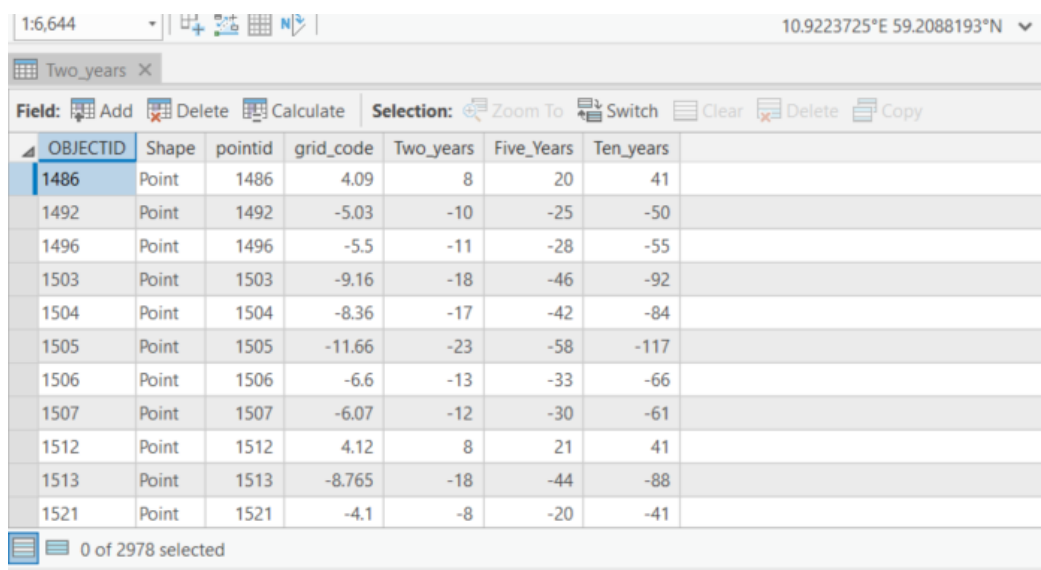
Figur 34: De gule punktene ble beholdt mens de ble filtrert vekk gjennom «erase point» funksjonen

Dette er et enkelt eksempel på hvordan en slik filtrering kan gjøres. Ved å variere rutenettstørrelse og krav til antall punkter som skal falle innenfor, vil brukeren selv kunne bestemme de parameterne som styrer resultatet.

3.2.11 Hvordan identifisere områder der NDH trenger oppdatering over tid

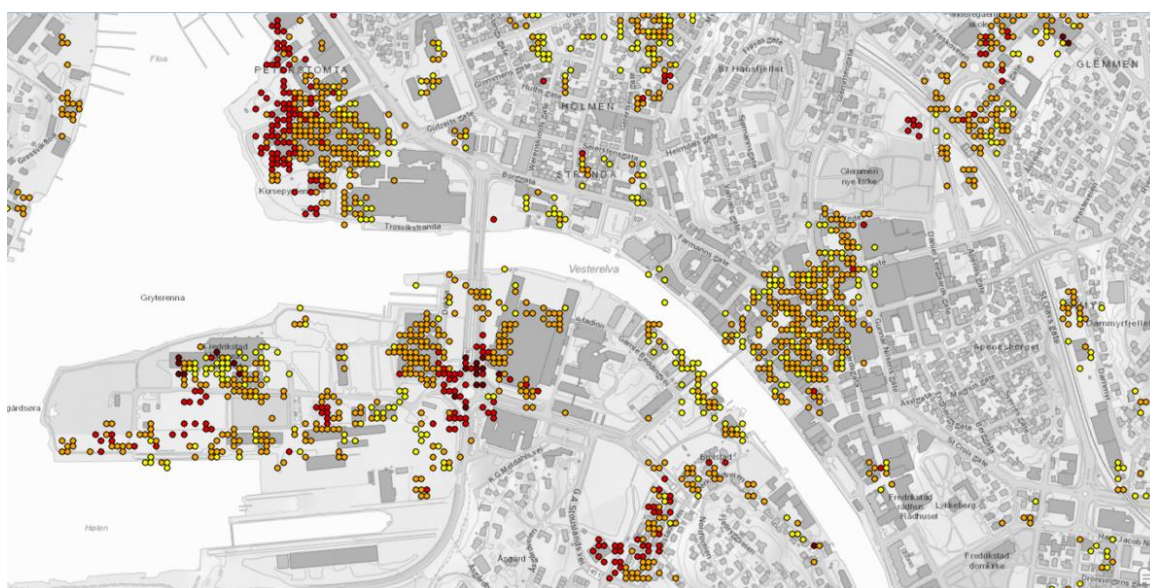
Frem til nå har prosessen i stor grad handlet om å verifisere om utviklingen vist i InSAR stemmer overens med hva historiske LiDAR data og landmåling viser. Etter en omfattende filtreringsprosess sitter vi igjen med de punktene som burde kunne brukes til videre studie med relativt høy pålitelighet.

Hvordan kan vi nå bruke det gjenværende datasettet til å se fremover? Ved å anta en at hvert punkt fortsetter en lik lineær utvikling, kan vi ved å multiplisere utviklingen med ønsket antall år finne ut hvor feil nasjonal detaljert høydemodell vil bli over tid.



OBJECTID	Shape	pointid	grid_code	Two_years	Five_Years	Ten_years
1486	Point	1486	4.09	8	20	41
1492	Point	1492	-5.03	-10	-25	-50
1496	Point	1496	-5.5	-11	-28	-55
1503	Point	1503	-9.16	-18	-46	-92
1504	Point	1504	-8.36	-17	-42	-84
1505	Point	1505	-11.66	-23	-58	-117
1506	Point	1506	-6.6	-13	-33	-66
1507	Point	1507	-6.07	-12	-30	-61
1512	Point	1512	4.12	8	21	41
1513	Point	1513	-8.765	-18	-44	-88
1521	Point	1521	-4.1	-8	-20	-41

Figur 35: Tabellen viser verdiene til punktene i Fredrikstad



Figur 36: Ved å gange «vertical velocity» med en verdi kan vi se hvor mye et punkt har beveget seg i løpet av denne tiden

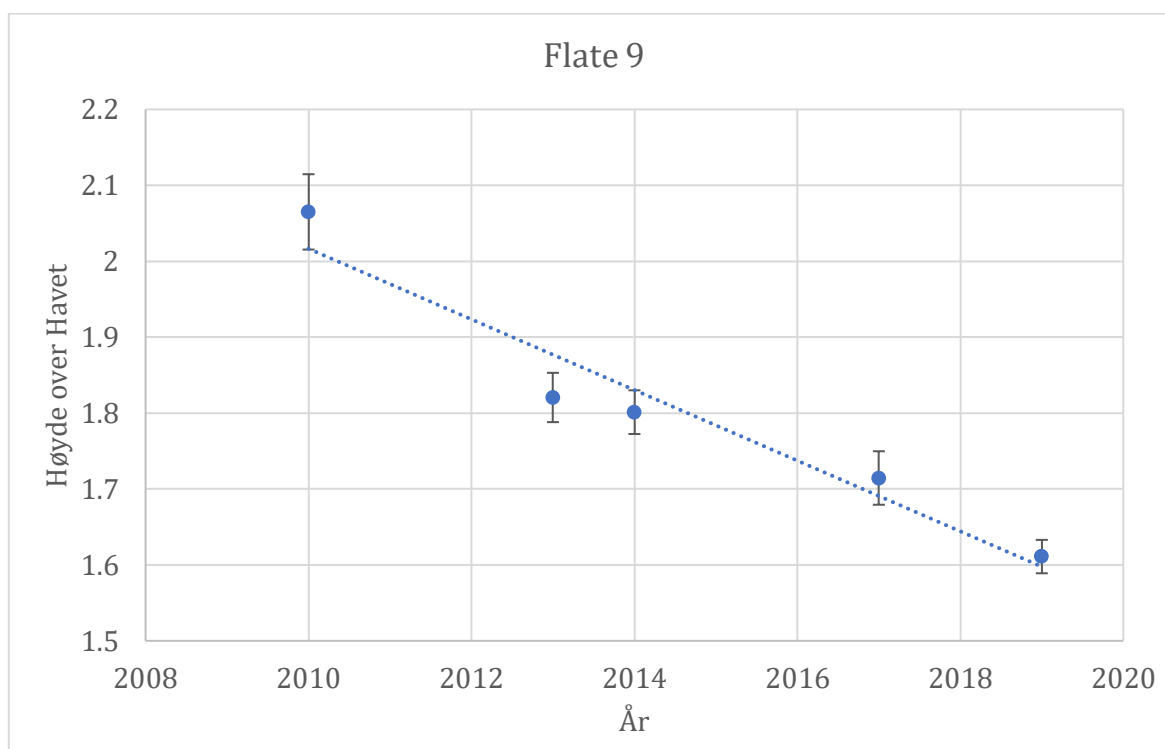
4. Resultater

I dette kapitlet gjennomgås resultatene som er funnet ved hjelp av fremgangsmåten benyttet i metodekapitlet. Første del vil presentere resultater fra ulike faser av prosesseringen i form av plot. Dette er for å gi en bedre forståelse av hvordan resultatene fra egen datainnsamling blir omgjort for å kunne sammenlignes med InSAR datasettet. Deretter vil resultatene fra de to caseområdene fremstilles etterfulgt av eksempler på hvordan InSAR datasettet kan visualiseres for å vise hvor NDH vil være utdatert og i hvilken grad.

Basert på dataene lagt fram i dette kapitlet skal problemstillingen besvares i kapittel 5.

4.1 Fremstilling av datasett for måleflater

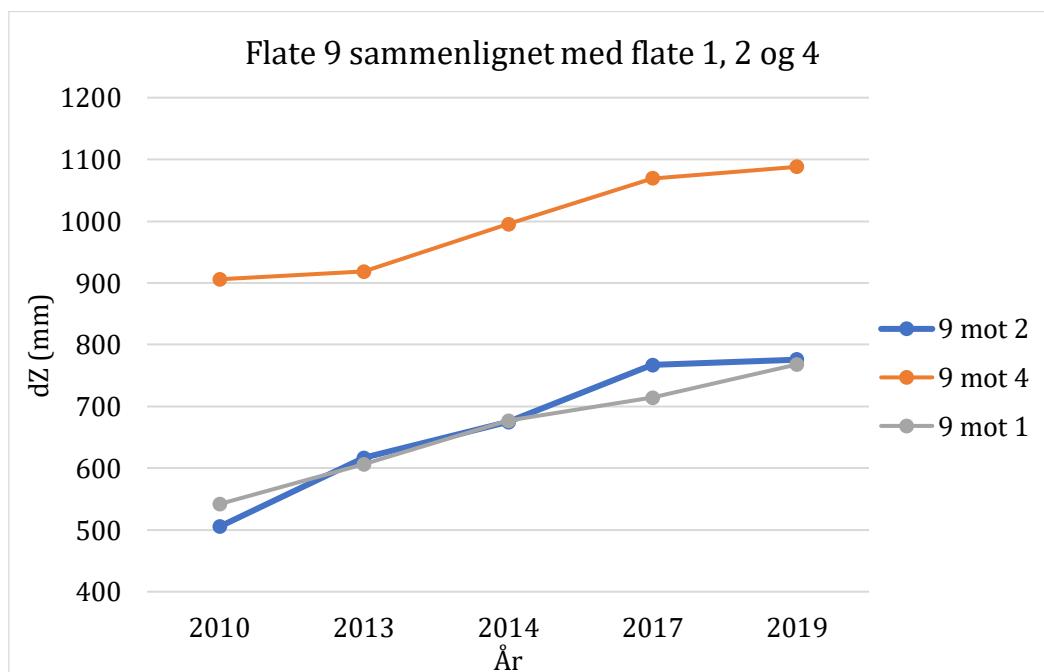
Figur 35 under tar for seg høydeutviklingen i flate 9 på Brattøra i Trondheim. Grafen viser snitthøyden for samme flate i punktskyene i 2010, 2013, 2014 og 2017 komplementert av landmåling fra feltarbeid i 2019. Y-aksen representerer høyde over havet mens X-aksen viser fra hvilket år målingene stammer fra.



Figur 37: Gjennomsnittshøyde i flate 9 for hvert år med standardavvik.

Hadde høydeverdiene hentet ut fra LiDAR-datasettet vært helt feilfrie, kunne høydeutviklingen fra figur 35 blitt direkte sammenlignet med utviklingen i InSAR datasettet.

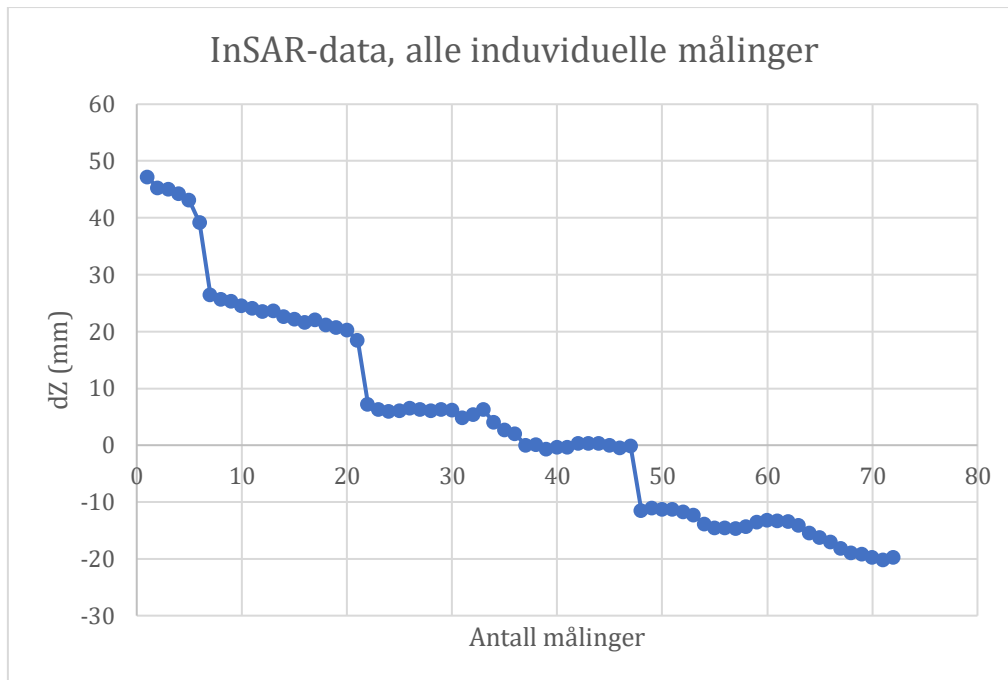
Det som ikke kommer frem i figur 35 er eventuelle høydeskift mellom punkttskyene. Høydeskift i LiDAR målinger skal være korrigert, og noen av datasettene fra kartverket inneholder informasjon om størrelsen og retningen på denne korreksjonen. Dessverre er ikke denne informasjonen tilgjengelig for alle punkttskyer. Siden denne studien bruker noen datasett uten denne informasjonen, må vi finne en måte å ta høyde for dette. Ved å kun se på høydeforskjellen mellom flater i samme punkttsky, vil ikke høydeskift kunne påvirke resultatene. Dersom sammenligning av de samme flatene gjentas over flere år kan en høydeutvikling hentes ut ved å se om differansen øker eller minker.



Figur 38: Utvikling av høydeforskjellen mellom ustabile flate 9 og 3 stabile flater

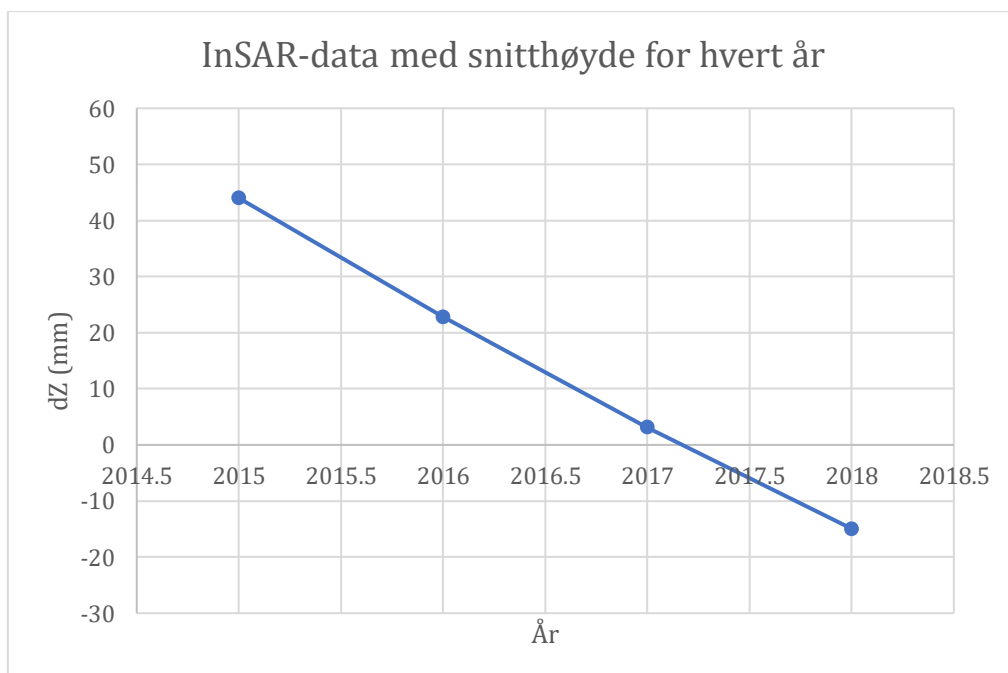
Her representerer Y-aksen høydeforandring i millimeter og X-aksen tid i år. Merk at grafen viser hvordan høydeforskjellen mellom flate 9 mot de andre flatene blir større over tid.

Sammenlignes flate 9 med flate 4 ser vi at avstanden mellom flatene øker fra 90 cm i 2010 til nesten 110 cm i 2019, en økning på tilnærmet 20 cm på en periode over 9 år. Dette tilsvarer ca. 2 centimeter per år som stemmer overens med hva NGU hevder InSAR dataene viser.



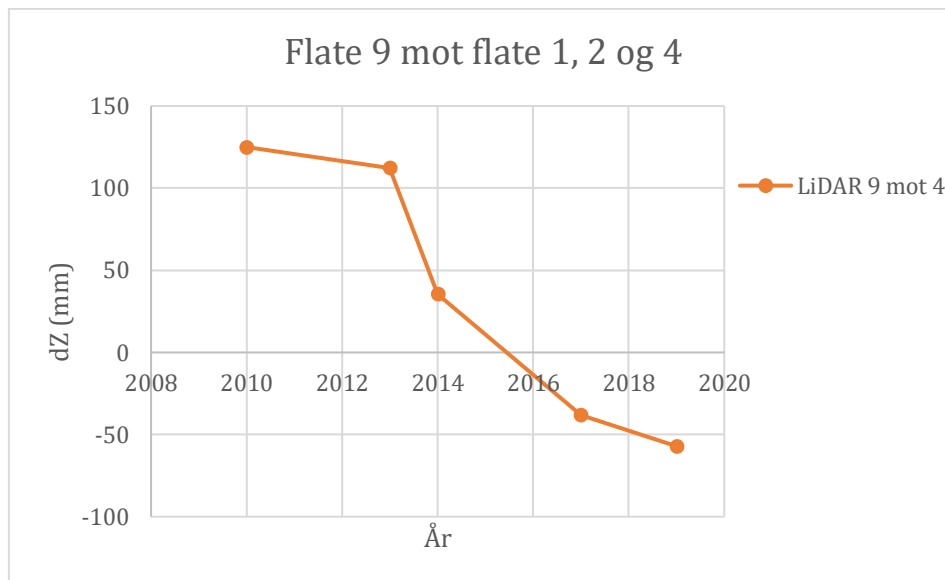
Figur 39: InSAR målinger hentet direkte fra tjenesten.

Figur 37 viser alle InSAR observasjoner over flate 9. Y-aksen representerer høydeforandring i millimeter og X-aksen antall målinger gjort over tidsrommet 2015 – 2018. Fordi målinger kun gjøres i fra juni – oktober, er det lett å se på hvor målinger opphører og begynner igjen. For å kunne sette InSAR dataene opp imot LiDAR og landmåling blir alle målinger for hvert år midlet slik som i figur 38 under:

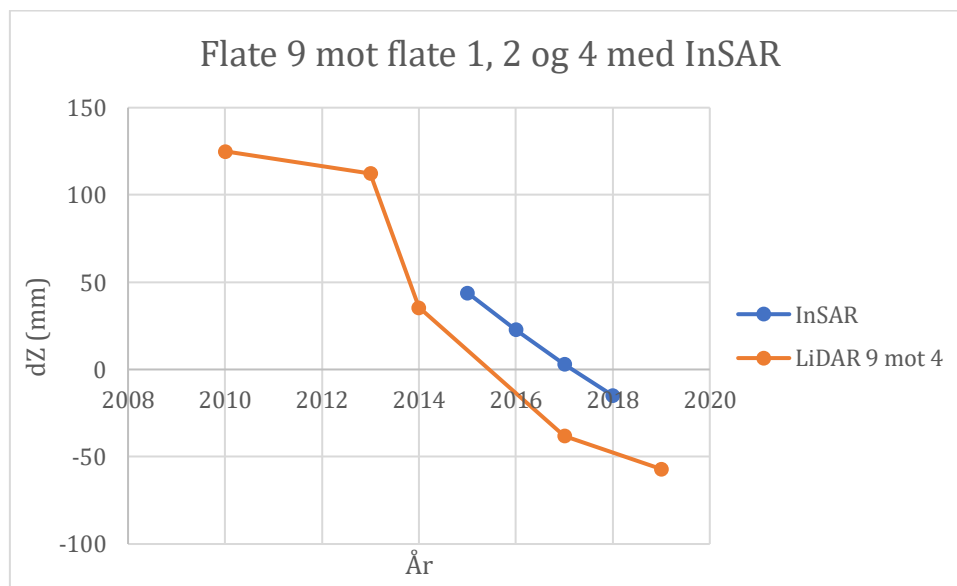


Figur 40: InSAR målinger over flate 4 hvor alle verdier fra hvert år er gjort et

Siden InSAR datasettet også kun viser en høydeendring over tid, kan vi begynne å sammenligne datasettene direkte. Ved å trekke fra høydeutviklingen mellom hvert år fra en fiktiv verdi tilpasset InSAR dataene, kan vi se om den generelle tendensen i deformasjon stemmer overens.



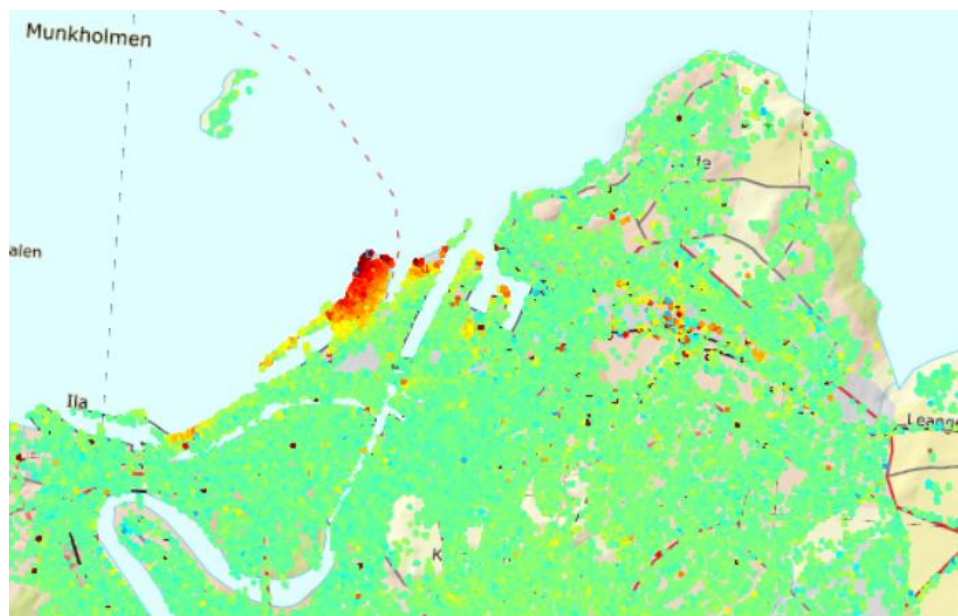
Figur 41: Flate 9 begynner på en fiktiv høyde på 125mm. For hvert år trekkes høydeutviklingen fra denne startverdien



Figur 42: Viser deformasjon for flate 9 mot flate 4, vist sammen med InSAR

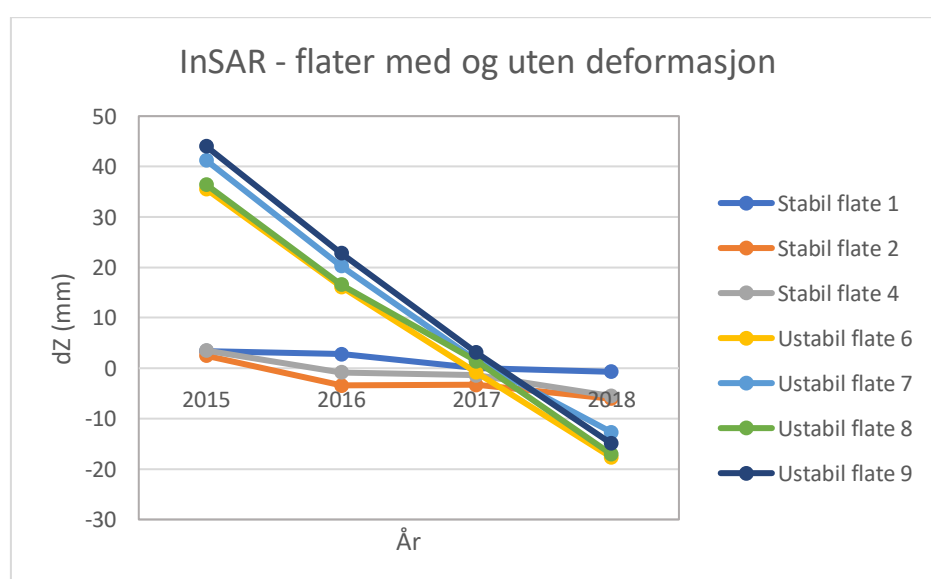
Denne modellen vil videre bli brukt for å vise hvordan høyder fra LiDAR og feltmåling stemmer overens med InSAR datasettet.

4.2 Caseområde 1: Brattøra i Trondheim

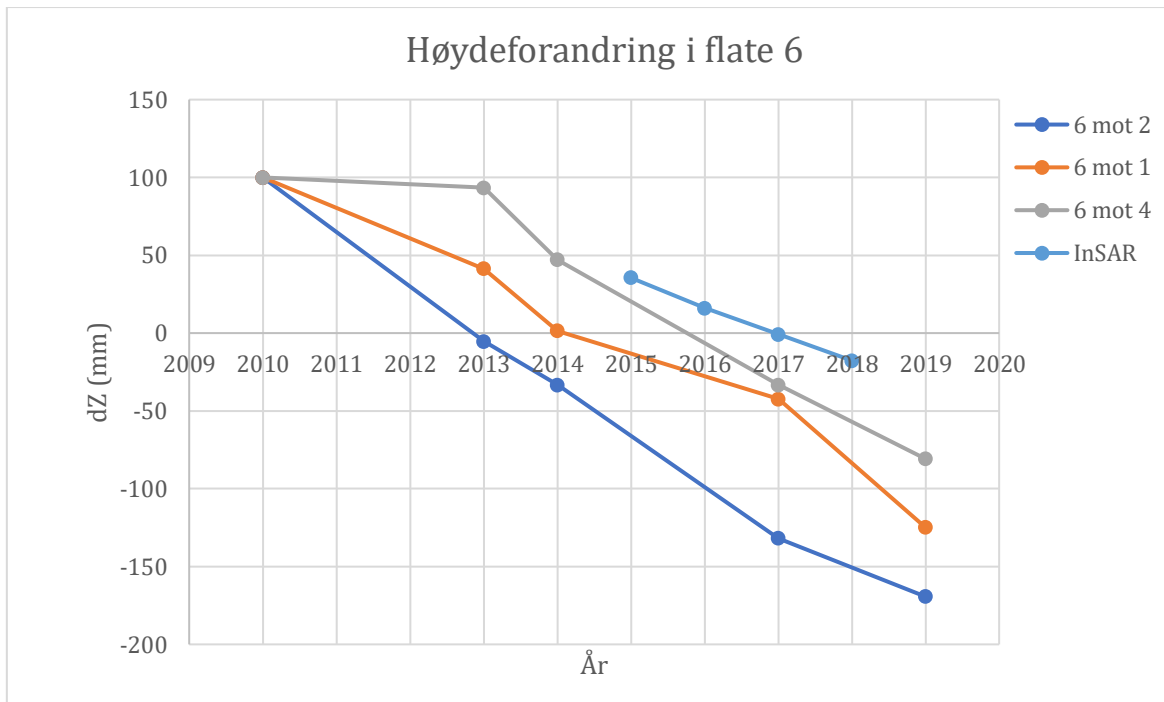


Figur 43: Viser Brattøra i Trondheim. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)

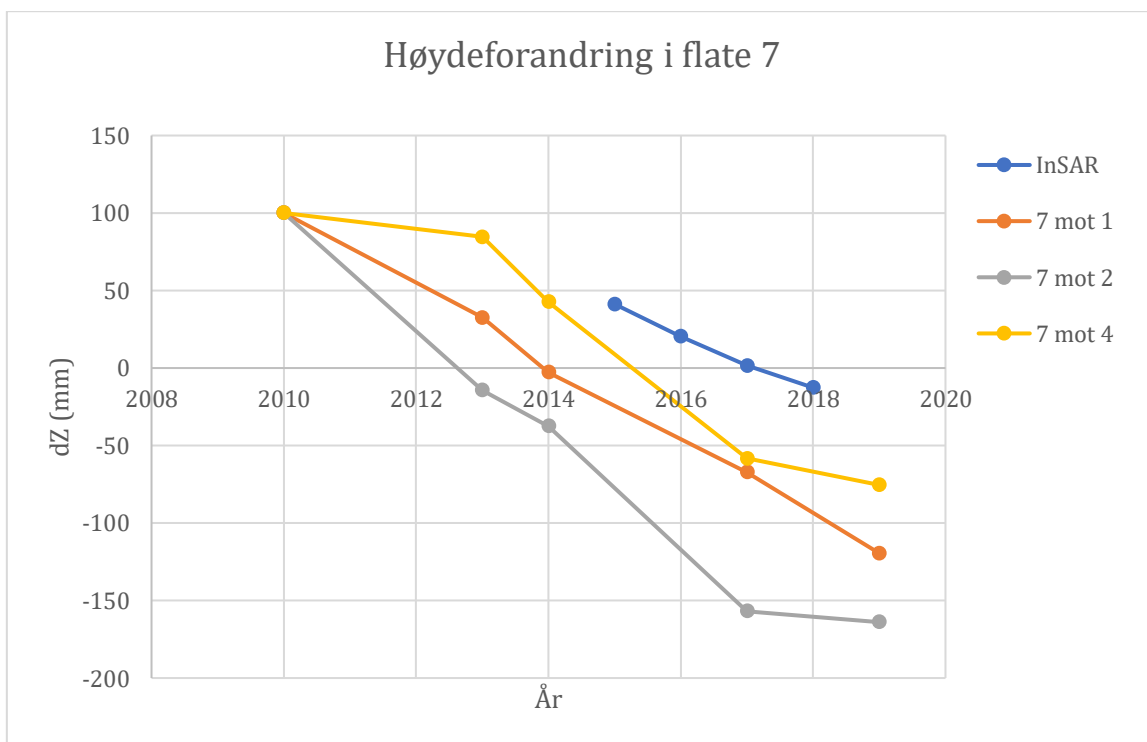
I denne delen vil høydeutviklingen fra InSAR-dataene bli sammenlignet med den høydeutviklingen som er funnet ved å se på historiske LiDAR data sammen med målinger fra feltarbeid. Av de ni oppmålte flatene på Brattøra vil kun 7 bli brukt videre da flate 5 og 3 hadde for mye støy i datasettet. Med utgangspunkt i InSAR kartet befinner flate 6, 7, 8 og 9 seg på et område som viser tegn til nedsynking mens flate 1, 2 og 4 skal være på stabil grunn. Hver figur sammenligner høydedifferansen mellom utvalgte ustabile flate og tre stabile flater.



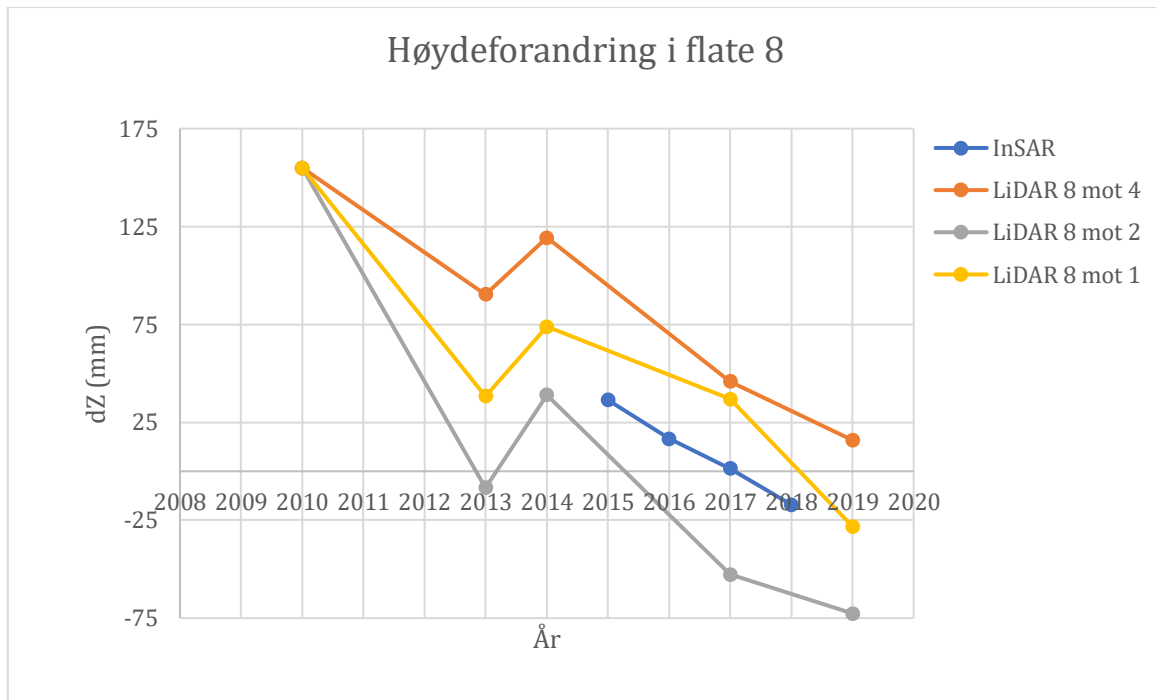
Figur 44: Figuren viser høydeutviklingen i de stabile flatene opp mot de ustabile. Her vises kun målinger gjort med InSAR for å illustrere forskjellen i høydeutvikling. Flatene befinner seg på Brattøra i Trondheim.



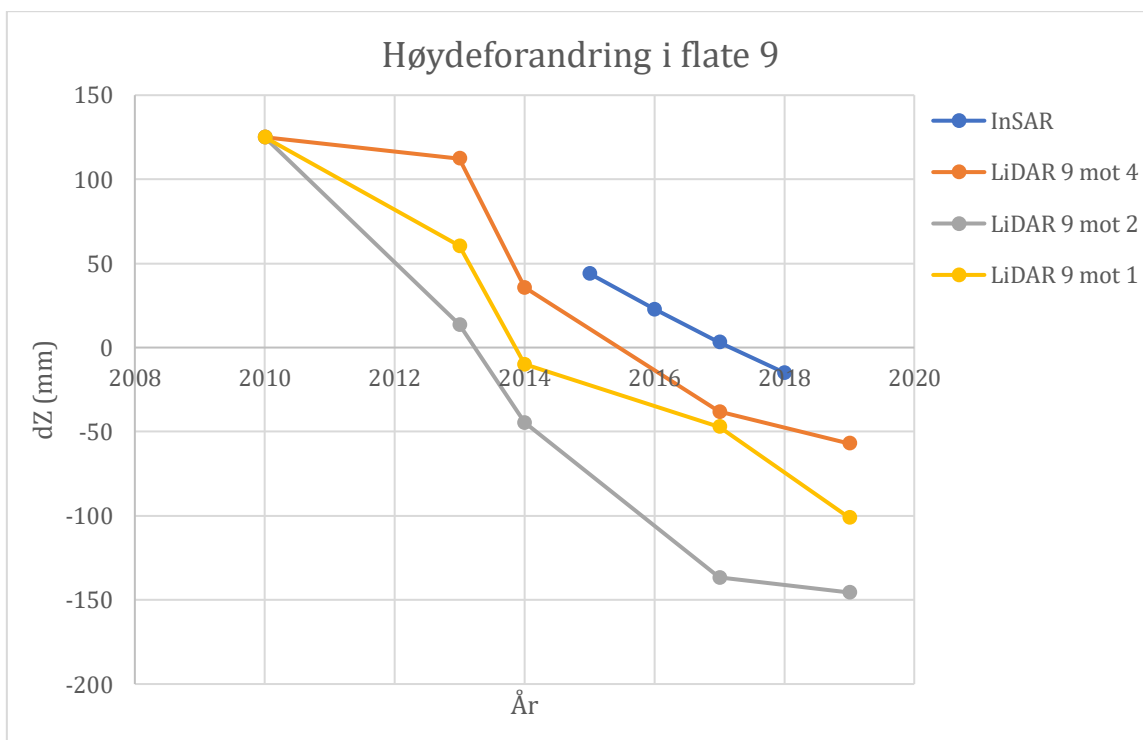
Figur 45: Deformasjonen i flate 6 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.



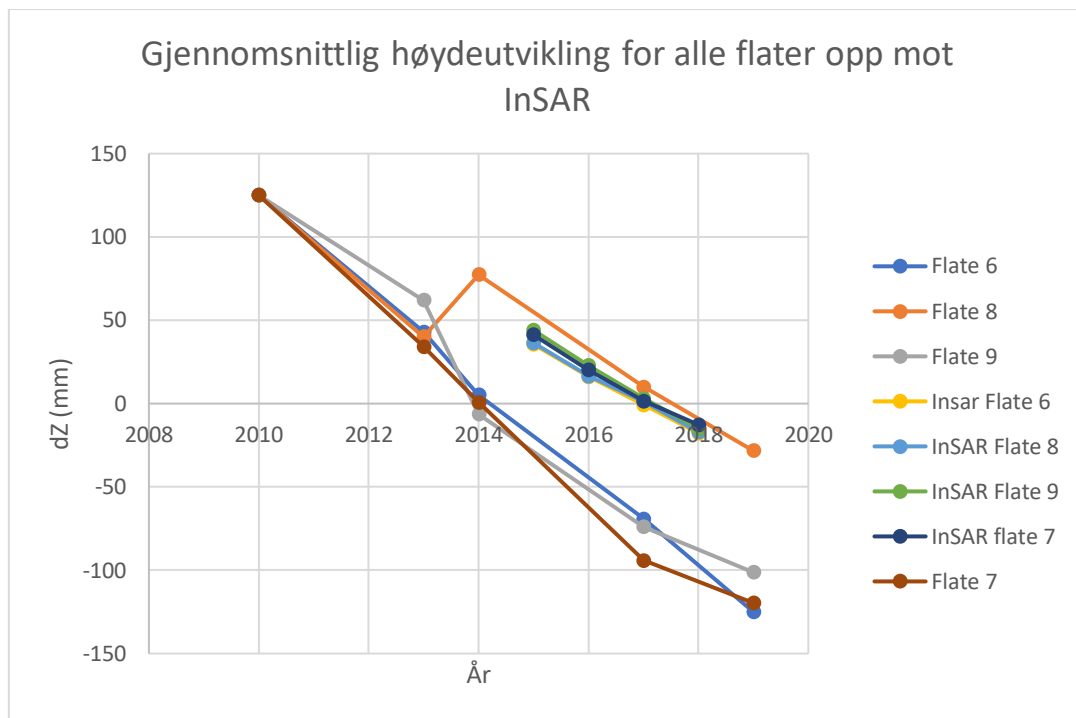
Figur 46: Deformasjonen i flate 7 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.



Figur 47: Deformasjonen i flate 8 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.



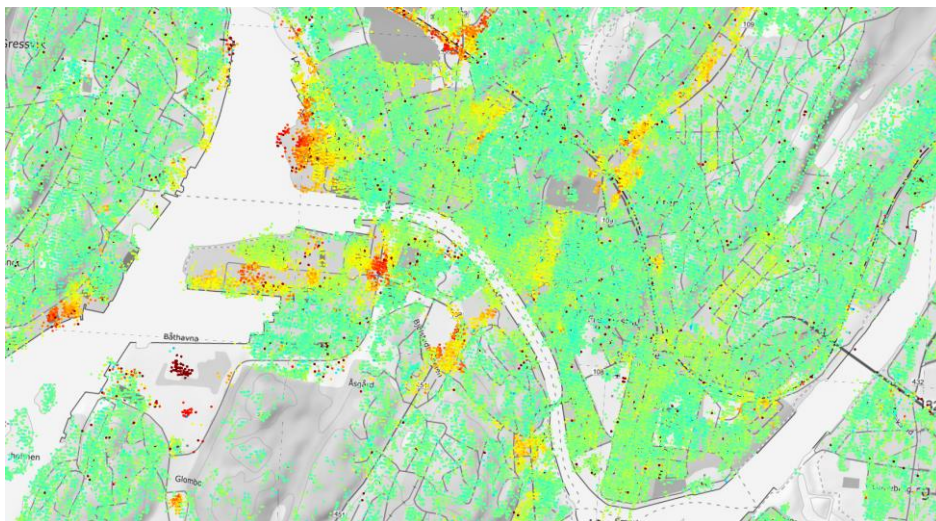
Figur 48: Deformasjonen i flate 9 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.



Figur 49: Viser høydeutvikling i flatene på Brattøra. Figuren viser snittet av høydeutviklingen i hver flate opp mot InSAR

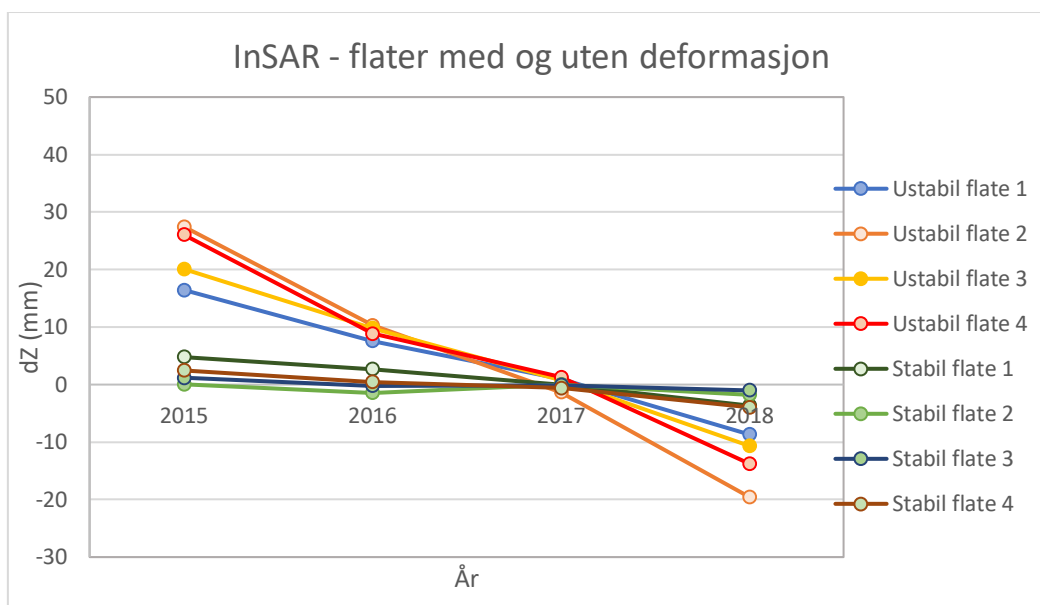
I figur 42 er gjennomsnittet av høydeutviklingen i hver figur over satt i en og samme figur opp mot tilsvarende InSAR verdier.

4.3 Caseområde 2: Fredrikstad

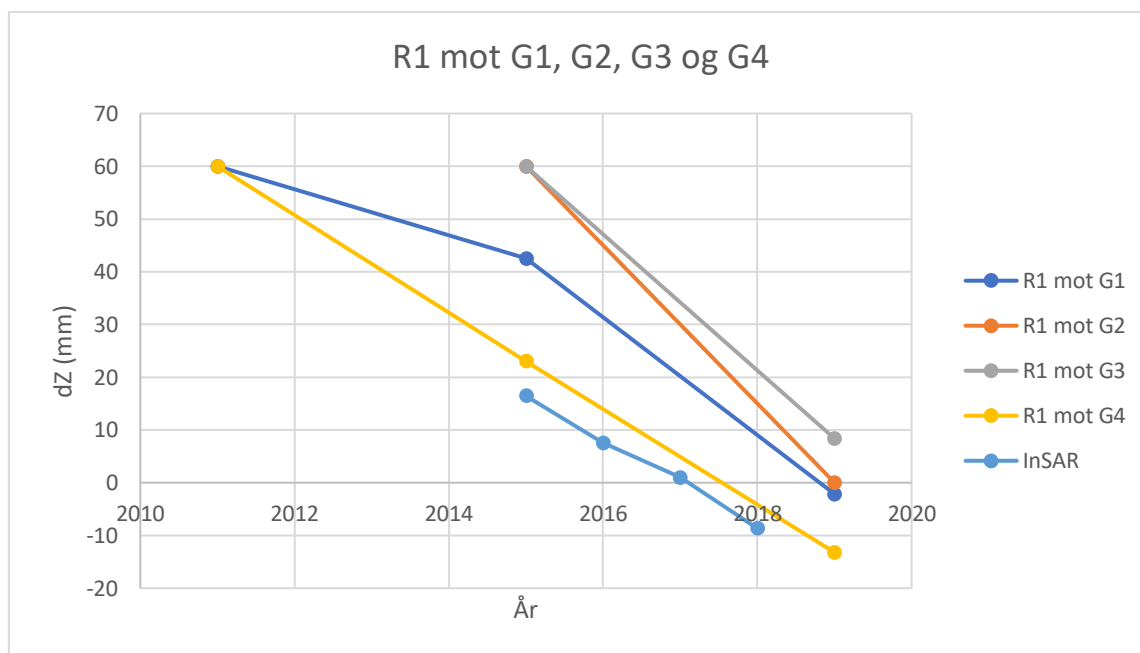


Figur 50: Fredrikstad viser mye deformasjon over store deler av byen, bilde hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)

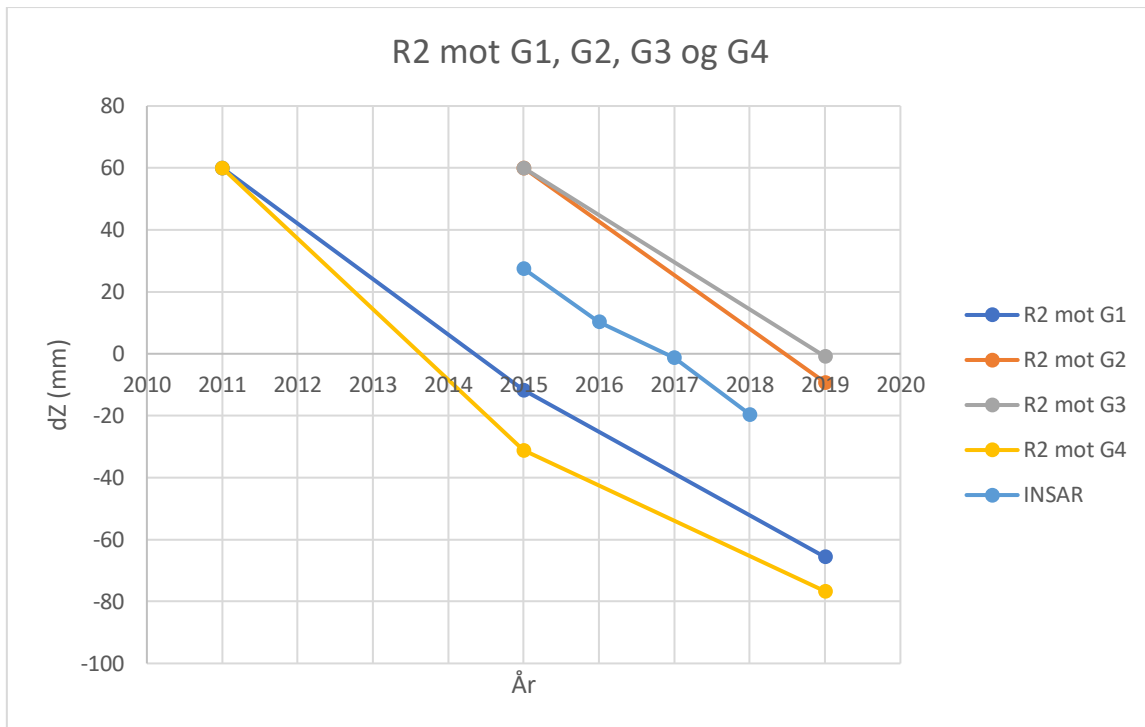
Som i caseområde 1 vil høydeutviklingen fra InSAR datasettet bli sammenlignet med den trenden som er funnet ved å se på historiske LiDAR data sammen med målinger fra feltarbeid. I Fredrikstad ble 8 flater oppmålt hvor 4 flater hver på stabile og ustabile steder. Ustabile flater er navngitt med «R» mens stabile flater er navngitt med «G».



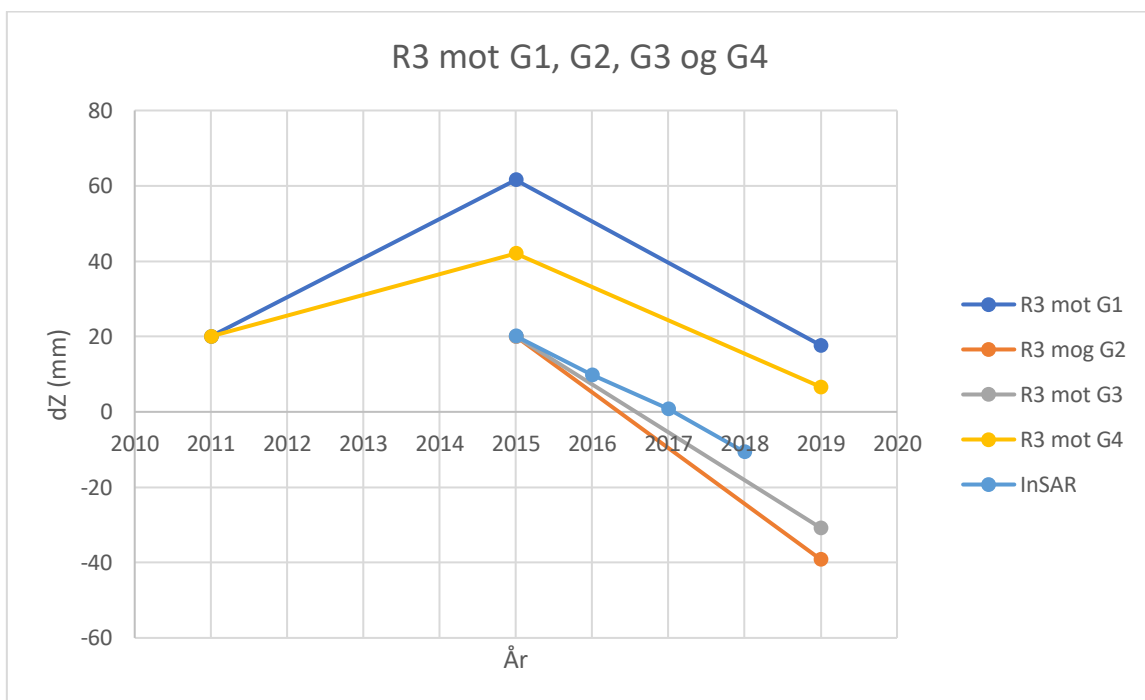
Figur 51: Figuren viser høydeutviklingen i de stabile flatene opp mot de ustabile. Her vises kun målinger gjort med InSAR for å illustrere forskjellen i høydeutvikling. Flatene befinner seg i Fredrikstad



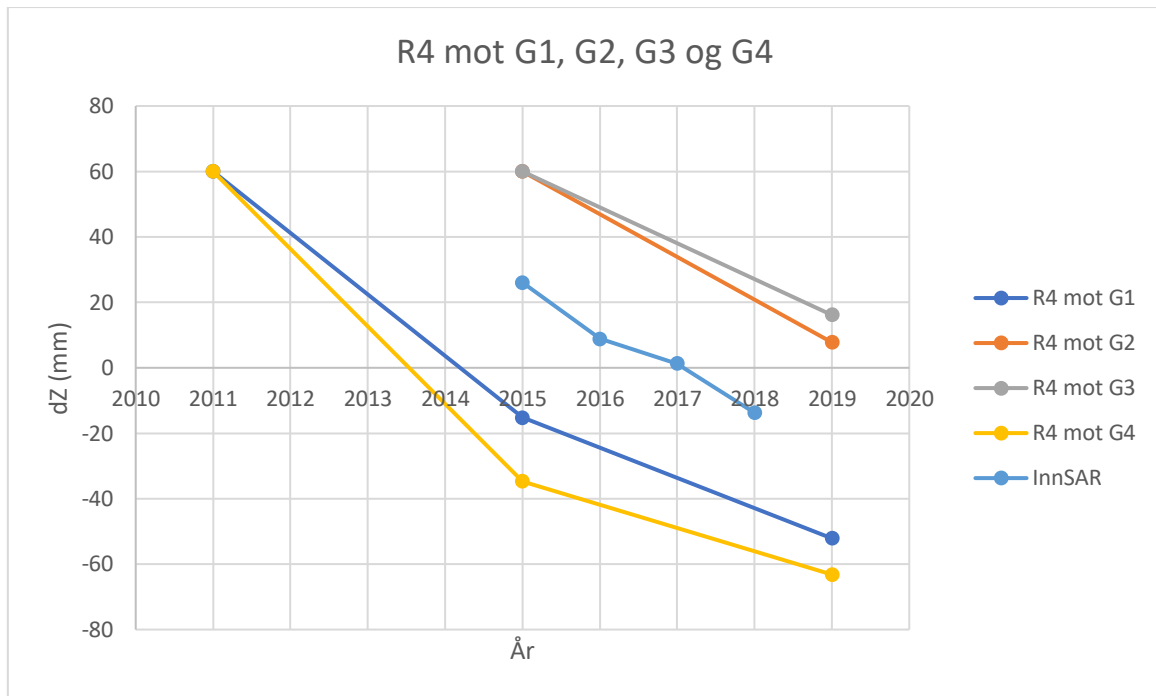
Figur 52: Deformasjonen i flate R1 vist med målinger fra InSAR og LiDAR



Figur 53: Deformasjonen i flate R2 vist med målinger fra InSAR og LiDAR



Figur 54: Deformasjonen i flate R3 vist med målinger fra InSAR og LiDAR

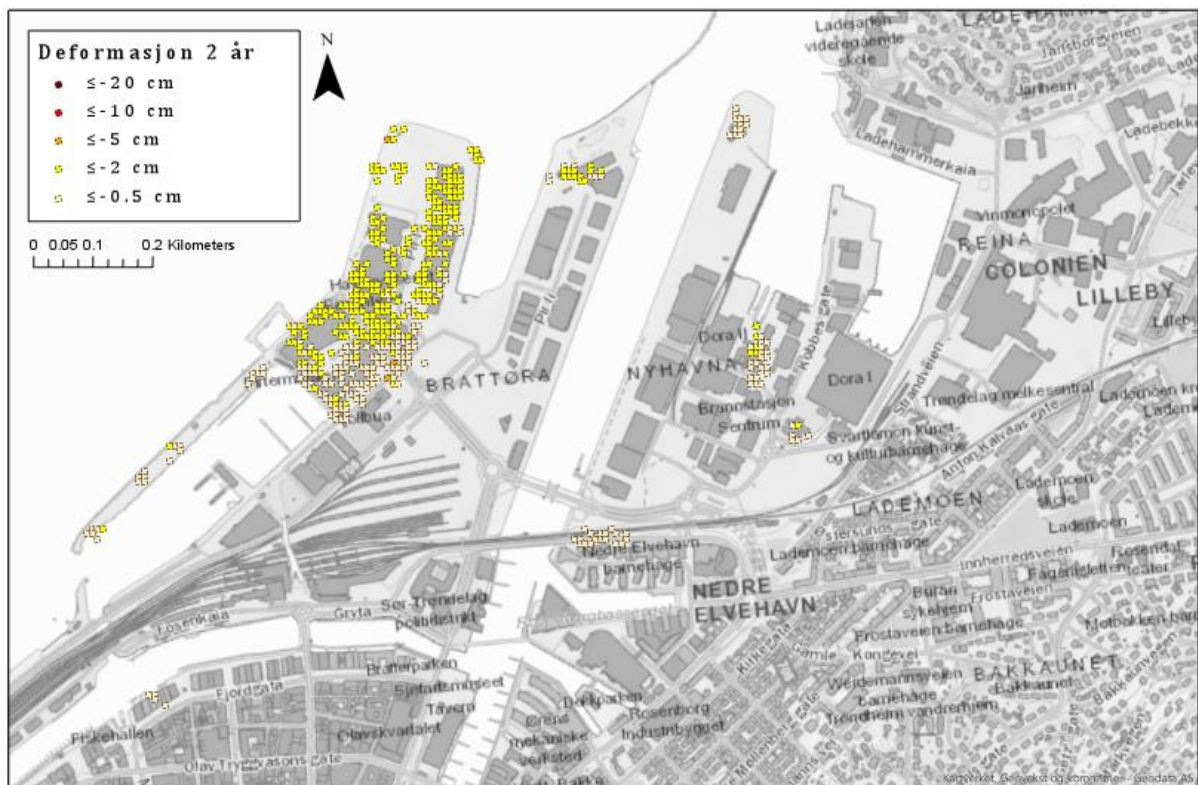


Figur 55: Deformasjonen i flate R4 vist med målinger fra InSAR og LiDAR

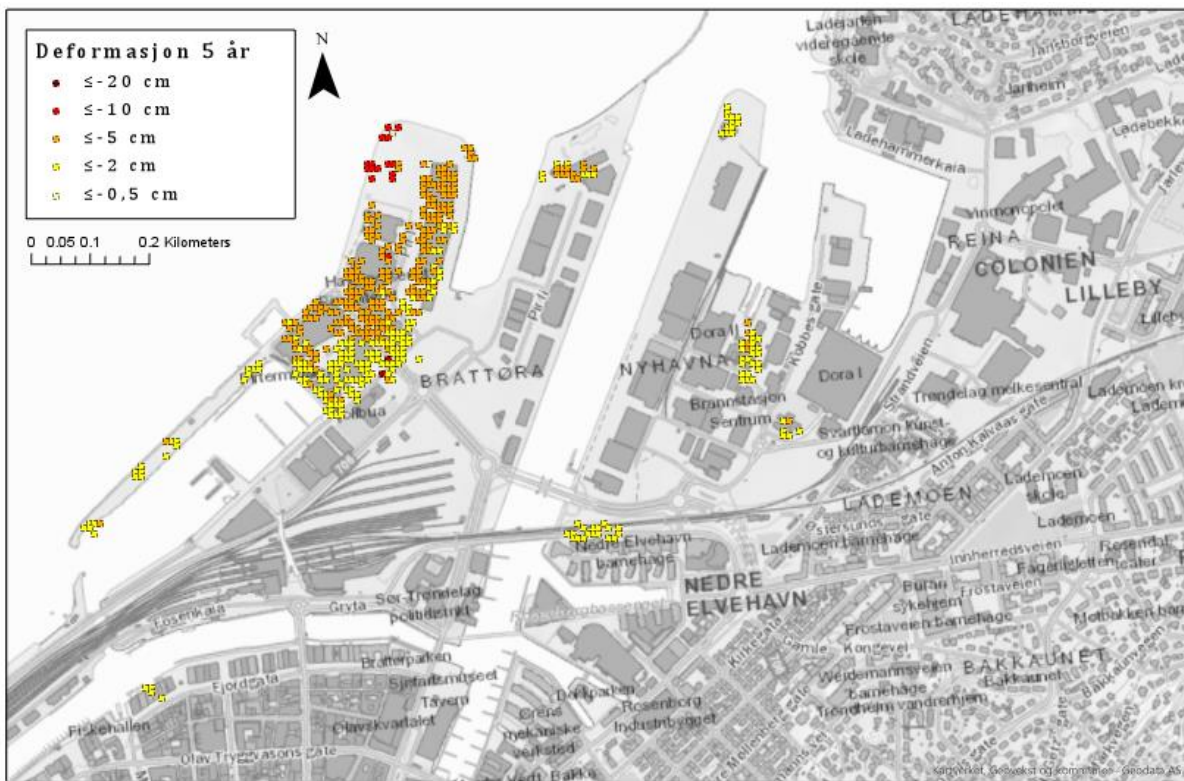
4.4 Visualisering av data

Denne delen viser eksempler på hvordan InSAR datasettet kan brukes dersom hele datasettet blir prosessert og forenklet. Kartene under viser hvordan deformasjonen på Brattøra og i Fredrikstad kan se ut om 2, 5 og 10 år. Datasettet har i tillegg blitt filtrert på en slik måte at det kun inneholder cluster av punkter som har minst 3 nære naboer innenfor en gitt avstand.

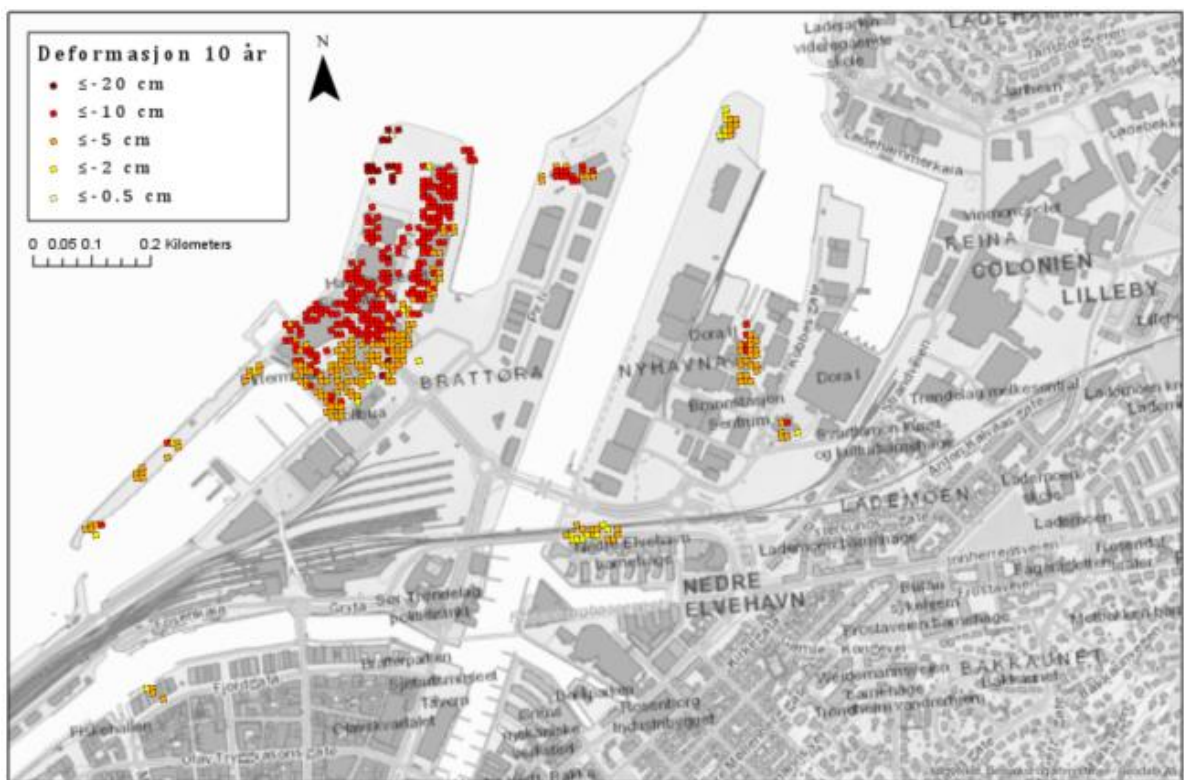
Brattøra i Trondheim



Figur 56: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 2 år med dagens utvikling

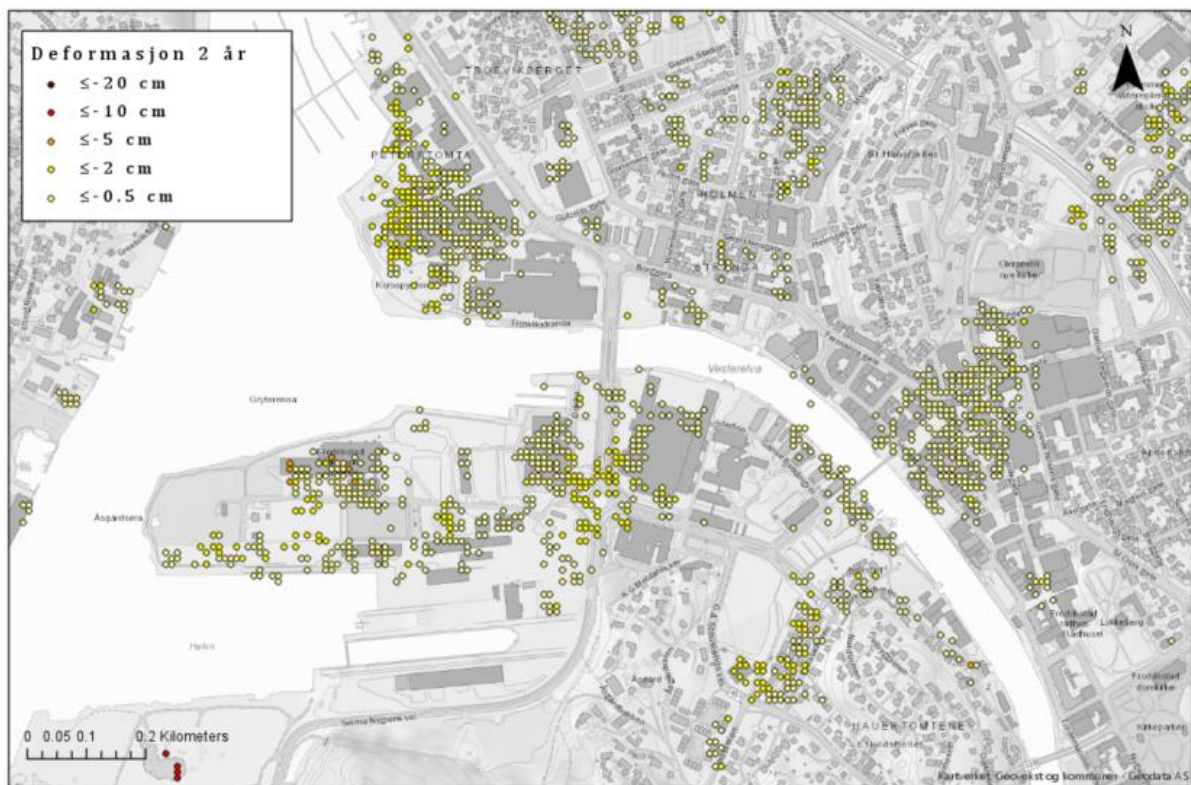


Figur 57: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 5 år med dagens utvikling

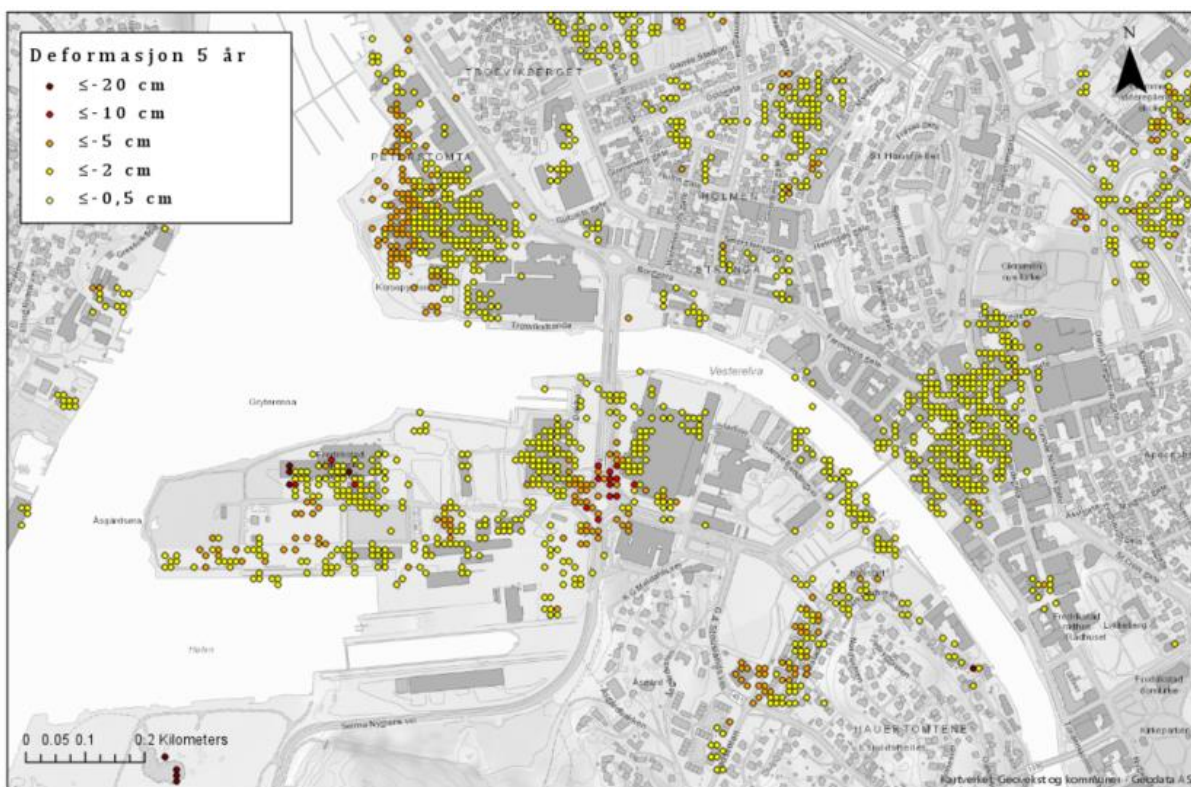


Figur 58: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 10 år med dagens utvikling

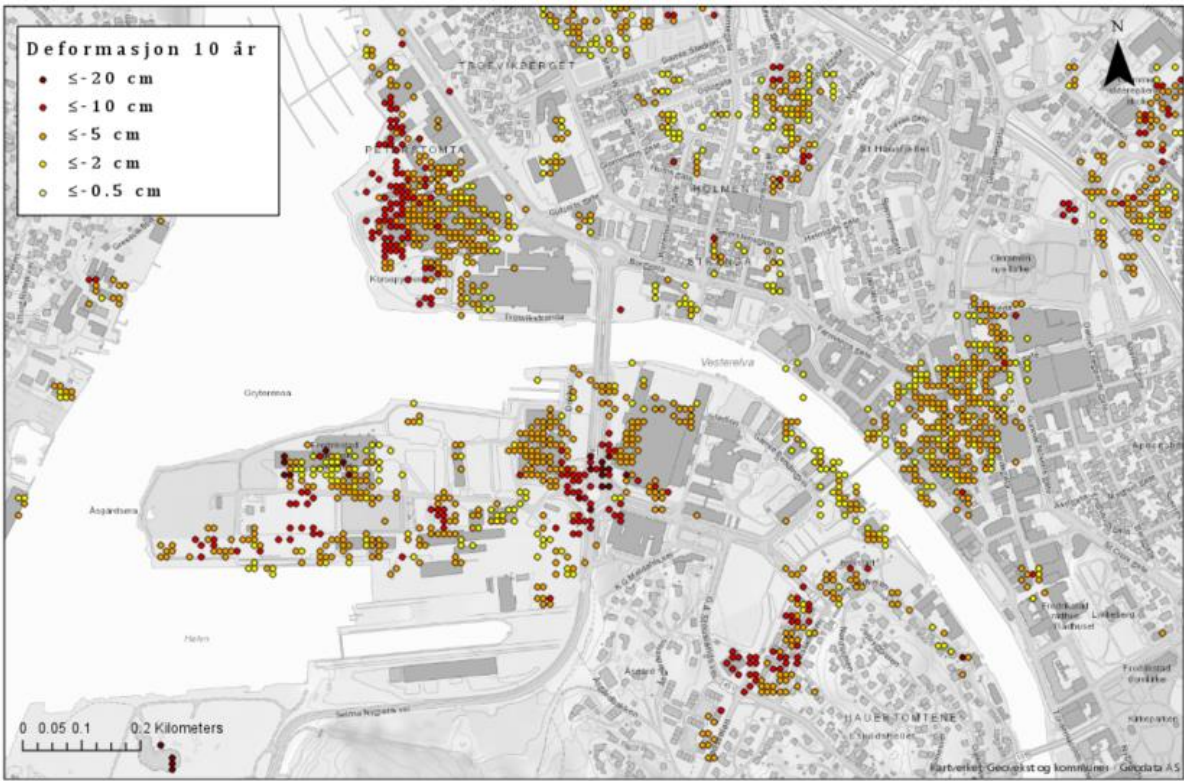
Fredrikstad



Figur 59: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 2 år med dagens utvikling



Figur 60: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 5 år med dagens utvikling



Figur 61: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 10 år med dagens utvikling

5 Diskusjon

5.1 Hvor godt stemmer høydeendringen i InSAR overens med Landmåling og LiDAR-data?

Resultatene presentert i forrige kapittel viser en tydelig sammenheng mellom utviklingen i InSAR dataene og hva vi kan finne ved å se på historiske LiDAR data sammen med feltmålinger. At utviklingen i målte flater konsekvent viser den samme trenden er en god indikasjon på at målingene gjort med InSAR er pålitelige for utvalgte caseområder.

Spesielt viktige var resultatene fra Brattøra som hadde de største forutsetningene for å gi et godt sammenligningsgrunnlag. Med høydeverdier fra fire punktskyer og feltarbeid, var det nok observasjoner til å ha et statistisk grunnlag til å påvise en korrelasjon mellom datasettene. I alle de målte flatene utgjorde høydeutviklingen en klar lineær trend som ofte falt innenfor et standardavvik på de fleste punktene. Dersom det ikke hadde vært mulig å påvise en sammenheng mellom datasettene på Brattøra, hadde det sannsynligvis ikke vært mulig på noen andre steder i Norge.

Fredrikstad hadde et dårligere utgangspunkt med kun 2 tilgjengelige punktskyer som gir et dårligere grunnlag for å kunne påvise en korrelasjon mot InSAR dataene. I tillegg få punktskyer var også nedsynkingen i gjennomsnitt litt lavere enn hva vi så i Trondheim. Det som derimot skilte seg ut med Fredrikstad var den jevne deformasjonen som kunne observeres på flere steder i byen. Dette gjorde byen spesielt interessant for videre bruk av datasettet gjennom å visualiseres deformasjonen over tid. Til tross for få datasett, viste de tilgjengelige målingene at utviklingen i høyeste grad var lik den vi kunne se i InSAR dataene.

At resultatene viste samvariasjon mellom datasettene var egentlig ikke spesielt overraskende. NGU har selv oppgitt at tjenesten har en presisjon på 1 mm/år ved estimat av lineær trend for datasettet. Dette hevder også andre aktører (SkyGeo, u.å.). Med så nøye utvalgte caseområder (hvorav Brattøra som NGU selv har brukt som eksempler for hvordan teknologien kan brukes) hadde et annet resultat heller sådd tvil om metoden som ble brukt. Det var likevel viktig å studere områder med så store deformasjoner da det på stabile flater hadde vært langt vanskeligere å se en klar sammenheng. Det ville også stilt større krav til presisjonen på tilgjengelige punktskyer og målingene fra selve feltarbeidet.

Usikkerheter med metoden

Samtidig som resultatene peker mot at InSAR målinger på nøye utvalgte steder kan ansees som pålitelige, er det nødvendig å påpeke noen forenklinger og usikkerheter i resultatene.

Den viktigste forenklingen er hvordan deformasjoner i denne oppgaven tar utgangspunkt i at høydeendringen i InSAR viser en vertikal høydeforandring, når den faktiske målte bevegelsen skjer i retning av radarantennen. Verdien for den vertikale høydeforandring er bare et estimat gjort under prosesseringen av datasettet og er dermed ikke en reell verdi. På den måten vil en direkte sammenligning mot den vertikale høydeutviklingen vi har funnet ikke være helt korrekt. Med det sagt er det likevel ikke en stor nok differanse mellom den estimerte verdien og observasjonene til at metoden ikke kan brukes.

Videre er det vanskelig å vite hvilke scatterer som har bidratt til å gi en høydeutvikling for de utvalgte punktene i InSAR. Prosesseringen av datasettet burde i utgangspunktet ha sørget for at inkonsistente refleksjonsobjekter har blitt fjernet. Men med den oppløsningen som er oppgitt for datasettet, er det likevel vanskelig å vite helt sikkert om høydeutviklingen i flatene målt under feltarbeid er sammenlignbare.

Sammen med punktskyene som blir lastet ned fra høydedata.no, kommer en rapport som oppgir nøyaktigheten på datasettet. I disse rapportene ble det rapportert om korreksjoner for høydeskift i punktskyen og standardavvik for hver av måleflatene mm. Alle rapporter ble gjennomgått for å sjekke at det ikke var påvist store feil som i stor grad kunne påvirke egne resultater. Til tross for at rapportene oppgir standardavvik for punktskyen som helhet, ble ikke disse tatt med i egne beregninger.

Mer nøyaktig landmåling

Nøyaktigheten på de oppmålte punktene i felt kunne ha blitt forbedret ved å ta med standardavviket oppgitt i KOF-filene i beregningene. I ettertid har det vist seg at noen centimeter større usikkerhet i målingene ikke ville ha utgjort mye for sluttresultatene. Hadde studien kun sammenlignet høydeverdier for landmåling opp mot LiDAR, hadde dette selvfølgelig vært en annen sak. I dette tilfelle hvor alt er relative høyder, vil utviklingen over tid være mer interessant enn absolutt nøyaktighet for punktmålingene.

Innmåling av flere områder

Ideelt sett burde det vært gjennomført feltarbeid på flere enn 2 steder. For å kunne bevise at InSAR dataene var pålitelige var det først og fremst viktig å gå for de tryggeste alternativene. Det hadde likevel vært spennende å se på andre områder som ikke viste en så klar nedsynking. Spesielt hadde steder rundt Alvdal som viser klare tegn til landheving vært interessant å se nærmere på. Siden målinger gjort i dalområder har vist seg å være påvirket av atmosfærisk støy, ble det derfor valgt å ikke ta turen. Det bør nevnes at både mangel på budsjett og tid var en faktor som gjorde at så få områder ble målt. Det hadde også vært interessant å måle opp kontrollflater i rundt om i Bjørvika i Oslo som på grunn av dårlig berggrunn har vist tegn til synking. Det interessante er at InSAR målingene over Bjørvika ikke slått særlig ut i noen retning.

Sluttvurdering av metoden for feltarbeid

Å benytte eksisterende LiDAR data sammen med landmåling har likevel vist seg å være en effektiv metode for å kvalitetssjekke utviklingen til InSAR. Metoden er ikke feilfri og stiller mange strenge krav til caseområde og antall tilgjengelige punktskyer som ikke mange steder i landet kan oppfylle. Det er også tidkrevende å reise rundt for å gjøre manuelt feltarbeid på de stedene i landet som egner seg. Samtidig er det få andre tradisjonelle landmålingsmetoder som har muligheten til å gjøre en slik type sammenligning uten å sette opp prosjekter som fra oppstart vil ta mange år.

5.2 Kan InSAR datasettet brukes til å finne områder hvor nasjonal detaljert høydemodell har behov for oppdatering?

InSAR datasettet har vist seg å ha et stort potensial som verktøy for å finne områder i Norge hvor NDH på sikt vil bli utdatert. Etter å ha sett en klar sammenheng mellom høydeutviklingen målt med InSAR og historiske LiDAR data sammen med landmåling, kan vi med større trygghet bruke InSAR datasettet til dette formålet.

Det er likevel flere ting man skal være klar over før man tar datasettet i bruk. Som nevnt over er det først og fremst viktig å være klar over at vertical velocity som har vært den eneste verdien tatt med videre i denne undersøkelsen, kun er et estimat på en vertikal høydeendring.

Behandler man datasettet på riktig måte, vil det til en viss grad være mulig å se bort i fra dette.

Ved å gjøre større filtreringer slik at man kun sitter igjen med punkter med en stor nok høydeendring og som samtidig befinner seg i umiddelbar nærhet til andre like punkter, vil det

være en liten tvil om at deformasjonen på dette området er reell. Som vi har sett fra resultatene fra både Brattøra og Fredrikstad, kan høydeendringen på de mest utsatte stedene utgjøre ganske store endringer over tid gitt at forandringen fortsetter med den samme lineære trenden vi har sett til nå.

For landsdekkende bruk bør datasettet gjennomgå større filtreringer

Dersom Kartverket ønsker å produsere et landsdekkende raster som viser deformasjon over flere år, burde likevel flere filtreringer gjøres utover hva som er gjort for caseområdene i denne oppgaven. Som nevnt tidligere har NGU selv oppgitt flere årsaker til støy og nøyaktigheter i datasettet. Selv om dette vil bli forsøkt fjernet i fremtidige versjoner av datasettet (Norges Geologiske Undersøkelse, 2019), er stedene hvor InSAR møter utfordringer med pålitelighet stort sett utenfor områder Kartverket i første omgang er interessert i. Behovet for oppdatert informasjon er størst i urbane områder hvor utvikling går raskt og nøyaktige, oppdaterte høydedata er nødvendig. Her er også dataene fra InSAR de mest pålitelige gitt at forholdene ligger til rette. Det kan derfor argumenteres for at Kartverket burde se bort fra målinger gjort utenfor urbane områder. Spesielt utsatt er punkter som befinner seg i helning. Avhengig av satellittens opptakssituasjon vil disse kunne gi svært ulike verdier og ikke være pålitelige.

Utfordringer med prosessering av datasettet

I begynnelsen av denne oppgaven var det et ønske om å prøve å lage et landsdekkende kartlag med de samme filtreringene som ble gjort for caseområdene. Dette viste seg å bli en litt for stor oppgave å gjennomføre på egenhånd i tillegg til de andre undersøkelsene som skulle gjøres. Det ble likevel forsøkt fra begynnelsen av oppgaven å lage et enkelt Python script som på best mulig måte kunne filtrere og stifte sammen hele InSAR datasettet. Med et så stort datasett ble det derfor nødvendig å bruke mye tid på å finne gode metoder å redusere tidsbruken mest mulig. Med litt hjelp ble scriptet godt nok optimalisert til å kunne iterere over 30-60 gb på noen minutter. For å ha bedre kontroll over datasettet ble ulike prosesser likevel delt opp i ulike script. Uten en helt klar plan for hvordan datasettet burde brukes i den senere delen av oppgaven, var det vanskelig å gjøre annet enn å prøve seg frem.

6 Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt undersøkt om InSAR kan brukes som et verktøy for å finne områder med deformasjoner i Norge og dermed kartlegge hvor den nasjonale høydemodellen vil ha behov for vedlikehold. Oppgaven har hatt som mål å besvare to problemstillinger. Første problemstilling var å se om det var en korrelasjon mellom høydeendringer i InSAR og målte endringer gjort med landmåling og historiske LiDAR data. Hensikten med dette var en kvalitetssjekk av InSAR dataene og ble gjennomført med feltarbeid på to caseområder

Feltarbeidet tok utgangspunkt i høydeendringer fra InSAR datasettet og ble gjennomført ved å måle 17 kontrollflater. Kontrollflatene var nøye utvalgt for å kunne oppfylle ulike krav som måtte ligge til grunn for kunne gi gode målinger med både Radar, LiDAR og landmåling. Stabile og ustabile områder ble målt og sammenlignet for å finne en høydeforskjell. Ved å bruke høydeforskjellen mellom de samme flatene over flere år var det mulig å finne en høydeutvikling i de ustabile flatene. Denne høydeutviklingen ble sammenlignet med InSAR for å se om det var mulig å se en korrelasjon.

Resultatet fra feltarbeid viser at det var en tydelig korrelasjon mellom høydeutviklingen i de ulike datasettene fra begge caseområder. Dette ble hovedsakelig konkludert basert på resultatene fra Trondheim da antallet observasjoner i Fredrikstad ikke var stort nok til å kunne anses som statistisk signifikant. Spesielt overraskende var ikke resultatet ettersom både NGU og andre aktører viser til at InSAR-målinger ved estimat av lineær trend (som ble brukt i denne oppgaven) har en presisjon på rundt 1 mm/år.

Med vissheten om at InSAR kan gi pålitelige målinger i urbane områder, ble fokuset flyttet til neste problemstilling; *kan InSAR-datasettet brukes for å finne områder hvor ny nasjonal høydemodell har behov for oppdatering?* Hele datasettet fra InSAR Norge ble brukt i denne analysen.

For å kunne fremheve områder med deformasjon måtte alle punkter uten tegn til høydeforandring først fjernes. Ved å videre filtrere vekk store mengder informasjon fra datasettet som ikke var nødvendig for videre bruk, kunne resterende data legges inn i ArcGIS pro for ytterligere analyser. Caseområdene ble igjen brukt hvor romlige filtreringer ble kjørt for å fjerne alle punkter som ikke befant seg i umiddelbar nærhet til et minimum antall andre punkter. Den vertikale høydeforandringsverdien ble så brukt for å predikere hvor stor deformasjon gjenværende punkter vil ha om 2, 5 og 10 år. Dette viste seg å være god måte å fremheve deformasjonen og illustrere hvilke steder som var mer utsatt enn andre.

For å konkludere har InSAR et potensiale som verktøy for å finne deformasjoner i Norge. Ved å prosessere datasettet levert fra NGU kan datamengden reduseres til en størrelse som gjør det lett å ta i bruk på landsbasis. Målingene kan dermed kartlegge hvor den nasjonale høydemodellen vil ha behov for vedlikehold ved å fremheve utsatte steder og visualisere hvor stor deformasjonen vil være om ønsket antall år.

6.1 Forslag til videre forskning

InSAR har potensiale til å kunne brukes til flere anvendelser enn hva vi ser i dag. Forslag til videre arbeid kan være:

- Lage et landsdekkende kartlag som viser deformasjoner over tid basert på dagens utvikling
- Sette opp reflektorer ved landsnettpunkter og bruke InSAR til overvåkning høydeutvikling
- Bruke InSAR som verktøy for å kvalitetssjekke fremtidig flybåren laserskanning

Litteraturliste

- Abdalla, A. A. (1995). The semi classical laser theory and some applications of laser.
- Bieniek, T. (2017). *Bidirectional UTM-WGS84 converter for python*. Tilgjengelig fra: <https://pypi.org/project/utm/> (lest 02.05.2019).
- Bürgmann, R., Rosen, P. A. & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28 (1): 169-209.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (u.å.).
- Esri. (1998). ESRI Shapefile Technical Description.
- Foundation, P. S. (u.å.). What is Python? Executive Summary.
- Girardeau-Montaut, D. (2011). Cloudcompare-open source project. *OpenSource Project*.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, b. 2: Springer Science & Business Media.
- Harrap, R. & Lato, M. (2010). An overview of LIDAR: collection to application. *Norway*.
- Lazecky, M., Bakon, M., Sousa, J. J., Perissin, D., Hlavacova, I., Patricio, G., Papco, J., Rapant, P. & Real, N. (2015). Potential of multi-temporal InSAR techniques for structural health monitoring.
- McKinney, W. (2010). *Data structures for statistical computing in python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference: Austin, TX.
- Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). (2018). InSAR Norge.
- Norges Geologiske Undersøkelse, N. (2019). Informasjon om karttjenesten.
- Norkart. (2005). KOF spesifikasjon.
- Oppikofer, T. (2016). Overvåking av skred og andre skråningsprosesser med bakkebasert laserskanning.
- Perissin, D. & Wang, T. (2011). Time-series InSAR applications over urban areas in China. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 4 (1): 92-100.
- Ritter, N., Ruth, M., Grissom, B. B., Galang, G., Haller, J., Stephenson, G., Covington, S., Nagy, T., Moyers, J. & Stickley, J. (2000). Geotiff format specification geotiff revision 1.0. *SPOT Image Corp*.
- Sardar, A. (1997). The evolution of space-borne imaging radar systems: a chronological history. *Canadian journal of remote sensing*, 23 (3): 276-280.
- Shafranovich, Y. (2005). Common format and MIME type for comma-separated values (CSV) files.
- Skolnik, M. I. (1970). Radar handbook.
- SkyGeo. (u.å.). InSAR TECHNICAL BACKGROUND.
- Sousa, J., Hlaváčová, I., Bakoň, I., Lazecký, M., Patrício, G., Guimarães, P., Ruiz, A., Bastosi, L. & Sousa, A. (2014). *Potential of Multi-Temporal InSAR for Bridges and Dams Monitoring: CENTERIS*.
- Tempfli, K., Kerle, N., Huurneman, G. C. & Janssen, L. L. (2009). Principles of remote sensing. *An introductory textbook*.
- Thomson, C. (u.å.). Common 3D point cloud file formats & solving interoperability issues.
- Vosselman, G. & Maas, H.-G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*: CRC.
- Weitkamp, C. (2006). *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, b. 102: Springer Science & Business.
- Wickersham, J. (2016). What Determines the Wavelength of a Laser?

Figur 1: Utdrag fra rapporten (Oppikofer, 2016) som vurderer modenhetsgraden av anvendelser av InSAR.....	4
Figur 2: Et atom blir truffet av et foton og faller ned et energinivå samtidig som det emitterer to nye fotoner.....	5
Figur 3: Skannermekanismene oscillerende- og polygonspeil. Figuren er hentet fra (Vosselman & Maas, 2010)	7
Figur 4: Viser hvordan mange opptak tas over samme overflate og stiftes sammen. Avstanden fra første til siste opptak utgjør lengden på den syntetiske antennen. (Hanssen, 2001).....	9
Figur 5: Illustrasjon fra InSAR geometri som viser hvordan to opptak fra så vidt forskjellig vinkel brukes. Hentet fra (Tempfli et al., 2009)	10
Figur 6: InSAR målinger før og etter deformasjon. Figuren viser hvordan deformasjon fører til en endret fase i signalet som kommer tilbake til satellitten. Hentet fra (SkyGeo, u.å.)	11
Figur 7: Viser PS til venstre med et objekt som reflekterer et sterkt signal og DS til høyre med flere objekter som avgir et svakt signal. Hentet fra (SkyGeo, u.å.).....	11
Figur 8: Hele Norge i www.insar.ngu.no sin løsning.....	12
Figur 9: De to datasettene Ascending 1 og Ascending 2.....	13
Figur 10: De to datasettene Descending 1 og Descending 2	13
Figur 11: Kartutsnitt hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse, 2019) som viser kjente problemer med målinger over visse steder.	16
Figur 12: Kartutsnitt fra Sørfjorden i Troms som viser hvor stor forskjell siktevinkelen kan utgjøre. Her vises data fra descending til venstre og ascending til høyre. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)	17
Figur 13: Mange punkter som viser stor og jevn nedsynking, men på en usikker overflate. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018).....	19
Figur 14: Stor og jevn nedsynking, men fra et område med svært mange ulike utslag. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018).....	19
Figur 15: Brattøra skiller seg med mye deformasjon i et konsentrert område som i denne figuren vises med rød farge oppe til venstre. Her vises målinger gjort med alle datagrunnlag. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018).....	20
Figur 16: Et utsnitt av Fredrikstad viser tegn til deformasjon over store områder.....	21
Figur 17: En trailer er parkert over flate 1 på Brattøra i datasettet fra 2017. De to firkantene er representert flate 1 i 2013 (nederst) og i 2017 (øverst).	22
Figur 18: Flatene ble målt med målebånd og tegnet ned med kritt.....	23
Figur 19: Alle flater i hvert caseområde målt med samme mønster for jevnest mulig spredning av punkter.....	23
Figur 20: Figuren viser de oppmålte flatene på Brattøra. De grønne firkantene representerer de stabile flatene, mens de røde representerer de ustabile flatene.	24
Figur 21: Figuren viser de oppmålte flatene på Brattøra. De grønne firkantene representerer de stabile flatene, mens de røde representerer de ustabile flatene.	25
Figur 22: Rådata hentet fra roveren og konvertert fra KOF til CSV ved hjelp av Python.	26
Figur 23: En av flatene fra feltarbeidet på Brattøra skjært ut med punkter fra flere punkttskyer. Hentet fra CloudCompare	27
Figur 24: 5 sett med høyder fra ulike år. Hver gule boks rommer alle punkter fra et datasett og viser hvordan flaten har sunket over tid. Hentet fra CloudCompare	27
Figur 25: plottet til venstre viser et unormalt stort standardavvik i punkttskyen fra 2013. Ved å fjerne støypunkter, ble standardavviket normalt som vist i figuren til høyre.	28
Figur 26: De røde punktene viser at noe har stått inne i på flaten i punkttskyen fra 2013. Prikker er førstørret for å være synlige mot den mørke bakgrunnen. Bildet er hentet fra CloudCompare	28
Figur 27: Laserdata viser store endringer for flate 2 og 3 mellom 2011 og 2015.....	29

Figur 28: Høydene i flate 2 og 3 viser hvordan området i 2010 var en skråning mens det i 2015 har blitt endret i sammenheng med utbygging.....	29
Figur 29: De første kolonnene inneholder blant annet punktets posisjon, endringsvektor og informasjon om opptakssituasjonen	30
Figur 30: Viser de 8 neste radene som inneholder dato for observasjon i og punktets høydeforandring i antennens sikteretning. Antall observasjoner varierer, men ligger i snitt på 50 +/- 20	31
Figur 31: Halve Norge vist i CloudCompare med menyen far rasterisering av datasettet.	32
Figur 32: figuren til venstre viser Brattøra med 25x25 meter mens figuren til høyre viser 10x10 meter.	33
Figur 33: Rutenett over Fredrikstad hvor alle ruter som inneholdt 4 eller færre punkter ble slettet.	34
Figur 34: De gule punktene ble beholdt mens de ble filtrert vekk gjennom «erase point» funksjonen	34
Figur 35: Tabellen viser verdiene til punktene i Fredrikstad	35
Figur 36: Ved å gange «vertical velocity» med en verdi kan vi se hvor mye et punkt har beveget seg i løpet av denne tiden.....	35
Figur 37: Gjennomsnittshøyde i flate 9 for hvert år med standardavvik.....	36
Figur 38: Utvikling av høydeforskjellen mellom ustabile flate 9 og 3 stabile flater.....	37
Figur 39: InSAR målinger hentet direkte fra tjenesten.	38
Figur 40: InSAR målinger over flate 4 hvor alle verdier fra hvert år er gjort et.....	38
Figur 41: Flate 9 begynner på en fiktiv høyde på 125mm. For hvert år trekkes høydeutviklingen fra denne startverdien	39
Figur 42: Viser deformasjon for flate 9 mot flate 4, vist sammen med InSAR.....	39
Figur 43: Viser Brattøra i Trondheim. Hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018).....	40
Figur 44: Figuren viser høydeutviklingen i de stabile flatene opp mot de ustabile. Her vises kun målinger gjort med InSAR for å illustrere forskjellen i høydeutvikling. Flatene befinner seg på Brattøra i Trondheim.	40
Figur 45: Deformasjonen i flate 6 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.....	41
Figur 46: Deformasjonen i flate 7 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.....	41
Figur 47: Deformasjonen i flate 8 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.....	42
Figur 48: Deformasjonen i flate 9 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.....	42
Figur 49: Viser høydeutvikling i flatene på Brattøra. Figuren viser snittet av høydeutviklingen i hver flate opp mot InSAR	43
Figur 50: Fredrikstad viser mye deformasjon over store deler av byen, bilde hentet fra (Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), 2018)	43
Figur 51: Figuren viser høydeutviklingen i de stabile flatene opp mot de ustabile. Her vises kun målinger gjort med InSAR for å illustrere forskjellen i høydeutvikling. Flatene befinner seg i Fredrikstad	44
Figur 52: Deformasjonen i flate R1 vist med målinger fra InSAR og LiDAR.....	44
Figur 53: Deformasjonen i flate R2 vist med målinger fra InSAR og LiDAR	45
Figur 54: Deformasjonen i flate R3 vist med målinger fra InSAR og LiDAR	45
Figur 55: Deformasjonen i flate R4 vist med målinger fra InSAR og LiDAR	46
Figur 56: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 2 år med dagens utvikling	47
Figur 57: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 5 år med dagens utvikling.....	48
Figur 58: Viser størrelsen på deformasjonen på Brattøra om 10 år med dagens utvikling	48
Figur 59: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 2 år med dagens utvikling.....	49
Figur 60: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 5 år med dagens utvikling.....	49
Figur 61: Viser størrelsen på deformasjonen i Fredrikstad om 10 år med dagens utvikling	50



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway