

Bruk av georadar til tilstandskontroll av berg bak tunnelkvelv

Margit Bugge Bævre

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovudrettleiar: Inge Hoff, IBM

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgåva sin tittel: Bruk av georadar til tilstandskontroll av berg bak tunnelkvelv	Dato: 10.06.2018 Tal på sider (inkl. bilag): 115 Masteroppgåve
Namn: Margit Bugge Bævre	
Faglærer/rettleiar: Professor Inge Hoff	

<p>Ekstrakt:</p> <p>I etterkant av at 200 m³ med stein raste frå hengen i Hanekleivtunnelen i 2006, skjerpa Statens vegvesen krava sine til kontroll av bergstabiliteten. Alle tunnelar må no inspiserast med jamne mellomrom, for å sjå om bergoverflata har endra seg. Det er likevel problematisk å få undersøkt bergoverflata, sidan den ofte er kledd att med prefabrikkerte vass- og frostsikringskvelv. Denne masteroppgåva undersøker difor om georadar kan vere ein ikkje-destruktiv inspeksjonsmåte for bergmasse bak kvelvet, utført frå trafikkrommet.</p> <p>Ei georadarantenne vart i dette forsøket ført langs tunnelkvelvet, og undersøkte ei stripe av tunnelveggen tre gonger. Ein totalstasjon logga posisjonen til antenna undervegs. Frå tolkeprofilen blei avstanden frå kvelvet og inn til bergoverflata tolka. Ved å kombinere posisjonsdataa frå totalstasjonen med avstanden inn til berg fekk bergoverflata eigne posisjonskoordinatar. Den tredje undersøkinga var av best kvalitet, og blei difor sett som referanseverdi når det skulle reknast avvik mellom tolkingane. Avviket blei på 4,43 % for runde 1, og 4,83 % for runde 2. Dette er låge avvik, og dei forskjellane som oppstod kom på grunn av uroingar frå leiande materiale i tunnelen.</p> <p>Metoden er framleis i utviklingsfasen, og kan ikkje implementerast før vidare arbeid er gjort. Det må etablerast eit erfaringsgrunnlag, slik at ein kan skilje hendelege tolkeavvik frå reelle, alvorlege endringar i bergmasse. Det bør i tillegg etablerast ein database, som lagrar data frå tidlegare undersøkingar, og dermed kan brukast som samanlikningsgrunnlag for nye undersøkingar.</p> <p>Frå denne forskinga er det klart at georadar har eit stort potensial som berginspeksjonsmetode i tunnelar der bergoverflata ligg gøymt bak vass- og frostsikringa. Undersøkingane viste, trass uroingar i datamaterialet, georadaren si emne til å samle repeterbar informasjon om posisjonen til bergoverflata. Forskinga viste òg at totalstasjon og georadar saman kan tileigne bergoverflata eigne koordinatar, noko som kan gjere det lettare å oppdage endringar i berget. Likevel er metoden framleis i utviklingsfasen. Samanlikna med andre inspeksjonsmetodar i tunnel, er georadar ein særskilt lovande ikkje-destruktiv metode.</p> <p>Georadar vil nok ikkje kunne erstatte dagens metodar for tunnelinspeksjon. Den kan likevel komplementere ein visuell kontroll frå tunnelrommet, slik at ein kan få eit inntrykk av tilstanden av både kvelv og berg, utan destruktive tiltak. Undersøkingar med georadar kan òg kombinerast med laserscanning. Bergoverflata vert ofte laserscanna før kvelvmontasje. Denne laserscanninga gjev eit 3D-bilete av bergoverflata, og georadar kan i ettertid brukast til å kontrollere om heile, eller delar av bergoverflata er i rørsle. For at georadar i framtida skal kunne brukast i tunnel på ein økonomisk og effektiv måte, krev det at georadar ikkje berre kan undersøke striper av bergoverflata, slik som i denne forskinga, men også større flater.</p>

Stikkord:

1. Georadar
2. Tunnel
3. Tunnelinspeksjon

Margit Bugge Bævre
(sign.)

Forord

Dette er ei masteroppgåve frå våren 2018 innan sivilingeniørstudiet for veg ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk, NTNU. Denne masteroppgåva har eit omfang på 30 studiepoeng og er skriven under rettleiing av professor Inge Hoff ved NTNU. Arbeidet med oppgåva har vore lærerikt og interessant, spesielt med tanke på å få vere med på georadarundersøking og påfølgande tolking.

Forfatternen ønskjer å takke alle som har bidrege i arbeidet, og vil rette ein ekstra stor takk til:

- Professor Inge Hoff for god rettleiing og støtte.
- Dr. Anne Lalagüe i ÅF Engeneering for hjelp til tolking og prosessering av georadar-data.
- Jan Erik Molde ved NTNU for assistanse under gjennomføring av georadarundersøkingane.
- Trond Arve Håkonsen og Christer Gabrielsen i Statens vegvesen for posisjonering av georadar.
- Skanska og AF Gruppen for disponering av tunnelar.
- Karsten Engdal Mykleset for hjelp med programvare og gjennomlesing av oppgåva.

Samandrag

I etterkant av at 200 m³ med stein raste frå hengen i Hanekleivtunnelen i 2006, skjerpa Statens vegvesen krava sine til kontroll av bergstabiliteten. Alle tunnelar må no inspiserast med jamne mellomrom, for å sjå om bergoverflata har endra seg. Det er likevel problematisk å få undersøkt bergoverflata, sidan den ofte er kledd att med prefabrikkerte vass- og frostsikringskvelv. Etter at det i 2016 også blei slutt på å byggje tunnelar som var tilrettelagde for manuell inspeksjon bak vass- og frostsikringskvelvet, måtte undersøkingane gjerast frå trafikkrommet. Denne masteroppgåva undersøker difor om georadar kan vere ein ikkje-destruktiv inspeksjonsmåte for bergmassa bak kvelvet, utført frå trafikkrommet.

Ei georadar-antenne sender elektromagnetisk energi inn i materialet som skal undersøkast. Energien forplantar seg vidare inn i materialet, men delar av energien blir reflektert attende til antenne når den treff eit skilje i materialeigenskapane. Georadaren brukar denne reflekterte bølgeenergien til å danne eit profil, eit bilete på korleis det "usynlege" materialet ser ut. Ei georadarantenne vart i dette forsøket ført langs tunnelkvelvet, og undersøkte ei stripe av tunnelveggen tre gonger. Ein totalstasjon logga posisjonen til antenne undervegs. Frå tolkeprofilen blei avstanden frå kvelvet og inn til bergoverflata tolka. Ved å kombinere posisjonsdataa frå totalstasjonen med avstanden inn til berg fekk bergoverflata eigne posisjonskoordinatar. Den tredje undersøkinga var av best kvalitet, og blei difor sett som referanseverdi når det skulle reknast avvik mellom tolkingane. Avviket blei på 4,43 % for runde 1, og 4,83 % for runde 2. Dette er låge avvik, og dei forskjellane som oppstod kom på grunn av uroingar frå leiande materiale i tunnelen.

Metoden er framleis i utviklingsfasen, og kan ikkje implementerast før vidare arbeid er gjort. Det må etablerast eit erfaringsgrunnlag, slik at ein kan skilje hendelege tolkeavvik frå reelle, alvorlege endringar i bergmassa. Det bør i tillegg etablerast ein database, som lagrar data frå tidlegare undersøkingar, og dermed kan brukast som samanlikningsgrunnlag for nye undersøkingar.

Frå denne forskinga er det klart at georadar har eit stort potensial som berginspeksjonsmetode i tunnelar der bergoverflata ligg gøymt bak vass- og frostsikringa. Undersøkingane viste, trass uroingar i datamaterialet, georadaren si emne til å samle repeterbar informa-

sjon om posisjonen til bergoverflata. Forskinga viste òg at totalstasjon og georadar saman kan tileigne bergoverflata eigne koordinatar, noko som kan gjere det lettare å oppdage endringar i berget. Likevel er metoden framleis i utviklingsfasen. Ei vidare forskning for å få til ei implementering av denne metoden er absolutt å anbefale, spesielt sidan det sidan 2016 vert bygd tunnelar som krev inspeksjon frå tunnelrommet. Samanlikna med andre inspeksjonsmetodar i tunnel, er georadar ein sær s lovande ikkje-destruktiv metode.

Georadar vil nok ikkje kunne erstatte dagens metodar for tunnelinspeksjon. Den kan likevel komplementere ein visuell kontroll frå tunnelrommet, slik at ein kan få eit inntrykk av tilstanden av både kvelv og berg, utan destruktive tiltak. Undersøkingar med georadar kan òg kombinerast med laserscanning. Bergoverflata vert ofte laserscanna før kvelvmontasje. Denne laserscanninga gjev eit 3D-bilete av bergoverflata, og georadar kan i ettertid brukast til å kontrollere om heile, eller delar av bergoverflata er i rørsle. For at georadar i framtida skal kunne brukast i tunnel på ein økonomisk og effektiv måte, krev det at georadar ikkje berre kan undersøke striper av bergoverflata, slik som i denne forskinga, men også større flater.

Abstract

After 200 m³ rock mass collapsed from the roof of the Hanekleiv tunnel in 2006, the Norwegian Public Road Administration (NPRA) sharpened its demand for rock stability inspections. All tunnels must now be inspected at regular intervals, to see if the surface of the rock has changed. Nevertheless, it is a problem to investigate rock surfaces, as it is often hidden behind prefabricated water and frost protection structures, mainly vaults. After NPRA in 2016 decided that new tunnels should not be designed for manual inspection behind the vaults anymore, investigations have to be done from the traffic area of the tunnel. This thesis therefore investigates whether ground penetrating radar (GPR) can be a non-destructive inspection method for rock mass behind tunnel vaults, carried out from the traffic room.

A GPR antenna sends electromagnetic energy into the material to be investigated. Energy propagates further into the material, but parts of the energy are reflected back to the antenna when the material properties changes. The GPR uses this reflected wave energy to form a profile, a picture of what the invisible material looks like. In this experiment, a GPR antenna was led along the vault, and it examined a strip of the tunnel wall three times. A total station continuously logged the position of the antenna during the experiment. From the interpretation profile, the distance from the vault to the rock surface was found. By combining the location data from the total station with the distance into the rock surface, the rock surface was assigned its own position coordinates. The third survey had the best quality and was therefore set to be the reference value when deviations between the three interpretations were considered. The deviation was 4.43% for round 1 and 4.83% for round 2. These are small deviations, and the differences that does exist in the interpretation profiles occurs because of the disturbance from conductive materials in the tunnel.

The method is still in the development phase and cannot be implemented until further work is done. An experience base must be established so that it can be distinguished between translator deviations and real, serious changes in the rock mass. In addition, a database should be established, which stores data from early investigations, and can be used as a basis for new investigations.

This experiment shows that GPR has a great potential as a rock inspection method in tunnels, where the rock surface is hidden behind the water- and frost protection structures. Surveys showed, despite disturbances in the interpretation data, the GPR's ability to collect repeatable information about the position of the rock surface. The research also showed that the total station and GPR together could provide the rock surface with its own coordinates, which could make it easier to detect changes in the rock mass. Further work towards an implementation of this method is definitely recommended, especially since inspection now must be conducted from the traffic room in new tunnels. Compared to other inspection methods in tunnels, GPR is one particular promising non-destructive method.

Ground penetrating radar will not be able to replace today's tunnel testing methods. It can nevertheless complement a visual inspection from the tunnel, which gives an impression of the condition of both vault and rock mass, without destructive measures. GPR surveys can also be combined with laser scanning. A laser scan is performed on the rock surface in new or rehabilitated tunnels before the vault is mounted. This laser scanning provides a 3D image of the rock surface, and GPR can later use this 3D image to check whether all or part of the rock surface has movements. In order to use GPR in an economical and efficient manner in the future, it requires a GPR equipment that not only investigates strips of the rock surface, as in this research, but also larger surfaces.

Innhold

Forord	iii
Samandrag	v
Abstract	vii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn og problem	1
1.1.1 Problem	4
1.2 Formål	5
1.3 Avgrensingar	6
1.4 Metode	6
1.5 Struktur	7
2 Norske tunnelar	9
2.1 Tunneldesign og reglement	9
2.2 Dagens inspeksjonsmetode i norske tunnelar	10
2.2.1 Tunnelar med inspeksjonsrom bak kvelv	11
2.2.2 Inspeksjon frå tunnelrommet	13
3 Georadarteori	15
3.1 Grunnleggande georadarteori	15
3.1.1 Georadarutstyr og -tilbehør ved undersøkingar på infrastruktur	15
3.1.2 Georadarantenner	16
3.1.3 Hyperbolsk refleksjon	17
3.1.4 Elektriske eigenskapar	18

3.1.5	Operativ frekvens for georadar	21
3.2	Georadar i praksis	22
3.2.1	Generelt	22
3.2.2	Georadar i tunnel	22
4	Metode	27
4.1	Litteratursøk	27
4.2	Georadarundersøking av tunnel	28
4.2.1	Lokasjon	29
4.2.2	Undersøking	29
4.2.3	Tolking av data	35
4.2.4	Transformasjon og tilarbeiding av data	37
5	Resultat	45
5.1	Avviksberekning	45
6	Diskusjon	59
6.1	Uroingar i tolkeprofil	59
6.1.1	Metall	59
6.1.2	Isdanning	61
6.1.3	Salt	61
6.1.4	Skøytar mellom betongelement	62
6.2	Avvik	63
6.2.1	Hyperbolsk refleksjon	63
6.2.2	Tolking	63
6.3	Grunnlag	65
6.3.1	Antenna vinkelrett på vertikal	66
6.3.2	Samsvar mellom metring frå DMI og totalstasjon	67
6.3.3	Lineær utvikling mellom punkt	68
6.3.4	Plotting av bergkoordinatar	68
6.3.5	Høgdekorrigering for kanal	69

<i>INNHALD</i>	xi
6.4 Forskingspørsmål	69
6.4.1 Detektering av rørsle	69
6.4.2 Posisjonsnøyaktigheit	71
6.4.3 Kan georadar erstatte dagens metodar?	73
7 Konklusjon	77
7.1 Kva står att?	78
A Script fra Matlab	81
B Rapport for posisjonering av georadar	87
Litteratur	94

Figurar

1.1	Eit typisk tunneltverrsnitt med vass- og frostsikringsinstallasjonar (SVV, 2010).	3
1.2	Bak eit typisk tunnelkvelv (Lindstrøm et al., 2013).	5
1.3	Plassen bak tunnelkvelv kan vere liten og ikkje eigna for inspeksjon. Illustrasjonsbilete henta frå: Aftenposten/ Scanpix	6
2.1	Teleskopstong med påmontert kamera kan brukast ved tunnelinspeksjon, her frå Frodeåstunnelen (Lindstrøm et al., 2013).	12
2.2	Fjernstyrt robot med påmontert kamera køyrer på baksida av hengt, Frodeåstunnelen (Lindstrøm et al., 2013).	12
3.1	Eit typisk georadarsystem for undersøkingar på infrastruktur (Saarenketo, 2009).	16
3.2	Georadarsignal blir sendt ut og reflektert ved materialgrenser. Dette dannar eit profil (t.h.) (Lalagüe, 2015).	17
3.3	Georadar kan overdrive forma til røyr og liknande som ligg i grunnen (Shaw et al., 2005).	18
3.4	Tunnelar som byggast i svake material (t.d. lausmasser) kan ha behov for bakfylling for å unngå setningar (Zhang et al., 2010).	25
4.1	Kartet viser Storsandtunnelen (merka i blått), tunnelen som georadarundersøkingane vart gjennomført i. Undersøkingane gjekk føre seg i vestre ende av tunnelen. Kartet er henta frå: Vegkart/ Statens vegvesen.	29

4.2	Kartet viser vestre ende av Storsandtunnelen, der undersøkingane blei teke. Forsøksområdet på omlag 120 meter er markert i raudt, og fastmerka er markert med punkt. Illustrasjonen er tilpassa etter kart frå: Vegkart/ Statens vegvesen.	30
4.3	Georadbilen har ein spesialtbygd festebrakett som georadarantenna er festa til. Ein kan òg sjå korleis antenna førast på hjul langs tunnelveggen. . .	32
4.4	360-gradersprismet, som totalstasjonen følger for å oppnå kontinuerleg posisjonslogging undervegs, er festa midt på aksa til festebraketten for georadarantenna.	33
4.5	Det var rigga opp tre rundprisme i tunnelen under forsøka, plassert over kvar sine fastmerke. Foto: Christer Gabrielsen, SVV.	34
5.1	Første halvdel av eitt av georadarprofilane (runde 3) frå tunnelundersøkinga i fullskala. Raudfarga indikerer det som er tolka som fjelloverflata. Langsgåande akse indikerer metring, nanosekund nedover i profilet.	47
5.2	Siste halvdel av eitt av georadarprofilane (runde 3) frå tunnelundersøkinga i fullskala. Raudfarga indikerer det som er tolka som fjelloverflata. Langsgåande akse indikerer metring, nanosekund nedover i profilet.	48
5.3	Tolkeidata for runde 1 med georadarundersøkingar.	49
5.4	Tolkeidata for runde 2 med georadarundersøkingar.	50
5.5	Tolkeidata for runde 3 med georadarundersøkingar.	51
5.6	Tolkeidata for runde 1, 2 og 3 med georadarundersøkingar.	52
5.7	Første del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.	53
5.8	Andre del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.	53
5.9	Tredje del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.	54
5.10	Fjerde del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.	54

5.11	Femte og siste del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.	55
5.12	Første del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida. Starten er til venstre i figuren.	55
5.13	Andre del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.	56
5.14	Tredje del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.	56
5.15	Fjerde del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.	57
5.16	Femte og siste del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida. Enden av strekninga er til høgre i figuren.	57
6.1	Inspeksjonsluka som var på den undersøkte strekninga var synleg i tolkeprofilen. Luka var av det leiande materialet metall, og lagar difor eit tydeleg ekko i profilen.	60
6.2	Utsikta bak kvelv frå inspeksjonsluka på strekninga, ca ved 78 meter. Ein kunne ikkje sjå langt, men ein kunne sjå fukt og høyre drypp. I tillegg kunne det skimtast ein kabel (t.h. i venstre bilete).	62
6.3	Skøytar mellom betongelement skapar uroingar i tolkeprofilen. Dei prefabrikerte tunnelementa er rundt 5 meter breie med fugemasse i skøytane. . .	63

Tabellar

3.1 Dielektriske eigenskapar for ulike material. Tabellen er tilpassa etter Saarenke- to (2006)	21
5.1 Repeterbarheita til georadarmålingane og -tolkingane er avgjord gjennom utrekning av avvik for dei tre forsøka. Runde 3 er referanse for runde 1 og runde 2.	46

Kapittel 1

Introduksjon

Denne masteroppgåva bygger vidare på Anne Lalagues forskning, som er skildra i doktoravhandlinga hennar, *Use of Ground Penetrating Radar for Transport Infrastructure Maintenance*.

1.1 Bakgrunn og problem

I Noreg har tunnelar til vegføremål vorte bygd sidan slutten av 1800-talet. Den harde, sterke bergkvaliteten i landet krev lite bergsikring, og har gjort tunnel til ei god løysing der bratt landskap gjer det vanskeleg med veg i dagen. I norske tunnelar med stor trafikk er bergoverflata ofte skjult bak prefabrikerte betongkvelv, som vist i figur 1.1 og 1.2. Desse kvelva utgjer tunnelen si vass- og frostsikring, i tillegg til at dei gjev trafikantane ei positiv køyreoppleving. I Noreg er kvelva som oftast sjølvståande, ikkje-bærande struktur. For meir lågtrafikkerte tunnelar er det vanlegare med kvelv av brannsikra PE-skum (PE-skum med eit tilstrekkeleg lag med sprøytebetong over).

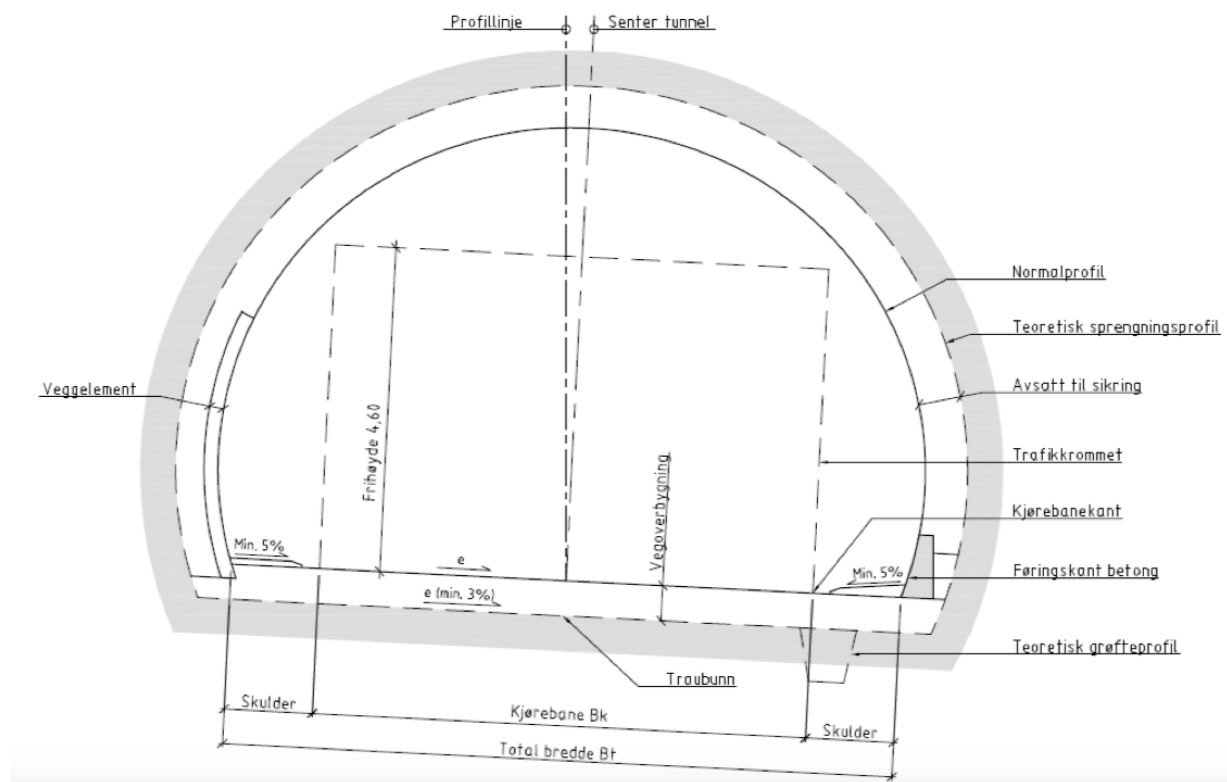
Seint på kvelden, første juledag i 2006, rasa det frå hengeret i Hanekleivtunnelen mellom Drammen og Holmestrand i Vestfold fylke (Lalagüe, 2015). Denne tunnelen ligg på den mest trafikkerte vegen i Noreg, E18, men sidan ulukka skjedde på eit særst lite trafikkert tidspunkt blei ingen skadd. Raset hadde eit omfang på omlag 200 m³, fordelt over 30 lengdemeter. Ingeniørgeologane som var med på etterforskinga av denne ulukka konkluder-

te med at tunnelen ikkje var tilstrekkeleg sikra. Dette er ei hending som Statens vegvesen har teke på stort alvor, og strengare retningsliner og krav har vorte innført i ettertid (Nilsen, 2011). Dei nye krava kom som eit direkte resultat av Hanekleivulukka, og som følge av ein bransjerapport som blei utarbeidd i etterkant av raset (SVV et al., 2007).

Nokre av dei nye krava frå Statens vegvesen er retta mot inspeksjon av tunnelar. I tunnelar der det ikkje tidlegare er utført ei registrering og vurdering av geologiske forhold og sikringsinstallasjonar, skulle tunnelen no inspiserast kvart år (SVV, 2014a). Elles var det hovudinspeksjon kvart femte år. Dette innebar at det skulle gjennomførast inspeksjonar av tunnelstabiliteten i store delar av dei norske tunnelane.

Det blei òg stilt fleire krav ved bygging av nye tunnelar. I mellom anna handbok 021 - Vegtunneler (forgjengaren til handbok N500) blei det lagt inn eit nytt punkt under kapitlet om vass- og frostsikring. Dette kapitlet omhandla det å leggje til rette for inspeksjon bak vass- og frostsikringskvelv (SVV, 2010). Nye, høgtrafikkerte tunnelar skulle no byggast med 0,6 meters avstand mellom normalprofil og teoretisk sprengingsprofil (sjå figur 1.1 og 1.2). Solen bak kvelvet måtte vere gangbar og ryddig, og inspeksjonspersonell skulle vere sikra mot å gå gjennom eller skli på sjølve kvelvkonstruksjonen. Såleis ville tunnelar bli tilrettelagde for trygge, manuelle inspeksjonar av berget bak kvelv. Handbok 021 kravde i tillegg inspeksjonsluker kvar 200 tunnelmeter, på begge sider av trafikkrommet. Desse krava var òg inkludert i 2014-utgåva av handbok N500.

I 2016 kom ei ny oppdatering av handbok N500. Då var underkapitlet om å leggje til rette for inspeksjon bak vass- og frostsikring teke ut av handboka. Denne endringa i handbok N500 er i hovudsak gjort som følge av den permanente stabilitetsikringa i nye tunnelar. Statens vegvesen seier at dei strenge krava til permanent sikring og den gode oppfølginga undervegs i byggjeprosessen og ved ferdigstilling, kan forsvare dei nye krava i handbøkene. Dei få sonene med dårleg berg vert prioritert sikra ved hjelp av dei nye krava, heller enn å tilretteleggje heile tunnelen for inspeksjon. Det er framleis krav til at alle eksisterande tunnelar inspiserast, men berre tunnelar som er bygd etter handbok 021 må inspiserast manuelt bak kvelv.



Figur 1.1: Eit typisk tunneltverrsnitt med vass- og frostsikringsinstallasjonar (SVV, 2010).

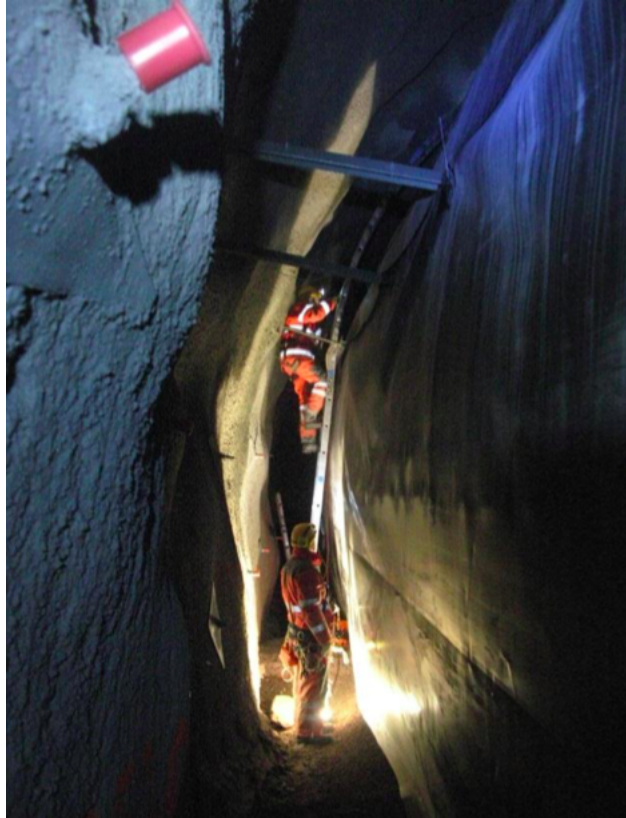
1.1.1 Problem

Som nemnt skjerpa Statens vegvesen i 2010 krava til utforming og kontroll av tunnelar, slik at rørsle i berg kan hindrast eller oppdagast i tide. I tunnelar som blei bygd etter handbok 021 med inspeksjonsrom bak kvelv, kan det vere vanskeleg for geologar å få utført ein manuell inspeksjon der det ikkje er plass til menneske mellom berg og sjølvståande betongkvelv, sjå figur 1.3. Inspeksjonslukene, som skal gje passasje frå tunnelrom til baksida av kvelv, kan vere lite føremålstenleg plasserte og til lite hjelp. Dette gjer inspeksjonen vanskeleg, og potensielt farleg for personellet som utfører den. I nokre tilfelle er manuell inspeksjon av slike tunnelar umogleg.

For nye tunnelar er det ikkje lenger krav om korkje inspeksjonsrom bak kvelv eller inspeksjonsluker. Dette kan føre til destruktive tiltak (tradisjonell inspeksjonsmetode) ved inspeksjon, der ein lagar hol i vass- og frostsikringa for å komme til eller for å sende kamera bak. Destruktive tiltak krev reparasjon, som kostar både tid og pengar. Dette kan òg vere tilfelle i noko eldre tunnelar der manuell inspeksjon ikkje let seg gjere. Meir om dagens inspeksjonsmetodar i tunnelar er skildra i kapittel 2.2. I lågtrafikkerte tunnelar med brannsikra PE-skum som vass- og frostsikring er det ikkje moglegheit for manuell berginspeksjon bak kvelv.

Temaet for denne masteroppgåva er å sjå på moglegheita for å nytte georadar som ein ikkje-øydeleggande metode (engelsk: Non-Destructive Testing, NDT eller Non-Destructive Examination, NDE) for kartlegging og tilstandskontroll av bergoverflater som ligg gøymt bak tunnelkvelv. Statens vegvesen har i dag ikkje presisert noko standard inspeksjonsmetode for detektering av rørsle i berg som skal gjelde for alle tunnelar. Ein slik ikkje-destruktiv metode vil vere nyttig i nye tunnelar, bygd utan inspeksjonsrom, i eldre tunnelar som generelt ikkje er designa for kontroll, og i tunnelar der manuell inspeksjon ikkje er fysisk mogleg. Òg lågtrafikkerte tunnelar som er kledd att med PE-skum og sprøytebetong vil kunne ha nytte av denne metoden. Metoden kan òg vere tidssparande, samanlikna med andre metodar.

Nye inspeksjonsmetodar for detektering av rørsle i berg vil kunne vere av interesse for Statens vegvesen, som har ansvaret for tilstanden på vegtunnelane. Ny, ikkje-øydeleggande



Figur 1.2: Bak eit typisk tunnelkvelv (Lindstrøm et al., 2013).

inspeksjonsmetode kan òg vere av interesse for entreprenørar som vil rekne på bergsikringskostnad ved tunnelrehabiliteringsprosjekt.

1.2 Formål

I denne masteroppgåva skal ein gjennom forkinga kunne svare på følgjande forskings-spørsmål:

- I kva grad kan rørsle i berg bak kvelv detekterast ved hjelp av georadar?
 - Korleis oppnå tilstrekkeleg posisjonsnøyaktigheit under kvar georadarmåling?
- Kan georadar erstatte/komplementere dagens metodar for inspeksjon av berg bak kvelv i tunnelar?



Figur 1.3: Plassen bak tunnelkvelv kan vere liten og ikkje eigna for inspeksjon. Illustrasjonsbilette henta frå: Aftenposten/ Scanpix

1.3 Avgrensingar

Det var naudsynt å snevre inn masteroppgåva, for å sikre nok tid til å fullføre det planlagde. Georadarundersøkingane vart utført på ei kort prøvestrekning i éin bestemt tunnel, med éin type vass- og frostsikring (prefabrikkerte kvelv). Alle undersøkingane blei gjort same kveld, så ulike fukt- eller temperaturforhold vart ikkje teke omsyn til.

Undersjøiske tunnelar og ulike typar vass- og frostsikring er ikkje vurdert i denne masteroppgåva. Frå forskinga til Anne Lalagüe (Lalagüe, 2015) veit ein at georadarsignal ikkje går gjennom elektrisk leiande materiale. Av den grunn er tunnelar med stålfiberarmert sprøytebetong eller med vass- og frostsikring av lettbetong med Leca ikkje teke omsyn til i denne forskinga. I vanlege prefabrikkerte kvelv, som er forsterka med armeringsnett, kan ein utføre undersøkingar. Det vert som å sjå gjennom eit gjerde. Sidan poenget med denne masteroppgåva er å teste om georadar i prinsippet vil fungere som ein inspeksjonsmetode for berg i tunnel, er dette likevel nyttig forskning.

1.4 Metode

Framgangsmåten er delt inn i to steg. Først, og undervegs i prosessen, blei det gjennomført eit litteratursøk opp mot georadarbruk, teknologi og inspeksjonsmetodar i norske tunnelar.

Litteratursøket er vidare skildra i kapittel 4.1.

For å skaffe nok data til å kunne svare på forskingsspørsmåla i underkapittel 1.2 vart det gjennomført eit tunneleksperiment med georadar. Georadaren var montert på støtfangaren til ein varebil, og undersøkingane blei utført tre gonger langs tunnelveggen på ein kort del av Storsandtunnelen ved Orkanger i Trøndelag. Posisjoneringa undervegs er teke hand om av ein totalstasjon, som med hjelp av fire fastmerke tracka posisjonen til eit prisme montert på georadarantenna. Resultata frå undersøkinga er tolka ved hjelp av programvara Road Doctor. Ved å bruke posisjoneringsdata frå totalstasjonen saman med den tolka avstanden mellom radar og bergoverflate, vert koordinatane til bergoverflata rekna ut.

1.5 Struktur

Denne avhandlinga er klassisk oppbygd, med teori, metode, resultat, diskusjon og konklusjon. Kapittel 2, Norske tunnelar, gjev ei oversikt over teorien omhandlande inspeksjonsreglar og -metodar for tunnelar i Noreg, medan kapittel 3, Georadarteori, omhandlar grunnleggande teori om georadar og georadarbruksområda fram til i dag. Informasjonen i desse kapitla er funne gjennom litteratursøket.

Vidare, i kapittel 4, Metode, vert framgangen i forskinga skildra steg for steg. Metode for litteratursøk og for utføring av sjølve undersøkingane er skildra der, i tillegg til kalkuleringsformlar, grunnlag og framgang ved koordinattransformasjon.

Kapittel 5, Resultat, tek for seg resultata av forskinga, gjennom grafar, figurar og tabellar. Diskusjonen rundt desse funna er i kapittel 6, Diskusjon, i tillegg til ein diskusjon rundt forskingsspørsmåla. Vidare er det ei kort oppsummering og konklusjon i kapittel 7, Konklusjon, der det òg kjem eit underkapittel (7.1) om forslag til vidare arbeid.

Kapittel 2

Norske tunnelar

2.1 Tunneldesign og reglement

Hanekleivulukka førte som nemnt til at det blei innført krav til regelmessig inspeksjon av tunnelstabiliteten i alle norske tunnelar. Frå 2010 til 2016 skulle inspeksjon gjerast manuelt for nye tunnelar, medan nye tunnelar etter år 2016 skulle inspiserast visuelt frå trafikkrommet, eller gjennom destruktive metodar.

Etter personleg kommunikasjon med Mona Lindstrøm ved seksjon for Tunnel og betong i Statens vegvesen (08.03.2018), kom det fram at endringa i tunnelutforming og inspeksjonsmetode i Handbok N500 i hovudsak er gjort som følge av den permanente stabilitetssikringa i nye tunnelar. Den permanente stabilitetssikringa er avgjort ut frå både Q-systemet og Statens vegvesen sine eigne, dels strengare sikringsklassar i N500 (SVV, 2016). For å fastsette omfanget av den permanente sikringa undervegs i byggjefasen følgjer ein Handbok R761 (SVV, 2014b) sitt krav om kontinuerleg kartlegging på stuff under driving, i tillegg til at ein brukar Eurokode 0 - *Grunnlag for prosjektering* og Eurokode 7 - *Geoteknisk prosjektering*, med uavhengig kontroll. Uavhengig kontroll handlar om at ein ingeniørgeolog, tilsett i eit uavhengig konsulentfirma, kontrollerar og skriv rapport om den fullførte sikringa. Lindstrøm seier vidare at det ikkje er mogleg å gardere seg hundre prosent mot nye rasulukker i tunnel, med eller utan tilrettelegging for manuell inspeksjon. Ho meiner likevel at dei strenge krava til permanent sikring, og den gode oppfølginga undervegs i

byggjeprosessen og ved ferdigstilling, kan forsvare dei nye krava i handbøkene. Særs liten del av total tunnallengd har dårleg berg i Noreg. Slike soner med dårleg berg vert prioritert sikra ved hjelp av krava handbøkene no stiller, i staden for å tilrettelegge heile tunnelen for inspeksjon.

I følgje Mona Lindstrøm er det òg fleire grunnar til at det ikkje lenger vert lagt til rette for inspeksjon i nye tunnelar. Å manuelt inspiserer berg bak kvelv er ein krevjande og farleg jobb. Difor krevst det mange kurs og mykje sikring for personell som er med på dette. Ved å bygge nye tunnelar som ikkje krev manuell inspeksjon, vil dette gagne HMS for ingeniørgeologane i Statens vegvesen. Kostnaden ved å sprengje ut ekstra stort tverrsnitt for å gjere plass til inspeksjonsrom aukar òg byggekostnaden vesentleg. Vidare gjer større profil og meir rom bak kvelv at monteringsboltane blir lengre. Dette er ugunstig som følgje av at trykk- og sugkrefter frå trafikken gjev større last på kvelvkonstruksjonen dersom boltane er lange og rommet bak kvelv er stort. Lindstrøm påpeikar at holrom bak kvelv i tillegg kan vere eit problem under brann. Dersom det brenn i trafikkrommet og kvelvet er uskadd, er vass- og frostsikringskvelva tilstrekkeleg brannsikre. Problemet oppstår om køyretøy kolliderer med kvelvkonstruksjonen og skadar den. Då kan tilgangen på luft bak kvelvet vere med på å halde ein eventuell brann ved like lenger.

2.2 Dagens inspeksjonsmetode i norske tunnelar

I Noreg har Statens vegvesen ansvaret for tunnelane. I slutfasen av kvart tunnelprosjekt skal det etter dagens krav leggest fram ein ingeniørgeologisk sluttrapport, som mellom anna skal innehalde dokumentasjon, inspeksjonsrutiner og sikringsavvik (SVV, 2016). Dei geologiske forholda og sikringsinstallasjonane skal registrerast og vurderast. I tunnelar der det ikkje er utført ei slik registrering og vurdering, skal tunnelen inspiserast kvart år. Ein hovudinspeksjon for dette skal gjennomførast minst kvart femte år (SVV, 2014a).

Utallege inspeksjonsmetodar for tunnelar finst, men dei aller fleste krev direkte tilgang til bergoverflata (Lalagüe, 2015). I norske tunnelar med høg ÅDT er det ofte montert eit prefabrikkert betongkvelv mellom køyrebane og sprengt kontur. Dette kvelvet fungerer i hovudsak som vass- og frostsikring, i tillegg til å gje trafikantane ei positiv køyreoppleving

(SVV, 2014a).

2.2.1 Tunnelar med inspeksjonsrom bak kvelv

Inspeksjon av norske tunnelar som er bygd mellom 2010 og 2016 krev fysisk tilgang bak betongkvelvet, og kan i nokre tilfelle vere vanskeleg på grunn av plassmangel mellom berg og betongkvelv, sjå figur 1.3. I slike tunnelar med særst liten plass er det uforsvarleg og til tider umogleg å sende geologar bak kvelv, og ein er avhengig av godt plasserte dører og inspeksjonsluker for at geologen skal kunne ta ein visuell inspeksjon av berget (Lindstrøm et al., 2013). Dersom det ikkje er tilstrekkeleg med slike inspeksjonsluker, kan ein bruke georadar til å detektere avstand mellom berg og kvelv, for så å lage nye inspeksjonsluker på strategiske områder der ingeniørgeologen får nok plass til å oppnå god oversikt (Lalagüe, 2015). I andre tilfelle vert det i tronge område bora hol i betongkvelvet frå tunnelsida, slik at ingeniørgeologane ved hjelp av ei teleskopstong kan sende eit kamera med lys inn bak kvelvet og filme forholda (Lindstrøm et al., 2013), sjå figur 2.1. Dette er ein destruktiv metode då det vert laga hol i vass- og frostsikringa som må reparerast. Det er både tid- og kostnadskrevjande. Ein kan òg bruke kamera bak kvelvet, dersom det er plass til geologane nede ved solen, men det er for trangt i heng. Då kan stonga med kamera bli sendt frå sole og opp mot heng, og geologane kan gjennom video få eit inntrykk av tilstanden i hengen. I dette tilfellet betyr det at geologane må folde saman teleskopstonga for kvar ein montasjebolt som kjem i vegen for stonga.

Ein annan metode som har vore nytta i inspeksjonssamanheng er fjernstyrte robotar med påmontert kamera, sjå figur 2.2 (Lindstrøm et al., 2013). I gamle tunnelar som ikkje vart bygd for slike inspeksjonsmetodar, kan kablar og skinner gjere det lite framkomeleg for små køyretøy. Ein sjølvkøyrande robot utan leidning kan køyre seg fast eller dette ned og gå tapt, medan ein robot med leidning er mindre mobil, men kan enklare hentast ned att. I nokre tunnelar finst det eigne transportskiner for slike fjernstyrte robotar, men desse skinnene krev òg vedlikehald.

Overvakingskamera med rørslesensor har blitt montert bak vass- og frostsikringa for å halde kontroll på endringar bak betongkvelv i spesielle områder (Lindstrøm et al., 2013).



Figur 2.1: Teleskopstong med påmontert kamera kan brukast ved tunnelinspeksjon, her frå Frodeåstunnelen (Lindstrøm et al., 2013).



Figur 2.2: Fjernstyrt robot med påmontert kamera køyrer på baksida av henget, Frodeåstunnelen (Lindstrøm et al., 2013).

På denne måten treng ein ikkje sende personell bak kvelv for visuell inspeksjon.

2.2.2 Inspeksjon frå tunnelrommet

For alle norske tunnelar vil det vere tid- og kostnadssparande å kunne foreta gode tunnelinspeksjonar frå tunnelrommet. Mange av tunnelane som er bygd før 2010, og dei fleste tunnelane som er bygd etter 2016, har ikkje moglegheit til å sende geologar bak kvelv. I dag er det ikkje presisert noko inspeksjonsmetode frå Statens vegvesen som skal gjelde for alle tunnelar. Tidvis kan visuell inspeksjon frå tunnelrommet vere tilstrekkeleg, men ofte kan det vere naudsynt med andre, meir nøyaktige løysingar.

Laserskanning er ein av løysingane som er forsøkt brukt til å inspisere tunnelen sin tilstand frå tunnelrommet. Dette fungerer som ei tredimensjonal avbilding av tunnelen, og held på å bli eit verdifullt verktøy i inspeksjonssamanheng. Det er ein allsidig og ikkje-destruktiv metode, som gjev nøyaktig, nyttig og omfattande informasjon om tilstanden til overflata på tunnelkvelvet på eit avgrensa område av ein tunnel (Hawks og Spoerr, 2014; Tabrizi et al., 2017). Metoden gjev ikkje informasjon om kva som ligg bak eller i sjølve kvelvet, men riss, sprekker, fukt og andre betongskadar i overflata på betongen blir kartlagde.

I dag utførast denne teknologien ofte direkte på bergoverflata under driving eller ved rehabilitering av tunnelar. Laserscanninga kan ikkje gjerast på bergoverflata på nytt før vass- og frostsikringa vert teke ned att, og fungerer difor dårleg som ein regelmessig inspeksjonsmetode av berg. Lindstrøm et al. (2013) hevdar at laserscanning kan nyttast frå trafikkrommet på betongkvelvet for inspeksjon og dokumentering av tunnelar, men at det krev ressursar. ”Lasermåling har vært testet ut i noen tunneler, men det er pr. nå ikke beskrevet nok til å kunne anbefale slike målinger generelt for tunneler” (Personleg kommunikasjon med Mona Lindstrøm i Statens Vegvesen, 08.03.2018)

Det finst òg kompliserte installasjonar som fiberoptiske kablar og geofonar som detekterer vibrasjonar og rørsle kontinuerleg gjennom ein heil tunnel. Begge metodane har vore utprøvd som hjelpemiddel for å oppdage dårleg sikra berg (Lindstrøm et al., 2013). Desse krev regelmessig kontrollar og resultattolking.

Kapittel 3

Georadarteori

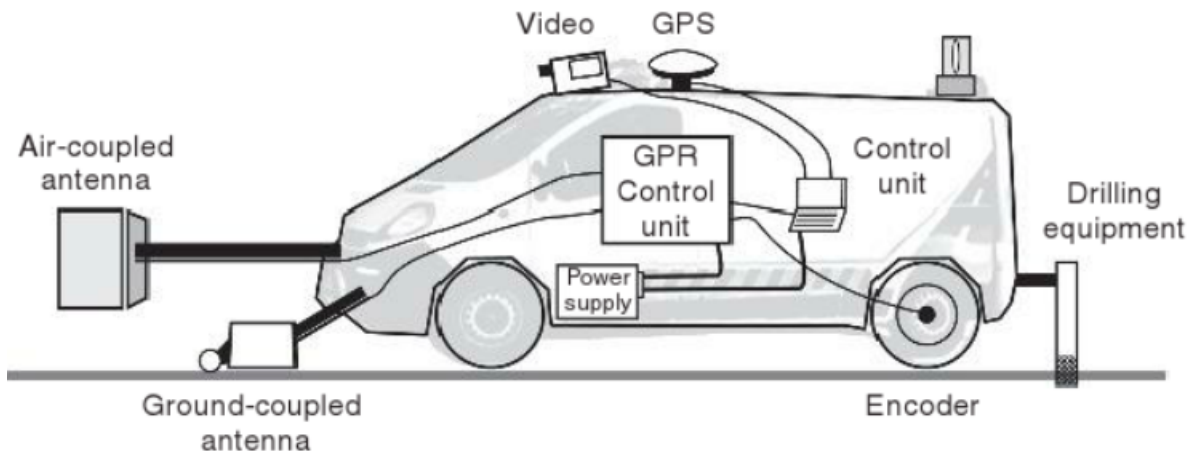
3.1 Grunnleggande georadarteori

Georadar (engelsk: Ground Penetrating Radar, GPR) er ein ikkje-destruktiv metode som brukast for å kartleggje og undersøke det som ligg bak ei overflate, *det ukjende*. Teknologien brukar elektromagnetiske antenner, som førast over ei overflate for å oppdage refleksjonar frå eigenskapar i grunnen (Annan, 2009). Ein kan til dømes bruke georadar for å finne tjuknaden på ulike lag, mellom anna i samband med vegundersøkingar, geoteknikk og geologi. Nedgravne røyr, steinar, bekkar og andre objekt kan mellom anna oppdagast ved hjelp av georadar, utan å grave. Ein sparar både tid og kostnad.

3.1.1 Georadarutstyr og -tilbehør ved undersøkingar på infrastruktur

Georadarsystemet som i infrastruktursamanheng vert montert på/i ein varebil, består vanlegvis av: Antenne, kablar, straumforsyning, georadar-kontrolleining/pulsgenerator og eventuelle tilleggsutstyr (sjå figur 3.1) (Saarenketo, 2009). Ofte har slike system òg ei ekstra kontrolleining (PC) for å styre undersøkingane, samt utstyr montert på bakhjul for å måle lengda av den undersøkte strekninga (DMI). Meir om det aktuelle utstyret i denne avhandlinga finst i kapittel 4.2.2, georadarutstyr.

I undersøkingar som ikkje gjerast i tunnel, kan GPS (Global Positioning System) bru-



Figur 3.1: Eit typisk georadarsystem for undersøkingar på infrastruktur (Saarenketo, 2009).

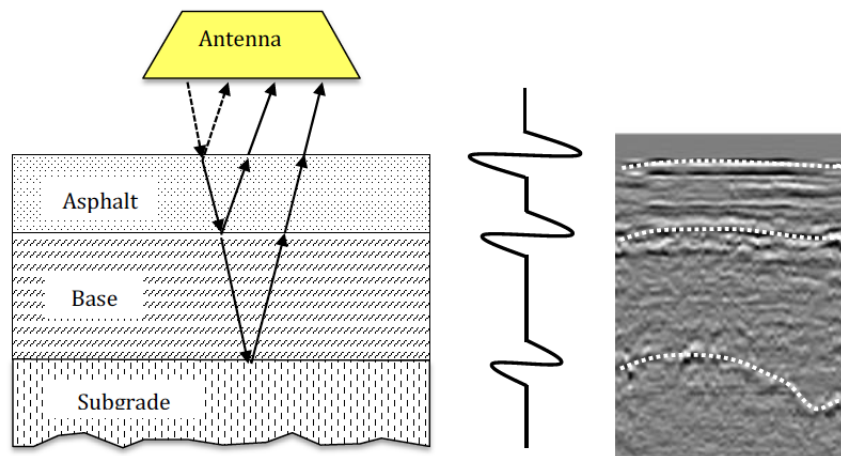
kast som tilleggsutstyr. Dette gjer at dataa frå målingane får posisjonskoordinatar (x , y , z), noko som kan vere til stor hjelp ved tolking av data. Det kan også vere til nytte i samband med målingar på rullebaner, parkeringsplassar eller andre opne plassar som manglar metreringsystem å knyte dataa til.

3.1.2 Georadarantenner

Det finst i dag to hovudtypar georadarantenner: Luftkoplå og jordkoplå (Saarenketo, 2009). Luftkoplå antenner er vanlegvis festa rundt ein halv meter frå materialet som skal undersøkast. Slike antenner opererer frå 500 MHz – 2,5 GHz, og dei elektromagnetiske bølgiene går omlag 0,5 – 0,9 meter inn i materialet. Frå jordkoplå antenner vil dei utsendte bølgiene forplante seg opp til 20 – 30 meter inn i trafikkinfrastruktur, og vil operere med en frekvens på 80 til 1500 MHz. Antenna har anten direkte kontakt med materialet som skal undersøkast til ei kvar tid, eller så er antenna festa slik at den passerer rett over materialet. Avstanden frå den jordkoplå antenna til materialet må haldast konstant, men til gjengjeld gjev jordkoplå antenne betra forplantning i materialet, samanlikna med luftkoplå antenner. Undersøkingar med jordkoplå antenner inneber ei lågare hastigheit under bruk (5 – 30 km/t), i forhold til luftkoplå antenner som kan operere i motorvegshastigheit.

Ei georadarantenne er i hovudsak samansett av to delar: Ein sendar og ein mottakar. Sendaren sender ut radarsignal, høg-frekvent elektromagnetisk energi, inn i materia-

let som undersøkast (Lalagüe, 2015). Elektromagnetiske bølger forplantar seg i materialet i ei hastigheit som er avgjort av dei elektriske eigenskapane til materialet. Delar av bølgeenergien blir reflektert attende til mottakaren på overflata når bøljepulsen treff ei grense, som representerer ei endring i materialet sine dielektriske eigenskapar. Bølgjelengda til den reflekterte bølgeenergien er kjent for ulike material, og ein kan dermed detektere kva material ein har støtt på. Resten av energien vil fortsette innover i materialet og reflektere signal frå fleire grenseflater, sjå figur 3.2. Det er amplituda og tida det tek frå bølga blir sendt ut frå sendaren, til reflektoren og attende til mottakaren som blir målt og registrert (tovegs gangtid til lydimpulsen). Reflektert signal nyttast for å lage eit bilete/profil av lagdeling og objekt under overflata. For å få til dette må antenna kontinuerleg flyttast langs undersøkingsstrekka.

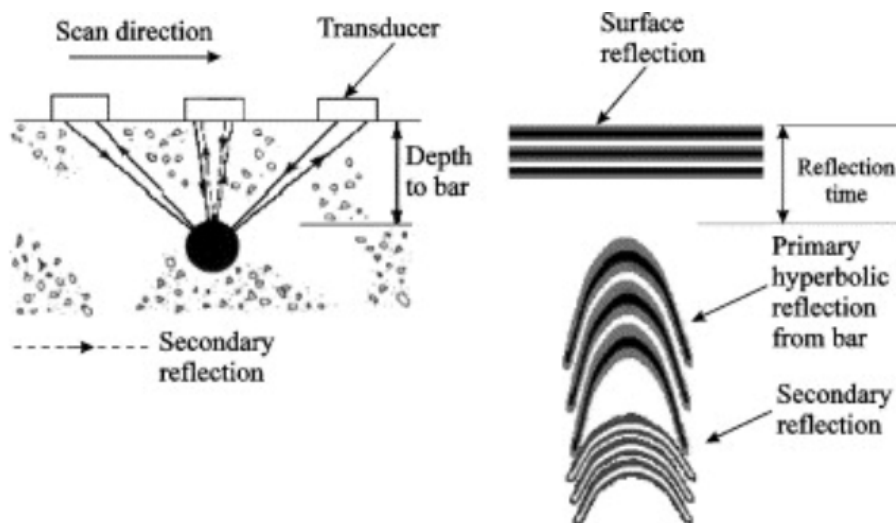


Figur 3.2: Georadarsignal blir sendt ut og reflektert ved materialgrenser. Dette dannar eit profil (t.h.) (Lalagüe, 2015).

3.1.3 Hyperbolsk refleksjon

Som følgje av at georadaren passerer over den undersøkte overflata samtidig som den sender ut og tek imot elektromagnetiske bølger, kan det påverke forma dei nedgravne objekta vil få i tolkeprofilen (Shaw et al., 2005). Georadaren har ein tendens til å overdrive små, sirkulære objekt som røyr og liknande, slik at dei i tolkeprofilen får ein hyperbolsk fasong (sjå figur 3.3). Det er som følge av denne forvirrende framstillinga viktig at tolkinga er gjort

av erfarne operatører, som kan gje gode tolkingar gjennom gjenkjenning av karakteristiske trekk i tolkeprofilen.



Figur 3.3: Georadar kan overdrive forma til røyr og liknande som ligg i grunnen (Shaw et al., 2005).

Dei siste ti åra har det skjedd ei vidare utvikling av georadarutstyr og tolkeverktøy. Med nyare utstyr kan ein i dag automatisk få fram former utover dei klassiske hyperbolske formene, i tillegg til fargekoding for ulike material (Ayala-Cabrera et al., 2014). Dette kan gjere tolking enklare, og meir tilrettelagt for at operatører utan lang erfaring kan gjere gode tolkingar.

3.1.4 Elektriske eigenskapar

For at ein georadar skal kunne gje resultat, er forskjellane i dei elektriske eigenskapane i materialet avgjerande. Teorien om dei elektriske eigenskapane i dette delkapittelet er henta frå Lalagüe (2015).

Hovudmaterialeigenskapane i undersøkingsmaterialet er dei eigenskapane som styrar forplantinga og dempinga av elektromagnetiske bølger i materialet. Desse eigenskapane heng saman med kvarandre.

- Den dielektriske permittiviteten (ϵ_r)

- Den elektriske leiingsemna (σ)
- Den magnetiske permabiliteten (μ)

Material med dielektriske eigenskapar er teoretisk skildra som straumførande. Mange av byggemateriala som blir brukt i vegsamanheng i dag er rekna som dielektriske. Likevel vil alt geologisk materiell til ein viss grad fungere dempende for den elektromagnetiske energien, ved å gjere energien om til varme. Difor vert slike material kategorisert som *lågtings-dielektriske material*.

Leiingsemna (konduktiviteten), (σ)

Eit material si leiingsemne handlar om emna materialet har til å leie straum, og i georadarsamanheng vil det seie noko om kor djupt inn i materialet vi kan sjå. Elektromagnetisk energi vil bli dempa av elektrisitet, så dess større leiingsemne eit material har, dess større demping får dei elektromagnetiske bølgiene. Dette fører til at forplantinga, og dermed undersøkingsdjupna, går ned. Om $\sigma = 0$ vil signala kunne penetrere djupt, men soner med til dømes leir eller saltvatn vil kunne seinke forplantingsdjupna, som følgje av den gode leiingsemna. For eit lågtapstilfelle vert dempinga:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

α (Np/m) er dempinga, σ (S/m) er konduktiviteten, ϵ_r (dimensjonslaus) er den relative dielektriske permittiviteten og μ er den magnetiske permabiliteten. $\mu = 1$ for dei fleste geologiske material.

Den relative dielektriske permittiviteten (ϵ_r)

Den relative dielektriske permittiviteten (formel 3.2) skildrar kor hurtig radarbølger går gjennom eit materiale. ϵ_r er dimensjonslaus, og handlar om emna eit lågtaps-dielektrisk material har til å lagre elektrisk lading etter påføring av eit elektrisk felt. ϵ_r er forholdet mellom den absolutte permittiviteten til eit stoff (ϵ) og det som finst av ledig plass eller vakuum (ϵ_0).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0(\omega)} \quad (3.2)$$

Den relative dielektriske permittiviteten består i hovudsak av frekvensavhengige reelle (lager) og imaginære (tap) komponentar:

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - i\epsilon_r''(\omega) \quad (3.3)$$

$\epsilon_r^*(\omega)$ er den komplekse, relative dielektriske permittiviteten. $\epsilon_r'(\omega)$ utgjør den reelle delen av den komplekse, relative dielektriske permittiviteten (lager), medan $i\epsilon_r''(\omega)$ står for den imaginære delen av den komplekse, relative dielektriske permittiviteten (tapsfaktor). Tapsfaktoren skildrar polariseringa som er ikkje-reversibel, og vert ofte rekna som neglisjerbar (for material med låg leiingsemne).

Relativ permittivitet i eit undergrunnsmateriale er, for å gjere det enkelt, redusert til sin reelle komponent ϵ_r , måla ved låge frekvensar. Denne relative permittiviteten heng saman med materialsamansettinga, fukt og mengda holrom, og er ofte omtala som den *relative dielektriske konstanten*. Elektromagnetiske pulsar har ei større hastigheit gjennom eit låg-dielektrisk permittivitetsmateriale enn for eit material med høg relativ dielektrisk permittivitet. Dette gjer georadaren meir effektiv på låg-dielektrisk permittivitetsmateriale.

Dess meir vatn det finst i det undersøkte materialet, dess høgare blir den relative dielektriske permittiviteten, og hastigheita på dei elektromagnetiske bølgiene går ned. Om vassmengda i materialet går ned, vert det omvendt verknad i ϵ_r og bølgehastigheita. Dei dielektriske eigenskapane for ulike material er skildra i tabell 3.1.

Den magnetiske permeabiliteten (μ)

Den magnetiske permeabiliteten skildrar emna eit material har til å bli magnetisert når det vert utsett for eit elektrisk felt. I likheit med leiemna (σ) vil ei auke i magnetisk permeabilitet dempe dei elektromagnetiske strålingane. Slike tilstandar oppstår sjeldan, med mindre det er ei monaleg mengd magnetittmineral i materialet. Den magnetiske permeabiliteten vert difor rekna som neglisjerbar for dei fleste material i veggssamanheng ($\mu = 1$).

Tabell 3.1: Dielektriske eigenskapar for ulike material. Tabellen er tilpassa etter Saarenketo (2006)

Materiale	Dielektrisk verdi
Luft:	1
Betong:	8 – 10
Ferskvatn:	81
Is:	4
Silt:	25 – 40
Leire:	16 – 30
Granitt:	5 – 7

3.1.5 Operativ frekvens for georadar

Frekvensen den elektromagnetiske energien svingar i, karakteriserer dei elektromagnetiske bølgiene. Lange bølger kjem frå låge frekvensar, medan dei korte bølgiene kjem som følge av høge frekvensar. Dette kan ein sjå frå formelen for bølglengda (m):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.4)$$

der c er hastigheita til elektromagnetiske bølger som forplantar seg i fritt rom ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s), og f er frekvens (1/s), som skildrar kor djupt og klårt vi kan sjå.

Bølglengda er knytt til kor djupt bølga forplantar seg inn i det undersøkte materialet og oppløysinga på data (vertikalt). Leiingsemna og den relative dielektriske permittiviteten til materialet er begge frekvensavhengig. Difor har pulsgenereringsfrekvensen ein direkte innverknad på hastigheit og demping. Dess høgare frekvens (kortare bølglengder), dess større demping får ein på dei elektromagnetiske bølgiene. Dette fører til kortare forplantingsdjupne, men klårare oppløysing på data. Lågare frekvensar gjev dårlegare oppløysing, men penetrerar derimot djupare.

3.2 Georadar i praksis

3.2.1 Generelt

Georadar oppnådde, etter mange tiår med forsøk, sine første resultat på 50-talet, og har dei siste 20 – 25 åra hatt ei sterkt aukane utvikling (Annan, 2009; Saarenketo, 2009). Utviklinga har skjedd innan både teori, teknikk, teknologi og bruksområde. Sidan georadar for første gong blei utprøvd i tunnelsamheng på midta av 70-talet i USA har georadar blitt brukt for ulike formål i tunnelar og anna veginfrastruktur (Saarenketo, 2009). Georadar er rekna som ein ikkje-destruktiv inspeksjonsmetode fordi den ikkje krev destruktive tiltak som boring av hol, prøvetaking eller likande for å få informasjon om det som ligg skjult. På denne måten slepp ein unna reparasjonar. I tunnelsamheng er georadar ein ikkje-destruktiv metode fordi geologar slepp å ta seg bak tunnelkvelv eller liknande på vanskelege punkt, som ofte ville blitt utført ved boring/skjering i vass- og frostsikringa.

Georadaren har gjennom åra fått mange ulike bruksområde, mellom anna geologiske undersøkingar, arkeologi, detektering av landminer, undersøking av over- og underbygging på veg og jernbane, kontroll av tilstand på brudekke og flyplassar, og inspeksjon av betongkvelv i tunnel (Lalagüe, 2015). Georadar er i tillegg brukt til å finne grunnvasspegelen, islinser og nedgravne objekt. Sjølv om georadar er eit godt hjelpemiddel, er georadaren mellom anna svak for vassinnhald i det undersøkte materialet. Dette kjem som følge av at den tidlegare omtala ϵ_r gjev lågare bølgehastigheit dersom vatn er til stades. Vatn har stor leiingsemne som gjer dempinga av dei elektromagnetiske bølgjene vesentleg, og undersøkingdjupna vert dermed grunnare. Georadaren fungerer òg dårleg i leir, organisk material og i saltvatn. Dersom to eller fleire material har forholdsvis like dielektriske eigenskapar, skil georadaren dårleg mellom dei.

3.2.2 Georadar i tunnel

Georadar er ikkje ein ukjent inspeksjonsmetode i tunnelsamheng. Forskinga som liknar mest på forskninga i denne masteroppgåva er Cardarelli et al. (2003), som brukte geofysiske teknikkar for å vurdere stabiliteten i berget i ein italiensk vasstunnel etter eit ras frå heng.

Studiet fokuserar i hovudsak på seismiske metodar, men òg georadar er brukt for å få informasjon om sprekker og mogleg betong–bergkontakt. Fleire forskingsartiklar skildrar òg bruk av georadar til tilstandskontroll av betongkvelv og bakfylling i tunnelsamanheng.

Tunnelkvelv

Betongkvelvet er ein sårbar del av tunnelane, samtidig som dei har ein viktig funksjon. I Noreg fungerer kvelva oftast som ikkje-bærande vass- og frostsikring, med mindre det er full utstøping. Ved full utstøping er berget så dårleg at armerte betongkvelv held konstruksjonen oppe. Slike løysingar er veldig vanleg i utlandet, der berget ikkje er i stand til å bære si eiga vekt.

Vatn som lek inn i tunnelane lagar sprekker i betongkvelvet, korrosjonsskadar på bergsikringa og betongavskaling (Lalagüe, 2015). Lekkasjar er vanskeleg å oppdage, men kan bli funne ved å stadig overvake skadar i betongveggane. Inne i tunnelane er det mørkt, fuktig og travelt, noko som gjer det vanskeleg å gjere inspeksjonar i tunnelar som sjeldan er stengte (Delatte et al., 2003). Ein må ha fokus på å gjennomføre raske kontrollar, og der kjem fokuset på ikkje-destruktive metodar inn.

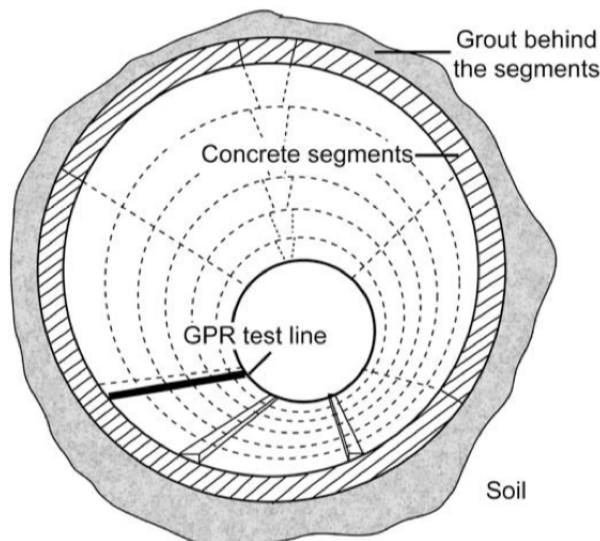
Det er fleire artiklar som skildrar forskning på ulike slike ikkje-destruktive metodar for tilstandskontroll av betongkvelv i tunnelar. Delatte et al. (2003) er ein av desse, og prøvde mellom anna ut Impact Echo, georadar, spektralanalyse av overflatebølgjer og impulsrespons. Det blei undersøkt kor raskt og nøyaktig det kan utførast tilstandskontroll i undergrunnstunnelar, utan å hindre t-banedrifta. Det vart konkludert med at ikkje-destruktive metodar har stort potensial, men at dei må utviklast meir. Wimsatt et al. (2014) gjennomførte ei liknande undersøking på slike metodar nokre år etter, og prøvde mellom anna ut luft- og jordkopla georadar, termografi, skanning, ultrasonisk tomografi og ekko og Impact Echo. Desse forskjellige ikkje-destruktive metodane blei sett opp mot kvarandre for å finne ut kven av dei som minimerar uroing av trafikken under tilstandskontroll. Spørsmålet var om metodane kunne kartlegge holrom, fukt, korrosjon og andre skadar, men òg om metoden er nytteleg, nøyaktig, enkel i bruk og om den toler trafikkstøy. På prøver mot simulert oppspalta betong blei konklusjonen for georadar at deteksjonen var dårleg pga

for små storleikar og fukt. I felt blei det derimot oppdaga at luftkopla georadar-antenner fungerte godt. Område med låge dielektriske eigenskapar vil i følge Wimsatt et al. (2014) bli identifisert av slike luftkopla georadarar, før dei vidare kan kontrollerast av jordkopla antenner (som gjev betre penetrasjon).

Bosela et al. (2006) har òg samanlikna georadar med andre ikkje-destruktive metodar (Impact Echo, Rotary Percussion og visuell inspeksjon) for tilstandskontroll av betongkvelv i ein t-banetunnel i USA. Viktige faktorar var vektlagt, som tidsbruk og kor godt metodane fanga opp dårleg betong i vass- og frostsikringa. Impact-echo detekterte flest feil i betongen, og georadar fann nest flest. Men som følge av at georadar hadde ein av dei raskaste inspeksjonstidene, kom georadar best ut av denne testen, til tross for at georadartolkinga vart sett på som noko subjektiv. Det blei konkludert med at georadar har potensialet til å bli ein praktisk og rask ikkje-destruktiv metode for undergrunnstunnelar.

Det er òg undersøkt om georadar kan detektere holrom, uheldige strukturar i betongen og kontakt mellom berg og kvelv (Parkinson og Ékes, 2008). Over 17 km med georadar-data frå testtunnelen viste at georadaren kontinuerleg kartla betongtjuknad, armering og andre material og holrom inne i kvelvet. Abraham og Dérobert (2003) brukte georadar for å kartlegge skadeomfanget på prefabrikkerte betongelement etter ein dødeleg brann i Mont-Blanc-tunnelen i 1999. Etter tunnelbrannen fann dei ut at betongelementa hadde blitt ujamne i tjuknaden, noko som svekker mekanisk styrke. Ved å ta kjerneprøver blei det oppdaga at den elastiske skjærstyrka i betongen var seinka, og georadar og seismikk blei gjennomført for å få ei oversikt over situasjonen. Det blei då oppdaga endringar i både mekaniske og elektromagnetiske eigenskapar i betongen, i tillegg til sprekkedanning. Forfattarane konkluderte med at fordelane med NDT-metodar var veldig overbevisande. Georadar og seismikk er komplimenterande, og kan nyttast ved rekonstruering av betongtjuknad. Dei hevda kjerneprøver av betongen ikkje kunne gje representative bilete av heile tilstanden, berre for små områder. Interpolering mellom kjerneprøver er ikkje gyldig, men områda mellom kjerneprøver kan undersøkast med bruk av NDT-metodar.

Armeringsnett og anna stål i betong vert på enklast måte funne ved bruk av georadar (Lalagüe, 2015).



Figur 3.4: Tunnelar som byggast i svake material (t.d. lausmasser) kan ha behov for bakfylling for å unngå setningar (Zhang et al., 2010).

Bakfylling

Der berget ikkje har tilstrekkeleg styrke blir det injisert mellom fjell og kvelv for tunneltryggleik og for å hindre setningar på overflata (sjå figur 3.4). Det kan likevel hende at delar av konturen blir ståande ufylt etter injisering. I slike tilfelle kan ein bruke georadar for å kontrollere bakfyllinga. Xie et al. (2007) testa metoden i ein t-banetunnel i Kina med 200 MHz jordkopla antenne for å sjå gjennom armert kvelv. Dette viste seg å fungere veldig bra. Nokre år etterpå blei 1 GHz, 500 MHz og 250 MHz prøvd ut, og 500 MHz viste seg å gje best resultat (Zhang et al., 2010). 250 MHz-georadaren hadde ei låg oppløysing, medan georadaren på 1 GHz hadde kort undersøkingsdjupne.

Holrom og nedfall bak kvelv

Anne Lalagüe si doktoravhandling *Use of Ground Penetrating Radar for Transport Infrastructure Maintenance* inneheld to forskingsartiklar om georadarforsøk i tunnel. I den eine artikkelen blei det undersøkt om georadar kan avdekke holrommet mellom kvelv og sprengt kontur (bergoverflate) (Lalagüe, 2015). Dette ville kunne vere til hjelp ved innsetting av nye inspeksjonsdører og -luker, slik at dei får den gunstigaste plasseringa med tanke på

berginspeksjon. Lalagüe undersøkte òg om georadar kan detektere nedfallssteinar liggande på baksida av kvelv. Ved å kunne detektere dette, vil det gjere det enklare å oppdrage berg som er dårleg sikra. Det viste seg at jordkopla georadar gav dei beste resultatane ved å detektere lause steinar på vass- og frostsikring. Slike antenner må som nemnt i kapittel 3.1.2 operere i låg hastigheit (her: 5 km/t), men gjev til gjengjeld god signalpenetrasjon og truverdige resultat. Antenne på 1,5 GHz var den mest effektive for denne undersøkinga.

Kapittel 4

Metode

Denne prosessen bestod i hovudsak av eit nøye litteratursøk og ein georadarundersøking i tunnel, i tillegg til tolking og tilarbeiding av desse dataa.

4.1 Litteratursøk

Relevant litteratur vart i all hovudsak funne om teorien bak georadartechnologi, tidlegare georadarbruk i tunnelar, og om inspeksjonsmetodane som vert brukt i norske tunnelar i dag. Det er òg leita opp informasjon om kravendringane i tunnelrelaterte handbøker dei siste åra, og kvifor dei vart gjort. Dette prosjektet byggjer som nemnt vidare på dr. Anne Lalagüe si doktoravhandling *Use of Ground Penetrating Radar for Transportation Infrastructure Maintenance*, der ho skildrar forskinga si på ulike bruksområde for georadar i vedlikehaldssamanheng av mellom anna vegar, tunnelar og jernbane. Difor er denne doktoravhandlinga særskild relevant for denne masteroppgåva. Den vidare litteraturen som er funne i dette litteratursøket er omtala i kapittel 2 og 3, høvesvis Norske tunnelar og Georadarteori. Dei aller fleste av kjeldene er bekrefta fagfelle-vurderte, gjennom Oria.no og NSDs Database for statistikk om høgare utdanning (DBH). Av dei få som ikkje er fagfelle-vurderte, finn ein handbøkene frå Vegdirektoratet/Statens vegvesen. Dette er likevel godt gjennomarbeidde normalar eller retningsliner godkjende av overordna myndigheit eller av Vegdirektoratet etter fullmakt. Eventuelt er handbøkene rettleiingar som er godkjende av

den avdeling som har fått fullmakt til dette frå Vegdirektoratet. Handbøkene vert difor rekna som gode kjelder. Andre ikkje-fagfelleverderte artiklar blei validerte av andre, gjerne fagfelleverderte kjelder.

Georadar-teknologien utviklar seg raskt, så nyare kjelder vart prioritert framfor eldre i denne avhandlinga. Dette gjeld spesielt teori opp mot dagens bruksområder og -metodar. Det same gjeld for handbøkene, som òg krev oppdaterte utgåver for å gje gyldig informasjon. Sidan georadarutstyret er rundt ti år gammalt, er litteratur om det aktuelle georadarutstyret ikkje av nyaste variant. Publikasjonar som stammar frå organisasjonar eller selskap med økonomiske eller kommersielle interesser vart brukt forsiktig, og forsøkt unngått. Der det likevel blei naudsynt, blei informasjonen verifisert gjennom andre kjelder.

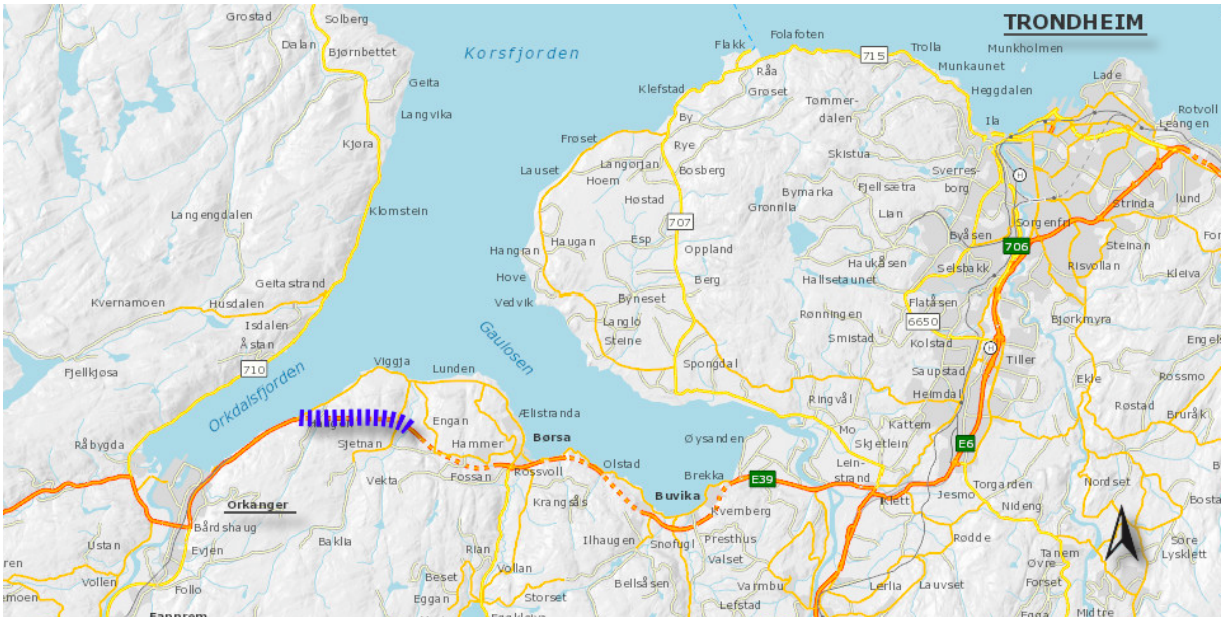
Sjølv om utviklinga innan georadartechnologi er stor, er forskingsfeltet framleis relativt smalt, spesielt i tunnelsamanheng. Dette gjer at det er nokre forskarar/forfattarar som vender attende i litteraturen, noko som speglar seg i delar av kjeldene i denne avhandlinga. Innan snevre forskingsfelt er dette vanskeleg å unngå, men dette kan tilnærmast på best måte ved å vurdere pålitelegheita til kvar enkelt gjentakande forfattar, i tillegg til å i hovudsak halde seg til fagfelleverderte artiklar.

Kjeldene i denne avhandlinga er innhenta frå:

- Oria.no (søkemotor for NTNU-biblioteket sine trykte og elektroniske samlingar). Denne nettsida søker òg i andre databasar som NTNU har tilgang på, mellom anna Science Direct (Elsevier), SpringerLink og ProQuest Entrepreneurship.
- Google Scholar
- Google (Brukt til å finne informasjon om det aktuelle georadarutstyret)

4.2 Georadarundersøking av tunnel

For å kunne svare på forskingsspørsmåla frå kapittel 1.2, vart det utført eit eksperiment i form av ei tunnelundersøking med georadar. Tunnelundersøkingar må av tryggleiksmessige grunnar skje i tunnelar som er stengde for trafikk. Som følgje av omfanget til ei masteroppgåve, var det tilstrekkeleg med gjentekne målingar frå ein enkelt tunnel.



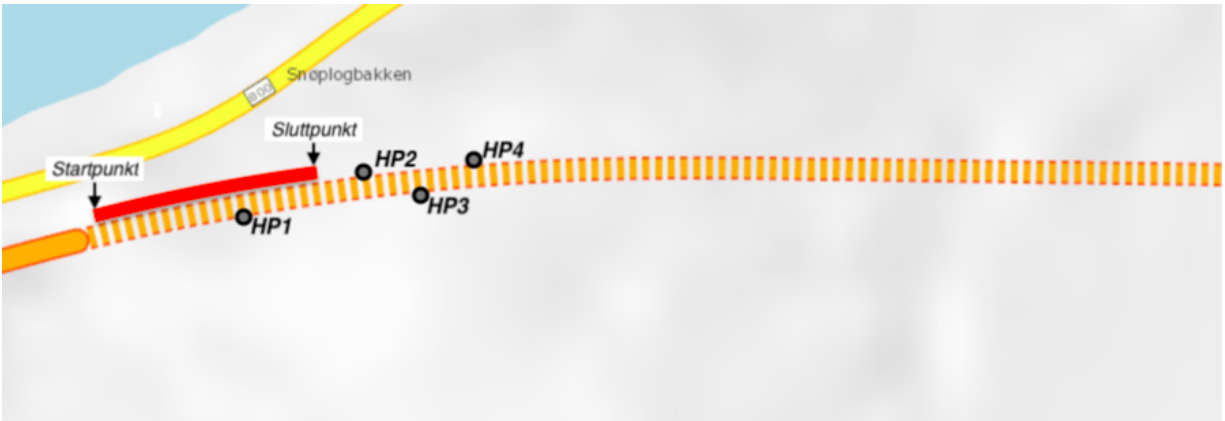
Figur 4.1: Kartet viser Storsandtunnelen (merka i blått), tunnelen som georadarundersøkingane vart gjennomført i. Undersøkingane gjekk føre seg i vestre ende av tunnelen. Kartet er henta frå: Vegkart/ Statens vegvesen.

4.2.1 Lokasjon

Tunnelen der dataa til denne masteroppgåva vart henta inn frå var Storsandtunnelen, som ligg på E39 mellom Engan og Storsanden i Skaun kommune, Trøndelag (sjå figur 4.1 og 4.2). Denne tunnelen er ein av sju tunnelar på vegprosjektet E39 Klett–Bårdshaug, eit prosjekt som er gjennomført som offentleg-privat-samarbeid (OPS). Dette inneber at den vidare drifta av vegen gjerast av private selskap. Storsandtunnelen er ein tretten år gammal tunnel med årstdøgntrafikk på over 9000 (SVV, 2017). Veggane er kledd med sjølvståande, prefabrikkerte betongelement, og i hengt er det montert brannsikra PE-skum som vass- og frostsikring.

4.2.2 Undersøking

Skanska er entreprenøren som har driftsansvaret på E39 Klett–Bårdshaug, og i samband med rehabilitering av vifter og tunnelvask skulle tunnelane på strekninga stengast nattetid. Det ville trass i det ikkje vere arbeid i alle tunnelane til ei kvar tid, så etter avtale med entreprenør vart Storsandtunnelen disponibel for georadarundersøking. Målingane denne



Figur 4.2: Kartet viser vestre ende av Storsandtunnelen, der undersøkingane blei teke. Forsøksområdet på omlag 120 meter er markert i raudt, og fastmerka er markert med punkt. Illustrasjonen er tilpassa etter kart frå: Vegkart/ Statens vegvesen.

masteroppgåva baserast på vart gjennomført natt til 14. mars 2018. Utetemperaturen i området låg på mellom -2 og -3 °C under forsøka.

Georadarutstyr

Georadarar finst i ulike typar, som nemnt i kapittel 3.1.2. Utstyret som er nytta i desse undersøkingane er den ti år gamle stegfrekvensradaren GeoscopeTM GPR, NTNU sitt eige utstyr, levert av det norske selskapet 3D-RADAR. Den luftkoplade georadarantenna som passar til slike undersøkingar er V0605. Den er 0,6 meter brei, har fem element på 7,5 cm, og eit frekvensspenn på 200 MHz – 3 GHz (3D-radar AS (2010); Personleg kommunikasjon med dr. Anne Lalagüe). Figur 3.2 viser antenna som vart brukt. Antenna er koplade til GeoScope Radar Unit, som lagar dei elektromagnetiske bølgiene og lagrar den innsamla datamengda. Alt dette vert styrt frå ei datamaskin i førarhuset i bilen. På venstre bakhjul er det plassert eit Distance Measurement Interval (DMI), som målar køyredistansa under målingane. Denne er, akkurat som antenna, koplade til GeoScope-eininga, som igjen er koplade til operasjonsmaskina.

Georadaren skal under forsøka førast horisontalt langs dei vertikale, pre-fabrikerte betongkvelva. For å få til dette er georadaren montert på ein løftebrakett som er festa til fronten av ein spesialtilpassa varebil (sjå figur 4.3). Løftebraketten er laga tidlegare, i samband med Anne Lalagüe si forskning. Sidan denne braketten allereie var tilgjengeleg

og brukbar, var det ikkje prioritert å designe og lage ei ny løysing. Med ein slik brakett vil georadarantenna kunne bevege seg høgare opp langs veggen dess nærare veggen bilen køyrer, og lågare på veggen om bilen køyrer lenger ifrå. Dette gjer at det er viktig at sjåføren forsøker å halde same avstand frå veggen. I desse forsøka var avstanden mellom bankett (opphøgd sideareal) og senter prisme/senter georadarantenne på ca 1,7 meter gjennom alle dei til kring 300 metera med undersøking, fordelt på tre rundar. Avstand mellom senter prisme og kvelvoverflate var 0,5 meter.

Målet med undersøkingane

Forskingsspørsmåla i kapittel 1.2 kan ikkje svarast på om ein ikkje validerar presisjonen til resultatata. Difor har georadaren undersøkt same strekning (omlag 120 meter) tre gonger same kveld. Målet med forskinga er at ein skal kunne tolke resultatata frå undersøkingane, og ved hjelp av posisjonering kunne samanlikne data og sjå etter posisjonsendringar i bergoverflata. Dersom resultatata er omlag heilt like, vil dette kunne gje ein indikasjon på at metoden fungerer, men at inga endring i bergmasse har skjedd mellom georadarundersøkingane. Sidan undersøkingane er tekne same kveld og endringar i bergmasse som regel tek tid, ventast inga endring. Dersom resultatata ikkje viser det same, kan dette tyde på at metoden ikkje fungerer, at posisjoneringa er dårleg eller at endring har skjedd. Med tanke på at desse undersøkingane utførast med kort tids mellomrom, er det lite truleg at endring i bergmasse har skjedd. Om georadaren har hatt ulik posisjonering i dei forskjellige undersøkingane, og dermed undersøkt tre ulike striper langs tunnelveggen, vil dette komme fram av posisjoneringslogging.

Posisjonering

Ein viktig del av denne forskinga er posisjonering under georadarundersøkingane. Georadarantenna som vart brukt i denne samanhengen er forholdsvis lita (0,6 meter breidde), og undersøker mindre enn det arealet den dekker av tunnelsida. Den undersøker berre ei stripe langs tunnelkvelvet (sjå figur 4.3). For at fleire georadarundersøkingar frå same strekning skal vere samanliknbare, må ein vite kvar georadaren har køyrt dei ulike gon-



Figur 4.3: Georadarbilen har ein spesialtbygd festebrekett som georadarantenna er festa til. Ein kan òg sjå korleis antenna førast på hjul langs tunnelveggen.

gene. Ein geomatikar frå Statens vegvesen var difor med, utstyrt med totalstasjon, fire lokale fastmerker og fire prisme. Med dette utstyret sikra han tilstrekkeleg nøyaktigheit i posisjonsdata undervegs i målingane. Totalstasjonen (Leica 1201+) vart plassert over eit fastmerke nokre titals meter forbi enden av målestrekninga (sjå figur 4.2), og Leica 360-gradersprismet var festa sentralt på festebrekett for georadarantenne (sjå figur 4.4). Resten av prisma (Leica rundprisme, sjå figur 4.5) var plassert over lokale fastmerker i bankett. Totalstasjonen koplar georadarposisjonen opp mot lokale koordinatar, og loggar såleis posisjonen med eit standardavvik på omlag 0,8 centimeter. I tillegg vil det vere noko unøyaktigheit på oppstilling og i sjølve fastmerka. Utrekning viser at det dreier seg om 3 mm (personleg kommunikasjon med landmålar i Statens vegvesen, Christer Gabrielsen, 04.06.2018). Det vart logga posisjon for kvar 20. centimeter georadaren køyrde i luftretning mot totalstasjonen. Posisjonsnøyaktigheita er viktig for å kunne samanlikne georadarresultata frå dei forskjellige undersøkingane med kvarandre. Sidan totalstasjon er sett på som eit særst nøyaktig måleutstyr, vert totalstasjon nytta.



Figur 4.4: 360-gradersprismet, som totalstasjonen følger for å oppnå kontinuerleg posisjonslogging undervegs, er festa midt på aksen til festebraketten for georadarantenna.

Totalstasjonen som vart brukt i dette forsøket, Leica 1201+, har vinkelnøyaktigheit på 0,3 mgon og avstandsnøyaktigheit på 3 mm, i tillegg til 1,5mm for kvar tusende meter (personleg kommunikasjon med landmålar i Statens vegvesen, Christer Gabrielsen, 04.06.2018). I desse undersøkingane var det ei kort prøvestrekning på langt under 1000 meter. Totalstasjonen blei som nemnt sett opp over eit fastmerke, og det blei måla fem observasjonar for kvart av dei tre andre fastmerka som blei etablert.

Tekniske utfordringar

Det måtte av ulike grunnar gjennomførast tre forsøk på datainnsamling for å få brukbare resultat. Her vert dei to mislykka forsøka skildra.

Det første forsøket på å samle inn data vart gjort natt til 14. februar 2018. Då vart georadaren køyrd til Innfjordtunnelen i Rauma kommune, Møre og Romsdal. Dette var ein tunnel under rehabilitering, og var difor stengt på kvelds- og nattetid. Etter avtale med utførande entreprenør, AF Gruppen, var tunnelen til disposisjon for georadarundersøkingar, i tillegg



Figur 4.5: Det var rigga opp tre rundprisme i tunnelen under forsøka, plassert over kvar sine fastmerke. Foto: Christer Gabrielsen, SVV.

til lån av geomatikar for posisjonsmåling undervegs. Då rigging av utstyr var ferdig, vart det klart at operatør-datamaskina tilhøyrande geoskopet ikkje fungerte. Denne brukast til å styre undersøkingane, konfigurere parametra og vise data som er samla inn under georadarundersøkingane. Datamaskina klarte ikkje å kople til geoskopet, som genererer og tilarbeider den reflekterte elektromagnetiske energien. Eksperimentet måtte difor avbrytast, og georadaren vart køyrd attende til NTNU Trondheim neste dag. I denne tunnelen var det nyleg gjennomført ei scanning av bergveggen, så det hadde vore mogleg å brukt denne vidare som ei validering av nøyaktigheita til resultatet.

Det vart i framkant av det andre forsøket avgjort at den neste undersøkinga skulle gjerast i ein tunnel nærare Trondheim. Tunnelar som er i dagleg drift vert stengde med nokolunde jamne mellomrom for vedlikehald og vasking. Vidare vart det difor undersøkt om det var planlagte tunnelstengingar i Trondheimsområdet. Entreprenøren Skanska har ansvaret for drift av E39 Klett–Bårdshaug i Trøndelag, OPS-strekninga som er skildra tidlegare under kapittel 4.2.1. I samband med rehabilitering av vifter skulle Skanska stenge vegen på nattetid, og Storsandtunnelen var disponibel for georadarundersøkingar natt til

23. februar. Ein geomatikar frå Statens Vegvesen var med for å logge posisjonen til georadar undervegs. Knappe to veker etterpå vart det klart at innstillingane på operatørmaskina stod på ei anna georadarantenne enn den som vart brukt under undersøkinga, og resultatata var difor nyttelause.

4.2.3 Tolking av data

Då tilstrekkeleg datamengd var samla inn, måtte georadardataa tolkast. For å kunne tolke desse georadarmålingane må ein ha opplæring av nokon med erfaring. Denne kompetansen har dr. Anne Lalagüe i ÅF Engeneering AS, som har skriva ein doktorgrad ved NTNU om bruk av georadar til vedlikehald av infrastruktur. Det er hennar forskning denne masteroppgåva skal vidareføre. Lalagüe held i dag til i Oslo, så det vart difor lagt inn ein tur dit for opplæring og tolking på Lalagües kontor. Programvara som vart brukt i samband med sjølve tolkingsarbeidet var i hovudsak Road Doctor, eit program som er utvikla i Finland og som NTNU har lisens på. Dette programmet gjer at ein på ein rask måte kan tolke og analysere georadardata.

Dataproessering

Dataa som vart samla inn vil ein teoretisk sett kunne endre dei visuelle eigenskapane på. Dette kan gjerast ved hjelp av ei tolkeprogramvare, slik at tolkeprosessen kan gjerast enklare. Slike endringar kan til dømes vere filtrering gjennom å fjerne bakgrunnsstøy eller å auke kontrastar. I dette forsøket var det so pass mykje uroingar i dataa at det ikkje lønte seg å gjere visuelle endringar.

Før sjølve tolkinga kunne starte måtte overflata definerast. For luftkopla antenner vil signalrefleksjon skje allereie på overflata av det undersøkte objektet, sjølv om det er bak overflata ein ønskjer å samle data frå. For å unngå uroingar frå desse overflatesignala kan ”time zero”-korrigeringar utførast. Dette gjerast ved å justere den tidlegaste signaltida frå signalet forlét antenna, til den penetrerte overflata. Dette fortel oss kvar overflata er, eit punkt som vil fungere som ein referanse i tolkinga. Time zero ved bruk av V0605-antenner er alltid rundt 2 nanosekund (ns) (Lalagüe, 2015).

Betongen har vanlegvis ein relativ dielektrisk permittivitet, ϵ_r , mellom 8 og 10 (sjå tabell 3.1). Ved hjelp av ein enkel, manuell kontroll av betongtjuknaden ved ei inspeksjonsluke vart betongtjuknaden måla til å vere 15 cm. Etter vurderinger i tolkeprofillet blei den generelle tjuknaden på betongkvelvet vurdert til å vere 5,493 ns, mellom anna som følge av at den dielektriske permittiviteten i det aktuelle betongkvelvet blei vurdert til å vere omlag 9. Ein gjennomsnittleg betongtjuknad på 5,493 ns ekvivalerer her rundt 17 cm.

V0605-antenna har fem kanalar å velje mellom ved tolking. Det vil seie fem ulike profil å velje mellom, som stammar frå ulike frekvensar under måling. Dei ulike kanalane tilhøyrer ulike soner på georadarantenna. I dette tilfellet blei det tolka i kanal 1.

Kalkuleringsmetode

I denne samanhengen var det ønskjeleg å finne ut kor stor avstanden er mellom bergoverflata og bakside betongkvelv. Dette ønska ein å finne for kvart av dei tolka punkta, og med hjelp av formlane 4.1, 4.2 og 4.3 kunne ein i første omgang rekne ut kor mange meter det er inn til bergoverflata frå tunnelrommet. Denne avstanden var, som alle andre avstandar frå georadaren, oppgjeven i nanosekund. Dette kom som følgje av at georadaren rekna seg fram til avstand etter kor lang tid det tok å få dei utsendte signala reflektert attende til antenna.

Før dei førnemnde formlane kunne nyttast, måtte betongtjuknaden subtraherast frå avstanden mellom kvelvoverflata og berg. Slik stod ein att med berre avstanden mellom bakside kvelv og bergoverflate, avstanden d .

Den relative permittiviteten, ϵ_r (omtala i kapittel 3.1.4), avgjer kva hastigheit bølgjene har gjennom i materialet (Lalagüe, 2015). Denne brukte ein vidare for å rekne ut den relative forplantingshastigheita, v , i eit ikkje-magnetisk material:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1)$$

Der:

c er hastigheita til elektromagnetiske bølger som forplantar seg i fritt rom ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r er den relative dielektriske permittiviteten (den reelle delen)

Den relative permittiviteten, ϵ_r , var i dette tilfellet lik 1 på grunn av at materialet mellom kvelv og bergoverflate var luft (sjå tabell 3.1). Avstanden mellom baksida av betongkvelvet og bergoverflata, d , kan uttrykkest slik:

$$d = v \cdot \frac{t}{2} \quad (4.2)$$

Der:

t er tovegs gangtid for signalet (sendar \rightarrow material \rightarrow mottakar).

Ved å sette inn uttrykket for relativ forplantingshastighet (4.1) inn i uttrykket for avstanden mellom kvelv og bergoverflate (4.2), kjem ein fram til at d kan reknast ut slik:

$$d = \frac{c \cdot t}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.3)$$

Avstanden d er den tolka avstanden inn til berg for kvart enkelt tolka punkt. Denne blei brukt i prosessen vidare.

4.2.4 Transformasjon og tilarbeiding av data

Etter tolking av georadarmålingane står ein att med ei rekke verdier for distansen d_i , som er avstandane mellom baksida av betongkvelvet og bergoverflata langs prøvestrekninga. Det er ønskjeleg å gje bergoverflata egne koordinatar, slik at ein seinare kan bruke denne metoden til å kontrollere om bergposisjonen har endra seg. Totalstasjonen, som tracka posisjonen til georadarantenna under forsøka, gav oss antenna sin koordinatposisjon i eit lokalt system for omlag kvar 0,2 meter georadarbilen køyrde. Desse posisjonsdata for georadarantenna kan brukast til å finne koordinatane til bergoverflata, ved hjelp av transformasjon.

Interpolering av posisjonsdata

Sidan koordinatposisjonen til georadaren er logga kvar 0,2 meter bilen køyrer, gjev det rundt 500 posisjonskoordinatar for kvart av forsøka på den omlag 120 meter lange prøve-

strekninga. Data frå georadartolkinga oppstår ved at ein manuelt plottar punkt i georadarprofilen, der ein kan sjå at bergoverflata ligg. Saman dannar punkta ei tolking av kvar bergoverflata er langs ei metring frå georadaren. Desse punkta er på grunn av manuell tolking ikkje systematiske, og kan vere plassert tilsynelatande tilfeldig, utan jamne mellomrom.

For at ein skal kunne nytte posisjonskoordinatane frå logginga saman med avstanden d til å kartlegge posisjonen til bergoverflata, må det nokre justeringar til. Ved å interpolere inn fleire punkt mellom dei målte posisjonane, vil ein lettare og med større nøyaktigheit kunne samanfalle posisjonsdataa med tolkepunkt. Det er meir korrekt å gå ut ifrå at det er ei lineær utvikling mellom trackingpunkta langs kvelvet, enn det er å gå ut i frå det same mellom tolkepunkt for bergoverflata. Dette handlar om at overflata på kvelvet er jamn, medan bergoverflata har ei mindre forutsigbar overflate. Georadarantenna trillar på store hjul langs ei relativ jamn flate, og har difor tilnærma lineær rørsle mellom dei målte punkta. Interpoleringa er utført i programvara MATLAB®, som er eit omfattande matematikkprogram med eige scriptspråk basert på C. Scriptet for interpoleringa ligg i Tillegg A. Etter interpolering fekk kvar av dei tre forsøka rundt 500 000 posisjonskoordinatar. Her er stega i MATLAB skildra:

- Inndata med x-, y- og z-koordinatane frå logging av posisjonen til georadarantenna vart henta inn i MATLAB. Tal på rader vart definert som lengda l på datafila. Denne lengda var i utgangspunktet på kring 500.
- Vidare vart ein vektor f definert. Dette var vektoren frå 1 til lengda l av datafila, med nummerering av kvart punkt.
- Ved å skrive "punkt = 1:0.001:l;" vart det definert ei steglengd på 0,001 mellom alle dei eksisterande punkta, heilt frå første punkt og opp til lengda l .
- MATLAB-funksjonen "interp1" saman med spesifikasjonen 'linear', interpolerte lineært mellom f , med tilhøyrande x-, y- og z-koordinatar. Med steglengde på 0,001, vart det etter interpolering totalt kring 500 000 x-, y- og z-koordinatar for kvar av dei tre forsøka.

Transformasjon av koordinatar

Koordinatane frå logginga gav oss georadarantenna sin posisjon i x, y og z i eit lokalt system. Etter å ha interpolert inn mange punkt mellom dei målte koordinatane, ga det ei større nøyaktigheit på transformasjonen, då fleire koordinatar i større grad sikra at kvart tolkepunkt hadde ein koordinat å knytast opp mot. Transformasjonen gjekk føre seg ved at ein tok for seg eit punkt i tolkedata. Dette punktet hadde ei metring i køyreretning, som var målt med den tidlegare nemnte DMlen på georadarbilen. Det kunne reknast ut ei køyrd lengde, $L(s)$, ut i frå data frå totalstasjonen. Som følge av at prismet logga ein koordinat for kvar 0,2 meter med rørsle i luftretning mot totalstasjon, kunne ein få til ei slags metring frå totalstasjonen òg. Ved å finne lengda $L(s)$ gav dette ei metring for posisjonsdataa som samanfall med metringa georadarbilen hadde målt. Dersom $L(s)$ for eit punkt samanfall med metringa, blei det aktuelle punktet vald ut. Deretter blei punktet rett før og punktet rett etter det utvalde punktet nytta til å lage ei line.

Frå posisjonsdatasettet tok ein då ut posisjonen som etter samanfelling av metringa ligg før og posisjonen litt etter det valde punktet frå tolkedatasettet. Mellom desse to posisjonane var det ei tenkt line. Denne lina var særskilt kort som følgje av mengda punkt som var laga ved interpolering. Med omlag 500 000 koordinatpunkt på ca 120 meter ville lina mellom punkta vere litt over 0,2 mm lang i gjennomsnitt. Frå midta av denne lina sette ein ved hjelp av dataprogram og trigonometrisk berekning eit punkt ut i avstand d , normalt på lina. Dette var ein prosess som ville teke alt for lang tid å gjere manuelt for kvart punkt, og spesielt om dette skulle bli ein metode for lange tunnelar. Difor var det viktig å finne ein måte å automatisere dette på.

Programvare

I første omgang blei programvara Gisline vald for å transformere koordinatar, etter forslag frå geomatikarar. Gisline er utvikla av Norkart AS og er mykje brukt innan landmåling. NTNU har brukarlisens på dette programmet, og det blei difor naturleg å ta Gisline Landmåling og Gisline 3D i bruk. Som eit resultat av at mange punkt skal transformerast, var det naudsynt å finne ein måte å automatisere denne plottinga på. Etter å ha brukt ei

veke på å lære programmet, og etter kontakt med Gisline Kundestøtte, viste det seg at dette ikkje var mogleg. Det kom som følge av at Gisline batch-funksjonen hadde avgrensa moglegheiter. Det blei difor avgjort at berekningane burde gjerast i eit anna program. Valet fall då på MATLAB igjen, grunna dei store bruksområda MATLAB har. Alle vidare kalkulasjonar er difor gjort i programvara MATLAB, sett vekk frå sjølve tolkinga.

Utrekning i MATLAB®, steg for steg

Alt av utrekningar blei som nemnt gjort i MATLAB. I delkapittel 4.2.4 vart prosessen med transformasjonen forklart, her vert hovudstega som blei gjort i programvara gjennomgått. Scriptet med alle utrekningar ligg i Tillegg A.

- Først blei fila med tolkepunkta og tilhøyrande metrering henta inn, og ein itererande prosess vart etablert ved hjelp av ei såkalla for-løkke. Det neste steget gjekk føre seg inni denne iterasjonen.
- Det blei definert ei lengd $L(s)$:

$$L(s) = \sqrt{(B1(s+1) - B1(s))^2 + (A1(s+1) - A1(s))^2} + L(s-1) \quad (4.4)$$

Denne lengda er metrering mellom to posisjonskoordinatar, pluss den allereie tilbakelegte distansa. Ved å få koordinatane om til metreringformat, kan dei samanfella med metreringa til tolkepunkta. MATLAB forstår ikkje $L(0)$, sidan ein vektor ikkje har ein verdi på plass nummer null, og kan difor ikkje legge til den allereie tilbakelegte distansen når s er lik 1. Difor må $L(1)$ definerast for seg sjølv. Variabelen s startar difor med itereringa på verdi nr. 2 og held på til siste rad med posisjonspunkt. Det må i formelen for s trekkast frå 1 fordi tal på intervall er ein mindre enn tal på verdiar. Vektorane $A1$ og $B1$ er høvesvis interpolerte koordinatar for x og y . Forløkka avsluttast.

- Vidare vert ei ny forløkke etablert, der i er den itererande variabelen frå første til siste tolkemetrering. Ei ny forløkke vert etablert inni den første, og for kvar i vert

den itererande variabelen j kjørd. Variabelen j er første til siste rad med metrering frå posisjonslogginga. Inni denne forløkka er det ei if-setning som for kvar j sjekkar om den tilbakelagte distansa i j , $L(j)$, er større enn den tilbakelagte distansa for tolkepunkt i . Dersom den tilbakelagte distansa i eit punkt, $L(j)$, ikkje er større enn metreringa fram til tolkepunkt i , vert forløkka kjørd på nytt for neste verdi. Om $L(j)$ er større enn metreringa fram til tolkepunkt i , vert p sett lik $j-1$. p er rada i posisjonsdataa som samantfall med det aktuelle tolkepunktet. Det er vald å hente ut verdien $j-1$ framfor j . Dette er fordi punkta i posisjon j og $j-1$ statistisk sett vil vere like nære den faktiske metreringa, sidan ein ikkje veit kvar i det omlag 0,2 mm lange intervallet den faktiske metreringa ligg. Dersom metreringa frå tolkeprofilen samantfall eksakt med den tilarbeidde metreringa frå totalstasjonen vil derimot $j-1$ velje ut den eksakte posisjonen. Om p var lik j ville den i det same tilfelle vel ein verdi som er eit intervall forbi.

- Når p er funnen, er det ønskjeleg å finne koordinaten før og etter den koordinaten som ligg som nummer p , altså $p-1$ og $p+1$. Mellom desse koordinatane vil det tenkast at det finst ei line. I x-retning vart det for kvar iterasjon ein differanse mellom desse to punkta på:

$$\Delta x = x_{p+1} - x_{p-1} \quad (4.5)$$

Der x_{p+1} og x_{p-1} er høvesvis x-koordinaten tilhøyrande posisjon nr $p+1$ og $p-1$ i posisjonsdatasettet.

I y-retning skjer det same:

$$\Delta y = y_{p-1} - y_{p+1} \quad (4.6)$$

Der y_{p+1} og y_{p-1} er høvesvis y-koordinaten tilhøyrande posisjon nr $p+1$ og $p-1$ i posisjonsdatasettet. Her er forteikna i formelen motsett enn for x sidan y-aksen er senkande.

- For å kunne plotte eit punkt 90 grader ut frå denne lina mellom $p+1$ og $p-1$, må ein ha vinkelen β for kvar iterasjon. β er vinkelen lina mellom $p+1$ og $p-1$ har på x-aksen, og formelen for β er difor som følgjande:

$$\beta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4.7)$$

- Det neste steget var å definere midtpunktet på lina for kvar iterasjon. Det er lagt til grunn at koordinatane til berget teiknast 90 grader ut frå midtpunktet til lina. Midtpunktet vart for x-aksen:

$$Midt(x) = x_{p-1} + 0,5 \cdot \Delta x \quad (4.8)$$

Der x_{p-1} er x-koordinaten tilhøyrande posisjon nr $p-1$ i posisjonsdatasettet.

For y-aksen vart midtpunktet rekna på same måten:

$$Midt(y) = y_{p-1} + 0,5 \cdot \Delta y \quad (4.9)$$

Der y_{p-1} er y-koordinaten tilhøyrande posisjon nr $p-1$ i posisjonsdatasettet. Avhengig av kva side av lina ein vil at den nye koordinaten skal plottast på, legg ein til eller trekk ifrå endringa i x og y. I dette tilfellet var det ønskjeleg at punkta vert plotta til venstre, då det undersøkte berget låg på venstresida av positiv køyreretning.

- Vidare, for å plotte punktet 90 grader på den fiktive lina og i avstand d ut, brukast følgjande formlar for dei nye x- og y-koordinatane i kvar iterasjon:

$$berg(x) = (d + 0.5m + 0.17m) \cdot \sin \beta \quad (4.10)$$

og

$$berg(y) = (d + 0.5 + 0.17) \cdot \cos \beta \quad (4.11)$$

Her var d den tolka avstanden [m] mellom baksida av betongkvelv og bergoverflate, medan 0,5 [m] var den faste avstanden mellom prisme og overflate kvelv og 0,17 [m] var kvelvtjuknaden. Avstanden frå prisme og 90 grader ut til bergoverflate varr difor $d + 0,5 + 0,17$.

- x- og y-koordinatane til bergoverflata fekk ein ved å legge saman det ein fann i dei to siste stega over:

$$\text{bergkoordinat}, x = \text{Midt}(x) + \text{berg}(x) \quad (4.12)$$

$$\text{bergkoordinat}, y = \text{Midt}(y) + \text{berg}(y) \quad (4.13)$$

- For å gje berget eigne høgdekoordinatar (z-koordinatar) vart dei målte høgdene frå totalstasjonen nytta, men dei vart korrigert etter kva tolkekanal på georadaren som vart brukt. Tolkekanal 1 vart nytta i denne forskinga, ein kanal som ligg plassert noko unna senter på georadarantenna, der prismet var montert. Det måtte difor korrigerast for at tolkekanalen ikkje låg akkurat på høgde med prismet. Det er funne informasjon om denne georadarantenna, og det vert difor lagt til grunn at kanal 1 ligg 0,225 m over prismet. Ny z-koordinat for alle forsøksrundane vart difor den innmålte høgdeposisjonen i prisma, pluss 0,225 m. Om denne korrigeringa ikkje viser seg å stemme, er det enkelt å endre dette i MATLAB-scriptet.

Grunnlag

For å kunne gjennomføre desse kalkulasjonane må det leggest til grunn at:

- georadaren står 90 grader på vertikalaksen til ei kvar tid under forsøka
- det er lineær utvikling mellom målte posisjonsdata, altså lineær interpolering mellom kvar 0,2 meter bilen køyrde.
- metringa til georadarbilen er korrekt og samsvarar med totalstasjonen sine målingar. I røynda vart kalibreringa av DMIfen utført manuelt med målehjul.

- Ved plotting av koordinatar for bergoverflate, vil desse punkta teiknast ortogonalt ut frå midta av ei kort line. Denne lina dannast mellom georadarposisjonen før og georadarposisjonen etter metreringsposisjonen tolkedata oppgjev. Det er ei fare for at tolkepunktet ikkje ligg midt mellom georadarposisjon 1 og 2, og at ein difor får eit lite avvik. Sidan lina som dannast er på 0,4 millimeter, vil avviket bli maksimalt 0,2 millimeter.
- For å korrigere for at tolkekanalen ikkje er plassert ved prismet, og dermed skapar eit lite høgdeavvik, er det lagt til å vere 22,5 cm over senter, grunna manglande informasjon om antenna.

Kapittel 5

Resultat

I dette kapitlet er resultatene frå georadarundersøkingane i tunnel presentert. Det startar med avviksberekningar for å finne repeterbarheita til tolkinga, før det går over til figurar. Avviksberekninga og figurane utgjer resultatene i denne forskinga, og det er desse som vert diskutert vidare saman med litteraturen og forskingsspørsmåla i kapittel 6, Diskusjon. Figurane viser tolkeprofilen, tolkedata og dei endelege koordinatpunktene til bergoverflata i 2D og 3D.

5.1 Avviksberekning

For å finne ut om georadarmålingane og dei påfølgjande tolkingane av bergoverflata er repeterbare, vart det rekna prosentvis avvik mellom dei ulike tolkedataa. Den tolka avstanden mellom baksida kvelv og bergoverflate kunne variere noko for dei tre rundane med målingar. Runde 3 (sjå figur 5.5) blei sett som referansemåling, fordi resultatene frå tolkinga viste at Runde 3 var av best kvalitet. Det vart for runde 1 og 2 (figurane 5.3 og 5.4) rekna prosentvis avvik, $Avvik_i$, opp mot denne ved hjelp av formelen:

$$Avvik_i = \frac{|d_i - d_{runde3}|}{d_{runde3}} \quad (5.1)$$

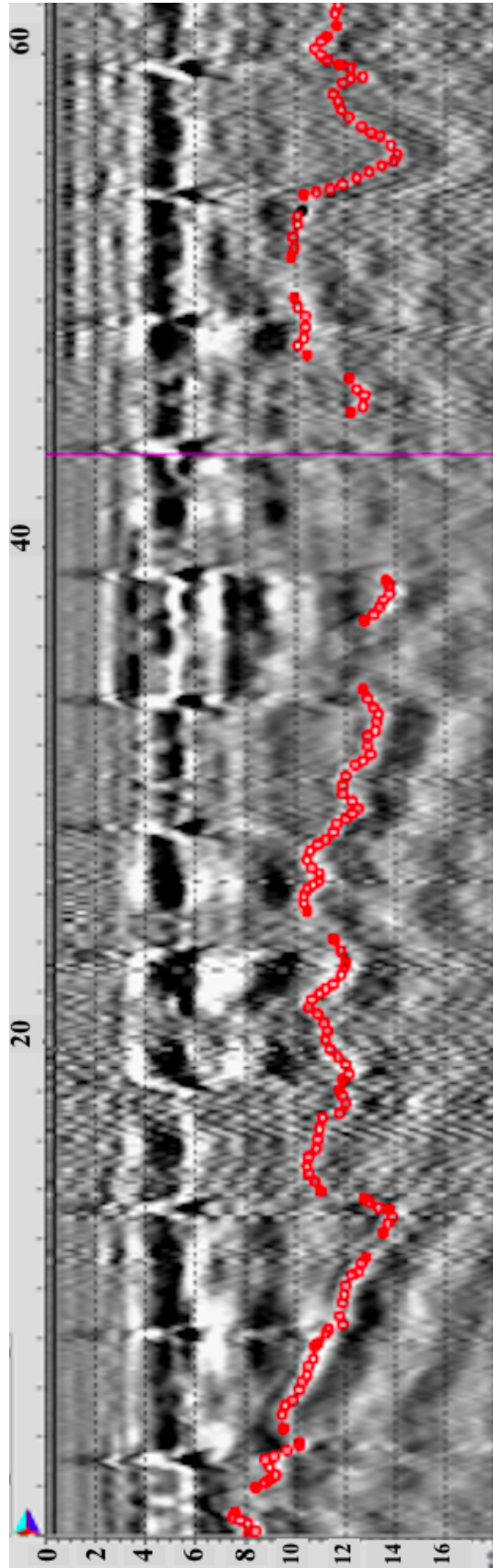
der d_i er den aktuelle avstanden mellom kvelv og bergoverflate frå runde 1 eller runde 2.

Tabell 5.1: Repeterbarheita til georadarmålingane og -tolkingane er avgjort gjennom utrekning av avvik for dei tre forsøka. Runde 3 er referanse for runde 1 og runde 2.

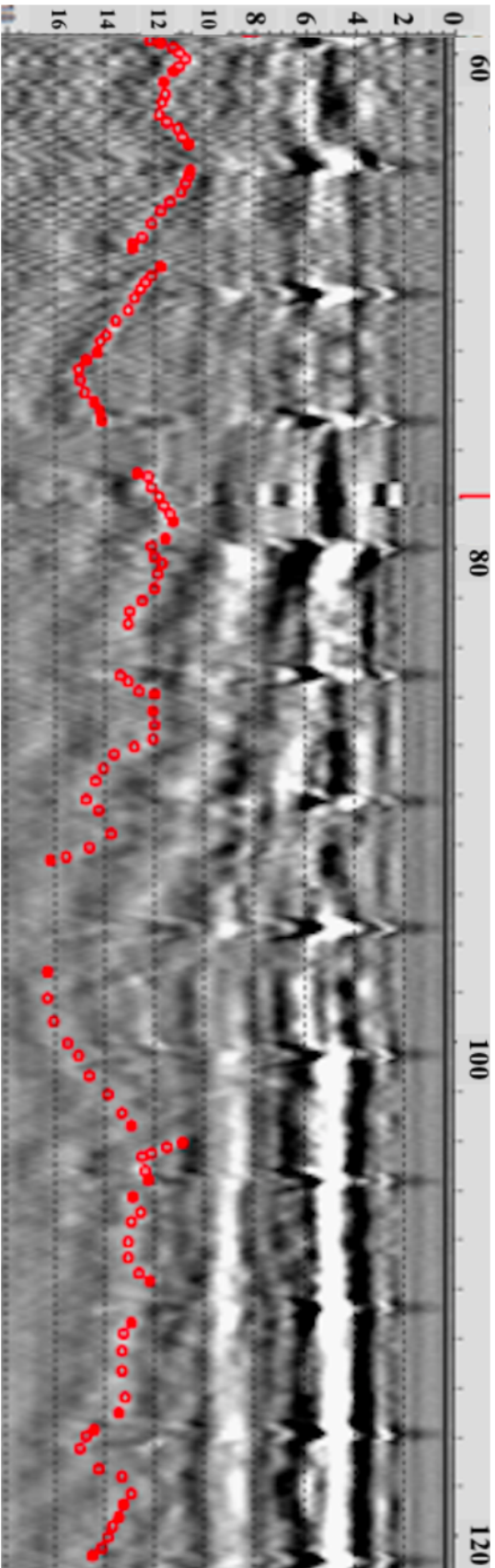
Totalt gjennomsnittleg avvik frå referansemålinga runde 3

Runde 1:	4,43 %
Runde 2:	4,83 %

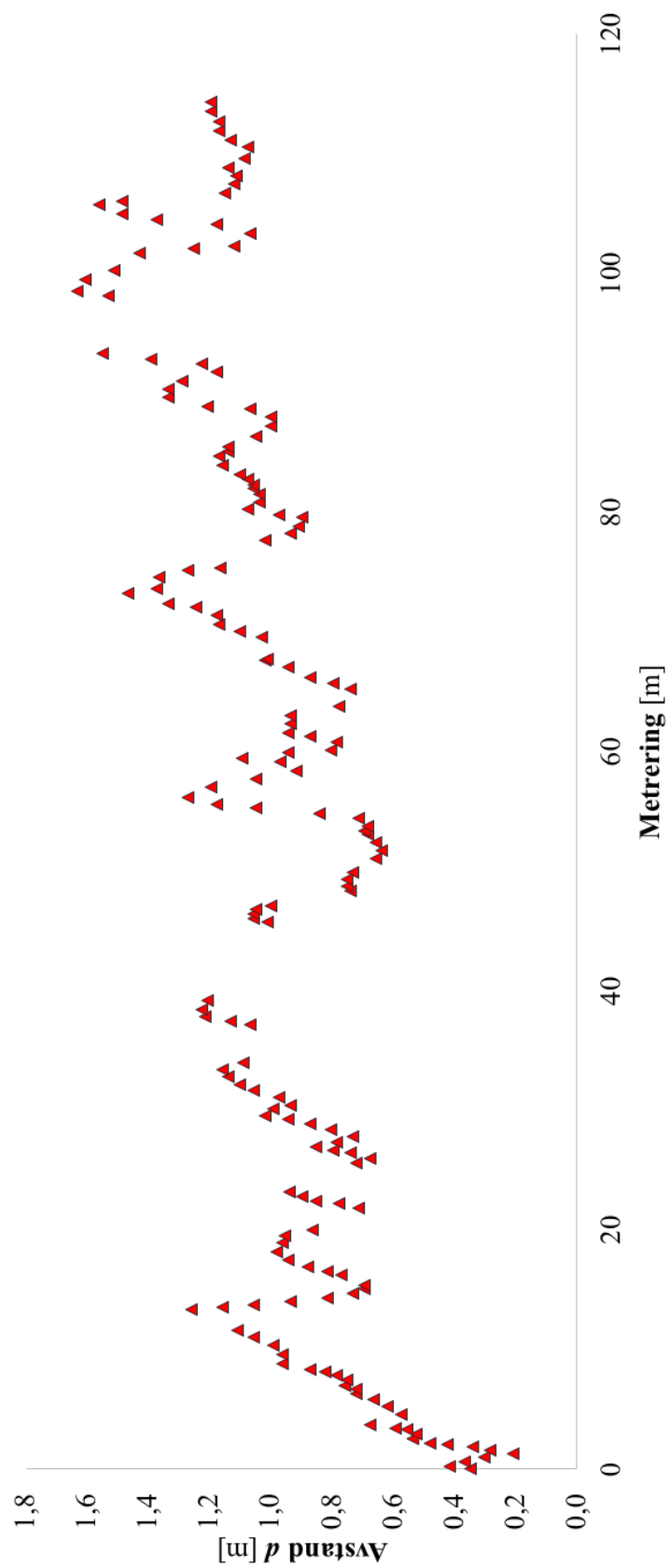
Det vart i utgangspunktet rekna avvik for kvar 0,25 meter langs berget. Dette blei gjennomført så framt alle tre profila var tolka i den aktuelle metringa, og så framt det var rimeleg å kunne anta lineær overgang mellom dei tolka enkeltpunkta. Eit døme på eit slikt område, var dei første 20 – 30 meterane av tolkeprofilen, sjå figur 5.1. Totalt blei 307 felles punkt for alle dei tre målingane samanlikna, og det gjennomsnittlege avviket er gjeve i tabell 5.1.



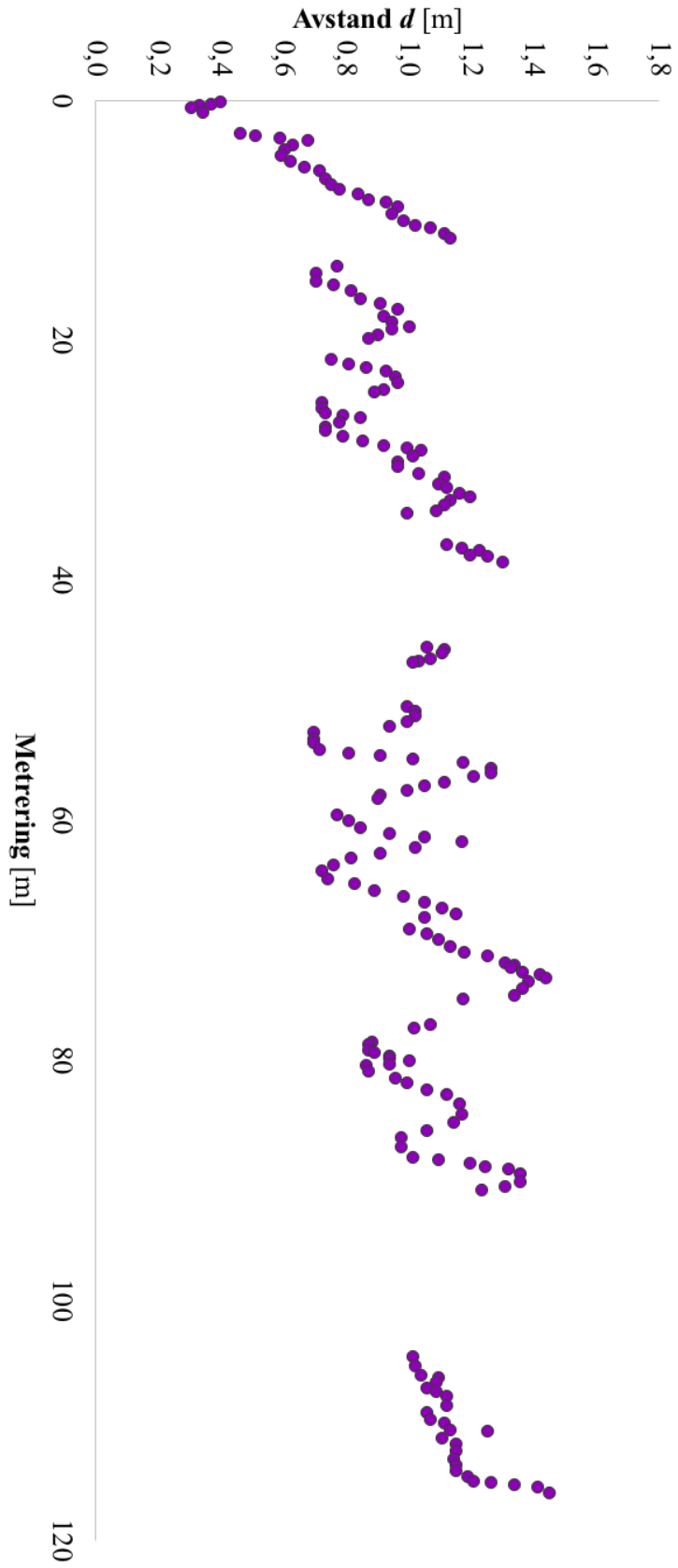
Figur 5.1: Første halvdel av eitt av georadarprofila (runde 3) frå tunnelundersøkinga i fullskala. Raudfarga indikerer det som er tolka som fjelloverflata. Langsgående akse indikerer metring, nanosekund nedover i profilet.



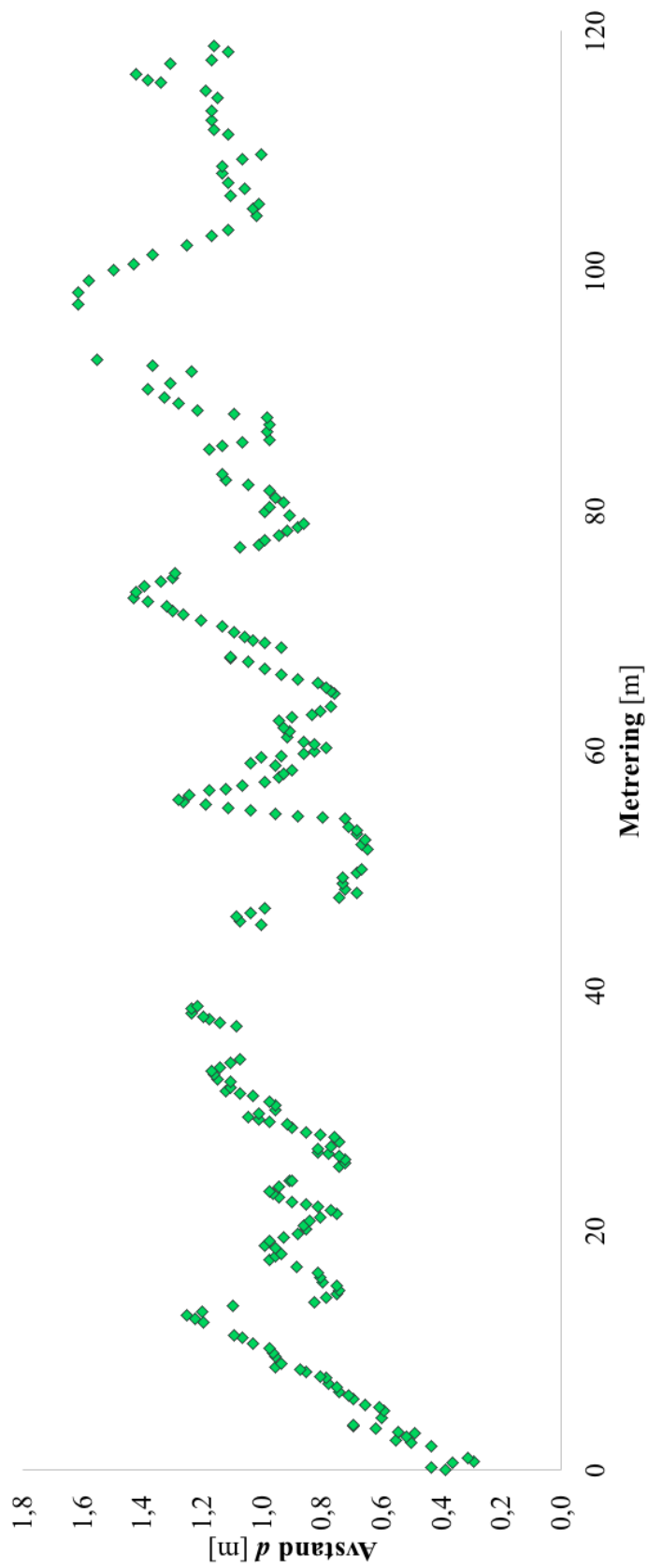
Figur 5.2: Siste halvdel av eitt av georadarprofila (runde 3) frå tunnelundersøkinga i fullskala. Raudfarga indikerer det som er tolka som fjelloverflata. Langsgående akse indikerer metring, nanosekund nedover i profilet.



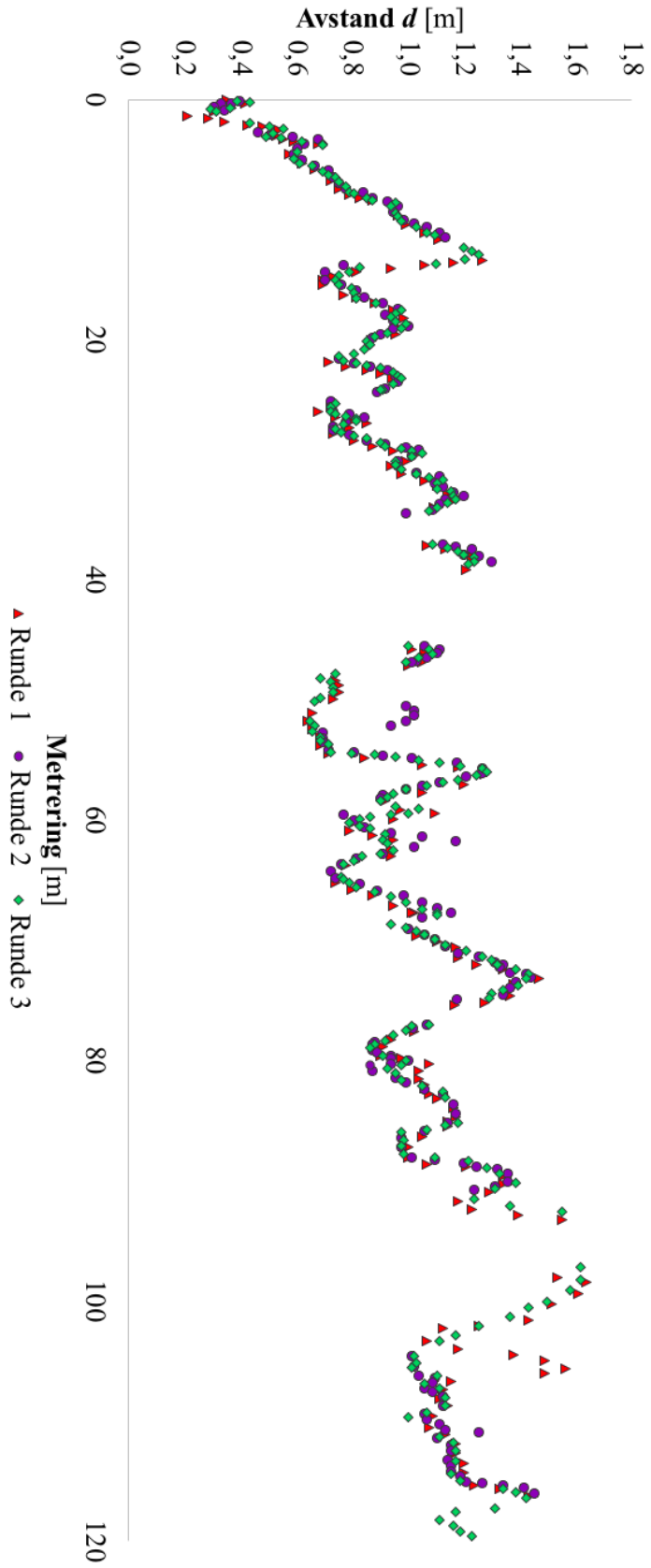
Figur 5.3: Tolkedata for runde 1 med georadarundersøkingar.



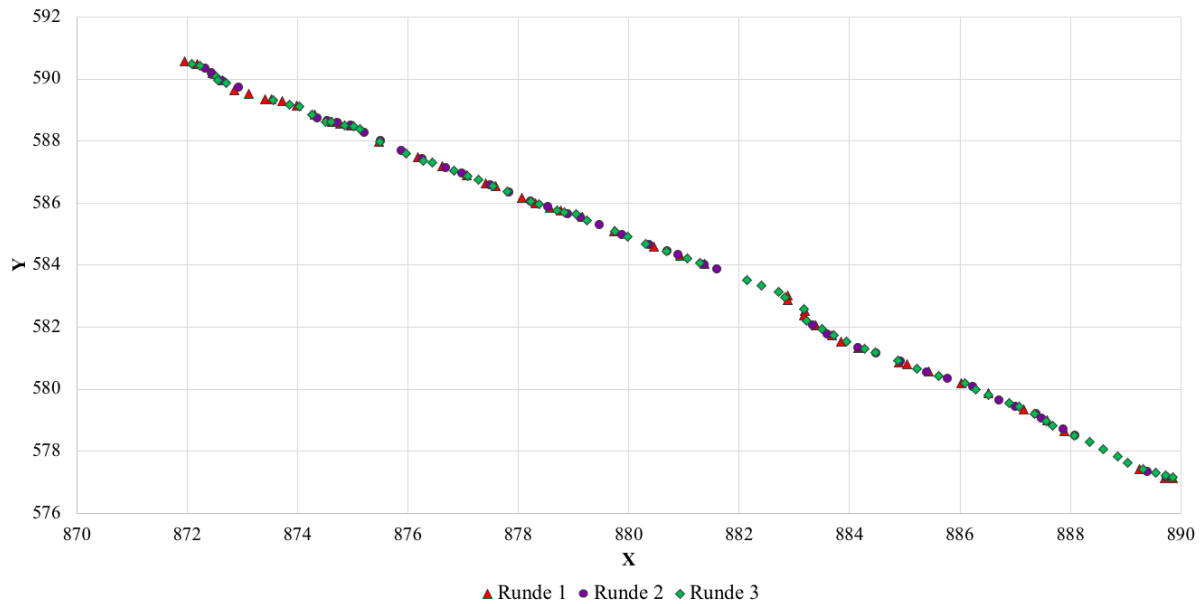
Figur 5.4: Tolkedata for runde 2 med georadarundersøkingar.



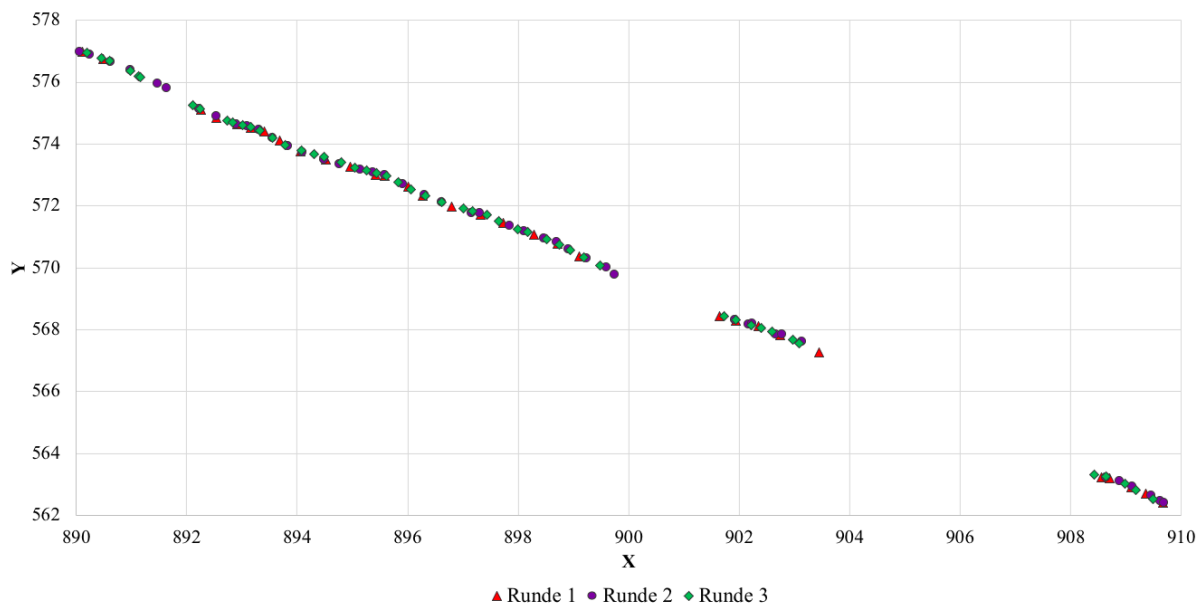
Figur 5.5: Tolkedata for runde 3 med georadarundersøkinger.



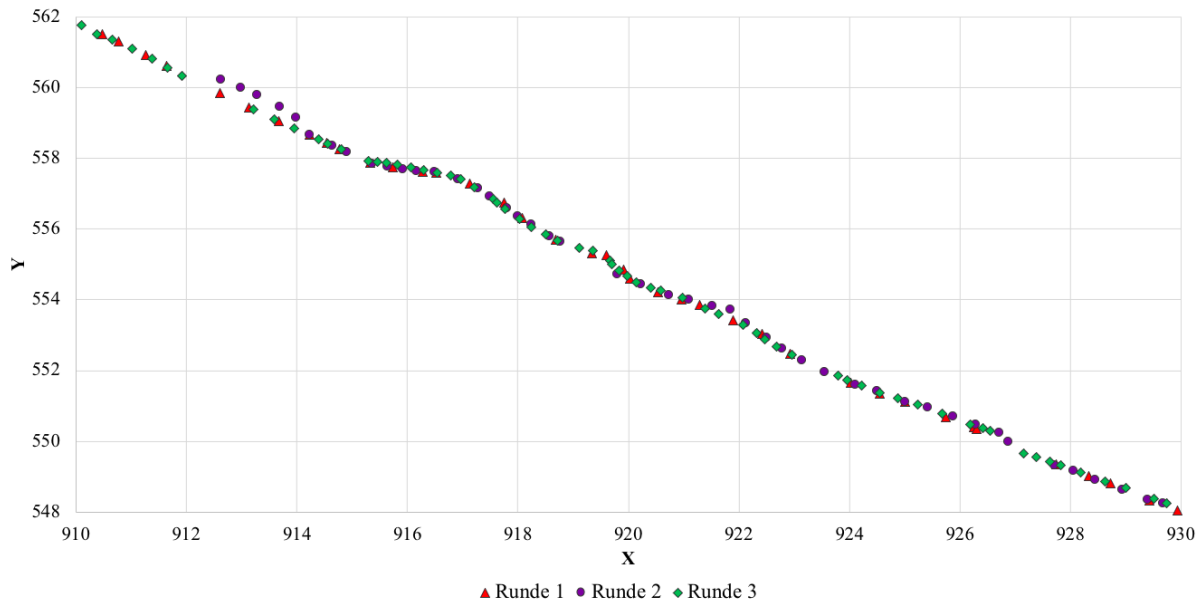
Figur 5.6: Tolkedata for runde 1, 2 og 3 med georadarundersøkingar.



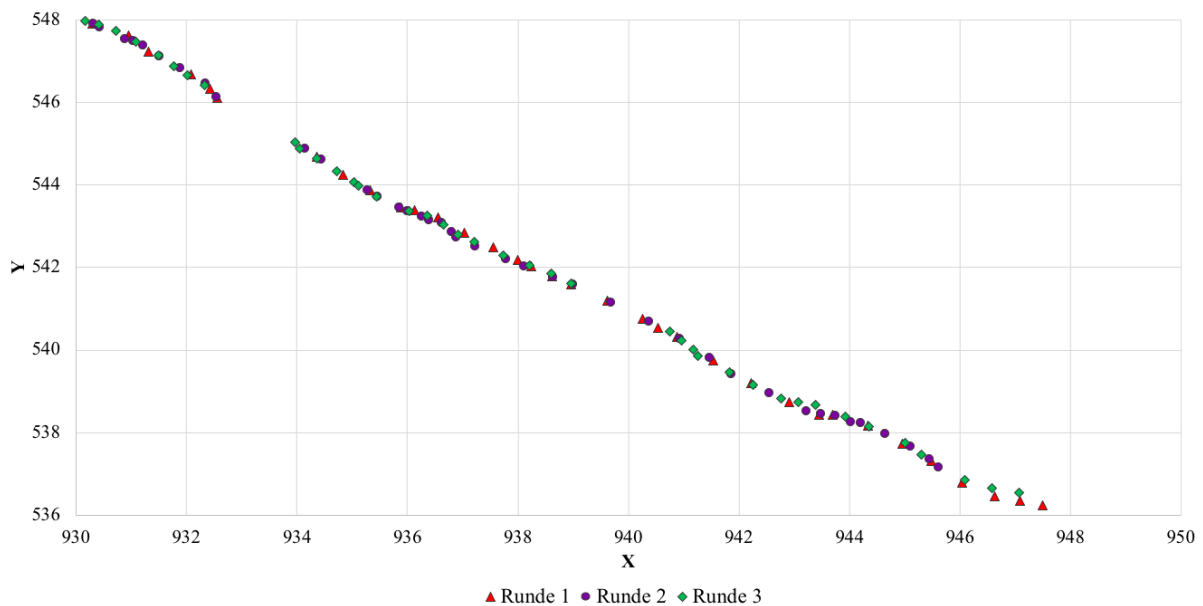
Figur 5.7: Første del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.



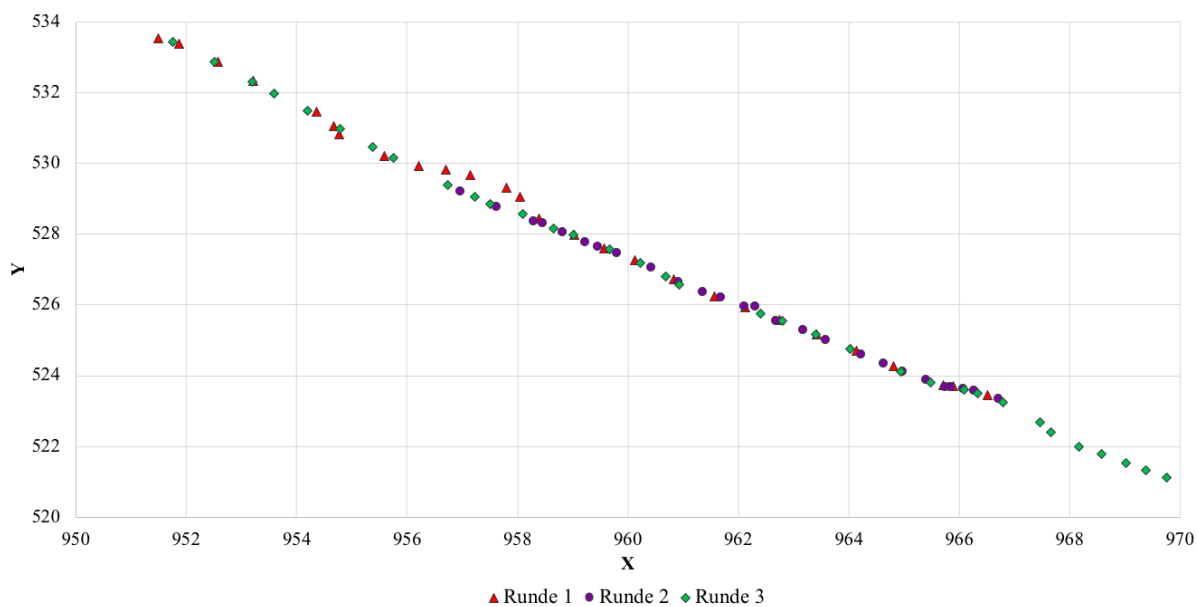
Figur 5.8: Andre del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.



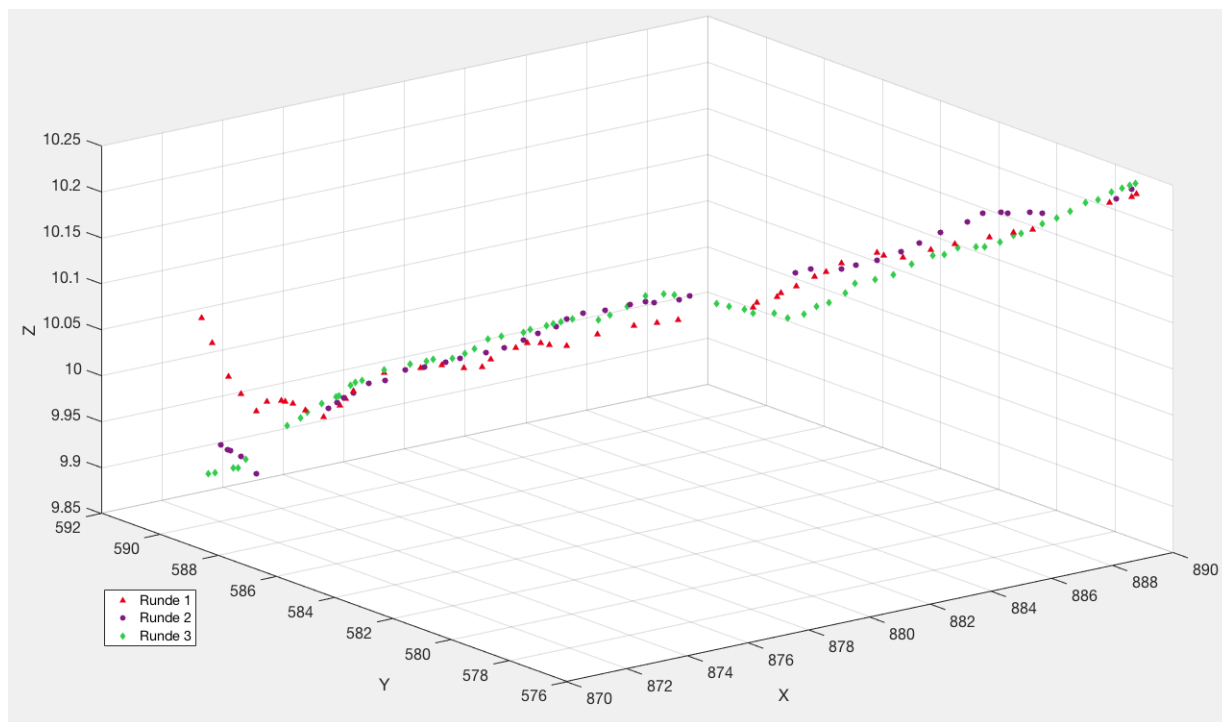
Figur 5.9: Tredje del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.



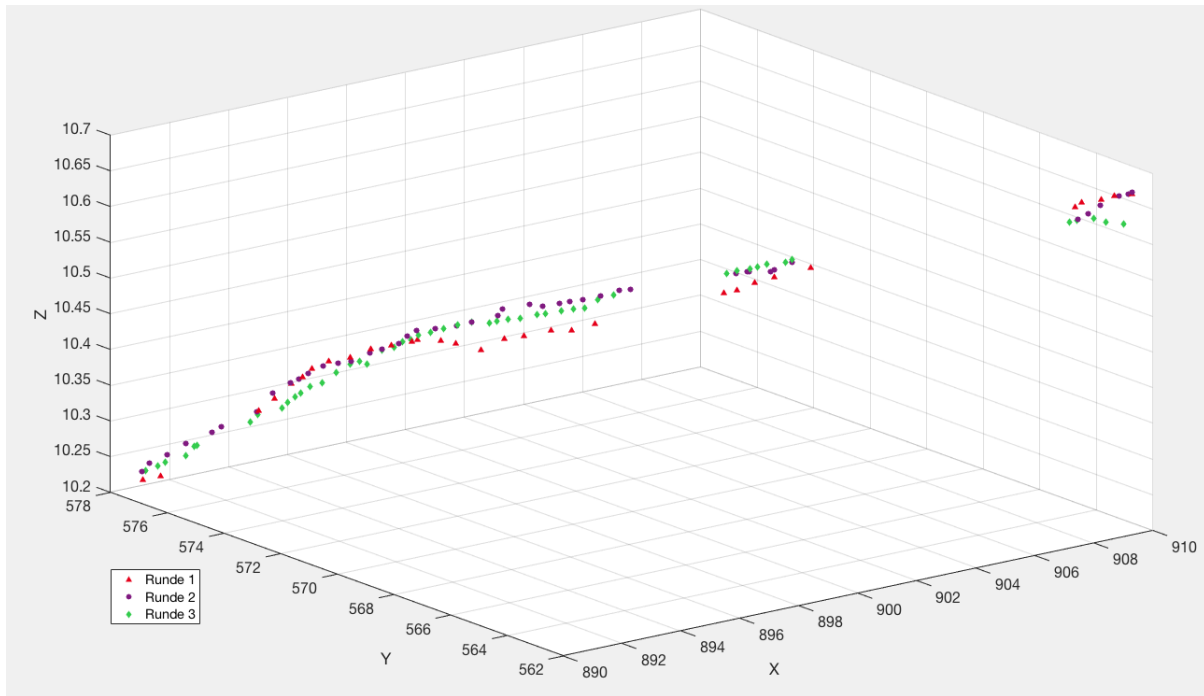
Figur 5.10: Fjerde del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plot. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.



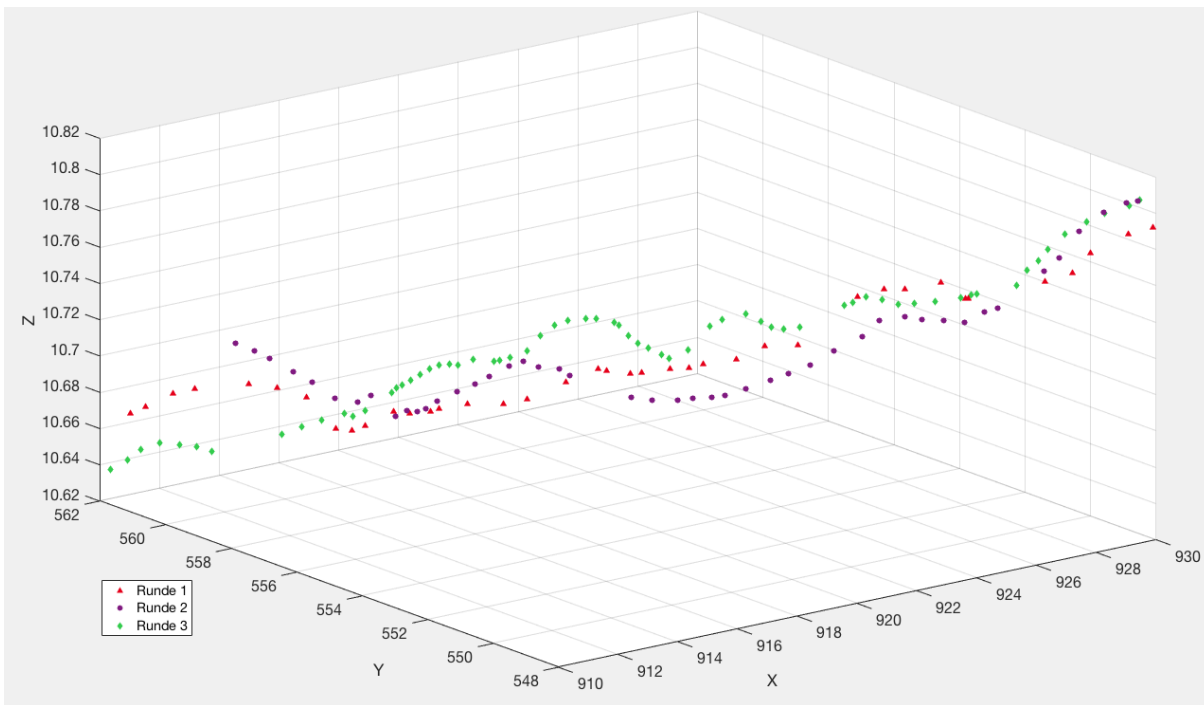
Figur 5.11: Femte og siste del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 2D-plott. 2D-plottet viser bergoverflata, sett ovanfrå.



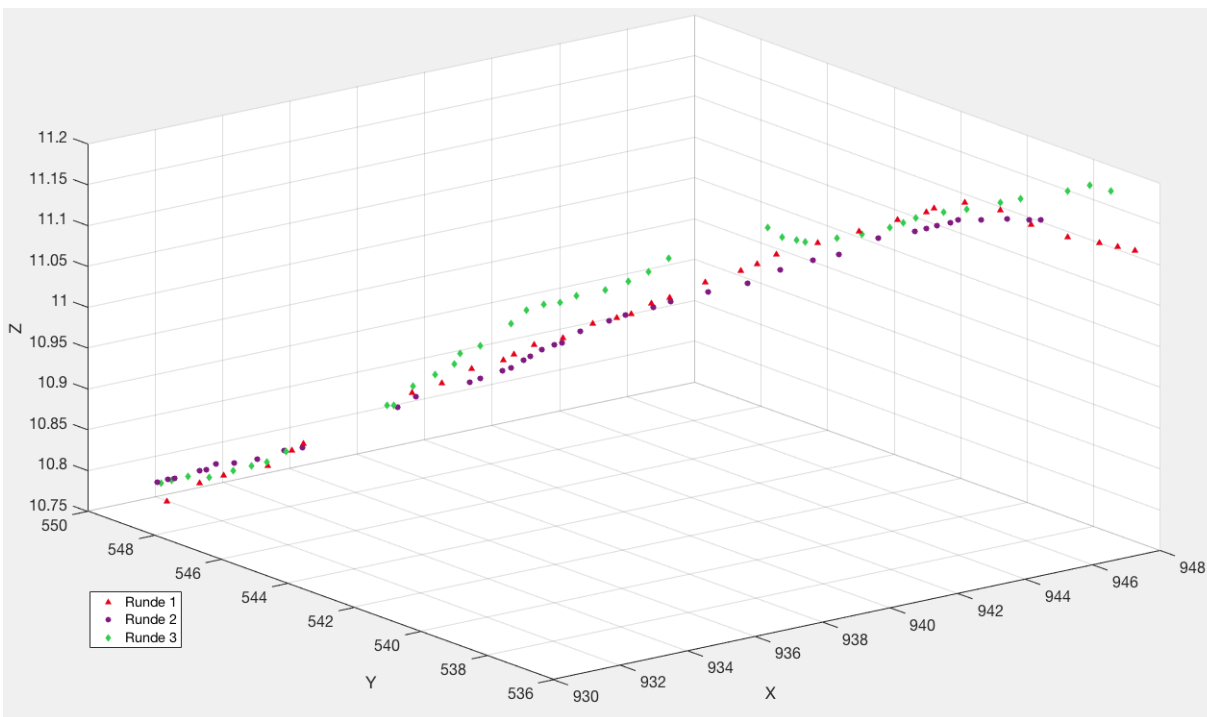
Figur 5.12: Første del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plott. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida. Starten er til venstre i figuren.



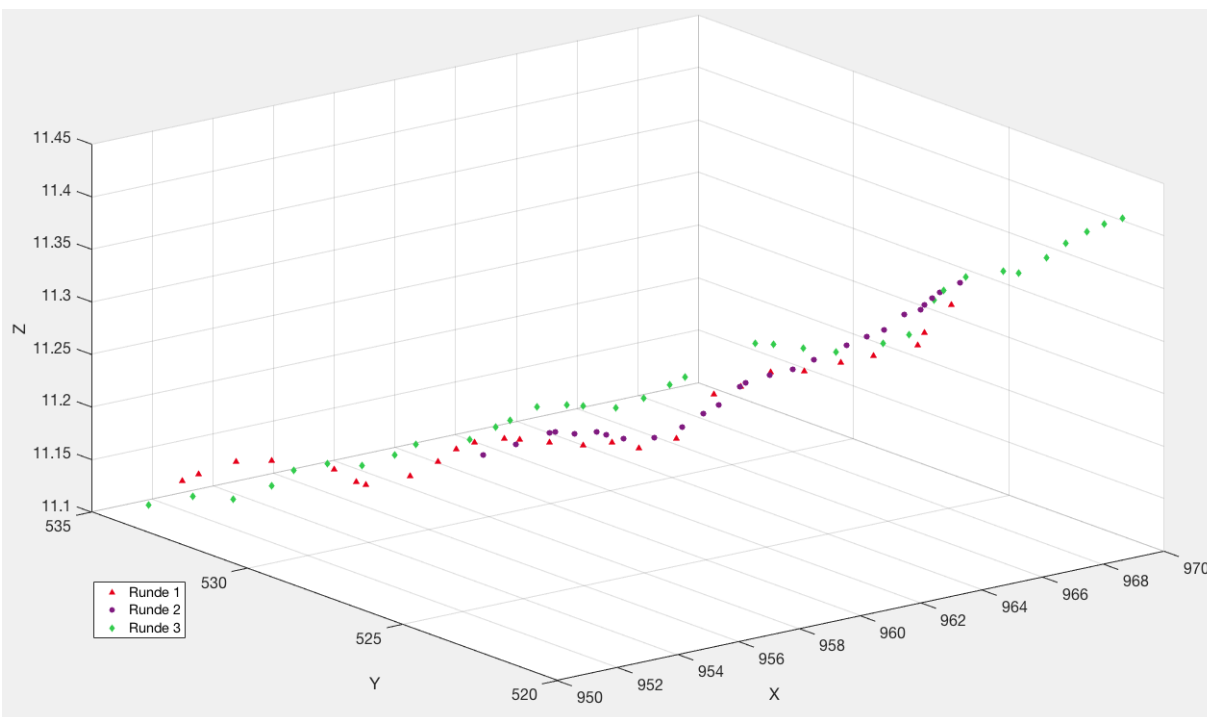
Figur 5.13: Andre del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.



Figur 5.14: Tredje del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.



Figur 5.15: Fjerde del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida.



Figur 5.16: Femte og siste del av koordinatpunkta frå dei tre undersøkingane i same 3D-plot. 3D-plottet viser bergoverflata, sett frå sida. Enden av strekninga er til høgre i figuren.

Kapittel 6

Diskusjon

Dette kapitlet inneheld ein diskusjon av potensialet for å bruke georadar som ein ikkje-destruktiv inspeksjonsmetode for berg bak tunnelkvelv. Forskingsspørsmåla svarast på i slutten av kapitlet, der den aktuelle metoden vert samanlikna med dagens metodar, og ein ser på potensialet georadar kan ha innanfor feltet i framtida. Om totalstasjonen ga ei god nok posisjonsnøyaktigheit blei også diskutert. Diskusjonen byggjer på teori frå litteraturstudiet i kapittel 2 og 3, og dei tilarbeidde resultata frå undersøkingane (kapittel 5).

Først vert alle dei moglege og påviste avvika og uroingane frå undersøkingane, utstyret, tolking og datatilarbeiding gjennomgått.

6.1 Uroingar i tolkeprofil

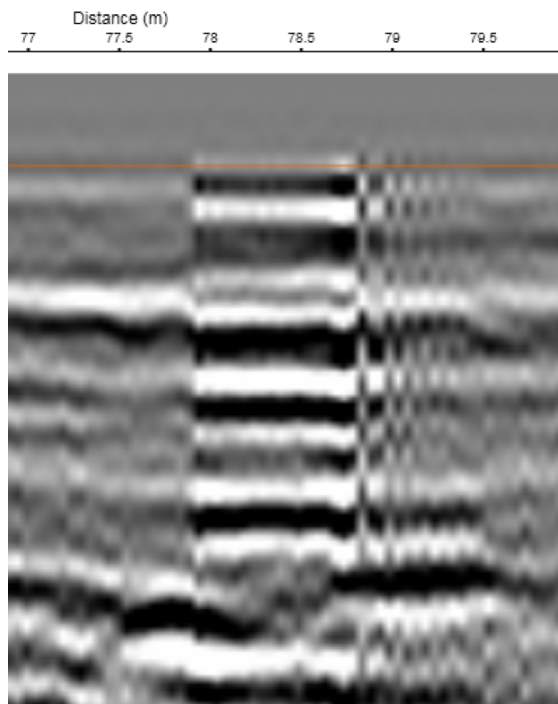
6.1.1 Metall

I figur 5.1 og 5.2 ser ein at tolkeprofilen er tydeleg ramma av uroingar. Dette gjeld for alle dei tre profila frå undersøkingane. Uroingane skjer som følge av at metall dempar forplantninga av dei elektromagnetiske bølgiene vidare inn i det undersøkte materialet. Metall har høg elektromagnetisk leiingsemne (σ) og sterk refleksjon av signal, noko som kjem tydeleg fram i figur 6.1. Sterk refleksjonen ser ein ved at signalet er skarpt og gjentek seg ned gjennom profilen. Frå underkapittel 3.1.4 kjem det fram at eit material si leiingsemne handlar om

emna til å leie straum, noko som her tyder kor djupt inn i materialet ein kan sjå. Sidan metall har høg leiingsemne, vil det skje ei stor demping av dei elektromagnetiske bølgjene. Dette fører til at forplantinga, og dermed undersøkingsdjupna, går ned.

Uroingane skjedde heilt frå starten av undersøkingsstrekninga, men blei verre etter omlag 78 meter, sjå figur 6.1. Det var klart før gjennomføring at det var ei inspeksjonsluke på strekninga, og gjennomgang av bilete og tolkeprofil viste at denne låg ved 78 meter. I tillegg er tunnelen elles full av kablar bak kvelv (sjå 6.2), boltar, skilt, bilar, kabelbruer og lysarmatur. Sjølv om antenna berre undersøker vinkelrett på tunnelveggen, vil det framleis skje signalspreiing utover i tunnelrommet. Desse metallinstallasjonane kan då ha reflektert mykje energi utover til kvarandre, som deretter blei returnert og motteke av antenna. Dette skapar urolege profil som kan vere vanskeleg å tolke.

Straum i kablar påverkar òg signala frå georadaren. I ettertid ser ein at straumen i tunnelen burde vore stengt av medan undersøkingane gjekk føre seg, i håp om å generere eit tolkeprofil med færre uroingar.



Figur 6.1: Inspeksjonsluke som var på den undersøkte strekninga var synleg i tolkeprofil. Luka var av det leiande materialet metall, og lagar difor eit tydeleg ekko i profilet.

6.1.2 Isdanning

At tolkeprofilen får ei så tydeleg forverring i etterkant av inspeksjonsluka, kan òg skuldast andre faktorar enn metall. Då undersøkingane blei gjort var det nokre få minusgrader ute, og undersøkingane blei gjort rett innfor tunnelmunninga. Storsandtunnelen er ein særskild fuktig tunnel, i følgje Skanska som bygde og som i dag driftar tunnelen. Ved å opne inspeksjonsluka kunne ein høyre drypp, og i tillegg sjå fukt og rim på baksida av kvelvet. At profilkvaliteten blei dårlegare etter 78 meter kan difor forklarast ved hjelp av tabell 3.1. Der ser ein tydeleg forskjellen i dielektrisk verdi mellom is og vatn, som er på høvesvis 4 og 81. Dersom det var is bak vass- og frostsikringa ute mot tunnelmunninga, ville det påverka signala i særskild liten grad. Undersøkingstrekket gjekk innover i tunnelen, noko som førte til auka temperaturar. Dersom det etter 78 meter var varmt nok til at fuktigheita ikkje lenger var fryst til is, men framleis var i vassform, ville ein dielektrisk verdi på 81 kunne vere grunnen til at signalet blei dårleg. I delkapittel 3.1.4 står det at for material med høg relativ dielektrisk permittivitet vil hastigheita til dei elektromagnetiske bølgiene gå ned, og georadaren vert mindre effektiv. Denne teorien er likevel usikker, sidan undersøkingane ikkje vart gjentekne i andre temperaturar.

Som følgje av uroingane etter 78 meter, kan ein sjå av figur 5.6 at tolkeavviket mellom dei tre rundane aukar. I forkant av auka i uroingar, er spreinga av tolkepunkt mindre, og dermed avviket mindre.

6.1.3 Salt

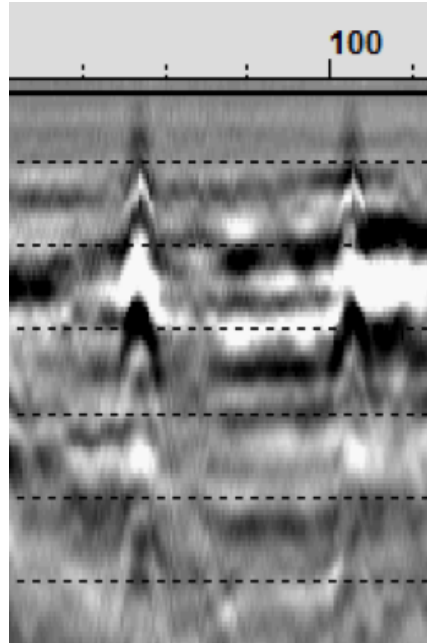
Undersøkingane i samband med denne masteroppgåva vart som tidlegare nemnt gjort på nattetid i midta av mars. Det var minusgrader denne natta og strekkinga vart difor salta for å oppretthalde tilstrekkeleg friksjon på vegoverflata. Sidan undersøkingane gjekk føre seg heilt i enden av tunnelen, var det naudsynt med salting også der. Salt på vegen og saltspreiing på veggane som skulle undersøkast kan ha påverka signala fordi salt er leiande, og lik som metall dempar den undersøkingsdjupna.



Figur 6.2: Utsikta bak kvelv frå inspeksjonsluka på strekninga, ca ved 78 meter. Ein kunne ikkje sjå langt, men ein kunne sjå fukt og høyre drypp. I tillegg kunne det skimtast ein kabel (t.h. i venstre bilete).

6.1.4 Skøyter mellom betongelement

Det er også andre uroingar som kjem tydeleg fram. Tunnelveggen er kledd med prefabrikerte betongelement, med ei breidde på omlag 4,5 meter. Denne breidda ser ein tydeleg att som uroingar i figur 6.3, då skøytene består av fugemasse. Fugemasse har ikkje dei same eigenskapane som betong, og har kanskje eigenskapar som liknar meir på luft. Dette gjev difor regelmessige, hyperbolske utslag i profilet. Desse utslaga forplantar seg innover i profilet som eit ekko, noko som kan påverke tolkinga av bergoverflata. Det kan skje ved at den som tolkar trur den plutslege hyperbolske formasjonen er ei kurve i bergstrukturen. Dette er så godt som mogleg forsøkt å teke omsyn til under tolkingsprosessen.



Figur 6.3: Skøyttar mellom betongelement skapar uroingar i tolkeprofil. Dei prefabrikkerte tunnelementa er rundt 5 meter breie med fugemasse i skøytane.

6.2 Avvik

6.2.1 Hyperbolsk refleksjon

Ein konvensjonelt driven tunnel vil få veggjar og heng med ujamn overflate. Bergoverflata kan ha krappe formasjonar bak kvelvet, såkalla knølar (på figur 6.2 kan ein sjå ein slik knøl). Slike formasjonar vil kunne bli overdrivne av georadaren i tolkeprofil (sjå figur 3.3 og kapittel 3.1.3). Dette fører til at metoden ikkje alltid kan gje oss eksakte og truverdige koordinatar til bergoverflata. Likevel er det endringa i bergoverflata som er det essensielle i denne forskinga. Ei endring i bergoverflata vil framleis kunne oppdagast, då denne hyperbolske overdrivinga vil skje for kvar undersøking, og tolkeoperatør kjenner til fenomenet.

6.2.2 Tolking

I dette prosjektet blei det utført manuell tolking av georadarprofil. Lalagüe (2015) presiserar at tolking bør gjerast manuelt, då avviket er for stort ved automatisk tolking. Tolking er

likevel avhengig av personen (operatøren) som utfører tolkinga, då noko avvik kan oppstå som følgje av at ulike menneske vurderer data ulikt. I dette forsøket vart alt datamaterialet tolka av same person, og dr. Anne Lalagüe som er erfaren med tolking, såg over i etterkant. Dette gjer at dei tre profila i dette forsøket er vurdert på same grunnlag. Det er verdt å nemne at georadarutstyret som er nytta i dette forsøket er ti år gammalt, og det er òg tolkeprogramvara. Georadarteknologien er som omtala i kapittel 3.1.3 stadig under utvikling, og med nyare utstyr er det mogleg å automatisk få fram former utover dei klassiske hyperbolske formene (som ved nedgravne objekt), i tillegg til eigne farger på ulike material i tolkeprofilen. Dette gjer at det vert lettare for ein operatørar med lite erfaring å tolke, og kanskje er det også lettare for datamaskiner å kunne utføre tolkingar. Om det vert eit press på utviklarane for å få laga gode automatiske tolkeverktøy, vil truleg teknologien kunne bli tilgjengeleg. I desse forsøka var det ikkje snakk om lange tolkeprofil, men ved ei eventuell implementering av georadar som inspeksjonsmetode kan det bli snakk om tolkeprofil for tunnelar på fleire mil. I slike tilfelle vil eit velfungerande automatisk tolkeverktøy vere gull verdt, både for å redusere tidsbruk og subjektive menneskelege feil.

Ein georadar lagar eit bilete av det ukjente, og det er opp til operatøren å tolke kva biletet viser. I dette forsøket er ikkje dette noko som kan kontrollerast/validerast i ettertid i form av manuell inspeksjon bak kvelv. Dette fører til at ein ikkje kan seie noko om denne studia er særleg nøyaktig eller ikkje, det vil seie om den tolka bergoverflata stemmer med den reelle situasjonen bak kvelv. Det ein derimot kan sjå på, er presisjonen *mellom* dei tre forsøka. Kor godt stemmer resultata frå dei ulike rundane overeins? Denne presisjonen er regna ut gjennom avviksberekningar i underkapittel 5.1 Avviksberekning.

I følgje Lalagüe (2015) kan ein seie at eit tolkeavvik under 10% tyder på repeterbare resultat (Personleg kommunikasjon med dr. Anne Lalagüe, 19.04.2018). Mesteparten av alle georadardata har eit avvik på mellom 2 – 10 % (Lalagüe, 2015). Likevel er det få av desse tala som stammar frå undersøkingar med Geoscope stegfrekvensradar frå 3D-Radar, slik som denne og Lalagües forking gjer. Det blei i denne forkinga tolka ei bergoverflate der tolkeoperatøren stort sett kunne sjå ein tydeleg overgang i materiale. Sidan det her var overgang mellom luft og berg, som har ulike dielektriske eigenskapar, skulle dette skiljet

etter teorien komme tydeleg fram i profilet.

Tolkeavviket frå tabell 5.1 på 4,43% og 4,83% for høvesvis runde 1 og runde 2 er rekna som lågt, då det er langt lågare enn grenseverdien på 10% (Lalagüe, 2015). Sjølv om det er visse område i tolkeprofilerna som skapar større avvik enn andre, er ikkje desse sett vekk ifrå vidare. Til dømes ser ein av figur 5.6 at runde 2 ved metrering 50 har ein tolka avstand d på rundt 1 meter, medan runde 1 og 3 er tolka med ein avstand d på 0,65 meter. I same figur kan ein sjå ein liknande situasjon ved profil 105, der runde 1 har fått ein d på heile 1,5 meter og runde 2 og 3 har ein d på 1 meter. Sidan det som regel er to profil som til ei kvar tid ser ut til å få omlag same tolking (slik som i døma over), vil det kunne indikere kva som er den reelle overflata. Der store avvik har oppstått kjem feiltolkinga som følge av det uklare tolkeprofilen. Dei tre tolkeprofilerna frå undersøkinga var i ulik grad ramma av uroingane, og profilet frå runde 3 (som er avbilda i figur 5.1 og 5.2) var det av best kvalitet. Der det er dårleg kvalitet på tolkeprofilen, vert det òg færre og dårlegare tolkingar. Dette kan ein sjå i figur 5.1 mellom ca metrering 39 til 44, der det var så uklart at det ikkje blei tolka noko for nokon av rundane. Etter 78 meter vert det færre tolkingspunkt, og kvaliteten på tolkinga er meir usikker i dette området.

Avvik i starten

Sidan den same, korte strekninga skulle undersøkast fleire gonger, måtte bilen rygge seg attende til startposisjonen. Det kunne då variere kor nær bilen kom veggen. I staden for at sjåføren skulle rygge fram og attende for å finstille posisjonen, var det på førehand avtalt at posisjonen skulle køyrast inn dei første meterane av undersøkingane. Dette skapar større avvik heilt i starten, som jamnar seg ut etter nokre få meter. Dette kjem tydeleg fram i figur 5.12, der runde 1 startar i høgare posisjon enn dei to andre. Dette avviket betrar seg etter få meter.

6.3 Grunnlag

Under tilarbeiding av data måtte ulike føresetnader etablerast for å kunne få fram resultat. Sidan dette var ei enkel undersøking for å vise om georadar og totalstasjon i prinsippet kan

fungere som ein inspeksjonsmetode for tunnelar, var dette nødvendig. Desse føresetnadane er diskutert vidare her.

6.3.1 Antenna vinkelrett på vertikal

Det vart under tilarbeiding av data lagt til grunn at georadarantenna til ei kvar tid under undersøkingane var 90 grader på vertikalaksen, altså inga skråstilling. Tunnelveggen er som nemnt laga av prefabrikkerte betongelement, som har ein krum form (sjå figur 1.1). Ved å køyre antenna for høgt opp eller for langt ned langs veggen, kan antenna då få ein anna vinkel mot fjellveggen bak kvelvet. Sidan måling er utført berre mot senteraksen på radaren, så blir ikkje ei eventuell helling på radaren registrert av totalstasjonen undervegs i forsøket. Om ei helling skjer, vil georadardata bli samla inn frå ei høgare eller lågare høgde, utan at ein får korrigert for det i etterkant. Det er difor viktig om ein skal gjere målingar med eit visst tidsrom (til dømes ved årlege inspeksjonar) at avstand frå bil til vegg, og avstand frå bil til antenne registrerast. Dette gjer at ein då vil få same forhold kvar gong undersøkingane skal gjerast. I dette tilfellet så er alle tre rundane likevel utført med relativt like avstandar, men med lenger tid mellom kvart forsøk vil det bli vanskeleg. Ei meir nøyaktig løysing kan vere å montere to prisme på radaren: Eitt til å tracke georadarantenna, og eitt til å registrere eventuell helling undervegs. Ei anna løysing kan vere å montere på ein LVDT (Linear Variable Distance Transducers) som målar vinkelen mellom brakett og antenne undervegs i undersøkingane. Problemet med denne er at dette gjev enda eit ekstra datasystem å inkludere i berekningane.

Sjølv om det er lagt til grunn at georadarantenna er ført 90 grader på vertikalaksen, har ikkje dette grunnlaget manipulert resultatata til noko meir lovande enn det er. Hensikta var berre å vise om georadarinspeksjon i tunnel fungerer, på ein enkel måte. Ved seinare undersøkingar vil det ikkje vere vanskeleg å inkludere instrument som kan måle, og ta omsyn til ei eventuell helling.

6.3.2 Samsvar mellom metring frå DMI og totalstasjon

Det vidare arbeidet med å gi bergoverflata eigne koordinatar skapar også eit avvik. Ein av feilkjeldene kjem som følge av dårleg samsvar mellom metringane. Metringa frå geoskopet kjem frå DMI-instrumentet som er montert på venstre bakhjul, medan metringa frå totalstasjonen er målt ved hjelp av prismeørsle. DMien vert for kvar gong georadaren skal brukast kalibrert. Dette vert gjort manuelt ved å måle ei 50 meter lang strekning med målehjul, køyre desse 50 meterane med georadbilen, og plotte det inn i systemet som 50 meter. Denne kalibreringa er ikkje særleg nøyaktig. Ein alternativ metode som òg vert brukt, er å køyre ei kjent strekning på Klett, som er måla til å vere 1 km lang. Sidan dette forsøket gjekk føre seg på vinterstid, var det nødvendig med vinterdekk. DMien krev sommardekk, så det var ikkje forsvarleg å kalibrere georadaren på denne strekninga. I tunnelen blei det skifta til sommardekk på hjulet med påmontert DMI, og kalibrering blei gjort med målehjul. Ved å bruke ein meir korrekt kalibreringsmetode vil det truleg kunne minske usikkerheita.

Det finst ein funksjon der ein kan strekke tolkeprofilen til å passe med den målte distansen frå totalstasjonen. Denne funksjonen blei ikkje nytta i denne samanhengen, men kunne med fordel vore nytta for å eliminere feilkjeldene frå unøyaktig kalibrering.

Grunnen til at kalibreringa av DMI skapar ein feilkjelde, handlar om at metoden som er nytta for å gje bergoverflata sine eigne koordinatar baserar seg på føresetnaden om at DMI kan settast lik metringa målt av totalstasjonen. Totalstasjonen er eit verktøy som brukast til å måle avstandar, og som har ein eigen funksjon for tracking av prisme. Denne avstandsberekninga er difor vurdert til å vere meir nøyaktig enn DMien. Ved å gå ut i frå at dei to posisjonsmålingane gjev same output, gjev det eit utslag i resultata. Som følge av at alle tre forsøka stammar frå same kalibrering av DMien, vil ikkje dei tre rundane ha eit stort avvik seg imellom, og har dermed stor nok presisjon til å kunne samanliknast. Lengda på undersøkingstrekket totalstasjonen målte for runde 3 var 121,16 meter, medan lengda på tolkeprofilen for runde 3 i figur 5.2 viser ei lengd på i underkant av 122 meter.

6.3.3 Lineær utvikling mellom punkt

For å få nok posisjonskoordinatar frå totalstasjonen til å kunne samanfalle med dei tilsynelatande tilfeldig plasserte tolkepunkta, måtte det leggest inn punkt mellom dei registrerte punkta. I utgangspunktet vart det registrert ein posisjon for kvar 20. centimeter antenna bevegde seg i luftline mot totalstasjonen. Sidan undersøkinga var i yttersving og dermed fekk ei sidelengs rørsle for totalstasjonen, blei desse stega til tider noko lenger enn luftline. Etter interpolering vart det ei registrering for omlag kvar 0,2 millimeter antenna hadde flytta seg. På denne måten vart avviket mindre når ein skulle finne ein posisjonskoordinat som var samanfallande eller heilt i nærleiken av metringa til tolkepunktet.

Å gå ut ifrå ei lineær utvikling mellom dei registrerte posisjoneringsdataa var sentralt for å få til denne interpoleringa. Kvelvoverflata er slett, sett bort frå skøyttane, i tillegg til at køyrehastigheita er gangfart og sjåføren difor har full kontroll på antennerørsla undervegs. Hjula som er påmontert antenna, og som rullar langs kvelvet, er store og fast orientert i køyreretning. Av den grunn vil ikkje antenna kunne ta særleg krappe svingar, spesielt ikkje i løpet av berre 0,2 meter. På grunn av dette er det rekna som akseptabelt å legge til grunn ei lineær utvikling mellom posisjonspunkta.

6.3.4 Plotting av bergkoordinatar

Då koordinatane for bergoverflata blei plotta, vart dei teikna ortogonalt ut frå midta av ei kort line på 0,4 mm. Denne lina ligg mellom georadarposisjonen før og georadarposisjonen etter metreringsposisjonen tolkedata oppgjev, men tolkepunktet ligg ikkje alltid midt mellom desse to posisjonane. Dette medfører eit avvik. Lina som dannast er riktig nok på berre omlag 0,4 millimeter, noko som gjer at avviket blir maksimalt 0,2 millimeter. Avviket vil heller ikkje forplante seg vidare til neste punkt, sidan forløkkene som styrer prosessen startar på nytt for kvar iterering. Ved å inkludere funksjonen i ei betre, meir eigna programvare ville ein sikkert kunne unngått dette avviket. Ein kan òg unngå problemet ved manuell datatilarbeiding, men sjølv for korte tunnelar vil det kreve mykje tid. Eit mogleg avvik på maks 0,2 mm er i denne samanhengen særst lågt, og føresetnaden gjev eit tilnærma korrekt resultat.

6.3.5 Høgdekorrigerering for kanal

Berget skulle i denne forskinga få tileigna egne koordinatar, og då inkludert høgdekoordinatar (z-koordinatar). Høgda opp til prismet på georadarantenna vart logga undervegs, men kanalen som resultat vart tolka i, var kanal 1, som mest sannsynleg ikkje ligg i senter. Ein måtte difor korrigere etter kva tolkekanal på georadaren som vart brukt. Georadarutstyret er gammalt, og det er funne lite informasjon om denne georadarantenna. Det vart av den grunn sett at kanal 1 ligg 0,225 m over prismet. Denne avstanden stemmer mest sannsynleg ikkje, men den kan enkelt endrast med eit tastetrykk i MATLAB-scriptet. Føresetnaden om plasseringa av kanalen i forhold til senter prisme vil heller ikkje påverke resultatet av forskinga. Denne føresetnaden er sett på som tilstrekkeleg for formålet, då den ikkje har noko å seie for kva moglegheit georadar har som inspeksjonsverktøy i tunnel.

6.4 Forskingsspørsmål

Frå delkapittel 1.2 har ein følgjande forskningsspørsmål som skal svarast på:

- I kva grad kan rørsle i berg bak kvelv detekterast ved hjelp av georadar?
 - Korleis oppnå tilstrekkeleg posisjonsnøyaktigheit under kvar georadarmåling?
- Kan georadar erstatte/komplementere manuell kontroll av berg bak tunnelkvelv eller destruktive metodar?

I avsnitta vidare skal desse spørsmåla på best mogleg måte svarast på.

6.4.1 Detektering av rørsle

Undersøkingane i denne masteroppgåva nådde ein presisjon på 4,43% og 4,83% avvik. Dette er i seg sjølv lågt, og viser i si heilheit at tolkedataa er repeterbare. Om ein ser på figur 5.6, kan ein likevel sjå tydelege, lokale forskjellar mellom tolkingane ved ca metrerings 50, 60 og 105. Desse forskjellane (som òg er kort nemnde i underkapittel 6.2.2) ser ein att i figur 5.9 og 5.11, ved x-koordinatane 912 – 913, 922 og 956 – 958. Områda dette gjeld trekkjer opp

det gjennomsnittlege avviket, og skil seg på denne måten ut. I dette forsøket er det rekna som kjent at forskjellen skuldast tolkeavvik, sidan berget ikkje kan ha bevega seg på same kveld. Ved ei eventuell seinare undersøking vil ein derimot spørje seg om denne forskjellen kan forklarast som reell rørsle i berget eller om det er avvik i tolkinga. Om metoden skal kunne brukast må det difor etablerast eit erfaringsgrunnlag. Med eit erfaringsgrunnlag vil ein kunne setje tydelege grenser for når forskjellen kan reknast som eit tolkeavvik, og når det bør utførast nærare undersøkingar av berget.

Ein database der alle måledata frå georadarundersøkingar registrerast og lagrast bør òg etablerast. I tillegg kunne tidlegare laserscanningar av bergoverflata vore interessante tilleggdata. Ved å samanlikne georadarresultat opp mot laserscanning av bergoverflata (ofte utført før montasje av vass- og frostsikring, sjå kapittel 2.2.2), kan det betre nøyaktigheita i georadarmålingane. Om det er eit område ein er usikker på, til dømes område med mistanke om rørsle, kan ein kontrollere dette området med ei «stripe» med georadar. Denne undersøkinga kan då kontrollerast opp mot punktskyta frå den tidlegare utførte laserscanninga, og må difor ikkje vere undersøkt av georadar på det aktuelle området tidlegare. På grunn av at georadaren kan overdrive knølformasjonar gjennom hyperbolsk refleksjon (sjå kapittel 3.3), vil det kunne vere ulikheiter mellom tolkeprofilen og data frå ei eventuell laserscanning, utan at rørsle i berg nødvendigvis har skjedd. Sjølv om den hyperbolske refleksjonen i stor grad vert korrigert for i nyare utstyr, er det ønskeleg at tolkeoperatør har erfaring, og kjenner til hyperbolsk refleksjonseffekt.

Sidan det under dette forsøket berre blei undersøkt éi stripe langs tunnelveggen, tyder det at eit veldig lite areal av tunnelen vert kontrollert. Det betyr òg at det er vanskeleg å kontrollere same område neste gong ein vil utføre ei undersøking, trass posisjonering frå georadar. Ein må ha eit overlapp mellom arealet der dei gamle og dei nye undersøkingane er utførte for å kunne samanlikne resultata. Dette gjer at dei enkle undersøkingane som er gjort i dette forsøket ikkje nødvendigvis kan klare å detektere ei reell rørsle i bergmassa. På grunn av dette bør det ved ei eventuell framtidig implementering av metoden ikkje lenger vere undersøkingar av striper av bergveggen som vert utført. Ein bør heller undersøke flater som heile eller store delar av bergoverflata, slik at ein vil kunne få tilstrekkeleg med

overlapp.

6.4.2 Posisjonsnøyaktigheit

Totalstasjon gjev ei god posisjonsnøyaktigheit. Den oppnår som nemnt i kapittel 4.2.2 eit standardavvik på 8 mm i desse undersøkingane, i tillegg til at det kan ha oppstått noko unøyaktigheit på ei oppstilling og i sjølve fastmerka på rundt 3 mm.

Med eit standardavvik på 8 mm må ein gange opp dette med ein faktor på 3 for å få framtidig avvik (personleg kommunikasjon med landmålar i Statens vegvesen, Christer Gabrielsen, 04.06.2018). Standardavvik er eit nøyaktigheitsmål som viser presisjon og kvalitet på posisjonsmålingane (Skogseth, 2014). Teoretisk sett vil berre 68% av dei nye målingane falle innanfor standardavviket på middelveidien av målingane. Om ein derimot gangar standardavviket med ein faktor på 3, vil berre 0,3% av alle målingane vere utanfor 3 gonger standardavvik. Seinare kan ein difor rekne med å få eit posisjonsavvik på maksimum 2,4 cm mot seinare målingar (personleg kommunikasjon med landmålar i Statens vegvesen, Christer Gabrielsen, 04.06.2018).

Dette er låge avvik, og vil vere tilstrekkeleg for å kunne samanlikne tolkedata. Dersom endringar av ein viss storleik har skjedd i berg, vil dette komme tydeleg fram trass ei eventuell posisjonsforskyving på maksimalt 2,4 cm. Dette gjeld spesielt om ein går frå å tolke striper til å tolke flater. Posisjonsnøyaktigheita er altså sett på som tilstrekkeleg nøyaktig for dette føremålet.

Om ein køyrer georadarbilen saktare enn i dette forsøket (gangfart), kan ein få dobbelt så mange trackingkoordinatar. Dette fører til at grunnlaget om lineær overgang mellom koordinatane kan gjerast for halvparten så lange intervall (0,1 m), og ein vil kunne oppnå enda meir presise koordinatsmålingar. Sidan det i denne samanhengen berre var aktuelt å vise at metoden fungerte, var ikkje dette prioritert. 0,2 meter mellom posisjonsdata var her tilstrekkeleg for å kunne bevise om georadar kan bli ein inspeksjonsmetode. Om metoden ein gong vert implementert, vil det kanskje i nokre tilfelle vere ein fordel å seinke undersøkingshastigheita for å få seinka posisjonsavviket. I lange, travle tunnelar som ikkje kan vere stengde lenger enn absolutt nødvendig vil dette kunne vere problematisk

tidsmessig. Det er likevel ikkje tal om stor differanse i hastigheit, og dermed ikkje stor forskjell i tidsbruk. På ei anna side er det truleg veldig små avvik som stammar frå denne antakinga, og med 0,2 meter mellom posisjonsdata vil ein for slette kvelv, og med store antennehjul, få gode interpoleringar. Difor vil det i dei fleste tilfelle vere tilstrekkeleg med posisjonslogging per 0,2 meter.

Om ein ser på dei fem figurane 5.12–5.16, ser ein at undersøkingshøgda er noko forskjellig mellom dei ulike forsøka. Dette er ikkje store avviket, spesielt om ein ser vekk frå starten. Legg merke til at z-aksen kan ha noko ulik skala mellom dei forskjellige figurane. Dette er for å få dram forskjellane i kvart av plotta. Det kjem tydeleg fram frå z-aksen at det i hovudsak dreier seg om små differansar i denne samanhengen. Forsøka viste med dette at ein konsentrert og erfaren sjåfør i stor grad kunne sikte seg inn og følgje liner på tunnelveggen.

Ein måte å sikre lik høgde for kvar undersøking på kan vere å merke kvelvoverflata på eit eller anna vis. Slik vil ein kunne oppnå tilstrekkeleg høgdenøyaktigheit mellom målingane. Eit døme på overflatemarkering, vil vere å montere små skruar i kvelvet, og spenne opp ei stram, synleg snor mellom skruane ved undersøking. Snora vil då vere ei rettesnor for sjåføren undervegs. Dersom dette vert utført på ein god måte, vil ein kunne spenne opp snora på nytt ved neste undersøking, og ved å følgje denne sikre at ein målar på omtrent same stad. Dette kunne vore eit alternativ til den meir omfattande metoden med totalstasjon. Då vil riktig nok ikkje bergoverflata få eigne koordinatar, men tolkedata frå georadar kan samanliknast direkte ved bruk av metring. Det ville vore ein enklare, raskare og rimelegare metode.

Ved å bruke totalstasjon til å koordinatfeste rørsla til georadaren, må det etablerast fastmerke i tunnelen. Desse fastmerka leggst inn i eit lokalt system, og koordinatane lagrast i databasen. Under målingane må totalstasjonen og prisma riggast opp fleire gonger. Dersom tunnelen er lang eller har relativt krappe svingar, trengst det fleire oppriggingar for å sikre tilstrekkeleg sikt mellom totalstasjon og prisme. Ei slik opprigging har som nemnt også eit avvik. Lange, svingete tunnelar gjer at ei tunnelundersøking med georadar og totalstasjon vil vere ein prosess som er delt opp i fleire intervall, med eit noko større

avvik enn i korte, rette tunnelar. Den alternative metoden med å utføre undersøking utan totalstasjon, men med rettesnor for sjåføren, vil ikkje krevje slike intervall. Undersøkingane kan i dei tilfella gjerast i eitt strekk. Likevel, dette gjev som sagt ikkje koordinatar til bergoverflata, men er ein enkel og rimeleg variant.

6.4.3 Kan georadar erstatte dagens metodar?

Georadar har som nemnt i kapittel 3, Norske tunnelar, fått fleire og fleire bruksområde dei siste tiåra, og i denne masteroppgåva var det ønskjeleg å undersøke om georadar kan brukast til regelmessig inspeksjon av tunnelar.

Gjennom denne forskinga er det vist at georadar gjev repeterbare resultat, og at det er mogleg å kombinere data frå totalstasjon og georadar til å tileigne bergoverflata eigne koordinatar. Metoden er likevel i utviklingsfasen, og implementering krev vidare arbeid. Tilarbeidinga av data i denne oppgåva er gjort på ein enkel måte, med hjelp av eit enkelt dataprogram, berre for å vise at prinsippet fungerer. Utrekningane kan sikkert gjerast på ein enklare måte med ei betre og meir tilrettelagt programvare. Ein del av det vidare arbeidet mot implementering vil til dømes vere å inkludere denne funksjonen i ei eksisterande, meir brukarvenleg programvare. I tillegg må det som nemnt lagast ein database og eit erfaringsgrunnlag.

Denne forskinga har berre hatt fokus på om metoden kan fungere, og er difor utført på ein enkel måte. Dette innebar at det var ei stripe av tunnelveggen som blei undersøkt, sidan utstyr til dette allereie var tilgjengeleg ved NTNU. Ved ei eventuell implementering av metoden, vil det ikkje vere like aktuelt å tolke striper av tunnelveggen lenger. Ein inspiserer som regel tunnelar for å gjere ei totalvurdering av tilstanden, eller for å få oversikt over eit kritisk område. På denne måten dekkjer ikkje georadar dagens behov når det kjem til tunnelinspeksjon. Ein kan sjølvsagt gjere undersøkingane fleire gonger for ulike høgder på veggen for å få eit betre bilete, men dette vil korkje vere tid- eller kostnadssparande. Poenget med å nytte metoden framfor andre metodar vil då forsvinne. Seinare vil det likevel vere aktuelt at georadaren kan undersøke større flater. Dette gjer at ein kan inspisere større område, samtidig som sannsynet for overlapp med tidlegare undersøkingar aukar.

Med overlapp frå tidlegare undersøkingar har ein data å samanlikne med. I desse tilfella er posisjonering viktig, og der vil bruk av totalstasjon framleis kunne vere aktuell. Om ein har ein 3D-modell av heile bergoverflata i tunnelen lagra i databasen, kan ein vel å kontrollere heile tverrsnittet på nytt ved neste undersøking, eller berre undersøke små område ein er usikker på. I sistnemnte tilfelle er det ikkje like viktig med metoden lenger, då kan ein til dømes ta ei stripe langs henget.

Laserscanning, som speglar heile tunnelprofilen gjennom ei tett punktsky, er i dag det næraste ein kjem ei 3D-framstilling av bergmassa i ein tunnel. Seinare vil kanskje georadar òg kunne tilby tilsvarende teknologi. Bergoverflatene i tunnelar vert i dag ofte laserscanna før kvelvmontasje for å kontrollere at ingen knølar kjem i vegen for køyreboksen/trafikkrommet. Datamaterialet frå scanninga kan ein lagre i georadardatabasen og bruke det til samanlikning av seinare georadarundersøkingar i området. Om ein har heile tunnelen si bergoverflate lagra i databasen, vil det aldri vere mangel på overlapp, uansett om ein berre tolkar ei stripe med georadar.

Det kan likevel medføre vanske ved å bruke georadar i andre delar av tunnelen, til dømes i henget. Henget er området som er mest utsett for endringar i bergmassa, som følgje av tyngdekrafta. Det er difor eit område som er ønskjeleg å undersøke. Problemet er at dette området òg har store mengder kablar, vifter, armatur og anna metall som uroar georadarsignala. Dette vil vere ei utfordring i ei eventuell vidareutvikling av metoden.

Sett opp mot andre inspeksjonsmetodar for tunnelar, gjennomgått i kapittel 2, er bruk av georadar til tilstandskontroll av berg bak kvelv ein lovande metode. Etter at det i 2016 blei slutt på å bygge nye tunnelar med inspeksjonsrom bak kvelv, må ein ha metodar som vert utført frå tunnelrommet. Slike metodar bør kunne detektere rørsle i berget i tide, og ikkje vere destruktive på installasjonane i tunnelen. Laserscanning og visuell inspeksjon frå tunnelrommet er to ikkje-destruktive inspeksjonsmetodar, men dei vil berre kunne detektere eventuelle skadar på kvelv. Dei vil ikkje kunne seie noko om tilstanden på berget før rørsle i berget skadar kvelvet, og skadar dermed vert synlege frå tunnelrommet. Kompliserte installasjonar som fiberoptiske kablar og geofonar malar vibrasjonar og rørsle kontinuerleg, men krev ei omfattande installering, vedlikehald, og tolking. Georadaren på

si side, vil berre krevje tolking i etterkant av undersøkingane, og vil dermed kunne vere eit rimelegare alternativ. Om det i tillegg vert utvikla ei god automatisk tolkeprogramvare, vil ein kunne spare enda meir tid og kostnad.

Georadar vil ikkje kunne erstatte dagens metodar for inspeksjon, men med vidare utvikling kan den i framtida komplementere inspeksjonsmetodane som brukast. Ved å kombinere georadarundersøking med ein visuell kontroll frå tunnelrommet, kan ein få eit inntrykk av tilstanden av både kvelv og berg, utan destruktive tiltak. Visuell inspeksjon kan gjerast samtidig som georadarundersøkinga, så det vil ikkje krevje lenger stengetid. Tunnelar som er bygd med inspeksjonsrom bak kvelv, kan òg ha nytte av å bruke georadar til inspeksjon. Dette gjeld i område bak kvelv der det er ueigna eller farleg for menneske å ferdast. Som nemnt kan undersøkingar med georadar i kombinasjon med laserscanning vere lovande. Bergoverflate som er laserscanna før kvelvmontasje, kan kontrollerast vidare med hjelp av georadaren i ettertid.

Kapittel 7

Konklusjon og vidare arbeid

I denne forskinga blei ei georadarantenne ført langs ein tunnelvegg for å detektere avstanden inn til berget tre gonger på rad. Sidan det var luft mellom kvelv og bergoverflate, var forskjellen i den dielektriske permittiviteten ϵ_r så stor at bergoverflata kom fram som ei klar grense på store delar av tolkeprofilen. Der bergoverflata ikkje kom tydeleg fram, var det på grunn av uroingar i profilen. Desse kan ha oppstått som følge av metall, elektrisitet, fukt, salt i tunnelrommet, eller av fugeskøytane mellom dei prefabrikkerte kvelva. Tolkeprofilen vart tolka manuelt, og deretter blei det rekna avvik for å vise at studiet er repeterbart.

Avviket mellom dei tre tolkingane var lågt, noko som peikar mot stor presisjon. Det må likevel, for å kunne skilje tolkeavvik frå faktiske endringar i bergmassa, etablerast eit erfaringsgrunnlag, i tillegg til ein database for lagring. Funksjonar for å tilarbeide tolke- og posisjonsdataa burde inkluderast i ei meir brukarvennleg programvare enn MATLAB, for å gjere arbeidet enklare og raskare. Vidare kan utvikling av ei god automatisk tolkeprogramvare i stor grad effektivisere ein eventuell inspeksjonsmetode for tunnel ved bruk av georadar.

Frå denne forskinga er det klart at georadar har eit stort potensial som berginspeksjonsmetode i tunnelar der bergoverflata ligg gøymt bak vass- og frostsikringa. Undersøkingane viste, trass uroingar i datamaterialet, georadaren si emne til å samle repeterbar informasjon om posisjonen til bergoverflata. Forskinga viste òg at totalstasjon og georadar saman kan tileigne bergoverflata eigne koordinatar, noko som kan gjere det lettare å oppdage

endringar i berget. Likevel er metoden framleis i utviklingsfasen. Ei vidare forskning for å få til ei implementering av denne metoden er absolutt å anbefale, spesielt sidan det sidan 2016 vert bygd tunnelar som krev inspeksjon frå tunnelrommet. Samanlikna med andre inspeksjonsmetodar i tunnel, er georadar ein sær s lovande ikkje-destruktiv metode.

Georadar vil nok ikkje kunne erstatte dagens metodar for tunnelinspeksjon. Den kan likevel komplementere ein visuell kontroll frå tunnelrommet, slik at ein kan få eit inntrykk av tilstanden av både kvelv og berg, utan destruktive tiltak. Undersøkingar med georadar kan òg kombinerast med laserscanning. Bergoverflata vert ofte laserscanna før kvelvmon-
tasje. Denne laserscanninga gjev eit 3D-bilete av bergoverflata, og georadar kan i ettertid brukast til å kontrollere om heile, eller delar av bergoverflata er i rørsle. For at georadar i framtida skal kunne brukast i tunnel på ein økonomisk måte, krev det at georadar ikkje berre kan undersøke striper av bergoverflata, slik som i denne forskinga, men også større flater.

7.1 Kva står att?

For at denne georadar skal kunne implementerast som ein ikkje-destruktiv inspeksjonsmetode for berg gøymt bak kvelv, må det vidare arbeid til. Her er det vidare arbeidet som anbefalast gjennomgått punktvis.

- I denne masteroppgåva er det utført georadarundersøkingar på ei stripe av ein tunnelvegg. I ein tunnel er det som regel hengt som er det største problemet med tanke på stabilitet og blokknedfall. Det ville difor vere ideelt å finne ein måte å utføre denne forskinga på heng. Ei løysing kan vere å montere antenna på ein sjølvgåande lift med eit fjøringssystem. Mykje av utfordringa ligg i nærleiken hengt har til lysarmatur, vifter, langsgåande kabelbruer og anna leiande materiale. Det vil kunne skape problem for georadarsignala.
- For å teste om georadar kan bli eit verktøy som kan måle endring i bergmassa opp mot data frå ei tidlegare utført laserscanning av bergoverflata, bør metoden prøvast i ein ny eller nyleg rehabilitert tunnel. I slike tunnelar er det ofte utført ei laserscanning

av bergoverflata før kvelvmontasje. Om data frå georadaren kan samanfalle med punktsky laser scanninga gjev, kan metoden ha eit stort potensial vidare. Så lenge posisjoneringa er riktig, kan laser scanning sørge for at det alltid er ein "før-situasjon" å samanlikne georadardata med.

- For at ein skal kunne skilje tolkeavvik frå reell endring i bergoverflata må det dannast eit erfaringsgrunnlag. På den måten får ein eksakte grenseverdier som tilseier om forskjell i tolkedata burde undersøkast vidare eller ikkje.
- For å sjå på kva faktorar som uroar georadaren i tunnelsamanheng, burde ulike situasjonar testast ut. Georadar bør testast på vinterstid, før og etter vasking av tunnelen. Dette er for å sjå kva effektar vegsalt i tunnelen kan ha på kvaliteten i tolkeprofilen. Det kunne òg vore interessant å sett korleis ulike temperaturar og fuktmengder påverkar tolkedata. Å slå av hovudstraumen før ein gjer undersøkingar i tunnel kunne også vore interessant.
- Det blei i startfasen vurdert å gjere undersøkingane på ein enklare måte, utan like mykje datatilarbeiding i ettertid. Denne metoden blei ikkje forsøkt, men er framleis mogleg å få til. Den dreiar seg om å til dømes spenne opp ei stram, godt synleg snor mellom regelmessig plasserte boltar i kvelvet. Denne snora vert då ei rettesnor for sjåføren under køyring, då antenna skal følge denne snora så godt som mogleg. Om boltane får stå, kan ein seinare knyte opp ein ny tråd og gjere det same på nytt, og på denne måten kontrollere same "stripa". Dette gjev ikkje bergkoordinatar, men det gjev tolkedata for akkurat same strekning på ein enkel og rimeleg måte. Metoden krev riktig nok ein stø sjåfør.
- Denne studia er gjort for å bevise at georadar kan detektere bergoverflate, og saman med ein totalstasjon kan dei gje bergoverflata eigne overflatekoordinatar. Dette er gjort på ein enkel måte i MATLAB, men vidare arbeid vil inkludere å legge inn tilarbeidingsfunksjonane av data i ei betre programvare. Det kan gjerne vere ei eksisterande programvare, som eventuelle kommande brukarar av metoden er kjend med frå før.

Tillegg A

Script fra Matlab

```

%===== Interpolering av koordinat
inndata_1 = xlsread('Maledata.xlsx','Posisjonsdata_Serie1');
x_1 = inndata_1(:,3);
y_1 = inndata_1(:,4);
z_1 = inndata_1(:,5);

l_1 = length(x_1);
f_1 = [1:l_1];
punkt = 1:0.001:l_1;

a_1 = interp1(f_1,x_1,punkt,'linear');
b_1 = interp1(f_1,y_1,punkt,'linear');
c_1 = interp1(f_1,z_1,punkt,'linear');

A_1=a_1';
B_1=b_1';
C_1=c_1'; % Interpolerte punkt for Serie 1

inndata_2 = xlsread('Maledata.xlsx','Posisjonsdata_Serie2');
x_2 = inndata_2(:,3);
y_2 = inndata_2(:,4);
z_2 = inndata_2(:,5);

l_2 = length(x_2);
f_2 = [1:l_2];
punkt2 = 1:0.001:l_2;

a_2 = interp1(f_2,x_2,punkt2,'linear');
b_2 = interp1(f_2,y_2,punkt2,'linear');
c_2 = interp1(f_2,z_2,punkt2,'linear');

A_2=a_2';
B_2=b_2';
C_2=c_2'; % Interpolerte punkt for Serie 2

inndata_3 = xlsread('Maledata.xlsx','Posisjonsdata_Serie3');
x_3 = inndata_3(:,3);
y_3 = inndata_3(:,4);
z_3 = inndata_3(:,5);

l_3 = length(x_3);
f_3 = [1:l_3];
punkt3 = 1:0.001:l_3;

a_3 = interp1(f_3,x_3,punkt3,'linear');
b_3 = interp1(f_3,y_3,punkt3,'linear');
c_3 = interp1(f_3,z_3,punkt3,'linear');

A_3=a_3';
B_3=b_3';

```

```

C_3=c_3'; % Interpolerte punkt for Serie 3

serie1 = [A_1 B_1 C_1]; % Alle seriane med interpolerte punkt
serie2 = [A_2 B_2 C_2];
serie3 = [A_3 B_3 C_3];

%===== Finne koordinaposisjonen til
tolkingspunkta
inndata_4 = xlsread('Margit.xlsx','Runde1');
inndata_5 = xlsread('Margit.xlsx','Runde2');
inndata_6 = xlsread('Margit.xlsx','Runde3');

metrering1 = inndata_4(:,1);
metrering2 = inndata_5(:,1);
metrering3 = inndata_6(:,1);
d = inndata_4(:,5);
d2 = inndata_5(:,5);
d3 = inndata_6(:,5);

% Lengde for Serie 1:
for s = 2:length(serie1)-1;
    L(1) = sqrt((B_1(1)-B_1(2))^2+(A_1(1)-A_1(2))^2);
    L(s) = sqrt((B_1(s+1)-B_1(s))^2+(A_1(s+1)-A_1(s))^2) +
L(s-1);
end

for i = 1:length(metrering1)
    for j = 1:length(serie1)-1
        if L(j) > metrering1(i)
            TALL(i) = j-1;
            break
        else
            end
        end
    end
end

% Lengde for Serie 2:
for s = 2:length(serie2)-1;
    L_2(1) = sqrt((B_2(2)-B_2(1))^2+(A_2(2)-A_2(1))^2);
    L_2(s) = sqrt((B_2(s+1)-B_2(s))^2+(A_2(s+1)-A_2(s))^2) +
L_2(s-1);
end

for i = 1:length(metrering2)
    for j = 1:length(serie2)-1
        if L_2(j) > metrering2(i)
            TALL_2(i) = j-1;
            break
        else
            end
        end
    end
end

```

```

    end
end

% Lengde for Serie 3:
for s = 2:length(serie3)-1;
    L_3(1) = sqrt((B_3(1)-B_3(2))^2+(A_3(1)-A_3(2))^2);
    L_3(s) = sqrt((B_3(s+1)-B_3(s))^2+(A_3(s+1)-A_3(s))^2) +
L_3(s-1);
end

for i = 1:length(metrering3)
    for j = 1:length(serie3)-1
        if L_3(j) > metrering3(i)
            TALL_3(i) = j-1;
            break
        else
            end
        end
    end
end

p = TALL';
p2 = TALL_2';
p3 = TALL_3';

%===== Utrekning og plotting

Serie1_lengde = length(serie1);
n = length(metrering1);

for i=1:n
    Deltax(i) = serie1(p(i)+1,1)-serie1(p(i)-1,1);
    Deltay(i) = serie1(p(i)-1,2)-serie1(p(i)+1,2); % y er
senkande

    beta(i) = atan(Deltay(i)/Deltax(i));
    midtx(i) = serie1(p(i)-1,1) + 0,5*Deltax(i);
    midty(i) = serie1(p(i)-1,2) + 0,5*Deltay(i);
    bergx(i) = (d(i)+0.5+0.17)*sin(beta(i));
    bergy(i) = (d(i)+0.5+0.17)*cos(beta(i));

    ny_x1(i) = midtx(i) + bergx(i);
    ny_y1(i) = midty(i) + bergy(i);
    ny_z1(i) = serie1(p(i),3) + 0.225;
end

NY_X1 = ny_x1';
NY_Y1 = ny_y1';
NY_Z1 = ny_z1';

Serie2_lengde = length(serie2);

```

```

n = length(metrering2);
for i=1:n
    serie2(p2(i)-1,1);
    Deltay2(i) = serie2(p2(i)-1,2)-serie2(p2(i)+1,2); % y er
senkande

    beta2(i) = atan(Deltay2(i)/Deltax2(i));
    midtx2(i) = serie2(p2(i)-1,1) + 0,5*Deltax2(i);
    midty2(i) = serie2(p2(i)-1,2) + 0,5*Deltay2(i);
    bergx2(i) = (d2(i)+0.5+0.17)*sin(beta2(i));
    bergy2(i) = (d2(i)+0.5+0.17)*cos(beta2(i));

    ny_x2(i) = midtx2(i) + bergx2(i);
    ny_y2(i) = midty2(i) + bergy2(i);
    ny_z2(i) = serie2(p2(i),3) + 0.225;
end

NY_X2 = ny_x2';
NY_Y2 = ny_y2';
NY_Z2 = ny_z2';

Serie3_lengde = length(serie3);
n = length(metrering3);

for i=1:n
    Deltax3(i) = serie3(p3(i)+1,1)-serie3(p3(i)-1,1);
    Deltay3(i) = serie3(p3(i)-1,2)-serie3(p3(i)+1,2); % y er
senkande

    beta3(i) = atan(Deltay3(i)/Deltax3(i));
    midtx3(i) = serie3(p3(i)-1,1) + 0,5*Deltax3(i);
    midty3(i) = serie3(p3(i)-1,2) + 0,5*Deltay3(i);
    bergx3(i) = (d3(i)+0.5+0.17)*sin(beta3(i));
    bergy3(i) = (d3(i)+0.5+0.17)*cos(beta3(i));

    ny_x3(i) = midtx3(i) + bergx3(i);
    ny_y3(i) = midty3(i) + bergy3(i);
    ny_z3(i) = serie3(p3(i),3) + 0.225;
end

NY_X3 = ny_x3';
NY_Y3 = ny_y3';
NY_Z3 = ny_z3';

figure
scatter3(NY_X1,NY_Y1,NY_Z1,19,'^','filled','MarkerFaceColor',
[.9 .0 .1])
hold on
scatter3(NY_X2,NY_Y2,NY_Z2,19,'filled','MarkerFaceColor',[.5 .

```

```
1 .5])
hold on
scatter3(NY_X3,NY_Y3,NY_Z3,19,'d','filled','MarkerFaceColor',
[.2 .8 .3])
hold off
grid on

xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')

serie_1 = [NY_X1 NY_Y1 NY_Z1];
serie_2 = [NY_X2 NY_Y2 NY_Z2];
serie_3 = [NY_X3 NY_Y3 NY_Z3];
```

Tillegg B

Rapport for posisjonering av georadar



Posisjonering av GeoRadar

Forsøk nr. 2 - 14.03.2018

Posisjonering av GeoRadar

Målt av: Christer Gabrielsen

Målt den: 22. februar 2018

Koordinatsystem: Lokalt system som ikke er georefert eller orientert mot nord. Skalafaktor 1:1

Utstyr benyttet:

Totalstasjon: Leica TCPR 1201+ R400

Prisme montert på GeoRadar: Leica 360 graders prisme

Prisme fastmerker: Leica rundprisme (GPR111)

Fastmerker:

Opprettet fire fastmerker, merket med bolt i bankett. Nummerert HP1, HP2, HP3 OG HP4.

HP1: Plasser ca. 21387 m



HP2: Plassert ca. 21324 m



HP3: Plassert på ca: 2300 m, ved Teknisk rom T18



HP4: Plassert på ca. 21270 m



Plassering av fastmerkene referer seg til egen meter merking i tunnelen.

Beregning av fastmerker:

Fastmerkene ble beregnet i Gisline landmåling. Fastmerke HP2 ble gitt koordinat x: 1000 y: 500 h: 10. Det ble opprettet to fiktive fastmerker: HP10 og HP22 for beregning av de etablerte fastmerkene HP1, HP3 og HP4. Fastmerkene ble så utjevnet.

Beregning av observasjoner:

Observasjonene ble beregnet i GisLine landmåling, ved bruk av polarberegning.

Innmåling av GeoRadar:

Prisme (type Leica 360 graders prisme) ble montert og dokumentert av NTNU. Totalstasjonene ble satt opp til automåling for hver 0,200 m. Det ble totalt målt 5 runder, 2 runder ble forkastet (nummer 3 og 4).

Runde 1: Punktnavn starter på A og referert som serie 1

Runde 2: Punktnavn starter på B og referert som serie 2

Runde 3: Forkastet

Runde 4: Forkastet

Runde 5: Punktnavn starter på E og referert som serie 3

Første måling i hver serie ble foretatt da bilen med radaren stod i ro, måling nummer to blir etter å ha kjørt 0,200 m osv.. Siste punkt i hver serie er der bilen stanset.

Vedlagte filer:

Fastmeker.kof	Inneholder koordinater på de etablerte fastmerkene
observasjoner_rådata.kof	observasjoner ubehandlet
Serie1.kof	Koordinater for serie 2
Serie2.kof	Koordinater for serie 2
Serie3.kof	Koordinater for serie 3
utjevning_fastmerker.dok	Tekstfil med dokumentasjon på fastmerkene

KOF-Filer: Eget format, tekst basert, som leses av landmålings/geoamtikk programvare

Merknader:

Da målinger utført kun mot aksene på radaren, så blir ikke ev. helning på radaren registrert. Det er derfor viktig hvis man skal foreta målinger med et hvis tidsrom at avstand fra bil til vegg, og avstand fra bil til radar registreres slik at man får samme forhold hver gang. I dette tilfellet så er alle tre rundene utført med relativt like avstander. Ev. kan man monterer to prismer på radaren.

TPS observasjonsrapport

Rapport laget: 21/03/2018 12:07:09

Prosjektdetaljer

Generelt		Kundedetaljer		Master-koordinatsystem	
Prosjektnavn	Georadar	Kundenavn:	-	Navn på koordinatsystem	NTM Sone 10
Eier:	-	Kontaktperson:	-	Transformasjonstype:	Klassisk 3D
Oppmålingsleder:	Gabrielsen Christer	Antall:	-	Restfeildeling:	Ingen
Dato laget	21/03/2018 10:42:49	Epost:	-	Ellipsoide:	WGS 1984
Siste bruk:	21/03/2018 10:42:50	Skype:	-	Projeksjonstype:	Transverse Mercator
Programvare	Infinity 2.1	Website:	-	Geoidmodell:	HREF2016B_NN2000_EUREF89
				CSCS-modell:	-
Sti:	H:\documents\Spesialmåling\Georadar\Georadar\Georadar.iprj				
Størrelse:	3,2 MB				
Kommentarer:	-				

Stasjon Id: 160318 - Ukjent

Dato/tid:	14/03/2018 23:46:52	y:	94 871,6254 m	St.avv. y	-
Punktrolle:	TPS-stasjon	x:	1 602 227,5807 m	St.avv. x	-
Instrumenthøyde:	0,0000 m	Høyde:	34,7606 m	St.avv. H	-
Retning:	0	Instrumenttype:	TCRP1201+	Instrument sno.:	241014
Orienteringskorreksjon:	0,0000 gon	Maks. geom. PPM:	0,0	Maks. atmosf. PPM:	0,0
Stasjonsmålestokk:	-	Min. geom. PPM:	0,0	Min. atmosf. PPM:	0,0

#	Til	Refl.høyde [m]	Måleobjekt	Kikkertstilling	Hv rå [gon]	Vv [gon]	Skråavst [m]	Måleprogram	Tilsiktning	Dato/tid
1	hp4	1,5820	Leica Circ Prism	I	366,7952	99,0419	52,2100	Tracking	Lås	14/03/2018 23:51:13
2	hp4	1,5820	Leica Circ Prism	I	366,7933	99,0420	52,2090	Tracking	Lås	14/03/2018 23:51:28
3	hp3	1,5240	Leica Circ Prism	I	395,9006	99,9333	25,9820	Tracking	Lås	14/03/2018 23:52:01
4	hp3	1,5240	Leica Circ Prism	I	395,9019	99,9332	25,9810	Tracking	Lås	14/03/2018 23:52:12
5	hp1	1,5310	Leica Circ Prism	I	154,9977	101,2438	64,1670	Tracking	Lås	15/03/2018 00:06:25
6	hp1	1,5310	Leica Circ Prism	I	154,9977	101,2438	64,1670	Tracking	Lås	15/03/2018 00:06:41
7	a0001	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2155	100,6789	156,9221	Tracking	Lås	15/03/2018 00:10:50
8	a0002	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2220	100,6883	156,7221	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:23
9	a0003	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2293	100,7010	156,5141	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:24
10	a0004	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2377	100,7063	156,3111	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:25
11	a0005	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2442	100,7123	156,0921	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:26
12	a0006	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2497	100,7189	155,8891	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:27
13	a0007	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2592	100,7248	155,6601	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:28
14	a0008	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2667	100,7220	155,4371	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:29
15	a0009	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2748	100,7218	155,2361	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:29
16	a0010	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2890	100,7235	155,0011	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:30
17	a0011	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2891	100,7249	154,7841	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:31
18	a0012	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,2968	100,7302	154,5551	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:31
19	a0013	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3040	100,7311	154,3351	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:32
20	a0014	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3129	100,7356	154,1181	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:32
21	a0015	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3190	100,7359	153,9121	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:33
22	a0016	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3274	100,7330	153,7071	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:34
23	a0017	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3367	100,7296	153,4921	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:34
24	a0018	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3435	100,7269	153,2101	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:35
25	a0019	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3496	100,7234	152,9621	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:35
26	a0020	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3549	100,7236	152,7561	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:36
27	a0021	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3612	100,7235	152,5421	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:36
28	a0022	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3574	100,7211	152,3271	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:37
29	a0023	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3715	100,7204	152,1071	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:37
30	a0024	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3759	100,7233	151,8931	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:38
31	a0025	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3817	100,7236	151,6791	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:38
32	a0026	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3879	100,7234	151,4311	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:39
33	a0027	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3933	100,7236	151,2031	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:39
34	a0028	0,0000	Leica 360° Prism	I	161,3996	100,7264	150,9871	Tracking	Lås	15/03/2018 00:11:40

Litteratur

- 3D-radar AS (2010). Opening a new dimension for ground penetrating radar. Henta frå: <http://www.3d-radar.com/wp-content/uploads/2010/04/geoscope-technical-note-2010.pdf> (11.04.2018).
- Abraham, O. og Dérobert, X. (2003). Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study. *NDT and E International*, 36(6):411–418.
- Annan, A. (2009). NDT transportation. In Jol, H. M., editor, *Ground Penetrating Radar*, pages 3–40. Elsevier.
- Ayala-Cabrera, D., Campbell, E., Carreño-Alvarado, E., Izquierdo, J., og Pérez-García, R. (2014). Water leakage evolution based on gpr interpretations. *Procedia Engineering*, 89(C):304–310.
- Bosela, P. A., Lek-udom, S. and Mullangi, S., og Delatte, N. (2006). Field Comparison of NDE Methods for Tunnel Condition Assessment.
- Cardarelli, E., Marrone, C., og Orlando, L. (2003). Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 52(2):93–102.
- Delatte, N., Chen, S.-E., Maini, N., Parker, N., Agrawal, A., Mylonakis, G., Subramaniam, K., Kawaguchi, A., Bosela, P., Mcneil, S., og Miller, R. (2003). Application of nondestructive evaluation to subway tunnel systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1845:127–135.
- Hawks, A. og Spoerr, B. (2014). Innovative infrastructure inspection technologies. *Tunnels & Tunnelling International*, pages 38–43.

- Lalagüe, A. (2015). Use of ground penetrating radar for transportation infrastructure maintenance.
- Lindstrøm, M., Magnussen, A., og Langelid, A. (2013). Inspeksjon av berg og bergsikring i vegtunneler, Statens Vegvesen.
- Nilsen, B. (2011). Cases of instability caused by weakness zones in norwegian tunnels. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(1):7–13.
- Parkinson, G. og Ékes, C. (2008). Ground penetrating radar evaluation of concrete tunnel linings. *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 16-19, 2008, Birmingham, UK*.
- Saarenketo, T. (2006). Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys.
- Saarenketo, T. (2009). NDT transportation. In Jol, H. M., editor, *Ground Penetrating Radar*, pages 393–444. Elsevier.
- Shaw, M., Millard, S., Molyneaux, T., Taylor, M., og Bungey, J. (2005). Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *NDT and E International*, 38(3):203–212.
- Skogseth, T. (2014). Grunnleggende landmåling.
- SVV (2010). Håndbok 021 - Vegtunneler.
- SVV (2014a). Håndbok R610 - Standard for drift og vedlikehold av riksveger.
- SVV (2014b). Prosesskode : Standard beskrivelse for vegkontrakter : 1 : Hovedprosess 1-7 : [Håndbok R761] : Prosesskode 1.
- SVV (2016). Håndbok N500 - Vegtunneler.
- SVV (2017). ÅDT Nivå1-punkt Sør-Trøndelag, Statens Vegvesen. Tilgjengelig frå <http://www.forestry.ubc.ca/conservation/power/>.

SVV, RIF, MEF, og EBA (2007). Tunnelsikkerhet : rapport.

Tabrizi, K., Celaya, M., Miller, B., Wittwer, A., og Ruzzi, L. (2017). Damage assessment of tunnel lining by mobile laser scanning pittsburgh, pennsylvania, implementation phase of FHWA SHRP 2 R06G Project. *Transportation Research Record*, (2642):166–179.

Wimsatt, A., White, J., Leung, C., og Scullion, T. (2014). *Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind Or Within Tunnel Linings*. SHRP 2 report.

Xie, X., Liu, Y., Huang, H., Du, J., Zhang, F., og Liu, L. (2007). Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the shanghai metro line, china. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(3):253–261.

Zhang, F., Xie, X., og Huang, H. (2010). Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2):99–107.