

Nytteverdi av grunnundersøkelser med georadar i nye vegprosjekter

KRISTIAN SANDLAND KOLSTAD



VEILEDER

Rein Terje Thorstensen, UiA
Jon Olav Upsal, Statens Vegvesen

Universitetet i Agder, 2022
Fakultet for teknologi og realfag
Institutt for Ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> • ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. • ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. • ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. • har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. • ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Opgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved institutt for Ingeniørvitenskap og teller 30 studiepoeng. Den er skrevet i perioden januar til mai 2022. Og markerer slutten på min 5 år lange sivilingeniørutdanning, satt sammen av 3 år ved USN campus Porsgrunn (Høgskolen i Telemark ved oppstart, USN ved endt løp), og nå 2 år ved Universitetet i Agder campus Grimstad.

Jeg vil takke Rein Terje Thorstensen, min veileder ved UiA for å ha kommet med gode tilbakemeldinger og støtte underveis i prosjektet. Han har også gitt faglige innspill, som har vært essensielt for gjennomføring av denne oppgaven.

En stor takk rettes også til plan og prosjekteringsleder Jon Olav Upsal ved Statens vegvesen, for å ha kommet med denne spennende oppgaven. Han har vært meget behjelpelig med svare på spørsmål og veiledning underveis.

Takk til alle som har stilt opp til intervju og bidratt med sine synspunkter, kunnskap og erfaring. I rapporten er disse anonymisert. Å ha fått muligheten til å diskutere et tema jeg er genuint interessert i, med viktige folk i bransjen har vært utrolig givende. Jeg har lært enormt mye fra disse samtalene, og vil ta med meg dette videre ut i arbeidslivet.

Målet med denne masteroppgaven er å identifisere hvordan resultatet fra grunnundersøkelser med den geofysiske metoden georadar (GPR) kan skape nytteverdi for byggherre og entreprenør ved gjennomføring av nye vegprosjekt.

Grimstad, 27.05.2022

Kristian Sandland Kolstad

Summary

This master thesis addresses the topic of utility value of site investigations with ground penetrating radar in new road projects. The thesis aims to answer the following research question: *How can site investigations with ground penetrating radar create utility value for both the project owner and the contractor?*

To answer the research question, a literature study, a field investigation and five interviews were conducted. The theoretical basis was the principal of propagation of electromagnetic waves through the ground.

Literature about ground penetrating radar usage in Norway and at international level showed a tendency of usage in maintenance and rehabilitation. The interviews, however, showcased more usage of the ground penetrating radar when planning new projects.

In conclusion, the use of site investigations with ground penetrating radar can create utility value for both the project owner and the contractor in several ways. First, the identification of layers in the ground where there is uncertainty about the conditions will lead to better mass balance. Second, the risk attached to unforeseen changes in the conditions of the ground will be reduced and thereby the HSE will be strengthened. Third, the knowledge about layers and depth in the bedrock will be useful for both planning and execution of new projects. Fourth, the gap between drill points will be tightened.

Recommendations for future research emerged from the limitations of the study. Future research should include a discussion of the economical aspect of implementing the ground penetrating radar in site investigation.

Innhold

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Figurliste.....	viii
Tabell-liste	x
1. Innledning	0
2. Samfunnsperspektiv.....	2
3. Kunnskapsbakgrunn	3
3.1. Grunnundersøkelser i vegprosjekt	3
3.1.1. Krav og føringer statens vegvesen	3
3.1.2. Metoder og resultater fra grunnundersøkelser	7
3.2. Georadar (GPR) – teori og virkemåte	8
3.2.1. Grunnleggende prinsipp	8
3.2.2. Materialeegenskaper som påvirker EM-bølgene	10
3.2.3. Viktige sammenhenger - frekvens, bølgelengde og hastighet	13
3.2.4. Ulike GPR systemer	15
3.2.5. Styrker og svakheter med georadar	17
4. Forskerspørsmål.....	17
4.1. Forskningsspørsmål og underspørsmål.....	17
4.2. Avgrensninger.....	18
5. Case og materialer	18
5.1. Generelt.....	18
5.2. IQMaps – programvare	19
6. Metode.....	20
6.1. Litteraturstudie.....	21
6.1.1. Forskningslitteratur	22
6.1.2. Etablert litteratur.....	23
6.1.3. Litteratur fra nasjonal vegmyndighet.....	23
6.2. Intervju	24
6.2.1. Gjennomføring	24
6.2.2. Hvem er spurt.....	26
6.2.3. Hvordan svarene er analysert	27

6.3.	Feltundersøkelser	27
6.4.	Egen dataanalyse - prosessering og tolkning av georadar data	27
7.	Resultat	28
7.1.	Bruk av georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter	28
7.1.1.	Vegvesenets publikasjoner og i norsk forskningslitteratur	28
7.1.2.	Lagdeling i overbygningen	32
7.1.3.	Lagdeling i undergrunnen og dybde til fjell	33
7.1.4.	Nedgravd infrastruktur – rør, stikkrenner, kabler osv	38
7.2.	Utføring, kalibrering og tolkning av resultatene fra grunnundersøkelser med georadar	39
7.2.1.	Hva resultatet fra georadarundersøkelsen representerer	39
7.2.2.	Kalibrering av overføringshastigheten (v) til EM-bølgene	43
7.2.3.	Prosessering av georadar-data	46
7.3.	Intervjuer – kvantifisering av nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt	47
7.3.1.	Grunnundersøkelser i dag	48
7.3.2.	Nytteverdi og nytte av grunnundersøkelser	50
7.3.3.	Grunnundersøkelser med GPR	52
7.3.4.	Annet	56
7.4.	Feltundersøkelse – målinger og observasjoner	57
7.5.	Egen dataanalyse av georadarmålinger	61
7.5.1.	DN400 stikkrenne under vegen	62
7.5.2.	Fjell i dagen langs vegen	62
7.5.3.	Lag i overbygningen	63
7.6.	Tidligere tolkninger av georadarmålinger	64
8.	Diskusjon	65
8.1.	Hvordan benyttes georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter? 65	
8.2.	Hvordan utføres, kalibreres, og tolkes resultatene fra grunnundersøkelser med bruk av georadar?	67
8.3.	Hvordan oppstår eller kvantifiseres nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt?	67
8.4.	Hvordan kan nytteverdien optimaliseres ved bruk av georadar?	68
8.5.	Svakheter og begrensninger	68
9.	Konklusjon	69
10.	Anbefalinger	69

11. Referanser.....	70
12. Vedlegg.....	73
12.1. Intervjuguide	73

Figurliste

Figur 3-1 Lagene i en vegoverbygning. Kopiert fra [13]	4
Figur 3-2 Vegens elementer. Modifisert (fjernet kapittelhenvisningene) fra [14].....	4
Figur 3-3 Grunnundersøkelser i ulike planfaser, kopiert fra [3, pp. 1-7].....	6
Figur 3-4 Ulike grunnundersøkelser og egnet undersøkelsesmedium, kopiert fra [3, pp. 1-13]	7
Figur 3-5 Opplysninger fra de ulike grunnundersøkelsesmetodene, kopiert fra [3, pp. 1-14]	8
Figur 3-6 Eksempel på et 2d radargram med et 50-MHz system over to vegtunneler (øverste del av figuren). Forskjellen i relativ dielektrisk permittivitet mellom berg og luft gir de store hyperblene t.v. i den nederste figuren. Det er amplituden til GPR signalet som vises som en funksjon av posisjon (horisontal akse) og signalets reisetid (vertikalaksen). Kopiert fra [16, p. 4].....	10
Figur 3-7 Array av typen Stream EM fra IDS, går i kilden under avansert utstyr, Kopiert fra: [26].....	16
Figur 3-8 Luftkoplede georadar montert bakpå en av SVV sine målebiler. Kopiert fra [23, p. 308]	16
Figur 3-9 Bildeserie med bakkekoplede georadarer. Kopiert fra [25].....	17
Figur 5-1 Strekningen av Rv.41 under utbedring, figur a) viser vegstrekningen fra A til B, figur b) viser vegstrekningens plassering i forhold til Arendal og Grimstad. Foto: Google Maps.....	19
Figur 5-2 Utsnitt av brukergrensesnittet i programvaren IQMaps fra IDS GeoRadar. Eget skjermbilde	20
Figur 6-1 Standard filter benyttet til prosessering av dataen. [Foto tatt i IQMaps]	28
Figur 7-1 Frostfronten i vegens tverrprofil, t.v. om vinteren og t.h. om våren. Kopiert fra [7, p. 64] ..	31
Figur 7-2 Profil på tvers av myra kombinert med test-data, den nederste grønne horisontale linjen viser refleksjon fra mineralsk jord (over hele figuren) og den gule horisontale linjen viser to synlige lag. Kopiert del a) fra: [31] (del b, som ikke er inkludert her, viser resultatet fra en CMP)	36
Figur 7-3 Identifisering av forskjellige teksturer i radargrammene kombinert med manuelle målinger av lagdelingen gjort in situ. (betegnelsen i figuren F1-F5 brukes ikke) Kopiert fra: [31]	37
Figur 7-4 Georadarmålinger kombinert med manuelle målinger. Fargeskalaen viser endringen i grunnen langs vegen. Kopiert fra: [31].....	37
Figur 7-5 Typiske refleksjoner fra en georadarmåling i en lagdelt struktur med en luft-koplet radar; (a) tverrsnitt som viser refleksjoner i en struktur med flere lag; (b) skisserte refleksjoner fra lagene i et enkelt 1D signal. Kopiert fra: [47, p. 329].....	40
Figur 7-6 Illustrasjon av hvordan et enkelt signal (a) kombineres til å danne et radargram (b), og til sist en time slice (c). Kopiert fra: [39, p. 203].....	41
Figur 7-7 Eksempel på 2D radargram. Kopiert fra: [15, p. 5]	42
Figur 7-8 Georadarprofil samlet inn med en luftkoplede antenne og dens enkelte puls. Profilen har refleksjoner fra overganger mellom to medier med ulike dielektriske egenskaper (epsilon). Lag 1 beskriver vegdekke, lag 2 beskriver bærelaget, lag 3 beskriver forsterkningslaget (sub-base), og lag 4 beskriver et filterlag. Figuren viser at den dielektriske verdien til materialer (fuktigheten) øker nedover i grunnen fra vegdekke med unntak av den dielektriske verdien til filterlaget (ϵ_4), som er lavere enn for forsterkningslaget (sub-base), og er derfor inverteres polariteten (svart linje mellom to hvite). Kopiert fra: [21, p. 6]	43
Figur 7-9 Curve-fitting på data samlet inn i et tunnelhvelv av betong. Den nederste hyperplene t.v. i figuren flyttes til den hyperbelen som skal måles, deretter justeres hastigheten (v) inntil en god passform er oppnådd. Kopiert fra: [15, p. 52].....	45
Figur 7-10 Konseptene bak kalibreringsmetodene Common midpoint (CMP) og Wide Angle Reflection and Refraction (WARR). Kopiert fra: [22, p. 119]	46

Figur 7-11 Punkter langs eksisterende veg for bruk i eget tolkningsarbeid. Fra venstre mot høyre; Rød = stikkrenne, Blå = fjell i dagen, Oransje = Lag i overbygningen	57
Figur 7-12 Bilder fra anleggsområdet. Begge tatt i retning Gauslå. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	58
Figur 7-13 Veggen sett fra innløp DN 400 stikkrenne, bilde t.v. vegen retning Hynnekleiv og bilde t.h. fra innløp rett over vegen mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	58
Figur 7-14 Utløp DN 400 stikkrenne ut i Guslåtjørna, bilde t.v. utløp stikkrenne og bilde t.h. måling av dybde fra topp slitelag til toppen av stikkrennas utløp ca. 99 cm. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	59
Figur 7-15 Innløp DN 400 stikkrenne ut i Guslåtjørna. [Foto: Jon Olav Upsal].....	59
Figur 7-16 Fjell i dagen bak autovern i yttersving mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	60
Figur 7-17 Nærbilde fjell i dagen bak autovern i yttersving mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	60
Figur 7-18 Synlige lag i overbygningen ved autovern, begge bilder er tatt på samme sted bare med litt ulik avstand. [foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]	61
Figur 7-19 Øverste lagene i overbygningen, bilde fra venstre mot høyre; Asphaltdekke (ukjent type) ca. 20 cm, Avrettingslag / gammelt grusdekke ca. 12 cm, og bærelag minst ca. 40 cm. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022].....	61
Figur 7-20: a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 84 cm ($v=11,34$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 7,0); c) Radargram med hyperbelen markert med rød pil (84 cm dyp). 600 MHz antenne. [Foto: eget arbeid i programmet IQMaps]	62
Figur 7-21 a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 104 cm ($v=10,0$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 9,0); c) Radargram med mulig fjell markert med stiplet rød linje (midten). 200 MHz antenne. [Foto: eget arbeid i programmet IQMaps]	63
Figur 7-22 a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 33 cm ($v=12,25$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 6,0); c) Radargram med mulig bunn asfalt markert med rød stiplet linje. 600 MHz antenne. [Foto: eget arbeid i programmet IQMaps].....	64
Figur 7-23 Tolkning av lag i vegkroppen fra den eksterne rapporten, figuren viser en rød (nederst) og en grønn (øverst) linje med endringer ved henholdsvis ca. 1 m og ca. 40-50 cm dybde. Kopiert fra [48]	65
Figur 7-24 Tolkning av lag i vegkroppen fra den eksterne rapporten, figuren viser det som er antatt å være tykkelsen på asfalten (rød linje) ca. 10-20 cm dypt. Kopiert fra [48].....	65

Tabell-liste

Tabell 3-1 Verdier for relativ permittivitet, overføringshastigheter og statisk konduktivitet for materialer i grunnen og i vegkonstruksjoner. (går over to sider)	11
Tabell 6-1 Metodene som er brukt til å svare på forskningsspørsmålets underspørsmål.....	20
Tabell 6--2 Nummerering av intervjuobjekter	26
Tabell 7-1 Oversikt over frekvenser, penetrasjonsdybde, oppløsning og bruksområde for georadarer i forbindelse med grunnundersøkelser. Gjengitt fra [25]	29
Tabell 7-2 Nummerering av intervjuobjekter – KOPI av tabell Tabell 6--2	47

1. Innledning

Alle konstruksjoner trenger en eller annen form for fundament eller noe å stå/ligge oppå. Larsen beskriver Larsen [1] fundamentet som en viktig del av enhver konstruksjon. Mens Saveren [2] forklarer at uavhengig av om det er en liten eller stor konstruksjon, så er enhver konstruksjon avhengig av bakken og et fundament. Dette må igjen ha en eller annen form for kobling med bakken og dens iboende usikkerhet.

Vegprosjekter skiller seg fra andre byggeprosjekter, som f.eks. en boligblokk, ved at de er lineære og strekker seg gjerne over større avstander. Dette øker muligheten for at grunnens sammensetning og lagdeling, f.eks. dybde til fjell, endrer seg langs veglinja.

For veger, påpeker blant annet håndbok V220 [3, p. kap 1 s.2] at grunnforholdene er avgjørende når det kommer til problemer under bygging og planlegging av veger. Derfor utføres det grunnundersøkelser for å innhente grunnlagsdata for å utforme prosjektene. På den andre siden, så er grunnundersøkelser som grunnboring, som beskrevet i [3, p. kap 1 s.29] kostbart og valg av uegnet boremetode eller feil plassering av boringene må unngås. Det kan også bli kostbart dersom grunnundersøkelsen er mangelfull, da problemer kan oppstå under anleggsperioden eller feil løsning kan velges [3, p. kap1 s.29].

Fysiske undersøkelsesmetoder som f.eks. totalsondering (borerigg), kan ifølge [4, p. 58] gi grunnlag for å vurdere relativ fasthet i løsmasser og bedømme jordarter, samt påvise fjell. Denne metoden gir da resultater i det enkelte punktet som kan benyttes videre i planleggingen. Hva som finnes i mellom disse punktene er uvisst, og det benyttes gjerne interpolering i form av rette linjer eller u- og v-profiler avhengig av terrenget, og/eller ingeniørmessig skjønn.

Vegvesenet gir føringer for hvordan både horisontal og vertikal geometri skal utformes, samtidig som det er ønskelig å opprettholde massebalanse i prosjektet.

Basert på grunnundersøkelser og annen tilgjengelig informasjon, blir det i dag gjerne generert en terrengmodell i et BIM verktøy, f.eks. Novapoint, som grunnlag for å dimensjonere veglinjen etter de krav og føringer som er gitt av SVV til f.eks. horisontal og vertikal geometri. Eventuelle avvik mellom prosjektet og virkelig terreng blir åpenbart ettersom prosjektet gjennomføres.

Utgangspunktet denne rapporten er et samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen og Universitetet i Agder, med mål om å utvide kunnskapen om alternative metoder for innsamling av data om grunnforhold i forbindelse med bygging av ny veg i terrenget– eller ved oppgradering av eksisterende veg. Bakgrunnen til dette behovet ligger i dagens metoder for grunnundersøkelser, som borerigg eller graving. Disse gir oss i dag god informasjon og data i det enkelte punkt som undersøkes, men ulempen er derimot at metodene er både tidkrevende og kostbare. Som en konsekvens kan derfor ikke hele området dekkes, og det må benyttes interpolering og ingeniørmessig skjønn mellom undersøkelsespunktene.

Blant disse alternative metodene, finnes det blant annet geofysiske metoder. Disse faller inn under kategorien ikke-destruktive metoder, som benytter elektriske, elektromagnetiske eller fysiske bølger, sendt gjennom bakken til å innhente informasjon om grunnen på hver sin måte.

En av disse metodene er georadar, som benytter elektromagnetiske bølger. Denne er blant annet inkludert i Eurokode 7 [5, p. p 2.4.1.1.], der under navnet Ground Penetrating Radar (GPR), som ett av flere eksempler på geofysiske undersøkelser (eng: geophysical investigations) som kan gjøres ute i felt, for bruk i prosjekteringsarbeidet (eng: design investigations). Georadar som metode er ifølge NGI [6], egnet å lokalisere objekt i bakken, som rør, hulrom og større gjenstander, og å kartlegge lagdeling i løsmasser.

På forskningsfronten relatert til veger her i Norge, er det allerede utgitt flere publikasjoner som handler om bruk av georadar til ulike formål. Blant annet har Anne Lalagüe i sin PhD-avhandling fra 2015 [7] sett på bruk av georadar innen vedlikehold av infrastruktur som veger, jernbane, tunnelhvelv, mm. Geir Wivestad i sin masteroppgave [8] fra 2017, har sett på tilstandsundersøkelse av vegkonstruksjoner med georadar, mens Raymon Helland [9] i 2018 så på bruk av georadar til å definere hulrom i asfalt. I tillegg satte Hoff et.al. allerede i 2008 [10] søkelys på hvordan georadar kan brukes til å identifisere seksjoner av eksisterende veg som er svake i forbindelse med utbedringer. Felles for publikasjonene nevnt ovenfor, er at kostnader ikke har hatt et stort fokus.

Derimot, er det gjennomført en studie av Christensen et.al. [11] i 2015 her i Norge (30 km E6 nordøst for Oslo), som så på bruk av en Airborne Electromagnetic (AEM) undersøkelse til å supplere de geotekniske undersøkelsene og besparelsen dette ga i kroner. Denne type undersøkelse er ikke identisk til georadar, men er beslektet. Studiet konkluderte med at kostnaden for grunnundersøkelser (eng: site investigations) kan bli betydelig redusert med denne metoden. Besparelsen ble estimert til 1000 – 10000 NOK/m for denne type undersøkelse, avhengig av ønsket nøyaktighet for modellen. Analysemetoden de utvikler er tiltenkt brukt i en tidligfase av grunnundersøkelsene, på grunn av presisjonsbegrensningene til de geofysiske målingene.

Som det kan trekkes fram fra de overnevnte publikasjonene, er det allerede gjennomført flere undersøkelser og skrevet en del om bruk av georadar på veger i Norge. Det er også gjennomført undersøkelser knyttet til kostnadsbesparelser av en lignende metode. Derimot, er det få undersøkelser som ser på hvordan bruken av georadar som metode kan sees i en større sammenheng, altså ikke kun hvilke data og resultater metoden kan gi oss – men hvordan denne dataen kan brukes ved både planlegging og gjennomføring av vegprosjekter. Dette har dannet utgangspunktet for min masteroppgave og denne rapporten som svaret på de manglende undersøkelsene.

2. Samfunnsperspektiv

Det har i nyere tid vært mer fokus på å velge miljøvennlige og bærekraftige løsninger i bygg- og anleggssektoren. Dette har vært både for å nå utslippsmålene Norge har forpliktet seg til, men også for å utnytte og ta vare på de ressursene vi har på en god måte. Her menes det ressurser som materialer, natur og miljø.

Det finnes mange spennende og innovative løsninger som kan prosjekteres og planlegges, men alle disse må planlegges på et grunnlag. Dette grunnlaget må være så virkelighetsnært som mulig, og samtidig praktisk og kostnadseffektivt å hente inn. Hvor godt dette grunnlaget er viker inn på hvilken konstruksjon vi sitter igjen med. Dette kan ses i sammenheng med FNs bærekraftsmål nr. 9, som omhandler infrastruktur, industrialisering og innovasjon.

Samtidig skal det bygges konstruksjoner som er trygge og varige, og som vi i tillegg skal ha råd til å bygge og vedlikeholde. Dette kan ses i lys av FNs bærekraftsmål nr.11, hvor byer og lokalsamfunn skal bygges til å være trygge, robuste og bærekraftige.

Bedre grunnundersøkelser vil virke inn på både bygge- og anleggssektoren. Grunnundersøkelsene kan være enten for å bygge nytt, vedlikeholde eller rehabilitere. Derfor er det et behov for å se på metoder potensielt kan bidra med supplerende informasjon knyttet til grunnundersøkelser.

3. Kunnskapsbakgrunn

I dette kapitlet presenteres bakgrunnen som trengs for å forstå forskningsspørsmålet i kapittel 4. Dette gjøres gjennom bruk av Vegvesenet håndbøker og relevant litteratur knyttet til georadar. For metodene som er benyttet til å samle inn denne informasjonen, se kapittel 6. Dette kapitlet har følgende inndeling:

Grunnundersøkelser i vegprosjekt - side 3

Gir en kort introduksjon til elementene i vegkroppen og relevante begreper for den geotekniske prosjekteringen i ulike faser av et vegprosjekt.

3.2. Georadar – teori og virkemåte - side 8

Gir en kort introduksjon til hvordan georadar som metode fungerer, materialegenskaper som påvirker resultatet og viktige sammenhenger som frekvens og bølgelengde. Det gis også en kort beskrivelse av ulike georadar systemer som finnes og brukes i dag.

3.1. Grunnundersøkelser i vegprosjekt

I dette kapitlet introduseres noen av de grunnleggende standardene, føringene, metodene og begrepene som benyttes i geoteknisk prosjektering innen vegprosjekt. Å være geoteknikker er en spesialistjobb. Dette kapitlet vil derfor ikke gi en komplett oversikt over alle metoder og regelverk innenfor dette fagfeltet, men har som formål å introdusere begreper og elementer i vegkroppen som benyttes senere gjennom rapporten.

3.1.1. Krav og føringar statens vegvesen

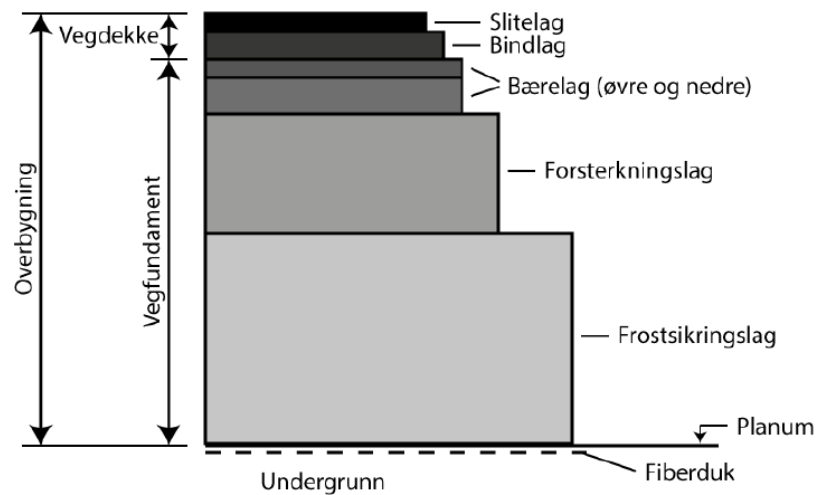
For vegbygging i Norge, er det Statens vegvesen (SVV) vegnormal N200 [12] som er den grunnleggende tekniske standarden. Denne inneholder flere føringar og krav for utforming av blant annet; overbygning, underbygning, fyllinger, skråninger, skjæringer og håndtering av overvann. Figur 3-1 viser lagene i vegoverbygningen, og Figur 3-2 en illustrasjon av elementene i vegen. For den geologiske og geotekniske prosjekteringen viser N200 [12, p. pkt.1.1.1.] til blant annet eurokodene (EC0 og EC7), og andre publikasjoner fra SVV og NVE for en ytterligere beskrivelse av den geotekniske prosjekteringa:

- NS-EN 1990 (EC0)
- NS-EN 1997-1 og NS-EN 1997-2 (EC7 del 1 og 2)
- V220 Geoteknikk i vegbygging [3]
- V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger
- NVE veileder nr.1/2019 (Sikkerhet mot kvikkleireskred)

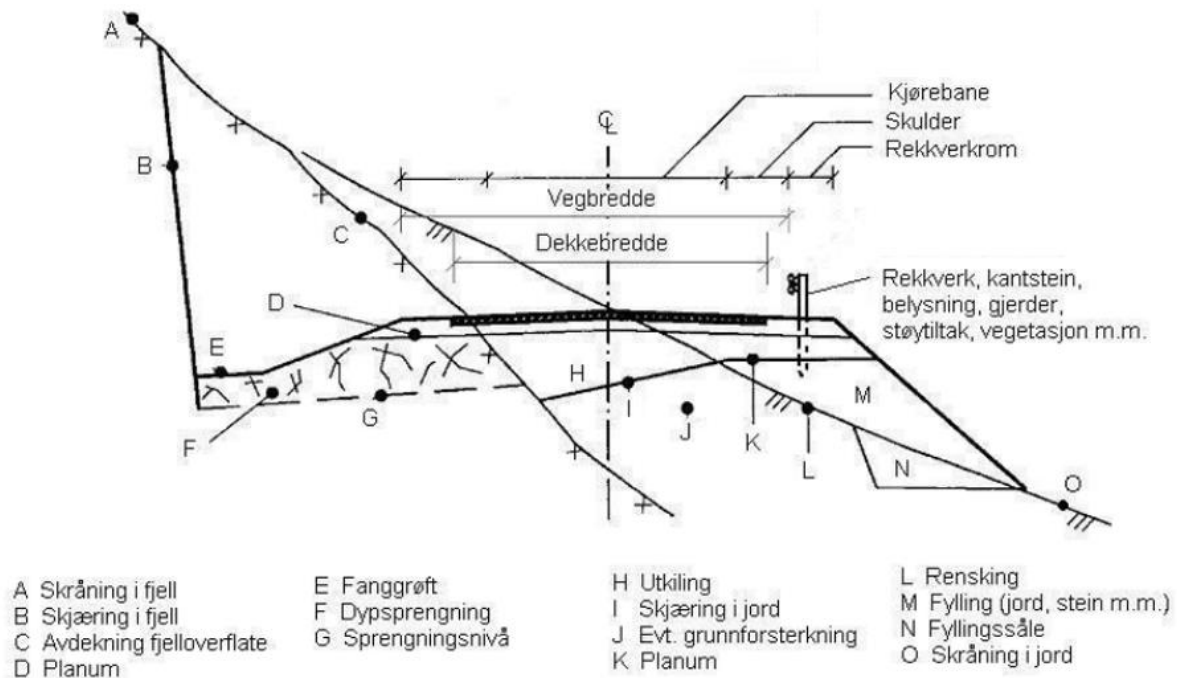
Grunnforholdene er ifølge håndbok V220 [3, pp. 1-2] avgjørende når det kommer til problemer under bygging og planlegging av veger, da det gjerne benyttes materialer i veglinjen eller lokale materialtak for oppbygningen av vegen. Vegen fundamenteres også normalt direkte på grunnen. Det er topografien, klima og de lokale geologiske forholdene, som virker inn på hvilke metoder og hvilket omfang av undersøkelsesmetodene som skal velges. Som en konsekvens vil dette ha en betydelig variasjon ettersom hvor i landet befinner seg i [3, pp. 1-2]. Hva som velges av undersøkelser, minus krav til stabilitet mot skred og utglidninger, må like vel etter [3, pp. 1-2] tilpasses den aktuelle vegstandard.

Grunnundersøkelser utføres ifølge [3, pp. 1-2] for å innhente grunnlagsdata for å utforme prosjektene på en slik måte at det oppnås:

- Nødvendig sikkerhet under både bygging og drift
- Riktige tekniske løsninger
- Grunnlag for både kostnadsberegning og kvalitetssikring



Figur 3-1 Lagene i en vegoverbygning. Kopiert fra [13]

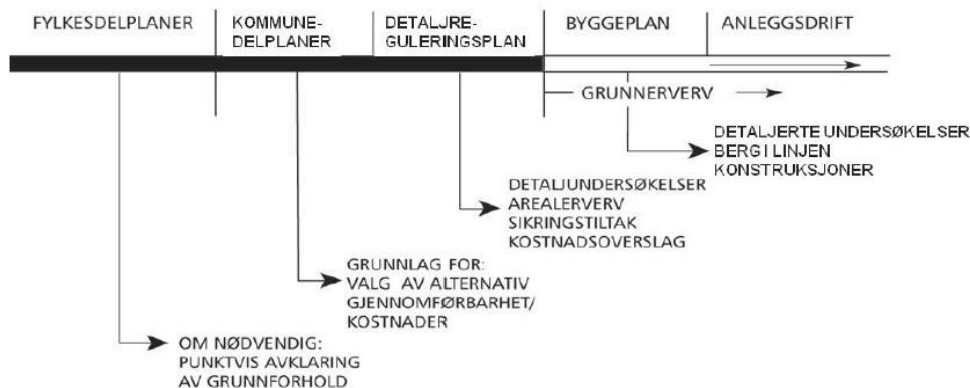


Figur 3-2 Vegens elementer. Modifisert (fjernet kapittelhenvisningene) fra [14]

Andre sentrale problemstillinger for grunnundersøkelser som beskrives i V220 [3] er:

- **Områdestabilitet;** omfatter ifølge [3, pp. 1-3] større områder som vegen går igjennom, enn lokalstabiliteten til enkelte vegelementer. Dette er spesielt viktig for områder med påvist kvikkleire eller med muligheter for kvikkleire, under marginrensene, i undergrunnen.
- **Skjæringer;** Aktuelle problemstillinger i tillegg til stabilitet (lokal og total) er ifølge [3, pp. 1--4] både skjæringsmassenes brukbarhet og lagdeling. Opplysninger om grunnens fasthet, jordart, og grunnvannssig trekkes også frem som viktige kriterier for både stabilitet, utglidning og erosjon. Håndboken presiserer videre, at for å bestemme bergoverflatens beliggenhet utføres det sonderinger, hvor innsamlet data benyttes til å tegne opp et tverrprofil og deretter beregne mengder løsmasser. På bakgrunn av materialenes egenskaper vurderes skjæringsmassenes brukbarhet til oppbygging av vegfyllinger, mens utførte prøver danner datagrunnlaget for dimensjoneringen av vegens oppbygning.
- **Fyllinger;** Grunnens sammensetning påvirker fyllinger gjennom dens bæreevne og mulige setninger. Grunnundersøkelser benyttes derfor for å innhente informasjon om grunnens fasthet, slik at stabiliteten kan kontrolleres og eventuelle tiltak prosjekteres. [3, pp. 1-4]
- **Materialtak;** Materialene som er nødvendige i oppbygging av en veg må ifølge [3, pp. 1-5] kartlegges med hensyn til hvor egnet og hvor brukbare de er, ettersom det stilles krav til materialene i over- og underbygningen. Videre, vil materialer som brukes i fyllinger hentes fra skjæringer i vegtraseen hvis dette er mulig. For overbygningen finnes det sjeldent egnede løsmasser i skjæringene langs veglinja, og masser av akseptabel kvalitet må da hentes fra et massetak, sidetak eller grustak.
- **Drenering;** Det å få kontroll på overvann og grunnvann i vegområdet og tilknyttede skråninger, er i [3, pp. 1-6] beskrevet som en viktig oppgave i vegbygging. For å kunne gjøre dette, kommer det fram at vannmengde, grunnvannstand og vannstrømning i grunnen bør undersøkes ved behov. Dette må måles for å kunne prosjektere tilfredsstillende drencsystem
- **Fundamentering av konstruksjoner;** Ved bygging av konstruksjoner og fundamenter, er det ifølge [3, pp. 1-6] flere mål med grunnundersøkelsene. Man ønsker blant annet å finne optimale løsninger for valg av type konstruksjon, plassering av veglinjen, hvordan det skal fundamenteres, samt løsninger for kostnader. Grunnlaget for de valgene som tas i de forskjellige trinnene i planprosessen kommer fra grunnundersøkelsene [3, pp. 1-7].

Behovet for grunnundersøkelser må tilpasses hvordan **planene** utvikler seg, og behovet for detaljert kunnskap om grunnforholdene vil øke ettersom planene utvikler seg og tar form [3, pp. 1-7]. Figur 3-3, fra V220 [3, pp. 1-7], illustrer behovet for grunnundersøkelser koblet opp mot plan- og byggeprosessene fra fylkesplan til anleggsdrift.



Figur 3-3 Grunnundersøkelser i ulike planfaser, kopiert fra [3, pp. 1-7]

Grunnundersøkelsene og planfasene i Figur 3-3 utdypes i V220 [3] som:

- **Region-/fylkesplaner;** Tilgjengelige opplysninger om grunnforholdene benyttes til å skaffe oversikt over mulige veglinjer. Disse linjene bør plasseres på en måte som unngår problematiske geotekniske og/eller kostbare punkter. [3, pp. 1-8]
- **Kommunedelplan;** Inneholder et overordnet kostnadsoverslag, og dersom det er usikkerhet rundt kostnader ved noen punkter vil det være nødvendig å gjennomføre grunnundersøkelser her. Samtidig velges potensielle sikringstiltak og fundamenteringsløsninger som et grunnlag til beregning av kostnaden [3, pp. 1-8]. I denne planfasen kartlegges det også mulige side-/massetak med søkelys på brukbarhet og mengder. Forundersøkelser av grunnforholdene utføres for bruer, underganger og blant annet kryss, slik at prinsipiell utforming og fundamentering kan avklares og kostnadsanslag produseres. [3, pp. 1-8]
- **Detaljreguleringsplan;** Inneholder komplette planer for veien og de tilhørende konstruksjonene. Grunnlaget for dette krever kjennskap om dybde til berg i skjæringsområder. Videre er en nøyaktig kartlegging av berg er viktig for å bestemme skråningsutslag, masseberegning og eiendomsinngrep. Spesielt for kombinerte ber- og jordskjæringer er dette av betydning. Samtidig i denne fasen blir det utarbeidet detaljerte grunnundersøkelser, for å bestemme fundamenteringsforholdene til både bruer og andre konstruksjoner. Disse undersøkelsene danner også grunnlaget for tiltak for å unngå erosjon, setninger, sikre stabilitet og avgjøre nødvendig plassering av fundamenter og brulengder. Det vurderes også om de tidligere nevnte massetakene og masser i skjæringer kan brukes til oppbygning av vegen. Materialene i grunnen undersøkes så for fasthet og telefarlighet, hvorav denne informasjonen brukes til å dimensjonere overbygningen. [3, pp. 1-9]
- **Byggeplan (tilbud);** Det valgte prosjektet forberedes for utførelse som det siste leddet i planprosessen, og en byggeplan utarbeides. Denne planen danner grunnlaget for tilbudsdokumentene når arbeidet settes ut på anbud, og er ment som en støtte i anleggsfasen. Etter det som beskrives i [3, pp. 1-10] vil det være lite behov for

grunnundersøkelser i denne fasen når det allerede er laget en detaljreguleringsplan, selv om behovet for suppleringer kan dukke opp. I de tilfeller hvor det skal peles ned til berg, må bergoverflatens beliggenhet ved pelespiss være kjent. En egen prosjektrapport utarbeides til slutt etter EC7 [5] ifølge [3, pp. 1-10], samt en egen rapport om selve grunnundersøkelsene som inkluderer profiler, utførte undersøkelser, sonderingsdiagrammer og resultater fra laboratorieundersøkelser.

I forkant av grunnundersøkelser in situ, bør alle tilgjengelige **bakgrunnsopplysninger** om grunnforholdene bli utnyttet/nyttiggjort, etter [3, pp. 1-10] er noen av disse:

- **Eksisterende/tidligere** grunnundersøkelser i databaser og rapporter.
- **Egne og lokale erfaringer** fra tidligere byggevirksomhet eller undersøkelser, og den kunnskapen de lokale sitter på
- **Kvartærgeologiske kart** finnes i varierende målestokk for deler av landet. Disse angir hvilke løsmasser som er å finne i de første 0,5 m. Kan hentes fra nettsida til Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). Merk, inntegnede grenser må betraktes som veiledende
- **Berggrunnsgeologiske kart** som gir informasjon om de viktigste bergartenes beliggenhet. Merk, inntegnede grenser må betraktes som veiledende
- **Marin grense** for hvor det kan finnes leire og kvikkleire, kan finnes fra isobasekart
- **Tolkning av flybilder** kan hjelpe med å planlegge grunnundersøkelser og og en oversikt over landskapsformene
- **Kart over forekomster av kvikkleire** er utarbeidet av NGI, som viser beliggenheten til mulige kvikkleireskred

3.1.2. Metoder og resultater fra grunnundersøkelser

Det finnes en rekke forskjellige grunnundersøkelsesmetoder. Figur 3-5 og Figur 3-6, gjengitt fra [3, pp. 1-13] viser henholdsvis en oversikt over hva metodene egner seg for å undersøke i, og hvilke opplysninger de gir. I forkant av noen av disse undersøkelsene skal det foreligge en borplan som inneholder både lokasjoner og bor-/prøvetakingsdybde [4, p. 22].

Undersøkelsesmetode	Utstyr	Egnet for undersøkelse i					
		Torv	Leire og leirig silt	Sandig silt og sand	Grus	Morene, blokkrik grus og stein	Berg
Sondering	Bergkontrollboring		●	○	○	○	●
	Dreietrykksondering		●	●	○		○
	Totalsondering	●	●	●	●	●	
	Trykksondering	●	●	●			
Prøvetaking	Graving	●	●	●	●	●	
	Skovlboring	●	●	●			
	Torvkanneboring	●					
	Naverboring		●	●			
	Ramprøvetaking		●	●	○		
	54 mm prøvetaking *	○	●	○			
75/95 mm prøvetaking *		●					
Kjerneboring					○	●	
Vingeboring	Vingebor		●				
GVS og poretrykk	Poretrykksmålere	●	●	●	●	●	○

● egnet

○ kan være egnet under spesielle forhold

* Blokkprøvetaking kan være et alternativ til stempelprøvetaking ved spesielle krav til prøvekvalitet

Figur 3-4 Ulike grunnundersøkelser og egnet undersøkelsesmedium, kopiert fra [3, pp. 1-13]

Metode	Gir opplysninger om:					
	Dybde til berg	Bergkvalitet	Relativ styrke, lagdeling	Jordartsklassifisering	Styrkeparametere	Andre jordartsparametere
Bergkontrollboring	●	○				
Dreietrykkssondering			●	○		
Totalsondering	●		●	○		
Trykksondering			●	○	●	●
Graving	○		○	●		●
Skovlboring				●		●
Torvkanneboring				●		●
Naverboring			●	●		●
Ramprøvetaking			●	●		●
54 mm prøvetaking *			●	●	●	●
76/95 mm prøvetaking*			●	●	●	●
Kjerneboring		●	●		●	
Vingebor					●	
Poretrykksmålere**						●

● gir god opplysning

○ kan gi opplysning under spesielle forhold

* Blokkprøvetaking kan benyttes i spesielle tilfeller hvor det er høye krav til prøve kvalitet

** Gir opplysninger om grunnvannsnivå eller grunnvannstrykk

Figur 3-5 Opplysninger fra de ulike grunnundersøkellesmetodene, kopiert fra [3, pp. 1-14]

Av alle metodene nevnt ovenfor, er totalsondering den mest brukte sonderingstypen som det beskrives i [3, pp. 1-18]. En beskrivelse av metoden er inkludert blant annet i V220 [3, pp. 1-18] og i V222 [4, p. 58]. Totalsonderingen er ifølge V222 [4, p. 58] en metode som benyttes til å bestemme lagdeling i løsmasser og dybde til berg, med mulighet for å bore gjennom stein/blokk. For å sikkert påvise berg, skal det bores 3 m inn i berg. Resultatene fra en slik undersøkelse kan gi grunnlag for å vurdere relativ fasthet i løsmasser og bedømme jordarter [4, p. 58].

3.2. Georadar – teori og virkemåte

Dette kapitlet introduserer teorien og virkemåten til den geofysiske undersøkelses metoden georadar, også referert til som GPR (Ground Penetrating Radar). Det finnes mye tilgjengelig litteratur både om både bruken og teorien bak virkemåten, som en introduksjon i Utsi 2017 [15], eller en mer teoribelagt innføring i Jol et.al. 2009 [16]. Bruksområdet til georadar er i denne rapporten begrenset til vegkonstruksjoner og grunnundersøkelser knyttet til bygging av vegkonstruksjoner. Teorien og virkemåten bak, vil være begrenset til det som trengs for å forstå de grunnleggende prinsippene, begrensingene og mulighetene, og tolkningen av dataen. For en mer detaljert gjennomgang, av f.eks. Maxwell sine likninger for elektromagnetisme og utforming av antenner, vises det til Jol et.al. 2009 [16].

3.2.1. Grunnleggende prinsipp

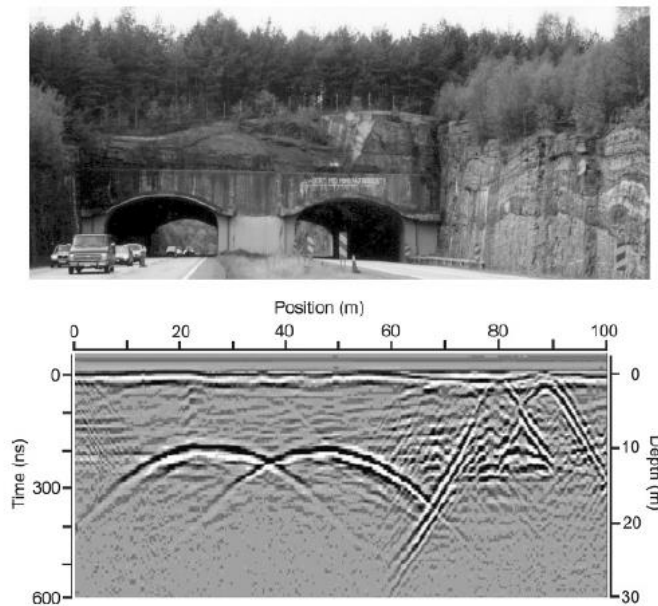
En georadar (GPR) virker ifølge Utsi [15, p. 4], ved at en elektromagnetisk (EM) puls sendes ned i det mediet som undersøkes. Dette kan være bakken/jorda, eller andre materialer som f.eks. betong. Når denne pulsen, eller bølgen, beveger seg gjennom mediet vil deler av pulsen bli reflektert tilbake dersom den støter på grenser/grenseflater eller objekter hvor de elektromagnetiske egenskapene til mediet endrer seg [15, p. 16]. Eventuell gjenværende energi vil fortsette videre nedover, hvilket gjør det mulig å motta refleksjoner fra flere forskjellige grenseflater [17]. Annan et.al. [18, p. 1] forklarer det samme prinsippet, ved at georadaren detekterer ekkoene fra endringer i materialeegenskapene inni strukturen som undersøkes. Som en konsekvens vil dette bety at georadaren kan oppdage ethvert materiale/objekt, så lenge dets magnetiske og/eller elektriske respons er forskjellig fra de omkringliggende materialene rundt det [15, p. 4].

EM-bølgen kobler ifølge Bigman [19, p. 12] sammen to separate felt; et elektrisk og et magnetisk. Disse står perpendikulært/vinkelrett på hverandre. Forsviner det ene, så vil det andre også forsvinne ettersom de henger sammen. Videre, så vil EM-bølgen fra antennen spres i alle retninger, ikke bare ned i grunnen - mesteparten av energien går ned i grunnen som følge av hvordan antennen er utformet.

Det er signalstyrken og tiden det tok fra grenseflaten tilbake til overflaten (toveis-reisetid, eng: TWTT) som registreres av georadaren ifølge NGI [6]. Samme definisjon benyttes også av Saarenketo 2006 [20, p. 20] hvor det beskrives at den reflekterte energien som samles inn av mottakeren, viser amplitude og medgått tid (i nanosekunder) mellom signalet var sendt og refleksjonen mottatt. Alle radarer måler ifølge [15, p. 13] i enheter som dikteres av bølgelengden. Den er avhengig av både radarens frekvens, men også av materialet som bølgene beveger seg gjennom. Det vil si at også hastigheten som radarbølgene beveger seg gjennom materialet er av betydning [15, p. 13].

De EM-bølgene som benyttes, har ifølge NGI [6] en frekvens som varierer fra flere MHz og opp til et par GHz. Andre områder for frekvensen er; 30 – 3000 MHz [21] fra SVV, 10 – 5000 MHz [18], og 10 MHz - 2,5 GHz [20, p. 20]. Innen georadar går denne frekvensen gjerne under begrepet sentralfrekvens, som beskrevet av Annan [18]. Valg av riktig antenne (frekvens) for jobben, blir av NGI [6] beskrevet som svært viktig da høye frekvenser gir en høy oppløsning, men på bekostning av å ikke nå like dypt ned i bakken (liten penetrasjonsdybde). Dette er i motsetning til antenner med lave frekvenser som penetrerer dypere ned i bakken, men på bekostning av en lavere oppløsning sammenlignet med høyfrekvente antenner [6]. Dersom en antenne designes til en enkelt frekvens, kalles denne frekvensen ifølge [15, p. 14] for «middels frekvensen» eller "sentralfrekvensen". Ved denne frekvensen sender antennen ut maksimalt med energi, og må ikke nødvendigvis være nøyaktig i midten av alle mulige frekvenser antennen kan sende.

For å kunne motta og sende denne EM-bølgen/pulsen, består derfor alle georadarer av en sender- og en mottakerantenne [15, p. 3]. Selve georadar-enheten og antennene kan deles inn i to grupper; bakkekoblede antenner og luftkoblede antenner. Førstnevnte er i direkte kontakt med bakken, alternativt noen cm over bakken, mens sistnevnte er fra noen cm, opptil 1m over bakken [22, p. 1]. Formen og varigheten til et enkelt signal sendt ned i bakken og mottatt av georadaren, vil ifølge [15, p. 28] avhenge av både antennedesign, frekvens og grunnforholdene. Ettersom georadaren flyttes over området som undersøkes, vil serien med enkeltsignaler ifølge [15, p. 6], bygges opp til et to-dimensjonalt (2D) bilde av grunnen, kalt et radargram. I 2D bildet, tar signalene gjerne formen som hyperbler (eng: hyperbolas) eller linjer, omkranset av en serie med sorte og hvite felt (andre farger kan også benyttes [15, p. 29]) [15, p. 6], denne effekten kan observeres på Figur 3-6 hvor vektunellene vises som to store hyperbler på radargrammet.



Figur 3-6 Eksempel på et 2d radargram med et 50-MHz system over to vegtunneler (øverste del av figuren). Forskjellen i relativ dielektrisk permittivitet mellom berg og luft gir de store hyperblene t.v. i den nederste figuren. Det er amplituden til GPR signalet som vises som en funksjon av posisjon (horisontal akse) og signalets reisetid (vertikalaksen). Kopiert fra [16, p. 4]

3.2.2. Materialeegenskaper som påvirker EM-bølgene

Som det kommer fram av kapitlet om Grunnleggende prinsipp (3.2.1), er det materialenes elektromagnetiske egenskaper som påvirker hvordan EM-bølgene fra georadaren spres og reflekteres i grunnen (eng: propagation og reflection). Disse egenskapene vil ikke bli gjennomgått i detalj i dette kapitlet. En mer komplett beskrivelse av EM-egenskaper til materialer, som Maxwell's likninger og lignende, er beskrevet i Jol et.al. 2009 [16] eller Saarenketo 2006 [20].

Permittivitet (ϵ) og relativ permittivitet (ϵ_r):

Permittiviteten beskriver ifølge Jol et.al. [16, p. 45] et materials evne til å lagre og frigi EM-energi i form av elektrisk ladning. Denne verdien for materialer i grunnen kan variere betydelig, og spesielt i de tilfellene hvor fritt eller bunnet vann er tilstede i materialet. Derfor er denne verdien vanligvis en kompleks, frekvensavhengig mengde som har reelle (lagring) og imaginære (tap) komponenter. Denne betegnelsen benyttes også av Saarenketo i [20, p. 20] og [21]. For praktisk bruk, blir ofte denne komplekse verdien forenklet til kun den reelle delen, og den imaginære delen blir ignorert. Dette er akseptabelt for å anslå radarbølgens hastighet og bølgelengde, men blir for generelt dersom det skal gjøres detaljerte analyser [16, p. 45]. En dypere forklaring av sammenhengen mellom den reelle og imaginære delen blir ikke forklart eller benyttet i denne rapporten.

Permittiviteten og dens innvirkning på hastigheten som GPR-signalet beveger seg gjennom mediet, blir av Saarenketo [20, p. 20] beskrevet som den aller viktigste elektriske egenskapen som påvirker resultatene til georadarundersøkelsen. Det er derfor helt essensielt å kjenne til for å beregne nøyaktig dybde til målene i bakken. Sammenhengen mellom hastighet og relativ permittivitet blir beskrevet i kapittel 3.2.3.

Det er vanlig å benytte den dimensjonsløse verdien, relativ permittivitet (ϵ_r) (eng: relative permittivity) [16, p. 45], som kan beregnes som vist i likning (3.1) under. Dette er også den verdien som stort sett er oppgitt i tabeller. En gammel praksis er å referere til den relative permittiviteten (ϵ_r), som den dielektriske konstanten (κ) [16, p. 45]. Håndbok R211 [23, p. 308] benyttet begrepet dielektrisk konstant, men med symbolet ϵ_r . En tabell med relative permittiviteter for en rekke materialer kan finnes i Tabell 3-1 nedenfor.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

Hvor:

ϵ_r = relativ permittivitet [-]

ϵ = materialets permittivitet [F/m (Farads per meter)]

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ F/m = permittiviteten til et vakuum eller luft

Tabell 3-1 Verdier for relativ permittivitet, overføringshastigheter og statisk konduktivitet for materialer i grunnen og i vegkonstruksjoner. (går over to sider)

Kilder:	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6
Materiale	Relativ permittivitet (ϵ_r)				Overførings hastigheter v [m/ns]	Statisk konduktivitet σ_s [S/m]
Luft	1	1	1			0
Ferskvann	78-88	81	81	80-81	0,033	01-10
Ferskvann - is	3					1-0,000001
Sjøvann	81-88					4000
Sjøvann is	4-8					10-100
Is		4	4	4	0,15	
Fjell og friksjonsmaterialer						
Berggrunn (granitt)		5-7	5-7			
Granitt – tørr	5-8					0,001-0,00001
Granitt – oppsprukket og våt	5-15					1-10
Kalkstein – tørr	4-8					0,001-0,0000001
Kalkstein – våt	6-15					10-100
Sandstein – tørr	4-7					0,001-0,0000001
Sandstein – våt	5-15					0,01-0,001
Skifer (shale) saturated	6-9					10-100
Sand		4-6				
Sand – tørr	3-6		4-6	2-6	0,2-0,12	0,0001-1
Sand – våt	10-30			10-30	0,095-0,055	0,1-10
Sand – kystnær, tørr	5-10					0,01-1
Grus		4-7	4-7 (tørr)			
Kohesjonsmaterialer og jord						
Leire – tørr	2-20		25			1-100
Leire – våt	15-40		40			100-1000
Silt (tørr-våt)		16-30	16-30			
Siltig sand			7-10			
Torv (naturlig)		60	60			
Torv (under veg)		40	40			
Morenematerialer		8-18	8-18			
Jord - tørr				9	0,1	

Jord – våt uorganisk				15-30	0,077-0,055	
Jord – våt organisk (f.eks. peat)				40-75	0,05-0,035	
Jord – sandig, tørr	4-6					
Jord – sandig, våt	15-30					
Jord – leirholdig, tørr	4-6					
Jord – leirholdig, våt	10-15					
Jord - gjennomsnitt	5					
Materialer i vegbygging						
Betong		8-10		9	0,1	
Betong – tørr	4-10					
Betong – våt	10-20					
Asfalt		5-6 ¹		6	0,122	
Grus i slitelag		12-14				
Knust bærelag		6-8				
Bitumenbundet bærelag		6-7				
Sementbundet bærelag		8-10				
Isolasjonsmaterialer		2-2,5				
Veikonstruksjoner midlet (ny/tørr)		5				
Veikonstruksjoner midlet (normale)		6				
Veikonstruksjoner (våt)		7-8				
Gjennomsnitt gammel vegkonstruksjon		7-8 ¹				
Grus i vegkonstruksjoner midlet		7-9				
Frosne veikonstruksjoner (normale)		5				
Frosne veikonstruksjoner (våte/gamle)		6				
Kilder:						
1) Jol et.al. [16, p. 46] gjennomsnittsverdier for relativ permittivitet						
2) SVV rapport nr.497 [24] og Saarenketo 2006 [20, p. 69]. Hvor [20, p. 69] påpeker at dette er verdier som vanligvis brukes til tolkning av georadar data i Skandinavia – alle materialene utenom torv/peat er de som brukes over grunnvannstand						
3) Mara Nord Site investigations 2011 [25]. Typiske verdier som brukes til å tolke georadar data i de nordiske landene, verdiene for jord gjelder når de ikke er frosne						
4) Utsi 2017 [15, p. 61]. Verdiene skal kun benyttes for sammenligninger, ikke for kalibrering						
5) Utsi 2017 [15, p. 61]. Typiske overføringshastigheter [m/s]						
6) Jol et.al. [16, p. 46] statisk konduktivitet σ_s i S/m						
Fotnoter:						
¹ Hentet fra [23, p. 307]						

Konduktivitet (σ):

Denne egenskapen beskriver frie ladningers mulighet til å bevege seg fritt i materialet. Jo flere frie ladninger i form av ioner og elektroner det er, desto høyere vil materialets konduktivitet være og dermed større attenuation av signalet fra georadaren [21]. Jol et.al. [16, p. 54] underbygger dette og tildeler kollisjon mellom elektroner og ioner som en kilde til energitap gjennom generering av varme.

Det er oftest den statiske konduktiviteten σ_s i S/m (siemens/m) som er oppgitt i tabeller. Dette er en forenkling som er passende i de fleste tilfeller [16, p. 54]. Tabell 3-1 inkluderer noen verdier for den statiske konduktiviteten til noen vanlige materialer.

Ved GPR undersøkelser på vegger og bruer i kalde klima, kan tilstedeværelsen av avisingssalter betydelig påvirke materialenes elektriske konduktivitet [20, p. 20]. Ved site investigations er electrical conductivity en veldig viktig faktor, da dette er hovedfaktoren som bestemmer signalets penetrasjonsdybde i leire, silt og morene. I verste fall kan penetrasjonen i leire med høy konduktivitet være kun 1 m, mens i beste fall kan et signal fra en 100 MHz antenne kun penetrere 3-4 m ned i leire. [25]

Magnetisk permeabilitet (μ):

I de fleste tilfeller har materialenes magnetiske permeabilitet (μ) liten effekt på hvordan GPR bølgene sprer seg [16, p. 55]. Men ferromagnetiske mineraler kan ha en betydelig effekt på hastigheten til GPR bølgene og attenuation av signalet. For de aller vanligste materialene i grunnen kan andelen ferromagnetisk materiale ansees som ubetydelig (normalt <2 %).

For praktisk bruk av GPR undersøkelser vil de magnetiske effektene være neglisjerbare dersom materialene grunnen kan ansees som «jern-frie». Dersom dette ikke er tilfellet, som som for noen sand og bergarter med magnetitt og avfallsprodukter som slagg, må de magnetiske effektene bli tatt hensyn til. Dette er fordi effekten kan være større enn effekten av de elektriske materialegenskapene [16, p. 55]. Når det kommer til måling av hulrom i asfaltdekker har slagg vist seg å forårsake betydelig attenuation av GPR signalet [21].

3.2.3. Viktige sammenhenger - frekvens, bølgelengde og hastighet

I dette kapitlet vil noen viktige sammenhenger mellom frekvens, bølgelengde og hastighet presenteres, og hvilken betydning dette har for bruk av georadaren.

Et ord som forekommer ofte i litteraturen, er forplanting (eng: propagation). Denne egenskapen har stor betydning for hvordan denne metoden funker. Begrepet defineres av Bigman [19, p. 13] som evnen til å bevege seg med en gitt hastighet. Det vil si at dersom man kan finne denne hastigheten i et materiale, så kan man direkte måle avstander/dybder. Dette gir formelen: *lengde = hastighet x tid*. Når EM-bølgen beveger seg gjennom grunnen, reflekteres og returnerer til overflaten, så har den beveget to ganger avstanden og tiden som har medgått er toveis-reisetid (eng: TWTT) . Derfor beregnes lengden ned til refleksjonspunktet etter *lengde = (hastighet x tid)/2*. Den samme likningen for interface depth benyttes også av Saarenketo [20, p. 20], gjengitt som likning (3.2).

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.2)$$

Hvor:

s = interface depth (m)

v = wave propagation speed [m/ns]

t = two-way travel time from the surface of the medium of the interface depth (ns)

Alle radarer måler i enheter som dikteres av bølgelengden, hvilket er avhengig av både radarens frekvens, men også av materialet som bølgene beveger seg gjennom [15, p. 13]. Det vil si at også hastigheten som radarbølgene beveger seg gjennom materialet er av betydning [15, p. 13], hvilket gir den grunnleggende likning (3.3) for bølgelengde:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.3)$$

Hvor:

λ = bølgelengden [m]

f = radarens frekvens [GHz]

v = transmission velocity of the radio waves transmitted by the radar [m/s]

Radarens bølgelengde viker ifølge [15, p. 17] også inn på maksimal penetrasjonsdybde, som under ideelle forhold ikke er større enn 20 bølgelengder før alle energien går tapt. Dette en viktig egenskap å ha i bakhodet for å vurdere om den valgte antennen passer det tiltenkte bruksområdet. Det er derimot ytterst få antenner som i praksis kommer i nærheten av denne teoretiske dybden, på grunn av de elektromagnetiske egenskapene til grunnen. Med unntak av måling av isbreer [15, p. 17]. Som en konsekvens av dette, krever dype undersøkelser antenner med lavere frekvens [15, p. 17].

Hastigheten til radarbølgene nevnt ovenfor er ikke konstant [15, p. 13], hvilket er grunnen til at radaren måler dybde i enheten nanosekunder [ns], og ikke i f.eks meter [15, p. 15]. Dette vil si at det er i oversettelsen fra dybde i nanosekunder til et standard mål på dybde, at unøyaktigheten er, om den skulle være tilstede [15, p. 15]. For å kunne utføre denne omregningen må man kjenne hastigheten til radarbølgene gjennom materialet. [15, p. 15] beskriver denne som overføringshastighet (eng: transmission velocity), hvilket er avhengig av undergrunnens elektromagnetiske egenskaper, se kapittel 3.2.2. Som en konsekvens av dette, er det nødvendig å kalibrere transmission velocity ved hver eneste anledning som georadaren benyttes. Dette er for å ta hensyn til undergrunnens varierende elektromagnetiske egenskaper [15, p. 16].

Materialene i undergrunnen kan ha stor nok variasjon i elektromagnetiske egenskaper, slik at hastigheten til bølgen kan endre seg enten i dybden eller over området som undersøkes. [15, p. 39] Hastigheten er nødvendig for å nøyaktig oversette dybden fra nanosekunder over til meter/cm [15, p. 48].

Radiobølger beveger seg ikke med en konstant hastighet. Overføringshastigheten er avhengig av materialet som EM-pulsene beveger seg gjennom, og hastigheten er derfor forskjellig fra asfalt, betong og luft. Inhomogene masser gjør dette mer komplisert, og her er det innholdet av vann ($\epsilon_r = 81$) og luft ($\epsilon_r = 1$) som har den største påvirkningen [15, p. 40]. Forholdet mellom overføringshastighet og de elektromagnetiske egenskapene, kan ifølge Utsi [15, p. 40] uttrykkes som likning (3.4).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

Hvor:

c = lysets hastighet – kan forenkles til 0,3 [m/ns]

ϵ_r = relativ permittivitet til materialet som bølgen går igjennom [-]

v = overføringshastighet [m/s]

Denne likningen (3.4) gjør det mulig å beregne potensielle overføringshastighet i forkant av en undersøkelse, og dermed estimere potensielle dybder i forkant av undersøkelsen [15, p. 40]. Hastigheten virker inn på bølgelengden og bølgelengden virker inn på dybden.

I tillegg til penetrasjonsdybde, virker også bølgelengden ifølge [15, p. 17] inn på størrelsen til objektene/målene radaren kan oppdage. Et mål/objekt som skal oppdages burde være større enn 10% av bølgelengden, i tillegg til å kunne skilles fra sine omkringliggende materialer eller mål. Generelt vil dette si at en kort bølgelengde er å foretrekke for å finne og/eller definere små mål, hvilket er i direkte konflikt med prinsippet om at kort bølgelengde vil begrense undersøkelsens dybde [15, p. 17]. Dette er ifølge [15, p. 17] gjenstand for en konflikt mellom de krav man har til radaren for størrelse på målene, og den dybden disse målene ligger på. Dette understreker viktigheten av å vurdere georadarens bølgelengde opp mot målet/hensikten med undersøkelsen, for å bestemme om den valgte antennen er passende [15, p. 17].

Ifølge Utsi [15, p. 18], er avstanden mellom mål/objekt like viktig som størrelsen på objektene når det benyttes georadar. Hvor mål/objekter innenfor 1/2 bølgelengde av hverandre vil resultere i at de reflekterte signalene fra begge objekt/mål blandes sammen til ett enkelt signal. For å kunne skille dem, er en tommelfingerregel at de burde ligge med 1 bølgelengdes avstand i mellom hverandre. Som en direkte konsekvens av dette, vil mål/objekter som står tett kreve en høyere frekvens og dermed kortere bølgelengde [15, p. 18].

Nøyaktigheten til den målte dybden, kan ifølge Utsi [15, p. 22] sees i sammenheng med georadarens bølgelengde. Hvor desto høyere frekvensen er, dets større er nøyaktigheten når det kommer til dybden. Som en tommelfingerregel kan nøyaktigheten mht. dybde, settes til 1/4 av en bølgelengde [15, p. 22].

3.2.4. Ulike georadar-systemer

Det finnes en rekke produsenter og varianter av georadarer, som blant annet [15, p. 5] trekker fram som en konsekvens av alle de forskjellige bruksområdene georadar har. Her er det en rekke forskjellige elektriske og mekaniske design som er aktuelle. Georadarer som benyttes på veier, kan ifølge [21, p. 5] deles inn i impulse-radars og stepped-frequency-radars.

Impulse-radar er den vanligste type georadar. Det virker på den måten at pulsen som antennen generer og sender ned i bakken, har en lengde/varighet mellom under et nanosekund opptil totals nanosekunder, alt avhengig av frekvensen [15, p. 5]. Radaren registrer toveis-reisetid og amplituden til signalene, som reflekteres som en funksjon av reisetiden.

Stepped-frequency-radar sender radarbølgene ut med en trinnvis stigende frekvens. Radaren måler fasen (phase) og amplituden til det reflekterte signalet ved hver enkelt frekvens, og transformerer så denne dataen fra frekvensdomenet over til tidsdomenet gjennom dataprosessering. Radargrammet er tilsvarende det som genereres med impulse-radar, og kan tolkes og prosesseres på samme måte. Innsamlingen i frekvens domenet gjør det mulig å benytte avanserte filtre og prosessering direkte på dataen i frekvensdomenet [21, p. 6].

Antennene til georadarer kan deles inn i to grupper; bakkekoblede antenner og luftkoblede antenner. Førstnevnte er i direkte kontakt med bakken, alternativt noen cm over bakken, og sistnevnte er fra noen cm, opptil 1m over bakken [22, p. 1]. I tillegg så kan antenne plasseres som en array, som [7, p. 13] beskriver som et sett med flere antenner noe som er spesielt passende for å dekke større områder, og tillater innsamling av common midpoint (CMP) data.

Luftkoblede antenner benyttes ifølge [16, p. 398] til å evaluere de øvre delene av vegkroppen, og kan brukes ved høye hastigheter (opptil 100 km/t) uten å forstyrre annen trafikk. Videre, benyttes det gjerne frekvenser mellom 500 MHz og 2,5 GHz, som normalt kan penetrere opptil 0,5-0,9 m ned i bakken. Et eksempel på en luftkoplede georadar på en av SVV sine målebiler er vist i Figur 3-8.

Bakkekoblede systemer har ifølge [16, p. 398] gjerne en sentralfrekvens mellom 80 MHz og 1500 MHz, med en potensiell penetreringsdybde på 20-30 m. Videre, så trekkes det fram at normal innsamlingshastighet er mellom 5-30km/t. En bildeserie med eksempler på bakkekoblede georadarer er vist i Figur 3-9.



Figur 3-7 Array av typen Stream EM fra IDS, går i kilden under avansert utstyr, Kopiert fra: [26]



Figur 3-8 Luftkoplede georadar montert bakpå en av SVV sine målebiler. Kopiert fra [23, p. 308]



Figur 3-9 Bildeserie med bakkekoblede georadarer. Kopiert fra [25]

3.2.5. Styrker og svakheter med georadar

Det finnes en rekke styrker og svakheter ved georadar som metode, i dette kapitlet gjengis noen eksempler fra [27].

Noen av styrkene ved georadar er:

- Datainnsamling kan utføres ved høy hastighet, med mobile enheter som kjøretøy og uten å være i kontakt med bakken. [27]
- Pga. den mobile måten dataen samles inn på, må ikke veger som undersøkes sperres av. Dette reduserer kostnader og påvirkningen undersøkelsen har for brukerne av vegen [27]

Noen av begrensningene ved georadar er:

- Materialer med høy konduktivitet, slik som våt leire, gjør at EM-bølgen attenueres raskt. [27]
- Jobben med å tolke radargrammer er generelt ikke intuitivt, og det krever derfor ekspertise for å kunne forstå og bearbeide den innsamlede dataen. [27]

4. Forskerspørsmål

I dette kapitlet presenteres rapportens forskningsspørsmål, underspørsmålene til forskningsspørsmålet og avgrensinger. Metodene som er benyttet i dette arbeidet er beskrevet i kapittel 6: Metode.

4.1. Forskningsspørsmål og underspørsmål

Forskningsspørsmålet er utarbeidet i samarbeid med veileder fra UiA og SVV. For å konkretisere arbeidet med å svare på forskningsspørsmålet er det utarbeidet fire underspørsmål. Denne rapporten skal svare på følgende forskningsspørsmål:

Hvordan kan resultatet fra grunnundersøkelser med georadar skape nytteverdi for byggherre og entreprenør ved planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekt?

Følgende underspørsmål er utarbeidet til forskningsspørsmålet:

1. *Hvordan benyttes georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter?*
2. *Hvordan utføres, kalibreres, og tolkes resultatene fra grunnundersøkelser med bruk av georadar?*
3. *Hvordan oppstår eller kvantifiseres nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt?*
4. *Hvordan kan nytteverdien optimaliseres ved bruk av georadar?*

4.2. Avgrensninger

Følgende avgrensninger gjelder for denne rapportens innhold og konklusjon:

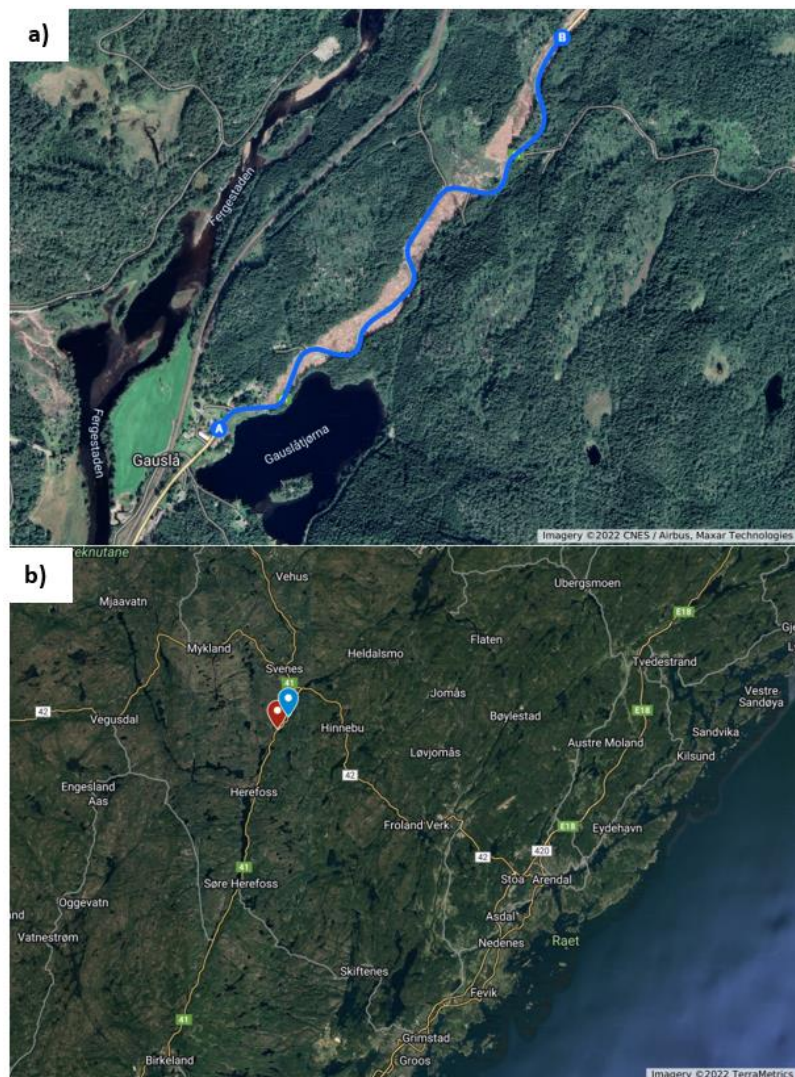
- Rapporten ser ikke på eller inkluderer økonomi/kostnad knyttet til verken nytteverdien eller bruken av georadar som metode
- Det har ikke vært mulig å gjennomføre prøvegraving på anlegget for kalibrering av georadar dataen ila. prosjektperioden (januar-mai 2022).

5. Case og materialer

5.1. Generelt

I forbindelse med utbedring av 1,5 km av Rv.41 fra Gauslå retning Hynnekleiv (Birkenes kommune), se Figur 5-1, har Statens Vegvesen gjennomført målinger med to geofysiske metoder; seismikk og georadar. Dataen som er samlet inn og tolket, kan nå vurderes opp mot det som avdekkes in situ ettersom vegprosjektet blir gjennomført. Målet med denne sammenligningen er å finne svar på hvordan disse metodene kan brukes til å avdekke hva som finnes i grunnen for vegprosjekt.

Denne rapporten fokuserer utelukkende på den geofysiske teknikken georadar og de dataene som er samlet inn gjennom denne metoden. Seismikk vil derfor ikke bli videre omtalt i denne rapporten. Georadar-dataen ble samlet inn Juni 2021, og en rapport med tolkninger av denne dataen er utarbeidet av firmaet som gjennomførte undersøkelsen. Både denne rapporten, rådataen, samt programvaren (IQMaps) som brukes til å se/tolke og prosessere dataen, har vært tilgjengelige for meg under arbeidet med denne rapporten.



Figur 5-1 Strekingen av Rv.41 under utbedring, figur a) viser vegstrekningen fra A til B, figur b) viser vegstrekningens plassering i forhold til Arendal og Grimstad. Foto: Google Maps

5.2. IQMaps – programvare

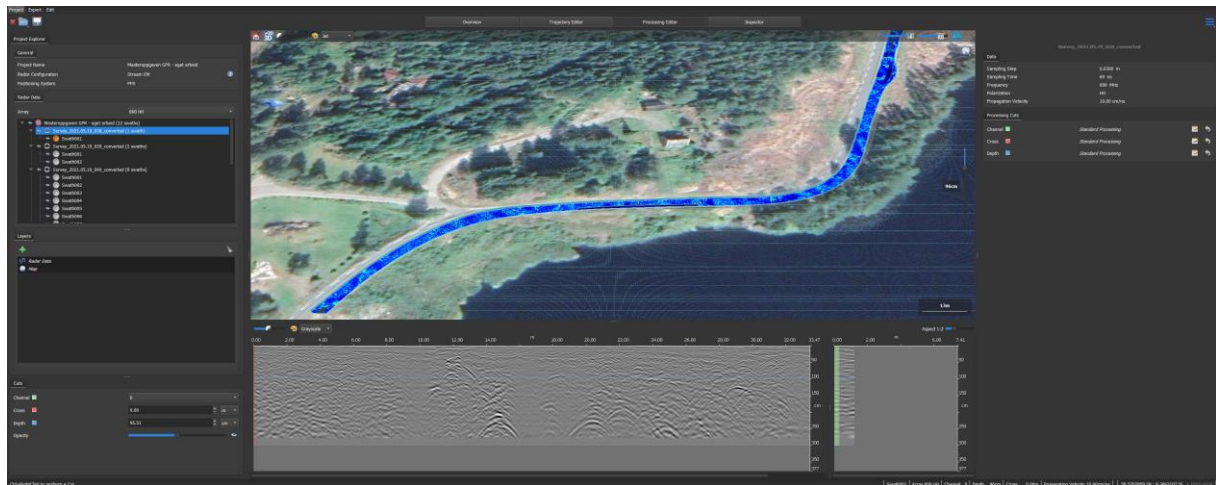
Som beskrevet i kapittel 5.1, er det i denne rapporten benyttet programmet *IQMaps* fra IDS GeoRadar [28]. Dette er et program som kan benyttes til å prosessere og presentere data fra georadarundersøkelser, ikke bare i 2D radargrammer, men også i 3D time-slices samtidig. Figur 5-2 viser et utsnitt av brukergrensesnittet i programvaren *IQMaps* fra IDS GeoRadar.

Versjonen benyttet i denne rapporten er: Ver 01.04.013

Programvaren byr på disse prosesseringsmulighetene [28]:

- Time-domain bandpass Filter
- Start Time Shifter
- Background Removal
- STC Smoothed Gain
- Time-domain Migration

- Absolute Value
- Time-domain Maximum
- Dewow



Figur 5-2 Utsnitt av brukergrensesnittet i programvaren IQMaps fra IDS GeoRadar. Eget skjermbilde

6. Metode

I dette kapitlet presenteres de metodene som er brukt for å svare på forskningsspørsmålet, og de fire underspørsmålene presentert i kapittel 4. Forskningsspørsmålet er:

Hvordan kan resultater fra grunnundersøkelser med georadar brukes til å skape nytteverdi for både byggherre og entreprenør ved planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekt

I Tabell 6-1 nedenfor er det vist en oversikt over hvilke metoder som er brukt til å svare på hvilke av forskningsspørsmålets underspørsmål.

Tabell 6-1 Metodene som er brukt til å svare på forskningsspørsmålets underspørsmål

Underspørsmål:		Metode(r):
1	Hvordan benyttes georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter?	Litteraturstudie (kap. 6.1) - Forskningslitteratur (kap. 6.1.1) - Etablert litteratur (kap. 6.1.2) - Litteratur fra nasjonal vegmyndighet (kap. 6.1.3) - Intervju (kap. 6.2)
2	Hvordan utføres, kalibreres, og tolkes resultatene fra grunnundersøkelser med bruk av georadar?	Litteraturstudie (kap. 6.1) - Forskningslitteratur (kap. 6.1.1) - Etablert litteratur (kap. 6.1.2) - Intervju (kap. 6.2)
3	Hvordan oppstår eller kvantifiseres nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt?	- Intervju (kap. 6.2) - Forskningslitteratur (kap. 6.1.1)
4	Hvordan kan nytteverdien optimaliseres ved bruk av georadar?	- Diskusjon av resultatet fra spørsmål nr. 1, 2 og 3 - Feltundersøkelser (kap. 6.3) - Egen datanalyse (kap. 6.4) - Intervju (kap. 6.2)

6.1. Litteraturstudie

Målet med litteraturstudiet i denne rapporten er å samle inn informasjon om den generelle virkemåten og teorien bak georadar som metode. Det skal også innhentes informasjon om hvordan metoden brukes i vegprosjekter og hvordan den er inkludert i publikasjonene til Statens Vegvesen (vegmyndigheten). Dette er utgangspunktet for de tre metodene som er benyttet i litteraturstudiet. -Metodene går ut på bruk av:

- **Forskningslitteratur** – Artikler som er publisert i anerkjente kanaler for forskningsformidling
- **Etablert litteratur** – Bøker og teori som er veletablert og diskutert
- **Litteratur fra nasjonal vegmyndighet** – SVV sine normaler, retningslinjer, osv.

Felles for alle metodene i litteraturstudiet er at søkene er loggført underveis i et eget Excel-ark. Det inneholder informasjon om:

- | | |
|---|---------------------------|
| • Type referanse (bok, artikkel, rapport) | • Søkemotor |
| • Fagfellevurdert | • Antall treff/resultater |
| • Utgivelsesår | • Dato først funnet |
| • Utgiver | • Egne kommentarer |

Søkemotorene som er benyttet er: Oria¹, GoogleScholar, Google² og vegvesenets nettsider.

Hvor disse søkebegrepene er benyttet:

- | | |
|--|--|
| • Georadar | • Ground penetrating radar in soil studies |
| • GPR / Ground Penetrating Radar | • Risk mitigation GPR |
| • Ground penetrating radar theory | • Ground investigation uncertainty |
| • Ground penetrating radar road construction | • Geotechnical survey in road construction |
| • GPR bedrock | |

Som det anbefales av Kildekompassets [29], er det i denne rapporten fokusert på å bruke primærkilder. Derfor er noe av litteraturen som benyttes funnet som kildemateriale oppgitt i primærkildene, og ikke direkte fra søkebegrepene listet opp ovenfor. Når det kommer til den etablerte litteraturen, er det noen få forfattere som går igjen i rekke artikler og publikasjoner. I disse tilfellene er primærkilden benyttet, som boka til Jol et.al. *Ground Penetration Radar Theory and Applications* fra 2009 [16].

Ettersom teknologi hele tiden utvikles, blir raskere og mindre kostbart, har målet vært å benytte forskningslitteratur av en nyere dato. Derimot når det kommer til den etablerte litteraturen bygger innholdet på kjent og etablert kunnskap, hvor dato ikke har blitt tatt hensyn til i samme grad.

I de neste kapitlene (6.1.1, 6.1.2 og 6.1.3) presenteres hvordan metodene i litteraturstudiet er gjennomført når det kommer til:

- Hvordan litteraturen er funnet

¹ Universitetsbiblioteket ved UiA sin søkemotor for forskningsartikler/publikasjoner nasjonalt og internasjonalt

² Benyttet dersom en spesifikk kildes-kilde ikke var å finne via Oria eller GoogleScholar

- Hvordan litteraturen er valgt ut
- Hvordan informasjonen er hentet ut av litteraturen
- Styrker og svakheter med denne gjennomføringsmetoden

6.1.1. Forskningslitteratur

Forskningslitteratur omfatter i denne rapporten enkelte artikler som ikke er en del av en samlet bok. Disse er artikler hvor det enten gjennomføres forsøk/målinger ute i felt og/eller på lab, sammenstillinger av artikler som en del av state-of-the-art/review/overview, eller artikler om enkelte tema.

Litteraturen er funnet enten ved bruk av søkebegrepene listet opp i starten av kapittel 6.1, eller som primærkilder til artikler allerede valgt ut. Søkemotorene Oria og GoogleScholar er brukt.

Litteraturen er valgt ut etter flere kriterier. For det første, skal alle artikler være fagfellevurderte. For det andre, er det valgt å kun bruke artikler fra Norge, Skandinavia, Europa og Nord-Amerika – for å ivareta tilsvarende klima og topografi som her i Norge. For det tredje, er det valgt å bruke artikler med fokus på undersøkelser av lagdeling i eksisterende vegkonstruksjon, og undersøkelser ute i terrenget for bygging av ny veg, inkludert forsterkningsarbeider. Artikler og publikasjoner som omhandler; kvalitetskontroll av ferdig veg (f.eks. hulroms % i asfalt), tilstandsovervåkning/registrering (f.eks. registrering av sprekker og delaminering), og vedlikeholdsplanlegging blitt valgt bort.

Informasjonen er hentet ut av forskningslitteraturen på to ulike måter, alt ettersom hvilket innhold og hva som var ønskelig hente ut:

- *Forsøk/målinger ute i felt og/eller på lab*
Hentet ut et lite sammendrag med studiens mål, hvilke metoder som er brukt og hva som er konklusjonen
- *Artikler som en del av state-of-the-art/review/overview og artikler om enkelte tema*
Enkelte avsnitt av relevans for rapporten er hentet ut. Eksempler på disse er; dybde til fjell, lagdeling i terrenget, og lag i vegkonstruksjonen (bærelag og undergrunn)

Styrker og svakheter med denne gjennomføringsmetoden er at relevante artikler kan bli valgt bort på grunn av at de er utenfor de valgte landene/områdene – på den andre siden er det ikke ubegrenset med tid, og dette fokuset har etter min mening økt sannsynligheten for å finne noe relevant «lokalt». Når det kommer til valget om å kun inkludere undersøkelser av vegkroppen kun for å bygge ny veg, har dette gjort flere artikler irrelevante, som sikkert inneholder nyttig kunnskap som kan brukes til å bestemme f.eks. tykkelse på vegdekke eller bærelaget. Dette er allikevel valgt bort, da mange av disse artiklene har vist seg å være veldig detaljerte innen sine områder. Dette mener jeg ville tatt fokuset vekk fra rapportens forskningsspørsmål innenfor den tilgjengelige tidsrammen. I tillegg er det sannsynlig at det finnes mye stoff er ute, men som ikke er dokumentert i de kanalene benyttet i denne rapporten. For eksempel finnes det muligens tekniske rapporter fra organer som SVV i Sverige og Danmark, som er land vi gjerne sammenligner oss med. Disse rapportene har jeg ikke tilgang på gjennom mine metoder.

6.1.2. Etablert litteratur

Etablert litteratur omfatter i denne rapporten bøker og teori som er veletablert og udiskutert – altså ikke forskningslitteratur, men litteratur som gjentatte ganger brukes som grunnlaget til annen forskning.

Litteraturen er funnet ved bruk av søkebegrepene listet opp i starten av kapittel 6.1. Søkemotorene Oria og GoogleScholar er brukt.

Litteraturen er valgt ut etter flere kriterier. For det første, så måtte den være relevant for å svare på forskningsspørsmålet, men heller ikke for teknisk – med dette mener jeg at målet med denne rapporten ikke er å skrive en ny lærebok om georadar, eller å beskrive hvordan man bygger en egen (f.eks. med avansert antenneteori). For det andre, er gjentatt referering til den aktuelle etablerte litteraturen i forskningslitteraturen sett på som et kvalitetstegn. For det tredje var det ønskelig å ha varierende kunnskapsnivå på den etablerte litteraturen – f.eks. så bruker Jol et.al. [16] Maxwell sine likninger til å forklare elektriske felt, mens Utsi [15] benytter en mindre matematisk metode.

Informasjonen er hentet ut av litteraturen ved å parafasere større sitater og sammenhenger, og supplert med enkeltsetninger fra annen litteratur dersom; jeg vurderte at noe manglet, fantes en alternativ beskrivelse av, eller var relevant å nevne i den sammenhengen.

Styrker og svakheter med denne gjennomføringsmetoden er at en bok gjerne er på flere sider, tar lang tid å lese, og gjerne dekker flere temaer enn man ofte trenger. Fordelen ved å benytte denne metoden, og dermed den samme etablerte kunnskapen som «alle andre» i forskningslitteraturen, at begreper og konsepter forstås på samme måte. Videre, så kan det stilles spørsmål om parafasering av større avsnitt kombinert med enkeltsetninger fra annen litteratur er rett vei å gå, da det er mulig at ting blir tatt ut av den sammenhengen originalforfatteren hadde tiltenkt. Dette er allikevel gjort da teorien knyttet til EM-bølger er et stort felt, og «spesiell» kunnskap om forhold her i Norden som påvirker materialeegenskapene ikke nødvendigvis blir tatt hensyn til av f.eks. en forfatter fra Canada.

6.1.3. Litteratur fra nasjonal vegmyndighet

Litteratur fra nasjonal vegmyndighet, altså Statens Vegvesen (SVV), omfatter i denne rapporten normaler, retningslinjer, veiledninger og rapporter. Hvilket inkluderer litteratur knyttet til både georadar og grunnundersøkelser i vegbygging.

Litteraturen er funnet enten ved søkebegreper som, georadar, GPR og Ground Penetrating Radar, eller som primærkilder fra litteratur allerede valgt ut. Søkemotoren som er benyttet er vegvesenets nettsider (inneholder publikasjonene). Når det kommer til grunnundersøkelser i vegbygging, er det N200 som har satt føringen for hvilke andre publikasjoner som er brukt.

Litteraturen er valgt ut på to ulike måter, alt ettersom hvilket innhold og hva som var ønskelig å hente ut:

- *Grunnundersøkelser i vegbygging*

Litteratur som gir overordnet informasjon om dette, hvilken informasjon trengs, hvordan

brukes denne, og hvordan kan denne skaffes.

- *Georadar*

Artikler med fokus på undersøkelser av lagdeling i eksisterende vegkonstruksjon og undersøkelser ute i terrenget for bygging av ny veg (inkl. forsterkningsarbeider). Som en konsekvens er artikler/publikasjoner som går på; kvalitetskontroll av ferdig veg (f.eks. hulroms % i asfalt), tilstandsovervåkning/registrering (f.eks. registrering av sprekker og delaminering), og vedlikeholdsplanlegging blitt valgt bort.

Informasjonen er hentet ut av litteraturen på to ulike måter, alt ettersom hvilket innhold og hva som var ønskelig hente ut.

- *Større publikasjoner som er relevante*

Hentet ut og parafasert større avsnitt og supplert med enkeltsetninger fra andre publikasjoner dersom det var vurdert relevant i den sammenhengen.

- *Mindre publikasjoner som er relevante eller større publikasjoner som ikke er meget relevante*

Enkelte setninger er hentet ut

Når det kommer til SVV sine publikasjoner (spesielt rapportene) må det også nevnes at det er en del stoff om georadar som går igjen. I de tilfellene hvor dette gjelder, er det valgt å benytte den publikasjonen med høyest nivå.

Styrker og svakheter med denne gjennomføringsmetoden; en styrke er at SVV sine erfaringer og eksisterende informasjon blir inkludert i rapporten, hvilket forsterker rapportens relevans her i Norge. En svakhet er at review-prosessen for SVVs publikasjoner er ukjent.

6.2. Intervju

Intervju er en kvalitativ metode som benyttes til å svare på forskningsspørsmålet. Som det kommer fram av Tabell 6-1, skal intervjuet bidra til å svare på hvordan nytteverdi oppstår eller kvantifiseres. Denne metoden er valgt, da nytte og nytteverdi (utenom det økonomiske, se kapittel 4.2) ikke har en fast definisjon. Forståelsen av dette begrepet kan derfor variere fra person til person, alt ettersom hvilken rolle eller erfaring man har.

6.2.1. Gjennomføring

Totalt er det gjennomført fem intervjuer i perioden mars-mai 2022, både fysisk, over teams/digitalt og over epost, alt etter hva som var mest praktisk for de som ble intervjuet. Hvis praktisk mulig ble det valgt fysiske møter, for å skape bedre flyt og etablere tillit. Varigheten til hvert enkelt intervju var basert på den tilgjengelige tiden intervjuobjektet hadde til rådighet, og varierte fra ca. 0,5 til 1 time, i noen tilfeller ble de gjennomført oppfølgingsintervjuer. Tabell 6--2 i kapittel 6.2.2 viser en liste over alle som er intervjuet.

Alle personopplysninger og innsamlet informasjon i sammenheng med intervjuene er anonymisert i denne rapporten. Videre er det heller ikke tatt noe lydopptak under intervjuene, dette er gjort av flere grunner. For det første, for å skape en mere avslappet atmosfære da de som intervjues vet at

ikke noe de sier kommer «ordrett» på trykk, dette understøttes av Jacobsen [30, p. 153] som poengterer at folk gjerne har negative reaksjoner på å bli tatt opp. For det andre, så må all innsamling av forskningsdata (inkl. intervjuer) som behandler personvernsopplysninger skal meldes inn og godkjennes av Norsk senter for forskningsdata (NSD) [31], hvor lydopptak regnes som en slik opplysning. Det er valgt å ikke sende inn en slik søknad da det er en viss saksbehandlingstid, samt at transkribering av lydopptak for bruk videre i rapporten ville krevet betydelige mengder tid og ressurser – det var isteden ønskelig å prioritere arbeid som selve intervjuene og andre deler av rapportarbeidet. Ulempen med dette var at det kun ble tatt håndskrevne notater underveis av undertegnede under intervjuene. Hvilket er en vanskelig balansegang mellom å skrive og samtidig føre en samtale, dette er noen som understøttes av [30, p. 153] som sier at intervjuet ideelt sett burde tas opp og bli transkribert senere.

Det er valgt å benytte et individuelt åpent intervju for å bidra til å besvare forskningsspørsmålet. Dette er ifølge Jacobsen [30, p. 146] den vanligste datainnsamlingsmetoden innenfor den kvalitative metoden, hvor data samles inn i form av ord med få individer som undersøkes [30, p. 145]. Videre, legges det i denne metoden ingen begrensinger på de svarene som respondenten (han/hun som blir spurt) kan gi [30, p. 146]. Det vil derimot være behov for en viss grad av struktur, blant annet for å unngå det Jacobsen [30, p. 149] beskriver, nemlig at dataene blir for resurskrevende å analysere i ettertid.

For å opprettholde denne strukturen og samtidig legge til rette for åpne svar er det laget en intervjuguide, en slik guide kan ifølge [30, p. 150] ha ulik grad av åpenhet. Derfor er det valgt en semistrukturert intervjuguide med faste temaer og spørsmål i en gitt rekkefølge med åpne svar slik at respondenten selv kan ta opp temaer de måtte ønske. Så lenge respondenten kunne svare på spørsmålene med sine egne ord, vil intervjuet forbli kvalitativt [30, p. 152]. Som en konsekvens av dette, ble ikke alle spørsmålene direkte besvart under intervjuet. I ettertid er det sendt oppklarings spørsmål for å tette eventuelle mangler i svarene.

Temaene i intervjuguiden er:

- Grunnundersøkelser i dag
- Nytteverdi og nytte av grunnundersøkelser
- Grunnundersøkelser med georadar

Basert på de overnevnte temaene er det utarbeidet en liste med ti utfyllende spørsmål som ble presentert til alle intervjudeltakerne i forkant (både fysiske og digitale, samt e-post). Disse spørsmålene er:

1. Bruker dere i dag noen digitale metoder for å kartlegge grunnforholdene?
2. Hvilke metoder bruker dere i dag for å kartlegge grunnforholdene?
 - a. Hva er fordelene?
 - b. Hva er ulempene?
3. Hvilken kunnskap/informasjon fra grunnundersøkelsene er mest nyttig når dere planlegger og prosjekter?
4. Hva bruker dere denne kunnskapen til?

5. Hvordan påvirker prosjektets størrelse og kompleksitet behovet for detaljnivået i grunnundersøkelsene?
6. Hvilken kunnskap/informasjon hadde vært nyttig for dere å ha, som dagens metoder ikke klarer å gi oss?
7. Har dere erfaring med å bruke georadar (GPR) i deres prosjekter?
8. Til hvilket bruk, kan dere se for dere å ha nytte av å bruke georadar (GPR)?
 - a. Skille mellom løsmasser og berg?
 - b. Skille mellom lagdeling i løsmasser?
 - c. Andre bruksområder?
9. Resultatene fra georadaren må tolkes og kalibreres, hvor nøyaktig/sikre må disse resultatene være for å ha noe verdi for dere?
10. Kan dere tenke dere at en mer komplett grunnundersøkelse (med GPR-data til å fylle «hulrommet» mellom borepunktene), ville påvirket hvordan dere:
 - a. Planlegger prosjekter?
 - b. Gjennomfører prosjekter?
 - c. Ser muligheter for både dere selv og byggherre?

6.2.2. Hvem er spurt

For å svare på forskningsspørsmålet i kapittel 3.2.5, er det for intervjuene nødvendig å snakke med de personene som er involverte i både planlegging og gjennomføring av vegprosjekt. Derfor er det valgt å intervjuer både byggherre, entreprenører og rådgivere, for å få flest mulige perspektiver.

Å velge ut respondenter basert på at de kan gi god informasjon, er noe som Jacobsen [30, p. 181] legger fram som et formålsstyrt utvalg, hvor det er undersøkelsens formål som bestemmer hvem som burde intervjues. Denne tilnærmingen er benyttet i utvelgelsen av respondentene i denne rapporten. Tips fra veileder og personer i bransjen bidro til å sikre at de som ble kontaktet hadde denne informasjonen, da det å vite på forhånd noe om informasjonen som kan hentes ut fra respondentene er noe som ifølge [30, p. 181] gjør at denne utvalgsmetode ikke er enkel i bruk. Tabell 6--2 nedenfor, viser nummereringen av intervjuobjektene sammen med hvilken rolle de har.

Tabell 6--2 Nummerering av intervjuobjekter

Nummer	Kategori	Kommentar	Intervjuform
1	Rådgiver	2 tilstede – Geotekniker og BIM	Fysisk
2	Entreprenør	3 tilstede – Stikning, BIM og prosjektutvikler	Teams
3	Byggherre	2 tilstede – Geotekniker og prosjekteringsleder	Fysisk
4	Entreprenør	1 tilstede – Prosjektsjef	E-post
5	Universitet/forskning	1 tilstede – Dr.ing.	Teams

I tillegg til de som er presentert i Tabell 6--2 ovenfor, ble også tre ytterligere personer spurt om de ville stille til intervju. Det ville de, men dette lot seg ikke gjennomføre på grunn av mangel på tid. Disse tre personene var; to rådgivere innen geofysikk hos to forskjellige firma, og en anleggsleder hos en stor entreprenør.

6.2.3. Hvordan svarene er analysert

Etter hvert intervju ble notatene renskrevet og utdypet med intervjuet friskt i minnet. Samtidig ble det skrevet et lite avsnitt med mine tanker og inntrykk som et hjelpemiddel ved analysen.

De tre temaene i intervjuguiden har dannet grunnlaget for å sortere og analysere dataen fra intervjuene, sammen med de ti spørsmålene som var sendt ut på forhånd. I tillegg er det opprettet en «annet» kategori for å ta hensyn til den informasjonen som fremkom, som ikke var inkludert på forhånd. Dermed blir kategoriene:

- Grunnundersøkelser i dag
- Nytteverdi og nytte av grunnundersøkelser
- Grunnundersøkelser med georadar
- Annet

Det er ikke benyttet noen programmer for tolkning av dataen. Argumentet for dette er at all «digital tekst» var mine egne notater, derfor ville en slik analyse i stor grad bli påvirket av meg og ikke de som ble intervjuet.

6.3. Feltundersøkelser

Det er gjennomført en feltundersøkelse ute på anlegget oppe på Gauslå (se kapittel 5.1) fredag 29.04. Undersøkelsene fant sted ved aktiv veg, derfor ble det benyttet synlighetstøy (refleksvest kl.3) og min. to personer var tilstede under hele undersøkelsen. I forkant ble entreprenørens anleggsleder kontaktet for å avklare tidspunkt og for å forsikre at undersøkelsen ikke kom i konflikt med anleggsvirksomheten – anlegget var stengt på fredager.

I forbindelse med egen dataanalyse (kapittel 6.4), var det ønskelig å få et inntrykk av prosjektet, og samtidig innhente informasjon om:

- Stikkrenner under veggen
- Synlig berg i dagen nær veggen
- Lagdeling i eksisterende vegkonstruksjon

Lokasjonen til objekter er tatt med en Garmin 66S håndholdt GPS.

Diameter og avstand fra topp vegdekke ned til topp stikkrenne ble målt med en tommestokk og en rettholt – hvilket er vurdert å ha tilstrekkelig nøyaktighet for senere bruk i denne rapporten.

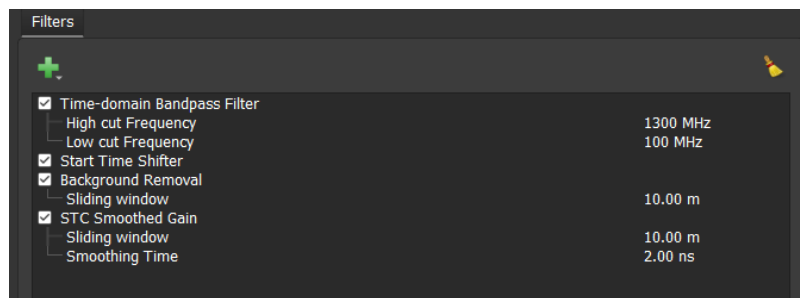
6.4. Egen dataanalyse - prosessering og tolkning av georadar data

Dette kapitlet presenterer metoden som er benyttet til ved egen dataanalyse, for informasjon om programmet se kapittel 5.2.

Dataen som er samlet inn i forkant av denne rapporten (se kapittel 5.1 og kapittel 7.6) har følgende nøkkelinformasjon:

- Sampling step = 0,030 m
- Sampling time = 60 ns
- Frekvenser 200 og 600 MHz

Til analysen er det benyttet den prosesseringen som ligger som «standard» i programvaren uten endringer i de forhåndsdefinerte innstillingene, som vist i Figur 6-1.



Figur 6-1 Standard filter benyttet til prosessering av dataen. [Foto tatt i IQMaps]

Merk, under utarbeidelsen av denne rapporten har det ikke vært mulig å få diskutert med de som samlet inn dataen, hvilken preprosessering og hvilke innstillinger de har brukt på deres Stream EM fra IDS ved datainnsamlingen er derfor ukjent.

7. Resultat

I dette kapitlet presenteres rapportens resultater, disse er oppnådd ved gjennom bruk av metodene presentert i kapittel 6 Metode.

7.1. Bruk av georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter

I dette kapitlet presenteres funn fra litteraturstudiet som går på hvordan georadar brukes i forbindelse med vegprosjekter. Dette inkluderer både nasjonal (f.eks. fra SVV) og fra internasjonal litteratur.

7.1.1. Vegvesenets publikasjoner og i norsk forskningslitteratur

Håndbøkene og publikasjonene til statens vegvesen står sentralt i all prosjektering og planlegging knyttet til vegprosjekter. I dette kapitlet gis det en kort oversikt over hvordan georadar er inkludert i håndbøker og veiledninger fra SVV i dag (mai 2022), samt to andre publikasjoner fra forskningsmiljøet her i Norge.

I Norge er georadar som metode inkludert i flere av Statens Vegvesens håndbøker og rapporter. Hovedsakelig som et supplement eller alternativ til grunnboring og/eller oppgraving ved; kvalitetskontroll, rehabilitering, eller vedlikeholdsoppdrag (alene eller som støtte) [23, p. 307] [13, p. 82]. Alternativt er metoden også i Rapport nr.626 *Lærebok Vegteknologi* [13, p. 82] foreslått benyttet ved forsterkningsplanlegging, for å gi informasjon om lagtykkelse i vegkonstruksjonen. Det å potensielt kunne avdekke frostdybde, grunnvannsnivå, bergoverflate og dybde av myr, blir i [13, p. 262] trukket fram som en mulighet. Dette dersom man tar georadarens dybdebegrensning i betraktning.

Også i Rapport nr. 373 *Forsterkning av vegger* [32] blir georadar trukket inn, da i forbindelse med kantforsterkning, altså utvide skuldre eller slakere fyllingsskråninger. Her benyttes metoden til å avdekke variasjoner i lagtykkelse eller materialegenskaper over vegens tverrprofil. Et eksempel som trekkes fram i [32] er vurdering av steinstørrelse i bærelaget ved planlegging av

forsterkningsarbeider. Når det kommer til kvalitetskontroll som nevnt i avsnittet ovenfor, er georadar også inkludert i flere andre rapporter fra SVV hovedsakelig relatert til asfaltdekker; nr. 392 [33], nr. 497 [24], nr. 610 [34], og nr. 800 [35].

Georadar har som det påpekes i SVV rapport nr. 598 *Varige veger sluttrapport* [36, p. 17], i liten grad vært benyttet til undersøkelser av veger, eller kvalitetssikring/kontroll i Norge. Denne rapporten fra 2017 hevder likevel at interessen har vært økende, hvor det spesielt er innenfor planlegging av forsterkning/rehabilitering av veger som georadar har størst potensiale i Norge [36, p. 17]. Spesielt trekkes Roadscanners Oy i Finland fram som et sterkt fagmiljø, og den fremste aktøren for denne bruken av georadar. I tillegg viser rapporten [36] til resultatet fra Vegdirektoratet og SVV region nord, sin deltakelse i det nordiske Interreg-prosjektet Mara Nord, om bruk av georadar innen vegbygging. Ut av dette prosjektet kom det fem rapporter i 2011 med anbefalinger/veiledninger for hvordan georadar skal brukes i ulike sammenhenger.

Blant disse anbefalinger/veiledningene for bruk av georadar i Mara Nord, er det hovedsakelig tre som er aktuelle for denne rapporten:

- Recommendations for guidelines for the use of GPR in Site investigations [25]
- Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement [21]
- The Use of GPR in Road Rehabilitation Projects [37].

De tre veiledningene fra Mara nord nevnt ovenfor, har mye felles teori og beskrivelse av georadarens virkemåte. Denne informasjonen sammenfaller med den i kapittel 3.2 og senere kapittel 7.2. Spesielt av interesse er rapporten *Recommendations for guidelines for the use of GPR in Site investigations* [25], hvilket er en retningslinje for innsamling av 2D og 3D data om jorda i undergrunnen og fjell i forkant av prosjektering av vegkonstruksjoner her i Norden. Ved denne typen undersøkelser har det kun vært brukt bakkekoblede antenner, med en sentralfrekvens mellom 30 til 400 MHz. Videre, så brukes det ikke luftkoblede antenner da de har dårlig dybdepenetrering. Tabell 7-1 er en gjengivelse av tabellen i [25] som summerer kvalitetene til ulike antenner som benyttes til grunnundersøkelser.

Tabell 7-1 Oversikt over frekvenser, penetrasjonsdybde, oppløsning og bruksområde for georadarer i forbindelse med grunnundersøkelser. Gjengitt fra [25]

Antenne	Sentralfrekvens [MHz]	Penetrasjonsdybde [m]	Oppløsning [i mm ved $\epsilon_r = 6$]	Bruksområde
Bakkekoplet antenne	400 - 600	1,5 - 4,0	80 - 150	Lag i vegkroppen, lave fyllinger, undergrunn < 3m
	50 - 200	3,0 - 30,0	250 - 500	Lag i vegkroppen, fyllinger, undergrunn < 20 m (gjelder ikke leire og silt)
Broadband antennes (stepped frequency) radar	200 - 3000 ¹	1,0 - 3,0	30 - 100	Lag/struktur i vegkroppen, undergrunn < 3m, lokalisere spesielle objekter som pelehatter osv.

¹Frekvensområdet for stepped frequency radar spesifiseres som min og maks frekvensinger istedenfor sentralfrekvens, dvs. at denne antennen dekke omtrentlig samme frekvensområde som en kombinasjon av en 400, 900 og 1500 MHz antenne.

Når det kommer til årstiden for undersøkelsen trekker Mara Nord rapporten [25] fram at det kan være fordelaktig å gjennomføre den på vinteren, da dette gir ytterligere informasjon om frostfronten/teledybde og jordas telefarlighet. Samtidig penetrerer signalet dypere i frossen leire dersom det er tilstede. Veiledningen gir også en rekke andre tips for gjennomføring av grunnundersøkelser, både ved det praktiske og når det kommer til tolkningen og hva som skal leveres til vegeier. Dette blir ikke gjengitt i denne rapporten.

Selve gjennomføringen av undersøkelsen gjøres ifølge [25] ved at radaren dras over bakken manuelt eller assistert av et kjøretøy. Dersom undersøkelser skal gjøres i nærheten av veg må retningslinjene til vegmyndigheten følges. Videre gir veiledningen [25] føringer for antall scan/m, antall linjer som burde gjennomføres (gjærne 3-4 for prosjektering av veg), og tidsvindu for registrering av dataen (avh. av ønsket dybde og materiale).

Når det kommer undersøkelser av overbygningen, inkluderer en annen veiledning i samme serie [21] metoder for å måle luftporeinnhold i asfalten. Det påpekes at dette kun fungerer for nye vegdekker [21, p. 8]. Det er også i [21] inkludert en fremgangsmåte for målingene, passende antenner og informasjon om hva som burde leveres til vegeier. Dette blir ikke gjennomgått i denne rapporten, og varierer fra det som er beskrevet i avsnittene ovenfor.

Den siste veiledningen i serien [37] presenterer en veiledning for innsamling av 2D og 3D georadardata i forkant av rehabiliteringsplanlegging, samt en tabell over hvilke antenntyper som benyttes til ulike formål.

Utenom statens vegvesens publikasjoner finnes det også annen forskning og bruk av georadar på infrastruktur og veger her i Norge. Disse to er allerede trukket fram i rapportens innledning (kapittel 1). Allerede i 2008, satte Hoff et.al. [10] søkelys på hvordan georadar kan brukes til å identifisere hvilke seksjoner av vegen som er svake i forbindelse med utbedring av veger. Hvor det var georadarens evne til å «se» mettede materialer og i noen tilfeller islinser som ifølge [10, p. 5], gjør metoden til et svært nyttig verktøy for den lavtrafikkerte andelen av vegnettet, som opplever betydelig problemer knyttet til telehiv og vårtining nesten hvert eneste år. Dette er et problem som forventes å forverres ved raskere endringer mellom frost og tining, som følge av klimaendringer. I forkant av rehabiliteringsarbeidet påpekes det i [10, p. 5] at georadaren kan gi informasjon om:

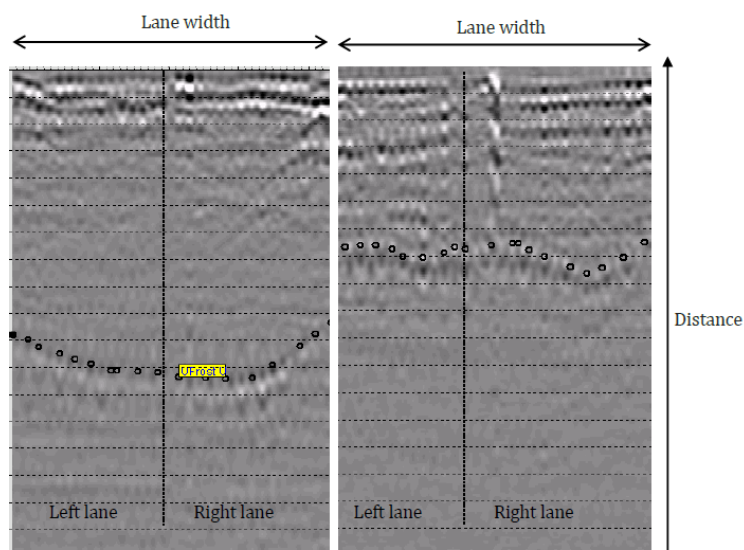
- Lagtykkelse
- Dybde til fjell er svak undergrunn
- Materialer
- Konstruksjonens homogenitet
- Større partikler/steiner i bærelaget
- Egenskaper knyttet til vann
- Rør og annen nedgravd infrastruktur

I denne sammenheng ble den økonomiske fordelen av å nyttiggjøre seg av den gjenværende verdien til eksisterende infrastruktur trukket fram. Dette i kombinasjon med muligheten for å unngå å velge ineffektive rehabiliteringsmetoder, hvor bruk av georadar i forkant av rehabiliteringen være kostnadseffektivt og burde brukes i de fleste tilfeller [10, p. 5].

En annen artikkel utgitt i Norge er PhD avhandlingen til Anne Lalagüe fra 2015 [7], som omhandler bruken av georadar for vedlikehold av infrastruktur knyttet til transport (eng: Use of Ground Penetrating Radar for Transportation Infrastructure Maintenance). Dette inkluderer bruksområder for georadar som; måling av lagtykkelser, tetthet og separasjon, fuktighet, stripping og delamination, saltkonsentrasjon på veger, nedgravdinfrasturktur, frossen grunn, brudekker, flyplasser, jernbane og tunneller.

I PhD avhandlingen [7, p. 59] ble georadarens nøyaktighet til å evaluere dekketykkelser vurdert, og feilen ble funnet til å normalt ligge 2 og 10% i litteraturen. Men, et fåtall av disse studiene er utført med et step-frequency system. Ved hennes egne undersøkelser av nøyaktigheten til 3d-GeoSxope systemet (3D radar) er i Norge, med 200 MHz – 2 GHz og 200 MHz – 3 GHz antenner hvor det ble tatt kjerneprøver, hadde undersøkelsene en nøyaktighet på henholdsvis 3,6 og 3,3 %. Derimot trekkes det fram at selve tolkningen kan påvirke nøyaktigheten også. Dersom grensen mellom lagene ikke er ren og skarp, kan det være vanskelig å velge senter i overgangen både manuelt og automatisk. Konklusjonen var at selv små avvik kan gi store utslag på målingenes nøyaktighet, og der det er mulig burde manuelle tolkninger av denne overgangen benyttes.

I tillegg ble det i [7, p. 62] utført undersøkelser knyttet til frostdybder og islinser i vegkonstruksjoner, da kjennskap til frostfronten er viktig for design og rehabilitering av veier. Georadaren benyttet i [7, p. 62] hadde suksess og viste utviklingen av frostfronten over tid som høst, vinter og vår. Her trekkes 3D bildene fram som en fordel, siden det kan lages tverrsnitt av frostfronten i vegen. Her viste tverrsnittene at frostfronten kurvet oppover ettersom den nærmet seg vegkantene, hvilket i dette tilfellet var pga. 1m med snø på sidene av vegen som fungerte som isolasjon og reduserte nedtrengningen av frost i bakken. Figur 7-1, er kopiert PhD-avhandlingen, og viser frostfronten (markert med dotter) på tvers av vegens tverrprofil om vinteren og våren.



Figur 7-1 Frostfronten i vegens tverrprofil, t.v. om vinteren og t.h. om våren. Kopiert fra [7, p. 64]

Islinser trekkes også fram i [7, pp. 62-63]. Da i kombinasjon med frostfronten, hvor dannelsen av disse linsene er knyttet til telefarlige masser og telehiv. Undersøkelsene som ble utført på vinteren

ble hindret av tilstedeværelsen av avisingsalt. Videre var ikke alltid lett å fastsette om det de så var islinser, steiner eller andre objekter. De benyttet derfor en phase inversion av signalet (hvit/svart/hvit, istedenfor Svart/hvit/svart), som indikerte at refleksjonen var forårsaket av et materiale med lavere dielektrisk permittivitet. Allikevel beskriver [7] at den beste måten å bekrefte eller avkrefte om dette var is, var å gjennomføre den samme undersøkelsen på sommeren for deretter å sammenligne de to målingene. Det viste seg da at de fleste objektene observert på vinteren forsvant om sommeren, og var derfor islinser.

Fokuset på kostnader dukker også opp i [7, p. 62], hvor det ble stilt spørsmål rundt de finansielle fordelene med georadar. Det som trekkes fram er at dette handler blant annet om balansegangen mellom nøyaktigheten til georadar-målingene og kostnadene. Som en del av arbeidet i [7] ble det gjennomført en studie, og for QA er det ideelt med 2-3 prøver. Mer enn 3 har gjerne lite utslag ifølge [7].

7.1.2. Lagdeling i overbygningen

Det finnes en rekke utenlandsk forskningslitteratur som går på bruk av georadar til å måle lagdelingen i vegens overbygning. I dette kapitlet gis det en kort oversikt over hvilke metoder som og bruksområder som georadar normalt har innenfor dette.

Når det kommer til evaluering av veger med bruk av georadar, er artikkelen til Saarenketo og Scullion *Road evaluation with ground penetrating radar* [38] fra 2000 en gjenganger i forskningslitteraturen. Det presenteres der [38, p. 128] blant annet en metode for å måle den dielektriske verdien til både vegdekke og bærelaget. Metoden er basert på å bruke refleksjonen til en metallplate, som gir 100% refleksjon, på toppen av asfalten sammen med de registrerte amplitudene til EM-bølgene i asfalten. Disse dielektriske verdiene kan så plugges inn i likningene som presenteres i [38, p. 129] (gjengis ikke i denne rapporten), for deretter å beregne tykkelsene. Derimot inkluderer ikke likningene attenuation, men [38, p. 128] argumenterer for at de allikevel gir fornuftige verdier for asfaltdekker ($t > 60$ mm) og ubundne bærelag. Et mulig bruksområde for denne testen og beregningsmetoden er ifølge [38] kontroll av dekketykkelse i forkant av fresing, i tillegg til kvalitetskontroll og tilstandsvurderinger. Denne metoden for å beregne asfaltens dielektriske verdi er også benyttet i [21].

Ifølge Saarenketo [20, p. 82] vil nøyaktigheten til målinger av bærelagstykkelser med georadar være ca. 8-12 %. Videre vil høye dielektriske verdier i bærelaget (9-16, > 16) beregnet med georadar, alltid være gode indikatorer for at det er eksisterende eller potensielt framtidige problemer i laget. Dette gjelder også dersom den dielektriske verdien er for lav, da dette vil indikere en åpen gradering i bærelaget og utilstrekkelig komprimering. Dette gjør laget påvirkelig ovenfor permanent deformasjon. I samme avhandling [20, p. 82] er det også presentert en tabell som viser sammenhengen mellom dielektriske verdier, og hvilken konsekvens dette har for bærelaget. Denne er ikke inkludert i denne rapporten.

En rekke studier er som går ut på evaluering av tykkelsen til vegdekker av asfalt og betong er presentert i Solla et.al. [27, p. 20]. Idisse er det bla. benyttet frekvenser over 800 MHz med ulik nøyaktighet av resultatene. Alle disse undersøkelsene i [27, p. 20] trenger kalibrering gjennom kjerneprøver. De resultatene som er oppnådd uten kalibrering har større feil, hvilket beskrives å

demonstrere at kun bruk av georadar alene til å vurdere vegdekker, kun er nyttig for raske og grove evalueringer.

Ved inspeksjon av veger, påpeker Annan et.al. [18, p. 62] at georadar gjerne brukes på fire ulike dekketyper. Disse inkluderer fleksible dekker (asfalt på forsterkningslag/bærelag), semi-stive dekker (asfalt på hydraulisk bundne lag), stive dekker av betong, eller kompositt dekker med asfalt over betong. I motsetning til georadarundersøkelser hvor man jakter enkelte objekter, forklarer [18, p. 62] at det for veger er vanligere med refleksjoner i form av linjer og kontinuerlige refleksjoner langs de ulike lagene i vegkonstruksjonen. I tillegg trekkes det fram at per 2018 [18] handler ikke georadarinspeksjoner av veger kun om lagtykkelser, men også om å detektere sprekker, hulrom, vanninfiltrering, nedgravde objekter, samt tilstandsvurdering/overvåkning. For å gjøre dette, er det ifølge [18, p. 62] array-radarsystemer tilgjengelige i dag. Disse har mulighet til å samle inn store mengder data sammenlignet med enkelte impulse-radarer, men et slikt system koster gjerne mer. Det er også i den samme artikkelen [18, p. 63] presentert en stor oversikt over flere artikler som går på inspeksjon av veger. Fokuset er mest på evaluering av vegdekke og skader ved bruk av antenner med høye frekvenser, og derfor ikke gjengitt i denne rapporten.

En rekke prosesseringsteknikker er presenter av Benedetto et.al. [39] fra 2016. Der påpekes det [39, p. 202] at for veger, så vil kjennskap til oppbygningen av lagene i vegkonstruksjonen ha en tendens til å redusere risikoen for å overprosessere dataen. Denne kunnskapen kan gjøre det mulig å velge mer spesifikke prosesseringsmetoder for bruk i tolkningsarbeidet. På den andre siden derimot, forklarer [39, p. 202] at den store mengden data som samles inn i forbindelse med undersøkelser av veger, gjør at muligheten for feil prosessering kan øke. Derfor er riktig planlegging kritisk.

7.1.3. Lagdeling i undergrunnen og dybde til fjell

Det finnes en rekke utenlandsk forskningslitteratur som går på bruk av georadar til å måle lagdelingen, undergrunnen og dybde til fjell. I dette kapitlet gis det en kort oversikt over studier hvor georadar er benyttet til dette, både i eksisterende veg og utenfor i terrenget.

Når det kommer til georadar, og andre geofysiske metoder, sin rolle innenfor geoteknikken trekker Annan et.al. [18] fra 2018 fram at denne rollen for det meste er å bekrefte de løsmasse- og fjellprofilene som er skaffet gjennom punktvis borehull. Målet er da å fylle det ukjente «tomrommet» med informasjon om lagdeling og fjell, mellom ulike borehull da disse vanligvis er begrenset i antall. I tillegg presenterer [18, p. 66] en tabell med en rekke andre studier som har benyttet georadar til å estimere intern erosjon i fyllingsdammer, avsetninger og dybde til berg.

Det argumenteres også i [18, p. 66] for at eksisterende muligheter til å skille/avgrense jord- og berglag ved hjelp av boreloggen fra grunnboringer, har gjort at geofysiske metoder så langt ikke er sett utbredt i bruk. Dette begrunnes med det som [18, p. 66] kaller en mangel på kunnskap om georadar og geofysikk i det geotekniske miljøet. I tillegg er ingeniører mer tilbøyelige til å tro informasjon om jord og fjell som de kan se fra boreloggen, fremfor det de ikke kan se via geofysiske signaler.

Spesifikt knyttet til lag i løsmasser / undergrunnen:

Ved undersøkelser av undergrunnen og ved grunnundersøkelser trekker Saarenketo og Scullion i [38, p. 122] fra 2000, samt [27] [38] fram tre undersøkelseskategorier alt ettersom hva undersøkelsens hensikt er:

- Ny linjeføring (eng: new road alignment) og site investigation
- Forsterkning og breddeutvidelse av eksisterende veg
- Bruk av den eksisterende vegen som informasjonskilde til planlegging av ny veg vedsiden av

Undersøkelser for bruk i Pavement Management Systems (PMS) og liknende formål, trekkes også inn som en mulig undersøkelses kategori av Saarenketo [20, p. 79] i 2006. Dette gjelder i tillegg til de andre kategoriene som listes opp ovenfor.

Ved utforming av ny linjeføring for veger, kan undersøkelser av undergrunnen med georadar ifølge [38, p. 122] brukes til å identifisere lagdeling og jordtyper, bestemme dybde til fjell, estimere grunnvannsstanden og telefarlighet. I tillegg argumenter [38, p. 122] for at georadarundersøkelsene også kan brukes som veiledning både i sammenheng med gjennomføring av tradisjonelle grunnundersøkelser (f.eks. grunnboring), eller når man skal velge hvilken tradisjonell metode å bruke. Dette er dersom det skulle være varierende grunnforhold.

Når det kommer til undersøkelser av løsmasser undergrunnen, påpeker [38, p. 122] at det ofte er ganske lett å skille grove fraksjoner med grus, sand og morene fra hverandre i dataen. I tillegg vil metoden normalt fungere godt i organiske masser som torv. Når det kommer til siltige jordarter forklarer [38, p. 122] at man gjerne vil oppnå relativt god penetrasjon. Derimot vil man for leirholdige jordarter normalt ikke oppnå større penetrasjonsdybde enn ca. 2 m her i Skandinavia, hvilket er ok for de fleste kabelpåvisninger, men ikke tilstrekkelig for prosjektering av veger. Da må andre geofysiske metoder vurderes.

Når man beregner tykkelsen til lagene i undergrunnen, må man ifølge Saarenketo [20, p. 80] ha i bakhodet at de dielektriske egenskapene til jord henger tett sammen med vanninnholdet og den typen vann som finnes i jorda. Dette gjeler spesielt dersom undergrunnen under vegen er av torv [20, p. 80]. Når det kommer til fuktighet og design av veger, trekker [20, pp. 80-81] fram at georadarmålinger har tidligere blitt brukt til å identifisere de delene av vegen som har betydelige mengder fuktighet. Og dermed hjulpet i arbeidet med å velge riktige dreneringsløsninger.

Undersøkelser på eksisterende veg, er også noe som ifølge [38, p. 122] kan gi god informasjon om komprimeringsegenskapene til jorda i undergrunnen, noe som trekkes fram som nyttig i sammenheng med; breddeutvidelse eller forsterkning av eksisterende veg, eller ved beregning av setninger og for planlegging av forbelastning av fyllinger over leire, silt eller torv.

I mange tilfeller kan også selve jordarten ifølge [38, p. 123] bestemmes utfra georadardataen. Argumentet for dette er at hver jordtype har sin egen geologiske tekstur, dielektriske- og elektriske egenskaper. Samtidig understrekes det at enhver jordartsklassifisering med georadar alltid trenger en eller annen form for prøvetaking som bekrefter tolkningen. Kjerneprøver trekkes i denne sammenhengen i [38, p. 123] fram som et hjelpemiddel i arbeidet med å identifisere skiller i lag. Data fra falloddsmålinger også kan gi svært nyttig tilleggsinformasjon i denne sammenhengen.

Georadar er også benyttet til å lokalisere synkehull under veger, oppdage utvasking av sandholdig materiale under vegdekke (pavement), og overvåke injeksjon i tomrom. [38, p. 127]

Solla et.al. i [27, p. 19] fra 2021 trekker fram at det er attenuation som skaper de største vanskelighetene når det kommer til å undersøke undergrunnen. I denne sammenhengen trekker de fram to mulige årsaker; mengden leire i jorda og tilstedeværelsen av betydelige mengder vann. I tillegg påpekes det at luftkoblede antenner er mere passende for å detektere overganger i lag og undergrunnen, mens bakke-koblede antenner er mer passende for å avdekke abnormale soner som kan tilknyttes skader på vegen.

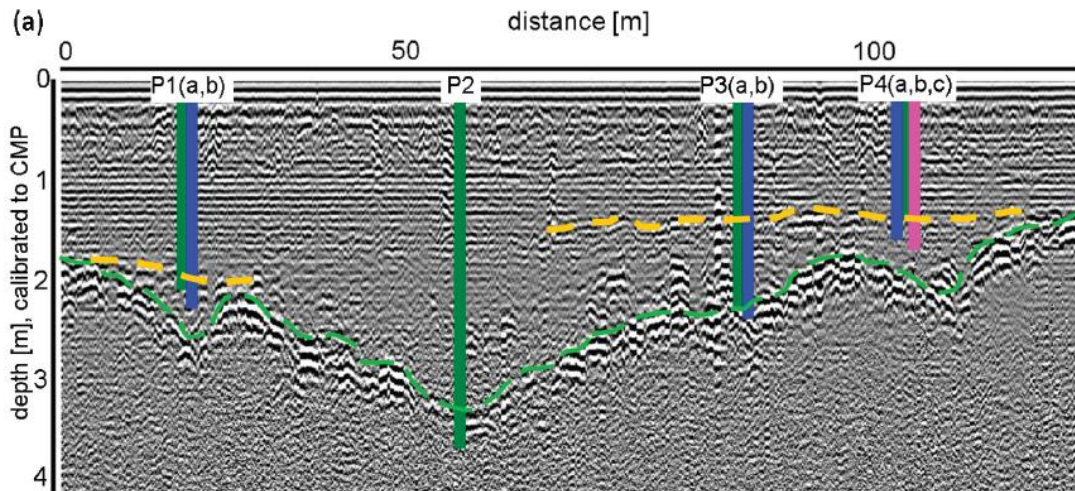
Zajicova og Chuman i [22] fra 2019 så også på undersøkelser av jord i undergrunnen. De argumenterer for at georadar har potensialet til å by på fordeler knyttet til både kostnader og tid, kombinert med muligheten til å gjenta undersøkelsen grunnet metodens ikke-destruktive natur [22, p. 166]. Ved undersøkelser i jord, benyttes det ifølge [22, p. 117] antenner med frekvenser som overstiger 500 MHz, da disse gir en høyere oppløsning hvilket gjør det mulig å skille mellom mindre synlige lag i grunnen – overgangen mellom lag blir registrert dersom w/λ mindre eller lik 0.3 (w =bredden av overgangen, λ =bølgelengden). Det presenteres også en rekke andre studier i [22], hvor det er benyttet georadar til å studere lagdelingen i jord – felles utgangspunkt for disse er at ulike lag i jorda har ulike egenskaper når det kommer til fuktighet.

I tillegg trekkes det i [22, p. 117] fram at, generelt så har sandig jord med kontrast mellom lagene vært å foretrekke ved georadar analyser av jord. Spesielt siden undersøkelser i jord med fin tekstur gjerne har vært mislykket pga. høyere elektrisk konduktivitet som f.eks. ved leire. En studie som trekkes fram av [22] er undersøkelser gjort på en vingård i Frankrike [40], hvor målet var å bestemme lagdelingen i bakken.

Når det kommer til analyse av torv, påpeker [22, p. 124] at den organiske jordas evne til å binde vann har gjort at georadar har vært brukt med suksess til å estimere dybden til torvholdig myr. På den andre siden, har metoden vært mindre vellykket til å skille mellom lag i selve myra. Videre forklarer [22, p. 124] at slike undersøkelser normalt er vanskelige å utføre i praksis, og dersom undersøkelsen er gjennomført på vinteren kan resultatene være vanskelige å tolke. Vanninnholdet i torv kan nå så høyt som 95% men er avhengig av dekomponeringsprosessen og myras sammensetning. Derfor kan den dielektriske permittiviteten variere mellom 50-70. Til sammenligning har ikke-organisk jord ifølge [22, p. 124] gjerne maksimalt 30-40% volumetrisk vanninnhold, og det er denne forskjellen gjør det blant annet mulig å skille mellom torv og annen jord i grunnen.

Under de rette forholdene, kan georadar-signaler ifølge [22] penetrere ned til 10m i torv, og gi data om lagdelinger med en nøyaktighet på 0.25m. De fleste studier konkluderer med at georadar kan bistå ved undersøkelser av torv, men de kan ikke benyttes alene og burde kombineres med andre geofysiske metoder eller manuelle undersøkelser. Pga. attenuation og dybder av torv, benyttes det gjerne antenner med frekvens mellom 100-200 MHz eller opp til 400 MHz. På samme måte som for vanlige jordarter, er georadar-undersøkelser i torv mest vellykket dersom det ikke er leire tilstede [22, p. 117].

En annen suksessfull undersøkelse i torv presenteres av Parsekian et.al. [41], hvor georadar er brukt til å beregne mengde (volum) med myr, hvilket ga gode resultater på lik linje med fysiske prøver. I tillegg kan dataen være nyttig for å karakterisere helninger i myr "bassenget" og estimere fysiske egenskaper. Det er ifølge [41] nødvendig å bruke hastigheter som er tilpasset stedet man undersøker. Figur 7-2 nedenfor, viser et radargram fra undersøkelsen gjennomført i [41] kombinert med fysiske målinger.



Figur 7-2 Profil på tvers av myra kombinert med test-data, den nederste grønne horisontale linjen viser refleksjon fra mineralsk jord (over hele figuren) og den gule horisontale linjen viser to synlige lag. Kopiert del a) fra: [31] (del b, som ikke er inkludert her, viser resultatet fra en CMP)

Spesifikt knyttet til dybde til fjell:

Når det kommer til å identifisere dybde til fjell påpeker Saarenketo og Scullion i [38, p. 123] fra 2000 at det ofte er vanskelig, om ikke umulig å identifisere fjell, dersom signalet ikke penetrerer mengden overliggende jord mellom georadaren og fjellet. De påpeker også [38, p. 123] at den reflekterte amplituden til signalet vil være svak, dersom de dielektriske egenskapene til fjellet og massene ovenfor er veldig like. Dypsprengning under en vegkonstruksjon trekkes fram i [38, p. 124] som et slikt tilfelle, hvor overgangssonen mellom fast fjell og vegkonstruksjonen vil være stor i størrelse og lite tydelig i den registrerte dataen. Det samme vil også gjelde dersom det er forvitret fjell over fastfjell [38, p. 124]. Dersom undersøkelsen finner sted på vinterstid, vil områder med fjell som ligger nærmere overflaten enn frostfronten ifølge [20, p. 80] være lette å identifisere. Dette da det ikke vil være noen refleksjoner fra frostlinja i selve fjellet i dataen.

Solla et.al. i [27] fra 2021 trekker også inn dybde til fjell, da som essensielt hovedsakelig ved planlegging av veglinja [27, p. 19]. De påpeker også på grunn av attenuation, så kan det være vanskelig å skille mellom fjell og lagdeling i grunnen. Solla et.al. i [27] trekker også fram en studie i Canada [42], hvor georadar sammen med ERT er benyttet til å identifisere fjell i forbindelse med installasjon av infrastruktur i bakken.

I studien fra Canada, Cherif et.al. [42] fra 2019, er det som nevnt benyttet georadar og ERT til å undersøke topografien til grunnfjell under leire, i sammenheng med installasjon av nedgrav infrastruktur i bystrøk. Georadarfrekvensene i denne studien var 450, 160, 100 og 80 MHz, og kjent

dybde eksisterende rør i bakken er brukt til å estimere overføringshastigheten (v) gjennom de øvre lagene til 0,14 m/s.

Målet med studien [42] var å vurdere effektiviteten til en kombinert georadar og ERT undersøkelse. Observasjoner fra grunnboringer og utgravninger ble brukt til å vurdere verdien av å gjennomføre geofysiske undersøkelser, for å støtte opp under planleggingsarbeidet ved å installasjon av infrastruktur i grunnen. I forkant av undersøkelsen registrerte de synlig fjell i dagen, det ble antatt at refleksjoner fra dette fjellet ville synes i georadar profilene tatt i nærheten. I tillegg ble det registrert hvilken infrastruktur som krysset eller gikk langsmed vegen – eksistensen av disse ga et utgangspunkt for en vurdering av minimum overdekning av løsmasser over fjell på disse stedene, som beskrevet i [42, p. 231]. Figur 7-3 og Figur 7-4 viser georadarmålingene kombinert med manuelle grunnprøver gjort in situ i [42].

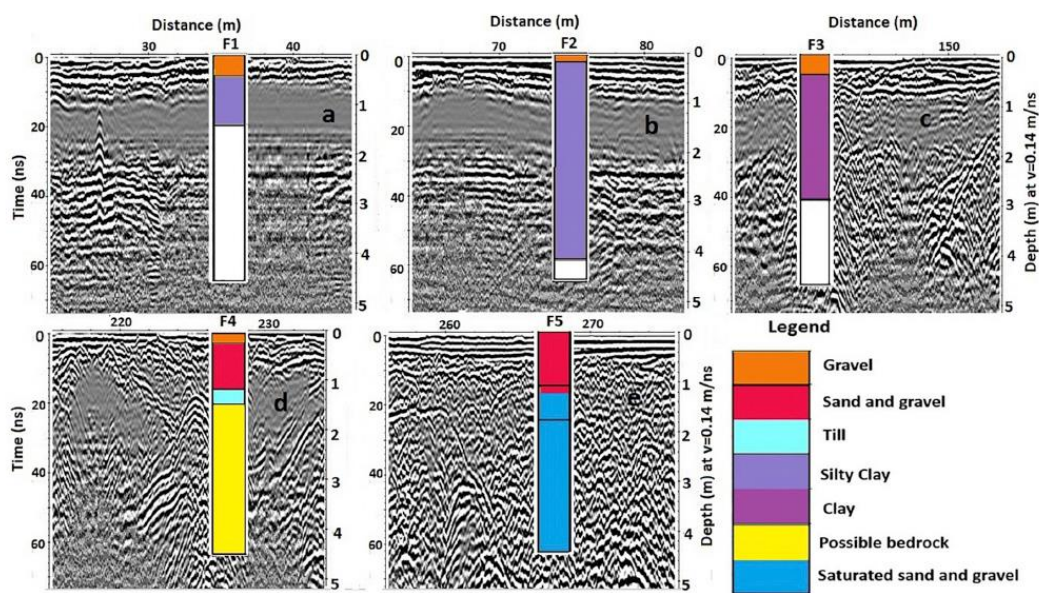
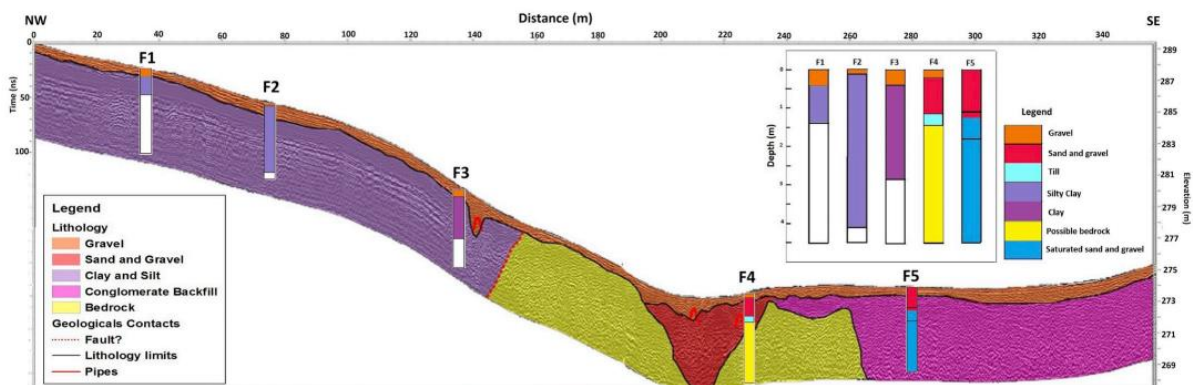


Fig. 6. Identification of different textures on GPR profiles and correlation with the lithology obtained manual auger holes on Cléricy Street.

Figur 7-3 Identifisering av forskjellige teksturer i radargrammene kombinert med manuelle målinger av lagdelingen gjort in situ. (betegnelsen i figuren F1-F5 brukes ikke) Kopiert fra: [31]



Figur 7-4 Georadarmålinger kombinert med manuelle målinger. Fargeskalaen viser endringen i grunnen langs vegen. Kopiert fra: [31]

Videre, trekkes det i [42] fram at en nøyaktig vurdering av hastigheten til georadarens EM-bølge, er mere komplisert for et inhomogent materiale enn et homogent. De påpeker også at i studien ble det oppdaget både leire, silt, fjell, sand og grus, og fyllmateriale i grunnen – EM-bølgene vil bevege seg ulikt gjennom disse. Under arbeidet med å legge VA-rør bekreftet gravearbeider plasseringen av fjell nær overflaten, slik det var observert på georadar dataen. Ifølge [42] belyser resultatet fra georadar og ERT undersøkelsen viktigheten av ikke-ødeleggende undersøkelser ved gjennomføring av denne type infrastrukturprosjekter. Det konkluderes i [42] med at georadaren effektivt identifiserte lagdelingen i de øverste 5 m basert på ulike teksturer. Videre, i de tilfellene hvor fjellet lå grunt var det mulig å skille dette fra løsmassene i profilene. Når det kommer til oppløsning var det antennen med 450 MHz som ga det beste resultatet, selv om attenuation forårsaket en grunnere penetreringsdybde – nedgravd infrastruktur i området var klart definerbare.

Spesifikt knyttet til fjellskjæringer:

Når det kommer til fjellskjæringer, har Maerz i [43] fra 2001, sett på bruk av georadar til å avdekke vertikale diskontinuiteter som går langs med vegen i fjellskjæringer, da disse ikke vil være synlige i dagen i skjæringen. I denne sammenhengen så kan georadar benyttes til å avdekke disse vertikale diskontinuitetene, unngå brudd og metoden kan brukes til å identifisere risikoutsatte områder. En rekke feltundersøkelser med ulike antenner er gjennomført i [43], blant 400, 900 og 1500 MHz antenner, viste det seg at kun på 400 MHz penetrerte dypt nok til å identifisere bruddlinjene i fjellet – i dette arbeidet var georadaren lett og bruke og resultatene relativt enkle å tolke.

Bruk av georadar til å analysere fjellskjæringer er også gjennomført av Jacques et.al. i [44] fra 2007, med hensyn til risikovurdering av overhengende fjell over en veg i de franske alpene. Antenner med frekvenser på 500 og 800 MHz er benyttet til å karakterisere sprekker/skjøter som kunne forårsake brudd. Hastigheten til georadar-bølgen ble bestemt via en CMP analyse. Resultatet i [44] var et «bilde» av nettverket av sprekker inni fjellet, hvor mengden helt fjell i de kritiske skjøtene ble vurdert som utilstrekkelig, og som en konsekvens ble det besluttet å fjerne deler av fjellet. I ettertid bekreftet graving/sprengningsarbeidet tolkningene fra georadaren både når det kom til omfang og plasseringen av disse skjøtene/sprekkene. Jacques et.al. i [44] påpeker at tradisjonelle undersøkelsesmetoder, som borehull, er ikke passende for å avdekke det romlige nettverket med sprekker eller dybden av disse, da de kun gir 1D informasjon. Undersøkelsen så 6 m inni fjellet, og tolkningene sammenfalt lokalt med borehulldata og observasjoner etter utført sprengningsarbeid. På bakgrunn av disse målingene i [44] ble dyden fjell som var planlagt fjernet redusert fra 4-5 m ned til 2m, gjennom beregninger, slik at volumet stein ble redusert.

7.1.4. Nedgravd infrastruktur – rør, stikkrenner, kabler osv.

Det finnes en rekke utenlandsk forskningslitteratur som går på bruk av georadar til å måle avdekke nedgravd infrastruktur i grunnen. I dette kapitlet gis det en kort introduksjon til noen studier som har benyttet georadar til dette formålet.

Det menneskeskapte nettverket av nedgravd infrastruktur er ifølge Annan et.al. [18] fra 2018, et komplekst nettverk i enhver urban by. Disse nettverkene kan inkludere; rør/kabler for vann, spillvann og overvann, samt strømkabler, kommunikasjonskabler og kabler for trafikklys osv. [18, p. 66]. I tillegg påstår [18] at kartlegging og posisjonering av nedgravd infrastruktur i urbane områder, trolig er det mest kompliserte bruksområde for georadar innen byggeteknikken (eng: civil engineering).

Bakgrunnen til denne påstanden, er at mønstrene i radargrammene ofte ikke har den samme konformiteten når det kommer til orientering, dybde, og sideveis avstand, sammenlignet med det man gjerne ser i f.eks. betong. Videre, så ligger denne typen infrastruktur normalt noen få meter under bakken, hvilket beskrives av [18, p. 66] å være godt innenfor georadarens rekkevidde. Ved denne type undersøkelser presiseres det at effektiv innsamling er særdeles viktig, både av store mengder data men også ved 3D kartlegging av slik infrastruktur. Bakgrunnen til dette forklares ved at i en 3D scann så kan kontinuerlig refleksjoner fra en serie med B-scans kartlegges tydelig og deretter identifiseres som f.eks. rør eller kabler. I motsetning til 3D, så kan en synlig hyperbel på en enkelt 2D B-scann f.eks. være nedgravd infrastruktur, eller det kan være et annet objekt med tilstrekkelig dielektrisk kontrast sammenlignet med jorda rundt, som f.eks. en stor stein/blokk [18, p. 66]. En rekke eksempler på andre studier hvor georadar er benyttet til å avdekke nedgravd infrastruktur kan finnes i [18, p. 68]. Lokalisering av nedgravd infrastruktur under veger, tekkes også frem av Saarenketo og Scullion [38, p. 127] i 2000, som et bruksområde for undersøkelser med georadar.

Når det kommer reduksjon av risiko og georadar trekker Utsi [45] i 2004, fram resultatene fra en undersøkelse med 400 MHz georadar gjort i forbindelse med en totalentreprise for utvidelse av en veg i England. I dette tilfellet, ønsket entreprenøren å kontrollere plasseringen av rør og annen infrastruktur i bakken, opp mot de teningene/informasjonen som var klart på forhånd. Både for å minimere risikoen for kostbare forstyrrelser av selve anleggsarbeidet, men også forstyrrelser ovenfor de som eide kablene/rørene. Studien [45] viste at det var en ekstra verdi for entreprenøren å kunne sammenligne resultatene fra undersøkelsen med lokasjonene som forelå i tegningene. Dette reduserte ikke bare risikoen for å avdekke rør og annen infrastruktur på uventede plasser, men var også betryggende mht. HMS på ute på anlegget. Undersøkelsen bekreftet plasseringen til flere nedgravde rør/kabler, men avdekket også flere uventede elementer, slik som nedgravde sensorer i vegen.

En annen undersøkelse, utført av Thomas et.al. [46] i 2009, så på hvilket behov de som arbeider med nedgravd infrastruktur har til nøyaktighet. Studien benyttet et spørreskjema for å avdekke dette nøyaktighetsbehovet. Dataen indikerte at behovet for nøyaktigheten til lokasjoner er 100 mm ved dybder ned til 3m under bakken, og noen ganger ned til 5m. Dette er noe som ifølge byr [46] på utfordringer for georadaren dersom disse behovene skal imøtekommes under alle mulige grunnforhold.

7.2. Utføring, kalibrering og tolkning av resultatene fra grunnundersøkelser med georadar

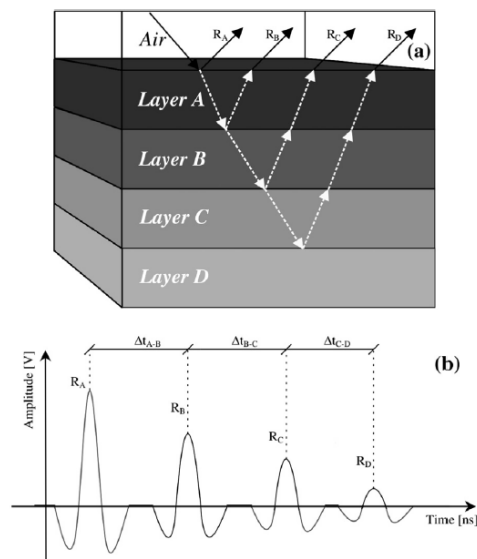
I dette kapitlet presenteres funn fra litteraturstudiet som går på hva radargrammet representerer, hvordan overføringshastigheten (v) kan kalibreres, og generelt om prosessering av data fra georadarundersøkelser. Dette inkluderer både nasjonal (f.eks. fra SVV) og fra internasjonal litteratur.

7.2.1. Hva resultatet fra georadarundersøkelsen representerer

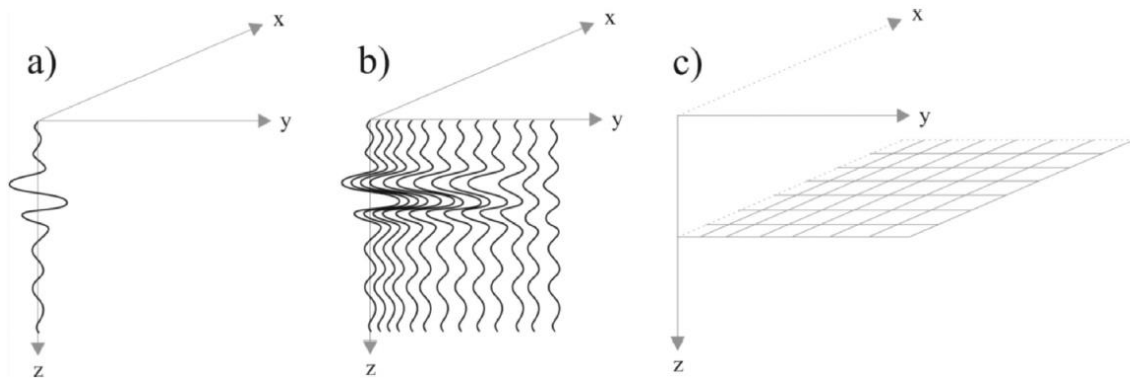
Formen og varigheten til et enkelt signal sendt ned i bakken og mottatt av georadaren, avhenger ifølge Utsi [15, p. 28] av både radarens design, frekvensen og grunnforholdene. Et enkelt 1D signal går gjerne under navnet «A-scans» eller «wiggly traces». 1D signalet viser ifølge [20, p. 20] den reflekterte energien som registreres av mottakeren, dette inneholder amplitude og medgått tid

mellom signalet var sent frem til mottatt refleksjon. Figur 7-5 fra [47, p. 329] nedenfor viser hvordan refleksjoner fra forskjellige lag Figur 7-5-(a) henger sammen med det som registreres i et enkelt 1D signal i Figur 7-5-(b). I del (a) av figuren er R_A er ekkoet fra overgangen luft – layer A, R_B er ekkoet fra overgangen layer A – layer B, også videre. Som det også kan sees på del (b) av figuren, så har amplituden en positiv og negativ del ettersom den krysser tidsaksen. Ifølge Utsi [15, p. 28] er det vanlig at sort = positive delene av signalet og hvit = negative delene av signalet – som videre er opphavet til det sorte og hvite båndmønsteret i dataen («krysser nullinja tre ganger»).

Denne 1D dataen er den mengden data samlet inn i løpet av georadarens innsamlingstid (eng: time window) [19, p. 49]. Denne innsamlingstiden kan ifølge Utsi ikke [15, p. 74] endres i ettertid. Denne tiden kan beregnes ved å snu om på likning (7.2), slik at det blir tid (*i toveis-reisetid*) = $strekning / fart$. Denne tiden burde holdes så kort som mulig for å unngå falske utslag i dataen fra objekter på overflaten, men samtidig burde den være 20-30 % lengre enn den ønskede dybden for å være sikker på at det ønskede målet nås [19, pp. 92-93]. Siden mottakerantennen kan registrere signaler som ikke er produsert av georadaren (f.eks. strømmaster), må man ifølge [19, p. 50] være obs når man tolker dataen.



Figur 7-5 Typiske refleksjoner fra en georadarmåling i en lagdelt struktur med en luft-koplet radar; (a) tverrsnitt som viser refleksjoner i en struktur med flere lag; (b) skisserte refleksjoner fra lagene i et enkelt 1D signal. Kopiert fra: [47, p. 329]



Figur 7-6 Illustrasjon av hvordan et enkelt signal (a) kombineres til å danne et radargram (b), og til sist en time slice (c).
Kopiert fra: [39, p. 203]

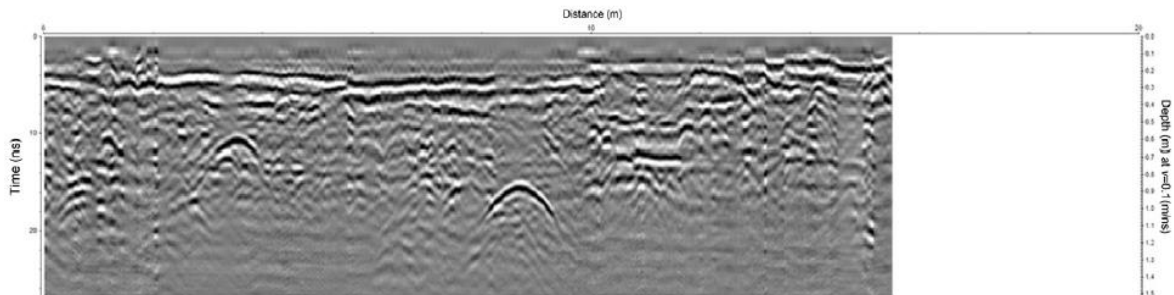
Ettersom georadaren flyttes over området som undersøkes, vil serien med enkeltsignaler (ved en forhåndsinnstilt sampling rate) ifølge [15, p. 6], som beskrevet i kapittel 3.2.1, bygges opp til et to-dimensjonalt (2D) bilde av grunnen, kalt et radargram. Ved fremstilling av 2D data vertikalt, benyttes det gjerne det nyere begrepet radargram, eller det eldre B-scan, men også radar profil eller radar trace brukes noen ganger [15, p. 29]. Det er også mulig å gruppere flere datasett sammen med bruk av informasjon om plasseringer fra GPS, rutenett eller totalstasjoner, og dermed konstruere et tre-dimensjonalt (3D) datasett av de enkelte radargrammene som kan undersøkes fra flere vinkler inkludert toppen [15, p. 105]. Horisontal presentasjon av 3D data kalles time slices, da de er hentet ut ved konstant tid [15, p. 106]. Figur 7-6 fra [39, p. 203], illustrerer hvordan flere enkelt signaler Figur 7-6 -(a) kombineres sammen for å danne et radargram Figur 7-6-(b), og til sist en 3D time slice Figur 7-6 -(c).

En annen ting å være obs på er signal-to-noise ratios, siden all 2D data vil inneholde en viss mengde «noise» (uønskede signaler), dette er en måte å beskrive hvor klar dataen er – og er til en viss grad avhengig av hvordan georadar systemet er utformet. Høyere signal-to-noise ratios har klare data som gjør analysen lettere, enn de med lavt forhold. Lave signal-to-noise ratios er en risiko dersom undersøkelsen finner sted over ujevn grunn. [15, p. 34]

Utsi [15, p. 94] påpeker at når sender og mottaker er separert (avstand i mellom), vil avstanden ned til refleksjonen egentlig ikke være halvparten av toveis-reisetid, men heller litt mindre – derimot så har alle georadar programmer en innebygd funksjon som korrigerer dette automatisk.

Et eksempel på 2D georadar-data er vist i Figur 7-7, Utsi [15, p. 5] presiserer at selv om dette bildet representerer det som ligger i bakken, så tar bildet på ingen måte formen til det objektene som måtte ligge i bakken. Grunnen til dette ligger i at Figur 7-7 representerer radiobølgene, og det er sammensetningen av hvert enkelt retursignal som utgjør bildet. X – aksen (horisontalt) representerer antennens forflytning langs undersøkelseslinjen, og Z – aksen (vertikalt) representerer reisetiden til den elektromagnetiske bølgen (toveis reisetid) [27].

Jol et.al. [16, p. 66] underbygger som beskrives i forrige avsnitt ved å presisere at, et grunnleggende prinsipp for å forstå georadar, er å forstå at bildet som er synlig på skjermen ikke er et tverrsnitt av bakken – men er isteden den tidsavhengige responsen til materialene i grunnen registrert av mottakeren, ettersom EM-energien sprer seg gjennom mediet og reflekteres.



Figur 7-7 Eksempel på 2D radargram. Kopierte fra: [15, p. 5]

Refleksjon og polaritet:

Når et georadar-signal beveger seg fra et medium til et annet, kan det ifølge [21, p. 7] beregnes en refleksjonskoeffisient, som vist i likning (7.1). Bigman [19, p. 43] påpeker at refleksjonene har en innvirkning på signaltap, da ettersom energi reflekteres, så er det mindre energi som fortsetter videre ned i grunnen. Mengden refleksjon burde oppgis som en absoluttverdi, men endringen i fortegn betyr at georadaren vil registrere ulike responser ettersom bølgene reflekteres av objekter/lag med raskere eller saktere hastigheter enn bølgen beveget seg ved – noe som kalles reversering av polariteten [19, p. 42].

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (7.1)$$

Hvor:

R = Refleksjonskoeffisient (eng: reflection coefficient)

ϵ_1 = Dielektrisk egenskap til det første laget

ϵ_2 = Dielektrisk egenskap til det andre laget

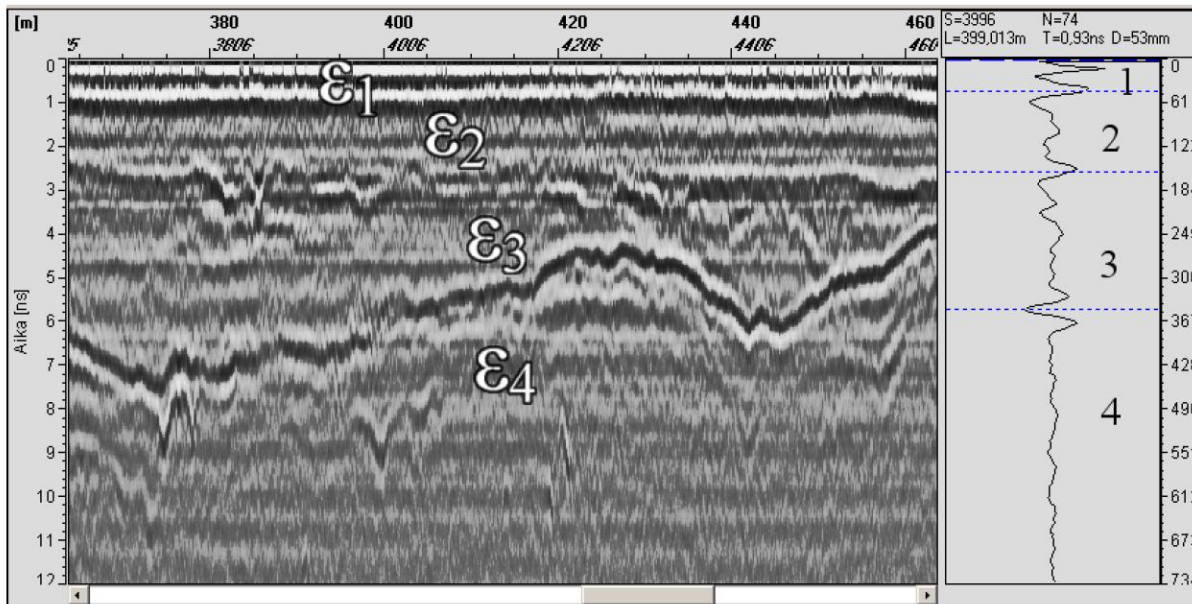
Basert på likning (7.1) beskrives det i [21, p. 7] at polariteten vil påvirkes ved:

- $\epsilon_1 < \epsilon_2$ – da endres polariteten
Hvilket er vanlig for vegkonstruksjoner og jord (vanninnhold øker med dybden)
- $\epsilon_1 > \epsilon_2$ – da forblir polariteten den samme som den fortsettende bølgen ved overgangen

For målinger på veier, beskriver [21, p. 7] at vanlig praksis er å la refleksjonen for overflaten bli registrert som positiv – selv om den egentlig er negativ (hastigheten sakter ned). Det samme gjelder for de andre lagene, dersom $\epsilon_{\text{øvre}} < \epsilon_{\text{nedre}}$ så registreres dette som en positiv refleksjon. I gråskalaen burde dette registreres på en måte så den hvite refleksjonen er i midten [11, p. 7]. På samme måte, dersom den dielektriske verdien til det nedre laget er mindre enn det øvre, er refleksjonen negativ og den svarte refleksjonen burde være i midten. Figur 7-8 på neste side, illustrer reversering/invertering av polariteten i georadar-data fra en vegkonstruksjon.

Ved bruk til grunnundersøkelser, påpeker [25, p. 6], at polariteten i georadar-bildet ikke er like viktig som det er ved undersøkelser av vegdekker og broer.

Når det kommer til reversering av polariteten, påpeker Bigman [19, p. 47] at refleksjoner fra hulrom generelt karakteriseres ved at polariteten reverseres selv om refleksjonskoeffisienten er positiv. Dette begrunnes med refleksjonen fra bakken i toppen av dataen alltid vill være først, og brukes som en referanse baseline – og denne vil ha en negativ refleksjonskoeffisient. Rekkefølgen på fargene derimot, vil IKKE alltid være likt – dette fordi du selv kan velge både farge og innstillinger i georadaren. Derfor skal man ikke bruke farger til å tolke et spesifikt mål, men heller som en indikator opp mot en annen refleksjon der du er kjent med om hastigheten går opp eller ned. [19, p. 47]



Figur 7-8 Georadarprofil samlet inn med en luftkoptet antenne og dens enkelte puls. Profilen har refleksjoner fra overganger mellom to medier med ulike dielektriske egenskaper (epsilon). Lag 1 beskriver vegdekke, lag 2 beskriver bærelaget, lag 3 beskriver forsterkningslaget (sub-base), og lag 4 beskriver et filterlag. Figuren viser at den dielektriske verdien til materialer (fuktigheten) øker nedover i grunnen fra vegdekke med unntak av den dielektriske verdien til filterlaget (e4), som er lavere enn for forsterkningslaget (sub-base), og er derfor inverteres polariteten (svart linje mellom to hvite). Kopiert fra: [21, p. 6]

Dybde til et objekt/lag:

Dybden ned til et observert lag/objekt kan ifølge [21] beregnes etter likning (7.2):

$$s = v \cdot t = \frac{0,5 \cdot TWTT \cdot c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{7.2}$$

Hvor:

$TWTT$ = toveis reisetid for bølgen

ϵ_r = mediets relative dielektriske verdi

c = lysets hastighet i vakum (0,3 m/s)

7.2.2. Kalibrering av overføringshastigheten (v) til EM-bølgene

For å kunne gjennomføre realistiske tolkninger av dataen, er det ifølge Jol et.al. [16, p. 158] nødvendig å konvertere dataen fra tids-domenet og over til en dybdeskala i f.eks. meter. For å gjøre

dette trengs et estimat for gjennomsnittlig overføringshastighet (v) i grunnen, hvor Jol et.al. [16, p. 158] og Utsi [15, pp. 51-61] lister opp følgende metoder for å kalibrere hastigheten til den innsamlede dataen:

- Hyperbolic velocity analysis [16] – (går også under; curve fitting [15] og hyperbola fitting [19])
- Kjente lag i bakken gjennom graving/prøvetaking [16] [15]
- Dybde til et kjent objekt (uten graving) [15]
- Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) / Common midpoint (CMP) [16] [15]

Disse metodene utdypes i dette kapitlet. Men, avhengig av metoden som benyttes, presiserer Utsi [15, p. 62] at man må kontrollere at verdiene er passende for det aktuelle undersøkelsesstedet – f.eks. ved å sammenligne verdiene med tabeller for vanlige hastigheter (disse tabellene er da kun for sammenligning, ikke for kalibreringa). Se Tabell 3-1 i kapittel 3.2.2 for noen slike verdier. I tillegg, så påpeker Utsi [15, p. 48] at hastigheten ikke lar seg estimere utfra hva man ser på overflaten av bakken alene, da f.eks. vann ved overflaten ikke alltid betyr at grunnen er helt mettet – på samme måte som at en tørr overflate ikke betyr at undergrunnen er tørr.

Når det kommer til denne type kalibrering i praksis, poengterer Jol et.al. [16, p. 159] at både CMP og hyperbolic velocity analysis pleier å gi en hastighet som avviker +/- 10% eller mer – hvilket vil si ifølge [16, p. 159] at når det kommer til tolkningen, så er det ikke noe poeng å bruke masse tid på å bestemme denne hastigheten nøyaktig da en gjennomsnittsverdi for alle dybder vil resultere i den samme tolkningen.

Curve fitting (hyperbola fitting [19], eller hyperbolic matching [16])

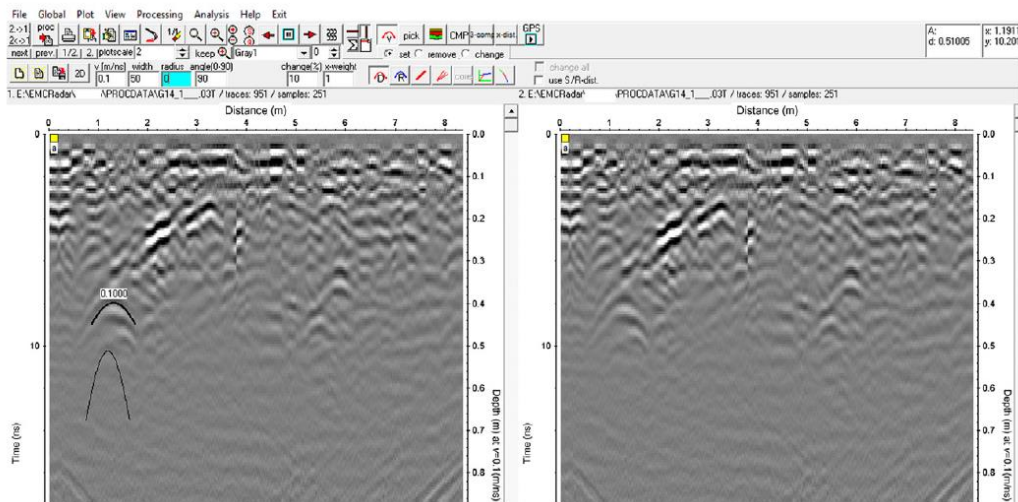
Metoden kan ifølge Jol et.al. [16, p. 159] utføres enhver seksjon som har en hyperbel, og utføres ved å matche en teoretisk hyperbel med en spesifikk hastighet mot den registrerte i dataen. Videre påpeker [16, p. 159] at avanserte programmer gjør det mulig å endre både størrelse og radius for å passe enhver hyperbel i dataen, men at dette gjerne er overflødig.

Formen på hver enkelt hyperbel i dataen er en funksjon av både dybden (bredden på radarbølgen øker med dybden) og overføringshastighet (v). Som en konsekvens, så kan hyperbelens buede form brukes til å bestemme overføringshastigheten, så lengde dybden er kjent – for dette brukes det programvare som matcher en digital hyperbel (programmet endrer aut. formen på denne ettersom dybden endres) med en registrert i dataen [15, p. 52]. Den digitale hyperbelen plasseres i krysningspunktet mellom positive og negative deler av signalet (om det er svart/hvit eller hvit/svart har null betydning) [15, p. 53]. Dersom den digitale hyperbelen ikke passer og målet er for stort, er det mulig å foreta en justering av radien [15, p. 53], men på grunn av metodens nøyaktighet er det sjelden behov for dette da det ikke får utslag på selve tolkningen [16, p. 159]. Figur 7-9 viser denne funksjonen som demonstrert i [15, p. 52].

Utsi [15, p. 54] påpeker at selv om denne metoder er relativt vanlig, så er det to potensielle fallgruver. For det første, så må det være klare og tydelige hyperbler i dataen å bruke – ellers vil dette ikke funke, det samme gjelder om det er for mye rot i dataen. For det andre, så er det litt slingringsmonn i å velge riktig hastighet som passer til hyperbelen – slik at en liten håndfull med verdier vil passe til den samme hyperbelen, men dette kan forbedres gjennom en teknikk kalt

migration (teknikk som reduserer en hyperbel til et punkt [15, p. 182], denne er ikke inkludert i denne rapporten).

Når denne metoden benyttes, må man ifølge Bigman [19, p. 91] være oppmerksom på at hyperbler fra objekter som ikke ligger loddrett 90° med innsamlingsretningen, da disse vil være bredere i radargrammet enn de som ligger 90° med innsamlingsretningen. Brukes da den brede hyperbelen til å utføre denne kalibreringsmetoden vil den estimerte hastigheten være større enn den egentlig er – og som en konsekvens det virke som målet ligger dypere enn det faktisk gjør.



Figur 7-9 Curve-fitting på data samlet inn i et tunnelhvelv av betong. Den nederste hyperblen t.v. i figuren flyttes til den hyperbelen som skal måles, deretter justeres hastigheten (v) inntil en god passform er oppnådd. Kopiert fra: [15, p. 52]

Kjente lag i bakken gjennom graving/prøvetaking

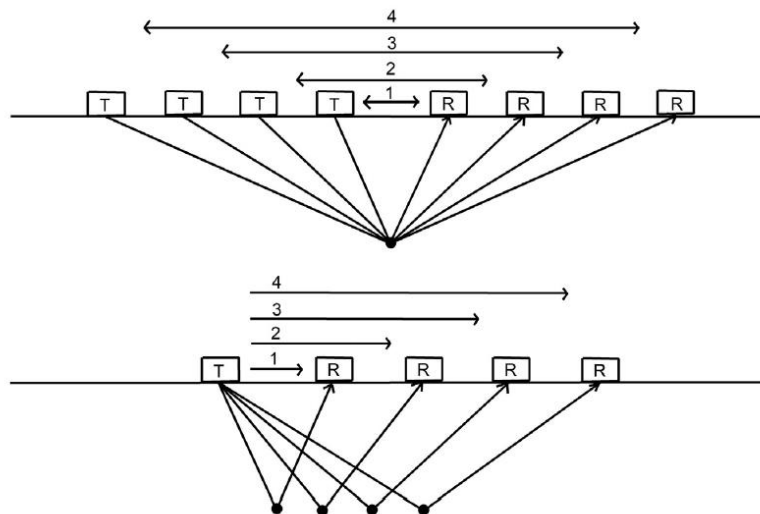
Ved denne kalibreringsmetoden, er det nødvendig å kjenne dybden til minst ett lag i grunnen [15, p. 56], det Jol et.al. [16, p. 159] på engelsk kaller ground truthing. Denne metoder benyttes ifølge Utsi [15, p. 56] normalt for veier, bruer og flyplasser. Dersom det er flere lag, kan målet til hvert enkelt benyttes til å kalibrere overføringshastigheten for hvert enkelt materiale. Disse målingene tas ved hjelp av prøver fra undersøkelsesstedet. Videre, så er det ifølge [15, p. 56] viktig at lokasjonene til disse prøvetakingspunktene markeres nøyaktig, slik at målene kan importeres på riktig plass i georadar dataen. Et problem som trekkes fram av [15, p. 56], er at ved undersøkelser i naturlige materialer i terrenget, så er det ikke alltid en sammenheng mellom endringer i elektromagnetisk respons, og en visuell endring i prøven – dette er selvsagt lett å se om man går fra veldig forskjellige materialer (f.eks. peat til granitt), men noe å være obs på når denne overgangen ikke er like markant.

Dybde til et kjent objekt (uten graving)

Denne metoden er beslektet med metoden ovenfor, men krever at et objekt allerede er i bakken som undersøkes med en kjent dybde og plassering [15, p. 57].

Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) / Common midpoint (CMP)

Også kjent som Common midpoint (CMP), er en metode for å kalibrere hastigheten som krever antenner som kan separeres. Metoden sammenligner direktesignalet gjennom luften sammen med et signal sendt gjennom bakken [15, p. 58]. Figur 7-10 fra [22, p. 119] illustrerer prinsippene bak disse metodene.



Figur 7-10 Konseptene bak kalibreringsmetodene Common midpoint (CMP) og Wide Angle Reflection and Refraction (WARR). Kopiert fra: [22, p. 119]

7.2.3. Prosessering av georadar-data

I dette kapitlet presenteres grunnleggende informasjon om prosessering av dataen fra en georadarundersøkelse. Selve teknikkene er mange, og det varierer hvor avanserte de er. For god informasjon om prosesseringsteknikker se Jol et.al. [16], Utsi [15], eller Benedetto et.al. [39] for prosessering spesifikt knyttet til veg.

Når det kommer til prosessering og analyse av dataen, trekker Jol et.al. [16, p. 141] fram at både mengde og type som trengs, er en kombinasjon av operatørens personlige mening, erfaring og selve datasettet. Og det som virkelig betyr noe, er at den endelige tolkningen er gyldig, og selv om prosessering er viktig så vil alltid god datainnsamling være nøkkelen til gode tolkninger [16, p. 141]. Spesielt da ingen form for prosessering kan hjelpe dersom den innsamlede dataen er dårlig til å starte med [16, p. 142]. Generelt så er det alltid best å bruke de enkleste prosesseringsmetodene først, og deretter stoppe når det ikke er mere å hente ut ved videre prosessering – et sitat som trekkes frem er *“if it cannot be seen in the raw data – is it really there?”* [16, p. 142]. Videre, er det dessverre veldig lett å overprosessere dataen - prosessering er normalt en iterativ prosess [16, p. 33].

Noen gode råd som presenteres i Jol et.al. [16, p. 145] for å forstå «the dark art» som er prosessering:

- **Hold det enkelt** – Mengden prosessering avhenger av både kvaliteten på rå-dataen, hva man er ute etter og prosjektets tids/kostnadsbegrensinger. Dersom raske omtrentlige/ca. tolkninger er godt nok (f.eks. lokalisere et objekt) så trengs det lite prosessering. 90 % av all innsamlet data trenger kun grunnleggende prosessering. Dersom avansert prosessering skal benyttes må man ha det klart for seg, hvorfor det trengs, hvilken tid dette tar, og hvilke fordeler dette vil gi. Det er ikke alltid tid til å implementere og bruke de avanserte prosesseringsteknikkene riktig. [16, p. 145]

- **Hold det realistisk** – Overprosessering uten mål og mening må unngås. Desto mere avanserte teknikker som benyttes, desto mere sannsynlig er det at disse vil introdusere gjenstander eller partiskhet i dataen. Dataen du har er den du har, ser den bra ut så er det fint, dersom den ikke gjør det så er det bare sånn det er. Til syvende og sist så er det den endelige tolkningen som teller, ikke hvor pene seksjonene med data ser ut. [16, p. 145]
- **Forstå hva du gjør** – Man må være sikker på at man forstår den prosesseringen som påføres dataen. Dette er nødvendig for å ha kontroll på hva som er virkelig eller ikke. Dette gjelder både automatiserte prosesseringstrinn i like stor grad som de man legger inn selv [16, p. 145]. Data prosessering må forbedre tolkningen av georadar-data, ikke kontrollere den [16, p. 146].
- **Vær systematisk og konsekvent** – Vær konsekvent i prosesseringstrinnene og følg et forhåndsdefinert flytskjema gjennom prosesseringstrinnene. Dersom det lar seg gjøre, burde det benyttes samme parameterne på like/tilsvarende datasett, hvor detaljene bak hvert trinn loggføres, dette er viktig dersom det skal gjennomføres en batch prosessering av større mengder like GPR seksjoner. Videre, så burde de parameterne som benyttes i prosesseringen velges ut fra fysiske eller praktiske kriterier (som f.eks. pulslengde), istedenfor å tilfeldig gjette den beste verdien.

Noen georadar-systemer legger ifølge [15, p. 84] prosessering direkte på dataen ettersom den samles inn, derfor er det viktig å kjenne til hva som brukes, for deretter å velge riktig prosesseringspakke. Bruk av feil sett med filter kan eliminere målene, derfor er det viktig å ha kjennskap til hvordan dataen blir påvirket av prefiltrene som ligger inne, og at man ikke bruker samme innstilling for absolutt alle undersøkelser [15, p. 84].

7.3. Intervjuer – kvantifisering av nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt

I dette kapitlet presenteres resultatet fra intervjuene som er gjennomført. Alle som er intervjuet fikk i kapittel 6.2.2 tildelt et nummer (Tabell 6--2), gjengitt her som Tabell 7-2.

Tabell 7-2 Nummerering av intervjuobjekter – KOPI av tabell Tabell 6--2

Nummer	Kategori	Kommentar	Intervjuform
1	Rådgiver	2 tilstede – Geotekniker og BIM	Fysisk
2	Entreprenør	3 tilstede – Stikning, BIM og prosjektutvikler	Teams
3	Byggherre	2 tilstede – Geotekniker og prosjekteringsleder	Fysisk
4	Entreprenør	1 tilstede – Prosjektsjef	E-post
5	Professor ved Universitet	1 tilstede – Dr.ing.	Teams

Svarene er nå organisert etter kategoriene som ble presentert i kapittel 6.2.3., i tillegg noen underkategorier (i uthevet tekst) basert på intervjuguiden i hver kategori. Kapitlet har følgende kapitalstruktur:

7.3.1 Grunnundersøkelser i dag

- Bruker dere noen digitale metoder for å kartlegge grunnen
- Fordeler og ulemper med metoder for å kartlegge grunnforhold i dag
- Nyttig informasjon/kunnskap fra grunnundersøkelsene når det planlegges og prosjekteres

7.3.2 Nytteverdi og nytte av grunnundersøkelser

- Hva bruker dere kunnskapen fra grunnundersøkelsene til
- Hvordan påvirke størrelsen eller kompleksiteten på prosjektet detaljnivået i grunnundersøkelsene
- Hva er nyttig å ha som dagens metoder for grunnundersøkelser ikke gir oss

7.3.3 Grunnundersøkelser med GPR

- Erfaring med bruk av Georadar
- Hva kan dere se for dere å bruke GPR til
- Hvor nøyaktige må resultatene fra GPR være for å ha en verdi
- Ville en «komplett» grunnundersøkelse med GPR påvirket hvordan dere planlegger, gjennomfører eller ser/jakter muligheter i prosjekt

7.3.4 Annet

7.3.1. Grunnundersøkelser i dag

Bruker dere noen digitale metoder for å kartlegge grunnen:

Både [nr.2] og [nr.3] trakk fram at de har erfaring å bruke georadar og seismikk som en metode. Respondent [nr.4] har ikke brukt georadar i deres prosjekter, men kjenner til andre som har.

Fordeler og ulemper med metoder for å kartlegge grunnforhold i dag:

Respondent [nr.1] som er en stor rådgiver innenfor mange ulike fag, forklarer at metodene som brukes til å finne de geotekniske svarene man er ute etter ikke viktig. Det som derimot er viktig, er at metoden(e) som benyttes gir deg det svaret du trenger for å være sikker i den vurderingen du gjør. Geoteknikk er veldig erfaringsbasert, og geoteknikere liker å bruke det de kan fra før i sitt arbeid [nr.1]. I planleggingen i dag, benyttes det mye 2D men og noe 3D [nr.1].

Selv om man har geotekniske kategorier etter EC7, så bestemmer man selv hvilke undersøkelser man vil bruke [nr.1]. Byggherren [nr.3] påpeker at undersøkelser med georadar vil kan påvirke geoteknisk kategori, dersom det er mulig å utelukke ting med en bedre modell. Men denne modellen må allikevel være realistisk.

Totalsonderinger er en grunnundersøkelsesmetode som går igjen hos [nr.1] og [nr.2] og [nr.3].

Fordeler og ulemper som trekkes fram er:

- Fordeler
 - Metoden gir grove estimat for lagdelingen og nøyaktige resultater for påvisning av berg [nr.1].
- Ulemper
 - Kostbart å gjennomføre, samtidig får du kun fasiten i ett punkt [nr.1] og [nr.5].

Siden geoteknikeren gjerne velger plassering, så er det behov for god kommunikasjon med vegplanleggeren for å sikre at informasjonen han/hun trenger til å dimensjonere vegen også hentes inn [nr.5].

Fremdeles på totalsonderinger, trekker [nr.1] fram at disse også, i likhet med georadar, må tolkes. Det har vært forsøk på å lage programvare for automatisert (AI) tolkning hos en stor rådgiver, men uten at dette har lyktes enda [nr.1]. Dette henger sammen med at de dypere svarene henger sammen med hvilke svar du kom fram til ovenfor [nr.1]. Eksempel som trekkes fram av [nr.1] ved automatisk tolkning av lag, er hvor programvaren ved ett tilfelle vekslet mellom grus, sand og silt, så ofte at den genererte over 500 lag.

Respondent [nr.1] kommenterer videre på bruken av AI, ved at programmet i seg selv gjerne ikke helt vet hva man presis er ute etter å hente ut av programmet. Et eksempel som trekkes fram, er om man kun er ute etter å peke ut fjell, så er ikke løsmassene så viktige. Slik at alt vil avhenge av hva prosjektet trenger av informasjon [nr.1]. Videre, så må det ifølge [nr.1] være mulig å etterspørre feilkilder som er registrert under innsamling av dataen i AI programmet, noe som ifølge respondenten er vrient. Eventuelle problemer som oppstår underveis, blir i dag registrert av boreriggoperatøren underveis og er tilgjengelige for geoteknikeren i arbeidet med å tolke den registrerte dataen [nr.1].

Respondent [nr.3] påpeker at utenom totalsonderinger, benytter de også CPTu, prøvetaking med skovl eller 54 mm stålsylinder. Alternativt benyttes åpent rør eller poretrykksmålere for grunnvann med mm. Fordelene med de «vanlige» grunnundersøkelsene er at disse gir detaljert data i et punkt, med mulighet til å tolke styrkeparametere i grunnen [nr.3]. I tillegg denne dataen brukes til å kalibrere data fra seismikk og georadar [nr.3].

Når det kommer til skjæringspunktet ved dagens metoder, trekker byggherren [nr.3] fram at det foreligger en risiko for å ikke komme ned til fjellgrunn, risiko for morene, og en redusert risiko når det trianguleres mellom punkter.

Respondent [nr.4] som stort sett arbeider med utførselsentrepriser hos en stor landsdekkende entreprenør, benytter dokumentene fra kundens konkurransegrunnlag. Kunden skal i utgangspunktet også skal ha kartlagt grunnforholdene. Derimot ved gjennomføring av prosjektet kan det ifølge [nr.4] være inkludert prosesser for prøvegraving, for å sjekke grunn, kabler etc. Eller prosesser for å ta miljøprøver, alt etter hva byggherren bestemmer.

Nyttig informasjon/kunnskap fra grunnundersøkelsene når det planlegges og prosjekteres:

Kunnskapen/informasjonen man trenger fra grunnundersøkelsene, vil ifølge [nr.1] variere fra prosjekt til prosjekt. Det kan f.eks. være behov for å kjenne forholdene helt ned til fast fjell, men dette er avhenger bla. av hva som faktisk skal bygges. Da alle prosjekter er unike, og det må kartlegges hvordan dette prosjektets «verden» er skrudd sammen [nr.1]. I denne sammenhengen kan erfaring fra andre prosjekter bidra, men du må alltid bekrefte at disse forholdene/prosjektene er like [nr.1]. Videre, så er geoteknikk er et premissfag for de andre fagene, og setter rammene de skal hole seg innenfor [nr.1].

Den store entreprenøren [nr.2], trekker fram planlegging for best mulig massebalanse for fjell, som nyttig informasjon fra grunnundersøkelsene. Dersom det viser seg å være for lite fjell under utføring av arbeidene, så må dette hentes et annet sted. Hvilket kan forstyrre fremdriften og påvirke kostnader [nr.2].

Den andre store entreprenøren [nr.4], tekker frem at utførselsentrepriser er enkle i denne sammenhengen. Siden det er byggherre sitt ansvar dersom grunnforholdene avviker fra konkurransegrunnlaget. Ofte vil ikke kartleggingen av grunnforholdene være komplette, og entreprenøren møter på avvik underveis. Noe som ikke nødvendigvis er en ulempe for entreprenøren, men derimot for byggherren som må betale for ekstra tiltak [nr.4]. Ved planlegging og prosjekterer er både geoteknisk rapport og ytre miljøplan nyttig å ha [nr.4].

Byggherren [nr.3] forteller at grunnundersøkelsene utføres både for å svare ut på hvilke «problemstillinger» prosjektet skal håndtere. Men også for å vurdere hvordan disse «problemstillingene» skal håndteres. Et eksempel som trekkes frem er håndtering av artesisk trykk, hvor nye vannveger kan forårsake store skader.

Dersom prosjektet har et stort underskudd av stein, så kan transport/innkjøp medføre store kostnader. Derfor er det viktig med god oversikt mht. massebalanse [nr.3].

For å gjennomføre grunnundersøkelser med f.eks. totalsondering, trengs det en borplan [nr.1]. Dette lages etter hva geoteknikeren selv mener, og hva man er villig til å ta ansvar for. F.eks. hvor mye risiko man er villig til å ta [nr.1]. Byggherren stiller gjerne spørsmål om kostnader istedenfor hvorfor borplanen er satt opp som den er. Noen ganger settes det opp 10 borepunkter, men man velger å stoppe undersøkelsene etter 5 dersom det viser seg å være nok [nr.1].

Avstand mellom borepunkter for veg har SVV føringer for [nr.1]. Normalt benyttes ifølge [nr.5] 50-100 m mellom hvert punkt ved rette veg strekninger, men dette avgjøres av geotekniker og etter hva som skal bygges.

For et boligprosjekt kan det være 20 m mellom punktene, alt avh. av hva som skal bygges [nr.1]. Samtidig vet man gjerne hvor f.eks. en heissjakt kommer, og inkludere det i planleggingen. Av hensyn til områdestabilitet kan det være aktuelt å undersøke punkter utenfor tomte også [nr.1].

Tidsbruk ved grunnundersøkelser inkluderer både tiden det tar å gjennomføre undersøkelsen. Men også tiden som brukes til å tolke den innsamlede informasjonen. F.eks. kan geoteknikeren få 20t totalt, og da er det opp til han/hun å velge riktig metode for å både gi og tolke svarene innenfor tidsrammen. [nr.1]

7.3.2. Nytteverdi og nytte av grunnundersøkelser

Hva bruker dere kunnskapen fra grunnundersøkelsene til:

Dette avhenger både av prosjektets størrelse, og hvilken fase man er i [nr.1]. F.eks. den det være å vurdere om man i det heletatt burde bygge her eller ei. Ofte er man interessert i å finne ut om prosjektet skal tas videre eller ei, da er det gjerne ikke behov for å omfattende undersøkelser. Samtidig er det forskjell på hvor bygget er plassert (kvikkleire?), kompleksiteten og verdien/bruksområdet (sykehus eller lager?). Kunnskapen brukes til å vise det som skal prosjekteres

er trygt etter regelverket. Derfor trengs det tilstrekkelige undersøkelser for å vite hva som er i bakken. [nr.1]

Ang. HMS, tekker [nr.2] fram at georadar vil virke inn på hvordan entreprenøren planlegger graving og spunting, og hvordan de kan forutse risikoen de kan møte. Det er en gevinst ved å bruke rett utstyr mht. Videre, så er faktorer for det økonomiske en ting, men god HMS kultur kan gi både en gevinst for økonomien og for framdrifta. [nr.2]

For [nr.3] vil dette avhenge av prosjektets planfase. Ved kommunedelplan og reguleringsplan brukes grunnundersøkelsene i større grad for å finne den veglinjen som har en gunstig linjeføring mht. pris, miljø, reisetid osv. Ved byggeplan benyttes det i hovedsak tidligere informasjon for å planlegge veg og konstruksjoner, for at vegen skal være trygg å både bygge og bruke under dens levetid.

Nytteverdi er for [nr.3] informasjon som kan bidra til redusert kostnad, bedre miljø, løsningsvalg, gjennomføring eller opplevelse for brukere. I tillegg trekkes det fram myr, og reduksjon av risiko, samtidig som at det trengs mere data i framtida, og denne har også en verdi.

Entreprenøren [nr.4] bruker kunnskapen fra grunnundersøkelsene til å planlegge massehåndtering og hvilke deponi som skal benyttes, ift. type masse og forurensningsgrad. Samt at entreprenøren må vurdere om de må gjøre tiltak knyttet til massene f.eks. spunting eller bruk av grøftekasser), og de må planlegge om de skal gjøre ytterligere miljøtiltak og HMS-tiltak [nr.4].

Resultater fra totalsonderingene brukes til plassering av vegen, kartlegging av materialtyper i trauet og telefarlighet [nr.5].

Dersom interpolering mellom borepunkter viser et behov for mere kunnskap, er dagens løsning å bore mere for å skaffe denne kunnskapen [nr.1].

Ved planlegging av veger i Novapoint, interpoleres det og brukes ingeniørmessig skjønn for å konstruere terrenggrunnlaget mellom borepunktene [nr.5]. Man ser også på hvordan terrenget går, hvilke avsetninger det er og eksisterende borepunkter [nr.5].

Jo dårligere kunnskapen om grunnforholdene er, jo mere konservativ må geoteknikeren være i den neste fasen [nr.1]. F.eks. 2 og ikke 1 spunt, hvilket kan koste betydelig mer enn et par borehull. Byggherren tenker ikke alltid slik, og etterspør sjelden hvordan man finner ut av ting, men heller at du finner svaret til en viss kostnad. Det er kostnader som BH reagerer best på [nr.1]

Ved miljøaspekt tenker man gjerne på forurensede masser, og ikke bærekraft. Geoteknikeren tilpasser sitt arbeid etter hva han/hun får beskjed om skal gjøres. [nr.1]

Entreprenørens løsninger og gjennomføringsmetoder velges ut fra konkurransegrunnlaget [nr.2]. Spesielt viktig er områder med sensitive masser (kvikkleire), som påvirker hvordan entreprenøren prosjekter og HMS under utførelse. Hadde entreprenøren hatt kjennskap til sensitive masser på forhånd, kunne de informert BH om hvordan de planlegger å gå fram. [nr.2]

Sparer man masser er penger spart, veglinja optimaliseres for å spare [nr.2].
Når det gjelder massebalanse, så vil georadar kunne gi en bedre prissetting [nr.5].

Når byggherren står for konkurransegrunnlaget, er det mye kringling ang. kontrakt. Desto mer nøyaktig dette er, jo bedre er det for entreprenøren [nr.5]. Samtidig må man huske at georadar er kostbart, men det er også en borerigg (riggeren, 2 mann på jobb, tid per borepunkt) [nr.5].

Til syvende og sist, så er det hvem som skal ta risikoen for grunnforholdene [nr.2]. Det er også viktig å huske at kostnadene som løper dersom anlegget står stille er betydelige, dersom noe ved grunnforholdene ikke skulle være som planlagt. [nr.2]

Hvordan påvirker størrelsen eller kompleksiteten på prosjektet detaljnivået i grunnundersøkelsene:

Varierer fra prosjekt til prosjekt, f.eks. bygging av ny veg krever mere detaljer en overflatearbeider som legging av ny asfalt og kantstein. [nr.4]

Hva er nyttig å ha som dagens metoder for grunnundersøkelser ikke gir oss:

Dybde til kabler, rør og annen infrastruktur, da dagens kabelpåvisning ikke viser dybde [nr.4].

7.3.3. Grunnundersøkelser med GPR

Erfaring med bruk av Georadar:

Den store entreprenøren som er respondent [nr.2], har i forbindelse med sitt siste store vegprosjekt gjennomført en georadarundersøkelse. Denne er gjort i forkant av detaljprosjekteringen (totalentreprisen). Hensikten med undersøkelsen var å avdekke løsmasseoverdekning i myr. De benyttet en bakkekoplet antenne med frekvenser på 160 og 450 MHz. Langs de undersøkte traseene fantes det eksisterende borepunkter. Områder som ikke var ryddet på forhånd, som skog, lot seg ikke undersøke. Området som ble undersøkt består hovedsakelig av myr og noen synlige fjellknoller. Dataen ble samlet inn i starten av februar. Det ble registrert data av god kvalitet ned til 150 ns, for myrområdene var fast fjell en synlig overflate som var lett å tolke. Eksisterende borepunkter ble brukt til å kalibrere dybden.

Entreprenøren [nr.2] har ennå ikke startet arbeidet og kan derfor ennå ikke si noe om hvilken nytte denne undersøkelsen hadde for dette prosjektet. Men de peker på at de har fått seg noen aha-opplevelser som følge av den innsamlede dataen. De utvalgte områdene i undersøkelsen var områder hvor [nr.2] var usikker på grunnforholdene. Hadde denne informasjonen vært på plass fra starten av, ville dette ifølge [nr.2] gitt en enorm gevinst for entreprenøren i tilbudsfasen. Da dette vil gi et bedre bilde av prosjektet. Når det er BH som er ansvarlig for det som er i bakken, er de som burde inkludere et grunnlag som georadar for å bygge en bedre modell.

For [nr.2] sitt prosjekt nevnt ovenfor, var det utfordringer knyttet til bygging gjennom myr hvor spesialkonstruksjoner som terskler for å holde på myra skulle bygges, og hensyn knyttet til GV stand måtte tas. Samtidig som vegen skulle utformes slik at vannet fra myra fikk bevege seg gjennom

vegkonstruksjonen. I dette tilfellet er det behov for å vite dybden på myra for å kunne beregne CO₂ besparelsen.

Byggherren [nr.3] påpeker at ved bruk av GPR i dag, så sliter de med å gjøre dette på en måte som gir merverdi.

Geoteknikeren kan ikke alltid få rådataen og tolke denne selv, og må derfor kunne stole på den ferdig tolkede dataen [nr.5]. Når det kommer til automatisert tolkning for veger, har [nr.5] erfaringer med at denne «hoppa» mye opp og ned i vegkroppen. Slik at et lag plutselig å dypere her og der, på en måte som ikke var naturlig ved manuell tolkning. For tolkningen så må man også vite hva man leiter etter før man starter tolkningen. Selve tolkningsprosessen er tungt arbeid da man må fysisk sitte å se på dataen. Ved prosessering har ikke respondenten erfaring med annet enn de standard som prosesseringsprogrammet hadde å by på. Da dataen de samlet inn var av god kvalitet. Respondenten [nr.5] har også erfaring med bruk av percometer til å måle dielektrisk verdi, blant annet på asfaltprøver i lab. [nr.5]

Respondent [nr.5] har også hatt erfaring med påvisning av rør og kabler, spesielt i byområder. Hvor de har testet dette, med varierende suksess. De fant gjerne 60% av de kablene og rørende som var i bakken, men man må da spørre seg hvor nyttig dette er når man ikke finner alle. Forskjell i massene trekkes også fram, da f.eks. man leire vil virke som et «spil» og gi god refleksjon men samtidig skjule alt under. [nr.5]

Respondent [nr.5] har også hatt erfaring med å bruke georadar til å se skiller og lag i vegkroppen. Noe som vil fungere fint for nye veger, men for gamle veger med mye grus vil det være verre å se skillene mellom lagene. Det kan også være vanskelig å skille lag som er bundet sammen med for eksempel bitumen fra hverandre. Mens det burde være mulig å kunne se forskjell mellom grov og velgradert stein. [nr.5]

Når det kommer til hvilke områder i et vegprosjekt som skal undersøkes med georadar, svarer respondent [nr.5] at de ser på områder med størst usikkerhet. Der det er utført prøver som viser størst risiko.

For entreprenøren [nr.2] sitt vegprosjekt beskrevet på forrige side, var det viktig å kartlegge dybde til fjell, for å avdekke om det f.eks. var 6m dypere enn antatt. For da må de hente ut mere fjell enn antatt/planlagt. Målet for dette prøveprosjektet var at rådgiver skulle kunne danne seg et bedre bilde av masseforholdene. Men pr. dette møtet er det enda litt tidlig å se nytteverdien nå.

Jordskjæringer i områder der man ikke er sikker på om det er fjell er mest kritisk, konsekvensen er at det er manko på stein underveis [nr.2]. Slik kan dataen bidra til å planlegge mengden stein som skal hentes ut. F.eks. så planlegger man for riktig uttak av stein til rett tid i prosjektet for bruk i fyllinger seinere, å måtte hente ut mere stein underveis (som ikke er planlagt) er kostbart og tidkrevende. I tillegg så plasser gjerne rådgiver vegen oppå jorda, men entreprenøren må grave seg ned til gode masser å bygge på. Da kan BH få seg noen overraskelser når mengde utførte masser er større enn de prosjekterte. [nr.2]

Hva kan dere se for dere å bruke GPR til

I denne sammenheng, trekker entreprenøren [nr.2] fram et annet prosjekt. Dette gikk på rehabilitering av en tunnel, hvor både asfalten og deler av overbygningen skulle byttes ut. Det var i forkant ikke utført noen undersøkelser med georadar. Det viste seg underveis at de prosjekterte mengdene og tykkelsene (eksisterende) ikke stemte med virkeligheten. Som en konsekvens ble det en god del endringsmeldinger. Om dette skulle vært gjort eller ei, er ifølge [nr.2] opp til byggherren å bestemme. Men hadde de derimot hatt kjennskap til dette (gjennom f.eks. bruk av georadar), kunne dette gitt kostnadsbesparelser. Spesielt her, da entreprenøren hele tiden måtte komme med endringsmeldinger underveis. I tillegg kunne kunnskap om mengde/tykkelse på eksisterende asfaltlag dannet grunnlaget for å vurdere/prise hvor mye som kan/skal gjenvinnes. [nr.2]

Måling av asfalttykkelse med georadar for gjenbruk av massene, vil ifølge [nr.5] la seg gjøre. Siden det alltid vil være et skille mellom asfalten/bitumen og de ubundne materialene i overbygningen. Derimot vil det være verre å skille alle de andre materialene i vegkroppen. [nr.5]

Entreprenøren [nr.4] kan se for seg at å bruke georadar til å skille mellom løsmasser og berg kunne vært nyttig. Men de jobber mye med utførselsentrepriser og har dermed ikke ansvaret for dette. Andre nyttige bruksområder vil være å finne dybde til kabler, rør og annen infrastruktur [nr.4].

Byggherren [nr.3] bruker georadar der den er kostnadmessig effektiv for å innhente grunnlagsdata. Metodens ikke-destruktive natur trekkes også fram, da i sammenheng med å ikke «skade» miljøet under datafangst. Informasjon om dybde til berg, er noe som [nr.3] ønsker tidlig i prosjektet for å få bedre grunnlag for trasevalg.

Bruk av georadar ute i terrenget er ifølge [nr.5] vrient, da signalene i terrenget vil kunne gå opp og ned. Når det kommer til å montere georadar på drone, trekker [nr.5] fram at det per i dag gjennomføres geologisk kartlegging med både fly og helikopter. Derimot gir disse metodene en helt annen oppløsning en det man potensielt ville fått med en drone. Andre måter å benytte georadar som trekkes fram er på jorder, ved å montere den på det kjøretøy (bil eller ATV). Respondent [nr.5] har blant annet erfaring med georadar fra 3D radar, som tekkes etter en bil 20-30 cm over bakken.

Når det kommer til forskningsfronten på bruk av georadar, trekker [nr.5] fram blant annet fram Roadscanners og Timo Saarenketo i Finland som driver mye med dette. Og disse har scannet en del i Norge, spesielt i nord. Videre så finnes det Oslo-baserte Terratec, samt 3D-radar her i Norge. [nr.5] har hatt suksess med noen bruksområder for GPR, og mindre suksess med andre. Noen ganger er grunnforholdene eller materialene feil, så da kan du ikke vite om du kommer til å lykkes med undersøkelsen på forhånd.

Respondent [nr.1] presenterte noen tanker både for og imot bruk av georadar. Det negative ved georadar var:

- Georadar funker ikke i marin leire, og det er der de vanskelige oppgavene er, i motsetning til sand og grus.
- Det er noen grunnforhold den ikke funker på, og vil dermed være skummel å bruke på et tidlig stadium, slik at man da heller vil gå inn med de tradisjonelle metodene man veit funker.

- Tolkningen av dataen kan ikke geoteknikeren gjøre, men det er enda han som står ansvarlig for hvilke vurderinger om grunnforholdene som sendes videre. Man kan derfor være mindre villig til å ta ansvaret/risikoen for jobben andre har gjort.
- Det er viktig for geoteknikerne å ha kontroll på timebruken, det funker ikke å komme etter 20t og si at jeg trenger mere tid til å gjøre georadarundersøkelsen min.

Det positive var:

- Ved forhold som myr kan georadar være gunstig, siden tradisjonelt utstyr kan bli upraktisk. F.eks. for å finne ut om det er noe verdi å bygge der, eller om det er for dypt til fjell eller brukbare masser.

Videre, så forklarer [nr.1] at enhver tolkning av GPR dataen må være en nøytral vurdering (personer passer dårlig). Men at det enda trengs borepunkter for det geotekniske arbeidet. Samtidig sier [nr.1] at jo flere ulike undersøkelsesmetoder som brukes på et prosjekt, jo mere tid påløper det til tolkningsarbeidet (gjelder ikke bare for GPR).

Hvor nøyaktige må resultatene fra GPR være for å ha en verdi:

Det vil komme an på typen prosjekt det er snakk om [nr.1]. Helst +/- 0,5-1,0 m, samtidig som det er ønskelig med nøyaktige punkter tidlig i prosessen [nr.1].

Bruk av georadar er viktig for å få et bilde av grunnforholdene, nøyaktighet på +/- 0,5-1,0 m ville gitt en gevinst. Spesielt for kritiske masser, da store utdypninger kan gi store konsekvenser for prosjektet når disse ikke er tatt hensyn til eller planlagt [nr.2].

For selve byggingen er det kun viktig å anta nivåene, å grave 0,5 m ekstra er ikke så viktig. Da det uansett må graves ned til gode masser. For denne entreprenøren brukes det kun som en indikasjon [nr.2]. Hvordan de faktiske grunnforholdene påvirker hvordan vegen bygges ute i felt, må faktisk vurderes ute i felt. [nr.2]

For entreprenøren [nr.4] som arbeider med utførelsesentrepriser er ikke nøyaktigheten til den tolkede dataen så viktig. Men de kan derimot tenke seg at dette ville vært nyttig for byggherren [nr.4].

Ville en «komplett» grunnundersøkelse med GPR påvirket hvordan dere planlegger, gjennomfører eller ser/jakter muligheter i prosjekt:

Sier man «kom å bruk georadar», så er folk skeptiske. Det må være nok data på plass for å bevise om dette funker. Skal det brukes, kan man mulig tenke en testfase på f.eks. 1 år, hvor georadaren benyttes sammen med andre undersøkelser [nr.1].

Entreprenøren som tar kostnaden ved georadar kan få en ekstra gevinst, men alt avhenger av hva man vil legge inn i et anbud. Da du kan gå konk på å bruke for mye tid og penger på å regne på jobber og gi tilbud uten at du får jobben [nr.2]. Dersom undersøkelser med georadar hadde vært gjort i forkant, kan dette ha stor betydning for anbudet videre. Dette henger sammen med risikoen og hvordan entreprenøren planlegger å utføre jobben. [nr.2]

Dette gjelder også for miljødelen, hvor det gjerne gjøres et LCA regnskap. Da kunne kunnskapen fra georadaren gitt deg en helt annen preferanse, f.eks. når det kommer til deponering av sensitiv leire. [nr.2]

Entreprenøren [nr.4] trekker fram at informasjon om nøyaktig plassering av kabler kan ha en innvirkning på deres planlegging av prosjekter. For gjennomføringen, så vil de kanskje kunne slippe prøvegraving eller kabelomlegging ved en merkomplett grunnundersøkelse. Men de vil nok mest sannsynlig gjennomføre sine prosjekter som tidligere. Derimot kan de tenke seg at dette ville vært nyttig for BH og konsulenter i prosjekteringsfasen [nr.4].

Ved spørsmål om hvorfor georadar ikke brukes oftere, så trekker respondent [nr.5] fram at byggebransjen er en konservativ bransje. I tillegg nå nevnes det at bransjen i dag samler inn store mengder data. Da kan det kanskje tenkes at noen vil stille spørsmål ved å introdusere mere data, dersom de ikke klarer å bruke den de allerede har fra før. Og til slutt, så må det være verdt å bruke georadar, enten gjennom lengre levetid på vegen, eller gjennom å få en billigere veg.

7.3.4. Annet

Grunnforholdene har for entreprenør [nr.2] ikke vært et stort problem når det har vært brukt enhetspriser. Men for totalentrepriser er dette annerledes, da kostnadene er knyttet til mengdene. Videre, så supplerer gjerne entreprenøren med egne geotekniske boringer. Denne typen undersøkelser er kostbare og gir kun indikasjon på det ene stedet. F.eks. har de opplevd å finne sensitive masser kun 0,5 m unna et borepunkt, hvor dette ikke kom fram.

Byggherren [nr.3] påpeker at for dem, så vil målet med grunnundersøkelser være likt for både totalentrepriser og utførselsentrepriser.

Når det kommer til framtida, påpeker byggherren [nr.3] at dette vil være automatisering og håndtering av dataen, sammen med droner og 3D scanning. I tillegg trekkes ikke-lineær triangulering i fram, sammen med teknologi for bildegjenkjenning.

Når det gjelder bærekraft, trekker respondent [nr.5] fra at CO2 regnskap nå noen ganger er introdusert som en del av anbudet. Da regnes det en verdi basert på dette regnskapet, som trekkes fra konkurranseprisen når det skal velges entreprenør. Dersom f.eks. en entreprenør hadde kommet inn med sin egen georadar vurdering kunne dette vært fordelaktig, uten å ta hensyn til advokatmaten i det hele. [nr.5]

Når det kommer til CO2 og myr, er det ifølge [nr.5] nå mye mere fokus på dette. Ikke bare mht. den mengden du tar ut av myr, men også om du drenerer myra (da starter materialet og råtne og dekomponere og slipper ut CO2 og gasser).

Bærekraft i sammenheng med grunnundersøkelser går ifølge respondent [nr.1] ut på å ikke overdimensjonere, siden:

- Geoteknikeren velger materialparameterne, og konservative valg kan få negative konsekvenser for medgått mengde stål og betong
- Mindre kunnskap gir mere konservative valg

- Bruk av sprengstein på prosjekter reduserer bla. transportavstanden
- Det avhenger alltid om penger/kostnader, med mindre hele prosjektet tilpasses for å nå visse bærekraftige valg fra starten av

Tolkningsarbeidet tid, går det 1 dag på innsamling av data så går det 1 uke til tolkningen. Men derimot går selve datainnsamlingen forholdsvis fort, sammenlignet med tolkningen. [nr.5]

7.4. Feltundersøkelse – målinger og observasjoner

I forbindelse med eget arbeid med programmet IQmaps, og tolkning av georadardataen, er det gjennomført en befaring oppe på anleggsplassen, metoden er beskrevet i kapittel 6.3. Langs hele veglinjen ble det totalt identifisert 16 stikkrenner laget i både PP-plast og stablede steinblokker.

For tolkningsarbeidet er det valgt å benytte en stikkrenne kombinert et punkt med synlig fjell i dagen og et sted hvor øverste delen av overbygningen var tilgjengelig, plassering av disse er vist i Figur 7-11. I tillegg er Figur 7-12 inkludert for å gi et inntrykk av anleggsområdet.



Figur 7-11 Punkter langs eksisterende veg for bruk i eget tolkningsarbeid.
Fra venstre mot høyre; Rød = stikkrenne, Blå = fjell i dagen, Oransje = Lag i overbygningen



Figur 7-12 Bilder fra anleggsområdet. Begge tatt i retning Gauslå. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]

DN 400 Stikkrenne under vegen:

Høyde fra toppen av slitelaget ned til toppen av stikkrenna ble målt med hjelp av en rettholt og tommestokk til ca. 99 cm ved utløpet ut i Guslåtjørna. Se Figur 7-13 for plasseringen av stikkrenna og Figur 7-14 for måling av dybde og uløpet. Innløpet var ved gjennomføring av feltundersøkelsen tildekket, men Figur 7-15 viser røret utildekket ved en tidligere anledning.



Figur 7-13 Vegen sett fra innløp DN 400 stikkrenne, bilde t.v. vegen retning Hynnekleiv og bilde t.h. fra innløp rett over vegen mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]



Figur 7-14 Utløp DN 400 stikkrenne ut i Guslåtjørna, bilde t.v. utløp stikkrenne og bilde t.h. måling av dybde fra topp slitelag til toppen av stikkrennas utløp ca. 99 cm. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]



Figur 7-15 Innløp DN 400 stikkrenne ut i Guslåtjørna. [Foto: Jon Olav Upsal]

Fjell i dagen i langs vegen:

Mellom vegen og Guslåtjørna er det er det synlig fjell i dagen, se Figur 7-16 og Figur 7-17, dette er antatt å være fast fjell grunnet nærhet til «kanten» og hvor bratt det er på sidene.



Figur 7-16 Fjell i dagen bak autovern i yttersving mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]



Figur 7-17 Nærbilde fjell i dagen bak autovern i yttersving mot Guslåtjørna. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]

Lag i overbygningen:

De øverste lagene i overbygningen var synlige langs det som tidligere var vegskulderen. Fra Figur 7-18 og Figur 7-19 kan det leses av følgene mål:

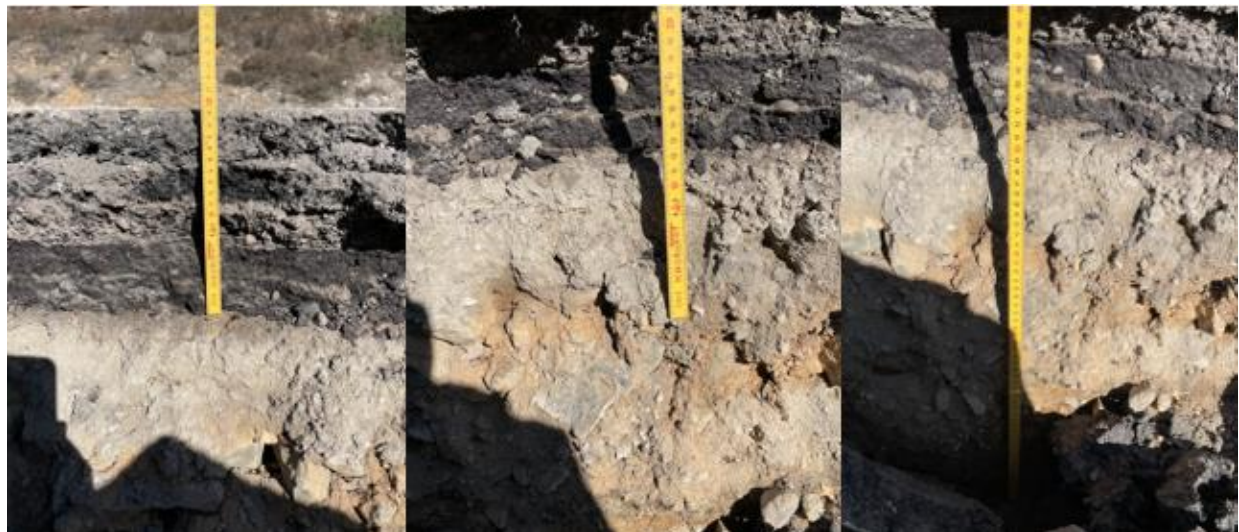
- Asfaltdekke (ukjent type) ca. 20 cm

- Avrettingslag / gammelt grusdekke ca. 12 cm
- Bærelag minst 40 cm

Merk; posisjonen som er markert i Figur 7-11 er omtrentlig, det ble ikke tatt koordinater av dette.



Figur 7-18 Synlige lag i overbygningen ved autovern, begge bilder er tatt på samme sted bare med litt ulik avstand.
[foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]



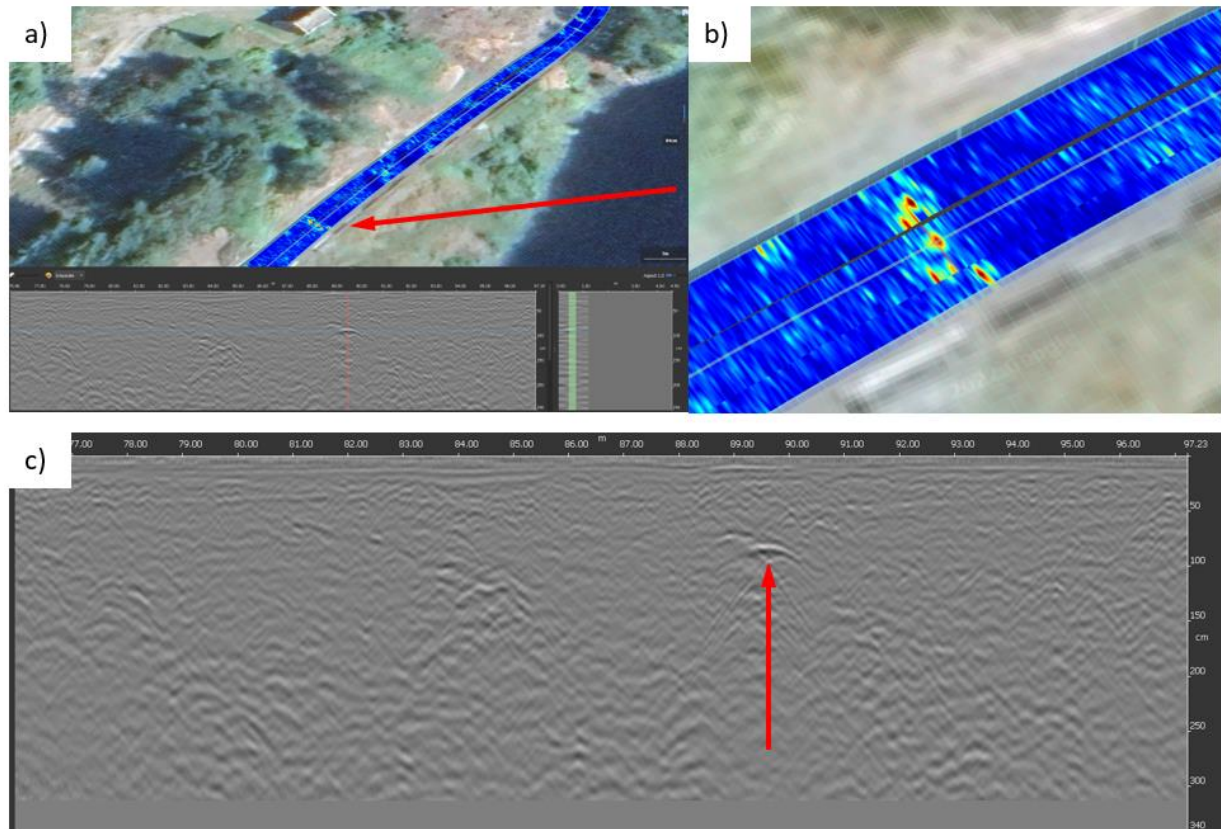
Figur 7-19 Øverste lagene i overbygningen, bilde fra venstre mot høyre; Asphaltdekke (ukjent type) ca. 20 cm, Avrettingslag / gammelt grusdekke ca. 12 cm, og bærelag minst ca. 40 cm. [Foto: Kristian Kolstad, 29.04.2022]

7.5. Egen dataanalyse av georadarmålinger

I dette kapitlet presenteres resultatene fra eget arbeid i dataprogrammet IQMaps. Lokasjonene er valgt ut etter de funnene som er presentert i kapittel 7.4. Metoden for prosessering er som beskrevet i kapittel 6.4.

7.5.1. DN400 stikkrenne under vegen

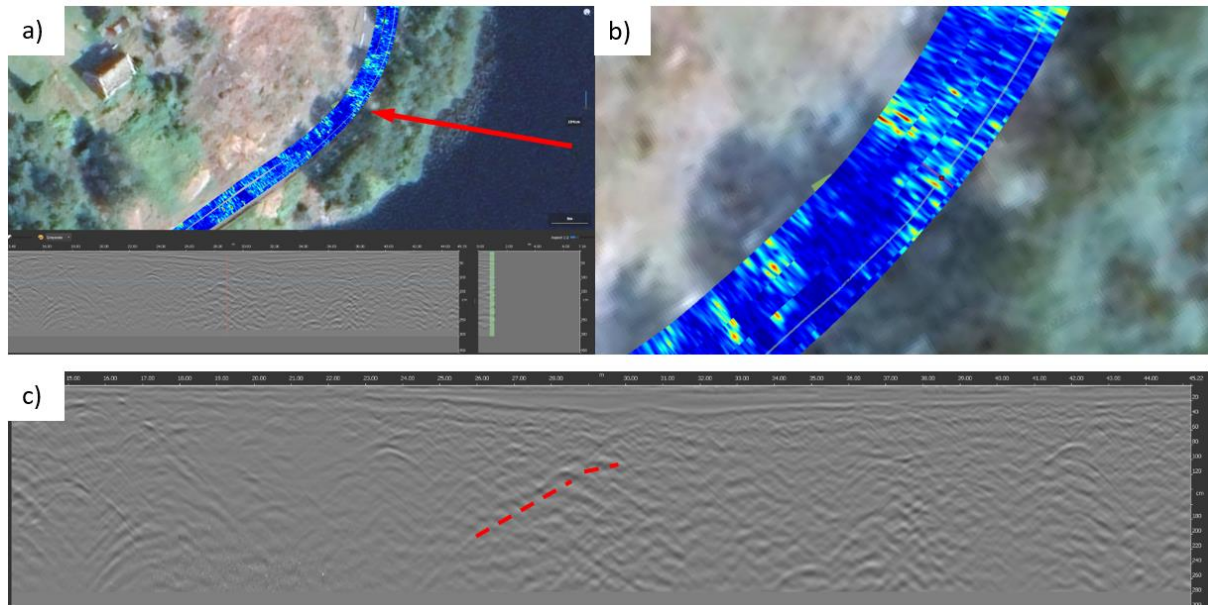
Figur 7-20 viser en serie utklipp fra programmet hvor B-scan med en hyperbel er markert, samt en time-slice ved 84 cm, det er her utført en hyperbola-fit på den markerte hyperblen, hvilket ga en dielektrisk konstant på 7,0 og en overføringshastighet på 11,34 cm/ns (0,11 m/ns) – merk at denne hyperblen ikke hadde særlig synlige «haler» og jeg fikk derfor kun mached den øvre delen noe som ikke var stort å jobbe med. Toppen av stikkrennen er antatt å ligge på ca. 90 cm



Figur 7-20: a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 84 cm ($v=11,34$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 7,0); c) Radargram med hyperblen markert med rød pil (84 cm dyp). 600 MHz antenne.
[Foto: eget arbeid i programmet IQMaps]

7.5.2. Fjell i dagen langs vegen

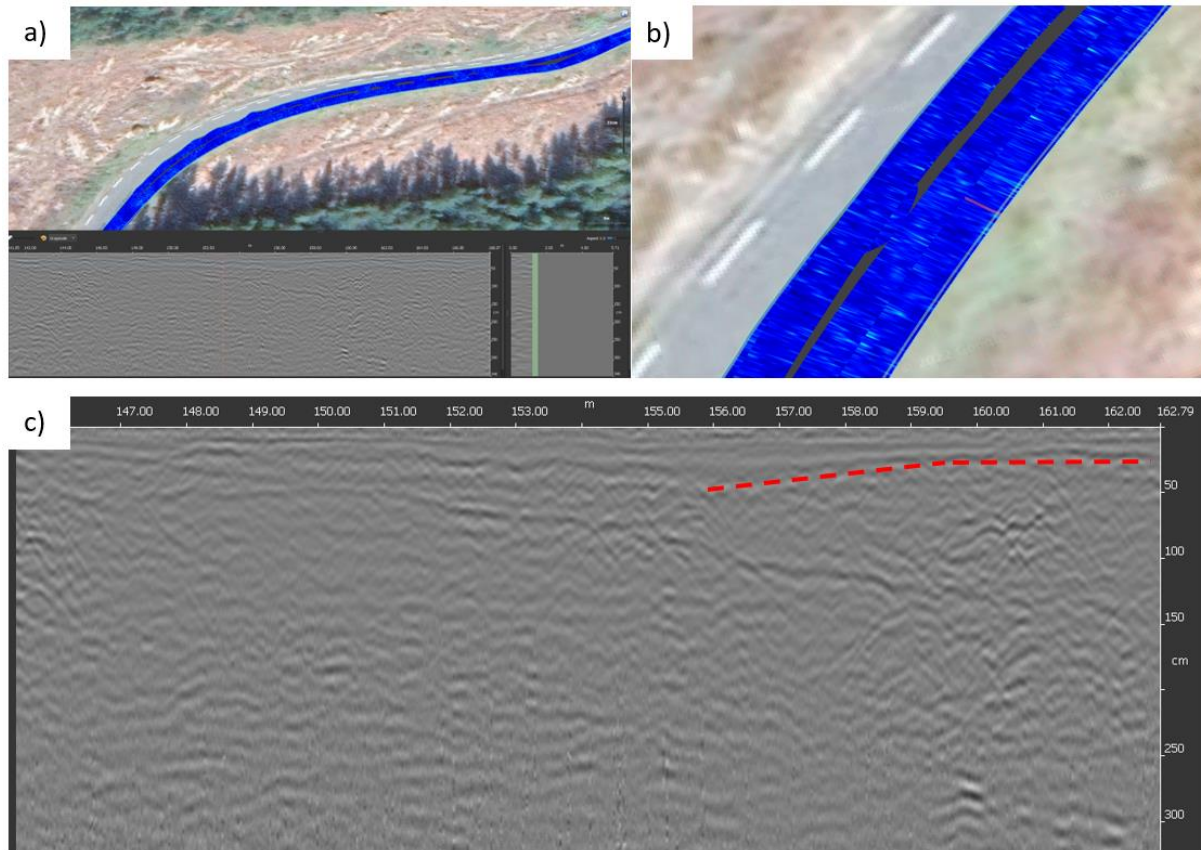
Figur 7-21 viser en serie utklipp fra programmet hvor B-scan hvor antatt fjell er markert med stiplet rød linje, og time-slice ved 104 cm er markert, det er her benyttet dielektrisk konstant på 9,0 og en overføringshastighet på 10,0 cm/ns (0,10 m/ns) plottet rett inn i hyperbola-fit funksjonen.



Figur 7-21 a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 104 cm ($v=10,0$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 9,0); c) Radargram med mulig fjell markert med stiplet rød linje (midten). 200 MHz antenne.
[Foto: eget arbeid i programmet IQMaps]

7.5.3. Lag i overbygningen

Figur 7-22 viser en serie utklipp fra programmet hvor B-scan hvor antatt bunn av asfalten er markert med stiplet rød linje, og time-slice ved 33 cm er markert, det er her benyttet dielektrisk konstant på 6,0 og en overføringshastighet på 12,25 cm/ns (0,12 m/ns) plottet rett inn i hyperbola-fit funksjonen. Tykkelsen til vegdekke er antatt å være ca. 20-25 cm.



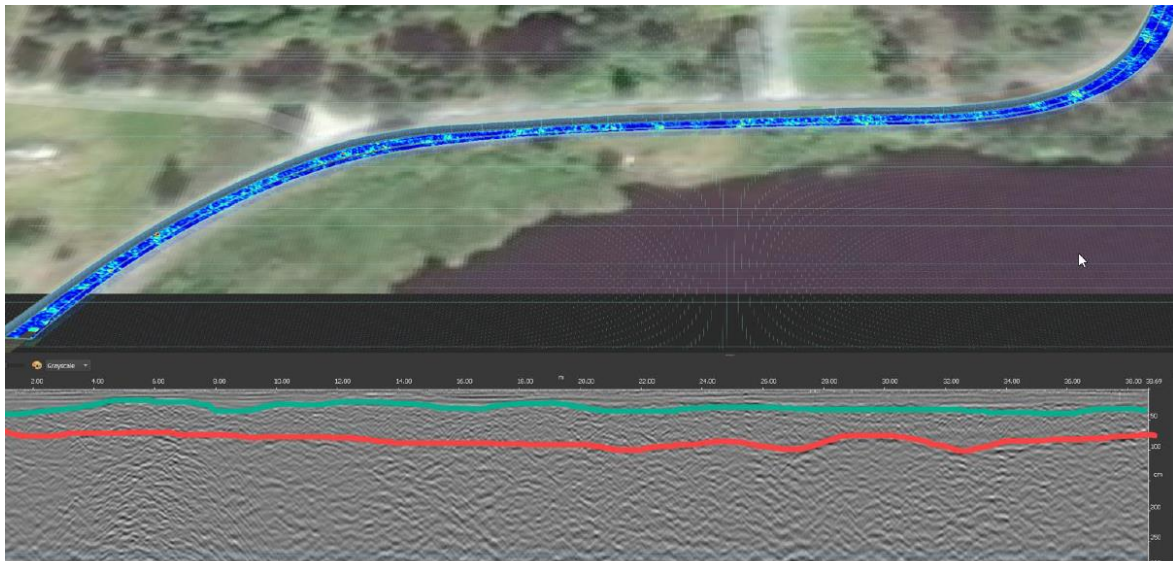
Figur 7-22 a) Oversiktsbilde fra IQMaps med radargram og time-slice i veglinja; b) Time-slice ved 33 cm ($v=12,25$ cm/ns, og dielektrisk konstant lik 6,0); c) Radargram med mulig bunn asfalt markert med rød stiple linje. 600 MHz antenne.
[Foto: eget arbeid i programmet IQMaps]

7.6. Tidligere tolkninger av georadarmålinger

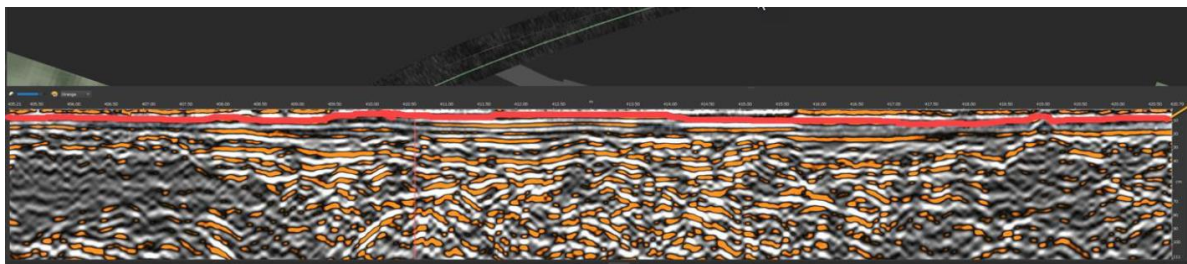
Som det kommer fram i kapittel 5 Case og materialer, har georadar-dataen blitt samlet inn og tolket av rådgiver (Geografi digital) [48]. Det er benyttet en georadar av typen Stream EM fra IDS, med 40 antenner på 200 og 600 MHz, som kan gi en 3D presentasjon av området som er scannet [48]. Programmet IQMaps (kapittel 5.2) er benyttet til prosessering og tolkningsarbeidet. Hovedfokuset i den eksterne rapporten var [48]:

- Objekter i bakken (rør og ledninger)
 - Noen objekter er avdekket, disse sammenfaller med observasjoner in situ
- Strukturer og grunnforhold (ulike typer masse og forholdene mellom disse)
 - Det er identifisert likhetstrekk som indikerer både lag og mønster
 - Det er behov for utgraving eller kjerneprøver for å definere hva som er i hvert lag

Det er den nedre delen av eksisterende veg som er i viet størst oppmerksomhet i den eksterne rapporten. Figur 7-23 viser en rød (nederst) og en grønn (øverst) linje som viser endringer ved henholdsvis ca. 1 m og ca. 40-50 cm dybde. Ved bruk av IQMaps er det i den eksterne rapporten også identifisert en endring på ca. 10-20 cm dybde i Figur 7-24, som antas å være tykkelsen på asfalten.



Figur 7-23 Tolkning av lag i vegkroppen fra den eksterne rapporten, figuren viser en rød (nederst) og en grønn (øverst) linje med endringer ved henholdsvis ca. 1 m og ca. 40-50 cm dybde. Kopiert fra [48]



Figur 7-24 Tolkning av lag i vegkroppen fra den eksterne rapporten, figuren viser det som er antatt å være tykkelsen på asfalten (rød linje) ca. 10-20 cm dypt. Kopiert fra [48]

8. Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene opp mot tidligere forskning.

8.1. Hvordan benyttes georadar til grunnundersøkelser knyttet til planlegging av vegprosjekter?

Blant SVV sine publikasjoner i Norge (kapittel 7.1.1), ligger hovedvekten av bruksområder for georadar innen vedlikehold, tilstandsvurdering, kvalitetskontroll eller forsterkningsarbeider av eksisterende veg. Derimot skiller rapporten fra Mara nord prosjektet [25] seg fra disse, ved at den fokuserer på bruk av georadar til planlegging av nye vegger.

Spesielt trakk respondent [nr.2] fram et eksempel hvor de har i forbindelse med sitt siste store vegprosjekt gjennomført en georadarundersøkelse, i forkant av detaljprosjekteringen. Hensikten i denne undersøkelsen var å avdekke løsmasseoverdekning i myr. Myr er et bruksområde hvor georadar har vist suksess, som beskrevet i Zajicova og Chuman [22, p. 124] (i kapittel 7.1.3), hvor myras evne til å binde vann gir en meget høy dielektrisk permittivitet sammenlignet med f.eks. fjell (se Tabell 3-1). Dette vil gi en høy refleksjonskoeffisient beregnet med likning (7.1), og dermed et synlig skille i dataen. Også Parsekian et.al. [41] (i kapittel 7.1.3) har hatt suksess i å estimere mengden (volum) myr, hvor resultatene samsvarte med fysiske prøver. I tillegg er dette bruksområde

for georadar et av flere som trekkes fram av SVV i Rapport nr. 626 [13, p. 262] og (kapittel 7.1.1). Respondent [nr.1] trekker også fram myr som et eksempel, på hvor georadar kan være gunstig.

I undersøkelsen benyttet respondent [nr.2] en bakkekoplet antenne med frekvenser på 160 og 450 MHz. Dette er sammenfaller godt med Parsekian et.al. [41] sitt anbefalte intervall på 100 – 400 MHz, og intervallet i Mara Nord rapporten [25] for grunnundersøkelser. Området som respondent [nr.2] undersøkte, bestod hovedsakelig av myr med noen synlige fjellknoller. Synlig fjell i dagen ble blant annet brukt av Cherif et.al. [42] til å skille fjell og løsmasser i dataen.

I undersøkelsen registrerte respondent [nr.2] gode data ned til 150 ns, hvor fast fjell var en synlig overflate som var lett å tolke. Og eksisterende borepunkter ble brukt til å kalibrere dybden. Det at dataen ble registrert med en TWTT på 150ns, viser til at de som gjennomførte undersøkelsen har tilpasset georadarens Hva resultatet fra georadarundersøkelsen representerer innsamlingsstid for den aktuelle undersøkelsen. Noe som Utsi [15, p. 74] påpeker er viktig, da dette ikke kan endres i ettertid (kapittel 7.2.1). Kalibrering vha. borepunkter er en fornuftig metode for overgangen myr/fjell, ettersom det kan være mangel på f.eks. hyperbler i dataen. En slik mangel gjør ifølge Utsi [15, p. 54] gjøre den vanlige metoden curve fitting umulig å bruke (kapittel 7.2.2).

Respondent [nr. 5] har erfaring med å bruke georadar til å identifisere lag i vegkroppen. Hvor respondenten påpeker at georadar vil fungere fint for nye veger, men for gamle veger vil det være verre å skille mellom lagene. Dette kan også ses i undersøkelser på Gauslå [48], hvor det kun er de øvre lagene som er synlige i dataene. At kun vegdekke og potensielt bærelag er synlig kan også ses i egne resultater fra bruk av programmet IQMaps (kapittel 7.5.).

En rekke studier som presenteres av Solla et.al. [27, p. 20] og [18, p. 62], bekrefter at georadar kan benyttes til å identifisere lag i vegkroppen. Identifisering av lag er også noe som trekkes fram av Hoff et.al. [10], når det kommer til å bruke georadar til utbedring av veger. Lalagüe [7, p. 59] trekker også fram frostdybder og islinser som mulige lag som kan identifiseres. Når det kommer til å kunne se forskjell mellom grov og velgradert stein, påpeker respondent [nr.5] at dette burde være mulig. Dette støttes av Saarenketo og Scullion [38, p. 122] (kapittel 7.1.3). Respondent [nr.2] trekker også fram måling av lag i eksisterende veg som et bruksområde hvor de kunne tenke seg å benytte georadar. I denne sammenhengen var det snakk om å kjenne tykkelsen på vegdekke og underliggende lag, for å redusere mengden avviksmeldinger sendt til byggherren.

Blant annet vil kunnskap om mengde/tykkelse på eksisterende asfaltlag ifølge respondent [nr.2], kunne danne grunnlaget for å vurdere/prise hvor mye asfalt som skal gjenvinnes. Saarenketo og Scullion [38, p. 128] trekker også fram kontroll av dekketykkelse i forkant av fresing, som et bruksområde for georadar. Ved slike undersøkelser understreker Solla et.al. [27, p. 20] viktigheten av kalibrering vha. kjerneprøver for å unngå store feil. Når det kommer til hvilke dekker denne metoden vil fungere på, inkluderer Annan et.al. [18, p. 62] de aller fleste vegtypene (kapittel 7.1.2). Respondent [nr.5] sier seg enig i at georadaren kan brukes til å måle tykkelser i for bindelse med gjenbruk. Da det alltid vil være et skille mellom asfalten/bitumen og de ubundne materialene i overbygningen.

I myrundersøkelsen nevnt innledningsvis i dette kapitlet, valgte respondent [nr.2] å gjennomføre undersøkelser der de var usikre på grunnforholdene. Respondent [nr.5] uttrykte enighet i dette, og presiserte at georadar gjerne brukes områder med størst usikkerhet hvor eksisterende prøver viser størst risiko. Områder med risiko var også fokuset til Maerz [43] og Jacques et.al. [44], som begge benyttet georadar til å vurdere risikoutsatte områder i fjellskjæringer (kapittel 7.1.3).

8.2. Hvordan utføres, kalibreres, og tolkes resultatene fra grunnundersøkelser med bruk av georadar?

Respondent [nr.5] påpeker at geoteknikeren ikke alltid kan få rådataen selv, og må derfor kunne stole på den ferdig tolkede dataen. I tillegg må man vite hva man leter etter før tolkningen starter. Tolkingsprosessen er tungt arbeid da man må fysisk må studere dataen. Som det kommer fram av kapittel 7.2.1, er radargrammet et sammensatt bilde og ikke alltid like rett fram å tolke. Mens respondent [nr.1] trekker fram at selv om geoteknikeren ikke utfører tolkningene, så er det enda han som står ansvarlig for hvilke vurderinger om grunnforholdene som sendes videre. Ved prosessering har ikke respondent [nr.5] erfaring med annet enn de standardfunksjonene som prosesseringsprogrammet hadde å by på, da dataen de har samlet inn har vært av god kvalitet. Dette underbygges av Jol et.al. [16, p. 141] (kapittel 7.2.3) som argumenterer for ikke all data trenger like mye prosessering. I egen dataanalyse fra kapittel 7.5 var det også her mulig å tolke resultatene fra grunnundersøkelsene ved hjelp av standardfunksjonene i prosesseringsprogrammet. Likevel opplevdes det som utfordrende å skille dypere lag, som fjell, i rotete data. Dette kan i noen tilfeller føre til at man ikke oppnår ønskede resultater fra undersøkelsen.

Tolkning av resultater ved bruk av georadar i litteraturen i kapittel 7.2 og fra egen datanalyse (kapittel 7.5) er beskrevet som manuell tolkning. Professoren [nr.5] derimot, har erfaringer med automatisert tolkning for veger. Tolkningen av lagene her “hoppet” mye opp og ned i vegkroppen. Det vil si at et lag plutselig lå dypere et sted, på en måte som ikke ville sammenfalt ved en manuell tolkning. Videre forklarer rådgiveren [nr.1] at enhver tolkning av GPR dataen må være en nøytral vurdering. Han/hun mener derfor at personer passer dårlig, og det trengs enda borepunkter for det geotekniske arbeidet. Samtidig sier rådgiveren [nr.1] at jo flere ulike undersøkelsesmetoder som brukes på et prosjekt, jo mere tid påløper det til tolkningsarbeidet.

8.3. Hvordan oppstår eller kvantifiseres nytteverdi knyttet til grunnundersøkelser i planlegging og gjennomføring av et vegprosjekt?

I følge entreprenøren [nr.2] kan undersøkelser med georadar gi mindre risiko, da det er lettere å planlegge gravingen. Dette kan også spille inn på HMS og risiko på arbeidsplassen, som Utsi [45] understøtter i sin studie angående nedgravd infrastruktur. Rådgiver [nr.1] legger til at god HMS-kultur gir nytte i form av både framdrift og økonomisk gevinst.

PhD avhandlingen til Anne Lalagüe [7, p. 62] setter spørsmål ved de finansielle fordelene ved GPR. Byggherren [nr.3] kan fortelle at de benytter bruker georadar der den er kostnadmessig effektiv for å innhente grunnlagsdata. Det påpekes av [nr.3] at det er vanskelig å benytte GPR på en slik måte at det gir merverdi i det store bildet. Både tidligere studier [20, p. 62] og byggherren [nr.3] mener

dermed at det må være en balansegang mellom resultat og kostnad ved bruk av georadar for at det skal gi nytte.

Finansielle fordeler kan også diskuteres [7, p. 62] i lys av prosjekterte mengder. Dersom byggherren har mer realistiske mengder på forhånd, som diskutert av entreprenøren [nr.2], vil han/hun unngå overraskelser ved utførelse som kan føre til finansielle ulemper. Kunnskapen georadar gir kan også brukes til å vurdere om det i det hele tatt burde bygges her, ifølge rådgiver [nr.1]. Professoren [nr.5] nevner også at når det gjelder massebalanse, vil georadar kunne gi en bedre prissetting. I følge entreprenøren [nr.2] optimaliseres veglinja for å spare, og spart masse vil føre til sparing av penger.

Entreprenøren [nr.4] antar at å bruke GPR til kabelpåvisning vil være nyttig, da dagens metode kun viser hvor kablene er, ikke hvor dypt de går. Professoren [nr.5], derimot, som har erfaring med kabelpåvisning har opplevd å kun få avdekt 60% av kablene ved bruk av georadar. Dermed er [nr.5] usikker på nytteverdien ved bruk av georadar.

8.4. Hvordan kan nytteverdien optimaliseres ved bruk av georadar?

Entreprenøren [nr.4] mener det kan gi nytte for byggherren og konsulenter i tidlige faser av et prosjekt. Dette støttes av byggherre [nr.3] som ønsket informasjon om dybde til berg, og av [nr.1] som ville hatt kjennskap til fjellprofil i myr i tilbudsfasen. Annan et al. [18, p. 66] bygger opp under byggherre [nr.3] sitt utsagn, ved å presentere ulike studier som har benyttet georadar hvorav estimering av dybde til berg er et av dem.

Respondent [nr.1] nevner at for økt nytte bør resultatene ved georadar være på +/- 0,5m. [nr.2] er enig i dette, da hun/han mener en nøyaktighet på +/- 0,5-1,0 m ville gitt gevinst. I følge disse respondentene vil det altså gi nytte å benytte georadar med nøyaktighet på +/- 0,5/1,0 m. Entreprenøren [nr.4] mener også at nøyaktigheten av grunnundersøkelsen vil være nyttig, spesielt for byggherren. Behovet for nøyaktighet ved grunnundersøkelser med georadar kan understøttes av undersøkelsen utført av Thomas et.al. [46] i 2009. De som arbeidet med infrastruktur hadde her et nøyaktighetsbehov på 100 mm ved dybder ned til 3 m under bakken.

Med dagens metoder, som punktvis grunnboringer, kan georadar gi nytte ved å hjelpe til med å tette gapet mellom borepunktene. Dette understøttes av Annan et al. [18], som trekker frem at et bruksområde ved georadar er å gi nødvendig informasjon om lagdeling og fjell mellom borehullene.

8.5. Svakheter og begrensninger

En stor del av litteraturen benyttet i rapporten omhandler vedlikehold, rehabilitering og tilstandsvurdering av eksisterende konstruksjoner av veg. Respondentene i intervjuet i denne rapporten derimot, benytter i hovedsak ikke georadar til vedlikehold. I stedet ligger fokuset på planlegging og gjennomføring av nye prosjekter. Det har derfor vært vanskelig å knytte eksisterende litteratur opp mot det som gjennomføres i praksis, da mange av undersøkelsene som går på fjell og løsmasser ikke har direkte sammenheng med veiplanlegging. Dette kan anses som en svakhet ved rapporten.

Ved oppstart av denne oppgaven ble det satt en begrensning om å ikke ta hensyn til de økonomiske aspektene ved bruk av georadar. Gjennom rapporten har det likevel vist seg at det økonomi og finansielle aspekter ved bruk av grunnundersøkelser som georadar har vært diskutert hyppig. Dette gjelder spesielt under intervju av fagfolk i bransjen. Da økonomi vil være viktig når nye metoder for grunnundersøkelser vurderes, har blitt inkludert i diskusjonen selv om det ikke direkte kan svare på forskningsspørsmålet i denne rapporten. Det kan også være en svakhet i seg selv at det økonomiske aspektet ikke er en del av forskningsspørsmålet.

9. Konklusjon

Hvordan kan grunnundersøkelser med georadar skape nytteverdi for byggherre og entreprenør ved planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekt?

- Ved å identifisere lag i grunnen i de områdene der det er usikkerhet rundt grunnforholdene, slik at man kan oppnå bedre massebalanse
- Ved å redusere risiko knyttet til uforutsette endringer grunnforholdene, som vil bidra til å styrke HMS på arbeidsplassen
- Ved å gi kunnskap om lagdeling og dybde til fjell, som vil være nyttig både for planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekter
- Ved å tette gapet mellom borepunkter, som er en svakhet ved dagens metoder for grunnundersøkelser

10. Anbefalinger

Anbefalinger om videre forskning har kommet fram av svakheter og begrensninger ved denne rapporten. Rapporten inkluderte ikke de økonomiske aspektene ved bruk av georadar, men har likevel avdekket ulike synspunkter knyttet til dette. Derfor vil det være et forslag til videre forskning å inkludere det finansielle perspektivet knyttet til bruk av georadar for planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekter.

11. Referanser

- [1] P. K. Larsen, *Konstruksjonsteknikk: Laster og bæresystemer*, 2. red., Fagbokforlaget, 2008.
- [2] M. v. Staveren, *Uncertainty and ground conditions. A risk management approach*, CRC press, 2006.
- [3] Statens Vegvesen, *V220 Geoteknikk i vegbygging*, Vegdirektoratet, 2018.
- [4] Statens Vegvesen, *V222 Geoteknisk felthåndbok - råd og metodebeskrivelser*, Vegdirektoratet, 2014.
- [5] Standard Norge, *NS-EN 1997-2:2007+NA:2008*, Standard Norge, 2008.
- [6] NGI - Norges geotekniske institutt, «ngi.no,» NGI, [Internett]. Available: <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Geofysikk-fjernmaaling-og-romlig-analyse/Georadar>. [Funnet 25 April 2022].
- [7] A. Lalagüe, «Use of Ground Penetrating Radar for Transportation Infrastructure Maintenance,» NTNU, Trondheim, 2015.
- [8] G. Wivestad, «Bruk av georadar til å undersøke tilstanden til veikonstruksjoner,» NMBU, 2017.
- [9] R. Helland, «Undersøke presisjon og effektivitet av Ground Penetrating Radar for å definere hulrom i asfaltdekket,» NTNU, 2018.
- [10] I. Hoff, B. Hoven og E. Eide, «Introduction of Ground Penetrating Radar in Pavement Rehabilitation in Norway,» ResearchGate, Trondheim, 2008.
- [11] C. W. Christensen, A. A. Pfafhuber, H. Anschutz og T. F. Smaavik, «Combining airborne electromagnetic and geotechnical data for automated depth to bedrock tracking,» *Journal of Applied Geophysics*, pp. 178-191, 2015.
- [12] Statens vegvesen, *N200 Vegbygging*, Statens vegvesen - Digitale vegnormaler, Juni 2021.
- [13] Statens vegvesen, *Rapport nr. 626 - Lærebok Vegteknologi*, Trondheim: Vegdirektoratet, 2016.
- [14] Statens Vegvesen, *N200 Vegbygging*, Vegdirektoratet, 2014.
- [15] E. C. Utsi, *Ground Penetrating Radar - Theory and Practice*, Ely: Elsevier, 2017.
- [16] R. Harry M. Jol, *Ground Penetration Radar Theory and Applications*, Wisconsin: Elsevier, 2009.
- [17] NGU - Norges Geologiske Undersøkelse, «ngu.no,» NGU, [Internett]. Available: <https://www.ngu.no/sites/default/files/GEORADAR-metodebeskrivelse.pdf>. [Funnet 25 April 2022].
- [18] W. W.-L. Lai, X. Derobert og P. Annan, «A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering - A 30 year journey from locating and testing to imaging and diagnosis,» *NDT and E international*, 2018.
- [19] D. P. Bigman, *GPR Basics: A handbook for Ground Penetrating Radar Users*, 1 red., Suwanee, GA: Learn GPR, 2018.
- [20] T. Saarenketo, «Electrical properties of roadmaterials and subgrade soils and the use of ground penetrating radarr in traffic infrastructure surveys, Doktorgradsavhandling,» Faculty of science, department of geosciences, University of Oulu, Rovaniemi, 2006.

- [21] T. Saarenketo, «Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement,» Mara Nord Project, Rovaniemi, 2011.
- [22] K. Zajicova og T. Chuman, «Application of ground penetrating radar methos in soil studies - A review,» *Geoderma*, 2019.
- [23] Statens Vegvesen, R211 Feltundersøkelser, Statens Vegvesen, 2021.
- [24] Statens vegvesen, «Rapport nr. 497 Vegteknologi - Hulromsmåling med georadar på Fv862 Hp01 og Hp54 i Tromsø,» Statens vegvesen, 2018.
- [25] T. Saarenketo og P. Maijala, «Recomendations for guideline for the use of GPR in site investigations,» Mara Nord Project, Rovaniemi, 2011.
- [26] A. Benedetto og L. Pajewski, *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer, 2015.
- [27] M. Solla, G. Vega Perez og S. Fontul, «A review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices,» *Remote Sensing*, 2021.
- [28] IDS GeoRadar – Part of Hexagon, «<https://idsgeoradar.com/products/software/iqmaps>,» IDS GeoRadar , [Internett]. Available: <https://idsgeoradar.com/products/software/iqmaps>.
- [29] Kildekompasset - Uia, USN og UIS, «Kildekompasset,» [Internett]. Available: <https://kildekompasset.no/kildekritikk/>. [Funnet 20 05 2022].
- [30] D. I. Jacobsen, *Hvordan gjennomføre undersøkelser? Innføring i samfunnsvitenskapelig metode*, 3 utgave red., Kristiansand: Cappelen Damm Akademisk, 2015.
- [31] NSD, «Norsk senter for forskningsdata (NSD); Vanlige spørsmål,» [Internett]. Available: nsd.no/personverntjenester/fylle-ut-meldeskjema-for-personopplysninger/vanlige-sporsmal/. [Funnet 15 April 2022].
- [32] Statens vegvesen, «Rapport nr. 373 Forsterkning av veger - Varige veger 2011-2014,» Statens vegvesen, Trondheim, 2015.
- [33] Statens vegvesen, «Rapport nr. 392 - Utførelsens betydning for asfaltdekkers levetid,» Statens vegvesen, 2015.
- [34] Statens vegvesen, «Rapport nr. 610 Vegdekker i Region øst 2019 - Status for dekketilstand, kvalitet og kontrakter,» Statens vegvesen, 2019.
- [35] Statens vegvesen, «Rapport nr. 800 - Dokumentasjon og kontroll av asfalt,» Statens vegvesen, 2021.
- [36] Statens Vegvesen, «Rapport nr.598 Varige veger - sluttrapport,» Vegdirektoratet, Trondheim, 2017.
- [37] T. Saarenketo og P. Maijala, «The Use of GPR in Road Rehabilitation Projects,» Mara Nord Project, Rovaniemi, 2011.
- [38] T. Saarenketo og T. Scullion, «Road evaluation with ground penetrating radar,» *Journal of applied geofysics*, pp. 119-138, 2000.
- [39] A. Benedetto, F. Tosti, L. B. Ciampoli og F. D'Amico, «An overview of ground-penetrating signal processing techniques for road inspecetions,» *Signal Processing*, pp. 201-209, 2017.
- [40] F. André, C. v. Leeuwen, S. Saussez, R. V. Durmen, P. Bogaert, D. Moghadas, L. d. Rességuier, B. Delvaux, H. Vereecken og S. Lambot, «High-resolution imaging of a vineyard in south of France

- using ground-penetrating High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating,» *Journal of Applied Geophysics*, 2012.
- [41] A. D. Parsekian, L. Slater, D. Ntarlagiannis, J. Nolan, S. D. Sebesteyen, R. K. Kolka og P. J. Hanson, «Uncertainty in Peat Volume and Soil Carbon Estimated Using Ground-Penetrating Radar and Probing,» *Soil Science Society of America Journal*, pp. 1911-1918, 2012.
- [42] M. C. Diallo, L. Z. Cheng, E. Rosa, C. Gunther og M. Chouteau, «Integrated GPR and ERT data interpretation for bedrock identification at Clericy, Quebec, Canada,» *Engineering Geology*, vol. 2019, pp. 230-241, 2019.
- [43] M. Norbert, «Potential use of ground penetrating radar in highway rock cut stability,» *Geophysics*, Januar 20001.
- [44] J. Deparis, S. Garambois og D. Hantz, «On the potential of Gprund Penetrating Radar to help rock fall hazard assessment: A case study of a limestone slab, Gorges de la Bourne (French Alps),» *Engineering Geology*, pp. 89-102, 2007.
- [45] E. Utsi, «The Use of Ground Penetrating Radar as a Risk Mitigation Tool,» *The international conference on ground penetrating radar*, pp. 795-798, 2004.
- [46] A. Thomas, C. Rogers, D. Chapman, N. Metje og J. Castle, «Stakeholders need for ground penetrating radar utility location,» *Journal of Applied Geophysiscs*, pp. 345-351, 2009.
- [47] F. Benedetto og F. Tosti, «A signal processing methodology for assessing the performance of ASTM standard test methods for GPR systems,» *Signal Processing*, pp. 327-337, 2017.
- [48] Xtend technology, «Gauslå Hynnekleiv Rv41 Seismikk og georadar undersøkelse r2,» 2021.
- [49] Roadscanners, «Roadscanners,» [Internett]. Available: <https://www.roadscanners.com/>. [Funnet 08 Mai 2022].
- [50] Statens Vegvesen, «Rapport nr. 365 Lærebok Drift og vedlikehold av veger,» Statens vegvesen, Trondheim/Oslo, 2015.

12. Vedlegg

12.1. Intervjuguide

23.03.2022

Nytteverdi av georadar (GPR) til grunnundersøkelser ved planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekt

Hensikten med denne masteroppgaven er å undersøke: *Hvordan kan resultatet fra grunnundersøkelser med georadar (GPR) brukes til å skape nytteverdi for både byggherre og entreprenør ved planlegging og gjennomføring av nye vegprosjekt?*

Merk: selv om fokuset i oppgaven min er på vegprosjekt, så er det også veldig nyttig å høre eventuelle tanker og innspill dere måtte ha som ikke direkte er knyttet til veg. I den ferdige oppgaven vil navn og hvor du jobber holdes anonymt.

Disse spørsmålene vil være utgangspunktet for samtalen:

- Nr. 1 Bruker dere i dag noen digitale metoder for å kartlegge grunnforholdene?
- Nr. 2 Hvilke metoder bruker dere i dag for å kartlegge grunnforholdene?
 - a) Hva er fordelene?
 - b) Hva er ulempene?
- Nr. 3 Hvilken kunnskap/informasjon fra grunnundersøkelsene er mest nyttig når dere planlegger og prosjekter?
- Nr. 4 Hva bruker dere denne kunnskapen til?
(f.eks. bedre prosjektering, bedre økonomi, massehåndtering, HMS, risiko, miljø)
- Nr. 5 Hvordan påvirker prosjektets størrelse og kompleksitet behovet for detaljnivået i grunnundersøkelsene?
(f.eks. detaljer som interpolering mellom borepunkter i BIM modellen for å profilere berg)
- Nr. 6 Hvilken kunnskap/informasjon hadde vært nyttig for dere å ha, som dagens metoder ikke klarer å gi oss?
- Nr. 7 Har dere erfaring med å bruke georadar (GPR) i deres prosjekter?
- Nr. 8 Til hvilket bruk, kan dere se for dere å ha nytte av å bruke georadar (GPR)?
 - a) Skille mellom løsmasser og berg?
 - b) Skille mellom lagdeling i løsmasser?
 - c) Andre bruksområder?
- Nr. 9 Resultatene fra georadaren må tolkes og kalibreres, hvor nøyaktig/sikre må disse resultatene være for å ha noe verdi for dere?
- Nr. 10 Kan dere tenke dere at en mer komplett grunnundersøkelse (med GPR-data til å fylle «hulrommet» mellom borepunktene), ville påvirket hvordan dere:
 - a) Planlegger prosjekter?
 - b) Gjennomfører prosjekter?
 - c) Ser muligheter for både dere selv og byggherre?

Side 1 av 1