



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi, IMT

Bruk av georadar til å undersøke tilstanden til veikonstruksjoner

Geir Wivelstad
Master i Byggeteknikk og Arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutning på et femårig studie i Byggeteknikk og Arkitektur ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet, med fordypning i Drift og Vedlikehold av Veg. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Ressursavdelingen i Statens Vegvesen, Region Øst.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til veilederne mine: Tatek Fekadu Yideti ved Statens Vegvesen, Region Øst har hjulpet meg masse med gode råd og veiledning når det gjelder faglige spørsmål og John Petter Langdalen ved NMBU har vært hovedveileder internt og har hjulpet meg ved administrative spørsmål.

I tillegg ønsker jeg å takke Viktor Hedfors ved Statens Vegvesen, Region Øst for introduksjon og opplæring i de konvensjonelle metodene for tilstandsmålinger og Pekka Maijala ved Roadscanners for god opplæring og hjelp i bruk av programvaren Road Doctor. Kåre Nygård ved Statens Vegvesen har vært til stor hjelp for å anskaffe data til analysene.

Sammendrag

Hulrom og lagtykkelse i veioverbygninger har mye å si for bæreevnen til veien og dermed også levetiden. Ved å ha en pålitelig metode for å undersøke disse to faktorene så vil man ha en bedre basis til å planlegge vedlikeholds og forsterkningstiltak.

Georadar er en relativt ny tilstandsmålingsmetode i Norge og det er et uttrykt ønske fra Statens Vegvesen å undersøke nøyaktigheten og effektiviteten av denne metoden. Denne oppgaven tar for seg og analyserer data fra tidligere gjennomførte georadar-målinger før resultatene av dette sammenliknes med målingsresultater fra konvensjonelle metoder. Det er fokus på to egenskaper ved veidekker; hulromsandel og lagtykkelse.

I oppgaven er det først en teoridel som beskriver virkemåten til georadar og tidligere konvensjonelle målemetoder, før selve undersøkelsen og metoden beskrives nærmere. Analysen beskrives i detalj før tolkningene gjennomgås og et resultat foreligger. Det er en påfølgende diskusjon og på bakgrunn av analysert data og betraktninger gjort underveis er konklusjonene som følger:

1. Georadar kan brukes til tolkning av hulromsandler i dekkelag
2. Georadar kan brukes til tolkning av lagtykkelser i bituminøse lag
3. Tolkning av rådata har svært mye å si for resultatet til undersøkelsene, og erfaring i tolkning av slik data er viktig for å få et riktig resultat
4. Anvendeligheten og hurtigheten til innhenting av rådata i felten gjør at georadar er et verktøy som kan fungere bra til supplerende undersøkelser

Abstract

Air voids and the thicknesses of layers in the road superstructure are crucial for the carrying capacity and the lifetime of the road. If there was a reliable method of surveying these two factors, there would be a better basis for planning road maintenance and reinforcement.

Ground penetrating radar is a fairly new technique in Norway used for analysing the condition and state of road networks and the Norwegian Public Roads Administration are interested in learning more about how precise and effective this method is. This thesis will analyse raw data from surveying done with ground penetrating radar. Then the results from the interpretation of the data will be compared to results from conventional methods of examining road structures. The focus will be on two characteristics of the road; air voids and layer thickness.

The thesis begins with theory about conventional methods and ground penetrating radar. Then the method for analysing raw data and interpreting it will be explained in more detail. Afterwards the result will be discussed and on the basis of this the conclusions from this thesis are as follows:

1. Ground penetrating radar (GPR) can be used for examining air voids in pavements
2. GPR can be used to examine the layer thicknesses of bituminous layers
3. The interpretation of raw data is very crucial for the result of the road inspection, and experience is needed in order to interpret data correctly
4. The speed and applicability GPR has in gathering data from the road shows that GPR is a good tool used for supplementary examination of roads

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag	ii
Abstract.....	iii
Innholdsfortegnelse.....	iv
Figurer.....	vi
Tabeller	viii
Forkortelser	ix
1. Innledning	1
2. Litteraturstudie.....	2
2.1 Veikonstruksjoner	2
2.1.1 Veikonstruksjoner generelt.....	2
2.1.2 Krav til bituminøse asfaltdekker.....	7
2.1.3 Kvalitetskontroll på asfaltdekke	9
2.2 Tradisjonelle metoder for tilstandsmåling.....	12
2.2.1 Prøvetaking av borkjerneprøver av asfaltmaterialer.....	12
2.2.2 Lagtykkelsesmålinger	13
2.2.3 Hulromsmålinger	15
2.3 Georadar	21
2.3.1 Historien til georadar	22
2.3.2 Prinsippene til georadar	23
2.3.3 Hulromsundersøkelser i georadar	34
2.3.4 Lagtykkelsesundersøkelser i georadar	35
2.3.5 Fremgangsmåten i georadarmålinger	36
2.4 Begrepsavklaring.....	39
2.5 Road Doctor programvare	41
3. Materiale.....	44
3.1 Langnestunnelen.....	44
4. Metode	48
4.1 Road Doctor	48
4.1.1 Hulromsundersøkelser	51
4.1.2 Lagtykkelses-undersøkelser	52
5. Resultater.....	53

6. Diskusjon.....	61
7. Konklusjon.....	63
8. Videre arbeid	65
9. Referanser.....	66
10. Vedlegg.....	67

-

Figurer

Figur 2.1.1	Tverrsnitt av en veioverbygning	s. 2
Figur 2.1.2	De ulike lagenes funksjon i en veioverbygning	s. 4
Figur 2.1.3	Prinsippskisse og måleutstyr for en penetrasjonstest	s. 7
Figur 2.1.4	Skisse og bilde av apparater brukt til måling av mykningspunkt	s. 8
Figur 2.1.5	Bilde av blødning fra et asfaltdekke	s. 10
Figur 2.1.6	Bilde av steinslipp fra et asfaltdekke	s. 10
Figur 2.2.1	Bilde av prøvetaking av borkjerneprøver	s. 13
Figur 2.2.2	Skisse av oppmåling av lagskiller på en borkjerneprøve	s. 14
Figur 2.2.3	Bilde av to borkjerneprøver	s. 14
Figur 2.2.4	Bilde av en Seaman C-300 isotopmåler	s. 16
Figur 2.3.1	Bilde av en georadarskanning	s. 21
Figur 2.3.2	Refleksjon med reversering av polaritet	s. 28
Figur 2.3.3	Illustrasjon av hvordan frekvensen til signalet påvirker oppløsning	s. 33
Figur 2.3.4	Oversikt over et integrert GPR system i et kjøretøy	s. 36
Figur 2.3.5	Bilde og illustrasjon av et luft-koplet GPR signal	s. 37
Figur 2.3.6	Fire signaltyper fra luft-koplete GPR-undersøkelser	s. 38
Figur 2.4.1	Bilde av hovedvinduet i NVDB	s. 39
Figur 2.4.2	Bilde av hovedvinduet i PMS 2010	s. 39
Figur 2.5.1	Skjermdump med forklaring av Road Doctor	s. 41
Figur 2.5.2	Eksempeldata i Road Doctor	s. 42
Figur 3.1.1	Oversikt over Langnestunnelen fra NVDB	s. 44
Figur 3.1.2	Bilde av vestre inngang til Langnestunnelen	s. 45
Figur 4.1.1	Bilde av prosessert data i Road Doctor	s. 50
Figur 5.1	Hulromsandelen i vestgående retning	s. 54
Figur 5.2	Hulromsandelen i østgående retning	s. 55
Figur 5.3	Tykkelsesundersøker i vestgående retning	s. 56

Figur 5.4	Tykkelsesundersøkelser i østgående retning	s. 57
Figur 5.5	Sammenlikning av hulromsandeler i vestgående kjørefelt	s. 58
Figur 5.6	Sammenlikning av hulromsandeler i østgående kjørefelt	s. 59
Figur 5.7	Sammenlikning av lagtykkelser i vestgående kjørefelt	s. 59
Figur 5.8	Sammenlikning av lagtykkelser i vestgående kjørefelt	s. 60

Tabeller

Tabell 2.1.1	Hulromsandelen for et utvalg asfaltdekker	s. 9
Tabell 2.3.1	Eksempler på dielektriske verdier	s. 30
Tabell 3.1.1	Borkjernerdata fra Langnestunnelen	s. 46
Tabell 5.1	Sammenlikning av hulromsandel på utvalgte punkter	s. 58
Tabell 5.2	Sammelikning av lagtykkelser på utvalgte punkter	s. 59

Forkortelser

NVDB	Norsk vegdatabank
PMS	Pavement Management System
ÅDT	Årsdøgntrafikk
GPR	Ground Processing Radar (Georadar)
RD	Road Doctor
FHWA	Federal Highway Administration

1. Innledning

Bakgrunnen for valg av problemstilling var ønsket Statens Vegvesen hadde om å undersøke nøyaktigheten og effektiviteten til georadar til tilstandsundersøkelse av veioverbygninger. Levetiden til veier blir påvirket av bæreevnen og dersom man kan finne en pålitelig metode til å beregne bæreevnen til veier kan man utvikle et system til å beregne levetiden til veien. Dette vil gi mer forutsigbarhet i arbeidet med å planlegge forsterkningstiltak og vedlikehold i fremtiden.

To faktorer som utgjør stor betydning for bæreevnen av veien er hulromsandelen i dekkelaget og lagtykkelsene i veioverbygningen. Formålet med denne oppgaven er å undersøke om georadar fungerer bra som et verktøy for å beregne disse verdiene sammenliknet med tidligere metoder. I denne oppgaven har det blitt forsøkt å undersøke dette kvantitativt ved å benytte seg av rådata fra georadar-skanninger og sammenlikne tolkningsresultatene fra disse med resultater fra tradisjonelle metoder.

Problemstillingen er "Hvor nyttig er georadar til å definere lagtykkelser og hulrom i overbygningen av veier".

Oppgaven tar først for seg teori rundt veikonstruksjoner generelt og tilstandsmålingstyper, før det går dypere inn på funksjonen og virkemåten til georadar. Deretter tar det for seg materialet som skal undersøkes. Det neste punktet er hvilken metode som benyttes i undersøkelsen, med en forklaring av programvaren som benyttes. Resultatene fra denne tolkningen gjennomgås i kapittel 5, som drøftes i påfølgende kapittel. Til slutt følger noen idéer om videre arbeid, før referanser og vedlegg tas med.

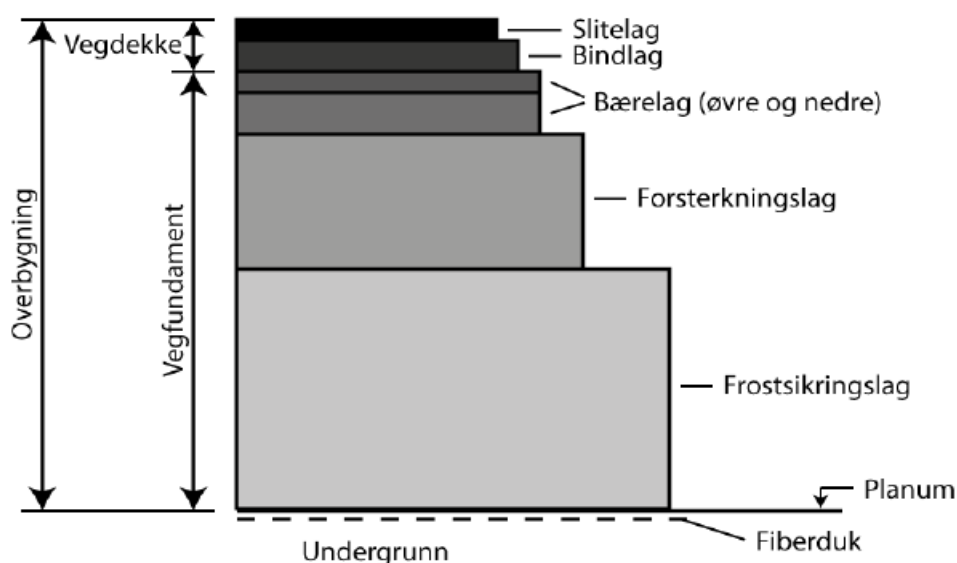
2. Litteraturstudie

2.1 Veikonstruksjoner

I dette kapittelet gjøres det en kort gjennomgang av grunnleggende teorier om veikonstruksjoner, krav til materialer, metoder for å undersøke kvalitet til bituminøse masser og konsekvenser ved valg av feil kvalitet på veidekker.

2.1.1 Veikonstruksjoner generelt

Veier er skapt for å lette ferdsel og skal bidra til å fordele trafikkbelastningen på en gunstig måte til undergrunnen. En veioverbygning er den delen av veien som er bygget på undergrunnen og den består av en lagvis konstruksjon der de ulike lagene har forskjellige funksjoner. Tverrsnittet til en veioverbygning er vist i figur 2.1.1.



Figur 2.1.1: Et tverrsnitt av en overbygning. Kopi av figur 4.17 (Vegdirektoratet 2016b)

Veidekket er det øverste laget i en overbygning og den består av to lag; slitelaget og bindlaget. Det er i veidekket man bruker asfalt som er steinmaterialer, også kalt tilslag, holdt sammen av bindemidler. Hovedkomponenten i bindemidler i asfaltdekker er bitumen, som er et stoff man får fra raffinering av råolje, og som er et svært klebrig og svart materiale. I

veidekket skal materialene være av høy kvalitet. Tykkelsen til dekkelaget pleier å være 4,0-8,0 cm.

Dekkelaget har en rekke funksjoner som den skal utføre:

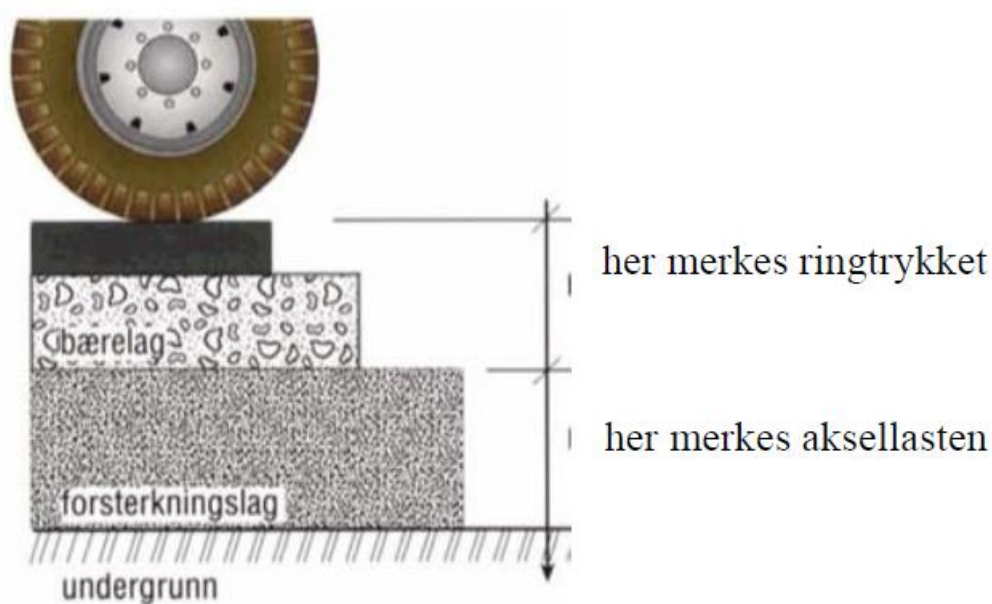
1. Den skal ha god deformasjonsmotstand, altså at det er lav etterkompaktering grunnet trafikkbelastning og forskyvningen skal være lik null.
2. Asfalten skal ha god slitasjemotstand, den skal tåle piggdekk og minske svevestøv og sporing i veiene.
3. Utmattingsmotstanden skal være høy, den skal tåle trafikk over tid og mikrosprekker som kan oppstå i veidekket skal ikke utvikle seg videre til å bli større og betydelige sprekker.
4. Asfalten skal ha god motstand mot temperaturoppsprekking, det vil si bindemiddelet må velges riktig så lav temperatur ikke skaper sprekker grunnet sammentrekning.
5. Friksjonen skal være så høy at det er et godt grep for kjøretøyene som ferdes på asfalten.
6. Veidekket skal ha gode lystekniske egenskaper, det skal være støydempende og dreneringsevnen skal være god.

Det er høye krav til materialkvalitet også i bærelaget grunnet høyt spenningsnivå fra gjentatte tunge trafikkbelastninger. Funksjonen til bærelaget er å fordele trafikkbelastningene videre ned til forsterkningslaget uten at det oppstår deformasjoner i veikonstruksjonen eller at steinmaterialene blir brutt ned. Bundne materialer i bærelaget er steinmaterialer som er bundet sammen av bitumen, mens ubundne bærelagsmaterialer er bærelag som kun består av ulike typer steinmaterialer. Tykkelsen til bærelaget pleier å være 10-20 cm avhengig av hvilke materialer som brukes.

Nedenfor bærelaget finnes forsterkningslaget som har to hovedfunksjoner: den skal fordele lasten for å unngå overbelastning av undergrunnen og drenere godt for å bidra til lavt vanninnhold i de overliggende lagene. Det er rene steinmaterialer som brukes til å bygge opp forsterkningslaget, de mest brukte steinmaterialer er kult 22/120, 22/180 og pukk 22/90 (Vegdirektoratet 2016b). Tallene indikerer størrelsen på de individuelle steinene, kult 22/120 viser at steinene skal ha størrelse på mellom 22-120mm. Tykkelsen på forsterkningslaget er mellom 20-120cm.

Frostsikringslaget er det første laget som ikke kun har å bedre bæreevnen som funksjon. Dette laget skal hindre at frost trenger ned i undergrunnen og skaper muligheter for telehiv. I nyere tid er det mer fokus på å unngå dette, og et fornuftig dimensjonert frostsikringslag er svært viktig for å unngå telehiv. Dette laget kan bestå av steinmaterialer eller andre materialer som lettklinker, skumglass eller ekstrudert polystyren (XPS). Tykkelsen på dette laget er avhengig av hvilken dimensjonerende verdi for frostmengde man har på den aktuelle strekningen. På bunnen av overbygningen brukes en fiberduk for å skille massene fra overbygningen og undergrunnen.

Nedenfor, på figur 2.1.2, vises hvilken belastning som påvirker ulike deler av overbygningen.



Figur 2.1.2: De ulike lagenes funksjon i en veioverbygning. Kopi av figur 9.2 (Vegdirektoratet 2015)

Ringtrykkbelastningen skaper spenninger grunnet lufttrykket i kjøretøyet. Dersom det er et høyt lufttrykk vil det være et mindre område av kjøretøyet som har kontakt med asfaltdekket, som fører til at større belastning overføres over et mindre område. Dermed øker spenningene i dekkelaget ved høyere ringtrykk. Aksellastbelastningen er lasten som veikonstruksjonen blir påført fra tyngden på kjøretøyet som føres ned gjennom akslingene.

I Norge dimensjoneres bærelaget ut i fra trafikkbelastningen, som er uttrykt i formelen 2.1.1.

$$N = f * \dot{A}DT_t * 365 * Gn * C * E$$

2.1.1

der N er dimensjonerende trafikkbelastning, f er fordelingsfaktor avhengig av antall kjørefelt (1 felt: f = 1,0, 2 felt: f = 0,5, 4 felt: f = 0,4), $\dot{A}DT_t$ er gjennomsnittlig antall tunge kjøretøy per døgn i veiens åpningsår (totalvekt $\geq 3,5$ tonn) og C er gjennomsnittlig antall aksler per tunge kjøretøy (kan settes lik 2,4). Formlene for Gn og E er uttrykt i formel 2.1.2 og 2.1.3.

$$Gn = \frac{(1 + p)^n - 1}{p}$$

2.1.2

der p er årlig trafikkvekst for tunge kjøretøy i prosent og n er dimensjoneringsperiode i antall år.

$$E = \left(\frac{\text{aksellast}}{\text{referanseaksellast}} \right)^4$$

2.1.3

der E er gjennomsnittlig ekvivalensfaktor for akslene på tunge kjøretøy, aksellast er aksellasten til kjøretøyet mens referanseaksellasten er satt til å være 10 tonn. I trafikkteilinger så kan det bli talt lange kjøretøy istedenfor tunge kjøretøy, men dette kan sies å være det samme (Vegdirektoratet 2014a).

Faktorene som legger grunnlaget for valg av veidekket er $\dot{A}DT$, dominerende påkjønning og bruksområde. $\dot{A}DT$ står for årsdøgntrafikk som er gjennomsnittlig antall passeringer per døgn. $\dot{A}DT$ blir beregnet ved å dele antall passeringer i året med antall dager.

For bærelaget er det trafikkbelastningen som bestemmer dimensjonene, mens det er trafikkbelastning og undergrunnsforhold som styrer dimensjoneringen av forsterkningslaget. I

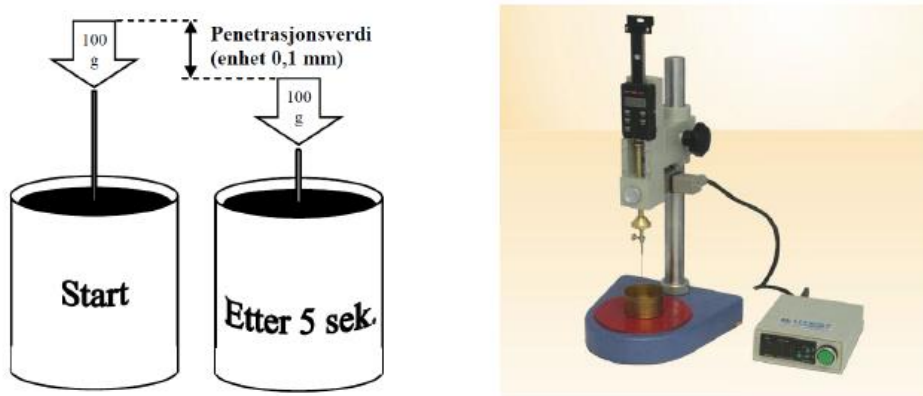
Norge dimensjoneres veikonstruksjoner for en 10-tonns aksellast og 20-års levetid (Samferdselsdepartementet 2007).

I Norge benytter man hovedsakelig et semi-empirisk dimensjoneringsystem, også kjent som dimensjoneringsnivå 2. Det betyr at dimensjoneringen av veikonstruksjoner blir gjort ved hjelp av indeksmetoden, i tillegg til teoretiske beregninger. Indeksmetoden går ut at man dimensjonerer lagene med tanke på bæreevne ut fra deres indeksverdi. Indeksverdien blir bestemt ut fra lastfordelingskoeffisienten multiplisert med tykkelsen til laget. Det settes krav til minimum indeksverdi til de ulike lagene. Dette gir en viss frihet i dimensjoneringen, og gjør at den er anvendbar for flere ulike situasjoner med hensyn til grunnforhold, trafikkmengde og -type, klima og nedbørmengde. Alle materialene som brukes i veikonstruksjoner ilegges en lastfordelingskoeffisient, og man kan bruke disse tallene til å forsikre seg om at styrken på veien er opprettholdt. Dersom man har materialer uten oppgitt lastfordelingskoeffisient gir det semi-empiriske systemet frihet til å benytte data om disse materialene funnet gjennom laboratorieforsøk.

2.1.2 Krav til bituminøse asfaltdekker

Det er en rekke mekanistiske krav som blir stilt til bituminøse asfaltdekker, for kvaliteten på både bindemiddelet og steinmaterialene som brukes. For at kravene til materialene skal være ivarett gjennomføres det en rekke tester for å avdekke kvaliteten. To av disse testene for bindemiddelet er beskrevet i detalj nedenfor. Den første testen som blir beskrevet er penetrasjonstesten.

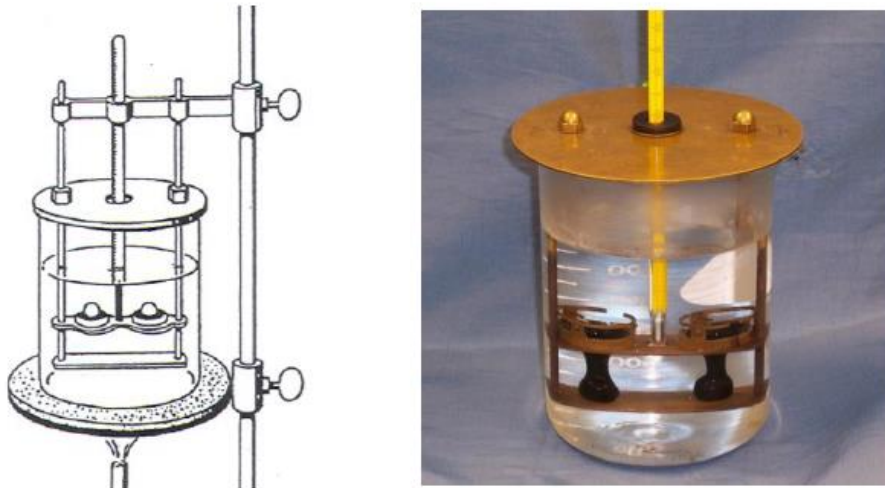
Den brukes for å undersøke hardheten til bitumenet og er en empirisk test som ble utviklet på slutten av 1800-tallet. I testen blir en metallkopp med bitumenet som skal undersøkes varmet opp til 25 °C. En nål med en konisk spiss blir senket ned til bitumenoverflaten og det settes på et lodd på 100 gram. Den totale nedsynkningen i løpet av 5 sekunder blir målt, og denne dybden uttrykt ved 0,1 mm som enhet kalles penetrasjonsverdien. Dersom det er en målt verdi på 8,7 mm vil man få en penetrasjonsverdi på 87. Benevningen til bitumenet beskriver hvilken hardhetsklasse det befinner seg i, for eksempel betyr benevningen bitumen 70/100 at penetrasjonsverdien ligger på mellom 70-100. Forsøket står nærmere beskrevet i NS-EN 1426. Oppsettet til en penetrasjonstest er vist i figur 2.1.3.



Figur 2.1.3: Prinsippskisse og måleutstyr for en penetrasjonstest. Kopi av figur 6.7 (Vegdirektoratet 2016b)

Mykningspunktet er en annen test som brukes for å beregne asfaltens deformasjonsmotstand i den øvre delen av bruksområdet. Prøver av bindemiddelet blir støpt inn i to ringer og plasseres på et stativ i et vannbad som ligger på 5 °C. En stålkule på 3,5 g legges på hver av prøvene og vannet varmes opp med en temperaturstigning på 5 °C/min. Ettersom

bindemiddelet mykner pga. høyere temperatur vil de begynne å sige nedover, og tyngden fra kulen vil presse prøven ned til kontakt med en plate 25,4 mm under utgangspunktet. Den temperaturen som vannet ligger på idét kontakten skjer kalles mykningspunkt-temperaturen. Dette forsøket beskrives nærmere i NS-EN 1427 og en skisse og et bilde av forsøket er illustrert nedenfor i figur 2.1.4.



Figur 2.1.4: Skisse og bilde av apparater brukt til måling av mykningspunkt. Kopi av figur 6.10 (Vegdirektoratet 2016b)

2.1.3 Kvalitetskontroll på asfaltdekke

I dette delkapittelet gjennomgås noen av de konsekvensene som kan oppstå dersom man har feil hulromsinnhold eller feil tykkelse på dekkelaget.

Den ønskede hulromsandelen for noen typer asfaltdekker følger i tabell 2.1.1. Tykkelsen på dekkelagene uttrykkes ofte i kg/m^2 . Det er to kategorier tykkelse som er oppgitt i Håndbok N200: Vegbygging, kapittel 6.3.1: dekketykkelse 60-80 kg/m^2 og dekketykkelse $> 80 \text{ kg/m}^2$. En tommelfingerregel man kan bruke for å regne om benevning på dekketykkelsen fra kg/m^2 til mm reell tykkelse er at 25 kg/m^2 tilsvarer ca. 10 mm tykkelse. Dersom man skal regne helt nøyaktig så er det avhengig av densiteten til dekkematerialene, som igjen avhenger av densiteten til tilslagsmaterialene og bindemiddelet som brukes. Dersom man følger tommelfingerregelen tilsvarer 60-80 kg/m^2 ca. 24-32 mm tykkelse, mens $>80 \text{ kg/m}^2$ tilsvarer dekketykkelse > 32 mm. Dersom man skal ha dekketykkelser på under 60 kg/m^2 , så er det ikke fastsatt noen krav til hulromsandel. Byggherre kan vurdere å bestemme krav til hulromsandel ved utførelse.

Asfalttype	Hulromsprosent, enkeltprøve	Hulromsprosent, middel av 5 prøver
Ab 60-80 kg/m^2 Slitelag/bindlag	2-7 % / 2-8 %	2-6 % / 2-7 %
Ab $> 80 \text{ kg/m}^2$ Slitelag/bindlag	2-5 % / 2-7 %	2-5 % / 2-6 %
Ska 60-80 kg/m^2 Slitelag/bindlag	2-7 % / 2-8 %	2-6 % / 2-7 %
Ska $> 80 \text{ kg/m}^2$ Slitelag/bindlag	2-5 % / 2-7 %	2-4,5 % / 2-6 %

Tabell 2.1.1: Hulromsandelen for et utvalg asfaltdekker

Dersom man har for lav hulromsandel kan man få instabilitet og blødning av asfaltdekket på sommerstid. Bitumenmaterialene i asfaltdekket vil utvide seg mer enn tilslaget på varme dager og dersom det er for lite hulrom for bitumenet å utvide seg i, vil det utvide seg på toppen og glide utover asfaltoverflaten. Dette er illustrert i figur 2.1.5.



Figur 2.1.5: Bilde av blødning på asfaltdekke. Kopi av figur 1, seksjon 5.3 (Vegdirektoratet 2014b)

Har man derimot for høy hulromsandel så gir det større mulighet for vanninntrenging i veidekket. Kjøretøybelastningen vil presse vann i hulrommet mellom bindemiddel og tilslag, og føre til dårlig vedheft og eventuell steinslipp. Frost kan også føre til steinslipp. I figur 2.1.6 illustreres steinslipp på et veidekke.



Figur 2.1.6: Steinslipp fra et asfaltdekke. Kopi av figur 2, seksjon 5.4 (Vegdirektoratet 2014b)

Ved at hulromsandelen til dekkelaget er på et akseptabelt lavt nivå vil man unngå ekstra komprimering fra trafikkbelastningen. Ved for høy hulromsandel i dekkelaget kan det gi større mulighet for oksidasjon av asfalten ved at luften har mulighet til å komme til større deler av asfalten. Oksidering av bitumen fører til herding og at fleksibiliteten til bitumenet synker. Dette kan føre til sprekker i dekkelaget og kortere levetid på veien (Read & Whiteoak 2003).

Dekketykkelsen avhenger av hvilken øvre kornstørrelse man har på steinmaterialene i asfalten. Dersom man har for tykt veidekke kan det bety at det er for mye bindemiddel og for lite steinmaterialer i et tverrsnitt av veien og bæreevnen påvirkes. Dersom det er for tynt veidekke så vil det ikke være fysisk plass for to steiner å ligge oppå hverandre. Fordelen ved å ha to steiner oppå hverandre er at friksjonen dem imellom fører til økt styrke på veidekket. Den optimale dekketykkelsen pleier å ligge på enten 2,5-3,0 ganger øvre nominelle kornstørrelse (Vegdirektoratet 2014a).

2.2 Tradisjonelle metoder for tilstandsmåling

Teorien om tradisjonelle tilstandsmålinger i denne oppgaven omhandler kun lagtykkelsen og hulromsandelen. Prosedyrene som er beskrevet her står nedfelt i Håndbok R210:

Laboratorieundersøkelser og Håndbok R211: Feltundersøkelser. Dersom det er uoverensstemmelser mellom prosedyrene i Håndbok R210 og Håndbok R211 og gjeldende standarder, skal man følge fremgangsmåten i standardene. De aktuelle standardene er henholdsvis NS-EN 12697-36 (2003); NS-EN 12697-6 (2012); NS-EN 12697-5 (2009) + AC (2012) og NS-EN 12697-8 (2003) for de påfølgende prosedyrene.

2.2.1 Prøvetaking av borkjerneprøver av asfaltmaterialer

Ved hjelp av en borkjernemaskin med en diamantkrone på 100 ± 2 mm indre diameter (evt. større) hentes det ut borkjerner fra det aktuelle punktet. Borkjernen skal ikke avvike med mer enn 5° fra normalen til overflaten. Borkjernen skal være representativ for asfaltdekket den er hentet ut fra, så det skal være boret gjennom alle asfaltlagene i dekket som skal undersøkes. Dersom det oppstår defekter, som for eksempel knuste eller urette borkjerner, skal ikke disse brukes i videre undersøkelser. Diameteren til borkjernen skal være 100 mm eller 150 mm. På hvert prøvefelt skal det bores ut to borkjerner med en innbyrdes avstand minst 300 mm. Etter boringen er fullført skal hullet fylles igjen med lappemasse. Borkjerneprøver som skal brukes til hulromsmålinger, skal hentes inn senest 3 uker etter dekkelegging for å få et riktig bilde av kvaliteten på asfalten før trafikkbelastningen komprimerer dekkelaget (Saarenketo 2011a). Prosedyren beskrives nærmere i Håndbok R211: Feltundersøkelser, punkt 15.441. Nedenfor vises prøvetakingsutstyret som brukes i figur 2.2.1.



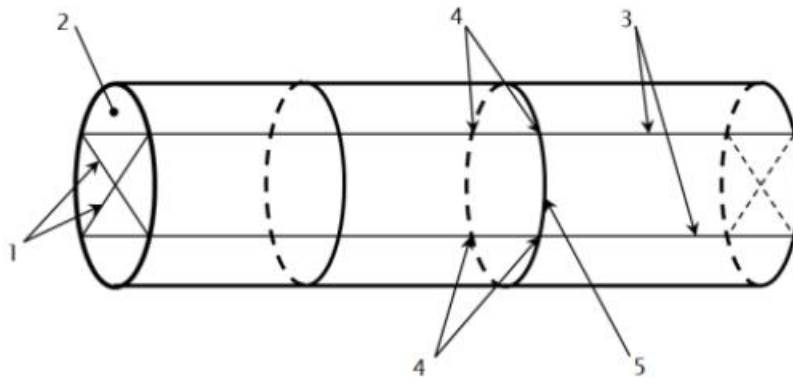
Figur 2.2.1: Bilde av prøvetaking av borkjerneprøver (Foto: Viktor Hedfors)

2.2.2 Lagtykkelsesmålinger

Ved hjelp av skyvelære skal lagtykkelsen måles til nærmeste mm på fire parvis motsatte punkter på kjerneprøven. Dersom det er kun ett lag som undersøkes så blir det middelverdien til de fire målingene som er gjeldende lagtykkelse. Hvis det er flere lag i borkjernen som skal undersøkes, skal det trekkes en rett linje fra oversiden av borkjernen gjennom de fire punktene som viser det øverste laget. Slik får man målingspunktene til de neste lagene på korrekt sted nedover på borkjerneprøven. Figur 2.2.3 nedenfor viser et bilde av to borkjerner som er hentet ut fra ett prøvefelt.

Når resultatet foreligger i form av mm per lag, skal midlere dekketykkelse i mm multipliseres med midlere densitet i g/cm^3 , slik at man får ut en verdi for asfaltforbruket i kg/m^2 .

Denne framgangsmåten er beskrevet nærmere i Håndbok R210 – Laboratorieundersøkelser, punkt 361.



Tegnforklaringer:

- 1 Kryssmarkering på toppflaten
- 2 Toppflate
- 3 Linjer vinkelrett på toppflaten
- 4 Krysspunkt
- 5 Lagskillelinje

Figur 2.2.2: Skisse av oppmåling av lagskiller på en borkjerneprøve. Kopi av figur 361-1 (Vegdirektoratet 2016a)



Figur 2.2.3: Bilde av to borkjerner som er hentet ut med tydelige lagskiller (Foto: Viktor Hedfors)

2.2.3 Hulromsmålinger

Det er flere steg som må gjøres for å beregne hulromsinnholdet i et asfaltdekke. Først må man beregne densiteten ρ_d enten gjennom undersøkelser gjort i laboratoriet eller ved hjelp av isotopmåler i felten. Laboratorieundersøkelser benytter seg av borkjerneprøver og er dermed en destruktiv metode, da man må gjøre et fysisk inngrep i veien. Isotopmålere er ikke-destruktive apparater man setter oppå asfaltoverflaten og får den dataen man ønsker uten inngripen i det fysiske dekkelaget. Deretter må man beregne maksimumsdensiteten ρ_m enten teoretisk ved hjelp av informasjon fra dekkeutlegging eller gjennom undersøkelser gjort i laboratoriet. Til slutt har man alt man trenger av informasjon for å beregne hulromsandelen V_m i prøvene.

En isotopmåler brukes til å måle densitet ρ_d under og etter kompaktering av bituminøse veidekker og bærelag. Som regel vil maksimal dybde som en overflatesonde kan undersøke være på 75 mm. Dette utstyret brukes til punktmålinger og vil dermed bare gi informasjon om densiteten til materialet i et veldig begrenset område. Selve målingen utføres ved først å sparkle ut kalkmel i et jevnt lag på en tørr overflate til et asfaltdekke for å fylle overflateporer. I et utvalgt område måles det på to punkter, med to målinger på hvert punkt. Avstanden mellom målepunktene skal være 200 – 400 mm. Densiteten ρ_d er middelverdien av målingene fra disse to punktene. Et bilde av en Seaman C-300 isotopmåler, som Statens Vegvesen bruker til slike målinger, er vist nedenfor i figur 2.2.4. Prosedyren for bruk av isotopmåler er gitt i Håndbok R211 – Feltundersøkelser, punkt 15.344.



Figur 2.2.4: Et bilde av en Seaman C-300 isotopmåler (Foto: Viktor Hedfors)

Under hulromsundersøkelser i laboratoriet må man begynne med å finne densiteten for prøven før man går videre med påfølgende undersøkelser. For å bestemme densiteten til prøven er det oppgitt fire metoder i Håndbok R210 – Laboratorieundersøkelser, punkt 362. Metode A brukes på prøver med noenlunde tett overflate og kalles forsegling. Metode B brukes på prøver med såpass høyt antatt hulromsandel at de andre metodene ikke er egnet, f.eks. ved hulromsandel på over 10 % eller på prøver med gjennomgående porer, og kalles målingsmetoden. Metode C kalles hydrostatisk overflatetørr og brukes generelt på prøver med en hulromsandel på under 7 %. Metode D kalles veiing, og kan brukes dersom det ikke er synlige åpne hulrom på snittflaten eller dype groper på endeflatene.

Det er metode B og C som brukes mest i laboratorieundersøkelser i Statens Vegvesen, så videre vil kun disse to metodene bli beskrevet i detalj. Mer informasjon om metode A og D finnes i Håndbok R210. Dersom det er usikkerhet på hvilken metode som skal benyttes så skal begge to gjennomføres. Hvis resultatet fra metode B, måling, viser seg til å være 10 %

eller høyere hulromsandel, bruker man det resultatet i videre arbeid. Dersom man får under 10 % hulromsandel ved måling, skal man betrakte resultatet fra metode C, hydrostatisk overflatetørr, som prøvens hulrom.

Metode B måling: Prøvetykkelse skal være på minst to ganger øvre nominelle steinstørrelse, dog ikke mindre enn 20 mm. Høyden måles til 0,1 mm nøyaktighet på fire parvis motsatte punkter, 1 cm inn fra kanten på prøven. Diameteren skal måles to steder vinkelrett på hverandre på toppen og bunnen, i tillegg til midt på sylinderensiden. Høyde- og diameterverdier xmidles for videre bruk. Formelen som brukes for å finne densiteten til borkjerneprøven er da:

$$\rho_d = \frac{m_1}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 * \pi * h}$$

2.2.1

der ρ_d er densiteten, m_1 er massen til den tørre prøven med en nøyaktighet på 0,1 g, d er gjennomsnittet av diametermålingene med en nøyaktighet på 0,1 mm og h er gjennomsnittet av høydemålingene med en nøyaktighet på 0,1 mm.

Metode C hydrostatisk overflatetørr: Prøven senkes i vann med temperatur $25 \pm 1,0$ °C. Bobler på overflaten skal forsiktig fjernes med en pensel før prøven skal ligge i 3-5 minutter for at vekten skal stabilisere seg. Standarden NS-EN 12697-6 angir at den må ligge i minst 30 minutter, men ikke mer enn 3 timer.

Etter at prøven har ligget i vannbadet den angitte tiden skal vekten m_2 leses av. Deretter tas prøven opp og tørkes lett med en fuktig klut. Kluten skal kun fjerne vannet fra sidene av prøven, men ikke suge ut vann fra porene. Etter at overflatevannet har blitt fjernet veies prøven på nytt og man får m_3 . Dersom man ikke har foretatt en veiing av prøven på forhånd skal den lufttørkes i 40 °C til man får en konstant vekt, og m_1 veies.

Formelen som brukes for å finne densiteten til prøven er som følger:

$$\rho_d = \frac{m_1 * \rho_w}{m_3 - m_2}$$

2.2.2

Der ρ_d er densiteten, ρ_w er densitet til vann ved 25 °C (0,9971 Mg/m³), m_1 er masse av tørr prøve med en nøyaktighet på 0,1 g, m_2 er masse av prøve nedsenket i vann med en nøyaktighet på 0,1 g og m_3 er masse av prøve i fuktig tilstand med en nøyaktighet på 0,1 g.

Prosedyren for densitetsmålinger står beskrevet i Håndbok R210: Laboratorieundersøkelser, punkt 362.

Maksimal prøvedensitet: For å beregne hulromsinnholdet må man i tillegg til prøvens densitet ha maksimal prøvedensitet, også kalt teoretisk densitet. Denne verdien bestemmes ut fra densiteten til de ulike komponentene i asfaltmaterialet i tillegg til deres innbyrdes blandingsforhold. Denne metoden er teoretisk og avhenger sterkt av hvor mye bindemiddel som absorberes. Verdien for bindemiddelabsorpsjon må antas før videre utregninger, og derfor er det en iboende usikkerhet ved bruk av denne testmetoden.

Det er to ulike måter å gjennomføre metoden på, enten kan man benytte seg av en matematisk prosedyre for å beregne den teoretiske maksimaldensiteten eller så kan man benytte seg av stålpyknometer og vann. I den matematiske metoden så begynner man ved å beregne massesammensetningen ut fra formelen: (proporsjon av tilslag + proporsjon av bindemiddel = 100,0% masse). Densiteten til bindemiddelet skal stå spesifisert i leverandørens dokumenter, eller så kan verdien 1,010 Mg/m³ benyttes i videre utregninger. Densiteten til tilslaget bestemmes ut fra prosedyre 122 og 123 i Håndbok R210: Laboratorieundersøkelser. Den andre prosedyren man kan følge benytter stålpyknometer. Man skal starte med å veie inn det tomme pyknometeret (volum V_p) inkludert glasslokk og klamme, som vil gi massen m_1 . Ved å legge prøven inn i en ovn som holder (110 ± 5) °C i minimum 20 minutter vil prøven tørke til en konstant masse. Etter tørkingen er fullført smuldres prøven opp i grove partikler og mørtelklumper. Mørtelklumpene skal ha en maksstørrelse på 6 mm. Etter avkjøling overføres prøvematerialet til pyknometeret. Den totale massen av pyknometeret og prøvematerialene veies og man får massen m_2 . Det skal deretter fylles på destillert vann til ca. 3 cm under toppen av pyknometeret, slik at alt av asfaltmaterialer dekkes. Når dette har blitt rørt ut festes

en propp koblet til en vakuumpumpe på pyknometeret og et trykk på 4 kPa eller lavere settes på i 15 (± 1) minutter. Trykket skal senkes så mye at vannet kan koke ved romtemperatur. Etter tiden er omme skal det ikke lenger komme større luftbobler fra prøvematerialet. Da kan proppen tas av og pyknometeret kan overføres til et vannbad som holder 25 (± 0,5) °C. Vannet skal stå omtrent 20 mm fra kanten på pyknometeret, som skal fylles helt med destillert vann og stå der i mellom 30-180 minutter. Etter dette skal pyknometeret overføres til arbeidsbenken, destillert vann skal fylles på slik at det renner over kanten og glasslokket skal festes uten at det er noe luft i pyknometeret. Etter dette skal pyknometeret veies og massen m_3 noteres.

Alle massene skal uttrykkes i gram til nærmeste 0,1 g. Volumet til pyknometeret skal bestemmes til nærmeste $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Densiteten til den bituminøse massen beregnes til nærmeste $0,001 \text{ Mg/m}^3$ og densiteten til destillert vann ved 25 °C settes lik $0,9971 \text{ Mg/m}^3$. Maksimumsdensiteten til prøvematerialet beregnet ut fra pyknometertest uttrykkes ved følgende formel:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 * V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w}\right)}$$

2.2.3

Der ρ_{mv} er maksimumdensiteten av det bituminøse materialet, uttrykt ved Mg/m^3 , m_1 er massen til pyknometeret i gram medregnet lokk og klamme, m_2 er massen til pyknometeret i gram medregnet lokk, klamme og prøvemateriale, m_3 er massen til pyknometeret i gram medregnet lokk, klamme, prøvemateriale og vann; V_p er volumet til pyknometeret når det fylles til referansepunktet og ρ_w er vannets densitet til nærmeste $0,0001 \text{ Mg/m}^3$. Denne prosedyren står nærmere beskrevet i Håndbok R210: Laboratorieundersøkelser, punkt 363.

Hulromsinnhold: For å beregne luftfylt hulrom i en asfaltprøve så benyttes formelen nedenfor:

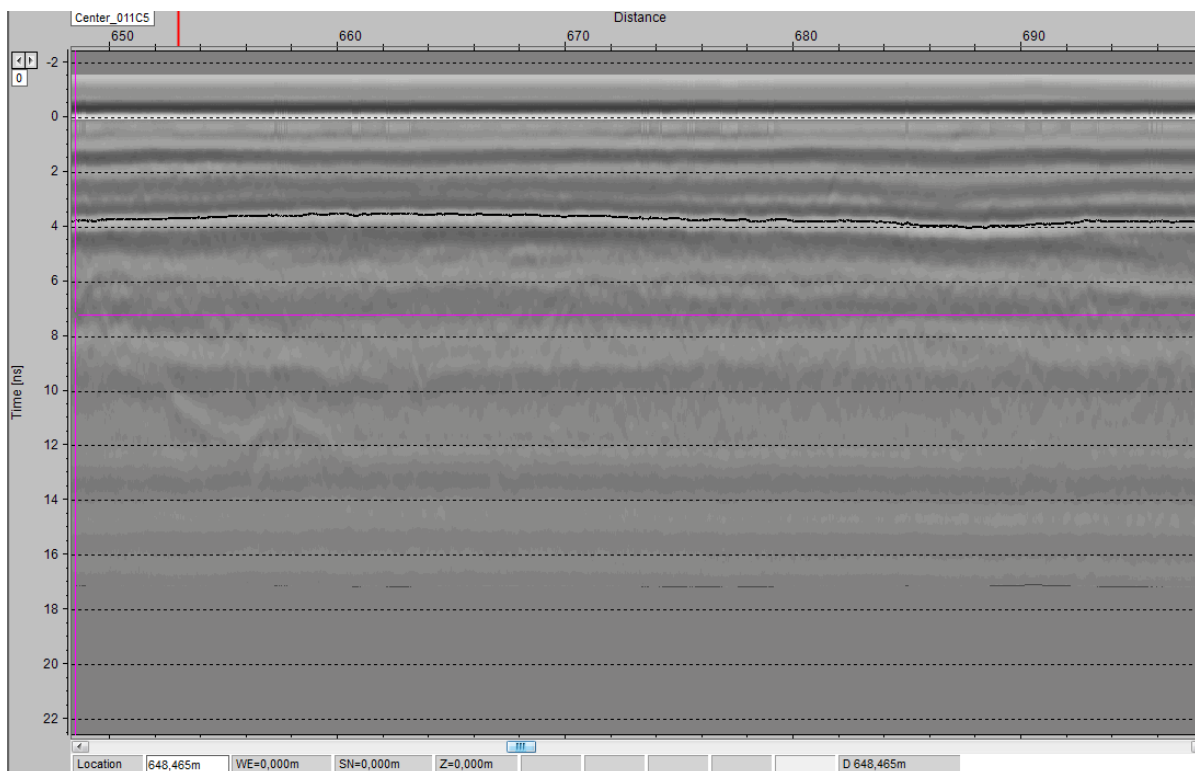
$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_b}{\rho_{mv}} * 100\%$$

2.2.4

der V_m er innholdet av luftfylt hulrom i prøvelegemet i %, ρ_m er maksimumsdensitet for prøvelegemet i kg/m^3 og ρ_b er prøvens densitet i kg/m^3 . Denne prosedyren står nærmere beskrevet i Håndbok R210: Laboratorieundersøkelser, punkt 364.

2.3 Georadar

I dette kapitlet forklares de grunnleggende prinsippene om hvordan en georadar fungerer og hvordan man kan tolke rådata fra georadar for å bestemme lagtykkelser og hulromsandeler i veidekker. En georadar er et verktøy som brukes for å avbilde undergrunnen ved hjelp av elektromagnetiske signaler. Bruksområdene er blant annet arkeologiske undersøkelser, minerydding, vei- og baneundersøkelser, geofysiske undersøkelser og rettsmedisinske undersøkelser (Daniels 2004). Et bilde av en typisk georadarskanning vises i figur 2.3.1, der x-aksen er lengderetning i m på veistrekningen som undersøkes, og y-aksen viser dybden til signalet i ns.



Figur 2.3.1: Bilde av en georadarskanning (Foto: Geir Wivelstad)

2.3.1 Historien til georadar

Utviklingen av georadar begynte på starten av 1900-tallet, og den første dokumenterte bruken av georadar ble beskrevet i en tysk patent av Leimbach og Löwy (Leimbach & Löwy 1910a). De prøvde å undersøke hvordan amplituden til et radiosignal påvirkes av materialet den elektromagnetiske bølgen passerer gjennom. De første årene av utviklingen ble det forsket på georadar som sendte ut kontinuerlige signaler, og det var først i 1926 at det første georadarapparatet som benyttet pulserende elektromagnetiske bølger kom på banen, utviklet av Hülsenbeck (Lampe 2003).

Fra 1970-tallet og utover har det vært en voldsom utvikling på denne fronten etter at FHWA i USA testet brukbarheten til georadar i tunnel- og broanalyser (Morey 1998). Mot slutten av dette tiåret hadde man undersøkt nyttigheten av georadaranalyser til å bestemme fuktighetsnivået i materialer (Rexford & Kovacs 1977) og bestemme hulromsandeler i veikonstruksjoner (Saarenketo 2006). På 1980- og 1990-tallet ble georadar brukt til tilstandsanalyse av veier, hovedsakelig for å bestemme lagtykkelser. Det ble også innført som en supplerende metode i tillegg til de konvensjonelle metodene i flere land, blant annet i USA, Finland og Storbritannia (Saarenketo 2006).

2.3.2 Prinsippene til georadar

Radar står for RAdio Detecting And Ranging og det er et system som bruker radiobølger for å bestemme hastigheten, vinkelen og avstanden til objekter. Det fungerer ved at noen av radiobølgene som blir sendt fra radaren blir reflektert på overflaten til objektet som undersøkes, og sendt tilbake til utgangspunktet. I nærheten av antennen som sender ut radarbølgene er det en mottaker-antenne som fanger opp de reflekterte bølgene, og det registreres i systemet. Frekvensen man bruker til radar er på mellom 1-40 GHz, og ved å undersøke om det er noe forskyvning i frekvensen som returneres til mottakerantennen så kan man se om objektet drar vekk fra radaren eller kommer mot den, ved hjelp av Doppler effekten. Dersom sende- og mottakerantennen er i nærheten av hverandre, vil mottakerantennen måle effekten i det returnerte signalet ved hjelp av formel 2.3.1.

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}$$

2.3.1

Der P_t er effekten til radarbølgene sendt fra senderantennen, G_t er effektiviteten til senderantennen, altså hvor mye energi sendt inn til antennen fra systemet som benyttes i radarbølgene som blir sendt, A_r beskriver hvor effektiv mottakerantennen er til å fange opp de reflekterte signalene, σ er radartverrsnittet til objektet, F er radarforplantingsfaktoren og R er avstanden mellom radaren og objektet som måles.

Der radaren måler effekten i det reflekterte signalet, så måler georadaren spenningen, som brukes til å plote ut amplitudetoppene til signalet.

En georadar benytter to antenner for å sende ut og motta elektromagnetiske signaler med en båndbredde i radio-spektrumet. De elektromagnetiske signalene blir sendt fra senderantennen ned i materialet som skal undersøkes, og ved forandringer i materialets elektriske egenskaper vil noen av signalene reflekteres og registreres av mottakerantennen. Den egenskapen som hovedsakelig påvirker hvordan radiosignalene sprer seg i materialet, er den dielektriske verdien, også kalt relativ permittivitet. Sonen mellom to materialer med ulik dielektrisk verdi, for eksempel to ulike lag i veikonstruksjonen, kalles grensesnittet. Det er i grensesnittet at noen av de elektromagnetiske signalene vil reflekteres.

Den relative permittiviteten til et materiale er en ratio av dets absolutte permittivitet mot permittiviteten til et vakuum. Permittivitet er en fysisk egenskap som påvirker Coulomb-kreftene mellom to punktladninger i materialet og formelen for relativ permittivitet følger i formel 2.3.2 (Hoekstra & Delaney 1974).

$$K^*(\omega) = K'(\omega) - iK''(\omega)$$

2.3.2

Der K' er den reelle delen av den dielektriske verdien, K'' angir den komplekse delen og K^* er den dielektriske verdien. ω står for vinkelfrekvensen. Den komplekse delen av formelen viser til det dielektriske energitapet i materialet.

Formelen for å beregne energitapet i dB til et georadarsystem er som i formel 2.3.3 (Daniels 2004).

$$L_t = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc}$$

2.3.3

L_t er det totale energitapet i dB som oppstår. L_e er antennetapet, det vil si effektiviteten til senderantennen (hvor mye energi av den tilførte energien kan den sende ut i form av elektromagnetiske bølger). L_m er mismatch-tapet, dvs. hvor mye energi går tapt grunnet dårlig match mellom senderantennen og mottakerantennen. L_{t1} er tapet som kan oppstå mellom senderantennen og overflaten til materialet som skal undersøkes, og L_{t2} er tapet som kan oppstå motsatt vei, altså fra den reflekterte bølgen fra overflaten tilbake til mottakerantennen. L_s er spredningstapet som oppstår dersom man anser senderantennen som en punktsender og beskriver det energitapet som oppstår fordi ikke alle de elektromagnetiske bølgene sendes til helt korrekt punkt. L_a er dempningstapet som oppstår i materialet, som er avhengig av den elektriske ledeevnen. Dersom den elektriske ledeevnen til materialet er høyt vil energitapet på denne formen være høyt, og motsatt. Til slutt står L_{sc} for spredningstapet til objektet man ønsker å undersøke. Med andre ord, dersom tverrsnittet til objektet man prøver å avbilde er lite, vil dette tapet øke grunnet geometrien i situasjonen, og det signalet som

returnerer vil være av lavere energi. Alle disse ulike tapene legges sammen som L_t og man får en oversikt over energitapet (Daniels 2004).

Forholdet mellom den elektriske konduktiviteten σ og K'' er gitt i formel 2.3.4 (Saarenketo 2006).

$$K''(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0(\omega)}$$

2.3.4

Der ε_0 er den dielektriske permittiviteten i vakuum, nærmere bestemt $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Tangenten for tapet som oppstår, $\tan \delta$, er gitt ved formel 2.3.5 (Hoekstra & Delaney 1974).

$$\tan \delta = \frac{K''(\omega)}{K'(\omega)}$$

2.3.5

Det er hovedsakelig tre ting som bestemmer den dielektriske verdien: den elektriske permittiviteten, den elektriske ledeevnen og den magnetiske permeabiliteten. Den elektriske permittiviteten, ε , angir motstanden som oppstår i et materiale når et elektrisk felt ledes i det og enheten er Farad per meter. Den elektriske ledeevnen, σ , angir flyten av elektrisk ladning idet en elektromagnetisk bølge passerer og angis i Siemens per meter. Det er denne verdien som er mest toneangivende for hvor langt signalet vil nå inn i materialet og for hvor stort energitap de elektromagnetiske bølgene har. Andelen vann i et materiale har mye å si for den elektriske ledeevnen, grunnet dipolmomentet som oppstår idet den elektromagnetiske bølgen passerer den vannrike delen. Vannrike områder fører til at det er høyere demping for den elektromagnetiske bølgen, mot at den dielektriske verdien til det området er høyere, og det er lettere å "se" det vannrike området i den påfølgende tolkningen (Saarenketo 1998). Den magnetiske permeabiliteten, μ , er relevant for de materialene som er magnetiske og den angir et materiales evne til å danne et magnetfelt inne i selve materialet, og beskriver sammenhengen mellom dens magnetiske feltstyrke og dens magnetiske flukstetthet.

Dersom man ser bort ifra den magnetiske permeabiliteten, (setter den som 1,0), kan man benytte følgende formel for å bestemme hastigheten det elektromagnetiske signalet beveger seg med i materialet, i formel 2.3.6 (Saarenketo 2006).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

2.3.6

Der c er lyshastigheten i vakuum (0,3m/ns) og ϵ_r er den relative dielektriske verdien eller relative permittiviteten K^* . v har enheten m/ns.

I forkant av undersøkelsen skal man skanne en kopperplate for å få A_{inc} , amplituden til det elektromagnetiske refleksjonssignalet fra kopperplaten, da en kopperplate er en perfekt elektromagnetisk reflektor og refleksjonskoeffisienten vil være -1. For å beregne første lags dielektriske verdi benyttes amplituden til kopperplate-skanningen, A_{inc} , og amplituden til radarsignalet fra overflaten til det første laget, A_0 i formel 2.3.7 (Al-Qadi & Lahouar 2005).

$$\epsilon_{r,1} = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_{inc}}}{1 - \frac{A_0}{A_{inc}}} \right)^2$$

2.3.7

Dersom man antar at refleksjonen av elektromagnetiske signaler i grensesnittene er relativt lavt (som det som regel er i bituminøse veikonstruksjoner) så kan man benytte formelen nedenfor for å beregne refleksjonsamplituden i grensesnitt n i formel 2.3.8 (Al-Qadi & Lahouar 2005).

$$\frac{A_n}{A_{inc}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,n}^-} \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,n}^+} \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}} \left[\prod_{i=0}^{n-1} (1 - \gamma_i^2) \right] e^{-\eta_0 \sum_{i=0}^n \frac{\sigma_i d_i}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

2.3.8

Der N er antall lag som finnes i veioverbygningen, A_n er refleksjonsamplituden ved grensesnitt n , $\varepsilon_{r,n}$ er den dielektriske verdien for lag n , σ_n er den elektriske ledeevnen for lag n , γ_i er refleksjonskoeffisienten ved det grensesnitt i (gitt i formel 2.3.* nedenfor), η_0 er bølgeimpedansen i vakuum, d_i er tykkelsen til lag i , gitt i følgende formel 2.3.9, og A_{inc} er amplituden til en radarskanning på en kopperplate.

$$d_i = \frac{ct_i}{\sqrt{\varepsilon_{r,i}}}$$

2.3.9

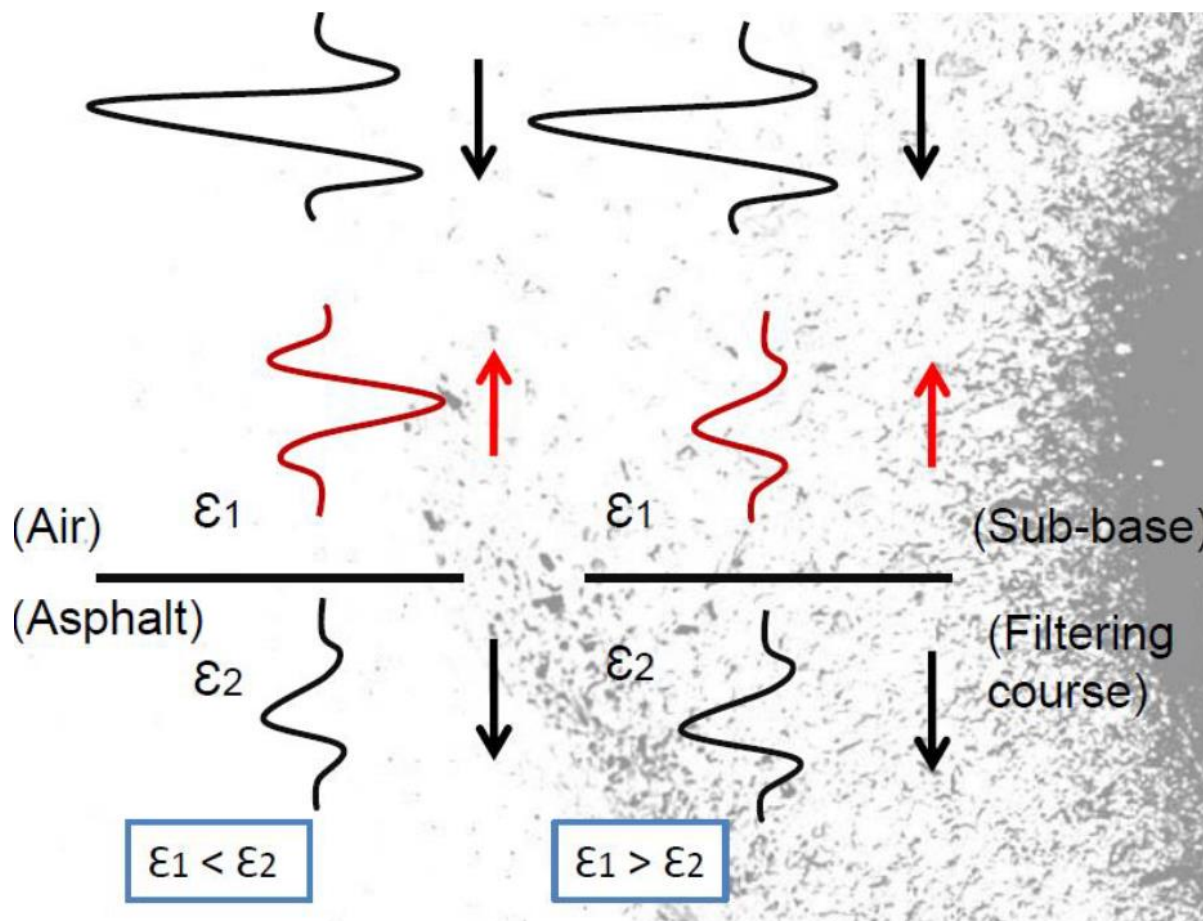
c er lyshastigheten i vakuum, t_i er to-veis reisetid for det elektromagnetiske signalet i lag i og $\varepsilon_{r,i}$ er den dielektriske verdien til materialet i lag i .

Refleksjonskoeffisienten γ_i til lag i beregnes ut fra formel 2.3.10 (Al-Qadi & Lahouar 2005):

$$\gamma_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r,i}} - \sqrt{\varepsilon_{r,i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r,i}} + \sqrt{\varepsilon_{r,i+1}}}$$

2.3.10

Refleksjonskoeffisienten angir hvor mye radarenergi som reflekteres i grensesnittet. Dersom det er stor forskjell i den dielektriske verdien til de to lagene, vil energien som reflekteres være høyere, og flere elektromagnetiske signaler finner veien opp til mottakerantennen. For at det skal være mest mulig tydelig hvor lagskillene går, er georadar avhengig av at det er en vesentlig kontrast mellom den dielektriske verdien til de to ulike lagene. Dersom den dielektriske verdien til lag $i+1$ er høyere enn den dielektriske verdien til lag i , vil det bety at verdien for γ_i vil være negativ, og polariteten til det reflekterte signalet vil reverseres. Dersom den dielektriske verdien til lag $i+1$ er lavere enn den dielektriske verdien til lag i , vil polariteten til det reflekterte signalet være den samme. Dette er illustrert i figur 2.3.2.



Figur 2.3.2: Refleksjon med reversering av polaritet (Kopi: (Saarenketo 2011a))

Arealet til området som reflekteres beskrives ved hjelp av formler 2.3.11 og 2.3.12 (Saarenketo 2011a).

$$B = A/2$$

2.3.11

$$A = \sqrt{\frac{\lambda L}{2}}$$

2.3.12

der λ er bølgelengden til det elektromagnetiske signalet i materialet og L er dybden til grensesnittet der refleksjonen skjer.

For å beregne den dielektriske verdien til lag 2 så settes $n = 1$ inn i formel 2.3.8, og verdien for $\varepsilon_{r,1}$ fra formel 2.3.7 brukes i formel 2.3.13 (Al-Qadi & Lahouar 2005).

$$\varepsilon_{r,2} = \varepsilon_{r,1} \left(\frac{\left(1 - [A_0/A_{inc}]^2\right) e^{-\eta_0 \frac{\sigma_1 t_1 c}{2\varepsilon_{r,1}}} - [A_1/A_{inc}]}{\left(1 - [A_0/A_{inc}]^2\right) e^{-\eta_0 \frac{\sigma_1 t_1 c}{2\varepsilon_{r,1}}} + [A_1/A_{inc}]} \right)^2$$

2.3.13

Der A_1 er amplituden til signalet som reflekteres i grensesnittet mellom lag 1 og lag 2, σ_1 er den elektriske ledeevnen til materialene i lag 1, t_1 er den to-veis reisetid til det elektromagnetiske signalet gjennom lag 1 og c er lyshastigheten i vakuum.

Dersom man ønsker å beregne den dielektriske verdien til lag 3, $\varepsilon_{r,3}$, så setter man inn $n = 2$ i formel 2.3.8, og får formelen 2.3.14 (Al-Qadi & Lahouar 2005).

$$\varepsilon_{r,3} = \varepsilon_{r,2} \left(\frac{\left(1 - [A_0/A_{inc}]^2\right) e^{-\frac{\eta_0 c}{2} \left(\frac{\sigma_1 t_1}{\varepsilon_{r,1}} + \frac{\sigma_2 t_2}{\varepsilon_{r,2}}\right)} - \gamma_1 \frac{A_1}{A_{inc}} - \frac{A_2}{A_{inc}}}{\left(1 - [A_0/A_{inc}]^2\right) e^{-\frac{\eta_0 c}{2} \left(\frac{\sigma_1 t_1}{\varepsilon_{r,1}} + \frac{\sigma_2 t_2}{\varepsilon_{r,2}}\right)} - \gamma_1 \frac{A_1}{A_{inc}} + \frac{A_2}{A_{inc}}} \right)^2$$

2.3.14

Så lenge lagene er homogene og uniforme når det gjelder dielektrisk verdi, det vil si at den dielektriske verdien ikke endrer seg i dybderetning av laget, vil man kunne bruke formel 2.3.14 ovenfor for å beregne de neste lagene gjennom iterasjon.

Materiale	Dielektrisk verdi
Luft	1
Ferskvann	81
Is	4
Sand	4-6
Grus	4-7
Asfalt/bituminøse masser	4-8
Betong	8-10
Berggrunn (granitt)	5-7
Torv (naturlig)	60
Torv (under vei)	40
Silt	16-30
Morenematerialer	8-18
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 midlet (våt)	7-8
Grus i veikonstruksjoner midlet	7-9
Frosne veikonstruksjoner (normale)	5
Frosne veikonstruksjoner (våte/gamle)	6

Tabell 2.3.1: Eksempler på dielektriske verdier for ulike materialer

I denne tabellen kan man se at det er luft og ferskvann som er ytterpunktene på skalaen over dielektriske verdier, der luft har verdien 1 og ferskvann har verdien 81. Dersom materialer blir utsatt for et elektromagnetisk felt, ved å sende et elektromagnetisk signal gjennom det, vil det oppstå polarisering av materialet. Polarisering betyr at de negative partiklene, elektroner, vil gå til en side mens de positive, atomkjernene, vil trekke seg til motsatt side. Etter at det elektromagnetiske feltet har forsvunnet vil partiklene finne veien tilbake til hverandre.

Mengden og typen polarisering kan da vise hvor godt materialet er til å beholde på energien som føres inn i det via den elektromagnetiske bølgen. Vann har en såpass høy dielektrisk verdi fordi det består av H_2O -molekyler, og når dette molekylet påvirkes av et elektrisk felt vil dipolmomentet få det til å snu seg og orientere seg riktig i forhold til det elektriske feltet. Noen andre polariseringsmomenter som påvirker georadarmålingene er ionebindinger og kovalente bindinger. Det er likevel dipolmomentet som er klart viktigst i polariseringen av materialer, så dersom det er en høy andel H_2O -molekyler, vil polariseringen være sterk. Derfor er ferskvann på toppen av listen over dielektriske verdier. Is har en svært lav dielektrisk verdi på ca. 4. Grunnen til dette er at is er veldig strukturert, og selv om det blir skapt et elektromagnetisk felt i materialet, har de solide vannmolekylene vanskeligheter for å snu seg og polariseringen er svært lav. Det er altså ikke noe særlig dipolmoment eller andre momenter som oppstår i isen.

Det er to typer antenner man kan bruke i georadarundersøkelser, enten luft-koplet eller bakke-koplet. Luft-koplet er antenner som har en høyde på 30-50 cm over overflaten til materialet man skal undersøke, mens bakke-koplet ligger på overflaten eller henger så vidt over overflaten (Saarenketo & Scullion 1999)

Luft-koplede antenner bruker en frekvens på mellom 500 MHz-2500 MHz (2,5 GHz), men i de fleste undersøkelser pleier man å bruke en frekvens på 1,0 GHz. Der man bruker et luft-koplet antennesystem med en viss avstand til overflaten, kan man bruke de i en ganske høy hastighet uten at kvaliteten til georadarundersøkelsen blir noe dårligere. Hastigheten til kjøretøyet som utfører undersøkelsen styres hovedsakelig av hvor mange skanninger antennen kan utføre per sekund, og da luft-koplede antenner kan gjennomføre 100 skanninger i sekundet er maksimal teoretisk kjørehastighet 100 km/t (Saarenketo & Scullion 1999). Som regel er anbefalt kjørehastighet med en luft-koplet antenne 60 – 70 km/t.

Et problem med bakke-koplede antenner, det oppstår ofte "antenna-ringing" (de Jongh et al. 1999). Denne problematikken kan delvis løses ved hjelp av bearbeidelse av rådataen i et tolkningsprogram, men det kan likevel føre til at bildet av undergrunnen blir mer uklart. Hastigheten til undersøkelsen ved bruk av bakke-koplede antennesystemer er vesentlig lavere

da overflaten kan være veldig ujevn og man må passe å ikke å ødelegge utstyret. Hastigheten til slike skanninger kan være ned mot 10-15 km/t. Bakke-koplede antenner bruker en frekvens på det elektromagnetiske signalet på mellom 80-1500 MHz.

Dybden man kan få bilde av i georadarundersøkelser er styrt av frekvensen på antennen man bruker i tillegg til materialet man undersøker. Jo lenger ned i materialet bølgene trenger, jo lavere energi vil de ha, og det er lavere sannsynlighet for at de reflekterte signalene har nok energi til å bli fanget opp av mottakerantennen. Dersom det er et høyt vanninnhold i materialet man undersøker, vil dette materialet ha høyere ledeevne, noe som fører til at energitapet til det elektromagnetiske signalet øker og signalet vil bli svakere. Ved å øke frekvensen vil det være mer energi i det elektromagnetiske signalet man sender ned i materialet, men energitapet øker ved høyere frekvenser. Signalet vil derfor ikke nå så dypt før energien er for lavt til at refleksjonene skal nå tilbake til mottakerantennen. Derfor er bruk av georadar ofte en balansesak mellom å få dybde og god oppløsning på bildet man får.

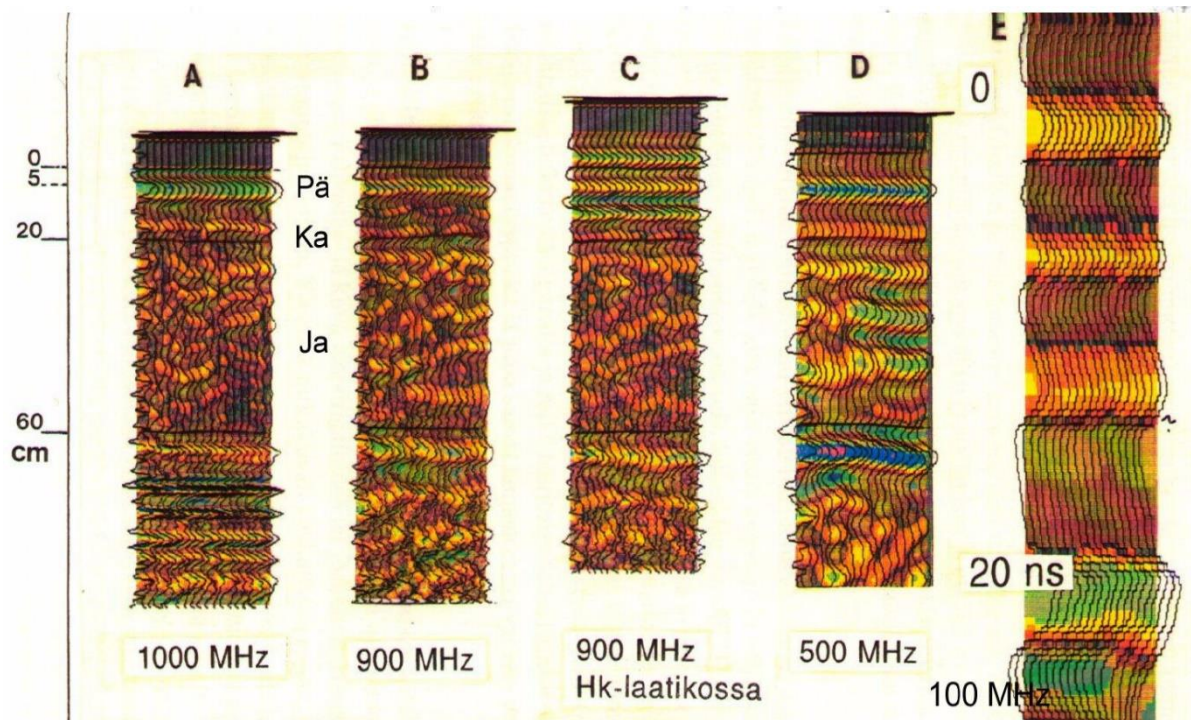
For at man skal kunne skjelne enkeltelementer i materialet man undersøker, må målene på disse objektene være så store at de er større enn minsteoppløsningen til det elektromagnetiske signalet. Hvis ikke vil ikke signalet kunne skjelne elementene fra hverandre. Vertikal oppløsning er oppløsningen nedover i materialet, og ettersom enheten nedover er tid (ns), så følger det at formelen er avhengig av tidsaspektet ved signalet. Den vertikale oppløsningen V_r er gitt i formel 2.3.15 (Saarenketo 2011a):

$$V_r = \frac{\tau_{puls} * c}{2 * \sqrt{\epsilon_r}}$$

2.3.15

Der τ_{puls} er pulslengden til signalet i ns, c er lyshastigheten i vakuum og ϵ_r er den dielektriske verdien til materialet. For å finne pulslengden til signalet må man ta den inverse av frekvensen man benytter, altså er $\tau_{puls} = 1/f$, der f er frekvensen. Denne formelen for vertikal oppløsning kan generelt brukes, spesielt mot toppen av materialet man undersøker, men feilmarginen øker dess lenger ned i materialet man kommer. Grunnen til dette er at da vil energitapet til signalet øke. I tillegg kan enkelte objekter som gir høy refleksjon blokkere

objekter i nærheten som har lavere refleksjonsverdi, og man får kun sett objektene med lav refleksjonsverdi dersom de er store. En illustrasjon som viser hvordan oppløsningen til materialet påvirkes av frekvensen på det elektromagnetiske signalet, vises nedenfor i figur 2.3.3.



Figur 2.3.3: Illustrasjon av hvordan frekvensen til signalet påvirker vertikal oppløsning (Saarenketo 2011a)

Formelen for horisontal oppløsning, formel 2.3.16, altså hvor nære to punktrefektorer kan være og det er mulig å skille dem. Det gir også et tall på hvor bratt stigningskurve det kan være på lag i veikonstruksjonen og det fortsatt er mulig å skille lagene fra hverandre. Formelen er funnet empirisk og er forenklet, slik at det kun fungerer i optimale omgivelser (Saarenketo 2011a).

$$\Delta x = \frac{75}{f * \sqrt{\epsilon_r}}$$

2.3.16

2.3.3 Hulromsundersøkelser i georadar

Ved hjelp av tidligere gjennomførte borkjerneprøver og metodene som er beskrevet i delkapittel 2.2, kan man beregne hulromsandelen til et materiale i georadarundersøkelser ved hjelp av formel 2.3.17 (Saarenketo & Roimela 1998):

$$y = 272,93e^{-1,301*k*\epsilon_r}$$

2.3.17

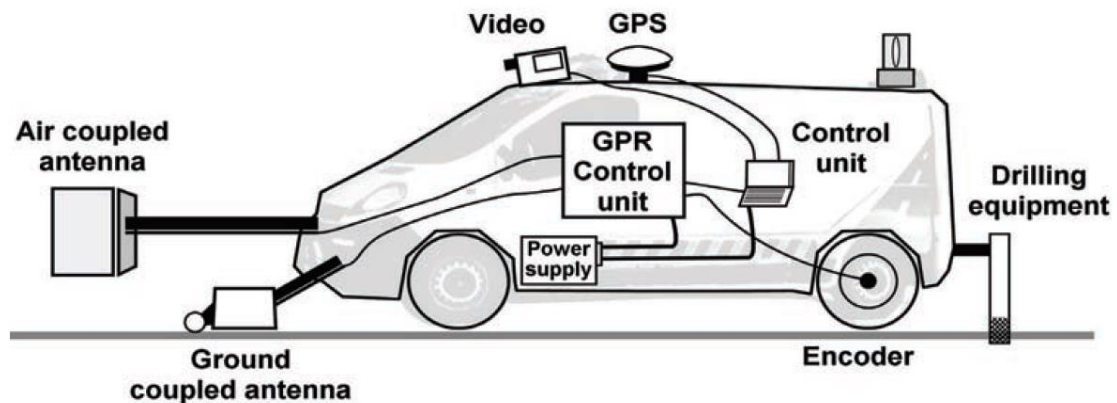
Der y er hulromsandelen, k er kalibreringsfaktoren og ϵ_r er den dielektriske verdien til det øverste laget gitt fra metallplatetesten. Vet å ha utført en borkjerneprøve med hulromsundersøkelser har man allerede faktoren y , og etter metallplatetesten har man ϵ_r . Den eneste ukjente er da kalibreringsfaktoren k . Hvis man finner kalibreringsfaktoren k på den veistrekningen man undersøker, kan man videre benytte seg av den dielektriske verdien som georadaren registrerer under målingen, og hulromsandelen kan automatisk bli beregnet i programmet man bruker for å tolke dataen. Dette kan også brukes på lag lenger ned i veikonstruksjonen så lenge man har utført borkjerneprøver for å bestemme hulromsandelen på et punkt, og man har funnet den dielektriske verdien til laget ut fra formlene i delkapittel 2.3.2.

2.3.4 Lagtykkelsesundersøkelser i georadar

Bruk av georadar for å bestemme lagtykkelsene kommer av grensesnittene som oppstår mellom materialene med ulik dielektrisk verdi. Dybden til lagskillet, eller grensesnittet, er gitt i formel 2.3.9 i delkapittel 2.3.2. Dersom det er høy kontrast mellom de ulike lagene, vil amplituden til det elektromagnetiske signalet i refleksjonen fra det grensesnittet være høyt, og det er tydelig å se lagskillet i tolkningsvinduet i analyseprogrammet. Dersom det er mindre forskjell mellom de dielektriske verdiene vil det være vanskeligere å tyde lagskillene i programmet. Man kan benytte seg av ulike funksjoner i programmet for å fjerne uønsket støy fra signalet, for å få bedret tolkningen og gjøre tolkningsjobben lettere.

2.3.5 Fremgangsmåten i georadarmålinger

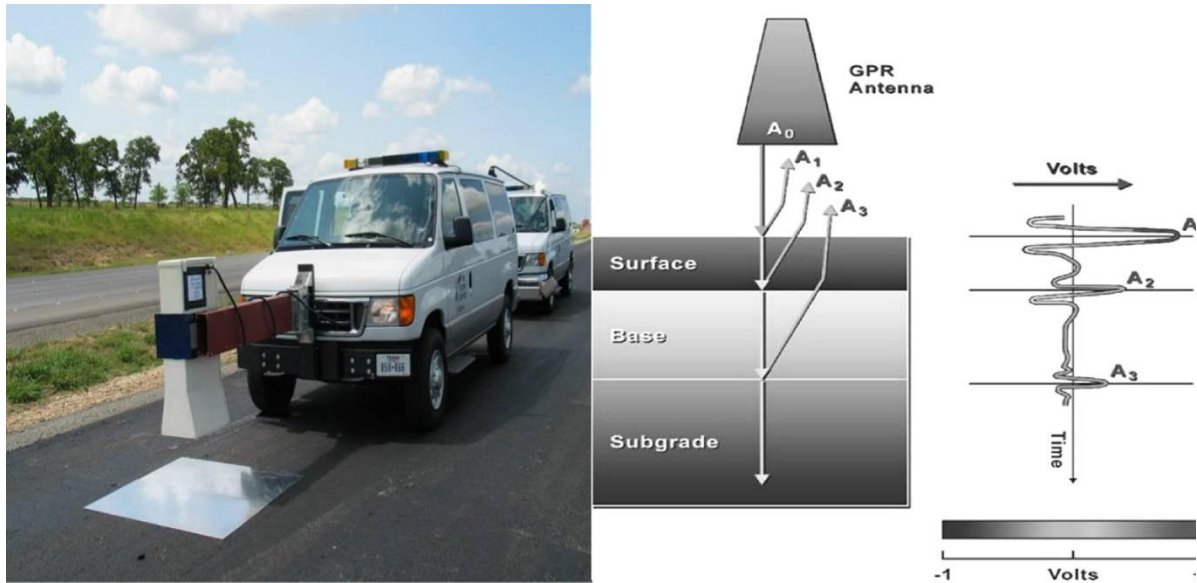
Oppsettet til en georadar består vanligvis av en senderantenne, en mottakerantenne, et lagringsystem og en datamaskin til å bearbeide dataen. Dette systemet kan benyttes på en tralle eller på et kjøretøy. Figur 2.3.4 nedenfor viser hvordan oppsettet kan være. Man kan utvide systemet for å ha mulighet til å ta med video for å filme veistrekningen man undersøker, borutstyr for å ta borprøver fra utvalgte punkter til videre undersøkelse i laboratoriet, en GPS for å kunne samkjøre dataen fra en georadarundersøkelse på en veistrekning med annen kartdata og laser for å skanne overflaten og kartlegge spordybde og ujevnheter i veidekket.



Figur 2.3.4: Oversikt over et integrert GPR system i et kjøretøy (Saarenketo 2006)

Man begynner undersøkelsen ved å skanne en metallplate for å finne refleksjonsamplituden til metallplaten, A_{inc} , slik at man kan beregne den dielektriske verdien til det øverste asfaltlaget. Det er kun mulig å benytte seg av metallplate-testen når man bruker luft-koplet antenner. Dersom man kun har georadarutstyr som er bakke-koplet kan man ikke beregne hulromsandel i undersøkelsen, kun lagtykkelser.

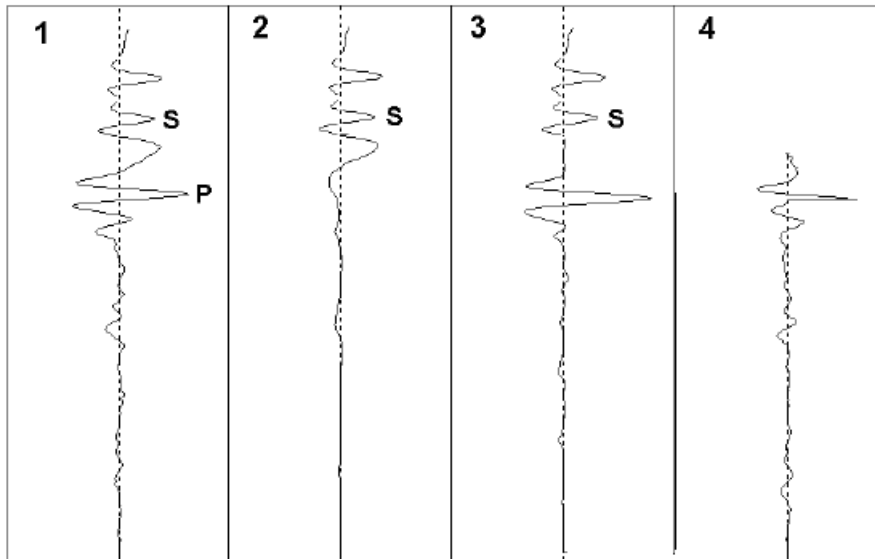
Deretter kjører man strekningen som skal undersøkes og rådataen med amplituder og andre faktorer som blir registrert av mottakerantennen vil bli lagret i lagringsenheten i kjøretøyet.



Figur 2.3.5: Bilde og illustrasjon av et luft-koplet GPR signal (Chen et al. 2014)

På figur 2.3.5 ovenfor kan man se et bilde av en georadarundersøkelse der kjøretøyet foretar skanning av en metallplate i forkant. På midtre illustrasjon kan man se hvordan de elektromagnetiske bølgene går ned i mediet før noen av dem reflekteres der det er grensesnitt mellom lag med ulik dielektrisk verdi. Til høyre er et bilde av hvordan et enkelt elektromagnetisk signal vises i tolkningsprogrammet, der amplituden til signalet er høyt ved grensesnittene og lavere mellom grensesnittene.. Amplitudeenheten i georadarmålinger er volt.

Etter gjennomført georadarundersøkelser burde man benytte innebygde funksjoner i tolkningsprogramvaren for å optimalisere bildet man får, og å gjøre tolkningsarbeidet lettere. De ulike signalene man får fra luft-koblede antennesystemer er vist nedenfor i figur 2.3.6.

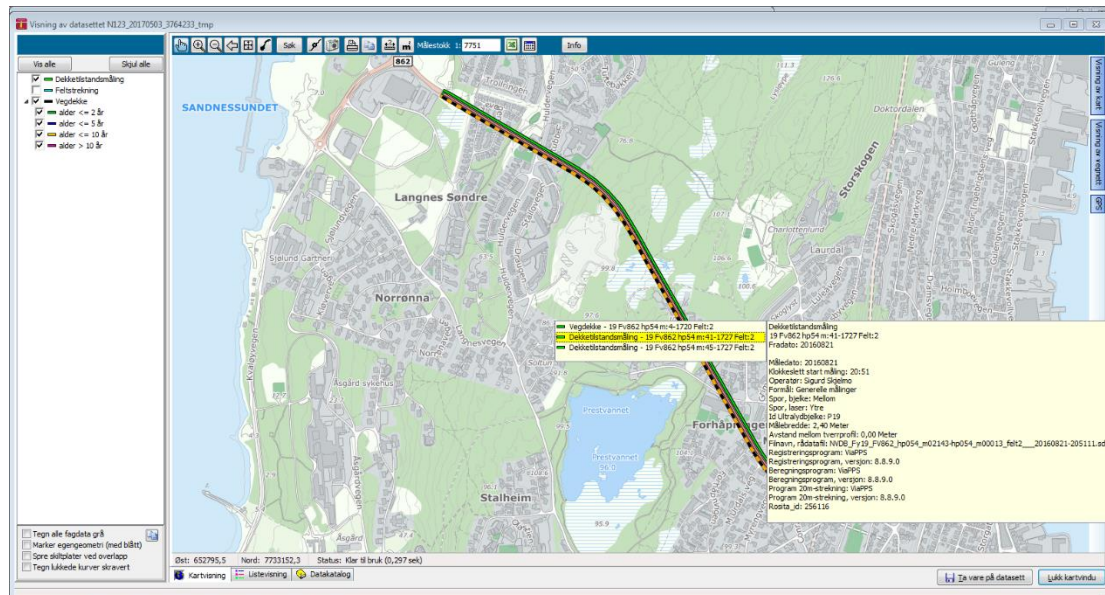


Figur 2.3.6: De fire signalene man får fra luft-koblede GPR-undersøkelser (Saarenketo 2011b)

S-amplituden i den første pulsen viser den direkte pulsen som brukes som referansenivå. P-amplituden er refleksjonsamplituden til asfaltoverflaten. Puls 2 er en luft-puls, som viser forstyrrelsene på amplitudene til refleksjonssignalene fra antennesystemet i seg selv. Puls 3 er metallplate-pulsen der bakgrunnsstøyen, altså puls 2, har blitt fjernet. Puls 4 helt til høyre er det endelige signalet, og oppnås ved å trekke puls 1 og deler fra puls 2, fra puls 3. Det er det fjerde signalet man bruker videre i tolkningsarbeidet i programmet dersom man har fjernet all bakgrunnsstøyen på en riktig måte.

2.4 Begrepsavklaring

Nasjonale vegdatabank (NVDB) er en database med informasjon om ulike typer veier i Norge, blant annet sykkelveier, private veier, kommunale og statlige veier. Man kan få ut diverse informasjon om blant annet veidekker, belysning, trafikkdata, skilt og oppmerking m.m.



Figur 2.4.1: Bilde av hovedvinduet i NVDB med veiinfo (Foto: Geir Wivelstad)

PMS 2010 (Pavement Management System) er et system for planlegging av veidekkevedlikehold, der man kan finne historiske data om dekket, tykkelse på dekket, dekkebredde m.m.

The screenshot shows the PMS v3.0 interface with a table of road segments. The table has the following columns:

Reg	Fy	Kom	Kat	St	Nr	Frahj	Fram	TilHj	TilM	Kj	Lengde	Pt	Inneholder	Målestid	Spor50	Krit.År/Spor	Spor50	Std Sp	Std Sp%	Sp40+	Spor90 (2018)	IRI90	Krit.År/IRI	IRI50	Std In	Std In%	IRI+3	IRI 90 (2018)	MPD50
5	19	2	F	V	862	54	1 902	54	2 146	2	244		FK Sjøane G - Østervbukt...	2016	7,8	2021	6,9	20	39	0	12,8	2,6	2023	1,9	4,0	65	0	3,1	1,7
5	19	2	F	V	862	54	1 908	54	2 110	4	202		Bjorne G RK - Østervbukt...	0	0,0	0	0,0	20	0	0	0,0	0,0	0	0,0	4,0	0	0	0,0	0,0
5	19	2	F	V	862	54	1 727	54	1 876	149			Langnetunnelen - BjorneG...	2016	3,6	0	3,3	20	18	0	0,0	5,3	0	2,9	4,0	133	8	0,0	0,9
5	19	2	F	V	862	54	1 902	54	2 146	1	244		FK Sjøane G - Østervbukt...	2016	4,5	2021	3,9	20	23	0	11,9	3,6	2018	2,5	4,0	90	0	4,2	1,1
5	19	2	F	V	862	54	1 902	54	2 146	3	244		FK Sjøane G - Østervbukt...	2012	16,0	0	13,2	20	80	0	0,0	4,2	0	2,3	4,0	105	0	0,0	0,8
5	19	2	F	V	862	54	1 727	54	1 723				Langnetunnelen	2016	23,5	0	20,7	20	118	0	0,0	2,4	0	1,6	4,0	60	0	0,0	1,2
5	19	2	F	V	862	54	1 902	54	2 146	4	244		FK Sjøane G - Østervbukt...	2016	2,8	2019	2,4	20	14	0	21,5	3,5	0	1,5	4,0	88	0	0,0	0,9

Figur 2.4.2: Bilde av PMS 2010 med informasjon om vegstrekinger (Foto: Geir Wivelstad)

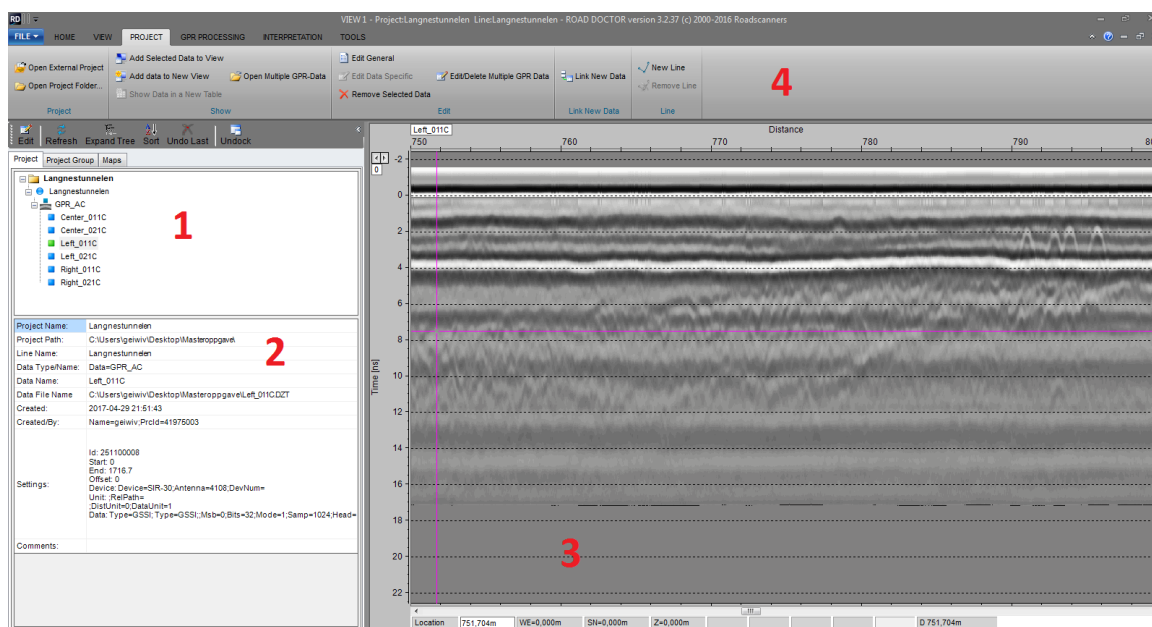
Det er en rekke ulike begreper som blir brukt videre i oppgaven. I dette delkapittelet vil disse begrepene defineres og forklares.

Falldodd – Falling Weight Deflectometer (FWD) er et verktøy som brukes til å måle nedbøyning på vei, for så å kunne si noe om kvaliteten til materialene som brukes i overbygning og undergrunn, i tillegg til å kunne beregne bæreevne til veien. Prinsippet til falloddet er at det er et lodd som slippes ned fra en bestemt høyde og treffer overflaten til veien. Målestasjoner i fastsatte avstander fra den induserte punktbelastningen måler hvor høy nedbøyning det er i de punktene fra den påførte belastningen.

Wheel Track test er en metode for å måle hvor god motstand bituminøse masser har mot permanente deformasjoner. Man måler spordybden et passerende hjul med en bestemt last og ved en bestemt temperatur lager på en borkjerne. Som regel bruker man 10 000 lastsykluser og resultatet gis som prosentvis deformasjon i forhold til prøvetykkelsen.

2.5 Road Doctor programvare

Programvaren som benyttes til analyse og tolkning av dataen fra georadarundersøkelsene i denne oppgaven er Road Doctor versjon 3.2.37. Road Doctor er et program som har blitt utviklet av Roadscanners i Finland. Brukeren kan laste inn rådata fra georadarundersøkelser gjort ved bruk av mange ulike typer utstyr (GSSI, Malå, IDS, Sensors&Software, 3D-Radar, Utsi m.m.) og programmet kan behandle og prosessere rådataen i sanntid. Man trenger altså ikke noe annet program for å bearbeide dataen på forhånd og brukeren kan selv velge hvilke faktorer som skal inngå i bearbeidelsen av rådataen. I tillegg til rådata fra selve georadarskanningen kan brukeren legge inn videofiler dersom det er gjort opptak, informasjon fra fallodd-målinger, GPS-informasjon for å kalibrere georadartolkningen mot kartsystemer, laserskanning fra overflaten for å undersøke spor og ujevnheter. Dette kan integreres i et skjermvindu slik at brukeren kan få fullstendig oversikt over mange aspekter ved undersøkelsen av veistrekningen. Brukeren kan videre bruke Road Doctor til å automatisk tolke rådataen som har blitt lastet inn og man kan få ut resultater grafisk eller analytisk. Road Doctor kan arbeide med både 2D- og 3D-georadar.



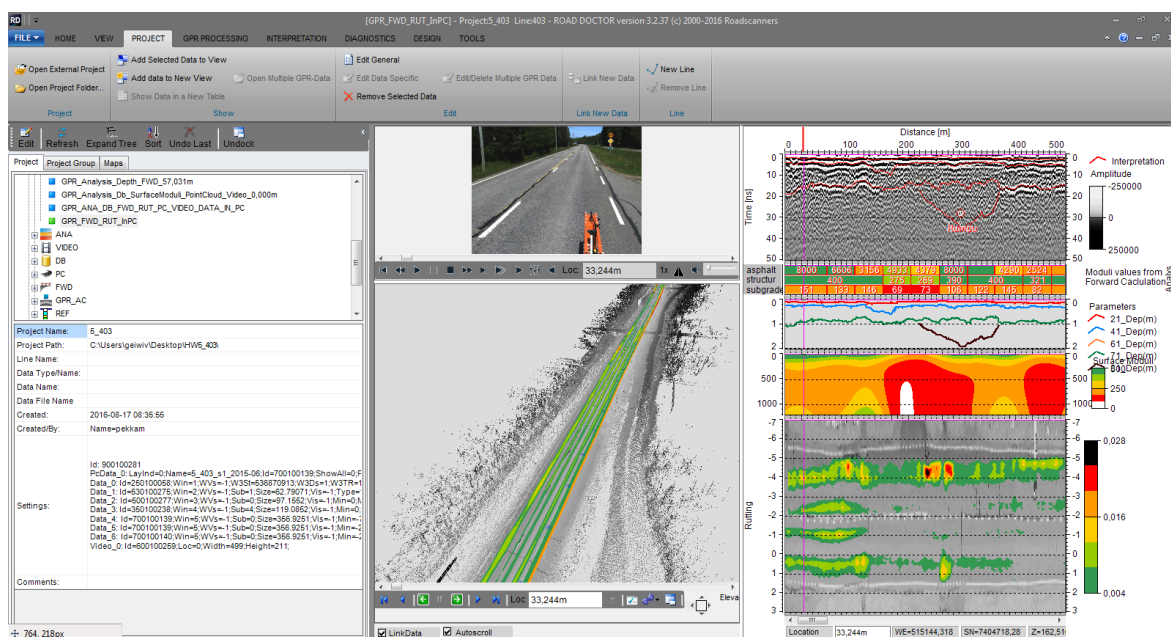
Figur 2.5.1: Skjermdump av Road Doctor programvaren (Foto: Geir Wivelstad)

Punkt 1 på bildet viser prosjektvinduet med Langnestunnelen som hovedprosjekt og med Langnestunnelen valgt som undersøkelses-linje. GPR_AC viser at det er luft-koplet georadar-data og de 6 filene deretter er hver av de 6 skanningene gjort på strekningen.

Punkt 2 viser informasjon om datafilen som er valgt, med beskrivelse om navn og lagringspunkt på datamaskinen.

Punkt 3 er hovedvinduet der det i dette tilfellet er lastet inn en bearbejdet rådatafil fra en georadarskanning. De horisontale linjene som hopper mellom hvitt og mørkegrått/svart signaliserer steder der den dielektriske verdien endrer seg og det har oppstått et grensesnitt.

Punkt 4 er båndmenyen på toppen der brukeren kan endre informasjon om prosjektene sine, visningsstiler og fargevalg. I tillegg har man diverse muligheter som GPR prosessering og tolkningsverktøy.



Figur 2.5.2: Eksempeldata i Road Doctor (Foto: Geir Wivelstad)

I dette skjermbildet vises en rekke data som har blitt integrert i det samme visningsvinduet. Øverst til venstre finner man en video-link, som er koplet opp mot kartdataen nederst til venstre. Hvis man trykker på "spill av" på videoen så vil programmet automatisk følge kartet bortover synkronisert med videobildet. Til høyre ser man en ferdigtolket georadar-skanning på toppen, der de røde linjene viser programmets automatiske tolkning av lagskiller. Nedenfor er det beregnet elastisitetensmodulverdier fra falloddmålinger og hulromsundersøkelser, slik at brukeren selv kan se hvilke punkter på veien som har lavere

bæreevne og kan undersøke dette nærmere. På bunnen er det et bilde av hvordan sporene på veien har utviklet seg med fargekoder som signaliserer ulik dybde på sporene. Dette er bare noen av de mange ulike dataene brukeren kan integrere i Road Doctor-systemet for å få en fullverdig oversikt over store deler av veikonstruksjonen.

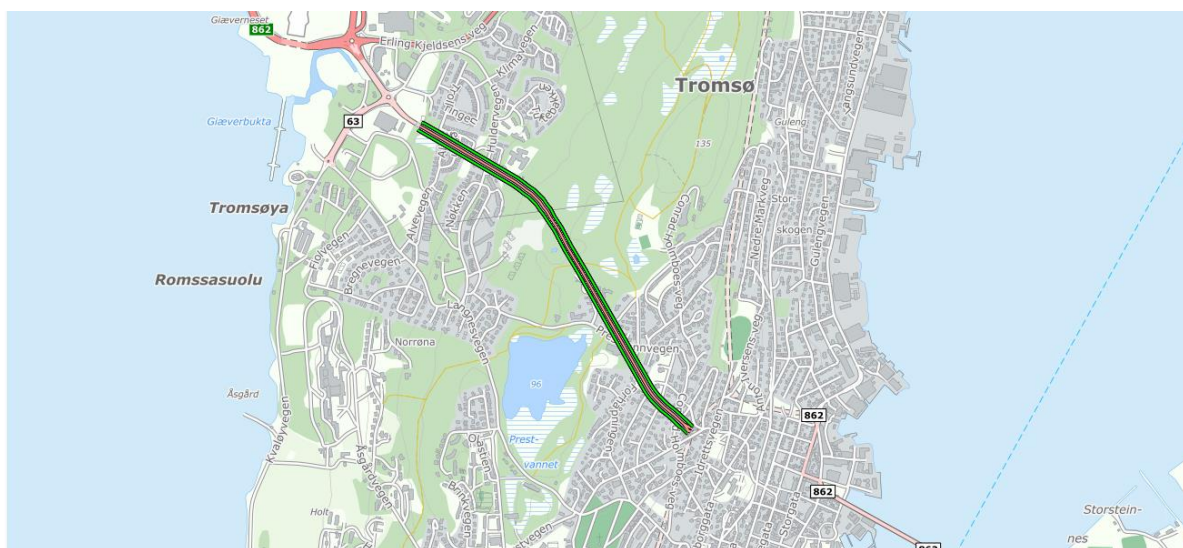
3. Materiale

Det er en veistrekning som blir undersøkt i denne oppgaven. En kort beskrivelse av strekningen følger nedenfor. Borkjernene er hentet ut ytre del av kjørefeltet, i høyre hjulspor. Fordi det skal være en ganske homogen asfaltmasse i bredden av veien brukes den samme resultatdataen for hulromsandel fra borkjernene til alle tre strekningsmålingen per kjørefelt i analysene i Road Doctor. Dette er mulig fordi borkjernene er hentet såpass kort tid etter dekkelegging at etterkomprimeringen fra trafikkbelastningen ikke har rukket å gjøre seg gjeldende.

3.1 Langnestunnelen

Veistrekningen som undersøkes er Fylkesvei 862 i Troms fylke, Langnestunnelen.

Veistrekningen er Hp 54, fra 4-1727m. Veien består av to felt, der felt 1 er østgående og har en gjennomsnittlig dekkebredde på 3.80 m, og felt 2 er vestgående med en gjennomsnittlig dekkebredde på 3,80 m. ÅDT for strekningen er 16200 i 2016, med andel lange kjøretøy 5 % (data hentet fra NVDB). Dekket ble lagt 6. oktober 2016. Plasseringen er vist nedenfor i figur 3.1.1.



Figur 3.1.1: Fv 862 Hp 54 4-1727m Langnestunnelen (NVDB 01.05.2017)

Slitelaget i veidekket i vestgående kjørefelt har en lagtykkelse på 43 mm og et masseforbruk på 107 kg/m², mens slitelaget i østgående kjørefelt har en tykkelse på 38 mm, med et masseforbruk på 96 kg/m² (hentet fra NVDB). Slitelaget i vestgående og østgående kjørefelt består av henholdsvis Ska 16 PMB (75/130-60) og Ska 16 (70/100). Ska er skjelettasfalt som er rikt på bindemiddel og den er tettgradert. Denne typen asfalt benyttes hovedsakelig på veier med en ÅDT > 5000. Tallet 16 betegner den øvre kornstørrelse, det vil si at steinmaterialet som brukes i denne type dekke har en øvre kornstørrelse på 16 mm. PMB står for polymermodifisert bindemiddel. For å hindre avrenning ved dekkepåleggelse kan man legge til polymerer i bindemiddelet, som kan være gummi eller plast. Da vil bindemiddelet holde seg bedre sammen og man slipper problemer som oppstår ved tradisjonelle bindemiddel-rike asfaltblandinger. Materialet i bindlaget er det samme som i slitelaget. Tunnelen har et bundet bærelag, så det er bituminøse masser i bærelaget også. Dette er viktig da det betyr at bærelaget har en noenlunde lik dielektrisk verdi som dekkelaget.



Figur 3.1.2: Bilde av den vestre inngangen til Langnestunnelen (Foto: Google Maps)

I Langnestunnelen har det vært hentet ut 12 borkjerner fra 6 felt. Det er Statens Vegvesen som har hentet borkjernerne og analysert dem i laboratoriet. Diameteren på borkjerneprøvene er 100 mm. I tabell 3.1 nedenfor følger data for disse borkjernerne.

Prøve	Massetype	F el t	Lokasjon [m]	Høyde slitelag [mm]	Høyde total [mm]	Densitet ρ_d [g/cm ³]	Maks Densitet [g/cm ³]	Hulrom [%]
4 (A)	Ska 16 70/100	2	388,0	37,0	210,0	2,479	2,516	1,47
4 (B)	Ska 16 70/100	2	388,0	39,0	210,0	2,470	2,500	1,20
Gj.snitt 4				38,0	210,0	2,475	2,508	1,34
5 (A)	Ska 16 PMB	1	388,0	50,0	210,0	2,435	2,481	1,85
5 (B)	Ska 16 PMB	1	388,0	47,0	210,0	2,441	2,491	2,01
Gj.snitt 5				48,5	210,0	2,428	2,486	1,93
12 (A)	Ska 16 PMB	1	300,0	39,7	210,0	2,451	2,486	1,41
12 (B)	Ska 16 PMB	1	300,0	38,9	210,0	2,453	2,486	1,33
Gj.snitt 12				39,3	210,0	2,452	2,486	1,37
14 (A)	Ska 16 70/100	2	300,0	39,4	210,0	2,476	2,508	1,28
14 (B)	Ska 16 70/100	2	300,0	38,6	210,0	2,477	2,508	1,24
Gj.snitt 14				39,0	210,0	2,477	2,508	1,26
13 (A)	Ska 16 PMB	1	800,0	44,1	210,0	2,453	2,486	1,33
13 (B)	Ska 16 PMB	1	800,0	40,6	210,0	2,451	2,486	1,41
Gj.snitt 13				42,4	210,0	2,452	2,486	1,37
15 (A)	Ska 16 70/100	2	800,0	42,4	210,0	2,387	2,508	4,82
15 (B)	Ska 16 70/100	2	800,0	38,4	210,0	2,349	2,508	6,34
Gj.snitt 15				40,4	210,0	2,368	2,508	5,58

Tabell 3.1.1: Borkjerne-data fra Langnestunnelen

Prøvene 4 (A), 4 (B), 5 (A) og 5 (B) ble tatt ut for å undersøke hulromsandelen og lagtykkelse i laboratoriet. Undersøkelsene man benyttet var hydrostatisk overflatetørr og maksimumsdensitet fra pyknometerundersøkelser. Deretter fant man hulromsprosenten ut fra formelen gitt på slutten av delkapittel 2.2.3. Høyde slitelag i tabellen ovenfor indikerer høyden på slitelaget funnet i borkjerneprøver.

De resterende prøvene ble egentlig tatt ut for å måle motstandsevnen til asfalten mot permanente deformasjoner, ved hjelp av Wheel Track testen. I den undersøkelsen har man funnet densiteten, ρ_d , men maksimumsdensiteten blir ikke regnet ut. Derfor har det blitt benyttet verdiene fra prøvene 4 og 5 for maksimumsdensiteten, altså 2,486 g/cm³ for borkjernene fra kjørefelt 1 og 2,508 g/cm³ for borkjernene fra kjørefelt 2. I tillegg er det usikkert hvilken dato de fire siste prøvene har blitt hentet ut, så det er mulig at de er hentet ut i etterkant av den 3-ukers perioden man har på å hente ut borkjerner til hulromsundersøkelser ved hjelp av georadar, og dermed ikke burde brukes til å beregne kalibreringsfaktoren i Road Doctor. De kan likevel benyttes som sammenlikningsgrunnlag for resultatene i oppgaven, så derfor er de tatt med i dette materiale-kapittelet.

Den totale tykkelsen i tabell 3.1 er tykkelsen til dekkelaget og bærelaget. Det er ikke gjort noen målinger på den totale tykkelsen da det ikke har blitt foretatt noen oppgravingsprøver fra denne veistrekningen og dataen fra borkjerneanalysene ikke gir informasjon om dette. Derfor blir denne tykkelsen beregnet ut fra prosedyrene i Håndbok N200 – Vegbygging. Det er benyttet metodikken beskrevet i delkapittel 2.1.1, om trafikkmengde og indeksmetoden, for å beregne en tykkelse på både bindlaget og bærelaget på denne strekningen. Da tykkelsen fra beregningene ikke helt stemmer med det som erfares i RD, har det blitt antatt at det er asfaltert et slitelag oppå eksisterende veidekke på denne strekningen. Dermed er total høyde for de bundne lagene på denne strekningen antatt å være 250 mm. Tykkelsen gitt har ikke så mye å si, da det kun brukes som sammenlikningsgrunnlag i kapittel 5.

Selve strekningen som Roadscanners har skannet i Langnestunnelen er 1715m lang. Dermed er det en kort strekning i forkant og etterkant av georadarmålingen som også er en del av den veistrekningen som oppgis ovenfor, da georadarmålingen er gjort over en strekning på 1715,65 meter. Det antas likevel at det ikke har så mye å si til undersøkelsen, da hulromsandelen over ± 10 meter er relativt likt, som også blir bekreftet ved å undersøke grafene i resultatkapittelet.

4. Metode

En veistrekning i Troms fylke blir undersøkt ved bruk av georadar og gjennom tolkningsarbeid i Road Doctor er det kommet fram til resultater i form av tall på både hulromsandelen i prosent og lagtykkelsen i mm til slitelaget.

4.1 Road Doctor

Det ble bestilt flatedekkende georadarmåling av finske Roadscanners til undersøkelse av tunnelen.. Målingen av Langnestunnelen ble utført 19. oktober 2016, 13 dager etter dekkelegging. Kontrollenheten som ble brukt under undersøkelsene var utviklet av GSSI, et amerikansk selskap som har lang erfaring fra utvikling av georadar-verktøy med oppstart på 1970-tallet. Kontrollenheten som ble brukt var av type SIR-30. Det ble benyttet en luft-koplet hornantenne med en frekvens på 1.0 GHz.

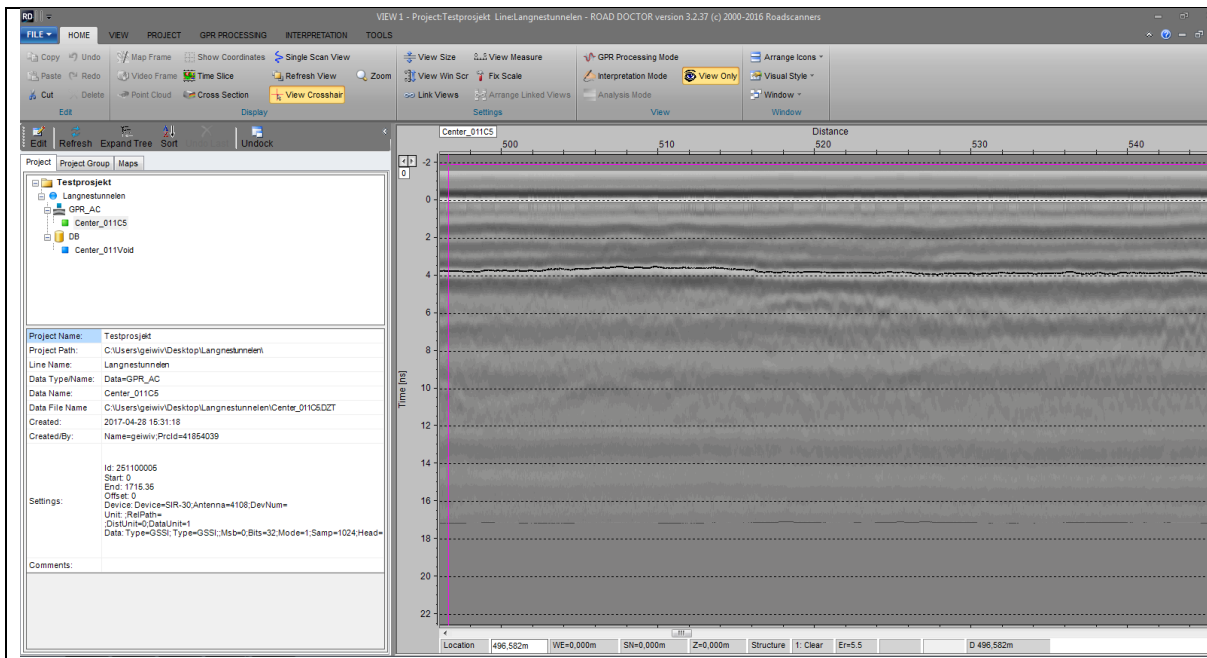
I tunnelen ble det utført 6 målinger, 3 i hvert kjørefelt. I tillegg ble det utført en metallplate-skanning i forkant av georadarskanningen.

Metoden til analysen og tolkningen av rådataen i Road Doctor blir gjennomgått på de neste sidene, mens en fullstendig gjennomgang av fremgangsmåten følger i vedlegg B.

Road Doctor er en prosjektorientert programvare, der bruker skaper prosjekter, for eksempel for nye veistrekninger som bygges. Innen hvert prosjekt kan brukeren ha en rekke ulike strekninger, linjer, som pleier å samsvare med en georadarundersøkelse. Under hver strekning kan man legge inn rådata fra en rekke ulike kilder, som blant annet loft-koplet georadarundersøkelser, bakke-koplet georadarundersøkelser, falloddmålinger, spordybdeundersøkelser, videoopptak mm. Et bilde av en RD skjermdump med flere av disse elementene integrert vises i figur 2.5.2.

Dersom man skal benytte seg av Road Doctor til å undersøke rådata fra luft-koplete georadarundersøkelser så må man først prosessere denne dataen. Man benytter innebygde funksjoner i programmet for å fjerne uønsket støy fra målingen, legge et nytt null-nivå for tolkningsdataen, reverserer polariteten på tolkningsdataen dersom det ønskes, filtrerer bort små variasjoner i signalet for å få et renere signal, m.m. Disse prosedyrene beskrives nærmere i vedlegget. Etter at brukeren har valgt hvilke faktorer som skal prosesseres i programmet så legger man inn data fra metallplate-testen. Etter dette kan programmet bearbeide rådataen fra en strekning, og man kan få data i visningsvinduet som er lettere å jobbe med. I tillegg vil programmet lage en .ERA-fil, som er en fil som beskriver amplituden til enhver enkeltskanning gjort i undersøkelsen. Denne filen vil programmet benytte seg av dersom brukeren ønsker å beregne hulromsandelen til veistrekningen.

Til slutt får man prosessert data i programmet som man kan bruke til videre tolkning, som er vist i figur 4.1.1.



Figur 4.1.1: Bilde av prosessert data i Road Doctor (Foto: Geir Wivelstad)

Her kan man se lengdesnittet til veien bortover langs x-aksen og dybden til veien i ns på y-aksen. Det er et tydelig lagskille på en dybde ca. 4 ns, som er vist ved at det er et hvitt parti med mørkere parti på over- og undersiden. Dette lagskillet har programmet automatisk fanget opp og det har blitt tegnet en svart stiplet linje som følger lagskillet bortover, for å gjøre brukeren oppmerksom på lagskillet.

4.1.1 Hulromsundersøkelser

For å bestemme hulromsandelen til slitelaget må man først lage en .ERA-fil i RD. Etter at man har lastet inn og prosessert filene fra georadarskanningene ber man programmet om å gjennomføre en hulromskalkulasjon på grunnlag av .ERA-filen. Første steg i hulromskalkulasjonen er å definere en kalibreringsfaktor. Denne faktoren blir regnet ut på grunnlag av kalibreringsdata fra tidligere gjennomførte borkjerneprøver på strekningen. Man legger inn hulromsandelen fra to borkjerneprøver og plasseringen disse ble hentet fra, så vil programmet beregne en kalibreringsfaktor. Formelen den benytter er formel 2.3.17 fra delkapittel 2.2.3. Etter kalibreringsfaktoren er lagt inn så vil programmet beregne hulromsandelen fra resten av strekningen ut i fra hvilken dielektrisk verdi som er målt i georadarmålingen. Brukeren kan deretter velge å få ut hulromsandeler og annen data i PMS-format.. Dersom man velger å få dataen ut i PMS-formatet, fra Pavement Management System, vil dataen vises i et ruteark. De ulike dataene man velge å få vist er posisjon, tykkelsesmålinger hvis det er tatt med, dielektriske verdier og hulromsandeler. Denne tabellen kan eksporteres til Microsoft Excel eller liknende programmer for videre arbeid. Avstanden som er valgt er 5 m, så hver verdi på hulrom som vises i denne tabellen er et gjennomsnitt av hulromsandelene på disse metrene.

Videre kan man be programmet om å lage en database. Ved å lage en database med den utregnede dataen kan man vise resultatene grafisk i programmet og se grafer av de nevnte faktorene. Dette kan være til god hjelp dersom man helst vil ha alt av data samlet i et program.

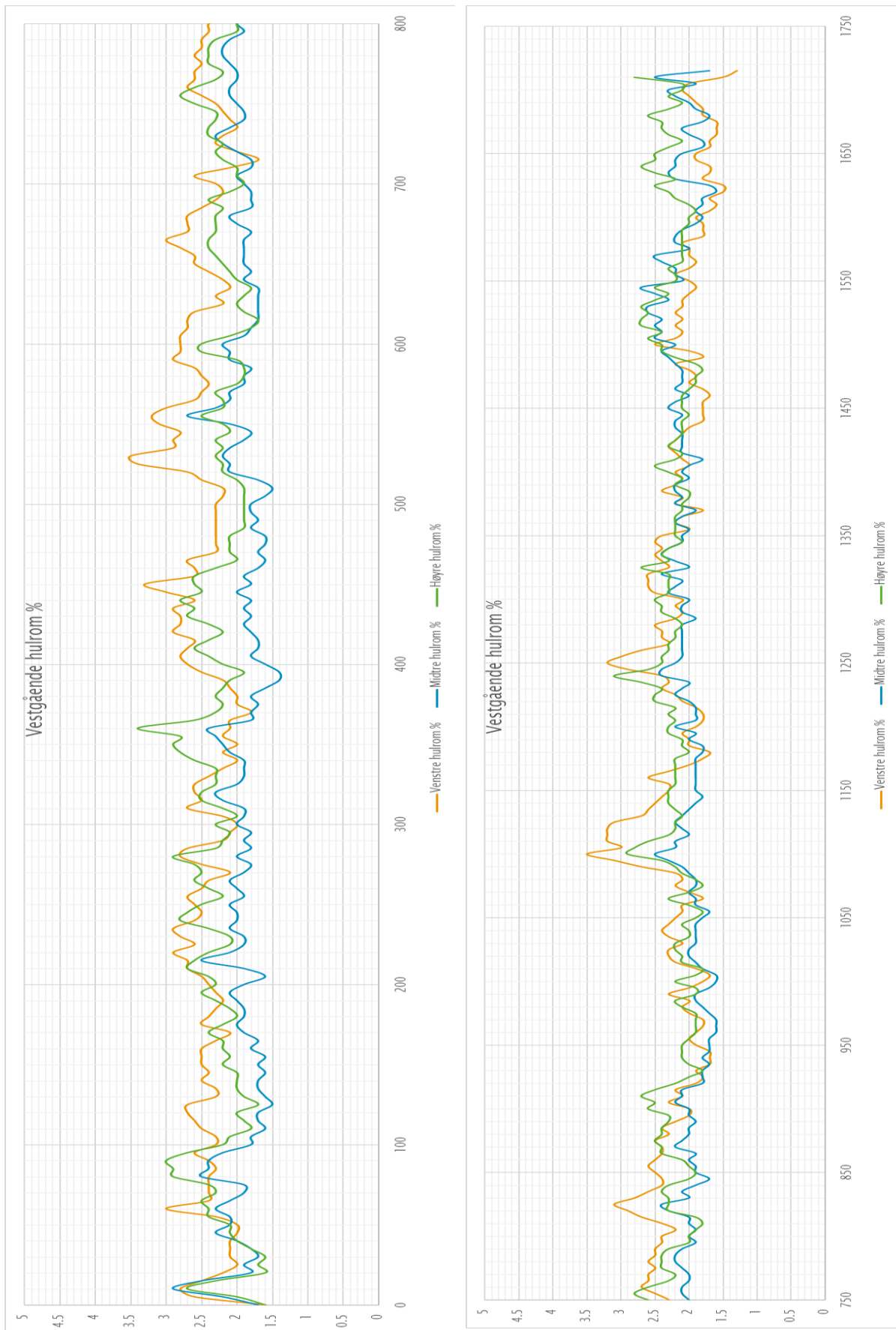
4.1.2 Lagtykkelses-undersøkelser

Man kan enten benytte .ERA-filen ovenfor for å beregne lagtykkelsen til valgt antall lag og publisere den informasjonen med hulromsdataen i PMS-formatet, eller så kan brukeren aktivt gå inn i tolkningsvinduet og be programmet følge et grensesnitt bortover lengdeaksen på veistrekningen og markere det i valgt farge. Dette er svært nyttig for å få en god forståelse om hvordan lagene endrer seg og om det er klare og tydelige skiller mellom lagene i veikonstruksjonen. Dersom veien er eldre er det som regel vanskeligere å tyde hvor lagskillene går, da fargekontrastene i tolkningsvinduet er mye mindre. Ved å studere tolkningsvinduet kan man også oppdage andre elementer i veikonstruksjonen, som f.eks. rør, store steiner eller kulverter. Programmet kan møte problemer dersom brukeren ber den beregne lagtykkelsene automatisk, så det er anbefalt å gå gjennom veistrekningen i tolkningsvinduet for å dobbeltsjekke at programmet følger riktig grensesnitt hele veien.

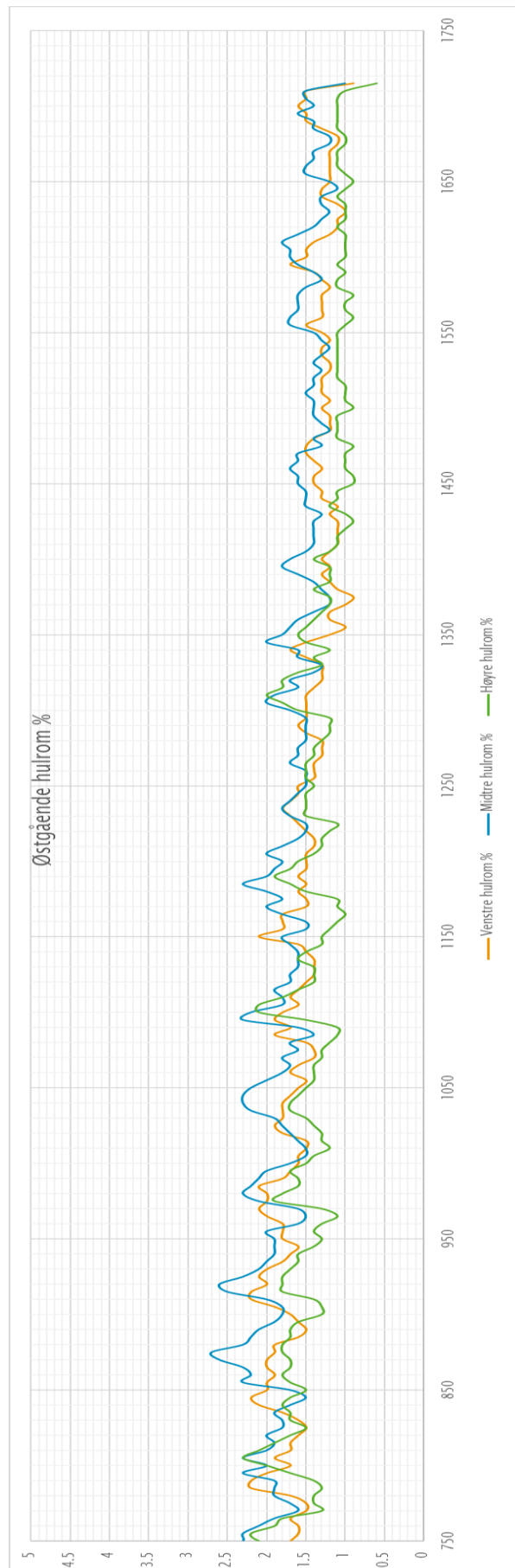
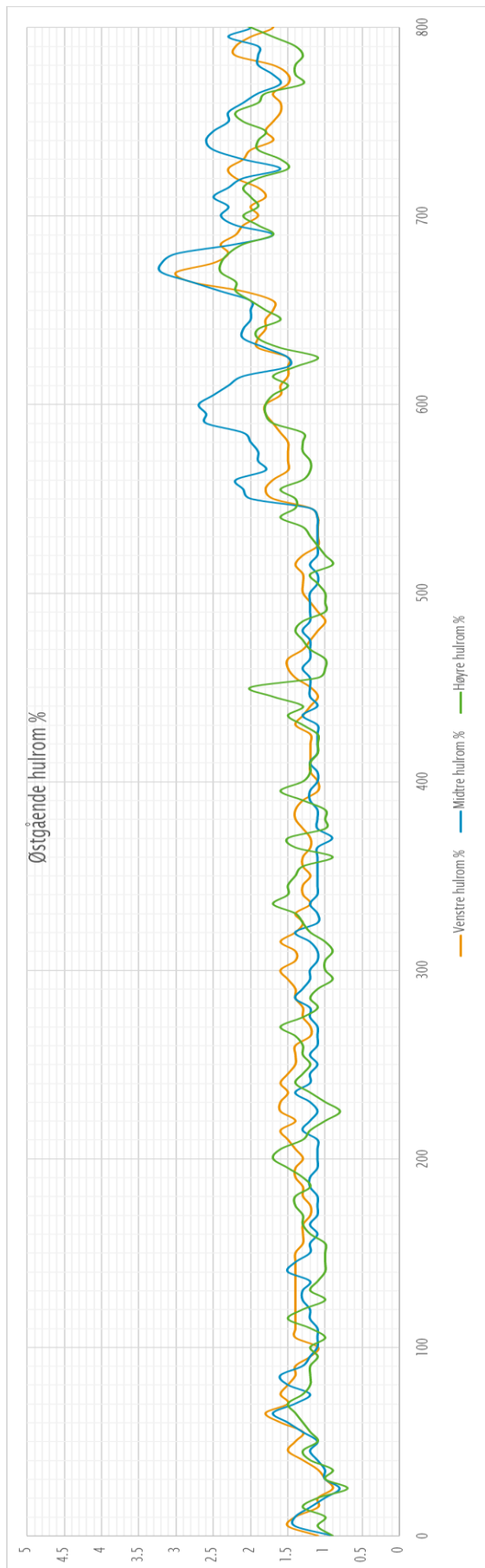
5. Resultater

Hulromsanalysene fra Langnestunnelen i Road Doctor er eksportert til Excel og grafisk fremstilt i figur 5.1 og 5.2, for henholdsvis vestgående og østgående retning. De ulike fargene viser hvor i kjørefeltet georadarskanningen har blitt utført. Grafene fra hver retning har blitt delt i to med overlappende områder i hver ende, slik at man har mulighet til å lese av nøyaktig. Lengdeaksen, x-aksen, viser avstanden på veistrekningen i meter, mens y-aksen på grafene viser hulromsandelen i prosent.

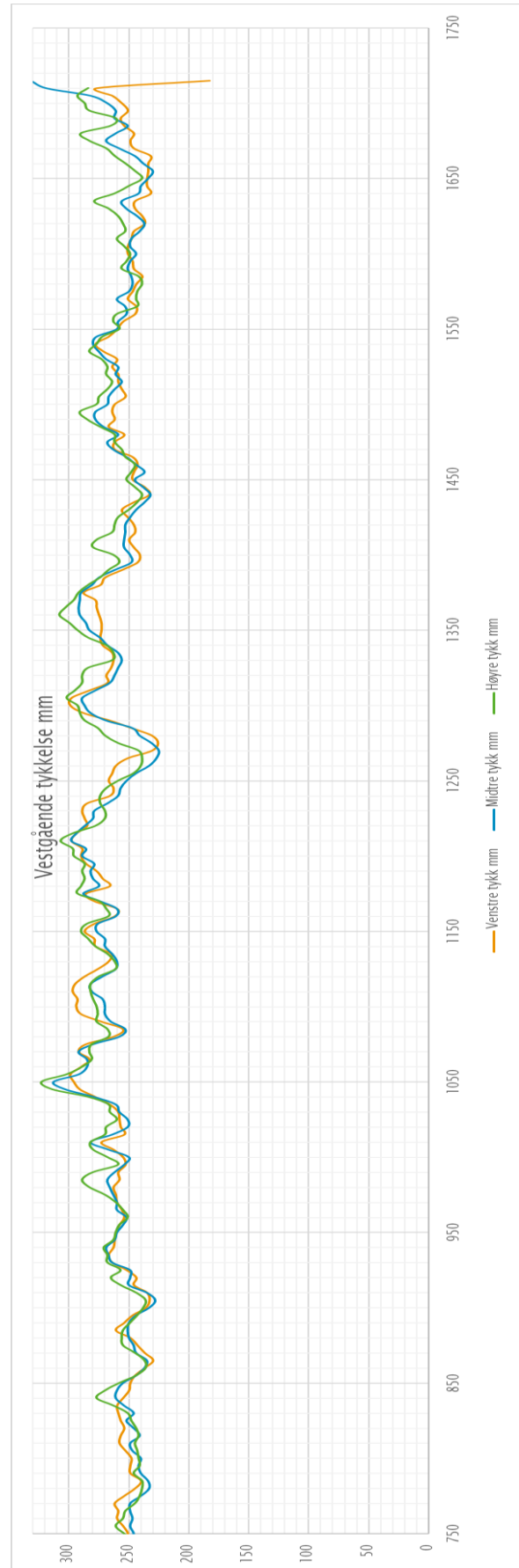
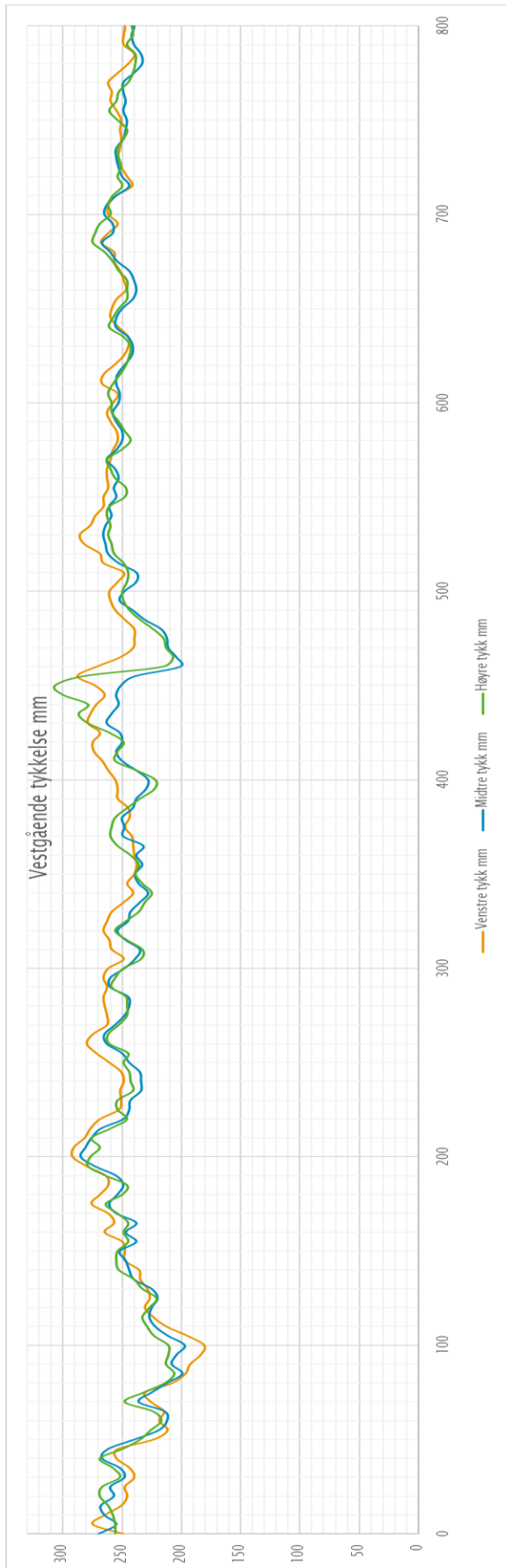
Grafene i figur 5.3 og 5.4 viser lagtykkelsene, med de samme aksesystemene som tidligere.



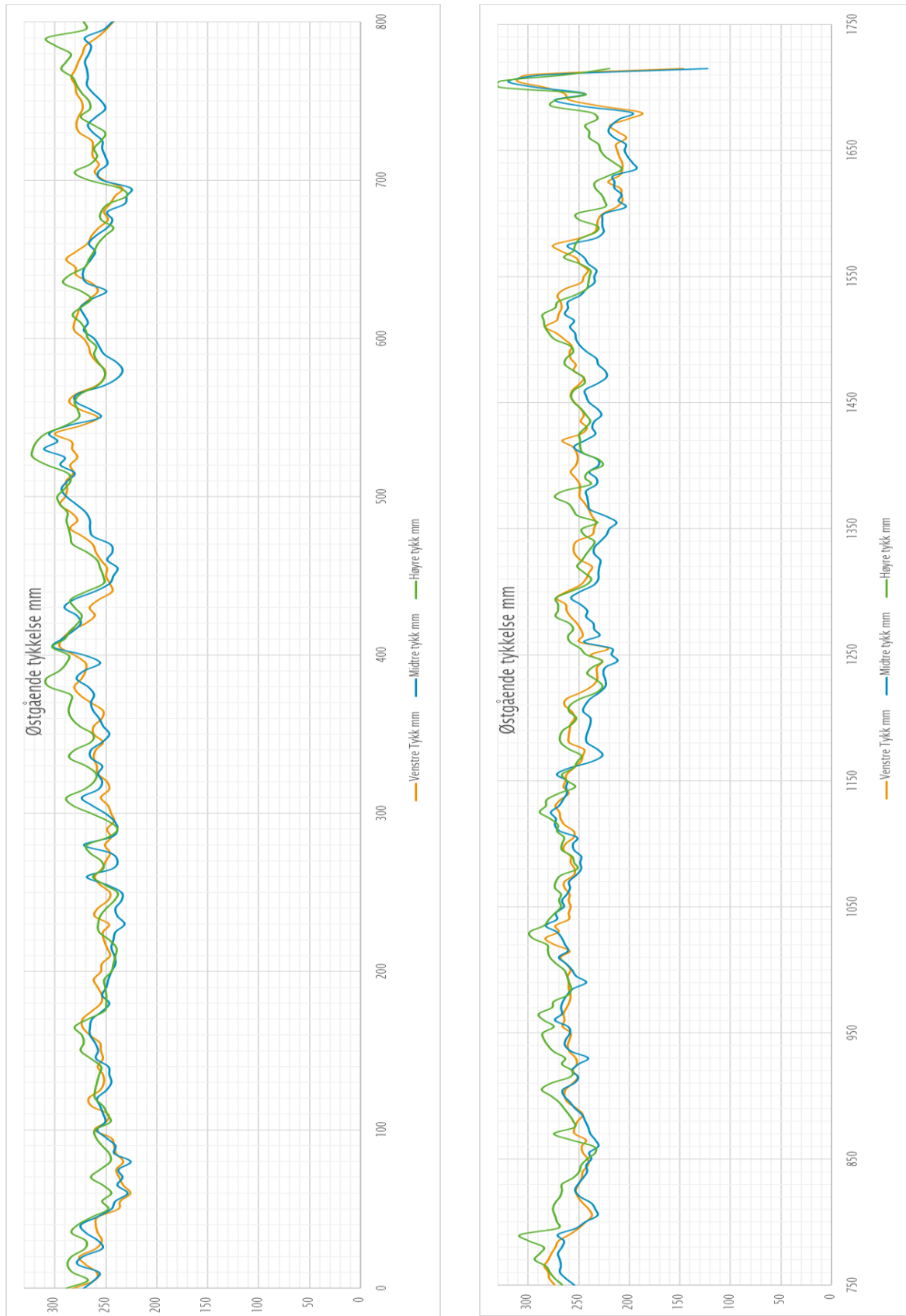
Figur 5.1: Hulromsandelen i vestgående retning



Figur 5.2: Hulromsandelen i østgående retning



Figur 5.3: Tykkelse på dekkelag og bærelag i vestgående retning

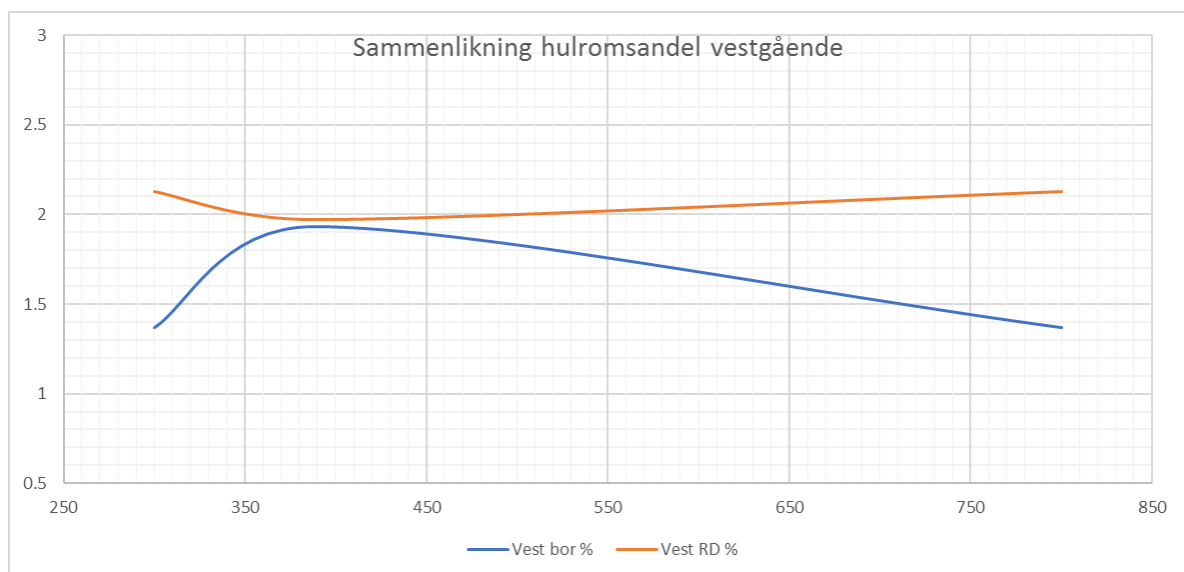


Figur 5.4: Tykkelse på dekkelag og bærelag i østgående retning

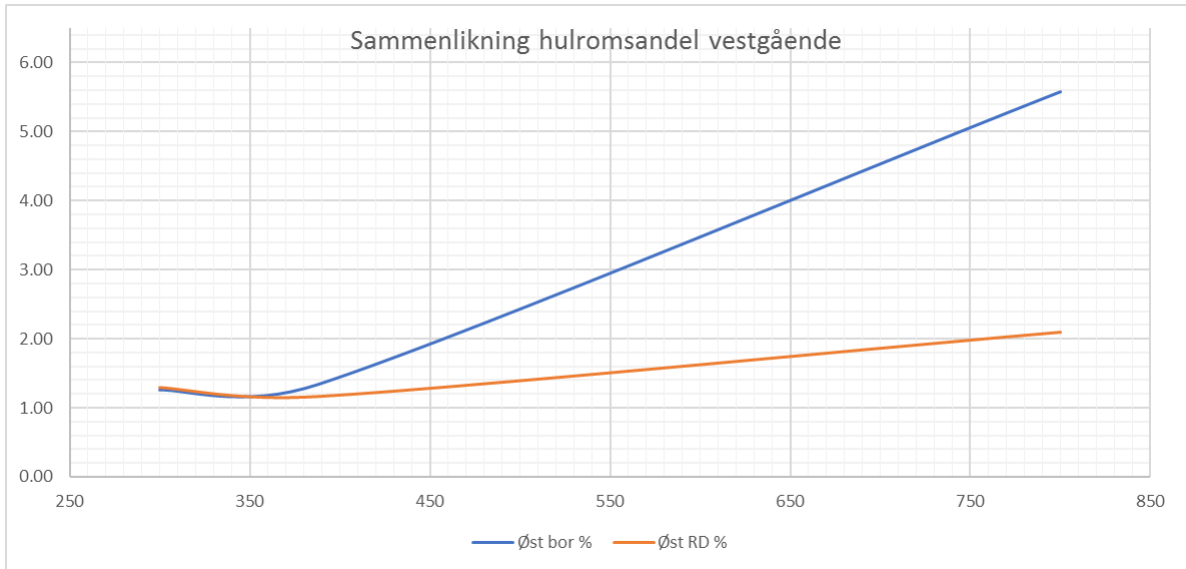
Nedenfor følger tabellene 5.1 og 5.2, som viser henholdsvis hulromsandel og lagtykkelser på utvalgte punkter, hentet ut manuelt fra RD. Programmet har beregnet disse faktorene med en gjennomsnittlig avstand på 5 meter. Hulromsprosenten fra RD er gjennomsnitt av hulromsverdiene på dette punktet fra alle tre strekningsmålingene, mens hulromsprosenten fra tidligere borkjerneprøver er gjennomsnittet fra hvert borefelt. Disse forskjellene har blitt illustrert grafisk i figur 5.5-5.8.

Prøve	Felt	Lokasjon [m]	Hulrom [%]	Hulrom fra RD [%]	Forskjell [%]
4	2	388,0	1,34	1,17	+ 0,17
5	1	388,0	1,93	1,97	- 0,04
12	1	300,0	1,37	2,13	- 0,76
14	2	300,0	1,26	1,30	- 0,04
13	1	800,0	1,37	2,13	- 0,76
15	2	800,0	5,58	2,10	+ 3,48

Tabell 5.1: Sammenlikning av hulromsandel på utvalgte punkter



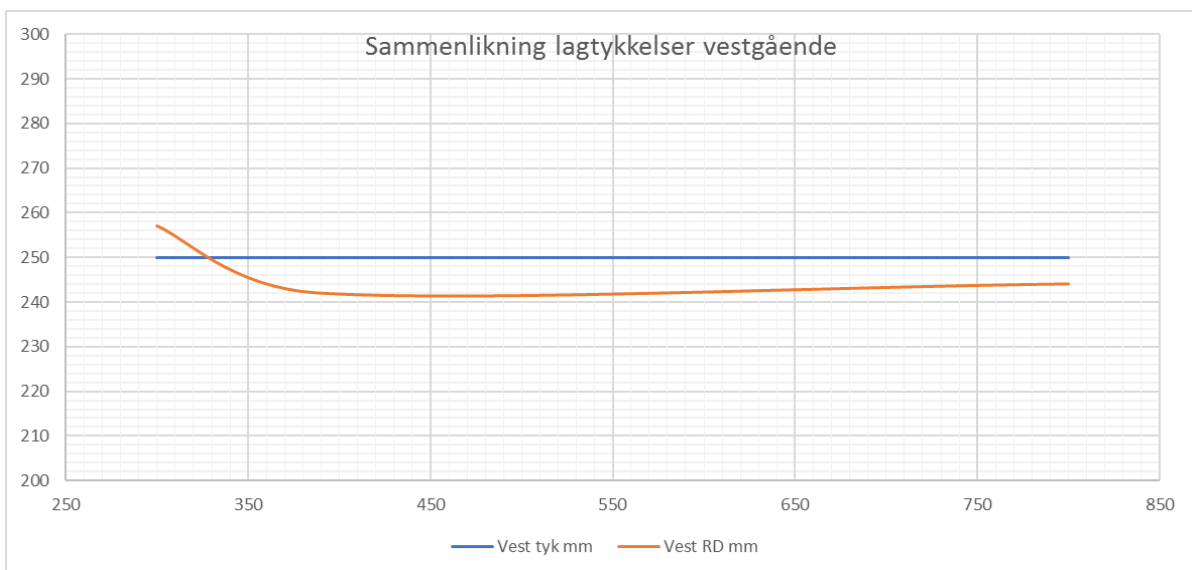
Figur 5.5: Sammenlikning av hulromsandel i vestgående kjørefelt



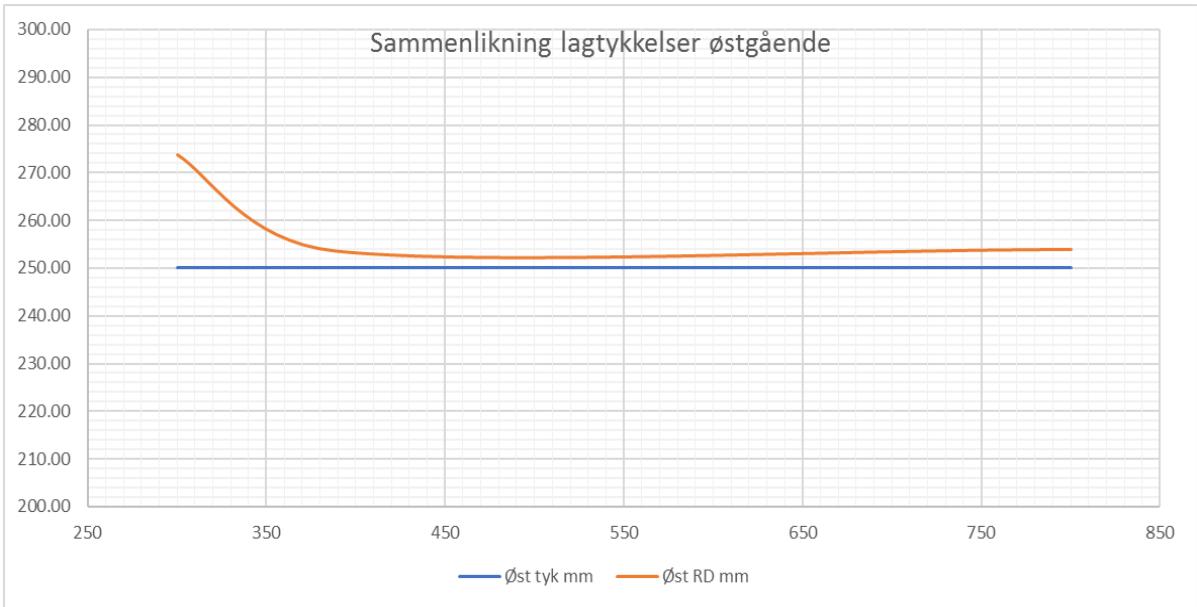
Figur 5.6: Sammenlikning av hulromsandeler i østgående kjørefelt

Prøve	Felt	Lokasjon [m]	Lagtykkelse [mm]	Lagtykkelse fra RD [mm]	Forskjell [mm]
4	2	388,0	250	273,7	- 23,7
5	1	388,0	250	242,0	+ 8,0
12	1	300,0	250	257,0	- 7,0
14	2	300,0	250	253,7	- 3,7
13	1	800,0	250	244,0	+ 6,0
15	2	800,0	250	254,0	- 4,0

Tabell 5.2: Sammenlikning av lagtykkelser på utvalgte punkter



Figur 5.7: Sammenlikning av lagtykkelser i vestgåend kjørefelt



Figur 5.8: Sammenlikning av lagtykkelser i østgående kjørefelt

6. Diskusjon

Resultatene fra hulromsundersøkelsene i Road DOctor, vist i figurer 5.1 og 5.2, viser at andelen hulrom ligger på mellom 1,3-3,5 % i vestgående og 0,6-3,2 % i østgående retning. Hulromsandelen er stort sett innenfor normalene til hulromsandeler, som ligger på 2-5 %. I en ideell verden ville hulromsandelen i lengderetning av veistrekningen være nokså stabilt, slik at det ikke oppstår svakere punkter på veien som er mer utsatt for skader.

Resultatene fra Road Doctor stemmer ganske godt overens med de lokale hulromsverdiene man har fått fra borkjerneprøver. Den største forskjellen er på målepunktet ved 800,0m, der det i østgående kjørefelt er en forskjell på 3,48 %. Hulromsverdien fra Road Doctor på dette punktet er 2,10 %, noe som er helt i tråd med resten av strekningen. Borkjerneundersøkelsene på dette punktet ga en verdi på 5,58 %. Dette er mye høyere enn resten av veistrekningen, også i forhold til den andre siden av veien som har en hulromsverdi på 1,37 %. Grunnen til at det er en så stor forskjell mellom verdiene i Road Doctor og borkjernen kan være flerfoldige; det kan være at det skjedde noe feil ved utlegging av veidekket på det punktet, det kan ha skjedd feil ved målingen av hulrom i laboratoriet eller det kan være noen feiltolkninger i Road Doctor. Generelt stemmer resten av verdiene fra Road Doctor analysen ganske godt overens med verdiene fra de 6 borkjernetestene.

Lagtykkelsesmålingene har en iboende usikkerhet, da det ikke er helt klart hvor tykt dekke- og bærelaget er på denne strekningen. Det har blitt antatt 250 mm tykkelse fra studenten sin side, men det er avhengig av at tykkelsen til bære- og dekkelag stemmer overens med resultatet man får fra dimensjoneringen i metoden beskrevet i Håndbok N200 – Vegbygging, i tillegg til at det har vært reasfaltert et slitelag til på toppen av dette. Antageligvis er tykkelsen på de to kjørefeltene litt ulikt, noe det ikke har blitt tatt høyde for i denne oppgaven. Resultatet fra lagtykkelsesmålingene, vist i figurene 5.3 og 5.4, viser at lagtykkelsen gitt fra tolkning i Road Doctor ligger på drøye 250 mm, med noen variasjoner både opp og ned langs veistrekningen. Disse tykkelsesverdiene ble manuelt beregnet i tolkningsvinduet i Road Doctor, og det har derfor vært opp til brukeren å "stake ut" grensesnittene som programmet skulle følge i disse utregningene. Det er en rekke mulige feilmarginer når det gjelder lagtykkelsesundersøkelser i Road Doctor. Den første er rett og

slett det at tykkelsen til bærelager og dekkelaget er helt usikkert, og er kun beregnet teoretisk, fordi det ikke har vært utført noen oppgravingsprøve på stedet. Selve punktene der det har vært hentet ut borkjerneprøver stemmer ikke nødvendigvis med de samme meter-punktene i analyse materialet. Det har vært vanskelig å synkronisere akkurat riktig punkt i Road Doctor mot riktig punkt i virkeligheten, så selv om tallene gitt fra Road Doctor er gjennomsnittlige tall fra 5-meters strekker er det en margin for feil der også.

Hvis man undersøker de spesifikke punktene fra lagtykkelsesmålingene i Road Doctor som samsvarer med punktene borkjernene ble hentet ut ser man at verdiene veldig variable. Det hopper fra 23,7 mm forskjell på det største til 3,7 mm forskjell på det minste. De fleste verdiene i tabell 5.2 viser likevel at forskjellen mellom den antatte tykkelsen og tykkelsen gitt fra Road Doctor ikke er så stor. Tykkelsesforskjellen ligger som regel på under 1 cm i de fleste tilfeller. Derfor antas det at tykkelsesmålinger ved hjelp av georadar fungerer greit i praksis, selv om de er sammenliknet mot et teoretisk tall.

Når det gjelder selve problemstillingen så fungerer Road Doctor og georadar godt for å undersøke hulromsandeler og lagtykkelser. Feilmarginen er ikke den største, og ved korrekt tolkning og bearbeidelse av rådataen kan det utføres på en enda mer korrekt måte. Resultatene fra denne oppgaven stemmer godt overens med resultater fra forskningsprosjekt om georadar gjort tidligere.

7. Konklusjon

På generelt grunnlag kan hulromsmålingene gjort ved hjelp av georadar sies å være innenfor de feilmarginene man opererer med i bransjen. Prosentvis stemmer hulromsandelen godt overens med tidligere gjennomførte borkjerner og det er grunnlag for å si at georadar kan brukes sammen med konvensjonelle metoder for tilstandsanalyse av hulromsandeler. Det samme gjelder lagtykkelsesmålinger, men det kan godt være grunnlag for å undersøke dette nærmere, med korrekt data, for å bekrefte tendensen man ser i denne oppgaven.

Erfaringene med georadar i denne oppgaven tilsier:

- Innhenting av rådata gjennom georadarskanninger kan gjennomføres på en rimelig rask måte, så man slipper å forstyrre trafikken, og sikkerheten til de ansatte øker
- Georadar undersøker store flater slik at man ved riktig tolkning av rådataen kan danne seg et godt bilde av tilstanden og kvaliteten på veien
- Det er hovedsakelig en engangskostnad ved innførelse av georadar og ved korrekt behandling/kalibrering av utstyret kan det brukes i lang tid
- Georadar kan fungere godt som et supplerende verktøy sammen med konvensjonelle metoder som borkjerner og isotopmålere
- Nøyaktigheten til georadaren er ganske høy, spesielt med tanke på hulromsundersøkelser, noe som bekreftes ved tidligere forsøk
- Innhenting av rådata er raskt gjort med georadar sammenliknet med andre metoder, men kontorarbeidet med tolkning i etterkant kan ta lang tid
- For å kunne tolke rådataen riktig så må man ha god erfaring og forståelse for programvaren som benyttes. Det er mange variabler som inngår i tolkning av georadarundersøkelser, og resultatet kan bli påvirket i høy grad av feil analyse

- Ved bruk av Road Doctor kan brukere enklere få oversikt over mange ulike tilstander til en veistrekning og det kan gjøre planlegging av vedlikehold og forsterkningstiltak lettere

8. Videre arbeid

Det er mange ulike bruksområder for georadarundersøkelser i fremtiden og teknologien brukt for tilstandsanalyse av veikonstruksjoner er ganske nytt her i Norge. Denne oppgaven har gitt et innblikk i mulighetene ved bruk av georadar, men den er langt fra fullkommen når det gjelder bruksområdene og anvendelsene videre.

Fremtidig arbeid som kan føres videre på grunnlag av denne oppgaven inkluderer

- Analysere rådataen grundigere, spesielt med tanke på lagtykkelser, for å bekrefte eller avkrefte tendensene gitt i denne oppgaven
- Undersøke betydningen av ulik kalibreringsfaktor brukt i RD ved hulromsundersøkelser
- Teste og se hvordan valg av frekvensen til georadaren påvirker kvaliteten på rådataen
- Analysere samme strekningen med bakke-koplet antenne for å analysere lagtykkelser
- Analysere både rådataen fra georadar og resultatet fra borkjerneprøver fra nye veistreknings for å se om resultatet holder også i andre situasjoner
- Benytte dataen fra georadarundersøkelser i videre beregninger av bæreevne og levetiden til veikonstruksjoner, da gjerne i sammenheng med FWD

9. Referanser

- Al-Qadi, I. L. & Lahouar, S. (2005). Measuring layer thicknesses with GPR - Theory to practice.
- Chen, D.-H., Hong, F., Zhou, W. & Ying, P. (2014). Estimating the hotmix asphalt air voids from ground penetrating radar. *NDT&E International*, 68: 120-127.
- Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar - 2nd Edition.
- de Jongh, R. V., Yaravoy, A. G., Ligthart, L. P., Kaploun, I. V. & Schukin, A. D. (1999). Design and analysis of new GPR antenna concepts.
- Hoekstra, P. & Delaney, A. (1974). Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory* (03755).
- Lampe, B. (2003). Finite-Difference Time-Domain Modeling of Ground-Penetrating Radar Antenna Systems.
- Leimbach, G. & Löwy, H. (1910a). Verfahren zur systematischen Erforschung des Erdinnern größerer Gebiete mittels elektrischer Wellen. *German Patent 237944*.
- Morey, R. M. (1998). Ground Penetrating Radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportation Facilities. *National Cooperative Highway Research Program* (Synthesis 255).
- Read, J. & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. Fourth Edition utg.: Thomas Telford Publishing.
- Rexford, M. & Kovacs, A. (1977). Detection of Moisture in Construction Materials.
- Saarenketo, T. (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. *Finnish National Road Administration* (FIN-96101).
- Saarenketo, T. & Roimela, P. (1998). Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control.
- Saarenketo, T. & Scullion, T. (1999). Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43.
- Saarenketo, T. (2006). *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*.
- Saarenketo, T. (2011a). Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air void content measurement. *Mara Nord project*.
- Saarenketo, T. (2011b). The Use of GPR in Road Rehabilitation Projects. *Mara Nord*.
- Samferdselsdepartementet. (2007). Forskrift om anlegg av offentlig veg.
- Vegdirektoratet. (2014a). Håndbok N200: Vegbygging.
- Vegdirektoratet. (2014b). Veiledninger - Håndbok V261: Skadekatalog for bituminøse vegdekker.
- Vegdirektoratet. (2015). *SVV Rapport 365: Lærebok - Drift og vedlikehold av veier*.
- Vegdirektoratet. (2016a). Håndbok R210: Laboratorieundersøkelser.
- Vegdirektoratet. (2016b). *SVV Rapport 626: Lærebok - Vegteknologi*.

10. Vedlegg

Vedlegg del A: Asfaltresepter til de tre ulike typene veidekker om er analysert i denne oppgaven



Arbeidsresept for bituminøse vegdekker og bærelag

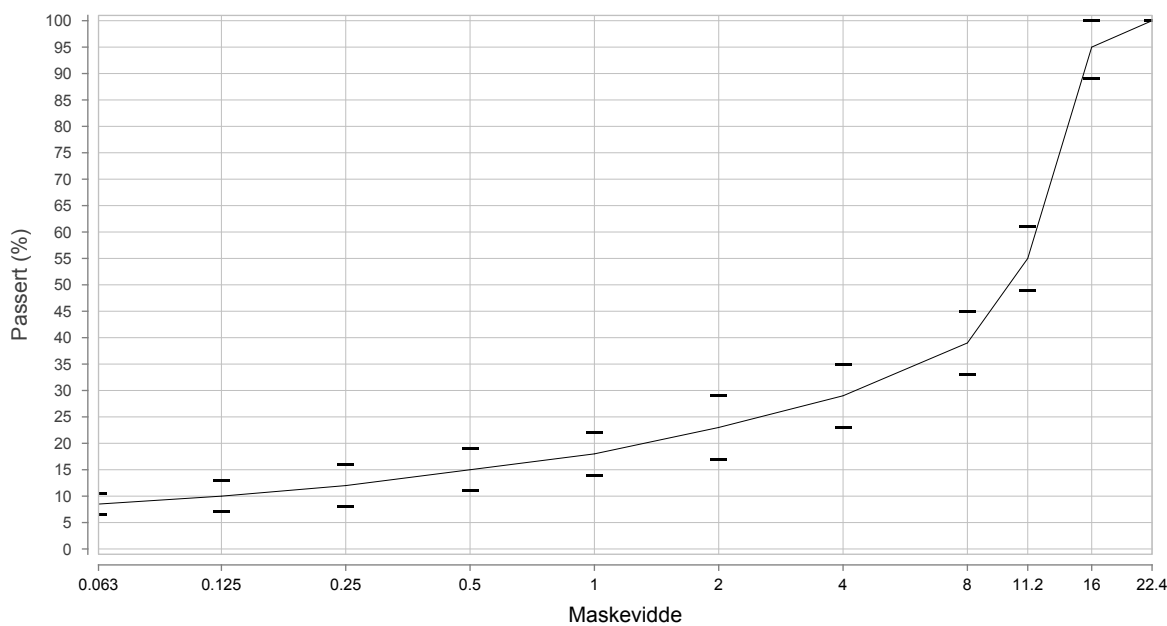
Reseptnr. **16331083**
 Produktnavn
 Reseptdato **25.04.2016**

Produksjonssted **Tromsø**
 Dekketype **Ska 16**
 Asfaltleverandør **Lemminkäinen Norge AS**

	Tilsiktet	Toleranse	Kompaktering
Bindemiddel (%)	5.8	0.4	Maks.densitet ρ_{mv} (Mg/m ³)
Hulrom (%)	3.5	1.5	Romdensitet ρ_b (Mg/m ³)
Forbruk (kg/m ²)			Hulrom (%)
Massetemp prod. (°C)	160.0	20.0	Bitumenfylt hulrom (%)
Dekkets densitet ρ_b (Mg/m ³)	2.418		Stabilitet (N)
Maks.teoretisk densitet ρ_{mc} (Mg/m ³)	2.506		Flyt (mm)
Maks. vanninnhold (%)			Stab:Flyt (N/mm)
			Ind. strekkst. (kPa)

Bindemiddeltipe	70/100
-----------------	--------

	μm				mm							
	63	125	250	500	1	2	4	8	11.2	16	22.4	
Tils	8.5	10.0	12.0	15.0	18.0	23.0	29.0	39.0	55.0	95.0	100.0	
Tol.	2.0	3.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	0.0	



Tilslag	Forekomst	Dens.	FI	LA	Mølle	Sort	Andel
Pukk	Durasplitt	2.77	15.0	15	7.0	11-16	50.0
Grus	Durasplitt	2.77	20.0	15	7.0	0-11	35.0
Filler	Miljøkalk	2.75				Filler	5.0
Asfaltgranulat		2.65					10.0

Tilsetningsstoff		Mengde (% av bindem.)	
Vedheftningsmiddel		Mengde (% av bindem.)	

Sted: _____ Dato: 25.04.2016

Underskrift: Bjørn Worum



Arbeidsresept for bituminøse vegdekker og bærelag

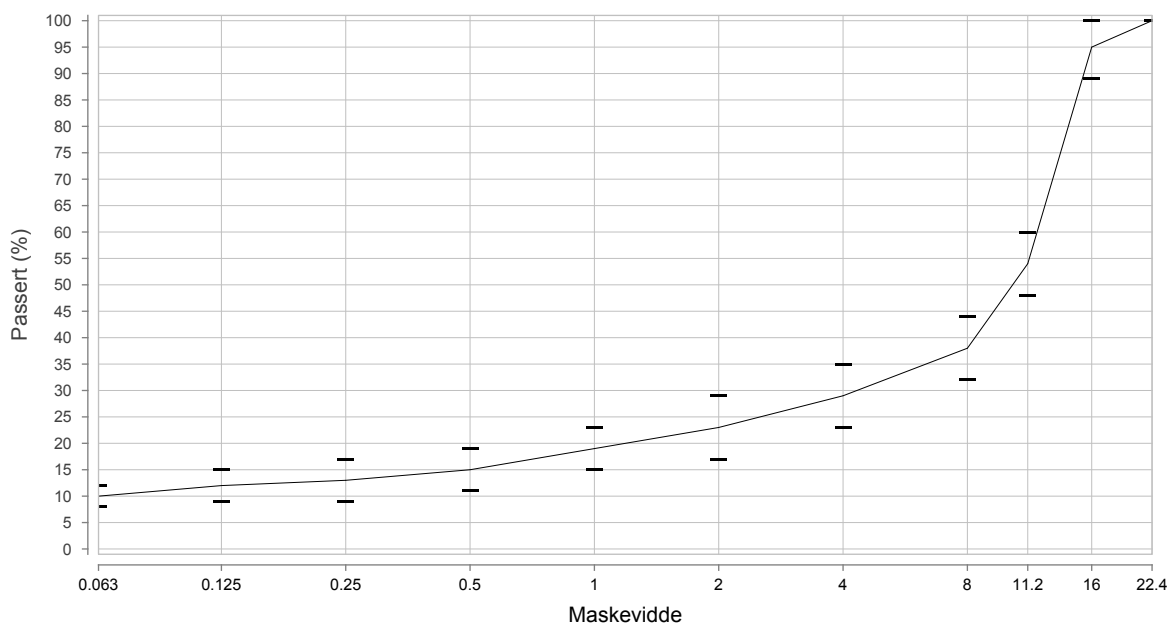
Reseptnr. **16331085**
 Produktnavn
 Reseptdato **19.10.2016**

Produksjonssted **Tromsø**
 Dekketype **SMA 16 PMB Ska 16**
 Asfaltleverandør **Lemminkäinen Norge AS**

	Tilsiktet	Toleranse	Kompaktering	Marshall 2*50 slag
Bindemiddel (%)	5.8	0.4	Maks.densitet ρ_{mv} (Mg/m ³)	
Hulrom (%)	3.5	1.5	Romdensitet ρ_b (Mg/m ³)	
Forbruk (kg/m ²)			Hulrom (%)	5.1
Massetemp prod. (°C)			Bitumenfylt hulrom (%)	73.0
Dekkets densitet ρ_b (Mg/m ³)	2.425		Stabilitet (N)	
Maks.teoretisk densitet ρ_{mc} (Mg/m ³)	2.513		Flyt (mm)	
Maks. vanninnhold (%)			Stab:Flyt (N/mm)	
			Ind. strekkst. (kPa)	

Bindemiddeltipe	Annet
-----------------	-------

	μm				mm							
	63	125	250	500	1	2	4	8	11.2	16	22.4	
Tils	10.0	12.0	13.0	15.0	19.0	23.0	29.0	38.0	54.0	95.0	100.0	
Tol.	2.0	3.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	0.0	



Tilslag	Forekomst	Dens.	FI	LA	Mølle	Sort	Andel
Grus	Durasplitt	2.77	20.0	15	7.0	0-11	43.0
Pukk	Durasplitt	2.77	15.0	15	7.0	11-16	51.0
Filler	Miljøkalk Verdal	2.72				Filler	6.0

Tilsetningsstoff	Viatop	Mengde (% av bindem.)	5.0
Vedheftningsmiddel	Ad-Here LOF Light	Mengde (% av bindem.)	0.3

Sted: _____ Dato: _____

Underskrift: Tor Arne Fenes



Arbeidsresept for bituminøse vegdekker og bærelag

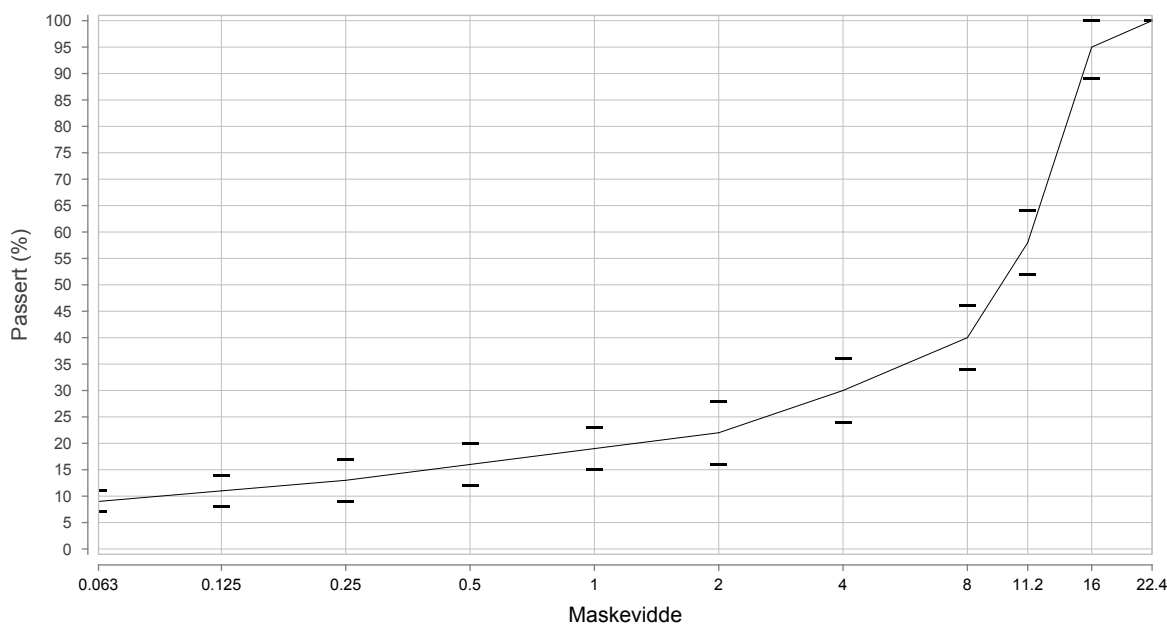
Reseptnr. **16331082**
 Produktnavn
 Reseptdato **22.01.2013**

Produksjonssted **Tromsø**
 Dekketype **SMA 16 70/100 Ska 16**
 Asfaltleverandør **Lemminkäinen Norge AS**

	Tilsiktet	Toleranse	Kompaktering	Marshall 2*50 slag
Bindemiddel (%)	5.8	0.4	Maks.densitet ρ_{mv} (Mg/m ³)	
Hulrom (%)			Romdensitet ρ_b (Mg/m ³)	2.514
Forbruk (kg/m ²)			Hulrom (%)	1.9
Massetemp prod. (°C)			Bitumenfylt hulrom (%)	88.2
Dekkets densitet ρ_b (Mg/m ³)			Stabilitet (N)	
Maks.teoretisk densitet ρ_{mc} (Mg/m ³)	2.515		Flyt (mm)	
Maks. vanninnhold (%)			Stab:Flyt (N/mm)	
			Ind. strekkst. (kPa)	

Bindemiddeltipe	70/100
-----------------	--------

	μm				mm							
	63	125	250	500	1	2	4	8	11.2	16	22.4	
Tils	9.0	11.0	13.0	16.0	19.0	22.0	30.0	40.0	58.0	95.0	100.0	
Tol.	2.0	3.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	0.0	



Tilslag	Forekomst	Dens.	FI	LA	Mølle	Sort	Andel
Pukk	Durasplit	2.77	15.0	15	7.0	11/16	48.0
Grus	Durasplit	2.77	20.0	15	7.0	0/11	46.0
Filler	Miljøkalk	2.75				Filler	6.0

Tilsetningsstoff		Mengde (% av bindem.)	
Vedheftningsmiddel		Mengde (% av bindem.)	

Sted: _____ Dato: _____

Underskrift: Tor Arne Fenes



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway