

Undersøkelse av ballast under jernbane ved hjelp av georadar

SINTEF Bygg og miljø
Veg og samferdsel

Desember 2001

Jernbaneverket
Biblioteket





SINTEF RAPPORT

SINTEF Bygg og miljø Veg og samferdsel

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse: Klæbuveien 153
Telefon: 73 59 46 60
Telefaks: 73 59 46 56

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

TITTEL

Undersøkelse av ballast under jernbane ved hjelp av georadar

FORFATTER(E)

Egil Eide, Inge Hoff og Einar Værnes

OPPDRAAGSGIVER(E)

Jernbaneverket

RAPPORTNR. STF22 A01319	GRADERING Åpen	OPPDRAAGSGIVERS REF. Christopher Schive og Kjell Arne Skoglund	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-02549-4	PROSJEKTNR. 223058	ANTALL SIDER OG BILAG 21
ELEKTRONISK ARKIVKODE Document2	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Inge Hoff, <i>Inge Hoff</i>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Terje Lindland, <i>T. Lindland</i>	
ARKIVKODE	DATO 19.12.01	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Tore Knudsen, forskningssjef, <i>Tore Knudsen</i>	

SAMMENDRAG

Tykkelse og tilstand for ballastlaget spiller en avgjørende rolle for hvor godt en jernbanekonstruksjon oppfører seg. For å undersøke tilstanden til ballasten har en til nå vært avhengig av å benytte manuell prøvetaking noe som er svært arbeidskrevende.

Ved Institutt for teleteknikk, NTNU, har det i tidsrommet 1998 – 2001 blitt utviklet en ny type georadar som består av flere antenner som er montert sammen slik at det er mulig å lage en tredimensjonal avbildning av objekter og lagdelinger i grunnen.

I dette prosjektet har vi undersøkt hvordan denne georadaren kan brukes til å undersøke tilstand og tykkelse til jernbaneballast ute i sporet. Resultatene er lovende og under de forholdene som ble undersøkt var det mulig å bestemme lagtykkelse relativt sikkert. Det ser også ut til at utstyret er godt egnet til å vurdere tilstanden til ballasten. Denne type utstyr vil kunne bli et nyttig redskap for kartlegging av tilstand og vurdering av behovet og typen for vedlikeholdstiltak.

I dette prosjektet er det brukt en eksperimentell prototyp av antennen og det trengs en god del utviklingsarbeid før en har en utgave som kan tas i praktisk bruk. Dette gjelder både selve utstyret og dataprogrammer for tolkning og framstilling.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Jernbane	Railroad
GRUPPE 2	Feltforsøk	Field trial
EGENVALGTE	Georadar	Ground Penetrating Radar
	Jernbane ballast	Railroad ballast

INNHALDSFORTEGNELSE

1	Innledning	3
2	Georadar	3
3	Tidligere arbeid	5
4	Feltmåling 26. oktober	6
	4.1 Selsbakk	7
	4.2 Marienborg	7
	4.3 Skansen tunnel	7
	4.4 Trondheim Sentralstasjon spor 3.....	7
	4.5 Radaroppsett.....	7
5	Resultater	8
	5.1 Selsbakk	8
	5.2 Marienborg	8
	5.3 Skansen tunnel	10
	5.4 Trondheim Sentralstasjon.....	11
6	Feltmåling 28. november	12
	6.1 Dybdekalibrering.....	12
7	Resultater	13
	7.1 Trondheim Sentralstasjon.....	15
8	Diskusjon og konklusjon	15
9	Videre arbeid	16
	9.1 Spesialutviklet utstyr for undersøkelse av ballast og lagdeling	16
10	Referanser	17
11	Vedlegg A Kartutsnitt over måleområdet	19
12	Vedlegg B Fullstendige radargram fra strekningen Marienborg til Skansen	21

1 Innledning

Ballastpukk er en meget viktig del av en jernbanekonstruksjon. Ballastens viktigste oppgaver er:

- Fundament for svillene. Skape vertikal og horisontal støtte for svillene.
- Spre lastene fra toget slik at belastningen på undergrunnen ikke blir for stor.
- Drenerer bort vann fra konstruksjonen.
- Bidra til en telesikker konstruksjon.

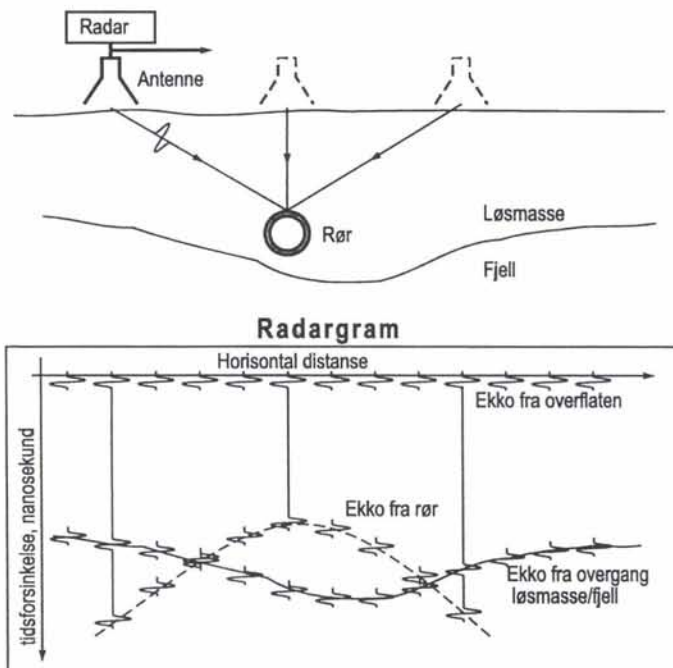
Det er viktig at tykkelsen på ballasten er forholdsvis jevn langs et sporet for å sikre en jevn respons på belastning og hindre at det oppstår langbølgede langsgående deformasjoner.

For at ballasten skal fungere bra er det viktig at den er fritt drenerende og ikke telefarlig. Det vil si at det ikke er for mye finkornig materiale til stede i ballasten. For å sikre seg mot dette problemet brukes grov stein av god kvalitet. Likevel vil det over tid akkumuleres finstoff som vil forringe ballastens oppførsel. Dette skyldes nedknusing av stein og inntrenging av materiale som ligger lenger ned i konstruksjonen.

I dag er kartlegging av ballasttykkelse og tilstand basert på manuell prøvetaking og er dermed veldig tid- og arbeidskrevende. En automatisert metode for kontinuerlig kartlegging av hele strekninger vil være et meget nyttig verktøy for planlegging av vedlikehold og tidlig identifisering av potensielle problemområder.

2 Georadar

Georadar er et verktøy som har vært i bruk siden midt på 1970-tallet til undersøkelse av undergrunnen. Anvendelsen har omfattet alt fra geologiske undersøkelser til arkeologi og deteksjon av rør og kabler. I de senere år har georadar blitt tatt i bruk i noen land for å undersøke veier, flyplasser og jernbane. En utførlig lærebok om georadar er skrevet av D.J. Daniels [1]. Figur 1 viser prinsippskissen for en georadar:



Figur 1. 2-dimensjonal datainnsamling basert på at georadarens antenne beveges langs en linje.

En georadar sender ut radiobølger som typisk ligger i frekvensområdet 10 MHz – 2 GHz alt etter grunnforholdene og anvendelsen. Radaren registrer ekko fra naturlige lagdelinger eller nedgravde objekter hvis disse har visse kontrastegenskaper i forhold til bakken. For ulike typer jordsmonn vil forskjeller i dielektrisitetskonstanten ϵ være opphav til radarekko der ekkostyrken Γ er gitt ved

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}. \quad (1)$$

Vann har en dielektrisitetskonstant på hele 81 (jfr Tabell 1), og dette gjør at en kan forvente gode reflekser fra eventuelle grunnvannsspeil. Metall gir gode ekko på grunn av ledningsevnen til metallet. Radiobølgene dempes kraftig i bakken på grunn av ledningsevnen til jorden. Generelt kan en si at lave frekvenser trenger lengre ned i bakken (1 – 20 meter), men gir dårligere oppløsning i bildet. Disse frekvensene blir oftest brukt for geologiske undersøkelser. Høye frekvenser blir hurtigere dempet i bakken, og de trenger som oftest ikke lenger enn 0.5 – 2 meter. For anvendelser der en ønsker å avbilde objekter eller lagdelinger med høy oppløsning, vil en ofte bruke frekvenser i området 250 MHz – 2 GHz.

Radaren måler tidsforsinkelsen τ fra utsendt puls til ekko mottas, og dette kan regnes om til dybde (d) ved å bruke følgende uttrykk:

$$d = \frac{v}{2} \tau. \quad (2)$$

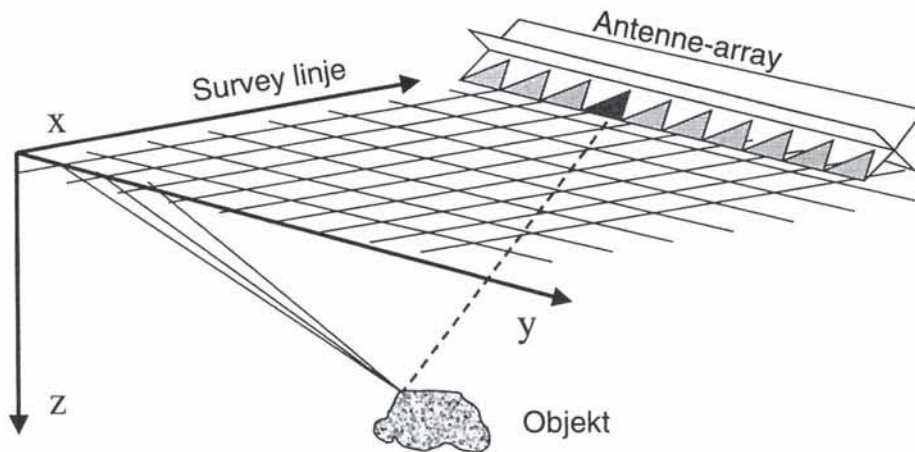
Bølgehastigheten v til radiobølgene avhenger av dielektrisitetskonstanten til jordsmonnet

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (3)$$

og en må derfor kjenne v eller anta en verdi for dielektrisitetskonstanten for å regne tidsforsinkelse om til dybde. c er her lysfarten i vakuum $3 \cdot 10^8$

Det finnes i dag flere kommersielle georadarer i bruk, og disse baserer seg i hovedsak på pulsteknikker. Såkalte ultra-korte pulser med pulslengde i størrelsesorden 0.5 – 10 ns og høy spisseffekt blir generert av radaren. Disse korte pulsene har et meget bredt spektralinhold, men de har begrensninger med henhold til pulsenergi og derved penetrasjonsevne. Til tross for dette er denne bølgeformen så og si enerådende på grunn av den gir relativt enkel radarkonstruksjon. De fleste kommersielle georadarer bruker to antenner (en til sending og en til mottaking), og resultatet fra en slik måling vil være en 2-dimensjonalt dybdeprofil (radagram).

Ved Institutt for teleteknikk, NTNU, er det i tidsrommet 1998 – 2001 utviklet en ny type georadar som bruker moderne digitalt genererte bølgeformer for å få høy systemytelse og høy oppløsning [2]. Den viktigste forskjellen på denne radaren og de fleste kommersielle georadarene er at den er konstruert for å gjøre 3-dimensjonal avbildning av undergrunnen. Dette gjøres ved å samle data på mange antenner samtidig. Figur 2 viser prinsippet for 3-dimensjonal avbildning. Antennene avleses elektronisk i løpet av 20 – 30 millisekunder samtidig som antenne-arrayet kjøres i gangfart langs en linje. På denne måten får en samlet inn data på et rektangulært rutenett slik at 3-dimensjonal avbildning kan gjøres i ettertids.



Figur 2. 3-dimensjonal datainnnsamling basert på elektronisk avlesning av antenne-arrayet og fysisk bevegelse av arrayet langs en linje.

Antennearrayet består av 31 antenner som dekker frekvensområdet fra 100 MHz – 2.4 GHz. Disse antennene ble opprinnelig utviklet for å avbilde små objekter som landminer og nedgravde kabler. Siden antennene ikke er særlig effektive for frekvenser under 300 MHz, kan en ikke vente å se særlig dypere enn ca 1.0 meter med dette oppsettet.

3 Tidligere arbeid

Georadar har tidligere vært brukt til undersøkelse av ballastlag under jernbanespor. Ved Universitetet i Edinburgh har en gruppe forskere gjort initielle studier av georadar for kartlegging av tilstanden til ballast [3][4]. Disse eksperimentene ble utført på en spesiell teststrekning som inneholdt både ren og brukt ballast under sviller av tre og betong. Målinger viste en klar refleksjon fra overgangen mellom ballast og underlag, og det var mulig å bestemme tykkelsen med mindre enn 1% feil ut fra antatt bølgehastighet i ballastlaget.

Videre ble det gjort laboratorieforsøk for å måle bølgehastigheten i forskjellige typer ballast [5], og tabell 1 viser at dielektrisitetskonstanten øker med vanninnholdet. Det er også en klar tendens til at brukt ballast har høyere dielektrisitetskonstant på grunn av finstoffet.

Tabell 1. Eksperimentelt bestemte dielektriske egenskaper til ballast [4].

Material	ϵ_r	Hastighet (m/s)
Luft	1,0	$3,00 \cdot 10^8$
Vann	81,0	$0,33 \cdot 10^8$
Tørr ren ballast	3,0	$1,73 \cdot 10^8$
Våt (5% vann) ren ballast	3,5	$1,60 \cdot 10^8$
Vannmettet ren ballast	26,9	$0,58 \cdot 10^8$
Tørr brukt ballast	4,3	$1,45 \cdot 10^8$
Våt (5% vann) brukt ballast	7,8	$1,07 \cdot 10^8$
Vannmettet brukt ballast	38,5	$0,48 \cdot 10^8$

Jack and Jackson [6] har utført praktiske målinger langs opptil 500 meter lange jernbanestrekninger. De brukte en håndholdt georadar der de plasserte antennene manuelt mellom

svillene. På den måten foretok de målingene med nokså stort intervall, men de unngikk på den annen side problemene med dårlig penetrasjon gjennom svillene. Resultatene fra disse undersøkelsene, som ble utført på 450 MHz senterfrekvens (dvs. frekvensområdet fra 200 – 700 MHz), viser tydelige lagdelinger mellom ballast og underlag. I noen tilfeller kunne de også se fjellgrunnen som en underliggende lagdeling. Den mest interessante observasjonen var imidlertid at refleksjonsprofilen for rensert ballast inneholdt mindre støy (clutter), enn for forurenset ballast. De kunne videre påvise variasjoner i ballasttykkelse på steder der vedlikeholdsproblemer var rapportert tidligere. En interessant observasjon var også at radardataene viste at ballastlaget var meget tynt i områder som var kjent for å ha såkalte “vaskesviller”. Forsøkene til Jack and Jackson var kvalitative siden de brukte en antatt bølgehastighet på $1,3 \cdot 10^8$ m/s til dybdekonverteringen uavhengig av hvilken type ballast som befant seg i måleområdet. De konkluderte likevel med at metoden var nyttig til å identifisere problemområder.

En tilsvarende måling med 900 MHz (450 – 1350 MHz) antenner ble utført av Haugenschmidt [7] for det sveitsiske jernbaneverket. Disse målingene ble foretatt med en mobil enhet som ble kjørt med hastigheten 10 km/h langs linjen. Haugenschmidt brukte avansert signalbehandling til å fjerne innvirkningen av svillene i radarbildet og til å forbedre signal-til-støyforholdet i radarmålingene. Radardata ble sammenlignet med utgravninger, og de konkluderte med at en bølgehastighet på $1,4 \cdot 10^8$ m/s gav tilstrekkelig nøyaktighet på målingen av ballasttykkelsen.

Narayanan, Kumke og Li [8] har også utført målinger av ballasttykkelse med georadar, og de gjorde bruk av både 400 MHz og 100 MHz antenner. Bruk av såpass lave frekvenser som 100 MHz gav for dårlig oppløsning til å måle ballasttykkelsen, men de kunne til gjengjeld registrere ekko fra underliggende lagdelinger.

4 Feltmåling 26. oktober

Det ble foretatt eksperimentelle radarmålinger med bruk av NTNU's radar høsten 2001. Radaren ble montert inne i førerhuset på en Robel lastetraktor mens antennevognen ble koplet til foran førerhuset som vist i figur 3. Et triggehjul sørget for at radaren foretok målinger på alle antennene for hvert 5.9 cm intervall langs kjøreretningen.

Første del av eksperimentet ble utført fredag 26. oktober i Trondheim. Hovedmålet med denne testen var å prøve utstyret langs fire utvalgte steder i nærheten av Trondheim for å se hvor godt radaren kunne finne tykkelsen på ballastlaget. Videre ønsket vi å studere virkningen av jernbaneskinner og sviller i radaravbildningen.

De fire målestedene ble valgt ut med tanke på å samle inn data fra områder med forskjellig grunnforhold og svilletyper. I utgangspunktet ønsket vi å gjøre radarmålinger for både tre- og betongsviller i områder som hadde løsmasser og fjellgrunn. I tillegg ønsket vi å gjøre målinger i en tunnel for å studere hvordan reflekser fra vegger og tak påvirket målingene. Ut fra disse kriteriene ble fire forskjellige målesteder valgt ut.



Figur 3. Antennevogn med antennearray montert på Robel lastetraktor.

4.1 Selsbakk

Området ved Selsbakk (Stolpe 2671 – 2672) ligger i en fjellskjæring. Det er brukt betongsviller langs området som ble undersøkt. Det er ukjent hvilke type underlag som er brukt under ballastlaget, men vi håpet på å se refleksjoner fra overgangen fyllmasse/fjell.

4.2 Marienborg

Dette er et flatt området med elvesand/fyllmasser som underlag. Det er brukt tresviller langs den aktuelle målestrekningen.

4.3 Skansen tunnel

Tunnellen mellom Ila og Skansen består av en murt kulvert med løsmasser omkring. Det er brukt tresviller inne i kulverten og betongsviller utenfor. Målet med denne undersøkelsen var å se om refleksjoner fra tunnelvegger og tak påvirket målingene.

4.4 Trondheim Sentralstasjon spor 3

Spor 3 inne på Trondheim Sentralstasjon har for det meste tresviller. På noen steder er det benyttet betongsviller, og det finnes også en asfaltert planovergang der vi ønsket å finne ut hvilke type sviller som befant seg under asfalten. Det ble foretatt radarmåling ved siden av spor 3 (mellom spor 3 og 4) for å se etter eventuelle kabler og rør samt kryssende kulvert mellom perrongene.

4.5 Radaroppsett

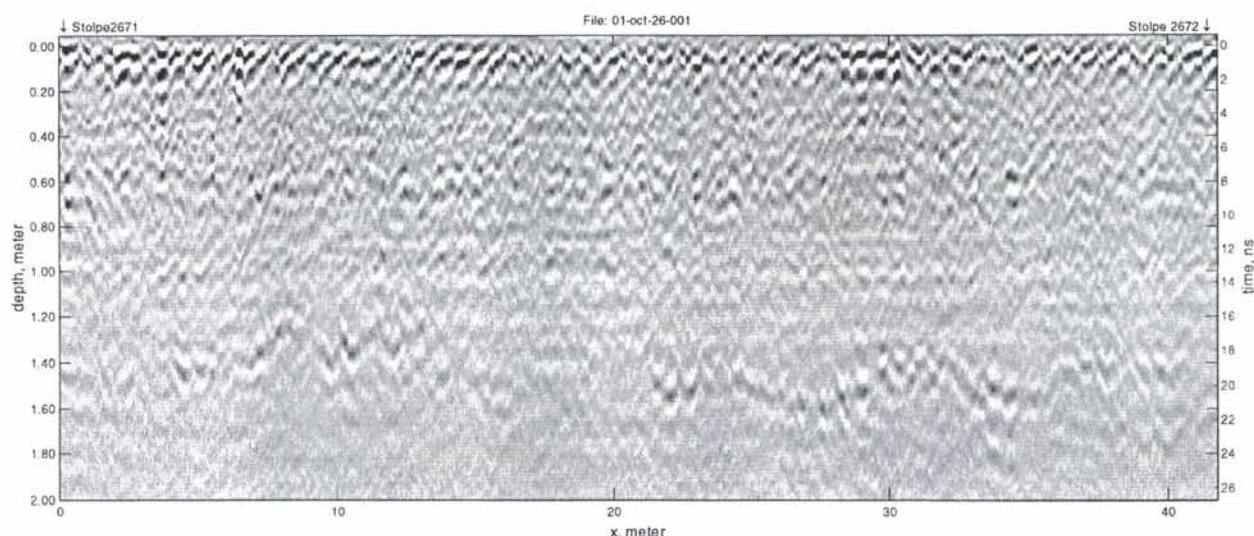
Radaren ble programmert til å sende ut en bølgeform med frekvensinnhold 100 MHz – 1.6 GHz. Denne bølgeformen ble benyttet til målingene ved Selsbakk og Marienborg. De første målingene på Selsbakk indikerte for dårlig penetrasjonsevne. For å få til bedre penetrasjon, ble radaren programmert til å sende ut en ny bølgeform som dekket frekvensbandet 100 MHz – 1.0 GHz.

Dette vil i praksis si at radaren bruker prosentvis mer integrasjonstid på de lavere frekvensene enn ved den første bølgeformen (100 MHz – 1.6 GHz). Den nye bølgeformen ble først tatt i bruk ved Marienborg og ble siden brukt i resten av målingene. Radargrammene har både tidsakse i nanosekunder (ns) og dybdeakse i meter. Vi har brukt en bølgehastighet på $1,45 \cdot 10^8$ m/s for å regne tidsforsinkelse om til dybde. Siden denne hastigheten har en antatt verdi, har vi valgt å referere til nanosekunder i beskrivelsen av refleksjoner som opptrer i radargrammene.

5 Resultater

5.1 Selsbakk

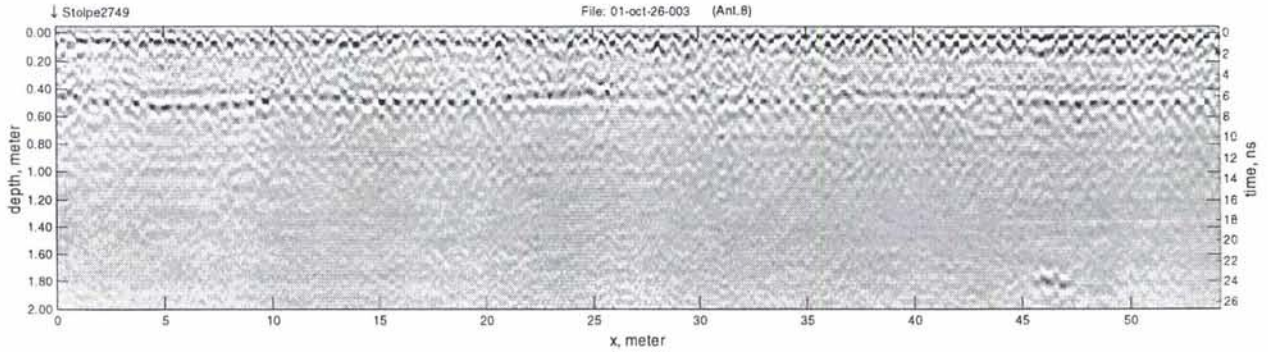
Figur 4 viser et radargram fra Selsbakk. Betongsvillene ses tydelig som et regulært mønster ved ca. 0,5 ns. Radargrammet viser mange irregulære ekko (clutter) ned til ca 8 ns der en kan ane en overgang til annet materiale. Det er imidlertid relativt svake ekko fra denne overgangen, og det er vanskelig å bestemme dybden til ballastlaget nøyaktig. Ved ca. 18 – 20 ns observeres et svakere ekko som trolig stammer fra overgangen fra løsmasse til fjellgrunn.



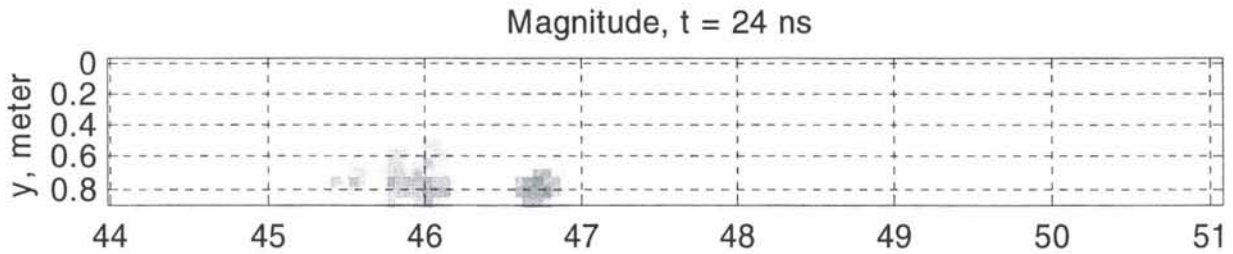
Figur 4. Selsbakk, radargram (100 MHz – 1.6 GHz). Svake usammenhengende ekko omkring 8 ns indikerer overgang mellom ballastlag og underlagsmasser.

5.2 Marienborg

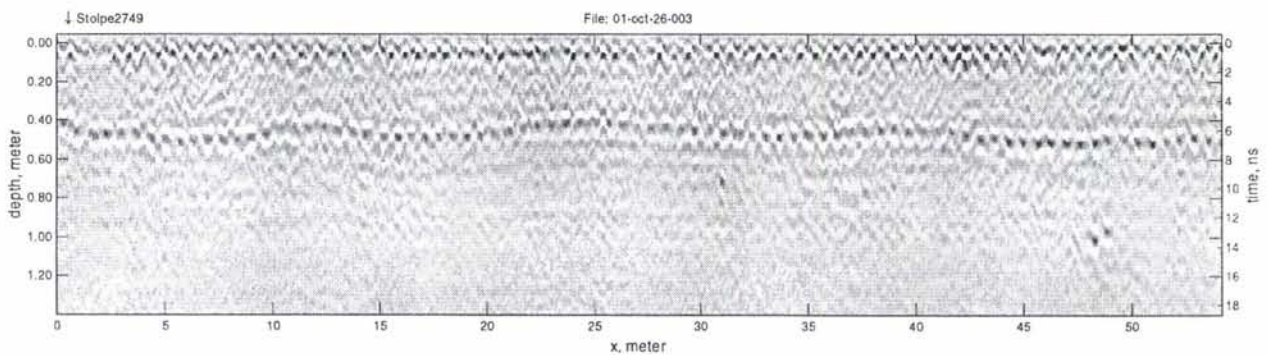
Figur 5 viser et radargram fra antenne nr. 8 ved Marienborg. Her kan en se et tydelige ekko fra overgangen mellom ballastlag og løsmasser ved ca. 6 ns. Ved $x = 46$ meter observeres et kraftig ekko ved $t = 24$ ns. Dette er analysert nærmere i figur 6 der en har laget et horisontalsnitt ved samme tidsrom ved å bruke alle antennene. Dette snittet viser at objektet som genererer ekkoet ligger i den ene siden av fyllingen.



Figur 5. Marienborg, dybdeprofil, antenne #8 (100 MHz – 1.6 GHz). Kraftig ekko omkring $t = 6$ ns indikerer overgang mellom ballastlag og underlag.

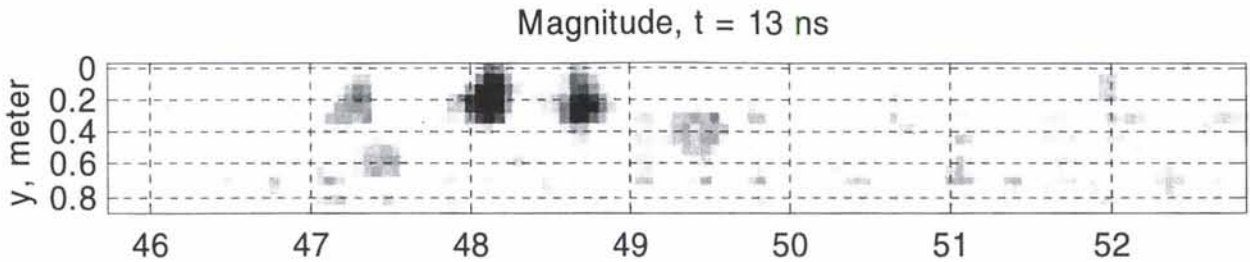


Figur 6. Marienborg, horisontalsnitt ved $t = 24$ ns. Ekko ved $x = 46 - 47$ m er fra et objekt som ligger på den ene siden av skinnegangen.



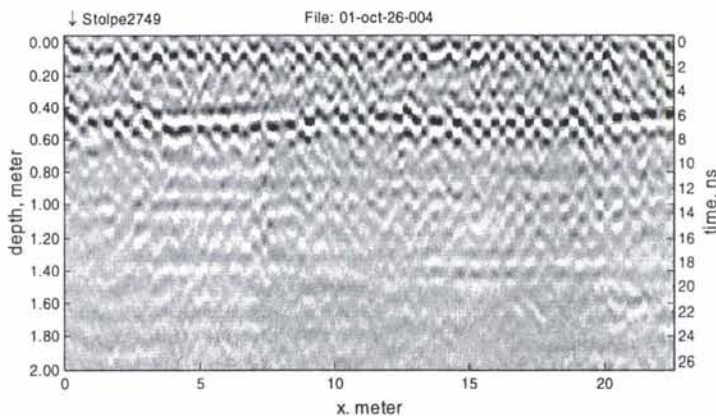
Figur 7. Marienborg, dybdeprofil, antenne #24. (100 MHz – 1.6 GHz). Kraftig ekko omkring $t = 6$ ns indikerer overgang mellom ballastlag og underlagsmasser.

Tilsvarende radargram for antenne nr. 24 i arrayet finnes i figur 7. Også her finner en to kraftige ekko ved $x = 48$ meter og $t = 13$ ns. Figur 8 viser et horisontalsnitt ved dette tidsrommet, og vi ser tydelige ekko for $x = 47 - 49$ meter. Det er all grunn til å tro at ekkoene stammer fra ett objekt, men at det ligger sviller og skygger for ekkoet. Siden ekkoet er såpass kraftig, må vi anta at dette er et metallisk objekt.



Figur 8. Marienborg, horisontalsnitt ved $t = 13$ ns. Ekko ved $x = 47 - 49$ viser tydelige punktreflekter.

Figur 9 viser måledata fra et lite utsnitt ved Marienborg der vi benyttet en bølgeform med frekvensinnhold 100 MHz – 1 GHz. Radargrammet er direkte sammenlignbart med de første 22 meterne av figur 5. Vi observerer at ekkoene fra overgangen ballast/løsmasse har blitt kraftigere mens tidsopløsningen i radarbildet har blitt dårligere.

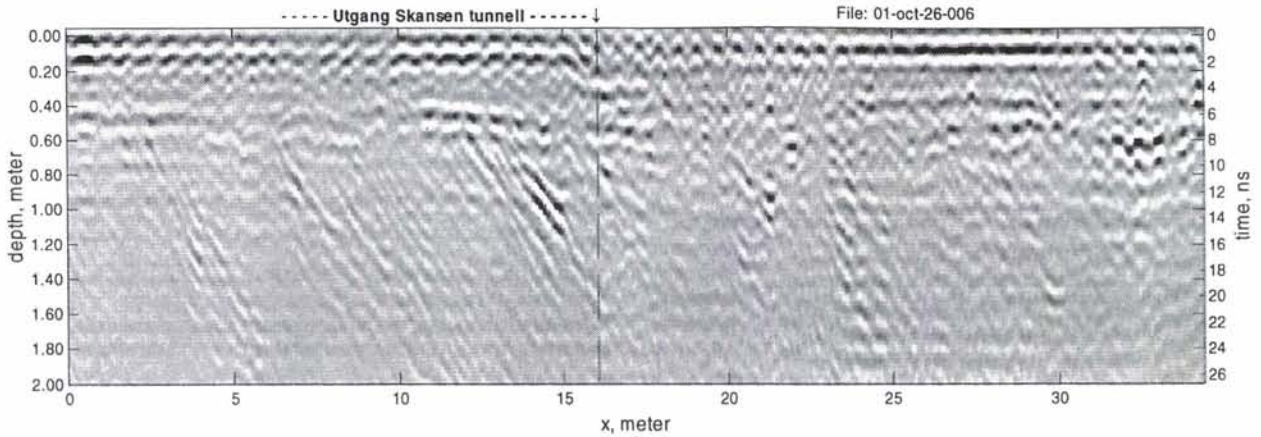


Figur 9. Marienborg, dybdeprofil (100 MHz – 1 GHz).

Generelt kan en si at måleforholdene ved Marienborg var gode da vi fikk klare ekko fra overgangen mellom ballast og løsmasse.

5.3 Skansen tunnel

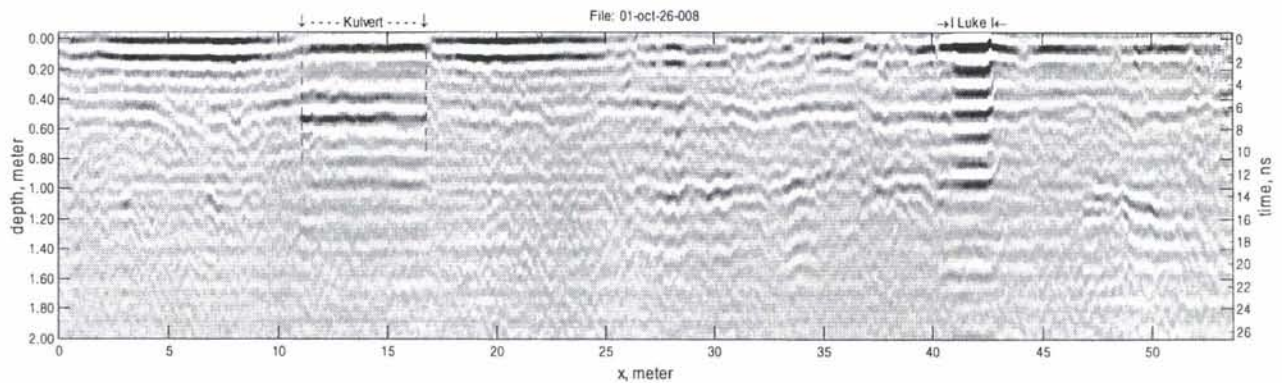
Målingene ved Skansen tunnel startet ca 16 meter inne i tunnelen og fortsatte ca 18 meter langs sporet på utsiden av tunnelen. Inne i tunnellen er det benyttet tresviller, mens det på utsiden er betongsviller. Vi observerte tydelig forskjell på ekkoene fra tresvillene og betongsvillene. Det virker som tresvillene på grunn av fuktighet gir kraftige ekko, mens betongsvillene gir mer distinkte ekko der hvor armeringsjernet ligger plassert inne i svillen. Radargrammet er ellers karakterisert ved ekko fra mange skråstilte lagdelinger. Disse lagdelingene kan ha blitt dannet ved utfylling av Skansenområdet. Løsmassekart fra NGU [9] angir at dette området er bygd opp av fyllmasser. Overgangen mellom ballast og løsmasser varierer mye på utsiden av tunnelåpningen, og dette kan tyde på at det har vært gravd mye i området.



Figur 10. Skansen tunnel, dybdeprofil (100 MHz – 1 GHz). Det er brukt tresviller inne i kulverten og betongsviller utenfor.

5.4 Trondheim Sentralstasjon

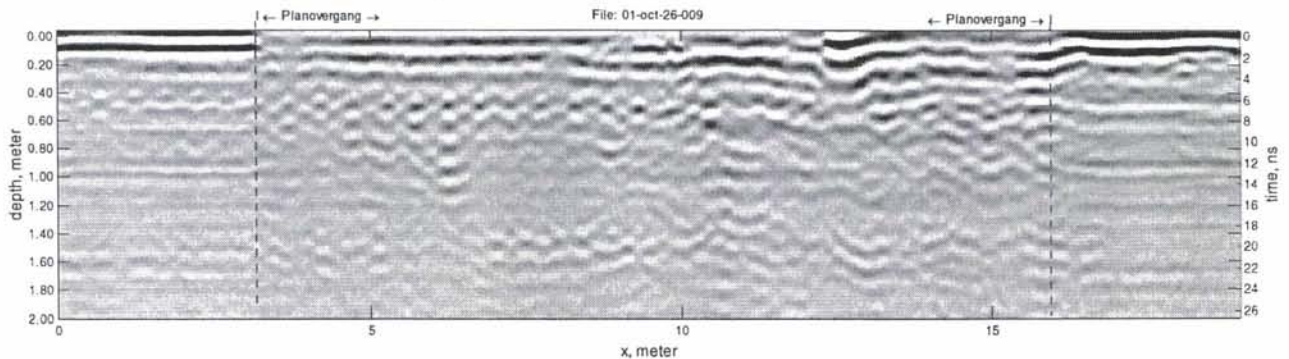
Området mellom spor 3 og 4 på Trondheim Sentralstasjon ble undersøkt ved å foreta en måling med antennene montert på utsiden av sporet. Figur 11 viser et radargram fra dette området, og en legger merke til at bildet ikke har de karakteristiske ekkoene fra svillene. En tydelig lagdeling ved $t \approx 6$ ns er overgangen mellom ballast og løsmasser. Ved $x = 11,5$ meter, oppstår et kraftig ekko som vedvarer til $x = 16,5$ meter. Dette er etter alt å dømme oversiden av en kryssende betongkulvert som går mellom spor 3 og 4. Taket til betongkulverten ligger altså på samme dyp som overgangen til løsmassene. Ved $x = 42$ meter passerte radaren over en metalluke på overflaten, og dette gav et kraftig ekko med multiple refleksjoner. Vi kan også observere en dypere lagdeling i området $x = 26 - 50$ meter, og dette kan muligens være et resultat av at det har vært brukt forskjellige typer masse under utfylling av stasjonsområdet.



Figur 11. Trondheim Sentralstasjon, Avlesning til side for spor 3. Luke av metall ved $x = 42$ m. Kraftig ekko mellom $x = 11.5$ m og $x = 16.5$ m er fra kryssende kulvert.

For å forsøke å identifisere hvilke type sviller som ligger under en asfaltert planovergang, ble radaren kjørt over denne overgangen. Figur 12 viser radargram fra dette eksperimentet. Vi kan tydelig se forskjell på radargrammet idet radarbølgene passerer gjennom asfalten. Det virker imidlertid som om ekkoet fra asfalten maskerer svillene, og det er derfor vanskelig å si noe om

hvilke type sviller som ligger under asfalten. Ved $x = 12,5$ meter var det sand i sporet, og dette gjorde at antennevognen klatret opp noen centimeter ved passasjen. Dette vises som en “dip” i radargrammet.



Figur 12. Trondheim Sentralstasjon. Passering av asfaltet planovergang.

6 Feltnmåling 28. november

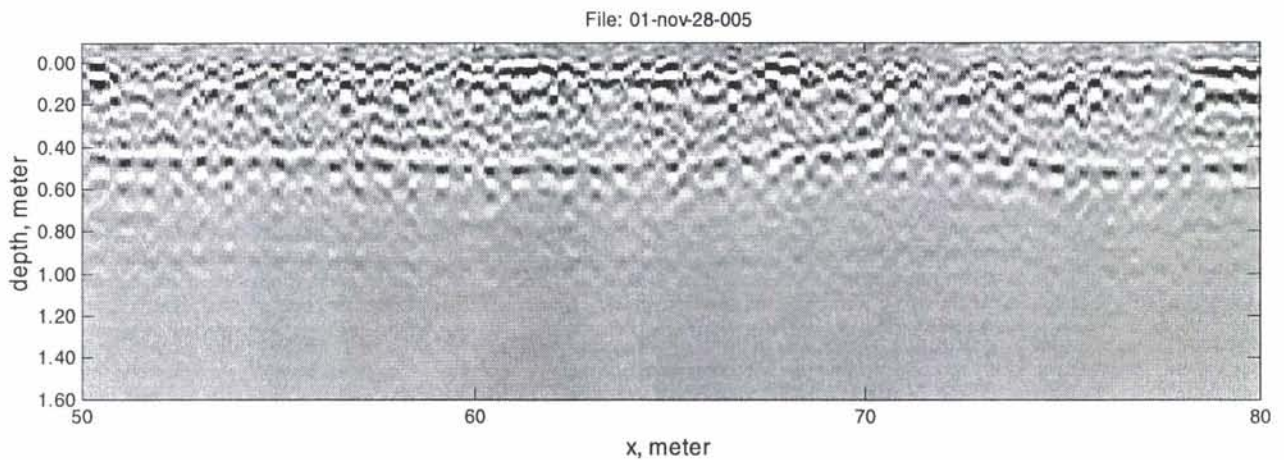
En ny feltnmåling ble foretatt 28. november langs strekningen Marienborg – Trondheim Sentralstasjon. Ved denne målingen var radaroppsettet forenklet ved at vi kun brukte 7 antenner, samtidig som måleintervallet ble økt til 10 cm langs sporet. Dette gav vesentlig raskere datainnsamling. Radaren brukte en bølgeform med frekvensinnhold 100 MHz – 1.6 GHz med 3 millisekund integrasjonstid for hver antenne. Det ble samlet inn data langs hele strekningen fra Marienborg til og med tunnelen ved Skansen samt for Spor 4 og 6 ved Trondheim Sentralstasjon. Vedlegg A viser et kartutsnitt av målestrekningen med referanser til datafilene.

6.1 Dybdekalibrering

For å kalibrere dybdeskalaen ble det foretatt en enkel utgraving ned til overgangen mellom ballastlag og underlagsmasse. Denne utgravingen ble foretatt ved $x = 62$ meter ved Marienborg. Figur 13 viser et fotografi av utgravingen, mens figur 14 viser et utsnitt av radardata der utgravingen fant sted. Dybden til overgangen mellom ballastlag og underlagsmasse ble målt til å være 47 cm fra overkant av pukklaget. Ballastlaget inneholdt noe finmasser, men det var såpass lave mengder at ballasten i praksis kan regnes for å være av normal kvalitet. Underlagsmassen bestod av fuktig sand. Det var en ganske klart skille mellom de to massetyperne. Tidsforsinkelsen i radargrammet var 6,5 ns, og dette tilsvarer en bølgehastighet på $1,45 \cdot 10^8$ m/s. I tabell 1 er denne bølgehastigheten målt for tørr, forurenset ballast, men det er også sannsynlig at denne bølgehastigheten kan passe for våt ballast som er lite forurenset. Denne enkle målingen i et punkt er selvsagt ikke tilstrekkelig til å brukes til praktisk kartlegging. Til det trengs det mer omfattende og systematiske undersøkelser.



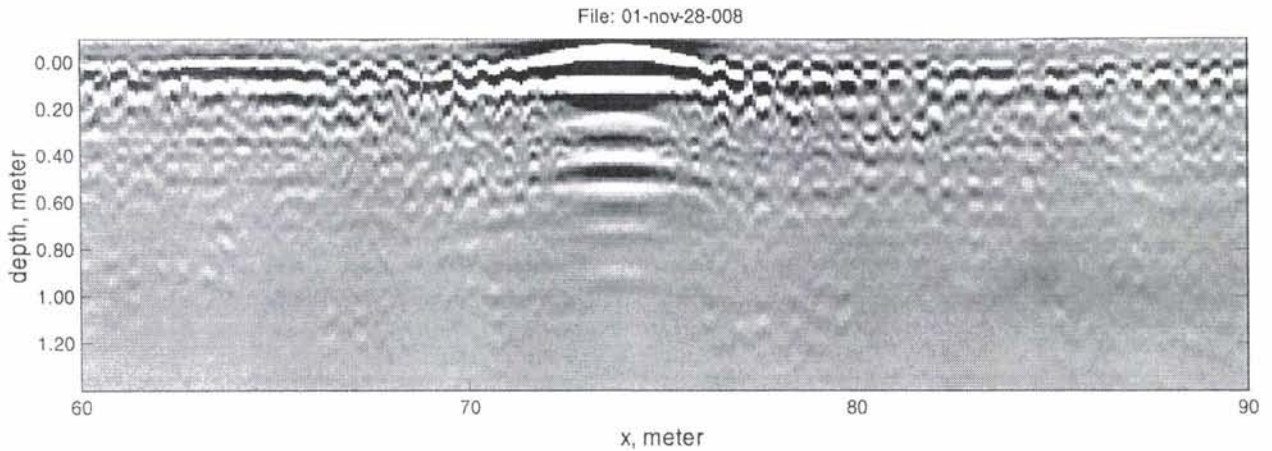
Figur 13. Dybdekalibrering ved Marienborg.



Figur 14. Utsnitt fra Marienborg. Tydelige refleksjoner ses i området mellom svillene.

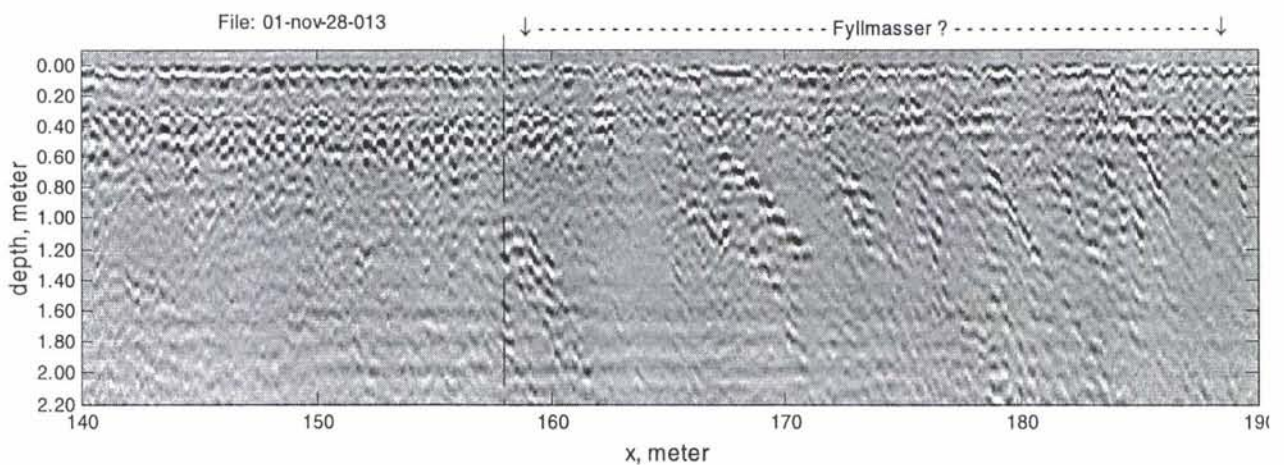
7 Resultater

Vedlegg B inneholder fullstendige radargram for hele måleserien fra Marienborg til Ila. Som vist i figur 14, er det en tydelig refleksjon fra lagdelingen i data fra Marienborg. Ved passering av sporveksler vil en skinne krysse under radarantennen, og dette gir et meget kraftig ekko med multiple refleksjoner som vist i figur 15. En generell observasjon er at ekkoet fra overgangen mellom ballastlag og underlag blir både svakere og mer uryddig jo mer en nærmer seg Ila. I følge gruppeleder BaneProduksjon Nord, Einar Solem, har det nylig blitt skiftet sviller i spor 2 i hele dette området, og ballastlaget har i dette arbeidet blitt utsatt for mye graving og mekaniske påkjenninger. Det er derfor grunn til å forvente mer uryddige radarekko fra dette området.



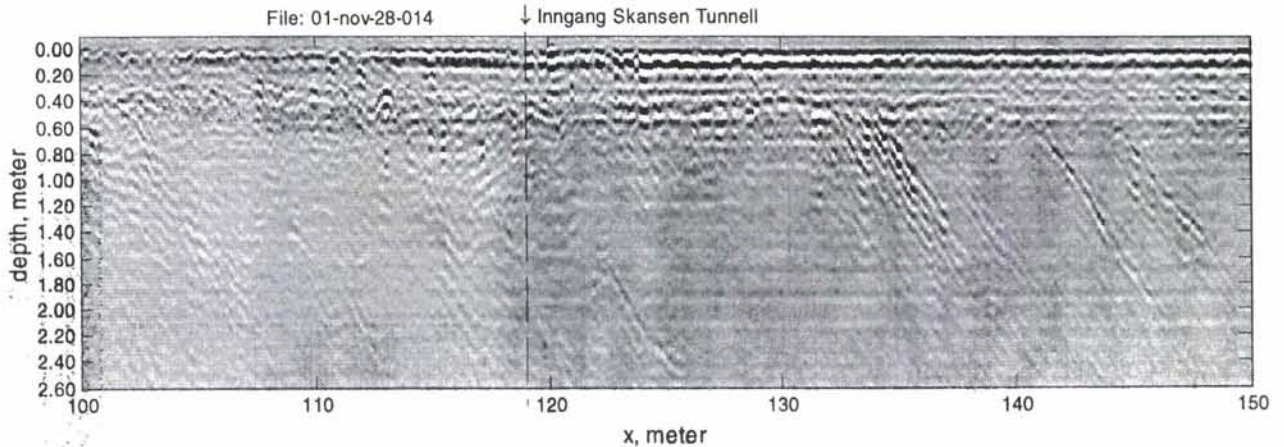
Figur 15. Sporveksler ved Marienborg gir kraftig ekko med multiple refleksjoner.

Ved Ila endrer radardataene karakter ved at det oppstår flere skrå etterfølgende lagdelinger i underlagsstrukturen. Dette kommer trolig av at en beveger seg fra et område med naturlig elvesand og inn på et område som er blitt fylt opp av løsmasser. De skrå lagdelingene observeres gjennom hele datasettet fram til Skansen.



Figur 16. Radargram fra Ila. Mulig overgang fra område med naturlig elvesand til fyllmasser.

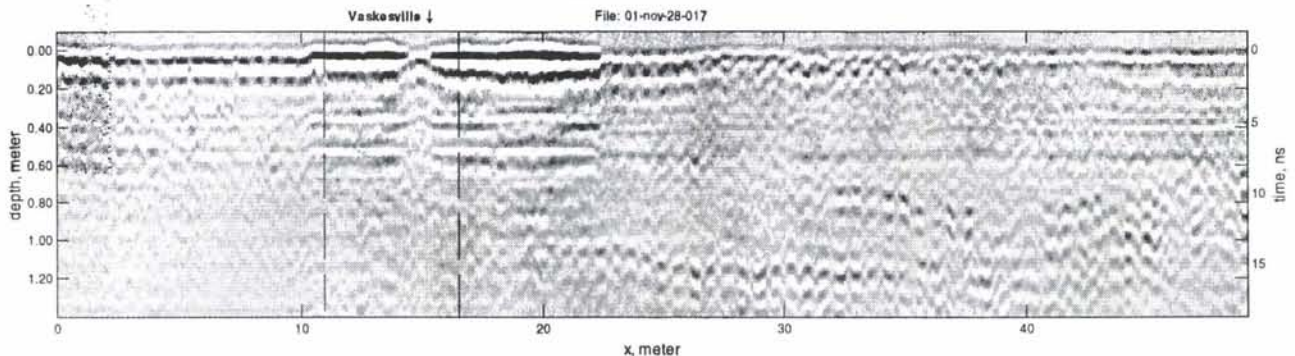
Figur 17 viser et radargram fra inngangen til Skansen tunnel. Vi observerer at det oppstår horisontale linjer i radarbildet, og disse kommer fra refleksjoner i vegger og tak. Det er likevel fullt mulig å studere lagdelingene i underlaget inne i tunnelen.



Figur 17. Detaljutsnitt fra inngangen til Skansen tunnel. Tydelige skrå lagdelinger er synlige i radargrammet.

7.1 Trondheim Sentralstasjon

I spor 6 på Trondheim Sentralstasjon er det rapportert om vaskesviller ved en skinneskjøt ca 15 meter fra sporveksleren. Figur 18 viser radardata fra Spor 6. De kraftige refleksjonene i området $x = 10 - 23$ meter sammenfaller med at det er lagt ut ny pukklaget i samme området. Årsaken til denne tilsynelatende kraftige refleksjonen kan være at toppen av pukklaget i dette området ligger høyere enn og delvis over toppen av svillene. Dette kan ha påvirket antennene slik at de fikk endret karakteristikk under passasjen. Det er vanskelig å observere en tydelig lagdeling i området der vaskesvillen er rapportert, men vi observerer lagdelinger like ved vaskesvillen som skrår nedover. Det er derfor all grunn til å tro at tro at finmasser har migrert oppover mot svillene i dette området. Siden denne undersøkelsen ble påvirket av litt unormale forhold er det viktig å få undersøkt flere tilfeller der en vet om vaskesviller for å være sikker på at utstyret er egnet til å finne slike problemområder.



Figur 18. Trondheim Sentralstasjon, Spor 6. Vaskesvill rapportert ved $x = 13$ m.

8 Diskusjon og konklusjon

Resultatene fra eksperimentet samsvarer godt med de resultatene som er beskrevet i litteraturen. De utførte eksperimentene har blitt utført med vesentlig høyere båndbredde enn det som er rapportert i litteraturen. Den høye båndbredden gjør at vi får høy oppløsning i radarbildene, og dette gir mulighet til å studere lagdelingene i detalj.

Overgangen mellom pukklag og finmasser gav spesielt på Marienborg sterk refleksjon. Det skulle derfor være relativt enkelt å utvikle programvare som ut fra radardata kan tegne profiler av tykkelsen av pukklaget. Vi har brukt en bølgehastighet på $1,45 \cdot 10^8$ m/s for å regne tidsforsinkelse om til dybde. Nøyaktigheten til dybdekonverteringen vil avhenge av hvor stort avvik det er i

bølgehastigheten på det aktuelle målestedet. Skinnene gav liten innvirkning på resultatene. Dette skyldes at antennene er relativt direkte og dermed stråler mesteparten av sendereffekten ned i bakken.

Tresviller gav mye sterkere respons i bildet enn betongsviller. Årsaken er trolig at tresvillene som regel er gjennomtrukket av vann, mens betongsvillene er relativt tørre innvendig. Til tross for at betongsvillene inneholder armeringsjern, vil vått tre ha stor dielektrisitetskonstant som gir kraftigere ekko. For måling av tykkelse på ballastlag er det tilstrekkelig å kun gjøre målinger mellom svillene. Det har derfor ingen praktisk betydning for målingene hvilke sviller som blir brukt.

Refleksjoner fra tunnelvegger og tunneltak var ikke framtreddende i de datasettene vi samlet inn. Konklusjonen er derfor at radaren med godt skjermede antenner også kan brukes i tunneller.

Høyoppløselig 3-dimensjonal avbildning var vanskelig på grunn av demping og refraksjon i svillene. For at en slik avbildning skal fungere, bør en lage et system som også klarer å dekke områdene under svillene.

Lavere frekvenser bør brukes hvis en ønsker dypere penetrasjon, men dette vil redusere oppløsningen. Forsøket på Marienborg med to ulike bølgeformer viser at lavere frekvenser gir noe bedre ekko fra lagdelingen mellom ballast og underlag, men bildene får til gjengjeld dårligere oppløsning. Ytterligere reduksjon av frekvensen vil kreve større antenner.

9 Videre arbeid

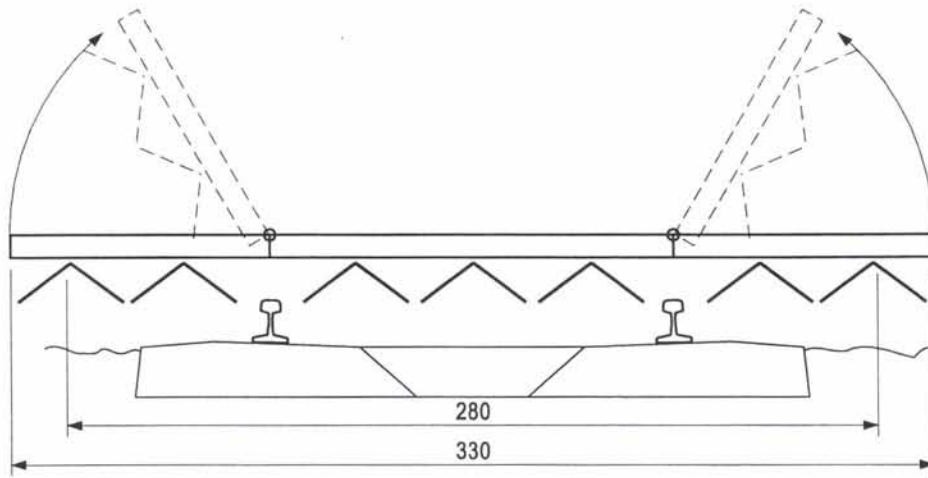
Ut fra erfaringene som ble oppnådd ved disse eksperimentene kan en peke på flere faktorer som vil kjennetegne et spesialtilpasset radarutstyr for jernbaneformål. Vi tror det er en fordel for videre forskning på dette området at en utvikler to forskjellige typer utstyr. En type med store antenner for lave frekvenser som kan brukes til å undersøke lagdeling og tilstand for ballasten, og en annen type med spesialutviklede antenner som kan brukes til å detektere gjenstander som kabler og lignende. Det er mulig at det på et senere tidspunkt kan utvikles et kombinert utstyr som klarer begge deler. Vi foreslår at en i første omgang konsentrerer seg om utstyret for ballast og lagdeling.

9.1 Spesialutviklet utstyr for undersøkelse av ballast og lagdeling

En viktig tilpasning av utstyret vil være å konstruere større antenne-elementer for bedre penetrasjon. Ved å redusere antall antenner til 7 som vist i figur 19 vil en fremdeles få tilstrekkelig antall målinger til å lage en tredimensjonal modell av lagdelingen med tilfredsstillende oppløsning for de fleste formål. De ytterste antenne-elementene på hver side bør kunne foldes opp slik at de ikke støter bort i eventuelle hindringer i nærheten av jernbanesporet. Siden kvaliteten på radardataene er best mellom svillene, bør radaren trigges slik at den kun samler inn data når antennen befinner seg mellom svillene. Et slikt system vil gi vesentlig mindre datamengde per lengdeenhet, og systemet vil dermed kunne kjøres mye hurtigere.

Det er mulig å måle bølgehastigheten på stedet ved å bruke en såkalt "common-mid-point" (CMP) teknikk der sender- og mottakerantennen først sentreres om et felles midtpunkt og deretter beveges fra hverandre under målingen. På denne måten vil en få data fra et refleksjonspunkt med forskjellige antenneoffset. Denne metoden er ikke utprøvd i dette eksperimentet, men det er mulig

å gjøre disse målingene automatisk ved hjelp av antennearrayet i figur 19. Når bølgehastigheten er funnet kan det settes en nøyaktig dybdeskala på radargrammene.



Figur 19. 7 elements antennearray for måling av tverrprofil og hastighetsprofil.

Det er fullt mulig å utvikle radarutstyr for kartlegging av ballasttykkelse. En slik radar bør ha følgende egenskaper:

- hurtigere datainnsamling (minimum 30 km/h)
- automatisk posisjonsbestemmelse til målingene vha GPS
- enklere brukergrensesnitt for bruk i felt
- klassifisering av ballastlag etter bølgehastighet
- automatisk generering av en 3-dimensjonal modell av ballastlaget
- eksportere ferdigtolkede data på standard dataformat som kan brukes i GIS programmer eller andre tegneprogrammer (f.eks. AutoCAD)

10 Referanser

- [1] Daniels, D.J., "Surface Penetrating Radar", IEE Radar, Sonar and Avionics Series 6, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1996. (ISBN: 0-85296-862-0)
- [2] Eide, E.S., "Radar Imaging of Small Objects Closely Below the Earth Surface", Doktor ing. avhandling, Institutt for teleteknikk, NTNU, August 2000. (ISBN: 82-7984-098-2)
- [3] Gallagher, G., Leiper Q., Clark, M., og Forde, M., "Ballast evaluation using ground-penetrating radar", Railway Gazette International, Vol. 156, No. 2, February 2000, p. 101 – 102.
- [4] Gallagher, G.P., Leiper, Q., Williamson, R., Clark, M.R., Forde, M.C., "Application of time domain Ground Penetrating Radar to evaluate railway track ballast.", NDT & E International, Vol. 32, No. 8, 1999, Elsevier Science Ltd, Exeter, Engl, p. 463 – 468. (ISSN: 0963-8695).

- [5] Clark, M.R., Gillespie, R., Kemp, T., McCann, D.M., Forde, M.C., “Electromagnetic properties of railway ballast”, *NDT & E International*, Vol. 34, No. 5, July 2001, 2001, p. 305 – 311.
- [6] Jack, R., Jackson, P., “Imaging attributes of railway track formation and ballast using Ground Probing Radar”, *NDT & E International*, Vol. 32, No. 8, 1999, Elsevier Science Ltd, Exeter, Engl, p. 457 – 462.
- [7] Hugenschmidt, J., “Railway track inspection using GPR”, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.43, No. 2 – 4, March 2000, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, p. 147 – 155.
- [8] Narayanan, R.M., Kumke, Chris J., Li, Dingqing, “Railroad track substructure monitoring using ground penetrating radar (GPR).”, *Rail International*, Vol. 32, No. 1, January 2001, Int. Railway Congress Assoc, Brussels, Belgium, p. 28 – 34.
- [9] Reite, A.J., Sveian, H., Erichsen, E., TRONDHEIM KOMMUNE, Løsmassekart M 1:50 000, Norges geologiske undersøkelse, 1989.

12 Vedlegg B Fullstendige radargram fra strekningen Marienborg til Skansen