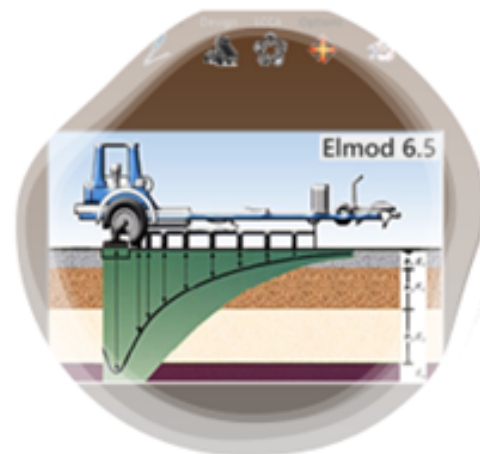
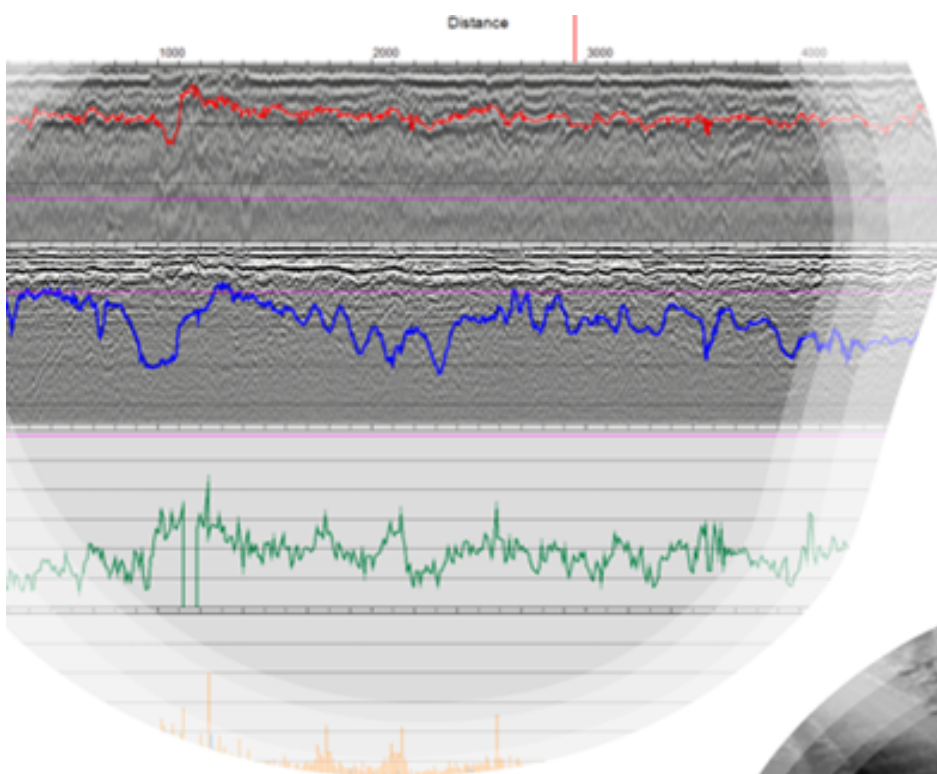


Georadar for lagtykkelser i vegoverbygning

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1076



Dennis Ian Salumbides

DynaHub

ROAD
DOCTOR

Tittel

Georadar for lagtykkelser i vegoverbygning

Undertittel**Forfatter**

Dennis Ian Salumbides

Avdeling

Vegutforming

Seksjon

Vegteknologi

Prosjektnummer**Rapportnummer**

1076

Prosjektleder

Tatek Fekadu Yideti

Godkjent av

Tatek Fekadu Yideti

Emneord

Georadar, RAPTOR, Road Doctor, ELMOD, Backcalculation, Lagtykkelser, Elastisitetsmoduler

Sammendrag

Rapporten omhandler bruk av Ground Penetrating Radar (GPR) for å bestemme lagtykkelser og vurdere tilstanden til vegkonstruksjoner med RAPTOR-målinger. Fire vegstrekninger ble analysert i Excel, Access, Road Doctor og ELMOD for å beregne elastisitetsmoduler. Resultatene viste variasjoner, inkludert ufullstendige data på visse strekninger og usikkerheter knyttet til mangel på utgravningsprøver. Etterregning ga generelt realistiske verdier, men noen avvik ble registrert. Rapporten konkluderer med at forbedret datakvalitet, flere målinger og utgravningsprøver er nødvendig for å styrke grunnlaget for fremtidige empiriske modeller.

Title

GPR for Layer Thicknesses in Road Pavement

Subtitle**Author**

Dennis Ian Salumbides

Department

Road Design

Section

Road Technology

Project number**Report number**

1076

Project manager

Tatek Fekadu Yideti

Approved by

Tatek Fekadu Yideti

Key words

Ground Penetrating Radar (GPR), RAPTOR, Road Doctor, ELMOD, Backcalculation, Layer thicknesses, Elastic moduli

Summary

The report concerns the use of GPR to determine layer thicknesses and assess the condition of road structures using RAPTOR measurements. Four road sections were analyzed in Excel, Access, Road Doctor, and ELMOD to calculate elastic moduli. The results showed variations, including incomplete data on certain sections and uncertainties related to the lack of excavation samples. Backcalculation generally provided realistic values, but some deviations were recorded. The report concludes that improved data quality, additional measurements, and excavation samples are necessary to strengthen the basis for future empirical models.

Sammendrag

Rapporten omhandler bruk av *Georadar (GPR)* for å bestemme lagtykkelser og *RAPTOR* for å vurdere vegoverbygningers tilstand. Hovedmålet har vært å behandle og analysere *RAPTOR*-data fra fire utvalgte vegstrekninger (Ev6 S174D1, Ev8 S7D1, Rv36 S3D1 og Rv52 S2D1) i både høyre og venstre kjørefelt, samt utføre *backcalculation i ELMOD* for å beregne elastisitetsmoduler i asfalt, bærelag og undergrunn. Arbeidet inkluderte rydding og strukturering av data i Excel, oppbygging av en database i Microsoft Access, tolkning av lagtykkelser i *Road Doctor* og videre analyser i ELMOD.

Resultatene viste variasjoner mellom strekningene. For Ev6 S174D1 ble full analyse gjennomført i høyre kjørefelt, mens venstre kjørefelt hadde feil i GPR-dataene. På Ev8 S7D1 ble begge kjørefelt analysert, men lufttemperaturdata måtte hentes fra Meteorologisk institutt. For Rv36 S3D1 manglet både ground coupled-målinger og oppgravingsprøver, noe som gjorde fullstendig analyse umulig, selv om defleksjonsdata ble registrert. På Rv52 S2D1 kunne lagtykkelser tolkes i begge kjørefelt, men mangelen på oppgravingsprøver gjorde vurderingene mer usikre. Backcalculation viste generelt realistiske verdier for bærelag og undergrunn, men enkelt strekninger hadde uventet høye asfaltmoduler og tilfeller der beregnet bærelagsmoduler (E_2) var lavere enn undergrunnsmodulen (E_{sub}).

Analysene viser at datakvalitet har stor betydning for påliteligheten i både lagtykkelsestolkning og backcalculation. Begrensninger som få dropp (måling) per punkt, manglende geofoner med kvalitetskriterier og fravær av oppgravingsprøver økte usikkerheten. Til tross for at målet om å supplere eksisterende empiriske modeller ikke ble fullt ut realisert, kan verdiene fra rapporten likevel brukes som grunnlag for videre arbeid, blant annet til å utvikle plot mellom E_1 og SCI, E_2 og BCI samt E_{sub} og BCI. Rapporten anbefaler å utføre nye analyser med bedre datagrunnlag, flere dropp per punkt, bruk av hele geofonoppsettet, kontroll av dielektriske verdier og inkludering av oppgravingsprøver for å redusere usikkerhet og styrke grunnlaget for fremtidige empiriske modeller.

Innhold

Sammendrag	1
Innledning	3
Bakgrunn	3
Mål og hensikt	4
Teori	5
Ikke-destruktive tester (NDT).....	5
Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) og RAPTOR.....	5
Falling Weight Deflectometer (FWD)	6
Backcalculation av elastisitetsmoduler.....	6
Defleksjonsparametere: SCI og BCI.....	7
Metode og databehandling	8
Bearbeiding av RAPTOR-data.....	8
Kartgrunnlag og tolkning av lagtykkelser	9
Backcalculation i ELMOD	10
Resultater	11
Oversikt over vegstrekningene	11
Defleksjonsdata	12
Lagtykkelsesdata og dielektriske verdier	20
Backcalculations.....	26
Diskusjon	32
Konklusjon og videre oppfølging	34
Referanser	35

Innledning

Bakgrunn

Å kartlegge den strukturelle tilstanden til norske veger er avgjørende for å planlegge vedlikehold, rehabilitering og dimensjonering av nye vegkonstruksjoner. Statens Vegvesen har de siste årene tatt i bruk flere typer ikke-destruktive målemetoder for å vurdere vegdekker og underliggende lag. To sentrale verktøy i denne sammenhengen er RAPTOR (Ground Penetrating Radar, GPR), som benyttes til å bestemme lagtykkelser, og Falloddsmåling (Falling Weight Deflectometer, FWD), som gir informasjon om vegens bæreevne gjennom nedbøyningsmålinger. Slike data er viktige for Statens Vegvesen fordi de gir et mer effektivt og pålitelig grunnlag for planlegging av drift og vedlikehold.

Sommerjobben min hos Statens Vegvesen har vært å behandle og analysere RAPTOR-data for fire utvalgte vegstrekninger: Ev6 S174D1, Ev8 S7D1, Rv36 S3D1 og Rv52 S2D1. Arbeidet startet med å rydde og strukturere datagrunnlaget, og deretter bygge opp en database i Microsoft Access. Denne databasen ble videre koblet opp mot ELMOD, et analyseprogram utviklet av Dynatest, for å gjennomføre tilbake beregning (backcalculation) av elastisitetsmoduler i de ulike lagene.

Et viktig delsteg i prosessen var å tolke og bestemme lagtykkelser ved hjelp av Road Doctor, Tolkningene fra Road Doctor er eksportert og brukt som input i ELMOD. Til støtte i arbeidet ble Vegkart også benyttet, som ga en bedre visuell oversikt over de aktuelle vegstrekningene og deres omgivelser.

I en nylig masteroppgave gjennomført ved OsloMet ble det utviklet empiriske sammenhenger mellom elastisitetsmoduli og defleksjonsparametere, blant annet E_1 vs. SCI, E_2 vs. BCI og E_{sub} vs. BCI. Studien viste lovende resultater, men også at datagrunnlaget er begrenset; kun ni vegstrekninger. Enkelte områder i figurene manglet datapunkter, noe som gjør sammenhengene sårbare for uteliggere og reduserer robustheten i de empiriske modellene.

Mål og hensikt

Målet med denne rapporten er å utføre backcalculation for både høyre og venstre kjørefelt på de fire vegstrekningene. Ambisjonen er at resultatene kan brukes til å supplere de eksisterende figurene og bidra til å redusere de identifiserte «hullrommene» i relasjonene mellom elastisitetsmoduli og defleksjonsparametere. Selv om fire vegstrekninger alene ikke nødvendigvis er nok til å fylle hullene helt, vil arbeidet likevel kunne styrke datagrunnlaget og gi et bedre grunnlag for videre utvikling av empiriske modeller.

Teori

Ikke-destruktive tester (NDT)

Tradisjonelt har vurdering av vegkonstruksjoner vært basert på destruktive metoder som kjerneboring eller graving. Disse gir presise resultater, men er kostbare, tidskrevende og kan medføre skader på vegen. Ikke-destruktive tester (NDT) har derfor fått en stadig viktigere rolle i moderne vegforvaltning. De gir rask tilgang til store mengder data med minimale inngrep i trafikken, og muliggjør analyser på både strekning- og nettverksnivå.

Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) og RAPTOR

Georadar er en av de meste brukte NDT-metodene i vegteknikk. Den bygger på prinsippet om elektromagnetiske bølger som sendes ned i vegkonstruksjonen. Når bølgene treffer grenseflater mellom materialer med ulike dielektriske egenskaper, reflekteres deler av signalet tilbake. Tiden det tar for signalet å returnere gir informasjon om dybde og tykkelse på de ulike lagene.

Ground Penetrating Radar (GPR) har flere fordeler, som kontinuerlig datainnsamling, mulighet for målinger i trafikkhastighet og evnen til å gi et helhetlig bilde av vegensoverbygning. En utfordring med metoden er at tolkningen kan være krevende, spesielt under fuktige forhold eller ved komplekse materialoverganger. I dette prosjektet ble det benyttet RAPTOR, et spesialisert georadarsystem utviklet for effektive datainnsamling i felt.

RAPTOR skiller seg fra vanlig bruk av georadar ved at systemet også måler hvordan vegen reagerer på belastning. Det er montert på et kjøretøy og kan samle inn data mens man kjører i vanlig trafikkhastighet. Dette gjør at man kan undersøke lange strekninger raskt og uten å stoppe trafikken. Georadaren i RAPTOR brukes til å finne lagtykkelser, mens sensorer samtidig registrerer nedbøyningen i vegen. På denne måten får man både informasjon om oppbygningen og om hvor stive materialene er. I motsetning til FWD, som ofte gjør flere dropp på hvert målepunkt, utfører RAPTOR en måling kontinuerlig, som tilsvarer ett «dropp». Dette gir mange målinger langs vegen, men hver enkelt måling blir ikke like grundig

kontrollert. Likevel gir RAPTOR et godt helhetsbilde, og resultatene kan brukes både til å vurdere tilstand og til dimensjonering.

Falling Weight Deflectometer (FWD)

FWD er en annen sentral metode innen NDT, og brukes til å kartlegge vegens mekaniske respons under belastning. Metoden innebærer at en kontrollert vekt slippes ned på en belastningsplate, slik at en dynamisk belastning påføres vegoverflaten. Geofoner plassert i ulike avstander fra lastpunktet registrerer den resulterende nedbøyningen. Disse målingene gir innsikt i hvordan belastningen fordeler seg gjennom de ulike lagene i vegkonstruksjonen.

Defleksjonsbollen som dannes, sier mye om både de øvre og nedre lagene. En lav nedbøyningsverdi indikerer vanligvis en stiv veidekkekonstruksjon med høy bæreevne, mens en høy nedbøyning antyder en svakere eller mer fleksibel konstruksjon.

Backcalculation av elastisitetsmoduler

Elastisitetsmodulen (E-modul) er et mål på stivhet, og er en nøkkelparameter i dimensjonering og vurdering av veger. For asfalt avhenger den blant annet av temperatur og lastfrekvens, mens for ubundne materialer påvirkes den sterkt av kornfordeling, fukttinnhold og kompakthet.

Backcalculation er en metode der man beregner stivheten i de ulike lagene i vegen ved å bruke målinger fra FWD eller RAPTOR. Man sammenligner de målte nedbøyningene med nedbøyninger beregnet fra en datamodell. Deretter justeres modellen trinnvis helt til resultatene stemmer godt overens med målingene. På denne måten kan man finne ut hvor stive lagene i vegen er, uten å måtte ta opp mange prøver fra felt. For å kunne gjennomføre en backcalculation i ELMOD kreves opplysninger om påført last, målte nedbøyninger og registrerte lagtykkelser.

Defleksjonsparametere: SCI og BCI

For å forenkle tolkningen benyttes ofte defleksjonsparametere som knyttes til ulike deler av vegkonstruksjonen. Surface Curvature Index (SCI) beregnes som forskjellen mellom nedbøyningen rett under lastplaten (D0) og nedbøyningen 20 cm fra senter (D20). Denne parameteren er særlig følsom for de øvre asfaltlagene, som slitelaget og bindlaget. En lav SCI-verdi tyder på stive og velfungerende asfaltlag, mens en høy kan indikere svakheter eller begynnende nedbrytning i veioverbygningen.

Base Curvature Index (BCI) beregnes som forskjellen i nedbøyningen mellom 90 cm (D90) og 120 cm (D120) fra lastpunktet. Denne parameteren reflekterer i større grad responsen fra de dypere lagene i vegkonstruksjonen, inkludert bærelag, forsterkningslag og undergrunnen. Ved bruk av SCI og BCI, er det lettere å identifisere hvor i konstruksjonen eventuelle svakheter befinner seg, enten i de øvre eller nedre delene, og dermed få verdifulle indikatorer for vurdering av vegens tilstand.

Metode og databehandling

Denne delen beskriver hvordan datagrunnlaget ble behandlet, strukturert og analysert ved bruk av programvare som Excel, Microsoft Access, Road Doctor og ELMOD. Fire vegstrekninger ble behandlet i dette arbeidet: Ev6 S174D1, Ev8 S7D1, Rv36 S3D1 og Rv52 S2D1. Hver vegstrekning ble levert i en mappe som inneholdt to undermapper, en for høyre kjørefelt (DIR1) og en for venstre kjørefelt (DIR2). I tillegg lå det i hver hoved mappe en tilhørende .rdp-fil fra RAPTOR-systemet.

Bearbeiding av RAPTOR-data

De opprinnelige RAPTOR-dataene ble levert som Excel-filer i undermappene DIR1 og DIR2. Dataene var imidlertid komprimerte og fremsto som uleselige i sin rå form. For å gjøre materialet lesbart ble Excel-funksjonen *Text to Columns* benyttet. Hele *kolonne A* ble markert, og deretter ble fanen *Data* åpnet. Funksjonen *Text to Columns* ble valgt, hvor alternativet *Delimited* ble aktivert. Skilletegnene ble satt til *semikolon* og *komma* før prosessen ble fullført. Etter dette ble datastrukturen ryddig og lesbar, slik at videre bearbeiding kunne gjennomføres.

Et utvalgt av de bearbeidende dataene ble overført til en Microsoft Access database. Det er nødvendig å organisere og bygge databasen slik at den kunne benyttes direkte i ELMOD. For å åpne dette ble det lagt vekt på nøyaktighet, særlig i samsvaret mellom *StationID* i tabellene *Stations* og *Drops*. Oppbygningen ble basert på strukturen fra en tidligere database kalt *NEv6Hp6*, som lå i mappen *E6 Per Otto*. Forskjellen er at databasen i dette prosjektet kun inkluderte tabeller tilgjengelig fra RAPTOR-dataene. Tabeller som *Transducers*, GPS-data i *Stations* og flere er ikke tilgjengelig og ble derfor utelatt. Videre, ble kolonnen *Stress* beregnet fra formelen $\text{stress} = \frac{\text{lik last (kraft)}}{\text{areal}}$ i tabellen *Drops*.

Når databasen ble ferdigstilt, ble den åpnet i ELMOD. Funksjonen *Review Data* ble benyttet for å kontrollere at innholdet er korrekt, og deretter ble *Plot* funksjonen brukt til å inspisere defleksjonskurvene. Flere uvanlige verdier ble identifisert, spesielt for geofonene D1 og D7. Disse avvikende verdiene ble notert og fjernet i en ny Excel-fil, før oppdaterte data ble lagt

inn i Microsoft Access og de gamle tabellene slettet. Denne prosedyren ble gjennomført for alle fire vegstrekninger. De nye filene fikk navn etter formatet *Navn på vegstrekning_DIR1_Removing_UV_Values* for høyre kjørefelt og *Navn på vegstrekning_DIR_Removing_UV_Values* for venstre kjørefelt. I fil navnet står *UV* for *Unnecessary Values*. I tillegg ble *StationID* for alle fjernende punkter lagret i .txt-filer, som fikk navnet i formatet *Navn på vegstrekning_Stations_with_UV_Removed*.

For vegstrekningen Ev8 S7D1 manglet lufttemperaturdata. For å komplettere datasettet ble temperaturverdier hentet fra Meteorologisk institutt (seklima.met.no). Værstasjonen *Skibotn //* ble valgt fordi den representerte de mest realistiske forholdene for strekningen. Dataene ble lagt inn i Microsoft, og ble deretter tilgjengelig i ELMOD som en del av analysen.

Kartgrunnlag og tolkning av lagtykkelser

Etter bearbeiding av RAPTOR-dataene, ble kartgrunnlaget lagt inn for hver vegstrekning i Road Doctor. Dette ga en direkte kobling mellom plassering i GPR-profilen og den tilsvarende posisjonen på kartet. Videre, ble lagtykkelser tolket ved bruk av .rdp-filene i *Interpretation Mode*. Metoden *Manual Tracing* ble stort sett benyttet til tolkning av lag da det ga bedre nøyaktighet enn *Layer Tracing*. Asfalt ble markert med rødt og bærelaget med blått, i tråd med programmets fargetabell. Lagdelingen ble begrenset til tre lag totalt (asfalt, bærelag og undergrunn), da dette er optimalt i ELMOD.

For vegstrekningen Ev6 S174D1 ble lagtykkelser kun tolket i høyre kjørefelt (DIR1). GPR-dataene for venstre kjørefelt (DIR2) inneholdt feil og ble derfor ikke benyttet. På Ev8 S7D1 ble begge kjørefelt tolket, *AMP* (Signal Amplification) og *HFL* (Horizontal Low Pass Filtering) ble aktivert for GPR *Ground Coupled* (GC) i *Processing Settings*. Disse to ble benyttet for å forbedre visualiseringen av laggrensene og øke nøyaktigheten i tolkningen. På Rv36 S3D1 ble det ikke tolket lagtykkelser, ettersom det kun forelå GPR *Air Coupled* (AC) og ikke ground coupled data. I tillegg manglet oppgravingsprøver, noe som gjorde det vanskelig å tolke lagtykkelsen på bærelaget. Asfaltlaget (lag 1) ble imidlertid tolket tidligere og ble beholdt som grunnlag. På Rv52 S2D1 forelå både AC- og GC-data, men oppgravingsprøver manglet. Funksjonen *AMP* og *HFL* ble også benyttet her for å forbedre

tolkningen, men mangelen på prøver medførte at lagtykkelsestolkningen måtte baseres på en mer subjektiv vurdering.

Når lagtykkelsene ble tolket, ble resultatene oppdatert i Road Doctor. Dette ble gjort ved å bruke funksjonen *Update Interpretation* og sette *Same point distance* til -1 m, slik at avstandsverdiene ble tvunget til 1 meters nøyaktighet. Deretter ble resultatene eksportert via *Vector Interpretation* under *Interpretation* fanen. Ved eksporten ble nøkkelordet */F=10/* lagt til i output, noe som delte opp strekningen i intervaller på 10 meter. På denne måten ble det generert lagtykkelsesdata for hver tiende meter langs hele strekningen. Før overføring av tykkelsesdata til ELMOD ble en graf med tolkede dielektriske verdier langs veistrekningen lagt til, og tykkelsesdata ble omgjort til mm.

Ved innlasting av dataene til ELMOD ble det oppdaget problemer med fremstillingen av lagfordeling i *Structure*. For å få et mer stabilt resultat ble intervallene justert fra 10 meter til medianverdier på 25, 75 og 125 meter osv., det vil si en verdi per 50 meter. Endringene ble først gjort i Excel, deretter lagret tilbake som .txt-fil og importert på nytt. De oppdaterte Excel-filene ble lagret med navn etter formatet *Navn på vegstrekning_THC_intervall*, mens de tilhørende .txt-filene fikk navn *Navn på vegstrekning_THC_intervall_DIR1* og *_DIR2*. Selv om strukturbildet i ELMOD ikke ble fullstendig komplett etter denne justering, representerte det en klar forbedring sammenlignet med de opprinnelige resultatene.

Backcalculation i ELMOD

Etter klargjøring av defleksjonsdata og lagtykkelser ble parameteroppsettet i *Structure* satt til *SI_PCN-Flex*. For material utvalg ble topplag satt til *AC*, mellom lag til *Base* og nedre lag til *Subgrade*. Videre, ble funksjonen *Deflection Basin Fit*, under *Moduli* ble benyttet. Høy amplitude i kurven indikerer uregelmessigheten i beregningen, ellers bør den være jevn. Når backcalculation ble fullført, ble resultatene visualisert gjennom *View Plot*. Disse ga elastisitetsmodulene for asfalt, bærelag og undergrunn. Prosessen ble gjennomført for alle vegstrekningene, med unntak av Ev6 S174D1 DIR2 og Rv36 S3D1. For Ev6 S174D1 DIR2

skyldtes dette feil i GPR-datene, mens for Rv36 S3D1 manglet både ground coupled data og oppgravingsprøver, noe som gjorde det utfordrende å etablere et pålitelig grunnlag.

Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatene fra analysen av de fire vegstrekningene. Det gis først en oversikt over tilgjengelig datagrunnlag, deretter presenteres defleksjonsdata, tolkede lagtykkelser og backcalculation resultater. Til slutt gis en oppsummering per strekning.

Oversikt over vegstrekningene

Tabellen under gir en oversikt over hvilke data som ble tilgjengelig, samt hvilke analyser som kunne gjennomføres for hver strekning.

Tabell 1: Oversikt over tilgjengelig datagrunnlag og analyser for de fire vegstrekningene

Vegstrekning	Tilgjengelige data	Tolking av lagtykkelser	Backcalculation	Kommentar
Ev6 S174D1	RAPTOR (.rdp), AC+GC-data, oppgravingsprøver	Ja (kun DIR1, feil i DIR2)	Ja (kun DIR1, mangler tykkelsesdata)	Full analyse mulig for høyre kjørefelt
Ev8 S7D1	RAPTOR (.rdp), AC+GC-data, oppgravingsprøver	Ja (DIR1 og DIR2, med AMP og HFL)	Ja	Lufttemperatur supplert fra seklima.met.no
Rv36 S3D1	RAPTOR (.rdp), kun AC-data, ingen prøver	Nei (lag 1 tolket tidligere)	Nei	Begrenset datagrunnlag, vanskelig å backcalculate
Rv52 S2D1	RAPTOR (.rdp), AC+GC-data, ingen prøver	Ja (DIR1 og DIR2, med AMP og HFL)	Ja	Lagtykkelser tolket, mer subjektivt

For veistrekingen Rv36 S3D1 ble datagrunnlaget begrenset, og det ble derfor ikke gjennomført full analyse.

Defleksjonsdata

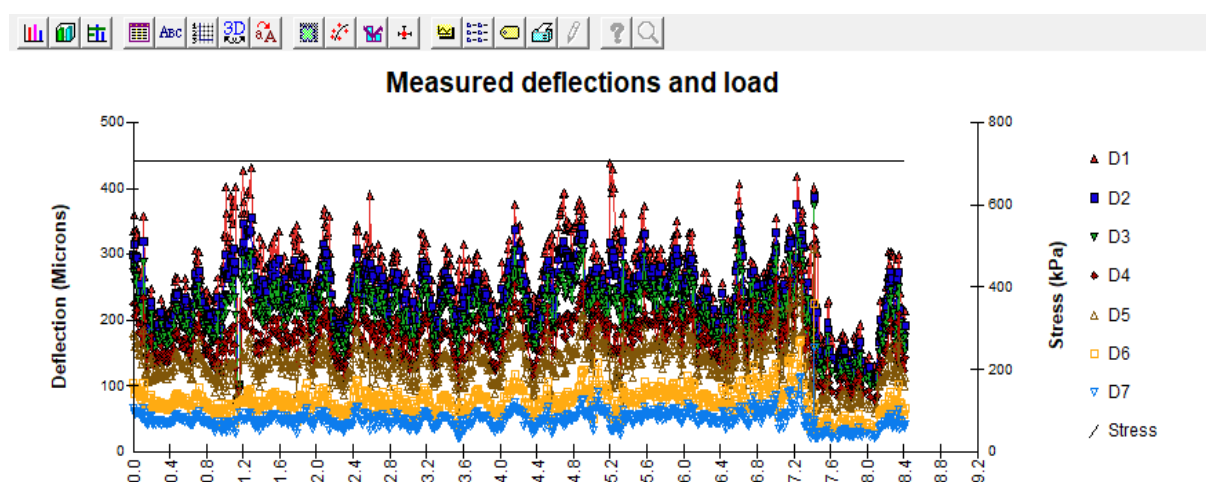
Defleksjonsmålingene fra RAPTOR-systemet ble analysert i ELMOD. I figurene presenteres resultatene med kjedeposisjon (chainage) langs strekningen på x-aksen, målt defleksjon i mikrometer (μm) på venstre y-akse, og tilhørende stress i kilopascal (kPa) på høyre y-akse.

Den konstante svarte linjen øverst angir stress, og har en verdi på 707,36 kilopascal.

Sensorene D1 til D7 er plassert fra senter og utover: D1 ved 0 mm, D2 ved 200 mm, D3 ved 300 mm, D4 ved 450 mm, D5 ved 600 mm, D6 ved 900 mm og D7 ved 1200 mm. I ELMOD indikerer en høy nedbøyning en svak veikonstruksjon med lav stivhet og bæreevne, mens en lav nedbøyning indikerer et sterkt veidekke med høy stivhet. Nedbøyningene avtar normalt med økende avstand fra lastplaten (D0), og trenden observeres på alle strekningene.

For Ev6 S174D1 fremgår defleksjonskurvene av Figur 1 og Figur 2. Tabell 2 og Tabell 3 viser at gjennomsnittlig D0 ble registrert til 263 μm i høyre kjørefelt og 258 μm i venstre kjørefelt.

Ved 1200 mm avstand ble nedbøyningene redusert til henholdsvis 48 μm og 45 μm .

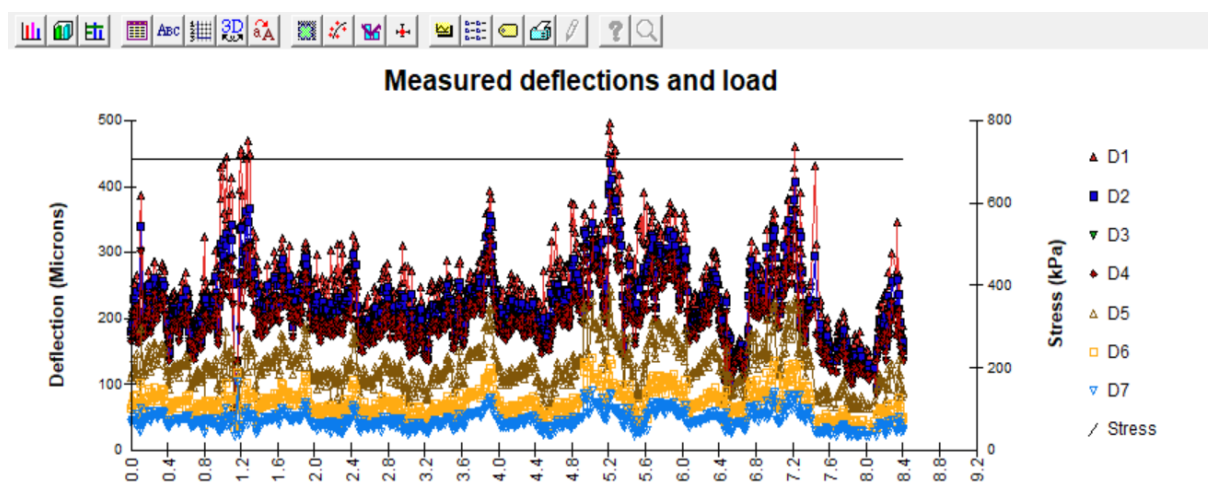


Figur 1: Målte defleksjoner og last for Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1)

Tabell 2: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1)

S1			
* = Log			
Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	807	263	57
200	807	232	47
300	807	208	42
450	807	168	35
600	807	133	30
900	807	76	19
1200	807	48	13

Save values Report



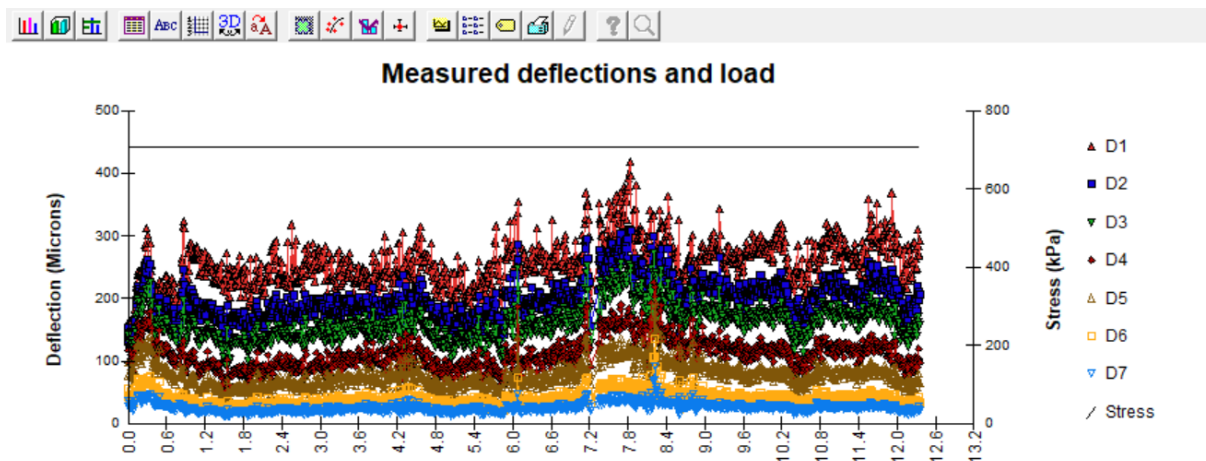
Figur 2: Målte defleksjoner og last for Ev6 S174D1, venstre kjørefelt (DIR2)

Tabell 3: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev6 S174D1, venstre kjørefelt (DIR2)

S1			
Station: 0.001 to 8.408			
* = Log			
Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	796	258	64
200	796	226	52
300	796	201	46
450	796	201	46
600	796	126	33
900	796	71	20
1200	796	45	13

Save values Report

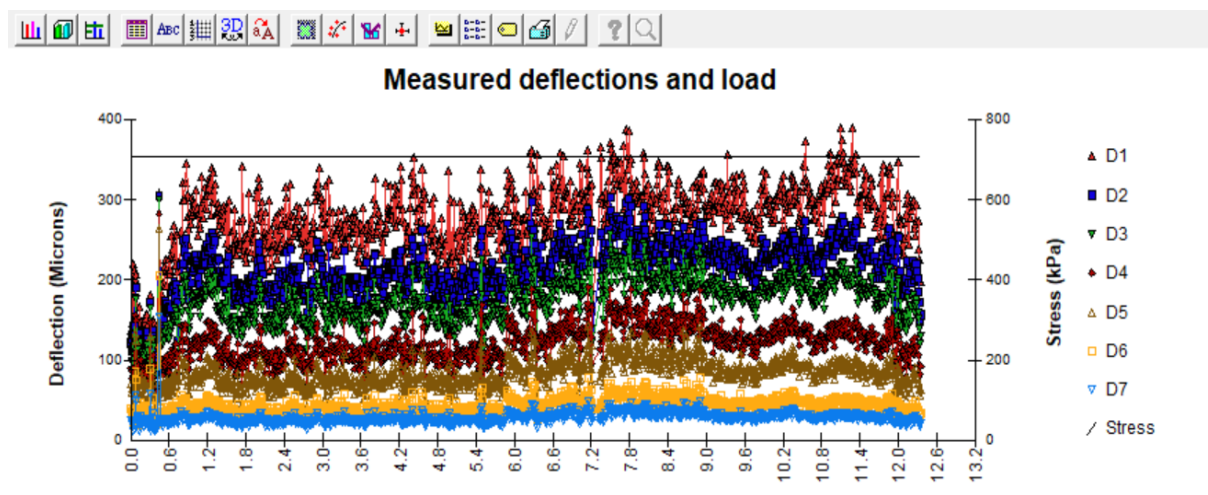
På Ev8 S7D1 presenteres defleksjon resultatene i Figur 3 og Figur 4. Ifølge Tabell 4 og Tabell 5 ble gjennomsnittlig D0 beregnet til 257 μm i høyre kjørefelt og 278 μm i venstre kjørefelt. For D7 ble nedbøyningene 25 μm i høyre kjørefelt og 27 μm i venstre kjørefelt, noe som er tilsvarende mindre enn forrige strekning.



Figur 3: Målte defleksjoner og last for Ev8 S7D1, høyre kjørefelt (DIR1)

Tabell 4: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev8 S7D1, høyre kjørefelt (DIR1)

S1			
Station: 0 to 12.357		* = Log	
Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	1198	257	37
200	1198	198	30
300	1198	160	28
450	1198	110	24
600	1198	76	19
900	1198	40	11
1200	1198	25	7
Save values Report			



Figur 4: Målte defleksjoner og last for Ev8 S7D1, venstre kjørefelt (DIR2)

Tabell 5: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev8 S7D1, venstre kjørefelt (DIR2)

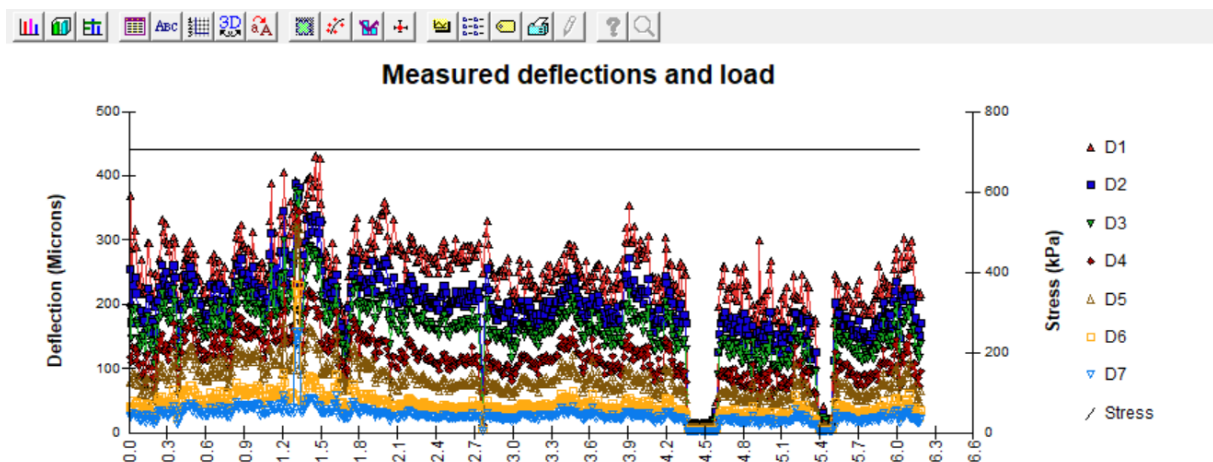
S1

Station: 0.009 to 12.353 * = Log

Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	1195	278	44
200	1195	214	33
300	1195	174	28
450	1195	121	23
600	1195	83	17
900	1195	44	10
1200	1195	27	7

Save values Report

Defleksjonskurvene for Rv36 S3D1 er vist i Figur 5 og Figur 6. I Tabell 6 og Tabell 7 ble gjennomsnittlig D0 beregnet til 239 μm i høyre kjørefelt og 201 μm i venstre kjørefelt. Ved sensor 1200 mm ble nedbøyningene redusert til 27 μm i høyre kjørefelt og 25 μm i venstre kjørefelt. D7-verdiene ligger på et nivå tilsvarende Ev8 S7D1. Svært lave defleksjonsverdier er registrert ved kjedeposisjon rundt 4,5 km og 5,4 km. Dette skyldes at målingene ble utført på en bru.

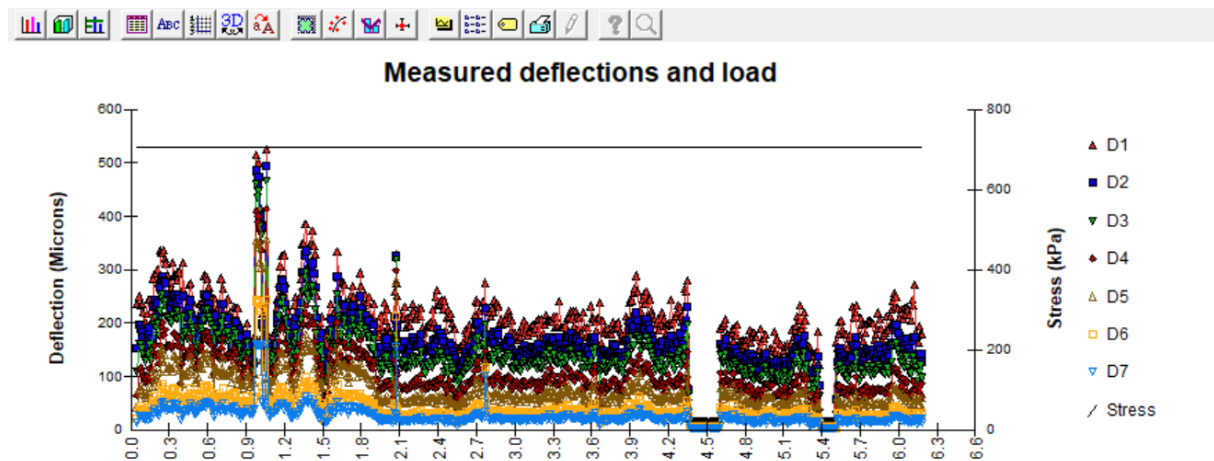


Figur 5: Målte defleksjoner og last for Rv36 S3D1, høyre kjørefelt (DIR1)

Tabell 6: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv36 S3D1, høyre kjørefelt (DIR1)

Station: 0.009 to 6.188 * = Log			
Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	610	239	72
200	610	189	59
300	610	157	52
450	610	112	42
600	610	79	34
900	610	42	21
1200	610	27	14

Save values Report



Figur 6: Målte defleksjoner og last for Rv36 S3D1, venstre kjørefelt (DIR2)

Tabell 7: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv36 S3D1, venstre kjørefelt (DIR2)

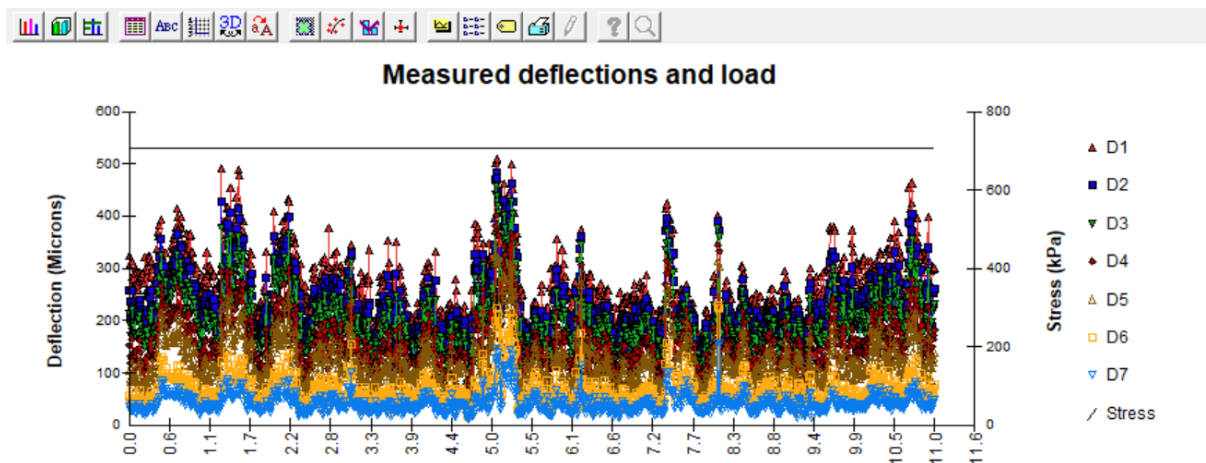
S1

Station: 0.043 to 6.184 * = Log

Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	611	201	69
200	611	162	61
300	611	137	56
450	611	100	49
600	611	73	42
900	611	40	27
1200	611	25	18

Save values Report

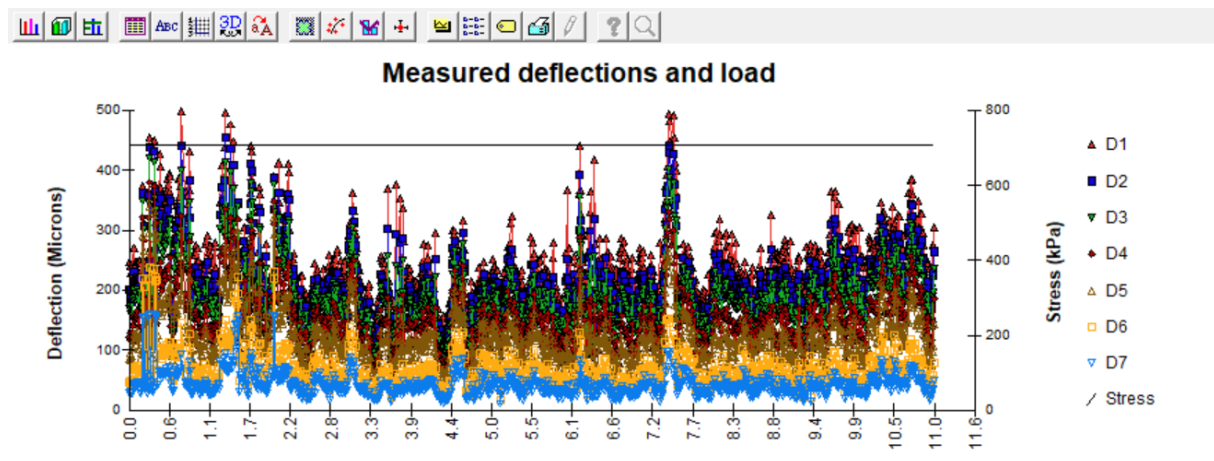
For Rv52 S2D1 viser Figur 7 og Figur 8 defleksjonskurvene for begge kjørefelt. Tabell 8 og Tabell 9 viser at gjennomsnittlig D0 ble registrert til 266 μm i høyre kjørefelt og 243 μm i venstre kjørefelt. For D7 ble nedbøyningene 42 μm i høyre kjørefelt og 43 μm i venstre kjørefelt, dette samsvarer litt med resultatene fra Ev6 S174D1.



Figur 7: Målte defleksjoner og last for Rv52 S2D1 høyre kjørefelt (DIR1)

Tabell 8: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv52 S2D1, høyre kjørefelt (DIR1)

S1			
Station: 0.003 to 10.995			* = Log
Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	1082	266	65
200	1082	228	59
300	1082	200	56
450	1082	155	50
600	1082	119	44
900	1082	66	28
1200	1082	42	18
Save values Report			



Figur 8: Målte defleksjoner og last for Rv52 S2D1 venstre kjørefelt (DIR2)

Tabell 9: Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv52 S2D1, venstre kjørefelt (DIR2)

S1

Station: 0.006 to 10.998 * = Log

Sensor mm.	N	Mean	Std.
0	1085	243	62
200	1085	212	57
300	1085	189	54
450	1085	151	48
600	1085	118	43
900	1085	67	29
1200	1085	43	20

Save values Report

Lagtykkelsesdata og dielektriske verdier

Lagtykkelser ble tolket i Road Doctor og analysert videre i ELMOD. Tabell 10 viser gjennomsnittlig tykkelse for asfaltlag og bærelag på de aktuelle strekningene.

Tabell 10: Gjennomsnittlig tykkelse for asfaltlag og bærelag per veistrekning.

Vegstrekning	Kjedeintervall	Asfaltlag (mm)	Bærelag (mm)
Ev6 S174D1 DIR1	1 m – 8412 m	244	817
Ev8 S7D1 DIR1	0 m – 12357 m	76	1044
Ev8 S7D1 DIR2	9 m – 12353 m	90	1026
Rv36 S3D1 DIR1	9m - 6188 m	Ikke tolket	Ikke tolket
Rv36 S3D2 DIR2	32 m - 6184 m	Ikke tolket	Ikke tolket
Rv52 S2D1 DIR1	3 m – 10995 m	152	718
Rv52 S2D1 DIR2	6 m – 10998 m	166	671

Tre figurer presenteres for hver strekning. Figur 9, 12, 15, 18 og 21, plassert til venstre, viser kartgrunnlaget. Illustrasjonene til høyre inneholder fire profiler: asfaltlaget i AC, bærelag i GC, en kombinert profil av asfalt- og bærelag samt de dielektriske verdiene for asfaltlaget. Disse dataene er hentet fra Road Doctor. Figur 10, 13, 16, 19 og 22 viser lagdelingen slik den ble modellert i ELMOD. Siden det ble kun implementert lag 1 og lag 2 tykkelsesdata i ELMOD per veistrekning og kjørefelt, ble H3 og H4 lagt inn som en del av H2. Figur 11, 14, 17, 20 og 23 viser gjennomsnittlig tykkelse for asfalt- og bærelag, beregnet i ELMOD. Tykkelsesdata for veistrekning Ev6 S174D1 og Ev8 S7D1 vurderes som gode, ettersom disse strekningene har oppgravingsprøver som referanse grunnlag. For Rv52 S2D1 er datagrunnlaget mindre tilfredsstillende, og det observeres tydelige forskjeller mellom DIR1 og DIR2.

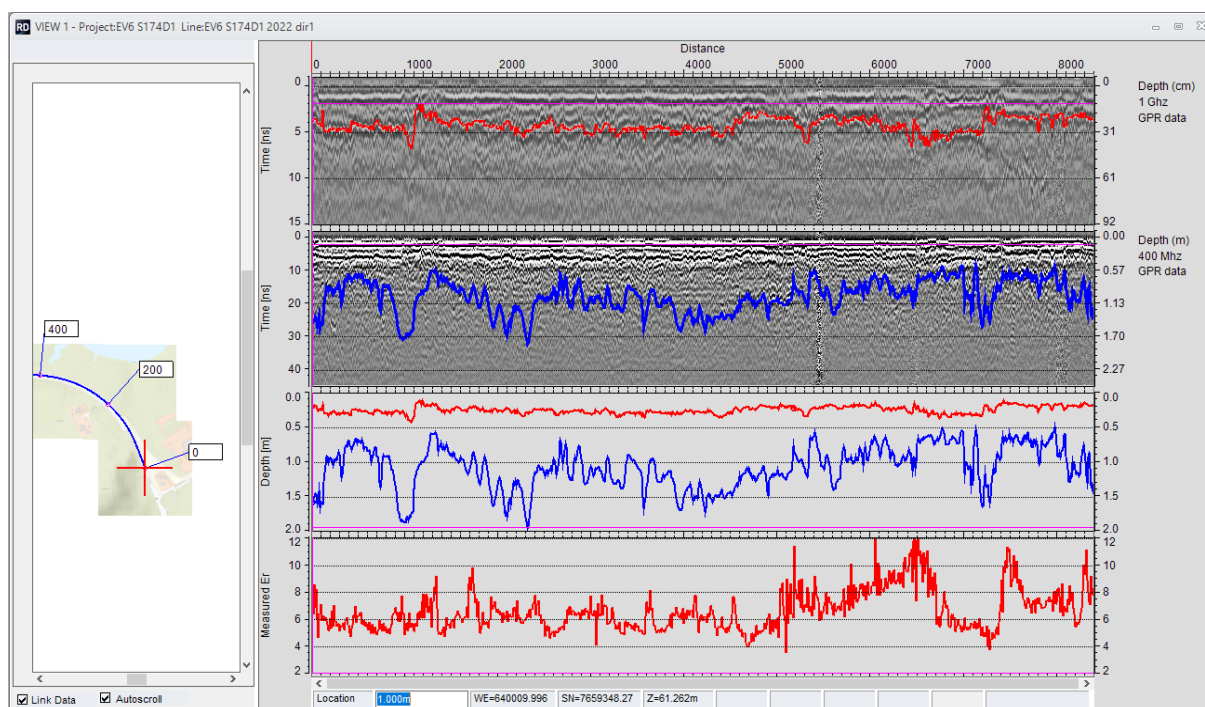


Figure 9: Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev6 S174D1 DIR1

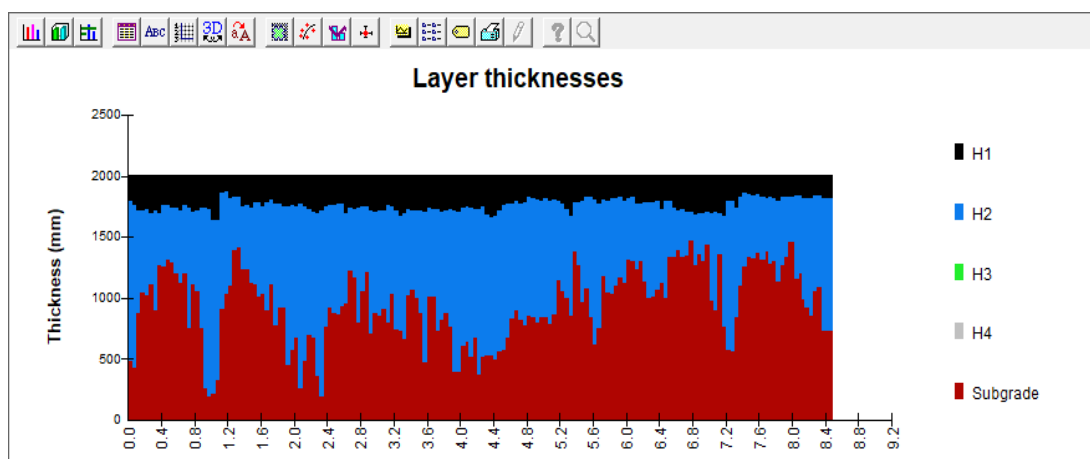
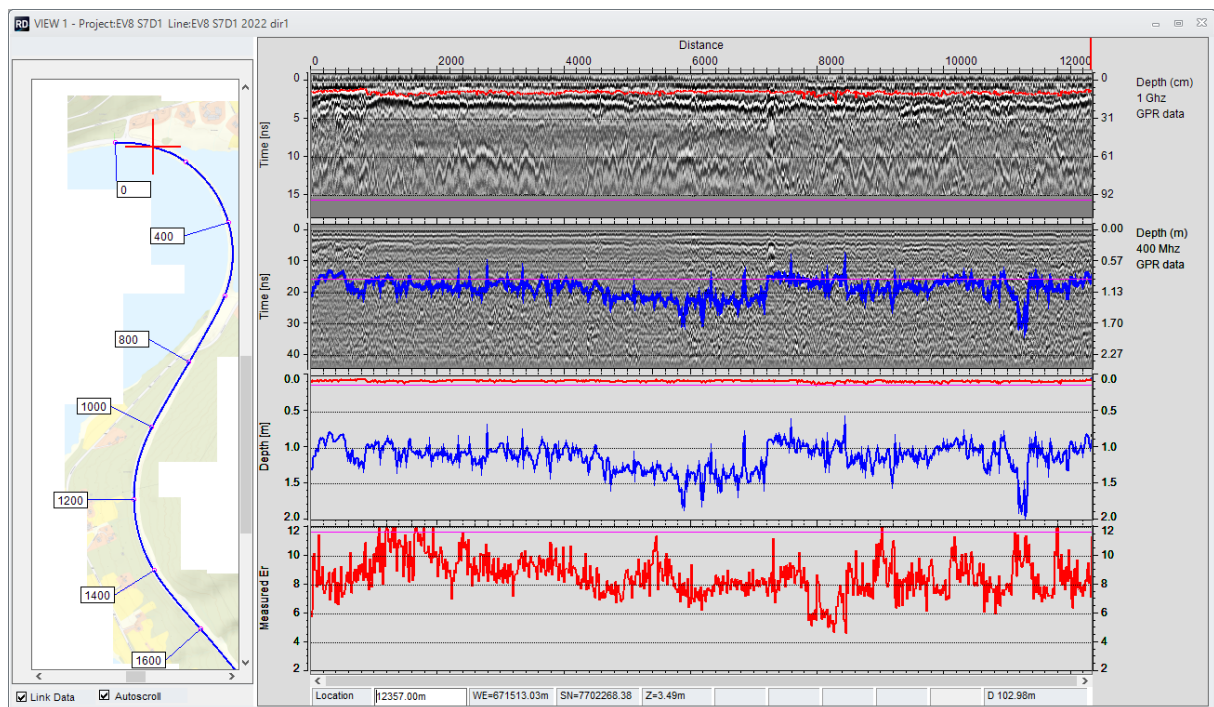


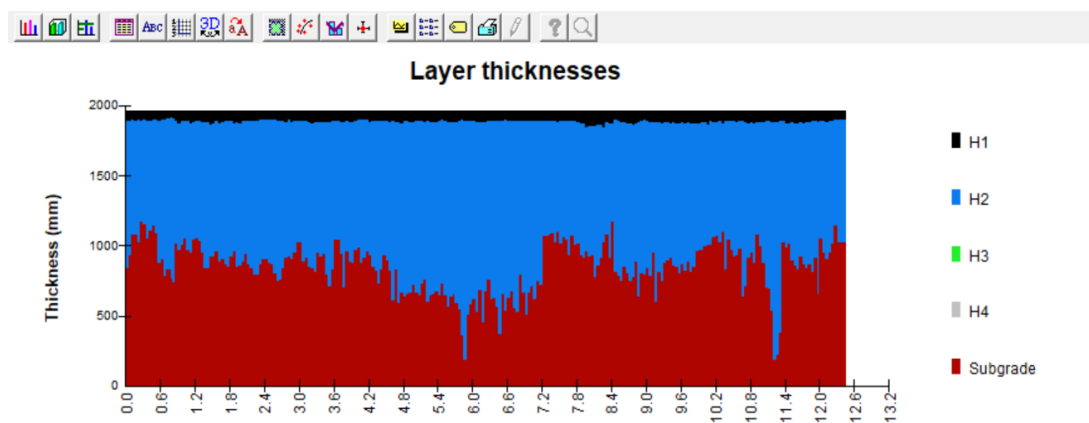
Figure 10: Lagdeling i ELMOD for Ev6 S174D1 DIR1

Figure 11 shows the 'Use parameter setup' dialog box. It includes fields for 'From' (0.001) and 'To' (8.412) values, a 'Seed Modulus' field, and a 'Material' dropdown menu. The 'Material' dropdown is set to 'AC'. Other options include 'Base', 'Subgrade', and 'PCC is layer no.'. There is also a 'Max depth to rigid layer' field and a 'Get mean GPR thicknesses' button.

Figure 11: Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Ev6 S174D1 DIR1



Figur 12: Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev8 S7D1 DIR1



Figur 13: Lagdeling i ELMOD for Ev8 S7D1 DIR1

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	76		AC
2	1044		Base
3			Subgrade
4			
5			

Max depth to rigid layer: mm

PCC is layer no.: None

Use parameter setup: ☒ Use GPR Data

Get mean GPR thicknesses

Figur 14: Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Ev8 S7D1 DIR1

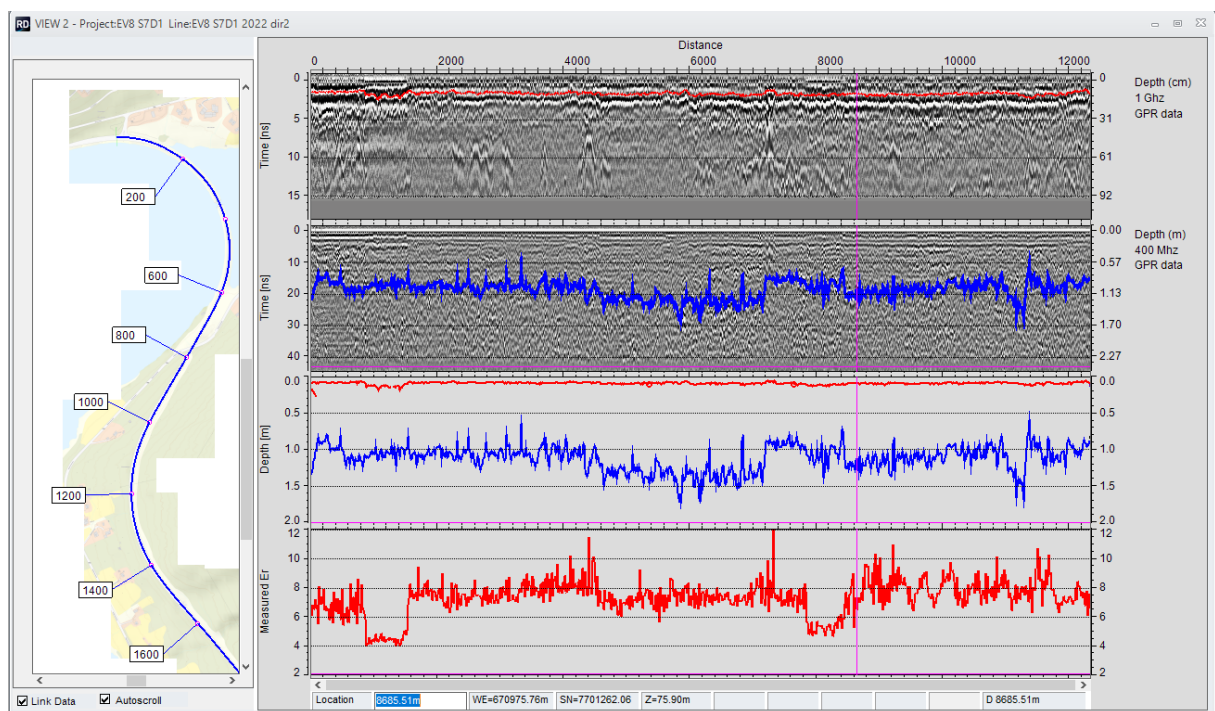


Figure 15: Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev8 S7D1 DIR2

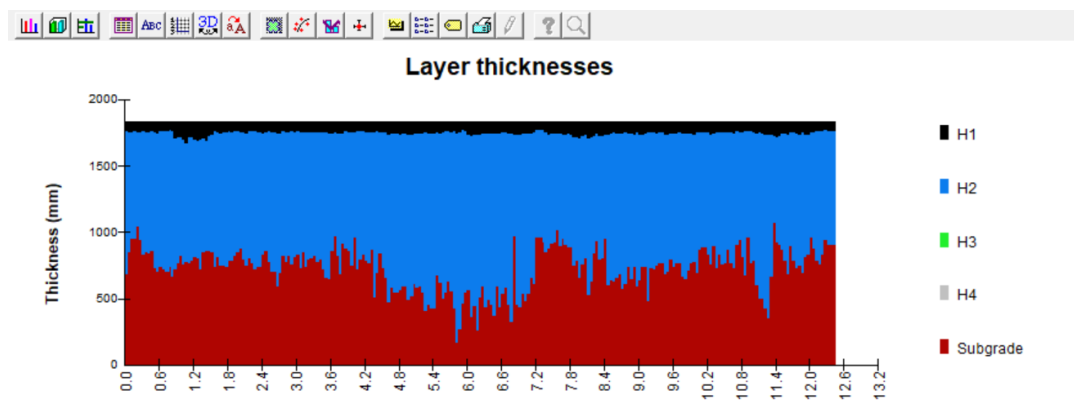
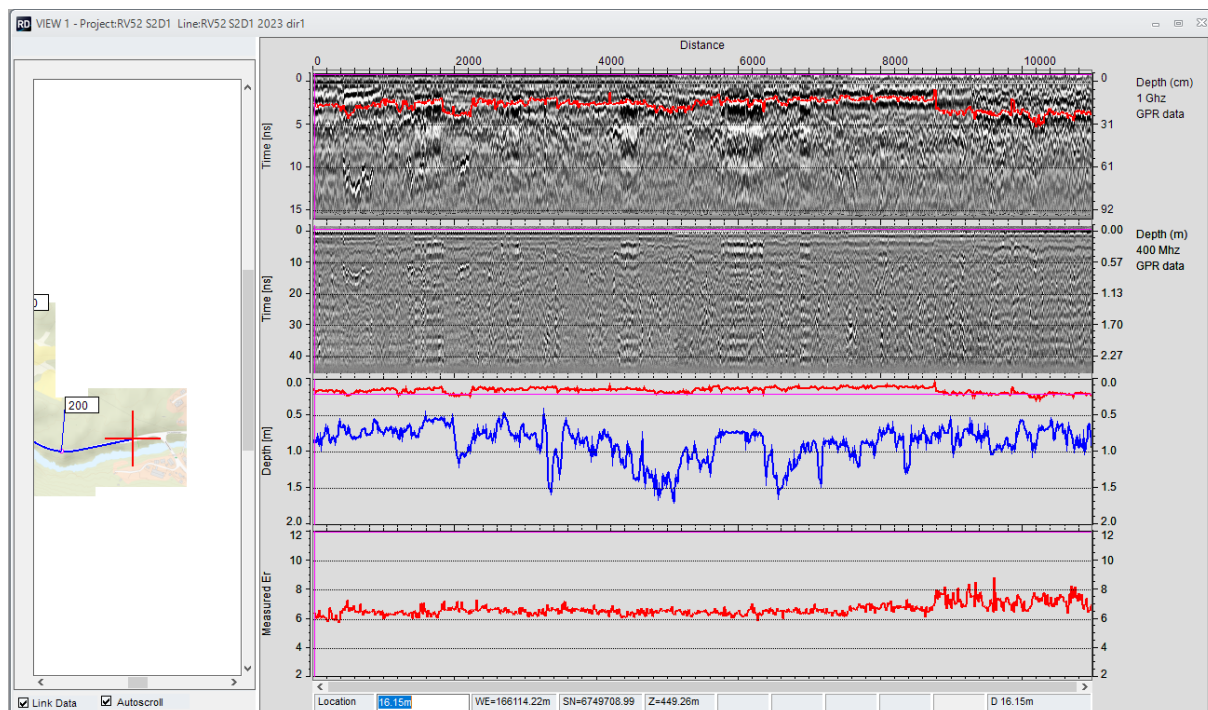


Figure 16: Lagdeling i ELMOD for Ev8 S7D1 DIR2

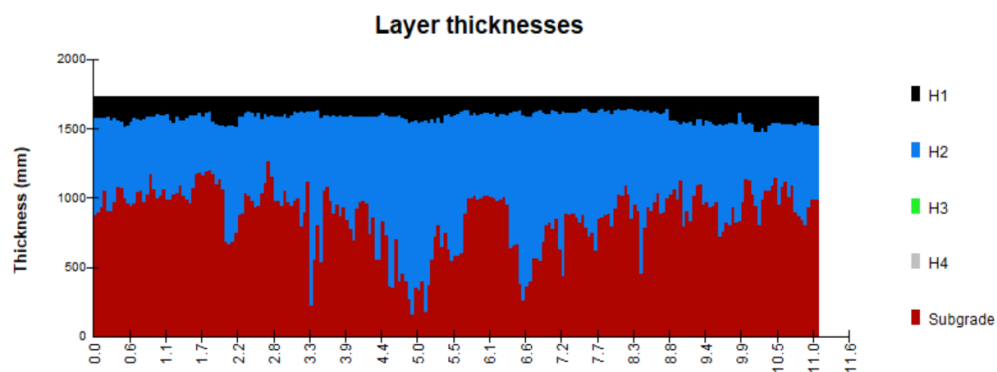
Figure 17 shows the ELMOD software parameter setup dialog box. It includes fields for 'From' (0.009) and 'To' (12.353) distances, and a dropdown for 'SI_PCN-Flex'. Below, a table lists layers 1 to 5 with their thicknesses (90, 1026, etc.) and materials (AC, Base, Subgrade). There are also checkboxes for 'Use GPR Data' and a button for 'Get mean GPR thicknesses'.

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	90		AC
2	1026		Base
3			Subgrade
4			
5			

Figure 17: Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Ev8 S7D1 DIR2



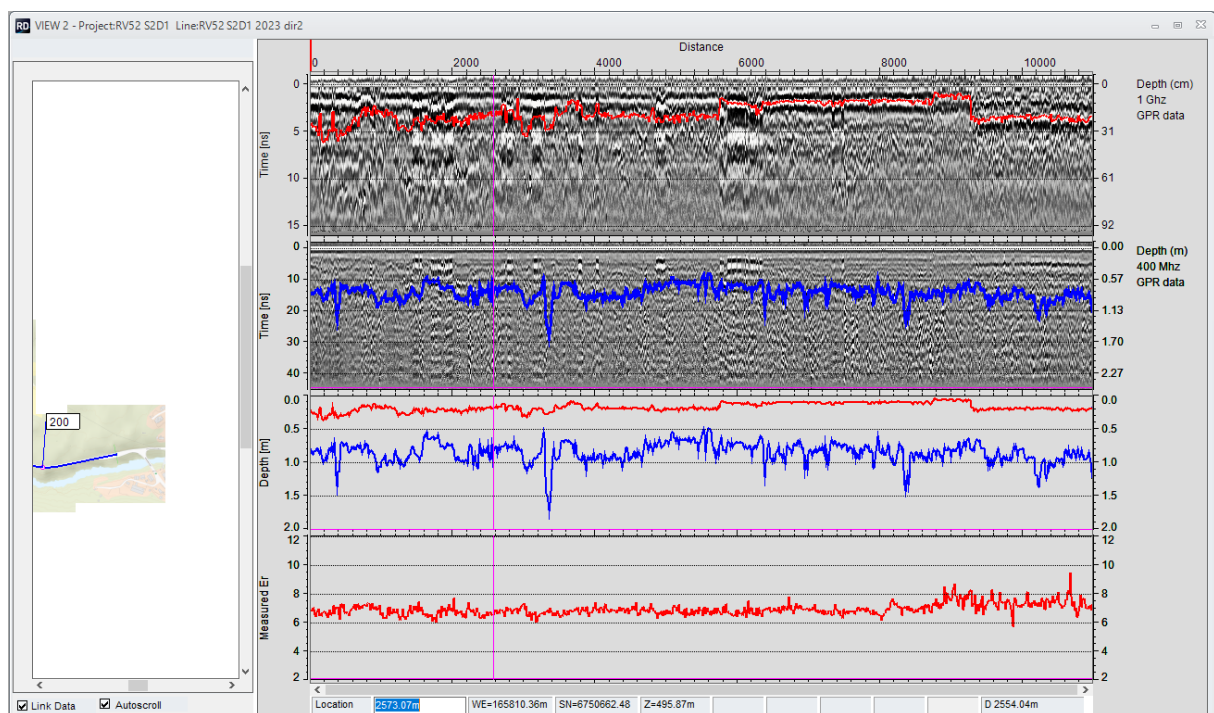
Figur 18: Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Rv52 S2D1 DIR1



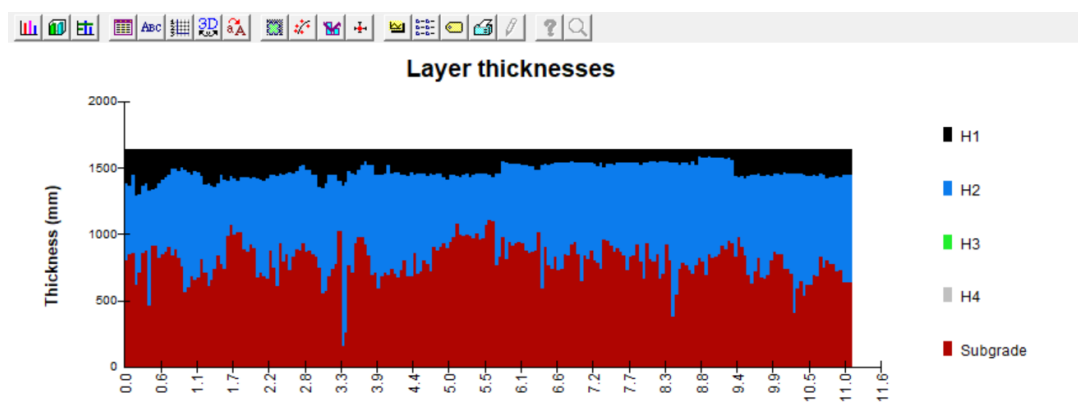
Figur 19: Lagdeling i ELMOD for Rv52 S2D1 DIR1

From	To	Use parameter setup	
1: 0.003	10.995	SI_PCN-Flex	
Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	152	at °C	AC
2	718		Base
3		E2/E3:	Subgrade
4		E3/E4:	
5		E4/E5:	
Max depth to rigid layer		PCC is layer no.	Use GPR Data
		None	
Get mean GPR thicknesses			

Figur 20: Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Rv52 S2D1 DIR1



Figur 21: Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Rv52 S2D1 DIR2



Figur 22: Lagdeling i ELMOD for Rv52 S2D1 DIR2

Figur 23: Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Rv52 S2D1 DIR2

Backcalculations

Backcalculation ble gjennomført i ELMOD ved bruk av funksjonen *Deflection Basin Fit*.

Analysen ga elastisitetsmoduler for asfaltlaget (E1), bærelaget (E2) og undergrunnen (E_{sub}).

Figurene viser moduli i megapascal (MPa) på y-aksen og kjedeposisjon (m) på x-aksen, mens tabellene oppsummerer resultatene for hver strekning.

Figur 24-28 viser resultatene fra backcalculation for henholdsvis Ev6 S174D1 DIR1, Ev8 S7D1 DIR1, Ev8 S7D1 DIR2, Rv52 S2D1 DIR1 og Rv52 S2D1 DIR2. Tilhørende resultater fremgår av Tabell 12-16. En samlet oversikt over alle strekningene er gitt i Tabell 11.

Tabell 11: Gjennomsnittlige E-moduli (MPa) for asfaltlag (E1), bærelag (E2) og undergrunn (E_{sub}) per veistrekning.

Vegstrekning	Kjedeintervall	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E_{sub} [MPa]
Ev6 S174D1 DIR1	1 m – 8412 m	4674	72	148
Ev8 S7D1 DIR1	0 m – 12357 m	21394	268	234
Ev8 S7D1 DIR2	9 m – 12353 m	13089	245	214
Rv36 S3D1 DIR1	9m - 6188 m	-	-	-
Rv36 S3D2 DIR2	32 m - 6184 m	-	-	-
Rv52 S2D1 DIR1	3 m – 10995 m	9300	147	159
Rv52 S2D1 DIR2	6 m – 10998 m	11437	128	157

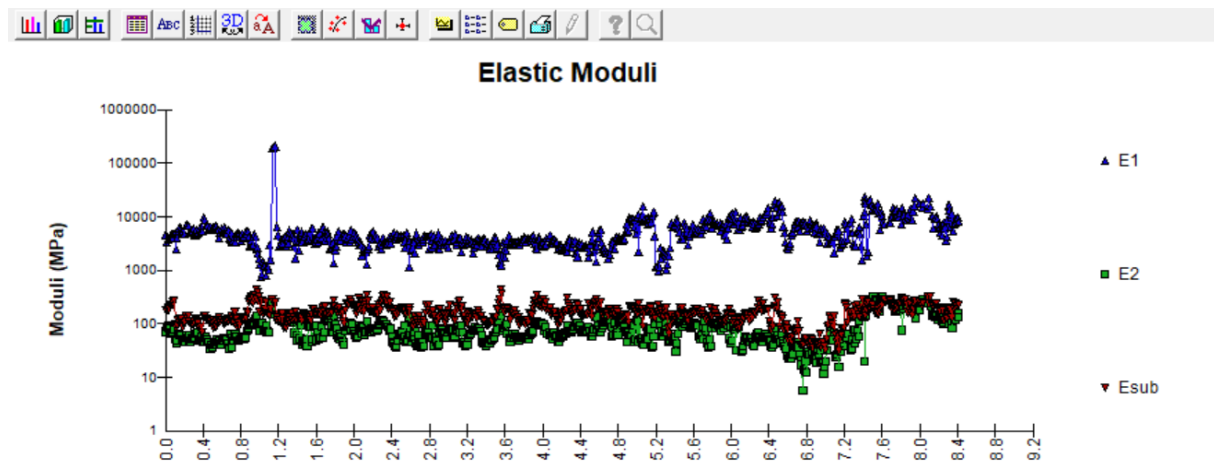
Asfaltmodulen fra Ev6 S174D1 ligger i akseptabelt nivå, mens verdiene fra Ev8 S7D1 fremstår betydelig høyere enn det som er vanlig for asfalt. Rv52 S2D1 har også en høy asfaltmodul.

For bærelaget ble det beregnet 72-268 MPa, noe som stemmer godt med litteraturverdier.

Undergrunnen ligger også innenfor typiske verdier for løsmasser og berggrunn.

Det ble samtidig lagt merke til at enkelte strekninger som Ev6 S174D1 DIR1, Rv52 S2D1 DIR1 og DIR2 hadde verdier der bærelaget (E2) ble beregnet lavere enn undergrunnen (E_{sub}).

Normalt forventes E2 å være høyere, ettersom bærelaget består vanligvis av mer kompakte og stive materialer enn undergrunnen. At E_{sub} overstiger E2 kan forekomme lokalt, men det er uvanlig at dette skjer over lengre sammenhengende strekninger.



Figur 24: Graf over elastiske moduler vs. Kjedeposisjon fra ELMOD for Ev6 S174D1 DIR1

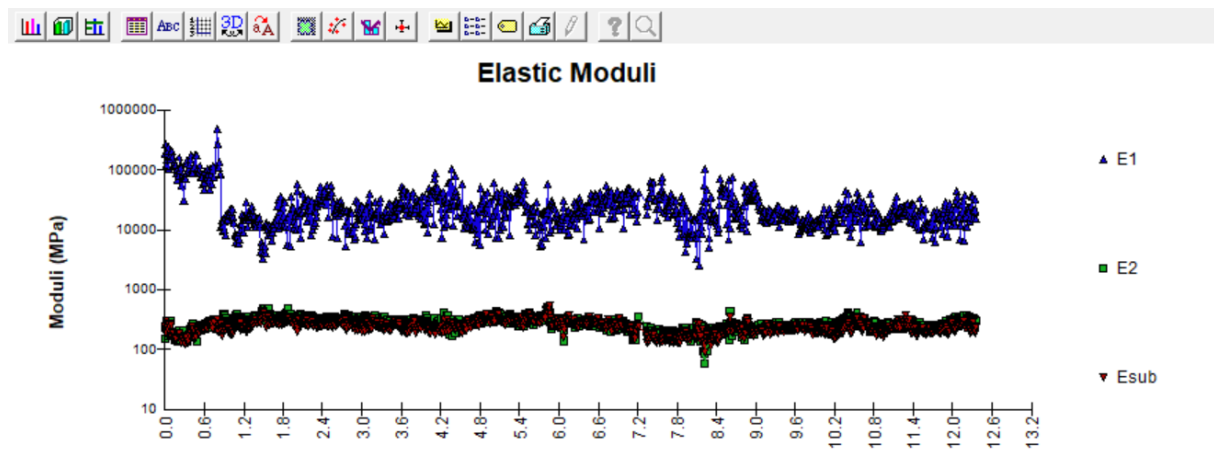
Tabell 12: Summerte resultater fra backcalculation for Ev6 S174D1 DIR1

S1

Station: 0.001 to 8.412 * = Log

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	807	4674	1.806
E2 *	807	72	1.730
E3 *	807	148	1.526

Save values Report



Figur 25: Graf over elastiske moduler vs. Kjedefosisjon fra ELMOD for Ev8 S7D1 DIR1

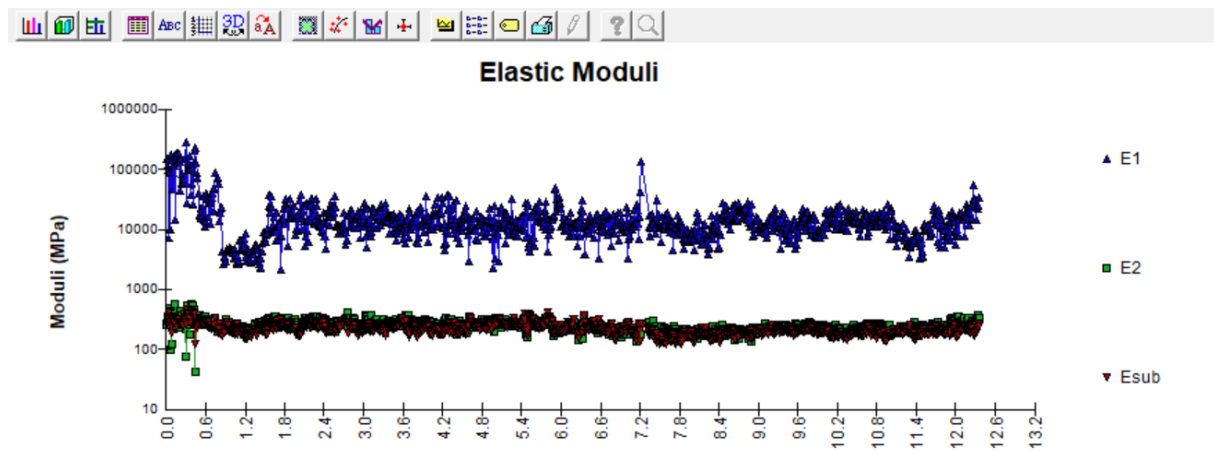
Tabell 13: Summerte resultater fra backcalculation for Ev8 S7D1 DIR1

S1

Station: 0 to 12.357 * = Log

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	1198	21394	1.974
E2 *	1198	268	1.266
E3 *	1198	234	1.272

Save values Report



Figur 26: Graf over elastiske moduler vs. Kjedeposisjon fra ELMOD for Ev8 S7D1 DIR2

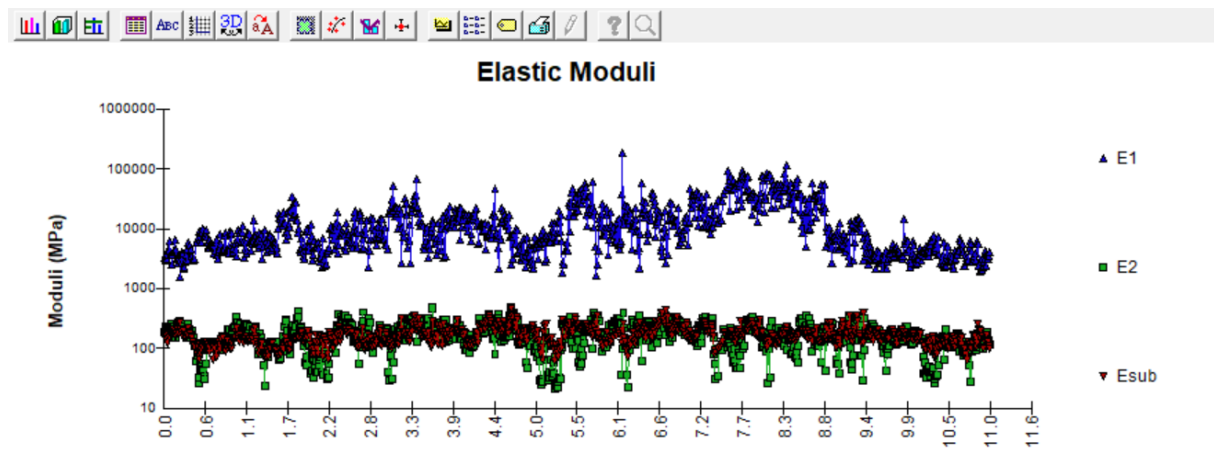
Tabell 14: Summerte resultater fra backcalculation for Ev8 S7D1 DIR2

S1

Station: 0.009 to 12.353 * = Log

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	1195	13089	1.951
E2 *	1195	245	1.226
E3 *	1195	214	1.236

Save values Report



Figur 27: Graf over elastiske moduler vs. Kjedeposisjon fra ELMOD for Rv52 S2D1 DIR1

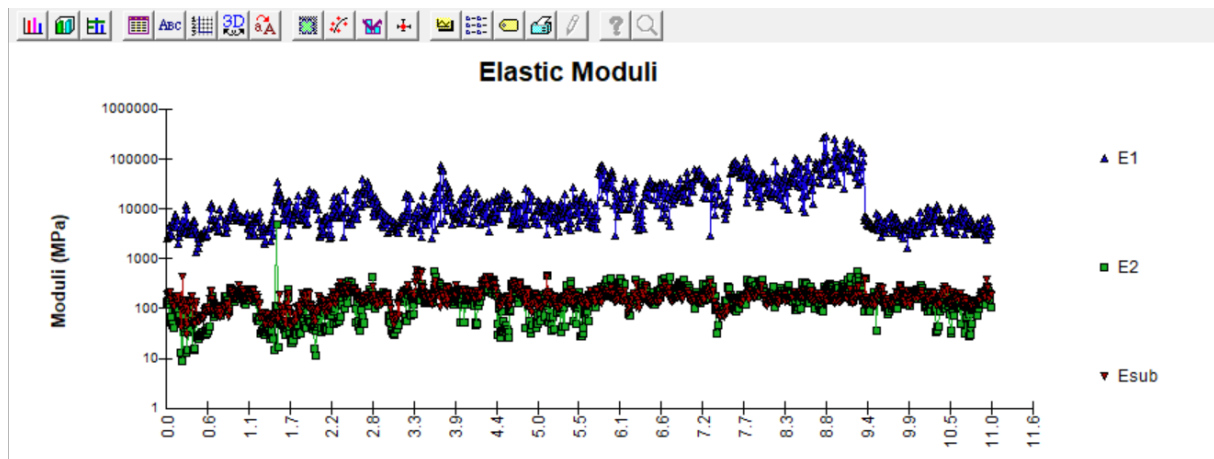
Tabell 15: Summerte resultater fra backcalculation for Rv52 S2D1 DIR1

S1

Station: 0.003 to 10.995 * = Log

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	1082	9300	2.396
E2 *	1082	147	1.796
E3 *	1082	159	1.391

Save values Report



Figur 28: Graf over elastiske moduler vs. Kjedefosisjon fra ELMOD for Rv52 S2D1 DIR2

Tabell 16: Summerte resultater fra backcalculation for Rv52 S2D1 DIR2

S1

Station: 0.006 to 10.998 * = Log

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	1085	11437	2.668
E2 *	1085	128	2.043
E3 *	1085	157	1.480

Save values Report

Diskusjon

Analysene viste at resultatene fra backcalculation varierte betydelig mellom de ulike vegstrekningene. For Ev8 S7D1 og Rv52 S2D1 ble det beregnet asfaltmoduler (E1) som lå betydelig høyere enn det som normalt forventes. Dette kan i stor grad forklares med at RAPTOR registrerer ett «dropp» per punkt. Pålitelige resultater anbefales minst to og helst tre dropp i ELMOD som i FWD, ettersom flere repetisjoner gir mulighet for gjennomsnittsberegning og mer stabile verdier. Ved kun ett dropp gir økt usikkerhet og gjør backcalculation mer følsom. I tillegg er tilgjengelig geofoner begrenset til D1-D7, vanligvis kan man ha opptil D9. I tillegg, oppfylte ikke noe av enkelte verdier kvalitetskriteriene, for eksempel $D1 \geq 200 \mu\text{m}$ og $D9 \geq 20 \mu\text{m}$. Når nedbøyningen er for liten, reduseres kvaliteten på beregningene ytterligere i ELMOD. Videre, når det gjelder forsøk på å justere lagtykkelser, ga det ubetydelige endringer, noe som understreker at problemene i hovedsak ligger i datagrunnlaget.

Under tolkningen av lagtykkelser ble det lagt merke til at dielektriske verdiene for Ev6 S174D1 DIR1, Ev8 S7D1 DIR1 og Ev8 S7D1 DIR2 avvek fra det som normalt forventes. Vanlige dielektriske verdier ligger mellom 5,5 og 7, men for disse strekningene ble det observert store forskjeller. For Rv52 S2D1 DIR1 og DIR2 ble derimot verdiene vurdert som mer stabile og realistiske langs hele strekningen. Ifølge opplæringsmaterialet i Road Doctor kan urealistiske dielektriske verdier skyldes at prøven er skadet, eller at laget ikke er tolket korrekt. Lagene ble derfor tolket på nytt for de aktuelle strekningene, men resultatet viste ingen forbedring, noe som er uvanlig. Det kan være relatert til begrensninger i datagrunnlaget eller manglende erfaring, ettersom problemet heller ikke kunne løses gjennom kursmateriale eller ved bruk hjelp verktøy på Road Doctor.

For Rv36 S3D1 ble lagtykkelser ikke tolket, ettersom det kun forelå air coupled data og ingen oppgravingsprøver. Selv om lagtykkelser teoretisk kan estimeres fra air coupled, gir fraværet av ground coupled data og feltprøver et svært usikkert grunnlag. Dette gjorde at backcalculation ikke ble gjennomført for denne strekningen. Likevel ble last og defleksjon registrert, og resultatene viste avvikende lave verdier rundt enkelte kjedeposisjoner, noe som skyldes at målingene ble utført på bru.

Et interessant funn er at enkelte strekninger viste bærelagsmoduler, E_2 , lavere enn undergrunnsmoduler, E_{sub} . Normalt forventes E_2 å være høyere, ettersom bærelaget består av mer kompakte og stivere materialer enn undergrunn. At E_{sub} overstiger E_2 kan forekomme over noen strekninger, men det er uvanlig at dette skjer over lengre strekninger. En mulig forklaring er at tykke asfaltlag reduserer forskjellen mellom lagene, slik at E_2 og E_{sub} blir beregnet til mer like verdier.

Mangelen på oppgravingsprøver for flere strekninger, særlig Rv36 S3D1 og Rv52 S2D1, økte usikkerheten i lagtykkelsestolkningen. I slike tilfeller ble tolkningene mer subjektive og avhengige av signalbehandling i Road Doctor. Ved slutten av tolkningen ble det observert tydelige forskjeller mellom DIR1 og DIR2 for Rv52 S2D1. Basert på datasettet fremstod DIR2 som mer pålitelig, da det ga tydeligere grenser mellom de ulike lagene og dermed bedre avgjørelse under tolkningen.

Til tross for begrensningene gir resultatene verdifull innsikt i hvordan datakvalitet påvirker påliteligheten til backcalculation. For Statens Vegvesen understreker dette viktigheten av å sikre et godt datagrunnlag gjennom tilstrekkelig antall dropp, bruk av nok geofoner, representative oppgravingsprøver og kvalitetskontroll av dielektriske verdier. Slike tiltak vil bidra til sterkere og sammenlignbare analyser, og dermed til bedre beslutningsgrunnlag for vedlikehold og dimensjonering av vegoverbygninger.

Konklusjon og videre oppfølging

Målet med prosjektet var å gjennomføre backcalculation på fire vegstrekninger og dermed bidra til å styrke datagrunnlaget for sammenhenger mellom elastisitetsmoduli og defleksjonsparametere. Arbeidet ble delvis oppnådd: analysene kunne gjennomføres på Ev6 S174D1, Ev8 S7D1 og Rv52 S2D1, mens Rv36 S3D1 ikke lot seg tolke fullt ut på grunn av manglende datagrunnlag.

Resultatene viste tydelige forskjeller mellom strekningene. Asfaltmodul til Ev6 S174D1 hadde en akseptabel verdi sammenlignet med litteratur, mens Ev8 S7D1 og Rv52 S2D1 viste svært høye asfaltmoduler som antas å henge sammen med begrenset datagrunnlag. Bærelag og undergrunn ble i hovedsak beregnet til nivåer innenfor forventede intervaller, men enkelte strekninger viste uvanlige forhold der E_2 ble lavere enn E_{sub} over lengre avstander.

Selv om ambisjonen om å supplere empiriske modeller ikke ble fullt ut realisert, kan verdiene fra denne rapporten likevel benyttes i videre arbeid for å lage plottene E_1 vs. SCI, E_2 vs. BCI og E_{sub} vs. BCI. Samtidig gir analysene nyttig innsikt i hvordan datakvalitet direkte påvirker påliteligheten i lagtykkelsestolkning og backcalculation. For Statens vegvesen fremheves behovet for flere dropp i målingene, bruk av hele geofonoppsettet og representative oppgravingsprøver.

For videre oppfølging, anbefales det å gjennomføre nye analyser basert på et mer omfattende datagrunnlag. Flere «dropp» målinger – registreringer av samme trase i en annen sesong når det er mulig, samt kontroll av dielektriske verdier og inkludering av oppgravingsprøver, kan gi et mer robust grunnlag og bidra til å redusere usikkerheten.

Referanser

Dynatest. (u.å.). *ELMOD – Evaluation of Moduli and Overlay Design*. Hentet fra

<https://www.dynatest.com>

Kassem, A. (2023). *Development of empirical models between deflection parameters and layer moduli for flexible pavements* [Masteroppgave, OsloMet – storbyuniversitetet].

OsloMet – Open Digital Archive.

Meteorologisk institutt. (u.å.). *SeNorge/seklima – Meteorologiske data*. Hentet fra

<https://seklima.met.no>

Statens vegvesen. (u.å.). *Road Doctor* [Programvarebeskrivelse]. Programportalen. Hentet fra

<https://programportalen.vegvesen.no/>

Statens vegvesen. (u.å.). *Vegkart*. Hentet fra <https://vegkart.atlas.vegvesen.no>

Statens vegvesen. (2024). *N200 Vegbygging* (Håndbok N200). Statens vegvesen.

<https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/vegnormaler>



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag