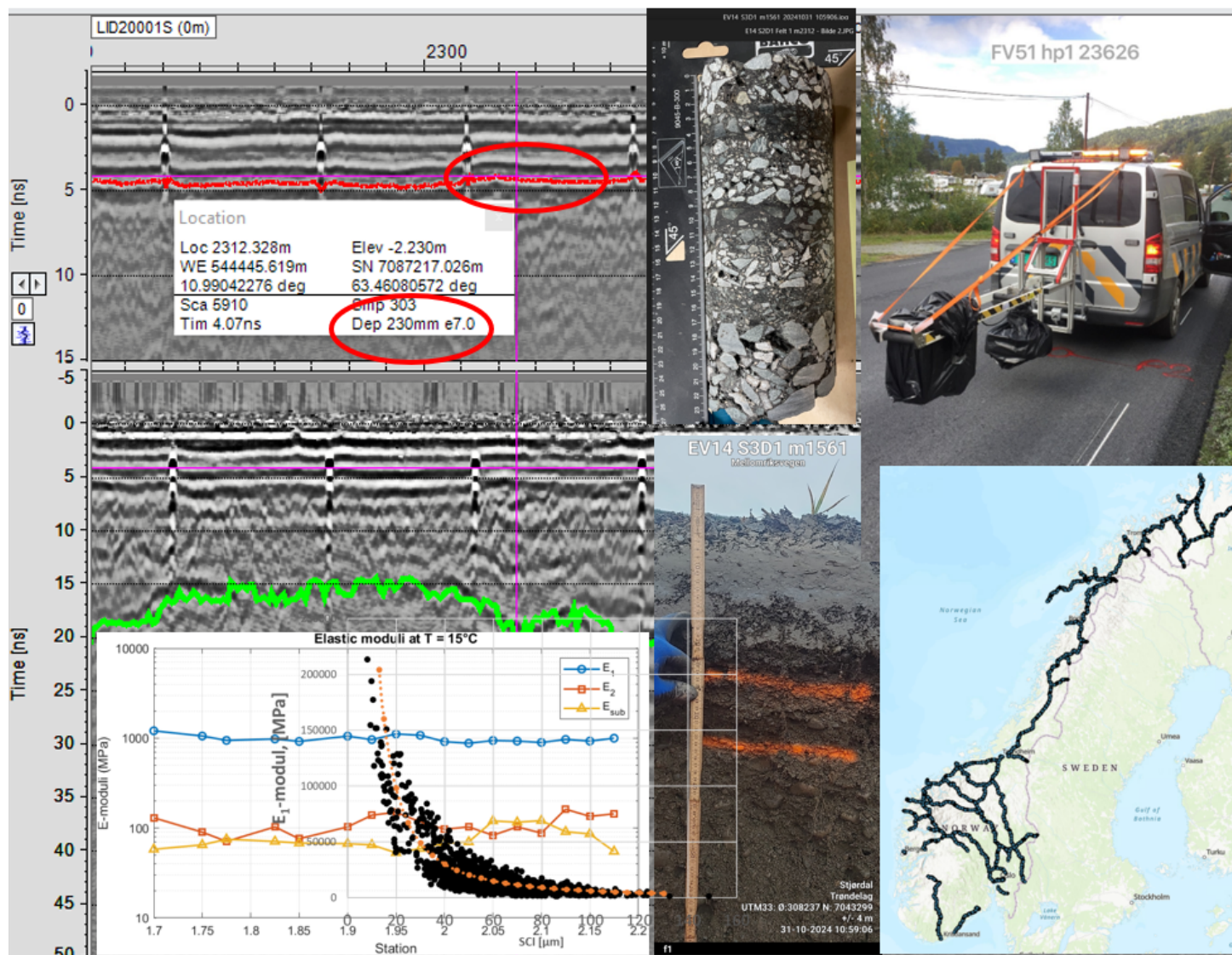


FoUI - Georadarprosjekt

- Lagtykkelsestolkning og etterregning av E-moduler ved bruk av GPR, FWD og RAPTOR

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1109



Tittel

FoUI - Georadarprosjekt

Undertittel

- Lagtykkelsestolkning og etterregning av E-moduler ved bruk av GPR, FWD og RAPTOR

Forfatter

Tatek Fekadu Yideti

Avdeling

Vegutforming

Seksjon

Vegteknologi

Prosjektnummer

VVL10610-010

Rapportnummer

1109

Prosjektleder

Tatek Fekadu Yideti

Godkjent av

Berthe J. Dongmo-Engelan

Emneord

Georadar, Fallodd, RAPTOR, Lagtykkelser, E-modul, RoadDoctor, ELMOD

Sammendrag

Prosjektet fastsatte lagtykkelser i vegoverbygninger og beregnet E-moduler i asfalt, bærelag og undergrunn ved bruk av GPR, fallodd og RAPTOR. Resultatene viste generelt godt samsvar med litteraturen, og modulene for ubundne materialer lå innenfor forventede intervaller. Analysene viser at høy datakvalitet er avgjørende for pålitelige lagtykkelser og modulberegninger. Videre anbefales flere målinger, gjentatte registreringer i ulike sesonger, kontroll av dielektriske verdier og inkludering av oppgravingsprøver for å styrke datagrunnlaget og redusere usikkerhet i resultatene.

Title

Research, Development and Innovation Project on Ground Penetrating Radar

Subtitle

Layer thickness Analysis and back-calculation of E-moduli using GPR, FWD, and RAPTOR

Author

Tatek Fekadu Yideti

Department

Road Design

Section

Road Technology

Project number

VVL10610-010

Report number

1109

Project manager

Tatek Fekadu Yideti

Approved by

Berthe J. Dongmo-Engelan

Key words

Ground Penetrating Radar (GPR), Falling Weight Deflectometer (FWD), RAPTOR, Layer Thickness, E-modulus, RoadDoctor,

Summary

The project determined layer thicknesses in pavements and calculated E-moduli for asphalt, base layers, and subgrade using GPR, FWD, and RAPTOR. Results generally agreed with the literature, and moduli for unbound materials were within expected ranges. Analyses show that high data quality is crucial for reliable layer thickness and modulus calculations. Further measurements, repeated surveys in different seasons, verification of dielectric values, and inclusion of excavation samples are recommended to strengthen the dataset and reduce uncertainty.



Sammendrag

Rapporten omhandler bruk av *Georadar (GPR)* og *RAPTOR* for å bestemme lagtykkelser og 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 etterregning 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 bakke koplede-målinger og oppgravingsprøver, noe som gjorde fullstendig analyse umulig, selv om defleksjonsdata ble registrert. På Rv52 S2D1 kunne lagtykkelser tolkes i begge kjørefelt, men manglende oppgravingsprøver gjorde vurderingene mer usikre. Etterregningen 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 undergrunns modulen (E_{sub}).

Analysene viser at datakvalitet har stor betydning for påliteligheten i både lagtykkelsestolkning og etterregning. 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 korrelasjon 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.

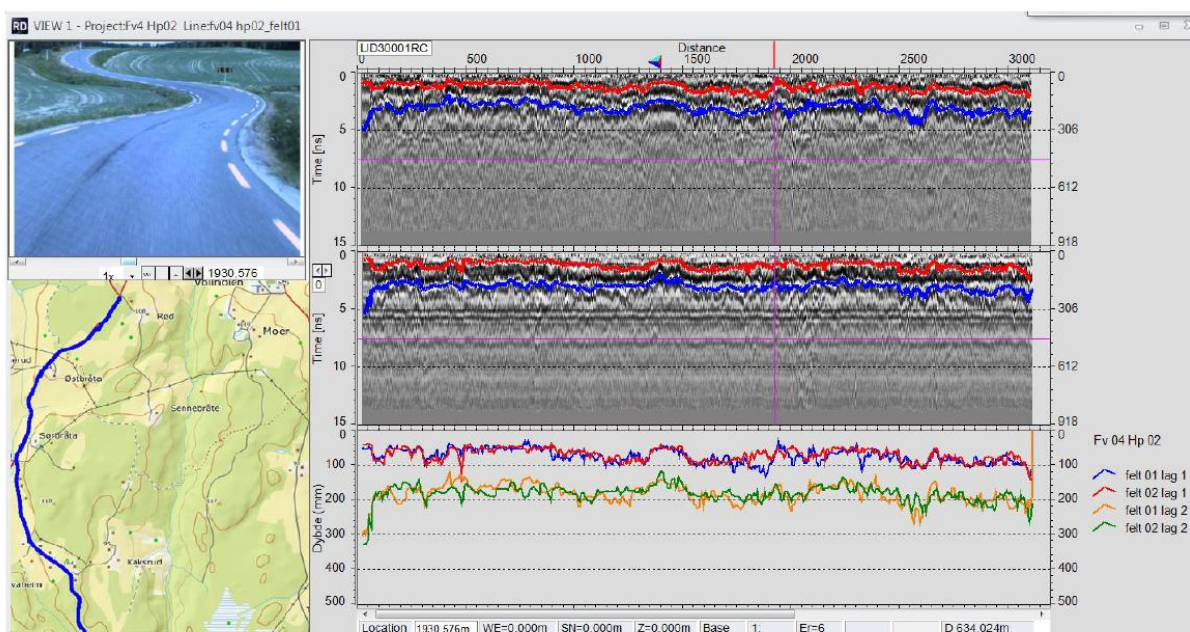
Innhold

Sammendrag	1
1. Innledning	3
1.1. Bakgrunn	3
2. Nedbøyningsmålinger med RAPTOR og Fallodd (FWD)	5
2.1. RAPTOR	5
2.2. Fallodd (FWD)	6
2.2.1. Parametere for nedbøyningsbasen	6
2.3. Georadar	7
2.4. Etterregning av Elastisitetsmoduler	8
3. Material innsamling	9
3.1. Vegstrekninger	9
4. Resultater	9
4.1. Kartgrunnlag og tolkning av lagtykkelser	9
4.2. Nedbøyningsdata med Fallodd	10
4.3. Georadar analyserte lagtykkelser	12
4.4. Oppgravingsprøver som kalibrering av georadar	14
4.5. Betydning av lagtykkelser og elastisitetsmoduler	15
Etterregning av elastisitetsmoduler	15
4.6. Nedbøyningsdata ved bruk av RAPTOR	18
5. Tolkning av lagtykkelser ved bruk av Road Doctor® (RD)	23
5.1. Road Doctor®-programvare	23
5.2. Bearbeiding og tolkning av Georadar data	23
5.3. Tolkning av Georadar data	24
5.4. Visualisering av Georadar data i Road Doctor	24
5.5. Tolkning av lagtykkelser	25
5.6. Etterregning av E-moduler	29
6. Nedbøyninger indeks parameters og E-moduler	32
7. Konklusjon og videre oppfølging	35
Referanser	36

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Forskning, utvikling og innovasjon (FoUI) prosjektet Forskning, utvikling og innovasjon – Georadar (FoUI Georadar) startet i januar 2024. Hovedmålet er å fastsette lagtykkelser i eksisterende vegoverbygninger. For mange eldre veger finnes det begrenset og ofte mangelfull informasjon om lagtykkelser i Nasjonal vegdatabank (NVDB). Denne mangelen skaper usikkerhet ved vurdering av behov for vedlikeholds- og forsterkningstiltak. Kunnskap om overbygningens lagtykkelser er også avgjørende for å kunne beregne vegens bæreevne og stivhetsmodul. Figur 1 viser et eksempel på måling av dekketykkelse i tolkningsvinduet til Road Doctor for fylkesveg fv. 4 (Tatek, 10298 – VEGT – 1).



Figur 1. Lagtykkelsesmålingen i tolkningsvinduet for fv. 4 fra Hp 02 m:20-Hp01 m:3117

Kartlegging av den strukturelle tilstanden til norske veger er en forutsetning for effektiv planlegging av vedlikehold, rehabilitering og dimensjonering av nye konstruksjoner. Statens vegvesen har de siste årene tatt i bruk flere ikke-destruktive målemetoder for å vurdere både vegdekke og underliggende lag. Blant de viktigste verktøyene i dette arbeidet er RAPTOR og falloddsmåling (Falling Weight Deflectometer, FWD), som brukes til å kartlegge og vurdere vegens bæreevne gjennom registrering av nedbøyninger. Georadar benyttes til å bestemme

lagtykkelser i vegoverbygningen. Kombinasjonen av disse verktøyene gir et effektivt og pålitelig grunnlag for planlegging av drift og vedlikehold.

I perioden 2021–2023 ble nesten hele riksveinettet i Norge målt med RAPTOR i samarbeid mellom Rambøll og Statens vegvesen, under ledelse av Drift- og vedlikeholdsavdelingen i Geofag fagressursseksjon. I dette FoUI prosjektet ble RAPTOR-data behandlet og analysert for 13 utvalgte vegstreknings: E6 S174D1, E8 S7D1, Rv36 S3D1 og Rv52 S2D1. Prosessen startet med opprydding og strukturering av datagrunnlaget, etterfulgt av oppbygging av en database i Microsoft Access. Databasen ble deretter koblet til analyseverktøyet ELMOD (utviklet av Dynatest) for etterregning av elastisitetsmoduler i de ulike lagene.

Et sentralt delsteg i prosessen var tolkning og bestemmelse av lagtykkelser i Road Doctor. Resultatene herfra ble eksportert og brukt som input i ELMOD. Vegkart ble benyttet som støtteverktøy for å gi en visuell oversikt over vegstrekningene og deres omgivelser.

Innenfor FoUI Georadar-prosjektet ble det også gjennomført en masteroppgave ved OsloMet, hvor det ble utviklet empiriske sammenhenger mellom elastisitetsmoduler og defleksjonsparametere, blant annet E1 vs. SCI, E2 vs. BCI og Esub vs. BCI. Resultatene var lovende, men datagrunnlaget var begrenset til ni vegstreknings. Enkelte områder i figurene manglet datapunkter, noe som reduserte robustheten i modellene og gjorde dem sårbare for uteliggere. I tillegg gjennomførte en sommerstudent analyser av fire vegstreknings, der lagtykkelsene i eksisterende overbygninger ble tolket og vurdert. Resultatene viste god overensstemmelse med oppgravingsprøver som ble brukt til kalibrering og validering.

2. Nedbøyningsmålinger med RAPTOR og Fallodd (FWD)

Nedbøyningsmålinger er en viktig metode for å vurdere bæreevnen til vegoverbygninger. Ved bruk av RAPTOR (Rapid Pavement Tester) og FWD (Falling Weight Deflectometer) registreres vegens respons på en kontrollert belastning, noe som gir innsikt i tilstanden til de ulike lagene i konstruksjonen. RAPTOR er et mobilbasert system som muliggjør rask datainnsamling under kjøring, mens FWD gir mer detaljerte punktmålinger ved å simulere hjullast gjennom fallende vekt. Kombinasjonen av disse metodene gir et helhetlig bilde av vegens strukturelle egenskaper og er nyttig for planlegging av vedlikehold og rehabiliteringstiltak.

2.1. RAPTOR

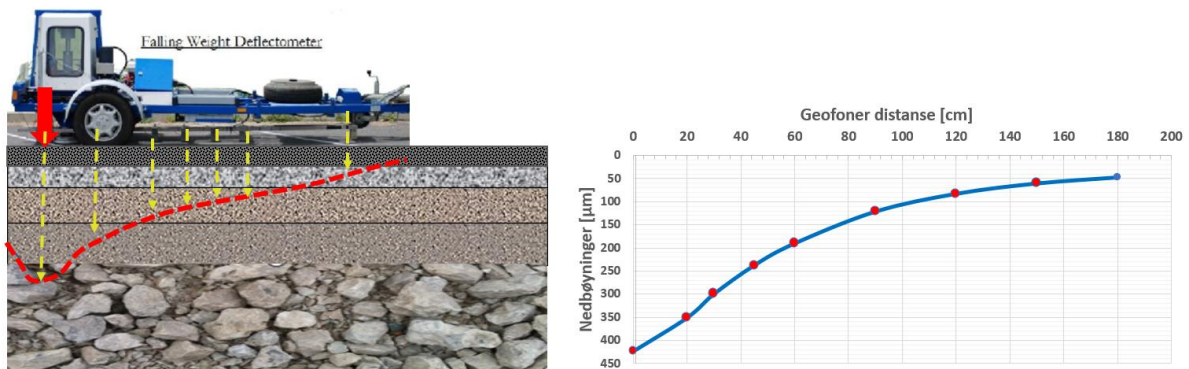
RAPTOR er et laserbasert nedbøyningsmålesystem utviklet for hurtig og kontinuerlig registrering av vegens defleksjoner uten behov for kjerneboring eller trafikkavvikling. Utstyret kombinerer høy presisjon med effektiv datainnsamling over lengre strekninger og fremstår som et aktuelt alternativ til tradisjonelle fallodds målinger (FWD). Teknologien, utviklet av Dynatest, muliggjør vurdering av vegdekker med hensyn til stivhet og deformasjon på en ikke-destruktiv måte. RAPTOR kan benyttes under ulike trafikk- og vegforhold, inkludert på høyhastighetsveger, og registrerer vegens respons mens kjøretøyet er i bevegelse. Dette gir et mer representativt datagrunnlag som reflekterer faktiske trafikkbelastninger og driftsforhold. Bruk av RAPTOR anses derfor som et mer effektivt og realistisk verktøy enn FWD ved undersøkelser av vegstrekninger. Figur 2 viser RAPTOR utstyret.



Figur 2. RAPTOR i felt – kontinuerlige målinger under ordinær trafikk

2.2. Fallodd (FWD)

Falloddsmåling (FWD) er en sentral metode innen ikke-destruktiv testing, og Dynatest' FWD-utstyr benyttes for å kartlegge vegens mekaniske respons under støtpulsbelastning. En kontrollert last påføres en lastplate, og geofoner registrerer den resulterende nedbøyningen, noe som gir innsikt i belastningsfordelingen gjennom vegens lag. Lav nedbøyning indikerer en stiv og bærekraftig konstruksjon, mens høy nedbøyning antyder svakere eller mer fleksible lag. Figur 3 viser utstyret og en typisk nedbøyningsprofil.



Figur 3. Falloddsmåler og en typisk nedbøyningsprofil

Nedbøyningsmålinger i denne studien ble utført med en Dynatest 8000 Falling Weight Deflectometer (FWD). I Norge benyttes vanligvis en belastningsplate med diameter på 300 mm, der last og fallhøyde er satt slik at maksimal kraft blir rundt 50 kN. Datainnsamlingen skjer med 50 meters intervall i hver kjørebane, forskjøvet med 25 meter i nabobanen for å øke den romlige tettheten. For hver vegstrekning dokumenteres luft- og asfalttemperatur under testene.

2.2.1. Parametere for nedbøyningsbasen

Surface Curvature Index (SCI), beregnet med ligning (1), angir tilstanden til de øvre lagene i vegkonstruksjonen, som slitelag eller bærelag.

$$SCI = d_0 - d_{20} \quad (1)$$

hvor:

- d_0 : nedbøyning målt i sentrum av belastningsplaten
- d_{20} : nedbøyning målt 20 cm fra sentrum av belastningsplaten

Base Curvature Index (BCI), beregnet med ligning (2), gir informasjon om tilstanden i de dypere lagene i vegkonstruksjonen, spesielt forsterkingslag og undergrunn.

$$BCI = d_{90} - d_{120} \quad (2)$$

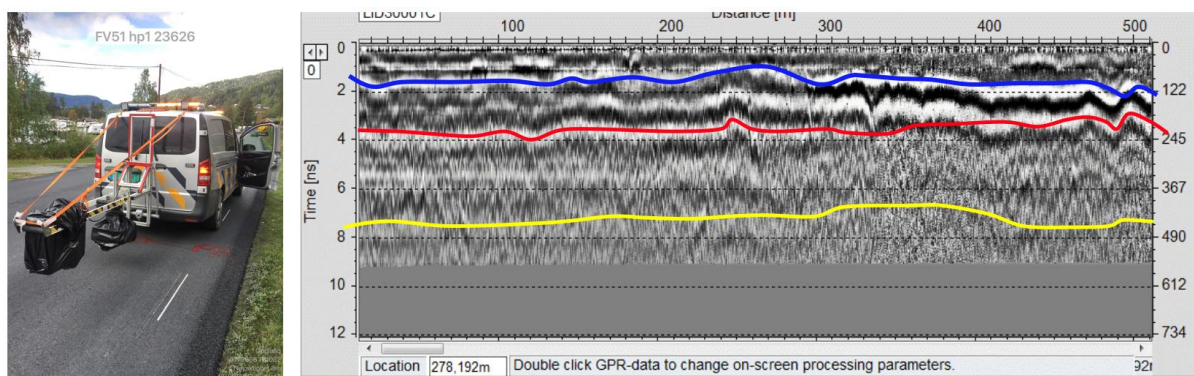
hvor:

- d_{90} : nedbøyning målt 90 cm fra sentrum av belastningsplaten
- d_{120} : nedbøyning målt 120 cm fra sentrum av belastningsplaten

2.3. Georadar

Georadar (GPR) er et måleverktøy som benyttes for å avbilde undergrunnen ved hjelp av elektromagnetiske signaler. Teknologien har røtter tilbake til tidlig på 1900-tallet, og ble på 1970-tallet tatt i bruk i USA til analyser av tunneler og broer. Mot slutten av tiåret undersøkte man også muligheten for å bruke GPR til å bestemme fuktighetsinnhold i materialer (Rexford & Kovacs, 1977). Senere ble metoden videreutviklet for å kartlegge hulromsandeler i vegkonstruksjoner.

På 1980- og 1990-tallet fikk GPR en mer sentral rolle i tilstandsanalyser av veger, særlig for bestemmelse av lagtykkelser. Flere land – blant annet USA, Finland og Storbritannia – integrerte da GPR som et supplement til konvensjonelle undersøkelsesmetoder (Saarenketo, 2006). Bruksområdene for georadar er i dag mange og omfatter blant annet arkeologiske undersøkelser, minerydding, vei- og baneanalyser, geofysiske undersøkelser og rettsmedisinske formål. Et eksempel på typisk GPR-utstyr og et skanningsbilde er vist i figur 4.



Figur 4. GPR-utstyr og et skanningsbilde

2.4. Etterregning av Elastisitetsmoduler

Elastisitetsmodulen (E-modul) er et mål på materialets stivhet og utgjør en sentral parameter ved dimensjonering og tilstandsvurdering av vegkonstruksjoner. For asfaltmaterialer påvirkes E-modulen blant annet av temperatur og lastfrekvens, mens den for ubundne materialer i hovedsak bestemmes av kornfordeling, fukttinnhold og komprimering.

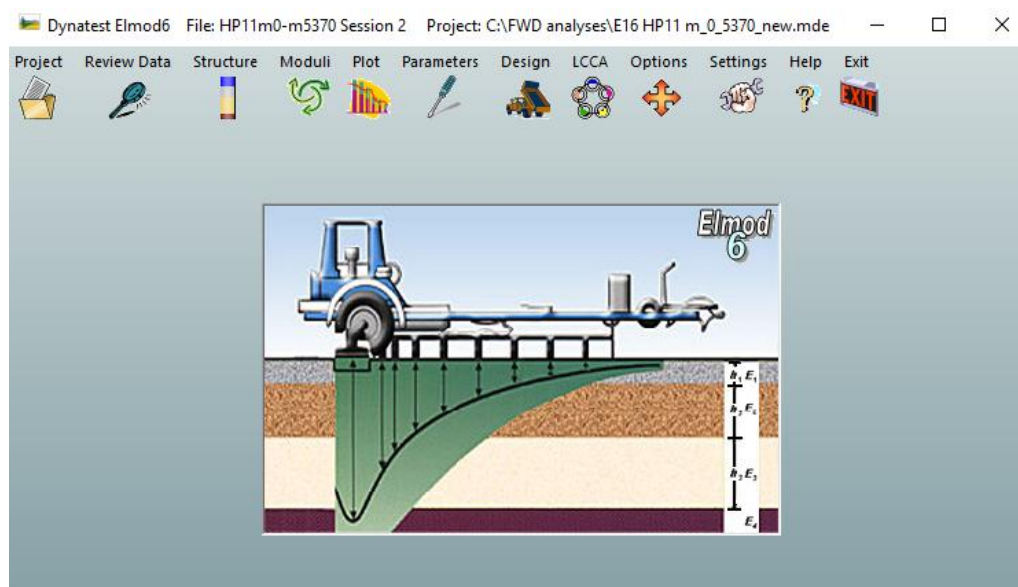
Etterregning er en metode som benyttes for å beregne stivheten i de ulike lagene i en vegkonstruksjon, basert på målinger fra for eksempel fallodds (FWD) eller RAPTOR. Metoden innebærer å sammenligne målte nedbøyninger med teoretiske nedbøyninger beregnet i en responsmodell.

ELMOD er et av verktøyene som brukes til etterregning av elastisitetsmoduler i vegoverbygninger. Modellen justeres iterativt til de beregnede nedbøyningene stemmer godt overens med de målte verdiene. På denne måten kan man estimere stivheten i de ulike lagene uten omfattende prøvetaking i felt.

For å kunne gjennomføre en etterregning i ELMOD kreves informasjon om påført last, målte nedbøyninger og registrerte lagtykkelser.

I dette FoU-prosjektet ble georadar hovedsakelig benyttet for å bestemme lagtykkelsene som grunnlag for etterregnings arbeidet.

Figur 5 viser ELMOD-programvaren som ble brukt i etterregningen.



Figur 5. ELMOD-programvaren

3. Material innsamling

3.1. Vegstrekninger

Vegstrekning klassifiseringen er gjort basert på nedbrytningsmålingsmetoden. Det er samlet inn totalt ni vegstrekninger som ble målt av falloddsmålinger og fire vegstrekninger som ble målt av RAPTOR. All vegstrekningene var målt med Georadarmålinger. i tillegg til at det er tatt ut graveprøver fra vegen, som finnes i vedlegget. Vegstrekningene ble valgt ut for å representere ulike regioner, trafikkmengder (ÅDT) og vegkonstruksjoner, slik at resultatene reflekterer et bredt spekter av vegtyper. Tabell 1 oppsummerer vegstrekningene som inngår i dette FoUI prosjektet som ble målt av falloddsmålinger. Kilometerangivelsene definerer start- og sluttposisjonen for hver undersøkt strekning. ÅDT-verdiene representerer gjennomsnittlig årlig døgnetrafikk for året 2023, hentet fra vegkart.no (kilde: vegkart.no).

Tabell 1. Vegstrekningene som inngår i dette FoUI prosjektet

Vegstrekning	Distanse	Datoen av nedbøynings måling	ÅDT	Nedbøyningstype
Ev6 S193D1	m600-m1250	15.05.2024	878	Fallodds
Ev14 S1D1	m1700-m2175	29.06.2022	6400	Fallodds
Ev14 S2D1	m0-m4000	29.06.2022	6400	Fallodds
Ev14 S3D1	m0-m3251	29.06.2022	3813	Fallodds
Ev8 S6D1	m4825-m9980	30.05.2023	3825	Fallodds
Ev6 S27D1	m3400-m3700	21.06.2021	16000	Fallodds
Ev6 S28D1	m10000-m10300	22.06.2021	15500	Fallodds
Fv33 S5D1	m5500-m5800	23.06.2021	1600	Fallodds
Ev16 S62D1	m7798-m8098	23.06.2021	10127	Fallodds
Ev6 S174D1	m0-m8404	19.08.2022		RAPTOR
Ev8 S7D1	m0-m12357	19.07.2022		RAPTOR
Rv36 S3D1	m0-m6180	12.08.2021		RAPTOR
Rv52 S2D1	m0-m11000	01.06.2023		RAPTOR

4. Resultater

4.1. Kartgrunnlag og tolkning av lagtykkelser

I dette kapittelet presenteres alle resultater fra analysen av de tretten vegstrekningene. Det gis først en oversikt over defleksjonsdata, tolkede lagtykkelser og etterregning resultater. Til slutt gis en oppsummering per strekning.

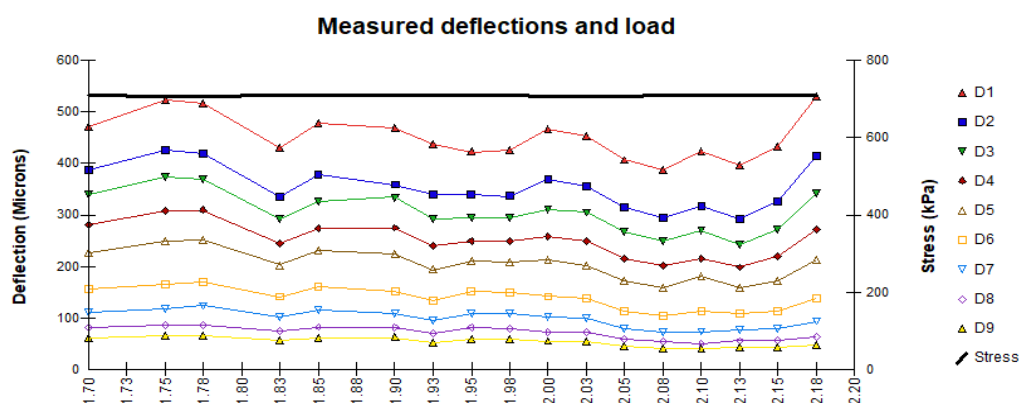
4.2. Nedbøyningsdata med Fallodd

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

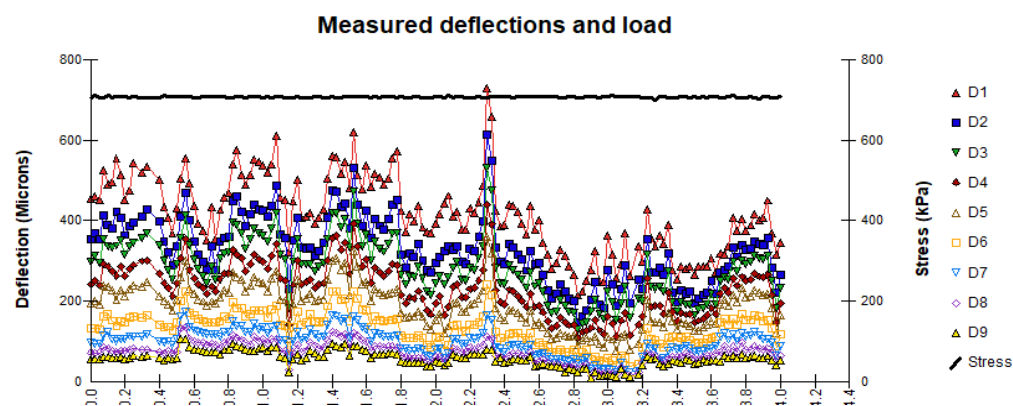
Den konstante svarte linjen øverst angir stress, og har en verdi på 707,36 kilopascal.

Sensorene D1 til D9 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, D7 ved 1200 mm, D8 ved 1500 mm og D9 ved 1800 mm. I ELMOD indikerer en høy nedbøyning en svak vegkonstruksjon med lav stivhet og bæreevne, mens en lav nedbøyning indikerer et sterkt vegdekke med høy stivhet. Nedbøyningene avtar normalt med økende avstand fra lastplaten (D0), og trenden observeres på alle strekningene.

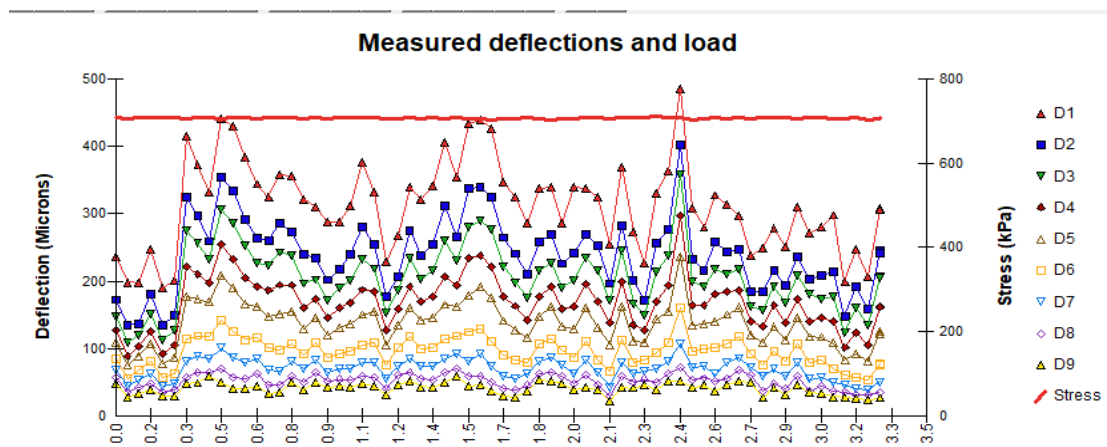
Nedbøyninger for Ev14 S1D1, Ev14 S2D1 and Ev14 S3D1 er vist på Figur 6a, 6b og 6c henholdsvis ned i figurene. Alle nedbøyningsmålinger er mål av falloddsutstyret. som ble målt av falloddsmålinger.



6a) Ev14 S1D1

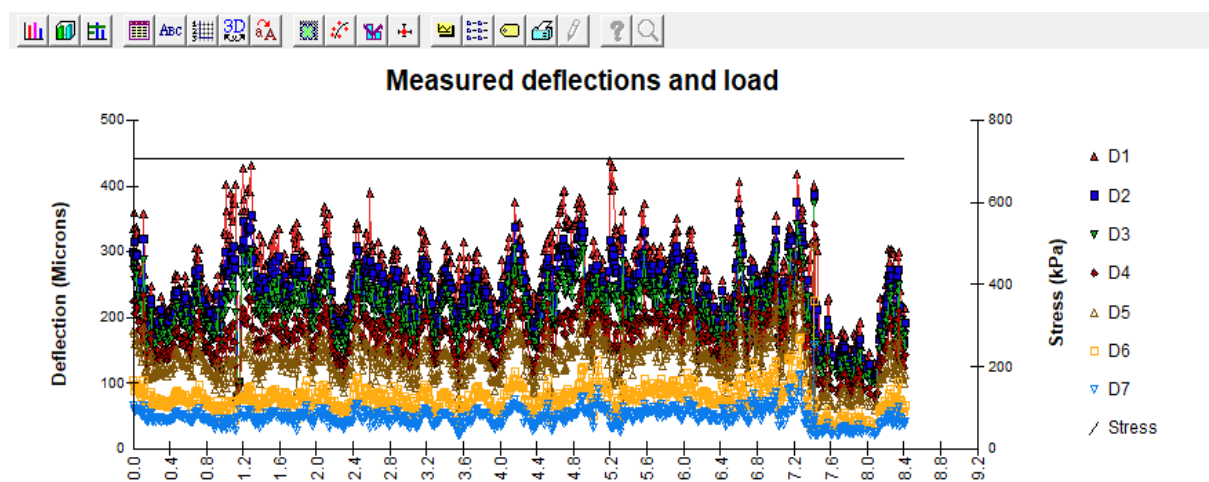


6b) Ev14 S2D1

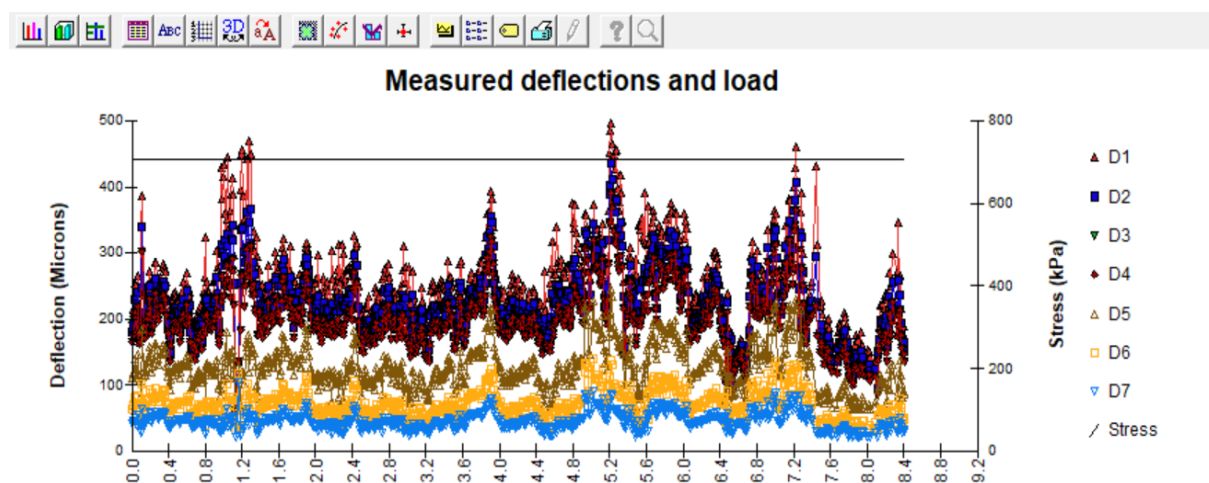


6c) Ev14 S3D1

RAPTOR målingers ekvivalent FWD nedbøyningsdata for Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1) og venstre kjørefelt (DIR2) er vist i Figur 7a og 7b.



Figur 7a: Målte defleksjoner nedbøyningsdata for Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1)



Figur 7b: Målte nedbøyningsdata for Ev6 S174D1, venstre kjørefelt (DIR2)

4.3. Georadar analyserte lagtykkelser

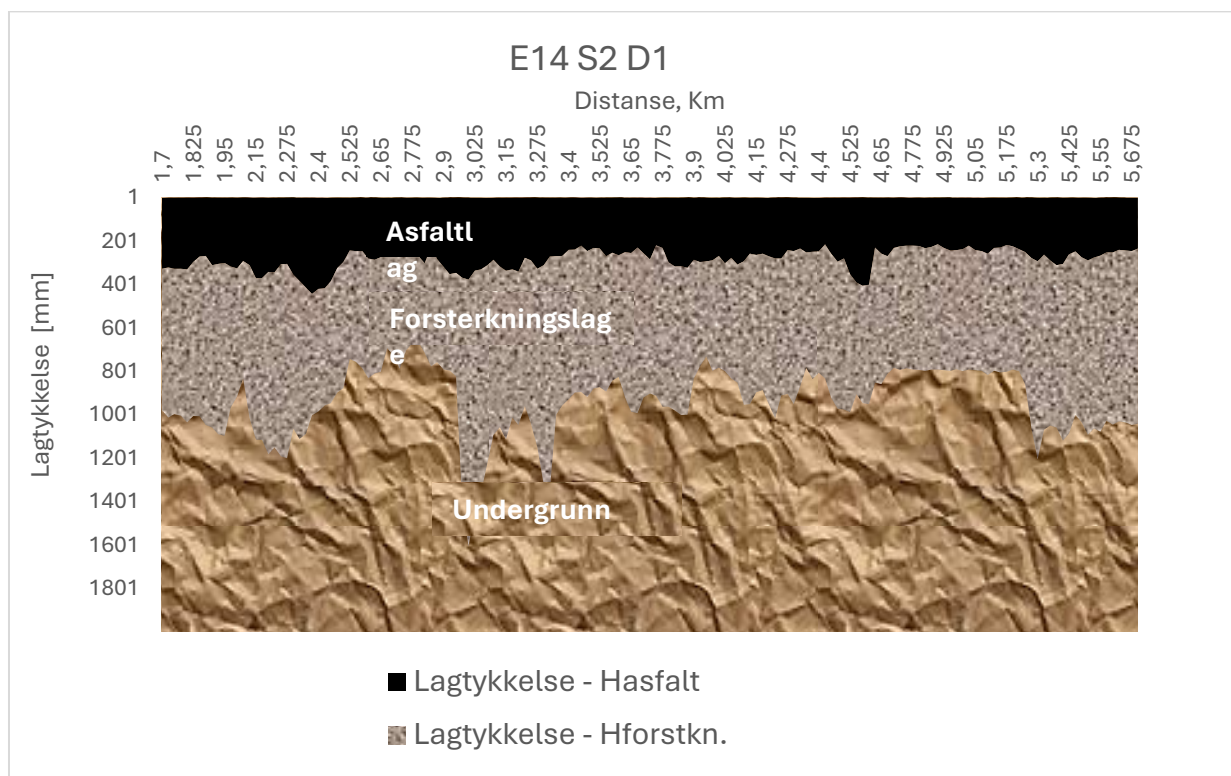
Georadarmålingene er analysert ved hjelp av RoadDoctor-programvaren for å tolke rådataene fra de utvalgte vegstrekningene. Resultatene viser gjennomsnittlig lagtykkelse for asfalt, bærelag og forsterkningslag i Tabell 2 og Figur 8a og 8b. Disse dataene gir et godt grunnlag for vurdering av vegens tilstand og behov for vedlikehold.

Generelt viser analysen at:

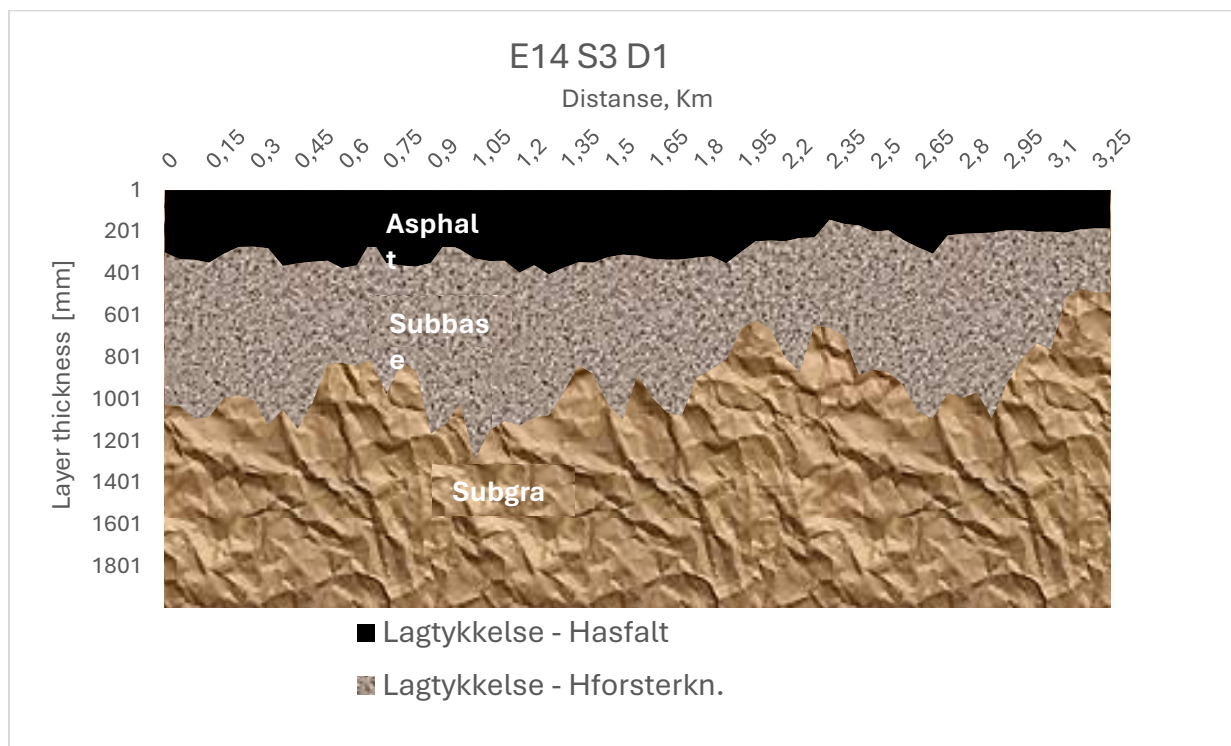
- **Asfaltlagene** (inkludert slitelag, bindlag og bærelag) varierer mellom strekningene, med både tynnere og tykkere oppbygning.
- **Forsterkningslagene** er til stede i ulik grad, med varierende tykkelser, og enkelte strekninger har svært tynne eller manglende forsterkningslag.

Tabell 2: Gjennomsnittlig lagtykkelse per vegstrekning fra georadarmålinger

Vegstrekning	Asfaltlag (mm)	Forsterkningslag (mm)
Ev6 S193D1	178	533
Ev14 S1D1	330	650
Ev14 S2D1	290	683
Ev14 S3D1	307	647
Ev8 S6D1	224	771
Ev6 S27D1	231	928
Ev6 S28D1	261	1154
Fv33 S5D1	135	580
Ev16 S62D1	215	923
Ev6 S174D1		
Ev8 S7D1		
Rv36 S3D1		
Rv52 S2D1		



Figur 8a lagtykkelser for Ev14 S2D1 etter importerte fra RoadDoctor til ELMOD.



Figur 8b lagtykkelser for Ev14 S3D1 etter importerte fra RoadDoctor til ELMOD.

4.4. Oppgravingsprøver som kalibrering av georadar

Oppgravingsprøvene på E14-strekningene ble brukt til å verifisere georadarens tolkning av lagtykkelser og materialtype. Disse prøvene gir ikke elastisitetsmoduler direkte, men gir grunnlag for å fastsette materialparametere som inngår i beregningene. Elastisitetsmoduler (E-moduler) beregnes i etterregning ved hjelp av **ELMOD-programvaren fra Dynatest**, basert på data fra falloddsmålinger (FWD) og konstruksjonsinformasjon fra georadar og oppgraving.

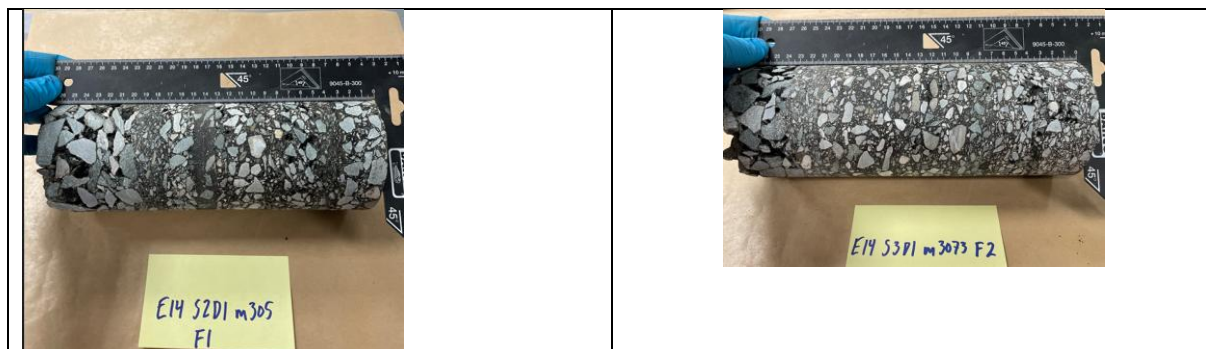
Denne kombinasjonen av metoder gir:

- **Georadar:** kontinuerlig profil av lagtykkelser langs strekningen.
- **Oppgraving:** punktvis verifikasjoner av tykkelser og materialtype.
- **ELMOD:** beregning av E-moduler for hvert lag, som brukes til strukturell analyse og levetidsvurdering.

Kalibreringen mellom georadar og oppgraving sikrer at ELMOD-beregningene baseres på korrekte konstruksjonsdata, noe som gir mer pålitelige resultater for bæreevne og forsterkningsbehov. Oppgravingsprøvene fungerer som referansepunkter for å justere georadarens tolkning av lagtykkelser og materialtype. Dette gir et bedre grunnlag for strukturelle analyser og levetidsberegninger.

Figur 9 viser noen av oppgravingsprøvene som ble tatt på E14-vegstrekningene. Disse prøvene illustrerer variasjon i lagoppbygging og bekrefter georadarens profil, samtidig som de gir nødvendig informasjon for etterregning i ELMOD.





Figur 9. oppgravingsprøvene som ble tatt på E14-vegstrekingene

4.5. Betydning av lagtykkelser og elastisitetsmoduler

Variasjoner i lagtykkelser har direkte innvirkning på vegens bæreevne og levetid. Tykkere asfalt- og bærelag gir normalt bedre lastfordeling, men materialets stivhet (elastisitetsmodul) er avgjørende for hvor godt lasten fordeles nedover i konstruksjonen. Et lag med høy E-modul kan kompensere for mindre tykkelse, mens et lag med lav E-modul kan kreve større tykkelse for å oppnå tilsvarende bæreevne.

For en helhetlig vurdering bør lagtykkelsene sees i sammenheng med:

- **Asfaltens E-modul**, som påvirkes av temperatur og bindemiddeltype.
- **Ubunden bærelagets E-modul**, som avhenger av gradering og fukttinnhold.
- **Forsterkningslagets E-modul**, som gir stabilitet og frostbeskyttelse.

Disse parameterne brukes i beregning av strukturell kapasitet (f.eks. med metoder som AASHTO eller PMS Veg), og er viktige for å planlegge vedlikehold og forsterkning.

Etterregning av elastisitetsmoduler

Elastisitetsmoduler for de ulike lagene i vegkonstruksjonen er beregnet ved bruk av **ELMOD-programvaren fra Dynatest**, basert på nedbøyningsdata fra falloddsmålinger (FWD) og konstruksjonsinformasjon fra georadar og oppgravingsprøver. Etterregningen gir et detaljert bilde av stivheten i hvert lag og den totale strukturelle kapasiteten.

Resultatene viser at:

- **Asfaltlagene** har beregnede E-moduler innen et bredt område, noe som indikerer varierende stivhet avhengig av temperatur og materialkvalitet.
- **Forsterkningslagene** har generelt lavere E-moduler, men bidrar likevel til stabilitet og frostbeskyttelse.

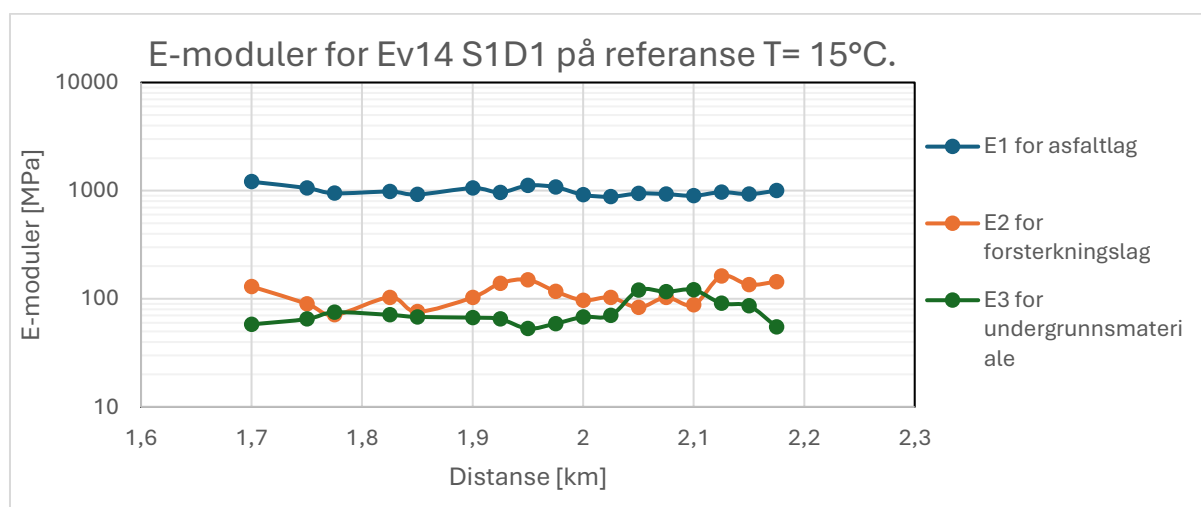
Disse beregningene er avgjørende for å vurdere levetid og behov for forsterkning. Strekninger med lave E-moduler i bærelag eller asfaltlag kan kreve tiltak for å opprettholde tilstrekkelig bæreevne.

Tabell 3 viser lagtykkelsene verdiene på alle strekningene.

Vegstreknin g	Asfaltlag (MPa)	Forsterkni ngslag (MPa)	Undergrunns materiale (MPa)	Kommentarer: lagsmaterialer
Ev6 S193D1				
Ev14 S1D1	988	111	77	Asfalt/knust grus/sand
Ev14 S2D1	1400	143	89	Asfalt/grus og knust grus/ silt og grus
Ev14 S3D1	1682	201	108	Asfalt/grus/knust fjell og grus
Ev8 S6D1	2053	166	131	Asfalt/samfengt grus/silt og leire
Ev6 S27D1	4764	229	233	Asfalt/Stein/Sprengt stein
Ev6 S28D1	3363	192	250	Asfalt/Stein/Sprengt stein
Fv33 S5D1	5655	670	800	Asfalt/kult/knust berg
Ev16 S62D1	3344	181	161	Asfalt/kult+pukk/Sand
Ev6 S174D1				
Ev8 S7D1				
Rv36 S3D1				
Rv52 S2D1				

Tabell 4 viser E-moduler verdiene på strekningene med variasjoner i undergrunns materiale fra sted til sted for Ev14 S1D1.

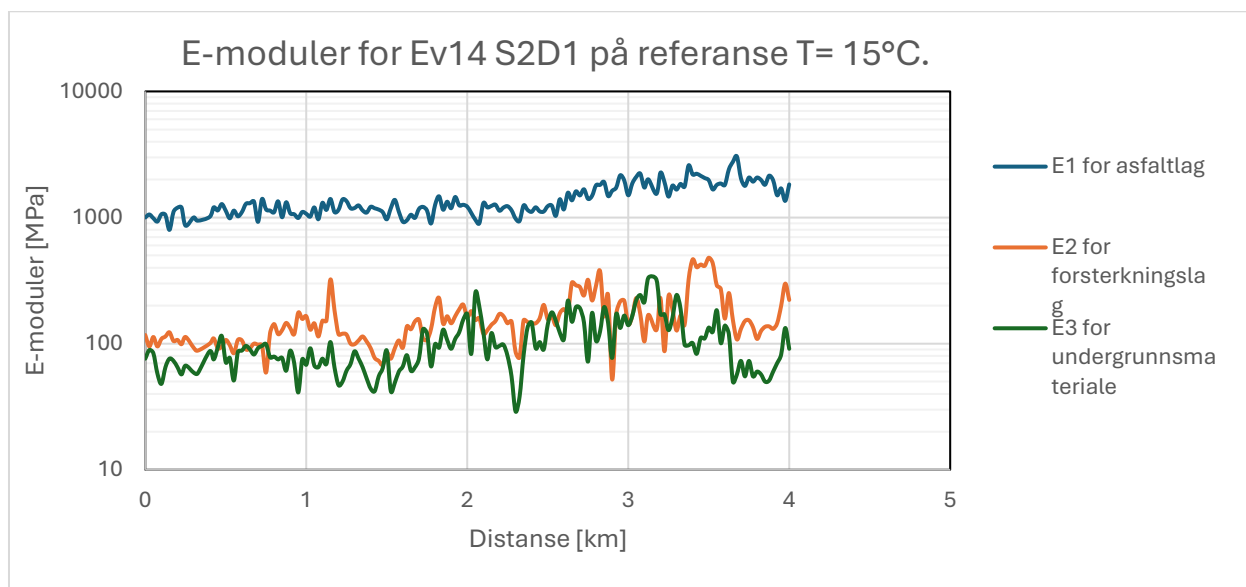
Målte intervall (km)	Lagtype	Material type	Gjennomsnitt lagtykkelser (mm)	gjennomsnitt. E- moduler på ref. temp. (MPa)
1.7-2.175	Asfaltlag	Asfalt	330	988
	forsterkningslag	Knust grus	650	111
	Undergrunn	sand	-	77



Figur 10. Gjennomsnitt E-moduler verdier for Ev14 S1D1.

Tabell 5 viser E-moduler verdiene på strekningene med variasjoner i undergrunns materiale fra sted til sted for Ev14 S2D1.

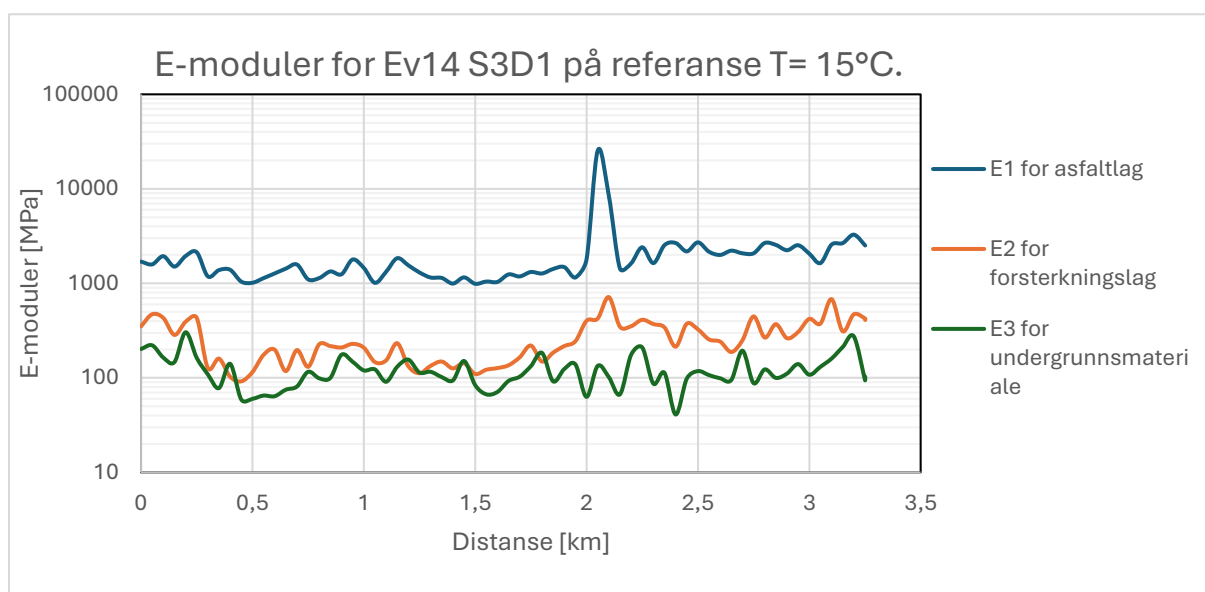
Målte intervall (km)	Lagtype	Material type	Gjennomsnitt lagtykkelser (mm)	gjennomsnitt. E-moduler på ref. temp. (MPa)
0-0.425	Asfaltlag	Asfalt	309	1027
	forsterkningslag	grus	696	105
	Undergrunn	sand	-	69
0.45-1.15	Asfaltlag	Asfalt	314	1154
	forsterkningslag	grus	595	126
	Undergrunn	grus	-	80
1.17-1.7	Asfaltlag	Asfalt	313	1148
	forsterkningslag	grus	789	109
	Undergrunn	silt	-	62
1.725-2.425	Asfaltlag	asfalt	270	1177
	forsterkningslag	grus	623	151
	Undergrunn	grus	-	110
2.45-3.625	Asfaltlag	asfalt	258	1741
	forsterkningslag	Knust grus	609	233
	Undergrunn	steinfjell	-	155
3.65-3.9	Asfaltlag	asfalt	275	2149
	forsterkningslag	Knust grus	785	134
	Undergrunn	Silt	-	58



Figur 11. Gjennomsnitt E-moduler verdier for Ev14 S2D1.

Tabell 6 viser E-moduler verdiene på strekningene med variasjoner i undergrunns materiale fra sted til sted for Ev14 S3D1.

Målte intervall (km)	Lagtype	Material type	Gjennomsnitt. lagtykkelser (mm)	Gjennomsnitt. E-moduler på ref. temp. (MPa)
0.3-0.65	Asfaltlag	Asfalt	335	1233
	forsterkningslag	grus	646	136
	Undergrunn	grus	-	81
0.7-1.05	Asfaltlag	Asfalt	317	1334
	forsterkningslag	grus	693	196
	Undergrunn	Knust fjell	-	120
1.1-1.6	Asfaltlag	Asfalt	350	1231
	forsterkningslag	grus	672	140
	Undergrunn	grus	-	107
1.65-3.251	Asfaltlag	asfalt	227	2933
	forsterkningslag	grus	575	332
	Undergrunn	Knust fjell	-	124

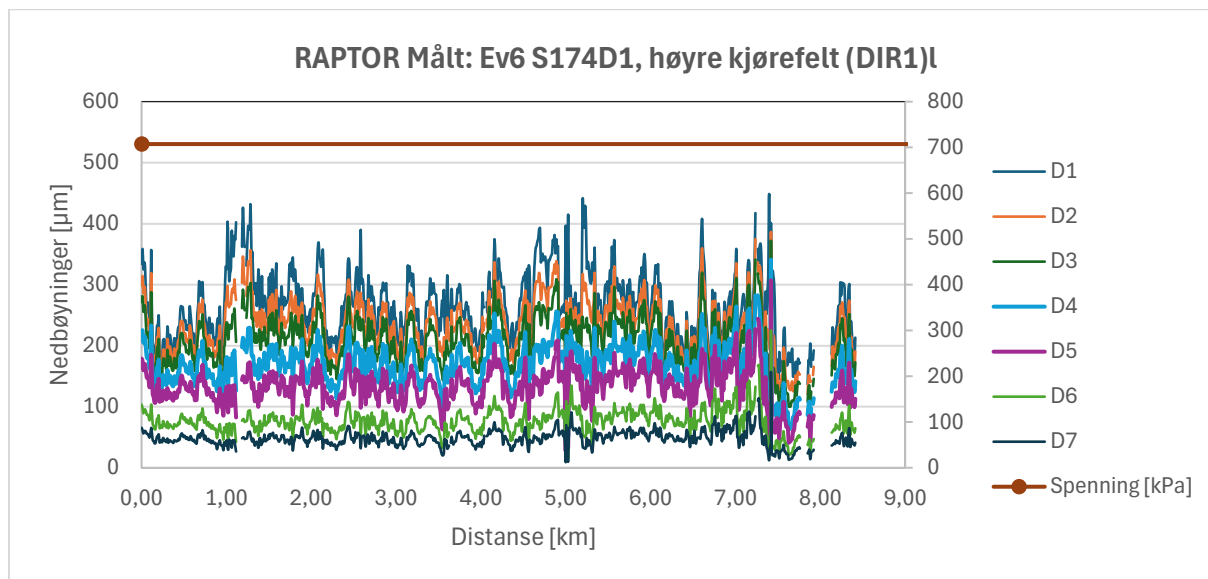


Figur 12. Gjennomsnitt E-moduler verdier for Ev14 S3D1.

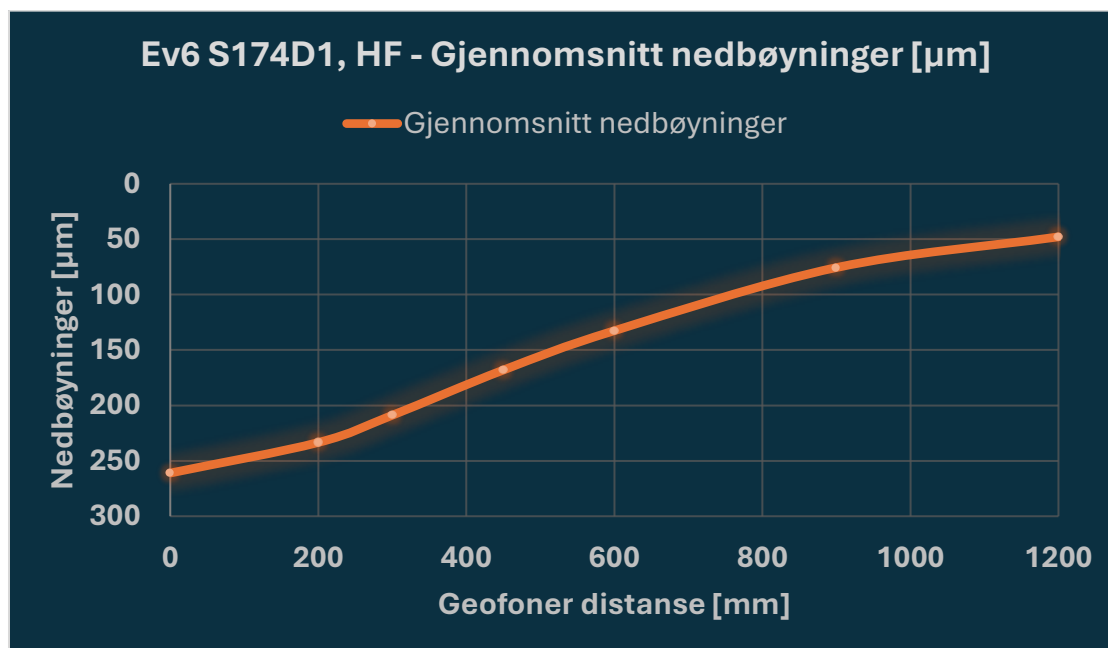
4.6. Nedbøyningsdata ved bruk av RAPTOR

Defleksjonsmålingene fra RAPTOR-systemet ble analysert i ELMOD, der nedbøyning (μm) og tilhørende belastningsnivå (707,36 kPa) er fremstilt langs kjedeposisjonen. Sensorene D1–D7 viser avtakende nedbøyning med økende avstand fra lastplaten, noe som bekrefter normal respons i vegkonstruksjonen. For Ev6 S174D1 viser målingene at gjennomsnittlig D0 var 263

μm i høyre kjørefelt og $258 \mu\text{m}$ i venstre, mens nedbøyningen ved 1200 mm var redusert til $48 \mu\text{m}$ og $45 \mu\text{m}$ (Se i Figur 13).

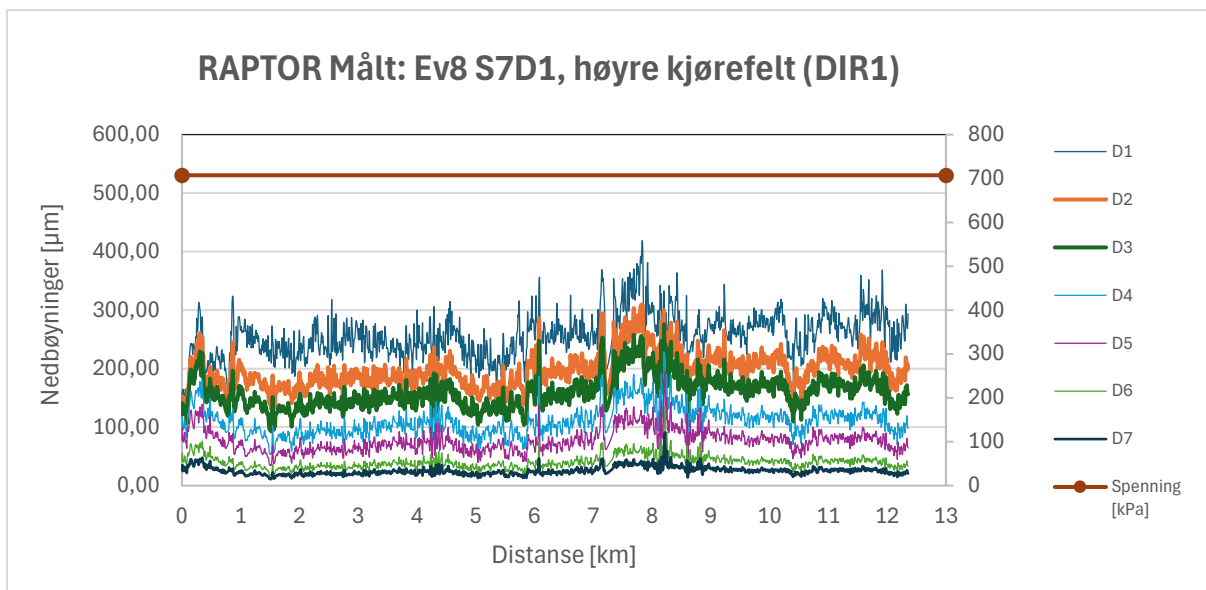


Figur 13. Målte defleksjoner og last for Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1)

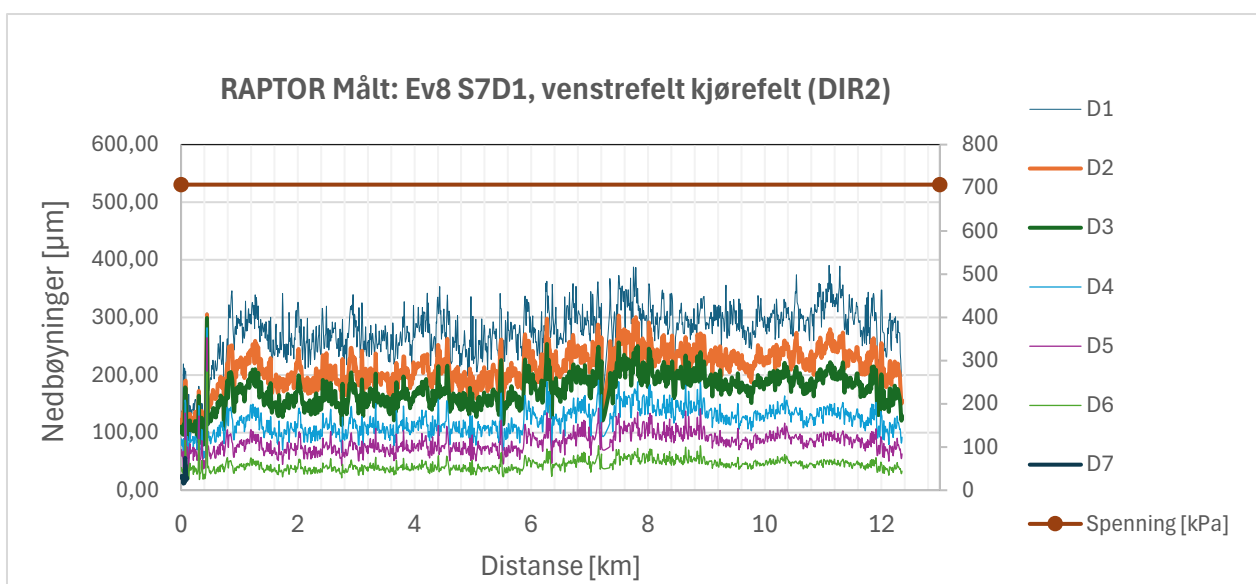


Figur 14. Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev6 S174D1, høyre kjørefelt (DIR1)

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



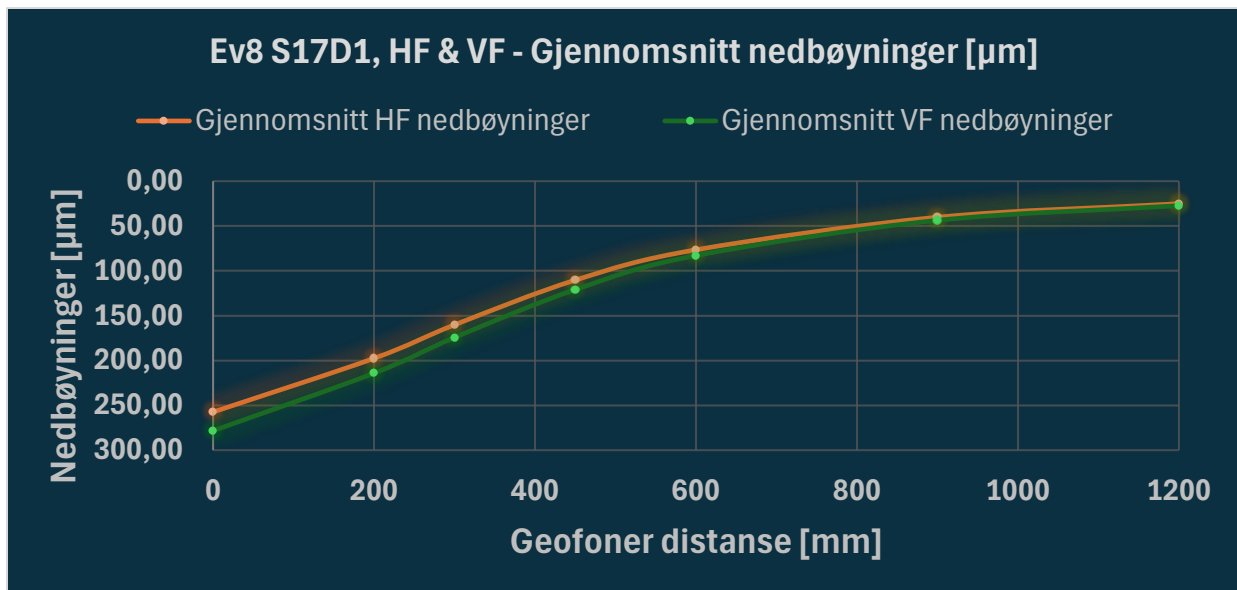
Figur 15. Målte defleksjoner og last for Ev8 S7D1, høyre kjørefelt (DIR1)



Figur 16. Målte defleksjoner og last for Ev8 S7D1, venstre kjørefelt (DIR2)

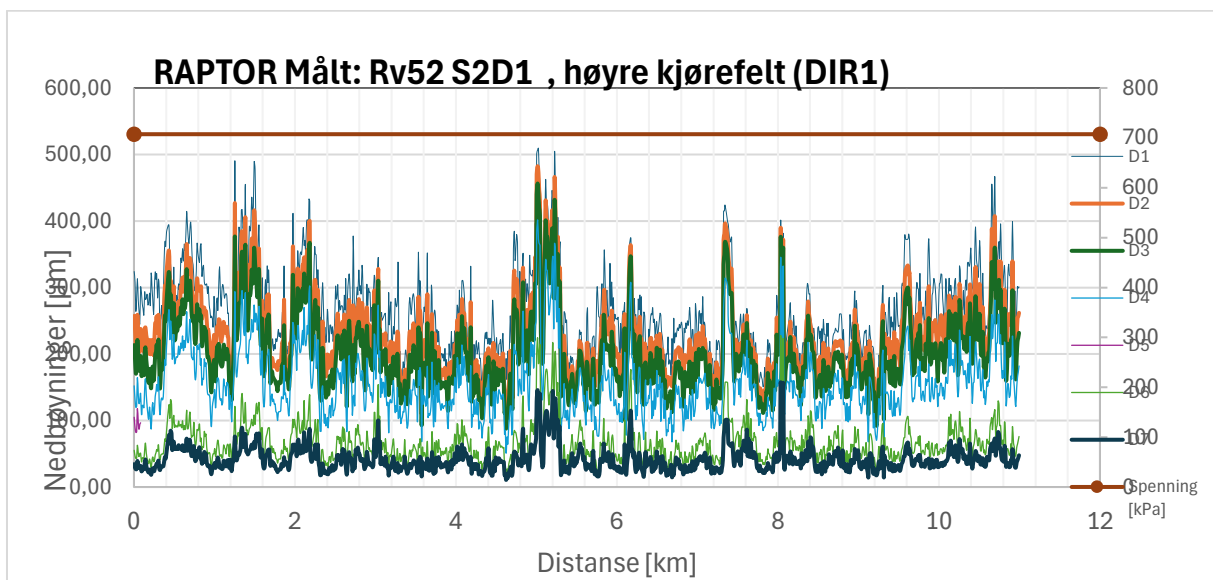
Tabell 7. Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev8 S7D1, høyre (DIR1) og venstre kjørefelt (DIR2)

Geofoner	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Distance [mm]	0	200	300	450	600	900	1200
Gjenm.st. høyre kjf. Nedbøyn. [µm]	257	198	160	110	76	40	25
Gjenm.st. venstre kjf. Nedbøyn. [µm]	278	214	174	121	83	44	27

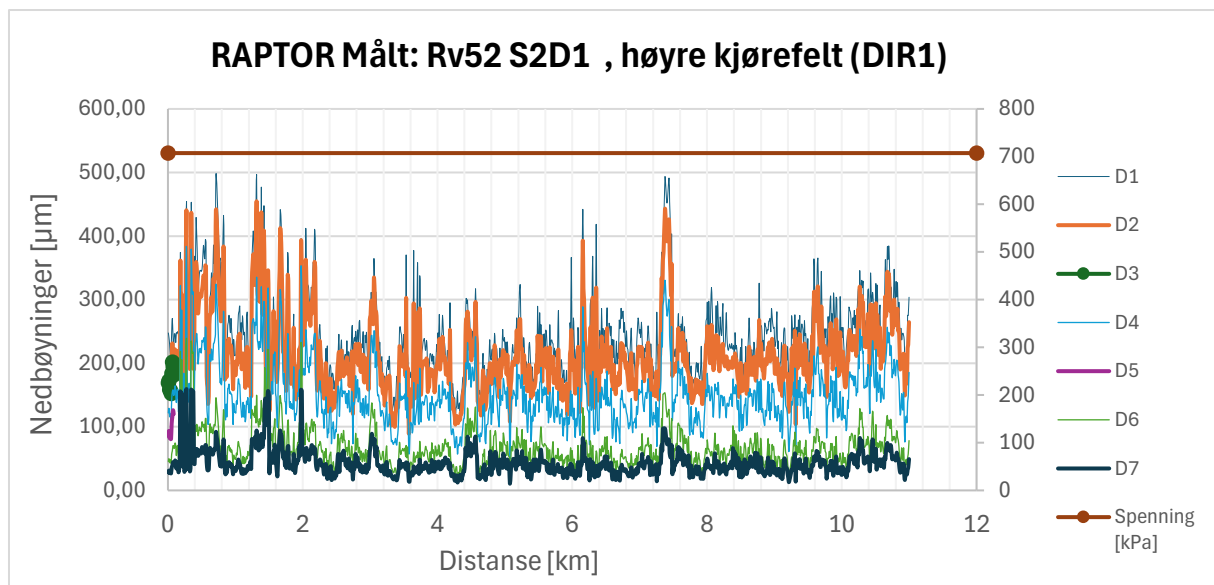


Figur 17. Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Ev8 S17D1, høyre kjørefelt (DIR1)

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.



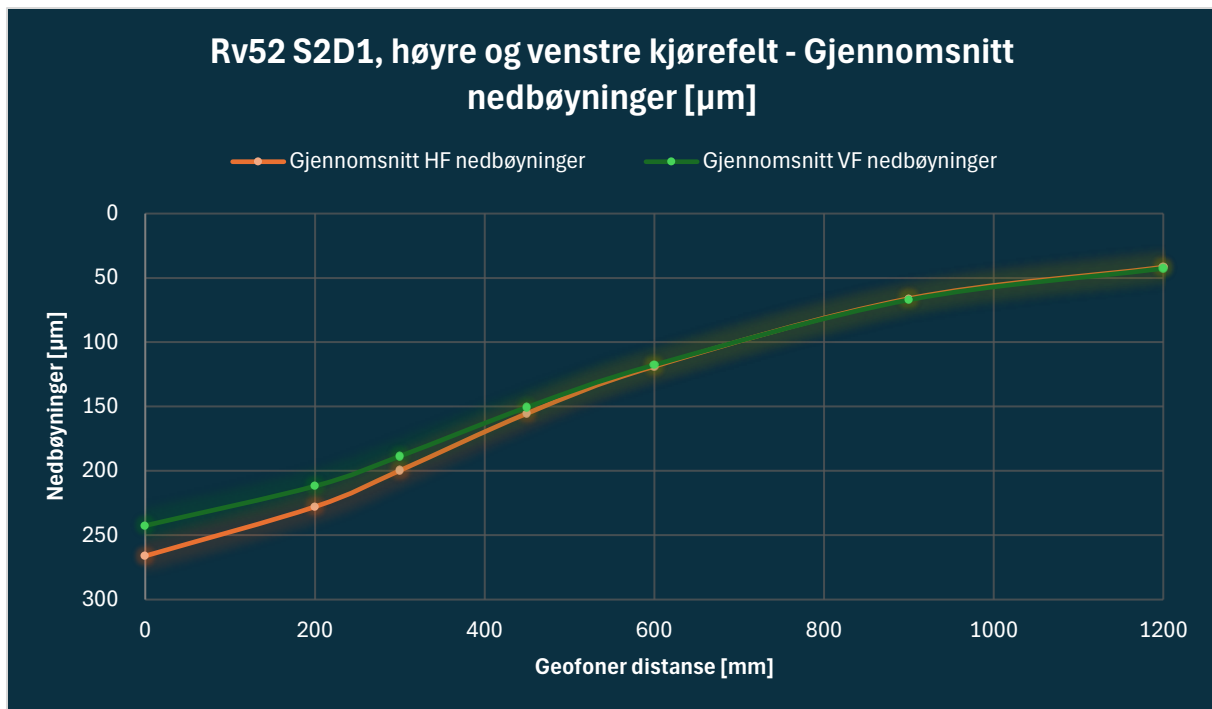
Figur 17. Målte defleksjoner og last for Rv52 S2D1 høyre kjørefelt (DIR1)



Figur 18. Målte defleksjoner og last for Rv52 S2D1 venstre kjørefelt (DIR2)

Tabell 8. Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv52 S2D1, høyre (DIR1) og venstre kjørefelt (DIR2)

Geofoner	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Distance [mm]	0	200	300	450	600	900	1200
Gjennm.st. høyre kjf. nedbøyinger [µm]	266	228	200	155	119	66	42
Gjennm.st. venstre kjf. nedbøyinger [µm]	243	212	189	151	118	67	43



Figur 19. Gjennomsnittlige defleksjonsverdier for geofonene (D1-D7) på Rv52 S2D1, høyre kjørefelt (DIR1)

5. Tolkning av lagtykkelser ved bruk av Road Doctor® (RD)

5.1. Road Doctor®-programvare

I dette FoUI prosjektet ble Road Doctor (RD) versjon 3.7.98 benyttet for å bestemme tykkelser på vegkonstruksjonens ulike lag. RD, utviklet av Roadscanners i Finland, er en omfattende programvarepakke for analyse og visualisering av infrastrukturdata. GPR-modulen i RD ble brukt til prosessering, tolkning og visualisering av de innsamlede georadardataene.

5.2. Bearbeiding og tolkning av Georadar data

Bruken av RD starter med en pre-prosesseringsfase der rådata fra GPR klargjøres. Programvaren håndterer både bakkekoblet og luftkoblet georadar data, og denne fasen omfatter blant annet deling, sammenslåing, reversering og skalering av datafiler.

Når dataene er klargjort, tilbyr RD et bredt spekter av verktøy for signalbehandling. Disse gjør det mulig å korrigere amplituders DC-nivå, fjerne bakgrunnsstøy, forsterke signaler og anvende både vertikale og horisontale filtre, samt andre prosesser som forbedrer datakvaliteten.

5.3. Tolkning av Georadar data

Road Doctor® gir mulighet for både manuell og semi-automatisk tolkning av prosesserte georadar data. Ved bakkekoblet georadar benyttes ofte manuell sporing, der brukeren identifiserer og følger lagsgrensene basert på refleksjonsmønstrene i profilen. Semi-automatisk sporing innebærer at brukeren markerer enkelte punkter langs en grense, hvoretter programvaren analyserer mønsteret og automatisk følger maksimal amplitude videre langs grensen.

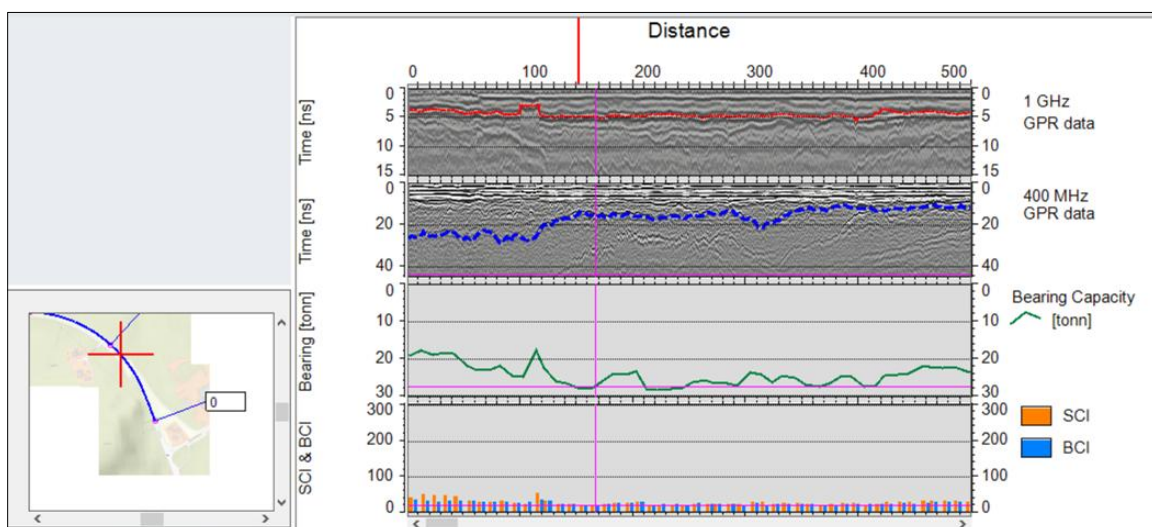
Hvert identifisert lag tilordnes en egen kode med forhåndsdefinerte egenskaper, som lagbetegnelse, farge og dielektrisk verdi (ε). Den dielektriske verdien er avgjørende for beregning av dybde og tykkelse på lagene. I denne studien ble dybdene til lagsgrensene kalibrert ved bruk av oppgravingsprøver fra vegstrekingene.

5.4. Visualisering av Georadar data i Road Doctor

Figur 2 viser et eksempel på visualisering av georadar data i RD. På høyre side vises flere profiler: øverst den luftkoblede GPR-profilen, der en rød linje markerer den tolkede grensen for asfaltlaget. Under denne vises den bakkekoblede GPR-profilen, hvor en blå linje indikerer subbasegrensen. Innenfor profilene er det angitt hvilke materialer som ble identifisert i bærelag og undergrunn basert på gravde prøver.

FWD-målinger er integrert i visningen og presenteres som beregnet bæreevne (tonn), inkludert SCI- og BCI-verdier. Den øvre horisontale aksens viser posisjonen langs den undersøkte vegstrekingen, mens de vertikale aksene viser henholdsvis tidsskala i nanosekunder (venstre) og dybdeskala i centimeter (høyre).

På venstre side av visningen finnes et kart levert via en Web MAP Service (WMS). Her er vegstrekingen representert som en blå linje, mens et rødt kryss markerer aktuell posisjon, noe som gir en direkte kobling mellom GPR-profilen og dens geografiske plassering.



Figur 20. Viser et eksempel på visualisering av georadar data i RD

5.5.Tolkning av lagtykkelser

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

Tabell 9. Gjennomsnittlig tykkelse for asfaltlag og bærelag per veistrekning.

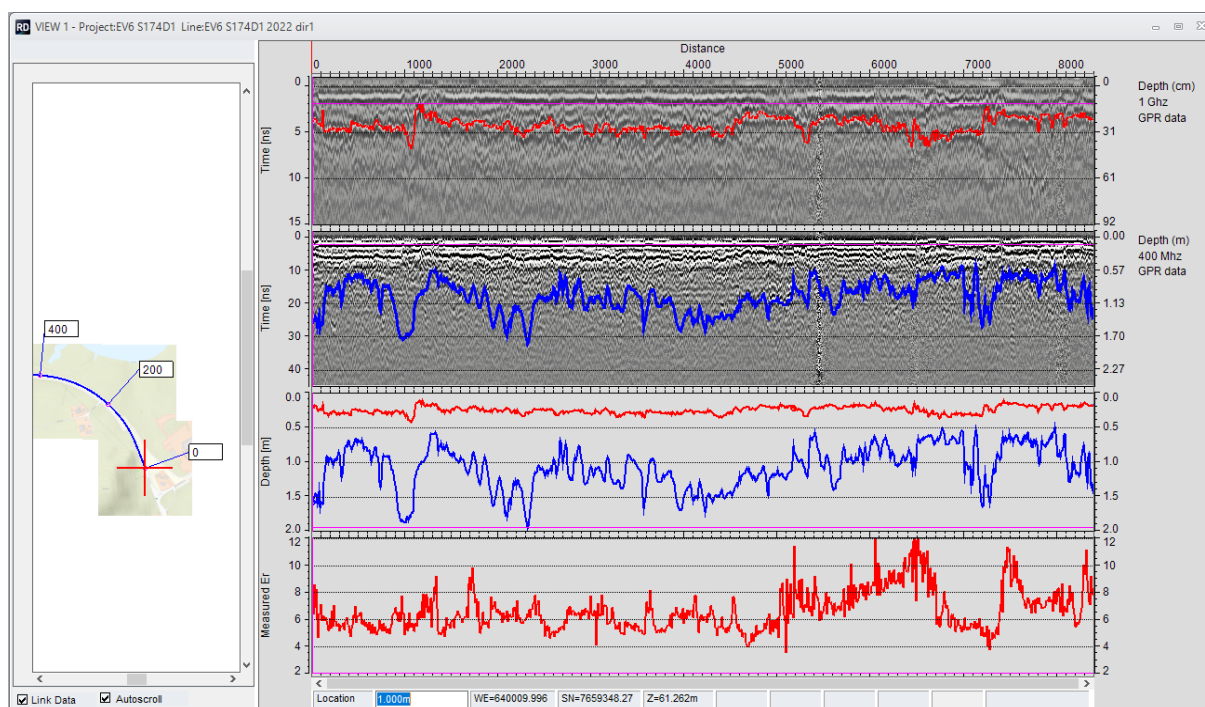
Vegstrekning	Kjedeintervall	Asfaltlag (mm)	Forsterkningslag (mm)
Ev6 S174D1 DIR1	1 m – 8412 m	244	817
Ev8 S7D1 DIR1	0 m – 12357 m	76	1044
Ev8 S7D1 DIR2	9 m – 12353 m	90	1026
Rv52 S2D1 DIR1	3 m – 10995 m	152	718
Rv52 S2D1 DIR2	6 m – 10998 m	166	671

For hver vegstrekning presenteres to figurer. Figur 21 viser kartgrunnlaget og er plassert på venstre side. Illustrasjonene til høyre består av fire profiler: asfaltlaget registrert med luftkoblet georadar, forsterkningslaget registrert med bakkekoblet georadar, en kombinert profil av asfalt- og bærelag, samt dielektriske verdier for asfaltlaget. Disse dataene er hentet fra Road Doctor (RD).

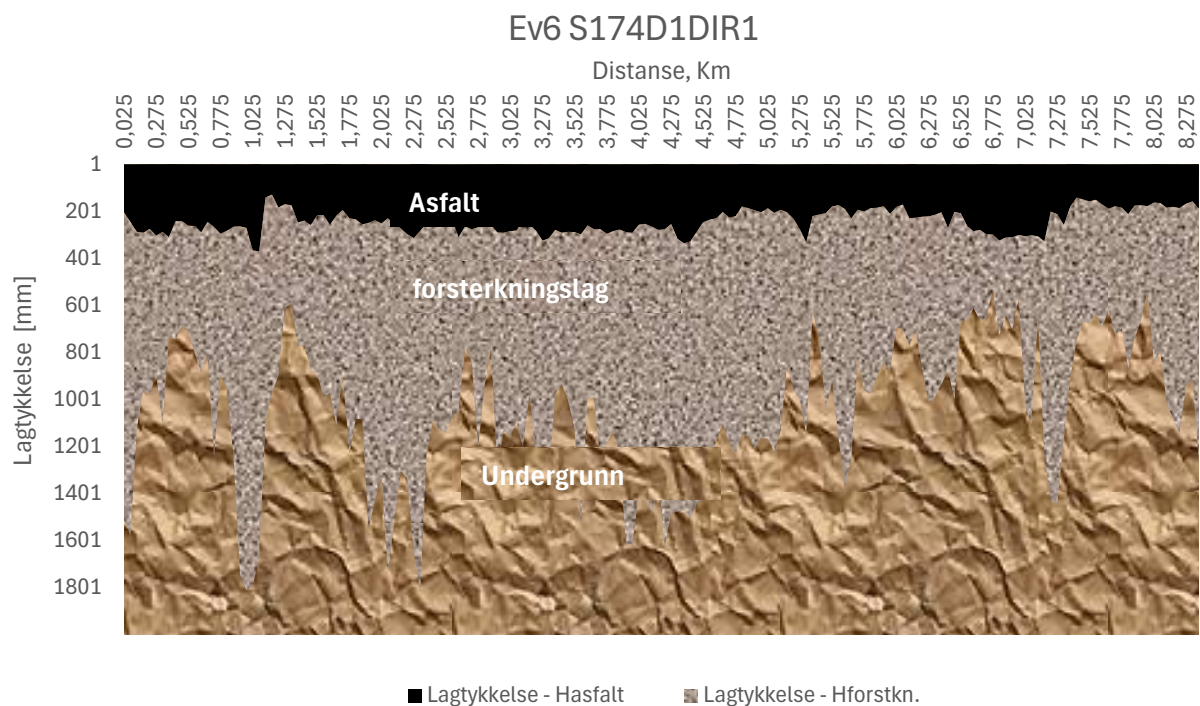
Figur 21 viser laginndelingen slik den er modellert i ELMOD. Ettersom kun tykkelsesdata for lag 1 og lag 2 ble importert i ELMOD for hver vegstrekning og hvert kjørefelt. Ubundne lagene under asfaltlaget slås sammen som et lag mellom asfaltlaget og undergrunnen.

Figur 22 viser gjennomsnittlig tykkelse for Ev6 S174D1 DIR1 asfalt- og forsterkningslaget, beregnet i ELMOD. Tykkelsesdata for vegstrekningene Ev6 S174D1 og Ev8 S7D1 vurderes som pålitelige, ettersom begge strekningene har oppgravingsprøver som referansegrunnlag.

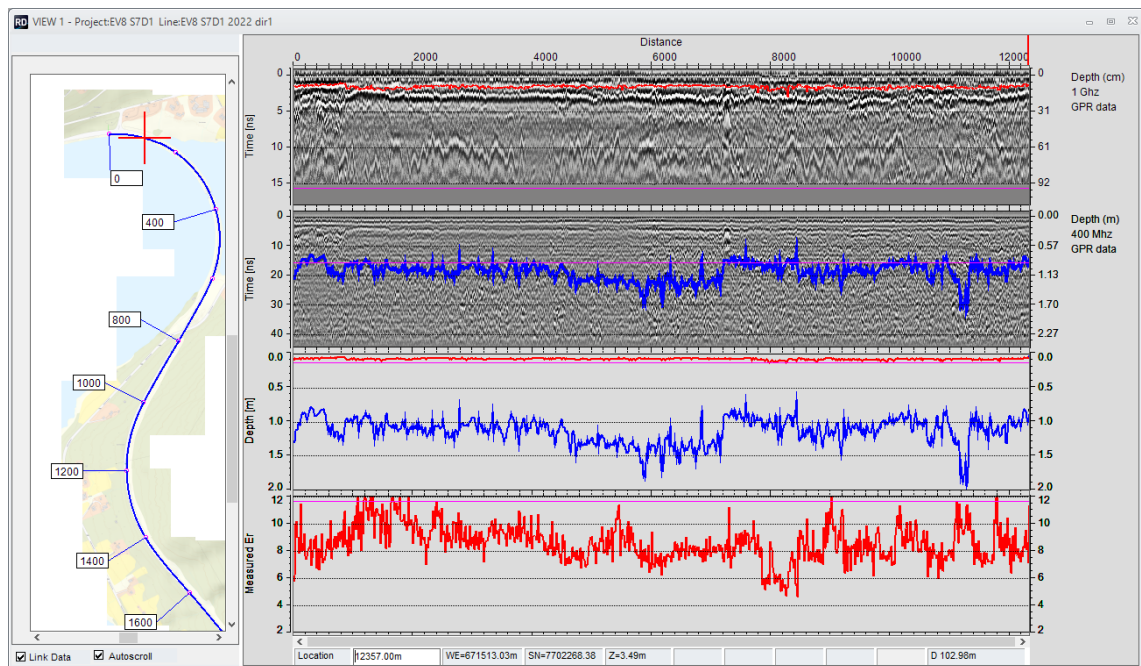
Figur 21 Gjennomsnitt tykkelse for asfalt- og bærelag beregnet. Valgt parameteroppsett og materialtype inkludert for Ev6 S174D1 DIR1



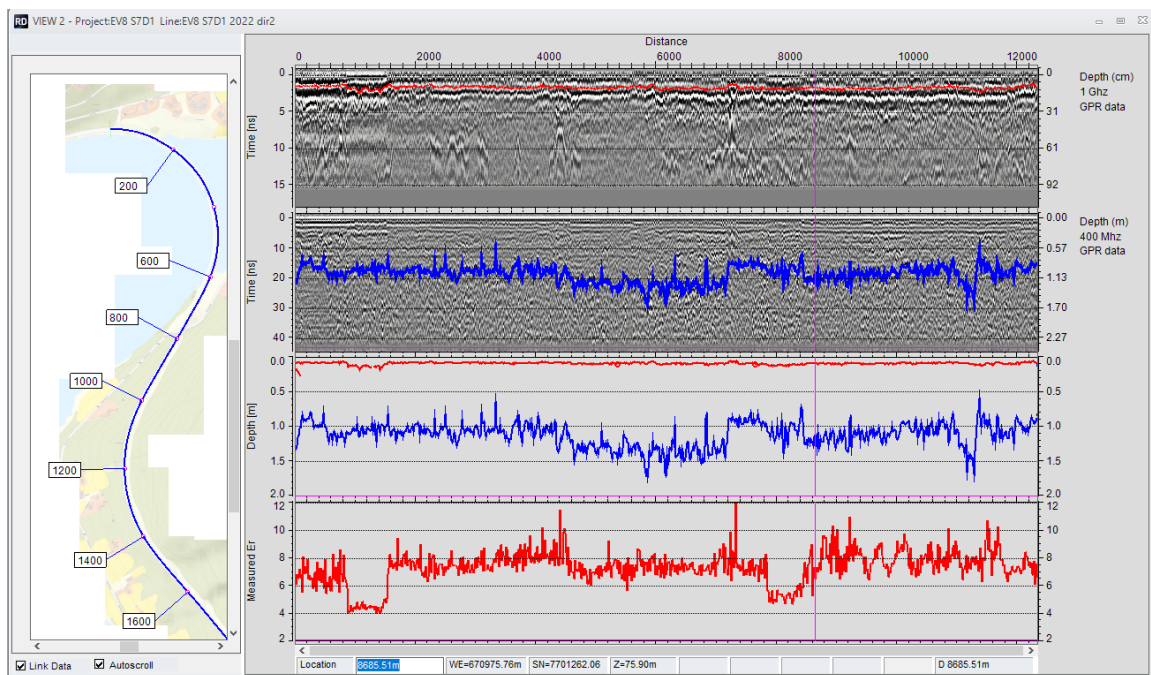
Figur 21. Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev6 S174D1 DIR1



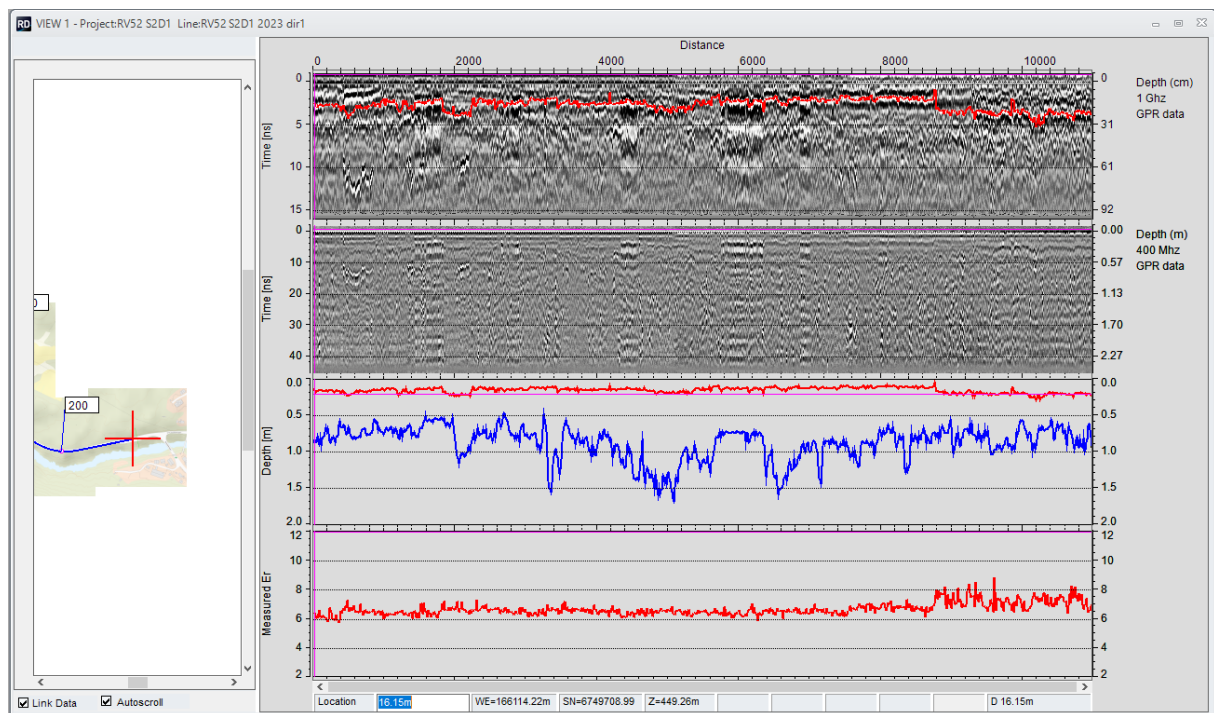
Figur 22. Lagdeling i ELMOD for Ev6 S174D1 DIR1



Figur 23. Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev8 S7D1 DIR1



Figur 24. Kartgrunnlag og profiler fra Road Doctor for Ev8 S7D1 DIR2



5.6. Etterregning av E-moduler

Etterregningen ble gjennomført i ELMOD ved bruk av funksjonen *Defleksjon Basin Fit*.

Analysen ga elastisitetsmoduler for asfaltlaget (E_1), forsterkningslag (E_{subb}) og undergrunnen (E_{subg}). Figurene viser moduli i mega pascal (MPa) på y-aksen og distanse (m) på x-aksen, mens tabellene oppsummerer resultatene for hver strekning.

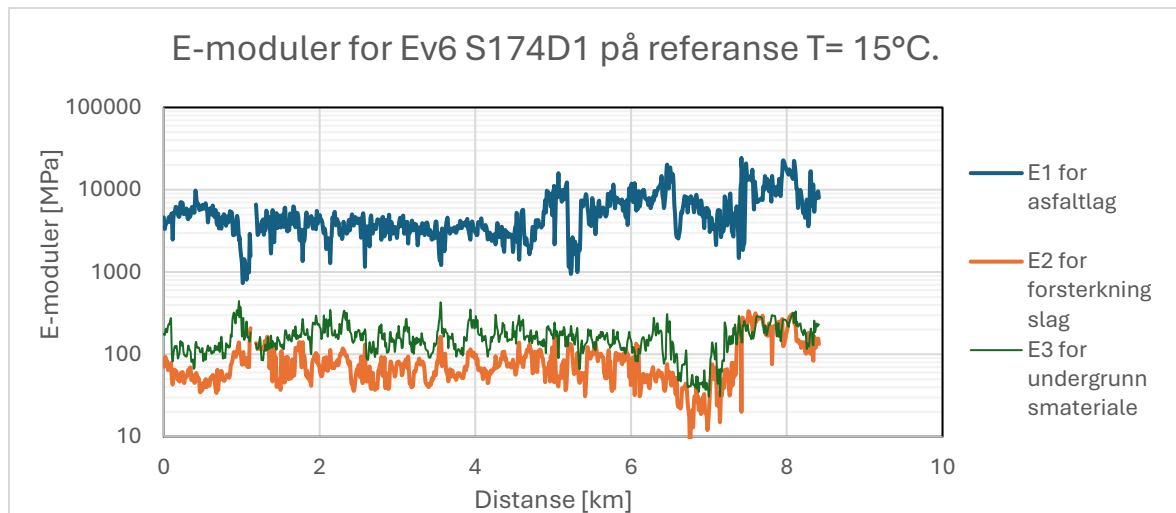
Figur 27-31 viser resultatene fra etterregning for henholdsvis Ev6 S174D1 DIR1, Ev8 S7D1 DIR1, Ev8 S7D1 DIR2, Rv52 S2D1 DIR1 og Rv52 S2D1 DIR2. En samlet oversikt over alle strekningene er gitt i Tabell 10.

Tabell 10. Gjennomsnittlige E-moduli (MPa) for asfaltlag (E_1), forsterkningslag (E_{subb}) og undergrunn (E_{subg}) per veistrekning.

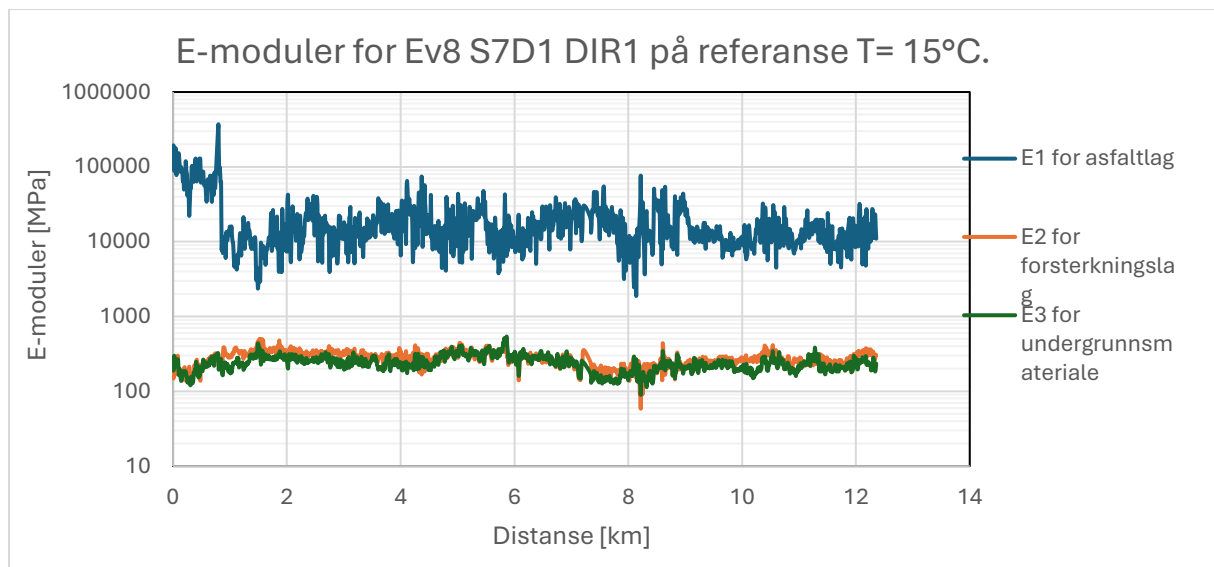
Vegstrekning	Distanse [m]	E_1 [MPa]	E_{subb} [MPa]	E_{subg} [MPa]
Ev6 S174D1 DIR1	1 m – 8412 m	4674	72	148
Ev8 S7D1 DIR1	0 m – 12357 m	21394	268	234
Ev8 S7D1 DIR2	9 m – 12353 m	13089	245	214
Rv52 S2D1 DIR1	3 m – 10995 m	9300	147	159
Rv52 S2D1 DIR2	6 m – 10998 m	11437	128	157

Asfaltmodulen for Ev6 S174D1 ligger på et akseptabelt nivå, mens verdiene for Ev8 S7D1 fremstår betydelig høyere enn det som normalt forventes for asfalt. Rv52 S2D1 viser også en forhøyet asfaltmodul. For forsterkningslaget ble det beregnet moduler i området 72–268 MPa, hvilket er i samsvar med typiske verdier rapportert i litteraturen. Undergrunns modul ligger også innenfor forventede nivåer for både løs masser og berggrunn.

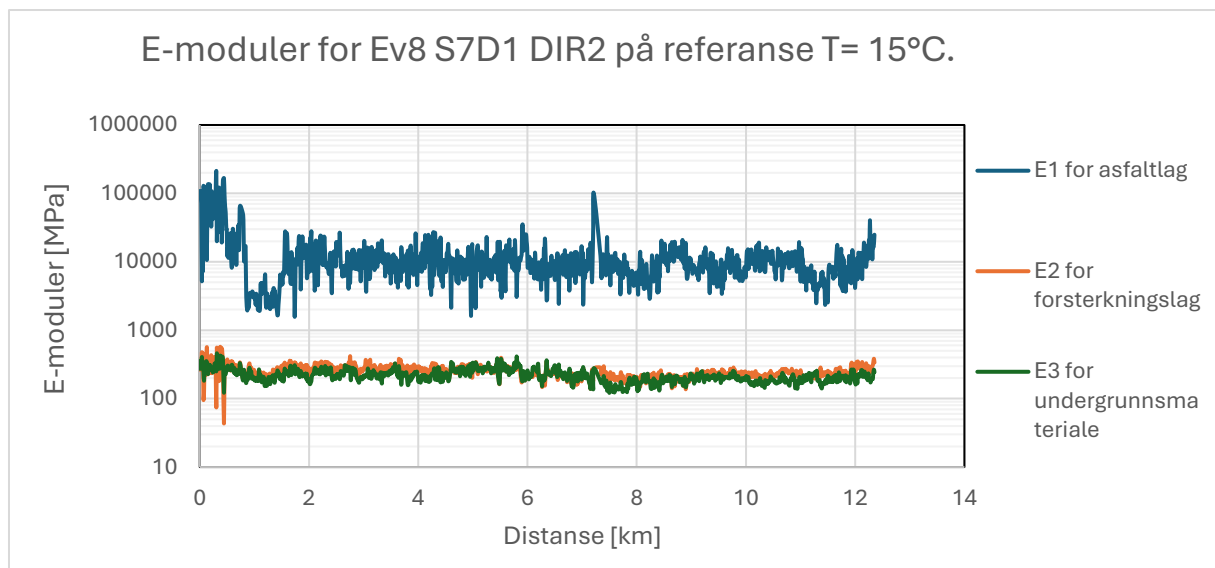
Det ble samtidig observert at enkelte strekninger, som Ev6 S174D1 DIR1 samt Rv52 S2D1 DIR1 og DIR2, hadde tilfeller der forsterkningslaget (E_{subb}) fikk lavere beregnet modul enn undergrunnen (E_{subg}). Normalt forventes E_{subb} å være høyere, ettersom forsterkningslaget vanligvis består av mer kompakte og stive materialer enn undergrunnen. At E_{subg} overstiger E_{subb} kan forekomme lokalt, men det er uvanlig at dette skjer over lengre, sammenhengende strekninger. En mulig forklaring kan være forekomst av stiv berggrunn under overbyggingen.



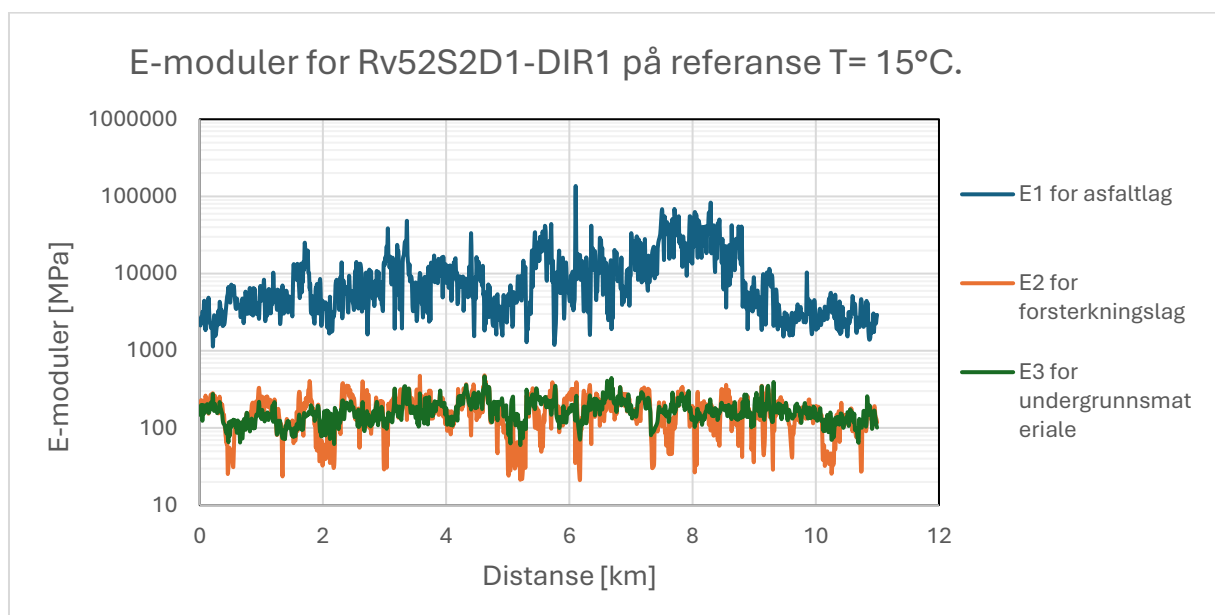
Figur 27. Etterregnete E- moduler for Ev6 S174D1 DIR1



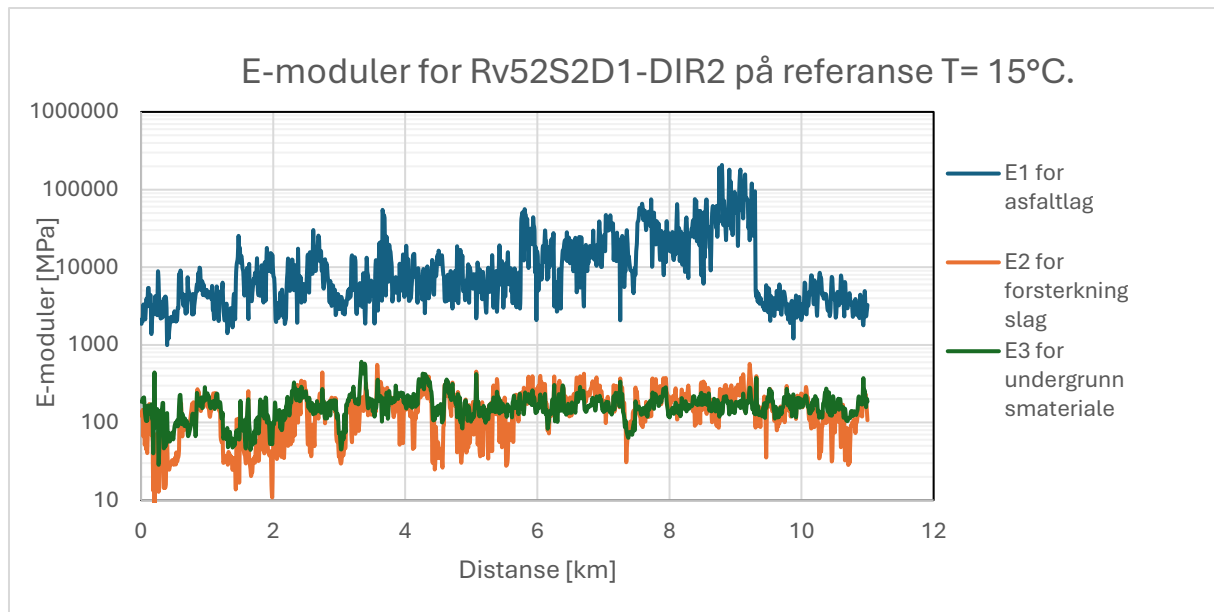
Figur 28. Etterregnete E- moduler for Ev8 S7D1 DIR1



Figur 29. Etterregnete E- moduler for Ev8 S7D1 DIR2



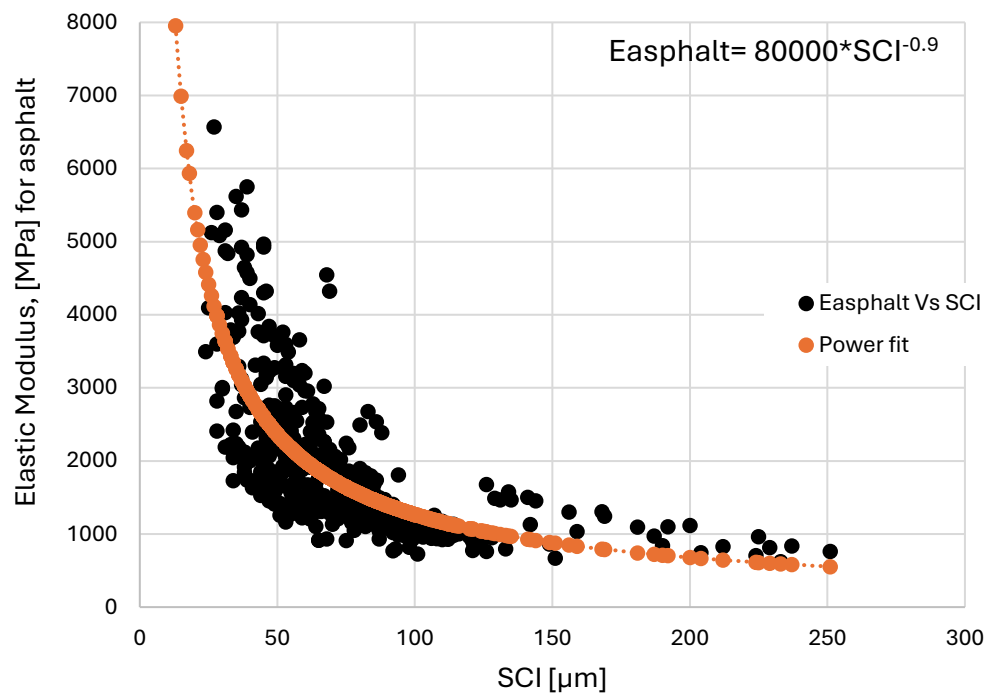
Figur 30. Etterregnete E- moduler for Rv52 S2D1 DIR1



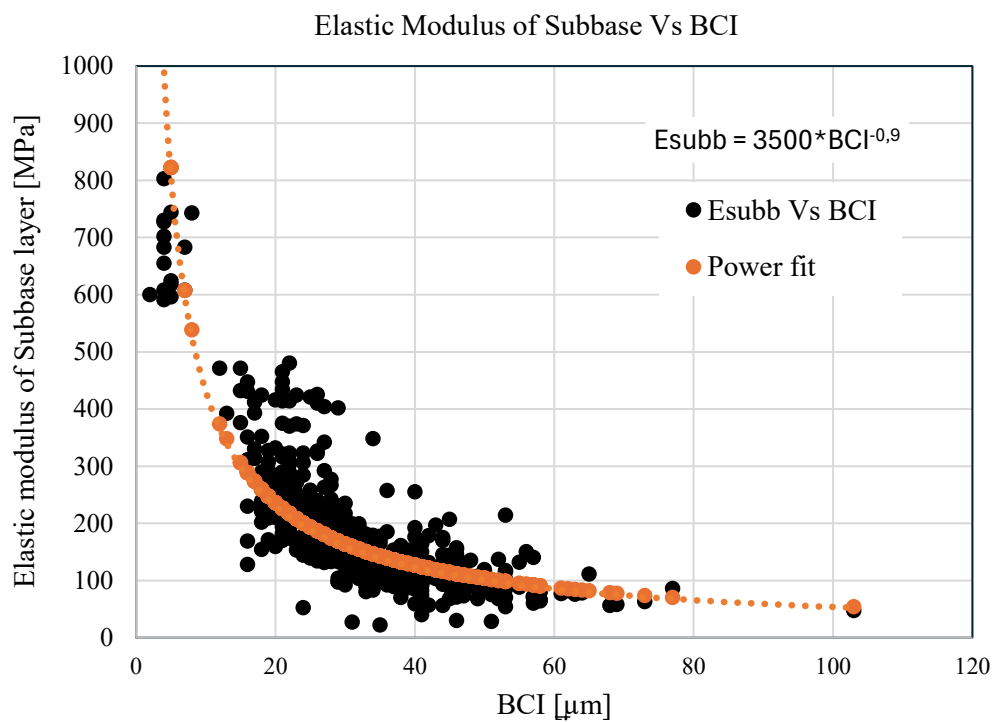
Figur 31. Etterregnete E- moduler for Rv52 S2D1 DIR2

6. Nedbøyninger indeks parameters og E-moduler

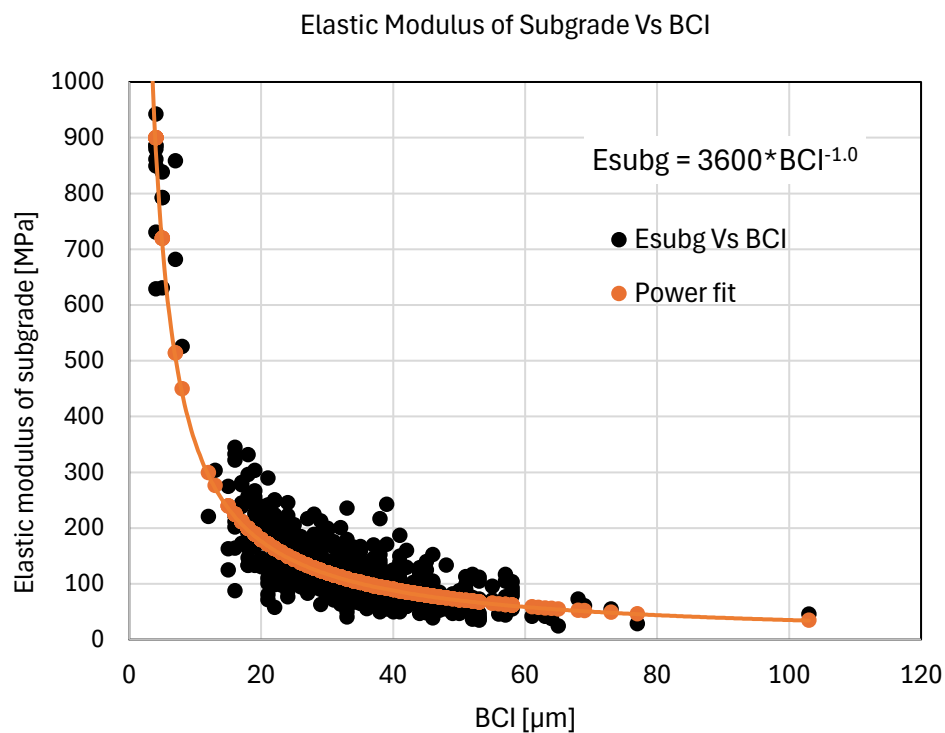
Figurene 32 til 35 viser den grafiske variasjonen i elastisitetsmodulen for de ulike veglagene i hver vegstrekning, basert på FWD-indeks parameterne. Det ble observert en tilfredsstillende korrelasjon mellom SCI og elastisitetsmodulen til asfaltlaget, samt mellom BCI og elastisitetsmodulen til forsterkningslaget og underbygningen. Disse funnene er i samsvar med tidligere forskning, som har vist at FWD-parametere som SCI og BCI har potensielle regresjonsforhold til elastisitetsmodulen i vegkonstruksjonens lag.



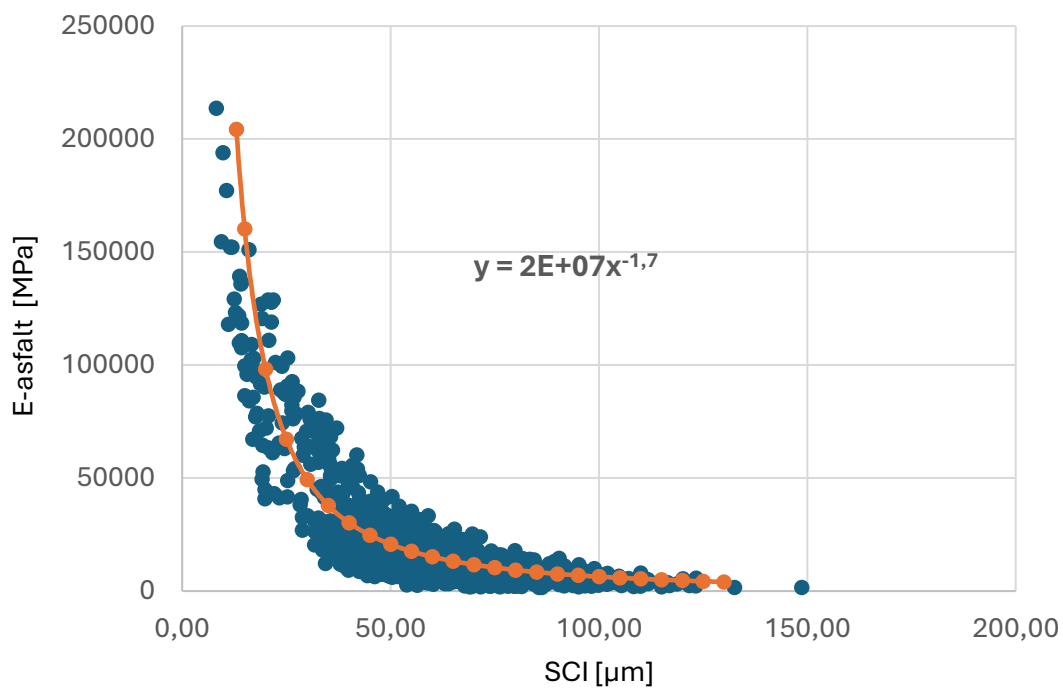
Figur 32. E-modul for asfaltlaget vs. SCI for Ev14



Figur 33. E-modul for forsterkningslaget vs. BCI for Ev14



Figur 34. E-modul for undergrunn vs. BCI for Ev14



Figur 35. E-modul for asfaltlaget vs. SCI for Ev8S7D1 for høyre og venstre kjørefelt

7. Konklusjon og videre oppfølging

Målet med prosjektet var å fastsette lagtykkelser i eksisterende vegoverbygninger og benytte disse som inngangsdata for etterregning av E-moduler i de ulike vegmaterialene. Analysene er basert på falloddsmålinger (FWD), Raptor-data og georadardata. Prosjektet omfattet utvalgte deler av riksvegnettet der både nedbøyningsmålinger og georadarmålinger er gjennomført.

Resultatene viser gjennomgående godt samsvar med verdier rapportert i litteraturen. Det anbefales imidlertid å videreføre arbeidet med et større og mer variert datagrunnlag for å redusere usikkerhet knyttet til begrenset datamengde. For ubundne vegmaterialer og undergrunns materialer ble beregnede E-moduler i hovedsak funnet å ligge innenfor forventede intervaller.

Det er etablert empiriske modeller som er i samsvar med litteraturen, men samtidig tilpasset praktiske og reelle forhold. De beregnede E-modulene viser godt samsvar med defleksjonsindeksene, beskrevet gjennom power-law-relasjoner. Videre gir analysene verdifull innsikt i hvordan datakvalitet påvirker påliteligheten både i tolkning av lagtykkelser og i etterregningen av materialparametere.

For videre oppfølging anbefales det å gjennomføre nye analyser basert på et mer omfattende datagrunnlag. Dette bør inkludere flere «drop»-målinger, gjentatte registreringer av samme strekning i ulike sesonger der dette er mulig, samt kontroll av dielektriske verdier. I tillegg vil inkludering av oppgravingsprøver kunne bidra til et mer robust beslutningsgrunnlag og redusert usikkerhet i resultatene.

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.-a). *Road Doctor* [Programvarebeskrivelse]. Programportalen. Hentet fra <https://programportalen.vegvesen.no/>

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

Statens vegvesen. (2024). *N200 Vegbygging (Håndbok N200)*. Statens vegvesen. Hentet fra <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