

FoUI - Asfaltdekkers funksjonsegenskaper

Bruk av laboratorietilvirkede kjerner for kalibrering av georadar

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1104



Tittel

FoUI - Asfaltdekkers funksjonsegenskaper

Undertittel

Bruk av laboratorietilvirkede kjerner for kalibrering av georadar

Forfatter

Trond Østen og Kim Rune Bragstad Grannes

Avdeling

Fagressurs Drift og vedlikehold

Seksjon

Geofag Drift og vedlikehold 2

Prosjektnummer

C14585

Rapportnummer

1104

Prosjektleder

Thor Asbjørn Lunaas

Godkjent av

Einar Aasprong

Emneord

Georadar, laboratorietilvirkede kjerner, kalibrering

Sammendrag

Bruk av georadar til måling av hulrom på nylagte asfaltdekker en et delprosjekt under FoUI-prosjektet "Asfaltdekkers funksjonsegenskaper".

Georadar må kalibreres for å kunne vise hulrom. Til nå er det benyttet kjerner fra veg for å kalibrere resultatene, men det undersøkes om laboratorietilvirkede kjerner kan erstatte kjerner fra veg.

På grunn av uforutsette problemer er det ikke tilstrekkelig med data for å kunne gi en konklusjon.

Title

Functional Performance Characteristics of Asphalt Pavements

Subtitle

Use of laboratory-manufactured cores for calibration of ground-penetrating radar

Author

Trond Østen og Kim Rune Bragstad Grannes

Department

O&M Planning and Engineering Services

Section

geological sciences 2

Project number

C14585

Report number

1104

Project manager

Thor Asbjørn Lunaas

Approved by

Einar Aasprong

Key words

Georadar, Laboratory-manufactured cores, calibration

Summary

The use of ground-penetrating radar (GPR) to measure air void content in newly laid asphalt is a subproject within the R&D project "Functional Performance Characteristics of Asphalt Pavements".

Ground-penetrating radar requires calibration to reliably identify subsurface voids. Historically, calibration has been based on cores taken from in-service pavements, but the feasibility of using laboratory-produced cores as a substitute is currently under investigation.

Owing to unforeseen challenges, the dataset is insufficient to support a conclusive assessment.



Forord

Denne rapporten er utarbeidet i Statens vegvesens FoUI-program *"Asfaltdekkers funksjonsegenskaper – bedre kontrakter, bedre kvalitet og bedre klima"* (2021-pågående).

Prosjektet, ledet av Thor Asbjørn Lunaas, har som hovedmål å forlenge levetiden til asfaltdekker, redusere miljøpåvirkningen og gi entreprenørene større fleksibilitet i valg av materialer og sammensetning.

Prosjektet utvikler testmetoder for asfaltens egenskaper, samt metoder for kontroll og dokumentasjon av utførelsen. Det ivaretar både byggherrens behov for økt levetid på asfaltdekker og entreprenørens behov for å optimalisere virksomheten sin økonomisk, klima og miljømessig. Prosjektet prøver ut testmetoder som er knyttet opp mot de reelle nedbrytningsmekanismene asfaltdekker utsettes for under nordiske forhold.

"Asfaltdekkers funksjonsegenskaper" gjennomføres i samarbeid med Fagressurs og Teknologi i divisjon Drift og vedlikehold i Statens vegvesen.

Rapporten er skrevet av Trond Østen i samarbeid med Kim Rune Bragstad Grannes.

Sammendrag

Georadar utgjør i dag et viktig supplement til punktbaserte metoder for kvalitetskontroll av nylagte asfaltdekker, og benyttes i økende grad av Statens vegvesen for å identifisere variasjoner i hulromsinnhold langs hele strekningen. Dagens kalibreringsrutine krever uttak av minst ni borkjerner fra veg, noe som er tid- og ressurskrevende, reduserer gjennomføringsevnen og innebærer betydelig HMS risiko. Denne rapporten undersøker derfor om laboratorietilvirkede kjerner kan erstatte feltkjerner som grunnlag for kalibrering av georadarmålinger.

Arbeidet er gjennomført i to hovedfaser: innledende metodeutprøving i 2023 og fullskala forsøk på to strekninger i 2024. I 2023 ble det utført testing av laboratorieutstyr for dielektrisitetmålinger, vurdering av metoder for tilvirkning av laboratoriekjerner og en sammenligning med feltuttatte kjerner fra en Ab 11. For laboratoriemålinger ble det anskaffet en PaveScan Mix Design Module (MDM), og to tilvirkningsmetoder av kjerner i laboratoriet ble undersøkt: gyrotorisk kompaktering av kjerner og wheel track-kompaktering av plater. Totalt ble det produsert 24 gyrotorkjerner og 39 wheel track-plater (ni hos Statens vegvesen og 30 fra ekstern leverandør), i tillegg til uttak av 26 kjerner fra veg.

Resultatene fra 2023 viste at gyrotorkjerner hadde betydelig variasjon i hulrom gjennom prøvens høyde. Dette førte til store forskjeller i målte dielektriske verdier mellom øvre og nedre del av kjernene. Gyrotorkjernene hadde god korrelasjon mellom dielektrisk verdi og hulrom, men trendlinjen avvek betydelig fra prøver fra veg. Wheel track-plater tilvirket ved Statens vegvesen viste derimot bedre samsvar med prøver fra veg både i hulromsfordeling og i dielektrisitetmålinger, selv om datagrunnlaget var smalt med intervall på 2–5 % hulrom. Basert på dette ble wheel track-metoden valgt videre for fullskala uttesting i 2024.

I 2024 ble metoden testet på to forsøksstrekninger med ulike massetyper: en Ska 16 PmB og en Ab 16. For forsøksstrekning 1 oppsto det utfordringer knyttet til varierende kontrollgrunnlag (benyttet forskjellige tilslag) og et parti med tynndekke. Dette gjorde det umulig å hente ut representative feltkjerner. De laboratorietilvirkede wheel track-platene viste også begrenset hulromsvariasjon og kunne ikke benyttes til kalibrering. På forsøksstrekning 2 ble det uttatt ni feltkjerner som ble målt både med PaveScan Rolling Density Meter 2.0 RDM i felt og MDM i laboratoriet. Selv om kjernene hadde noe variasjon i dielektrisk verdi, var spredningen i hulrom begrenset. I tillegg viste etterkontroll at deler av strekningen hadde fuktighet ved måletidspunktet, noe som kan forklare oppnådd avvik mellom MDM og RDM, ettersom vann gir betydelig høyere dielektrisk respons. Wheel track-platene til denne massen viste også her liten variasjon i hulrom, og heller ikke disse kunne benyttes for å etablere en kalibreringskurve.

Basert på det samlede datagrunnlaget har prosjektet ikke lyktes med å etablere en sammenheng mellom dielektrisk verdi for laboratorietilvirkede kjerner og feltuttatte kjerner. Utfordringene skyldes hovedsakelig begrenset hulromsvariasjon i laboratorietilvirkede plater og ytre påvirkningsfaktorer i felt. Resultatene indikerer at laboratorietilvirkede kjerner har potensial, men at dagens metodikk ikke gir tilstrekkelig presisjon til å erstatte feltkjerner i kalibreringen av georadarmålinger.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag.....	2
1. Innledning.....	5
1.1 Bakgrunn	5
1.2 Mål.....	5
2. Metode	6
2.1 Utstyr for måling av dielektrisk verdi.....	7
2.1.1 Felt.....	7
2.1.2 Laboratoriemålinger	7
2.2 Dielektrisk verdi.....	8
2.2.1 Fresnelsone	9
2.2.2 Penetrasjonsdybde	11
2.3 Laboratorieanalyser	12
2.4 Laboratorietilvirkede prøver.....	12
2.4.1 Gyratorisk kompaktor	13
2.4.2 Wheel track kompaktor.....	14
3. Arbeid i 2023	17
3.1 Dekketype.....	17
3.2 Kjerner fra veg	17
3.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Gyrator	18
3.4 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra STATENS VEGVESEN	21
3.5 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra ekstern leverandør	23
3.6 Vurdering og diskusjon av resultater fra 2023	24
4. Arbeid i 2024	26
4.1 Forsøksstrekning 1	26
4.1.1 Dekketype	26
4.1.2 Kjerner fra veg	26
4.1.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra Statens vegvesen.....	26
4.1.4 Vurdering av resultat	27
4.2 Forsøksstrekning 2	28
4.2.1 Dekketype	28
4.2.2 Kjerner fra veg	28
4.2.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra Statens vegvesen.....	30
4.2.4 Vurdering av resultat	31
5. Diskusjon.....	31
5.1 Tilvirkning av kjerner i laboratoriet.....	31

5.1.1	Wheel track plater	31
5.1.2	Gyratorkjerner	32
5.1.3	Temperatur ved tilvirkning av prøver.....	33
5.2	Måling av dielektrisk verdi	33
5.2.1	PaveScan MDM	33
5.2.2	PaveScan RDM 2.0.....	34
5.3	Andre faktorer	35
5.3.1	Tid og kostnad for utstyr	35
5.3.2	Gjennomføringsevne	35
6.	Konklusjon.....	36
7.	Videre arbeid	37
7.1	Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi fra RDM og fra MDM.....	37
7.2	Laboratorietilvirkede kjerner	37
	Kilder	38
	Vedlegg A – Prosedyre for måling med MDM, utarbeidet ved sentrallaboratoriet i Trondheim april 2024	i
	Fremgangsmåte MDM målinger	i
	Vedlegg B – Kjerner fra veg - 2023.....	ii
	Vedlegg C – Laboratorietilvirkede kjerner - Gyrator	vi
	Vedlegg D – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater Statens vegvesen	x
	Vedlegg E – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater ekstern	xi
	Vedlegg F – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater Statens vegvesen – Forsøksstrekning 1	xii
	Vedlegg G – Kjerner fra veg – Forsøksstrekning 2	xiii
	Vedlegg H – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater Statens vegvesen – Forsøksstrekning 2	xiv

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Statens vegvesen har ansvar for over 12 000 km riks- og europaveger, og er den største vegeieren i Norge. Dette medfører et stort ansvar, ved å være fremoverlent og ta i bruk ny teknologi tidlig, for å kunne nå bærekraftmål. I 2025 planlegges det å reasfaltere ca. 700 km (rundt 5,8% av det totale vegnettet Statens vegvesen har ansvar for) [1], som betyr at hvert dekke i gjennomsnitt skal ha en levetid på ca. 17 år. Det er mange faktorer som har påvirkning på levetiden til et dekke. For eksempel massesammensetning, utførelse, trafikkmengde, hulromsinhold etc. Hulrom er en av de viktigste faktorene for levetiden til asfaltdekker. Høyt hulrom bidrar til akselerert nedbrytning av dekket, og dermed en forkortelse av dekkelevetiden. Det å tidlig kunne identifisere og utbedre partier med høyt hulrom, er avgjørende for å kunne forlenge levetiden til asfaltdekket.

Statens vegvesen har testet ut bruk av georadar for kvalitetskontroll på nylagte asfaltdekker siden 2016, både ved bruk av eksterne konsulenter og i egenregi. Georadarmålinger har i Statens vegvesen gått fra å være på utprøvningsstadiet, til å være en av flere metoder som benyttes for å kontrollere hulrommet på nylagte asfaltdekker. De andre metodene som benyttes er densitetsmålere, enten radioaktive målere som Seaman og Troxler eller ikke-radioaktive målere som Pavement Quality Indicator (PQI). Fasiten er laboratorieanalyse av borkjerner.

Densitetsmålinger og borkjerner er punktbaserte metoder, mens georadar gir kontinuerlige målinger langs strekningen. Dette gjør det enklere å oppdage lokale avvik i hulrommet langs strekningen. I Statens vegvesen rapport 1084 Dokumentasjon og kontroll av asfalt er det beskrevet «*Hyppige densitets-/hulromsmålinger og registrering av utleggerens framdrift/jevnhet i framdrift. Asfaltlagets densitet og/eller hulrom skal dokumenteres med minst 1 prøvepunkt for hver 500 m i én utleggerbredde. Et prøvepunkt består av minst 2 parallelle densitetsmålinger eller av 2 borkjerner. Det skal være minst 3 prøvepunkter for hvert kontraktspunkt*» [2]. En isotopmåler dekker et lite areal på ca. 0,06 m² (antatt størrelse på 20 cm x 30 cm), og det gjøres to parallelle målinger i ett punkt per 500 meter. Dette vil medføre at ca. 0,006 % av dekkearealet kontrolleres, ved antatt feltbredde på 3,5 meter. Med georadar benyttes det tre antenner som utfører en måling hver tiende centimeter, hvor hvert skann dekker ett område med en diameter på rundt 15 cm. Dette tilsvarer ca. 11 % av dekkearealet med samme feltbredde. Sjansen for å oppdage problemområder er derfor betydelig større med georadar enn med de andre metodene.

1.2 Mål

Statens vegvesen benytter i dag kravene i håndbok R211 Feltundersøkelser [3] ved kalibrering av georadarmålinger. Uttak og analyse av kalibreringskjerner er en tidkrevende og kostbar prosess, som både reduserer georadarens gjennomføringsevne og innebærer betydelig HMS-risiko for personellet som utfører måling og utboring. Normal prosesseringstid for en georadarstrekning er 1–2 måneder, noe som er lenge med tanke på behovet for rask identifisering og eventuell utbedring av feil.

I USA er det gjennomført forskning på om laboratorietilvirkede kjerner kan erstatte feltuttatte kalibreringskjerner [4], [5]. Formålet med denne rapporten er å undersøke hvordan slike laboratorietilvirkede kjerner kan produseres, hvilken sammenheng som kan etableres mellom laboratorie- og feltkjerner, og om metoden kan utgjøre et reelt alternativ til dagens kalibreringsrutine.

2. Metode

Arbeidet i delprosjektet Georadar er gjennomført av personell ved Statens vegvesens Laboratorium Midt i Trondheim. Undersøkelsene ble utført i perioden 2023–2024.

Metodeopplegget består av to hovedfaser: (1) laboratoriebaserte metodeforsøk i 2023 og (2) fullskala uttesting på to forsøksstrekninger i 2024.

Metodekapitlet beskriver fremgangsmåten brukt for å undersøke om laboratorietilvirkede asfaltkjerner kan erstatte feltuttatte kalibreringskjerner ved georadarmålinger. Arbeidet omfatter både tilvirkning av laboratoriekjerner, uttak av feltkjerner, georadarmålinger i felt og laboratorieanalyser.

Undersøkelsene følger kravene i håndbok R210 Laboratorieundersøkelser av asfalt og håndbok R211 Feltundersøkelser. Metodikken bygger på følgende hovedprinsipper:

- minst ni feltkjerner skal tas ut fra hver forsøksstrekning, med tilstrekkelig variasjon i hulromsinnhold
- dielektrisk verdi skal måles både i felt, med Pavescan Rolling Density Meter 2.0 (heretter benevnt RDM) og i laboratorium med Pavescan MDM (Mix Design Module, heretter kalt MDM).
- laboratorietilvirkede kjerner skal produseres med kontrollerte hulromsnivåer
- hulromsinnhold, romdensitet og maksimumsdensitet bestemmes i henhold til gjeldende metodebeskrivelser
- sammenhengen mellom dielektrisk verdi og hulrom skal vurderes for både felt- og laboratoriekjerner

Metodearbeid 2023 – laboratoriebaserte undersøkelser

Formålet med arbeidet i 2023 var å teste tilgjengelig laboratorieutstyr og identifisere den mest egnede metoden for tilvirkning av laboratoriekjerner. Det ble gjennomført:

- testing av MDM for laboratoriemåling av dielektrisk verdi mot uttatte kjerner i felt
- produksjon av laboratoriekjerner ved to metoder:
 - gyratorisk kompaktering (NTNU)
 - wheel track-kompaktering (Statens vegvesen og ekstern leverandør)
- uttak og analyse av feltkjerner

Begge laboratoriemetodene ble vurdert opp mot feltkjerner for å identifisere hvilke som best gjenskapte feltegenskapene.

Resultatene fra denne fasen dannet grunnlaget for valg av metode for å tilvirke kjerner i lab i 2024.

Metodearbeid 2024 – fullskalatesting på to strekninger

I 2024 blir den valgte laboratoriemetoden testet på to ulike strekninger med forskjellig massetyper. Metodeopplegget omfattet følgende for hver strekning:

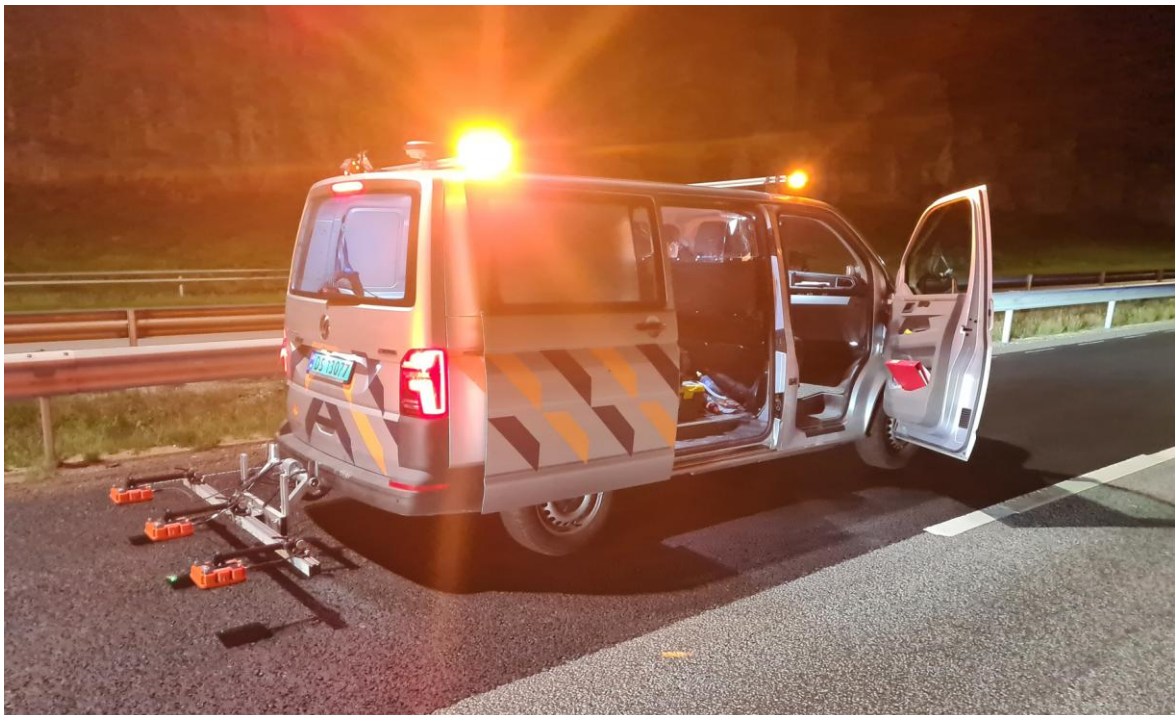
- Georadarmålinger i felt med RDM
- Uttak av ni kjerner med varierende dielektrisk verdi, som også ble målt med MDM i lab

- Tilvirkning av minimum ni kjerner i lab, med hulrom mellom 3-12 %
- Etablering av sammenheng mellom RDM og MDM

2.1 Utstyr for måling av dielektrisk verdi

2.1.1 Felt

Statens vegvesen benytter i dag utstyr fra Geophysical Survey Systems Inc (GSSI) [6], av typen Pavescan Rolling Density Meter 2.0 ved sin kvalitetskontroll. Dette utstyret er blitt benyttet siden 2021, og Vegvesenet har bygd opp mye erfaring med å benytte dette i sin kvalitetskontroll. Utstyret finnes i dag i Bergen og Trondheim. RDM består av tre antenner med en frekvens på 2 GHz. RDM er enten tralle- eller bilbasert. Ved målinger med bil, er utstyret montert ca. 25 cm-26 cm over dekkeoverflaten (mulig å justere), mens tralle benytter 30 cm. Dette er noe mindre enn GSSI anbefaler i brukermanualen for bilbåren måling på 28 cm – 33 cm [6], men det er tidligere undersøkt med GSSI at utstyret skal håndtere dette. Utstyret har en repeterbarhet/nøyaktighet på $\pm 0,08$.



Bilde 1 PaveScan RDM 2.0. Foto: Kim Rune Grannes Statens vegvesen

2.1.2 Laboratoriemålinger

Det er per dags dato kun funnet kun to mulige utstyr for måling av dielektrisk verdi på kjerner; Percometer (permittivitet og konduktivitet) fra Adek [7] og Pavescan Mix Design Module. fra Geophysical Survey Systems Inc (GSSI) [8].

Percometeret har vært på markedet i over 20 år, og benyttes både for å måle dielektrisk verdi til granulære materialer og asfalt. Utstyret er tilgjengelig ved Statens vegvesens laboratorier i Nordkjosbotn og Trondheim. Percometeret består av en sensor som plasseres direkte på overflaten til kjernen, eller på siden av kjernen (buet probe). Penetrasjonsdybden til Percometeret er ikke oppgitt eller kontrollert.

MDM er et nylig utviklet utstyr, som kun er laget for måling av kjerner. MDM benytter samme antenne som på RDM, med en frekvens på 2 GHz. Målingen utføres ved at det brukes et mellomlegg imellom antennen og kjerner (med kjent tykkelse og dielektrisk verdi), som simulerer normal avstand mellom antennen og dekkeoverflaten. Det gjøres fire målinger ved

å rotere kjernen 90 grader for hver måling. Høyden på kjernen angis, slik at signalet kuttes på toppen av kjernen. Det er en høydebegrensing på kjernen fra 30 mm - 120 mm. Målinger utenfor dette intervallet er ikke mulig. Diameteren på prøven skal minimum være 150 mm.

Som en del av FoUI prosjektet har Statens vegvesen gått til anskaffelse av en MDM ved sentrallaboratoriet i Trondheim, og benyttet den i all testing av kjerner i lab. Prosedyre for gjennomføring av måling med MDM er vist i vedlegg A.



Bilde 2 PaveScan MDM (Foto: Trond Østen, Statens vegvesen) og percometer (Foto: Adek [7])

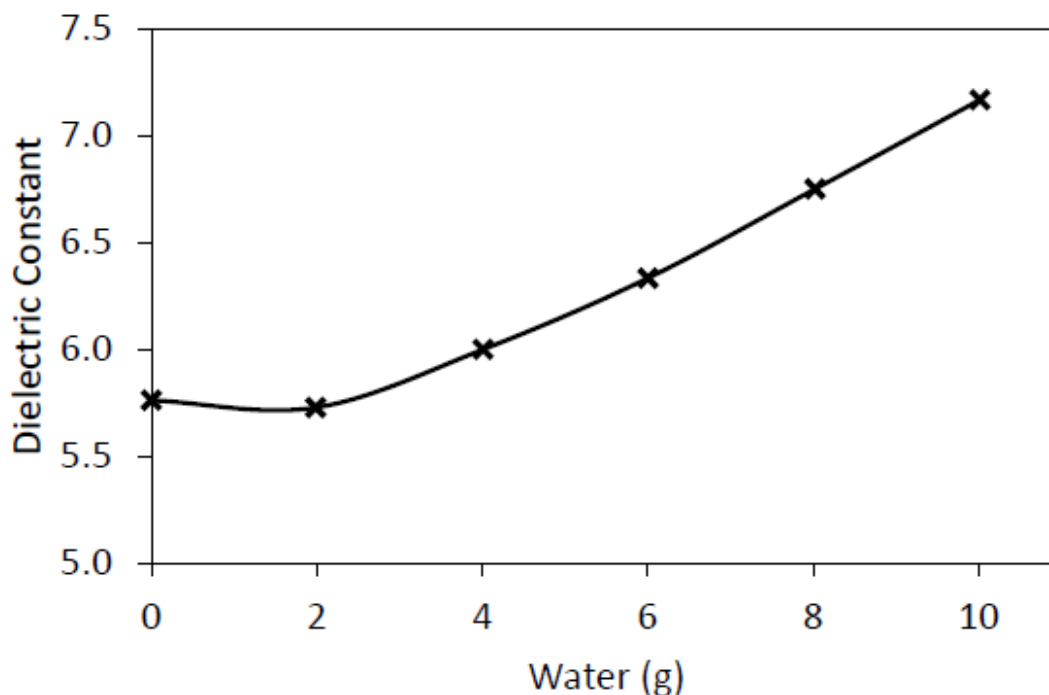
2.2 Dielektrisk verdi

Georadaren måler den dielektriske verdien til det øverste sjiktet av asfaltdekket. Den dielektriske verdien er forenklet forklart påvirket av tre faktorer; tilslagets dielektriske verdi, bitumenets dielektriske verdi og andel luft. Ved bruk av georadar til kvalitetskontroll forventes det at variasjonen i målt dielektrisk verdi kun skyldes endring i andel luft, og at sammensetningen ellers er homogen. Dette er en forenkling av virkeligheten, da det naturlig vil oppstå variasjoner i asfaltmassen. Tabell 1 angir normale verdier for dielektrisk verdi på forskjellige materialer [9]. Med antagelsen at det kun er andelen luft som endres i dekket, er teorien at dielektrisk verdi gradvis skal gå mot 1 når det kun er luft igjen. Dette er imidlertid kun teoretisk.

Tabell 1 Vanlige dielektriske verdier [9]

Materiale	Relative dielektrisk verdi (ϵ_r)
Luft	1
PEHD	2,3 - 2,4
Bitumen	2,5 - 3,5
Stein	4 - 8
Asfalt	3 - 7
Vann	81
Metall	> 32 000

Av de mulige ytre påvirkningsfaktorene er det vann som er vanligst og som har størst påvirkning [10]. Federal Highway Administration (FHWA) i USA har gjennomført et forsøk, ved å gradvis øke vannmengden på overflaten av kjerner med diameter på 100 mm. Figur 1 viser utviklingen i dielektrisk verdi, avhengig av tilført vannmengde. Som det kan sees vil det ved kun små mengder vann bli en betydelig økning i dielektrisk verdi, som igjen fremhever viktigheten av at det er tørt under målinger.



Figur 1 Effekt av vann på målt dielektrisk verdi [10]

Den dielektriske verdien kan benyttes til å bedømme homogeniteten til et dekke, men gir ikke direkte svar på hulromsnivået. For å konvertere dielektrisk verdi til hulrom er det behov for å etablere en kalibreringskurve, for å finne sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi og hulrom for hver asfaltmasse/kontrollgrunnlag. Slik regelverket er i dag, gjennomføres det punktmålinger på minimum ni lokasjoner, der dielektrisk verdi måles direkte over lokasjonen der det tas ut en kalibreringskjerne. Basert på dette utarbeides det en kalibreringskurve som benyttes videre til kalibrering av de regulære målingene. Punktmålingene er statiske målinger, på ca. 30 sekunder, rett over kalibreringspunktet. Regulærmålingene er målingene som gjennomføres kontinuerlig over hele strekningen.

2.2.1 Fresnelsoner

ed bruk av georadar er det ikke bare et punkt rett under antennen som bestemmer den målte dielektriske verdien, men et volum rundt dette punktet. Dette volumet kan omtales som et fotavtrykk eller en Fresnelsoner, og størrelsen øker med økende avstand fra antennen. Hver antenne har flere fresnelsoner som påvirker målingene, men i denne rapporten er kun den første fresnelsonen undersøkt (heretter omtalt som fresnelsonen). Analysen er begrenset til dekkeoverflaten som er undersøkt. Fresnelsonens utstrekning avhenger av bølgelengden og dybden, og et estimat av fresnelsonens størrelse kan beregnes ved hjelp av formel 1 [4].

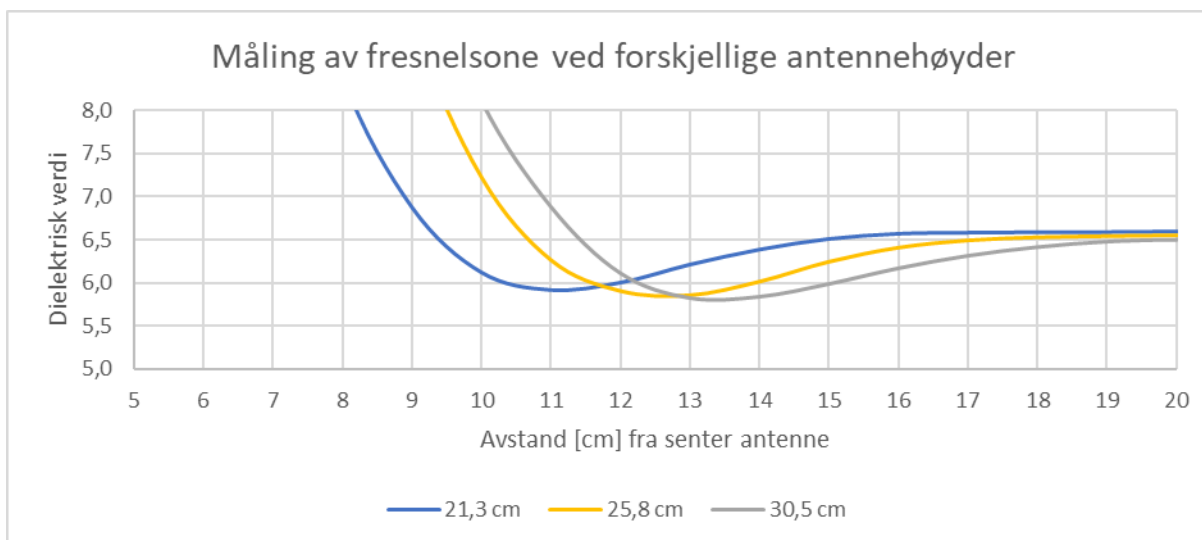
$$F_r = 0,5 * c * \left(\frac{t}{f}\right)^{0,5}$$
$$t = \frac{2 * h}{c}$$

Hvor

- c er lysets hastighet (29,98 cm/ns)
- t er toveis reisetid for signalet [ns]
- h er høyden over overflaten [cm]
- f er antennes sentralfrekvens [GHz]

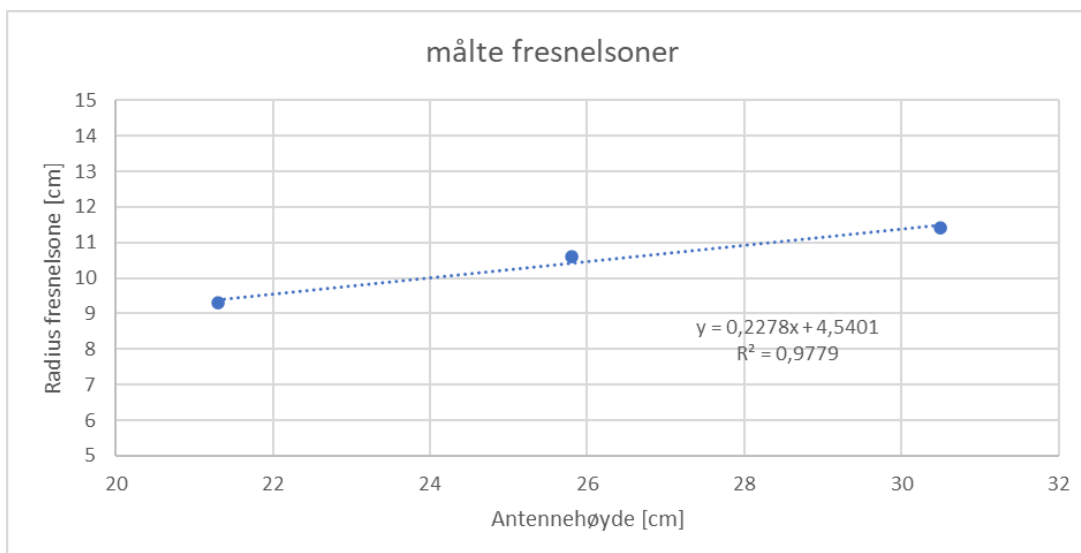
For RDM er det oppgitt at diameteren på fresnelsonen er ca. 20 cm (radius 10,2 cm), ved en antennehøyde på 30 cm over dekkeoverflaten [4]. Dette avviker noe fra utførte forsøk ved sentrallaboratoriet. Det er her testet på tre forskjellige høyder som vist i figur 2. Det ble gjennomført statiske målinger for hver centimeter, fra 20 cm unna senter av antennen.

Estimerte fresnelsoner er funnet ved å gjøre en måling uten metallplate for å finne grenseverdien og så finne den korresponderende verdien for hver av høydemålingene med metallplate. Ved antennehøyde på 21,3 cm er fresnelsonen 9,3 cm, ved antennehøyde på 25,8 cm (bilbasert) er fresnelsonen 10,6 cm og ved antennehøyde 30,5 cm (trallehøyde) er fresnelsonen 11,4 m.



Figur 2 Kontroll av fresnelsonen ved forskjellige høyder

Figur 3 viser den lineære sammenhengen mellom de estimerte fresnelsonene, og viser at det er en lineær sammenheng mellom sonene innenfor disse antennehøydene.



Figur 3 Lineær sammenheng mellom estimerte fresnelsoner fra målinger

Det benyttes i dag kjerner med diameter 150 mm til kalibrering, slik at RDM vil ha med noe bidrag utenfor utboret kerne. Dette medfører at det vil være noe variasjon mellom RDM og MDM. Det å redusere antennehøyden slik at fresnelsonen blir mindre enn diameteren på kjernen er ikke mulig, da dette vil komme i konflikt mellom refleksjonen fra overflaten og antennen. Basert på dette er det ikke mulig å benytte RDM for målinger i laboratoriet.

2.2.2 Penetrasjonsdybde

Penetrasjonsdybden til utstyret er en viktig faktor, som skal være kontrollert for hvert utstyr slik at underliggende lag ikke tas med i beregning av dielektrisk verdi. For RDM er det gjennomført kontroll med måling i lab på asfaltplater med variabel tykkelse (3,9 cm, 4,2 cm og 5,0 cm), med og uten metallplate under platene. Metall har betydelig høyere dielektrisk verdi enn asfalt (se tabell 1 for mer konkrete verdier). Ved å sammenligne målinger med og uten metallplate under asfaltplaten, kan penetrasjonsdybden undersøkes ved å se om det blir en økning i dielektrisk verdi eller ikke. Basert på resultatene vist i tabell 2 er penetrasjonsdybden til RDM < 3,9 cm. Eksakt penetrasjonsdybde er ikke bestemt, men dekketykkelsen er normalt $\geq 4,0$ cm ved målinger i felt.

Tabell 2 Oversikt over utførte målinger av dielektrisk verdi på asfaltplater med og uten metallplate under platene.

Tykkelse [cm]	Med /uten metallplate	Måling 1		Måling 2		Snitt begge	Differanse uten - med metall under
		Snitt	STD	Snitt	STD		
3,9	Uten	6,056	0,012	6,052	0,012	6,054	0,066
	Med	5,988	0,013	5,987	0,015	5,987	
4,2	Uten	5,718	0,009	5,713	0,008	5,715	0,003
	Med	5,710	0,012	5,715	0,010	5,712	
5,0	Uten	5,572	0,009	5,565	0,008	5,569	0,049
	Med	5,518	0,007	5,521	0,008	5,519	

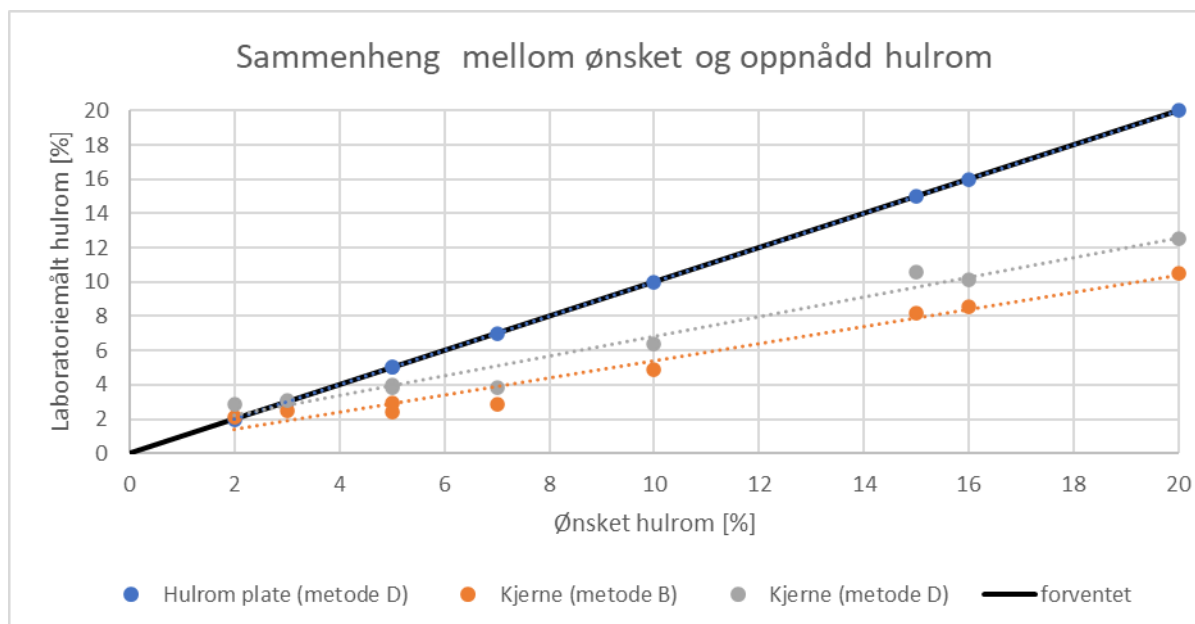
2.3 Laboratorieanalyser

I Norge benyttes i hovedsak to metoder for bestemmelse av hulrom: metode B (hydrostatisk, overflatetørr) og metode D (måling). Kravene til utførelse av laboratorieanalyser er beskrevet i Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser [11]; 362 Prøvens densitet, 363 Maksimumsdensitet og 364 Hulromsinhold. Kravene er som følger: Slitelaget kappes fra underliggende lag. Deretter kappes halve steinstørrelsen i toppen for å fjerne hulrom som er en del av normal overflateruhet. Prøvenes romdensitet analyseres med metode B og D. Maksimumdensiteten til massen i prøven analyseres og hulrom beregnes. Dersom hulrom bestemt ved metode D $\geq 10\%$, skal denne verdien benyttes. Dersom hulrommet bestemt ved metode D er $< 10\%$, skal resultatet fra metode B benyttes.

Når det lages laboratorietilvirkede prøver gjøres dette fra rommål. Man har en mengde asfalt [g] i en form (wheel-track eller gyrator) med kjent volum [cm^3]. Dette gir en kjent romdensitet [g/cm^3] og et kjent hulrom [%]. Dette er hulrom for en wheel-track plate etter metode D. En laboratorietilvirket plate vil normalt ha størst hulrom i kantene og når det bores ut en kjerne fra senter av plata, vil denne normalt være tettere og ha lavere hulrom, selv når den blir målt på rommål (med skyvelær) etter metode D. Måler man den utborede kjernen med metode B (nedsenket i vann) vil ikke overflatehulrom regnes som en del av hulrommet og målingene vil vise at kjernen er enda tettere, det vil si, har enda lavere hulrom.

Det vil derfor være en forskjell på den beregningen som gjøres for hulrom (ønsket/tilsiktet) med plater i henhold til metode D og målingene man gjør av en utboret del av plata, med metode B.

Ved videre arbeid med denne rapporten er det valgt å kun benytte én metode; metode B. Dette medfører at det vil være noe avvik mellom beregnet (ønsket/tilsiktet) hulrom og målt hulrom. Differanse mellom metodene er vist i figur 4. Der synliggjøres forskjellen for hulrom mellom en wheel track plate (med metode D), og en kjerne boret fra platen, målt med metode B og D.



Figur 4 Utvikling i hulrom, avhengig av valgt metode

2.4 Laboratorietilvirkede prøver

Tilvirkning av kjerner/plater gjøres etter kravene i Statens vegvesens håndbok R210 Laboratorieundersøkelser [11]. Det er valgt å undersøke kjerner tilvirket i gyratorisk kompaktor (kapittel 3532) og wheel track plater (kapittel 367).

Temperaturen til asfaltmassen ved blanding og kompaktering (utlegging) avhenger av bindemiddelets viskositet. For formålet her er det to steder som angir krav til temperatur, NS-EN 13108-1 og R210 Laboratorieundersøkelser.

Øvre og nedre grense på temperaturen for forskjellige bindemiddeltypen er vist i tabell 3, i henhold til NS-EN 13108-1 [12]. Den høyeste temperaturen er den høyeste temperaturen tillatt noe sted i løpet av produksjonen. Den laveste temperaturen er laveste tillatte temperatur når asfalten forlater asfaltverket. For Polymermodifisert Bindemiddel (PmB) henvises det til leverandørens dokumentasjon.

Tabell 3 Maks og minimumstemperatur for forskjellige bindemiddeltypen, iht. NS-EN 13108-1 [12]

Bindemiddel	Temperatur [°C]
20/30	160 til 200
30/45	155 til 195
35/50, 40/60	150 til 190
50/70, 70/100	140 til 180
100/150, 160/220	130 til 170
250/330, 330/430	120 til 160

Forbehandling av prøvene og blanding av laboratorieprøver er beskrevet i håndbok R210 kapittel 310 og kapittel 3531 [11]. R210 oppgir veiledende blande- og komprimeringstemperaturer for forskjellige bindemiddeltypen (se tabell 4 og tabell 5). Maks temperatur er maksimal temperatur under blanding, mens referanse temperaturen er ønsket temperatur når komprimering starter.

Tabell 4 Maksimal oppvarmingstemperatur for forskjellige bindemiddeltypen, i henhold til R210 tabell 310-1 [11]

Bindemiddel	Maks temperatur [°C]
PmB *	180 til 200
Bitumen, penetrasjon 35 - 150	140 til 155
Bitumen, penetrasjon 150 - 430	125 til 140

* Hvis ikke annet er oppgitt fra leverandør

Tabell 5 Veiledende blande og komprimeringstemperatur, i henhold til R210 tabell 3531-1 [11]

Bindemiddel	Referanse temperatur [°C]	Maks temperatur [°C]
35/50	160 ± 5	180
50/70	150 ± 5	170
70/100	145 ± 5	165
100/150	140 ± 5	160
160/220	135 ± 5	155
250/330	130 ± 5	150
330/430	125 ± 5	145

2.4.1 Gyratorisk kompaktor

Gyratorkjernene er tilvirket ved NTNUs asfaltlaboratorium i Trondheim ved bruk av en ICT-150RB gyrator fra produsenten Invelop Oy. Tilvirkningen skjer ved at både asfaltmassen og formene forvarmes til produksjonstemperaturen angitt i kontrollgrunnlaget. Sylindren monteres ved å plassere bunnplaten i formen og legge et frigjøringspapir i bunnen. Oppmålt masse fylles deretter i formen og overflaten jevnes før et nytt frigjøringspapir legges på toppen. Ved ønske om mindre prøvehøyder kan det monteres et mellomstykke. Sylindren settes inn i gyratoren, og topplokket monteres. Trykk, antall omdreininger per minutt og

gyratorvinkel stilles inn, og gyreringen avsluttes når prøven har oppnådd ønsket densitet. Gyreringen påfører massen skjærbevegelser som gradvis reduserer hulromsinholdet. Ferdige gyratorkjerner har en diameter på 150 mm og en høyde på 150 mm (dette er kun det som er valgt her, gyratorkjernene kan produseres ved flere høyder og diametere). Mengden masse og antall gyreringer varierer for å oppnå ønsket variasjon i densitet. Nødvendig prøvemengde beregnes etter formel 2.

Formel 2 Beregning av nødvendig masse til gyratorkjerner, avhengig av ønsket hulromsinhold.

$$M = 10^{-9} * \pi * \frac{D^2}{4} * h_{min} * (p_m - \frac{v_m - p_m}{100})$$

Hvor

- M er asfaltmassen som skal veies inn [g]
- D er den indre diameteren til formen [mm]
- H_{min} er minste høyde til komprimert prøve ved 0 % hulrom [mm]
- p_m er asfaltens maksimumsdensitet [g/cm³]
- v_m er ønsket hulrom i %

Basert på litteratur fra USA [4, 5 og 12], er tidligere forsøk på bruk av laboratorietilvirkede kjerner til kalibrering av georadaren utført med gyratortilvirkede kjerner.



Bilde 3 Gyrator ved NTNUs laboratorium. Foto: Trond Østen, Statens vegvesen

2.4.2 Wheel track kompaktor

Wheel-track-plater fra Statens vegvesen tilvirknes i laboratoriet ved bruk av en Cooper hydraulisk standard rullekompaktor med lineær bevegelse i én retning. Tilvirkningen skjer ved at både formen og asfaltmassen forvarmes i varmeskap til produksjonstemperaturen som er angitt i kontrollgrunnlaget. Den oppvarmede massen fordeles jevnt i formen før formen plasseres i rullekompaktoren.

Antall overførter stilles inn og en oppvarmet rulle beveger seg gjentatte ganger frem og tilbake over prøven, inntil ønsket høyde (her 5 cm) er oppnådd. Hvor hardt/fort prøven skal pakkes, styres manuelt ved å justere trykket underveis. Plater kan produseres i ulike dimensjoner. Det er her benyttet 30,5 cm × 30,5 cm × 5 cm (l × b × h).

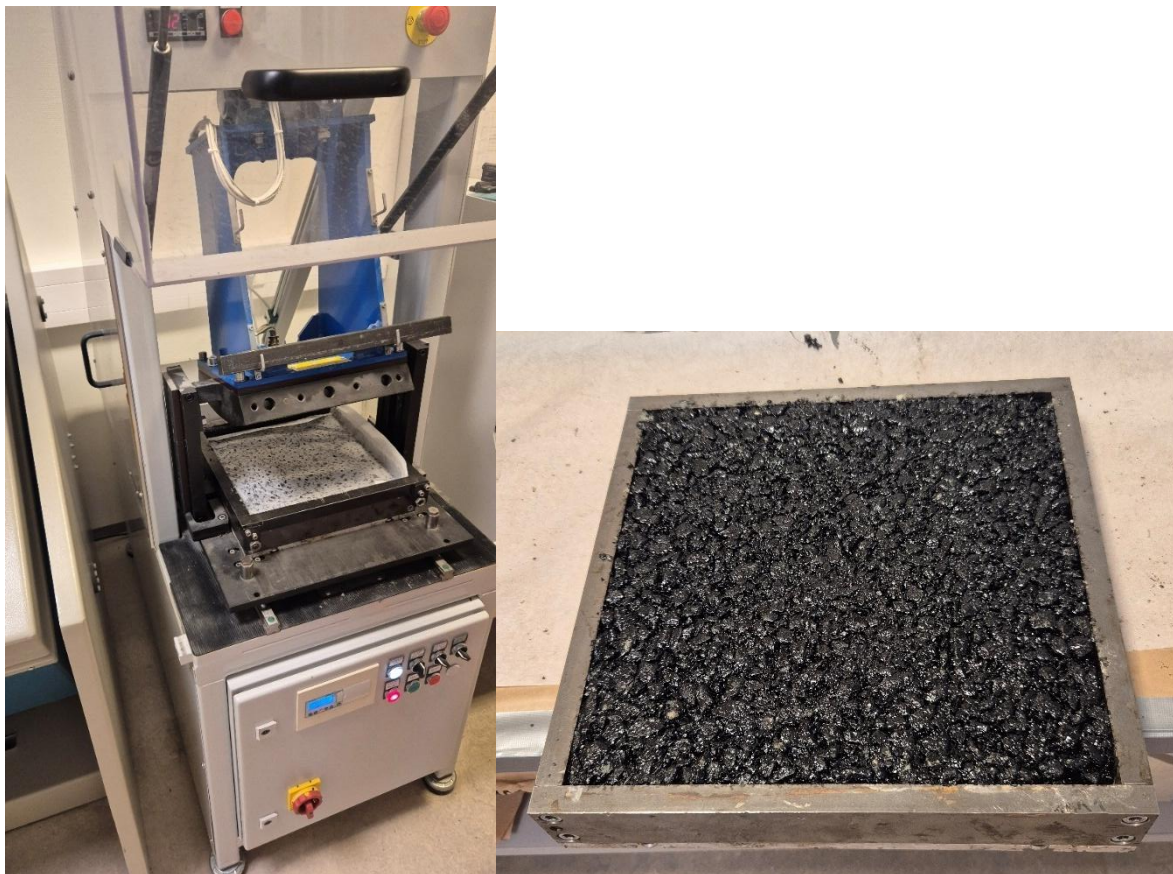
Nødvendig massemengde for å oppnå ønsket hulromsinhold (NB! Gjelder hulromsinholdet til platen, jamfør figur 4) beregnes etter formel 3.

Formel 3 Beregning av massebehov for wheel track plater

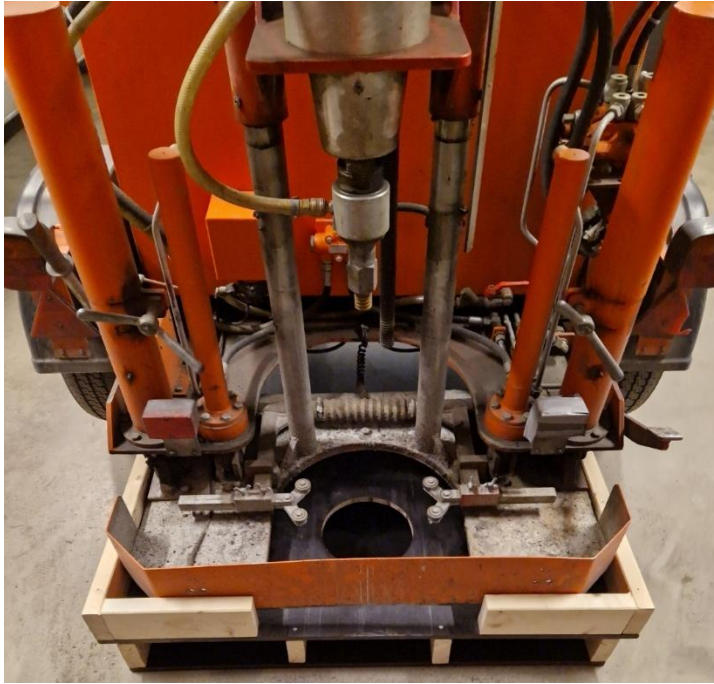
$$M = \left(b * l * h * \frac{(100 - v_m)}{100} \right) * p_m$$

Hvor

- M er asfaltmassen som skal veies inn [g]
- b er bredden, l er lengden og h er høyden på formen [cm]
- p_m er asfaltens maksimumsdensitet [g/cm³]
- v_m er ønsket hulrom i %



Bilde 4 Cooper hydraulisk rullekompaktor benyttet ved Statens vegvesen, sentrallaboratoriet i Trondheim og tilvirket prøve. Foto: Trond Østen, Statens vegvesen



Bilde 5 Utboringsjigg. Foto: Jørn Trygve Myhre, Statens vegvesen

Densitetsmålingene ble utført på kjerner med 150 mm diameter, boret ut fra senter av wheel-track platene.

3. Arbeid i 2023

Det finnes i dag ingen omforent metode for tilvirkning av laboratoriekjerner til bruk ved georadarkalibrering. For å vurdere forskjeller mellom gyrottilvirkede kjerner og wheel-track-tilvirkede kjerner ble det derfor valgt en forsøksstrekning på Østlandet, der det ble undersøkt variasjonen mellom kjerner uttatt fra felt og kjerner tilvirket i laboratoriet.

3.1 Dekketype

Dekketyperen på strekningen var AC 11 surf 70/100 Ab 11, med oppgitt maksimumsdensitet på 2,425 g/cm³. Av uttatt masse ble det tatt fem prøver, hvor det ble gjennomført måling av maksimumsdensitet (se resultat i tabell 6). Gjennomsnittlig maksimumsdensitet er 2,419 g/cm³, og denne verdien er benyttet videre i beregning av hulrom.

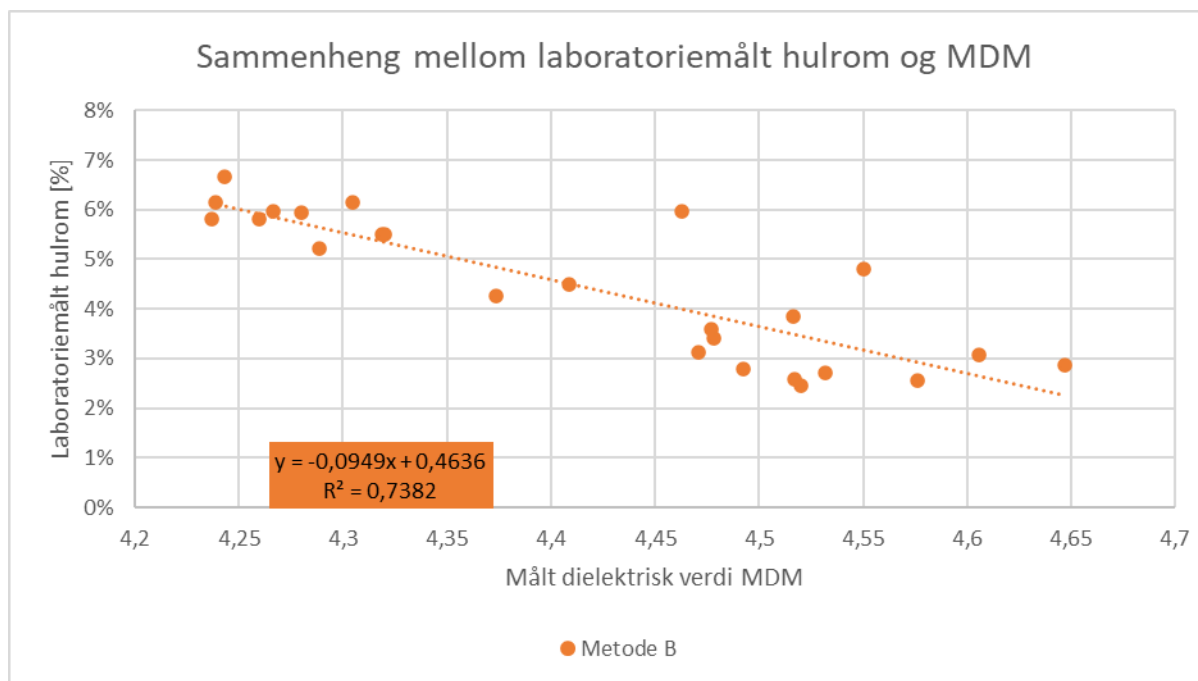
Tabell 6 Målt maksimumsdensitet fra uttatt masse

Delprøve	Maksimumsdensitet [g/cm ³]
1	2,416
2	2,415
3	2,421
4	2,429
5	2,412
Gjennomsnitt	2,419

3.2 Kjerner fra veg

Det ble uttatt 26 prøver fra veg over en strekning på 107 meter. Det ble ikke gjennomført målinger med RDM før prøveuttak, da det regnet den dagen prøvene ble tatt. Det er derfor ikke mulig å sammenligne resultater fra RDM og MDM. Prøvene er ikke kappet i topp eller bunn og har en diameter på 150 mm. Figur 5 viser målt dielektrisk verdi fra MDM mot laboratoriemålt hulrom med metode B. Det er noe lavere korrelasjon mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratoriemålt hulrom enn ønsket, med en korrelasjonsfaktor R^2 på 0,76. Det er to avvikende kjerner (AX-3 og AX-7). Fjernes disse, oppnås en korrelasjonsfaktor R^2 på 0,89, som ansees som bra.

Fullstendig oversikt over målt dielektrisk verdi og hulrom for hver kerne er vist i vedlegg B. NB! Det er ikke gjennomført maksimumsdensitetsmålinger på kjernene, slik at det kan være mindre variasjoner fra benyttet verdi.



Figur 5 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratoriebestemt hulrom med metode B

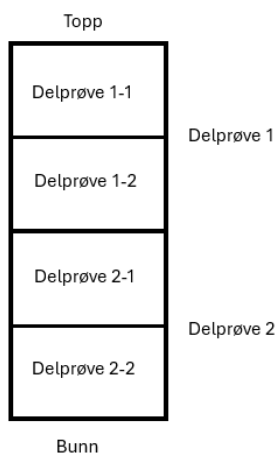
3.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Gyrator

Det ble tilvirket 24 gyratorkjerner. Det ble benyttet et trykk på 620 kPa, en gyratorvinkel på 17 mrad og en gyratorhastighet på 26,6 omdreininger per minutt.

Det ble forsøkt å produsere kjerner med varierende hulromsinnhold fra 3 %–12 %. Ferdige kjerner skal ha en høyde og diameter på 150 mm. MDM har en begrensning på maksimal høyde på 120 mm, og prøvene er derfor kappet. Kjernene er kappet i senter, og fire kjerner ble i tillegg delt i fire like deler. Kjernene er benevnt XX-1 (øvre del) og XX-2 (nedre del), i henhold til figur 6 (viser også inndeling for kjernene som er kappet i fire).

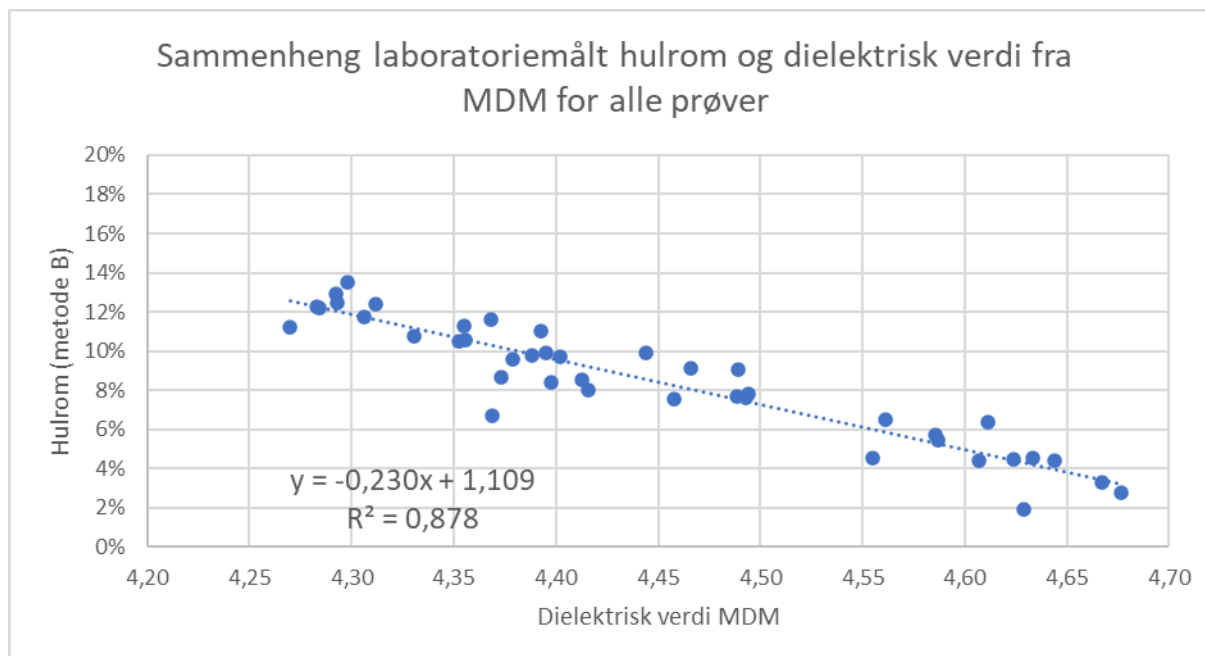
Det er ikke gjennomført målinger av dielektrisk verdi på hele prøven eller på delprøvene 1-1, 1-2, 2-1 og 2-2. Delprøve 1 og 2 er målt med MDM, og hulrommet er analysert i laboratoriet med metode B og D. Det er ikke gjennomført måling av maksimumsdensitet, annet enn på delprøvene 1-1, 1-2, 2-1 og 2-2. Resultatene for disse kjernene ligger innenfor $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ fra benyttet maksimumsverdi og ansees som innenfor forventet variasjon.

Maksimumsdensitet målt på uttatt masse er benyttet videre ved beregning av hulrom (se tabell 6). En detaljert oversikt over resultatene for hver kjerne er vist i vedlegg C.



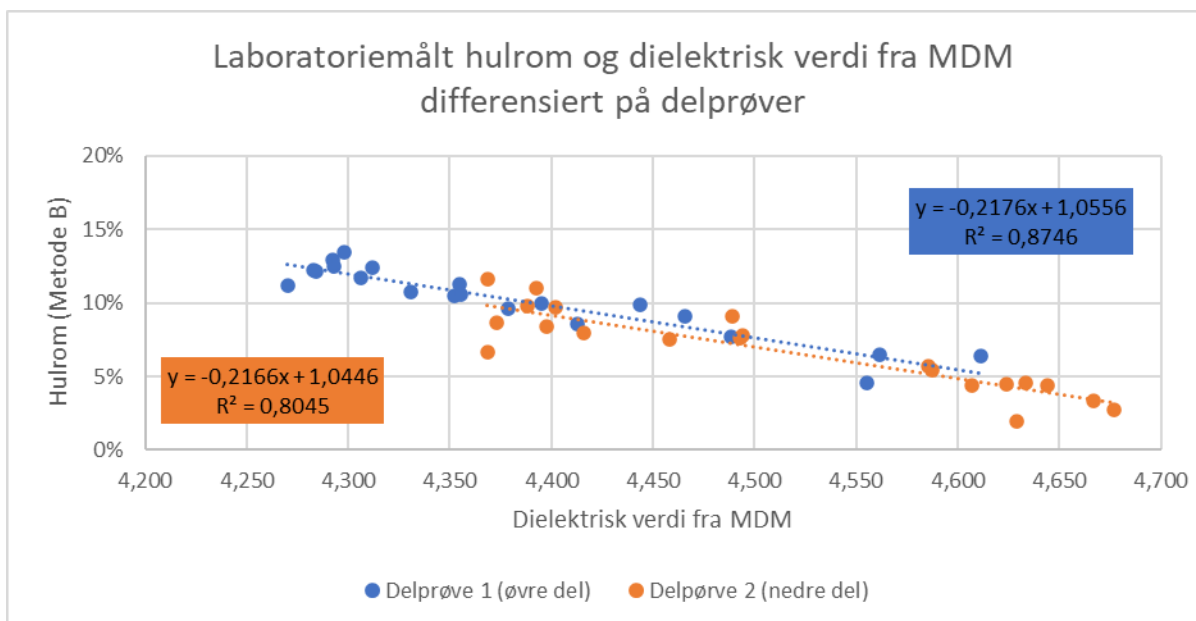
Figur 6 Navnsetting av gyratorprøver etter kapping

Figur 7 viser sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratoriemålt hulrom med metode B, uten å skille på delprøvene. Målingene viser en god korrelasjon mellom dielektrisk verdi og hulrom, med en korrelasjonsfaktor R^2 på 0,87. Det ble observert et tydelig skille mellom delprøvene, der nedre del generelt er betydelig tettere (lavere hulrom). Dette ble også bekreftet visuelt på prøvene, ved at prøvene er fetere mot bunnen (antatt mere bindemiddel).



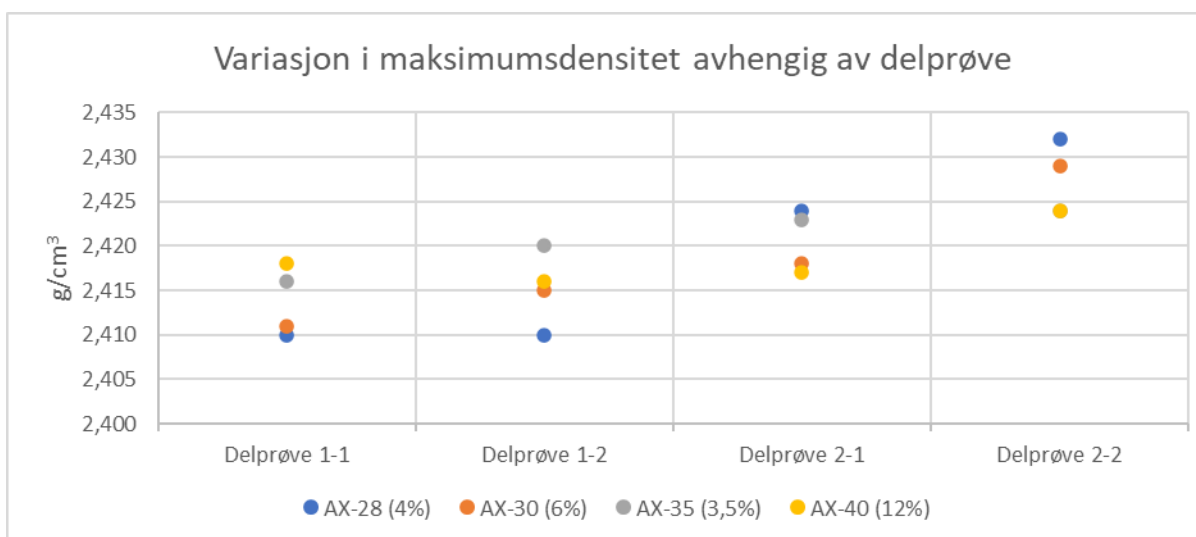
Figur 7 Sammenheng dielektrisk verdi og hulrom fra laboratoriet for gyrator (alle delprøver). Laboratoriemålt hulrom med metode B

For å illustrere forskjellen mellom øvre og nedre del er delprøvene skilt i figur 8. Her fremgår det en tydelig trend: nedre del av kjernen har høyere densitet (lavere hulrom) enn øvre del. Differansen mellom øvre og nedre del varierer, men er mest markant for prøvene med ønsket lavt hulrom. Det er god korrelasjon både for øvre og nedre del, med $R^2 > 0,8$. Trendlinjene for øvre og nedre del følger hverandre og det er en ikke-signifikant forskjell mellom linjene. Det anses derfor at øvre og nedre del følger samme trend når det gjelder utvikling i dielektrisk verdi.



Figur 8 Sammenheng dielektrisk verdi og hulrom fra laboratoriet for gyrator (Skilt på delprøver). Laboratoriemålt hulrom med metode B

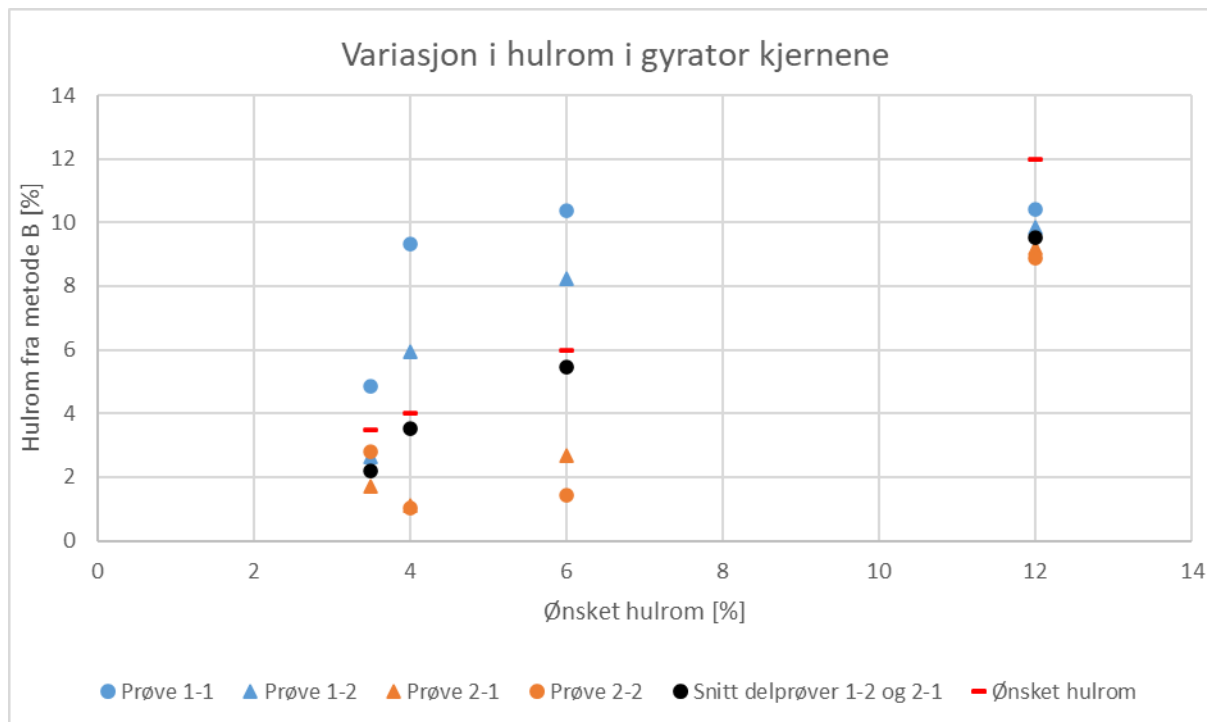
Det ble valgt ut fire kjerner som ble kappet i senter av hver delprøve. Prøvene hadde ønsket hulrom på 3,5 %, 4 %, 6 % og 12 %. Hulrom og maksimumsdensitet ble målt for hver delprøve. Variasjonen i maksimumsdensitet for hver delprøve er vist i figur 9. Resultatene indikerer at det kun er små differanser i maksimumsdensitet mellom delprøvene (maksimal differanse er $0,02 \text{ g/cm}^3$, som tilsvarer under 1 % hulrom), men at det gjennomgående er økende maksimumsdensitet fra topp til bunn av kjernene. Dette er noe forskjellig fra det som er forventet, da det er forventet motsatt effekt (reduksjon i maksimumsdensitet i de nederste delprøvene, grunnet økt bindemiddelinnhold med lavere densitet). Det er ikke utført ekstraksjon for å undersøke eventuell differanse i bindemiddelinnhold i kjernene.



Figur 9 Målt maksimumsdensitet for hver delprøve på gyratorkjernene

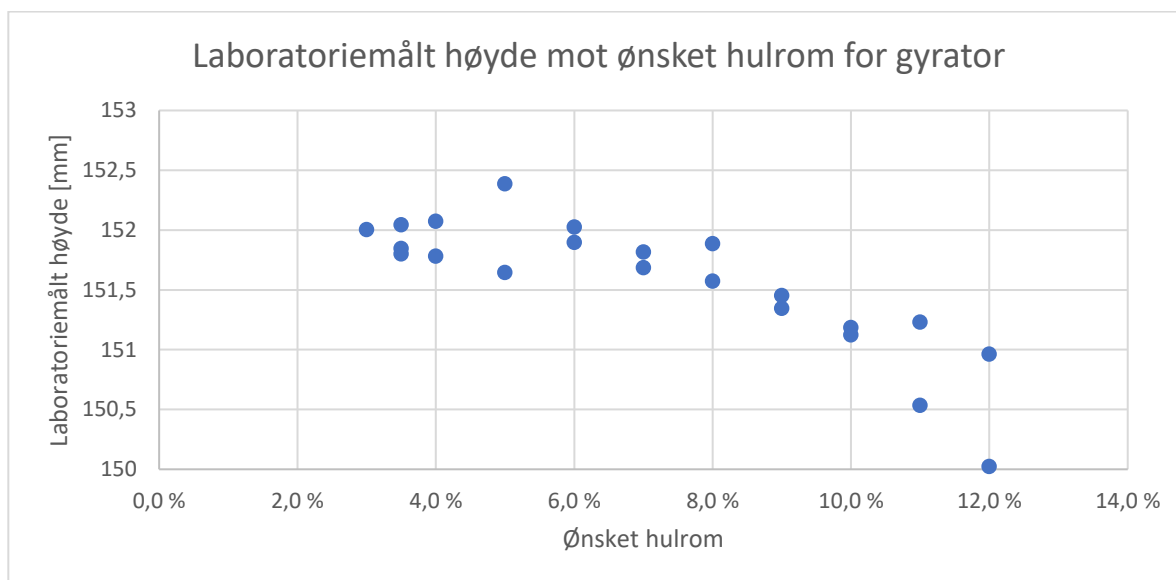
Figur 10 viser ønsket hulrom opp mot faktisk laboratoriemålt hulrom for hver delprøve. I tillegg er hulrommet for delprøve 1-2 og 2-1 snittet for å synliggjøre hvordan senter av kjernen oppfører seg. Tendensen er tydelig: hulrommet er størst i øvre del av kjernen (delprøve 1-1 og 1-2), og det er mindre variasjon mellom delprøve 2-1 og 2-2. Avviket er

størst for prøvene med ønsket hulrom på 3,5 %, 4 % og 6 %, men betydelig mindre for kjernen med 12 % hulrom.



Figur 10 Sammenheng mellom ønsket hulrom og målt hulrom fra laboriet med metode B for hver delprøve for gyratorkjernene.

Det har vært problematisk å oppnå riktig høyde på gyratorkjernene. Som det kan sees i figur 11 ble kjernene i hovedsak 1,0 mm - 2 mm høyere enn ønsket høyde på 150 mm.



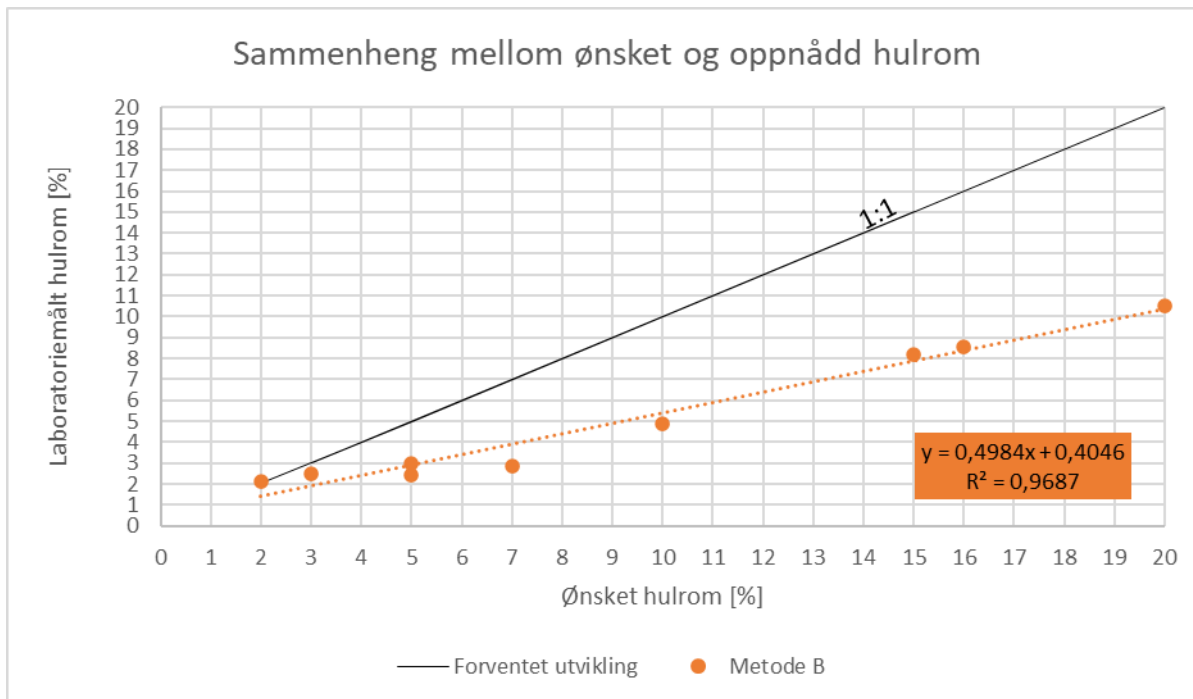
Figur 11 Laboratoriemålt høyde mot oppnådd hulrom for gyratorkjerner

3.4 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra STATENS VEGVESEN

Det ble laget ni laboratorietilvirkede wheel track plater ved sentrallaboratoriet i Trondheim, med variabelt ønsket hulrom fra 2 % - 20 %. Platene ble produsert ved to forskjellige temperaturer (tre plater på 140°C og seks plater på 160°C). Begge temperaturene er innenfor temperaturgrensene for massen ved produksjon, og det kan ikke sees noen store differanser imellom platene. Det ble gjennomført måling med MDM på utboret kjerner. Det er

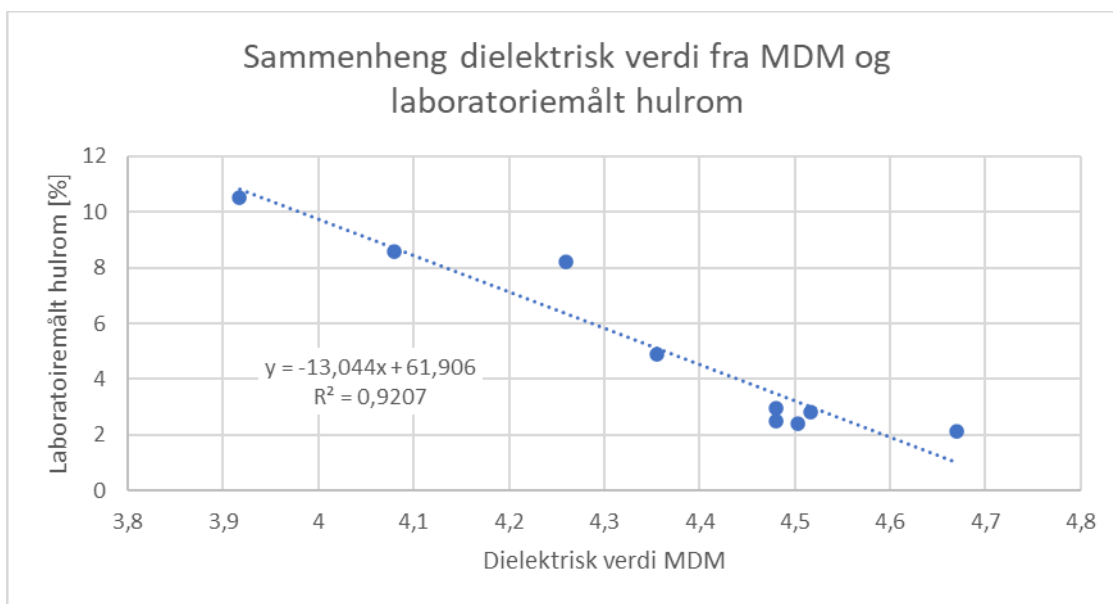
ikke gjennomført målinger med RDM på platene. Detaljert oversikt over resultatene er vist i vedlegg D.

Ønsket hulrom sammenlignet med laboratiormålt hulrom med metode B er vist i figur 12. Det er en god korrelasjon på utviklingen av hulrommet ($R^2 = 0,96$), men laboratiormålt hulrom er som forventet betydelig lavere enn ønsket hulrom (faktor på ca. 0,5 fra trendlinjen).



Figur 12 Sammenheng mellom ønsket hulrom og laboratiormålt hulrom med metode B

Sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratiormålt hulrom med metode B er vist i figur 13. Det er god sammenheng mellom målt dielektrisk verdi og laboratiormålt hulrom, med en korrelasjon R^2 på 0,92.



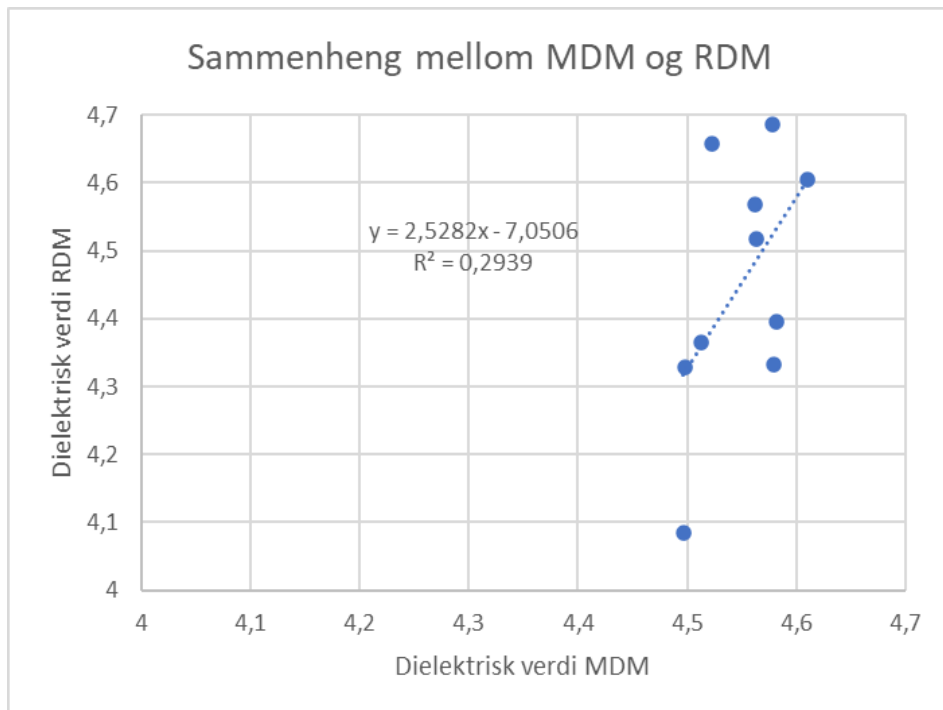
Figur 13 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi og laboratiormålt hulrom med metode B på wheel track plater fra Statens vegvesen

3.5 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra ekstern leverandør

Det ble tilvirket 30 wheel track plater av en ekstern leverandør. Platene ble produsert ved temperatur på 140 °C, med forskjellig tykkelse (75-85 mm) og forskjellig kraft (15 kN og 18 kN) for å oppnå variasjon i hulrommet. Det ble likevel minimal variasjon i hulrommet på de utborede kjernene fra wheel track platene (0,5 %-1,6%). Data fra alle målinger er vist i vedlegg E.

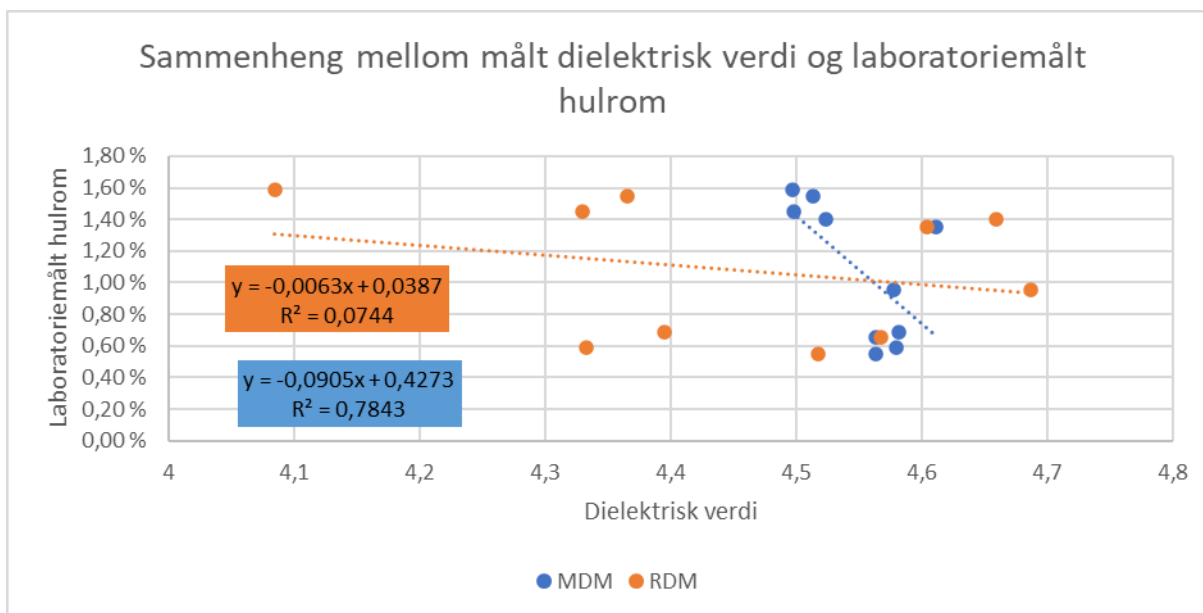
Det ble gjennomført målinger med RDM på alle platene og MDM på ti utborede kjerner. RDM vil ta med et større areal enn kjernen, og vil kun måle ca. halve tykkelsen på platen. Det forventes derfor noe avvik imellom målingene med RDM og MDM. RDM målingene indikerte lite variasjon i platene, slik at det ble valgt å kun gjøre MDM målinger på de ti platene som viste størst variasjon.

Figur 14 viser sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi med MDM og RDM. Som det kan sees er det betydelig større spredning i dielektrisk verdi for RDM målingene enn for MDM målingene.



Figur 14 Sammenheng mellom dielektrisk verdi målt med MDM og RDM fra wheel track plater produsert eksternt

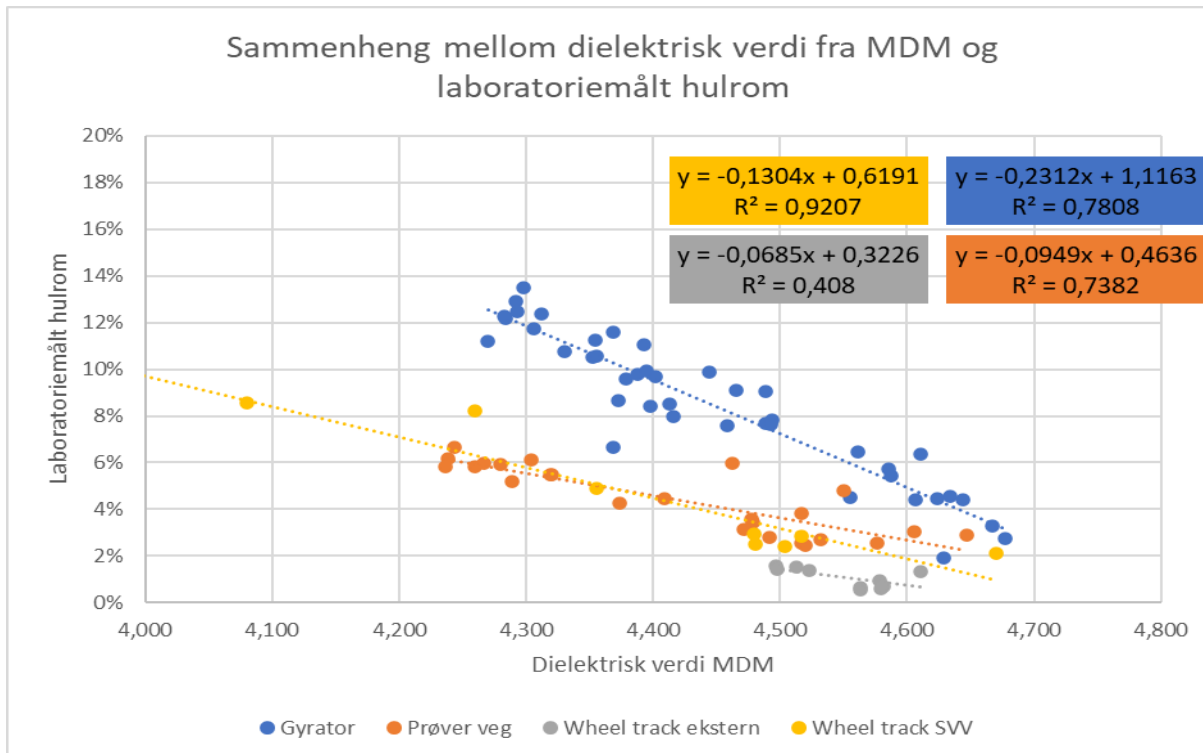
Figur 15 viser sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi fra RDM og MDM mot laboratoriemålt hulrom med metode B. Oppnådd korrelasjon mellom laboratoriemålt hulrom og dielektrisk verdi for MDM er på $R^2 = 0,78$ som ansees som akseptabelt. RDM har imidlertid en korrelasjonsfaktor R^2 på 0,07, som betyr at det ikke er korrelasjon mellom faktorene.



Figur 15 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi med MDM og RDM mot laboratoriemålt hulrom med metode B

3.6 Vurdering og diskusjon av resultater fra 2023

Sammenhengen mellom dielektrisk verdi fra MDM og laboratoriemålt hulrom er vist i figur 16. Her ansees kjernene uttatt fra veg som fasit. Hulrommet for kjernene fra veg er begrenset til området 2 %-7,5 %, slik at hele kurveforløpet ikke er dekket. Trenden er imidlertid tydelig, og det er forventet at utviklingen vil være i samme området som trendlinjen.



Figur 16 Oppnådd sammenheng mellom dielektrisk verdi fra MDM og laboratoriemålt hulrom med metode B

Gyratorkjernene har en markant annen trend, enn kjernene fra veg. Med tanke på at det er benyttet samme masse, vil dette medføre at kalibreringskurven fra gyratorkjernene vil gi feil resultat. Slik prøvene fremstår er det ikke mulig å gjøre en enkel korreksjon av kurven, for å tilpasse gyrator til kjernene fra veg. Prøvene fra Gyrator er noe tykkere enn prøvene fra veg (ca. 73 mm for gyrator og ca. 49 mm for veg). Ved en homogen prøve vil ikke høyden på prøven være utslagsgivende, men gyratorprøvene er ikke homogene i høyden. Dette har medført noen differanser som vist i figur 8. Det er kun data for én strekning, men basert på resultatet fra denne undersøkelsen ble det vurdert at gyrator ikke var en aktuell metode for laboratorietilvirkede kjerner til kalibrering av georadarmålingene i 2024.

Wheel track platene som ble produsert eksternt hadde for liten variasjon i hulrom (0,5 % - 1,6 %) til at det var mulig å gi en god sammenligning mot kjerner uttatt fra veg. Det som kan sies er at prøvene hadde noe lavere hulrom ved samme dielektrisk verdi enn prøver fra veg, men at trendlinjen viste relativ lik utvikling. Datagrunnlaget er imidlertid for lite, til at det kan trekkes noen konklusjon.

Wheel track platene som ble produsert av Statens vegvesen hadde relativt sammenfallende verdier med kjerner fra veg. Hovedtyngden av resultatene har hulromsverdier rundt 2 % - 4 % og det er kun tre prøver med hulrom over 5 %. Med kun ni kjerner totalt er datagrunnlaget for tynt til å kunne gi en tydelig konklusjon, men basert på foreløpige resultater ble wheel track plater fra Statens vegvesen ansett å være det beste alternativet for å få sammenlignbare kurver med prøver fra veg. Det ble derfor valgt å benytte dette alternative videre ved feltforsøkene i 2024.

4. Arbeid i 2024

Det ble valgt ut to strekninger som testpiloter, hver med ulik dekketype. Med bakgrunn i resultatene fra undersøkelsene i 2023 ble det besluttet å bruke kjerner boret fra wheel-track-plater produsert ved sentrallaboratoriet i Trondheim som grunnlag for å etablere kalibreringskurven for laboratorietilvirkede kjerner.

4.1 Forsøksstrekning 1

Forsøksstrekning 1 var en høyt trafikkert strekning med ÅDT i området 12 000 (med 16 % lange kjøretøy) på Østlandet. Vegen er en 2-felts veg, med utstrekning på ca. 4,8 kilometer.

4.1.1 Dekketype

Det var planlagt benyttet en SMA 16 65/105-60 Skag 16 på delstrekningen med oppgitt maksimumsdensitet på 2,454 g/cm³.

Av uttatt masse ble det tatt ut fire prøver, hvor det ble gjennomført måling av maksimumsdensitet (se resultat i tabell 7). Gjennomsnittlig maksimumsdensitet er 2,449 g/cm³, og denne verdien ble benyttet videre ved beregning av nødvendig prøvemengde til wheel-track-plater og ved beregning av hulrom.

Tabell 7 Målt maksimumsdensitet fra uttatt masse

Delprøve	Maksimumsdensitet [g/cm ³]
1	2,445
2	2,455
3	2,458
4	2,439
Gjennomsnitt	2,449

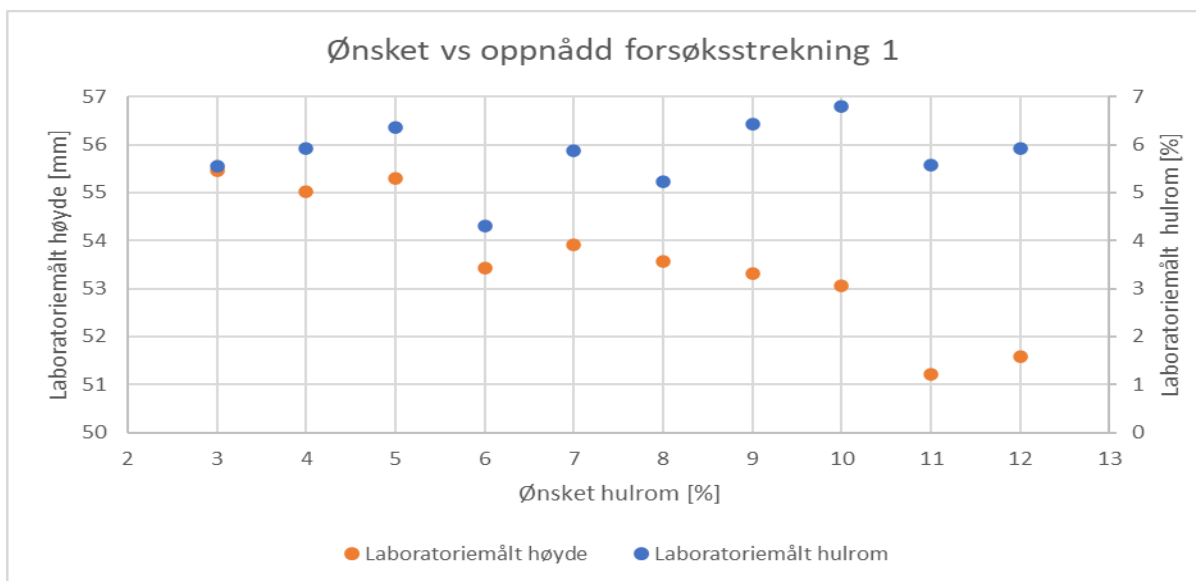
4.1.2 Kjerner fra veg

Det ble ikke tatt ut prøver fra veg. Det er derfor ikke mulig å sette opp en sammenheng mellom RDM og MDM for denne massen.

4.1.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra Statens vegvesen

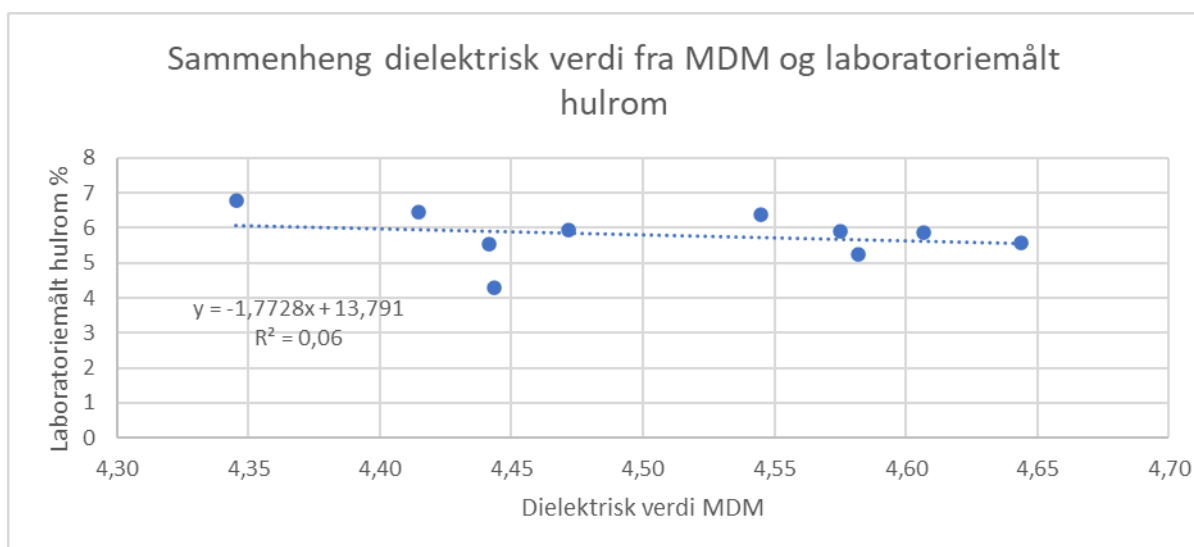
Det ble tilvirket ti wheel track plater ved sentrallaboratoriet i Trondheim. Platene ble tilvirket med en tilsiktet variasjon i hulrommet fra 3 % til 12 %. Kjernene ble ikke kappet, verken i topp eller bunn. Detaljert oversikt over resultatene er vist i vedlegg F.

Figur 17 viser sammenhengen mellom ønsket hulrom og laboratoriemålt hulrom (sekundær Y akse), og laboratoriemålt høyde på kjernen for hvert nivå av ønsket hulrom (primær Y akse). Kjernene skulle teoretisk ha en høyde på 50 mm. Dette er en forutsetning for å oppnå ønsket hulrom. Det var imidlertid vanskelig å kompaktere prøver med denne massen ned til 50 mm. Med mindre masse i formen (høyere hulrom) ble det lettere å pakke massen til nærmere ønsket høyde. Det er liten variasjon i laboratoriemålt hulrom med metode B (4,3 % - 6,8 %) og man oppnådde ikke på langt nær variasjonen man hadde ønsket fra 3 % til 12 %.



Figur 17 Oversikt over oppnådd høyde og hulrom på kjerner sett opp mot ønsket hulrom for forsøksstrekning 1

Figur 18 viser sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi fra MDM og laboratoriemålt hulrom med metode B. MDM indikerer en tydelig differanse i målt dielektrisk verdi, selv om det er lite variasjon i laboratoriemålt hulrom.



Figur 18 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratoriemålt hulrom med metode B for forsøksstrekning 1

4.1.4 Vurdering av resultat

Etter at georadarmålingene ble gjennomført, viste det seg at det var benyttet flere resepter og ulike dekketykkelser på strekningen. Det ble benyttet to forskjellige tilslag, og det var også lagt et parti med tynndekke. Punktene som ble markert for boring viste seg å være der tynndekket var lagt. Et tynndekke medfører at georadarmålingene får bidrag fra underliggende lag. Det er heller ikke mulig å gjennomføre MDM-målinger på denne dekketypen, da prøvene må være minimum 30 mm tykke for testing på MDM. Det ble derfor valgt å ikke bore ut kjerner fra veg, noe som igjen medførte at det ikke var mulig å etablere en sammenheng mellom RDM og MDM.

Det har vært utfordrende å oppnå tilstrekkelig variasjon i hulromsinnholdet for wheel-track-platene. Som vist i figur 17 varierer høyden på kjernene boret ut fra disse platene mellom 51 mm og 55 mm. Prøvemengden var dimensjonert for en høyde på 50 mm. Platene lot seg

ikke komprimere til ønsket tetthet (hulrom). I stedet for å oppnå lavere hulrom fikk man plater med identisk hulrom, hvor tykkelsen økte med mengden asfalt man benyttet.

4.2 Forsøksstrekning 2

Forsøksstrekning 2 ble gjennomført på en 2 felts veg på nordre del av Østlandet. Vegen har lav/moderat trafikk, med en ÅDT på 2300 (35 % lange kjøretøy). Strekningen er 6 km, og begge felt er målt.

4.2.1 Dekketype

Det ble benyttet en AC 11 surf 70/100 Ab 11 som ble produsert ved lav temperatur (LTA) og med 30 % resirkulert asfalt. Teoretisk maksimumsdensitet var oppgitt til 2,708 g/cm³.

Det ble gjennomført tre målinger av maksimumsdensitet på uttatt masse, som vist i tabell 8.

Tabell 8 Gjennomførte undersøkelser av maksimumsdensitet på uttatt masse fra forsøksstrekning 2

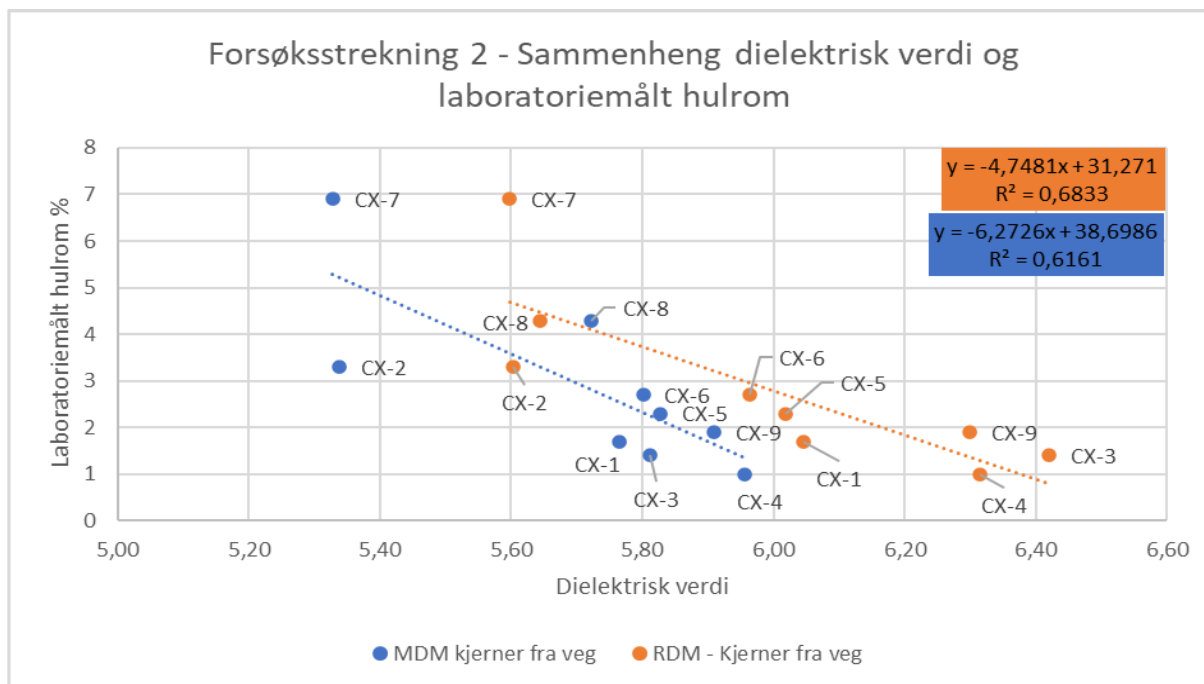
Prøve nr	Maksimumsdensitet [g/cm ³]
1	2,702
2	2,707
3	2,705
Gjennomsnitt	2,704

Gjennomsnittlig maksimumsdensitet på 2,704 g/cm³ ble benyttet videre for å beregne prøvemengde til wheel-track-platene og for beregning av hulrom på utborede kjerner fra disse platene. For utborede kjerner fra veg er maksimumsdensiteten for hver enkelt kerne benyttet..

4.2.2 Kjerner fra veg

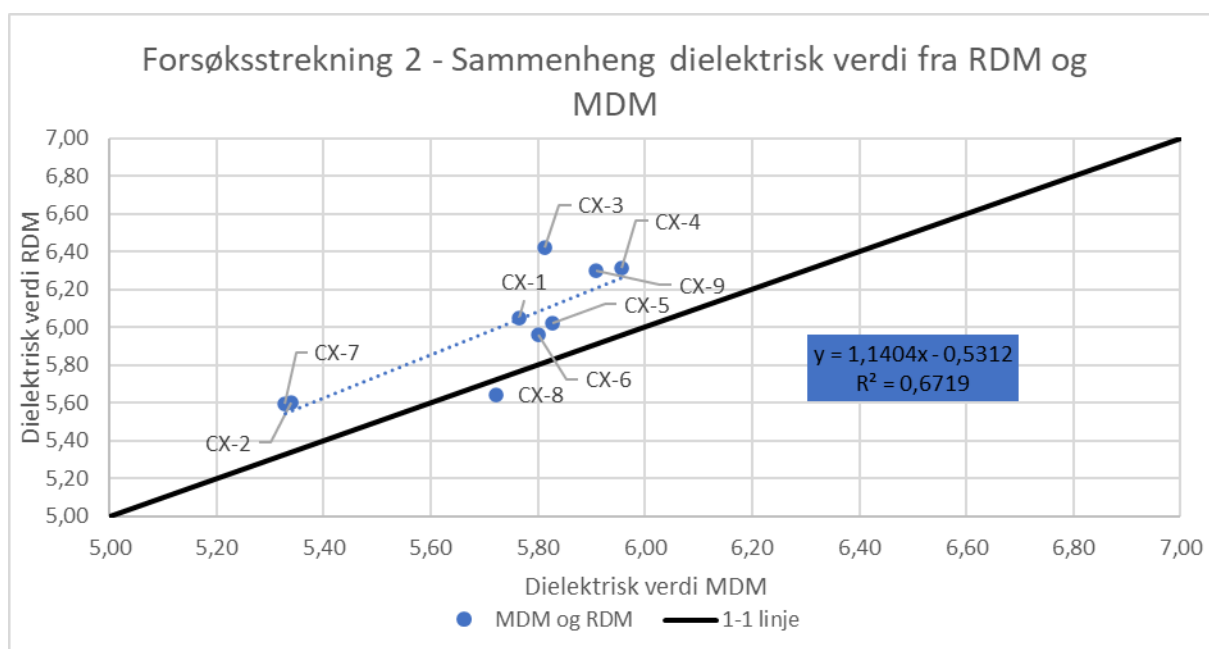
Det ble gjennomført målinger på ni kjerner, med RDM i felt og MDM i laboratoriet. Resultatet fra målingene og tilhørende hulrom for hver kerne er vist i detalj i vedlegg G. Kjernene er kappet i lagskillet, men ikke i overflaten. I tillegg til hulromsmålinger, er det gjort måling av maksimumsdensitet på hver kerne.

Det er noe variasjon i hulrommet fra 1,0 % - 6,9 % (etter metode B), men hovedtyngden av prøvene har imidlertid hulrom mellom 1,0 % - 3,3 % (7 av 9). Med så liten variasjon er det vanskelig å få en god sammenheng mellom målt dielektrisk verdi og laboratoriemålt hulrom. Dette vises i figur 19, der det kan sees at det er oppnådd en lav korrelasjonsfaktor R² for både MDM og RDM. MDM har en R² på 0,616, mens RDM har en R² på 0,68. Det er betydelig avvik på maksimumsdensiteten på to kjerner (CX-2 og CX-7), der det måles betydelig lavere dielektrisk verdi enn på de resterende prøvene for MDM (delvis også RDM).



Figur 19 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi med MDM og RDM mot laboratoriemålt hulrom på kjerner fra veg. Metode B er benyttet for laboratoriemålt hulrom.

Figur 20 viser sammenhengen mellom dielektrisk verdi fra MDM og RDM. Her kan det sees at RDM generelt måler noe høyere dielektrisk verdi enn MDM. Utviklingen er heller ikke jevn, slik at RDM har noe større stigning enn MDM. RDM gir en større spredning enn det som blir registrert med MDM. Variasjonen i målte verdier fra RDM - MDM varierer fra -0,08 til 0,61. I gjennomsnitt ligger RDM 0,27 høyere enn MDM. Noe variasjon mellom målingene er forventet med tanke på at RDM har et større fotavtrykk enn uttatt kjerner. Den største usikkerheten vil imidlertid her være fuktighetsinnholdet i kjernen ved målingene i felt. Vann har betydelig høyere dielektrisk verdi enn asfalt (se differanse i figur 19), slik at kun små endringer i fuktighet vil medføre en økning i dielektrisk verdi. De regulære målingene med RDM indikerte at det var fuktige partier på strekningen. Det ble prøvd å velge partier for kjernene der det ikke visuelt var fuktig, men det betyr ikke at det ikke var fuktighet i kjernene.

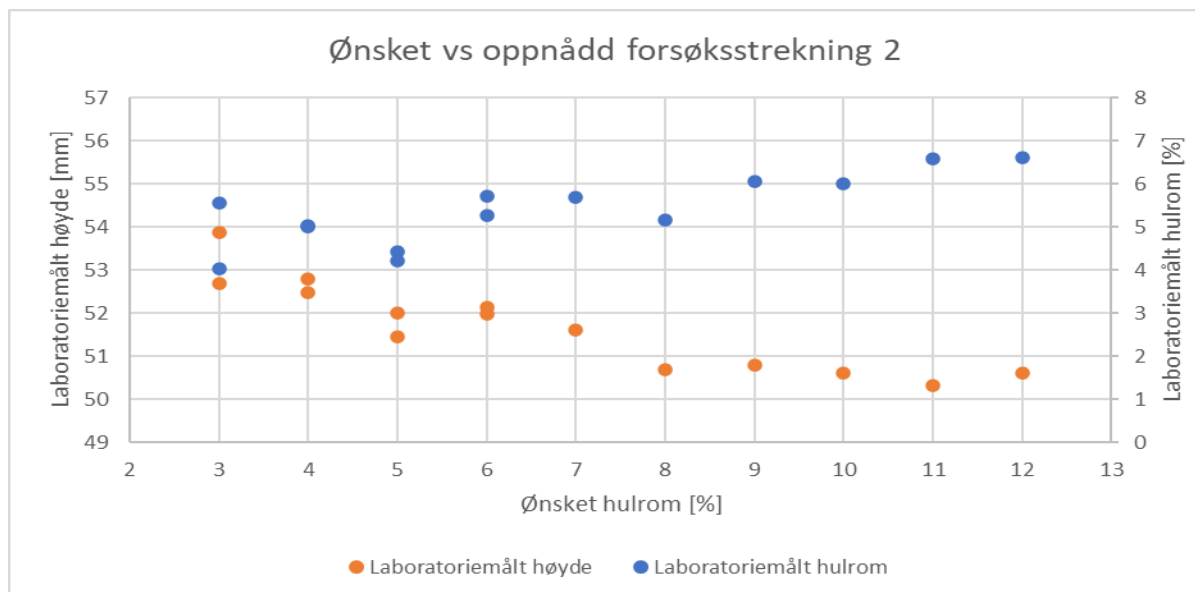


Figur 20 Dielektrisk verdi fra MDM og RDM på kjerner fra felt.

4.2.3 Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel track plater fra Statens vegvesen

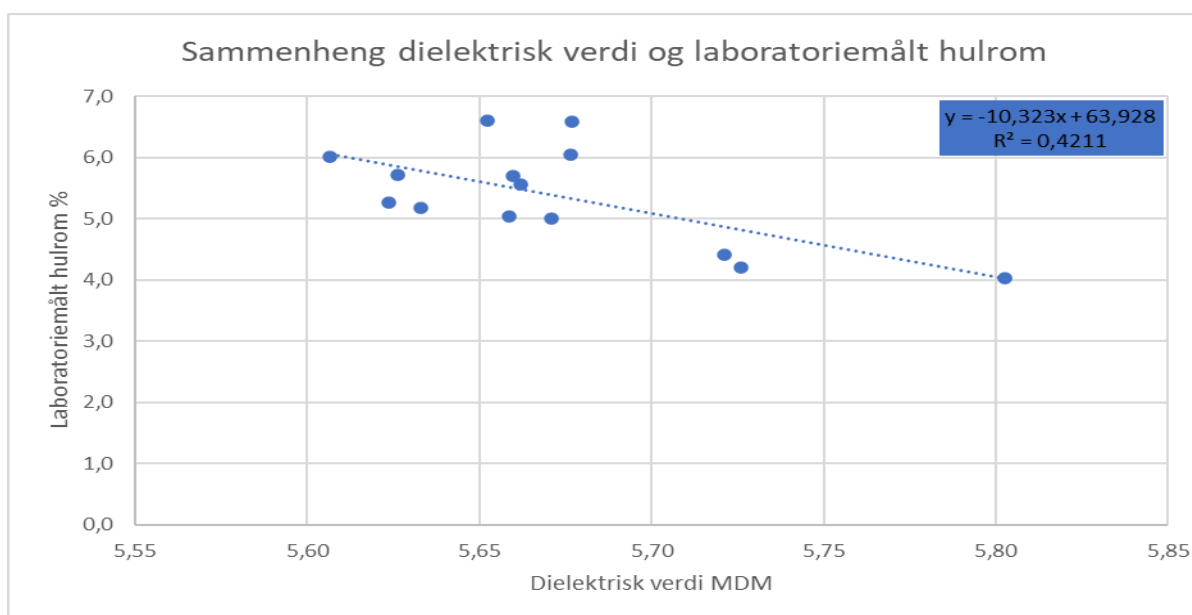
Det ble tilvirket 14 wheel track plater ved sentrallaboratoriet i Trondheim. Platene var tilvirket med en ønsket variasjon i hulrommet fra 3 % - 12 %. Kjernene ikke kappet, verken i topp eller bunn. Detaljert oversikt over resultatene er vist i vedlegg H.

Figur 21 viser sammenhengen mellom ønsket hulrom og laboratiemålt hulrom (sekundær Y akse), og laboratiemålt høyde på kjernen for hvert nivå av ønsket hulrom (primær Y akse). Som beskrevet i kapittel 4.1.3 var det også her utfordrende å kompaktere platene til ønsket høyde på 50 mm. For prøver med tilsiktet hulrom 8 % og høyere ser det ut til at prøvene har blitt tilnærmet kompaktert som planlagt, men med liten variasjon i laboratiemålt hulrom.



Figur 21 Oversikt over laboratiemålt høyde og laboratiemålt hulrom med metode B på kjerner sett opp mot ønsket hulrom på forsøksstrekning 2

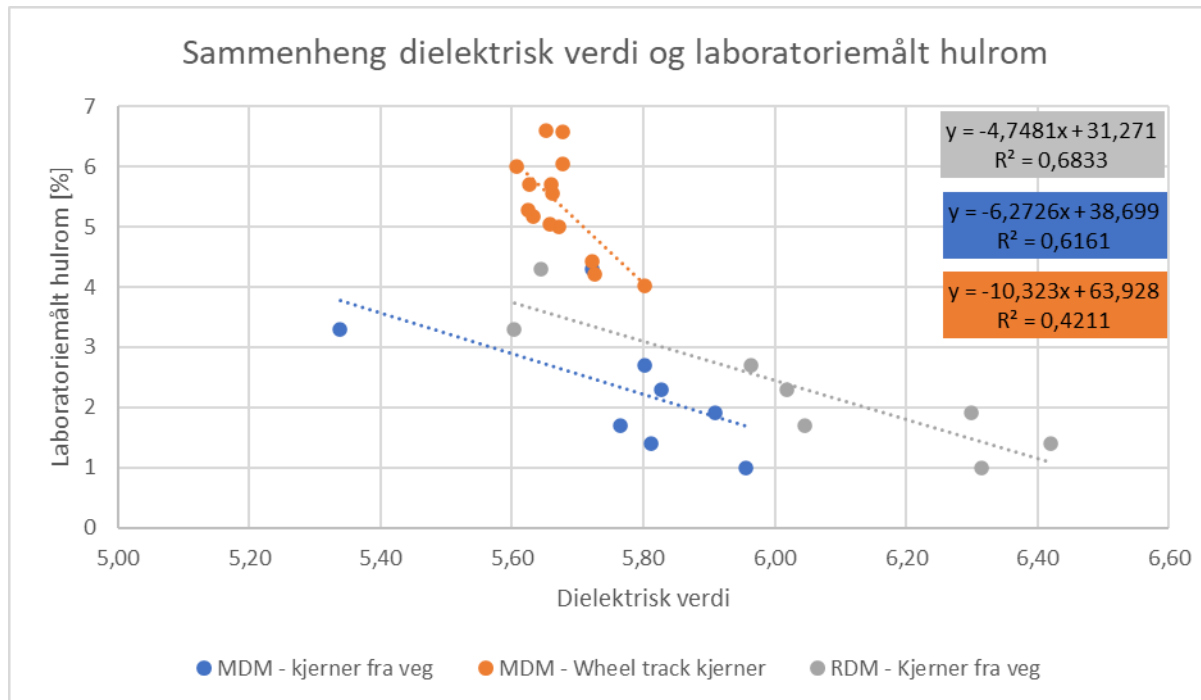
Figur 22 viser sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratiemålt hulrom med metode B. Det er lav korrelasjon mellom målingene, med en korrelasjonsfaktor R^2 på 0,42.



Figur 22 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi med MDM og laboratiemålt hulrom med metode B

4.2.4 Vurdering av resultat

Figur 23 viser sammenhengen mellom dielektrisk verdi og laboratiormålt hulrom for MDM og RDM for felt- og laboratoriekjerner. MDM og RDM på kjerner fra veg har relativt grei sammenheng (bare noe forskjøvet dielektrisk verdi), men MDM målingene fra wheel track kjernene har en betydelig brattere stigning. Siden det er så liten variasjon i laboratiormålt hulrom for kjernene fra wheel track platene, er det imidlertid vanskelig å trekke noen klar konklusjon.



Figur 23 Sammenheng mellom dielektrisk verdi fra MDM og RDM og laboratiormålt hulrom med metode B på kjerner fra veg og laboratiortilvirkede kjerner fra wheel track plater.

5. Diskusjon

Estimert hulrom fra georadar benyttes ikke direkte til bonus/trekk i kontrakter, men fungerer som et verktøy for målrettet prøvetaking. Avvik mellom laboratoriebaserende kalibreringskurver og de reelle kalibreringskurvene i felt vil derfor ikke få direkte økonomiske konsekvenser for kontraktsoppgjøret. Ved betydelige avvik kan imidlertid metodens pålitelighet trekkes i tvil. Det er derfor viktig at det i forsøksfasen dokumenteres godt samsvar mellom kalibreringskurver etablert i laboratoriet og kalibreringskurver basert på felldata.

5.1 Tilvirkning av kjerner i laboratoriet

5.1.1 Wheel track plater

Wheel track plater kan ha varierende hulrom. De kan lett bli mer kompaktert med lavere hulrom i senter og mindre kompaktert med høyere hulrom i ytterkantene. For å få høyere hulrom i senter av platen, må tilsiktet hulrom økes (mengden asfalt reduseres) og massen fordeles jevnere. Måten platene tilvirknes på vil kunne ha stor innvirkning på variasjon av hulrommet. Det er viktig med rett varme på massen (og formene). Tiden det tar fra massen tas ut fra varmeskap til den kompakteres er også avgjørende. Temperaturen må være rett når kompakteringen utføres. Massene må være homogen og fordeles godt utover i formen. Det har under prøvetillagingen ikke vært lagt nok vekt på at materialet skulle fordeles godt utover i formen før kompaktering. Massene bør fordeles i små porsjoner utover i formen, eksempelvis ved hjelp av ei murskje. Det er også viktig at det ikke legges ut i full høyde direkte, men at man pakker godt etter massen etter hvert som den legges på. Ved behov kan

formen med pålagt masse ettervarmes, før videre fordeling av massen utføres. Det bør benyttes et termometer for å ha kontroll på asfaltens temperatur underveis. Dette vil gi mer homogene prøver.

Wheel track platene som ble tillaget ved sentrallaboratoriet i 2023 viste variasjon i hulrom og det ble oppnådd god kompaktering. Høyden på platene avvek imidlertid fra tilsiktet høyde. Maskinen skal være kalibrert til å stoppe, ved platehøyder på 50 mm, men minste platetykkelse ble målt til 48,3 mm. I grunn har det ingen praktisk betydning, annet enn at hulrommet endres noe fra ønsket. Det viser kun at kalibreringsfeilen på kompaktoren må justeres.

Det var ikke samme personell som tilvirket platene i 2023 og 2024, og det er tydelig at ikke samme fremgangsmåte ble fulgt, da man i 2024, i motsetning til 2023 ikke klarte å oppnå god variasjon i hulrommet. I 2024 ble platene tilvirket ved at all masse ble lagt i midten av forma og fordelt utover. Dette medførte en fare for at det er mer masse i senter enn langs kantene, noe som hindrer kompaktoren i å komme ned til den høyden som er satt. Det skal være mulig å kompaktere asfalt til lavere hulrom enn det som ble oppnådd i 2024. Andre faktorer som kan ha bidratt til at man ikke klarte dette kan være at prosessen med å legge massen i formene tok for lang tid, at massen var for kald (enten i utgangspunktet, eller grunnet medgått tid), eller at det ble brukt utilstrekkelig kraft/antall overfarer ved kompaktering. Det ansees derfor at det høyst sannsynlig er problemer med tilvirkningen, som har medført at det ikke har vært mulig å benytte resultatene fra 2024 opp mot prøver fra veg.

Tilvirkning av wheel track plater viste seg å være noe tid- og utstyrskreven, i tillegg til sensitiv for feil utførelse. For å kunne etablere en tilstrekkelig kalibreringskurve, bør det være plater med hulrom fra ca. 3 % -12 % (i alle fall i starten, til det er verifisert at metoden gir stabile resultater). Det bør være én plate for hver hulromsprosent, slik at det tilvirkes minimum ti plater per masse. Siden hver plate krever omlag 9 kg – 11 kg masse, vil det være behov for ca. 120 kg masse (når det i tillegg bør tas maksimumsdensitet av uttatt masse).

5.1.2 Gyratorkjerner

Gyratorkjerner ble opprinnelig vurdert som den beste metoden for å tillage kalibreringskjerner til georadar. Prøvene krever mindre masse enn wheel track plater (ca. 50-70 % av wheel track platene når en høyde og diameter på 150 mm benyttes). Bruk av gyrtor krever god kjennskap til metoden, kontroll av massen og temperatur for å få riktige resultater.

Tidligere forskning har benyttet gyrtorkjerner til å tilvirke laboratoriekjerner, og fått god sammenheng mellom dielektrisk verdi og hulrom [13]. Det var derfor forventet at gyrtortilvirkede kjerner skulle vise en bedre sammenheng, enn det som ble oppnådd i prosjektet her. En stor del av problemet skyldes nok hvordan det ble bestemt at prøvene skulle kappes. Det ble valgt å kun kappe prøvene i to, men gyrtorkjerner har ikke et konstant hulrom i verken høyden eller i tverrsnittet på kjernen. Tidligere forskning fra PROKAS [14-17] viser at kjernene er inhomogene, både i høyden og tverrsnittet. Mest riktig ville vært å kappe hver kjerne i tre deler, og benytte den midterste delen. Dette vises også i forsøket der hver kjerne ble kappet i fire deler, der det gjennomsnittlige hulrommet av de to midterste delene viste tilnærmet ønsket hulrom (se tabell 11). Det vil imidlertid fortsatt være variasjonen i hulrommet over prøvehøyden, da gyrtorkjernene aldri vil bli homogene.

Det ble produsert kjerner med den største mulige høyden. Normalt benyttes mindre prøvehøyder (60 mm høyder ved diameter på 100 mm og 100 mm høyde ved diameter på 150 mm), som ikke vil få like store variasjoner i høydetversnittet. Disse prøvene vil også være raskere å tilvirke og antas å hulrom som ligger nærmere det tilsiktede.

5.1.3 Temperatur ved tilvirkning av prøver

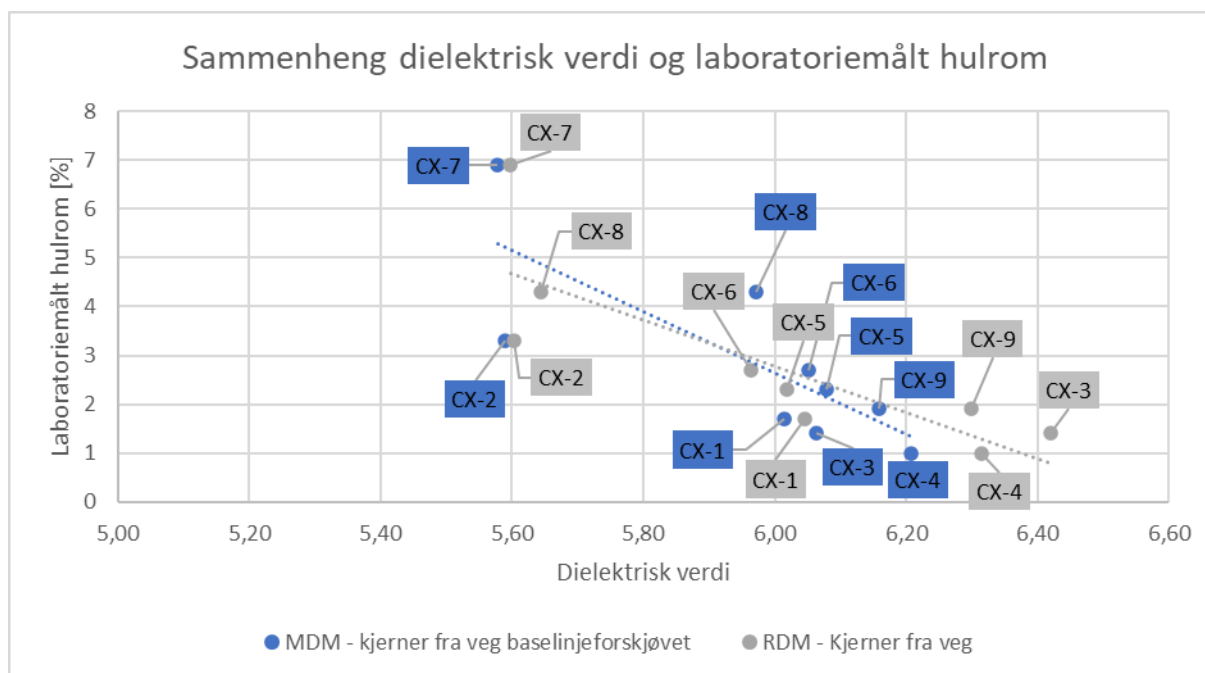
Det har vært tilstrekkelig kontroll av massetemperaturen ved tilvirkning av wheel track-platene både i 2023 og 2024. I 2023 ble det benyttet 140 °C og 160 °C, mens det i 2024 ble benyttet 160 °C for begge massetyper. Dette er akseptabelt for massen på forsøksstrekning 2 (bindemiddel 70/100), men noe lavt for massen på forsøksstrekning 1 (bindemiddel 65/105-60).

Det ble kun gjennomført målinger av overflatetemperaturen på form og masse ved enkelte wheel track-plater, og da med IR-termometer. Det ble derimot ikke kontrollert hvilken temperatur massen hadde i kjernen da den ble tatt ut av varmeskapet, eller hvilken temperatur prøven hadde før komprimering i kompaktoren. Det kan derfor ikke utelukkes at for lav temperatur var en medvirkende årsak til at ønsket hulromsvariasjon i wheel track-platene ikke ble oppnådd.

5.2 Måling av dielektrisk verdi

Det er i prosjektet ikke etablert en tydelig sammenheng mellom måling av dielektrisk verdi i felt og i laboratoriet. Det er kun en strekning som har målinger både i felt med RDM og i laboratoriet med MDM. Strekningen er i tillegg usikker, da den kan være påvirket av fuktighet. Figur 24 viser resultatene fra forsøksstrekning 2, når MDM er baselinjeforskjøvet med +0,25 (dette er kun verdi som ga best tilpasning for denne kurven). For enkelte punkter er det betydelige forskjeller, mens andre har god tilpasning.

Det vil alltid være noe variasjon mellom punktene, selv etter en baselinjeforskyvning. Om en ren baselinjeforskyvning eller om det i tillegg må legges inn en forskyvning i stigningstallet for å få god korrelasjon mellom målemetodene må undersøkes videre. Det kan ikke trekkes noen klar konklusjon basert på dataene i prosjektet.

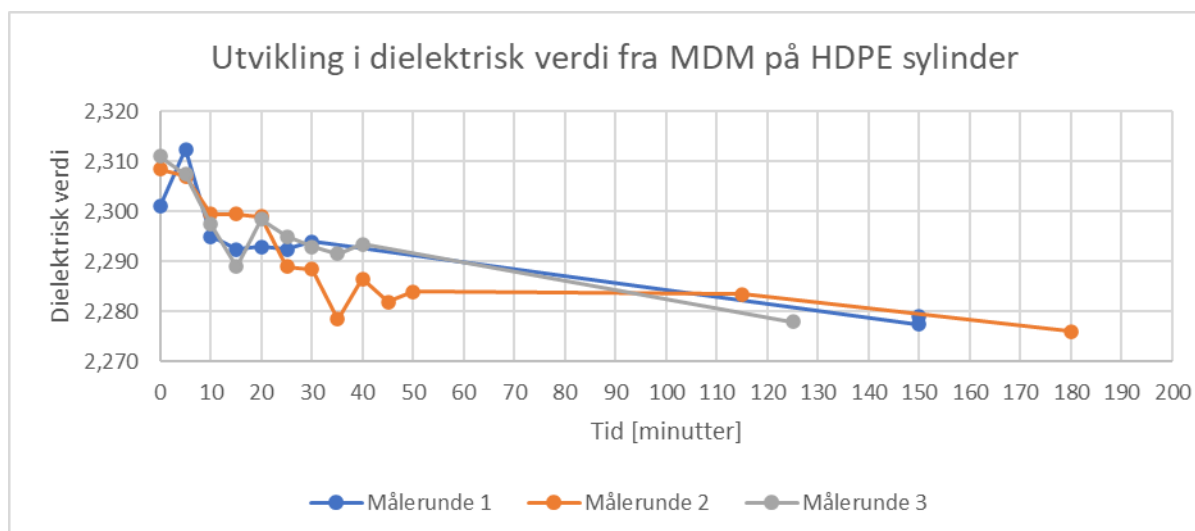


Figur 24 Baselinjeforskjøvet verdi for MDM på forsøksstrekning 2 for kjerner fra veg mot RDM målinger fra veg

5.2.1 PaveScan MDM

MDM er rask og effektiv i bruk, og gir repeterbare målinger. Det benyttes normalt sett ca. 10 minutter per kjerne, som medfører at en kalibreringskurve med ni kjerner kan måles i løpet av ca. 1,5 time. Det er viktig å vente tilstrekkelig lenge etter kapping, til at kjernen har tørket. Ved romtemperatur på 20 °C - 23 °C, er det tilstrekkelig med tre dager tørking.

Det har vist seg at det er noe drift i målt dielektrisk verdi for MDM, avhengig av hvor lenge utstyret har vært påskrudd. Figur 25 viser utviklingen i dielektrisk verdi målt på en høydensitet polyetylen (HDPE) sylinder som medfølger utstyret. Som det kan sees er det en tydelig fall i målt dielektrisk verdi avhengig av tid etter oppstart. På bakgrunn av dette ble det valgt å kreve at utstyret minimum skulle være påskrudd 2 timer før måling.



Figur 25 Utvikling i målt dielektrisk verdi fra MDM på HDPE sylinder

Målt dielektrisk verdi med MDM er følsom for variasjoner i høyden på kjernen. Følsomheten avtar ved økende høyde på kjerne, slik manualen viser (se manual, under ofte stilte spørsmål [6]). For kjernen oppgis det én høyde, men i henhold til utarbeidet prosedyre (se vedlegg A) gjøres det minimum fire målinger av dielektrisk verdi per kjerne med rotering 90° for hver måling (slik at det egentlig blir fire høyder som er interessante). En kjerne med kappede overflater vil alltid ha noe variasjon i høyden. For å definere et godkjent intervall, ble det valgt å se på standardavviket på høydemålingene for kjerner med varierende høyde (fra 40 mm - 120 mm, fem forskjellige høyder). Kjerner med ett normalisert standardavvik for høyden < 0,6 viste akseptabel variasjon i målt dielektrisk verdi (ca. høydevariasjon på 1 mm rundt kjernen).

Målinger utført med MDM utføres under ideelle forhold. Prøvene blir kappet og tørket, slik at det ikke skal være andre faktorer enn endring i homogeniteten som påvirker målingene. Dette medfører at det alltid vil være noe usikkerhet ved sammenligning mot måling i felt.

5.2.2 PaveScan RDM 2.0

Målinger med RDM utføres i felt. Det er her flere faktorer som ikke kan kontrolleres, som kan medføre at det er variasjoner mot MDM. Overflatestrukturen som kappes bort i laboratoriet påvirker RDM målingene. Dette gjelder særlig for masser med mye overflatestruktur, som Ska 16 / Skag 16. Fuktinnholdet i dekket måles ikke i felt, slik at selv om det normalt antas at det er lite/ingen fuktighet er det en faktor som kan ha stor påvirkning på målt dielektrisk verdi (som vist i figur 1). RDM måler i tillegg et større areal enn uttatt kjerne (se kapittel 2.2.1), slik at noe av bidraget som RDM måler ikke kommer med på MDM målingene. Det vil derfor alltid være en viss usikkerhet knyttet til å benytte kalibreringskurver fra laboratorietilvirkede kjerner i felt, ettersom det uunngåelig vil forekomme variasjoner som ikke er fullt ut fanget opp i laboratorieforsøkene.

5.3 Andre faktorer

5.3.1 Tid og kostnad for utstyr

Det vil kreve dedikert personell som står for uthenting av masse, tilvirkning av laboratorietilvirkede kjerner, kapping og analysering av hulrom. Både gyratorkjerner og wheel track plater krever spesialutstyr for tilvirkning som ikke er tilgjengelig på alle laboratorier. Muligheten for å kunne utføre dette i større skala, vil derfor kreve en kostnadsinvestering i utstyr og opplæring av personell. For at det skal være mulig å gjennomføre dette trengs det et betydelig volum over flere sesonger, for å rettferdiggjøre innsatsen.

Med dagens prosedyre er det ikke dedikert personell som har ansvar for måling og analysering av prøver for georadar. Dette medfører at det tar lang tid før resultatet av målingene kan leveres (normalt 1 – 2 måneder). Med dedikert personell som kun har ansvar for å gjennomføre georadar målinger (tilvirke og), analysere kjerner, og rapportere resultatene, kan rapporteringstiden reduseres betydelig.

5.3.2 Gjennomføringsevne

Bruk av laboratorietilvirkede kjerner vil vesentlig øke gjennomføringsevnen for georadar. Det går med mye tid på hver strekning for å finne egnede prøvelokasjoner, gjennomføre punkt målingen, markere punkter og bore de nødvendige kalibreringskjernene (normalt ni per strekning pluss eventuell kontroll av ekstremt lave dielektriske punkter (høyt hulrom)). For strekninger med normal lengde (10 felt km – 20 felt km) vil det normalt sett ta 1 til 2 timer å finne og markere punktene, og 15-20 minutter for å bore hvert punkt (helt avhengig av avstand mellom kalibreringspunktene). Det regnes derfor normalt at det kan gjennomføres målinger på en strekning per natt.

Ved bruk av laboratorietilvirkede kjerner vil det være mulig å gå fra måling av én strekning per natt, til 2 - 4 (avhengig av lengde og avstand imellom hver strekning). Dette vil gjøre at georadaren kan benyttes på langt flere prosjekter, samt at det gjør gjennomføringen tryggere for personellet. Men igjen vil økt mengde strekninger medføre en økning i arbeid som må gjøres i laboratoriet.

6. Konklusjon

Formålet med prosjektet har vært å vurdere om laboratorietilvirkede kjerner kan benyttes som erstatning for feltuttatte kalibreringskjerner ved etablering av kalibreringskurver for georadarmålinger. På bakgrunn av de oppnådde resultatene i 2023 og 2024 vurderes prosjektets datagrunnlag som tilstrekkelig til å fastslå at laboratorietilvirkede kjerner kan erstatte feltuttatte kalibreringskjerner. Det konkluderes derfor med at ytterligere undersøkelser, inkludert flere feltstrekninger, forbedret laboratorietilvirkning og mer kontrollerte sammenligningsmålinger mellom RDM og MDM, er nødvendige før en endelig konklusjon kan foretas.

7. Videre arbeid

På grunn av dårlig datagrunnlag anbefales det at forsøket gjentas i 2026.

7.1 Sammenheng mellom målt dielektrisk verdi fra RDM og fra MDM

Arbeidet er kun utført ved sammenligning av to strekninger og massetyper i felt og lab. For videre arbeid anbefales det at det gjennomføres supplerende undersøkelser, hvor det utføres målinger i både lab og felt på flere strekninger og massetyper. Målinger i lab gjøres med MDM og felt med RDM. Dette foreslås utført på alle oppdrag med full kalibrering (minimum ni kjerner) med georadar i 2026, som gjennomføres ved sentrallaboratoriet i Trondheim. Basert på arbeidsmengde fra tidligere år burde det da opparbeides en database på 8-10 prosjekter (72-90 kjerner).

7.2 Laboratorietilvirkede kjerner

Da det var store svakheter med testingen av hvilken metode som er best egnet for laboratorietilvirkning av kjerner, anbefales det at det gjennomføres en ny evaluering av både gyrator og wheel track. Det var store variasjoner i om tilsiktet hulrom ble oppnådd med laboratorietilvirkede kjerner fra wheel track plater i 2023 og 2024. Her bør det gjøres flere forsøk for å finne ut om wheel track plater er en aktuell metode for tilvirkning av kjerner til kalibrering. Dette bør først gjennomføres forsøk for å se om ønsket variasjon i hulrom oppnås, før det så bør etableres sammenhenger mellom felt og lab.

Kilder

1. <https://www.vegvesen.no/nn/om-oss/presse/aktuelt/2025/04/snart-starter-arets-asfaltsesong/>
2. [Rapport 1084 Dokumentasjon og kontroll av asfalt 2026](#), Joralf Aurstad, Johnny Stenshagen og Even K. Sund, november 2025
3. [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#), Statens vegvesen, 2024
4. Toward core-free pavement compaction evaluation: An innovative method relating to asphalt permittivity to density. Kyle Hoeg, Roger Roberts, Shongtao Dai og Eyoab Zegeye Teshale, 26.06.2019. [Toward Core-Free Pavement Compaction Evaluation: An Innovative Method Relating Asphalt Permittivity to Density](#)
5. Minnesota department of transportation case studies for coreless Asphalt pavement compaction assessment. Kyle Hoegh, Trevor Steiner, Eyoab Zegeye Teshale og Shongtao Dai. Transportation research record 2020 side 291-301. Tilgjengelig på https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2020/04/05_Coreless-Compaction-Assessment-MnDOT-2019-Case-StudiesAcceptedforPu....pdf
6. PaveScan RDM 2.0 systemet, [PaveScan RDM System | Ground Penetrating Radar Equipment | GSSI](#)
7. Percometer, [Adek - Adek](#)
8. PaveScan MDM, [PaveScan® MDM - GSSI Geophysical Survey Systems, Inc.](#)
9. [Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys](#), Timo Saarenketo 11.11.2006
10. FHWA, 2024. Public Roads, Spring 2024. <https://highways.dot.gov/public-roads/spring-2024/01>, last accessed April 18, 2024. Washington, DC: Federal Highway Administration.
11. [Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser](#), Statens vegvesen, 2025
12. NS-EN 13108-1 Bituminøse masser, materialspesifikasjoner, del 1: Asfaltbetong. Standard Norge, 2016.
13. Laboratory dielectric measurement system (LDMS) for asphalt mixture bulk specific gravity determination, final report for NCHRP IDEA project 229. Jo E Sias og Eshan V. Dave, universitetet av New Hampshire 01.2023. Tilgjengelig på https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/IDEA/FinalReports/Highway/NCHRP229.pdf?utm_source=chatgpt.com
14. PROKAS – Proporsjonering og kontroll av asfalt, prosjektrapport nr. 15, sluttrapport. 2004. https://www.sintef.no/globalassets/upload/a04354_sluttrapport-prokas.pdf
15. PROKAS – Proporsjonering og kontroll av asfalt, prosjektrapport nr. 2, Ringanalyse I – Gyratorisk kompaktor, 2000. Icopal
16. PROKAS – Proporsjonering og kontroll av asfalt, prosjektrapport nr. 4, Ringanalyse II – Gyratorisk kompaktor, 2000. Icopal
17. PROKAS – Proporsjonering og kontroll av asfalt, prosjektrapport nr. 6, Hulromsfordeling i gyratorprøver, 2002. Lemminkäinen

Vedlegg A – Prosedyre for måling med MDM, utarbeidet ved sentrallaboratoriet i Trondheim april 2024

Fremgangsmåte MDM målinger

1. MDM skal skrus på, minimum 2 timer før målinger begynner, helst dagen før.
2. Før måling skal det gjennomføres kontroll på kalibreringssylinder, minimum 2 målinger. Kontrollere mot forventet verdi (ca. 2,275-2,285)
3. Hver prøve skal ha 4 markeringer, for hver 90 grad. Startposisjonen skal være tydelig markert. Hver kjerne måles med «toppoverflate» ned mot MDM. Kjernen roteres med klokken.
4. Det skal gjennomføres minimum 4 målinger pr kjerne. En måling pr. rotering
 - a. Ved Std større enn 0,04 for dielektrisk verdi bør man gjennomføre tilleggsmåling
 - b. Ved store forskjeller i Std for dielektrisk verdi, kan man også se på Std for høyden på kjernen. Er denne større enn 0,6, må kjernen kappes på nytt, og ny måling gjennomføres etter tørking.
5. Etter at alle målinger er gjennomført, skal det igjen gjøres 2 målinger på kalibreringssylinder.

Viktige momenter

- Kjernene må være helt tørre. Anbefaler minimum 2 dager mellom hydrostatisk måling og måling med MDM, når prøven lagres i romtemperatur (20 °C).
- Platen må være sentrert så godt som mulig på MDM maskinen. Kun små endringer, kan medføre ulike måleresultater.
- MDM apparatet kan bli påvirket av ytre kilder. Ikke ha PC eller mobiltelefon oppved måler. Ved bytte av plassering av måleutstyr (alt testet i lite kontor ved pauserom), så skal det kontrolleres mtp. interferens.

Vedlegg B – Kjerner fra veg - 2023

Tabell 9 Uttatte prøver fra veg. Prøver med fet skrift er benyttet i sammenligningen

Prøve nr	Dielektrisk verdi (MDM)	Hulrom skyvelær	Hulrom hydrostatisk	Merknad
AX-1	4,532	3,47 %	2,70 %	
AX-2	4,647	3,61 %	2,88 %	
AX-3	4,551	6,00 %	4,81 %	
AX-4	4,305	7,59 %	6,14 %	
AX-5	4,606	4,30 %	3,07 %	
AX-6	4,517	4,93 %	3,85 %	
AX-7	4,463	7,81 %	5,96 %	
AX-8	4,243	8,28 %	6,67 %	
AX-9	4,373	5,65 %	4,25 %	
AX-10	4,289	7,46 %	5,21 %	
AX-11	4,260	7,75 %	5,81 %	
AX-12	4,319	7,20 %	5,51 %	
AX-13	4,237	7,84 %	5,81 %	
AX-14	4,239	7,92 %	6,16 %	
AX-15	4,280	8,25 %	5,93 %	
AX-16	4,267	7,20 %	5,96 %	
AX-17	4,320	7,35 %	5,50 %	
AX-18	4,409	6,13 %	4,48 %	
AX-19	4,478	4,79 %	3,41 %	
AX-20	4,477	4,70 %	3,58 %	
AX-21	4,471	4,31 %	3,13 %	
AX-22	4,576	3,75 %	2,56 %	
AX-23	4,492	3,97 %	2,79 %	
AX-24	4,517	3,24 %	2,58 %	
X25		-	-	Ikke analysert. Ikke boret helt igjennom → kant rundt
X26	4,520	3,27 %	2,46 %	

Vedlegg C – Laboratorietilvirkede kjerner - Gyrator

Tabell 10 Oversikt over laboratorieundersøkelser og MDM målinger utført på gyratorkjerner, delprøve 1 og 2

Nr	Ønsket hulrom	Antall gyrer	Dielektrisk verdi	Hulrom metode B	Hulrom metode D	Hulrom hydrostatisk hel prøve (snitt)	Hulrom skyvelær hel prøve (snitt)
AX-27-1	3,5	286	4,488	7,68 %	6,93 %	2,68 %	3,96%
AX-27-2			4,677	2,75 %	1,01 %		
AX-28-1	4	25	4,353	10,52 %	10,01 %	4,71 %	6,07 %
AX-28-2			4,667	3,30 %	1,23 %		
AX-29-1	5	86	4,331	10,76 %	9,84 %	5,39 %	7,42 %
AX-29-2			4,607	4,39 %	3,04 %		
AX-30-1	6	193	4,284	12,17 %	11,19 %	6,18 %	8,23 %
AX-30-2			4,633	4,57 %	2,89 %		
AX-31-1	-						
AX-31-2							
AX-32-1	-						
AX-32-2							
AX-33-1	7	21	4,466	9,09 %	8,20 %	6,22 %	8,21 %
AX-33-2			4,494	7,82 %	7,14 %		
AX-34-1	8	34	4,307	11,72 %	11,16 %	7,55 %	9,67 %
AX-34-2			4,458	7,57 %	6,49 %		

AX-35-1	3,5	65	4,611	6,38 %	4,68 %		
AX-35-2			4,624	4,46 %	3,06 %		
AX-36-1	9	27	4,312	12,36 %	10,70 %		
AX-36-2			4,373	8,65 %	8,39 %		
AX-37-1	3	76	4,561	6,48 %	4,59 %		
AX-37-2			4,644	4,39 %	3,18 %		
AX-38-1	10	14	4,29225	12,93 %	12,20 %		
AX-38-2			4,388	9,80 %	8,62 %		
AX-39-1	11	8	4,283	12,25 %	11,27 %		
AX-39-2			4,392375	11,04 %	10,65 %		
AX-40-1	12	7	4,298125	13,49 %	13,59 %		
AX-40-2			4,368375	11,59 %	11,32 %		
AX-41-1	4	Brannalarm gikk etter 41 gyrringer. Prøven ble ikke varmet opp til andre runde med gyrring. Prøven tas ikke med i målingene.					
AX-41-2							
AX-42-1	5	33	4,413	8,54 %	7,77 %		
AX-42-2			4,585	5,71 %	4,76 %		
AX-43-1	6	90	4,356	10,59 %	10,17 %		
AX-43-2			4,587	5,44 %	4,07 %		
AX-44-1	7		4,379	9,61 %	9,19 %	6,38 %	8,51 %

AX-44-2		22	4,493	7,63 %	7,07 %		
AX-45-1	8	28	4,293	12,48 %	11,32 %	8,20 %	10,30 %
AX-45-2			4,416	7,98 %	9,98 %		
AX-46-1	9	13	4,355	11,26 %	10,61 %	8,40 %	10,49 %
AX-46-2			4,402	9,69 %	9,39 %		
AX-47-1	10	24	4,395	9,93 %	12,50 %	8,77 %	11,67 %
AX-47-2			4,369	6,68 %	9,68 %		
AX-48-1	11	8	4,444	9,88 %	12,08 %	9,39 %	12,74 %
AX-48-2			4,398	8,43 %	11,87 %		
AX-49-1	12	7	4,27	11,19 %	14,51 %	9,82 %	14,13 %
AX-49-2			4,489	9,06 %	11,14 %		
AX-50-1	3,5	54	4,555	4,52 %	5,69 %	3,51 %	5,04 %
AX-50-2			4,629	1,94 %	3,26 %		

Tabell 11 Oversikt over laboratorieundersøkelser utført på gyrotorkjerner for delprøver 1-1, 1-2, 2-1 og 2-2

Nummerering	Ønsket hulrom [%]	Målt høyde delprøve [mm]	Målt diameter [mm]	Hulrom Metode B [%]	Hulrom metode D [%]	Snitt metode B del 1-2 og 2-1 [%]	Maksimumsdensitet [g/cm ³]
AX-28-1-1	4	34,90	150,08	9,34	11,85	4,3	2,41
AX-28-1-2		35,69	150,00	5,96	6,99		2,41
AX-28-2-1		35,78	150,09	1,1	1,54		2,424
AX-28-2-2		31,47	150,06	1,02	1,39		2,432
AX-30-1-1	6	34,82	150,04	10,39	13,53	6,6	2,411
AX-30-1-2		34,63	150,47	8,23	9,55		2,415
AX-30-2-1		34,50	150,13	2,68	3,69		2,418

AX-30-2-2		33,87	150,07	1,44	3,23		2,429
AX-35-1-1	3,5	36,75	149,69	4,87	6,43		2,416
AX-35-1-2		32,44	149,81	2,64	3,84	3,3	2,42
AX-35-2-1		33,62	149,79	1,73	2,73		2,423
AX-35-2-2		34,51	149,91	2,81	4,81		2,424
AX-40-1-1	12	31,98	150,83	10,42	15,41		2,418
AX-40-1-2		37,59	151,21	9,84	12,26	9,5	2,416
AX-40-2-1		32,31	151,41	9,2	11,47		2,417
AX-40-2-2		33,38	151,26	8,9	12,76		2,424

Vedlegg D – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater Statens vegvesen

Tabell 12 Oversikt tilvirkede Wheel-track plater fra Statens vegvesen

Prøve nr	Ønsket hulrom plate	Nødvendig prøvemengde [g]	Merknader	Målt høyde [mm]	Dielektrisk verdi MDM	Hulrom metode B [%]	Hulrom metode D [%]
AX-61	2	11026,3	ujevn toppflate. Produsert på 140 grader	50,44	4,67	2,11	2,88
AX-62	5	10688,8	ujevn toppflate. Produsert på 140 grader	50,56	4,48	2,96	4,02
AX-63	15	9563,7	ujevn toppflate. Produsert på 140 grader	48,97	4,26	8,2	10,61
AX-64	3	10913,8	Produsert på 160 grader	50,82	4,4805	2,49	3,09
AX-65	5	10688,8	Produsert på 160 grader	49,97	4,50325	2,4	3,8
AX-66	7	10463,8	Produsert på 160 grader	49,53	4,5165	2,84	3,82
AX-67	10	10126,2	Produsert på 160 grader	49,09	4,3555	4,89	6,39
AX-68	16	9451,2	Produsert på 160 grader	49,43	4,07975	8,58	10,11
AX-69	20	9001,1	Produsert på 160 grader	48,34	3,91725	10,54	12,56

Vedlegg E – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater ekstern

Tabell 13 Oversikt målinger på wheel-track plater fra ekstern produsent

Prøve nr	Stampet kN	Vekt [g]	Høyde [mm]	Dielektrisk verdi RDM plate	Dielektrisk verdi MDM kjerne	Hulrom metode B [%]	Hulrom metode D [%]
AX-51	18	14800	75,61	4,69	4,58	0,96	2,29
AX-52	15	14800	76,33	4,60	4,61	1,35	2,25
AX-53	18	16004	81,66	4,57	4,56	0,66	1,98
AX-54	15	16000	83,28	4,66	4,52	1,40	2,90
AX-55	15	16000	84,66	4,08	4,50	1,59	3,03
AX-56	18	16004	81,82	4,33	4,58	0,59	2,14
AX-57	15	16002	83,55	4,33	4,50	1,45	3,00
AX-58	15	16000	84,1	4,36	4,51	1,55	3,28
AX-59	18	16006	82,06	4,52	4,56	0,55	1,88
AX-60	18	16000	82,59	4,40	4,58	0,69	1,77

Vedlegg F – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater

Statens vegvesen – Forsøksstrekning 1

Tabell 14 Resultater fra forsøksstrekning nr 1, fra wheel-track plate Statens vegvesen

Prøve nr	Ønsket hulrom [%]	Nødvendig mengde [g]	Målt høyde [mm]	Målt dielektrisk verdi MDM	Hulrom metode B [%]	Hulrom metode D [%]
BX-40	3	11049	55,5	4,44	5,55	10,36
BX-41	4	10935	55	4,58	5,92	10,36
BX-42	5	10821	55,3	4,54	6,37	10,85
BX-43	6	10707	53,4	4,44	4,31	8,98
BX-44	7	10593	53,9	4,61	5,88	10,06
BX-45	8	10479	53,6	4,58	5,24	9,34
BX-46	9	10365	53,3	4,41	6,44	9,55
BX-47	10	10252	53,1	4,35	6,8	10,16
BX-48	11	10137	51,2	4,64	5,57	7,18
BX-49	12	10024	51,6	4,47	5,93	8,86

Vedlegg G – Kjerne fra veg – Forsøksstrekning 2

Tabell 15 Oversikt over prøver fra veg på forsøksstrekning 2 (hulrom med fet skrift er benyttet til å se på sammenheng mellom målt dielektrisk verdi og hulrom).

Prøve nr	Målt dielektrisk verdi RDM	Målt dielektrisk verdi MDM	RDM - MDM	Maksimums-densitet [g/cm ³]	Hulrom metode B [%]	Hulrom metode D [%]
CX-1	6,05	5,76	0,28	2,679	1,7	3,3
CX-2	5,60	5,34	0,26	2,596	3,3	5
CX-3	6,42	5,81	0,61	2,7	1,4	3,0
CX-4	6,31	5,96	0,36	2,693	1,0	2,3
CX-5	6,02	5,83	0,19	2,703	2,3	4,0
CX-6	5,96	5,80	0,16	2,707	2,7	4,6
CX-7	5,60	5,33	0,27	2,604	6,9	10
CX-8	5,64	5,72	-0,08	2,678	4,3	6,7
CX-9	6,30	5,91	0,39	2,684	1,9	3,1

Vedlegg H – Laboratorietilvirkede kjerner – Wheel-track plater

Statens vegvesen – Forsøksstrekning 2

Tabell 16 Resultater fra forsøksstrekning nr 2, fra wheel-track plate Statens vegvesen

Prøve nr	Ønsket hulrom plate [%]	Målt høyde [mm]	Dielektrisk verdi MDM	Hulrom metode B [%]	Hulrom metode D [%]
CX-40	3	52,7	5,80	4,03	5,98
CX-41	4	52,5	5,67	5,01	7,10
CX-42	5	51,4	5,72	4,42	6,48
CX-43	6	52,1	5,63	5,71	7,80
CX-44	7	51,6	5,66	5,70	7,58
CX-45	8	50,7	5,63	5,17	7,12
CX-46	9	50,8	5,68	6,05	8,33
CX-47	10	50,6	5,61	6,01	8,15
CX-48	11	50,3	5,68	6,58	9,29
CX-49	12	50,6	5,65	6,61	8,95
CX-50	3	53,9	5,66	5,55	7,51
CX-51	4	52,8	5,66	5,04	6,93
CX-52	5	52,0	5,73	4,21	6,37
CX-53	6	52,0	5,62	5,27	7,63



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