

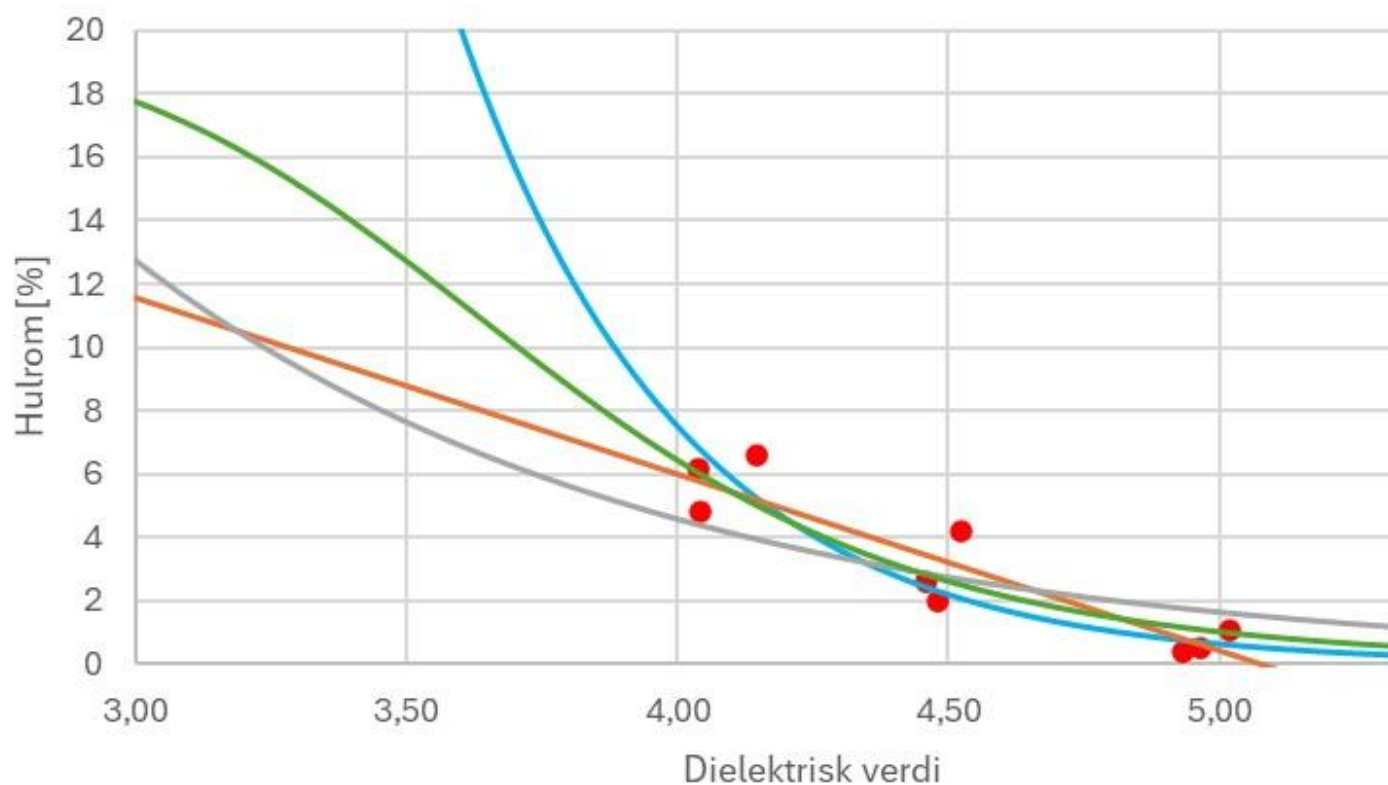
FoUI Asfaltdekkers funksjonsegenskaper

Vurdering av forskjellige beregningsmetoder for kalibrering av georadarresultater

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1105

Kalibrering av georadar



Trond Østen, Statens vegvesen

Tittel

FoUI Asfaltdekkers funksjonsegenskaper

Undertittel

Vurdering av forskjellige beregningsmetoder for kalibrering av georadarresultater

Forfatter

Trond Østen og Kim Rune Bragstad Grannes

Avdeling

Fagressurs Drift og vedlikehold

Seksjon

Geofag Drift og vedlikehold 2

Prosjektnummer

C14585

Rapportnummer

1105

Prosjektleder

Thor Asbjørn Lunaas

Godkjent av

Einar Aasprong

Emneord

Georadar, beregning av hulrom fra dielektrisk verdi.

Sammendrag

Bruk av georadar til kvalitetskontroll på nylagte asfaltdekker er et delprosjekt under FoUI-prosjektet "Asfaltdekkers funksjonsegenskaper".

Georadar måler dielektrisk verdi, som må kalibreres for å kunne beregnes om til hulrom. Det er til nå benyttet en metode for å konvertere dielektrisk verdi til hulrom, men denne metoden er ikke vurdert opp mot andre beregningsmetoder. Rapporten sammenligner resultatet fra fire forskjellige beregningsmetoder, for å bestemme hvilke metode som statistisk gir best tilpasning.

Title

Functional Performance Characteristics of Asphalt Pavements

Subtitle

Comparison of calculation methods for converting dielectric values to air void content

Author

Trond Østen og Kim Rune Bragstad Grannes

Department

Operations and maintenance, Planning and Engineering services

Section

Geomechanics

Project number

C14585

Report number

1105

Project manager

Thor Asbjørn Lunaas

Approved by

Einar Aasprong

Key words

Georadar, converting dielectric values to air voids

Summary

Application of ground-penetrating radar for quality control of newly constructed asphalt pavements constitutes a subproject under the R&D project "Functional Performance Characteristics of Asphalt Pavements".

GPR measures the dielectric value, which must be calibrated before it can be converted to air void content. To date, a single method has been used for this conversion, but it has not been evaluated against alternative calculation methods. This report compares results from four different calculation methods to determine which method provides the best statistical fit.

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 til bruk i kvalitetskontroll på nylagte asfaltdekker er et av områdene som blir undersøkt i FoUI-prosjektet «asfaltdekkers funksjonsegenskaper». Georadar har blitt testet/brukt av Statens vegvesen som en metode for å gjennomføre kvalitetskontroll på nylagte asfaltdekker i flere år. Vegvesenet benytter i dag reglene i R211 Feltundersøkelser for valg av kalibreringsmetode og R210 Laboratoriemetoder for bestemmelse av laboratoriemålt hulrom.

Rapporten har en todelt målsetning. Sammenligning og verifisering av beregningsmetoden som benyttes for konvertering av dielektrisk verdi til hulrom og vurdering av hvordan valg av analysemetode på laboratoriet påvirker beregning av hulrom med georadar.

Det er valgt å benytte fire faktorer som beskriver hvor godt modellen er tilpasset punktdataene. Faktorene er justert R^2 (bestemmelseskoeffisient som beskriver hvor godt modellen beskriver variasjonen til den avhengige variabelen), S_e (residualt standardavvik), S_e/S_y (modellens standardavvik i forhold til variasjonen) og RMAE (relative gjennomsnittlig absolutt feil). I tillegg er det gjort en visuell bedømming av formen på kalibreringskurvene, for å vurdere de opp mot hverandre.

For å vurdere metoden for konvertering av dielektrisk verdi til hulrom er det gjennomført en liten litteraturstudie. Basert på litteraturstudiet er det valgt ut fire metoder for å gjennomføre kalibreringen; Lineær funksjon, naturlig eksponentiell funksjon (dagens metode), Mara Nord og MnDOT modifisert. Det er valgt ut 30 strekninger for sammenligning av kalibreringskurver med de forskjellige metodene, basert på målinger utført av Vegvesenet i perioden 2021-2025. Alle strekningene har i utgangspunktet ni kjerner til kalibrering (fordelt på lav, gjennomsnittlig og høy dielektrisk verdi), men på grunn av manglende sammenheng mellom forventet hulrom og faktisk hulrom er det på noen strekninger valgt å fjerne en eller to kjerner. Sammenligningen viser at metodene lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert, generelt viser god tilpasning mot punktdataene (i snitt er justert $R^2 > 0,8$), mens Mara Nord generelt viser dårligere tilpasning (i snitt er justert R^2 på 0,53). Av modellene er det MnDOT modifisert som marginalt viser best tilpasning mot punktdataene.

Det er valgt ut seks strekninger for sammenligning av kalibreringskurver med forskjellige laboratoriemetoder. Det er etablert tre kalibreringskurver, kurve 1. basert på metode B: Hydrostatisk overflatetørr for alle punkter, kurve 2. metode D: Måling (for alle prøver som er definert til å ha lav dielektrisk verdi (høyt hulrom)) ellers er metode B benyttet på resterende punkter og kurve 3. i henhold til R210 laboratorieundersøkelser. R210 angir at hvis metode D har hulrom $\geq 10\%$, skal metode D benyttes, ellers benyttes metode B. Kurve 1 har god tilpasning til lavt og gjennomsnittlig hulrom, men kan undervurdere høyt hulrom (der hulrommet etter metode D $> 10\%$). Kurve 2 vil overestimere hulrommet i området 5-10%, men gir et godt estimat på høyt hulrom ($> 10\%$). Kurve 3 ofte være lik kurve 2, men det kan være variasjon på hvilke laboratoriemetoder som benyttes for å definere punktene med høyt hulrom.

Det gis ingen klar konklusjon på spørsmålstillingen, men slik regelverket er bygd opp i dag vil medføre at så lenge det benyttes to laboratoriemetoder for å bestemme hulrommet, vil det være noe usikkerhet knyttet til resultatet fra georadaren. Dette skyldes ikke målingene fra georadaren, men regelverket som benyttes.

Fokuset i rapporten er på hvor god tilpasning modellene har, ikke gjennomførbarheten eller økonomiske vurderinger ved valg av hvilken modell som benyttes til kalibrering, selv om dette har betydning i praksis.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag.....	2
1. Innledning.....	5
1.1 Bakgrunn	5
1.2 Mål.....	5
2. Metode	6
2.1 Kalibreringsmetoder.....	6
2.1.1 Lineær funksjon.....	7
2.1.2 Den naturlig eksponentielle funksjonen	7
2.1.3 Mara Nord	7
2.1.4 MnDOT modifisert.....	8
2.2 Kalibreringspunkter	9
2.3 Kontroll av modellene.....	10
2.4 Laboratorieanalyser	11
3. Resultater.....	13
3.1 Modelltilpasning	14
3.1.1 Modelltilpasning for hver strekning	14
3.1.2 Modelltilpasning totalt for alle strekningene	16
3.2 Hulrom	18
3.3 Bruk av flere laboratoriemetoder til kalibrering Heretter kalt R210.....	24
4. Diskusjon.....	25
4.1 Kvalitetssikring av datagrunnlaget.....	25
4.2 Vurdering av modellene	25
4.2.1 Lineær funksjon.....	26
4.2.2 Naturlig eksponentiell funksjon.....	26
4.2.3 Mara Nord	27
4.2.4 MnDOT modifisert	27
4.3 Laboratorieanalyser	27
4.4 Feilkilder ved sammenligning av punkt og regulære målinger	29
4.5 Andre faktorer	29
5. Konklusjon.....	30
6. Videre arbeid.....	31
6.1 Sammenheng lab/felt	31
6.2 Kalibreringskurve	31
Kilder.....	32
Vedlegg A – Resultater alle strekninger. Laboratorieresultat	i

Vedlegg B – Resultater alle strekninger. Kalibreringskurver	vi
Vedlegg C – Resultater alle strekninger. Hulrom	xliii

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

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 utprøvingsstadiet, 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 882 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*» [1]. En isotopmåler dekker et areal på ca. 0,06 m² (20 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.

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.

1.2 Mål

Denne rapporten har en todelt målsetning.

Statens vegvesen benytter i dag kravene i håndbok R211 Feltundersøkelser [2], der det er valgt en kalibreringsmetode som ble anbefalt av utstyrsleverandøren i 2019. Dette er imidlertid kun en av flere mulige beregningsmetoder for konvertering av dielektrisk verdi til hulrom. Gjennom sammenligning av resultatet på utvalgte strekninger som er målt i perioden 2021-2025, har denne rapporten som mål å identifisere hvilke mulige kalibreringsmetoder som benyttes i dag, vise forskjellene mellom de ulike kalibreringsmetodene og angi hvilken metode som teoretisk har best tilpasning til kalibreringsdataene. Basert på dette gis det innspill til en eventuell revisjon av regelverket i R211 Feltundersøkelser.

Statens vegvesen benytter kravene i håndbok R210 Laboratorieundersøkelser [3], for valg av laboratoriemetode for bestemmelse av hulrom. Rapporten har som mål å vise hvilken effekt det har at kalibreringskurven kan være basert på én eller to laboratoriemetoder. Dette medføre at dagens regelverk kan gi en diskontinuitet i kurva, på bakgrunn av krav i regelverkene/kontraktene.

2. Metode

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 skyldes endring i andel luft, og at sammensetningen ellers er homogen. Dette er en forenkling av virkeligheten, da det naturlig vil kunne oppstå variasjoner i asfaltmassen. Tabell 1 angir normale verdier for dielektrisk verdi på forskjellige materialer [4]. Med antagelsen at det kun er andelen luft som endres i dekket, er teorien at dielektrisk verdi gradvis skal gå mot en, når det kun er luft igjen. Dette er imidlertid kun teoretisk.

Tabell 1 Vanlige dielektriske verdier [4]

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

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 asfalmasse/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 kalibreringskje. Basert på dette utarbeides det en kalibreringskurve som benyttes videre til kalibrering av de regulære målingene.

For å gjennomføre sammenligningen er det sett på data fra to datakilder

1. Punktmålinger (kalibreringspunkter). Dette er statiske målinger som er gjennomført på punktene der det ble tatt ut kalibreringskje. Målingene blir utført i ca.30 sekunder, og presenteres som gjennomsnittlig dielektrisk verdi.
2. Regulærmålinger. Dette er data fra målingene på hele strekningen. Det gjøres en måling ca. hver 10 cm, som snittes over 2 meter i dataene som benyttes.

2.1 Kalibreringsmetoder

Det er gjennomført en enkel litteraturstudie for å se på hvilke mulige kalibreringsmetoder som benyttes for å konvertere dielektrisk verdi til hulrom. Litteraturen er hovedsakelig fra USA og Finland. Basert på litteraturstudien kommer det frem at det i dag hovedsakelig benyttes tre forskjellige metoder, men at det også finnes flere metoder som foreløpig er mindre utprøvd. Det er valgt å presentere fire metoder, hvor de tre første metodene benyttes i dag og den siste er på prøvestadiet.

- Lineær
- Naturlige eksponentiell
- Mara Nord
- MnDOT modifisert

2.1.1 Lineær funksjon

En lineær funksjon beskriver at det er en rettlinjet (lineær) sammenheng mellom målt dielektrisk verdi og hulrommet. Ved hjelp av regresjonsanalyse kan sammenhengen mellom punktmålingene beskrives ved hjelp av formel 1. Lineære funksjoner er ofte benyttet for å beskrive sammenhengen mellom estimert verdi (målingene) og eksakt verdi (laboratoriebestemt).

Formel 1 Lineær funksjon

$$Y = A * \varepsilon + B$$

Hvor

- Y er estimert hulrom fra georadaren
- A og B er faktorer hentet fra regresjonsanalysen. A beskriver stigningstallet (veksten) til funksjonen. B beskriver skjæringspunktet på Y -aksen.
- ε er målt dielektrisk verdi på toppsjiktet

Den lineære funksjonen er benyttet som kalibreringsmetode i enkelte land/stater. Siden metoden er lineær, kan det ved et dårlig utvalg av kalibreringspunkter forekomme at estimert hulrom blir negativt etter kalibreringen.

2.1.2 Den naturlig eksponentielle funksjonen

Den naturlige eksponentielle funksjonen beskriver sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi og hulrommet. Ved hjelp av regresjonsanalyse kan sammenhengen mellom punktmålingene beskrives ved hjelp av formel 2.

Formel 2 Naturlig eksponentiell funksjon

$$Y = A * e^{B*\varepsilon}$$

Hvor

- Y er estimert hulrom fra georadaren
- A og B er faktorer hentet fra regresjonsanalysen. A beskriver skjæringspunktet på Y -aksen. B beskriver stigningstallet (veksten) til funksjonen
- ε er målt dielektrisk verdi på toppsjiktet

Den naturlige eksponentielle funksjonen er benyttet som kalibreringsmetode i flere stater i USA og er metoden som i dag er beskrevet i R211 Feltundersøkelser [2]. Det er kun funnet krav til antall kalibreringsskjerner i Texas [5], der det kreves minimum ni kalibreringsskjerner fordelt på tre nivåer (lav, gjennomsnittlig og høy dielektrisk verdi). Variasjonen i dielektrisk verdi mellom lav og høy dielektrisk verdi skal minimum være 0,75. Til forskjell fra en lineær funksjon vil ikke en naturlig eksponentiell funksjon kunne få negative verdier, men er ømfintlig for ekstremverdier avhengig av verdiene på A og B . Hos Statens vegvesen er det valgt å sette en begrensning på maksimalt estimert hulrom til 15%, for å unngå disse utslagene.

2.1.3 Mara Nord

Som en del av Interreg samarbeidet, ble det på 2010 tallet utarbeidet flere rapporter fra de nordiske landene Finland, Sverige og Norge for georadar. Rapportene var ment for å lage felles prosedyrer for hvordan georadar skal benyttes i Norden. En av rapportene het

“Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement” (heretter omtalt som Mara Nord metoden) [6], som gir inngående beskrivelse av hvordan georadar fungerer, prosedyrer for målingene og for kalibrering av måleresultatene.

Mara Nord metoden er basert på det finske PANK regelverket, som er beskrevet i *PANK-4122 ASFALTTIPÄÄLLYSTEEN TYHJÄTILA, PÄÄLLYSTETUTKAMENETELMÄ* [7]. Formelen er basert på sammenhengen mellom felt- og laboratorieundersøkelser på fire forskjellige dekketyper og med forskjellig hulrom. Målingene er utført med et percometer, i 1996 og 1997 i Finland. Percometeret og georadar måler forskjellige flateområder (altså hvor stort område som tas med), slik at det kan være noe avvik mellom det et percometer måler og det georadaren måler på samme prøve. Hulrommet beregnes i henhold til formel 3.

Formel 3 Mara Nord formelen

$$Y = 272,93e^{-1,3012 * K * \varepsilon}$$

$$K = \frac{\ln\left(\frac{Y_i}{272,93}\right)}{-1,3012 * \varepsilon}$$

Hvor

- Y er estimert hulrom fra georadaren
- K = Kalibreringsfaktor er del av stigningstallet (veksten) til funksjonen.
- ε er målt dielektrisk verdi på toppsjiktet
- Y_i er laboratoriemålt hulrom på punktet

Mara Nord formelen er en eksponentiell formel, men med kun en variabel, K . Som tidligere beskrevet i kapittel 2.1.2, har eksponentielle formler normalt to faktorer, A og B , men i dette tilfelle er faktor A allerede bestemt, slik at det kun er B faktoren (stigningstallet) som endres.

Metoden krever at det tas ut minimum 1-2 kjerner per strekning, på homogene områder med gjennomsnittlig dielektrisk verdi. I Nord-Norge benytter Statens vegvesen Mara Nord metoden, benyttes det 3 kjerner til kalibrering. Basert på sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi fra punkt- eller regulærmålingene og laboratoriemålt hulrom beregnes K for hvert punkt (som vist i formel 3). K presenteres som gjennomsnittet fra alle uttatte kjerner med gjennomsnittlig dielektrisk verdi, og bør normalt ligge mellom 0,6 - 0,8.

2.1.4 MnDOT modifisert

De vanlige empiriske modellene har vist seg å kunne være unøyaktige til å beskrive hulrommet ved lavere dielektriske verdier (høyt hulrom). For å ta høyde for dette er det utarbeidet en justert logisk modell ved Minnesota Department of Transportation som er videreutviklet og heretter kalt MnDOT modifisert [8]. Denne modellen er utviklet for å benyttes på laboratorietilvirkede kjerner, men vil også kunne benyttes på kalibreringskjerner fra felt. Modellen er kun beregnet for bruk på asfaltdekker med normalt hulrom, altså f.eks ikke på dekker som er proporsjonert med høyt hulrom slik som drensasfalt.

En logisk modell beskriver veksten først eksponentiell før den flater ut mot et gitt nivå (S -kurve). For denne formelen er det antatt øvre realistisk grense for hulrom på 20% (0,2 verdien), og at hulrommet ved dielektrisk verdi på $1,0006 \approx 100\%$, altså kun luft. MnDOT modifisert er vist i formel 4.

$$Y = \frac{0,2}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{C}\right)^B\right)} + \frac{0,0005}{\varepsilon - 1}$$

Hvor

- Y er estimert hulrom fra georadaren
- B og C er konstanter. B beskriver stigningen mellom øvre og nedre grenseverdi og C beskriver totalt skifte på kurven horisontalt. Verdien for B ligger hovedsakelig mellom 9 - 13 og C hovedsakelig mellom 3,5 - 4,5.
- ε er målt dielektrisk verdi på toppsjiktet fra georadar

B og C verdiene utledes ved hjelp av minste kvadratsums tilpasning, f.eks ved hjelp av Excel problemløser eller Matlab.

2.2 Kalibreringspunkter

Statens vegvesen benytter kravene i R211 feltundersøkelser ved utvelgelse av kalibreringspunkter. For å sikre tilfredsstillende spredning på punktene benyttes følgende fordeling [2]:

- **Lav:** gjennomsnittlig dielektrisk verdi fra regulærmåling – 2 × standardavvik
- **Medium:** gjennomsnittlig dielektrisk verdi fra regulærmåling
- **Høy:** gjennomsnittlig dielektrisk verdi fra regulærmåling + 2 × standardavvik

Standardavviket beregnes basert på dielektriske målinger fra alle målelinjer for alle felt på strekningen, der målingene er homogene. Ved store variasjoner mellom målelinjene, benyttes kun linjen mellom hjulspor, da det er her det er minst påvirkning fra trafikk. Standardavviket bør være > 0,10-0,15 for å oppnå tilstrekkelig spredning i prøvene for å kunne etablere en god kalibreringskurve. Lavere standardavvik indikerer ofte liten variasjon i hulrommet, som medfører at det er vanskelig å etablere gode kalibreringskurver. Da faller også behovet for en kalibreringskurve bort, da dekket er homogent. Prøvene skal tas på homogene områder fordelt over strekningen.

Metode for utvelgelse av prøvelokasjoner er kun beskrevet i prosedyrer som er funnet Texas [5]. Samme dokumentasjon er ikke funnet i andre land eller stater. Erfaring viser at rutinene som Statens vegvesen har utviklet, med $\pm 2 \times$ standardavvik, gir verdier som tilsvarer nedre 10. og øvre 90. persentil av måleverdiene. Dette gir oftest en variasjon fra lav til høy dielektrisk verdi på $\geq 0,6 - 0,8$, altså kan det være noe mindre enn kravene som er benyttet i Texas på 0,75. Basert på erfaringer er dette i utgangspunktet tilstrekkelig variasjon til å få etablert en grei kalibreringskurve. På homogene dekker vil et minimumskrav til differanse være vanskelig å finne i felt, slik at bruk av $\pm 2 \times$ standardavvik ansees som et bedre krav.

For metodene lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert vil det etter dagens regelverk være krav om minimum tre kjerner for hver av klassene lav, medium og høy dielektrisk verdi. Ved bruk av tre kjerner for hver klasse, vil det være mulig å oppdage og fjerne eventuelle utliggere fra datasettet. Med kun en eller to punkter per klasse, vil ikke dette være mulig. For Mara Nord benyttes tre kjerner med medium dielektrisk verdi.

2.3 Kontroll av modellene

Det er valgt å benytte fire parametere for å vurdere hvor godt modellene passer punktdataene. Bestemmelseskoeffisienten R^2 , residualt standardavvik (S_e), relativ gjennomsnittlig absolutt feil (RMAE) og modellens feil i forhold til variasjonen (S_e/S_y).

Bestemmelseskoeffisienten R^2 benyttes som et mål på hvor godt modellen forklarer variasjonen til punktdataene. R^2 varierer mellom 0 og 1, der 0 indikerer at modellen ikke forklarer noen av variasjonen i dataene, mens 1 indikerer at modellen forklarer all observert variasjon. Verdier mellom 0 og 1 uttrykker graden av forklaringskraft, der høyere verdier tilsier at modellen gir en bedre tilpasning til dataene. Det er imidlertid viktig å merke seg at en høy R^2 verdi ikke nødvendigvis innebærer at modellen er god, ettersom andre faktorer som modellens kompleksitet, antall variabler og mulige skjevheter i dataene også må vurderes [9]. Beregningsmetoden er vist i formel 5.

Bestemmelseskoeffisienten R^2 øker alltid når man legger til flere uavhengige variabler, selv om de ikke nødvendigvis forbedrer modellens forklaringskraft. For å korrigere for dette brukes den justerte bestemmelseskoeffisienten, justert R^2 , som tar hensyn til både modellens forklaringsgrad og antall uavhengige variabler. Justert R^2 gir dermed et mer rettferdig mål på hvor godt regresjonsmodellen forklarer variasjonen i den avhengige variabelen. Beregningsmetoden er vist i formel 6.

Formel 5 Beregning av bestemmelseskoeffisienten R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Regresjonssummen av kvadrater (SSR)}}{\text{Total kvadratsum (SST)}}$$

$$SSR = \sum (y_i - y_{i, \text{estimert}})^2$$

$$SST = \sum (y_i - y_{\text{snitt}})^2$$

Formel 6 Beregning av justert bestemmelseskoeffisient R^2

$$R^2 = 1 - \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{i, \text{estimert}})^2}{n - k - 1}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{\text{snitt}})^2}{n - 1}}$$

Hvor

- y_i er laboratoriemålt hulrom i punkt i
- $y_{i, \text{estimert}}$ er estimert hulrom i punkt i
- y_{snitt} er gjennomsnittlig laboratoriemålt hulrom
- n er antall prøver
- k er antall uavhengige variabler
- S_e er standardfeilen til estimert hulrom (residualt standardavvik)
- S_y er standardavviket til det laboratoriemålte hulrommet.

Den relative gjennomsnittlige feilen (RMAE) beskriver hvor stor feilen i snitt er i forhold til gjennomsnittsverdien på hulrommet fra lab. Dette kan brukes til å tolke hvordan ytelsen til modellen er. RMAE beregnes som vist i formel 7.

Formel 7 Beregning av RMAE

$$RMAE = \frac{1}{n} * \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y_{i,estimert}|}{y_{snitt}}$$

Se forklaring på faktorene under formel 5 og formel 6.

For å bedømme hva avvikende residualer er benyttes residual standardavvik, S_e . Lavere standardavvik betyr bedre tilpasning til dataene [10]. Faktoren S_e/S_y beskriver hvor stor del av variasjonen i residualene som gjenstår, sammenlignet med den totale variasjonen som dataene viser. Lavere faktor betyr bedre tilpasning til dataene. Ved å benytte S_e/S_y , S_e , RMAE og justert R^2 blir det en mer helhetlig vurdering av modellens kvalitet.

For å vurdere justert R^2 og S_e/S_y foreslås det å benytte verdiene i tabell 2 [8]. NB! Dette er kun generelle verdier fra litteratur i forbindelse med georadar og foreslås ikke benyttet videre ved rapportering av faktiske prøveoppdrag. For rapportering i felt, ville det anbefales å endre reglene for justert R^2 til kravene til angitte verdier i kolonne 3 (Justert R^2 revidert). For vurdering i rapporten her benyttes verdiene for «justert R^2 ».

Tabell 2 Vurderingskriterier for å vurdere justert R^2 , S_e/S_y og S_e

Vurdering	Justert R^2	Justert R^2 revidert*	S_e / S_y
Meget god	$\geq 0,90$	$\geq 0,90$	$\leq 0,35$
God	0,7 - 0,89	0,8 - 0,89	0,36 - 0,55
Akseptabel	0,4 - 0,69	0,6 - 0,79	0,56 - 0,75
Dårlig	0,20 - 0,39	0,4 - 0,59	0,76 - 0,89
Veldig dårlig	$\leq 0,19$	$\leq 0,39$	$\geq 0,9$

* Revidert justert R^2 basert på norske erfaringer fra georadarmålinger.

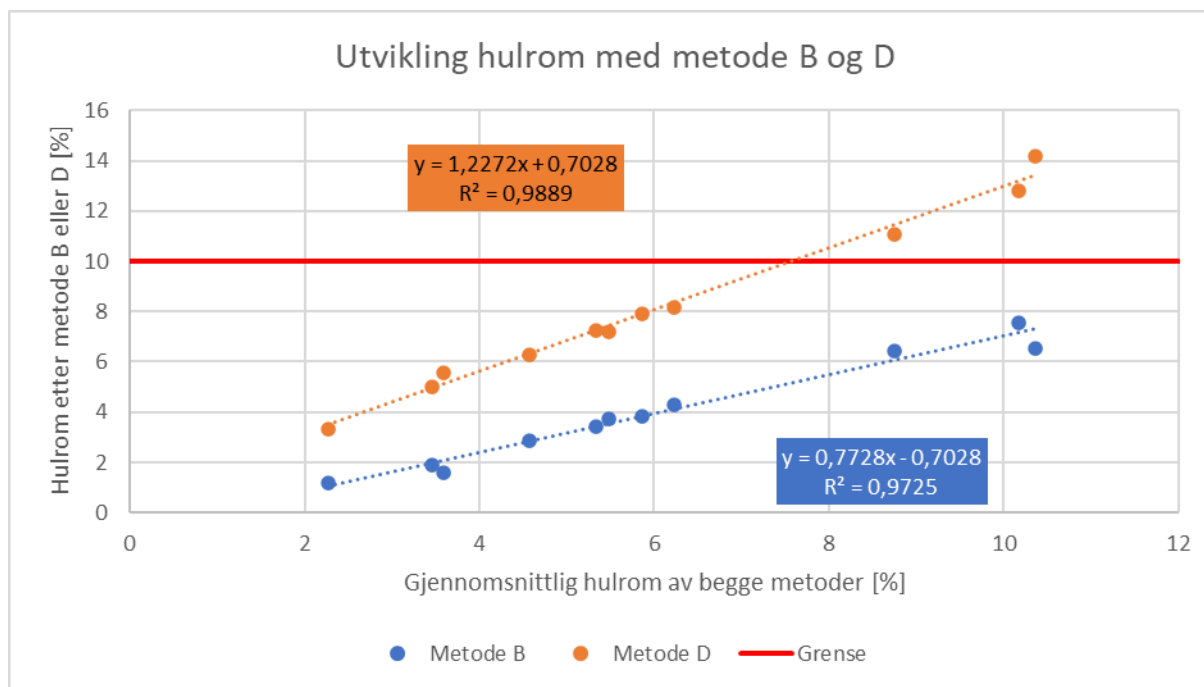
2.4 Laboratorieanalyser

I Norge benyttes i hovedsak to metoder for bestemmelse av hulrom: metode B (hydrostatisk, overflatetørr) og metode D (måling). Ved kontroll av hulrom i Statens vegvesens kontrakter følges kravene til utførelse av laboratorieanalyser beskrevet i Håndbok R210

Laboratorieundersøkelser [3]; 362 Prøvens densitet, 363 Maksimumsdensitet og 364 Hulromsinhold. Kravene er som følger: Asfaltprøvene kappes halve steinstørrelsen i toppen for å fjerne hulrom som er en del av normal overflateruhet. Deretter analyseres prøvenes romdensitet med metode B og D. Maksimumsdensiteten til massen i prøven analyseres og hulrom beregnes. Dersom hulrom bestemt ved metode D ≥ 10 %, skal denne verdien benyttes. Dersom hulrommet bestemt ved metode D er < 10 %, skal resultatet fra metode B benyttes.

Med den metodikken som er valgt brukt ved utarbeidelse av kalibreringskurver kan dette innebære at det må benyttes to forskjellige laboriemetoder. Dette kan medføre et kunstig sprang i dataene, ettersom overgangen mellom de to metodene ofte gir et tydelig skift. Spranget varierer med massetype og med prøvenes egenart og kan ofte være i størrelsesorden 2-3 hulromsprosent eller mer. Generelt er det mindre avvik mellom Agb og Ab masser, enn det vil være for Ska og grov Ska. For Ska og grov Ska kan skiftet i noen tilfeller være betydelig større (> 6 hulromsprosent). Dette skiftet påvirker i hovedsak

metodene lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert, ettersom gjennomsnittlig dielektrisk verdi sjelden blir så høy at Mara Nord-formelen berøres. Effekten av overgangen mellom laboriemetode B og D er illustrert i figur 1. I figuren representerer de oransje sirklene målinger med metode D, mens de blå sirklene representerer målinger med metode B. Den røde linjen er grenselinjen på 10% hulrom, der resultatene for metode B er gyldig der metode D viser hulromsandel under referanselinjen, mens metode D er gyldig over referanselinjen. Figuren viser dermed fordelingen av gyldige hulromsverdier for de to metodene.



Figur 1 Kalibrering med metode B og D, samt grenselinje for hvilke metoder som er gyldig

Ved sammenligning av kalibreringsmetoder (lineær, eksponentiell, Mara Nord og MnDOT modifisert) er det valgt å kun benytte én laboriemetode, metode B, både ved kalibrering og ved beregning av estimert hulrom fra georadar.

For å synliggjøre differansen med flere laborieanalyser er seks strekninger valgt ut, der hulrom etter metode D er over 10 % for én eller flere av kalibreringskjernene. Det er benyttet tre forskjellige oppsett, for å synliggjøre hvordan valg av hulrom påvirker kalibreringskurven.

Kurve 1: Metode B for alle kjerner.

Kurve 2: Metode B for medium og høy dielektrisk verdi og metode D på lav dielektrisk verdi (uavhengig av om hulrommet etter metode D ≥ 10 % eller ikke).

Kurve 3: Etter kravene i R210. Metode D benyttes på alle prøver som har hulrom $\geq 10\%$, ellers benyttes metode B.

Ettersom målet ikke er å sammenligne beregningsmetoder, men å undersøke hvordan kalibreringskurvene endres avhengig av beregningsmetode for konvertering av dielektrisk verdi til hulrom, er det valgt å benytte kun én kalibreringsmetode for illustrasjon; eksponentiell funksjon.

3. Resultater

Det er valgt ut 30 strekninger som er målt med georadar i perioden 2021-2025, for å vurdere tilpasningen av de forskjellige metodene for å beregne hulrom basert på dielektrisk verdi.

Målingene er hovedsakelig gjennomført på riksvegnettet, og det er derfor hovedsakelig utført på dekker av Asfaltbetong (Ab), Skjellettasfalt (Ska) eller Grov skjellettasfalt (Skag), henholdsvis 12, 14 og 3 stk. I tillegg er det 1 strekning med Asfaltgrusbetong, (Agb).

Benyttede dekketyper per strekning kan sees i tabell 3. Prøvene er både kappet og ukappet i overflaten. Dette vil normalt ikke ha påvirkning for dekker med tett overflate som Agb og Ab, men vil kunne ha påvirkning på dekker med større overflatehulrom som Ska og Skag.

For å vurdere effekten av en eller to laboratoriemetoder er det valgt ut seks strekninger av de tidligere 30 utvalgte strekningene, som har benyttet både metode B og D som input ved etablering av kalibreringskurvene. Strekningene som er valgt ut er markert med H-nummerering i tabell 3.

Målingene er utført med Statens vegvesens PaveScan RDM 2.0, med tre stk. 2 GHz antenner. På alle strekningene er det uttatt minimum ni kjerner til kalibrering. På enkelte strekninger har det vist seg at det ikke var sammenheng mellom dielektrisk verdi og hulrom, slik at det på noen serier er fjernet en eller to kjerner. Det er ikke gjennomført måling av dielektrisk verdi på kjernene i lab, da analysene er gjennomført på forskjellige laboratorier og det kun er ved Sentrallaboratoriet i Trondheim (PaveScan MDM) og laboratoriet i Nordkjosbotn (percometer) man har utstyr for dette i Statens vegvesen.

Tabell 3 Oversikt over valgte strekninger for kontroll av kalibreringsmetoder og for laboratoriemetoder.

Strekning	Dekke	Kappet/Ukappet topp	Strekning	Dekke	Kappet/Ukappet topp
1	AC 11 PMB, Ab 11 PMB	Kappet	16	AC 11 70/100 Ab 11	Kappet
2	SMA 11 70/100 Ska 11	Kappet	17	AC 11 160/220 Agb 11	Ukappet
3	Ab 11	Kappet	18	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet
4	SMA 16 PMB Ska 16	Ukappet	19	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet
5	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet	20	AC 11 70/100 Ab 11	Kappet
6	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet	21 (H5)	AC 16 PMB Ab 16	Kappet
7	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet	22	AC 11 70/100 Ab 11	Kappet
8	SMA 11 PMB Ska 11	Kappet	23 (H4)	AC 16 surf 70/100 Ab 16	Kappet
9	SMA 11 70/100 Skag 11	Kappet	24	AC 16 PMB Ab 16	Kappet
10 (H1)	AC 16 PMB Ab 16	Kappet	25	SMA 16 PMB Skag 16	Kappet
11	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet	26 (H3)	SMA 16 PMB Skag 16	Kappet
12 (H2)	SMA 16 PMB Ska 16	Kappet	27 (H6)	AC 16 PMB Ab 16	Kappet
13	AC 11 70/100 Ab 11	Ukappet	28	AC 11 surf 70/100 Ab 11	Kappet

14	SMA 16 PMB Ska 16	Ukappet	29	SMA 16 65/105-60 Ska 16 PMB	Ukappet
15	SMA 16 PMB Ska 16	Ukappet	30	SMA 16 65/105-60 Ska 16 PMB	Ukappet

Alle resultater er i sin helhet presentert i vedleggene A-C. Resultatet fra laboratorieundersøkelsene er vist i vedlegg A, kalibreringskurver er vist i vedlegg B, og beregnet hulrom fra georadaren er vist i vedlegg C.

3.1 Modelltilpasning

Det er totalt uttatt 270 kjerner på de 30 strekningene som blir sammenlignet. For sammenligningen for hver strekning er det totalt 252 kjerner som er inkludert i grunnlaget, da 18 kjerner er fjernet grunnet manglende sammenheng mellom dielektrisk verdi og hulrom ved kalibrering. Det er da grunnlaget fra punktmålingene (kalibreringskjernene) som er benyttet. Resultatet her er vist i kapittel 3.1.1.

Det er sett på sammenhengen mellom dielektrisk verdi og hulrommet fra punktmålingene, og for dielektrisk verdi hentet fra selve målingen (regulærmålingen). Ved sammenligning med regulærmålinger og punktmålinger totalt for alle strekningene er det benyttet 176 kjerner. Dette på grunn av at det er hentet georadardata fra kun ett kjørefelt per strekning, og borkjernene er fordelt over flere felt. Totalt er 94 kjerner fjernet fra dette grunnlaget. Den dielektriske verdien fra regulærmålingen er snittet over to meter segmenter, noe som medfører at sammenhengen reduseres noe. Resultatene er vist i kapittel 3.1.2.

Det er ikke skilt på masstype eller om prøven er kappet/ukappet i overflaten, da datagrunnlaget her er for snevert for dette.

3.1.1 Modelltilpasning for hver strekning

For metodene lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert er kalibreringskjernene for lav, gjennomsnittlig og høy dielektrisk verdi benyttet som input ved kalibrering, mens for Mara Nord er det kun benyttet de gjennomsnittlige kalibreringskjernene. Tabell 4 viser justert R^2 , S_e/S_y , RMAE og S_e beregnet fra punktmålinger for alle strekningene, og er fargekodet i henhold til foreslåtte krav i tabell 2. For lineær, eksponentiell og modifisert MnDOT kategoriseres resultatene hovedsakelig som gode eller bedre for justert R^2 ($> 0,7$) og for S_e/S_y ($< 0,55$), mens det er noe mer variasjon i S_e . Mara Nord viser variasjon med akseptable og dårlige verdier for alle faktorer. Basert på alle faktorene er det MnDOT modifisert som viser best tilpasning til punktdataene, men resultatene for lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert er imidlertid tilnærmet like. Alle resultatene er vist i tabell 4.

Tabell 4 Justert R^2 , S_e/S_y , MAE og S_e for hver strekning.

Strekning	Lineær				Eksponentiell				Mara Nord				MnDOT modifisert			
	J- R^2	S_e/S_y	RMAE	S_e	J- R^2	S_e/S_y	RMAE	S_e	J- R^2	S_e/S_y	RMAE	S_e	J- R^2	S_e/S_y	RMAE	S_e
1	0,77	0,49	16,9 %	0,84	0,70	0,55	19,1 %	0,95	0,39	0,78	28,1 %	1,38	0,74	0,51	18,7 %	0,92
2	0,75	0,50	13,2 %	0,67	0,81	0,43	12,0 %	0,51	0,40	0,77	19,6 %	0,64	0,80	0,45	12,7 %	0,58
3	0,90	0,31	10,2 %	0,77	0,79	0,46	15,8 %	1,13	0,67	0,57	18,5 %	1,42	0,88	0,35	12,5 %	0,94
4	0,86	0,38	10,9 %	0,58	0,90	0,31	8,2 %	0,45	0,71	0,54	11,4 %	0,37	0,88	0,35	9,0 %	0,56
5	0,92	0,31	10,6 %	0,32	0,90	0,31	11,8 %	0,32	0,87	0,36	13,4 %	0,37	0,92	0,29	11,9 %	0,31
6	0,86	0,38	17,6 %	0,77	0,74	0,52	20,4 %	1,12	0,74	0,51	26,6 %	1,06	0,85	0,39	17,6 %	0,93
7	0,84	0,40	16,2 %	0,91	0,74	0,51	20,5 %	1,16	0,48	0,72	32,3 %	1,65	0,83	0,42	18,1 %	1,01
8	0,61	0,63	43,9 %	1,14	0,66	0,58	35,0 %	0,88	0,12	0,94	54,0 %	1,01	0,74	0,51	31,2 %	1,01
9	0,72	0,53	13,8 %	0,70	0,76	0,49	13,7 %	0,65	0,65	0,60	15,5 %	0,79	0,75	0,50	13,3 %	0,65
10	0,95	0,23	12,0 %	0,86	0,55	0,67	32,0 %	2,64	0,63	0,61	30,8 %	0,99	0,90	0,31	19,5 %	1,16
11	0,76	0,49	18,3 %	0,98	0,78	0,47	16,4 %	0,75	0,51	0,70	24,2 %	1,20	0,78	0,47	16,1 %	0,79
12	0,83	0,41	25,8 %	0,98	0,96	0,20	8,0 %	0,47	0,41	0,77	34,2 %	1,82	0,95	0,23	10,3 %	0,39
13	0,81	0,43	20,1 %	1,28	0,66	0,59	29,3 %	1,36	0,53	0,69	25,7 %	1,58	0,79	0,46	22,3 %	1,21
14	0,77	0,48	16,2 %	0,88	0,80	0,45	14,6 %	0,70	0,47	0,73	26,2 %	1,26	0,80	0,45	14,4 %	0,73
15	0,76	0,50	18,1 %	0,97	0,77	0,48	19,4 %	1,09	0,53	0,69	25,9 %	0,96	0,77	0,48	19,4 %	1,07
16	0,83	0,41	20,4 %	0,94	0,93	0,27	13,0 %	0,68	0,41	0,77	28,6 %	2,04	0,92	0,28	11,7 %	0,59
17	0,67	0,58	21,6 %	1,32	0,69	0,56	18,9 %	1,33	0,39	0,78	27,1 %	2,08	0,69	0,55	18,7 %	1,23
18	0,84	0,40	15,1 %	0,67	0,87	0,36	12,6 %	0,69	0,56	0,67	24,4 %	1,64	0,87	0,37	12,6 %	0,65
19	0,89	0,33	16,8 %	0,54	0,89	0,34	18,3 %	0,81	0,61	0,63	34,9 %	1,86	0,91	0,30	16,9 %	0,67
20	0,83	0,41	20,1 %	1,02	0,92	0,28	12,0 %	0,95	0,37	0,79	38,9 %	1,38	0,91	0,30	11,4 %	1,04
21	0,88	0,35	12,6 %	1,06	0,92	0,28	9,6 %	0,84	0,65	0,59	20,1 %	1,79	0,92	0,28	10,5 %	0,85

22	0,78	0,47	17,4 %	0,75	0,85	0,38	13,5 %	0,61	0,23	0,88	27,6 %	1,40	0,88	0,34	13,4 %	0,54
23	0,93	0,26	8,9 %	0,77	0,87	0,35	11,9 %	1,05	0,61	0,62	20,8 %	1,84	0,92	0,28	10,2 %	0,81
24	0,94	0,25	20,7 %	1,08	0,95	0,23	17,8 %	0,99	0,55	0,67	31,3 %	1,96	0,91	0,30	16,3 %	0,89
25	0,97	0,17	6,2 %	0,12	0,93	0,26	10,2 %	0,18	0,79	0,45	18,8 %	0,32	0,94	0,24	9,1 %	0,17
26	0,70	0,55	22,8 %	1,21	0,77	0,48	20,7 %	1,07	0,44	0,75	29,9 %	1,67	0,78	0,47	19,5 %	1,05
27	0,83	0,42	24,2 %	1,04	0,78	0,46	21,7 %	1,26	0,54	0,68	42,1 %	1,56	0,85	0,39	20,6 %	1,09
28	0,78	0,47	20,3 %	1,09	0,79	0,45	20,3 %	1,06	0,71	0,54	24,4 %	1,25	0,81	0,44	18,5 %	1,02
29	0,78	0,46	16,7 %	0,50	0,80	0,45	16,7 %	0,49	0,59	0,64	19,6 %	0,69	0,80	0,45	16,1 %	0,48
30	0,62	0,62	11,8 %	0,51	0,65	0,59	11,3 %	0,49	0,28	0,85	13,9 %	0,70	0,66	0,58	11,2 %	0,48
Snitt	0,81	0,42	17,3 %		0,80	0,43	16,8 %		0,53	0,68	26,3 %		0,84	0,39	15,5 %	
Std	0,09	0,11	0,068		0,10	0,12	0,065		0,16	0,12	0,089		0,08	0,10	0,047	

3.1.2 Modelltilpasning totalt for alle strekningene

Justert R^2 , S_e/S_y , RMAE og S_e mellom laboratoriemålt hulrom og estimert hulrom fra georadar for punktmålinger og regulære målinger er vist i tabell 5. For punktmålingene gir faktorene gode verdier for lineær, eksponentiell og MnDOT, men kun akseptabel for Mara Nord. Også her er det MnDOT modifisert som marginalt viser best tilpasning til dataene.

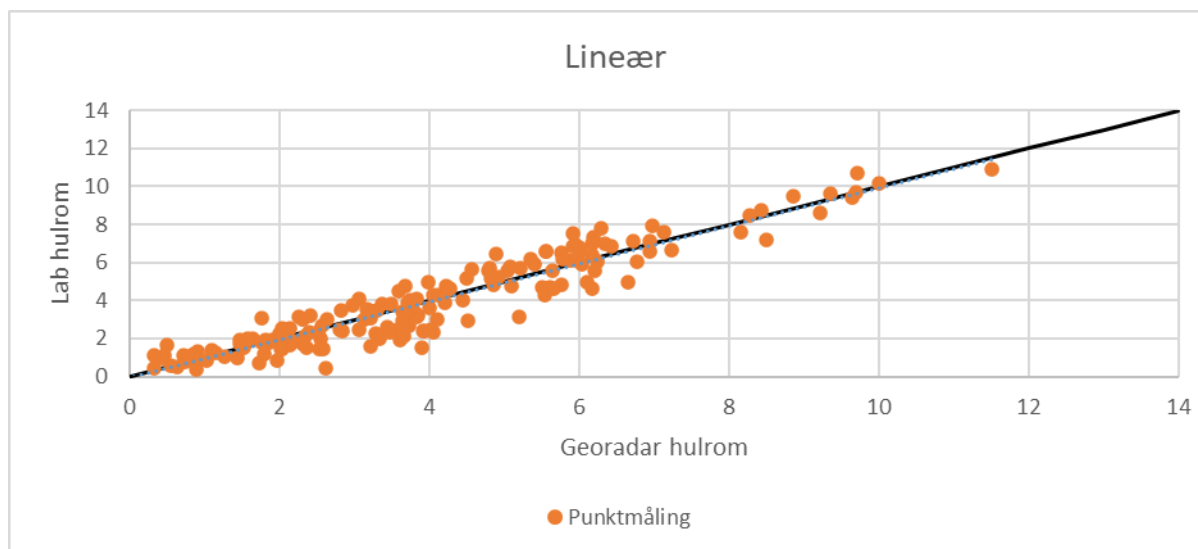
For de regulære målingene er det forventet dårligere tilpasning enn punktmålingene. Faktorene viser gode og akseptable verdier for lineær, eksponentiell og MnDOT, og akseptabel for Mara Nord. Verdiene for lineær, eksponentiell og MnDOT er tilnærmet like.

Tabell 5 R^2 , RMAE, S_e/S_y og S_e for hver strekning.

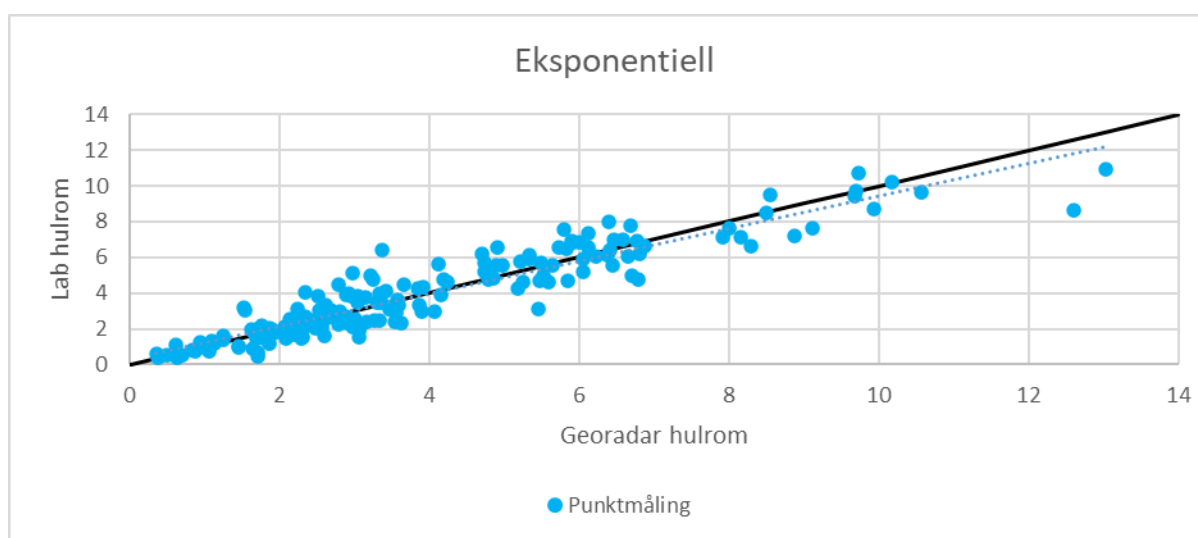
	Faktor	Lineær	Eksponentiell	Mara Nord	MnDOT modifisert
Punkt	Justert R^2	0,89	0,86	0,74	0,90
	S_e/S_y	0,33	0,37	0,51	0,31
	S_e	0,80	0,90	1,25	0,76
	RMAE	16,4 %	17,0 %	24,0 %	15,1 %
Regulær	Justert R^2	0,79	0,77	0,64	0,79
	S_e/S_y	0,46	0,48	0,60	0,46
	S_e	1,12	1,17	1,46	1,13
	RMAE	22,2 %	23,2 %	29,3 %	22,4 %

Figur 2 - figur 5 viser forholdet mellom estimerte hulrom og laboratoriemålte hulrom for de ulike kalibreringsmetodene basert på punktmålingene. For å tydeliggjøre avviket mellom estimat og referanse er det inkludert en referanselinje (1:1-linje), som representerer ideelt samsvar. En trendlinje er i tillegg lagt inn for å fremheve den systematiske tendensen i punktdataene. Sammenstillingen gjør det mulig å vurdere hvor godt de ulike metodene

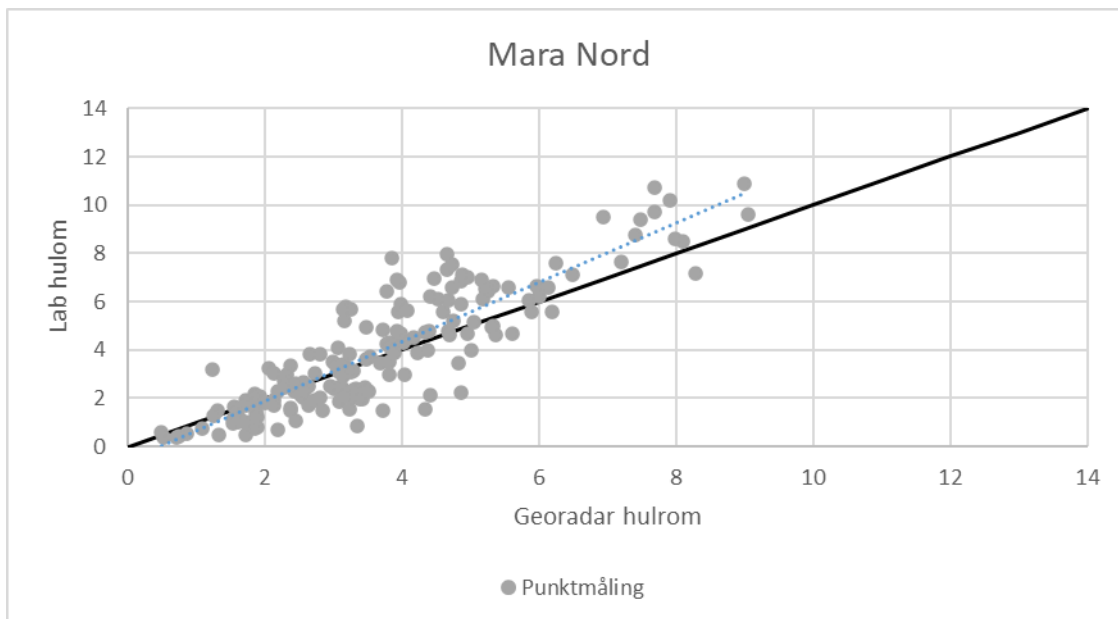
reproduserer laboratoriemålingene, samt å identifisere eventuelle systematiske skjevheter i estimeringene



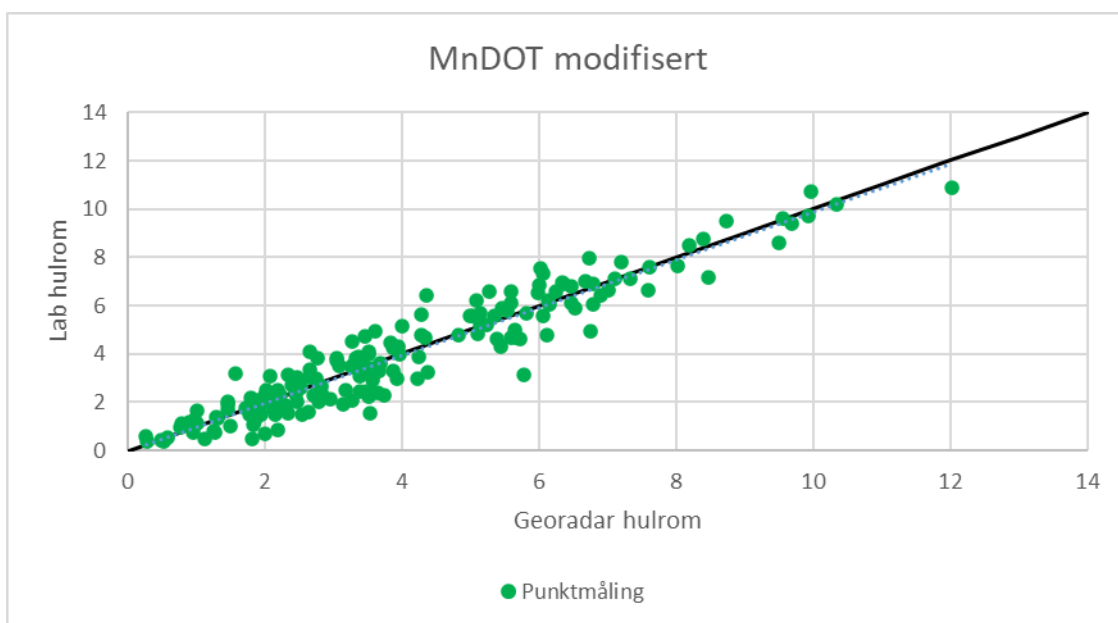
Figur 2 Sammenligning estimert hulrom mot faktisk hulrom, lineær beregningsformel



Figur 3 Sammenligning estimert hulrom mot faktisk hulrom, eksponentiell beregningsformel



Figur 4 Sammenligning estimert hulrom mot faktisk hulrom, Mara Nord beregningsformel



Figur 5 Sammenligning estimert hulrom mot faktisk hulrom, MnDOT modifisert beregningsformel

3.2 Hulrom

Hulrommet er beregnet for alle strekningene, men det er kun presentert fire strekninger i rapporten. De resterende strekningene er presentert i vedlegg C. De fire strekningene er valgt ut basert på variasjonen i hulrommet fra borkjerner, for å vise hvilke effekter dette har på de forskjellige beregningsmetodene.

- Figur 6 viser strekning 5 som har en variasjon i hulrommet på kjernene fra 0,8 % – 3,5%.
- Figur 7 viser strekning 2 som har en variasjon i hulrommet på kjernene fra 1,9 %– 5,8%.
- Figur 8 viser strekning 7 som har en variasjon i hulrommet på kjernene fra 1,1 %– 7,3%.

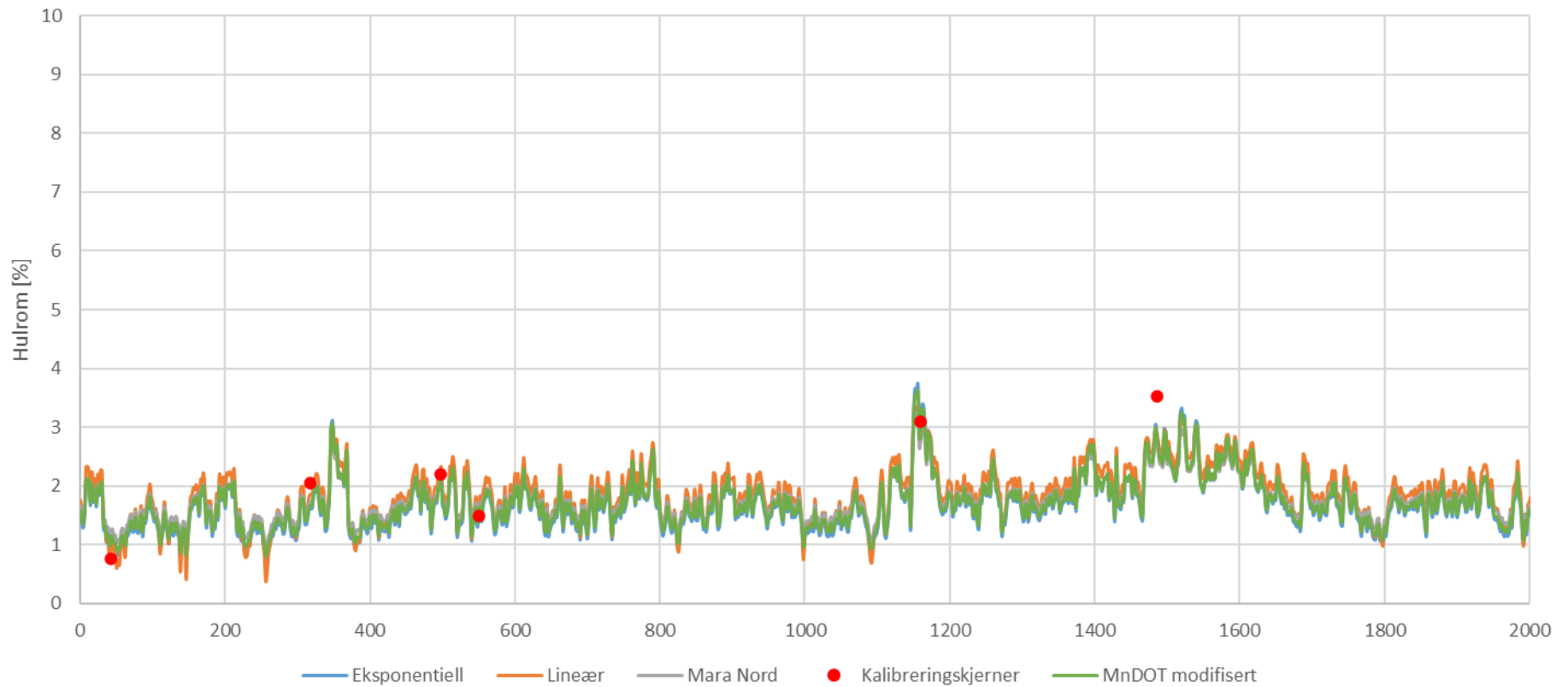
- Figur 9 viser strekning 21, som har en variasjon i hulrommet på kjernene fra 3,1% - 10,7%.

Tabell 6 Gjennomsnittlig absolutt residual mellom estimert hulrom på punktmålingene mot laboratoriemålt hulrom

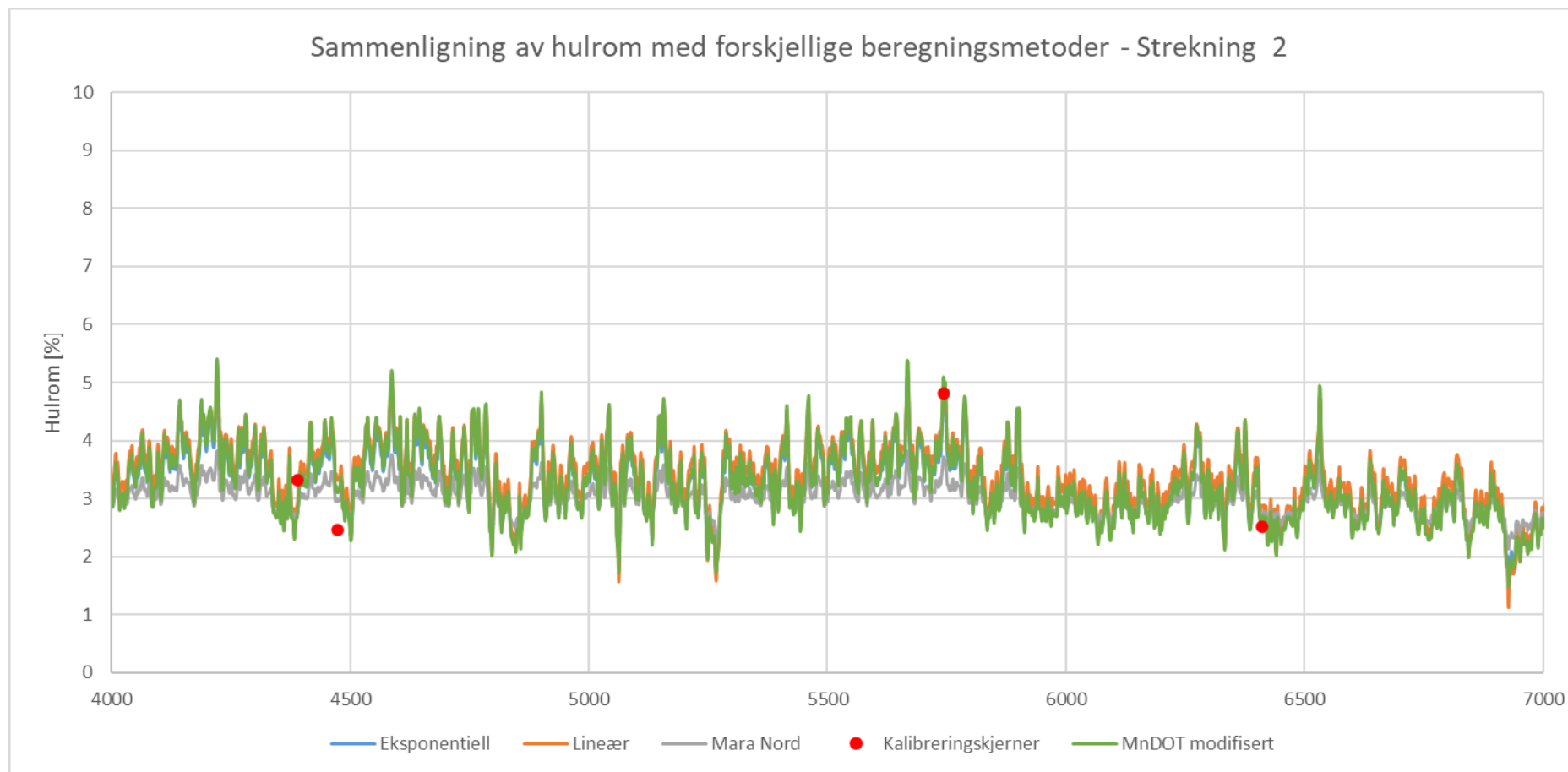
Strekning	Lineær	Eksponentiell	Mara Nord	MnDOT modifisert
5	0,221	0,266	0,289	0,274
2	0,483	0,346	0,413	0,463
7	0,705	0,893	1,405	0,790
21	0,757	0,452	1,457	0,548

Som det kan sees i tabell 6 er det en trend i at residualene stiger når hulrommet på kalibreringskjerne øker opp til et visst punkt, før det slutter å stige. For lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert er gjennomsnittlig residualt avvik rimelig likt på tvers av metodene, mens for Mara Nord blir det betydelig større avvik når hulrommet blir øker. Mara Nord benytter gjennomsnittlig dielektrisk verdi til kalibrering, slik at det vil bli større avvik mellom klassene lav og medium dielektrisk verdi. Dette vil medføre at det er forventet at metoden får større residual når hulrommet øker.

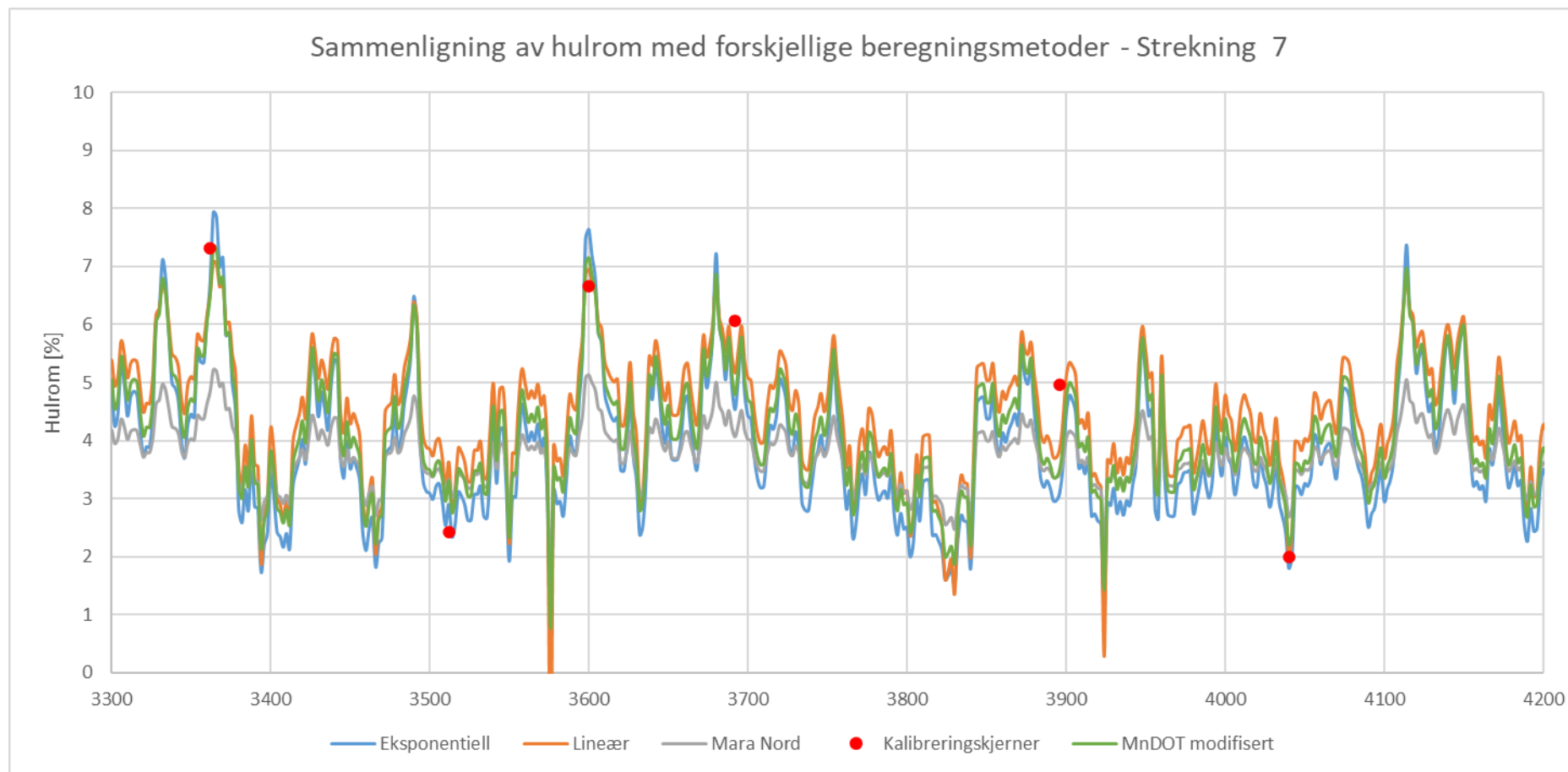
Sammenligning av hulrom med forskjellige beregningsmetoder - Strekning 5



Figur 6 Beregnet hulrom på strekning 5

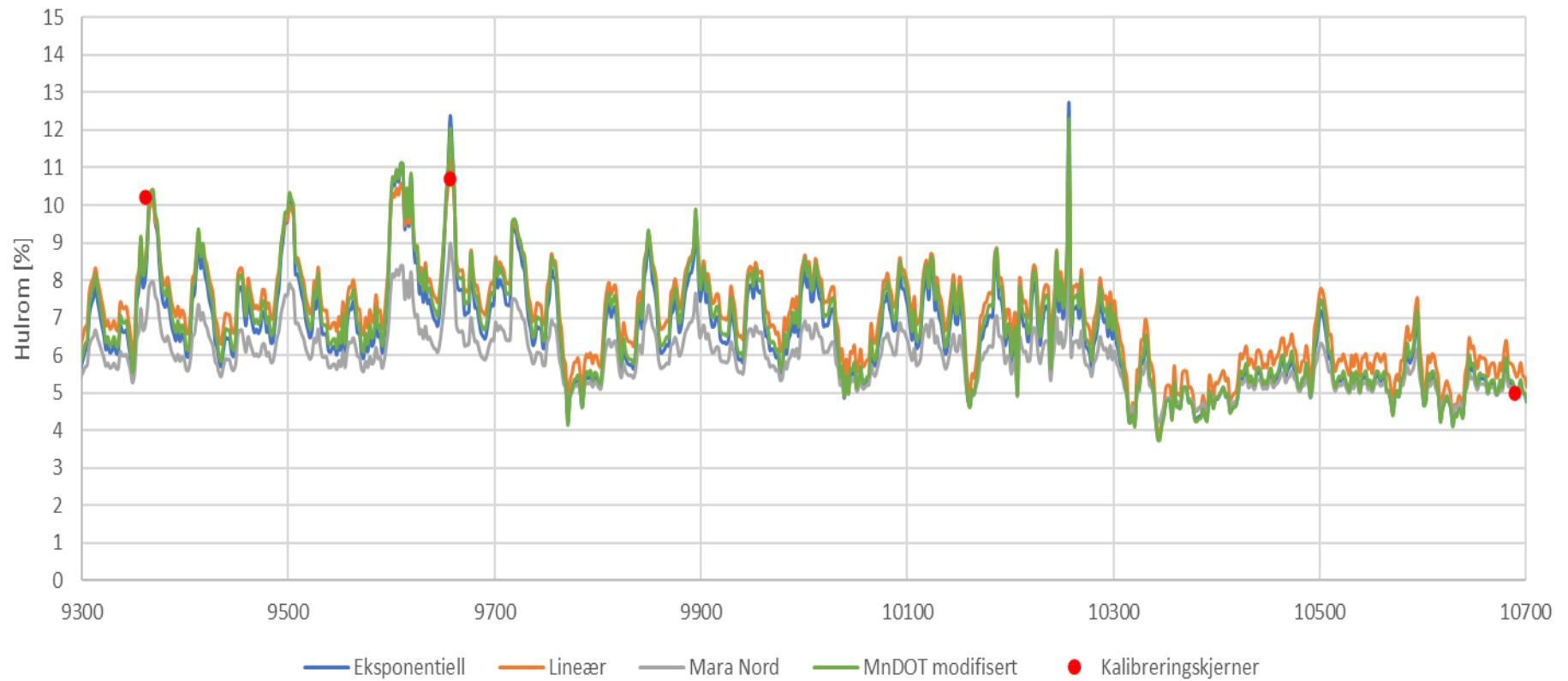


Figur 7 Beregnet hulrom på strekning 2



Figur 8 Beregnet hulrom på strekning 7

Sammenligning av hulrom med forskjellige beregningsmetoder - Strekning 21



Figur 9 Beregnet hulrom strekning 21

3.3 Bruk av flere laboratoriemetoder til kalibrering Heretter kalt R210.

Tabell 7 viser resultatet på strekningene det er benyttet forskjellige laboratoriemetoder til kalibrering. En oversikt over masstype og om toppflaten er kappet/ukappet på strekningene er vist i tabell 3. Det er benyttet 3 forskjellige kurver til kalibrering:

Kurve 1: Metode B for alle kjerner. Heretter kalt metode B.

Kurve 2: Metode B for medium og høy dielektrisk verdi og metode D på lav dielektrisk verdi (uavhengig av om hulrommet etter metode D $\geq 10\%$ eller ikke). Heretter kalt metode B og D.

Kurve 3: Etter kravene i R210. Metode D benyttes på alle prøver som har hulrom $\geq 10\%$, ellers benyttes metode B. Heretter kalt R210.

Tabell 7 R^2 , S_e/S_y , S_e og RMAE med forskjellige laboratoriemetoder

Strekning	Eksponentiell				Analyser
	R2 - Justert	Se/Sy	RMAE	S _E	
H1	0,553	0,669	32,0 %	2,64	Metode B
	0,789	0,46	24,2 %	2,29	Metode B og D
	0,789	0,46	44,8 %	3,58	R210
H2	0,961	0,198	8,0 %	0,47	Metode B
	0,895	0,324	21,6 %	1,59	Metode B og D
	0,895	0,324	21,6 %	1,59	R210
H3	0,77	0,48	20,7 %	1,07	Metode B
	0,859	0,375	20,6 %	1,87	Metode B og D
	0,722	0,527	31,8 %	2,61	R210
H4	0,875	0,354	11,9 %	1,05	Metode B
	0,835	0,406	15,7 %	1,63	Metode B og D
	0,835	0,406	15,7 %	1,63	R210
H5	0,923	0,277	9,6 %	0,84	Metode B
	0,935	0,254	11,6 %	1,08	Metode B og D
	0,935	0,254	11,6 %	1,08	R210
H6	0,785	0,464	24,6 %	1,14	Metode B
	0,893	0,327	24,1 %	1,55	Metode B og D
	0,893	0,327	24,1 %	1,55	R210
Snitt metode B	0,81	0,41	17,8 %	1,20	
Snitt metode B og D	0,87	0,36	19,6 %	1,67	
Snitt R210	0,84	0,38	24,9 %	2,01	
Standardavvik metode B	0,13	0,15	0,09	0,68	
Standardavvik metode B og D	0,05	0,07	0,05	0,36	
Standardavvik R210	0,07	0,09	0,11	0,84	

4. Diskusjon

Denne rapporten omfatter totalt 30 strekninger målt med georadar i perioden 2021–2025, hvor alle er benyttet til å vurdere beregningsmetodene og seks strekninger er benyttet for å vurdere effekten av hvilke laboratoriemetoder som benyttes til kalibrering. Formålet har vært å vurdere fire ulike beregningsmetoder – lineær funksjon, naturlig eksponentiell funksjon, Mara Nord og MnDOT modifisert – med tanke på statistisk ytelse og visuell bedømming av kalibreringskurvene.

4.1 Kvalitetssikring av datagrunnlaget

For å sikre at sammenligningen mellom modellene skjer på et godt grunnlag, er det gjennomført flere tiltak for kvalitetssikring.

1. Vurdering av modellene basert på punktmålinger

Det er valgt å gjøre vurderingen av modellene basert på punktmålingene over kalibreringspunktene, og fra regulærmålingene. Ved vurdering bør imidlertid resultatene fra punktmålingene benyttes. Årsaken til dette er for å sikre så nøyaktig resultat som mulig, da det alltid vil være en differanse mellom regulærmålingene og punktmålingene (videre diskutert i kapittel 4.4).

2. Standardisert kalibrering mot laboratoriemålinger

Kalibreringen er gjennomført med laboratoriemålt hulrom etter metode B, slik at metodiske sprang som oppstår ved kombinasjon av metode B og D elimineres. Dette har både positive og negative effekter. En metode er ønskelig for et likt sammenligningsgrunnlag, men kan også bidra til feilkilder.

3. Systematisk utvalgelse av kalibreringskjerner

Borkjerner er valgt med spredning i dielektrisk verdi basert på $\pm 2 \times$ standardavvik fra gjennomsnittet for strekningen. Denne metoden, etablert i Statens vegvesens praksis, tilsvarer verdier i 10. og 90. persentil, som gir tilfredsstillende variasjon for å etablere stabile kalibreringskurver.

4. Fjerning av avvikende målepunkter

Kjerner som ikke viser en forventet sammenheng mellom dielektrisk verdi og hulrom, er fjernet. Dette reduserer risikoen for at enkeltavvik påvirker modellparameterne uforholdsmessig.

5. Ensartet feltmåling

Målingene er utført med samme utstyr (PaveScan RDM 2.0) og etter standardiserte prosedyrer for måling og plassering av målepunkter, noe som reduserer målevariasjon knyttet til utstyr og utførelse.

4.2 Vurdering av modellene

Det er ikke gjennomført en uavhengig validering av estimert hulrom fra modellene. Alle dataene som er brukt til å kalibrere de forskjellige metodene er gjort basert på dataene fra kalibreringen. Det er ikke tatt ekstra kjerner, for å kontrollere faktisk hulrom utover dette. Dette er en svakhet med valideringen, men påvirker ikke selve sammenligningen av de forskjellige modellene, som hovedsakelig benytter punktmålingene.

For å vurdere hvor godt modellen tilpasser seg dataene er det valgt å benytte justert R^2 , S_e , S_e/S_y og RMAE, ettersom disse målene utfyller hverandre og gir et helhetlig bilde av modellens kvalitet. Justert R^2 viser hvor stor andel av variasjonen i den avhengige variabelen som forklares av modellen, samtidig som den korregerer for antall forklaringsvariabler slik at man unngår en kunstig høy forklaringsgrad. S_e gir et mål på gjennomsnittlig avvik mellom

observerte og predikerte verdier i samme enhet som dataene, mens forholdet S_e/S_y setter dette avviket i relasjon til variasjonen i de observerte verdiene og dermed uttrykker hvor mye av usikkerheten modellen faktisk har redusert. RMAE er inkludert fordi det gir et dimensjonsløst mål på prediksjonsfeilen, noe som gjør det enklere å tolke nøyaktigheten i relativ forstand og sammenligne resultater på tvers av ulike datasett eller variabler. Samlet sett er disse målene valgt fordi de belyser både modellens forklaringskraft, prediksjonsnøyaktighet og relative ytelse.

Da det kun er benyttet hulrom fra metode B som input til vurdering av beregningsmetodene, kan det ikke gis en entydig konklusjon på hvilken beregningsmetode som gir best tilpasning. Dette da kalibreringen ikke er utført etter kravene i R210/kontraktene. For strekningene H1-H6 som er benyttet i vurderingen av laboriemetodene, er det i tillegg beregnet etter kravene i R210. Disse strekningene viser ingen større variasjon mellom statistisk ytelse for modellene mellom kravene i R210 og etter kun metode B.

Det er gjort en visuell overordnet bedømming av form og tilpasning for kalibreringskurvene i vedlegg B. Generelt er det kun mindre forskjeller mellom lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert. Lineær har en tendens på de strekningene med høyt hulrom, at den bommer på gjennomsnittlig hulrom (tolker for høyt). Her viser eksponentiell og MnDOT modifisert bedre tilpasning. Eksponentiell har en tendens til å overestimere høyt hulrom. Dette er forventet, med bakgrunn i hvordan den eksponentielle formelen fungerer. Basert på en visuell gjennomgang av kalibreringskurvene er det MnDOT modifisert som generelt gir best tilpasning til punktene. Så lenge kalibreringskurvene kun er utført på data som er kalibrert etter metode B, vil det imidlertid ikke være helt reelt opp mot formen på kurvene som følger kravene i R210. Det er kun på strekningene der det er vurdert laborieanalyser som kravene i R210 også er benyttet. Det kan imidlertid antydes at samme trend kan sees på disse strekningene også.

4.2.1 Lineær funksjon

Styrker

Den lineære modellen er enkel å iverksette og lett å tolke. Den krever kun to parametere (stigning og skjæringspunkt) og kan beregnes raskt uten avansert programvare. I denne studien viser den god ytelse på tvers av strekningene, med en gjennomsnittlig justert R^2 på 0,81 og S_e/S_y på 0,420, noe som tilsier at modellen forklarer en stor del av variasjonen i hulromsdataene.

Svakheter

Fraværet av logiske grenseverdier gjør at modellen kan gi negative hulromsestimater dersom parameterne kalibreres mot et skjevt datasett. Metoden er dessuten sensitiv for dårlige eller smalt spredte kalibreringsdata, og ekstreme datapunkter kan trekke kurven betydelig både opp og ned. Den gir derfor best resultater på dekker med tydelig og lineær sammenheng mellom dielektrisk verdi og hulrom, noe som ikke alltid er tilfelle.

4.2.2 Naturlig eksponentiell funksjon

Styrker

Metoden unngår negative hulromsverdier og er allerede etablert i norsk praksis gjennom R211 Feltundersøkelser, noe som gir et fortrinn med hensyn til implementering og opplæring. Den presterer generelt godt (justert $R^2 = 0,805$; $S_e/S_y = 0,425$) og er robust på tvers av strekninger med moderat variasjon.

Svakheter

Som for den lineære modellen mangler faste øvre grenseverdier, noe som kan føre til urealistisk høyt estimert hulrom ved lave dielektriske verdier. Med tanke på at Statens

vegvesen har satt maksverdi for estimert hulrom til 15%, vil ikke dette ha en praktisk betydning. Den er også følsom for utligger, og resultatene er avhengige av at kalibreringspunktene har tilstrekkelig spredning. På strekninger med betydelig variasjon kan det være et problem med at formelen overestimerer hulrommet. Dette er særlig der det er et lite skift mellom resultatet fra punktmålingen og regulærmålingen, med tanke på dielektrisk verdi.

4.2.3 Mara Nord

Styrker

Mara Nord-modellen er utviklet med logiske grenseverdier, som sikrer realistiske estimater innenfor et forhåndsdefinert intervall. Den krever relativt få kalibreringskjerner (1–2 per strekning) og bygger på en etablert finsk standard (PANK-4122). Ved bruk av færre kalibreringskjerner kan resultater presenteres raskere, da det er mindre tidkrevende for lab. Dielektrisk verdi for kjernene hentes fra regulærmålingene, slik at det ikke er behov for stopp underveis på strekningen. Dette er særlig positivt for sikkerheten til operatørene.

Svakheter

Metoden gir gjennomgående lavere statistisk tilpasning (justert $R^2 = 0,528$; $S_e/S_y = 0,676$), ofte i kategorien «akseptabel» eller «dårlig» etter vurderingskriteriene i tabell 2. Fordi den kun benytter gjennomsnittlig dielektrisk verdi, er den ofte mindre følsom for lokal variasjon i hulrom. På strekninger med høy variasjon fra kjernedataene øker residualspreddingen markant, og modellen har derfor begrenset presisjon ved stor variasjon i hulrommet. Siden det kun blir tatt 3 kalibreringskjerner med gjennomsnittlig dielektrisk verdi, blir det ikke kontrollert høyt hulrom. Kalibreringskjernene er en verifisering både av hulromsnivået på strekningen, men også av hvor godt modellen passer dataene. Uten bruk av flere kjerner, blir det vanskelig å validere om modellen gir et riktig svar under normal bruk.

4.2.4 MnDOT modifisert

Styrker

MnDOT modifisert gir den beste statistiske ytelsen i studien (gjennomsnittlig justert $R^2 = 0,838$; $S_e/S_y = 0,391$). Modellen er logisk utformet med en S-kurve og en øvre grense for hulrom på 20 %, noe som forhindrer urealistiske estimater. Den håndterer lave dielektriske verdier bedre enn tradisjonelle empiriske modeller og er mindre påvirket av enkeltavvik i dataene.

Svakheter

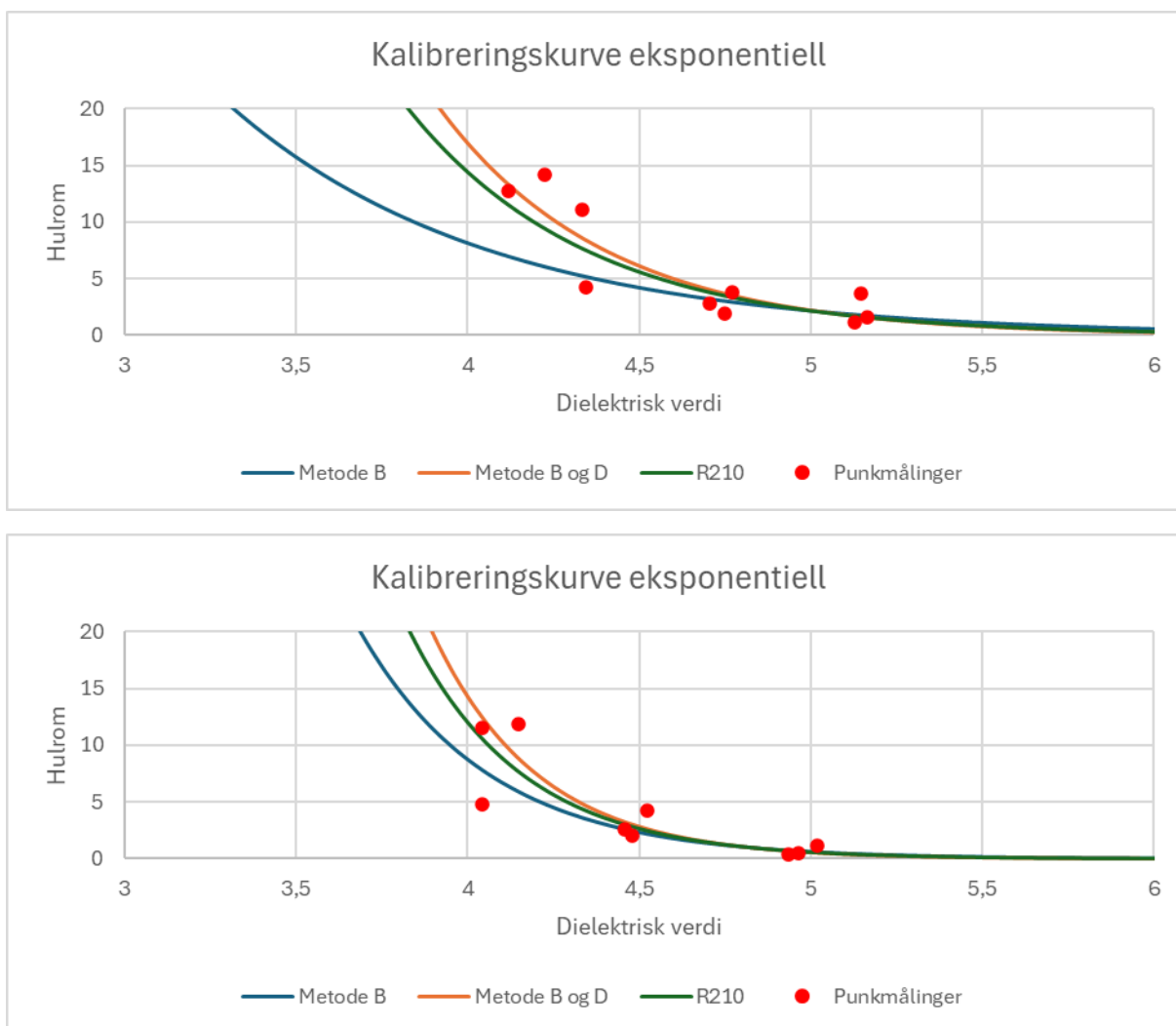
Metoden krever numerisk parameterjustering (for eksempel via Excel problemløser eller Matlab), noe som gjør bruken mer kompleks. Den forutsetter minst tre kjerner med god spredning for å oppnå pålitelig kalibrering, men vil i praksis kreve ni kjerner for å sikre tilstrekkelig sikkerhet. Metoden er i forhold til de andre metodene, ikke testet og utprøvd i større skala, eller i normal bruk. Dette betyr at en begrenset test på 30 strekninger kan være et for lite datagrunnlag for å gi en tydelig konklusjon.

4.3 Laboratorieanalyser

Figur 10 viser kalibreringskurver for henholdsvis strekning H3 og H6 med eksponentiell beregningsmetode for de tre alternativene kalibreringskurvene. Det er noe differanse mellom kalibreringskurvene, men hovedsakelig kun mellom metode B og de to andre kurvene. Kurveforløpene blir betydelig brattere ved bruk av to laboratoriemetoder, som gjør at hulromsnivået i økende grad vil bli overestimert (opp til 10% nivået). På strekninger med punkter med hulrom > 10 % med metode D, er det ofte kortere partier som har høyt hulrom, mens mye av hulrommet ofte vil ligge i området < 10%. Dette medfører at ved en etterkontroll kan laboratoriemålt hulrom avvike fra estimert hulrom fra georadaren, der hulrommet er under 10% med dagens metode for kalibrering. Dette kan på sikt bidra til en

oppfattelse at estimert hulrom fra georadar overestimeres, og vil kunne gi mindre bruk av metoden grunnet unøyaktigheter. Ved bruk av kun metode B til kalibrering vil imidlertid hulrommet bli underestimert ved høyt hulrom.

Så lenge det benyttes to analysemetoder i lab, vil det være usikkerhet knyttet til etablering av kalibreringskurven, enten i underestimering av høyt hulrom eller overestimering av gjennomsnittlig/middels høyt hulrom så lenge kalibreringen kun baserer seg på en kurve som i dag. Variasjonen mellom metode B og D varierer avhengig av massetypen. For Agb og Ab dekker er som regel differansen mindre enn for Ska og grov Ska. Dette skyldes at Agb og Ab masser er tettere dekker, enn Ska og grov Ska. På enkelte strekker med Ska og grov Ska vil metode B gi galt svar, da metoden ikke er egnet for prøver som er for åpne. På slike strekker er det kun metode D som gir et riktig svar. Dette er viktige faktorer for vurdering av hulrommet, men som ikke direkte går direkte på modellene.



Figur 10 Sammenligning av kalibreringskurve med en eller to beregningsmetoder for H3 og H6. Punktmålinger er etter krav i R210.

4.4 Feilkilder ved sammenligning av punkt og regulære målinger

Det ble vurdert å presentere sammenligning fra både punktmålingene og den regulære målingen. De regulære målingene er innmålt i start/slutt med GNSS enhet med CPOS og dataene er justert basert på dette. Dette medfører at det kan være noe unøyaktighet i posisjoneringen langs strekningen, grunnet varierende kurvatur, etc. (posisjonering følger senterlinjen på vegen). For å unngå dette måtte metringene vært beregnet basert på GNSS posisjoneringen for å få helt nøyaktig plassering. Regulærmålingene er i tillegg presentert som snittede verdier over 2 meter. Dette gjør at ved feil utvalgelse av kalibreringspunkt, kan det være store variasjoner for hvert snitt, som endrer den dielektriske verdien. Basert på dette må det alltid forventes en variasjon i dielektrisk verdi mellom de forskjellige målingene, og at det sjeldent vil oppnås tilsvarende R^2 verdier.

4.5 Andre faktorer

Rapporten her vurderer kun hvilken tilpasning de forskjellige modellene har til punktdataene, og vurderer ikke faktorer som gjennomføringsmuligheter, sikkerhet for måleoperatører eller kostnader knyttet til metodene.

Kostnader med bruk av de forskjellige metodene er en faktor som ikke er belyst i rapporten. Bakgrunnen for dette er at hovedfokus er å se på hvor godt de forskjellige modellene estimerer hulrommet. Det er imidlertid en viktig faktor ved praktisk bruk av metodene, da det vil kunne være store differanser mellom metodene. Lineær, eksponentiell og MnDOT modifisert må minimum ha 3 kjerner til kalibrering. Hvis kalibreringskurven utarbeides basert på kun 3 kjerner, vil eventuelle avvik ikke kunne detekteres for hvert nivå (lav, gjennomsnittlig og høy dielektrisk verdi). Disse metodene vil derfor i praksis ha behov for 9 kjerner for å kunne fjerne eventuelle avvikende kjerner, for å sikre at estimert hulrom blir så godt som mulig.

Mara Nord har kun behov for minimum 1-2 kjerner per strekning (i praksis bør 3 prøver benyttes). Det stilles heller ikke krav til at det må gjennomføres punktmålinger, men at verdiene fra regulærmålingene kan benyttes til å bestemme prøvelokasjoner og dielektrisk verdi direkte. Det er imidlertid viktig at nøyaktigheten på posisjoneringen er god, for at en slik metode skal kunne benyttes, ellers vil ikke resultatene kunne benyttes direkte til kalibreringen (særlig ikke ved inhomogene strekninger). Så lenge resultatet fra regulærmålingene benyttes direkte vil det alltid være en viss usikkerhet, som punktmålingene eliminerer. Avhengig av hvilken type georadar som benyttes, medfører dette at ved bruk av Mara Nord til kalibrering, kan det i visse tilfeller måles i trafikkhastighet uten behov for stopp. Dette medfører at det ikke er behov for arbeidsvarsling for utførelse av selve målingene, og dermed betydelig reduserte kostnader knyttet til både målingen og arbeidsvarsling. Dette gjør det også mulig å gjennomføre målinger på flere strekninger. Da behovet for antall prøvepunkter reduseres, medfører dette også at det vil være mulig å samkjøre uttak av borekjernene, så lenge strekningene er i rimelig nærhet av hverandre. Dette vil det ikke være mulig å gjøre for de tre andre målemetodene, da det her kreves at det gjennomføres punktmålinger og at utboringen da oftest utføres samme natt. For Mara Nord vil det imidlertid være behov for å verifisere høyt hulrom med ekstra uttak av kontrollkjerner.

Uttak og analysing av kalibreringskjerner er både tidkrevende og kostnadsdrivende. Laboratoriet er ofte en begrensende faktor på hvor fort et resultatene kan rapporteres. Totalt sett for gjennomførbarhet og økonomi er det ingen tvil om at Mara Nord modellen vil være best egnet, så lenge det aksepteres de usikkerhetene metoden gir.

5. Konklusjon

Sammenligningen viser at det er store variasjoner på hvor godt det estimerte hulrommet fra de forskjellige modellene passer kalibreringspunktene. Generelt kan det sies at lineære, eksponentielle og MnDOT modifisert funksjonene gir god og tilnærmet lik tilpasning til punktene. Mara Nord-formelen er mindre følsom for variasjoner i hulrommet, og kan underestimere høyt hulrom og overestimere lavt hulrom. Basert på sammenligningen er det MnDOT modifisert modellen som totalt sett gir best tilpasning til kalibreringspunktene på strekningene, da denne jevnt over har best resultat på de forskjellige vurderingsfaktorene og best visuell form. Det anbefales derfor at denne formelen implementeres i R211 feltundersøkelser.

Resultatene fra forsøk med bruk av forskjellige laboratoriemetoder til input for utarbeidelse av kalibreringskurvene har stor betydning for endelig resultat. Dette gjelder særlig i de tilfellene der lav dielektrisk verdi (høyt hulrom), benytter både metode B og D til kalibreringen. Dagens metode etter kravene i R210 vil medføre at hulrommet i området 5-10% oftest er overestimert. Så lenge regelverket er slik det er i dag, med bruk av to laboratoriemetoder, må det imidlertid forventes at estimert hulrom fra georadaren vil kunne være noe over/underestimert.

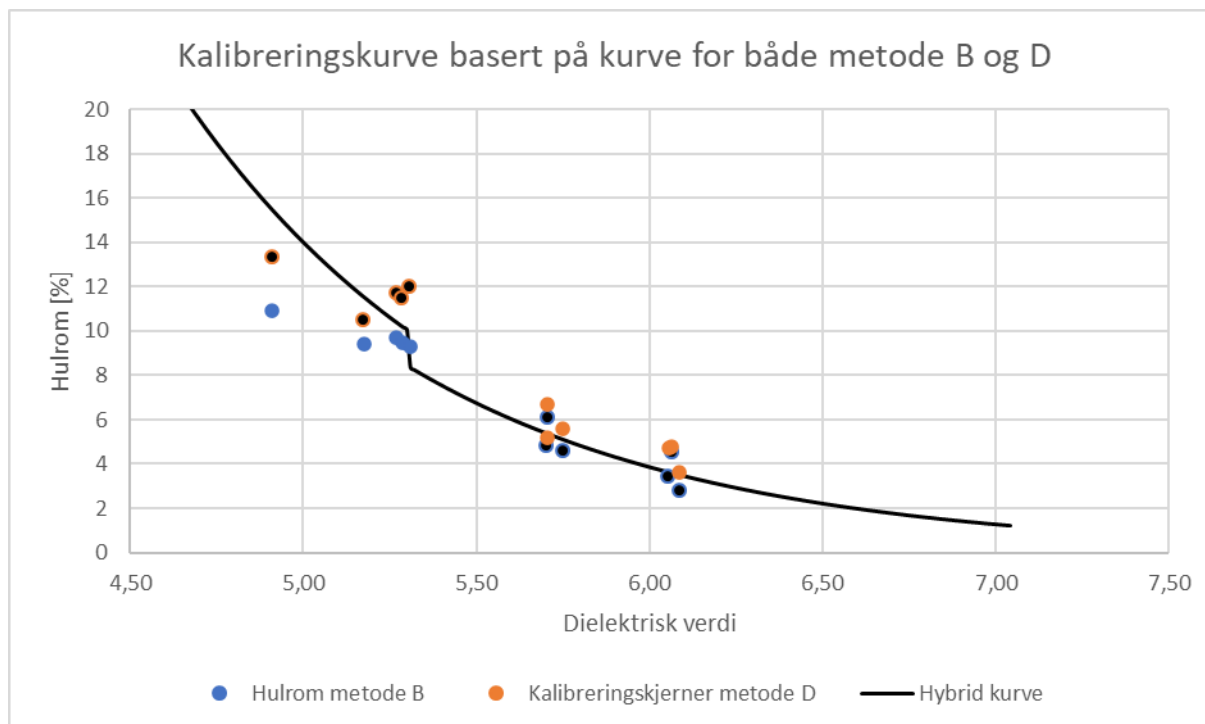
6. Videre arbeid

6.1 Sammenheng lab/felt

Arbeidet er kun utført ved sammenligning av et lite utvalg av strekninger i felt under varierte forhold. For videre arbeid anbefales det at det gjennomføres supplerende undersøkelser, hvor det utføres målinger i både lab og felt. Målinger i lab kan gjøres med eksempelvis PaveScan MDM eller Percometer. Da får man større kontroll på faktorene som vanninnhold, fremmedlegemer som støv/jord på dekkeoverflaten, kappet toppflate slik at effekten av eventuelt overflatehulrom minskes og at kun arealet til kjernen måles. Da skal det i prinsipp kun være variasjonen i hulrom som skal ha påvirkning på måleresultatet. Dette vil i tillegg bidra til å finne sammenhengen mellom målt dielektrisk verdi på feltutstyr og labutstyr. Dette vil være nyttig hvis det i fremtiden blir mulig å gjennomføre kalibrering av utstyr basert på laboratorietilvirkede kjerner.

6.2 Kalibreringskurve

Det er til nå kun sett på muligheten til å benytte en kalibreringskurve, basert på resultat fra både metode B og D. Et annet alternativ er at det utarbeides to kalibreringskurver, basert på henholdsvis metode B og metode D. Basert på disse lages det en hybrid av de to kalibreringskurvene. Kravene fra R210 benyttes da direkte, ved at kurven for metode B benyttes så lenge hulrommet etter metode D < 10%, før det skiftes til kurven for metode D når denne kurven ≥ 10%. Et eksempel er vist i figur 11, som viser nytt kurveforløp. Denne metoden vil fjerne deler av problematikken som to laboratoriemetoder gir i kalibreringen. Strekninger der høyt hulrom er definert med både metode B og D vil imidlertid fortsatt kunne være noe usikkert. Det vil imidlertid bli et tydelig skille, der det skiftes mellom kalibreringskurvene. Det foreslås at denne vurderingen gjøres, sett opp mot kravene etter R210 som benyttes i dag.



Figur 11 Hybridkurve, basert på eksponentiell kurve. Gyldige kalibreringspunkter er vist med helsvart fyll

Kilder

1. [Rapport 882 Dokumentasjon og kontroll av asfalt](#), Nils Uthus, Joralf Aurstad, Geir Berntsen og Even K. Sund, desember 2022
2. [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#), Statens vegvesen, 2025
3. [Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser](#), Statens vegvesen, 2025
4. [Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys](#), Timo Saarenketo 11.11.2006
5. TEST PROCEDURE FOR GPR FOR ASPHALT MIXTURE CONSTRUCTION, Texas A & M transportation institute. Bryan Wilson, Stephen Sebesta og Tom Scullion, 09.2021
6. [Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement](#), Mara Nord 2011
7. [PANK specification PANK-4122 Asfalttipäällysteen tyhjättilä, päällystetutkamenetelmä](#), revidert 5/9/2008 (engelsk utgave kan sees [her](#)).
8. Primusz, P.; Abdelsamei, E.; Ali, A.M.; Sipos, G.; Fi, I.; Herceg, A.; Tóth, C. Assessment of In Situ Compactness and Air Void Content of New Asphalt Layers Using Ground-Penetrating Radar Measurements. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 614. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/614>
9. [Coefficient of determination, R-squared](#),
10. [How to Interpret Residual Standard Error](#), Zach Bobitt 11.05.2021

Vedlegg A – Resultater alle strekninger. Laboratorieresultat

Tabell 8 oversikt over laboratoriemålt hulrom

Strekning	Målt dielektrisk verdi (gjennomsnitt)	Lab målt hulrom hydrostatisk [%]	Lab målt hulrom skyvelær [%]
1	5,06	4,69	4,48
1	5,07	6,57	6,47
1	5,11	4,79	5,06
1	5,38	1,38	1,32
1	5,38	3,99	3,72
1	5,40	4,75	5,13
1	5,60	1,47	0,35
1	5,71	1,95	2,52
1	5,72	1,96	1,90
2	5,20	4,81	4,40
2	5,20	5,77	5,74
2	5,22	2,74	2,40
2	5,39	3,32	2,70
2	5,42	3,69	3,20
2	5,43	2,46	1,09
2	5,71	1,92	1,22
2	5,71	2,51	2,41
2	5,71	2,28	0,26
3	4,65	9,63	11,82
3	4,77	7,19	6,87
3	4,80	8,48	9,91
3	5,17	5,58	6,48
3	5,18	6,59	7,36
3	5,21	6,19	7,17
3	5,50	2,24	2,90
3	5,51	3,48	4,39
3	5,63	2,12	1,47
4	4,20	8,78	12,40
4	4,29	6,62	8,51
4	4,31	6,04	7,72
4	4,56	4,77	6,19
4	4,56	4,58	4,58
4	4,57	-	-
4	4,83	3,46	5,16
4	4,87	2,73	4,17
4	4,88	3,73	5,02
5	4,52	3,09	7,18

5	4,55	3,52	6,83
5	4,99	2,05	5,58
5	5,02	1,48	5,39
5	5,03	2,20	5,81
5	5,54	0,96	1,48
5	5,57	0,76	2,32
6	4,20	5,21	7,55
6	4,23	5,57	6,81
6	4,26	3,81	6,58
6	4,57	2,49	3,31
6	4,65	2,82	3,07
6	4,65	4,08	5,58
6	4,99	1,54	1,86
6	5,15	0,82	1,49
6	5,38	0,34	0,44
7	4,36	6,66	8,22
7	4,50	6,06	6,55
7	4,51	7,32	9,49
7	4,83	0,99	1,07
7	4,83	4,96	5,30
7	4,84	2,43	3,39
7	5,16	5,26	5,86
7	5,17	2,00	2,47
7	5,23	1,06	1,40
8	4,20	5,23	6,12
8	4,21	5,00	5,71
8	4,21	3,22	3,86
8	4,60	0,46	0,60
8	4,61	1,47	1,60
8	4,66	3,20	3,49
8	5,13	0,40	0,79
8	5,41	0,37	-0,50
8	5,45	0,60	0,83
9	4,73	6,51	7,37
9	4,79	4,68	4,78
9	4,82	5,90	6,02
9	5,10	4,31	5,27
9	5,11	3,00	3,58
9	5,12	4,26	4,50
9	5,39	2,41	1,49
9	5,42	4,40	5,62
9	5,51	3,02	3,23
10	4,07	8,62	13,04
10	4,15	8,74	12,75
10	4,18	7,62	10,15

10	4,60	3,99	4,35
10	4,55	6,43	5,80
10	4,59	5,16	5,75
10	4,94	0,84	10,45
10	4,96	0,75	1,05
10	5,01	0,83	1,16
11	5,23	6,56	3,25
11	5,26	5,15	4,79
11	5,26	6,58	6,04
11	5,61	2,31	1,33
11	5,62	3,62	3,23
11	5,62	5,10	5,45
11	5,98	2,51	1,50
11	5,98	1,68	0,63
11	6,07	2,19	1,24
12	4,02	2,90	4,55
12	4,02	7,79	13,27
12	4,04	6,41	11,22
12	4,40	2,68	2,67
12	4,42	2,27	3,01
12	4,44	2,62	3,50
12	4,83	1,17	1,03
12	4,89	1,10	1,38
12	4,89	0,98	0,23
13	4,44	7,13	9,34
13	4,55	5,59	7,19
13	4,58	2,08	2,68
13	4,91	1,52	1,81
13	4,94	3,90	4,10
13	4,96	4,51	4,56
13	5,22	0,86	1,24
13	5,25	0,89	0,98
13	5,25	3,07	3,32
14	4,62	6,13	7,95
14	4,77	5,29	7,04
14	4,77	5,59	7,74
14	4,96	2,41	4,17
14	4,97	3,11	4,83
14	4,99	4,80	7,91
14	5,21	1,96	3,29
14	5,28	2,13	3,47
14	5,40	1,88	3,08
15	4,55	8,78	11,06
15	4,56	7,06	8,72
15	4,60	4,96	5,97

15	4,89	3,01	3,60
15	4,91	4,91	5,67
15	4,94	4,47	4,84
15	5,22	3,12	3,33
15	5,23	1,85	1,88
15	5,32	1,51	1,32
16	3,78	5,90	7,15
16	3,79	6,82	9,03
16	3,79	6,90	8,65
16	4,11	3,16	3,79
16	4,16	2,52	3,07
16	4,17	2,32	3,11
16	4,46	1,30	1,71
16	4,46	2,00	2,54
16	4,62	1,64	1,73
17	5,06	7,02	9,92
17	5,09	4,67	5,63
17	5,12	7,53	8,59
17	5,31	5,63	7,06
17	5,32	2,95	3,86
17	5,34	3,93	4,87
17	5,57	2,56	2,88
17	5,60	2,01	2,46
17	5,76	2,17	3,59
18	4,14	6,89	8,54
18	4,20	6,84	8,48
18	4,23	4,38	5,32
18	4,42	3,70	5,36
18	4,45	4,09	5,92
18	4,60	2,86	3,62
18	4,60	2,36	2,88
18	4,62	1,54	0,51
18	4,74	2,06	2,69
19	4,18	7,12	7,43
19	4,28	6,97	8,89
19	4,37	4,66	3,18
19	4,75	3,59	2,25
19	4,76	3,82	3,35
19	4,81	1,54	0,33
19	5,18	1,32	3,29
19	5,19	0,77	-1,06
19	5,23	0,95	-0,91
20	4,44	5,69	8,27
20	4,44	3,14	6,07
20	4,46	5,77	9,19

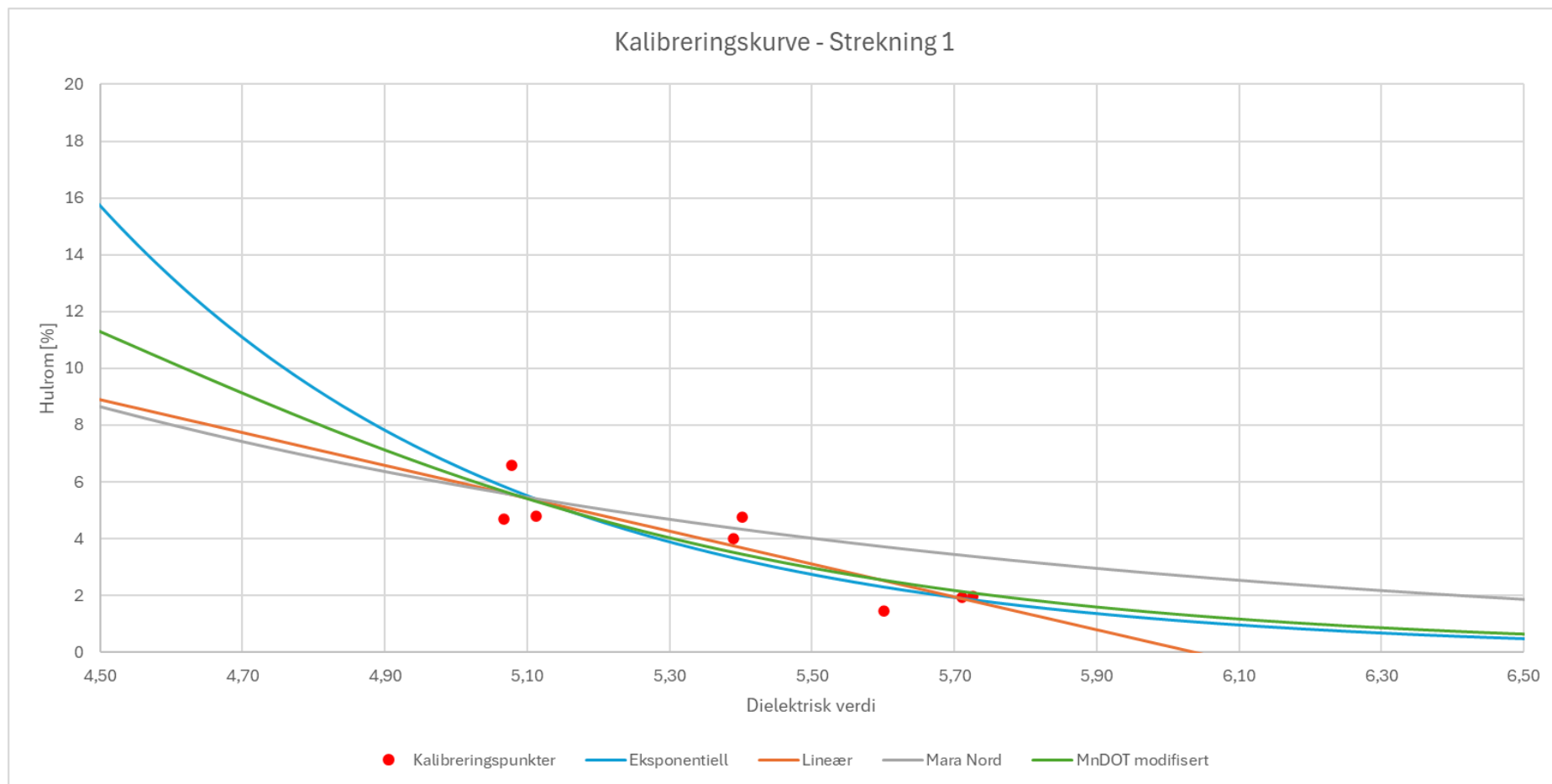
20	4,75	3,32	5,34
20	4,75	1,58	2,92
20	4,78	2,48	4,83
20	5,14	1,04	2,74
20	5,14	1,01	1,85
20	5,15	1,13	1,83
21	5,232	10,20	12,80
21	5,274	10,70	13,50
21	5,277	9,70	12,00
21	5,802	6,80	8,50
21	5,804	6,70	7,40
21	5,816	4,60	5,00
21	6,125	5,00	5,70
21	6,289	3,10	3,50
21	6,308	4,20	4,70
22	4,869	3,50	4,00
22	4,870	5,70	6,60
22	4,915	4,50	4,90
22	5,199	1,90	1,70
22	5,200	2,20	2,40
22	5,206	3,00	3,50
22	5,536	1,90	1,70
22	5,536	1,70	1,50
22	5,553	1,90	2,00
23	4,911	10,90	13,30
23	5,176	9,40	10,50
23	5,270	9,70	11,70
23	5,286	9,50	11,50
23	5,308	9,30	12,00
23	5,704	4,80	5,20
23	5,707	6,10	6,70
23	5,750	4,60	5,60
23	6,056	3,40	4,70
23	6,064	4,50	4,80
23	6,087	2,80	3,60
24	4,202	9,62	13,84
24	4,537	7,96	9,42
24	4,722	5,13	5,69
24	4,986	2,47	3,07
24	5,043	2,52	2,29
24	5,091	4,22	4,40
24	5,290	1,48	1,48
24	5,344	1,81	1,74
24	5,507	1,86	1,96
25	4,881	1,89	1,65

25	4,887	1,81	1,95
25	4,954	1,77	1,33
25	5,346	1,26	0,46
25	5,734	0,55	-1,18
25	5,740	0,34	-1,52
25	5,873	0,44	-0,57
26	4,117	7,57	12,78
26	4,224	6,53	14,20
26	4,334	6,43	11,08
26	4,346	4,28	8,17
26	4,704	2,84	6,30
26	4,748	1,90	5,02
26	4,772	3,83	7,89
26	5,126	1,20	3,33
26	5,146	3,74	7,21
26	5,165	1,60	5,59
27	4,040	6,20	11,50
27	4,042	4,80	7,10
27	4,146	6,60	11,90
27	4,458	2,60	3,10
27	4,480	2,00	3,20
27	4,523	4,20	5,10
27	4,933	0,40	0,10
27	4,964	0,50	0,70
27	5,019	1,10	2,50
28	4,623	7,60	11,20
28	4,739	7,30	9,90
28	4,973	4,60	5,60
28	5,429	3,80	5,00
28	5,446	2,10	3,30
28	5,447	4,10	4,30
28	5,837	3,70	4,10
28	5,907	0,70	1,10
28	5,941	1,90	1,90
29	5,604	3,30	5,00
29	5,643	4,30	6,70
29	5,964	2,70	4,60
29	6,019	2,30	4,00
29	6,046	1,70	3,30
29	6,298	1,90	3,10
29	6,314	1,00	2,30
29	6,419	1,40	3,00
30	4,899	4,65	7,17
30	4,918	4,76	6,99
30	4,931	3,87	6,24

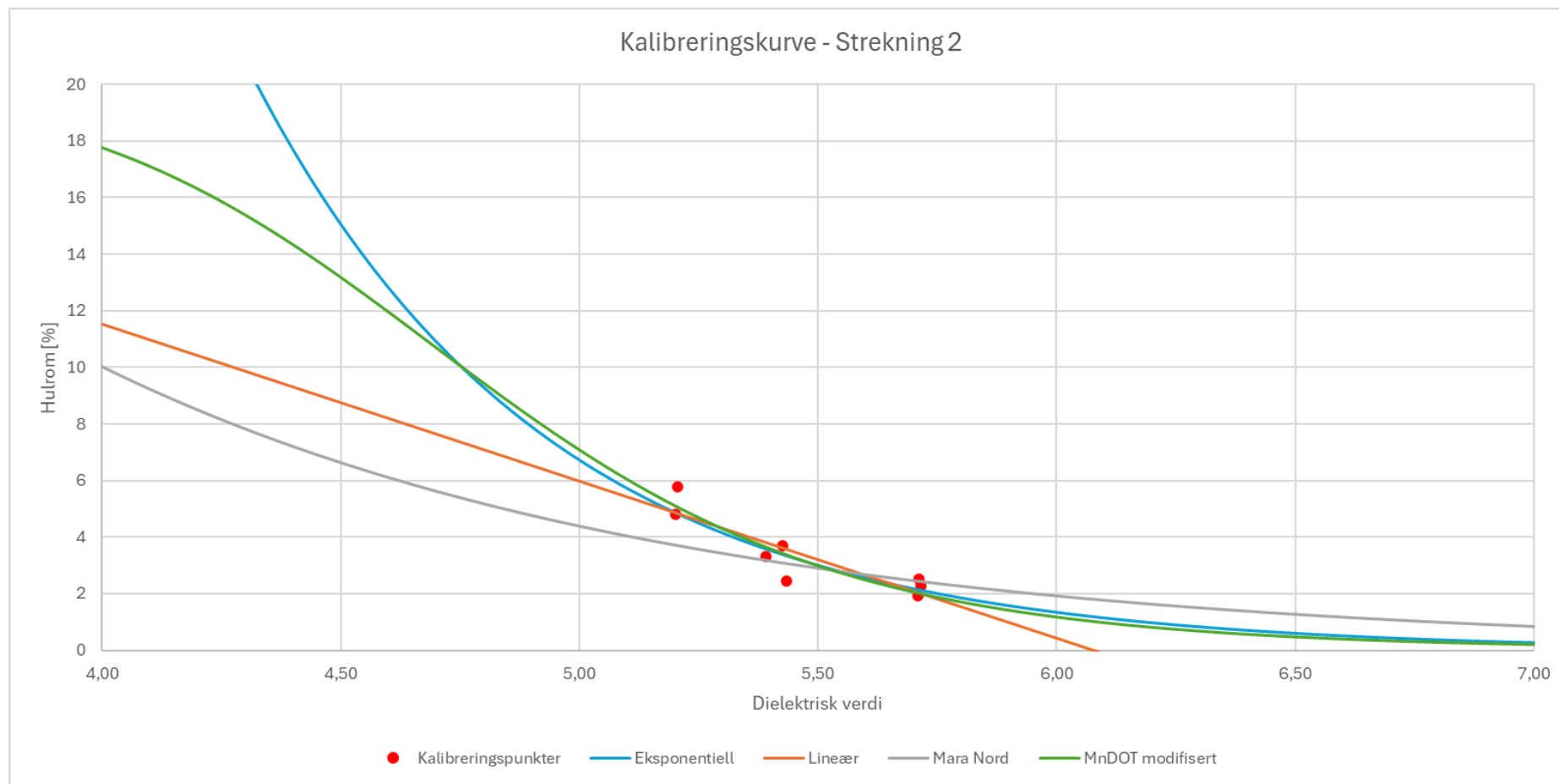
30	5,177	3,38	5,82
30	5,180	2,91	4,60
30	5,482	3,33	5,41
30	5,548	2,45	4,63
30	5,622	3,04	4,77
H1	4,07	8,62	13,04
H1	4,16	8,74	12,75
H1	4,19	7,62	10,15
H1	4,60	3,99	4,35
H1	4,55	6,43	5,8
H1	4,60	5,16	5,75
H1	4,95	0,84	10,45
H1	4,97	0,75	1,05
H1	5,02	0,83	1,16
H2	4,02	7,79	13,27
H2	4,04	6,41	11,22
H2	4,40	2,68	2,67
H2	4,42	2,27	3,01
H2	4,45	2,62	3,5
H2	4,83	1,17	1,03
H2	4,89	1,1	1,38
H2	4,90	0,98	0,23
H3	4,12	7,57	12,78
H3	4,22	6,53	14,2
H3	4,33	6,43	11,08
H3	4,34	4,28	8,17
H3	4,70	2,84	6,3
H3	4,75	1,9	5,02
H3	4,77	3,83	7,89
H3	5,13	1,2	3,33
H3	5,14	3,74	7,21
H3	5,16	1,6	5,59
H4	4,91	10,9	13,3
H4	5,18	9,4	10,5
H4	5,27	9,7	11,7
H4	5,29	9,5	11,5
H4	5,31	9,3	12
H4	5,70	4,8	5,2
H4	5,71	6,1	6,7
H4	5,75	4,6	5,6
H4	6,06	3,4	4,7
H4	6,06	4,5	4,8
H4	6,09	2,8	3,6
H5	5,23	10,2	12,8
H5	5,27	10,7	13,5

H5	5,28	9,7	12
H5	5,80	6,7	7,4
H5	5,80	4,6	5
H5	5,82	5	5,7
H5	6,12	3,1	3,5
H5	6,29	4,2	4,7
H5	6,31	3,5	4
H6	4,04	6,2	11,5
H6	4,15	6,6	11,9
H6	4,46	2,6	3,1
H6	4,48	2	3,2
H6	4,52	4,2	5,1
H6	4,93	0,4	0,1
H6	4,96	0,5	0,7
H6	5,02	1,1	2,5

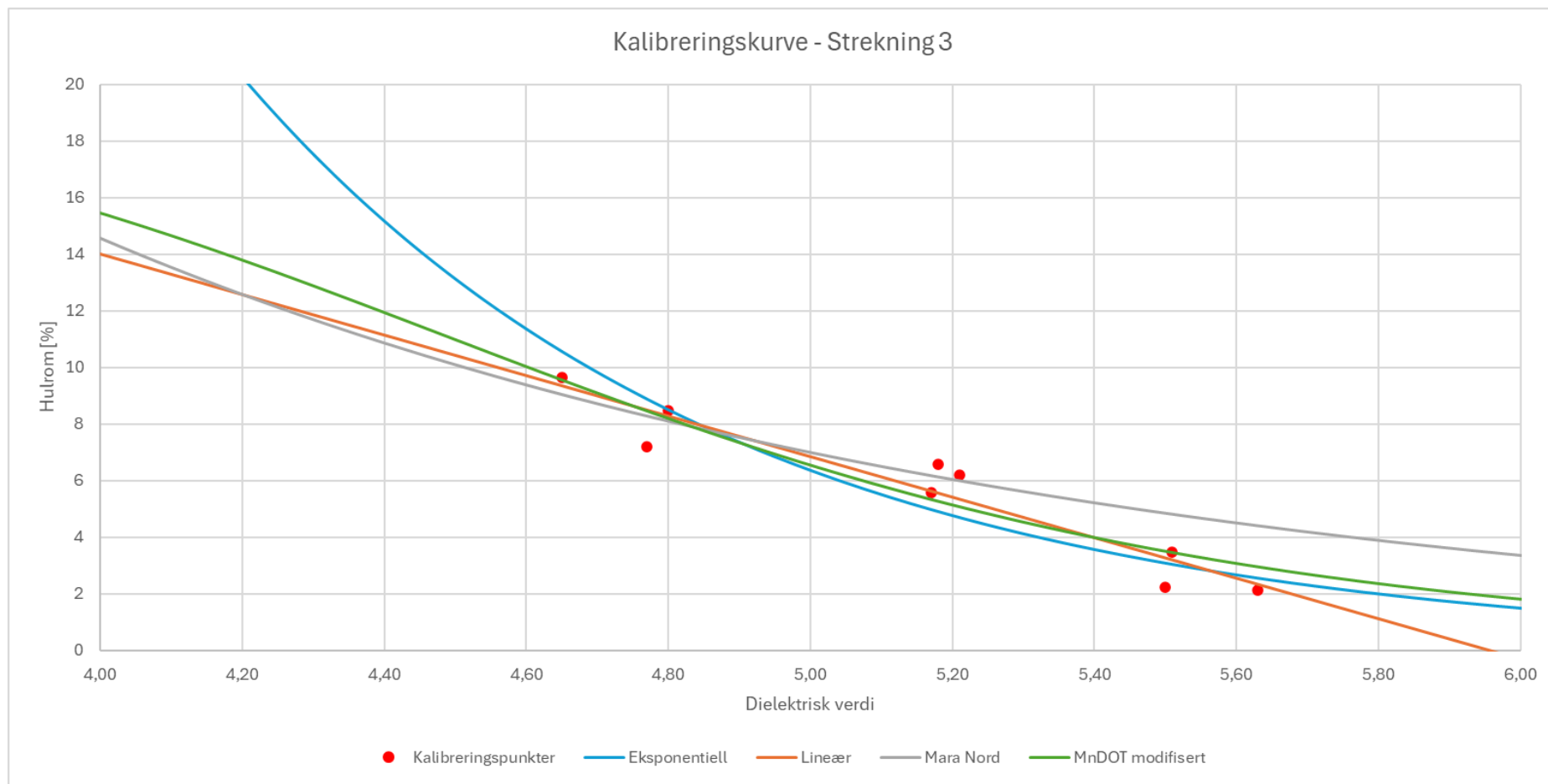
Vedlegg B – Resultater alle strekninger. Kalibreringskurver



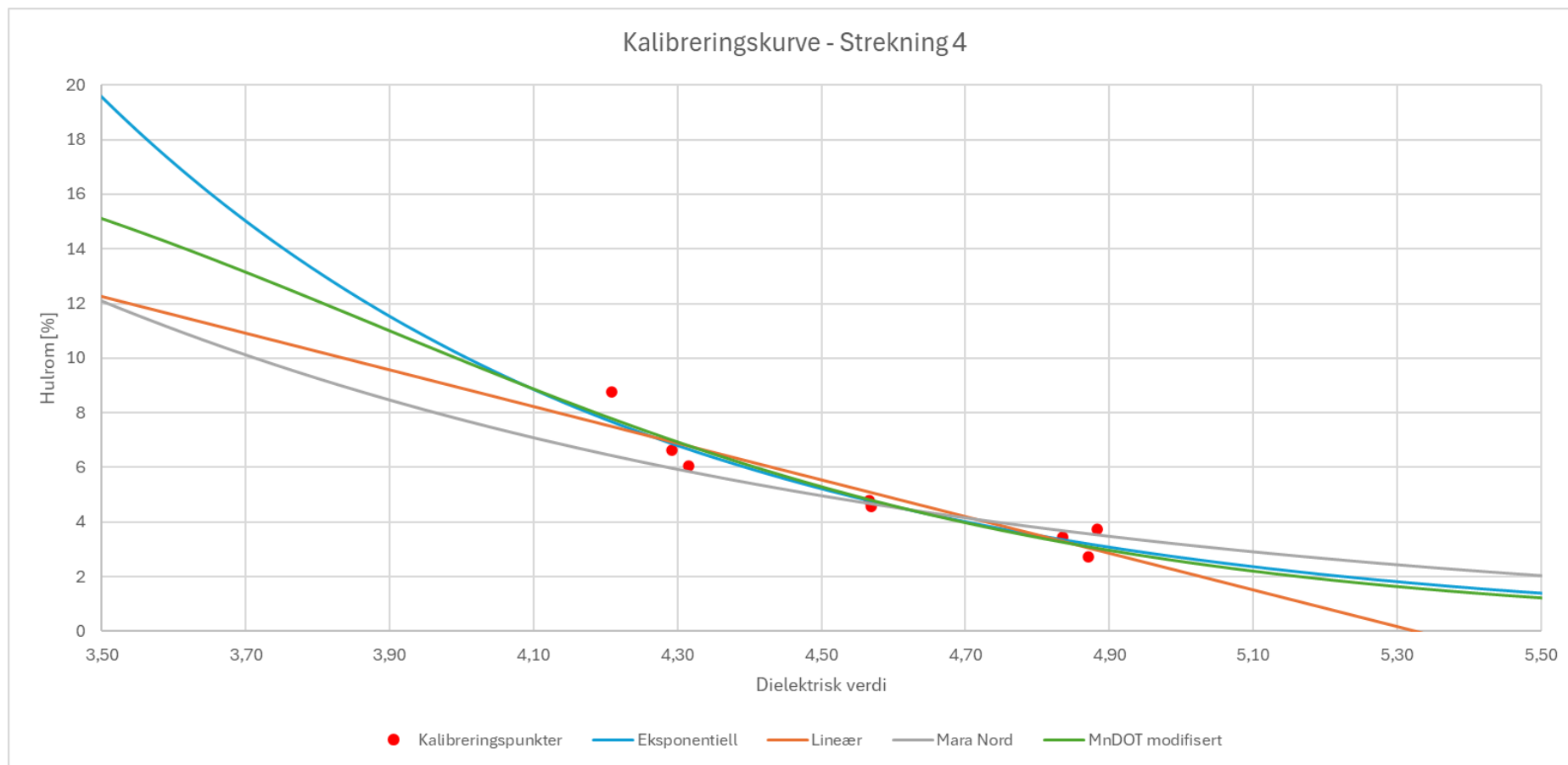
Figur 12 Resultat strekning 1



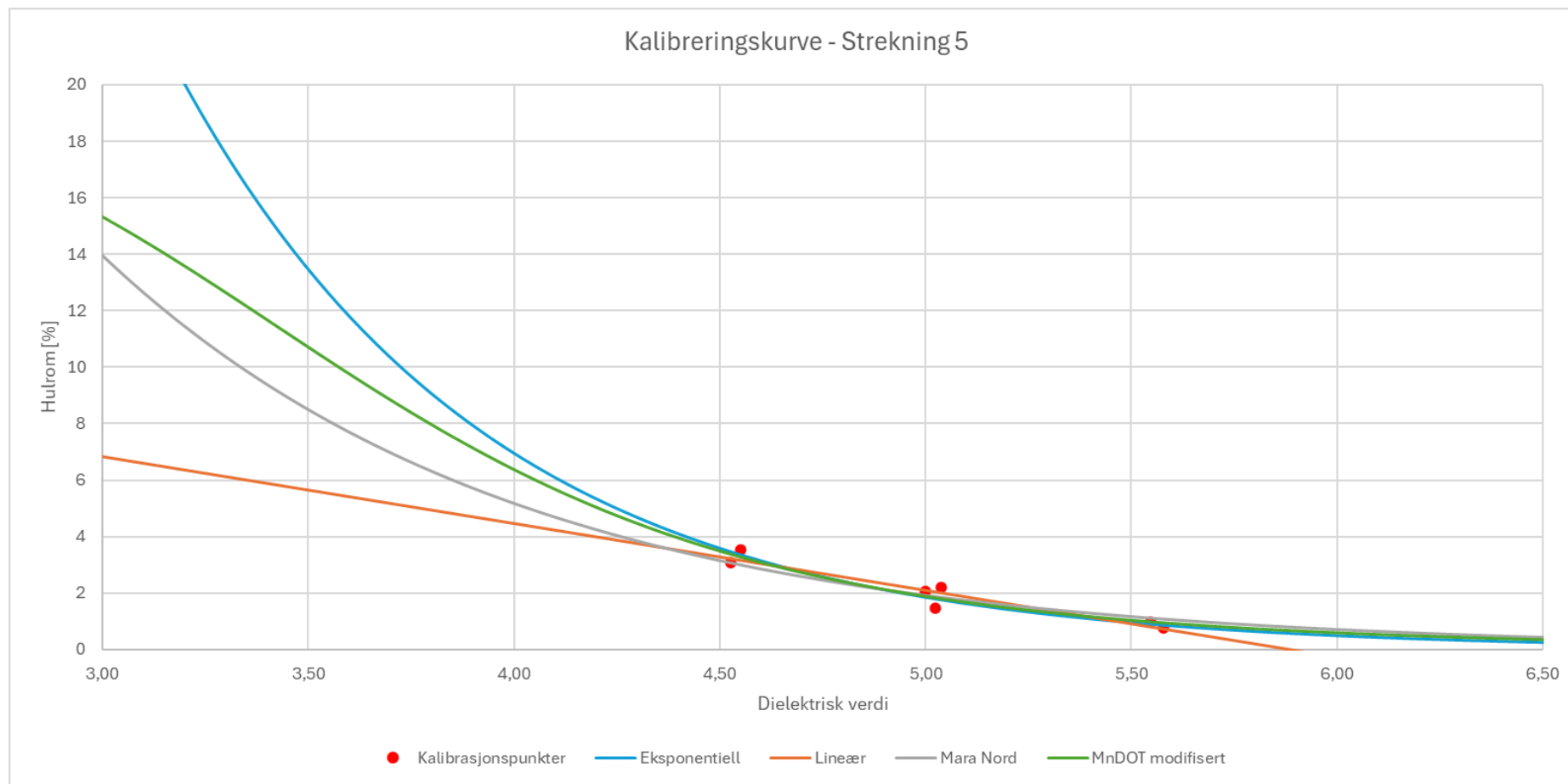
Figur 13 Resultat strekning 2



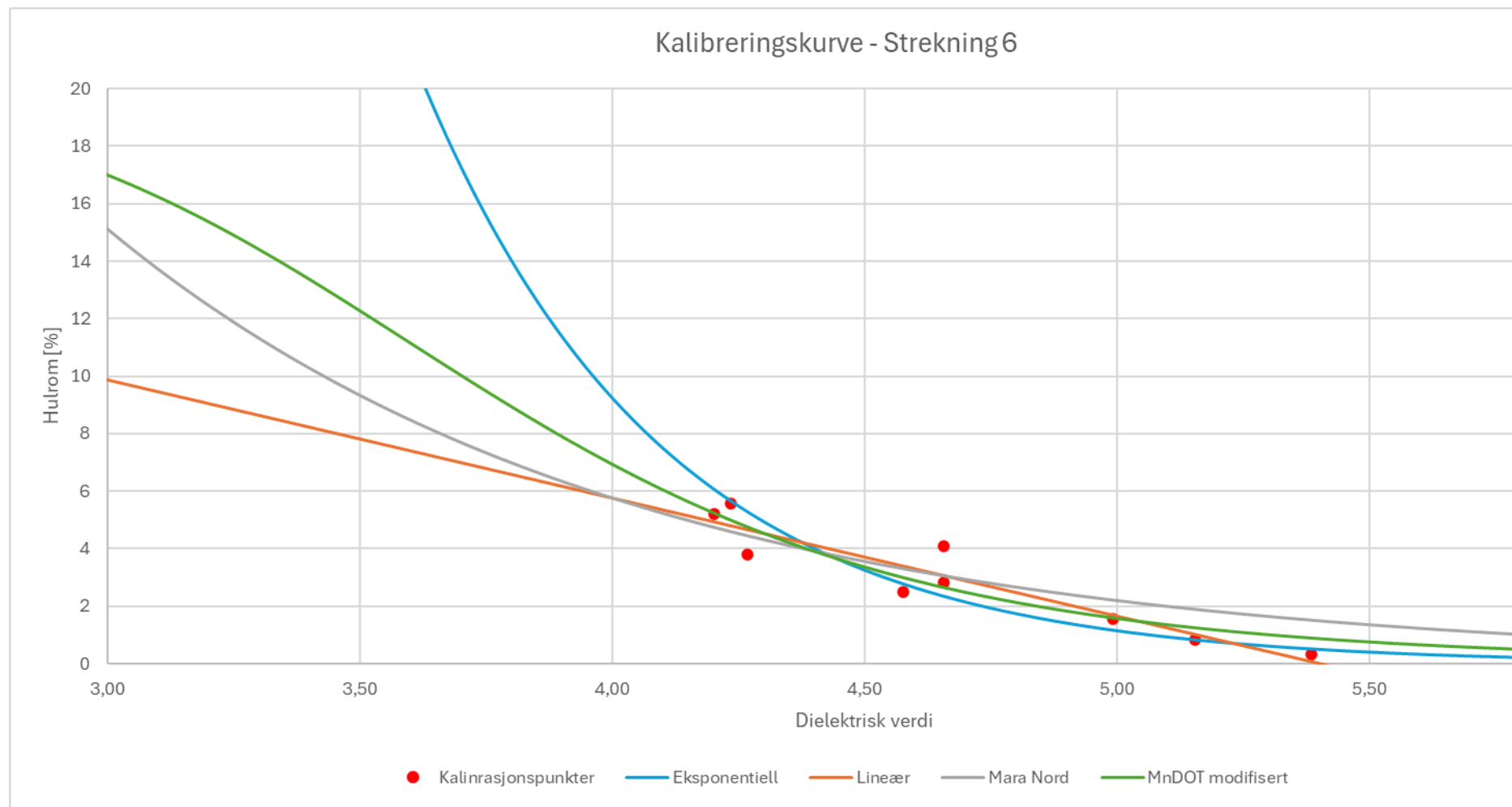
Figur 14 Resultat strekning 3



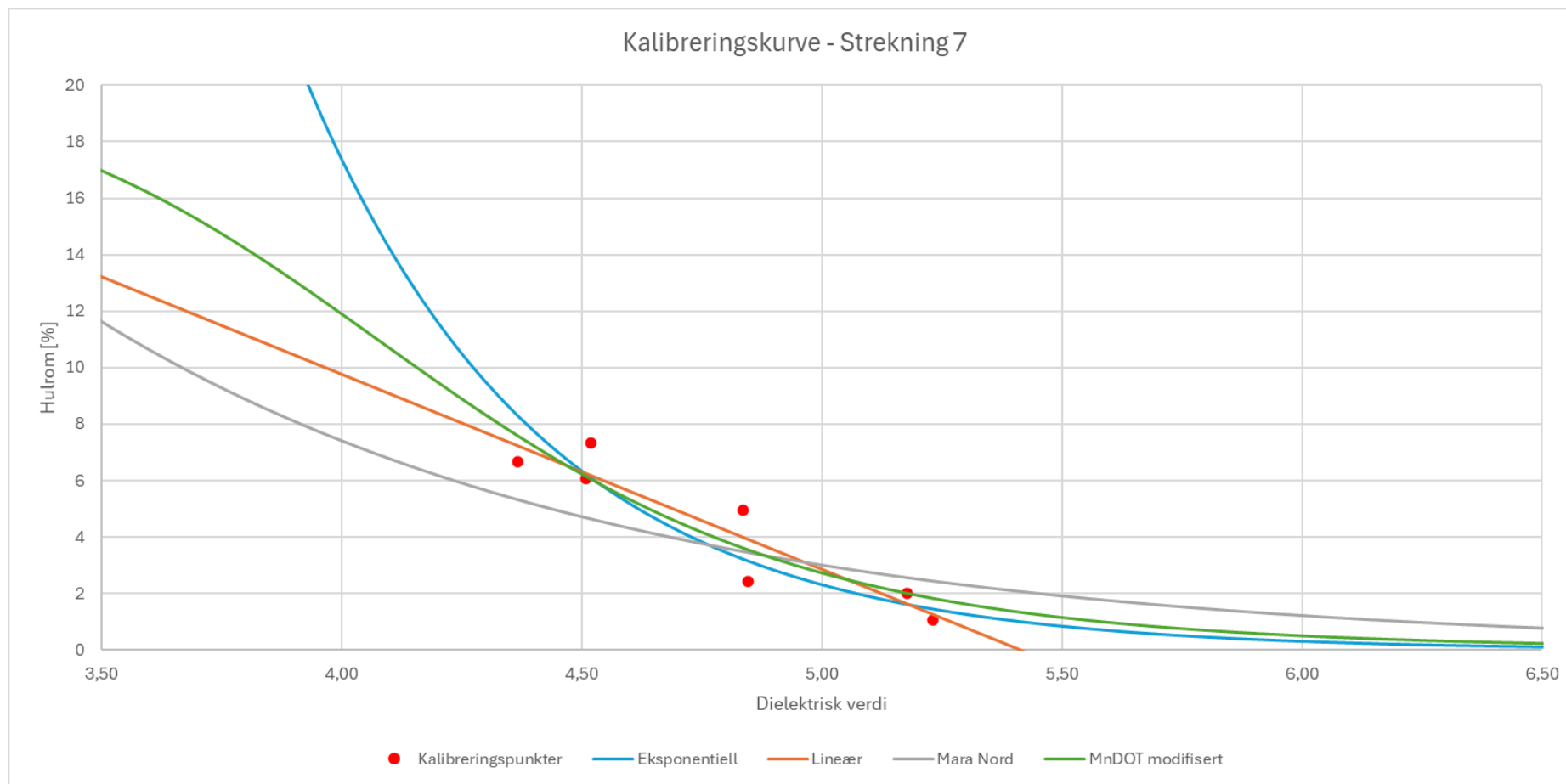
Figur 15 Resultat strekning 4



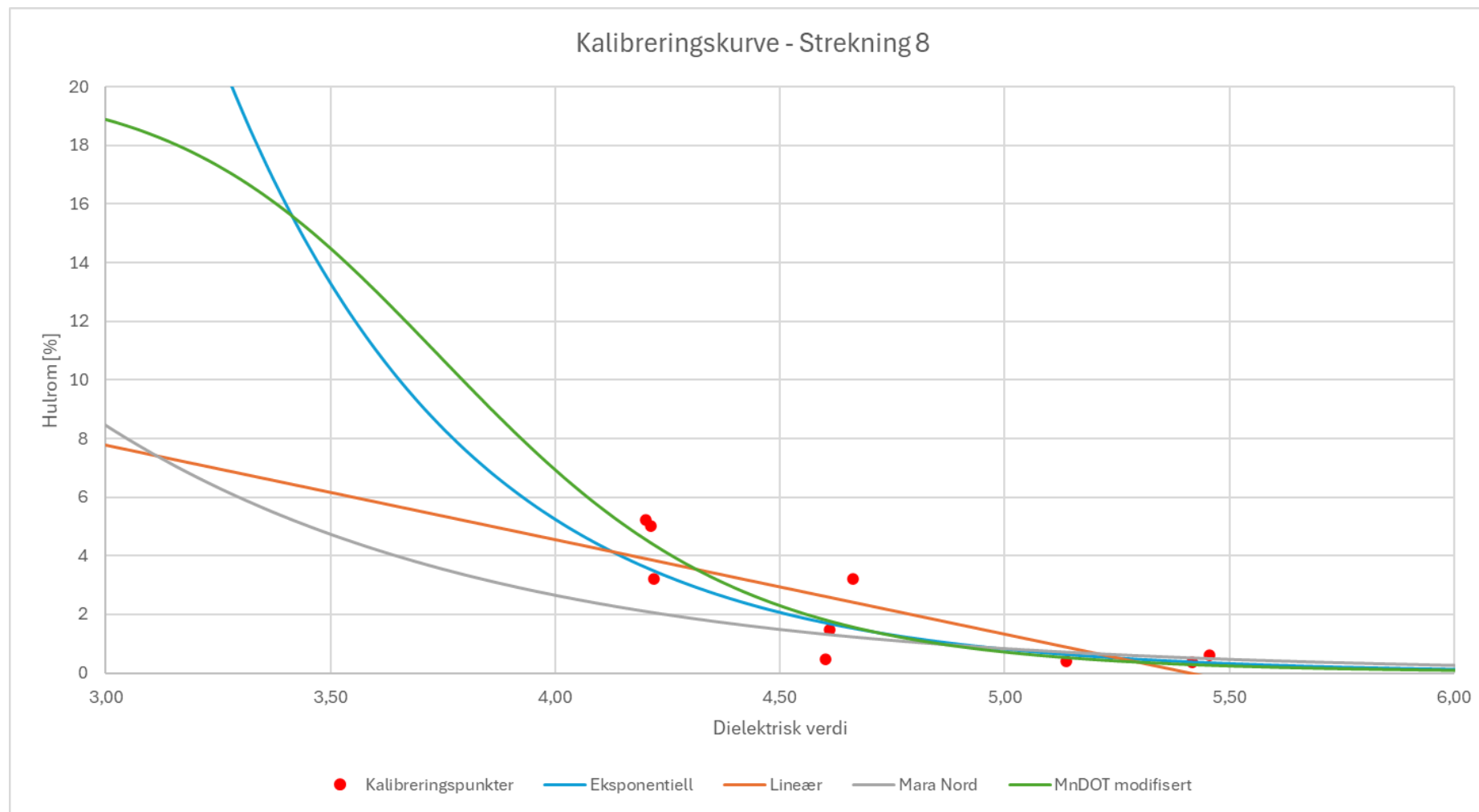
Figur 16 Resultat strekning 5



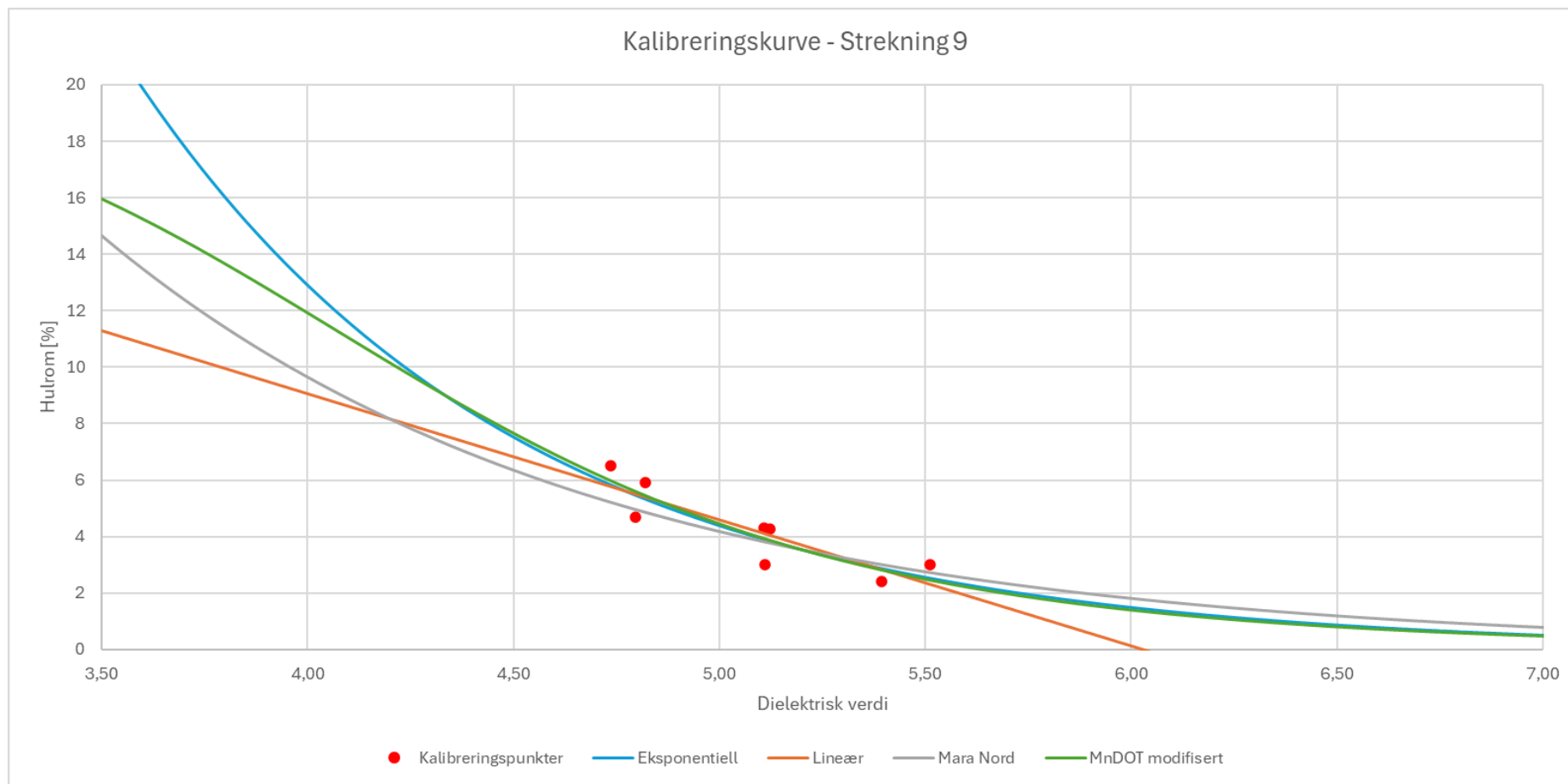
Figur 17 Resultat strekning 6



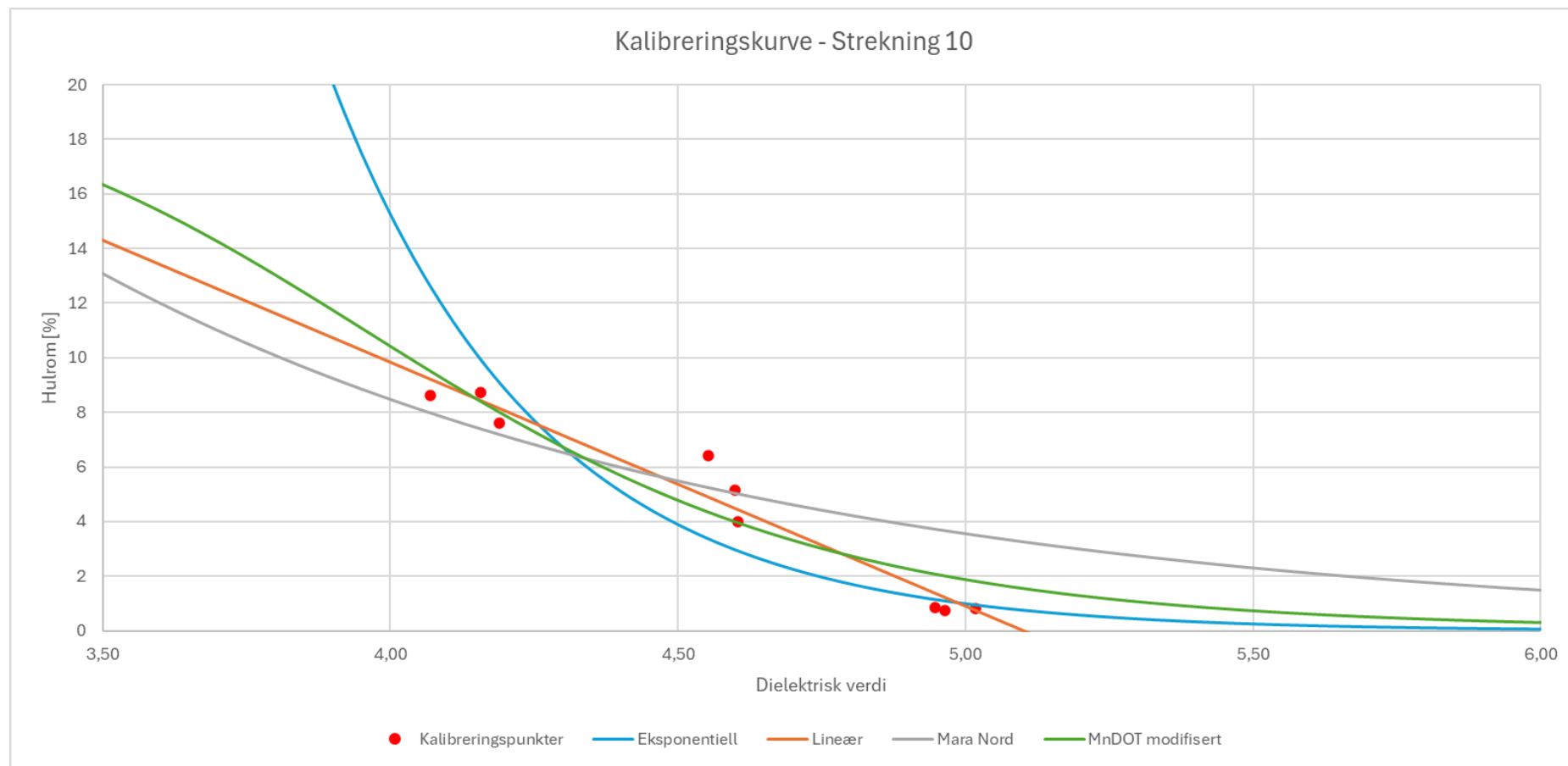
Figur 18 Resultat strekning 7



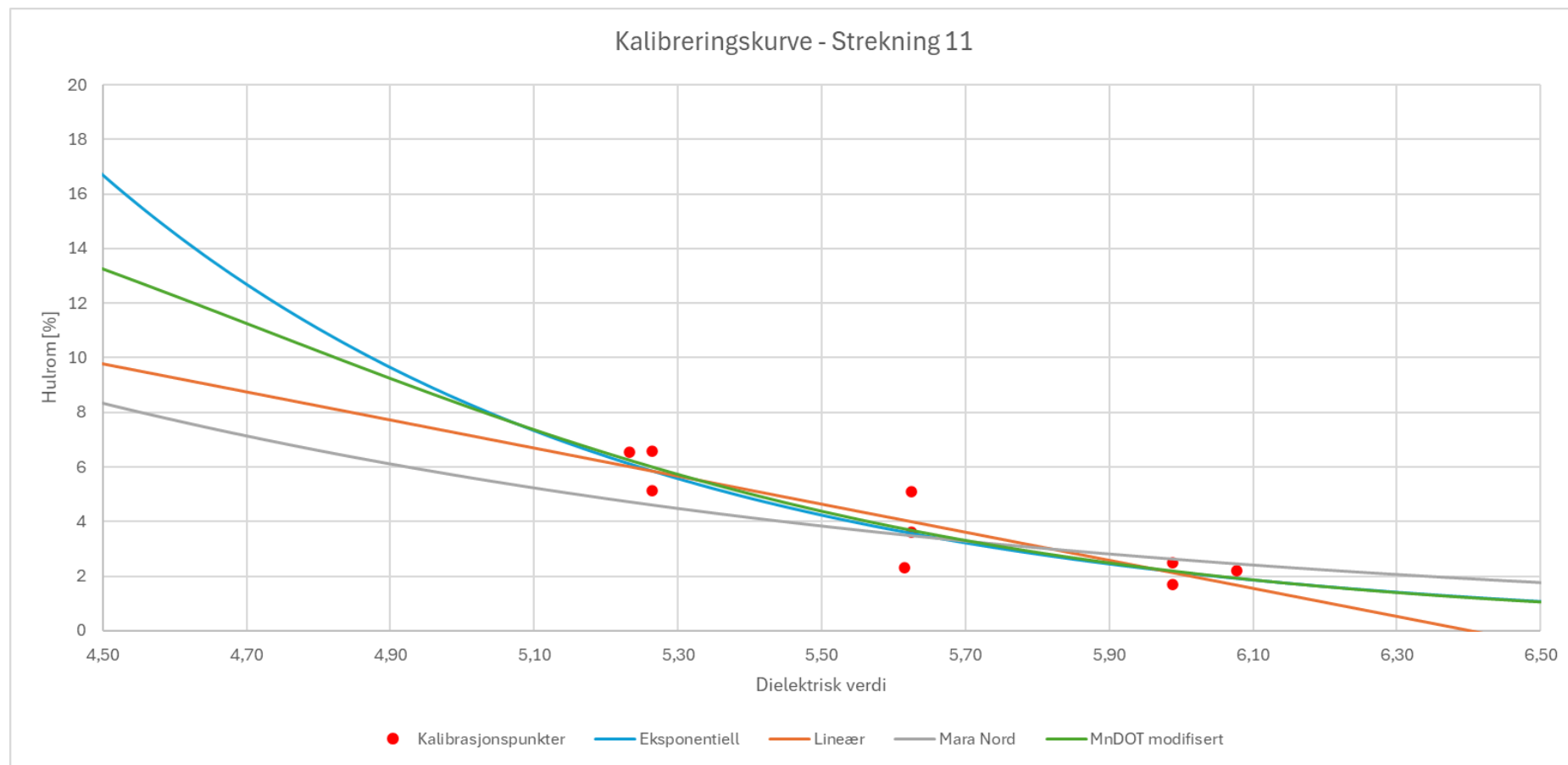
Figur 19 Resultat strekning 8



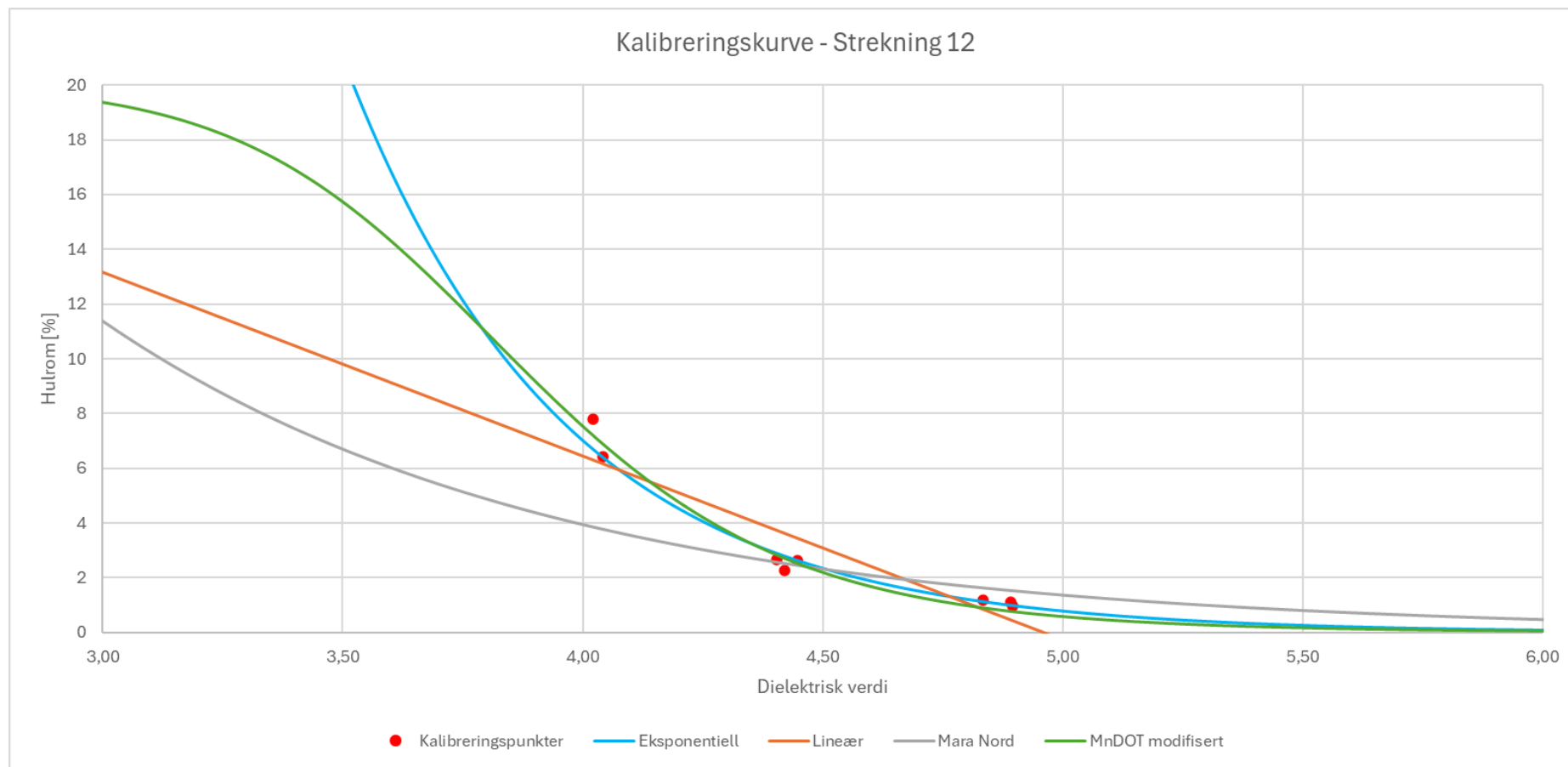
Figur 20 Resultat strekning 9



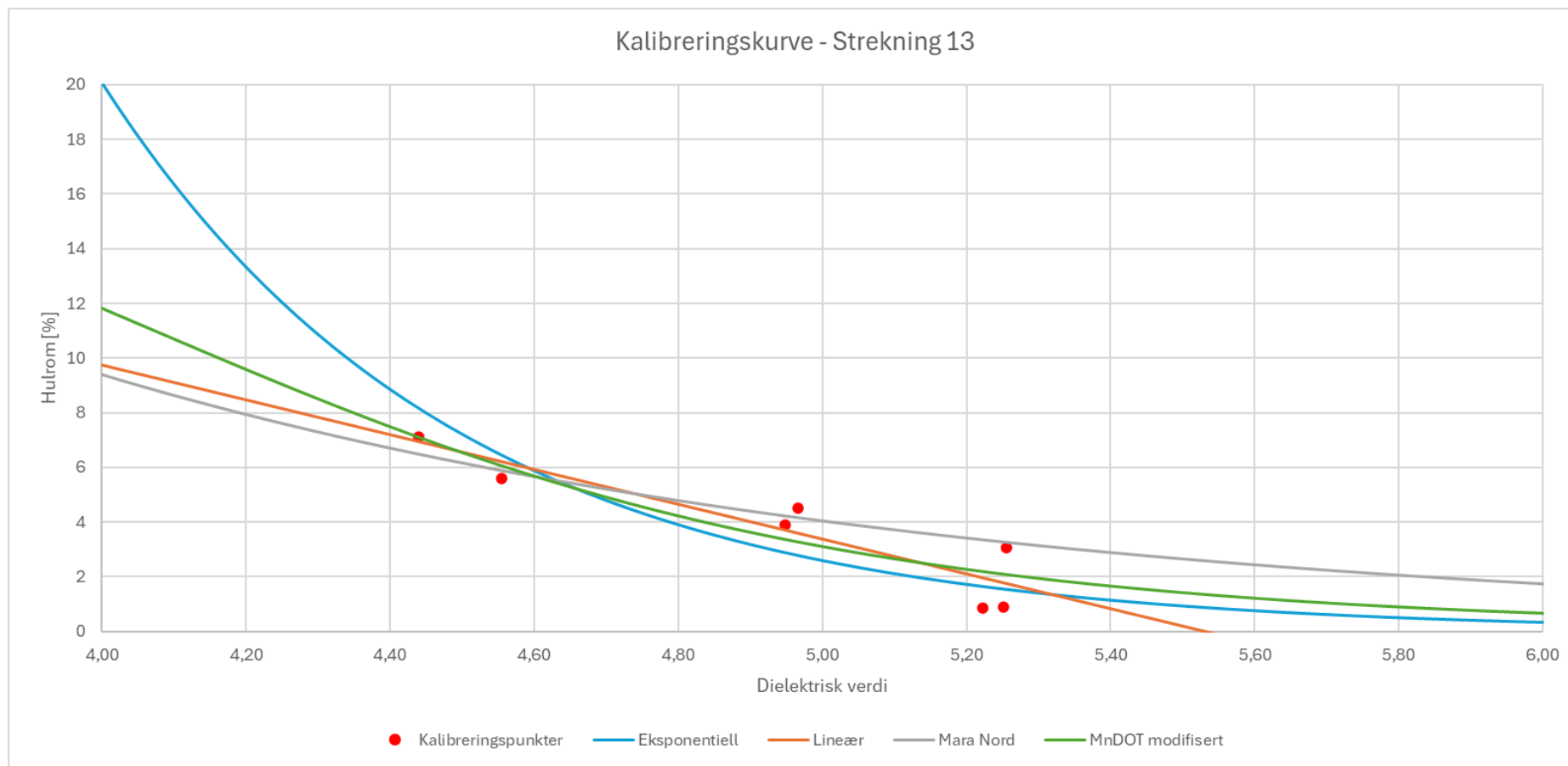
Figur 21 Strekning 10



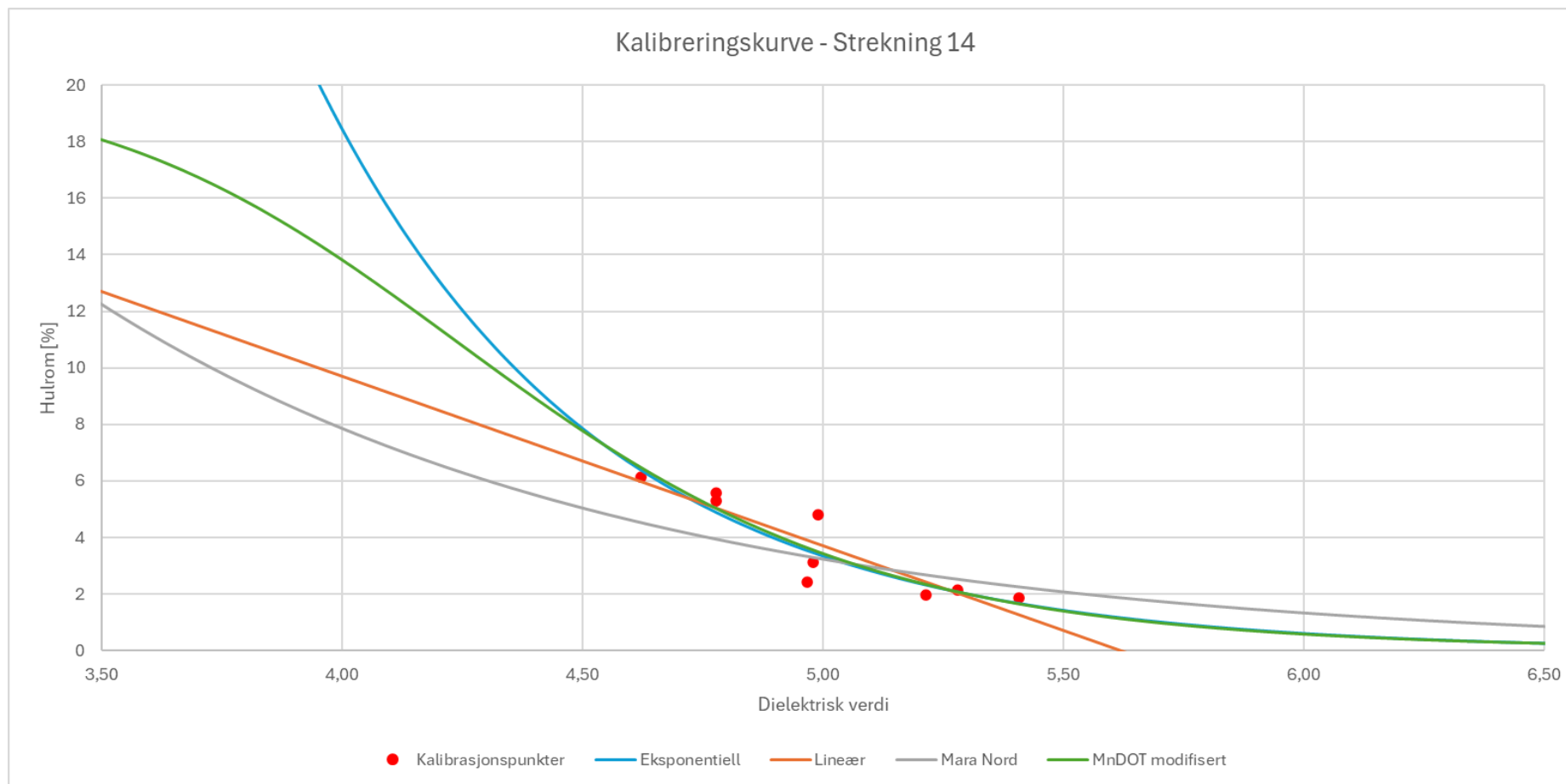
Figur 22 Resultat strekning 11



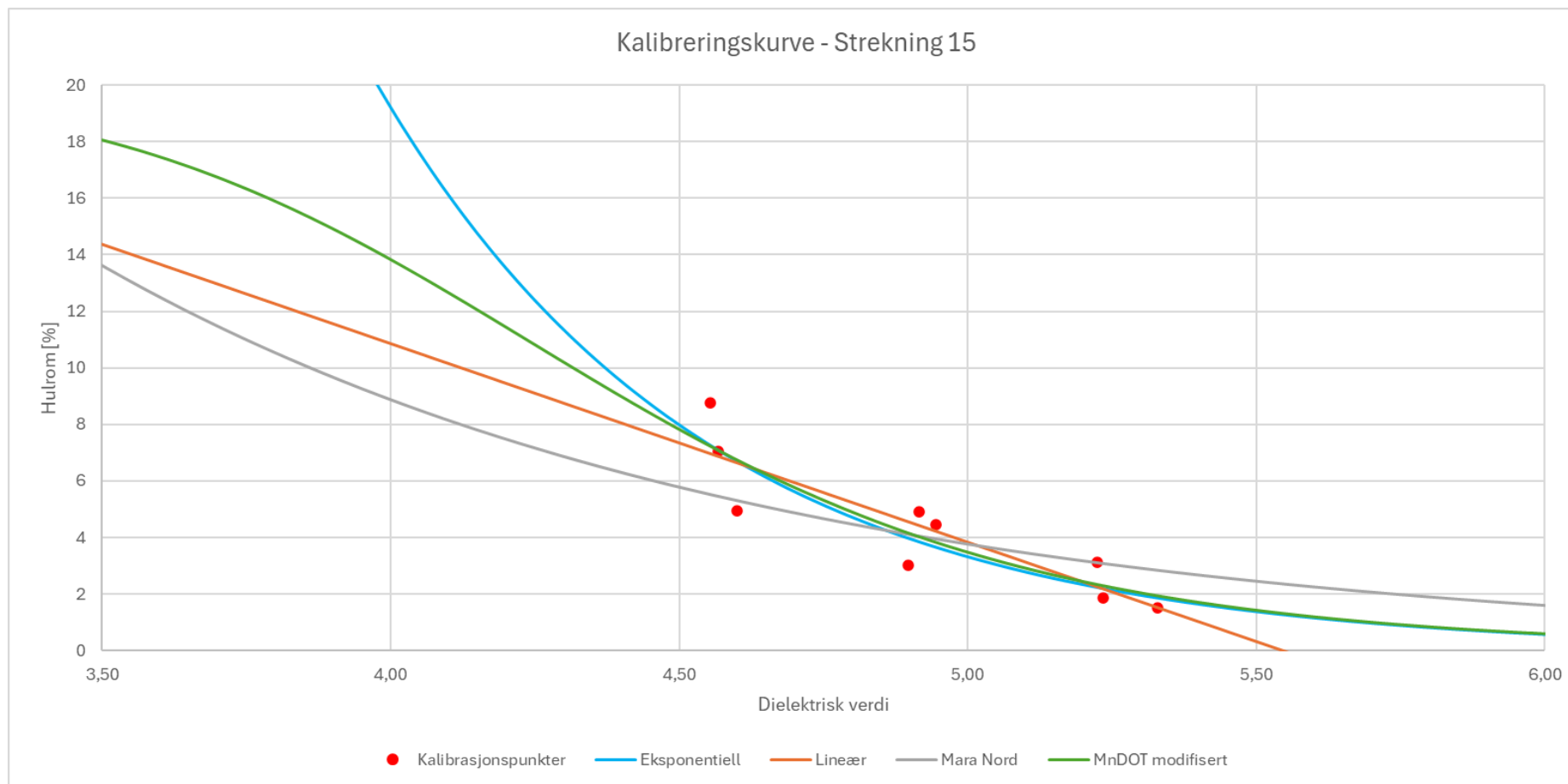
Figur 23 Resultat strekning 12



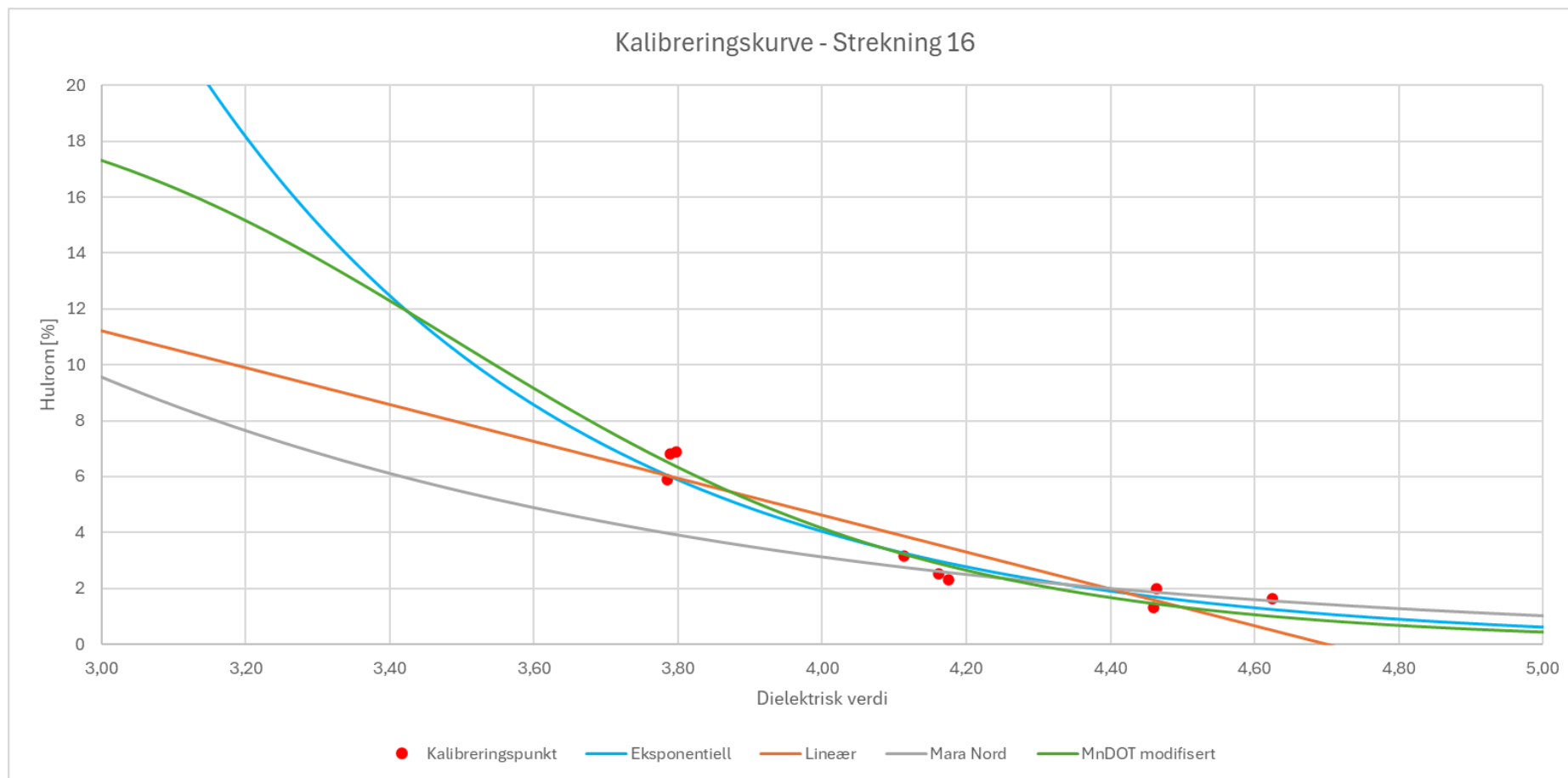
Figur 24 Resultat strekning 13



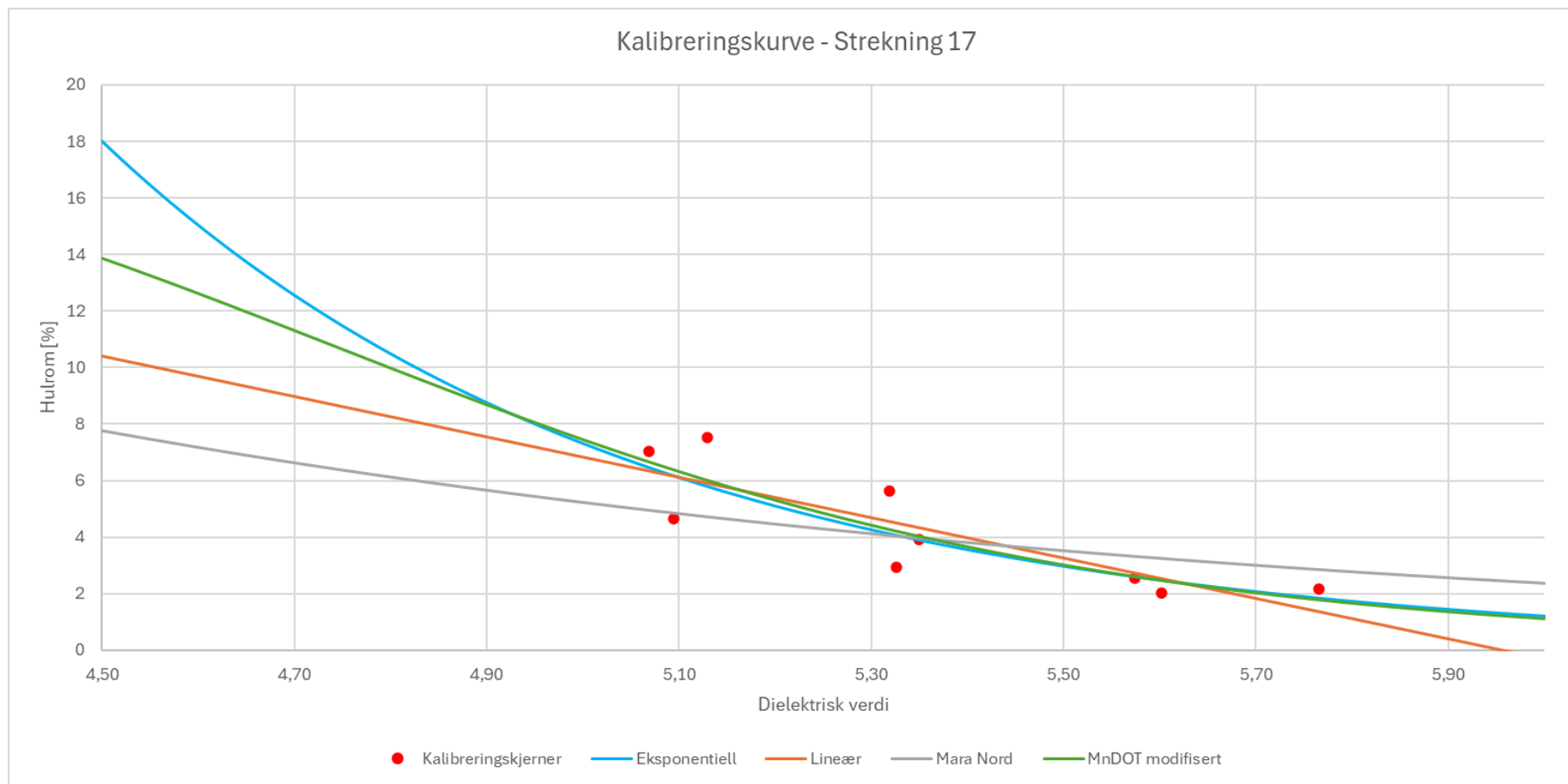
Figur 25 Resultat strekning 14



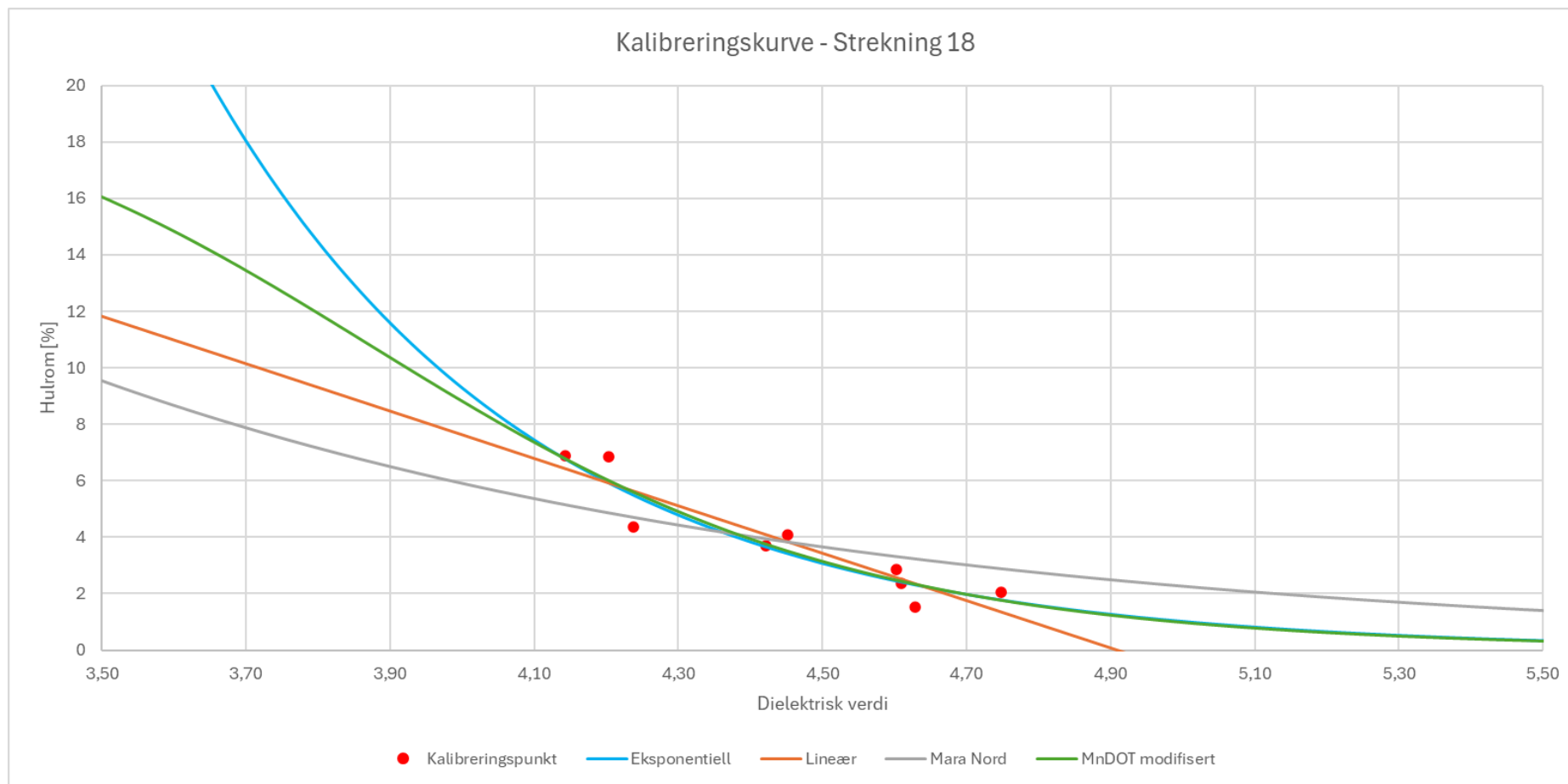
Figur 26 Resultat strekning 15



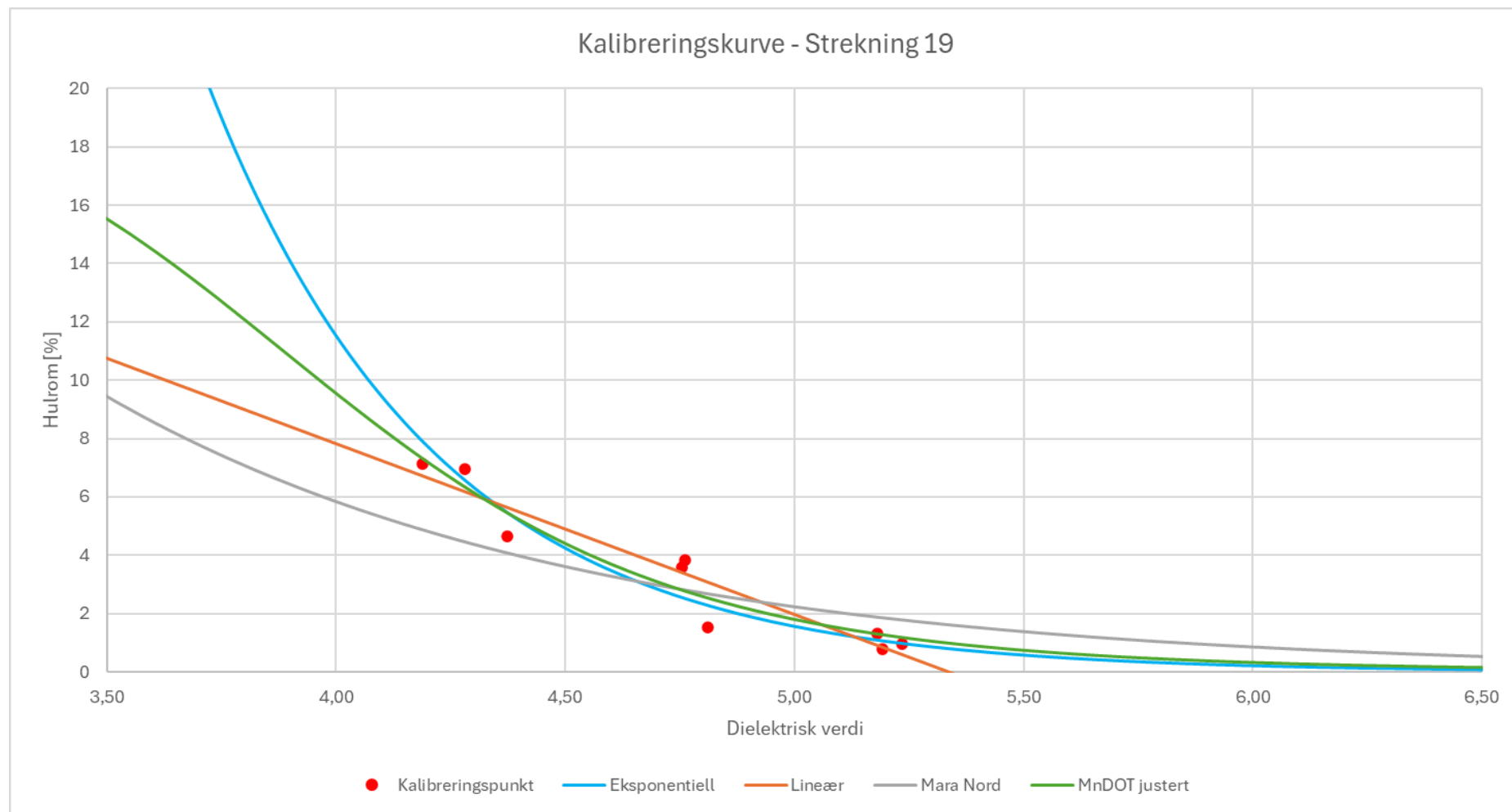
Figur 27 Resultat strekning 16



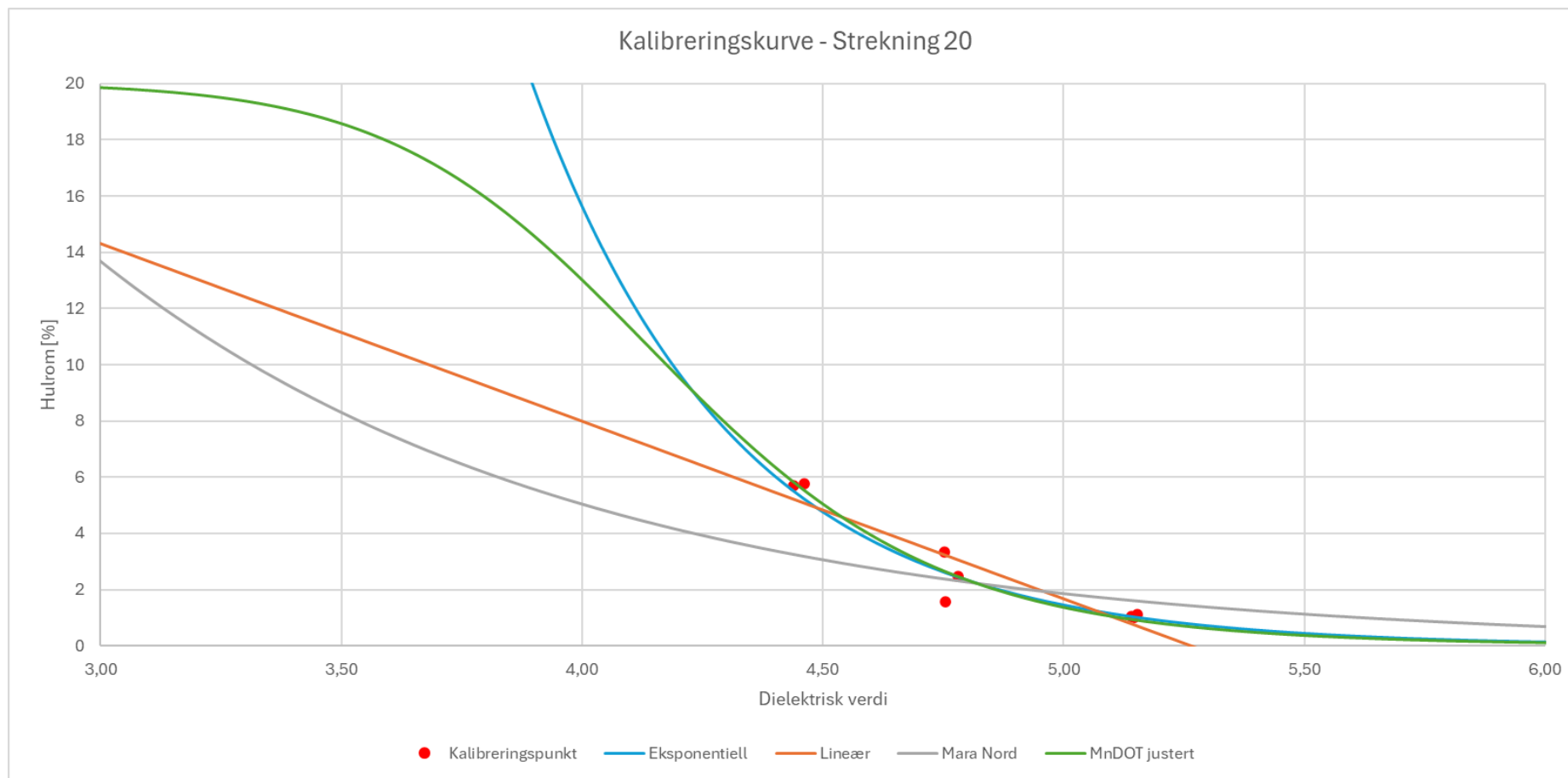
Figur 28 Resultat strekning 17



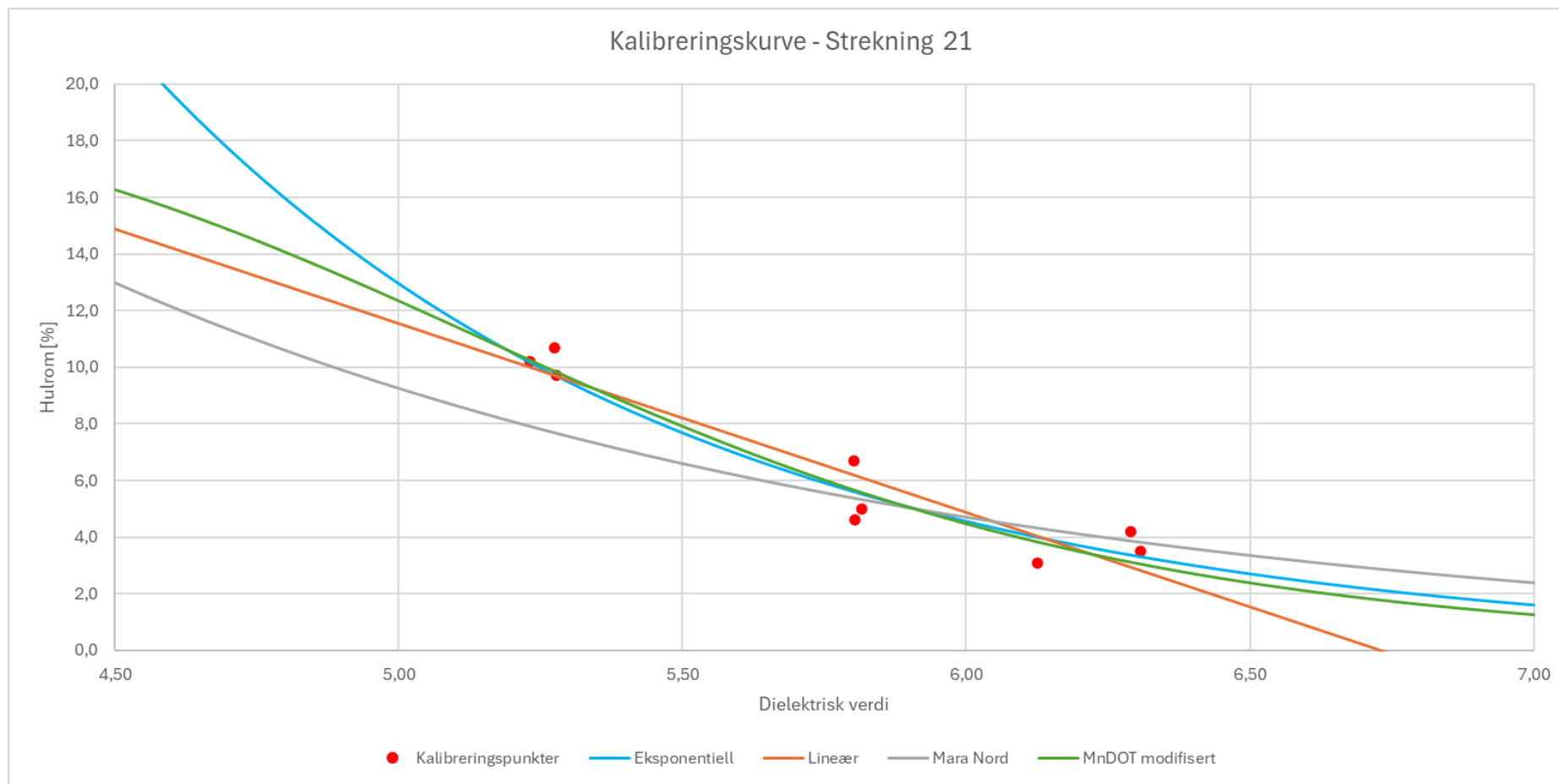
Figur 29 Resultat strekning 18



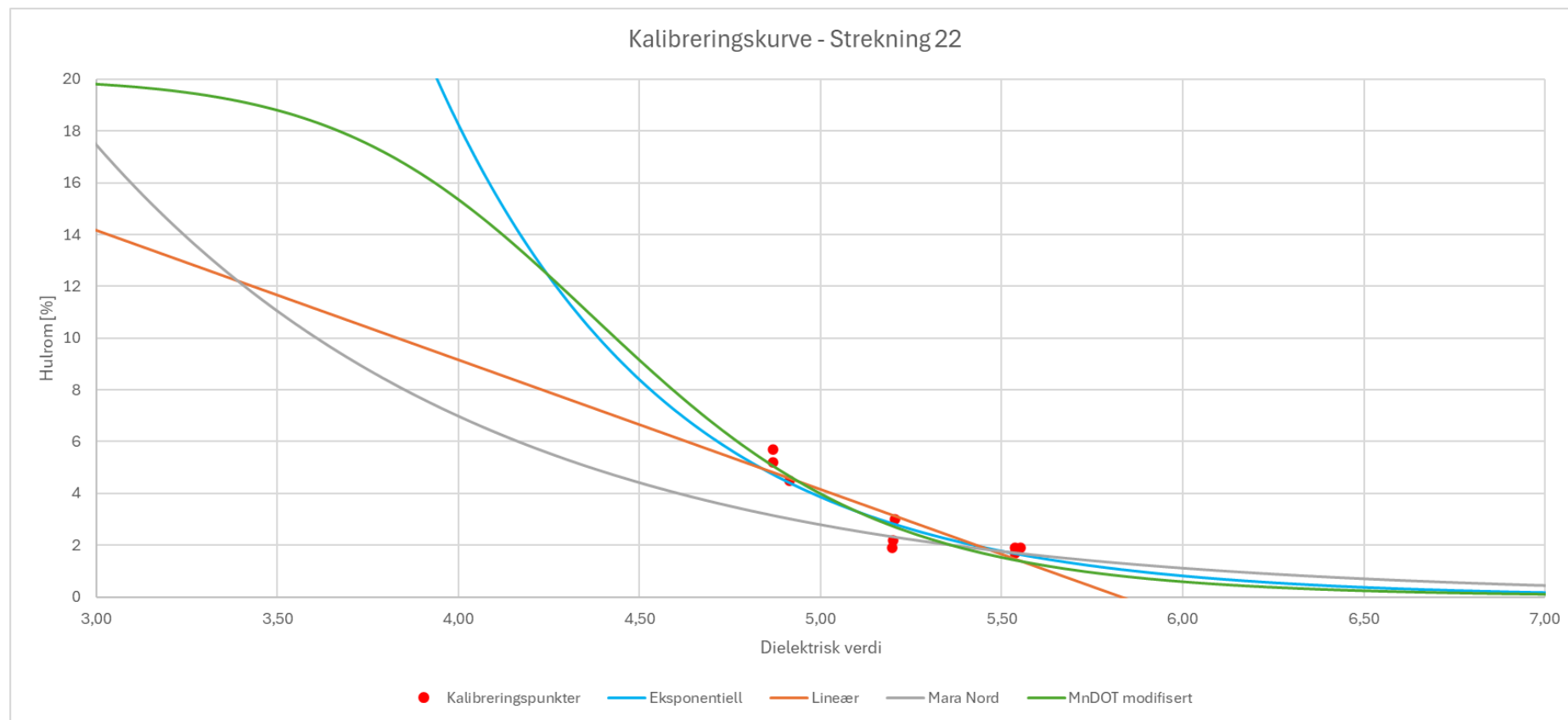
Figur 30 Resultat strekning 19



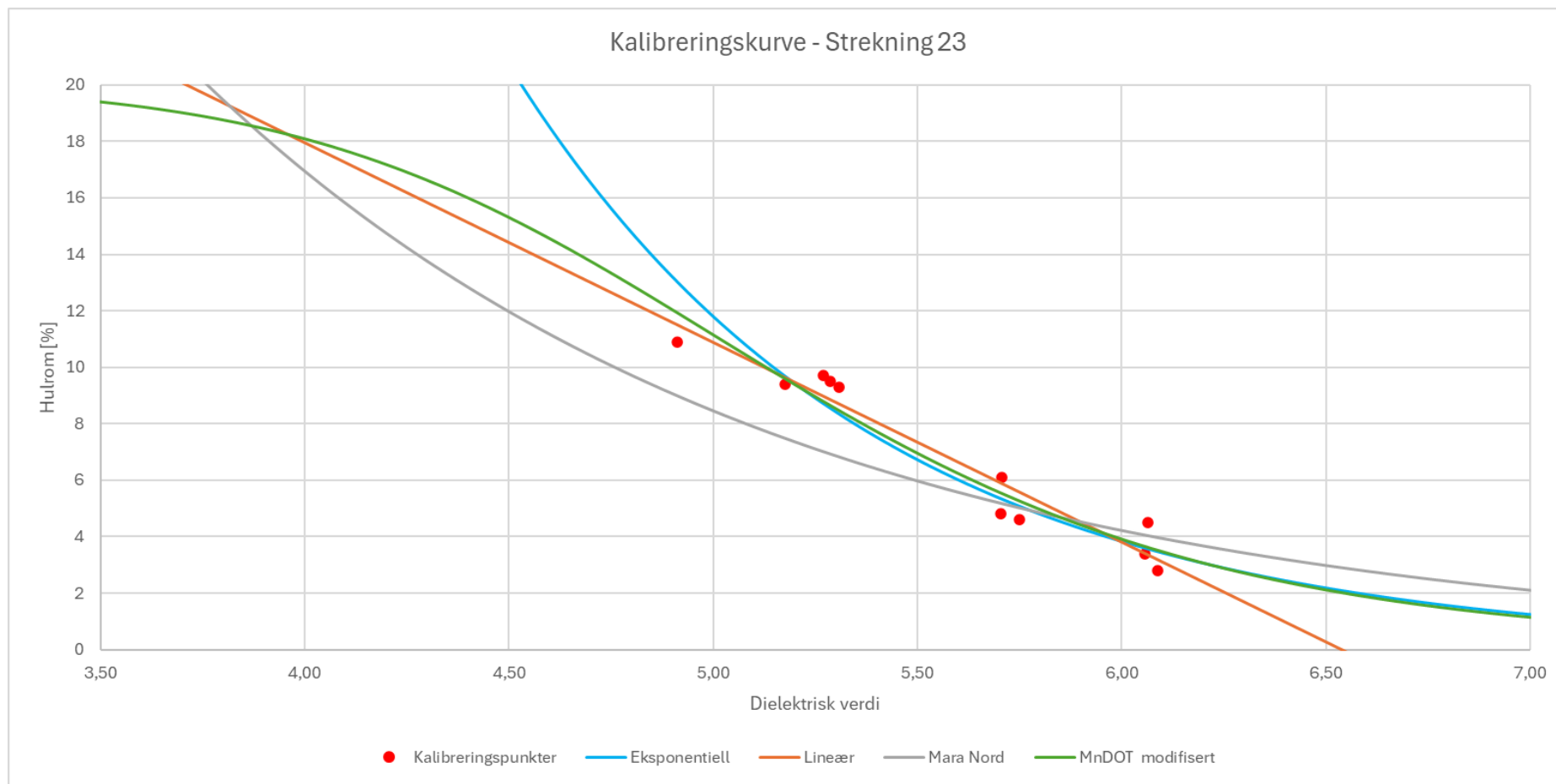
Figur 31 Resultat strekning 20



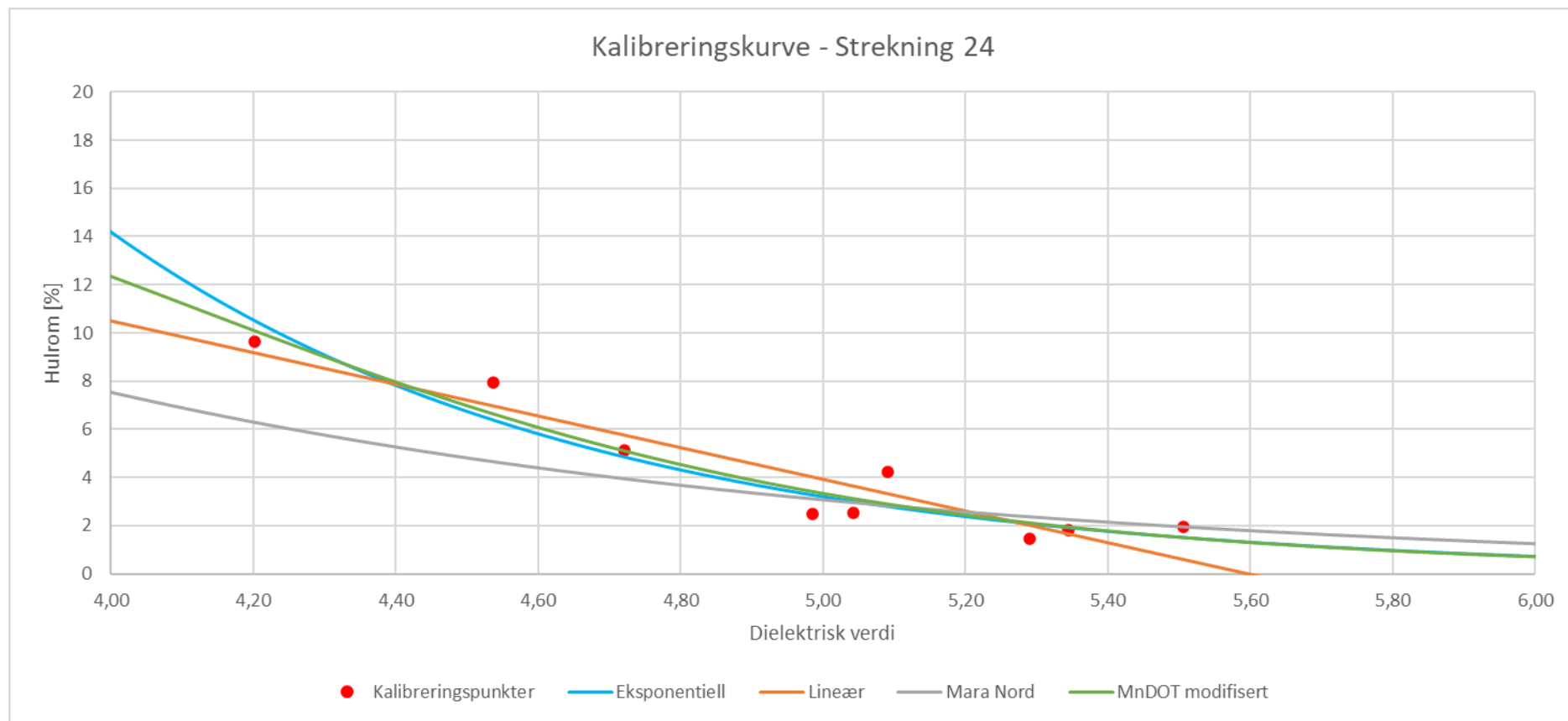
Figur 32 Resultat strekning 21



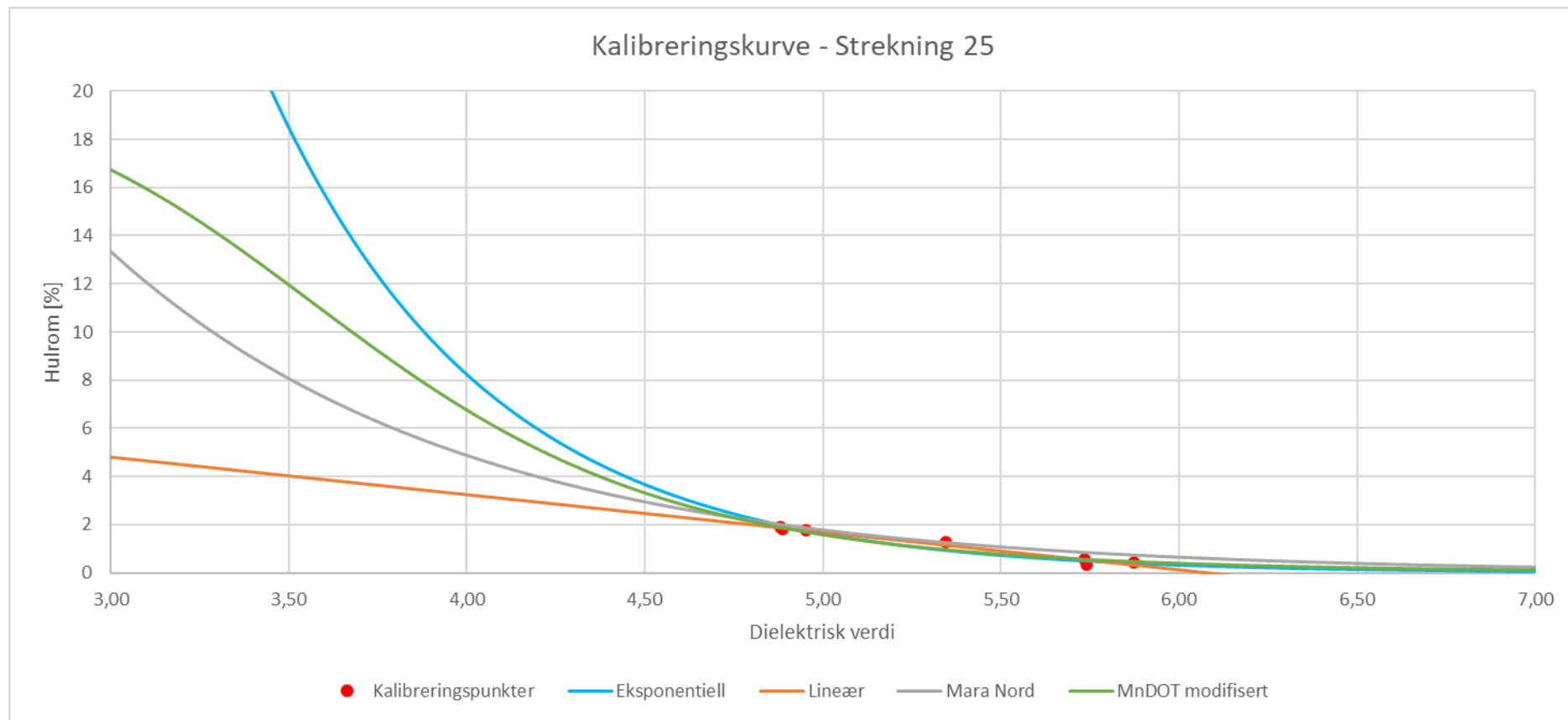
Figur 33 Resultat strekning 22



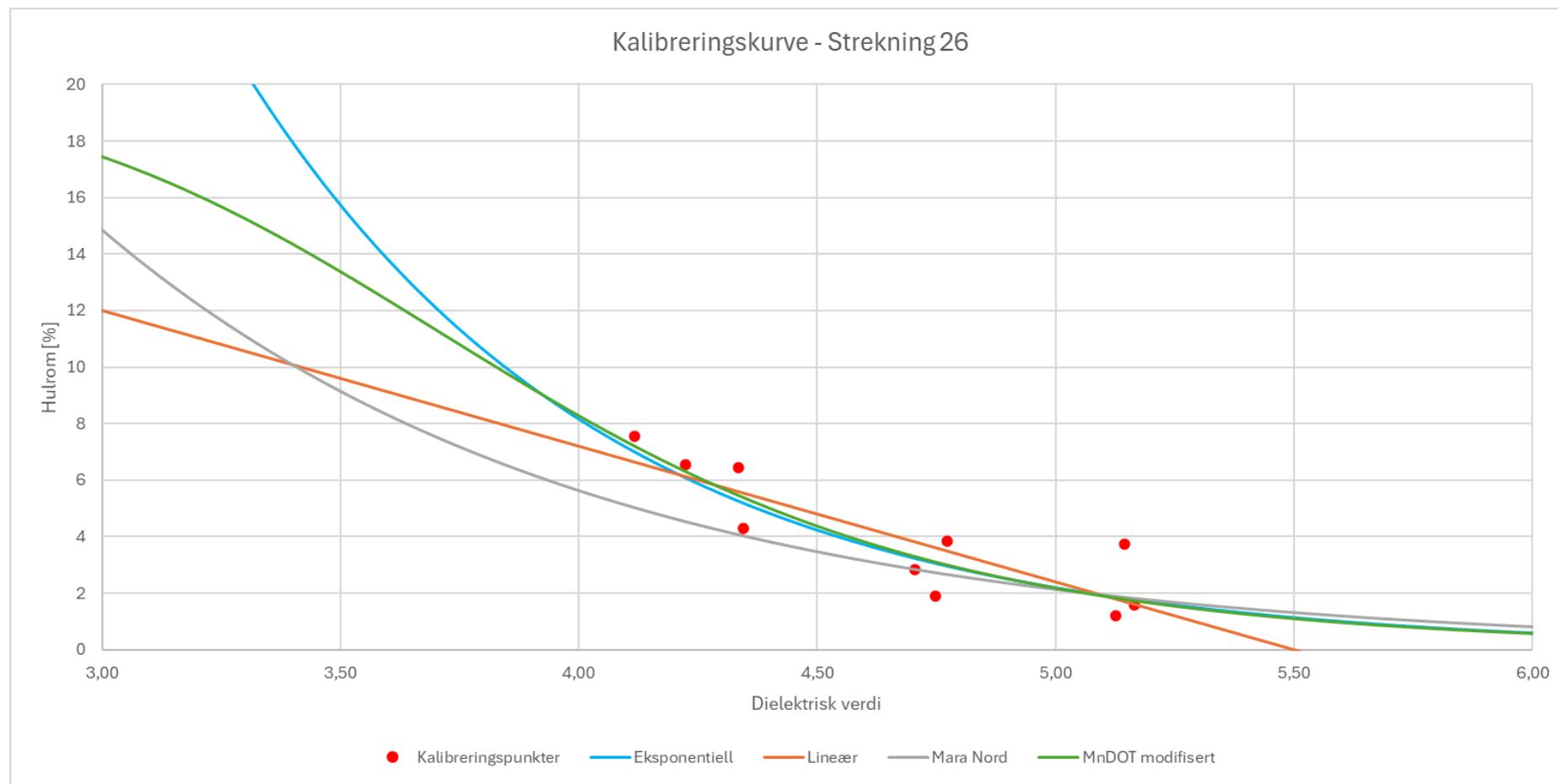
Figur 34 Resultat strekning 23



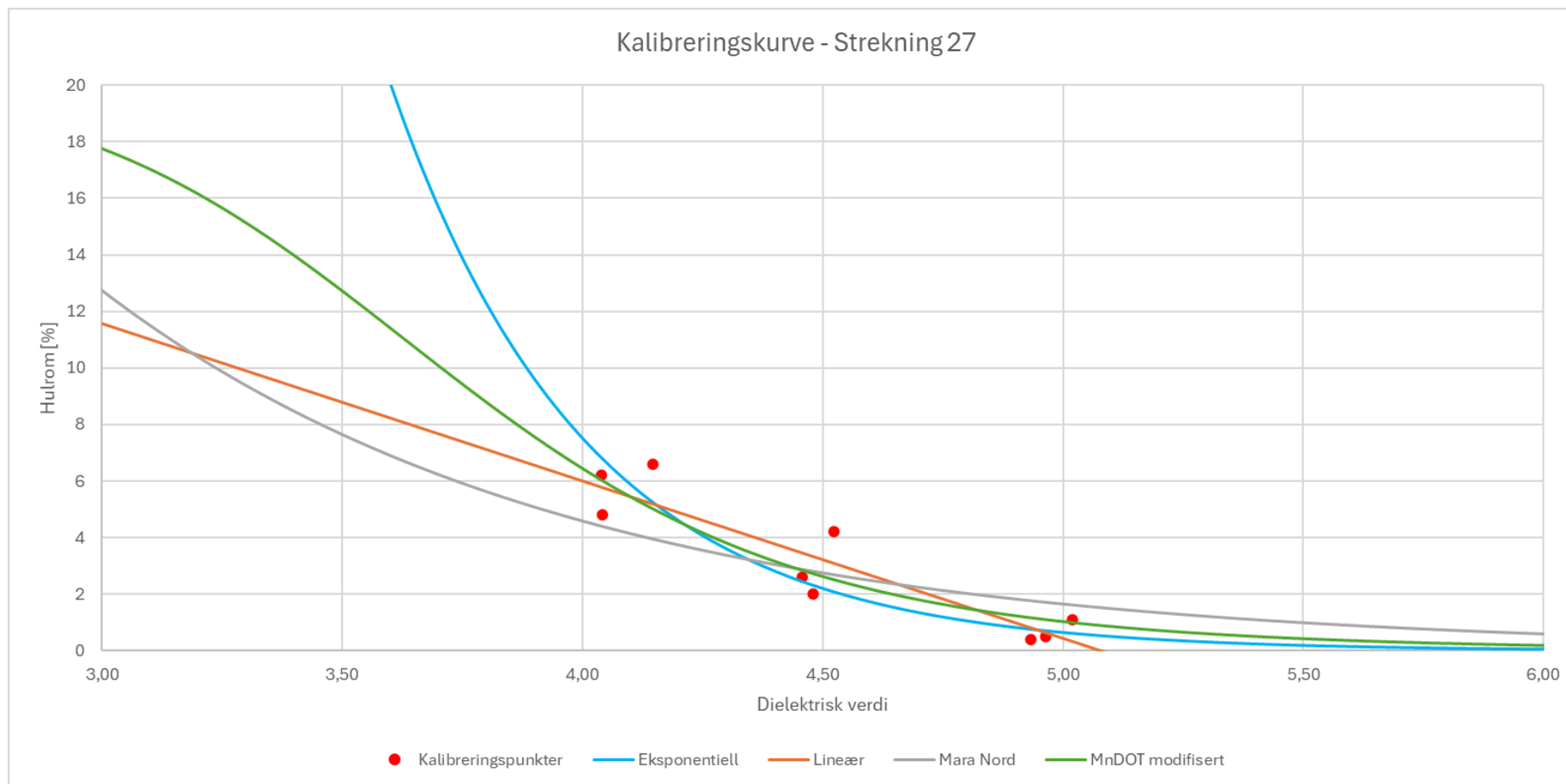
Figur 35 Resultat strekning 24



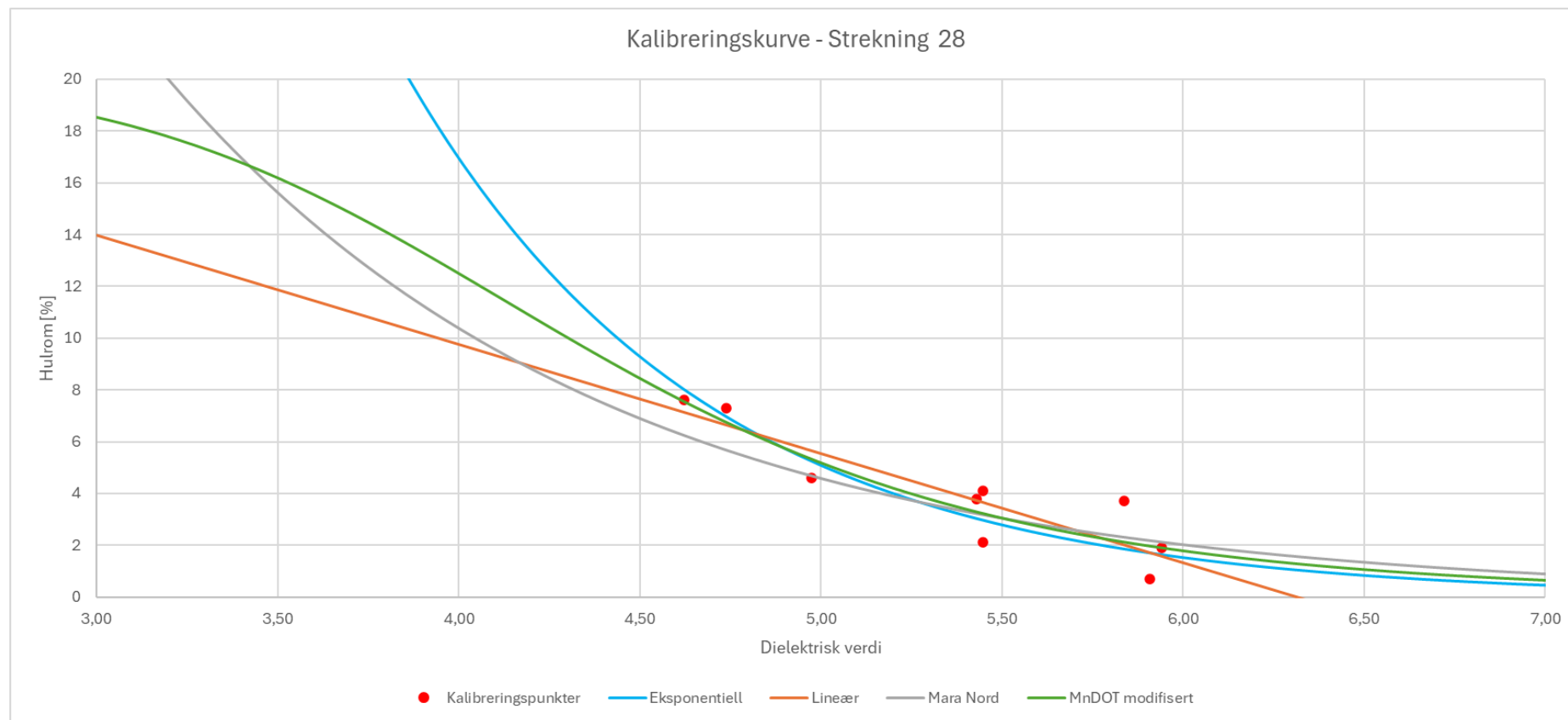
Figur 36 Resultat strekning 25



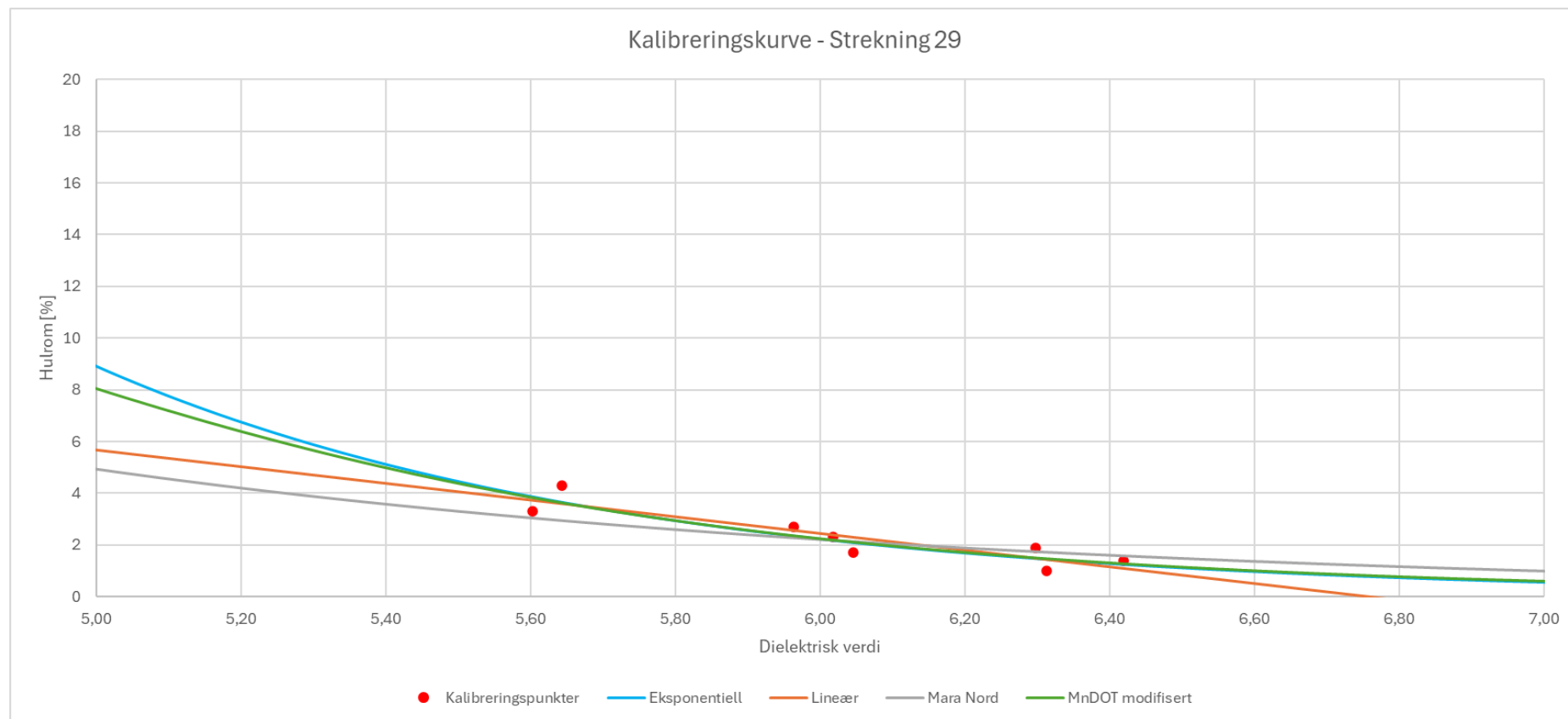
Figur 37 Resultat strekning 26



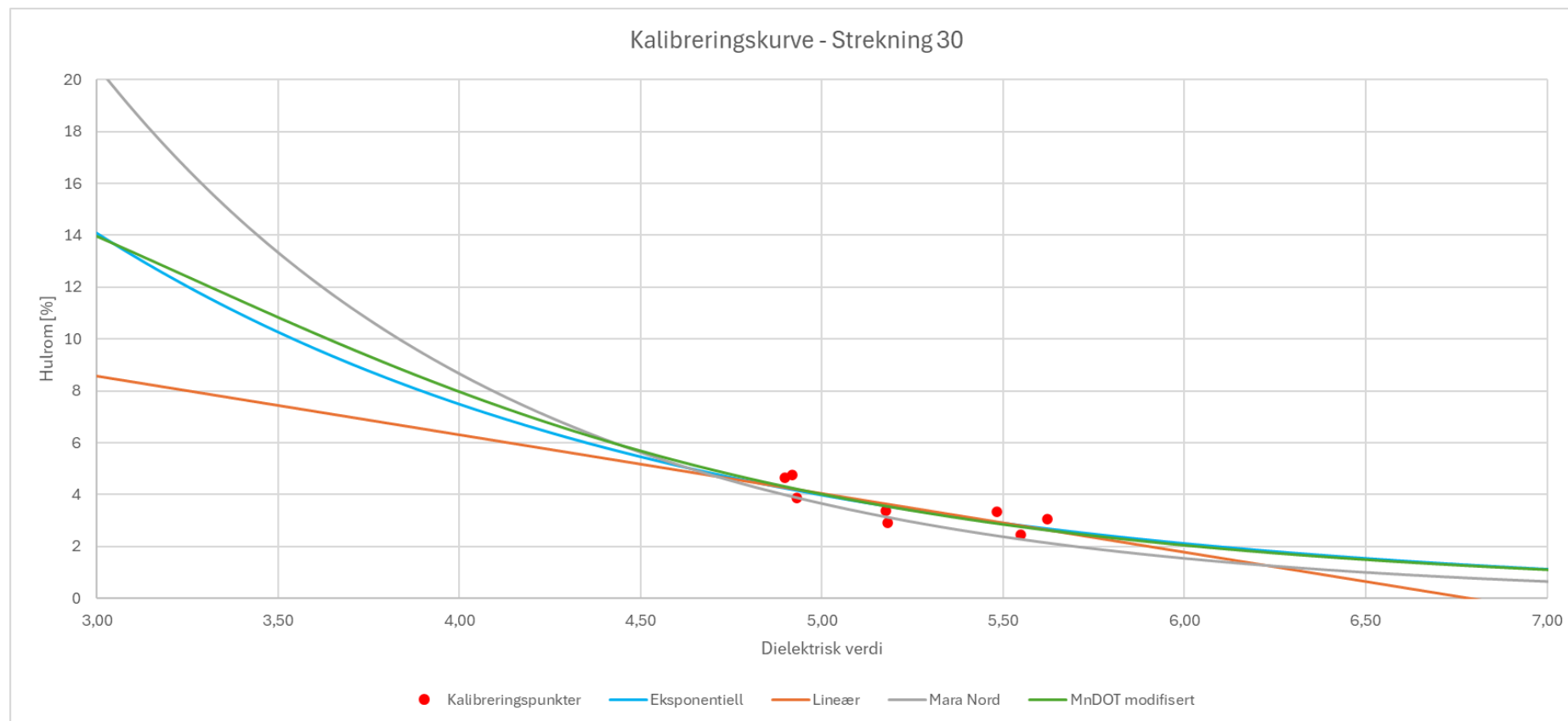
Figur 38 Resultat strekning 27



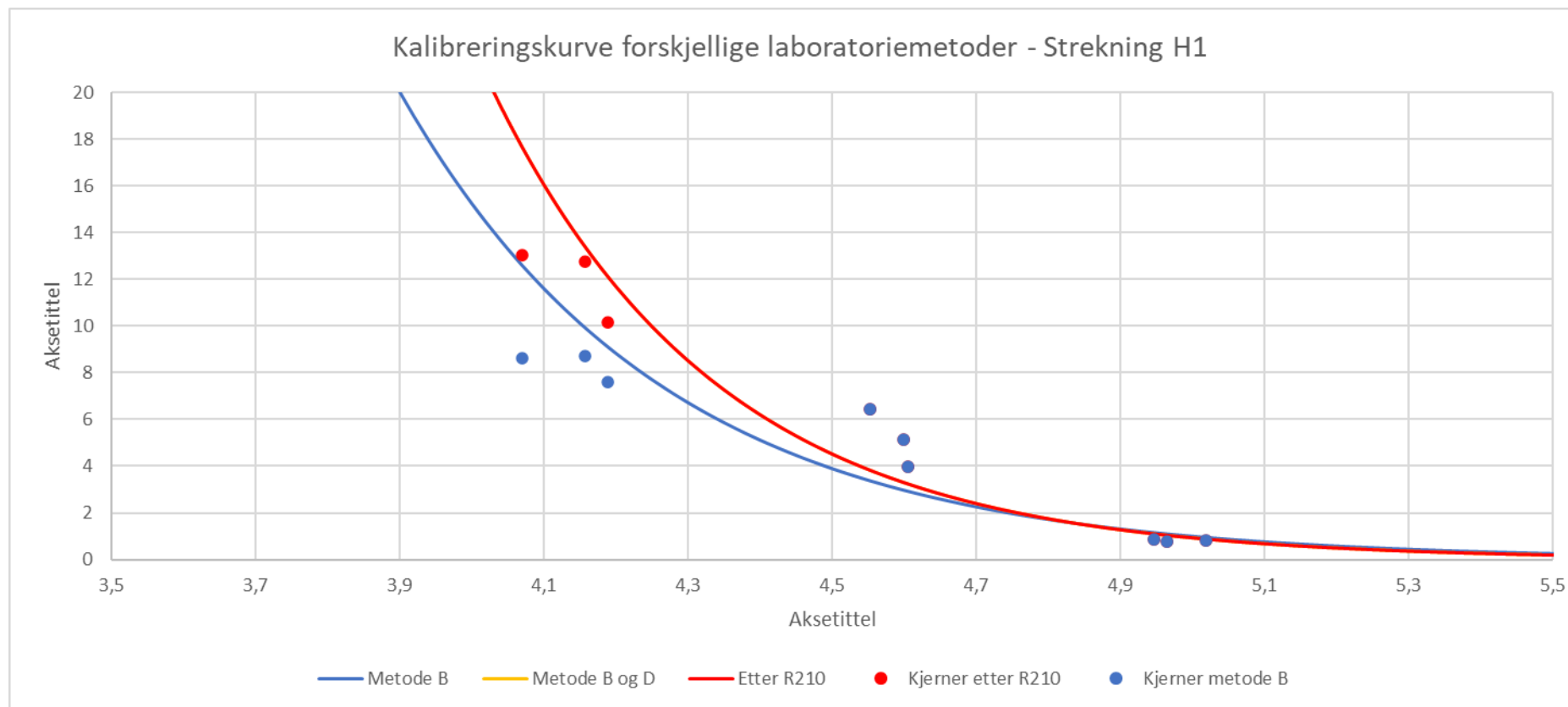
Figur 39 Resultat strekning 28



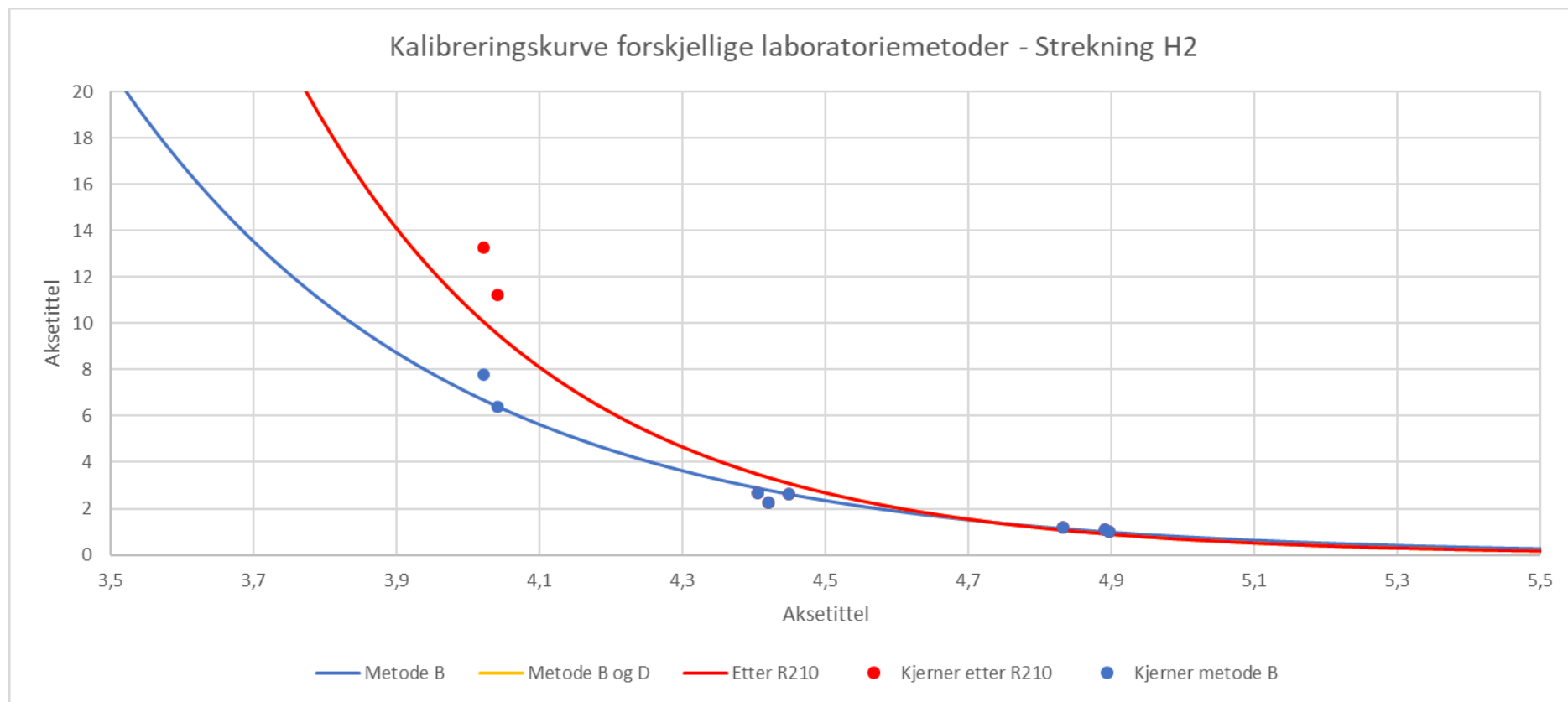
Figur 40 Resultat strekning 29



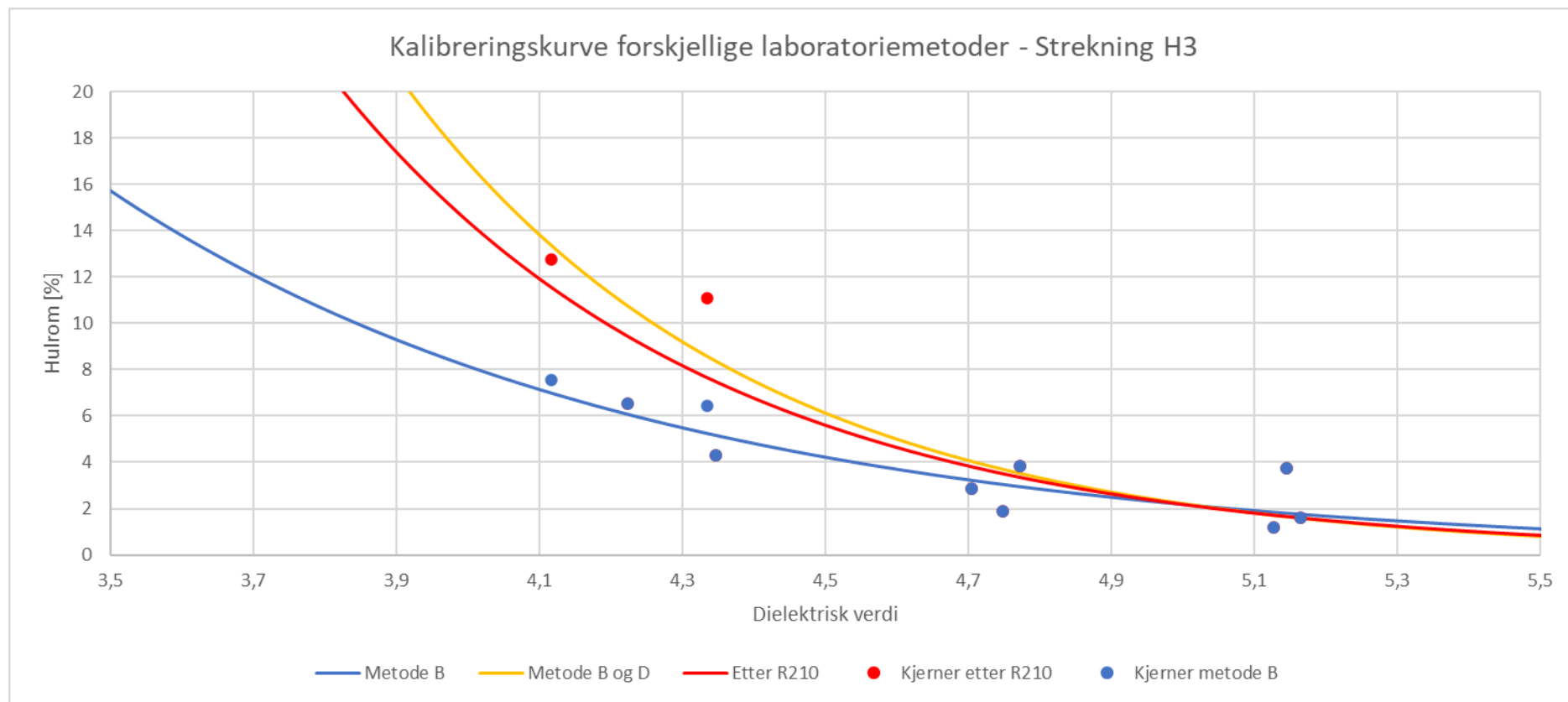
Figur 41 Resultat strekning 30



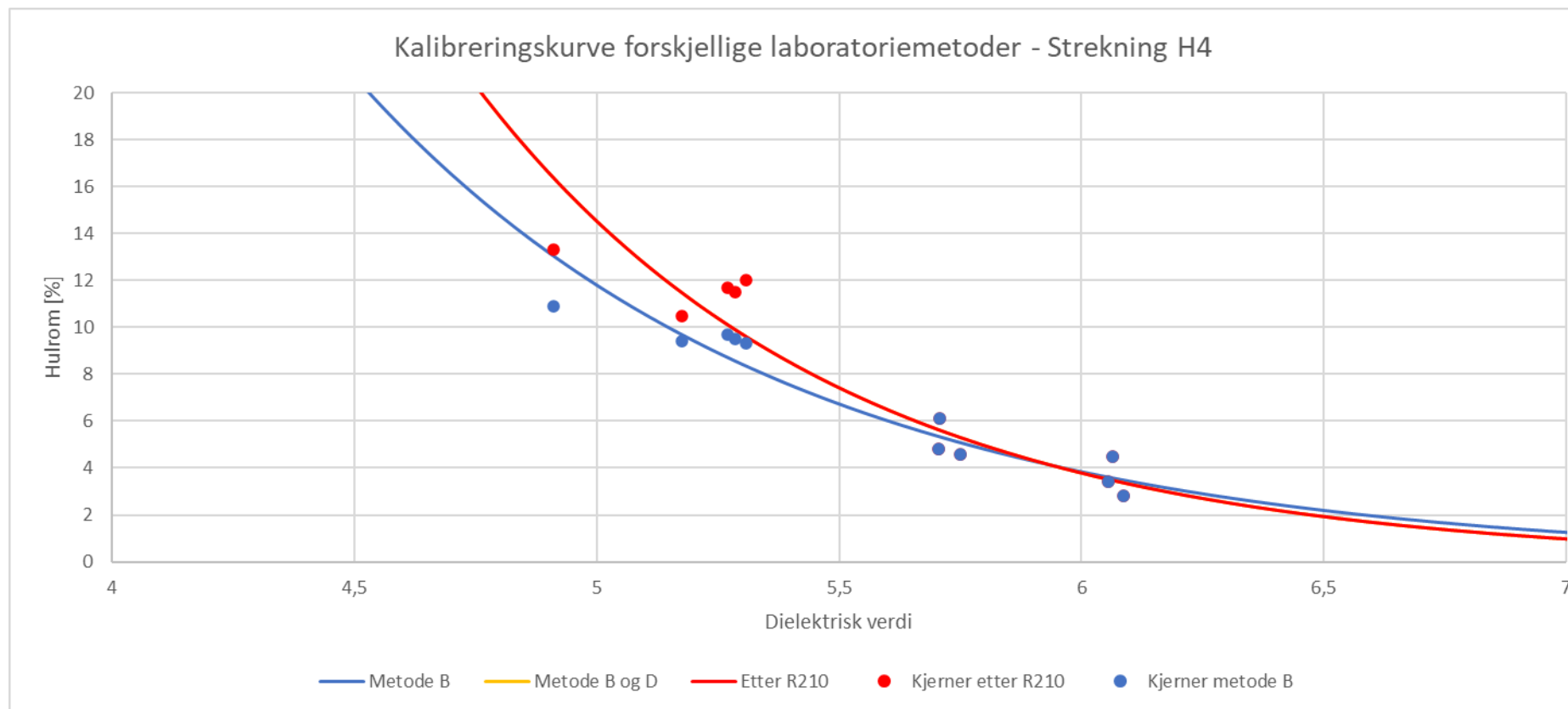
Figur 42 Resultat strekning H1, eksponentiell



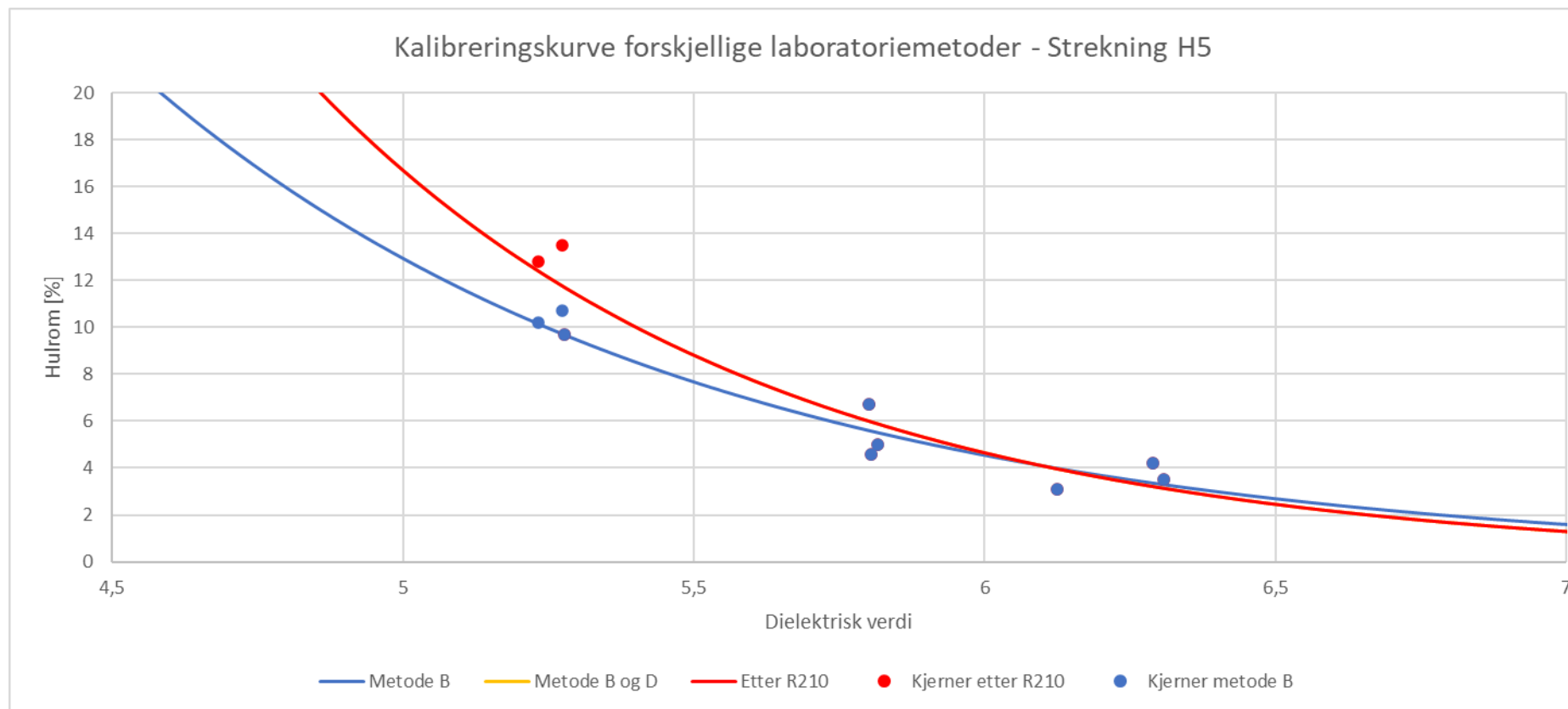
Figur 43 Resultat strekning H2, eksponentiell



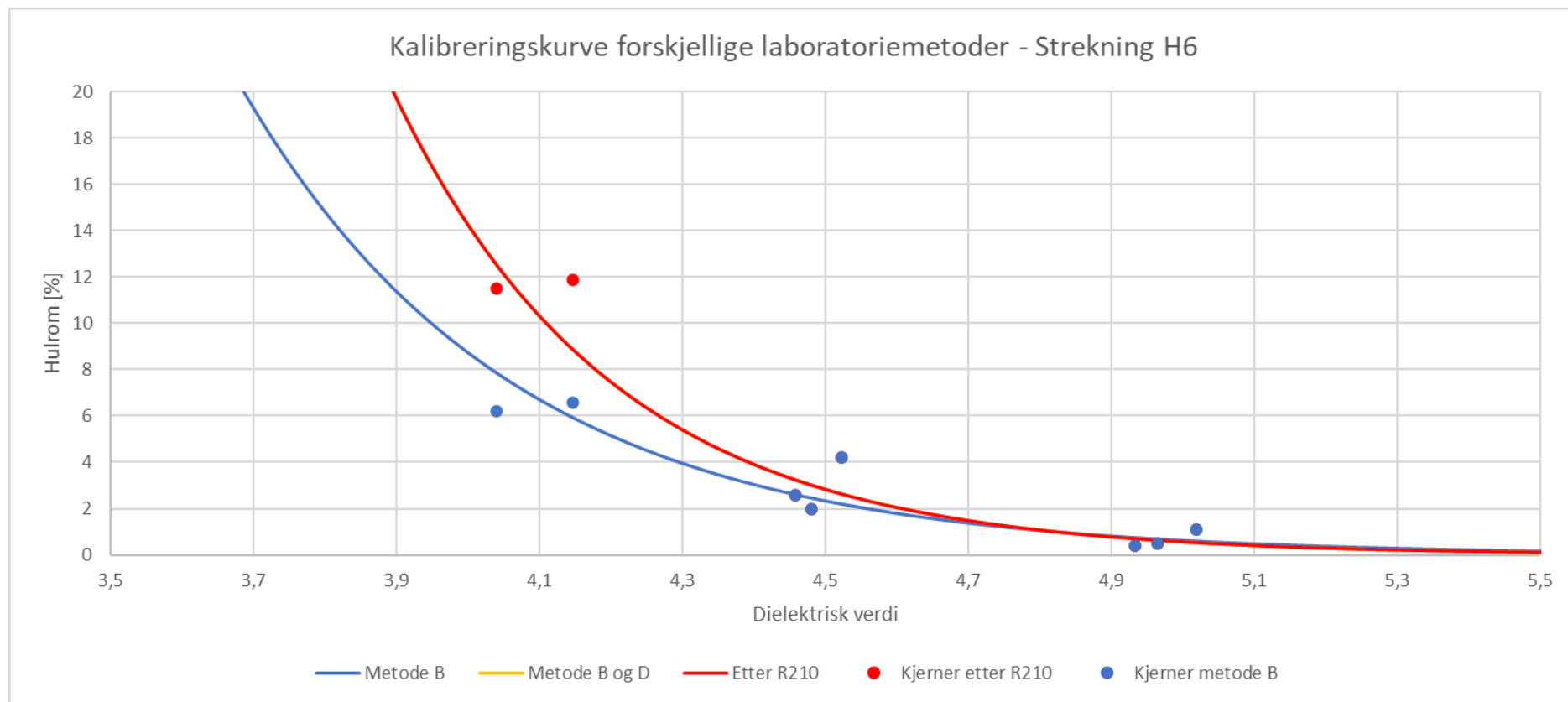
Figur 44 Resultat strekning H3, eksponentiell



Figur 45 Resultat strekning H4, eksponentiell

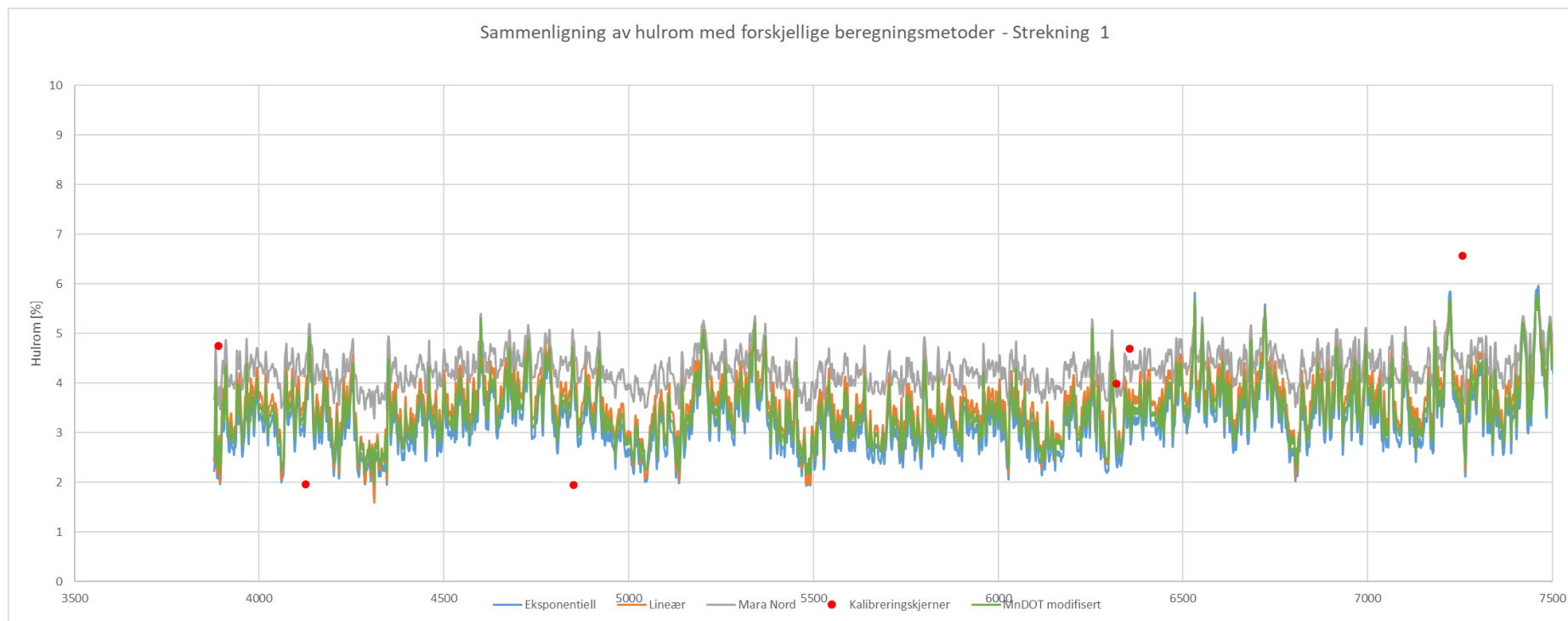


Figur 46 Resultat strekning H5, eksponentiell

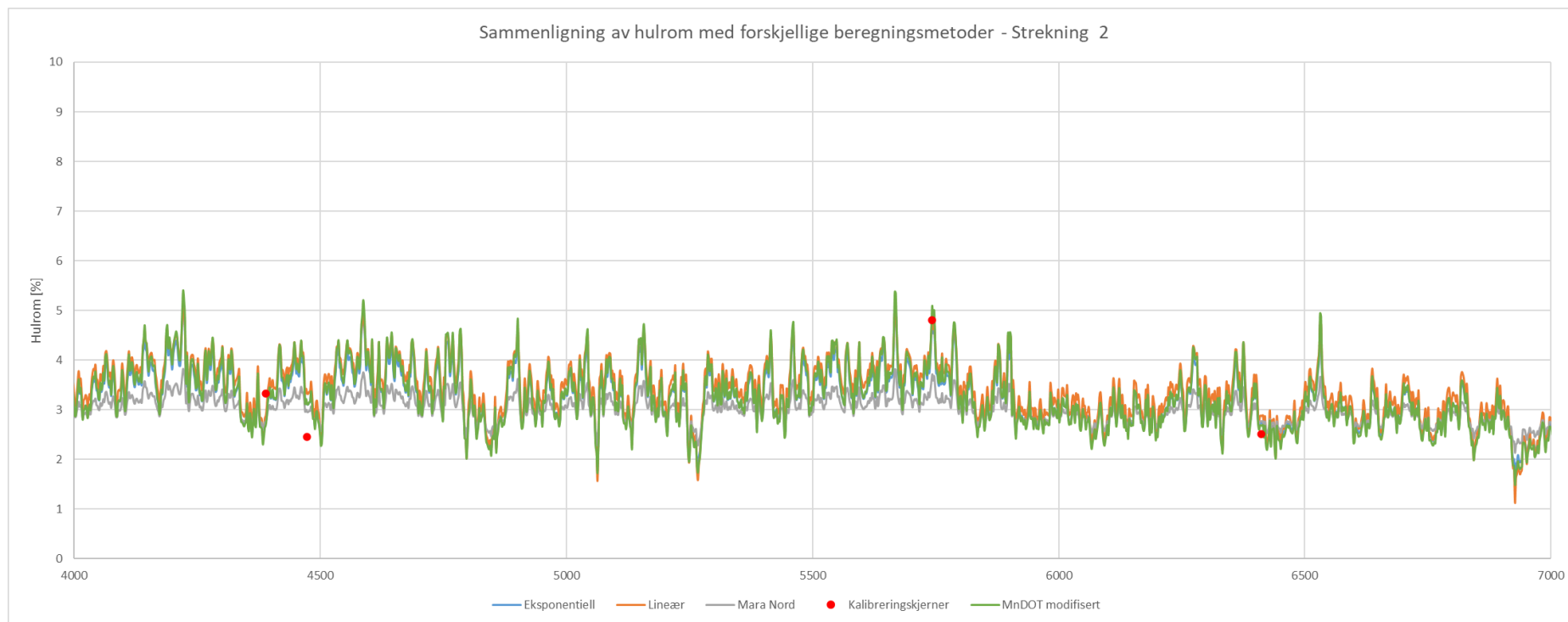


Figur 47 Resultat strekning H6, eksponentiell

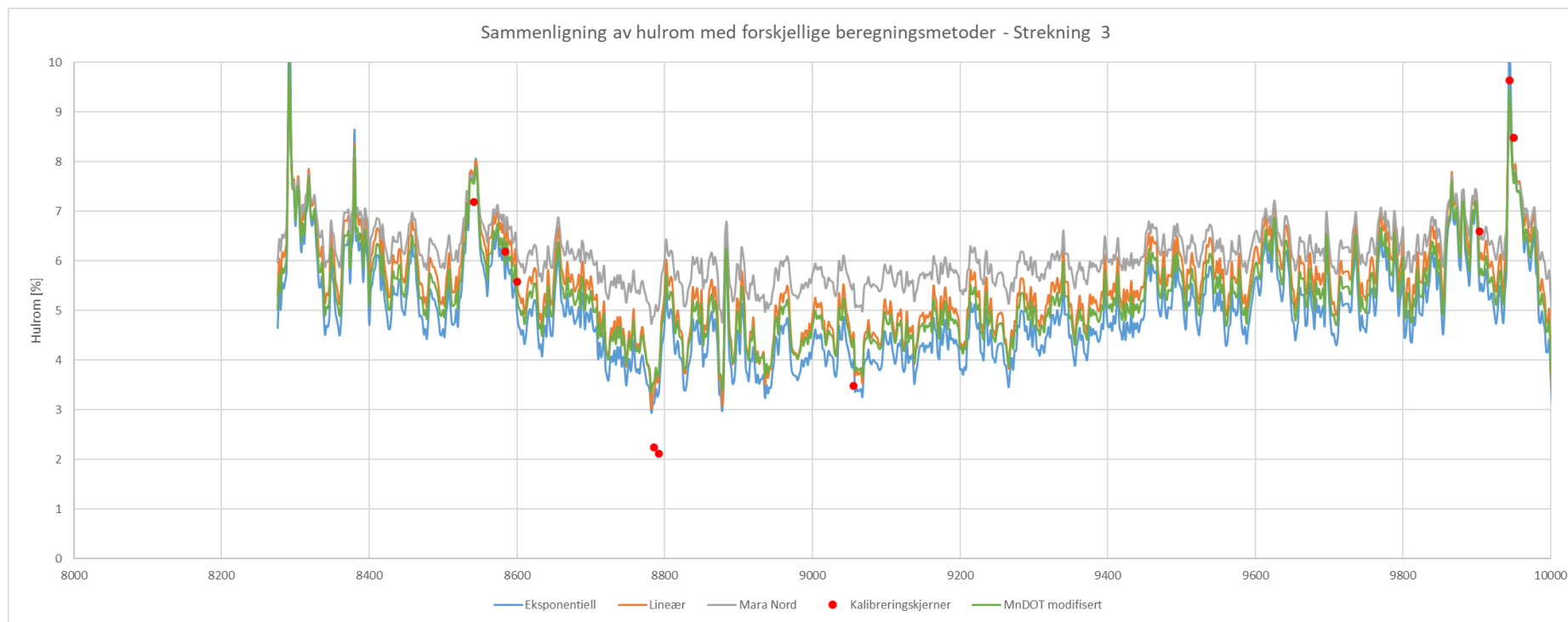
Vedlegg C – Resultater alle strekninger. Hulrom



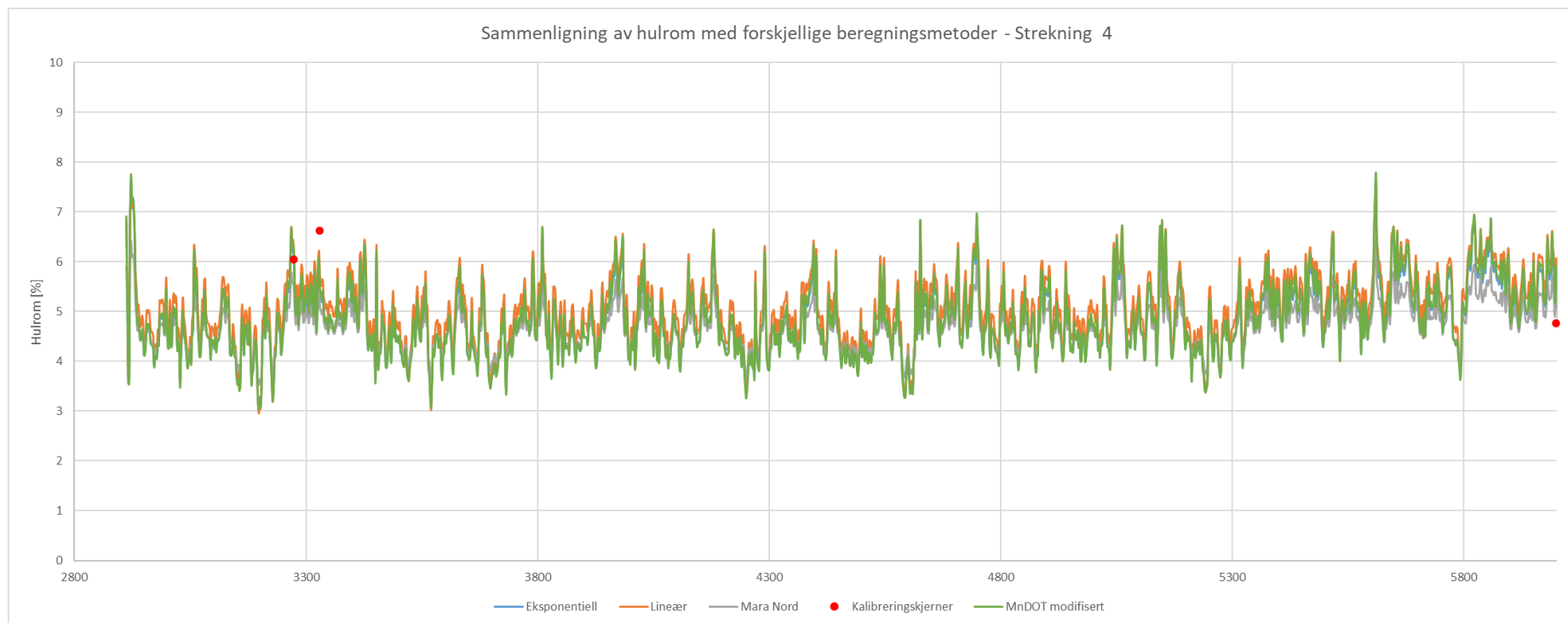
Figur 48 Strekning 1 hulrom



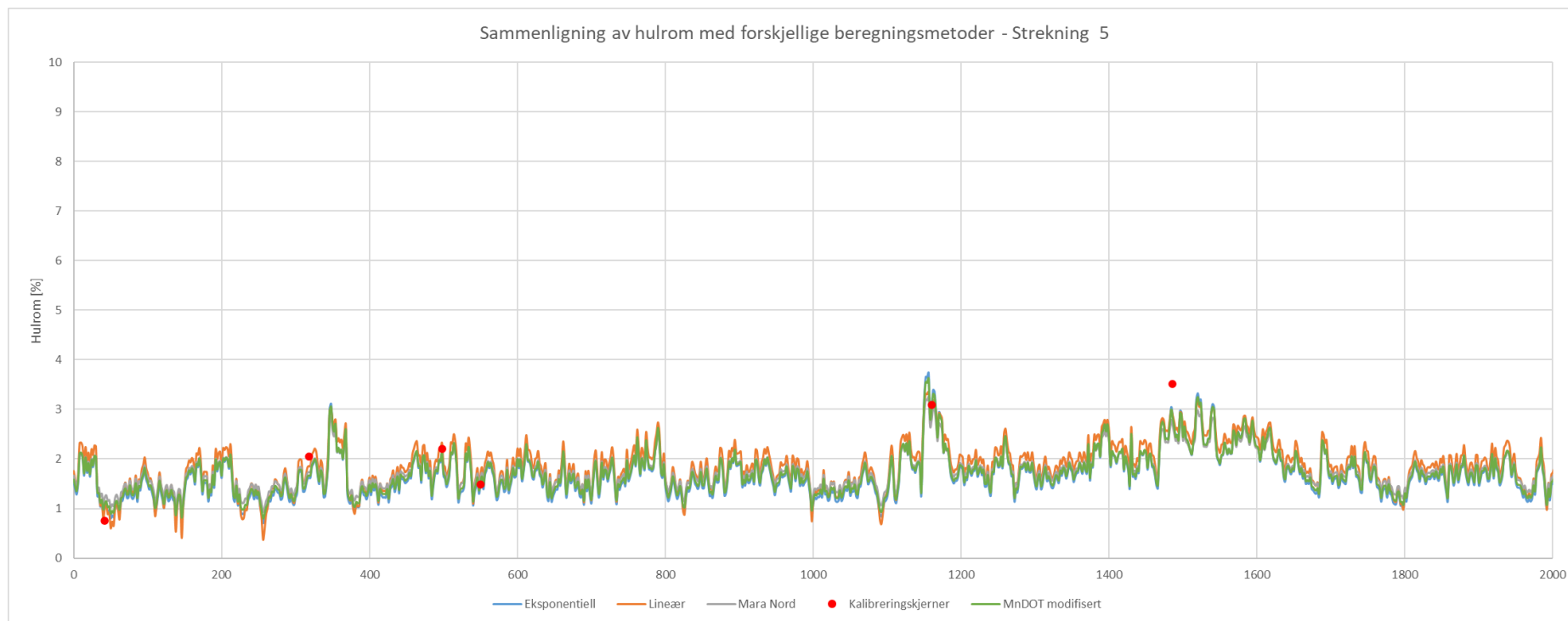
Figur 49 Strekning 2 hulrom



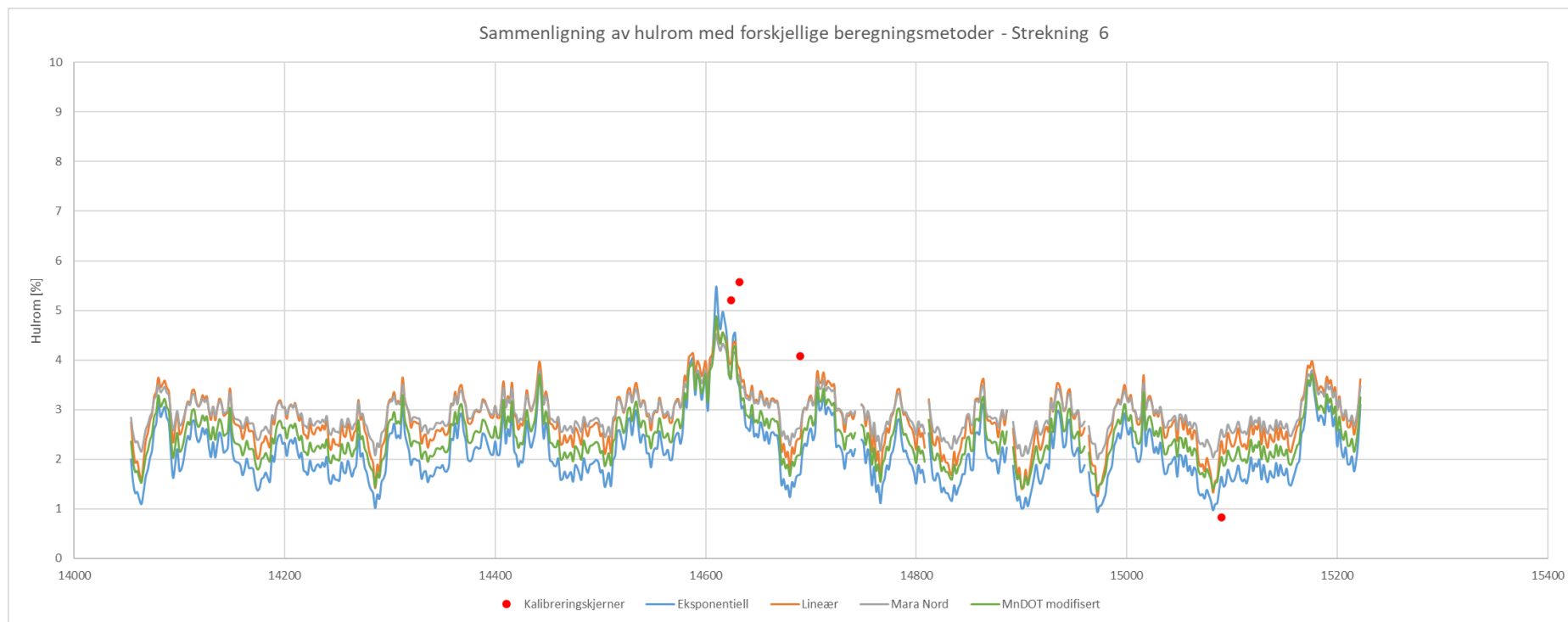
Figur 50 Strekning 3 Hulrom



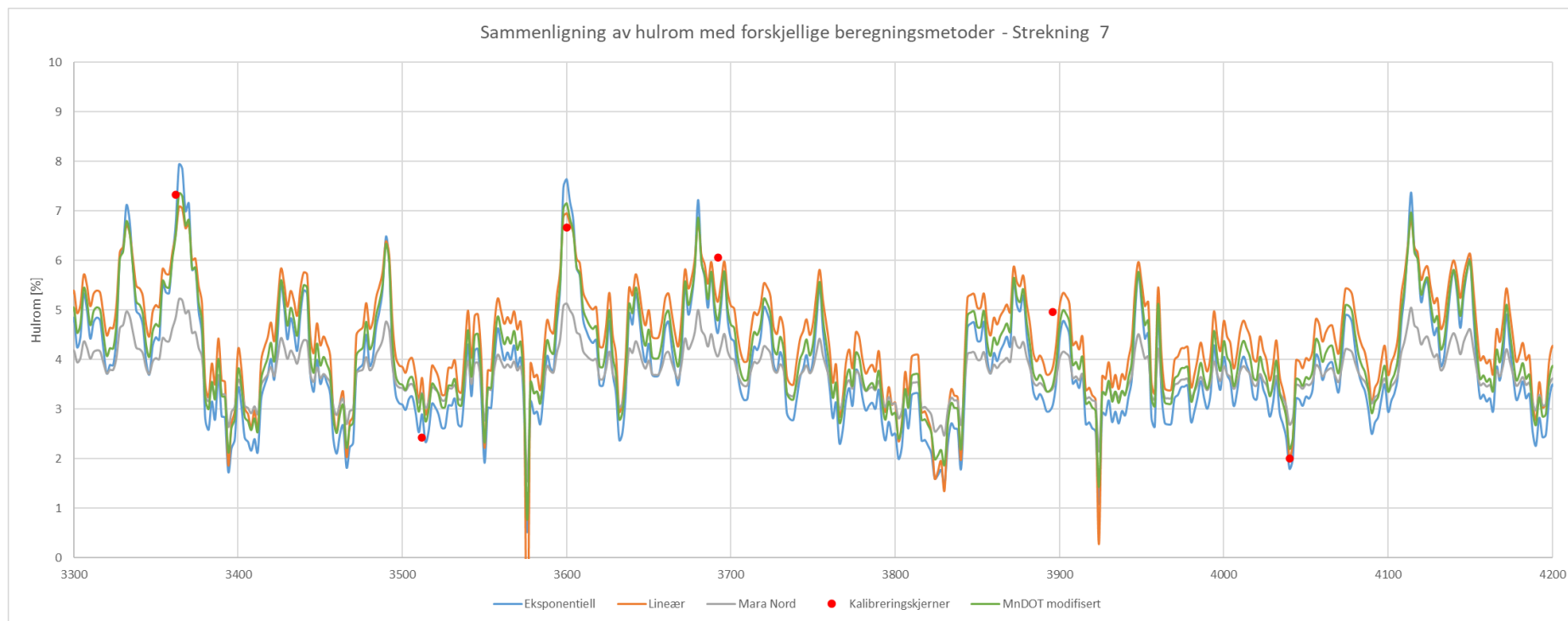
Figur 51 Strekning 4 Hulrom



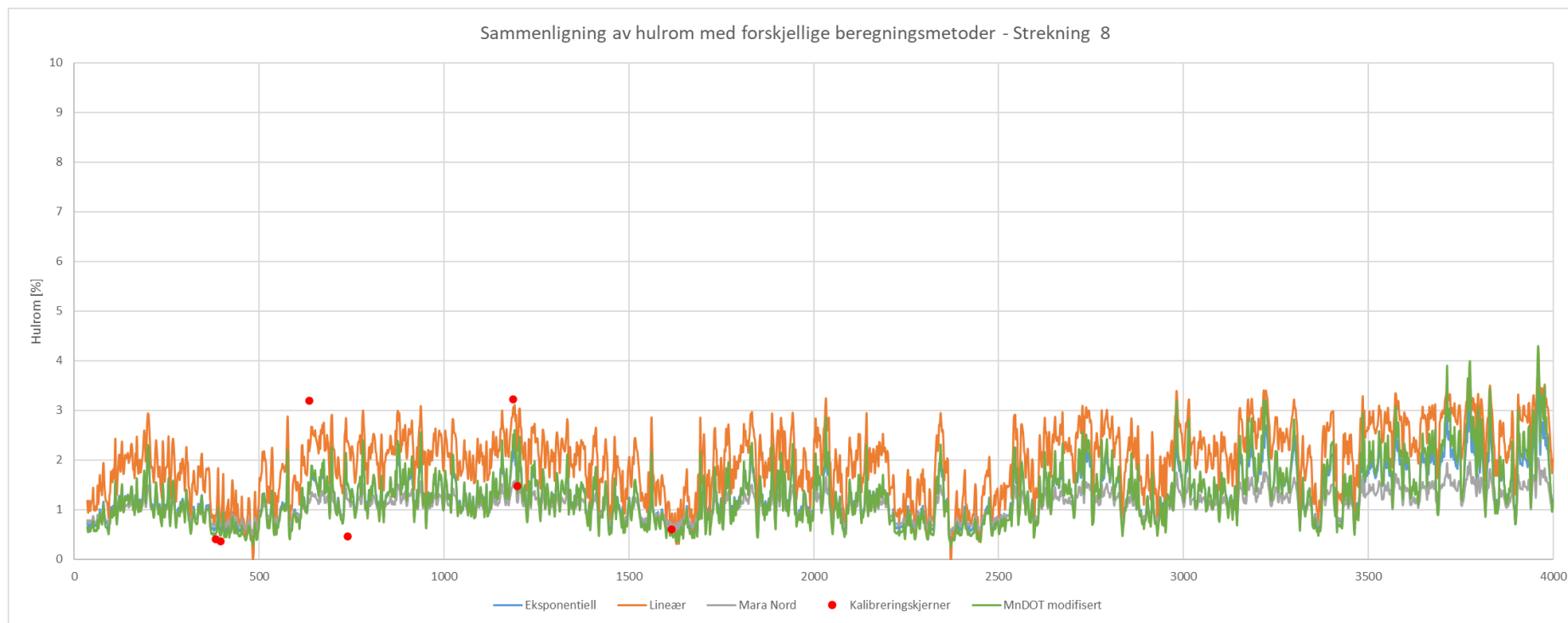
Figur 52 Strekning 5 Hulrom



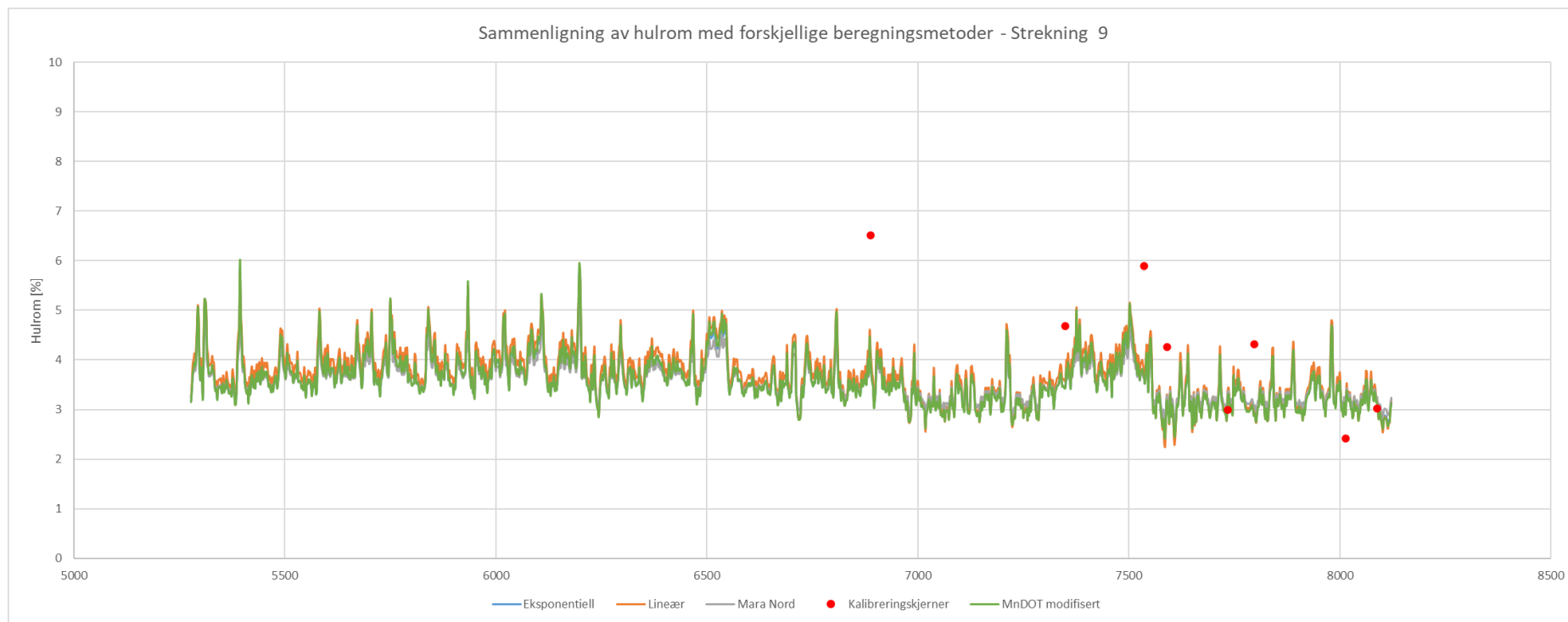
Figur 53 Strekning 6 Hulrom



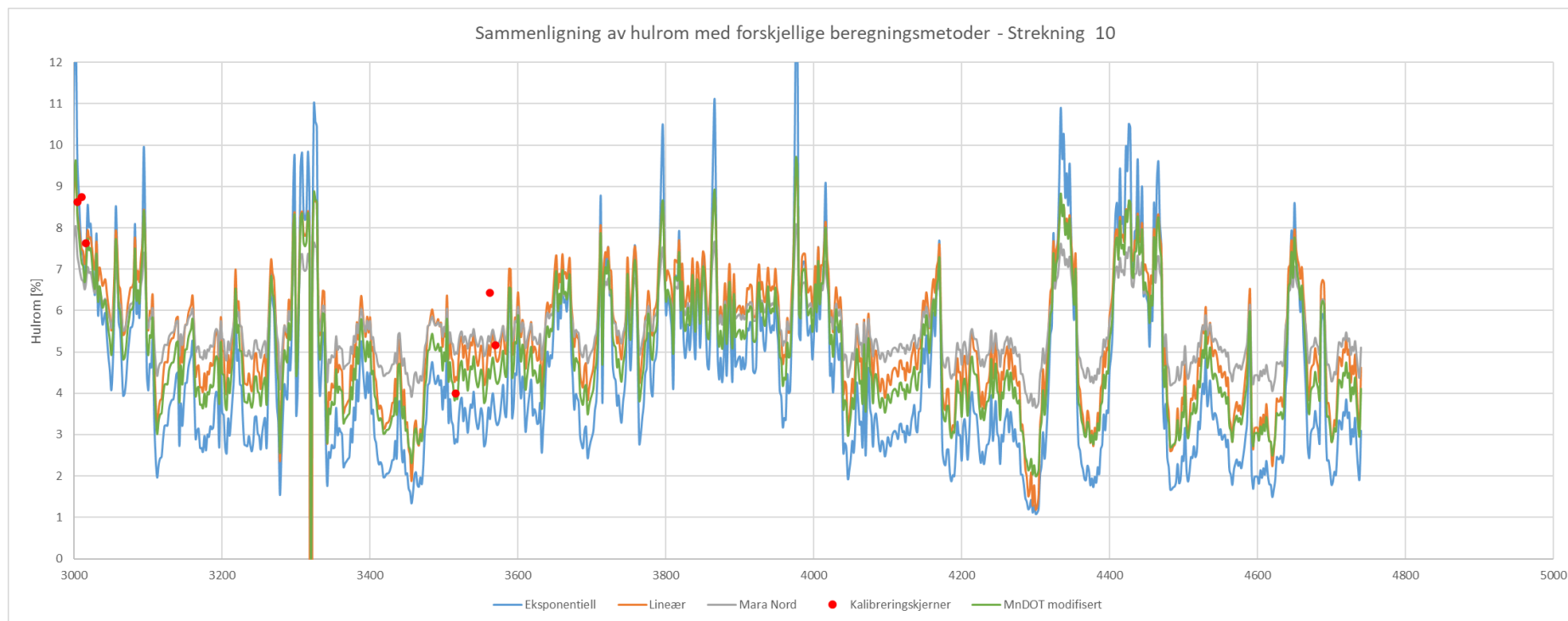
Figur 54 Strekning 7 Hulrom



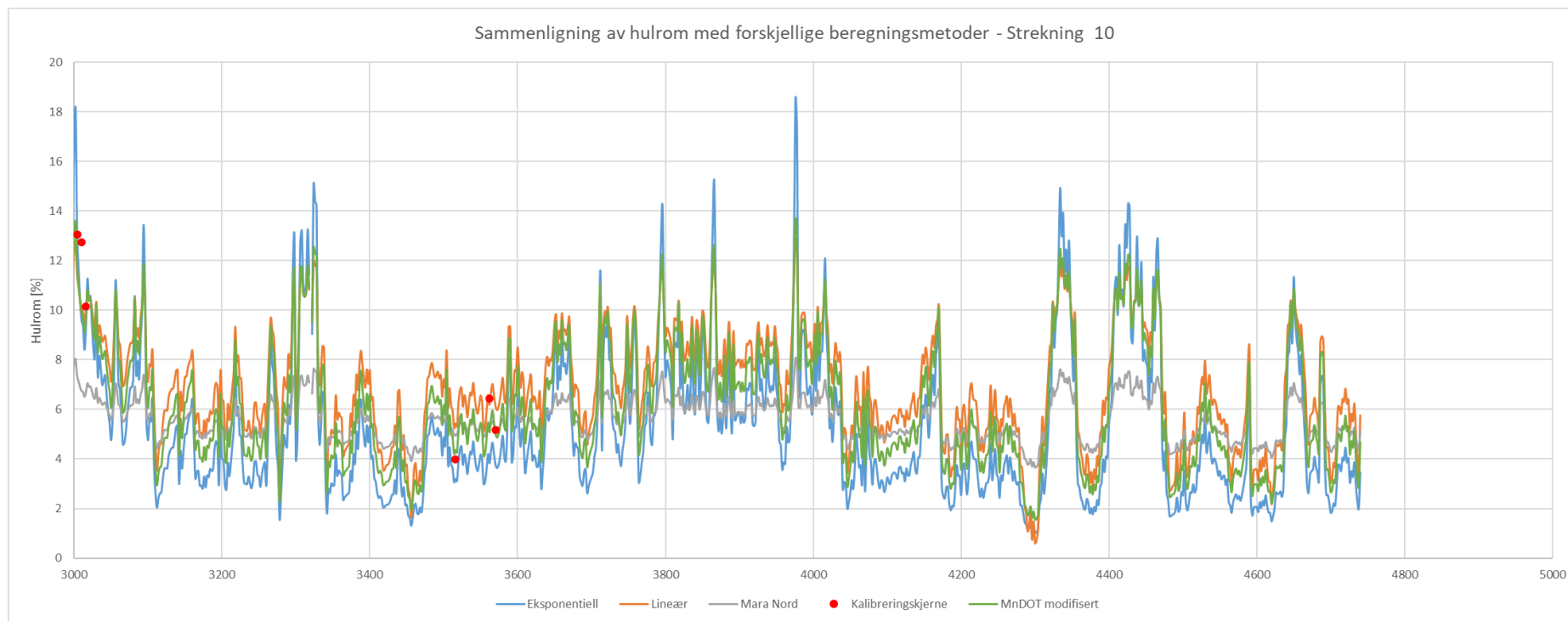
Figur 55 Strekning 8 Hulrom



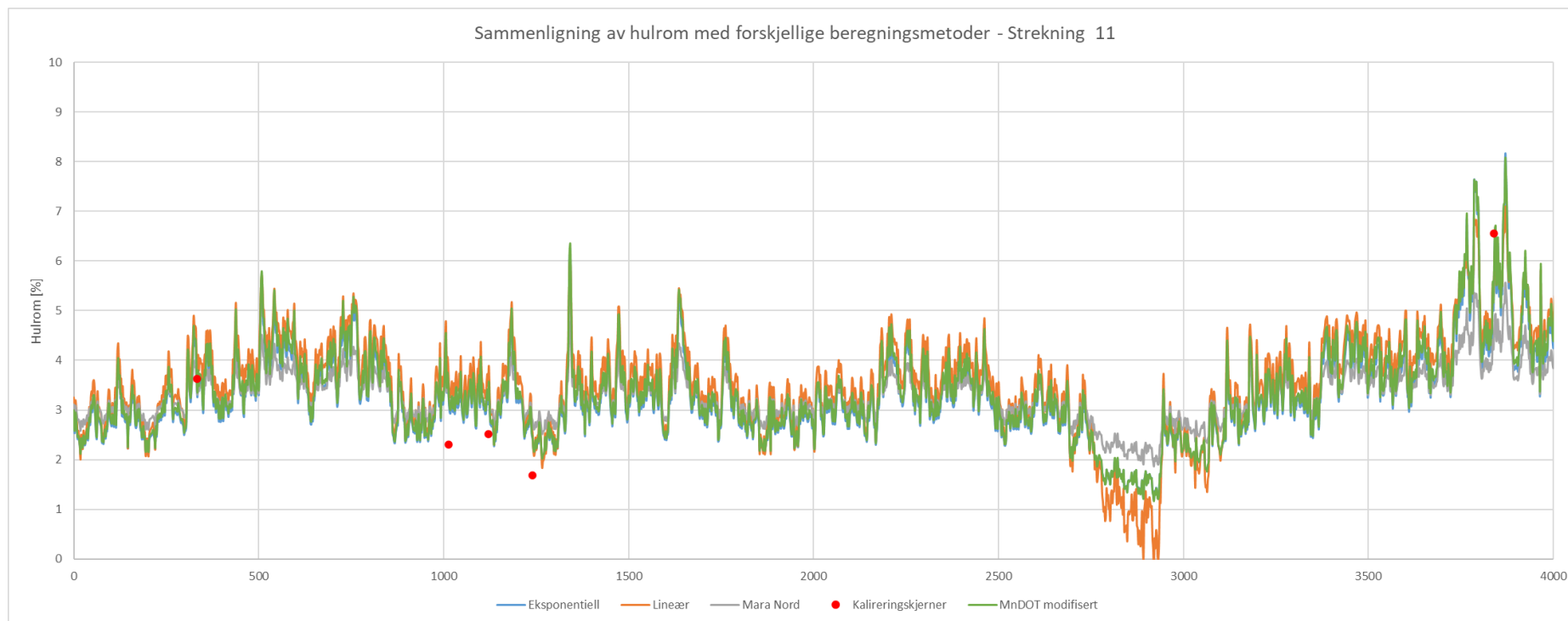
Figur 56 Strekning 9 Hulrom



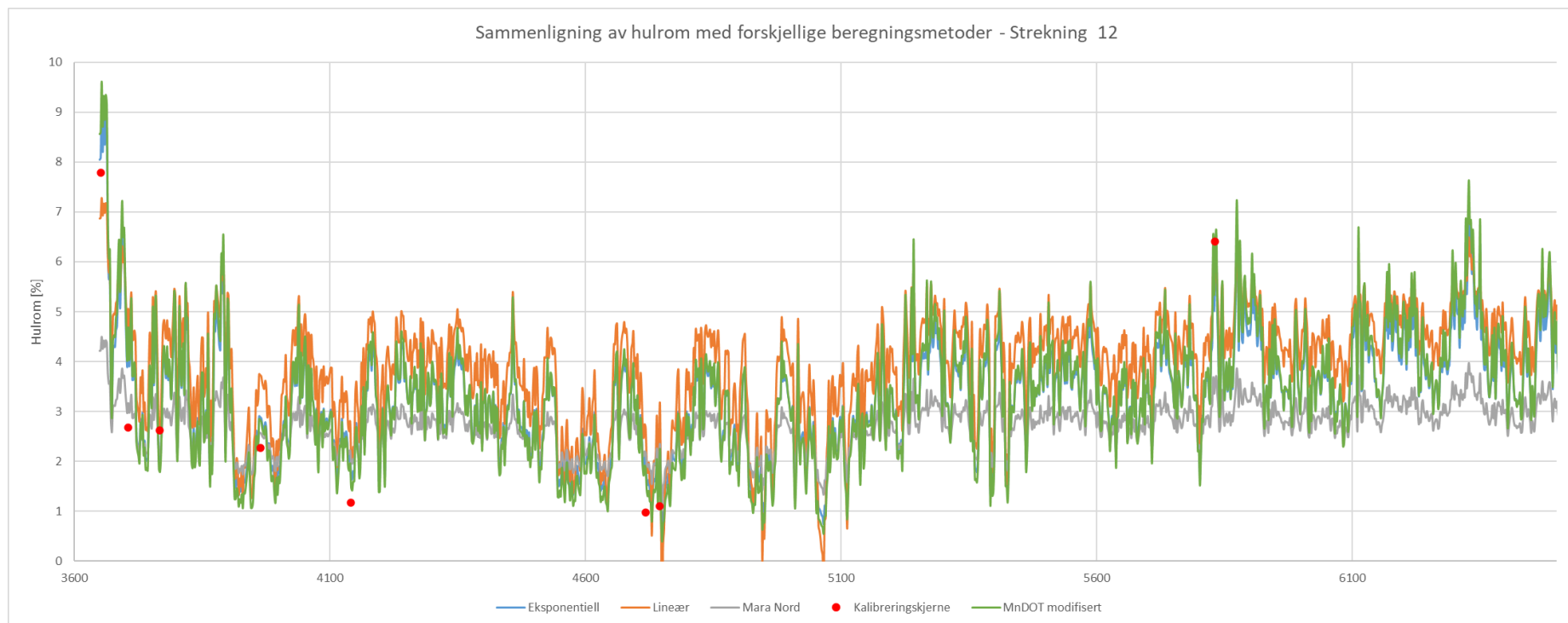
Figur 57 Strekning 10 Hulrom



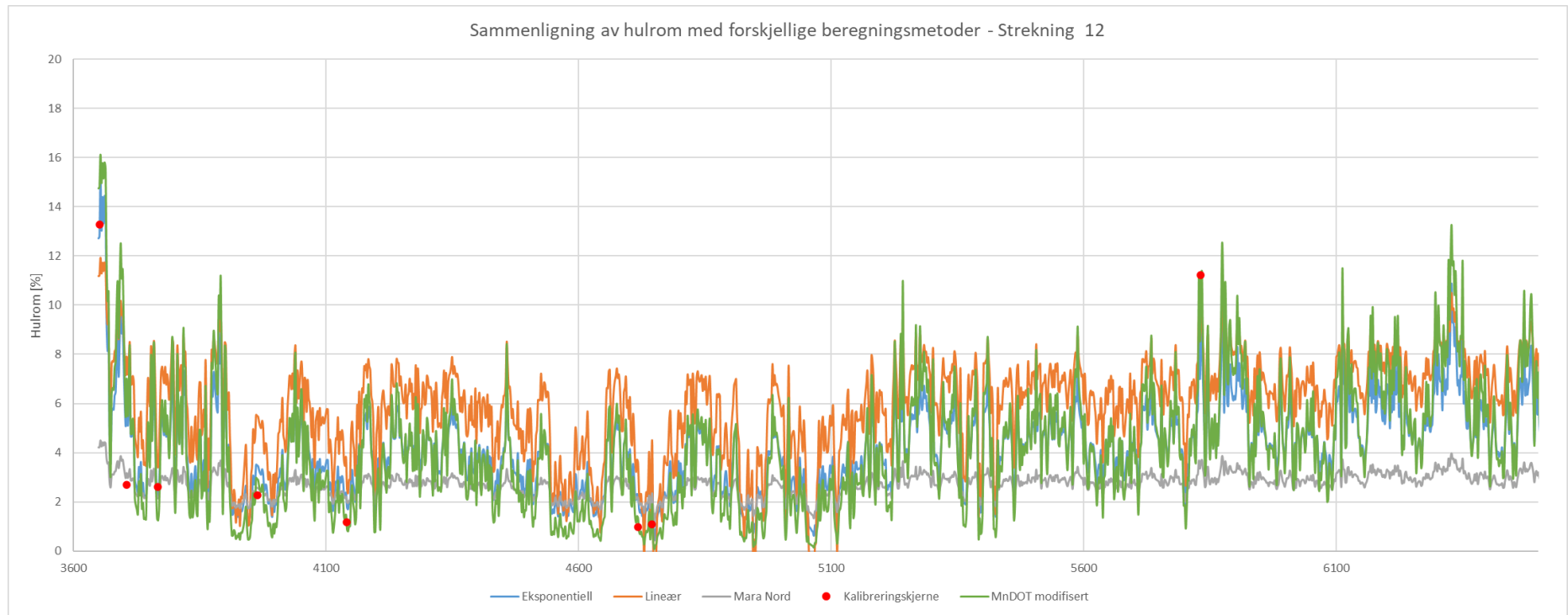
Figur 58 Strekning 10 Hulrom estimert basert på to laboratriemetoder



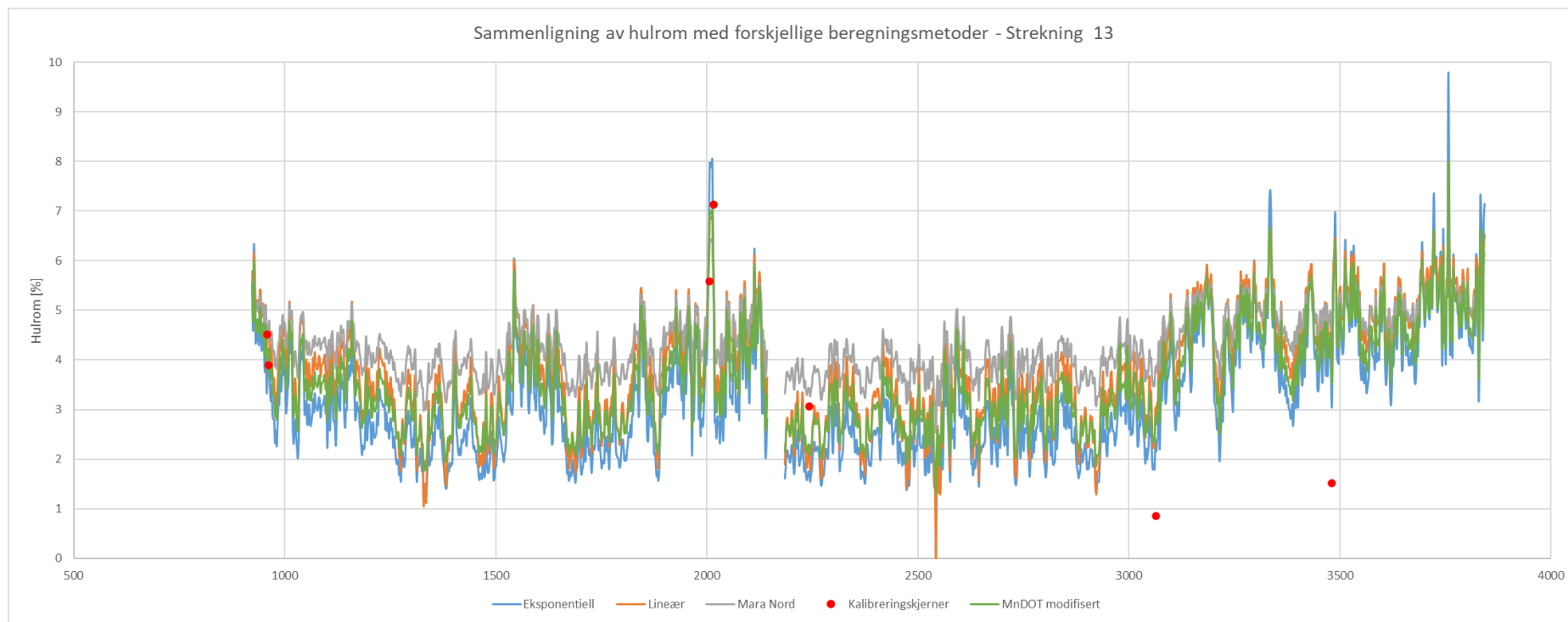
Figur 59 Strekning 11 Hulrom



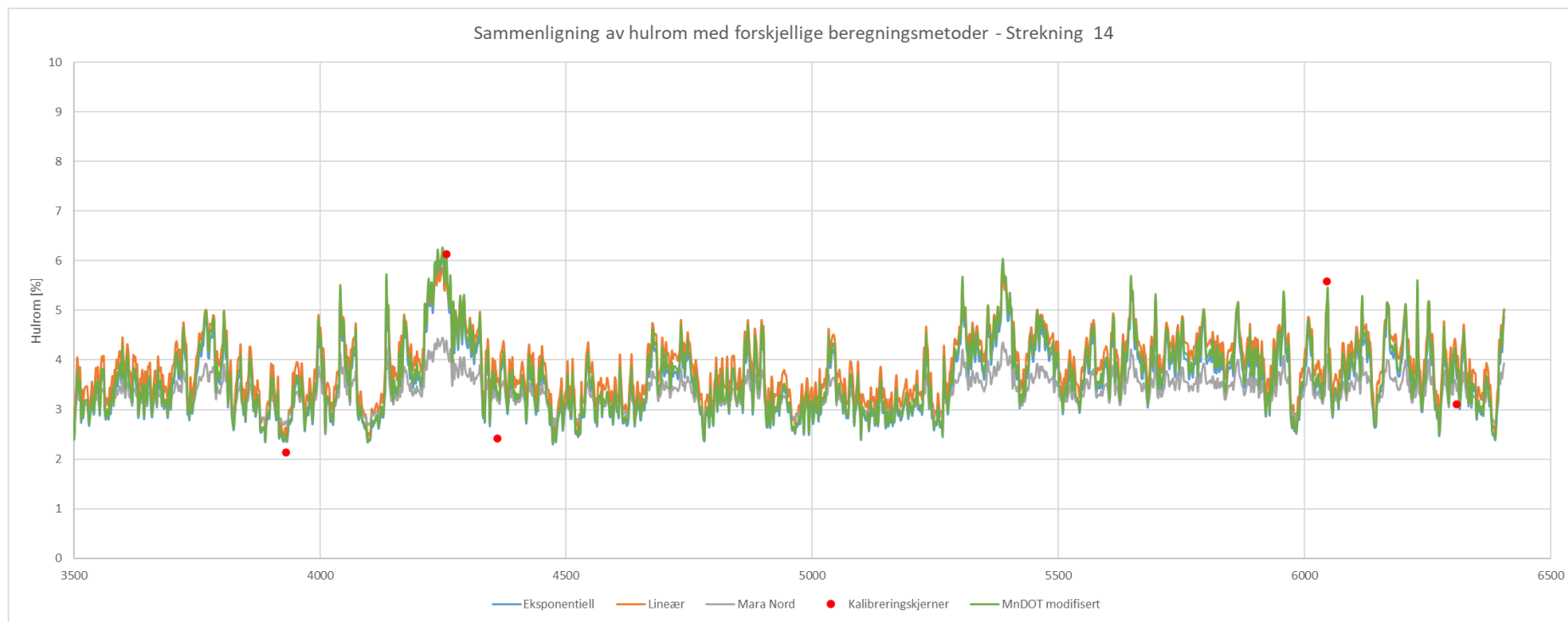
Figur 60 Strekning 12 Hulrom



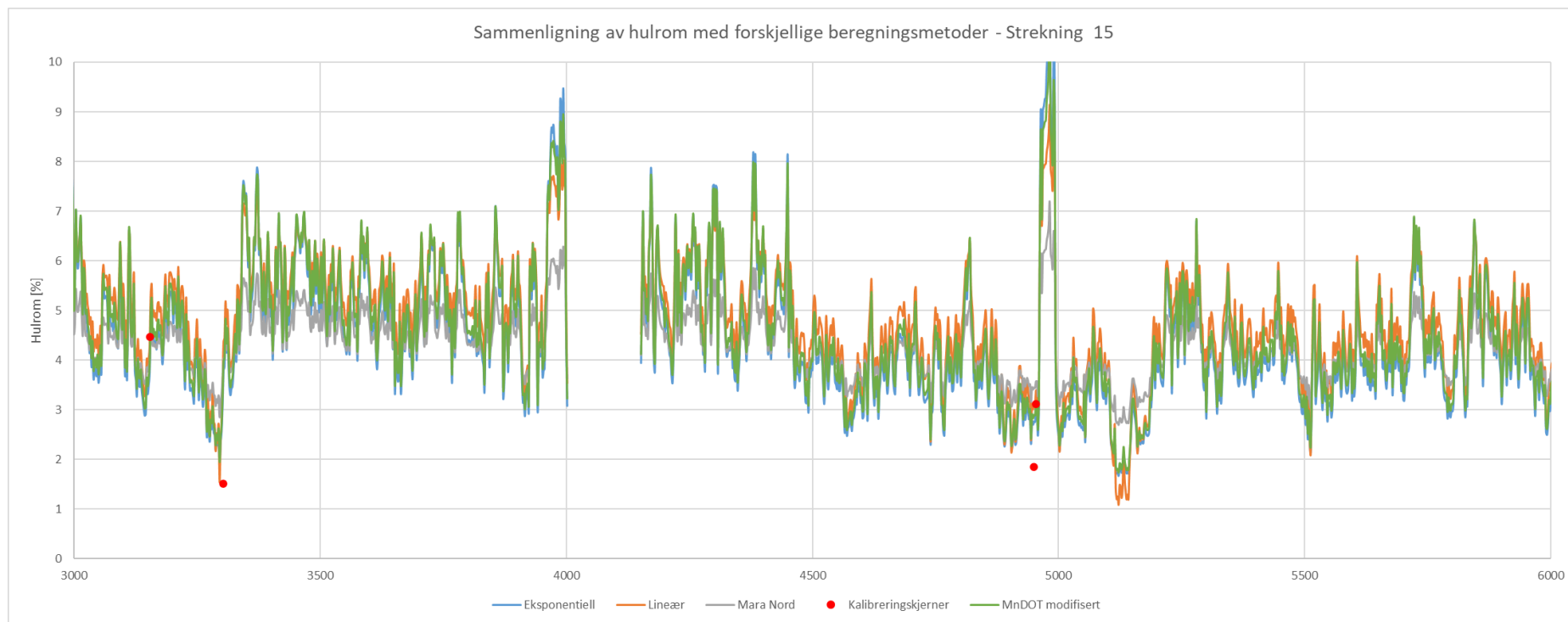
Figur 61 Strekning 12 Hulrom estimert basert på to laboratriemetoder



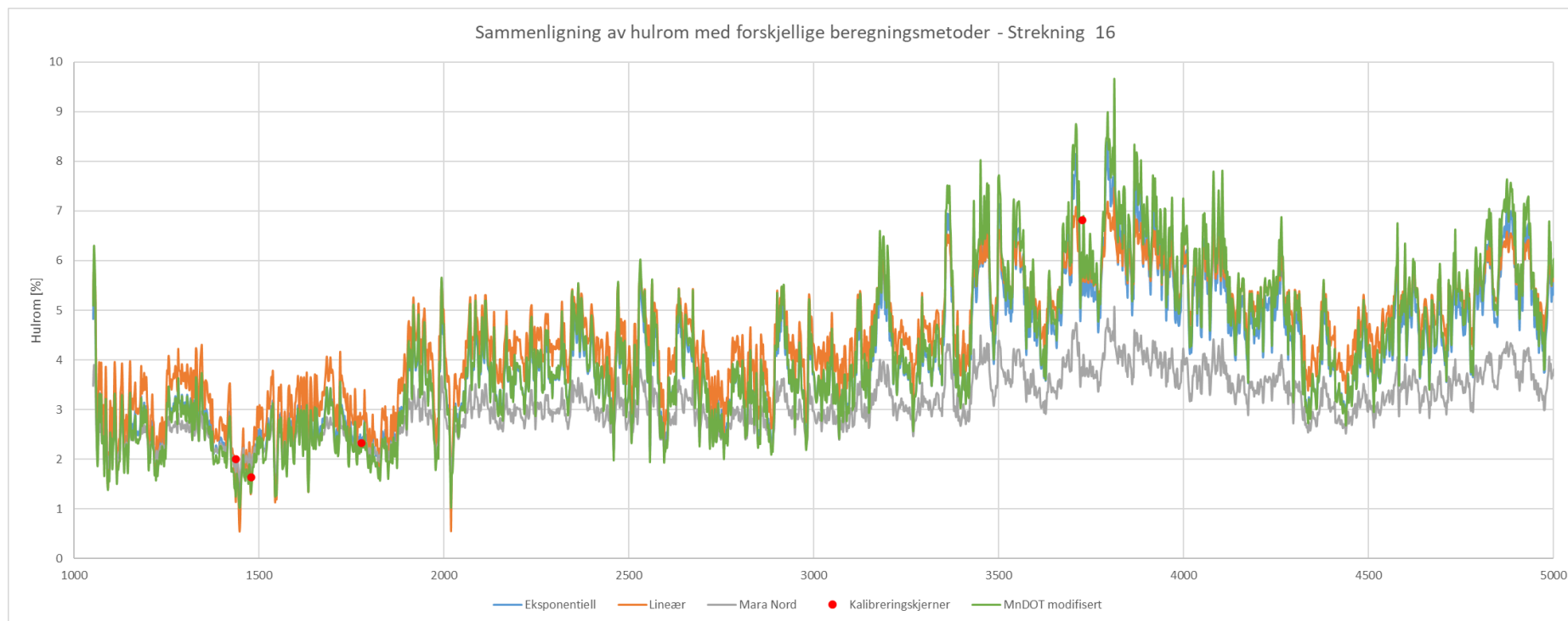
Figur 62 Strekning 13 Hulrom



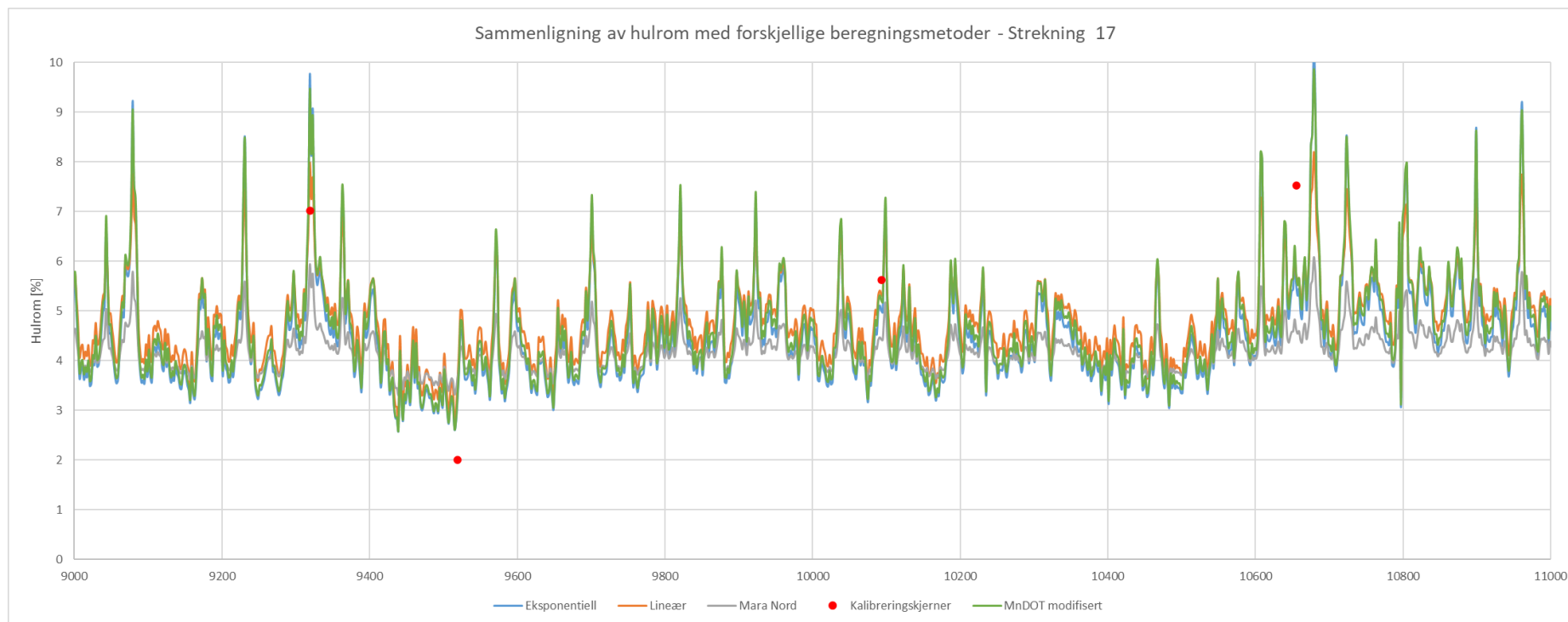
Figur 63 Strekning 14 Hulrom



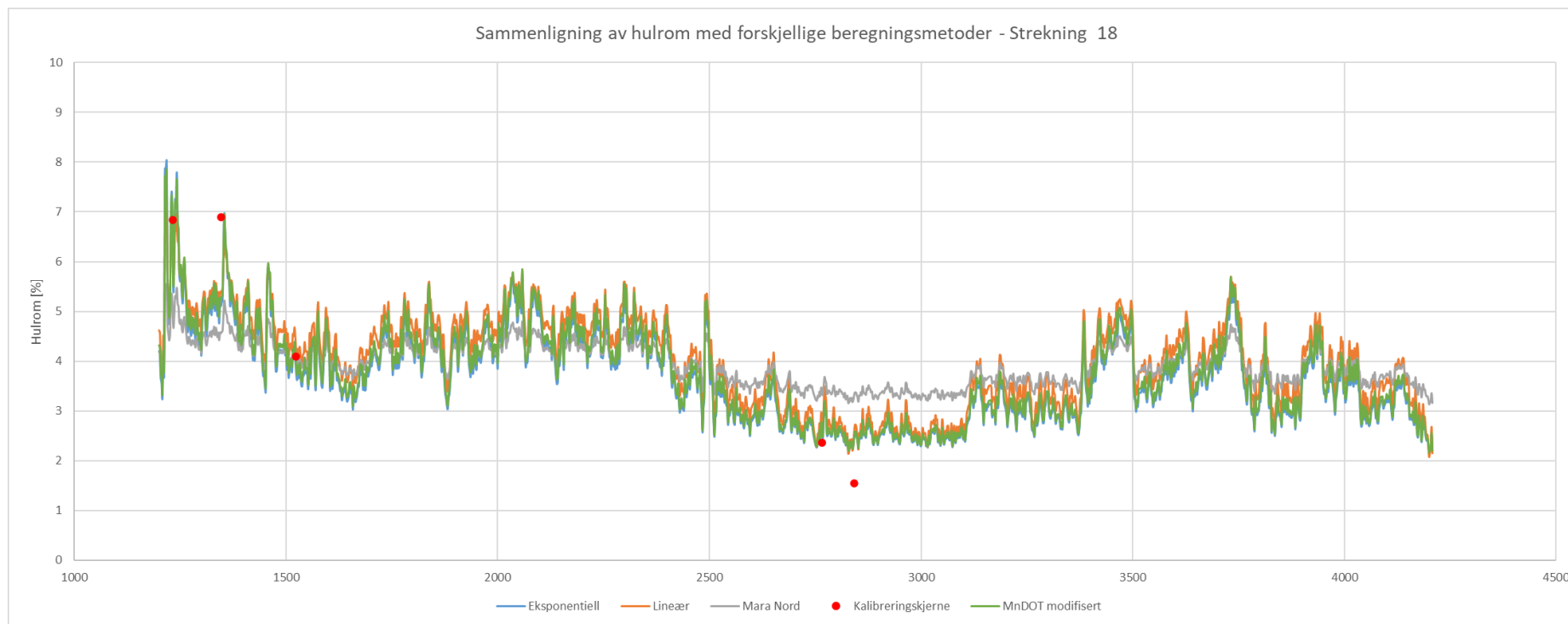
Figur 64 Strekning 15 Hulrom



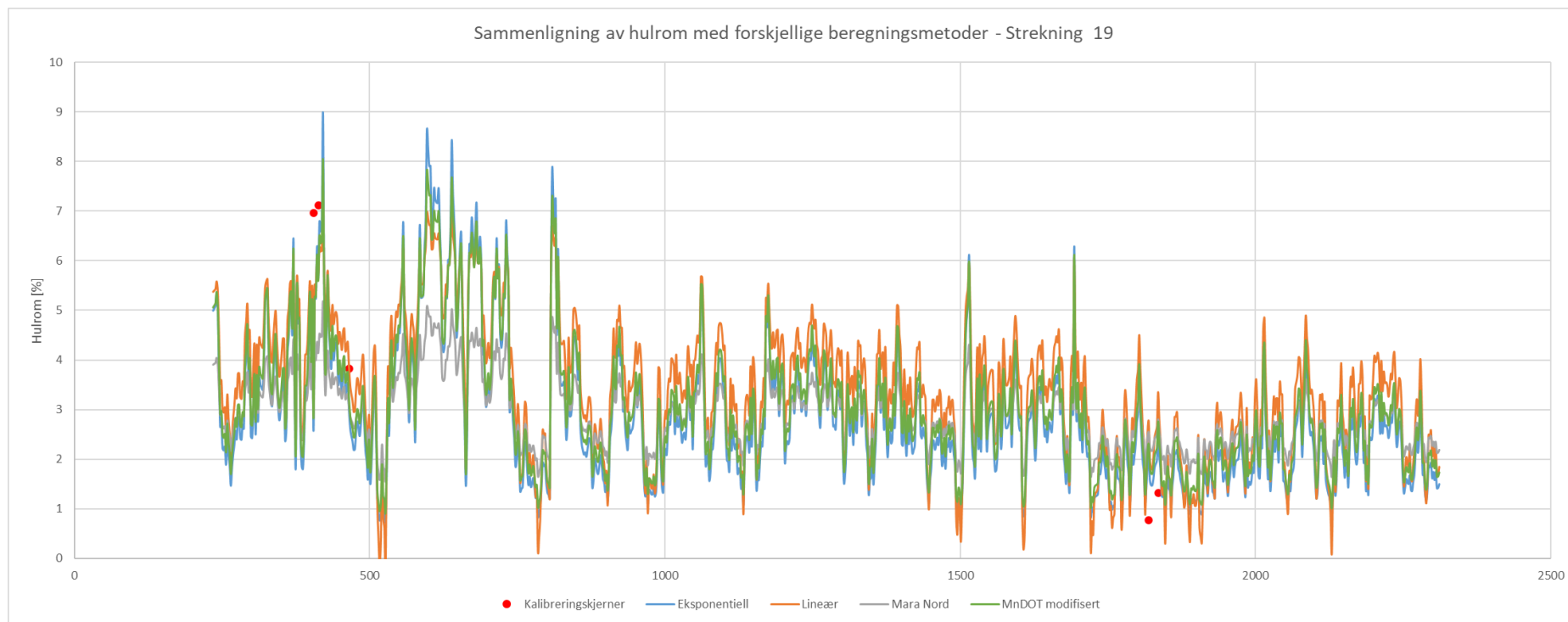
Figur 65 Strekning 16 Hulrom



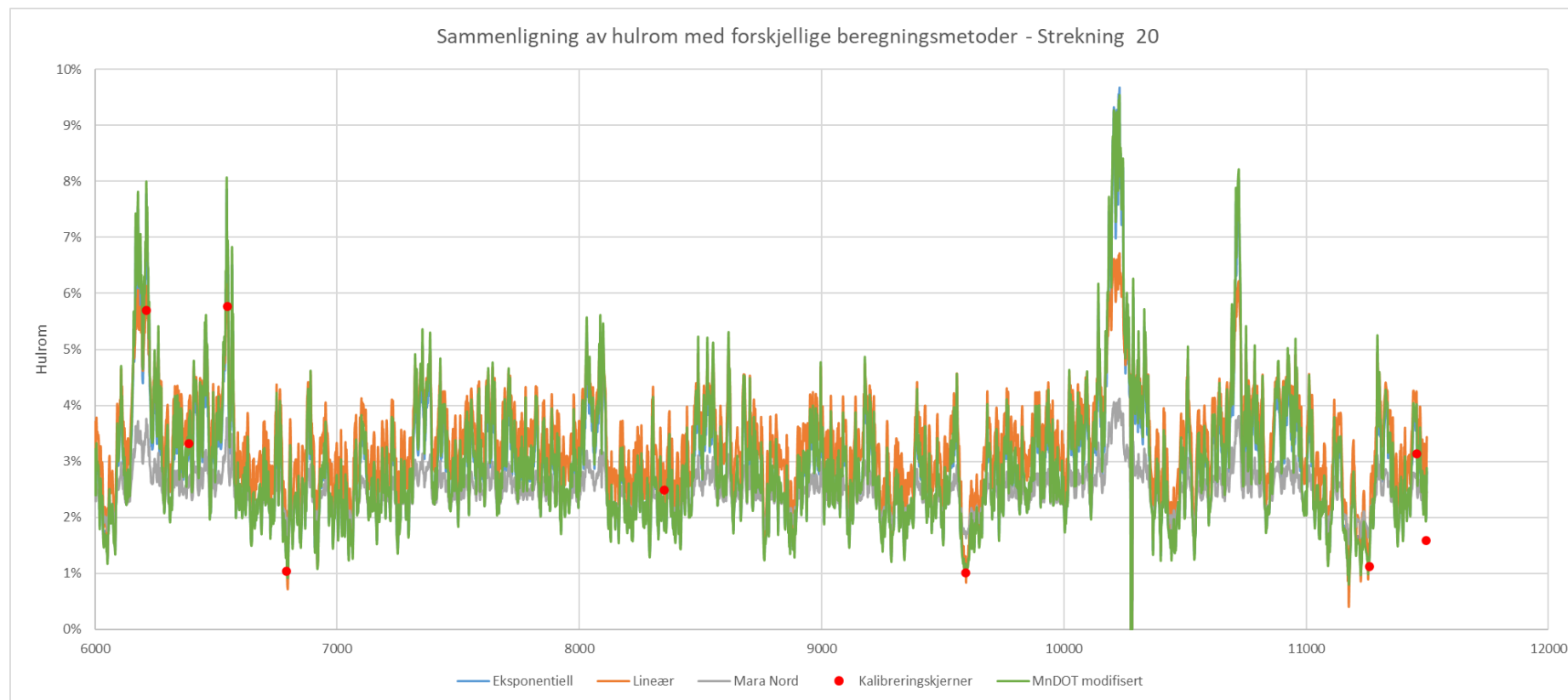
Figur 66 Strekning 17 Hulrom



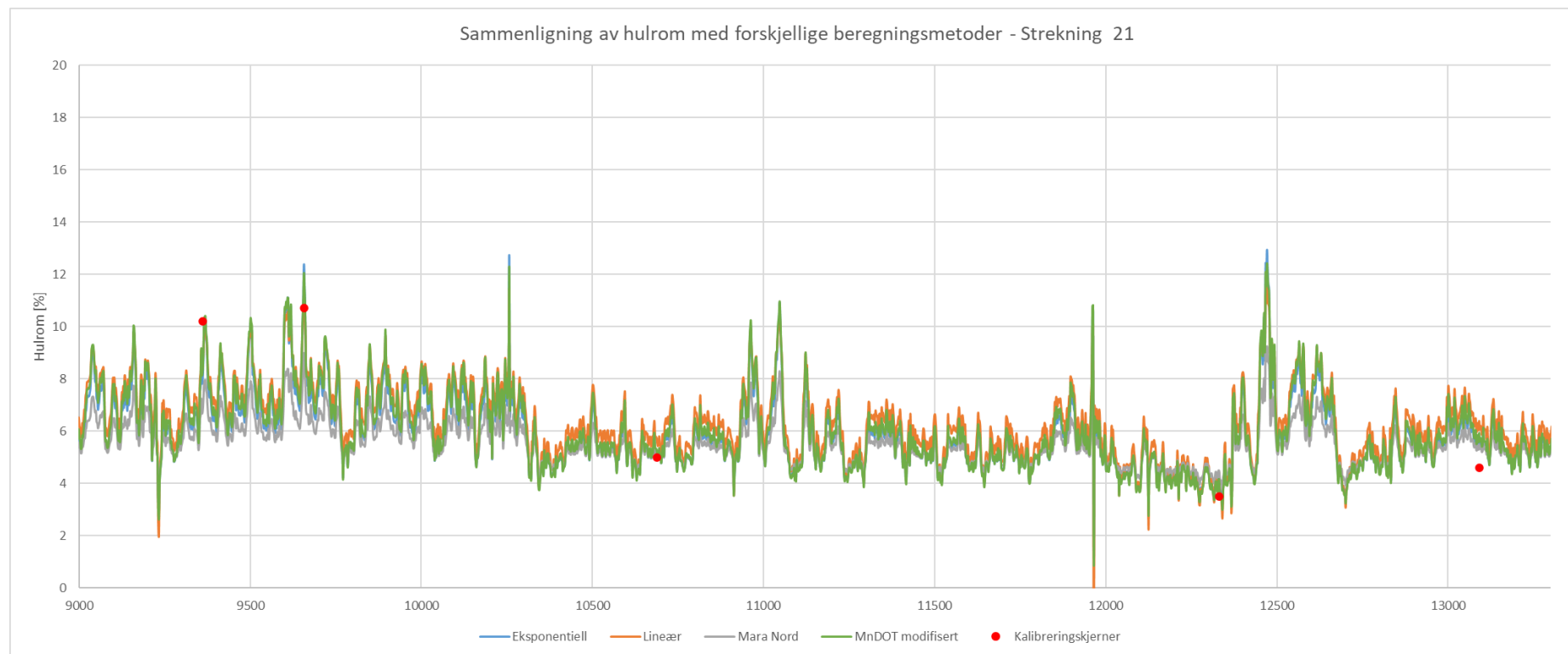
Figur 67 Strekning 18 Hulrom



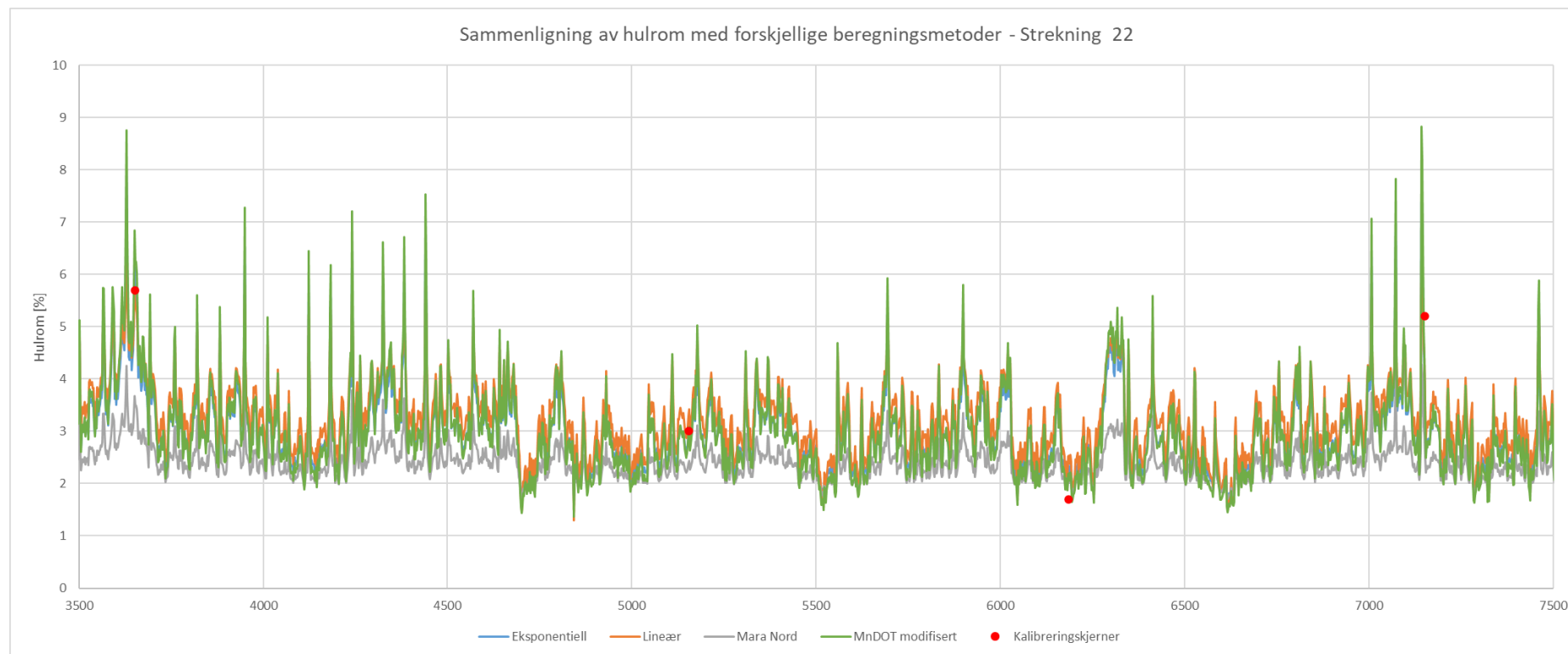
Figur 68 Strekning 19 Hulrom



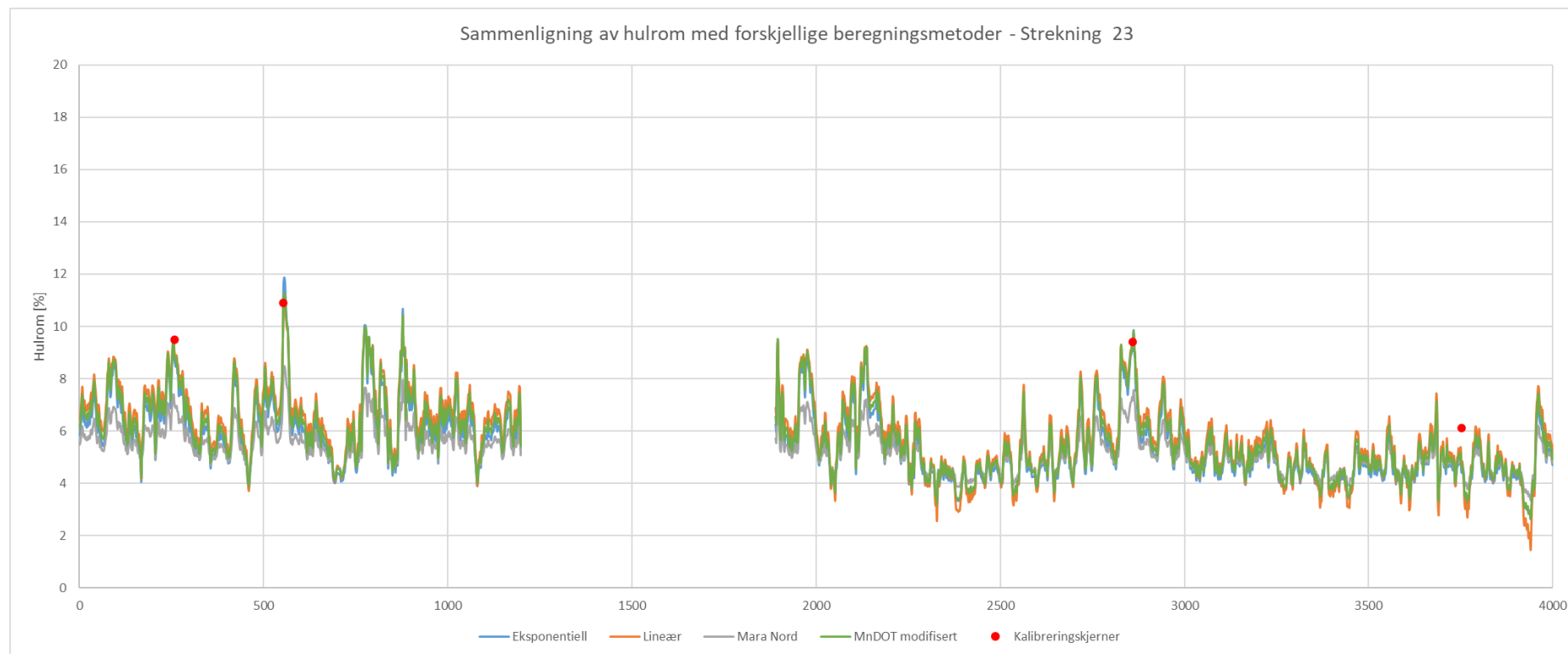
Figur 69 Strekning 20 Hulrom



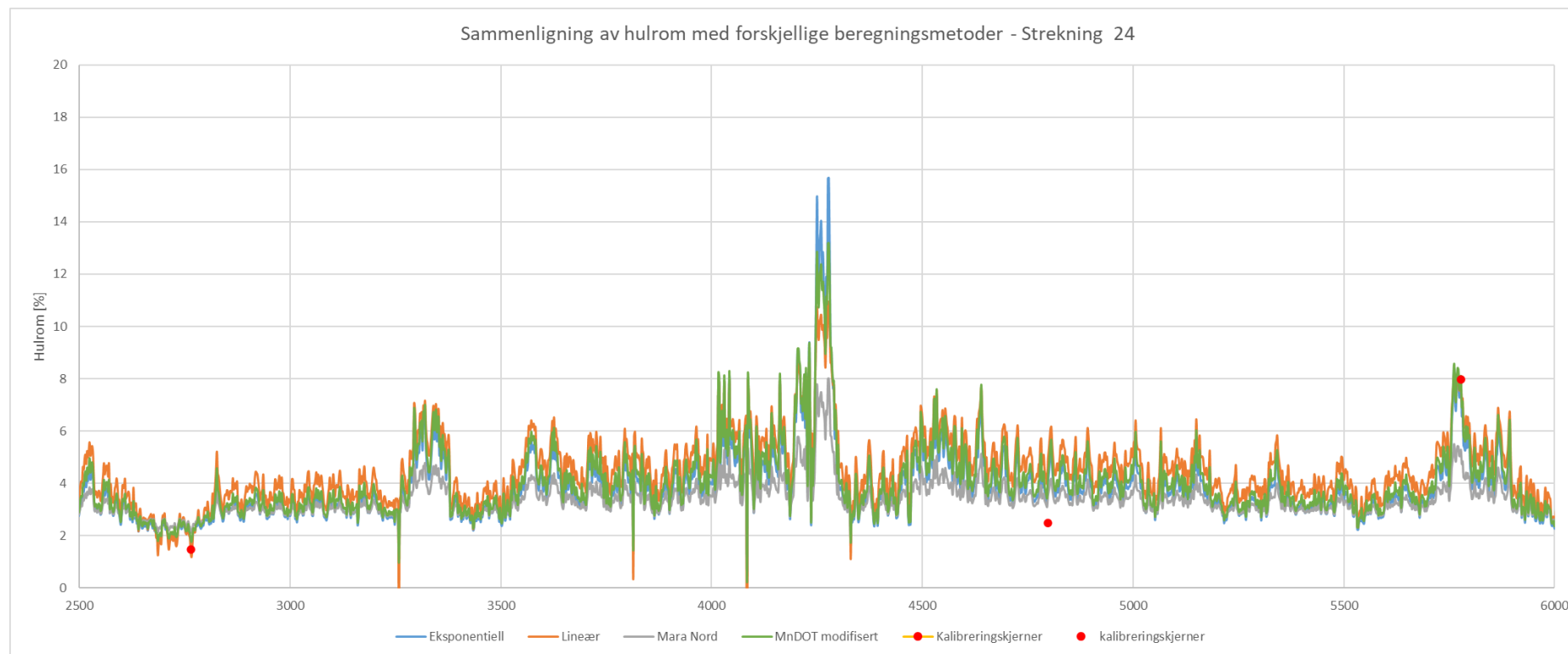
Figur 70 Strekning 21 Hulrom



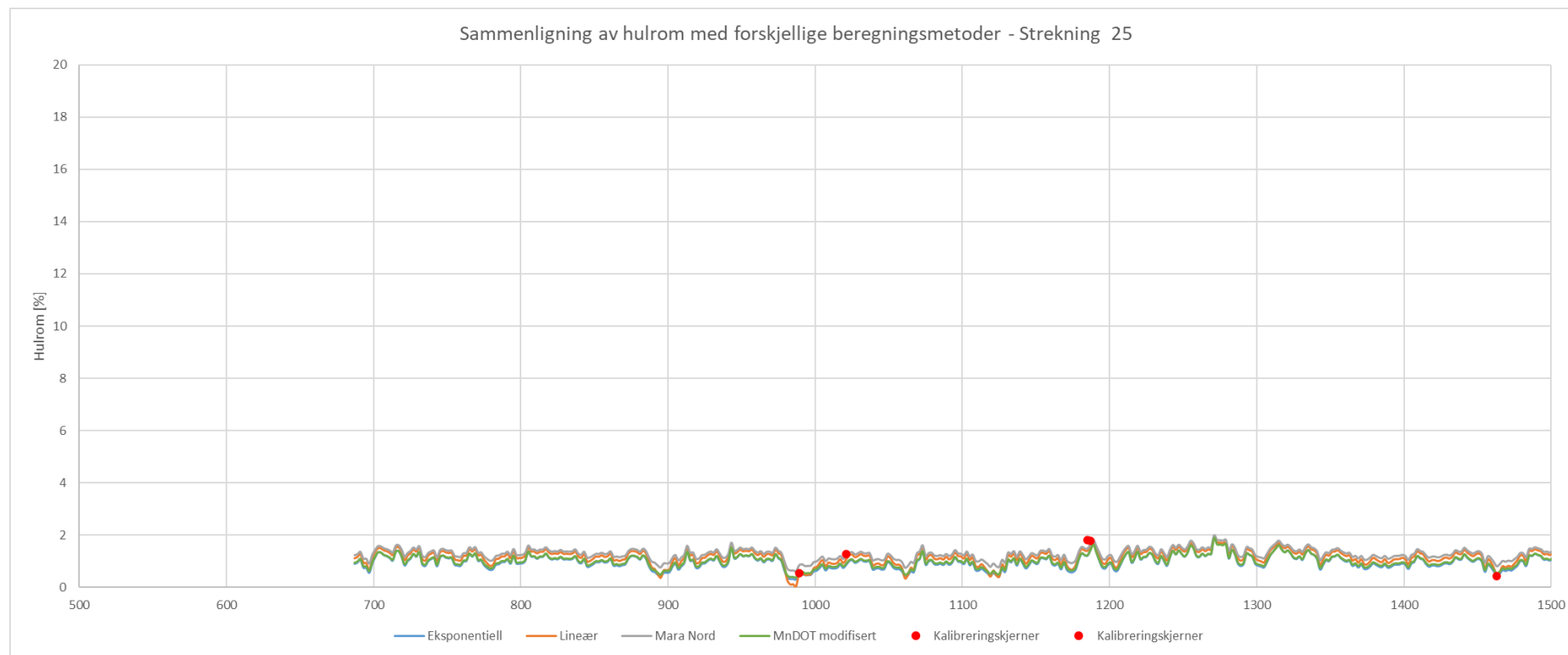
Figur 71 Strekning 22 Hulrom



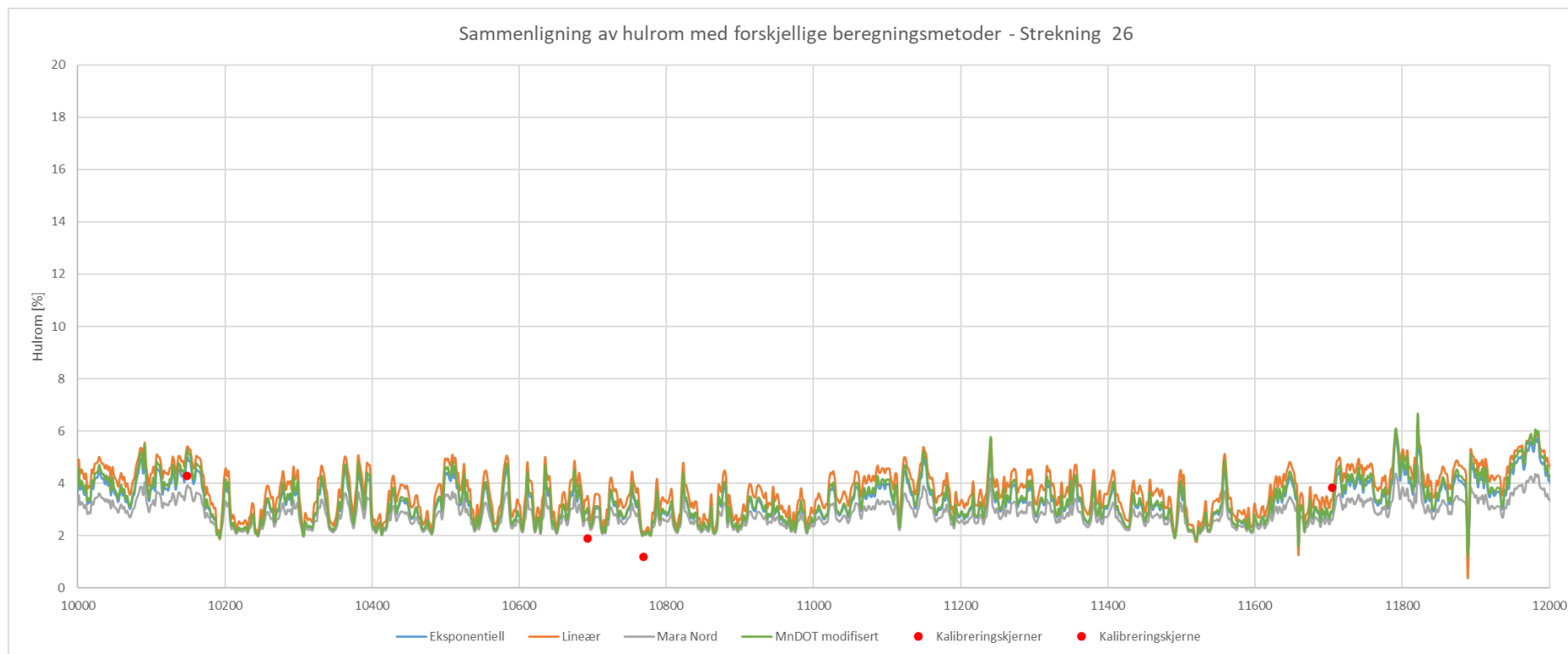
Figur 72 Strekning 23 Hulrom



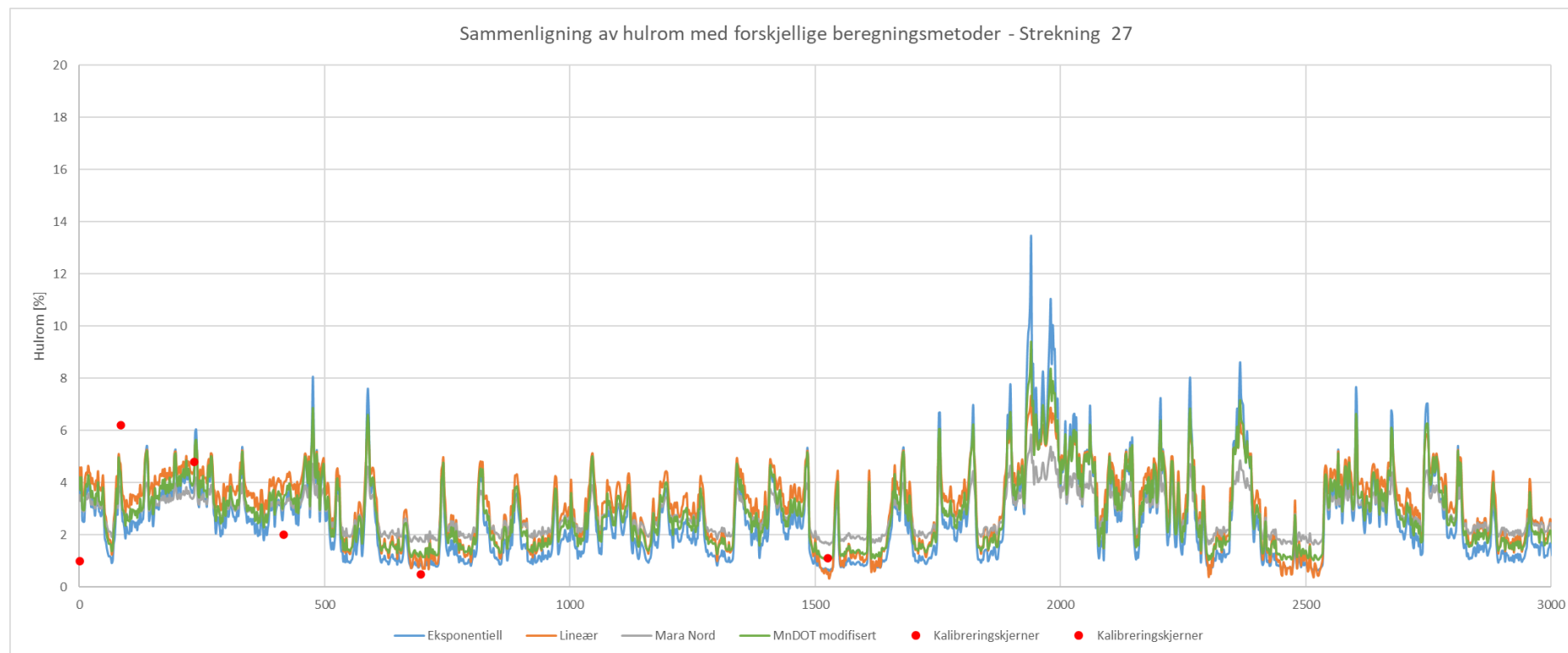
Figur 73 Strekning 24 Hulrom



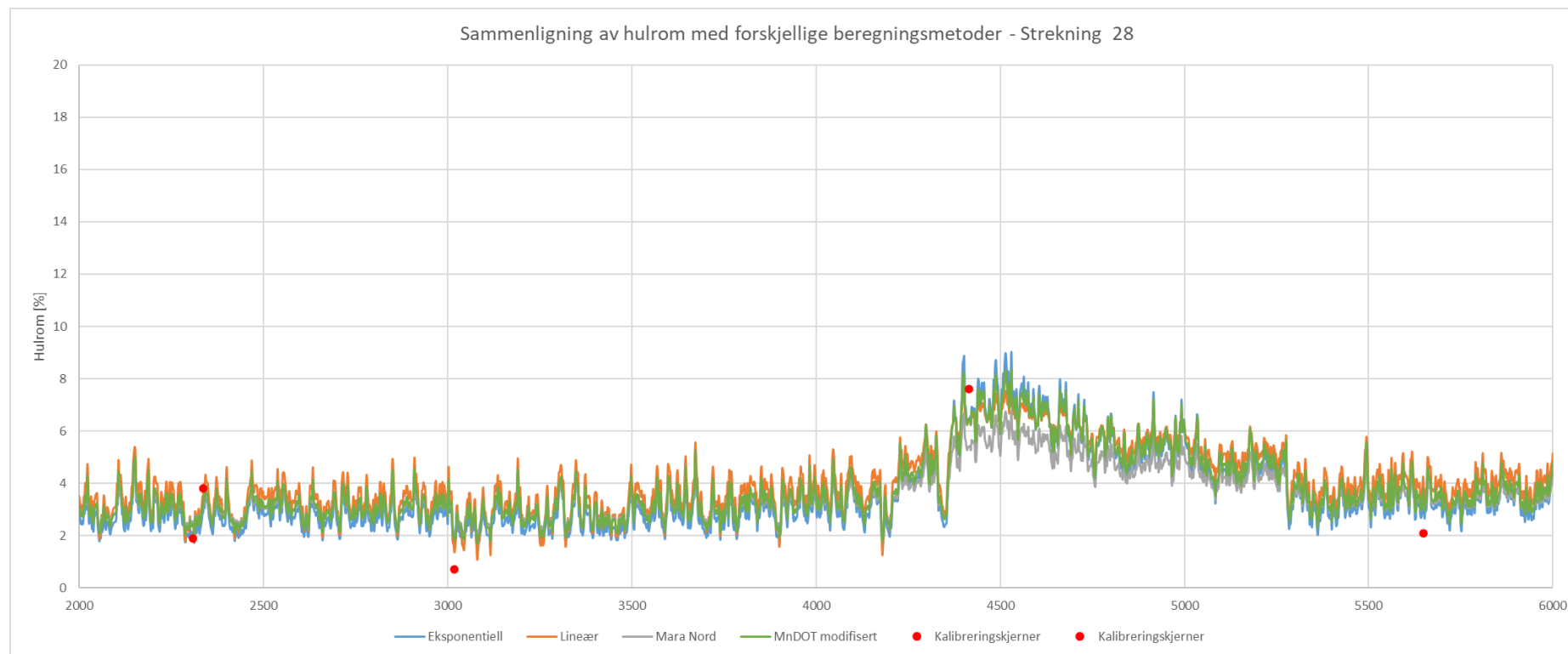
Figur 74 Strekning 25 Hulrom



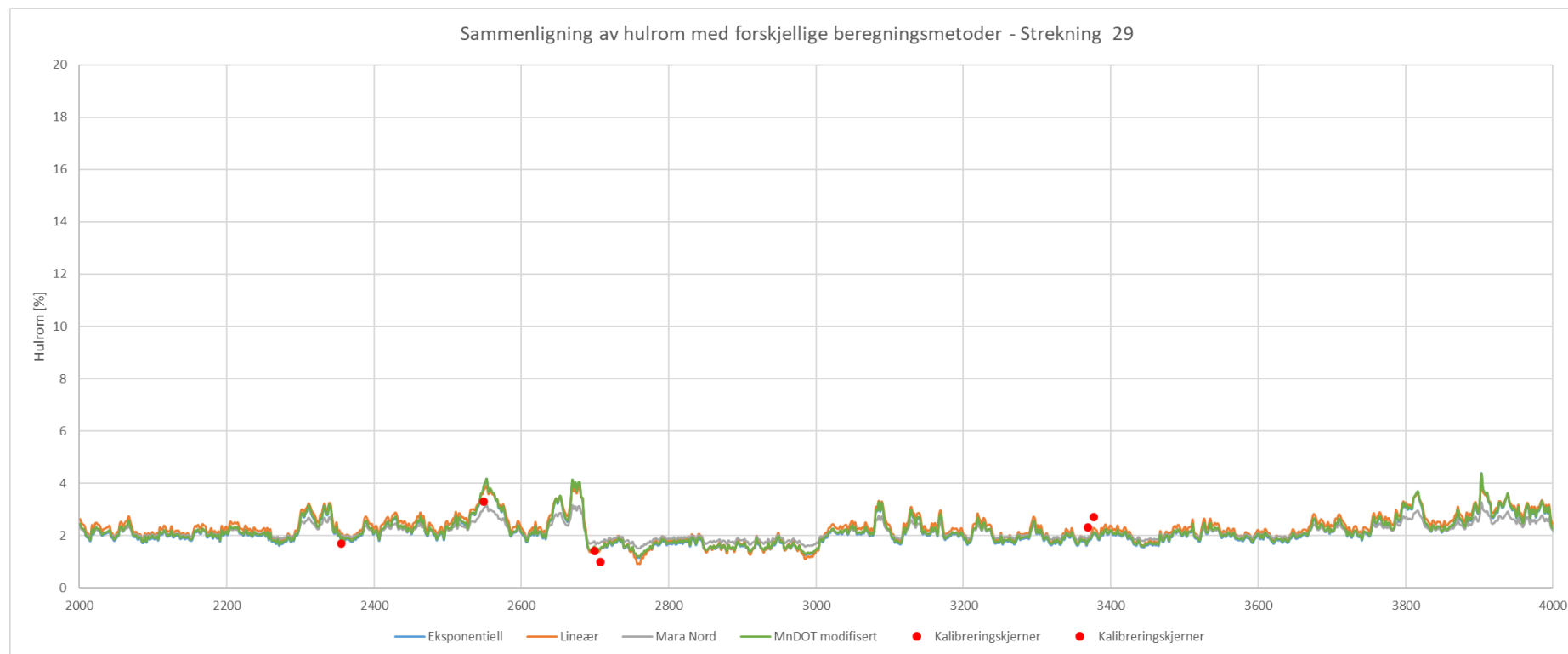
Figur 75 Strekning 26 Hulrom



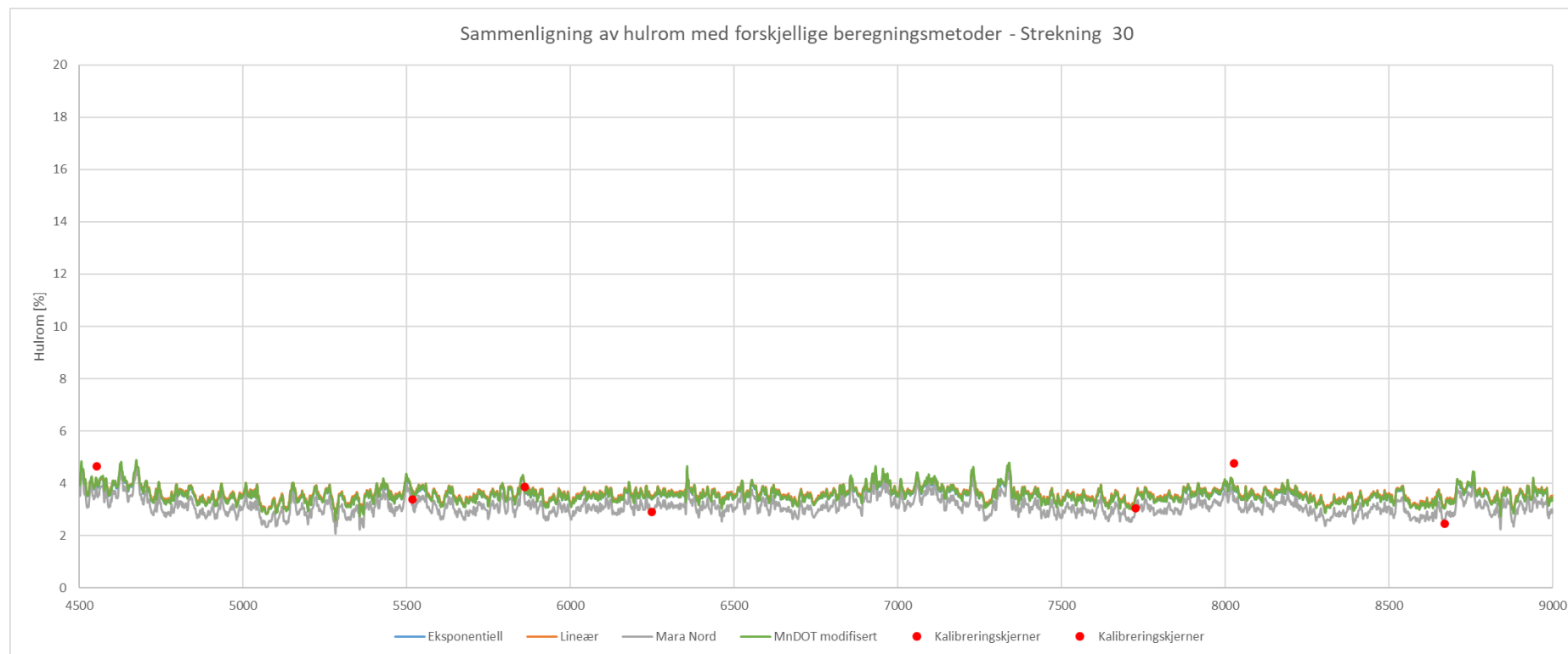
Figur 76 Strekning 27 Hulrom



Figur 77 Strekning 28 Hulrom



Figur 78 Strekning 29 Hulrom



Figur 79 Strekning 30 Hulrom



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