

FoUi Bæreevnemålinger:

Sammenligning av Fallodd, Raptor og TSD

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1108



Tittel

FoUi Bæreevnmålinger:

Undertittel

Sammenligning av Fallodd, Raptor og TSD

Forfatter

Ali Mirhosseini

Avdeling

Fagressurs Drift og vedlikehold

Seksjon

Laboratorier 1

Prosjektnummer

C15505

Rapportnummer

1108

Prosjektleder

Kari Østerås

Godkjent av

Per Otto Aursand

Emneord

Bæreevne, Fallodd, Nedbøyningsmåling, Raptor, TSD

Sammendrag

Dette delprosjektet er en del av hovedprosjektet Bæreevnmålinger og hadde som mål å sammenligne rullende bæreevnmålere (Raptor og TSD) med fallodd. Målinger ble gjennomført på fem veistrekninger i Midt-Norge sommeren 2022, med temperaturkorrigerte data for bedre sammenlignbarhet. Resultatene viser god repeterbarhet for begge systemer, der TSD har best samsvar med fallodd. Raptor ga høyere beregnet bæreevne, og en justeringsmetode ble utviklet. Begge systemer har potensial på nettverksnivå, men videre kalibrering er nødvendig.

Title

R&D: Bearing Capacity Measurements

Subtitle

Comparison of FWD, Raptor and TSD

Author

Ali Mirhosseini

Department

Operation and Maintenance, Planning and Engineering Services

Section

Laboratories 1

Project number

C15505

Report number

1108

Project manager

Kari Østerås

Approved by

Per Otto Aursand

Key words

Bearing Capacity, Falling Weight Deflectometer, Deflection Measurement, Raptor, TSD

Summary

This subproject is part of the main project Bearing Capacity Measurements and aimed at comparing rolling weight deflectometers (Raptor and TSD) with Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements. Field tests were carried out in summer 2022 on five road sections in Central Norway. Temperature-corrected data were used to ensure comparability. The results show good repeatability for both systems, with TSD generally agreeing better with FWD. Raptor produced higher bearing capacity values, and a correction method was developed. Both systems show potential for network-level evaluation, though further calibration is needed.

Forord

Denne rapporten presenterer delprosjektet «Sammenligningsmålinger av nedbøyningsdata» innenfor et større prosjekt som heter «Bæreevne målinger» der Statens vegvesen i årene 2021-23 har målt bæreevne på rv./ev.-nettet med Raptor (Rapid Pavement Tester). Prosjektet ledes av laboratorieseksjonen i fagressursavdelingen i divisjonen drift og vedlikehold. Hovedprosjektet startet i 2021 og pågår fortsatt (per juli 2025).

Hovedmålet med dette delprosjektet var å sammenligne resultater fra måling med forskjellige typer rullende bæreevne målere (Traffic Speed Deflectometer Devices, TSDD), og da spesielt Raptor kontra tradisjonelt fallodd (FWD). Dette fordi Raptor var et nytt måleutstyr som man hadde lite erfaring med kontra fallodd som har vært det dominerende utstyret for å måle bæreevne på det norske veinettet i mer enn 40 år. Fallodd ble benyttet som referanse for å kunne vurdere påliteligheten, repeterbarheten og reproducerbarheten til denne TSDD-en med tanke på fremtidig bruk. For dette formålet ble Rambølls Raptor-utstyr og Greenwoods TSD-utstyr valgt for å gjennomføre denne sammenligningsmålingen.

På tidspunktet da målingene ble gjennomført, var Norge det eneste landet som gjennomførte en slik måling og sammenligning med fallodd og to av de meste kjente TSDD-enhetene samtidig, som et pilotprosjekt.

Muligheten for å gjennomføre sammenligningsmålingene med alle tre typene bæreevneutstyr som benyttes til målinger på vei, oppsto i forbindelse med BCRR-konferansen (Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields) som ble avholdt i Trondheim i juni 2022. Dette skyldtes at både Rambølls Raptor-utstyr og Greenwoods TSD-utstyr, var til stede i Trondheim samtidig.

Målingene med Raptor-utstyret fra Rambøll og fallodd utført av Statens vegvesen ble finansiert gjennom det nasjonale måleprogrammet for bæreevne. Greenwood utførte sine målinger uten vederlag, mot at de fikk lese konklusjonene før publisering og komme med kommentarer som kunne bli tatt med i rapporten dersom de ønsket det.

Rapporten er skrevet av Ali Mirhosseini i samarbeid med Per Otto Aursand.

Sammendrag

Dette delprosjektet er en del av hovedprosjektet «Bæreevnmålinger» og hadde som mål å sammenligne resultatene fra målinger med rullende bæreevnmålere (Raptor og TSD) med tradisjonelle fallodd-målinger (FWD). Bakgrunnen for prosjektet var å vurdere påliteligheten og anvendeligheten til nye målemetoder for bæreevne under norske forhold, samt å undersøke muligheten for å bruke Raptor-data til å beregne bæreevne etter den norske formelen opprinnelig utviklet for falloddsdata.

Målingene ble gjennomført på fem utvalgte veistrekninger i Midt-Norge sommeren 2022, der alle tre teknologiene ble benyttet. For å sikre sammenlignbarhet mellom metodene, ble overflatetemperatur registrert og brukt i en temperaturkorregeringsmetode utviklet i et tidligere delprosjekt.

Analysen viser at både Raptor og TSD gir repeterbare målinger, men TSD har generelt bedre samsvar med fallodd, særlig ved de indre radiale avstandene (geofonene). Raptor viste høyere beregnet bæreevne, noe som delvis forklares med systematisk lavere nedbøyninger sammenlignet med fallodd. Det ble utviklet en temperaturkorregeringsfaktor og justeringsmetode for å forbedre samsvaret mellom Raptor og fallodd.

Prosjektet konkluderer med at begge rullende bæreevnmålere har potensial for bruk i strukturell vurdering på nettverksnivå. Likevel kreves videre studier for å validere og kalibrere målingene hvis de skal være direkte sammenlignbare med fallodd, særlig for Raptor. Resultatene gir et viktig bidrag til vurderingen av nye metoder for effektiv tilstandskartlegging av det norske vegnettet.

Summary

This subproject is part of the main project "Bearing Capacity Measurements" and aimed at comparing results from rolling weight deflectometers (Raptor and TSD) with traditional Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements. The motivation was to evaluate the reliability and applicability of new bearing capacity measurement technologies under Norwegian conditions, and to assess the possibility of using Raptor data to calculate bearing capacity based on the Norwegian formula.

Measurements were conducted during summer 2022 on five selected road sections in Central Norway using all three methods. Surface temperature was recorded and incorporated into a temperature correction method already developed in a previous subproject to ensure comparability across systems.

The analysis shows that both Raptor and TSD provide repeatable measurements, but TSD generally shows better agreement with FWD, especially at inner radial distances. Raptor tends to yield higher bearing capacity values, partly due to systematically lower deflection readings. A correction factor and adjustment method were developed to improve the agreement between Raptor and FWD.

The project concludes that both rolling deflectometers have potential for network-level structural evaluation. However, further studies are needed to validate and calibrate the measurements if they are to be directly comparable to FWD, particularly for Raptor. The findings contribute valuable insights to the assessment of new methods for efficient pavement condition monitoring on the Norwegian road network.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag.....	2
Summary	3
1. Innledning.....	5
1.1. Hva er bæreevne?	5
1.2. Fallodd	5
1.3. Raptor (Rambøll).....	6
1.4. TSD (GREENWOOD)	10
1.5. TSDD kontra FWD	12
2. Målsetning.....	13
3. Gjennomføring av målinger.....	16
4. Analyse metoden.....	19
4.1. Temperatur betydning	19
4.2. Nedbøyningsbasseng og andre parametere.....	21
5. Resultater	22
5.1. Fallodd -masterkurver.....	22
5.2. Repeterbarhet av rullende bæreevnemålere.....	23
5.3. Sammenligning av nedbøyningsverdier.....	26
5.4. Sammenligning av nedbøyningsindekser.....	32
5.5. Temperaturkorrigering av BC (bæreevne) verdier	35
5.5.1. Temperaturkorrigeringsfaktor for Raptor data.....	36
6. Konklusjon.....	39
Referanser	41

1. Innledning

1.1. Hva er bæreevne?

Definisjon av bæreevne i [N200](#): «Den største aksellast en veg kan ta over en tidsperiode (dimensjoneringsperioden) uten at vegens tilstand, ved normalt vedlikehold, faller under en definert akseptabel grense.»

Bæreevne er et svært sammensatt begrep, og i Norge er det valgt å knytte bæreevnen til aksellasten (tonn). Dette er et tallmessig uttrykk for vegens respons (nedbøyning) på en prøvebelastning (formelen for beregning av bæreevne finnes i [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#)). For praktisk bruk gjøres det forenklinger, slik at bæreevnetallet ikke gir den hele og fulle sannhet. Bæreevnen er et øyeblikksbilde på stivheten til vegkonstruksjonen, og vil variere med temperaturen i asfalten og fuktinnholdet i de ubundne lagene. Bæreevnen varierer derfor også med årstidene (Siden dette prosjektet ble gjennomført om sommeren, representerer resultatene sommerforhold. Det er dermed sommerbæreevnen som ligger til grunn for analysene). Teleløsningsbæreevnen kan være vesentlig lavere, opptil 3-4 tonn for svake veger. Det beregnes også en temperaturkorrigert bæreevne med referansetemperatur på 20°C, som vil bli forklart senere i rapporten (se 5.5. Temperaturkorrigering av BC (bæreevne) verdier). Det er også viktig å være oppmerksom på at bæreevneformelen selv ikke vil avdekke svakheter dypt i konstruksjonen eller i grunnen. Det er derfor anbefalt å også se på andre indekser som f.eks. Base Curvature Index (BCI) sammen med bæreevnetallet for å få et helhetlig bilde på bæreevnen.

1.2. Fallodd

Fallodd (FWD¹), har vært standardutstyret for strukturell evaluering av veidekker i Norge i mer enn 40 år. Som et impulsgivende nedbøyningsapparat (Figur 1) faller det en stasjonær last (ca. 50 kN) fra en viss høyde ned på veidekket og måler nedbøyninger vha. geofoner på ulike radielle avstander fra belastningssenteret (se [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#) for mer detaljer). Ved å bruke nedbøyningsbassenget som oppnås fra falloddet kan bæreevne (tonn) og andre strukturelle parametere beregnes (se [Håndbok V230 Forsterkning av veger](#)). Ved også å bruke tykkelsen på de ulike veioverbygningslagene, kan elastisitetsmodulene til lagene beregnes gjennom en tilbake-beregningsprosess (1).

¹Falling Weight Deflectometer



Figur 1. Fallodd (Falling Weight Deflectometer, FWD) utstyret som brukes på laboratorieseksjonen, fagressurs drift og vedlikehold

Det er imidlertid noen utfordringer knyttet til bruken av fallodd. For det første måler fallodd enkeltpunkter med intervaller på 25 eller 50 meter. Dette betyr at svake punkter mellom to påfølgende målepunkter kan bli oversett. Videre må kjørefeltet stenges for trafikk når falloddet er i drift, noe som kan skape trafikale utfordringer og også være farlig for operatørene. En tredje utfordring er at falloddets fallvekt ikke simulerer rullende trafikkbelastninger godt nok. Falloddet er også tregt og ineffektivt for målinger på nettverksnivå (2-4).

Rullende bæreevnemålere (TSDD²) representerer toppmoderne utstyr for strukturell evaluering av veidekker. Rullende bæreevnemålere har flere fordeler sammenlignet med fallodd. De gir kontinuerlige målinger, opererer i trafikkhastighet, krever ikke veistengning og påfører belastningen på en måte som ligner mer på trafikkens faktiske påkjenninger på vegen. Dette gjør rullende bæreevnemålere til et mer effektivt alternativ for målinger på nettverksnivå og omfattende strukturelle vurderinger.

1.3. Raptor (Rambøll)

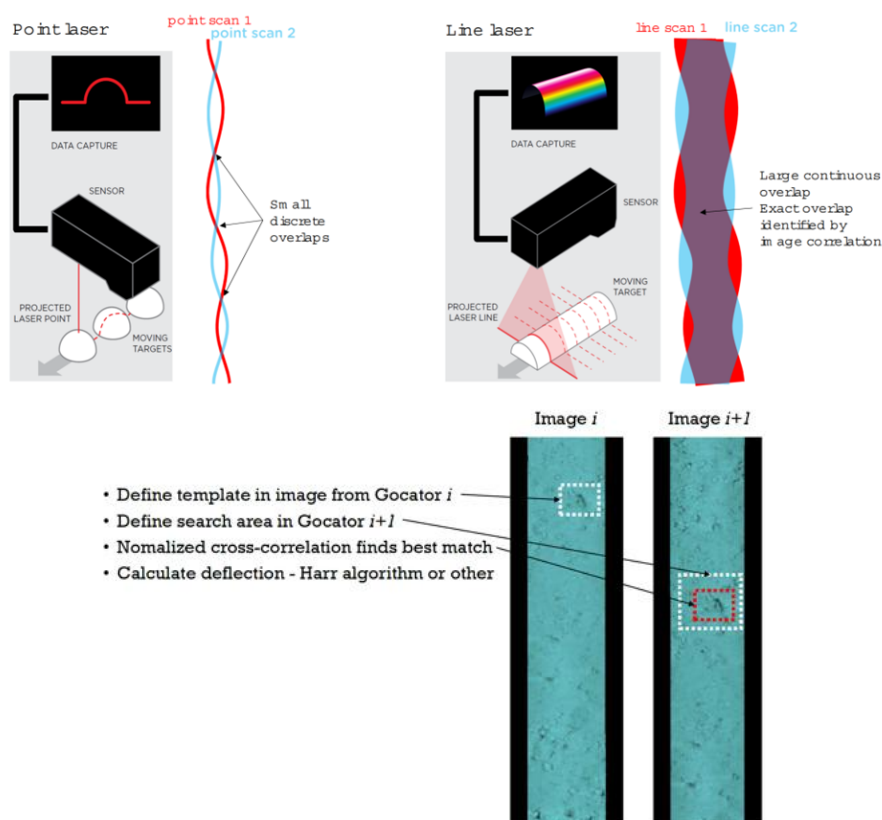
Raptor, opprinnelig utviklet av Dynatest og senere overtatt av Rambøll i 2020, representerer en betydelig innovasjon innen vurdering av veikonstruksjoner (5). Utstyret benytter Dynatest 'Rolling Weight Deflectometer' (RWD) for å samle inn strukturelle data (Figur 2).

² Traffic Speed Deflection Devices



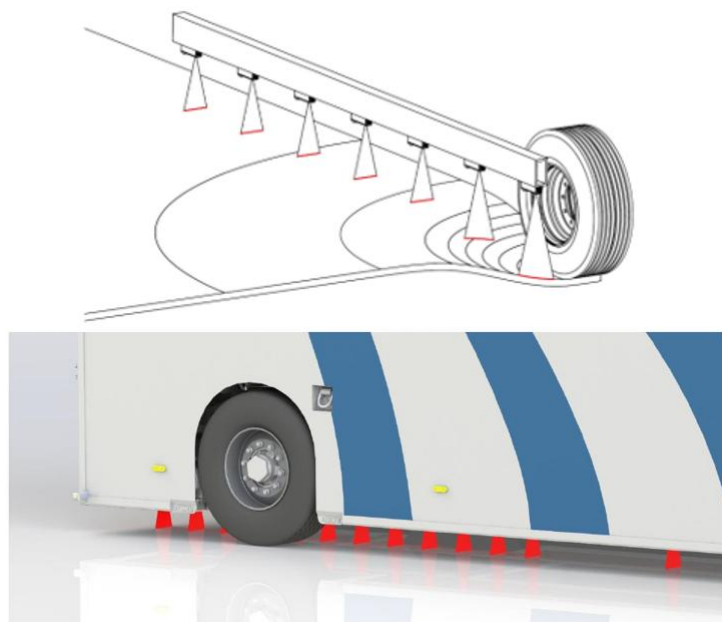
Figur 2. Rambølls Raptor-utstyr

Raptor bruker avanserte digitale bildebehandlingsteknikker, ved å anvende normalisert krysskorrelasjon på bilder tatt av linjelasere i stedet for tradisjonelle avstandslasere (Figur 3). Denne innovative tilnærmingen, patentert av Dynatest i 2013, løser effektivt utfordringen med å korrelere målinger fra forskjellige sensorer tatt på samme sted på veibanen. Videre inneholder Raptor svært nøyaktige inertialsensorer for å spore bjelkebevegelesene, noe som forbedrer enhetens fleksibilitet og kompakte form (patentert i 2017).



Figur 3. Avanserte digitale bildebehandlingsteknikker benyttes av Raptor ([Rambøll](#)) (5)

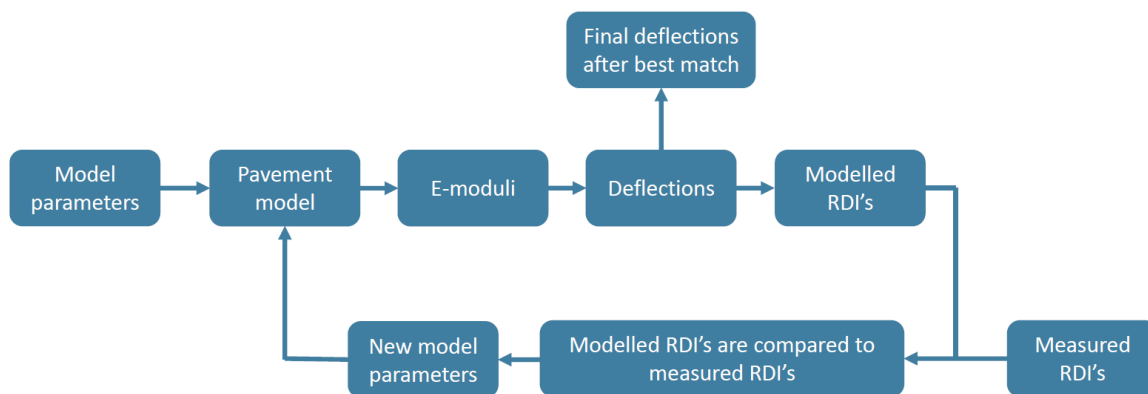
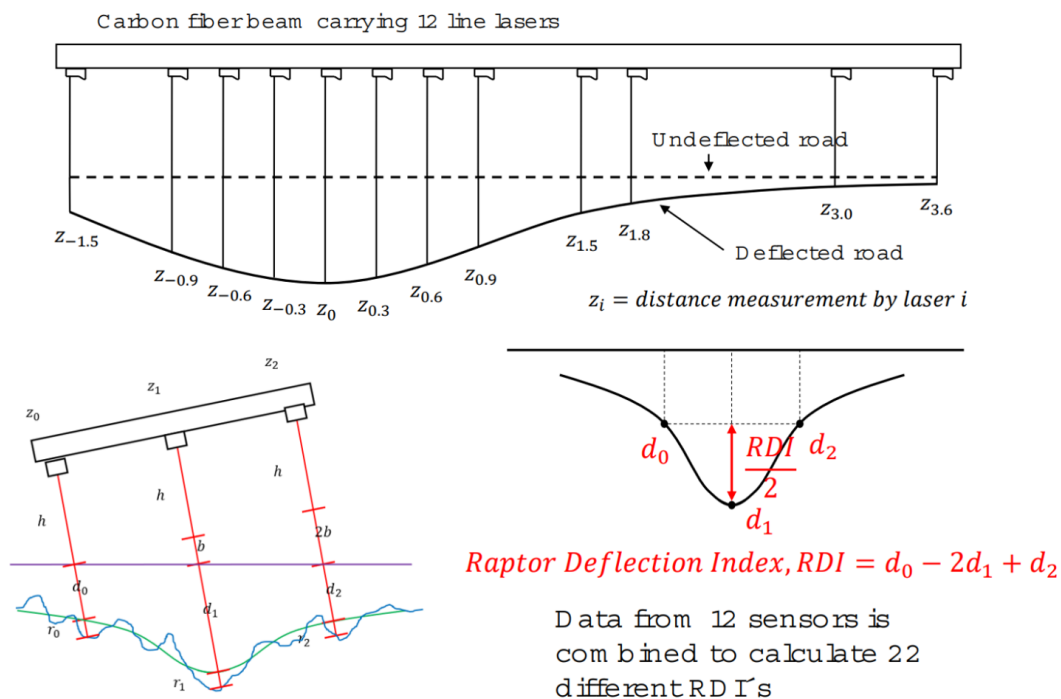
Raptors målebjelke, laget av karbonfiber for en gunstig stivhet og temperaturstabilitet, er montert i en semitrailerkonfigurasjon (Figur 4). Den er utstyrt med 12 linjelasersensorer som måler over 1280 punkter langs en 200 mm linje på tvers av kjøretøyets kjøreretning. Disse sensorene er strategisk plassert nær bakakselen, med noen plassert opptil 3,6 meter foran og 1,5 meter bak lasthjulet (6). Dette oppsettet gjør det mulig for Raptor å skanne nedbøyningsbassenger langs hele veien, i stedet for enkeltpunkter, og dermed gi en mer omfattende vurdering.



Figur 4. Raptor målebjelke plassering

Data samlet inn av disse sensorene behandles ved hjelp av en bildebehandlingsteknikk for å definere den eksakte plasseringen av hver lasersensor. De resulterende dataene, kjent som Raptor nedbøyningsindekser (RDI^3) (Figur 5), konverteres deretter til fallodddsekvivalente nedbøyningsverdier gjennom en tilbakeregning (Figur 5). Et kalibreringssystem ombord, sikrer både nøyaktighet og pålitelighet i målingene.

³ Raptor Deflection Indices



Figur 5. Beregning av Raptor nedbøyningsindekser (RDI)

Tekniske spesifikasjoner:

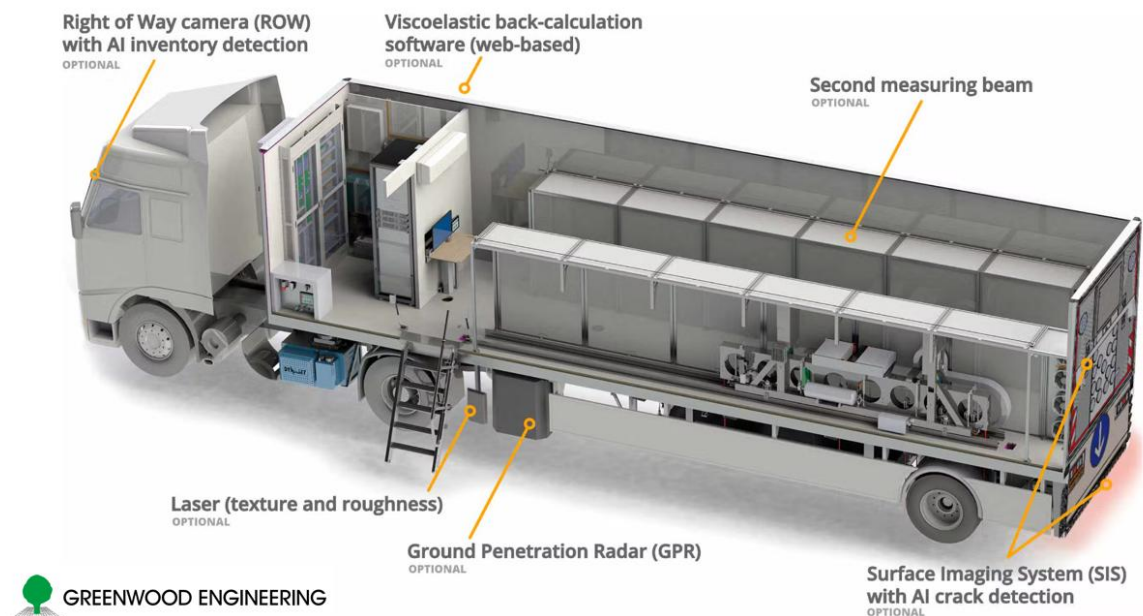
- Høyde: 3,15–3,35 meter
- Lengde: 9,5 meter
- Bredde: 2,5 meter
- Aksellast: 6–10 tonn
- Sensorer: 12 linjelaserprofilere, kan utvides opp til 24
- Lastmålingssystem: Inkluderer lastceller, strekkmålere og akselerometre

- Hastighetsområde: 2–100 km/t
- Kalibrering: Hurtig ombord system for sanntidskalibrering

Raptors design gjør det mulig for rask og effektiv drift. Utstyret kan måle mellom 150 og 400 felt-kilometer per dag, noe som gjør det til et svært effektivt verktøy for omfattende veivurderinger. Utstyrets robusthet og presisjon har ført til utstrakt bruk i mange land, inkludert Norge, Sveits, Italia og USA. Nedbøyningsdata leveres normalt for praktisk bruk som en gjennomsnittsverdi per 10 m veg.

1.4. TSD (GREENWOOD)

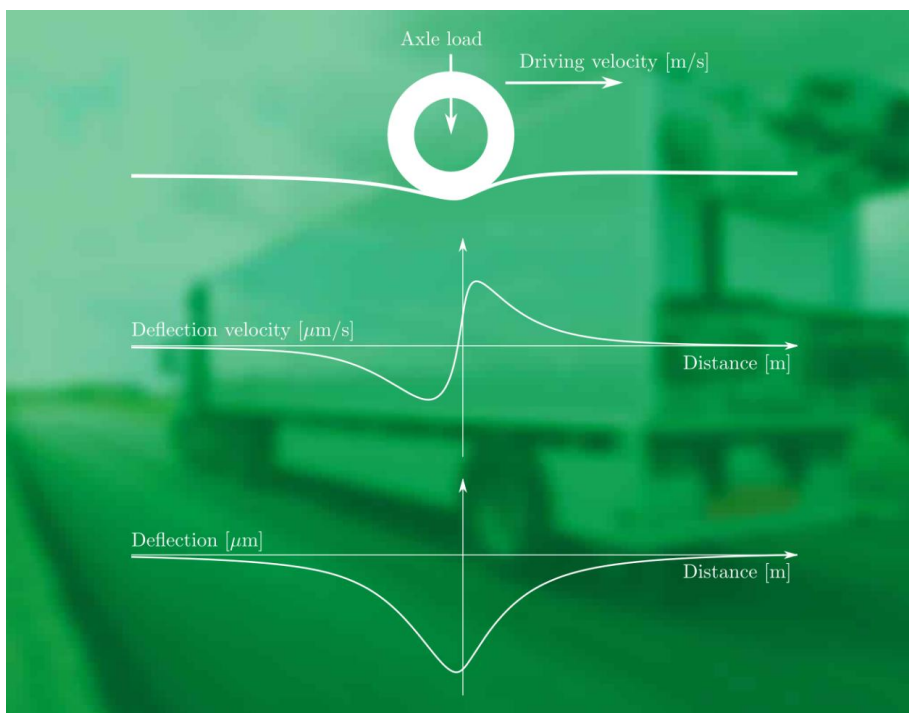
Traffic Speed Deflectometer (TSD), utviklet av Greenwood Engineering i 2004, er en banebrytende teknologi utviklet for å vurdere veikonstruksjoners nedbøyning (Figur 6). TSD bruker Doppler-lasersensorer montert på en stiv bjelke for å måle nedbøyningshastigheten forårsaket av bakakselens belastning på vegen med tvillinghjul (7). Ved å dele denne nedbøyningshastigheten med kjøretøyets horisontale hastighet, beregnes nedbøyningshelninger (Figur 7) (7, 8). Disse helningene konverteres deretter til nedbøyningsverdier ved hjelp av beregningsmetoder som Area Under the Curve (AUTC) metoden og Euler-Bernoulli (EB) metoden (9).



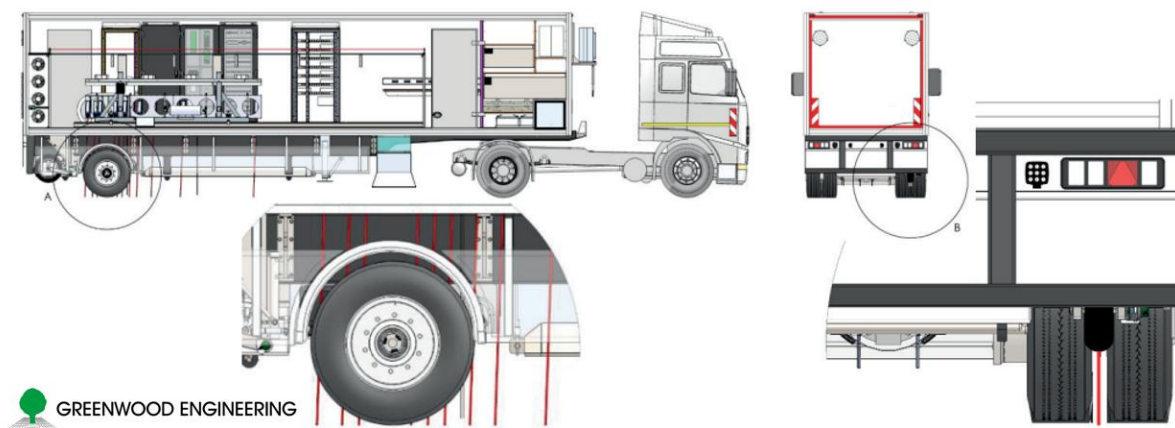
Figur 6. Greenwoods TSD-utstyr (hentet fra [GREENWOOD Engineering](https://www.greenwood-engineering.com/))

TSD måler nedbøyningshastighet i stedet for nedbøyning, ved å bruke Doppler-effekten for å fange endringer i bølgelengden av signaler reflektert fra veibanen (Figur 7). Dette prinsippet sikrer at faktorer som overflatetekstur og ujevnheter ikke påvirker nøyaktigheten av målingene. Utstyret inkluderer typisk 10 eller flere Doppler-lasere, plassert for å måle veibevegelsen både foran og bak lasthjulet, og gir en omfattende visning av nedbøyningsbassenget (Figur 8). Nøkkelparametrene som oppnås inkluderer Surface

Curvature Index 300 (SCI_{300}) og maksimal nedbøyning (d_0), som er avgjørende for å analysere veideformasjoner over store veinettverk og flyplasser.



Figur 7. TSD måler nedbøyningshastigheten i stedet for nedbøyningen (hentet fra [GREENWOOD Engineering](https://www.greenwood-engineering.com/))



Figur 8. Skjematisk illustrasjon av lasere i TSD (hentet fra [GREENWOOD Engineering](https://www.greenwood-engineering.com/))

Tekniske spesifikasjoner:

- Målebjelke: 'Rigid beam' med flere Doppler-lasersensorer
- Sensorer: 10 eller flere, plassert foran og bak lasthullet
- Kalibrering: Høy presisjon ved bruk av doppler-teknologi
- Ytelse: Nøyaktige og repeterbare målinger av nedbøyningsbassenget

TSD har blitt brukt i en rekke land, inkludert Danmark, Storbritannia, Australia, Italia, Polen, Sør-Afrika, USA, Iran, Kina, Norge og Tyskland (9), noe som understreker dens brede aksept og pålitelighet.

I tillegg, kan TSD produsere et kontinuerlig, klart bilde av veidekket med god oppløsning, uavhengig av lysforhold. Dette oppnås ved hjelp av kraftige LED-blitser som eliminerer skygger og sikrer jevn belysning. Denne funksjonen, sammen med evnen til å lagre kontinuerlige bilder med nøyaktige tids- og distansedata, øker både nøyaktigheten og nytteverdien av TSDs vurderinger.

1.5. TSDD kontra FWD

Selv om rullende bæreevнемålere har sine fordeler, har fallodd levert nøyaktige nedbøyningsmålinger i mange år (10, 11). Det finnes ennå ingen standardprotokoll for å integrere nedbøyningsdata fra rullende bæreevнемålere i veivedlikeholdssystemer. En relevant bekymring kan være om rullende bæreevнемålere og fallodd gir konsistente resultater. Til tross for at rullende bæreevнемålere og fallodd har ulike belastningskarakteristikker og måleprinsipper, må enhver ny teknologi for strukturell vurdering kunne identifisere svake punkter i veidekker. Derfor er det nyttig å undersøke hvor godt disse enhetene samsvarer når de definerer veidekkets strukturelle egenskaper.

Elseifi og Zihan sammenlignet TSD og fallodd på en vei i Louisiana, USA, og fant at nedbøyningsverdiene var statistisk forskjellige, med overflate-jevnhet som en mulig påvirkende faktor i TSD-målingene (10). De utviklet et kunstig nevralt nettverk (Artificial Neural Network, ANN) modell for å forutsi tilsvarende fallodd-nedbøyninger basert på TSD-målinger. Morovatdar et al. sammenlignet TSD- og fallodd-målinger på en hovedvei i Wisconsin, og konkluderte med at indeksene fra nedbøyningsbassenget oppnådd fra TSD og fallodd hadde god sammenheng; imidlertid var fallodd-nedbøyninger generelt 12 til 37 % høyere enn TSD-nedbøyninger for de samme stedene på veien (12). Nielsen og Jensen brukte TSD for strukturell evaluering av to rullebaner på Kastrup lufthavn og observerte at SCI-verdier fra TSD og '*Heavy Weight Deflectometer*' (HWD) var sammenlignbare (13). I en annen studie viste Nielsen et al. at det er konsistens mellom TSD-målinger og nedbøyninger oppnådd fra et prøvedekke i Finland. De observerte også et svært godt samsvar mellom spenninger utledet fra TSD og spenninger oppnådd fra transdusere på det instrumenterte dekket (14). Abdel-Khalek et al. utviklet en parameter «strukturelt nummer» (SN). Formelen er basert på nedbøyninger oppnådd med en '*Rolling Wheel Deflectometer*' (RWD). Selv om den foreslåtte modellen ikke hadde noen ledd relatert til tykkelsen og egenskapene til veglagene, ble det observert et godt samsvar mellom SN-verdier fra denne formelen og SN-verdier oppnådd fra fallodd (15).

Elseifi et al. sammenlignet RWD med fallodd, og fant en god sammenheng mellom nedbøyningsmålingene. De konkluderte med at begge teknologiene kan beskrive veienes strukturelle integritet, men at veiens tilstand spiller en avgjørende rolle for å sammenligne spredning og ensartethet av dataene fra disse enhetene (16). Antonsen og Mork (17) oppdaget at både maksimal nedbøyning og SCI var sammenlignbare mellom TSD og fallodd, både når det gjelder nedbøyningsverdier og variasjonsmønstre. De brukte bæreevne beregnet fra fallodd-målinger som referanse for å analysere TSD-målinger, og

utviklet en revidert bæreevneformel basert på TSD-data. I en nylig artikkel, oppsummerte Katicha et al. (5) litteraturstudier om TSD fra det siste tiåret, og konkluderte med at generelt, finnes det en god korrelasjon mellom fallodd og TSD, samt at informasjonen som kan oppnås fra fallodd, også kan hentes fra TSD. Andre studier har også forsøkt å evaluere konsistensen mellom TSD og fallodd, men temperaturkorrigering av rullende bæreevнемålere har ennå ikke blitt grundig undersøkt (11, 20, 21).

Raptor er en nyere teknologi, og forskningen på dens bruk er fortsatt begrenset. Madsen og Pedersen foreslo en dynamisk viskoelastisk modell for å simulere effekten av støt og bevegelige laster. De brukte tilbake-regning av Raptor-målinger for å finne RDIs. Deretter brukte de fremover-regning (ved hjelp av ligninger basert på fallodd) for å finne de tilsvarende verdiene fra fallodd-målingene. De konkluderte med at de beregnede ekvivalente d_0 og d_{150} er sammenlignbare med de målte fallodd-nedbøyningene på de samme stedene (18, 19).

Rullende bæreevнемålere er avanserte og kostbare verktøy sammenlignet med fallodd, men kan likevel være mer kostnadseffektive for målinger på nettverksnivå og høytrafikkerte veger. Deres kostnadseffektivitet vurderes derfor ofte som god i slike sammenhenger, men bør fortsatt evalueres nøye ved valg av nye løsninger for tilstandskartlegging. Valget av en pålitelig rullende bæreevнемåler er derfor interessant for både vegforvaltere og ingeniører. For å studere deres anvendelse under norske forhold, gjennomførte Statens vegvesen et feltforsøk ved bruk av Rambølls Raptor-utstyr og Greenwoods TSD-utstyr, sammen med fallodd-utstyret ved forskjellige temperaturer. Fallodd-masterkurver (forklart i detalj i 4.1. Temperatur betydning) ble laget for temperaturkorrigering, og georadar (Ground Penetration Radar, GPR) ble brukt for data om lagtykkelser. Grafiske, statistiske og strukturelle sammenligninger ble utført mellom fallodd og rullende bæreevнемålere. En foreslått forbedring var rettet mot å øke samsvaret mellom Raptor-data og fallodd for beregning av bæreevne. Ved å undersøke repeterbarheten til de rullende bæreevнемålerne og evaluere deres samsvar med fallodd, bidrar dette prosjektet med verdifull innsikt i anvendelsen og den potensielle integreringen av rullende bæreevнемålere i veivedlikeholdssystemer.

2. Målsetning

Som nevnt i forord, var målet med dette prosjektet å vurdere muligheten for å bruke nye metoder for bæreevнемåling (rullende bæreevнемålere) ved å sammenligne resultatene med fallodd-målinger. En viktig del av prosjektet er å sikre repeterbarheten av målingene med de nye rullende bæreevнемålerne. I tillegg, og kanskje viktigst, er det nødvendig å vurdere hvor godt resultatene fra de to rullende bæreevнемålerne stemmer overens med resultatene fra fallodd. Om nødvendig, skal det også utvikles en justerings- eller korreksjonsfaktor for å gjøre resultatene sammenlignbare.

Hovedmålene for dette delprosjektet kan derfor oppsummeres som følger:

- Å undersøke repeterbarheten av rullende bæreevнемålere.

- Å evaluere samsvar mellom nedbøyninger oppnådd fra rullende bæreevнемålere og fallodd.
- Å oppnå en temperaturkorrigeringsfaktor for å bestemme bæreevnen basert på fallodd-data.
- Å foreslå en justering for Raptor-data for å gjøre bæreevnen oppnådd fra Raptor og fallodd sammenlignbare.

Det er verdt å nevne at dette delprosjektet bygger på det forrige delprosjektet om temperaturkorrigeringsfaktor av fallodd-målinger, der en temperaturkorrigeringsfaktor for bæreevne (tonn) ble oppnådd som var svært lik den som brukes i Norge (se [Håndbok V230 Forsterkning av vegger](#)). Med denne temperaturkorrigeringsfaktoren kan alle bæreevne-verdier beregnet basert på nedbøyninger målt ved fallodd ved forskjellige temperaturer (overflate-temperaturen må ikke være lavere enn 5 grader og ikke høyere enn 35 grader) overføres til bæreevne-verdier ved referansetemperaturen (20 grader). For mer informasjon, se 4.1. Temperatur betydning.

Muligheten for å gjennomføre sammenligningsmålingene med alle tre typene bæreevneutstyr som benyttes til målinger på veg, kom som følge av «BCRRA» (Bearing Capacity of Roads, Railroads and Airports) konferansen som ble avholdt i Trondheim i juni og juli 2022 (29.6.2022, 4.7.2022, og 5.7.2022). Dette som følge av at både Rambøll med sitt Raptor-utstyr, Greenwood med sitt TSD-utstyr var i Trondheim, og fallodd med en Dynatest 8012-044 modell.

Målingene med Raptor-utstyr fra Rambøll ble finansiert gjennom nasjonalt måleprogram for bæreevne. FoU-prosjektet finansierte målinger utført av SVV, mens Greenwood utførte målingene uten vederlag mot at de ville få lese konklusjonen før publisering og komme med kommentar som blir tatt med i rapporten dersom de ønsker dette.

Følgende strekninger ble valgt ut for sammenligningsmålinger. Se Figur 9 for plassering:

Strekning 1: E14 Stjørdal-Hofstad

- S1D1 m1700 – 2200
- Målt i felt 1 (østgående)
- Fartsgrense: 70 og 80 km/t
- ÅDT: 4400, ÅDT_T: 10%

Strekning 2: E14 Stjørdal-Hofstad

- S2D1 m0 – 4000
- Målt i felt 1 (østgående)
- Fartsgrense: 70 og 80 km/t
- ÅDT: 4400, ÅDT_T: 10%

Strekning 3: EV14 Hegramo-Forra bru (Nylagt dekke 2021)

- S3D1 m0-3250

- Måles i begge felt (felt 1 og felt 2). Totalt: 6,5 km
- Fartsgrense: 70 km/t
- ÅDT: 2600, ÅDT_T: 12%

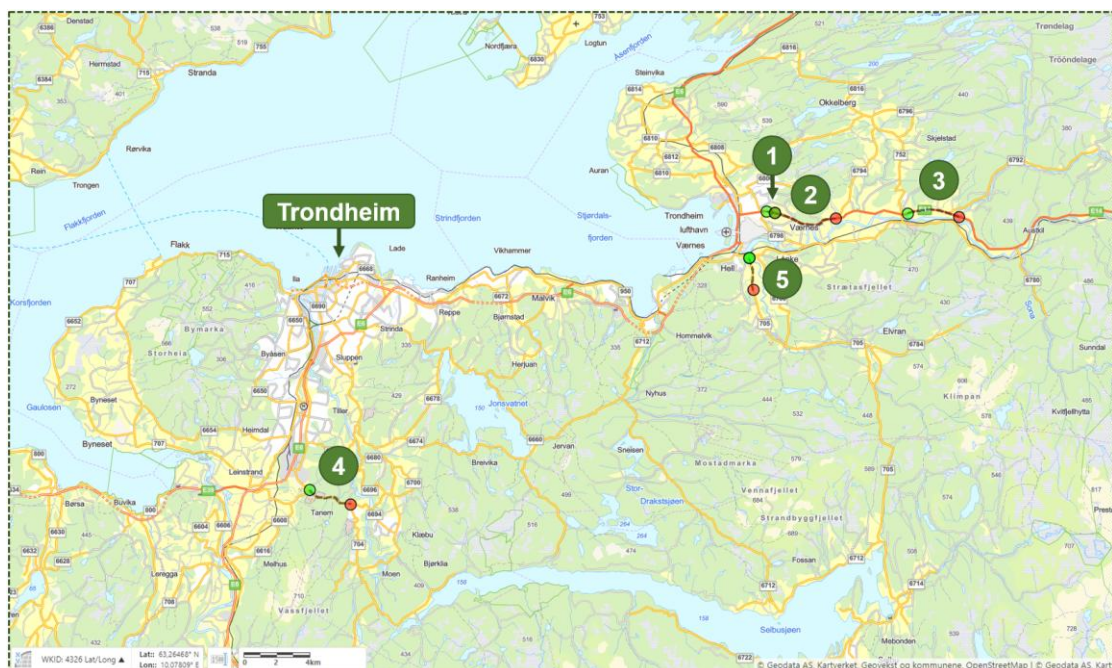
Strekning 4: FV705, Hell-Leira

- S1D1 m1000 – 3000
- Måles i felt 1 (sørgående)
- Fartsgrense: 60 og 70 km/t
- ÅDT: 4416, ÅDT_T: 11%

Strekning 5: FV704 Skjøla-Tanem (relativt nybygd fra 2018)

- S2D1 m0 – 2850
- Måles i felt 1 (østgående)
- Fartsgrense: 80 km/t
- ÅDT: 4100 ÅDT_T: 40%.

Det var også planlagt å måle Fv704 S1D1 m520 – 2200 som en del av strekning 4. Strekningen ble tatt bort dagen før måling, på grunn av trafikksikkerhet og logistikk. På grunn av høyere trafikkmengde (ÅDT over 5000) hadde vi ikke mulighet (lov) til å måle denne med fallodd i perioden kl. 06 – kl. 09 og kl. 13 – kl. 19. Det var derfor ikke mulig å måle denne samtidig som TSD og Raptor da vi kun hadde disse tilgjengelig i perioden kl. 07.00 – 13.00.



Figur 9. Plassering av strekningene som ble valgt for sammenligningsmåling

3. Gjennomføring av målinger

Målingene var planlagt å starte opp den 29.06.2022 kl. 08, men på grunn av delvis fuktig asfaltdekke forårsaket av kondens ble det bestemt at falloddet skulle starte kl. 08 og rullende bæreevнемålere (Raptor og TSD) skulle starte kl. 09. Dette fordi både Raptor og TSD er avhengig av tørt dekke for å utføre målingene. Målingene med Raptor og TSD ble utført mellom kl. 09.00 og 14.00.

Fallodd målte bæreevnen med intervaller på 25 eller 50 meter (se Tabell 1). Luft- og overflatetemperaturene ble også registrert ved hvert målepunkt i henhold til [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#). Fallodd-sensorene ble plassert på ni radiale avstander, nemlig 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 og 180 cm fra lastens senter. Den påførte lasten var 50 kN og platens diameter var 300 mm. Tabell 1 oppsummerer strekninger, plassering, målte kjørefelt, gjennomsnittlig overflatetemperatur (°C), antall målinger, måleintervaller og antall brukte datapunkter for hver strekning i videre dataanalyse.

Tabell 1. Informasjon om strekningene og forskjellige temperaturer som målinger ble gjort for strekningene med Raptor, TSD, og fallodd

Nr.	Veg	Strekning	Felt	Gjennomsnitt overflate temp. (°C)	Antall målepunkter	Intervall (m)	Antall brukte datapunkter
1	EV14 S1D1	Stjørdal-Hofstad	1	17.1	21	25	20
				28.4	20	25	
				34.0	21	25	
2	EV14 S2D1	Stjørdal-Hofstad	1	19.3	161	25	161
				27.5	161	25	
				30.8	161	25	
3	EV14 S3D1	Hegramo-Forra	1	20.9	131	25	66
				27.3	66	50	
				28.6	131	25	
			2	19.9	131	25	66
				24.4	66	50	
				31.5	131	25	
4	FV705 S1D1	Hell-Leira	1	18.5	81	25	41
				28.9	41	50	
				33.1	81	25	
5	FV704 S2D1	Skjola-Tanem	1	15.8	17	25	17 og 30
				15.9	110	25	
				20.2	112	25	
				28.6	30	50	

Raptor-målinger ble gjennomført i begge retninger på alle strekningene bortsett fra strekning 1 den 29. juni 2022 (Tabell 2). Utstyret som ble brukt var Rambølls Raptor (serienummer 9100-002), og den normaliserte gjennomsnittslengden ble satt til 10 m. Luft- og overflatetemperaturene ble registrert kontinuerlig og normalisert på de samme 10 m intervallene. Raptor måler punkter veldig tett, men på grunn av stor usikkerhet på hvert enkelt punkt rapporteres det bare ut 1 verdi for hver 10. meter. Det vil si at det fra m0 – m10 blir en punktverdi (gjennomsnitt over 10m), og SVV har valgt i våre målinger å plassere disse ut på

startmeter (m0). Gjennomsnittsverdien som er plassert i m0 gjelder da fra m0 og 10m fremover. Da dette er en samlet verdi over 10m kan denne verdien plasseres hvor den vil innenfor målelengden på 10m ved sammenligning mot fallodd. 10m filene inneholder informasjon om posisjonering, nedbøyningsbasseng og utregnede verdier (som SCI, BCI, osv.), men ikke utregnet bæreevne i tonn. Raptor-målingene ble utført på to forskjellige hastighetsnivåer; 50 og 80 km/t.

Raptor måler inn punktene sine basert på GPS-posisjon med basekorleksjon. Plassering på vegsystemreferansen med vegnummer, strekning, delstrekning og meter gjøres i ettertid. Det slås da opp i API-et til vegreferansesystemet i NVDB hvilken verdi som ligger på en og en GPS-posisjon. Rambøll benytter INS med GNSS og IMU, hvor de da tar inn satellitter fra både GPS og Glonass-systemene. I tunneller kjøres det på trippsteller som både korreleres fremlengs og baklengs fra siste kontakt med GPS. Dette er ikke relevant for sammenligningsmålingene da ingen av strekningene inneholder tunneller eller andre hindre.

TSD-målingene ble utført med Greenwoods TSD den 29. juni 2022, samme dag som Raptor-målingene. Da Greenwood ikke ønsket betalt for målingene, er det SVV som har stått for å koble målingene til vegreferansen. Dette er gjort på samme måte som Rambøll gjør for Raptor-målingene. Da ved å slå GPS-posisjon opp mot API-et til vegreferansesystemet. Overflatetemperaturen da TSD var i drift var imidlertid omtrent 5 °C lavere enn på tidspunktet da Raptor utførte målingene. Som vist i Tabell 2, målte TSD kjørefelt 1 av strekningene som ble målt med Raptor, og den normaliserte gjennomsnittslengden var igjen 10 m.

Tabell 2. Tilgjengelighet av målinger for GPR og hver type måling pr. strekning

Nr.	Veg	Strekning	Felt	Fallodd	Raptor	TSD	GPR ¹⁾
1	EV14 S1D1	Stjørdal-Hofstad	1	✓	✗	✗	✓
			2	✗	✗	✗	✓
2	EV14 S2D1	Stjørdal-Hofstad	1	✓	✓✓	✓✓	✓
			2	✗	✓✓	✗	✓
3	EV14 S3D1	Hegramo-Forra	1	✓	✓✓	✓	✓
			2	✓	✓✓	✗	✓
4	FV705 S1D1	Hell-Leira	1	✓	✓✓	✓	✓
			2	✗	✓✓	✗	✓
5	FV704 S2D1	Skjola-Tanem	1	✓	✓✓	✓	✗
			2	✗	✓✓	✗	✗

1) utført av SVV med eget utstyr

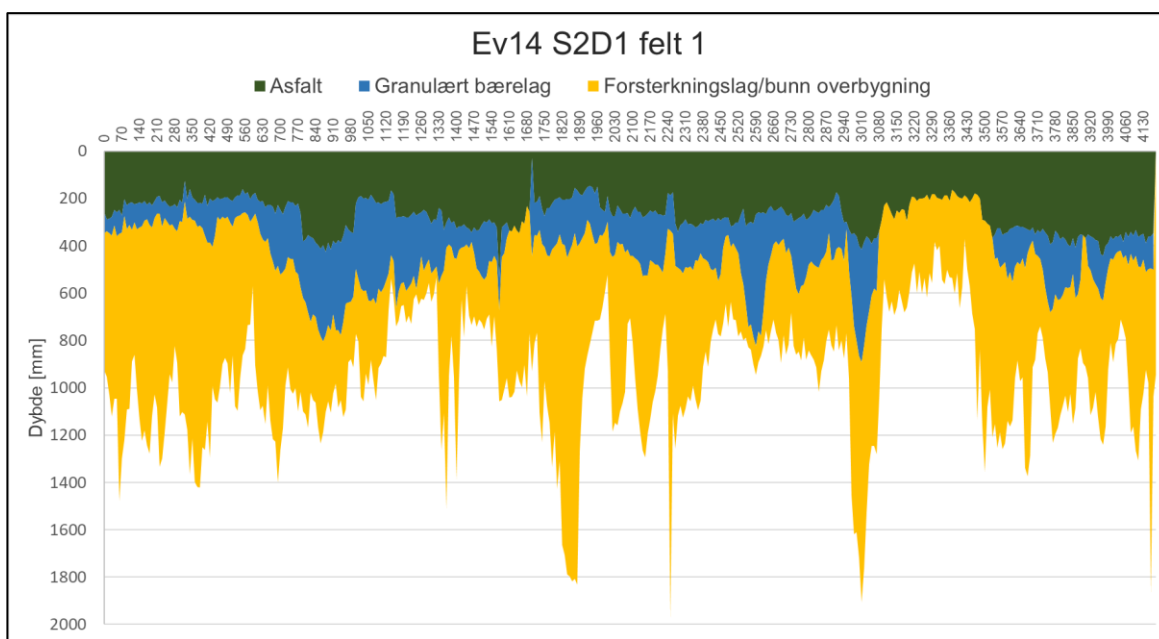
Det ble kjørt georadar, på strekningene 1, 2, 3, og 4. Strekning 5 ble ikke målt med georadar grunnet for lite tid på dagen satt av for målinger. Det er valgt å utføre georadarmålinger på strekningene for å hente ut informasjon om lagtykkelser for å kunne vurdere resultatene fra bæreevnemålingene mer nøyaktig. Målingene vi utførte gir oss informasjon om dybde ned og lagtykkelse til alle lag som kan ses. Det er ikke utført

oppgravingsprøver for å kontrollere målingene som følge av begrensede midler til prosjektet, men det ble tatt ut 2-4 borkjerner på hver strekning for å kalibrere asfalttykkelsen som har mest å si for utregningen av bæreevne i tonn.

Målingene ble utført av SVV med eget utstyr. Det ble benyttet en hornantenne fra IDS på 1 GHz og en bakkeantenne fra IDS på 400 MHz. På grunn av lav oppdragsmengde på denne typen målinger og kostnader ble målingene tolket av Roadscanners OY fra Finland.

Resultatene rapporteres med total asfalttykkelse, granulære bærelag, forsterkningslag/bunn overbygning og eventuell fylling i tabellformat basert på vegreferanse samt X- og Y-koordinater. Basert på dette har vi laget grafer som viser lagtykkelser (se Figur 10 som et eksempel).

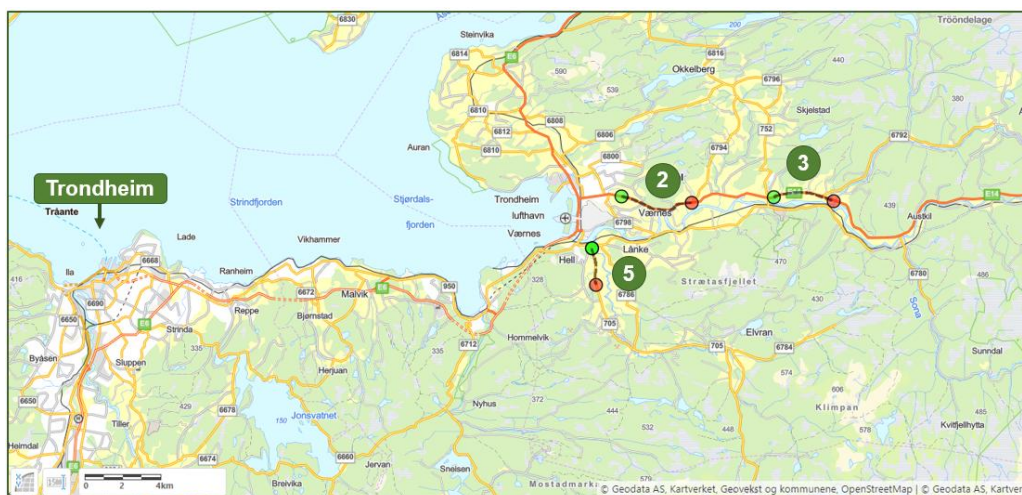
Målinger ble også utført på veistrekningene med en 1 GHz hornantenne GPR den 1. juli 2022, og tykkelsen på overflatelaget ble spesifisert. Monteringshøydene over bakken for GPR-antennen og hornantennen var henholdsvis 30 og 40 cm, og målingene ble utført i høyre hjulspor. Den normaliserte gjennomsnittslengden for GPR-målingene var 10 m. Tabell 2 oppsummerer de målte fallodd-, Raptor-, TSD- og GPR-dataene. GPS-informasjon inkludert breddegrad og lengdegrad, luft- og overflatetemperatur ble også registrert av hvert apparat og normalisert på 10 m eller 25 m intervaller. For Raptor og TSD ble andre måling utført umiddelbart etter den første. Lastebilens øyeblikks hastighet (instantaneous velocity) ble også registrert under drift av de rullende bæreevne målerne.



Figur 10. Tolkning av lagtykkelser basert på GPR måling på Ev14 S2D1 felt 1
metrering 0-4130

Med referanse til Tabell 2, ble data fra de tre følgende seksjonene som hadde alle fire målinger (dvs. fallodd, Raptor, TSD og GPR) valgt for sammenligningsformål. Et kart som viser plasseringen av disse strekningene, er vist i Figur 11. Disse inkluderer:

- Datasett 1: EV14 S2D1, mellom Stjørdal og Hofstad, felt 1, ca. 4,5 km total lengde, 25 m intervaller for fallodd-data, **161** datapunkter for sammenligning.
- Datasett 2: FV705 S1D1, mellom Hell og Leira, felt 1, 2 km total lengde, 50 m intervaller for fallodd-data, **41** datapunkter for sammenligning.
- Datasett 3: EV14 S3D1, mellom Bergamo og Forra, felt 1, 3,2 km total lengde, 50 m intervaller for fallodd-data, **66** datapunkter for sammenligning.



Figur 11. Plassering av endelige utvalgte strekninger for analyse med data om fallodd, Raptor, TSD og GPR

Posisjonering av falloddsmålingene ble tatt basert på vegreferanser via GPS-koordinater. Dette fungerer ved at vi kjørte en PC-versjon av appen «vegviseren» som gir oss vegreferansen basert på GPS-koordinater. GPS-koordinatene som benyttes tas gjennom GPSen på falloddet, og denne GPSen er en diskantenne (ukjent modell). Da nøyaktig posisjonering sjelden er veldig viktig er det ikke basekorreksjon på denne antennen. Det vil derfor være en viss usikkerhet knyttet til den nøyaktige posisjoneringen, selv om dette burde være relativt bra ved god satellittdekning. Tester tidligere har vist at feilmarginen normalt sett ligger innenfor 1 m.

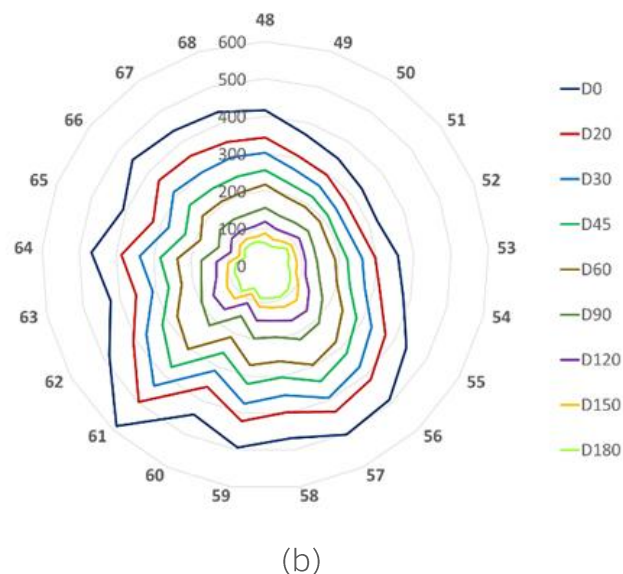
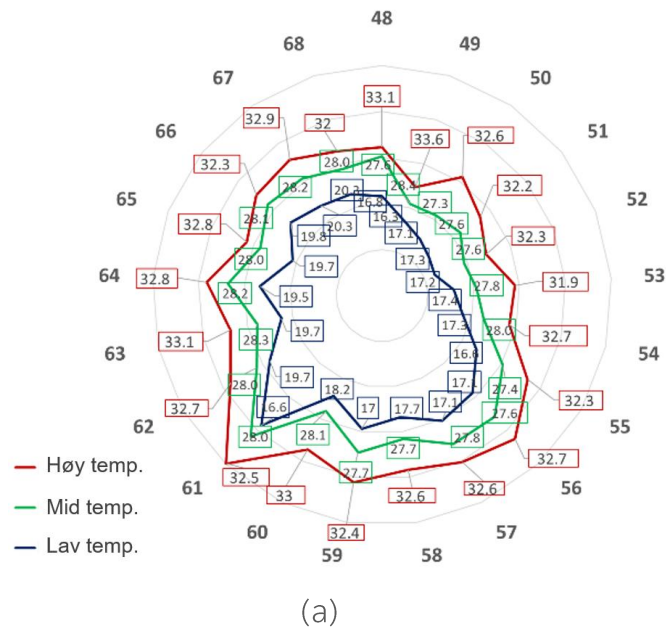
4. Analyse metoden

4.1. Temperatur betydning

For å sammenligne nedbøyningene av rullende bæreevnemålere med fallodd på en nøyaktig måte, må temperaturens effekt først vurderes. Ulike metoder for å korrigere denne effekten har blitt brukt av forskere (9, 20-22). Blant annet, er korrigering av d_0 for både rullende bæreevnemålere og fallodd ved å bruke metoden gitt av AASHTO designretningslinjer (22), og justering av d_0 for TSD til en referansetemperatur kjent som to eksempler av d_0 korrigering (21).

I dette prosjektet ble det etablert relasjoner mellom overflatetemperatur og fallodd-nedbøyninger. Metoden er kort forklart her, og mer detaljert informasjon om å anvende temperaturens innvirkning på bæreevne finnes i en tidligere rapport og en artikkel skrevet av forfatterne av denne rapporten (23). Figur 12 viser fallodd-nedbøyninger for et tilfeldig utvalg

av 20 målepunkter ved EV14 S1D1. Som vist i Figur 12(a), ble nedbøyningen målt for hvert målepunkt ved tre forskjellige temperaturer, høy (rød), middels (grønn) og lav (blå). For hvert målepunkt, kan en egen kurve defineres for å tilpasse deformasjonsverdiene, noe som betyr at masterkurver (se 5.1. Fallodd -masterkurver) for hvert målepunkt kan oppnås. Ved å bruke disse masterkurvene kan d_0 verdier ved en hvilken som helst temperatur kalkuleres (referanse-temperatur i dette prosjektet er satt til 20°C). Som vist i Figur 12(b), ble det observert nesten lignende trender for de andre radielle avstandene. Derfor, kan masterkurver også utvikles for de andre radielle avstandene.



Figur 12. Nedbøyninger fra alle sensorene målt med fallodd på et tilfeldig utvalg av 20 målepunkter ved EV14 S1D1; (a) d_0 målt på tre forskjellige temperaturer, (b) d_0 til d_{180} på lav temperatur

Derfor, kan nedbøyninger ved hvilken som helst vilkårlig temperatur oppnås ved hjelp av interpolasjon eller ekstrapolasjon. Siden overflatetemperaturen blir registrert under rullende bæreevнемålinger, kan overflatetemperaturen for et tilsvarende datapunkt fra rullende bæreevнемålere settes inn i fallodd-masterkurvene for det samme punktet. Dermed kan de tilsvarende fallodd-målingene ved det punktet beregnes. Disse tilsvarende nedbøyningene kan nå sammenlignes med de målte rullende bæreevнемålernes nedbøyninger. Det er verdt å nevne at i denne prosessen kan TSD-data ikke sammenlignes direkte med Raptor-data; imidlertid kan begge sammenlignes med sine tilsvarende fallodd-data ved samme temperatur som de rullende bæreevнемålerne sine.

4.2. Nedbøyningsbasseng og andre parametere

Det antas at det kan være en sammenheng mellom veiens bæreevne og nedbøyningsbassengsindekser beregnet fra de målte nedbøyningene på det aktuelle punktet. Derfor, kan det være nyttig å vurdere disse indeksene ved sammenligning av fallodd og rullende bæreevнемålere. I dette prosjektet, ble et sett av tre vanlige indekser vurdert for sammenligning. Disse inkluderer Surface Curvature Index (SCI), Base Curvature Index (BCI), og bæreevne (BC) (Tabell 3).

Tabell 3. Nedbøyningsbasseng og flere relevante parameter

Parameter	Definisjon	Formel
SCI ₃₀₀	Surface Curvature Index, beskriver styrken i øvre del av vegkroppen, typisk i dekke/bærelag.	$d_0 - d_{30}$
BCI	Base Curvature Index, beskriver styrken i nedre del av vegkroppen, typisk forsterkningslag/ undergrunn	$d_{90} - d_{120}$
BC	Bearing Capacity, bæreevne	$BC_{asfalt} = 11 \times \left(\frac{E_{dim}}{200}\right)^{0.6} \times \left(\frac{50}{\dot{A}DT_H}\right)^{0.072}$

Som nevnt i innledningen, er bæreevnen (Bearing Capacity, BC) den største aksellast en veg kan ta over en tidsperiode (dimensjoneringsperioden) uten at vegens tilstand, ved normalt vedlikehold, faller under en definert akseptabel grense (se [N200 Vegbygging](#) for mer detaljer). BC beregnes i henhold til formel 1.

$$BC_{asfalt} = 11 \times \left(\frac{E_{dim}}{200}\right)^{0.6} \times \left(\frac{50}{\dot{A}DT_H}\right)^{0.072} \quad (1)$$

Der $\dot{A}DT_H$ er $\dot{A}DT$ for tunge kjøretøy, og E_{dim} kan beregnes slik:

$$E_{dim} = 11 \times \frac{110 \times P}{\sqrt{d_0 (d_0 - d_{20})}} [MPa] \quad (2)$$

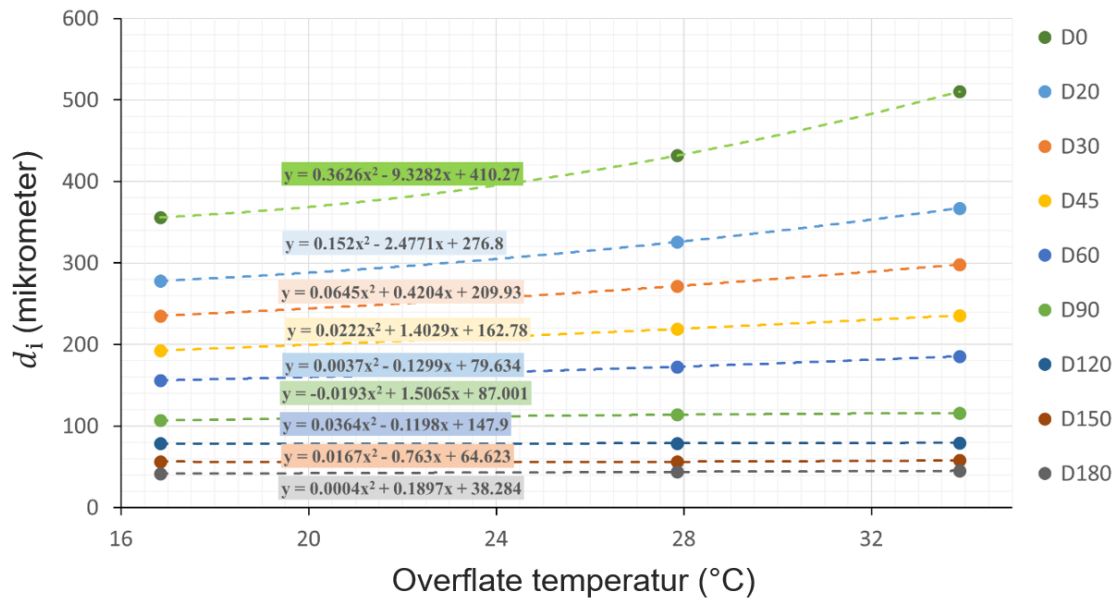
I formelen over er P kontaktrykket fra belastningsplate (MPa) og d_0 og d_{20} er deformasjoner (cm) ved henholdsvis 0 og 20 cm avstand fra lastens sentrum ([Håndbok V230 Forsterkning av veier](#)).

5. Resultater

Med tanke på totalt 268 fallodd-datapunkter (målepunkter) i datasettene 1, 2 og 3 og ni radielle avstander, ble 2412 masterkurver utviklet. Python (versjon 3.9.) ble brukt for å lette prosessen med å finne modellkoeffisientene. Målingene av nedbøyninger og tilhørende overflatetemperaturer ble lagt inn som 'input' i tekst-format, og modellkoeffisientene ble oppnådd. Rambøll bruker et etterbehandlingsprogram for å oppnå nedbøyninger fra RDIs (5,6) og kan rapportere deformasjoner på hvilken som helst vilkårlig avstand. I dette prosjektet, ble Rambøll bedt om å oppgi nedbøyningsverdier ved ni radielle avstander som ligner på fallodd-dataene. På den annen side, bruker Greenwood en parametrisert modell for å estimere nedbøyningsverdier fra nedbøyningshellinger. I denne modellen, optimeres visse parametere ved hjelp av matematisk integrasjon for å finne den beste tilpasningen for de målte nedbøyningshellingerne (20). Greenwood ble også bedt om å oppgi nedbøyninger på avstander som tilsvarer fallodd-dataene. Nedbøyningene fra rullende bæreevnemålere ble normalisert til 10 m, og intervallene for fallodd var 25 eller 50 m. Derfor ble fallodd-datapunktene (målepunktene) betraktet som referansepunkter. GPS-koordinatene for punktene for rullende bæreevnemålere ble deretter sjekket en etter en og sammenlignet med koordinatene for fallodd-datapunktene (målepunktene) for å velge de tilsvarende punktene så nær som mulig hverandre. I den andre repetisjonen av TSD for datasett 1, ble det rapportert om problemer med måling av overflatetemperaturer. Av denne grunnen, ble kun én repetisjon av TSD og to repetisjoner av Raptor sammenlignet med deres tilsvarende fallodd-nedbøyninger.

5.1. Fallodd -masterkurver

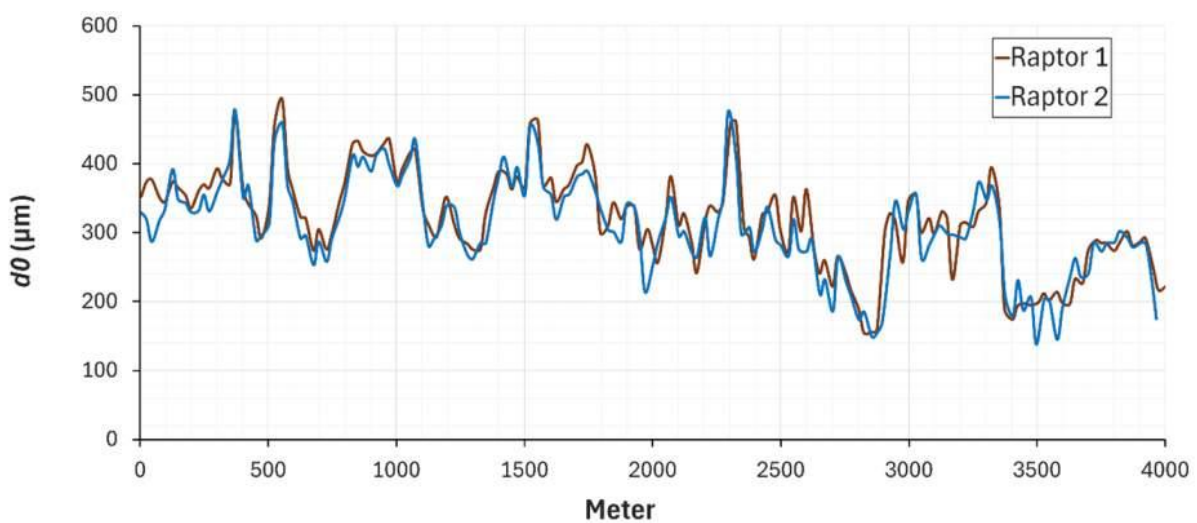
Figur 13 viser masterkurvene for et tilfeldig punkt i Datasett 1 (EV14 S2D1). Som vist, er effekten av temperatur på deformasjonene mer betydelig for de indre radielle avstandene, og temperaturkorreksjon har ikke en betydelig effekt på nedbøyningene for de ytre radielle avstandene (for eksempel d_{120} , d_{150} , og d_{180}).



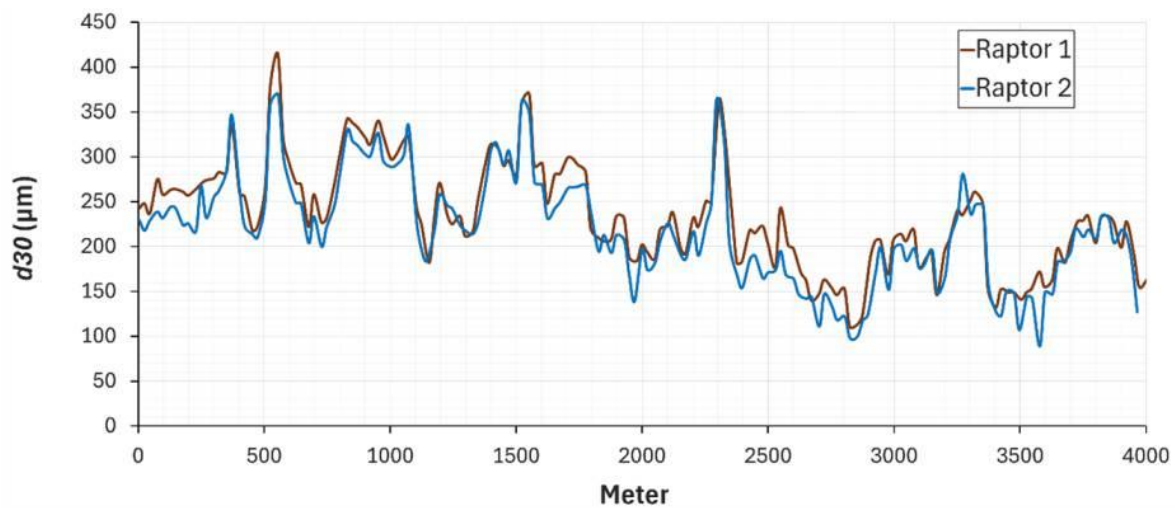
Figur 13. Masterkurver for et tilfeldig utvalgt av målepunkt i Datasett 1 (EV14 S2D1), med andregradspolynom regresjoner

5.2. Repeterbarhet av rullende bæreevnemålere

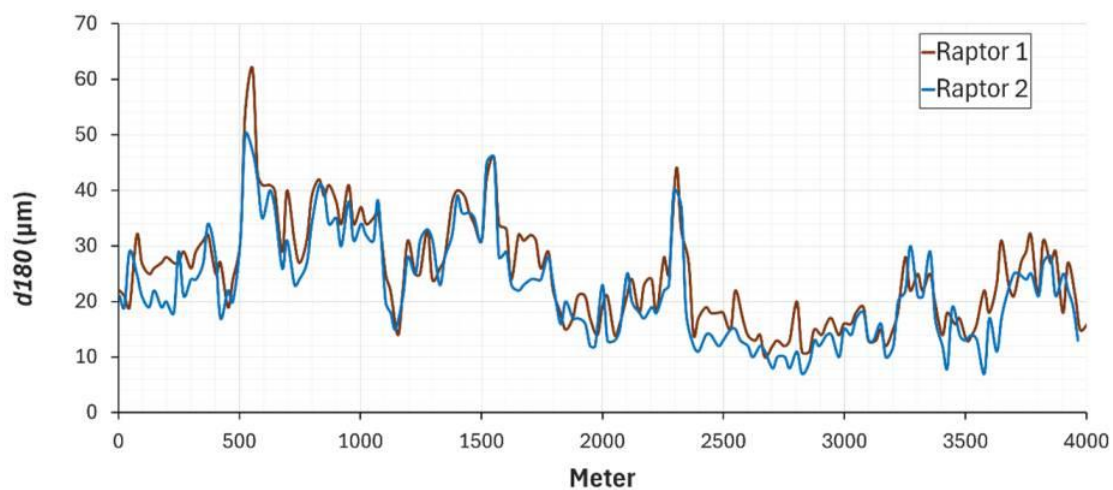
Repeterbarheten av rullende bæreevnemålere ble evaluert for Datasett 1 (EV14 S2D1). I denne evalueringen ble ikke effekten av temperatur og/eller hastighet normalisert. Som nevnt ble overflatetemperaturen ikke korrekt registrert for den andre repetisjonen av TSD. Imidlertid, siden disse to gjennomkjøringene av TSD ble utført umiddelbart etter hverandre, ble de sammenlignet med hverandre for nedbøyninger ved ulike radielle avstander. Figur 14 og 15 viser to repetisjoner på samme diagram for tre radielle avstander av Raptor og TSD.



(a)

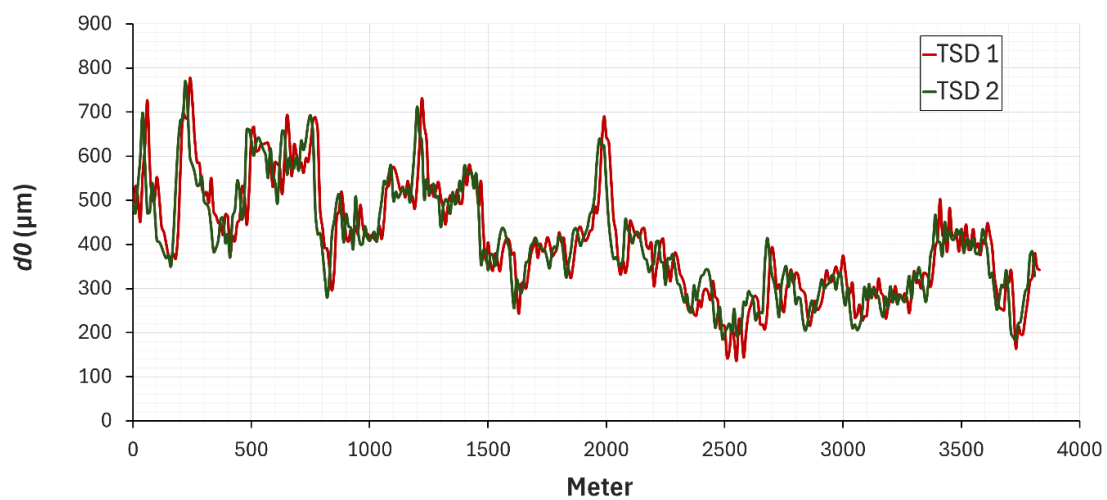


(b)

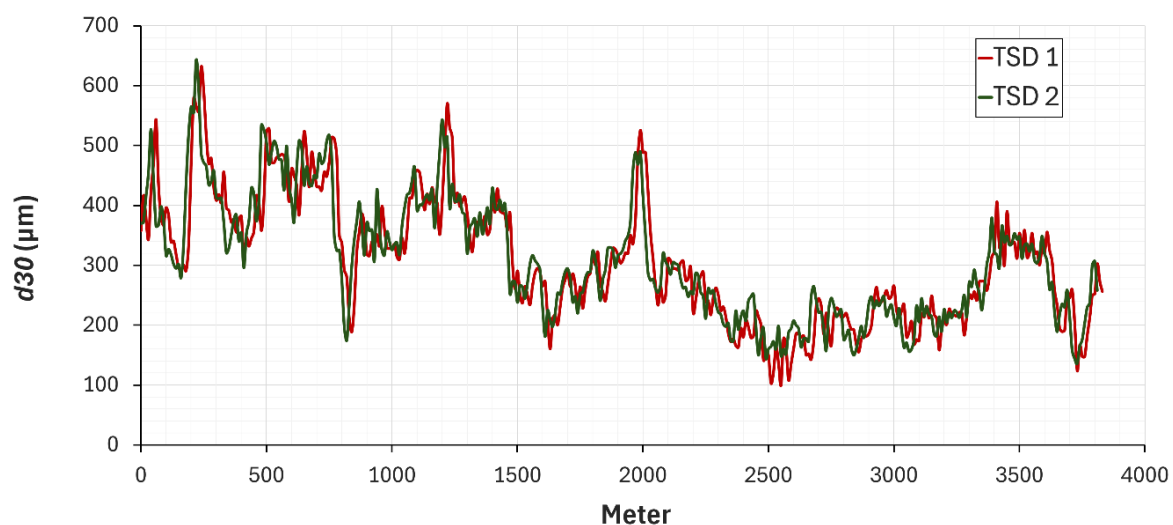


(c)

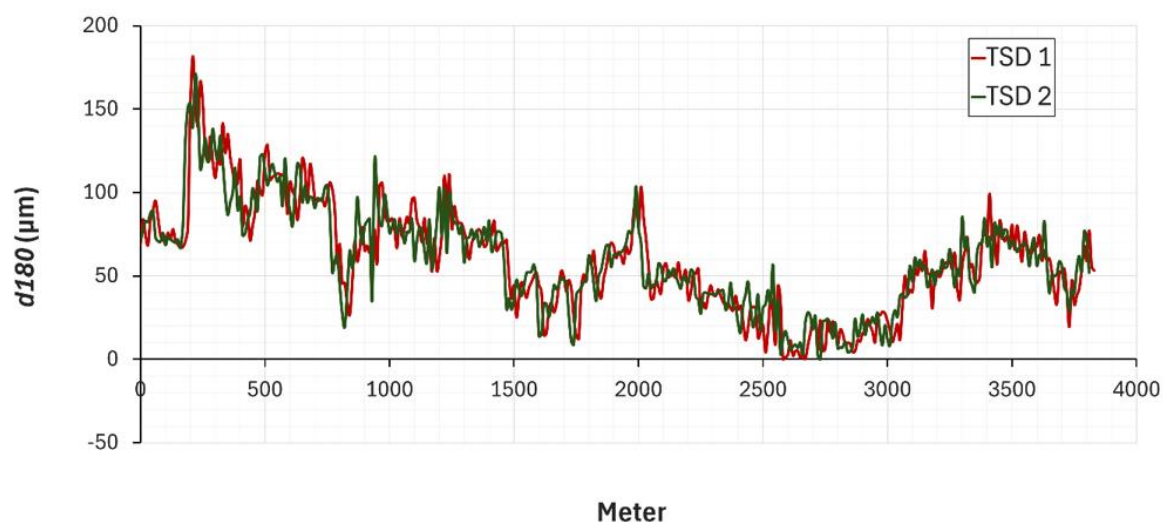
Figur 14. Repeterbarhet av rullende bæreevnmålere: likhet i måling av (a) d_0 , (b) d_{30} , (c) d_{180} for to repetisjoner med Raptor utført kort tid etter hverandre



(a)



(b)



(c)

Figur 15. Repeterbarhet av rullende bæreevnmålere: likhet i måling av (a) d_0 , (b) d_{30} , (c) d_{180} for to kortsiktige repetisjoner for TSD

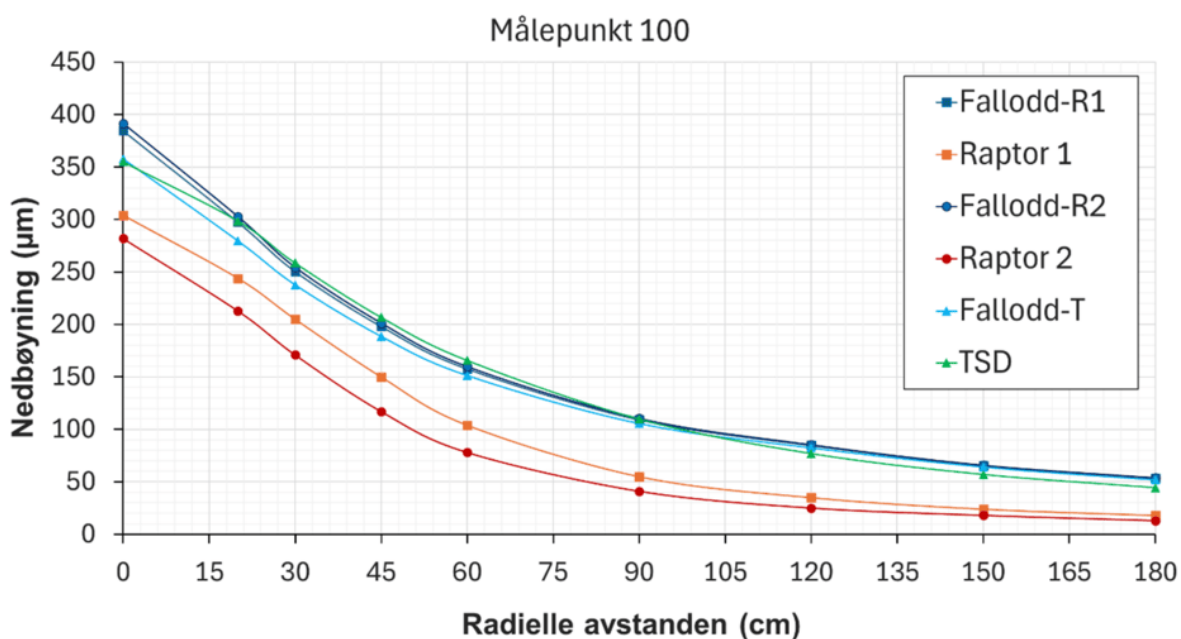
Den grafiske sammenligningen viser at både TSD og Raptor gir repeterbare resultater, og Raptor-nedbøyningene er nærmere til hverandre ved de indre radiale avstandene enn de ytre. Fra et statistisk perspektiv ble Pearsons korrelasjonskoeffisient (PCC⁴) beregnet, hvor detaljene finnes i en publisert artikkel av forfatterne av denne rapporten (24). PCC er en korrelasjonskoeffisient som generelt brukes til å måle den lineære sammenhengen mellom to datasett. Forholdet mellom to variabler (her PCC mellom to repetisjoner av TSD eller Raptor) anses generelt som sterkt når r-verdien er større enn 0,7. PCC for TSD var 0,99 for d_0 , synkende til 0,97 for d_{180} . For Raptor-målinger beregnet PCC som 0,93 for d_0 , og mellom 0,97 og 0,91 for d_{20} til d_{180} . Disse høye verdiene tyder klart på at både TSD og Raptor gir repeterbare resultater. Det konkluderes også med at for de ytre radiale avstandene er PCC

⁴ Pearsons Correlation Coefficient

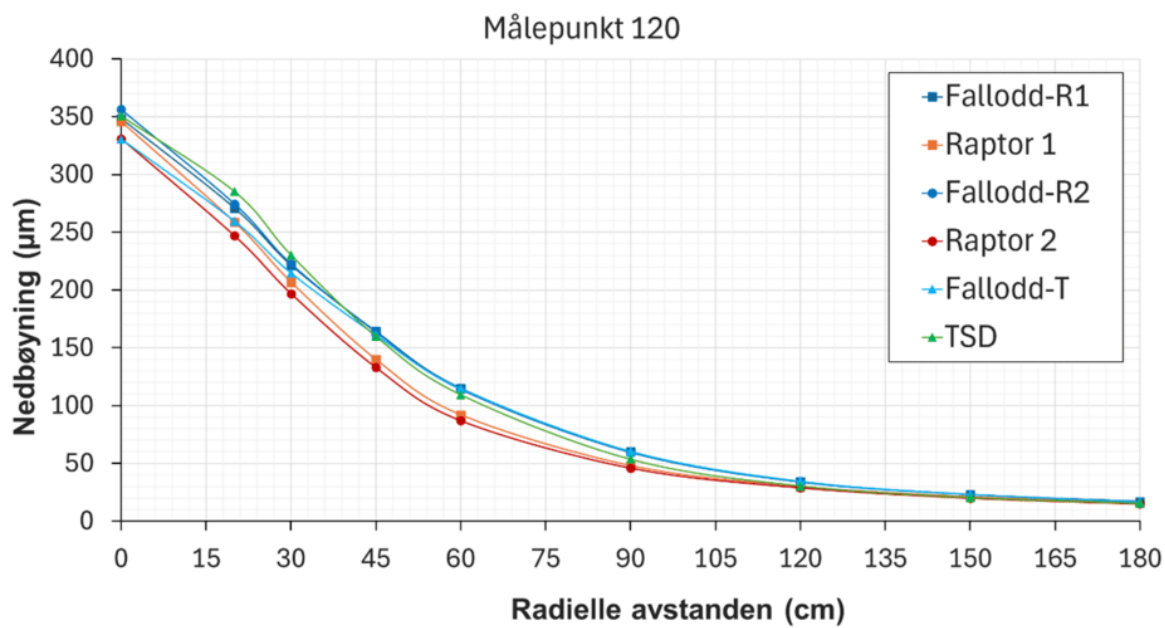
generelt lavere sammenlignet med de indre radiale avstandene. Den gode repeterbarheten av Raptor-målinger viser også at innflytelsen av kjøretøyets hastighet (mellom 50 og 80 km/t) i målingen av nedbøyninger er nesten ubetydelig. Det er verdt å merke seg at tykkelsen på veidekket varierte mellom 15,0 og 43,0 cm for Datasett 1 (EV14 S2D1), mellom 14,1 og 22,7 cm for Datasett 2 (FV705 S1D1), og mellom 16,1 og 43,4 cm for Datasett 3 (EV14 S3D1). Den gode repeterbarheten til rullende bæreevnemålere er i samsvar med noen andre studier (6, 20, 22, 28, 29).

5.3. Sammenligning av nedbøyningsverdier

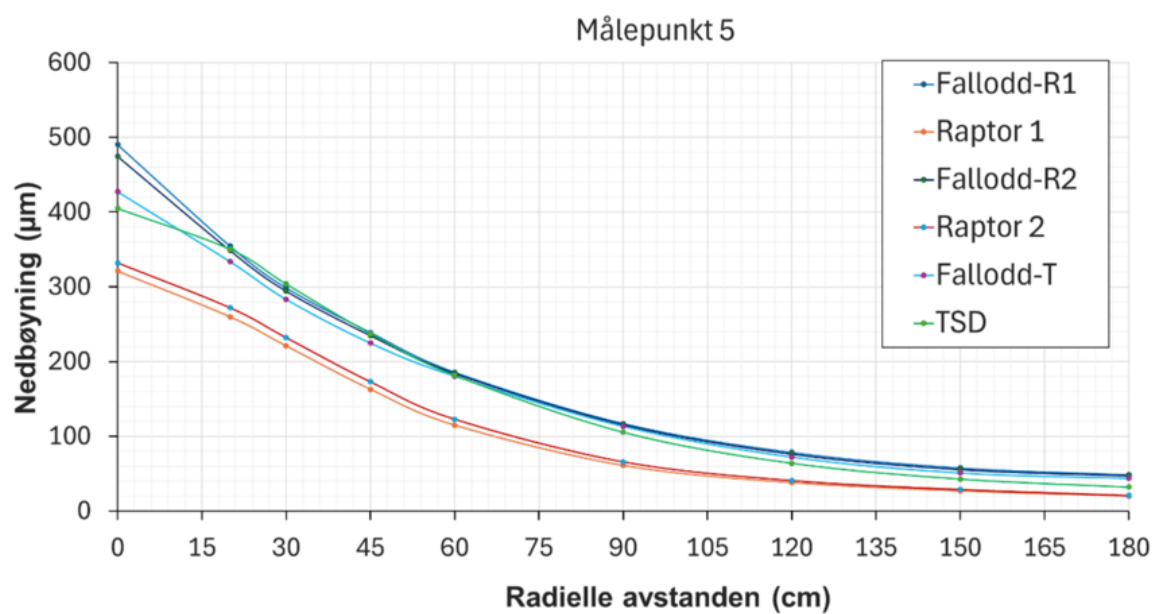
Nedbøyningsbassenger ble sammenlignet for noen tilfeldige datapunkter (målepunkter). Som vist i Figur 16, er Raptor 1 og Raptor 2 de to repetisjonene av Raptor. TSD indikerer TSD-målingen, fallodd-R1 og fallodd-R2 betegner de tilsvarende fallodd-nedbøyningene ved temperaturene fra henholdsvis første og andre runde av Raptor, og fallodd-T betegner de tilsvarende fallodd-nedbøyningene ved temperaturen fra TSD-målingene. Det er verdt å merke seg at det ikke ble gjennomført direkte sammenligning av temperatursensorene på Raptor og Fallodd. Mulige systematiske avvik mellom sensorene kan representere en feilkilde i temperaturkorrigeringen. Det er tydelig at TSD generelt viser bedre samsvar med fallodd enn Raptor gjør, når det gjelder nedbøyningsverdier. I tillegg er samsvaret mellom fallodd og de rullende bæreevnemålerne tydeligere ved de indre radiale avstandene.



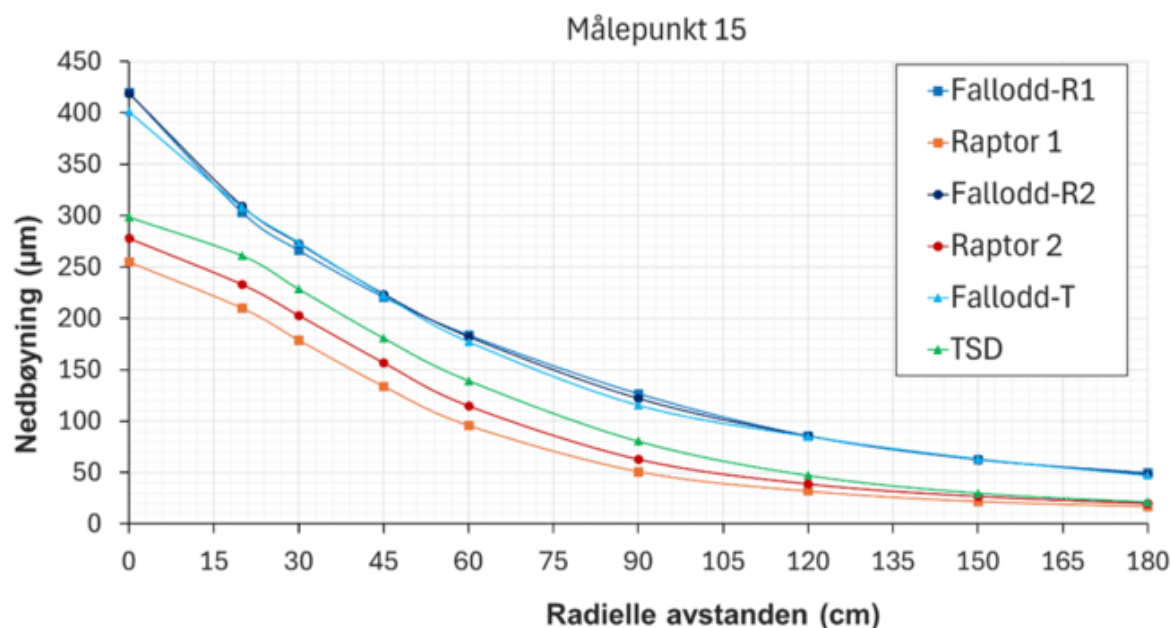
(a)



(b)



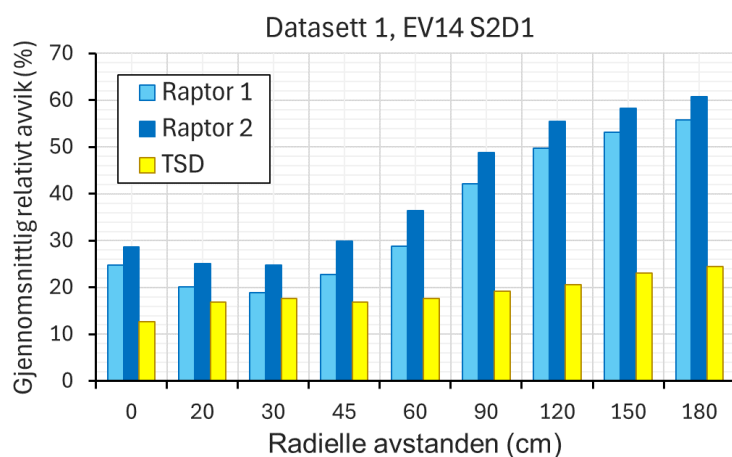
(c)



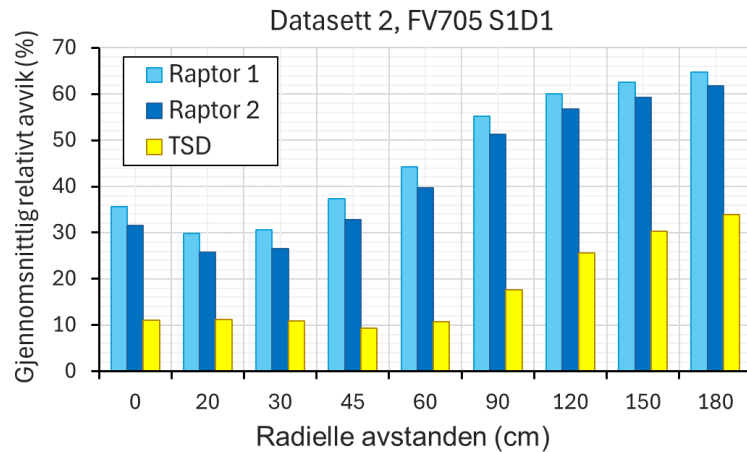
(d)

Figur 16. Sammenligning av nedbøyningsbassenger for to tilfeldige punkter for: (a, b) Datasett 1 (EV14 S2D1); (c, d) Datasett 2 (FV705 S1D1).

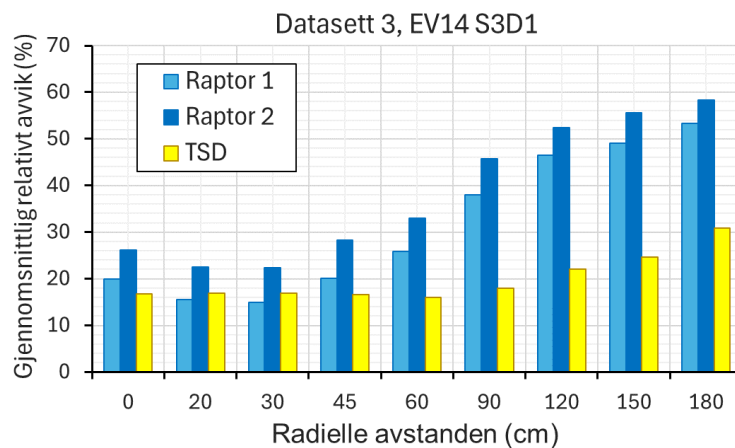
Det gjennomsnittlige relative avviket (Average Relative Error) i prediksjonen av de tilsvarende fallodd-nedbøyningene for forskjellige radiale avstander ble også beregnet for TSD og de to repetisjonene av Raptor. Resultatene er vist i Figur 17 for hvert datasett separat. Som vist, er de relative avvikene i bestemmelsen av tilsvarende fallodd-nedbøyninger lavere for TSD-målingene, spesielt for de indre radiale avstandene.



(a)



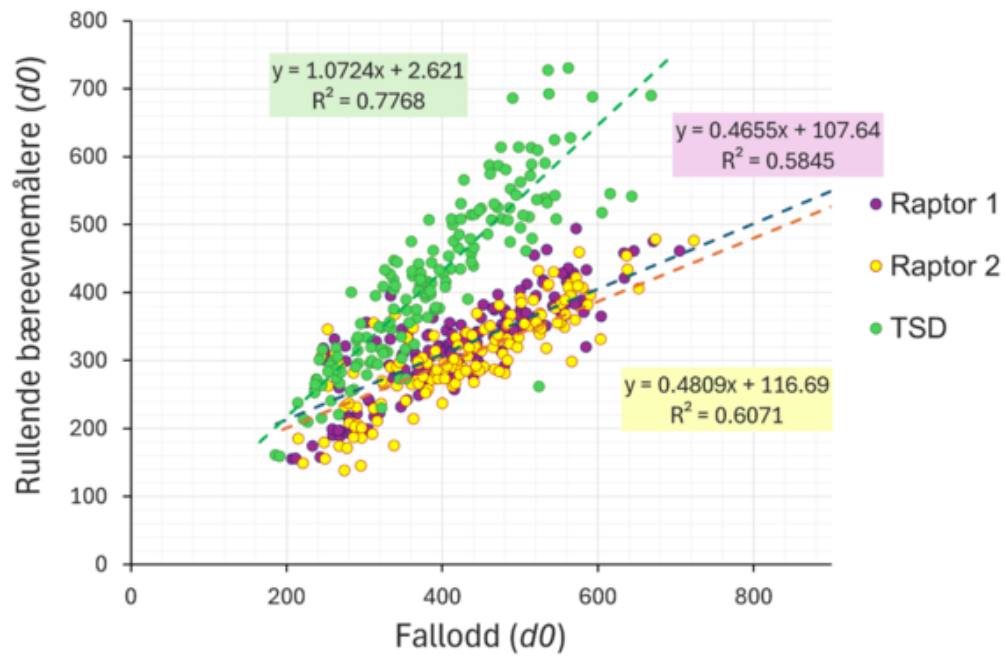
(b)



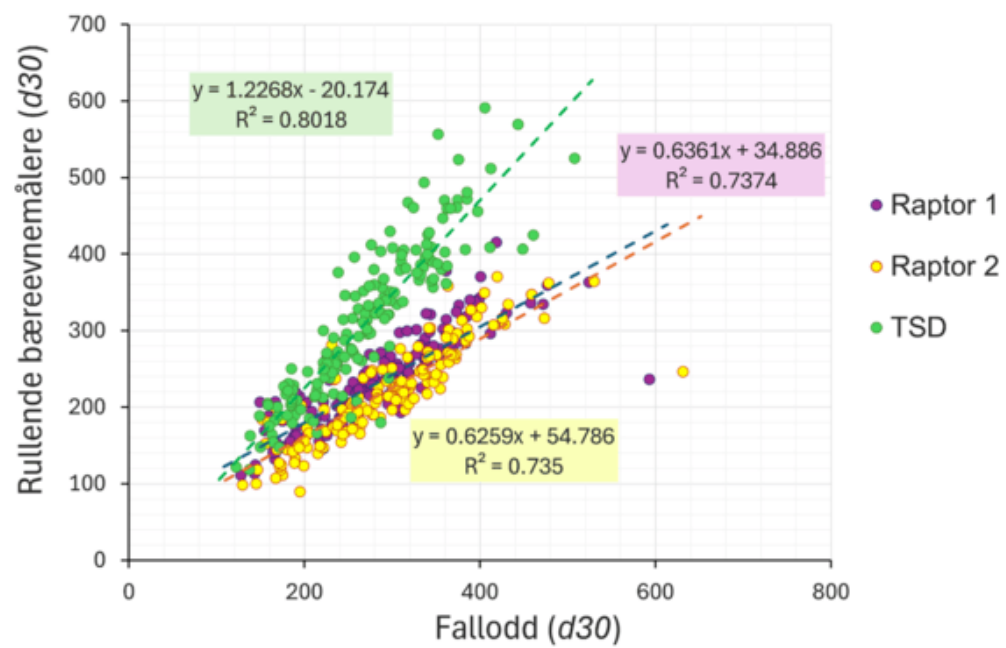
(c)

Figur 17. Gjennomsnittlig relativt avvik for nedbøyningsverdier for rullende bæreevne målere og deres ekvivalente fallodd-nedbøyninger for: (a) Datasett 1 (EV14 S2D1); (b) Datasett 2 (FV705 S1D1); (c) Datasett 3 (EV14 S3D1).

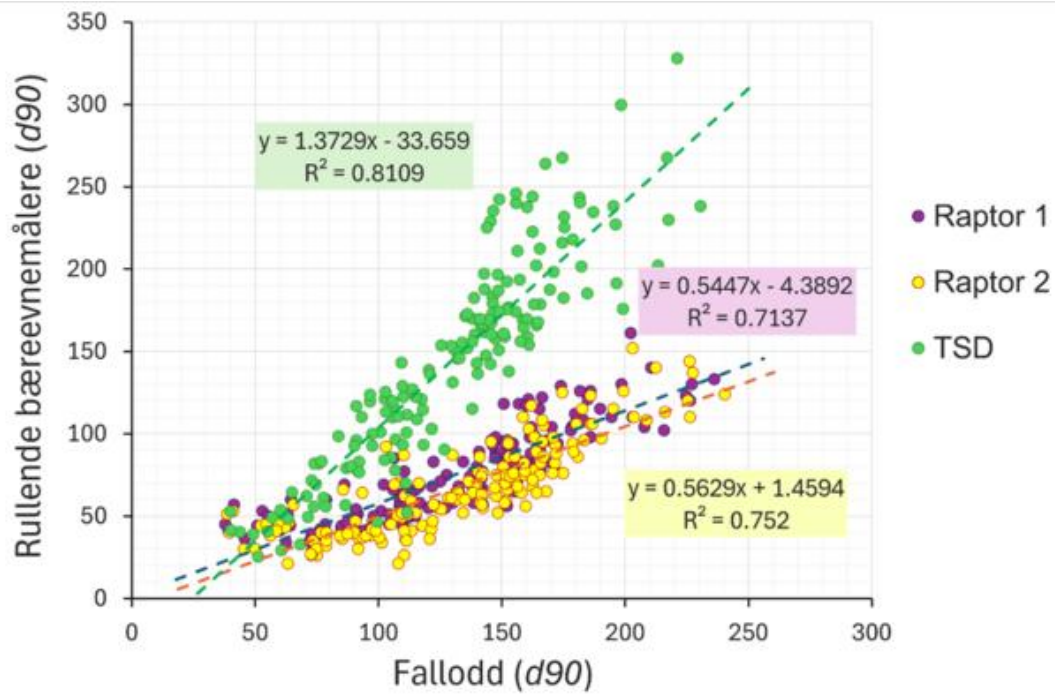
Sammenstilling av data fra de tre datasettene i ett enkelt diagram (Figur 18) og statistisk sammenligning bekrefter igjen det høyere nivået av samsvar mellom TSD og den ekvivalente fallodd-målingen, sammenlignet med Raptor. Ved indre radiale avstander er dette samsvaret enda sterkere. Det fremgår også at TSD-datapunktene tilsynelatende er mer spredt enn Raptor-datapunktene. Det er også vist at de to repetisjonene av Raptor gir sammenlignbare resultater, og ved ytre radiale avstander er forskjellen mellom Raptor og ekvivalente fallodd-nedbøyninger mer betydelig.



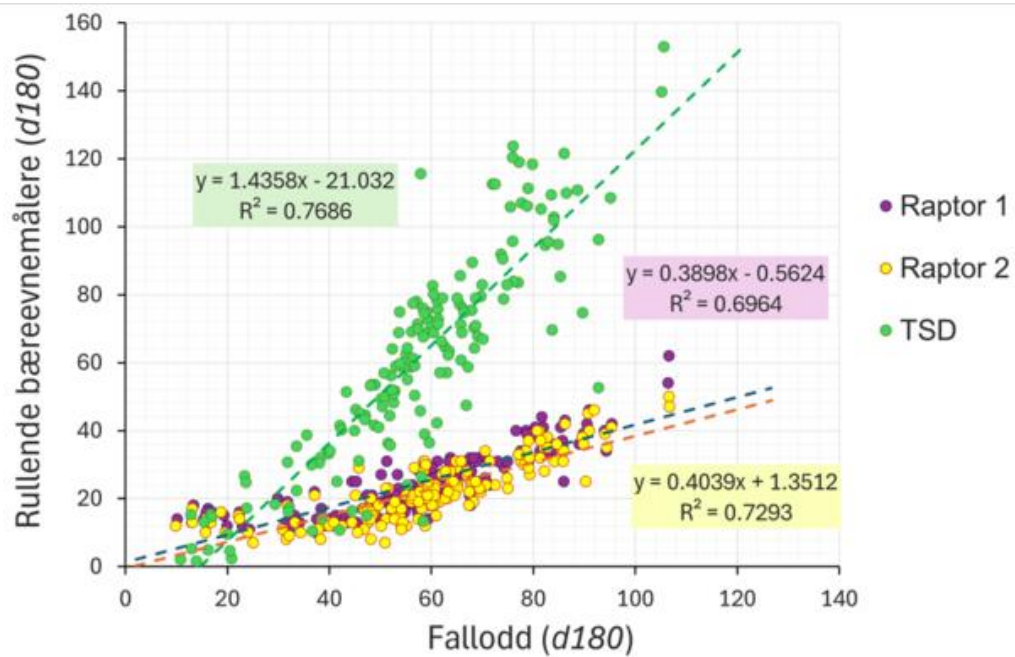
(a)



(b)



(c)

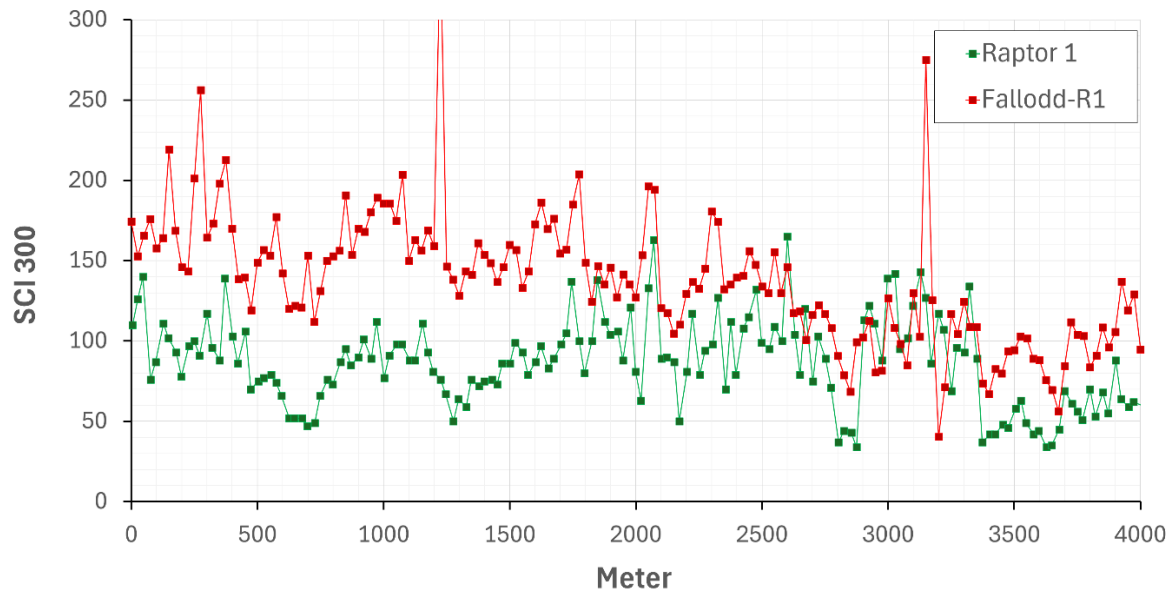


(d)

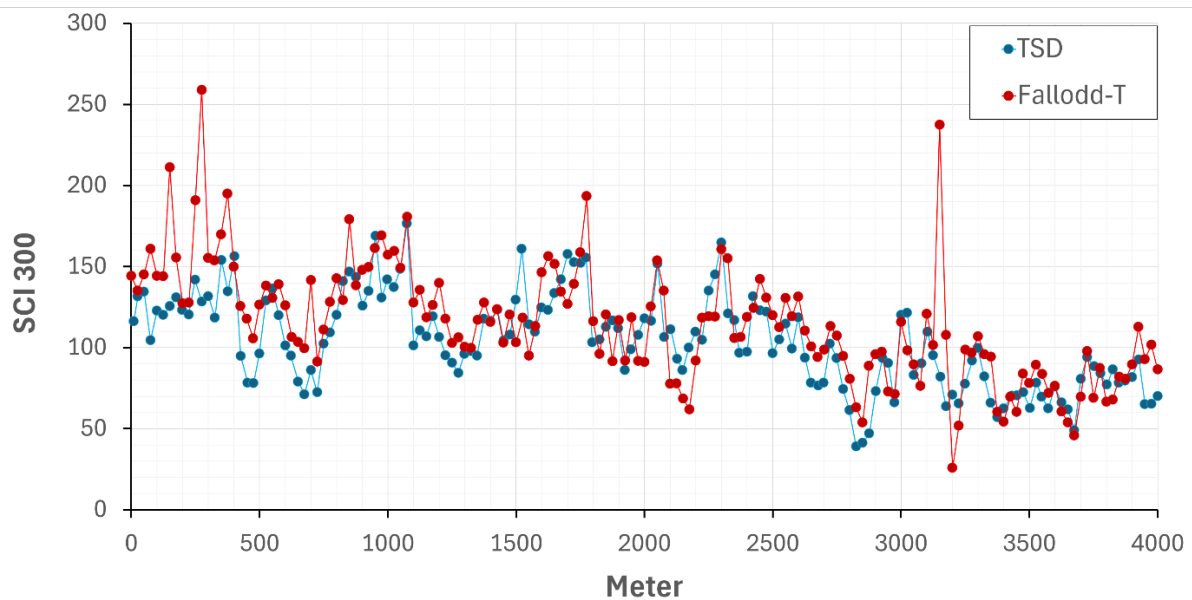
Figur 18. Sammenligning av nedbøyningsverdier for rullende bæreevne målere og deres tilsvarende fallodd-nedbøyninger for fire forskjellige radielle avstander: (a) d_0 , (b) d_{30} , (c) d_{90} , og (d) d_{180} .

5.4. Sammenligning av nedbøyningsindekser

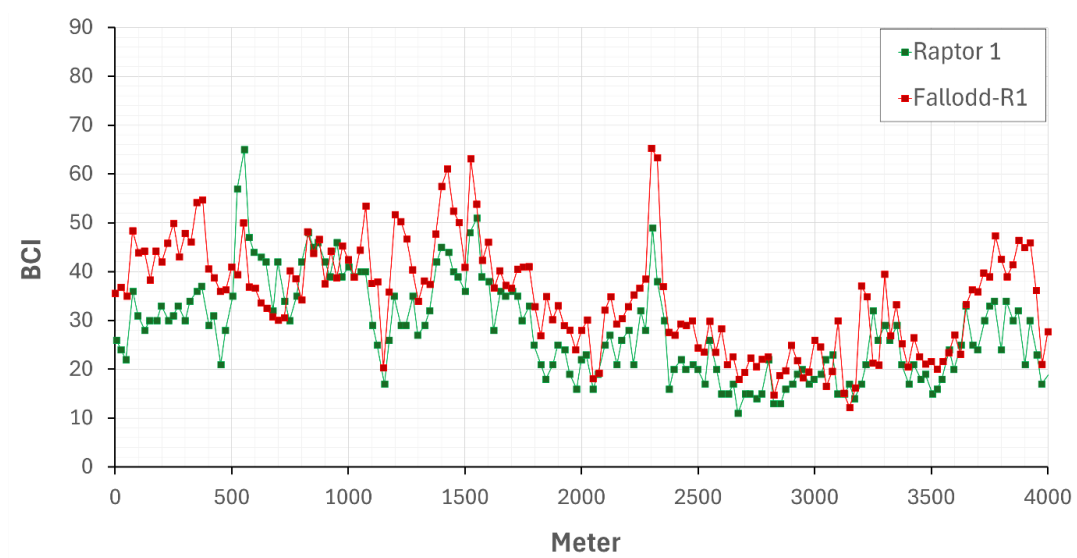
Nedbøyningsindekser, inkludert SCI_{300} , BCI , og BC , ble beregnet for hvert sammenligningspar og er vist i Figur 19. Pearsons korrelasjonskoeffisienter (PCC) for disse kurvene er demonstrert i Figur 20.



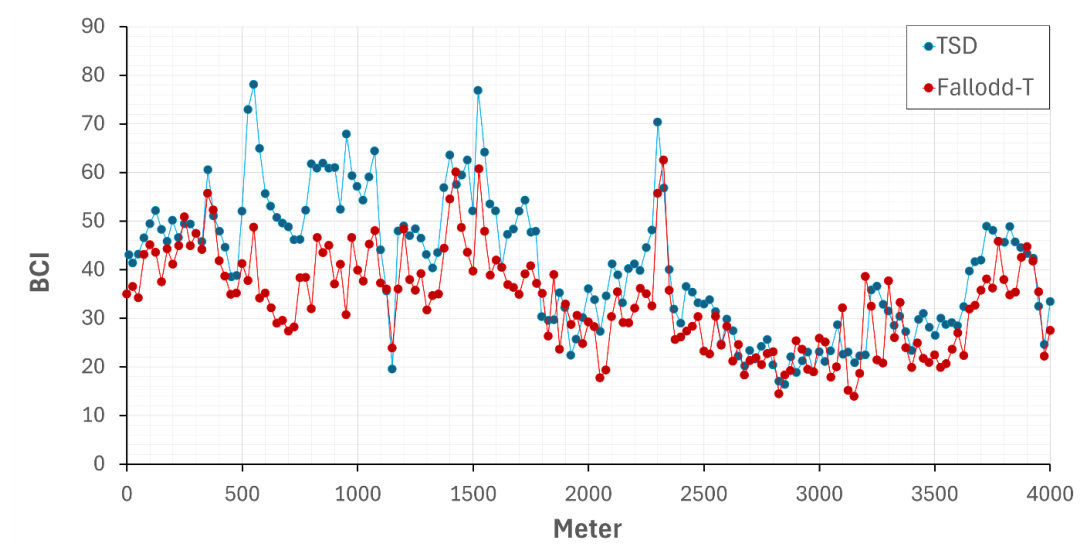
(a)



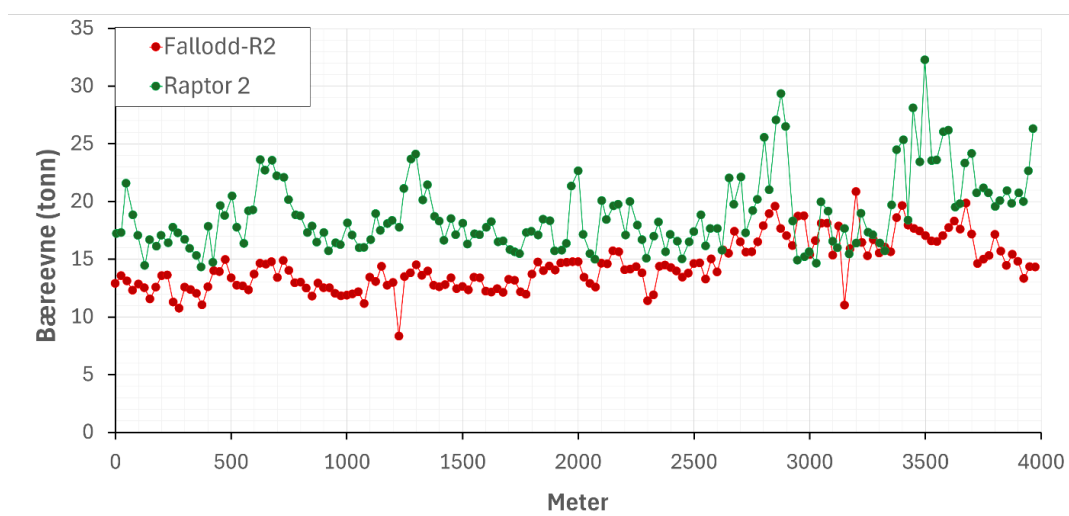
(b)



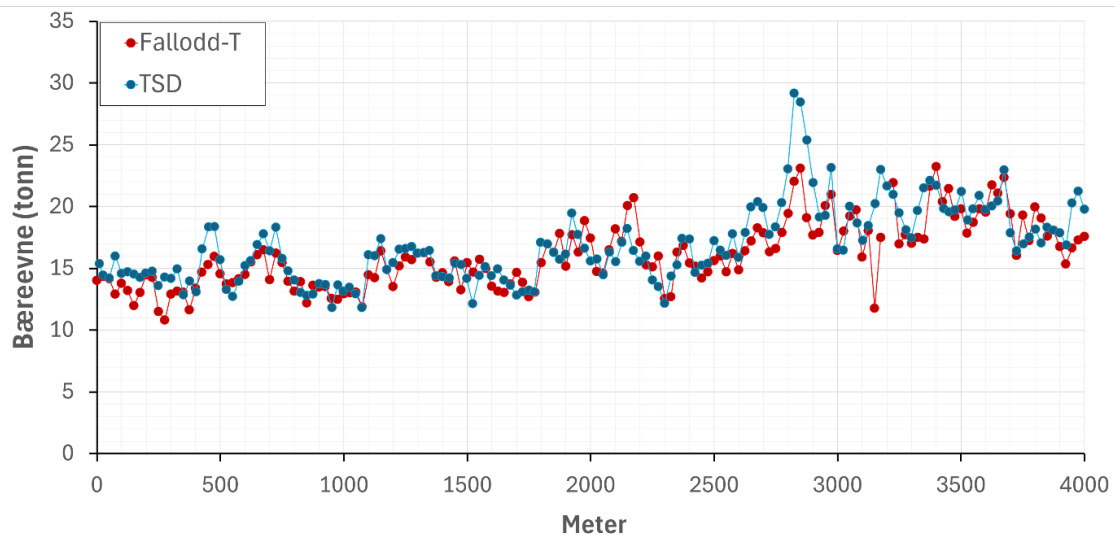
(c)



(d)



(e)



(f)

Figur 19. Sammenligning av rullende bæreevнемålere og tilsvarende fallodd-nedbøyinger for nedbøyningsbassengsparametere og strukturelle indekser: (a, b) SCI_{300} , (c, d) BCI, og (e, f) BC, bæreevne

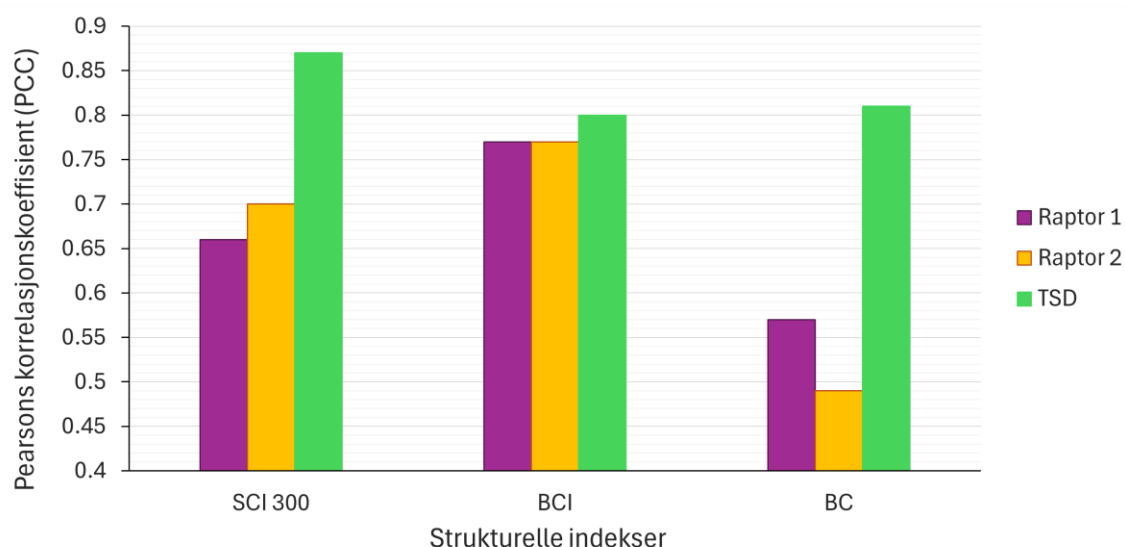
Basert på visuell evaluering av Figurene 19 og 20, kan følgende konklusjoner trekkes angående hver indeks:

- **SCI_{300} :** PCC er høyere for TSD sammenlignet med Raptor, noe som viser bedre samsvar med fallodd for TSD. Begge repetisjonene av Raptor viser tilsvarende samsvarsnivåer, men Raptor gir generelt lavere SCI_{300} -verdier sammenlignet med fallodd.
- **BCI:** Både TSD og Raptor viser et godt samsvar basert på Pearsons korrelasjonskoeffisient (PCC). Likevel viser figur 19(c, d) at Raptor har en tendens til å underestimere, mens TSD har en tendens til å overestimere denne indeksen sammenlignet med fallodd.
- **BC (bæreevne):** Begge repetisjonene av Raptor har PCC-verdier under 0,60, mens TSD viser en korrelasjonskoeffisient over 0,80. Figur 19(e, f) bekrefter at Raptor har en tendens til å overestimere bæreevnen sammenlignet med fallodd.

For å oppsummere er PCC generelt høyere for TSD sammenlignet med Raptor (høyere PCC indikerer bedre samsvar med fallodd). For den andre repetisjonen av Raptor viser BCI resultater som er sammenlignbare med TSD. Imidlertid, når det gjelder å beregne SCI_{300} og BC, presterer TSD betydelig bedre. Om SCI_{300} , er de sammenlignbare verdiene for TSD og fallodd i samsvar med andre studier. Derimot, viser ikke Raptor et høyt samsvar med fallodd for SCI_{300} , selv om både fallodd og Raptor viser nesten like trender. Når det gjelder bæreevne, underestimerer Raptor bæreevnen sammenlignet med fallodd, mens TSD viser godt samsvar med fallodd.

Basert på Figur 19 og 20, kan det konkluderes med at begge to kan identifisere strukturelt sterke og svake seksjoner. Resultatene viser at både TSD og Raptor klarer å prioritere ulike

veiseksjoner basert på deres strukturelle tilstand på nettverksnivå i et veivedlikeholdssystem.



Figur 20. Pearsons korrelasjonskoeffisient (PCC) for nedbøyningsindekser

5.5. Temperaturkorrigering av BC (bæreevne) verdier

Et annet mål med prosjektet var å undersøke om Raptor-data kunne brukes til å beregne bæreevne etter den norske formelen. I følge av Figur 19(e), er BC-verdiene oppnådd fra Raptor betydelig høyere enn BC-verdiene oppnådd fra fallodd. Enklere sagt, ettersom Raptor underestimerer fallodd-nedbøyninger (Figurer 16 og 18), overestimerer den bæreevnen. En nærmere vurdering av nedbøyninger fra Raptor og tilsvarende fallodd tyder imidlertid på at det kan være en forskyvning mellom fallodd- og Raptor-data, og at Raptor-nedbøyninger muligens kan konverteres til fallodd-nedbøyninger. Det bør nevnes at denne analysen bygger på Raptor-modellen for beregning av falloddsekvivalente nedbøyninger slik den var i 2022. Ved endringer i modellen må analysen gjentas.

For å eliminere effekten av temperaturforskjeller i bæreevneformelen, ble en ny temperaturkorrigeringsfaktor (TKF) utviklet basert på den norske bæreevneformelen. For dette formålet ble det målt nedbøyninger på 6 ulike veger ved 3 ulike temperaturer. Siden TKF kan oppnås ved å sammenligne målinger fra de to første geofonene på Fallodd (d_0 og d_{20}), ble det utviklet masterkurver for disse to geofonene. Ved å velge en referansetemperatur (20 °C) ble den korrigerte bæreevneformelen etablert. Denne formelen ble deretter sammenlignet med den opprinnelige bæreevneformelen for å utvikle en ny korrigeringsfaktor (23). Følgende ligning viser hvordan TKF kan beregnes i henhold til den norske formelen:

$$TKF = \frac{BC_{korrigert}}{BC_{ikke.korr}} = \left(\frac{E_{dim,korr.}}{E_{dim,ikke.korr.}} \right)^{0.6} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{d_0(d_0-d_{20})}} \right)^{0.6}_{korr.}}{\left(\frac{1}{\sqrt{d_0(d_0-d_{20})}} \right)^{0.6}_{ikke.korr.}} =$$

$$\left(\frac{\sqrt{d_{0-ikke.korr.}(d_{0-ikke.korr.}-d_{20-ikke.korr.})}}{\sqrt{d_{0-korr.}(d_{0-korr.}-d_{20-korr.})}} \right)^{0.6} = \left(\frac{d_{0-korr.}(d_{0-korr.}-d_{20-korr.})}{d_{0-ikke.korr.}(d_{0-ikke.korr.}-d_{20-ikke.korr.})} \right)^{-0.3} \quad (3)$$

Hvor E_{dim} representerer elastisk moduli og kan beregnes som følgende formel:

$$E_{dim} = 11 \times \frac{110 \times P}{\sqrt{d_0(d_0-d_{20})}} [MPa] \quad (4)$$

P er kontaktrykket til platen (MPa), og de andre parameterne er allerede kjent. TKF kan derfor brukes på både fallodd- og Raptor-data for å korrigere bæreevneverdien. Merk at referansetemperaturen er satt til 20 °C.

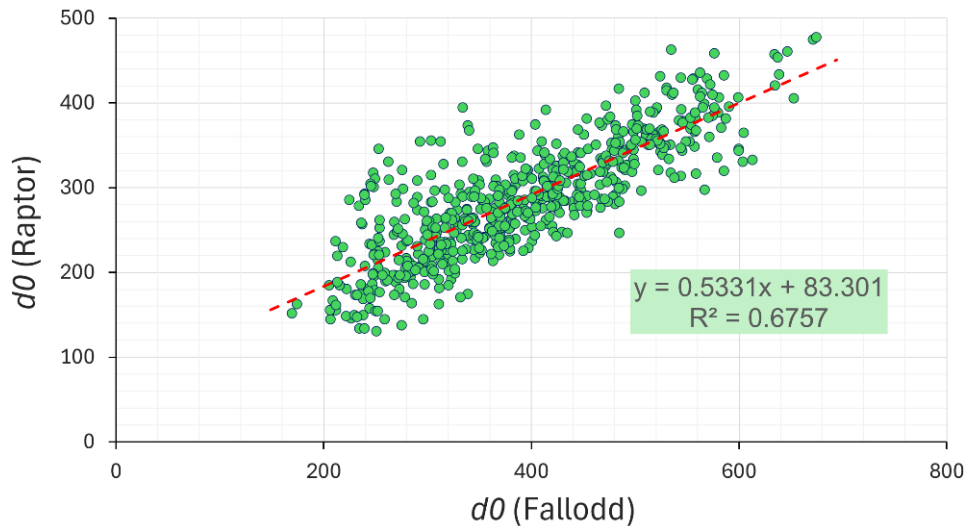
TKF for fallodd-data er allerede beregnet (23), og en temperaturkorrigeringsmodell er allerede definert der. Dette betyr at bæreevneverdier basert på fallodd-data målt på hvilken som helst temperatur (T) kan korrigeres til bæreevne ved referansetemperatur (20 °C) ($BC_{Temp-korr.}$), som følgende formel:

$$TKF_{FWD} = \frac{1}{1.273-0.0146 T_{overflate}} \Rightarrow BC_{FWD,Temp-korr.} = \frac{BC}{1.273-0.0146 \times T_{overflate}} \quad (5)$$

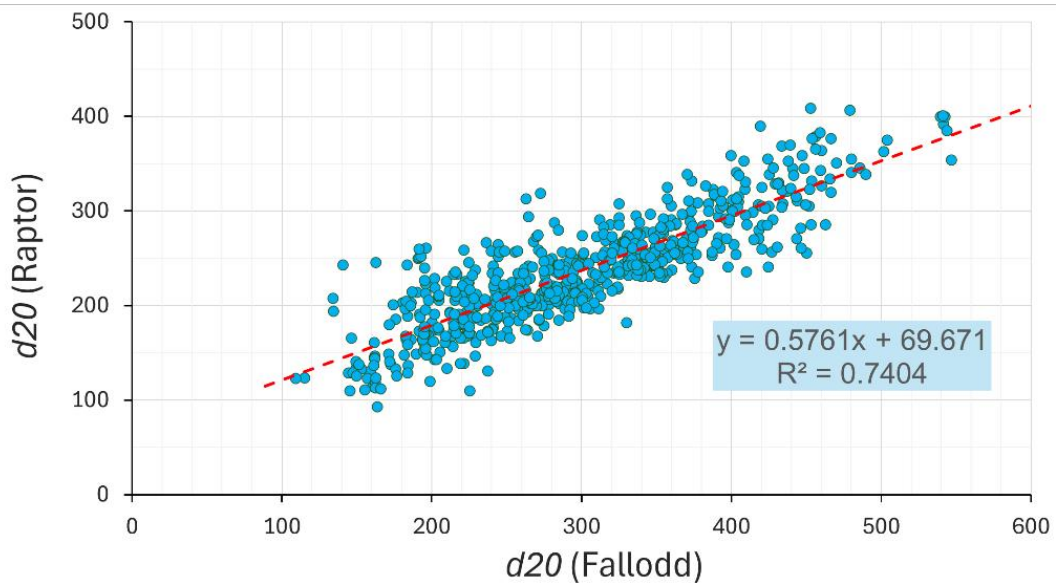
Videre vises det hvordan Raptor-data også kan justeres basert på samme prinsipp, ved bruk av den eksisterende estimerte bæreevneformelen for fallodd-data.

5.5.1. Temperaturkorrigeringsfaktor for Raptor data

Ved å bruke det samme prinsippet og formelen (3), og ved å fjerne 'outliers', kan korrigerte d_0 og d_{20} verdier for Raptor-data beregnes ved først å plote d_0 og d_{20} verdiene for både Raptor og fallodd som følger:



(a)



(b)

Figur 21. Linjert regresjon-modeller for Raptor og fallodd nedbøyninger; (a) d_0 , og (b) d_{20}

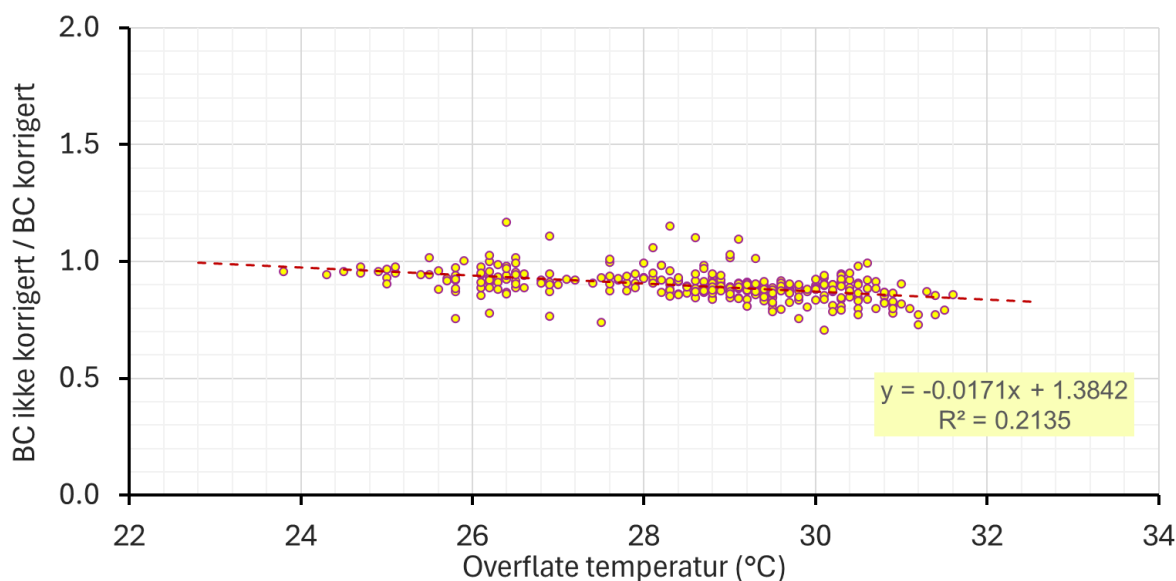
Figur 21 viser forholdet mellom d_0 og d_{20} målt med fallodd og Raptor. Dette innebærer at hvis de regresjonsformlene som er oppnådd og vist nedenfor, benyttes med fallodd-verdiene ved 20 °C, kan de tilsvarende d_0 og d_{20} verdiene for Raptor ved 20 °C beregnes.

$$d_{0-Raptor} = 0.5331 \times d_{0-fallod} + 83.301 \quad (6)$$

$$d_{20-Raptor} = 0.5761 \times d_{20-fallod} + 69.671 \quad (7)$$

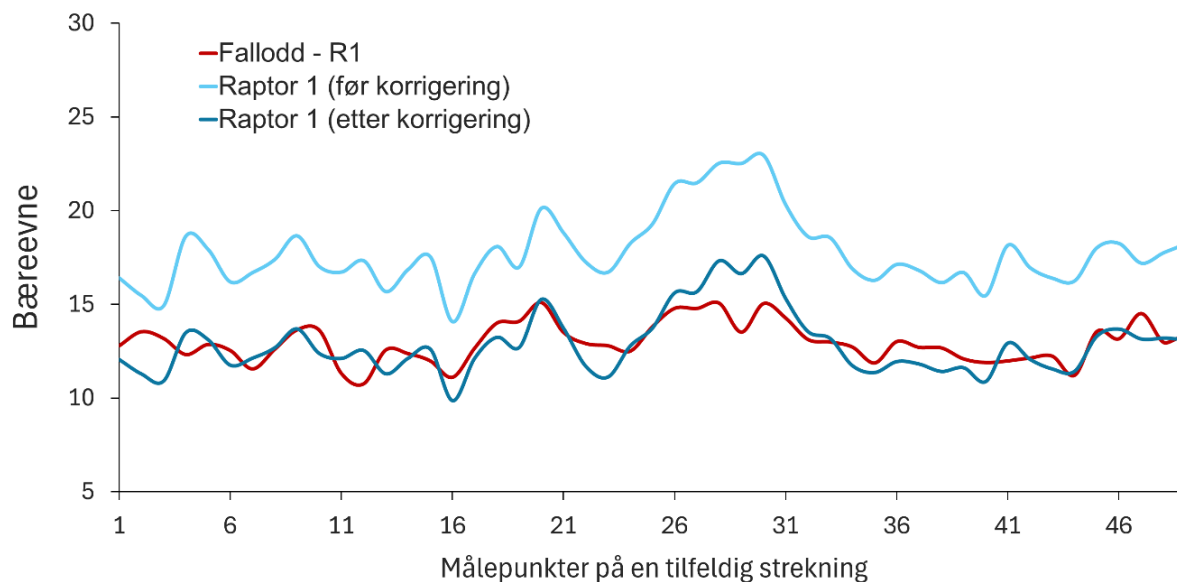
Denne prosessen kan gjentas på alle de målte d_0 og d_{20} verdiene for å beregne korrigeret bæreevne. Ved å følge samme prosedyre som ble brukt for fallodd-data, kan regresjonsformelen mellom bæreevnen målt ved en hvilken som helst overflate-temperatur ($T_{overflate}$) og korrigeret bæreevne ($Bæreevne_{Raptor,Temp.korr}$) ved 20 °C beregnes. Formelen kan vises som følger som er beregnet basert på regresjonen vist i Figur 22:

$$TKF_{Raptor} = \frac{1}{1.384 - 0.0171 \times T_{overflate}} \Rightarrow Bæreevne_{Raptor,Temp.korr} = \frac{Bæreevne}{1.384 - 0.0171 \times T_{overflate}} \quad (8)$$



Figur 22. Temperaturkorrigering av bæreevnen ved Raptor målinger

Etter å ha anvendt temperaturkorrigeringsfaktoren på Raptor-dataene, kan Figur 23 plottes, der bæreevneverdier før og etter korrigering vises for et utvalg av 45 tilfeldige punkter. Bruken av korrigeringsfaktoren kan vesentlig øke samsvaret mellom fallodd og Raptor når det gjelder beregning av bæreevne, ved å redusere den relative feilen fra 30 % til omtrent 10 %.



Figur 23. Bæreevne før og etter korrigering av Raptor nedbøyninger

6. Konklusjon

Dette prosjektet sammenligner rullende bæreevнемålere (TSD og Raptor) med hensyn til deres samsvar med tilsvarende fallodd-nedbøyninger. For dette formålet ble det utført målinger på utvalgte veistreknninger i Midt-Norge ved bruk av fallodd, TSD og Raptor, samt georadar (GPR). Hovedfunnene i dette prosjektet er som følger:

- Både Raptor og TSD gir repeterbare nedbøyninger, spesielt når det gjelder nedbøyninger ved indre radielle avstander (geofoner).
- Både TSD og Raptor klarer å identifisere svake parseller av veistreknninger.
- Fra et visuelt og statistisk perspektiv er samsvaret mellom TSD og fallodd bedre enn samsvaret mellom Raptor og fallodd.
- SCI_{300} : TSD har høyere Pearsons korrelasjonskoeffisient (PCC) enn Raptor, noe som viser bedre samsvar med fallodd for TSD. Begge repetisjonene av Raptor viser omtrent samme samsvarsnivå, men Raptor gir generelt lavere SCI-verdier enn fallodd.
- BCI : Både TSD og Raptor viser godt samsvar med Fallodd basert på PCC, men Raptor har en tendens til å underestimere, mens TSD har en tendens til å overestimere denne indeksen.
- BC (Bæreevne): Begge repetisjonene av Raptor har PCC-verdier under 0,60, mens TSD viser en korrelasjonskoeffisient over 0,80. Raptor har en tendens til å overestimere bæreevnen sammenlignet med fallodd.
- En korreksjon for Raptor-data ble foreslått. Bruk av denne korreksjonen forbedrer samsvaret mellom Raptor og fallodd i beregningen av bæreevne.

Rullende bæreevнемålere har flere fordeler sammenlignet med fallodd, noe som øker interessen for å bruke dem til strukturell evaluering på nettverksnivå. Dette prosjektet viste at TSD, i større grad enn Raptor, viser samsvar med fallodd, mens Raptor-nedbøyninger bør justeres for bedre korrelasjon med fallodd-nedbøyninger. Det er imidlertid grunnleggende forskjeller mellom rullende bæreevнемålere og fallodd som må tas i betraktning. TSD måler vegens respons under maksimal last, Raptor måler avstanden mellom deformerte og ikke-deformerte vegforhold, og fallodd fanger maksimal nedbøyning fra ulike lasthistorikker. I tillegg, påfører fallodd en støtlast gjennom en sirkulær plate, mens rullende bæreevнемålere påfører en dynamisk last via en enkelt (Raptor) eller dobbel (TSD) dekkbelastning. Gitt disse forskjellene i måleprinsipper og lastmekanismer, forventes det ikke at de vil produsere identiske nedbøyningsverdier.

TSD har vært evaluert i over et tiår og kan nå innpasses i vegforvaltningssystemer. Raptor derimot er en nyere teknologi, og videre forskning anbefales. Til tross for dette, viser både TSD og Raptor potensial til å skille mellom sterke og svake veier. Selv om dette prosjektet bekrefter en korrelasjon mellom rullende bæreevнемålere og fallodd, var regresjonsmodellene utviklet basert på et begrenset datagrunnlag. For å etablere en generalisert formel for å korrelere rullende bæreevнемålere med fallodd, bør et mer omfattende pilotprosjekt som tar hensyn til faktorer som ulike vegstrukturer, værforhold og kjøretøyhastigheter, gjennomføres.

Fremtidig forskning kan fokusere på å utvikle nye analysemetoder for rullende bæreevнемålere uavhengig av fallodd, definere strukturelle parametere som bedre

reflekterer vegens integritet, kalibrere og validere disse nye indeksene, foreslå nye protokoller for datainnsamling og utføre grundigere forskning på temperaturkorrigeringsprosedyrer for rullende bæreevnemålere.

Referanser

1. Shahin, M. Y. (2005). Pavement management for airports, roads, and parking lots (Vol. 501). New York: Springer.
2. Flintsch, G. W., Ferne, B., Diefenderfer, B., Katicha, S., Bryce, J., & Nell, S. (2012). Evaluation of traffic-speed deflectometers. *Transportation Research Record*, 2304(1), 37-46.
3. Huang, B., Zhang, M., Gong, H., & Polaczyk, P. (2022). Evaluation of Traffic Speed Deflectometer for Collecting Network Level Pavement Structural Data in Tennessee (No. RES2020-08). Tennessee. Department of Transportation.
4. Skar, A., Levenberg, E., Andersen, S., & Andersen, M. B. (2021). Analysis of a moving measurement platform based on line profile sensors for project-level pavement evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 22(9), 2069-2085.
5. Technical Description of Ramböll Raptor (2020), Raptor Brochure, Ramböll consulting Engineering group.
6. Sletten, J. Temperature correction of deflection measurements on the road (Temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger på vei), Master of Science Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), June 2022.
7. Technical Description of Greenwood TSD (2023), TSD Brochure, Greenwood Engineering A/S ([GREENWOOD Engineering](#)).
8. Xiao, F., Xiang, Q., Hou, X., & Amirkhanian, S. N. (2021). Utilization of traffic speed deflectometer for pavement structural evaluations. *Measurement*, 178, 109326.
9. Katicha, S., Flintsch, G., & Diefenderfer, B. (2022). Ten years of traffic speed deflectometer research in the United States: a review. *Transportation Research Record*, 2676(12), 152-165.
10. Elseifi, M. A., & Zihan, Z. U. (2018). Assessment of the traffic speed deflectometer in Louisiana for pavement structural evaluation (No. FHWA/LA. 18/590). Louisiana Transportation Research Center.
11. Levenberg, E., Pettinari, M., Baltzer, S., & Christensen, B. M. L. (2018). Comparing traffic speed deflectometer and falling weight deflectometer data. *Transportation Research Record*, 2672(40), 22-31.
12. Morovatdar, A., Mandal, T., Arabzadeh, A., & Kemp, P. (2023). Mechanistic Assessment of Flexible Pavements in Wisconsin Using Traffic Speed Deflectometer. *Transportation Research Record*, 03611981231156582.
13. Nielsen, C. P., & Jensen, K. (2021, November). Traffic speed deflectometer measurements at Copenhagen airport. In *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Volume 1 (pp. 458-465). CRC Press.
14. Nielsen, C. P., Varin, P., Saarenketo, T., & Kolisoja, P. (2021, November). Traffic speed deflectometer measurements at the Aurora instrumented road test site. In *Eleventh*

International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (Vol. 1, p. 399).

15. Abdel-Khalek, A. M., Elseifi, M. A., Gaspard, K., Zhang, Z., & Dasari, K. (2012). Model to estimate pavement structural number at network level with rolling wheel deflectometer data. *Transportation Research Record*, 2304(1), 142-149.
16. Elseifi, M. A., Abdel-Khalek, A. M., Gaspard, K., Zhang, Z., & Ismail, S. (2012). Evaluation of continuous deflection testing using the rolling wheel deflectometer in Louisiana. *Journal of Transportation Engineering*, 138(4), 414-422.
17. Antonsen, V., & Mork, H. (2017). A comparison of TSD and FWD deflections at Norwegian roads with an interpretation of bearing capacity from TSD measurements. In *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields* (pp. 579-584). CRC Press.
18. Madsen, S. S., & Pedersen, N. L. (2022). Comparison of Raptor measurements with falling weight deflectometer deflections using backcalculation. In *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 3* (pp. 33-44). CRC Press.
19. Madsen, S. S., & Pedersen, N. L. (2019). Backcalculation of raptor (RWD) measurements and forward prediction of FWD deflections compared with FWD measurements. In *Airfield and Highway Pavements 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements* (pp. 382-391). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
20. Katicha, S. W., Shrestha, S., Flintsch, G. W., & Diefenderfer, B. K. (2020). Network level pavement structural testing with the traffic speed deflectometer (No. VTRC 21-R4). Virginia Transportation Research Council (VTRC).
21. Nasimifar, M., Chaudhari, S., Thyagarajan, S., & Sivaneswaran, N. (2020). Temperature adjustment of surface curvature index from traffic speed deflectometer measurements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(11), 1408-1418.
22. Kim, Y. R., and Park, H. G. (2002). Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation. No. FHWA/NC/2002-006.
23. Hamidi, A., Mirhosseini, A. F., Hoff, I., Grannes, K. B., Anastasio, S., & Aursand, P. O. (2024). Revising the Norwegian formula for bearing capacity by applying a temperature correction factor. In *Advances in Functional Pavements* (pp. 257-261). CRC Press.
24. Hamidi, A., Mirhosseini, A. F., Hoff, I., Mork, H., Grannes, K. R. B., & Aursand, P. O. (2025). Comparative evaluation of falling weight deflectometer, traffic speed deflectometer and rapid pavement tester in deflection measurement. *Transportation Research Record*, 2679(2), 1475-1494.



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