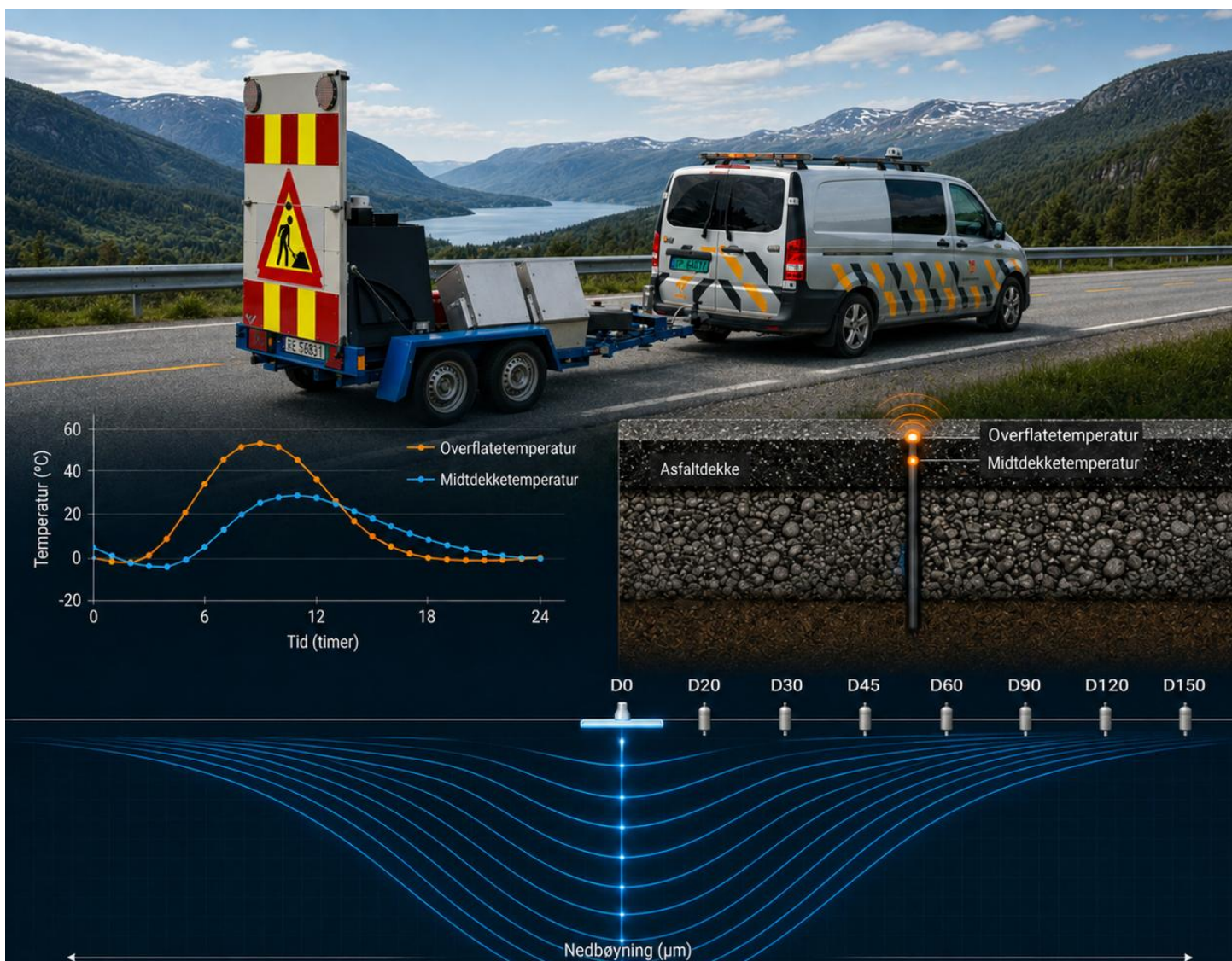


FoUi Bæreevnemålinger:

Temperaturkorreksjon av falloddsmålinger og nedbøyningsbasseng

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1149



Tittel

FoUi Bæreevnmålinger:

Undertittel

Temperaturkorleksjon av falloddsmålinger og nedbøyningsbasseng

Forfatter

Ali Foroutan Mirhosseini

Avdeling

Fagressurs Drift og vedlikehold

Seksjon

Laboratorier 1

Prosjektnummer

C15505

Rapportnummer

1149

Prosjektleder

Kari Østerås

Godkjent av

Per Otto Aursand

Emneord

Bæreevne, Fallodd, Temperaturkorleksjon, Nedbøyningsbasseng

Sammendrag

Denne rapporten presenterer metoder for temperaturkorleksjon av hele nedbøyningsbassenget fra falloddsmålinger. Basert på temperaturmålinger, feltdata og numeriske simuleringer er det utviklet modeller både med og uten dekketykkelse. Den lineære modellen anbefales når dekketykkelse ikke er kjent, mens den simuleringsbaserte modellen anbefales når dekketykkelse er tilgjengelig.

Title

R&D: Bearing Capacity Measurements

Subtitle

Temperature Correction of FWD Measurements and Deflection Basin

Author

Ali Foroutan Mirhosseini

Department

O&M Planning and Engineering Services

Section

Laboratories 1

Project number

C15505

Report number

1149

Project manager

Kari Østerås

Approved by

Per Otto Aursand

Key words

Bearing Capacity, Falling Weight Deflectometer, Temperature Correction, Deflection Basin

Summary

This report presents methods for temperature correction of the full deflection basin from Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements. Based on temperature measurements, field data, and numerical simulations, models were developed both with and without pavement thickness. The simple linear model is recommended when pavement thickness is unavailable, whereas the simulation-based model is recommended when pavement thickness is available.



Forord

Denne rapporten presenterer delprosjektet «Temperaturkorleksjon av falloddsmålinger og nedbøyningsbasseng», som inngår i det større prosjektet «Bæreevnmålinger». Innenfor dette hovedprosjektet har Statens vegvesen i perioden 2021–2023 gjennomført omfattende bæreevnmålinger på riks- og europavegnettet ved bruk av Raptor (Rapid Pavement Tester). Prosjektet ledes av laboratorieseksjonen i fagressursavdelingen i divisjonen Drift og vedlikehold. Hovedprosjektet startet i 2021 og pågår fortsatt (per juni 2026), og ledes av Kari Østerås.

Hovedmålet med dette delprosjektet har vært å utvikle og evaluere metoder for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger, med særlig vekt på temperaturkorleksjon av hele nedbøyningsbassenget. Som grunnlag for dette arbeidet er det utviklet praktiske modeller for estimering av temperaturen i midtdekket basert på overflatetemperatur, samt modeller for temperaturkorleksjon både med og uten informasjon om asfalttykkelse. Rapporten omfatter både modeller utviklet fra feltmålinger og en simuleringsbasert modell utviklet ved hjelp av numeriske analyser av et bredt spekter av vegkonstruksjoner. Analysene bygger på ett års kontinuerlige temperaturmålinger fra sensor installert i asfaltdekket, falloddsmålinger fra flere vegstrekninger med ulike temperaturforhold, GPR-målinger av asfalttykkelse og numeriske simuleringer.

Resultatene fra delprosjektet skal bidra til et bedre faglig grunnlag for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger og vurdering av vegers bæreevne på nettverksnivå. Arbeidet gir et grunnlag for mer konsistente analyser av nedbøyningsbasseng og videre utvikling av praktiske og pålitelige metoder innenfor Statens vegvesens arbeid med strukturell tilstandsvurdering av vegdekker. Rapporten inngår som en del av langsiktige satsingen på å forbedre datagrunnlag, analysemetoder og beslutningsstøtte knyttet til bæreevnmålinger i Norge.

Sammendrag

Denne rapporten undersøker og videreutvikler metoder for temperaturkorreksjon av falloddsmålinger, med hovedvekt på temperaturkorreksjon av hele nedbøyningsbassenget. Arbeidet bygger på falloddsmålinger utført på åtte vegstrekninger ved ulike temperaturnivåer, ett år med kontinuerlige målinger av overflate- og midtdekket temperatur ved Malvik trafikkstasjon samt informasjon om asfalt tykkelse fra GPR-målinger og borekjerner.

Som en del av arbeidet ble flere regresjonsbaserte modeller undersøkt for å beskrive sammenhengen mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket. Resultatene viser at temperaturen i midtdekket kan estimeres med tilfredsstillende nøyaktighet ved hjelp av relativt enkle modeller. Analysene viser samtidig at forskjellen mellom temperaturkorreksjon basert på overflatetemperatur og temperatur i midtdekket er begrenset under de undersøkte måleforholdene. Overflatetemperatur vurderes derfor som et tilstrekkelig og praktisk temperaturgrunnlag for korreksjon på nettverksnivå.

Temperaturkorreksjonen ble først vurdert for bæreevne og de sentrale nedbøyningene som inngår i den norske bæreevneformelen. Deretter ble metoden utvidet til å omfatte nedbøyninger ved alle geofonposisjoner. Dette gjør det mulig å korrigere hele nedbøyningsbassenget til en referansetemperatur på 20 °C for bæreevne, SCI, BCI og andre nedbøyningsbaserte parametere beregnes. Resultatene viser at en enkel lineær regresjonsmodell gir tilstrekkelig nøyaktighet og er godt egnet for praktisk bruk når informasjon om asfalt tykkelse ikke er tilgjengelig.

Effekten av asfalt tykkelse ble også undersøkt ved hjelp av feltpaserte multivariate og eksponentielle modeller. Den relativt begrensede variasjonen i tykkelse i feltdatasettet, omtrent 18–29 cm, gjorde det imidlertid vanskelig å identifisere tykkelsens betydning på en entydig måte. For å dekke et større spenn av temperaturer, tykkelser og vegkonstruksjoner ble det derfor utviklet en simuleringsbasert temperaturkorreksjonsmodell. Modellen er basert på numeriske analyser av 500 vegkonstruksjoner og ikke-lineær optimalisering, og ble validert mot ytterligere numeriske simuleringer og gjentatte falloddsmålinger på en norsk vegstrekning. I tillegg ble modellen sammenlignet med den finske TPPT-modellen for temperaturkorreksjon av nedbøyningsbassenget, hvor den simuleringsbaserte modellen viste enda bedre nøyaktighet. Modellen korrigerer nedbøyningen ved hver geofon ved hjelp av temperatur og asfalttykkelse som inputvariabler.

På bakgrunn av resultatene anbefales den enkle lineære modellen for temperaturkorreksjon av nedbøyningsbassenget når asfalt tykkelse ikke er tilgjengelig. Når tykkelsen er kjent, anbefales den simuleringsbaserte modellen, fordi den inkluderer samspillet mellom temperatur og asfalttykkelse og er utviklet for et bredere spekter av vegkonstruksjoner. De anbefalte modellene gir et praktisk og konsistent grunnlag for temperaturkorreksjon av falloddsmålinger på nettverksnivå.

Summary

This report investigates and further develops methods for temperature correction of Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements, with primary emphasis on the correction of the entire deflection basin. The study is based on FWD measurements conducted on eight road sections at different temperature levels, one year of continuous surface and asphalt-layer mid-depth temperature measurements at Malvik traffic station, and asphalt-layer thickness information obtained from GPR measurements and core samples.

As part of the work, several regression-based models were evaluated to describe the relationship between pavement surface temperature and asphalt-layer mid-depth temperature. The results show that asphalt-layer temperature can be estimated with satisfactory accuracy using relatively simple models. At the same time, the analysis indicates that the practical difference between corrections based on surface temperature and asphalt-layer mid-depth temperature is limited under the investigated measurement conditions. Surface temperature is therefore considered a sufficiently representative and practical temperature input for network-level correction.

Temperature correction was initially evaluated for bearing capacity and the central deflections included in the Norwegian bearing-capacity equation. The methodology was subsequently extended to deflections measured at all geophone positions. This enables the entire deflection basin to be corrected to a reference temperature of 20 °C before bearing capacity, SCI, BCI, and other deflection-basin parameters are calculated. The results show that a simple linear regression model provides sufficient accuracy and is well suited for practical implementation when information on asphalt-layer thickness is unavailable.

The influence of asphalt-layer thickness was also investigated using field-based multivariate and exponential models. However, the relatively limited thickness range in the field dataset, approximately 18–29 cm, made it difficult to identify the thickness effect conclusively. A simulation-based temperature-correction model was therefore developed to cover a broader range of temperatures, asphalt thicknesses, and pavement structures. The model was derived from numerical analyses of 500 pavement structures and nonlinear optimization and was validated against additional numerical simulations and repeated FWD measurements on a Norwegian road section. It was also compared with the Finnish TPPT temperature-correction model for the deflection basin, where the simulation-based model achieved a lower average relative error. The model corrects the deflection at each geophone using temperature and asphalt-layer thickness as input variables.

Based on the results, the simple linear model is recommended for temperature correction of the deflection basin when asphalt-layer thickness is unavailable. When thickness information is available, the simulation-based model is recommended because it accounts for the interaction between temperature and asphalt-layer thickness and was developed using a broader range of pavement structures. Together, the recommended models provide a practical and consistent framework for network-level temperature correction of FWD measurements.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag.....	ii
Summary	iii
1. Innledning	1
2. Bakgrunn.....	2
2.1. Fallodd (FWD)	2
2.2. Bæreevne (BC).....	3
3. Datainnsamling	4
3.1. Falloddmålinger	4
3.2. Temperaturmålinger i midtdekket	5
4. Analyse av temperaturmålinger i midtdekket	7
4.1. Temperaturmodellering	8
4.2. Temperaturkorrigering av bæreevne (BC)	10
5. Resultater	12
5.1. Data observasjon	12
5.2. Temperaturmodellering	14
5.3. Sammenligning av temperaturkorrigeringsfaktorer (TKF)	24
6. Temperaturkorrigering av nedbøyningsbassenget	27
6.1. Modellvurdering og betraktninger.....	29
6.2. Dekketykkelse i formelen.....	30
6.3. Simuleringsbasert modell	33
7. Begrensninger	40
8. Konklusjon.....	41
9. Anbefalinger	42
10. Referanser.....	42

1. Innledning

Fallodd (FWD¹) har vært en grunnstein i strukturell evaluering av vegdekker i over 40 år, og har levert avgjørende data for utvikling og vedlikehold av infrastruktur. Denne metoden, som måler nedbøyninger i overflaten, har oppnådd bred internasjonal anerkjennelse og forblir standardmetoden, til tross for nyere verktøy som for eksempel rullende bæreevнемålere ^{2,3}. Nedbøyningsdata fra fallodd benyttes blant annet i tilbakeberegningsprogrammer for å estimere stivhetsmodulene i vegkroppens ulike lag (Chen et al., 2000).

Asfaltens stivhet er temperaturavhengig, og det er derfor avgjørende å definere en referansetemperatur for å eliminere temperaturforskjellers påvirkning ved sammenligning av ulike vegstrekningers bæreevne (FHWA 2017, Baltzer & Jansen, 1994). Mange forskere har utviklet prosedyrer for temperaturkorreksjon av falloddsmålinger og/eller lagvise moduler (Kim et al., 1994; Fernando et al., 2001; Mun Park et al., 2002). Flere av de mest brukte modellene for temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger omtales av Sletten (2022).

Endringer i stivhetsmoduler som følge av temperaturvariasjoner har stor innvirkning på asfaltens bæreevne. Ifølge Statens vegvesens håndbok N200 vegbygging defineres bæreevne som:

‘Den største aksellast en veg kan ta over en tidsperiode (dimensjoneringsperioden) uten at vegens tilstand, ved normalt vedlikehold, faller under en definert akseptabel grense. ([N200 Vegbygging](#)).’

En nøyaktig vurdering av vegens bæreevne krever også en presis beskrivelse av vegens termomekaniske tilstand på måletidspunktet. Asfalt er et viskoelastisk materiale med temperaturfølsom stivhet, og små feil i antatt temperatur kan gi store feil i beregnet modul, nedbøyning og til slutt bæreevne. Tradisjonelt har tilgjengelige overflatetemperaturer blitt brukt som en erstatning for midtdekke-temperaturen. Overflaten reagerer imidlertid raskt på atmosfæriske endringer (solstråling, lufttemperatur, vind), mens temperaturen i midtdekke utvikler seg langsommere på grunn av varmeledning, termisk treghet og dempede døgn- og sesongsykluser. Dette gir både faseforskyvning og amplitudedemping mellom overflate og underliggende lag, noe som kan føre til skjevhet i temperaturkorreksjoner dersom det ikke tas hensyn til.

Tradisjonelt har temperaturkorreksjon hovedsakelig vært knyttet til bæreevne eller enkelte nedbøyningsparametere, som for eksempel d_0 . Utviklingen innen analysemetoder og nye måleteknologier gjør det imidlertid stadig mer aktuelt å temperaturkorrigere hele nedbøyningsbassenget. Dette er særlig viktig ved sammenligning mellom fallodd og rullende bæreevнемålere, ved tilbakeberegning av lagvise materialegenskaper og ved videre utvikling av automatiserte analysemetoder. Samtidig kan konstruksjonsparametere, som asfalt tykkelse, påvirke temperaturresponsen og dermed også temperaturkorreksjonen.

Målet med denne rapporten er derfor å videreutvikle temperaturkorreksjonen av falloddsmålinger gjennom en kombinasjon av feltmålinger, empiriske modeller og numeriske simuleringer. Arbeidet omfatter både forbedring av temperaturgrunnlaget som benyttes ved temperaturkorreksjon og utvikling av modeller for temperaturkorreksjon av hele nedbøyningsbassenget. Rapporten undersøker også hvilken betydning asfalt tykkelse har for temperaturkorreksjonen, og presenterer en simuleringsbasert modell som kan benyttes når dekketykkelsen er kjent.

Denne rapporten har derfor følgende hovedmålsetninger:

1. *Utvikle en praktisk modell for estimering av temperaturen i midtdekket.*

¹ Falling Weight Deflectometer

² Bæreevne: Bearing Capacity (BC)

³ Rullende bæreevнемålere: Traffic Speed Deflection Devices (TSDDs)

Målet er å etablere en enkel modell som kan benyttes på nettverksnivå når direkte temperaturmålinger i midtdekket ikke er tilgjengelige.

2. *Revurdere temperaturkorreksjonen av bæreevne og sentrale nedbøyningsparametere.*
Statens vegvesens eksisterende metode evalueres ved bruk av forbedrede estimater av midtdekke-temperatur og oppdaterte regresjonsmodeller for defleksjonsbaserte parametere (f.eks. d_0 , d_{20} og bæreevne), med mål om å forbedre nøyaktigheten uten å endre metodens grunnstruktur.
3. *Utvikle og evaluere modeller for temperaturkorreksjon av hele nedbøyningsbassenget.*
Dette inkluderer utvikling av temperaturkorreksjonsfaktorer for alle geofoner samt vurdering av hvordan dekketykkelse kan påvirke temperaturkorreksjonen gjennom bruk av GPR-målinger og verifisering med borekjerner.

Som grunnlag for analysene ble det installert en temperatursensor midt i dekket på Malvik trafikkstasjon (Trøndelag), hvor temperaturen ble registrert kontinuerlig gjennom ett år. Disse målingene danner grunnlaget for utviklingen og valideringen av modellen for midtdekketemperatur. Videre bygger rapporten på omfattende falloddsmålinger, GPR-data og numeriske simuleringer av representative vegkonstruksjoner for å utvikle og evaluere temperaturkorreksjonsmodeller for hele nedbøyningsbassenget.

2. Bakgrunn

2.1. Fallodd (FWD)

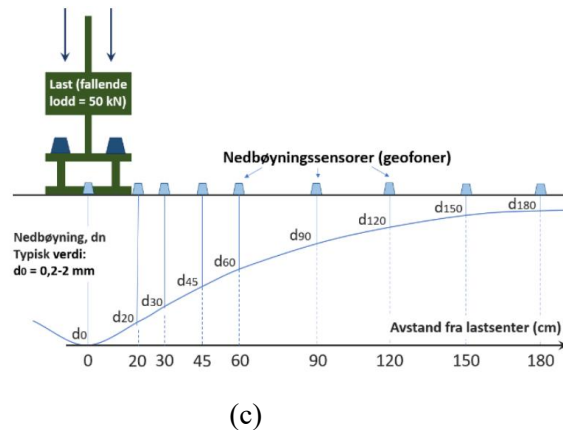
Som ble nevnt tidligere, har fallodd vært standardutstyret for strukturell evaluering av veidekker i Norge i mer enn 40 år. Som et impulsgivende nedbøyningsapparat (figur 1a, b) faller det en stasjonær last (ca. 50 kN) fra en viss høyde ned på veidekket og måler nedbøyninger vha. geofoner på ulike radielle avstander fra belastningssenteret (se [Håndbok R211 Feltundersøkelser](#)). Dette simulerer belastningen fra et hjul på en forbipasserende bil. Belastningen overføres til dekket og fører til at asfaltlaget bøyer seg. Ut fra disse målingene kan man tegne en kurve som kalles for nedbøyningsbassenget (figur 1.c). Ved å bruke nedbøyningsbassenget som oppnås fra falloddet (figur 1c) kan bæreevne (tonn) og andre strukturelle parametere beregnes (se [Håndbok V230 Forsterkning av veger](#)).



(a)



(b)



Figur 1. (a, b) Fallodd utstyret som brukes på laboratorieseksjonen, fagressurs drift og vedlikehold Trondheim), og (c) nedbøyningsbassenget ([Håndbok R211 Feltundersøkelser](#))

2.2. Bæreevne (BC)

Vegens bæreevne er en viktig faktor i planlegging og utvikling av veginfrastrukturer. I Norge brukes det i dag en egen formel for å beregne denne bæreevnen. Denne formelen har vært brukt i flere år, og tar hensyn til ulike faktorer for å gi et estimat på vegens evne til å tåle trafikkbelastning:

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

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 nedbøyninger (cm) ved henholdsvis 0 og 20 cm avstand fra lastens sentrum ([Håndbok V230 Forsterkning av veger](#)).

Som nevnt tidligere har den nåværende formelen noen begrensninger. En viktig utfordring er at vegens bæreevne varierer gjennom året, først og fremst på grunn av temperatursvingninger. Stivheten i asfalt, og dermed bæreevnen, er sterkt påvirket av temperaturen. Statens vegvesen bruker i dag en lineær temperaturfaktor for å korrigere for temperaturforskjeller. Denne faktoren er gitt i følgende formel:

$$BC_{Temp-corr.} = \frac{BC}{1.3 - 0.015 \times T} \quad (3)$$

Der $BC_{Temp-corr.}$ er den korrigerte verdien for bæreevne ved referansetemperatur (20 °C), T er overflatetemperaturen på vegdekket (°C), og BC er opprinnelige bæreevnen ved temperatur T ([Håndbok V230 Forsterkning av veger](#)).

Disse utfordringene viser behovet for å revurdere dagens temperaturkorreksjonsformel for bæreevne. I stedet for å foreslå en fullstendig ny metode, er målet med dette prosjektet å bekrefte og styrke den eksisterende metoden ved hjelp av oppdaterte data og analytiske teknikker.

3. Datainnsamling

3.1. Falloddmålinger

Falloddmålinger for dette prosjektet ble gjennomført i både 2022 og 2023, i sommersesongen. Åtte strekninger ble valgt ut (syv i 2022 og en i 2023) og ble målt ved tre ulike temperaturer. Under målingene ble nedbøyningene registrert med ni geofoner plassert på 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 og 180 cm fra senter av belastningsplaten. I tillegg ble overflatetemperatur og lufttemperatur målt og loggført.

Ved hjelp av ÅDT for tunge kjøretøy (ÅDT_H) kunne bæreevne (BC) samt to viktige indekser (nemlig Surface Curvature Index (SCI) og Base Curvature Index (BCI)) beregnes. Tabell 1 viser spesifikasjonene for målingene. Alle strekningene ligger i Trøndelag fylke, i nærheten av Trondheim (figur 2).

Tabell 1. Informasjon om strekningene og forskjellige temperaturer som målinger ble gjort ved

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	
6	FV6612 S1D1	Klett	1	19.3	16	20	48
				5.8	16	20	
				35.6	16	20	
7	FV6612 S1D1	Klett	2	21.5	16	20	48
				6.4	16	20	
				36.5	16	20	



Figur 2. Trøndelag fylke

3.2. Temperaturmålinger i midtdekket

For å samle temperaturdata i midtdekket, ble en temperatursensor installert i en dybde på 4 cm midt i asfaltdekket (figur 3) på parkeringsplassen til Malvik trafikkstasjon, som ligger ved E6 mot Stjørdal (figur 4). Sensoren ble montert og satt i drift i midten av april 2024.

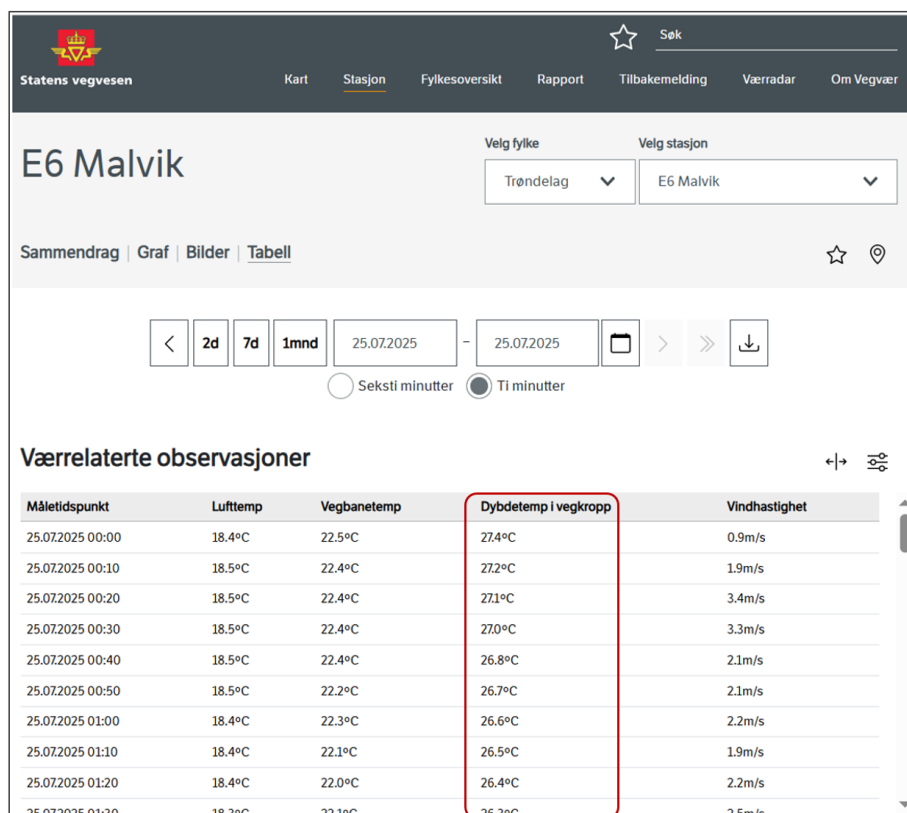


Figur 3. Temperatursensor installert i en dybde på 3 cm midt i asfaltdekket



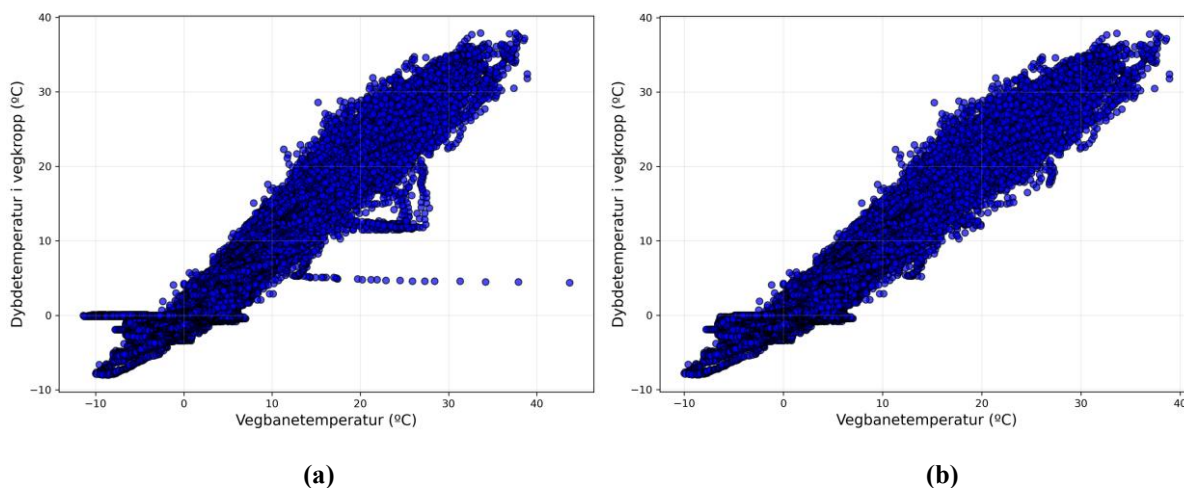
Figur 4. Malvik trafikkstasjon

Siden det allerede ligger en værstasjon på stedet, ble sensoren koblet til denne. Dette gjorde det mulig å registrere temperaturen i midtdekket samtidig med andre værparametere, inkludert asfalt overflatetemperatur og luft temperatur. Dataene ble gjort offentlig tilgjengelige som en del av værstasjonens målesystem (figur 5).



Figur 5. Offentlig tilgang til E6 Malvik trafikkstasjon

For dette prosjektet ble temperaturdata fra både overflaten og midtdekket i asfalten samlet inn i perioden fra 1. mai 2024 til 1. mai 2025. Dette datasettet danner grunnlaget for modellene og analysene i de neste kapitlene. Etter datainnsamlingen viste en visuell gjennomgang at enkelte verdier var tydelige avvik, noe som kunne redusere nøyaktigheten i resultatene. Disse unormale verdiene kan ha oppstått på grunn av systemfeil eller andre årsaker. Derfor var det nødvendig å rense datasettet før analysen kunne fortsette. Som vist i figur 6.b, ble avvikene fjernet som en del av denne prosessen.



Figur 6. (a) Rå temperaturdata før og (b) etter rensing

4. Analyse av temperaturmålinger i midtdekket

Dette kapitlet består av to hoveddeler. Den første delen handler om å etablere et enkelt og praktisk forhold mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket som kan brukes på nettverksnivå. Siden direkte måling av temperatur i midtdekket ikke alltid er mulig i praksis, ble ulike datadrevne modeller testet for å kunne estimere denne basert på den mer tilgjengelige overflatetemperaturen. Modellene som ble brukt inkluderer forsinkelsesbaserte (lagg-based) regresjonsmodeller, harmonisk analyse, multivariat lineær regresjon, og inndeling etter årstid eller tidspunkt på døgnet. Hver metode har ulike fordeler når det gjelder å fange opp kortsiktige variasjoner, sesongeffekter og tidsforsinkelser i varmeoverføring gjennom asfaltdekket. Selv om det finnes mer avanserte modeller som bruker flere parametere og kan gi høyere nøyaktighet (for eksempel BELLS3), er målet her å utvikle en modell som er så enkel og brukervennlig som mulig, samtidig som den gir god nok presisjon for praktisk bruk.

Den andre delen handler om temperaturkorrigering av bæreevnemålinger, med spesielt fokus på nedbøyningsparametrene d_0 og d_{20} som er sentrale i den norske bæreevneformelen og korregeringsfaktoren. Siden bæreevne er svært følsom for temperatur, særlig i de øvre lagene, er det nødvendig å justere disse verdiene til en standard referansetemperatur (20 °C i dette prosjektet). En revidert temperaturkorreksjonsfaktor (TKF¹, men TCF på grafer) er utviklet ved hjelp av tilpassede masterkurver for d_0 og d_{20} , noe som gjør det mulig å beregne korrigert bæreevne ved enhver målt temperatur.

¹ Temperature Correction Factor (TCF): TCF og TKF vil bli brukt om hverandre i resten av rapporten

4.1. Temperaturmodellering

For å undersøke sammenhengen mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket ble flere modelleringsstrategier testet. Modellene representerer ulike nivåer av kompleksitet og har ulike styrker når det gjelder å beskrive tidsforsinkelse, døgnvariasjoner og sesongeffekter. Først presenteres en forsinket lineær modell som beskriver termisk etterslep mellom overflate og midtdekke. Deretter vurderes en harmonisk modell for å analysere døgnsykluser, etterfulgt av en multivariat lineær regresjon som kombinerer temperatur, tid på døgnet og sesong. Til slutt analyseres gruppebaserte regresjonsmodeller der dataene deles inn etter årstid og tidspunkt på døgnet for å utvikle enkle og praktisk anvendelige ligninger.

4.1.1. Forsinket (lagged) lineær modell

Den forsinkede lineære modellen (Lagged Linear Model) beskriver den fysiske tidsforsinkelsen mellom temperaturendringer på overflaten og hvordan disse endringene påvirker temperaturen dypere ned i asfaltlaget (Zhao et al. 2020). Denne termiske forsinkelsen oppstår på grunn av varmeledning i asfaltmaterialet, hvor temperaturen i midtdekket følger endringene på overflaten med et visst etterslep. Modellen har følgende form:

$$T_{mid}(t) = \beta_0 + \beta_1 T_{surf}(t - \tau) \quad (4)$$

hvor β_0 er konstantleddet (intercept), β_1 er stigningstallet (slope) (skalafaktor), og τ er tidsforsinkelsen (i timer) mellom temperatur på overflaten og i midtdekket (Li et al. 2018, Zhao et al. 2020). Forsinkelsen blir identifisert gjennom krysskorrelasjonsanalyse, og når denne tas med i beregningen, gir en enkel lineær regresjon ofte R^2 -verdier over 0,8.

Denne modellen er både fysisk forståelig og enkel å bruke. Den forklarer hvor raskt og hvor sterkt temperaturendringer på overflaten påvirker dypere lag, ved hjelp av bare tre parametere. I tillegg gjør modellen det mulig å analysere sesongvariasjoner og døgnmønstre ved å tilpasse modellen til ulike måneder eller tidspunkter på dagen. Dette gjør den forsinket modellen til en nyttig og praktisk metode for å beregne temperaturen i midtdekket når man kun har temperaturdata fra overflaten.

4.1.2. Harmonisk (Sinusformet) modell

Den harmoniske modellen bygger på tanken om at temperaturendringer i asfalt følger et gjentakende daglig mønster. Disse endringene skyldes hovedsakelig sollys som varmer opp overflaten om dagen og avkjøling om natten. Både overflatetemperaturen og temperaturen i midtdekket viser et slikt døgnrytmemønster, som kan beskrives ved hjelp av en enkel bølgeformet (sinusformet) funksjon (Philips 1984, Fernandez et al. 2025). Modellen antar at temperaturen i midtdekket kan estimeres ved hjelp av følgende ligning:

$$T_{mid}(t) = a0_{mid} + A_{mid} \times \cos(\omega t - \varphi_{mid}) \quad (5)$$

hvor $a0$ er den gjennomsnittlige døgn-temperaturen, A er størrelsen på den daglige variasjonen (amplituden), ω ($\frac{2\pi}{24}$) er basert på døgnsyklusen på 24 timer, og φ viser hvor forsinket temperaturen i midtdekket er sammenlignet med overflaten. Det er verdt å nevne at denne estimeringsmodellen kan brukes både for overflatetemperatur og temperatur i midtdekket. Når man har φ både for overflaten og for midtdekket, kan man beregne faseforskyvningen, som angir hvor mye temperaturen i midtdekket er forsinket i forhold til tidspunktet for maksimal temperatur på overflaten:

$$\Delta\varphi = \varphi_{mid} - \varphi_{surface} \quad (6)$$

Den harmoniske (sinusformede) modellen er en estimeringsmodell som ofte brukes i veg- og klimastudier fordi den passer godt med hvordan temperatur endrer seg gjennom døgnet (Fernandez et al. 2025). Den trenger bare noen få parametere for å beskrive hele døgnsyklusen, og gir nyttig innsikt, for eksempel hvor mye temperaturen dempes nedover i asfaltlaget sammenlignet med overflaten, eller hvor mange timer senere endringer merkes i midtdekket. Totalt sett er den harmoniske modellen en enkel, men effektiv metode for å beskrive og forutsi temperaturendringer i midtdekket.

I dette prosjektet er modellen brukt på data samlet inn fra mai til september 2024, og dekker alle døgnetimer. Grunnen til dette utvalget er at dette er den perioden hvor det er mest aktuelt å gjennomføre fallodd-målinger. Separate kurver blir tilpasset for overflate- og midtdekketemperaturer, med tid på døgnet som inputvariabel. Resultatet er to jevne døgnskurver som viser hvordan hvert lag reagerer på oppvarming og nedkjøling.

Selv om det finnes mer avanserte termiske modeller som benytter flere parametere som luftfuktighet, vindhastighet eller termisk ledningsevne, er målet i dette prosjektet å holde modellen så enkel og praktisk som mulig, samtidig som den gir nøyaktige og forståelige resultater. Den harmoniske modellen oppfyller dette målet godt: den bruker kun en input (klokkeslett på døgnet), krever ingen ekstern værdata, og gir gode tilpasninger med tydelig fysisk tolkning.

4.1.3. Multivariat lineær regresjonsmodell

For å forbedre nøyaktigheten i prediksjon av temperatur i midtdekket, ble det utviklet en multivariat lineær regresjonsmodell. I motsetning til enklere modeller som kun bruker overflatetemperaturen som input, inkluderer denne modellen tre typer informasjon: overflatetemperatur, tidspunkt på døgnet (uttrykt i desimaltimer), og hvilken måned det er i året

Grunnen til denne tilnærmingen er at temperaturen i midtdekket ikke bare påvirkes av den nåværende overflatetemperaturen, men også av bredere mønstre som årstidssvingninger og dag-natt-sykluser. For å ta høyde for sesongvariasjoner ble månedene kodet som egne ‘dummyvariabler’, slik at modellen kunne fange opp ulike justeringer for hver måned. Tidspunkt på døgnet ble lagt inn som en kontinuerlig variabel, siden temperaturforskjellen mellom overflate og midtdekket vanligvis varierer mellom dag og natt på grunn av solstråling og nedkjøling.

Modellen ble tilpasset med alle tilgjengelige data fra måleperioden på ett år, og resultatene viste god tilpasning med høye R^2 -verdier som skal presenteres seinere i rapporten.

En viktig fordel med denne modellen er balansen mellom enkelhet og fleksibilitet. Den krever verken kompliserte fysiske beregninger eller avanserte metoder for tilpasning, men klarer likevel å fange opp viktige tidsavhengige mønstre og variasjoner. I tillegg kan den ferdige ligningen brukes i enkle dataprogrammer, noe som gjør modellen anvendelig både i forskning og i praktisk drift.

4.1.4. Regresjon gruppert etter årstid og tid på døgnet

I denne siste modelleringsmetoden blir sammenhengen mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket beskrevet ved hjelp av enkel lineær regresjon, men anvendt på strategisk grupperte data. Tanken er å dele datasettet inn i undergrupper som gjenspeiler typiske termiske mønstre, altså hvordan temperaturen varierer gjennom døgnet og mellom ulike årstider.

Gruppering etter årstid og tre daglige perioder

Først ble dataene gruppert etter:

Årstid:

1. Mai–September (varmere måneder)
2. Oktober–April (kaldere måneder)

Og tid på døgnet:

1. Natt (00:00–08:00)
2. Dag (08:00–16:00)
3. Kveld (16:00–24:00)

For hver av de seks kombinasjonene ble det tilpasset en egen lineær regresjonsmodell. Disse gruppevise modellene gjør det mulig å justere sammenhengen mellom overflate og midtdekketemperatur ut fra tidspunkt og forhold ved måletidspunktet. Resultatene viste at metoden gir en fleksibel og likevel enkel måte å ta hensyn til termiske forskjeller som oppstår på grunn av variasjoner i solstråling, lufttemperatur og varmeopptak i asfaltdekket, både over tid og mellom årstider.

Utvidet gruppering til seks tidsintervaller

Som et videre steg ble data fra mai til september analysert med seks daglige tidsintervaller:

00–04, 04–08, 08–12, 12–16, 16–20 og 20–24.

Denne mer detaljerte inndelingen fanger opp finere mønstre i varmeoverføring gjennom døgnet, og er spesielt nyttig ved raske temperaturendringer rundt soloppgang og solnedgang. En egen lineær regresjon ble beregnet for hvert tidsintervall, og tilhørende helningsverdi, konstantledd og R^2 -verdi ble lagret som referanse.

Denne utvidede modellen gir mer detaljert informasjon, samtidig som den er lett å bruke. Seks-intervallsmodellen gjør det mulig for brukere å velge regresjonsparametere som passer best med tidspunktet for målingen. Dette kan forbedre presisjonen uten å kreve avanserte modeller eller ekstra datainnsamling. Metoden egner seg godt for bruk i større prosjekter eller der man ønsker å justere bæreevne basert på begrenset temperaturinformasjon.

Parvis regresjonsanalyse ¹

I tillegg til de ovennevnte regresjonsmetodene ble det også gjennomført en parvis analyse basert på tids-matchede målinger av overflatetemperatur og temperatur i midtdekket fra juli (tilfeldig valgt). I denne metoden ble hver måling behandlet som et eget temperaturpar ($T_{\text{overflate}}, T_{\text{midtdekke}}$), og separate lineære regresjonsmodeller ble utviklet for tre perioder i løpet av døgnet: natt (00:00–08:00), dag (08:00–16:00) og kveld (16:00–24:00). Denne fremgangsmåten kan gi en mer detaljert vurdering av det direkte forholdet mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket på ulike tidspunkter, uten sesongbasert eller månedlig utjevning.

4.2. Temperaturkorrigering av bæreevne (BC)

Siden bæreevnen er avhengig av de to viktige parameterne d_0 og d_{20} , må disse verdiene korrigeres for temperatur for å kunne justere bæreevnen til en valgt referansetemperatur. Derfor benyttes en

¹ Paired regression analysis

temperaturkorrigeringsfaktor (TKF). Ved å trekke ut d_0 og d_{20} fra bæreevneformelen, sammen med tilhørende eksponenter i formelen, kan TKF beregnes på følgende måte:

$$TKF = \frac{BC_{korrigert}}{BC_{ikke.korr}} = \left(\frac{E_{dim,korr.}}{E_{dim,ikke.korr.}} \right)^{0.6} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{d_0(d_0-d_{20})}} \right)^{0.6}_{korr.}}{\left(\frac{1}{\sqrt{d_0(d_0-d_{20})}} \right)^{0.6}_{ikke.korr.}} = \left(\frac{\sqrt{d_{0-ikke.korr.}(d_{0-ikke.korr.}-d_{20-ikke.korr.})}}{\sqrt{d_{0-korr.}(d_{0-korr.}-d_{20-korr.})}} \right)^{0.6} = \left(\frac{d_{0-korr.}(d_{0-korr.}-d_{20-korr.})}{d_{0-ikke.korr.}(d_{0-ikke.korr.}-d_{20-ikke.korr.})} \right)^{-0.3} \quad (7)$$

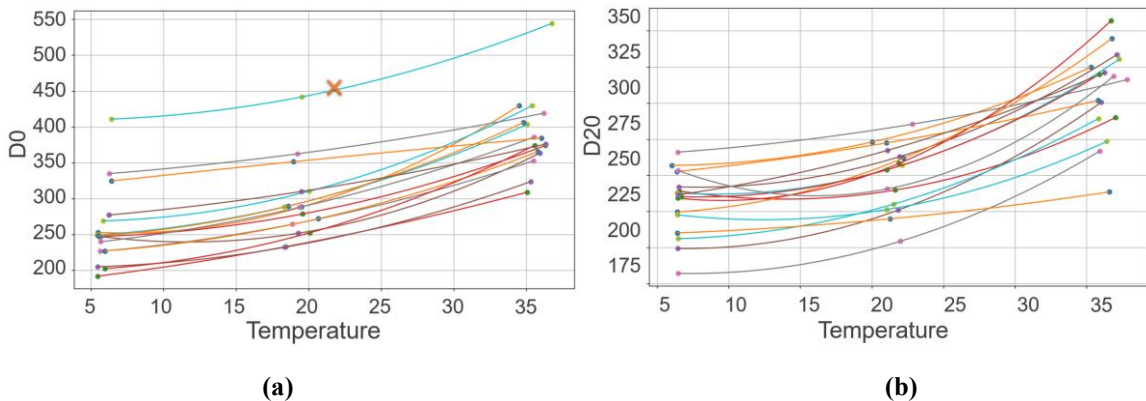
TKF er i praksis en regresjonslinje i et diagram der den horisontale akse viser overflatetemperaturen, og den vertikale akse viser forholdet mellom opprinnelig bæreevne $BC_{ikke.korr}$ og korrigert bæreevne $BC_{korrigert}$. Som nevnt tidligere, beregnes $BC_{korrigert}$ basert på de korrigerte verdiene av d_0 og d_{20} . TKF-linjen gir derfor en regresjonslinje som gjør det mulig å beregne en temperaturkorrigert bæreevne ($BC_{corrected}$) ved hvilken som helst målt temperatur.

4.2.1. Korrigering av d_0 og d_{20}

For å kunne gjennomføre en ny vurdering av temperaturkorrigeringsformelen, er det en forutsetning å ha fallodd-målinger ved minst tre forskjellige temperaturer. For hvert målepunkt kan det tegnes en polynomisk kurve. Ved å plote kurvene for alle pålitelige målepunkter, kan en samlet ‘masterkurve’ estimeres for hver vegstrekning (om ønskelig), og videre for hele vegnettet. Basert på den tilpassede ligningen for masterkurvene for henholdsvis d_0 og d_{20} , kan verdiene for d_0 og d_{20} ved en hvilken som helst temperatur (referansetemperatur i denne studien) estimeres ved hjelp av følgende formel:

$$D_{0-master\ curve} = A_0 \times T^2 + B_0 \times T + C_0 \quad (8)$$

Hvor A_0 , B_0 , og C_0 er korrelasjonskoeffisientene til den tilpassede masterkurven for d_0 . Ved å sette inn T som referansetemperaturen (20 °C i denne studien), kan korrigerte verdier for hver fallodd-måling beregnes. Tilsvarende kan samme fremgangsmåte gjentas for d_{20} . Figur 7 viser et tilfeldig eksempel på estimering av masterkurver for d_0 og d_{20} .



Figur 7. Eksempler på beregnede masterkurver for korrigering: (a) d_0 , og (b) d_{20}

Som nevnt tidligere, ble datarensing utført for å fjerne ‘outliers’ og velge pålitelige og repeterbare data. Python (versjon 3.11.3) ble brukt for å beregne og lage masterkurvene.

I denne rapporten ble de polynomiske masterkurvene beregnet med overflatetemperaturen som den uavhengige variabelen ved hvert målepunkt.

I tillegg til de polynomiske kurvene ble også lineære regresjonslinjer beregnet for sammenligningsformål. Dette ble gjort både med den målte overflatetemperaturen og med

overflatetemperaturen konvertert til midtdekke-temperatur ved hjelp av ligningene utviklet i kapittel ‘4.1.4. Regresjon gruppert etter årstid og tid på døgnet’. På denne måten muliggjøres en samtidig sammenligning mellom polynomisk og lineær regresjon, samt en vurdering av effekten av å bruke henholdsvis overflate og midtdekke-temperatur. En typisk formel for en slik lineær regresjonsmodell er:

$$D_{0\text{-linær reg.}} = A_0 \times T_{\text{midt}} + B_0 \quad (9)$$

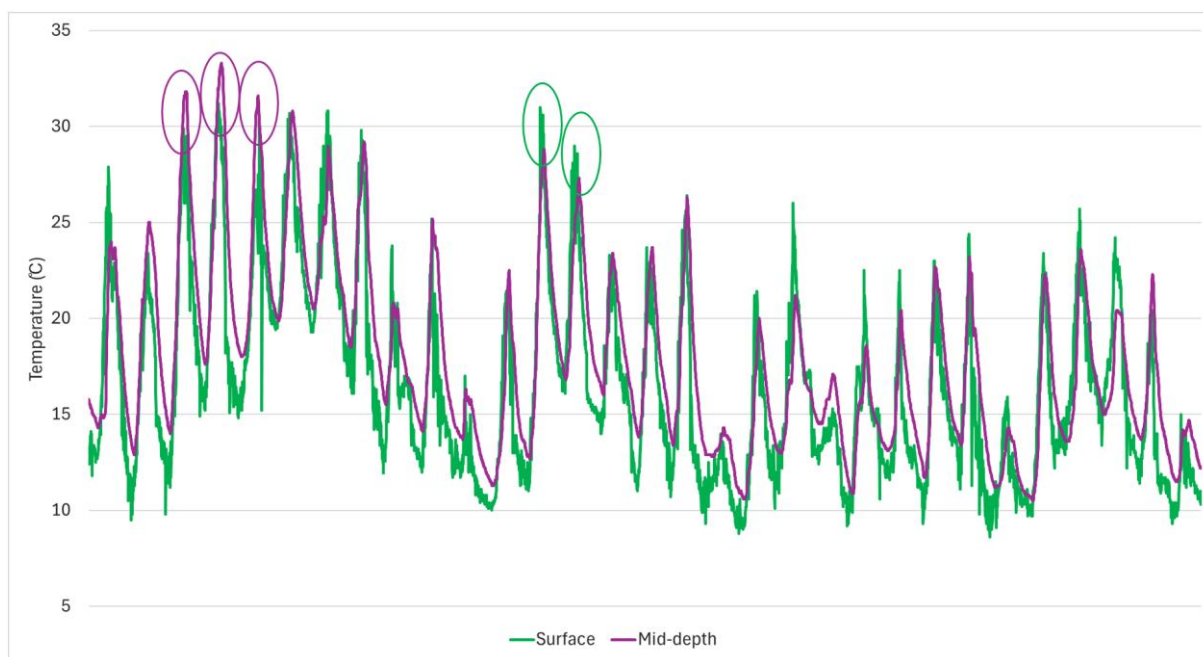
hvor T_{midt} representerer temperaturen i midtdekket, og A_0 og B_0 er regresjonskoeffisientene som er tilpasset dataene.

Til slutt ble temperaturkorrigeringsfaktorene som ble beregnet ved hjelp av lineære regresjonsbaserte metoder (det vil si sesong- og tre-tidsperiodeinndelingen, samt den utvidede inndelingen i seks tidsintervaller) både med overflate og midtdekke-temperaturen, sammenlignet med faktorene som ble beregnet ved hjelp av polynomiske masterkurver basert på overflatetemperatur. Denne sammenligningen gjorde det mulig å vurdere om de forenklede lineære metodene (spesielt de som er basert på den mer stabile temperaturen i midtdekke) kan fungere som pålitelige alternativer for temperaturkorrigering på nettverksnivå.

5. Resultater

5.1. Data observasjon

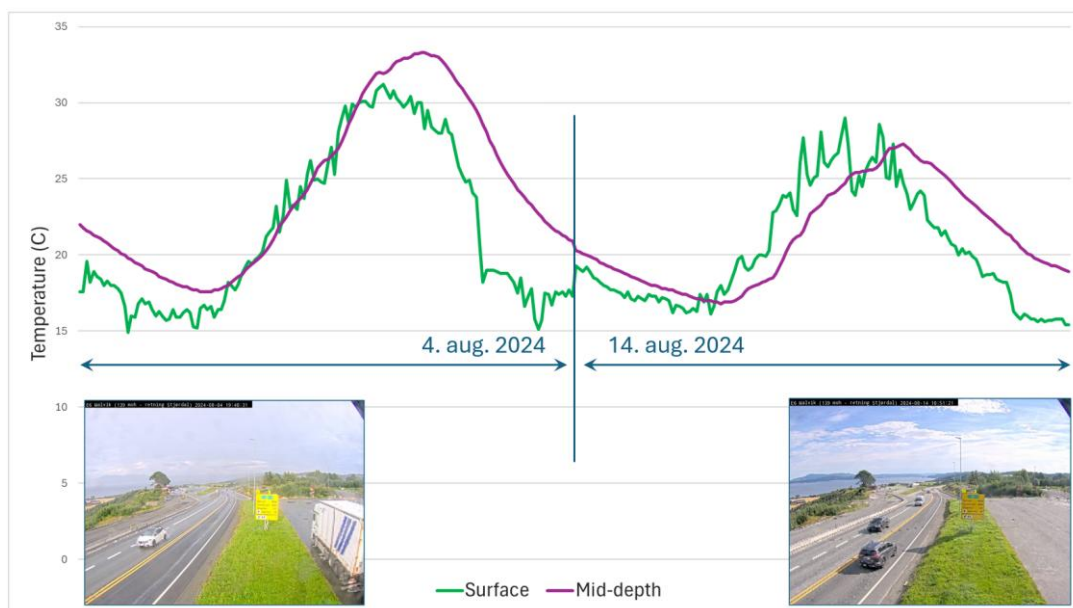
Etter datarensing ble det gjennomført en visuell vurdering av dataene, og den visuelle framstillingen av dataene for august, som et eksempel, er vist i figur 8.



Figur 8. Rådataobservasjon (august)

En gjennomgang av temperaturlagene avdekket et interessant mønster på de varmeste sommerdagene, altså de dagene hvor overflatetemperaturen i asfalt nådde 30 °C eller høyere. På flere av disse dagene var det daglige maksimumet i 4 cm dybde faktisk høyere enn tilsvarende maksimum på overflaten, slik det fremgår i figur 8. Gjennomgang av bildearkivet fra værstasjonen viste at dette

temperaturbyttet vanligvis oppstod under overskyet eller nedbørrikt vær, mens på klare og solrike dager steg overflatetemperaturen raskt og holdt seg høyere enn temperaturen i midtdekket (se figur 9).



Figur 9. Sammenligning av to tilfeldige dager i august med ulike temperaturmønstre

Fra et fysisk perspektiv kan denne oppførselen forklares ved hjelp av BELLS3-varmeoverføringsmodellen (som ofte brukes til å modellere temperaturforløp i asfalt og temperatur i midtdekket), som kombinerer konduktiv varmeledning med latent varmeutveksling grunnet fordampning og kondensasjon av fuktighet. På solrike dager fører høy netto stråling til at overflaten når sitt maksimum først, og deretter kjøles raskt ned ved solnedgang. Dermed blir midtdekket, som har større termisk treghet, hengende etter og forblir kjøligere. På overskyede eller regnfulle dager undertrykkes derimot temperaturtoppen på overflaten av fordampningskjøling og lavere strålingstap, mens fuktighet i asfalten frigjør latent varme i underlaget, noe som gjør at midtdekket kan holde seg varmere og tidvis overstige overflatetemperaturen.

Selv om de eksakte mekanismene ikke kunne utforskes fullt ut på grunn av et begrenset sett med tilgjengelige klimatiske og strukturelle parametere, antyder disse observasjonene at forholdet mellom overflate- og midtdekke-temperatur er svært følsomt for kortsiktige værforhold.

På grunn av disse dynamiske forholdene anbefaler flere relevante tekniske rapporter og retningslinjer, blant annet fra USA, Finland og Tyskland, å unngå fallodd-målinger når overflatetemperaturen overstiger 30 °C.

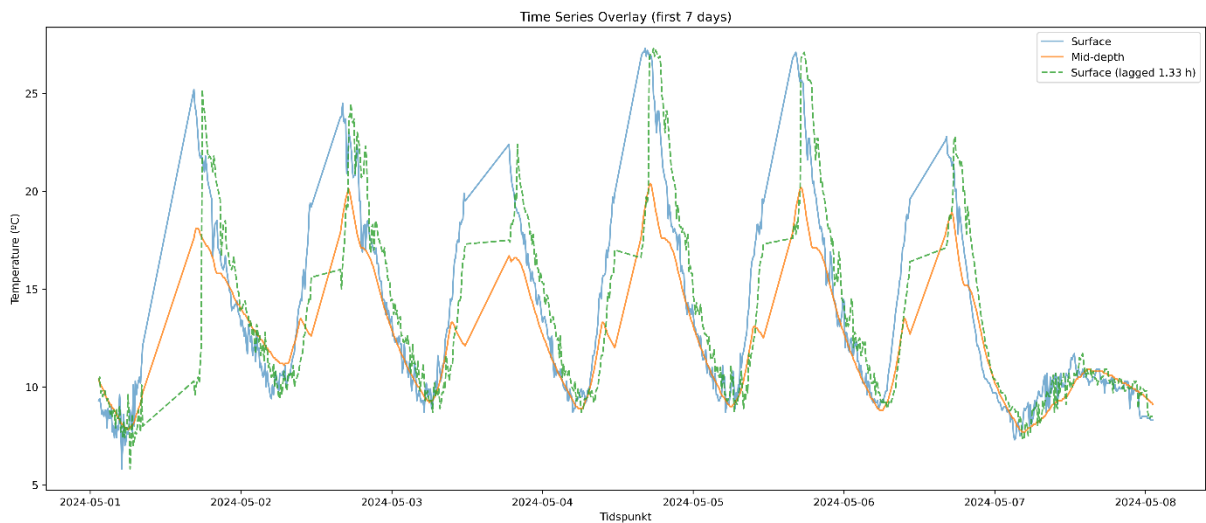
I denne rapporten ble to tilnærminger testet: (i) å utelate alle data der overflatetemperaturen oversteg 30 °C, og (ii) å inkludere disse dataene. Ettersom det ikke ble observert noen statistisk signifikant forskjell i de resulterende temperaturkorreksjonsfaktorene, valgte man å gå videre med hele datasettet. Det må til slutt påpekes at sensoren i midtdekket ikke kunne registrere temperaturer over 40 °C, og alle målinger over denne grensen ble derfor utelatt fra analysen.

5.2. Temperaturmodellering

5.2.1. Forsinket lineær modell

Krysskorrelasjon av de gjennomsnittlige tidsseriene for overflatetemperatur og midtdekket (mai–september data) identifiserte et optimalt etterslep på 1,33 timer. Dette indikerer at temperaturendringer ved vegoverflaten kommer omtrent 80 minutter før temperaturen endres i midtdekket.

Figur 10 viser rådata for overflatetemperatur (blå), målt temperatur i midtdekket (oransje), og overflatetemperaturen forskjøvet med 1,33 timer (grønn stiplet) for de første sju dagene. Det gode samsvaret mellom den etterslepet overflatekurven og midtdekket bekrefter visuelt at det oppdagede etterslepet er representativt.

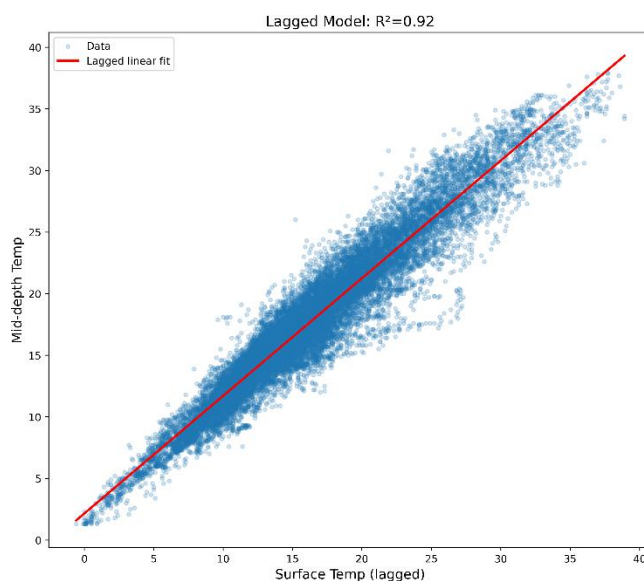


Figur 10. Tidsserieoversikt for overflate, midtdekket og tidsforskjøvet overflatetemperatur (første syv dager)

En enkel lineær regresjon av midtdekket-temperaturen mot den forsinkede overflatetemperaturen gir følgende:

$$T_{midt} = 2.16 + 0.955 T_{overflate}(t - 1.33h) \quad (10)$$

Figur 11 viser spredningsdiagrammet mellom midtdekket-temperatur og forsinket overflatetemperatur, sammen med den tilpassede regresjonslinjen. Over 92 % av variasjonen forklares av denne modellen. Tabell 2 oppsummerer koeffisienter av modellen.



Figur 11. Sammenheng mellom temperatur i midtdekke og forsinket overflatetemperatur med tilpasset lineær regresjonsmodell

Tabell 2. Sammendrag av forsinket modellen

Parameter	Verdi
Forsinkelse τ (timer)	1.33
Konstantledd (intercept) β_0	2.16 (°C)
Stigningstall (slope) β_1	0.955
R^2 -verdi	0.924

5.2.2. Harmonisk (sinusformet) modell

5.2.2.1. Alle data (Mai-September)

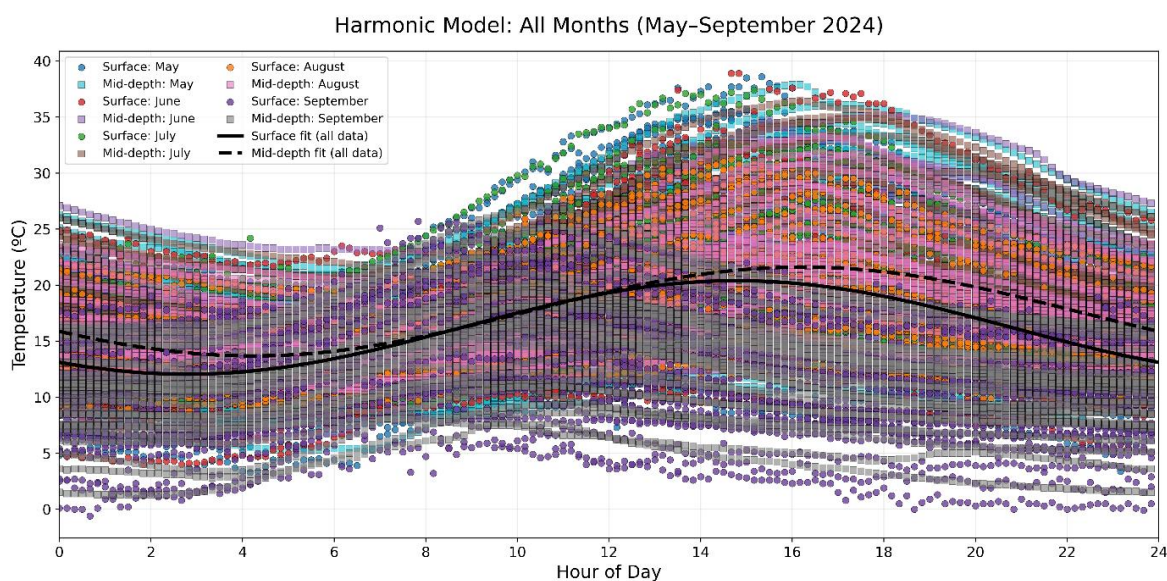
Ved å tilpasse cosinusmodellen til hele datasettet for mai–september, ble følgende parametere oppnådd:

Tabell 3. Generelle parametere for harmoniske modellen

Parameter	Overflate	Midtdekke	Faseskift*
Middelverdi (a0)	16.22	17.65	
Amplitude	-4.17	-3.96	
Fase (rad)	0.73	1.11	0.38
Fase (timer)	2.79	4.22	1.43

* midtdekke i forhold til overflate

Denne harmoniske kurven (figur 12) fanger opp den dominerende døgnsyklusen, som skyldes soloppvarming på dagtid og nedkjøling om natten. Kurven for midtdekket viser lavere amplitude og et konsekvent faseskift i forhold til overflatesignalet, noe som reflekterer varmespredning gjennom asfaltlaget.



Figur 12. Harmonisk modell tilpasset alle data fra mai til september 2024. De svarte linjene viser de tilpassede cosinuskurvene for overflate (heltrukket) og midtdekke (stiplet), lagt oppå spredningsdataene.

5.2.2.2. Månedlige harmoniske tilpasninger

- For å undersøke sesongvariasjoner ble den harmoniske modellen tilpasset separat for hver måned. Tabell 4 viser estimerte parametere for mai til september. Overordnet sett gjelder følgende:
- Amplituden er høyest midt på sommeren (juni–juli) og avtar mot mai og september.
- Middelterperaturen når også sitt høyeste nivå i juli.
- Faseskiftet holder seg i området 2–3 timer, med en liten økning i de varmeste månedene. Dette tyder på at oppvarmingen i dybden skjer langsommere når temperaturendringene ved overflaten er sterkest.

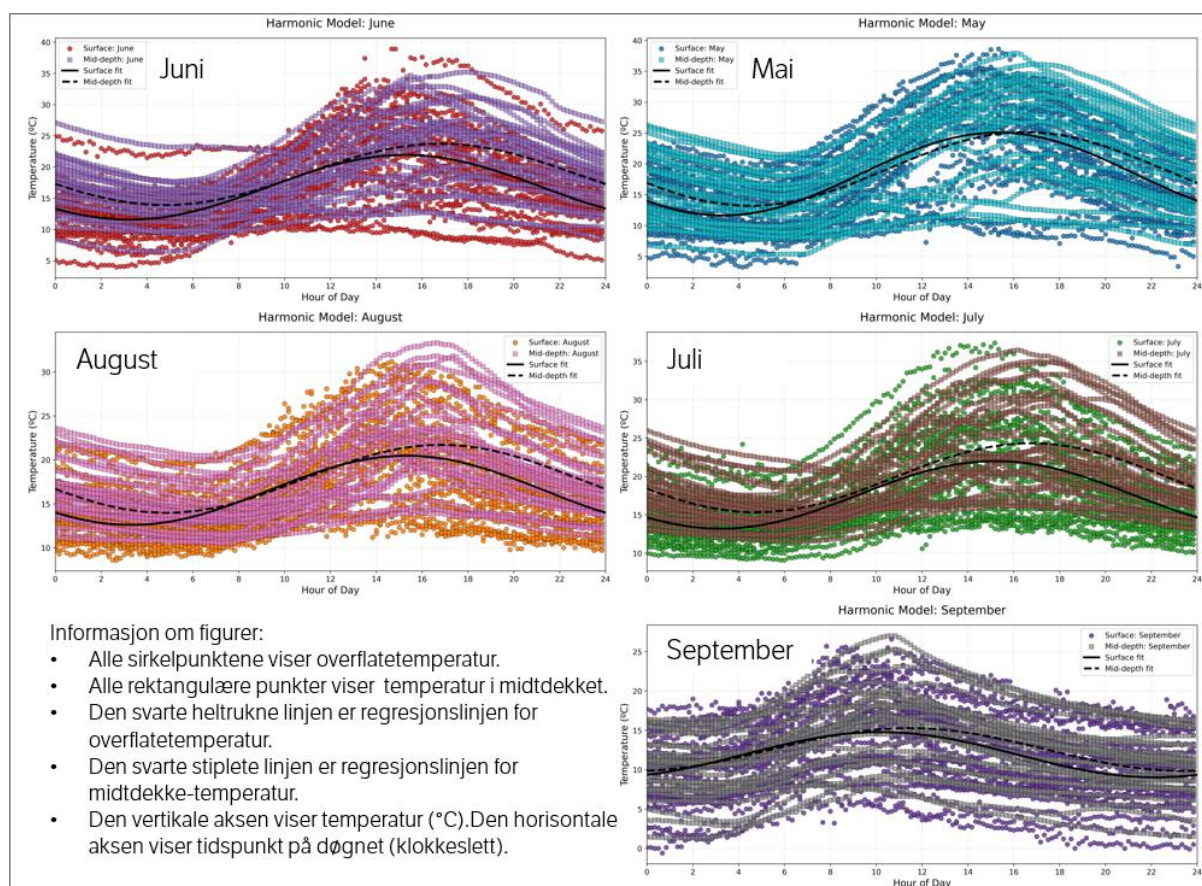
Tabell 4. Månedlige harmoniske parametere

Måned		Middelverdi (a0)	Amplitude	Fase (rad)	Fase (timer)
Mai	Overflate	18.36	-6.71	0.87	3.31
	Midtdekke	19.17	-5.96	1.18	4.50
	Faseskift*			0.31	1.19
Juni	Overflate	16.77	-5.18	0.85	3.24
	Midtdekke	18.82	-4.91	1.25	4.79
	Faseskift			0.41	1.55
Juli	Overflate	17.60	-4.40	0.84	3.21
	Midtdekke	19.83	-4.50	1.25	4.76
	Faseskift			0.41	1.55
August	Overflate	16.54	-3.93	0.87	3.31
	Midtdekke	17.84	-3.86	1.27	4.84
	Faseskift			0.40	1.52
September	Overflate	11.90	-2.88	-0.47	-1.81
	Midtdekke	12.55	-2.72	-0.15	-0.57
	Faseskift			0.32	1.24

* midtdekke i forhold til overflate

Figur 13 illustrerer de månedlige tilpasningene:

- Hvert delplott viser rådata for overflate (sirkel) og midtdekke (firkant) for den aktuelle måneden.
- De heltrukne og stiplede svarte kurvene er de tilpassede cosinusfunksjonene for henholdsvis overflate og midtdekke.
- Legg merke til det gradvise skiftet i tidspunkt for maksimumstemperatur og reduksjon i amplitude fra juni/juli til mai/september.



Figur 13. Månedlige harmoniske tilpasninger (mai–september) med spredningsdata og tilpassede kurver for overflate og midtdekke

Den harmoniske modellen gir viktig innsikt i vegens termiske oppførsel. For det første viser de høyere amplitudene i juni og juli tydeligere oppvarming på dagtid og mer markerte døgnsvingninger midt på sommeren, mens de lavere amplitudene i mai og september gjenspeiler mildere temperatursykluser. For det andre stemmer det konsistente faseskiftet på omtrent 2–3 timer mellom toppene i overflate og midtdekke godt overens med resultatene fra regresjonsmodellen med etterslep, og kvantifiserer asfaltdekkets termiske treghet: temperaturen i dybden følger alltid overflatens endringer med noen timers forsinkelse. Til slutt, til tross for modellens enkelhet (den krever kun en middelverdi, en amplitude og en faseparameter) klarer den harmoniske tilnærmingen å fange både omfanget og tidspunktet for daglige temperaturvariasjoner med imponerende nøyaktighet. Denne enkelheten gjør modellen til et praktisk og lett anvendelig verktøy for å estimere temperatur i midtdekke basert på overflatedata, uavhengig av årstid. En viktig begrensning er imidlertid at modellen forutsetter regelmessige døgnsvingninger og ikke tar høyde for plutselige værendringer, som for eksempel skyer, regn eller raske temperaturfall, noe som kan redusere modellens nøyaktighet i enkelte perioder.

5.2.3. Multivariat lineær regresjon

For å fange både sesongmessige og døgnvariasjoner samtidig, ble en multivariat lineær modell tilpasset basert på følgende:

$$T_{midt} = \beta_0 + \beta_1 T_{overflate} + \beta_2 \times tid + \sum_{m=1}^{12} \gamma_m 1_{\{måned=m\}} + \varepsilon \quad (11)$$

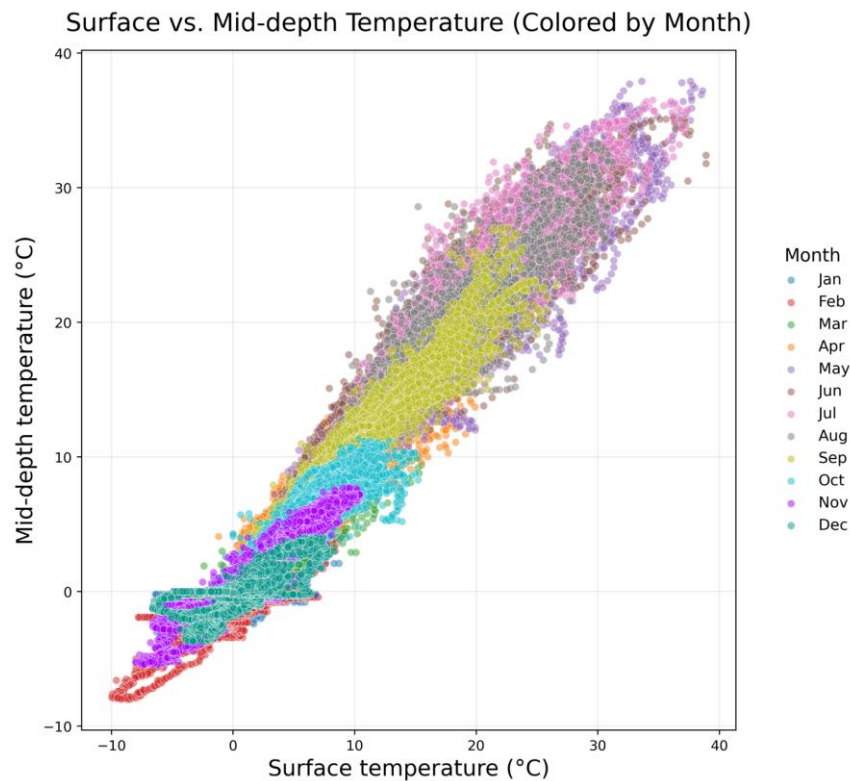
hvor β_0 er konstantledd, β_1 er følsomhet for overflatetemperatur, β_2 er effekten av tid på døgnet (i timer), og γ_m er månedlig ‘offset’ (dummyvariabel-koeffisient). Tabell 5 oppsummerer regresjonskoeffisientene fra den helårige multivariate modellen.

Tabell 5. Regresjonskoeffisienter fra den multivariate helårsmodellen.

Variabel	Koeffisient
Konstantledd (Intercept)	1.43
Overflate temperatur (β_1)	0.80
Tid i dagen (β_2)	0.04
Måned 1 (Jan)	-2.27
Måned 2 (Feb)	-3.17
Måned 3 (Mars)	-1.85
Måned 4 (April)	-0.23
Måned 5 (Mai)	2.50
Måned 6 (Juni)	3.40
Måned 7 (Juli)	3.74
Måned 8 (August)	2.60
Måned 9 (September)	1.05
Måned 10 (October)	-1.23
Måned 11 (November)	-2.01
Måned 12 (Desember)	-2.52

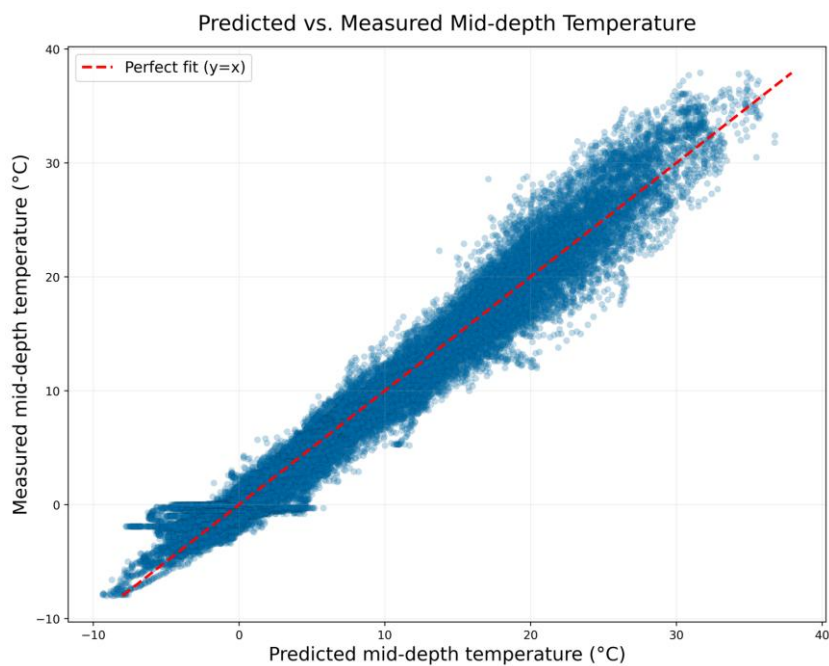
Modellen har en samlet forklaringsgrad (R^2) på 0,95, noe som indikerer at 95 % av variasjonen i midtdekke-temperaturen forklares av kombinasjonen av overflatetemperatur, tid på døgnet og sesongmessige (månedlige) faktorer.

Figur 14 viser alle målepunkter fargekodet etter måned (jan–des), plottet mot tilsvarende overflatetemperatur. De tydelige sesongmessige ‘lagene’ reflekterer effekten av de månedlige dummyvariablene: sommermånedene (jun–aug) danner klynger med høyere midtdekke-temperaturer for en gitt overflatetemperatur, mens vintermånedene (des–feb) ligger lavere.



Figur 14. Overflatetemperatur vs. midtdeke-temperatur gruppert etter måned, som illustrerer sesongvise forskyvninger

Til slutt viser figur 15 de predikerte midtdeke-temperaturene fra den fullstendige modellen sammenlignet med de faktiske målingene. Den tette spredningen rundt 1:1-linjen (stiplet rød) bekrefter modellens nøyaktighet under varierende forhold.



Figur 15. Predikert vs. målt temperatur viser modellens totale treffsikkerhet

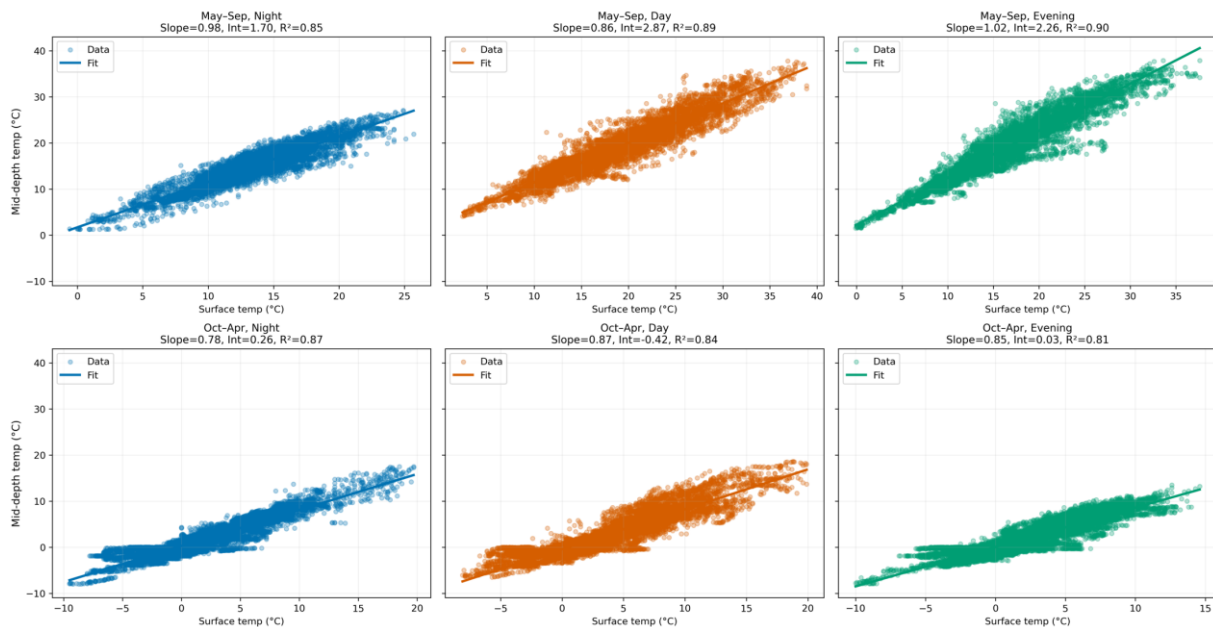
5.2.4. Sesongbasert og periodisk regresjonsanalyse

For å få bedre innsikt i hvordan forholdet mellom overflate- og midtdekket-temperatur varierer over tid, ble det først gjennomført en lineær regresjonsanalyse der datasettet ble delt inn i to hovedsesonger (mai til september og oktober til april) og tre standard tidsperioder i døgnet:

Natt (00:00–08:00), dag (08:00–16:00) og kveld (16:00–24:00).

Denne tilnærmingen hadde som mål å fange effekten av både sesong- og døgnvariasjoner på temperaturatferden i dybden. Resultatene, vist i figur 16, viser tydelige forskjeller i både stigningstall og konstantledd på tvers av de seks sesong-tidskombinasjonene.

I den varme sesongen (mai–september) ble høyest stigningstall observert om kvelden (1,02), noe som indikerer en nær 1:1-respons i midtdekket-temperaturen på endringer ved overflaten. I motsetning til dette hadde dagperioden i samme sesong et merkbart lavere stigningstall på 0,86, noe som tyder på at temperaturendringer i midtdekket skjer tregere enn ved overflaten, sannsynligvis som følge av termisk treghet i de dypere lagene ved sterk solinnstråling. Nattperioden viste et mellomliggende stigningstall på 0,98. For alle tre perioder i den varme sesongen lå R^2 -verdiene mellom 0,85 og 0,90, noe som bekrefter en sterk lineær sammenheng i denne perioden.



Figur 16. Lineære regresjoner fordelt på to sesonger og tre tidsperioder i døgnet

I den kalde sesongen (oktober–april) var stigningstallene gjennomgående lavere, noe som reflekterer redusert varmeoverføring fra overflaten til midtdekket. Nattperioden hadde det laveste stigningstallet på 0,78, noe som indikerer større demping i de kaldeste timene. Dag- og kveldperiodene viste noe høyere stigningstall på henholdsvis 0,87 og 0,85.

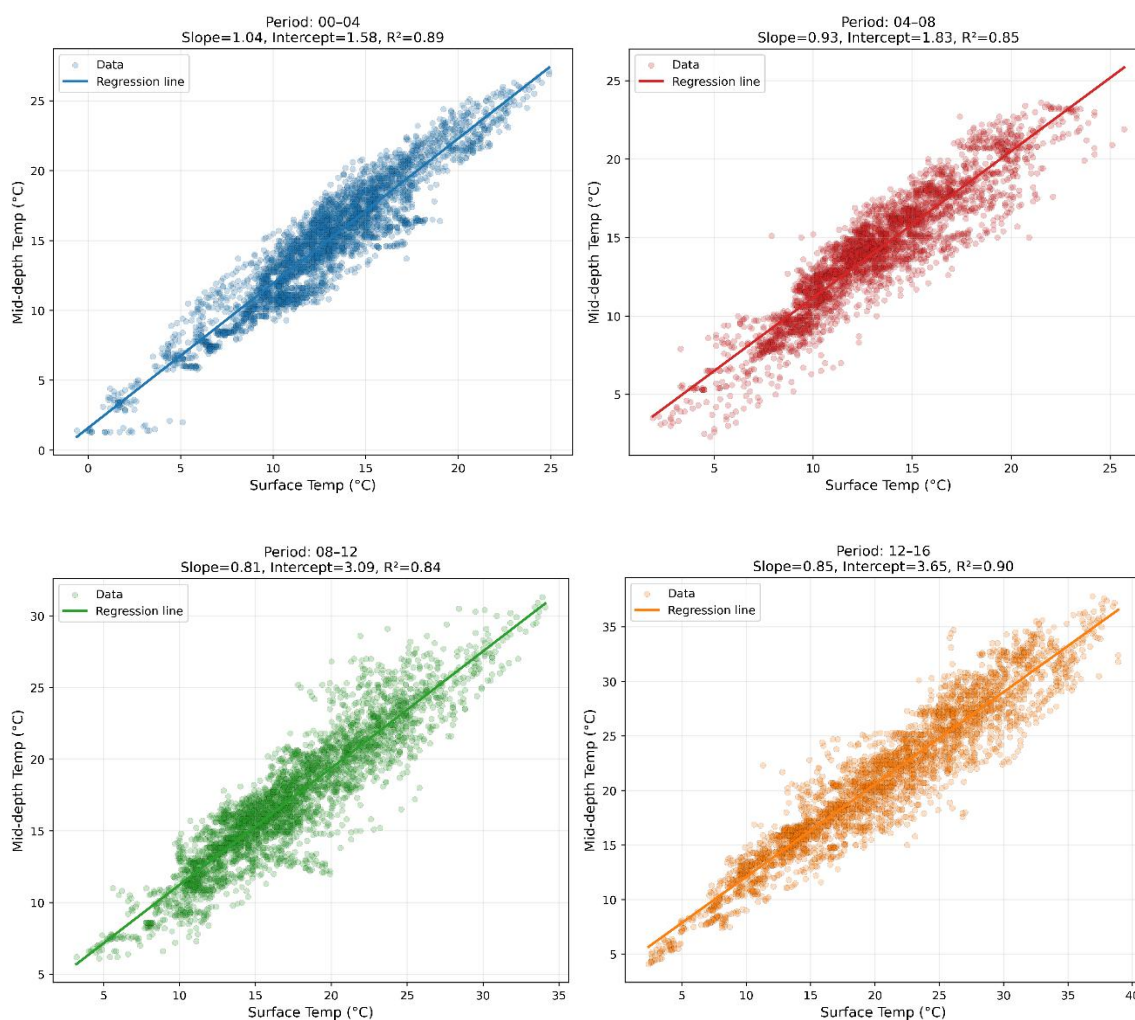
R^2 -verdiene holdt seg relativt høye (0,81–0,87), noe som tyder på at overflatetemperaturen fortsatt var en god forklaringsvariabel for temperaturen i midtdekket, selv under lavere omgivelsesforhold. Alle regresjonskoeffisientene for denne modellen er vist i Tabell 6.

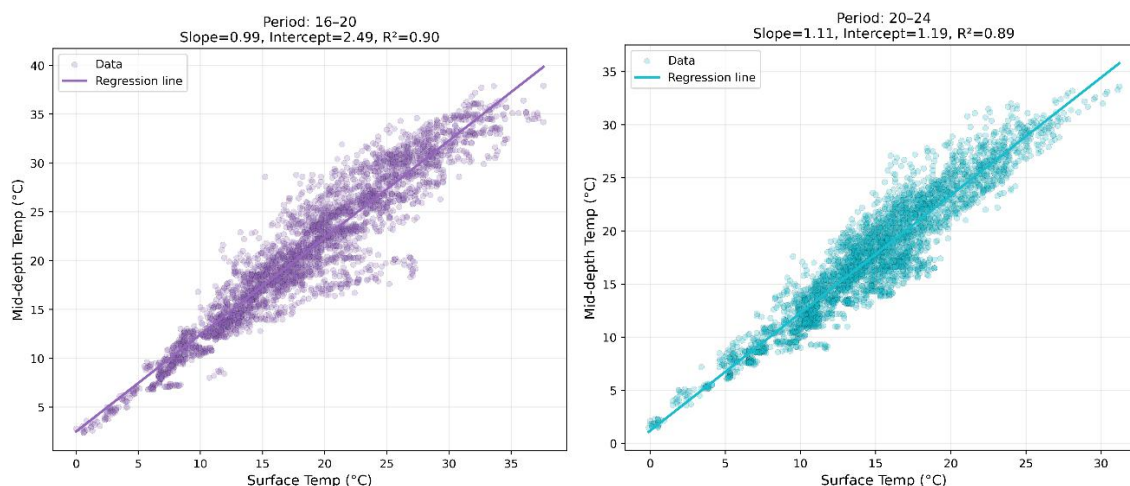
Tabell 6. Regresjonskoeffisienter for hvert av de tre tidsintervallene (mai til september)

Sesong	Periode	Konstantledd	Stigningstall	R ²	N_punkter
Mai-Sep	Natt	1.70	0.98	0.85	7344
Mai-Sep	Dag	2.87	0.86	0.89	7164
Mai-Sep	Kveld	2.26	1.02	0.90	7324
Okt-Apr	Natt	0.26	0.78	0.87	9759
Okt-Apr	Dag	-0.42	0.87	0.84	9804
Okt-Apr	Kveld	0.03	0.85	0.81	9792

Selv om inndelingen i tre tidsperioder ga en nyttig oversikt, manglet tilstrekkelig detaljering til å fange opp mer subtile endringer i temperaturdynamikken mellom overflate og midtdekk gjennom døgnet.

For å bøte på dette ble analysen utvidet ved å dele 24-timerssyklusen inn i seks smalere tidsintervaller: 00–04, 04–08, 08–12, 12–16, 16–20 og 20–24, men kun for data fra mai til september. Resultater er illustrert i figur 17.





Figur 17. Lineære regresjoner for en sesong (mai–september) fordelt på seks tidsperioder i døgnet

Den utvidede modellen avdekket tydeligere mønstre i hvordan varme overføres gjennom døgnet. De høyeste stigningstallene ble observert tidlig på morgenen (00–04, stigningstall = 1,036) og sent på kvelden (20–24, stigningstall = 1,11), når temperaturendringene skjer relativt langsomt, noe som gjør at midtdekke-temperaturen i større grad kan følge overflatetemperaturen. I motsatt ende ble det laveste stigningstallet registrert mellom 08–12 (stigningstall = 0,814), en periode preget av rask oppvarming av overflaten og forsinket respons i underlaget på grunn av termisk treghet.

Perioden 12–16 viste et moderat stigningstall på 0,846, mens 16–20 hadde et markant høyt stigningstall på 0,993, noe som igjen indikerer bedre termisk kobling på ettermiddagen. Konstantleddene varierte også gjennom dagen, fra omtrent 1,19 til 3,65, og reflekterer sannsynligvis den akkumulerede termiske ‘hukommelsen’ fra tidligere timer.

Viktigst er at alle modellene oppnådde R^2 -verdier over 0,84, noe som bekrefter at overflatetemperaturen er en pålitelig indikator for temperatur i midtdekke i alle tidsperioder. Denne seksdelte inndelingen gir et mer detaljert og nøyaktig grunnlag for utvikling av tidsavhengige modeller som estimerer temperatur i midtdekket basert på observasjoner ved overflaten. Tilhørende regresjonskoeffisienter for hver av de seks tidsintervallene fra mai til september er presentert i Tabell 7.

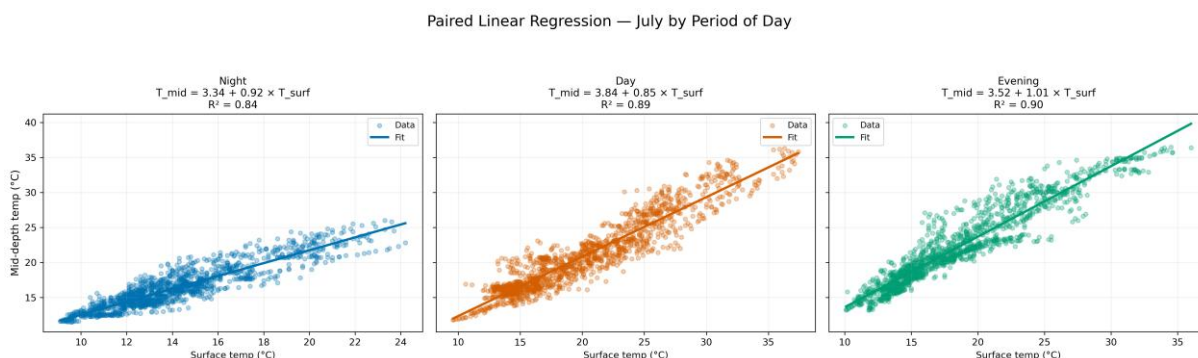
Tabell 7. Regresjonskoeffisienter for hvert av de seks tidsintervallene (mai til september)

Periode	Konstantledd	Stigningstall	R^2	N_punkter
00–04	1.58	1.04	0.89	3672
04–08	1.83	0.93	0.85	3672
08–12	3.09	0.81	0.84	3632
12–16	3.65	0.85	0.90	3532
16–20	2.49	0.99	0.90	3652
20–24	1.19	1.11	0.89	3672

Parvis regresjonsanalyse

For å evaluere resultatene fra den parvise regresjonen, ble måneden juli valgt helt tilfeldig for å undersøke om resultatene skilte seg vesentlig fra den vanlige regresjonsmetoden som er vist tidligere (figur 18). Ettersom resultatene var nesten identiske og det ikke ble observert noen signifikant statistisk

forskjell, bekrefter dette at regresjonsmodellen basert på tre daglige perioder er pålitelig, og at parvis analyse ikke er nødvendig i praktisk bruk.



Figur 18. Resultater av parvis regresjonsanalyse for juli

For mer detaljerte og presise beregninger viser Tabell 8 alle regresjonskoeffisientene og de endelige ligningene som kobler sammen temperatur i midtdekk og overflatetemperatur, basert på måned og tidspunkt på døgnet, for perioden der de fleste fallodd-målinger vanligvis gjennomføres, altså fra mai til august.

Tabell 8. Regresjonskoeffisienter fra parvis regresjonsanalyse (mai–august)

Måned	Periode	N_par	Konstantledd	Stigningstall	R2	Formel
Mai	Natt	1488	0.52	1.07	0.90	$T_{midt} = 0.52 + 1.07 \times T_{overflate}$
Mai	Dag	1308	1.34	0.89	0.90	$T_{midt} = 1.34 + 0.89 \times T_{overflate}$
Mai	Kveld	1468	2.61	0.97	0.84	$T_{midt} = 2.61 + 0.97 \times T_{overflate}$
Juni	Natt	1440	3.08	0.94	0.85	$T_{midt} = 3.08 + 0.94 \times T_{overflate}$
Juni	Dag	1440	3.89	0.82	0.87	$T_{midt} = 3.89 + 0.82 \times T_{overflate}$
Juni	Kveld	1440	4.84	0.93	0.89	$T_{midt} = 4.84 + 0.93 \times T_{overflate}$
Juli	Natt	3.34	0.92	0.84	3.34	$T_{midt} = 3.34 + 0.92 \times T_{overflate}$
Juli	Dag	3.84	0.85	0.89	3.84	$T_{midt} = 3.84 + 0.85 \times T_{overflate}$
Juli	Kveld	3.52	1.01	0.90	3.52	$T_{midt} = 3.52 + 1.01 \times T_{overflate}$
August	Natt	1488	2.79	0.91	0.87	$T_{midt} = 2.79 + 0.91 \times T_{overflate}$
August	Dag	1488	2.14	0.88	0.83	$T_{midt} = 2.14 + 0.88 \times T_{overflate}$
August	Kveld	1488	3.27	0.96	0.87	$T_{midt} = 3.27 + 0.96 \times T_{overflate}$

5.3. Sammenligning av temperaturkorrigeringsfaktorer (TKF)

Som tidligere nevnt i metodekapitlet, er TKF en regresjonslinje som relaterer bæreevnen målt ved en gitt temperatur til den korrigerte bæreevnen ved referansetemperaturen. Med utgangspunkt i forholdet mellom $\frac{BC_{corrected}}{BC_{initial}}$ og vegbanetemperaturen (T), kan ligningen for TKF uttrykkes slik:

$$BC_{korrigert} = BC_{ini.} \times TKF \quad (12)$$

Sammenligningen av temperaturkorreksjonsfaktorer (TKF) ble gjennomført ved bruk av fire ulike tilnærminger. Som tidligere nevnt bør temperaturen som brukes i den norske formelen ideelt sett måles i midtdekket. I praksis har imidlertid overflatetemperatur ofte blitt brukt, grunnet mangel på tilgjengelige målinger i dybden.

Denne sammenligningen har som mål å oppnå følgende:

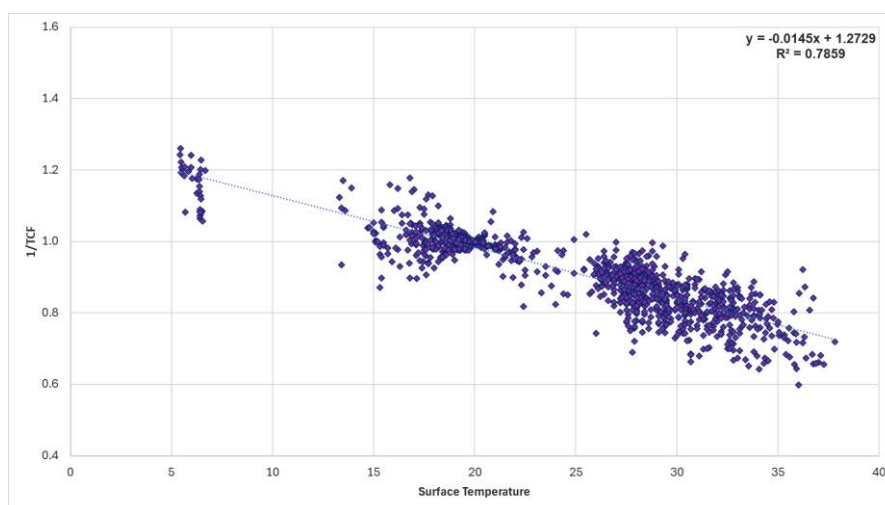
- Sammenligne faktorer beregnet basert på overflate- og midtdekket-temperaturer
- Sammenligne lineær regresjon og polynomiske masterkurver for korreksjon av d_0 og d_{20}
- Vurdere effekten av å bruke tre versus seks tidsintervaller per døgn på modellens nøyaktighet
- Evaluere hvor godt modellene samsvarer med den gjeldende norske formelen

Resultatene for de ovennevnte målene presenteres gjennom fire ulike tilnærminger for beregning av TKF. Til slutt, viser Tabell 9 alle regresjonskoeffisientene for alle fire scenariene.

5.3.1. Overflatetemperaturer og polynomiske masterkurver

I denne metoden ble det utviklet polynomiske masterkurver for hvert målepunkt ved å bruke tre forskjellige temperaturer for å korrigere både d_0 og d_{20} . De korrigerte bæreevneverdiene (BC) ble deretter sammenlignet med de målte verdiene, og forholdet mellom dem ble plottet mot temperaturen. I dette tilfellet ble overflatetemperatur benyttet i alle beregningene. Modellen ga en R^2 -verdi på 0,79, noe som indikerer en relativt god tilpasning. Basert på resultatene vist i figur 19 og ligning 7, kan sammenhengen mellom opprinnelig og korrigert bæreevne uttrykkes som følger:

$$BC_{korrigert} = \frac{BC_{ini.}}{1.273 - 0.0145 T} \quad (13)$$

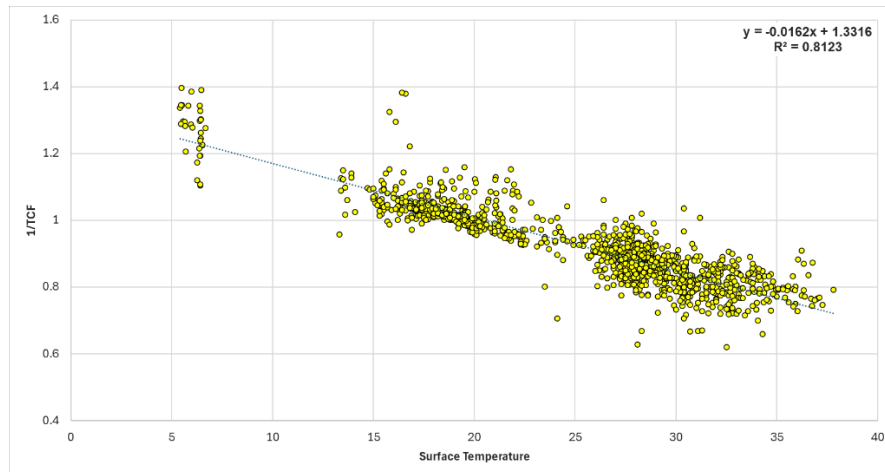


Figur 19. TCF (TKF) mot overflatetemperatur ved bruk av polynomisk regresjon

5.3.2. Overflatetemperaturer og lineær regresjon

Lineære regresjonslinjer ble estimert for hvert målepunkt for å korrigere d_0 og d_{20} , basert på overflatetemperatur. Resten av fremgangsmåten var den samme som i 5.4.1. Det ble observert en liten forbedring i R^2 -verdien (0,81). Regresjonskoeffisientene skilte seg imidlertid fortsatt noe fra de som brukes i dagens norske formel. Basert på resultatene vist i figur 20 og ligning 7, kan sammenhengen mellom opprinnelig og korrigert bæreevne uttrykkes som følger:

$$BC_{korrigert} = \frac{BC_{ini.}}{1.332 - 0.0162 T} \quad (14)$$

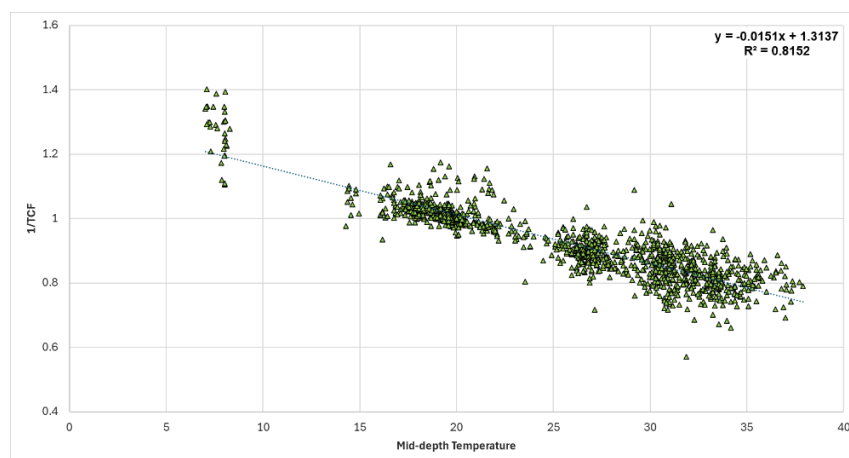


Figur 20. TKF mot overflatetemperatur ved bruk av lineær regresjon

5.3.3. Midtdekke-temperaturer (tre daglige perioder) og lineær regresjon

Ved å bruke modellene utviklet i '5.2.4.Sesongbasert og periodisk regresjonsanalyse', ble overflatetemperaturene først konvertert til midtdekke-temperaturer basert på tre standardperioder i løpet av døgnet. Deretter ble det beregnet lineære regresjonslinjer for hvert målepunkt for å korrigere d_0 og d_{20} , og de korrigerte verdiene for bæreevne (BC) ble utregnet. R^2 -verdiene viste ytterligere forbedring, og R^2 -verdiene var mer i samsvar med dagens norske formel. Basert på resultatene vist i figur 21 og ligning 7, kan sammenhengen mellom opprinnelig og korrigert bæreevne uttrykkes som følger:

$$BC_{corrected} = \frac{BC_{initial}}{1.314 - 0.0151 T} \quad (15)$$

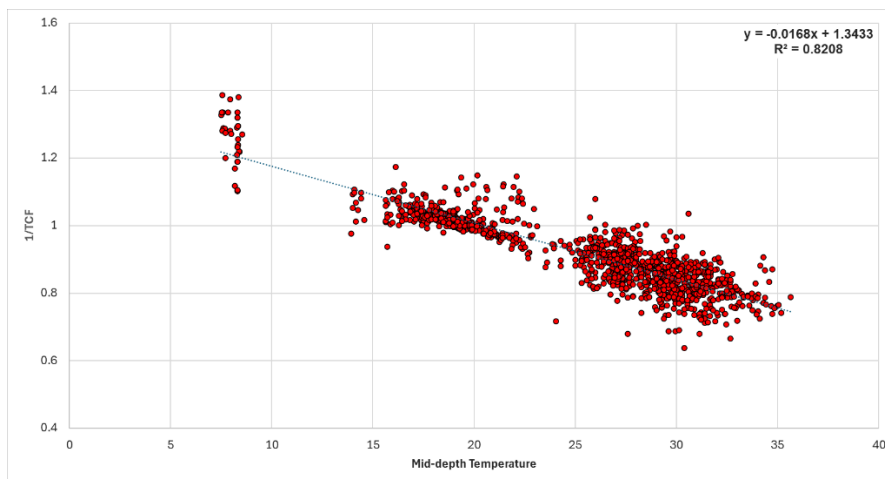


Figur 21. TKF mot temperatur i midtdekke basert på tre daglige perioder ved bruk av lineær regresjon

5.3.4. Midtdekke-temperaturer (seks daglige perioder) og lineær regresjon

Til slutt ble den samme fremgangsmåten anvendt, men med seks tidsintervaller i stedet for tre. Midtdekke-temperaturene ble beregnet på nytt basert på tidspunktet på døgnet, og nye korreksjoner for d_0 og d_{20} ble utført. Resultatene var svært like de som ble oppnådd i '5.3.3. Midtdekke-temperaturer (tre daglige perioder) og lineær regresjon', med kun en liten forbedring i R^2 -verdien (0,8208). Basert på resultatene vist i figur 22 og ligning 7, kan sammenhengen mellom opprinnelig og korrigert bæreevne uttrykkes som følger:

$$BC_{korrigert} = \frac{BC_{ini.}}{1.343 - 0.0168 T} \quad (16)$$



Figur 22. TKF mot temperatur i midtdekke basert på seks daglige perioder ved bruk av lineær regresjon

Tabell 9. Sammendrag av regresjonskoeffisienter for TCF-beregninger

Modell ($BC_{korrigert} = \frac{BC_{ini.}}{b - a \times T}$)	a	b	R^2
Norske formelen	-0.015	1.3	-
Overflatetemperaturer og polynomiske masterkurver	-0.0145	1.2729	0.79
Overflatetemperaturer og lineær regresjon	-0.0162	1.3316	0.81
Midtdekke-temperaturer (tre daglige perioder) og lineær regresjon	-0.0151	1.3137	0.82
Midtdekke-temperaturer (seks daglige perioder) og lineær regresjon	-0.0168	1.3433	0.82

Resultatene viser at temperaturkorreksjon basert på overflatetemperatur gir tilnærmet samme nøyaktighet som korreksjon basert på estimert midtdekketemperatur innenfor de undersøkte måleforholdene. Dette indikerer at overflatetemperatur kan benyttes operativt på nettverksnivå uten vesentlig tap av presisjon.

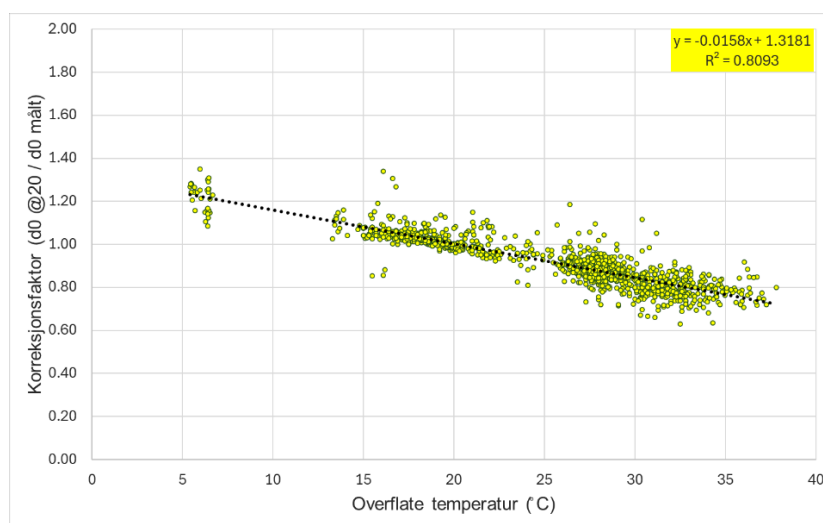
6. Temperaturkorrigering av nedbøyningsbassenget

I de foregående kapitlene ble estimering av asfaltens temperatur i midtdekket, basert på sensor montert i slitelaget, presentert og evaluert ved bruk av ulike modelleringsmetoder. På grunnlag av disse temperaturmodellene ble det etablert og sammenlignet fire scenarier for å undersøke hvordan (i) lineære versus polynomiske masterkurver og (ii) overflatetemperatur versus temperatur i midtdekket påvirker beregningen av temperaturkorreksjonsfaktoren i bæreevneformelen.

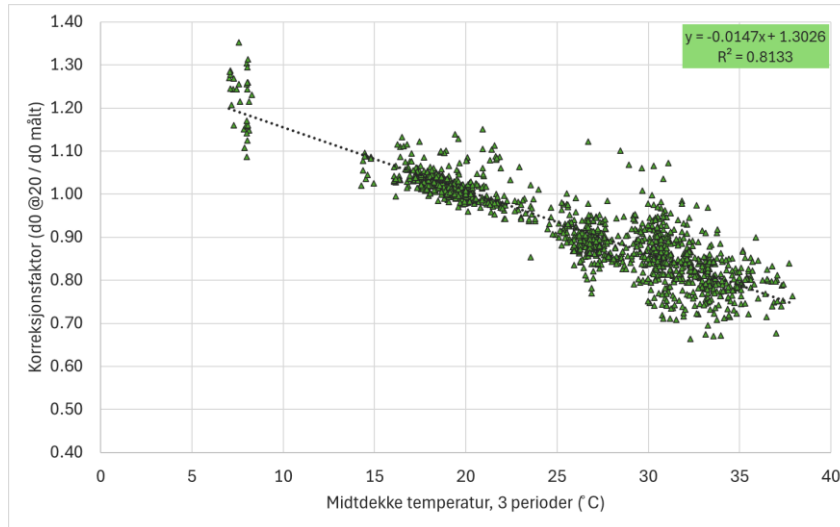
For praktisk bruk på nettverksnivå ble det observert at bruk av lineære masterkurver, som viste litt høyere nøyaktighet, i kombinasjon med overflatetemperatur gir en mer effektiv og operativ gjennomførbar løsning. Det ble ikke observert vesentlige forskjeller mellom korreksjonsfaktorer basert på overflatetemperatur og temperatur i midtdekket. Med hensyn til enkel implementering og tilgjengelighet av måledata ble derfor lineær masterkurve basert på overflatetemperatur vurdert som den mest hensiktsmessige løsningen for storskala bruk.

I internasjonal praksis korrigeres ofte alle nedbøyninger målt av geofonene for å justere hele nedbøyningsbassenget og dermed sikre et bedre sammenligningsgrunnlag mellom målinger utført under ulike temperaturforhold og i ulike sesonger (Chen et al., 2000, Kim et al., 1995). Innenfor Long-Term Pavement Performance (LTPP)-programmet har Federal Highway Administration (FHWA) publisert retningslinjer som beskriver hvordan asfaltens temperatur påvirker FWD-målinger, samt empiriske metoder (blant annet BELLS-modeller og regresjonsbaserte tilnærminger) for temperaturkorrigering av nedbøyninger og tilbake- beregnede stivhetsmoduler til en referansetemperatur. Det anbefales videre at FWD-målinger på asfaltdekker primært gjennomføres når dekke-temperaturen ligger mellom 10 °C og 30 °C for å begrense temperaturindusert variasjon og redusere behovet for omfattende korreksjoner (FHWA 2017). Tilsvarende anbefalinger finnes i SHRP/LTPP-dokumentasjon og i senere internasjonale studier, hvor det er vist at korrigering av hele nedbøyningsbassenget, og ikke bare d_0 eller d_{20} , gir et mer konsistent grunnlag for strukturell vurdering. Temperaturkorreksjon er derfor avgjørende for å unngå feiltolkning av vegens bæreevne og for å sikre pålitelige beslutninger på nettverksnivå.

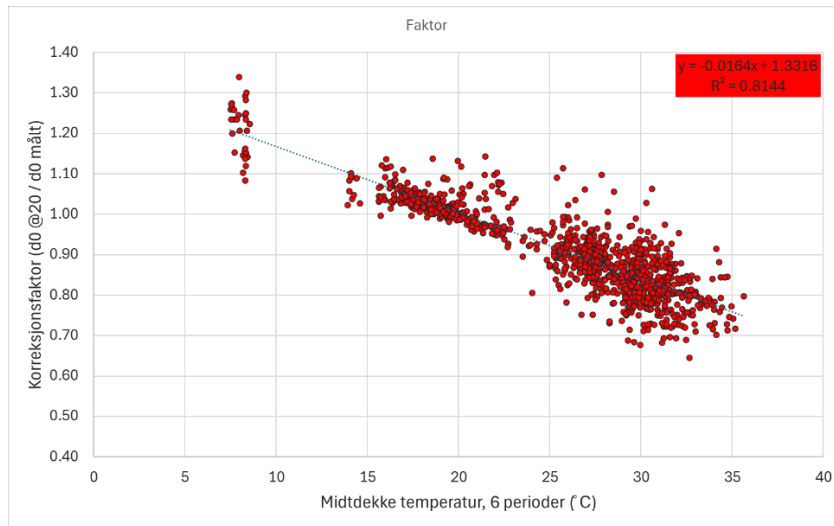
Med samme tilnærmingen som ble benyttet for korrigering av d_0 og d_{20} , ble det deretter etablert temperaturkorreksjonsfaktorer for samtlige målte nedbøyninger i bassenget. Dette ble gjennomført for tre utvalgte scenarier, og resulterte i at om lag 35,100 (1,300 punkter, 9 geofoner, 3 temperaturmodeller) regresjonslinjer og derfor 35,100 faktorer ble etablert og evaluert. Tilsvarende ble det utviklet egne korreksjonsfaktorer for nedbøyningene målt av hver enkelt geofon, slik at hele nedbøyningsbassenget ble korrigert på en konsistent og systematisk måte. Figur 23 et eksempel som viser temperaturkorreksjonsfaktorene for d_0 for tre ulike temperaturscenarier.



(a)



(b)



(c)

Figur 23. Temperaturkorreksjonsfaktorer for d_0 ved bruk av: a) overflate temperatur, b) midtdekke temperatur med tre, og c) med seks daglige perioder

Tilsvarende som ved utarbeidelsen av temperaturkorreksjonsfaktor for bæreevne basert på tre temperaturscenarioer, kan det heller ikke her observeres noen vesentlig forskjell mellom bruk av temperatur i midtdekke og overflatetemperatur. Det bør presiseres igjen at en av årsakene til dette kan være at sensordybden i asfalten er relativt liten, samt at det ble benyttet regresjonsmodeller med et begrenset antall parametere, sammenlignet med mer avanserte modeller som for eksempel BELLS3-modellen, som kan være mer aktuell ved bruk på nettverksnivå. Dette er også omtalt under kapitlet om begrensninger.

Ligning 17 viser regresjonsligningen som benyttes for temperaturkorreksjon av nedbøyningene. I ligningen 17, er $d_{i, \text{målt}}$ nedbøyningen i avstanden i fra lastens sentrum målt ved temperaturen T , mens a og b er regresjonskoeffisientene. Tabell 10 presenterer regresjonskoeffisientene som kan benyttes i temperaturkorreksjonsformelen for nedbøyningsbassenget.

$$d_{i, \text{korrigert}} = d_{i, \text{målt}} \times ((a_i \times T) + b_i) \quad (17)$$

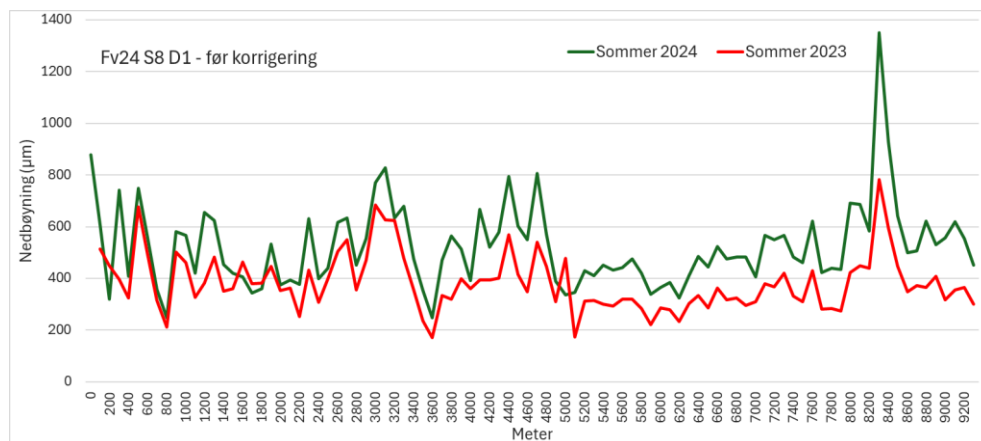
Tabell 10. Regresjonskoeffisientene for å benytte i temperaturkorreksjonsformelen

Temperatur	Koef.	d_0	d_{20}	d_{30}	d_{45}	d_{60}	d_{90}	d_{120}	d_{150}	d_{180}
Overflate temperatur	<i>a</i>	-0.0158	-0.0105	-0.008	-0.0061	-0.0044	-0.0019	-0.0009	-0.001	-0.0016
	<i>b</i>	1.3181	1.2109	1.1594	1.1192	1.0851	1.0355	1.0162	1.0161	1.0303
Midtdekke 3-perioder	<i>a</i>	-0.0147	-0.0095	-0.0072	-0.0054	-0.0038	-0.0015	-0.0006	-0.0009	-0.0014
	<i>b</i>	1.3026	1.1951	1.1472	1.1076	1.0757	1.0303	1.0118	1.0158	1.0312
Midtdekke 6-perioder	<i>a</i>	-0.0164	-0.0106	-0.0081	-0.006	-0.0042	-0.0016	-0.0006	-0.0008	-0.0015
	<i>b</i>	1.3316	1.2124	1.1601	1.1177	1.0818	1.0308	1.0103	1.014	1.032

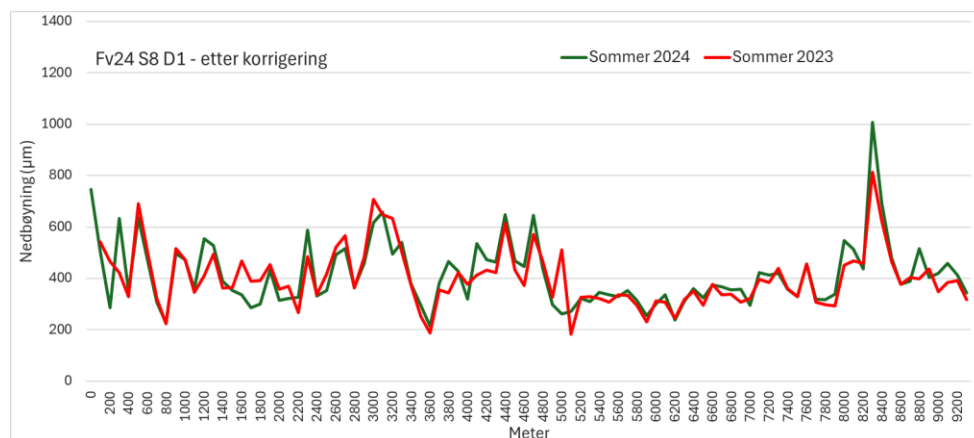
6.1. Modellvurdering og betraktninger

Som nevnt tidligere er modellen utviklet på bakgrunn av vegstrekningene oppgitt i Tabell 1. Disse strekningene besto hovedsakelig av europaveger i svært god tilstand, samt enkelte fylkesveger som enten var nybygde eller vurdert å være i god teknisk tilstand.

På grunn av begrenset datatilgang forelå det kun et begrenset antall fylkesveger på Østlandet hvor det var gjennomført fallodd-målinger ved to ulike temperaturer. Blant disse ble det valgt ut en strekning som ble vurdert å være i relativt god tilstand for å presentere i rapporten og teste modellens overførbarhet. På denne måten ble modellen, som var tilpasset på et sett av veger i god tilstand i Trøndelag, testet på en vegstrekning i en annen region (Østlandet). Fv24 ble valgt som teststrekning, og figur 24 viser d_0 før og etter temperaturkorreksjon.



(a)



(b)

Figur 24. Sammenligning av d_0 : (a) før, og (b) etter temperaturkorrigering

Modellen ble testet på flere andre vegstrekninger, og for samtlige strekninger ble gjennomsnittlig avvik mellom to predikerte verdier registrert til å være under 10 %. Resultatene indikerer dermed en tilfredsstillende presisjon innenfor det datagrunnlaget som er benyttet. For å kunne benytte modellen på en forsvarlig måte må følgende forutsetninger legges til grunn:

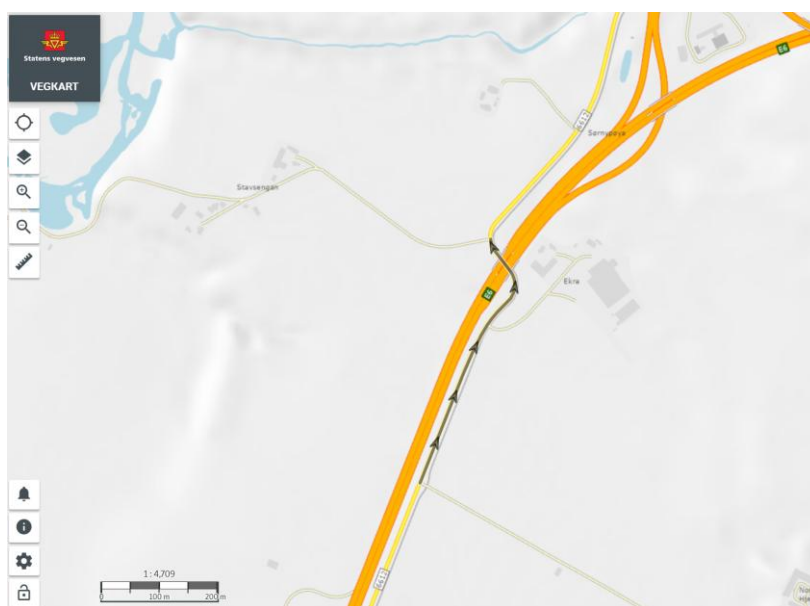
1. Overflatetemperatur skal benyttes i kombinasjon med tilhørende regresjonskoeffisienter angitt i Tabell 10, og disse settes inn i ligning 17.
2. Falloddsmålinger bør gjennomføres når overflatetemperaturen ligger mellom 10 °C og 30 °C.
3. Modellen er utviklet og validert for veger i god tilstand. Definisjonen av «god tilstand» er basert på SCI-verdier i henhold til Tabell 1.3.3.4-1 i Håndbok V230, hvor veger med SCI-verdi under 120 klassifiseres som gode. Modellen kan benyttes for veger i akseptabel tilstand, men da med forsiktighet og faglig vurdering.

Det er behov for flere falloddsmålinger for å kunne undersøke modellens gyldighet for andre vegtyper, spesielt fylkesveger som generelt sett har svakere strukturell tilstand enn riks- og europaveger. Dette inngår som en del av det videre arbeidet i hovedprosjektet.

6.2. Dekketykkelse i formelen

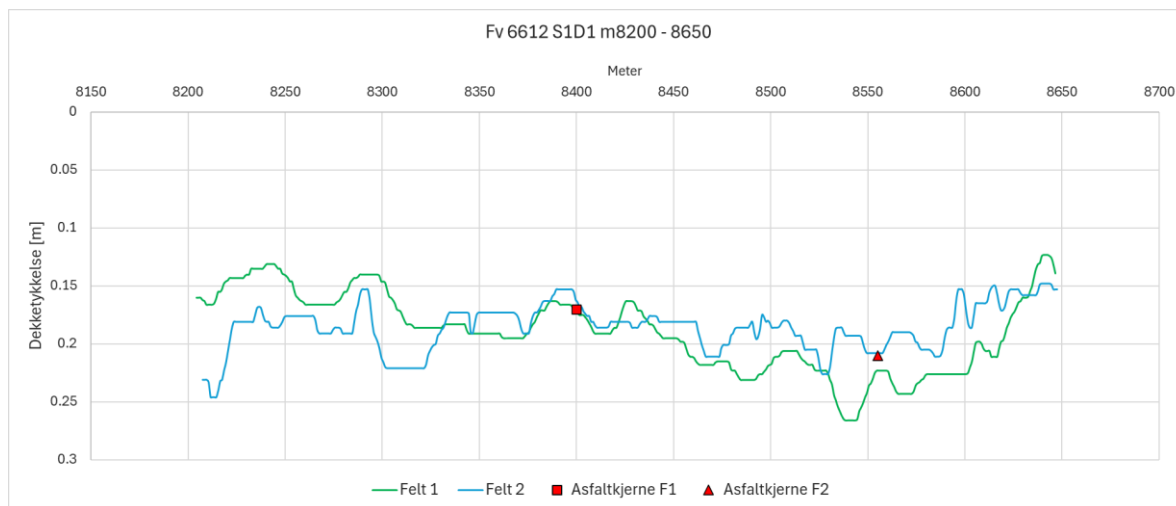
Ideelt sett bør en temperaturkorreksjonsformel for nedbøyningsbassenget inkludere også dekkets tykkelse. Årsaken er at asfalt tykkelse har direkte innvirkning på temperaturfordelingen gjennom konstruksjonen, samt på stivhetsresponsen og fordelingen av nedbøyninger i bassenget. Tykkere dekke vil generelt gi lavere temperaturgradient gjennom laget og redusert temperaturfølsomhet i nedbøyningsresponsen, mens tynnere dekker i større grad påvirkes av temperaturvariasjoner (Chen et al., 2000, Kim et al., 1995). For å oppnå en mer fysisk representativ og robust korreksjonsmodell ble det derfor vurdert å inkludere dekke-tykkelse som en forklaringsvariabel.

For dette formålet ble det gjennomført GPR-målinger (Ground Penetrating Radar) på de aktuelle strekningene for å estimere dekketykkelse. Resultatene fra GPR-undersøkelsene ble deretter kontrollert og verifisert ved hjelp av borekjerner tatt ut fra vegdekket. Figur 25 viser den siste teststrekningen (Fv6612 S1 D1 m7800–8100) hvor det ble gjennomført GPR-målinger i oktober 2025.

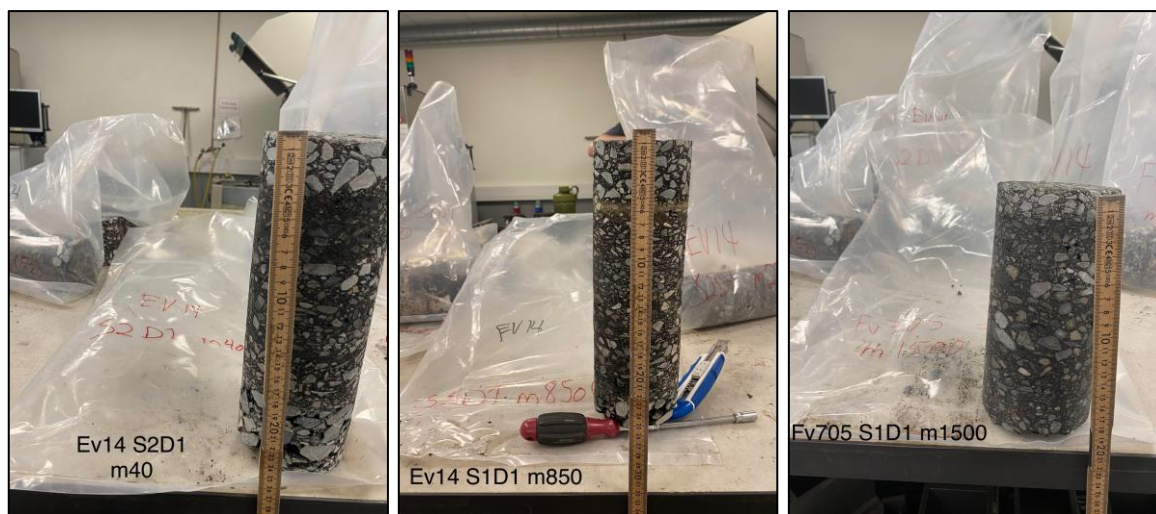


Figur 25. Strekingen Fv6612 S1 D1 m7800–8100

Resultatene fra GPR samt målte tykkelser fra borekjernene, benyttet til verifikasjon, er presentert i figur 26. Figuren viser svært godt samsvar mellom GPR-estimert tykkelse og faktisk målt tykkelse fra kjerneboringer, noe som indikerer høy pålitelighet i GPR-dataene. Figur 27 viser et eksempel på måling av asfalttykkelsen for å verifisere GPR-dataene.



Figur 26. GPR data med borekjerner tatt ut fra Fv6612 S1 D1 m7800–8100



Figur 27. Verifisering av GPR data ved å måle asfalttykkelsen fra borekjerner

For å inkludere asfalttykkelse i temperaturkorreksjonen ble det etablert og analysert to ulike modelltilnærminger. Den første tilnærmingen var en multivariat lineær regresjonsmodell, hvor både temperatur og asfalttykkelse ble benyttet som forklaringsvariabler. Denne modellen gir en relativt enkel og transparent sammenheng mellom nedbøyning, temperatur og tykkelse, og er godt egnet for praktisk implementering på nettverksnivå. Den lineære modellen kan uttrykkes som følger:

$$d_{i,korrigert} = a + b_1 T + b_2 d_{i,m\ddot{a}lt @ T} + b_3 H \quad (18)$$

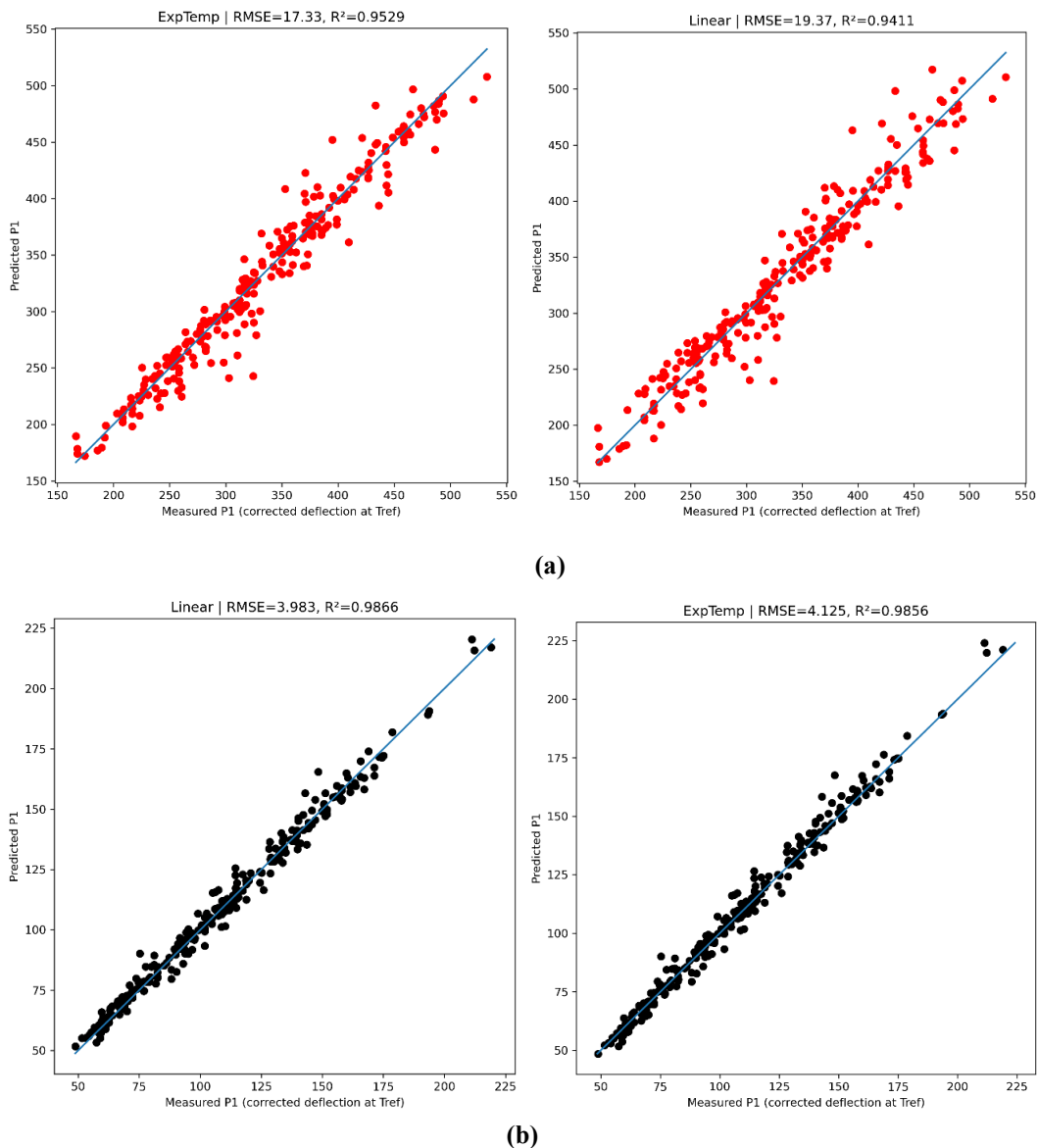
I denne ligningen er $d_{i,m\ddot{a}lt @ T}$ nedbøyningen målt ved temperaturen T (°C), H er dekketykkelsen (millimeter), og a , b_1 , b_2 , og b_3 er regresjonskoeffisientene.

Den andre tilnærmingen var en eksponentiell modell, hvor temperaturens innvirkning på nedbøyningen ble beskrevet gjennom en eksponentiell funksjon. Denne modellen er mer i tråd med den fysiske oppførselen til asfaltmaterialer, ettersom asfaltens stivhet og dermed nedbøyningsresponsen varierer ikke-lineært og tilnærmet eksponentielt med temperatur. Tykkelse ble også inkludert som en variabel i denne modellen for å undersøke om en mer fysisk representativ formulering kunne forbedre prediksjonsnøyaktigheten. Den eksponentielle modellen kan uttrykkes som følger:

$$d_{i,korrigert} = d_{i,m\ddot{a}lt @ T} \cdot e^{k(T-20)} \cdot H^c \quad (19)$$

I denne modellen har parameterne samme betydning som beskrevet ovenfor. c og k er regresjonskoeffisienten i modellen. Begge modellene ble utviklet og evaluert med hensyn til forklaringsgrad, pålitelighet og praktisk anvendbarhet. Figur 28 viser et eksempel på analyseresultater for d_0 og d_{90} , der målt temperaturkorrigert nedbøyning er plottet sammen med modellpredikert nedbøyning, samt tilhørende korrelasjonskoeffisient. Begge modellene ble anvendt for hver enkelt geofon for å vurdere hvilken modell som gir best tilpasning til dataene.

Fra d_0 til d_{60} viser den eksponentielle modellen noe bedre tilpasning til dataene. Fra d_{90} til d_{180} presterer derimot den lineære modellen bedre enn den eksponentielle modellen.



Figur 28. Implementering av begge modeller på (a). d_0 og (b) d_{90}

I henhold til figur 28 gir den eksponentielle modellen bedre tilpasning for d_0 -dataene er presentert i Tabell 11.

Tabell 11. Koeffisienter for de lineære og eksponentielle modellene som inkluderer dekketykkelse

	d_0	d_{20}	d_{30}	d_{45}	d_{60}	d_{90}	d_{120}	d_{150}	d_{180}
Lineær multivariant regresjon modell									
a	131.871	75.850	54.130	36.262	23.000	9.406	3.277	1.433	1.136
b_1	-5.242	-2.709	-1.788	-1.130	-0.690	-0.216	-0.096	-0.086	-0.081
b_2	0.875	0.907	0.925	0.928	0.934	0.951	0.968	0.966	0.966
b_3	0.444	0.050	-0.110	-0.055	0.005	-0.010	0.037	0.082	0.076
Ekspontensiell modell									
k	-0.017	-0.011	-0.008	-0.006	-0.005	-0.002	-0.001	-0.001	-0.002
c	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.001

Selv om begge modellene ble anvendt og evaluert for samtlige geofoner, og den ene modellen i enkelte tilfeller viste noe bedre tilpasning enn den andre, vurderes den lineære multivariate regresjonsmodellen som mest hensiktsmessig for bruk på nettverksnivå. Den lineære modellen gir en mer transparent sammenheng mellom variablene, enklere implementering i beregningsverktøy og mindre risiko for numerisk ustabilitet ved praktisk anvendelse. Selv om den eksponentielle modellen i enkelte tilfeller viste marginalt bedre tilpasning (for eksempel for d_0), var forskjellene i forklaringsgrad generelt små og ikke av en slik størrelse at de rettferdiggjør økt modellkompleksitet i operativ bruk.

Når det gjelder inkludering av dekketykkelse som forklaringsvariabel, viser regresjonskoeffisientene at tykkelsesleddet har relativt begrenset innvirkning innenfor det analyserte datagrunnlaget. I den lineære modellen (koeffisient b_3) varierer tykkelseskoeffisientene i hovedsak rundt null og har gjennomgående lavere absoluttverdi enn temperaturkoeffisienten (b_1) som forventet. Tilsvarende observeres i den eksponentielle modellen at parameterne knyttet til tykkelse ikke bidrar til markant forbedring av modellens ytelse.

En sannsynlig forklaring er at de inkluderte vegstrekingene hadde relativt begrenset variasjon i asfalt tykkelse (omtrent 18–29 cm). Når variasjonsbredden i en forklaringsvariabel er liten, reduseres den statistiske sensitiviteten til å identifisere dens effekt i en regresjonsanalyse. Med andre ord kan tykkelsens reelle betydning være vanskelig å påvise når datagrunnlaget ikke omfatter tilstrekkelig strukturell variasjon. Dette gjelder særlig for den eksponentielle modellen, hvor ikke-lineære sammenhenger krever større spredning i inputvariablene for å kunne estimeres sterkt. Den var grunnen at en simuleringsbasert modell ble utviklet som detaljene kan leses nedenfor.

6.3. Simuleringsbasert modell

Resultatene i de foregående delkapitlene er basert på temperaturkorleksjon utviklet fra gjentatte falloddsmålinger på et begrenset antall vegstrekinger. En alternativ tilnærming er å utvikle temperaturkorleksjonsfaktorer ved hjelp av numeriske simuleringer. Fordelen med en slik metode er at et svært stort antall vegkonstruksjoner kan analyseres systematisk, slik at effekten av temperatur, dekketykkelse og materialegenskaper kan undersøkes over et betydelig større parameterområde enn det som er praktisk mulig gjennom feltmålinger alene. En slik modell kan derfor gi et mer generelt grunnlag for temperaturkorleksjon av nedbøyningsbassenget.

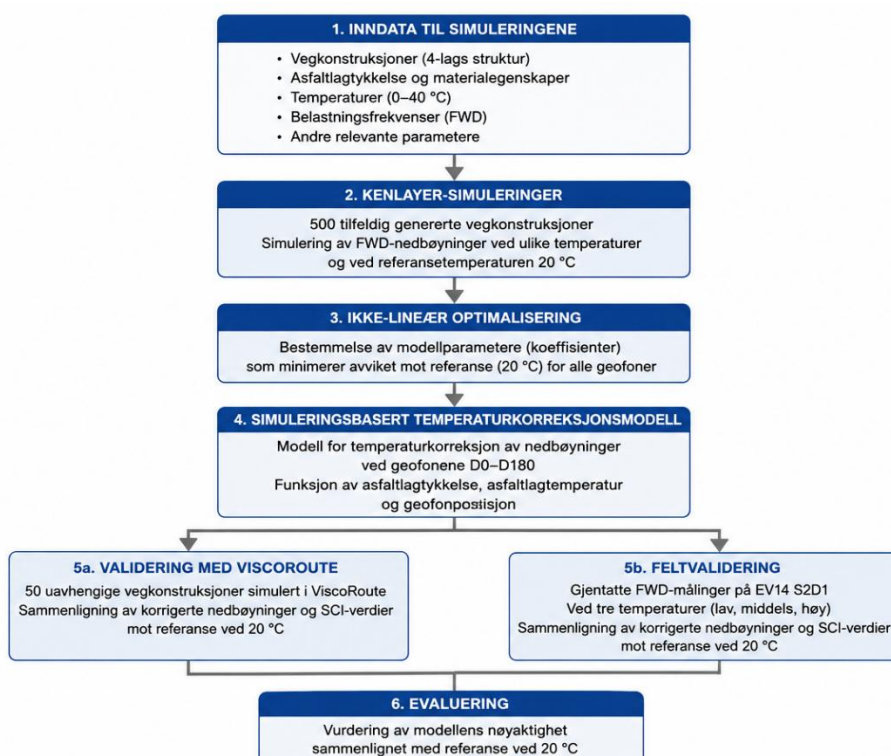
Parallelt med arbeidet som presenteres i denne rapporten utviklet forfatteren, sammen med samarbeidspartnere, en simuleringsbasert temperaturkorleksjonsmodell for falloddsmålinger. Modellen ble nylig publisert i et internasjonalt vitenskapelig tidsskrift og er basert på numerisk modellering og ikke-lineær optimalisering (Hamidi et al. 2026).

6.3.1. Metodikk

Utgangspunktet for arbeidet var å avgjøre hvilken parameter som burde temperaturkorrigeres. Tidligere modeller har enten korrigert tilbakeberegnete elastisitetsmoduler eller enkelte nedbøyninger (for eksempel d_0 og d_{20}). I studien ble det valgt å korrigere selve nedbøyningene ved alle geofonposisjoner. Dette gjør det mulig å beregne alle ønskede nedbøyningsparametere (SCI, BCI osv.) etter temperaturkorleksjon uten å utvikle egne modeller for hver parameter.

Deretter ble et stort antall vegkonstruksjoner simulert i KENLAYER, et mekanistisk analyseprogram for beregning av responsen i flerlags vegkonstruksjoner under belastning. Asfaltlaget ble modellert som et viskoelastisk material ved hjelp av Huet–Sayegh-modellen, hvor både temperatur og belastningsfrekvens påvirker asfaltens dynamiske stivhet. Firelags vegkonstruksjoner med varierende asfalttykkelse, ubundne lag og undergrunn ble etablert tilfeldig innenfor representative intervaller for nordiske veger. Totalt ble 500 ulike vegkonstruksjoner simulert ved temperaturer mellom 0 og 40 °C, samt på nytt ved referansetemperaturen 20 °C.

For å validere modellen ble ytterligere 50 uavhengige konstruksjoner simulert i ViscoRoute. ViscoRoute er et numerisk program for viskoelastisk analyse av vegkonstruksjoner. Til slutt ble modellen verifisert mot gjentatte falloddsmålinger fra strekningen EV14 S2D1, hvor målinger ved tre forskjellige temperaturer ble sammenlignet med referansen ved 20 °C. Dekketykkelsen ble definert ved hjelp av georadar (GPR), mens temperatur i asfalt ble estimert ved bruk av ERAPave PP. Arbeidsflyt for utvikling og validering av modellen er vises i figuren 29.



Figur 29. Prinsipiell arbeidsflyt for utvikling og validering av den simuleringsbaserte temperaturkorreksjonsmodellen

6.3.2. Modell

Basert på simuleringsresultatene ble en generell temperaturkorreksjonsmodell etablert for alle geofonene. Modellen uttrykker den temperaturkorrigerende nedbøyningen som en funksjon av:

1. asfalt (midtdekke) temperatur,
2. asfalt tykkelse,
3. geofonposisjon,
4. fire regresjonskoeffisienter bestemt ved ikke-lineær optimalisering.

Og kan presenteres som følgende:

$$d_{i,korr.} = d_i \times \frac{10^{C_1+C_2 \times \log(h_{AC})}}{10^{C_3 \times T_{PAV} + C_4 \times T_{PAV} \times \log(h_{AC})}} \quad (20)$$

Der d_i er ukorrigerende nedbøyningen (μm), $d_{i,korr.}$ er temperaturkorrigerende nedbøyningen (μm) ved referansetemperaturen 20°C for geofon i , h_{AC} er asfalt tykkelse (cm), T_{PAV} er temperaturen i midtdekket ($^\circ\text{C}$), og C_1 , C_2 , C_3 og C_4 er modellkoeffisienter.

Ved utviklingen av temperaturkorreksjonsmodellen ble det lagt vekt på å velge en modellstruktur som både kunne beskrive temperaturens påvirkning på nedbøyningene og samtidig være tilstrekkelig enkel til å kunne kalibreres mot et stort antall simulerte vegkonstruksjoner. Valgte modellen er basert på en tidligere modell utviklet av Nasimifar et al. (2020) for temperaturkorreksjon av SCI fra TSD-målinger, men ble videreutviklet i denne studien til å gjelde temperaturkorreksjon av falloddsnedbøyninger ved alle geofoner. Både overflatetemperatur og temperaturen i asfaltens midtdekke ble modellert. Modellstrukturen ble valgt fordi den inkluderer både asfalt temperatur og tykkelse, samtidig som den inneholder et begrenset antall modellparametere som kan bestemmes ved ikke-lineær optimalisering. Dette gir en pålitelig modell med god generaliseringsevne for et bredt spekter av vegkonstruksjoner.

I motsetning til de lineære modellene presentert tidligere i denne rapporten inneholder denne modellen eksplisitt asfalt tykkelse og gjør det derfor mulig å beskrive hvordan temperaturfølsomheten endres når konstruksjonen blir tykkere. Separate koeffisientsett ble utviklet for alle geofoner fra d_0 til d_{180} .

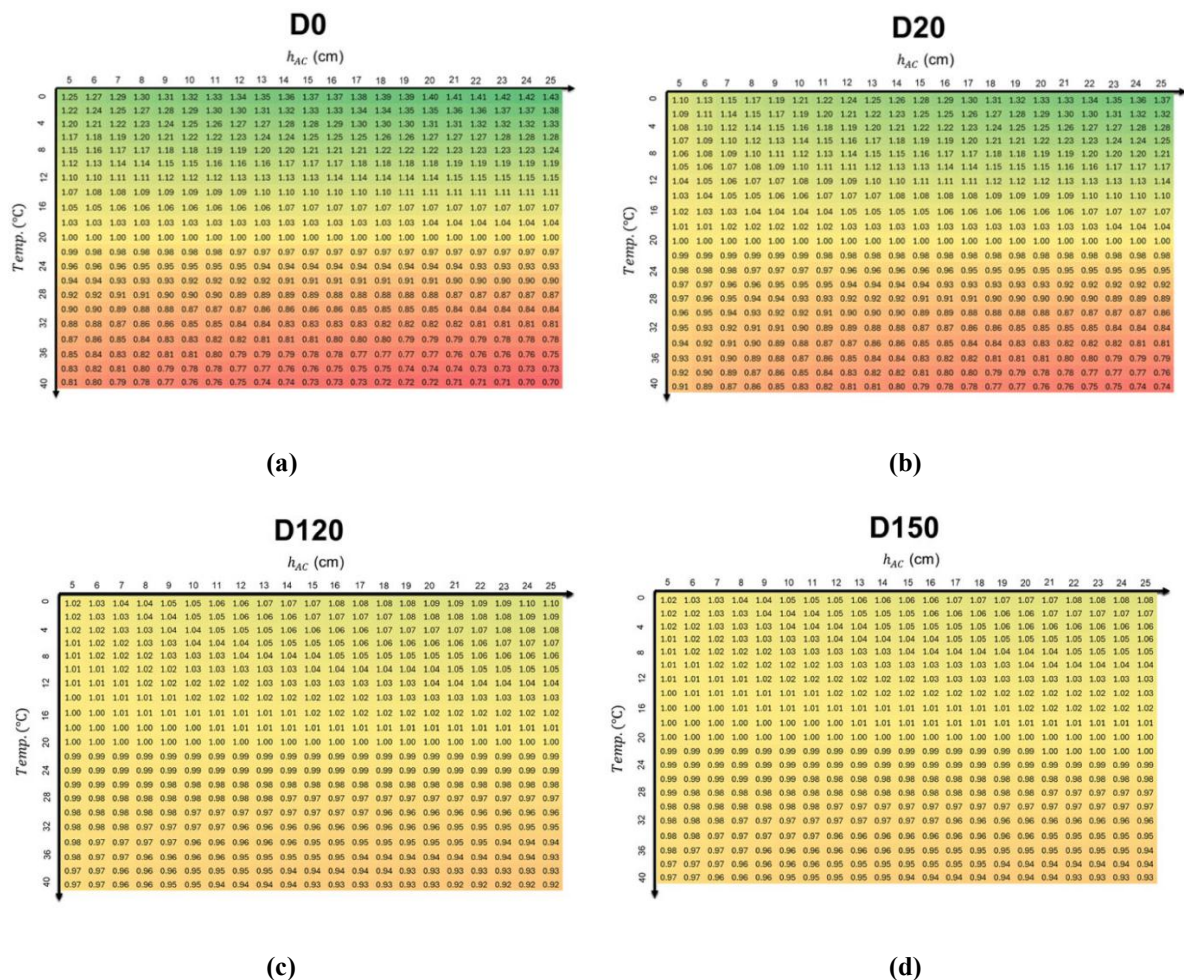
6.3.3. Resultater

Den ikke-lineære optimaliseringen resulterte i et sett modellparametere for hver geofon (d_0 – d_{180}). De estimerte koeffisientene er presentert i Tabell 12. Parameterne beskriver hvordan temperaturkorreksjonsfaktoren varierer som funksjon av asfalt temperatur og tykkelse, og danner grunnlaget for beregning av temperaturkorrigerende nedbøyninger ved referansetemperaturen på 20°C .

Tabell 12. Modell koeffisienter

Geofon	C1	C2	C3	C4
d_0	-0.0406	0.0811	-0.0025	0.0043
d_{20}	-0.1869	0.1344	-0.0092	0.0066
d_{30}	-0.1921	0.1263	-0.0091	0.0060
d_{45}	-0.1733	0.1098	-0.0079	0.0051
d_{60}	-0.1416	0.0892	-0.0065	0.0042
d_{90}	-0.0938	0.0607	-0.0041	0.0027
d_{120}	-0.0672	0.0450	-0.0029	0.0020
d_{150}	-0.0501	0.0348	-0.0021	0.0015
d_{180}	-0.0378	0.0276	-0.0015	0.0012

Simuleringene viste at temperaturens innvirkning på nedbøyningene varierer både med geofonposisjon og asfalt tykkelse. Som vist i figur 30 er temperaturfølsomheten størst ved de innerste geofonene (d_0-d_{20}), hvor størstedelen av deformasjonen skjer i asfalten. Lenger ut i nedbøyningsbassenget avtar temperaturens betydning gradvis, og ved $d_{120}-d_{150}$ er korreksjonsfaktorene nærmere 1,0 over hele temperaturområdet. Dette stemmer godt overens med den fysiske forståelsen av at de innerste geofonene i hovedsak påvirkes av asfallets viskoelastiske egenskaper, mens de ytterste geofonene i større grad reflekterer responsen fra de ubundne lagene og undergrunnen.



Figur 30. Temperaturkorreksjonsfaktorer for de ulike geofonene som funksjon av asfalt tykkelse og temperatur, (a) d_0 , (b) d_{20} , (c) d_{120} (d) d_{150}

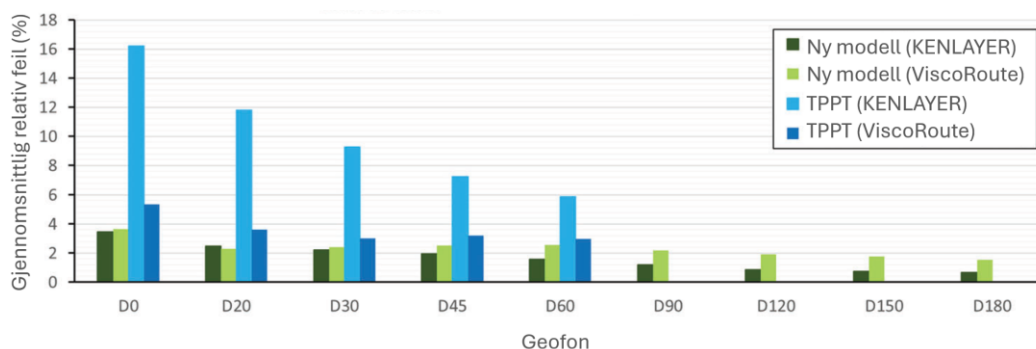
Et annet tydelig resultat er at temperaturens betydning øker med økende asfalttykkelse. For tykke asfaltdekker blir temperaturkorreksjonsfaktorene betydelig større ved lave temperaturer og tilsvarende mindre ved høye temperaturer. Dette viser at temperaturkorreksjonen ikke bare er avhengig av temperaturen i midtdekket, men også av hvor stor del av den totale konstruksjonen som består av asfalt. Videre viser simuleringene at temperaturpåvirkningen strekker seg lenger utover i nedbøyningsbassenget når asfalten blir tykkere, noe som understreker betydningen av å inkludere dekketykkelse i temperaturkorreksjonsmodellen.

Modellen ble opprinnelig kalibrert ved bruk av temperatur i midtdekket. Etterfølgende analyser viste at en tilsvarende kalibrering basert på overflatetemperatur ga tilnærmet identiske resultater, uten

statistisk signifikante forskjeller. Av praktiske hensyn kan modellen derfor benyttes med overflatetemperatur.

6.3.4. Validering mot numeriske simuleringer

Modellens ytelse ble deretter evaluert ved å sammenligne temperaturkorrigerte nedbøyninger med referansenedbøyninger beregnet ved numeriske simuleringer i KENLAYER og ViscoRoute. Resultatene er vist i figur 31, hvor den simuleringsbaserte modellen sammenlignes med den finske TPPT-modellen som benyttes for temperaturkorreksjon av nedbøyningsbassenget. En mer detaljert beskrivelse av valideringen finnes i selve artikkelen (Hamidi et al. 2026).

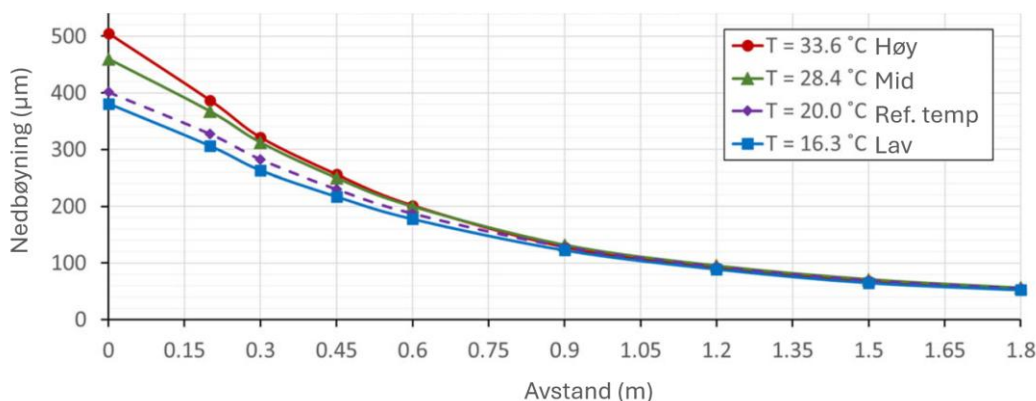


Figur 31. Gjennomsnittlig relativ feil¹ mellom temperaturkorrigerte og simulerte referansenedbøyninger ved bruk av TPPT-modellen og den simuleringsbaserte modellen.

Den simuleringsbaserte modellen ga gjennomgående lavere gjennomsnittlig relativ feil enn TPPT-modellen ved alle geofonposisjoner. Den største forbedringen ble oppnådd ved de innerste geofonene, hvor temperatures innvirkning på nedbøyningene er størst. Resultatene viser at modellen gir en mer nøyaktig temperaturkorreksjon over et bredt spekter av vegkonstruksjoner enn den eksisterende TPPT-modellen.

6.3.5. Feltvalidering

For å verifisere modellen under reelle feltforhold ble den validert mot gjentatte falloddsmålinger utført på forsøksstrekningen EV14 S2D1 ved ulike temperaturer. Nedbøyningsbassenget ved 20 °C ble etablert, og de temperaturkorrigerte nedbøyningene ble deretter sammenlignet med denne referansen.



Figur 32. Validering av den simuleringsbaserte modellen mot gjentatte falloddsmålinger på EV14

¹ Average Relative Error

Feltvalideringen viste at modellen ga bedre samsvar med referansebassenget enn TPPT-modellen, særlig for de innerste geofonene og tilhørende SCI-verdier. Resultatene bekrefter at modellen ikke bare gir høy nøyaktighet i numeriske simuleringer, men også kan benyttes til temperaturkorleksjon av falloddsmålinger under reelle feltforhold.

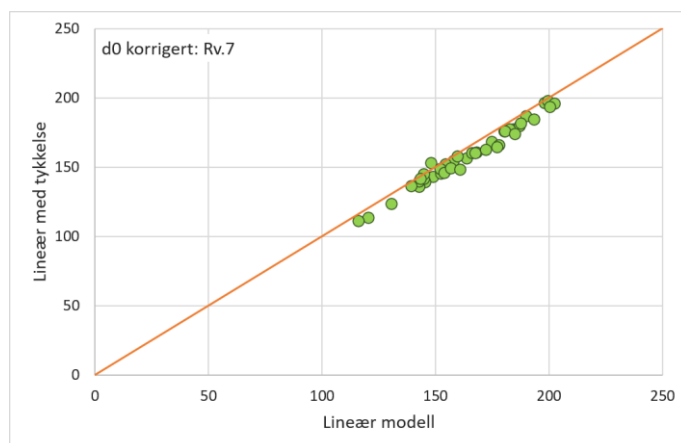
Samlet viser både simuleringene og feltvalideringen at simuleringsbaserte modellen gir en nøyaktig temperaturkorleksjon av hele nedbøyningsbassenget. Modellen presterte gjennomgående bedre enn TPPT-metoden både i numeriske simuleringer og ved gjentatte falloddsmålinger på EV14 S2D1. Resultatene bekrefter samtidig observasjonene fra kapittel 6.2 om at asfalt tykkelse har en vesentlig påvirkning på temperaturkorleksjonen og derfor bør inkluderes når denne informasjonen er tilgjengelig.

6.3.6. Sammenligning mellom temperaturkorleksjonsmodellene

For å sammenligne de ulike temperaturkorleksjonsmodellene ble ett representativt eksempel valgt fra Rv.7 S1 D1 m1700–2700, som ble målt med fallodd i juni 2026. Strekningen ble valgt fordi asfalt tykkelse var kjent, slik at alle de aktuelle temperaturkorleksjonsmodellene kunne sammenlignes. Formålet med sammenligningen er ikke å validere modellene på nytt, men å undersøke hvor godt de ulike modellene stemmer overens og hvilke praktiske konsekvenser modellvalget har.

a. Lineære modellen og modellen med dekketykkelse

Figur 33 viser sammenhengen mellom lineære temperaturkorleksjonsmodellen og lineære modellen med inkludert dekketykkelse. Resultatene viser svært god overensstemmelse mellom modellene, og de fleste punktene ligger tett rundt 1:1-linjen. Dette indikerer at de to modellene i praksis gir svært like temperaturkorlekserte nedbøyninger for denne strekningen.

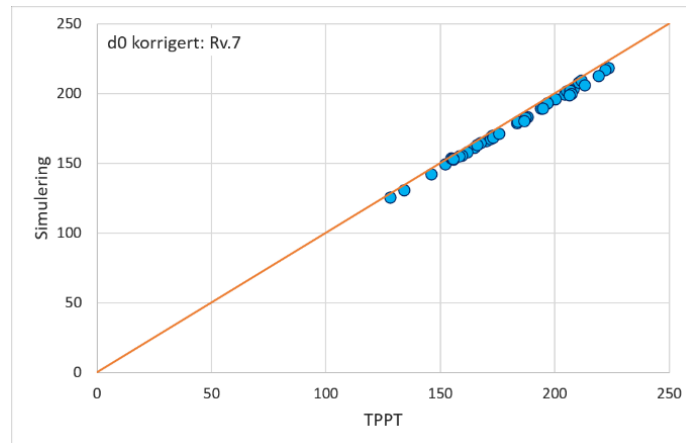


Figur 33. Visuell sammenligning av lineære modellen og modellen med dekketykkelse

Den gode overensstemmelsen skyldes sannsynligvis at variasjonen i asfalt tykkelse i datasettet som ble brukt til å utvikle modellen med dekketykkelse var relativt begrenset. Når tykkelsesvariasjonen er liten, vil tykkelsesleddet få begrenset innflytelse på den beregnede temperaturkorleksjonen, og modellen blir derfor svært lik den lineære modellen.

b. Sammenligning med simuleringsbaserte modellen

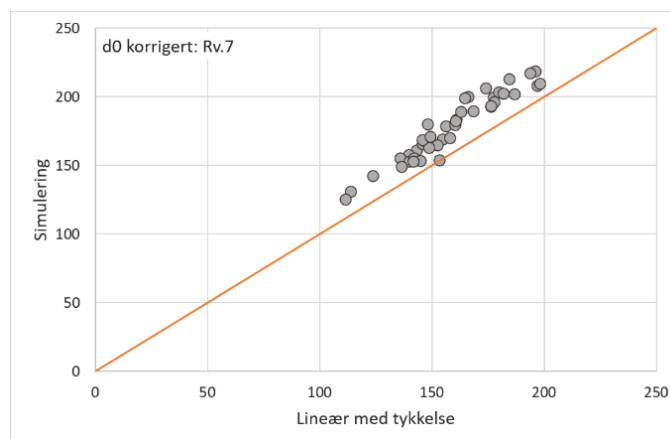
Figur 34 og figur 35 viser sammenligningen mellom simuleringsbaserte modellen og henholdsvis den finske TPPT-modellen og lineære modellen med dekketykkelse.



Figur 34. Visuell sammenligning av simuleringsbaserte modellen og TPPT modellen

Som forventet viser sammenligningen mellom TPPT og simuleringsbaserte modellen svært god overensstemmelse. Som ble presentert i figur 31 og mer detaljer som kan finnes i tilhørende artikkelen, hvor en mer detaljert beskrivelse av analysene og valideringen er gitt, viser den simuleringsbaserte modellen lavere gjennomsnittlig relativ feil enn TPPT-modellen. Den gode korrelasjonen viser derfor at simuleringsbaserte modellen i stor grad er kompatibel med TPPT, samtidig som den gir en mer nøyaktig temperaturkorreksjon. Dette tyder på at brukere som er kjent med TPPT-modellen, kan ta i bruk den simuleringsbaserte modellen uten at tolkningen av de temperaturkorrigerte nedbøyningene endres vesentlig.

Sammenligningen mellom simuleringsbaserte modellen og lineære modellen med dekketykkelse viser større systematiske avvik. Den lineære modellen med dekketykkelse gir generelt høyere temperaturkorrigerte nedbøyninger enn den simuleringsbaserte modellen, og avviket øker noe med økende nedbøyning. Dette viser at de to modellene ikke er direkte utbyttbare, selv om begge inkluderer asfalttykkelse.



Figur 35. Visuell sammenligning av simuleringsbaserte modellen og lineære modellen med tykkelse

Samlet viser sammenligningen at simuleringsbaserte modellen gir de mest nøyaktige resultatene når asfalt tykkelse er kjent. Modellen ga lavest gjennomsnittlig relativ feil både mot numeriske simuleringer og ved feltvalidering.

Dersom informasjon om asfalt tykkelse ikke er tilgjengelig, viser resultatene i denne rapporten at den enkle lineære modellen gir temperaturkorrigerte nedbøyninger som ligger svært nær modellen med

dekketykkelse. Lineære modellen representerer derfor et godt praktisk alternativ ved nettverksmålinger og andre situasjoner hvor dekketykkelse ikke er kjent.

Resultatene viser dermed at **simuleringsbaserte modellen er det beste alternativet når asfalt tykkelse er kjent, mens enkle lineære modellen gir en hensiktsmessig løsning når slik informasjon ikke foreligger.**

7. Begrensninger

Som enhver vitenskapelig studie har også dette arbeidet sine begrensninger. Noen av de viktigste er listet opp nedenfor:

1. Begrensede inputparametere

Temperaturen i midtdekket og temperaturkorreksjonen av nedbøyningsbassenget påvirkes av flere faktorer utover overflatetemperatur og tidspunkt på døgnet eller året. Dette inkluderer klimatiske forhold som vindhastighet, solstråling og lufttemperatur, samt konstruksjonsmessige egenskaper av vegen, som dekketykkelse, termisk ledningsevne og asfaltstivhet. Siden denne studien hovedsakelig baserer seg på overflatetemperatur og tidsbaserte variabler, er ikke alle påvirkningsfaktorer inkludert, noe som kan begrense modellens overførbarhet.

2. Bruk av kun en temperatursensor

Analysen er basert på data fra en temperatursensor installert på ett sted og i en dybde. Selv om dette ga et høyoppløselig datasett over ett år, er det ikke tilstrekkelig for å beskrive temperaturutviklingen i asfalt under ulike klimatiske og strukturelle forhold. Flere sensorer, installert i ulike dybder og på forskjellige vegtyper, vil kunne styrke validiteten og muliggjøre bedre regional kalibrering av modellene. I tillegg, kunne ikke sensoren registrere temperaturer over 40 °C, slik at de varmeste periodene ikke inngår i analysene.

3. Begrenset variasjon i veistruktur og dekketykkelse

Vegstrekingene som inngår i analysen består hovedsakelig av europaveger i god tilstand samt fylkesveger som er nybygde eller i relativt god strukturell tilstand. I tillegg var variasjonen i dekketykkelse begrenset. Dette reduserer muligheten til å analysere effekten av strukturelle forskjeller fullt ut, og var en viktig motivasjon for utviklingen av den simuleringsbaserte modellen, som dekker et betydelig bredere spekter av asfalttykkelser og vegkonstruksjoner

4. Følsomhet for raske værendringer

På varme dager, spesielt når overflatetemperaturen nærmer seg eller overstiger 30 °C, ble sammenhengen mellom overflate- og midtdekke-temperatur tidvis påvirket av raske værendringer som skydekke eller nedbør. Slike forhold kan endre varmemflyten i veikonstruksjonen og redusere nøyaktigheten i modeller basert kun på overflatetemperatur. Dette understreker behovet for mer omfattende meteorologiske data i fremtidige analyser.

5. Begrensninger ved simuleringsbaserte modellen

Den simuleringsbaserte modellen bygger på numeriske analyser av idealiserte vegkonstruksjoner. Selv om modellen er validert mot feltmålinger, vil numeriske simuleringer alltid innebære forenklinger av materialegenskaper, lagoppbygning og randbetingelser. Ytterligere feltvalidering på ulike vegtyper vil derfor være viktig.

8. Konklusjon

Denne studien har utviklet og evaluert et helhetlig rammeverk for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger, med hovedvekt på temperaturkorleksjon av hele nedbøyningsbassenget. Arbeidet bygger på falloddsmålinger fra åtte vegstrekninger ved ulike temperaturnivåer, kontinuerlige temperaturmålinger fra Malvik trafikkstasjon gjennom ett år, GPR-målinger av asfalttykkelse samt numeriske simuleringer av et bredt spekter av vegkonstruksjoner. Resultatene gir et forbedret grunnlag for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger på nettverksnivå.

Som en del av arbeidet ble flere regresjonsbaserte modeller utviklet for å beskrive sammenhengen mellom overflatetemperatur og temperatur i midtdekket. Analysene viste en tydelig termisk forsinkelse mellom overflate og midtdekke, samtidig som både forsinkede regresjonsmodeller, harmoniske modeller og multivariate regresjonsmodeller ga høy forklaringsgrad. Resultatene viser at temperaturen i midtdekket kan estimeres med tilfredsstillende nøyaktighet ved hjelp av relativt enkle modeller. Samtidig viste analysene at forskjellen mellom temperaturkorleksjon basert på overflatetemperatur og temperatur i midtdekket er begrenset under de undersøkte måleforholdene. Overflatetemperatur vurderes derfor som et tilstrekkelig og praktisk temperaturgrunnlag for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger på nettverksnivå.

Et sentralt bidrag i denne studien er utvidelsen av temperaturkorleksjonen fra de to nedbøyingene som inngår i den norske bæreevneformelen til hele nedbøyningsbassenget. Temperaturkorleksjonsmodeller ble utviklet for alle geofonposisjoner, slik at samtlige nedbøyinger kan korrigeres til en felles referansetemperatur før videre beregning av bæreevne, SCI, BCI eller andre nedbøyningsbaserte parametere. Dette gir en mer konsistent og generell metode for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger enn dagens praksis.

Effekten av asfalttykkelse ble først undersøkt ved hjelp av felldata, hvor tykkelsen ble definert med GPR og verifisert med borekjerne. Selv om både lineære og ikke-lineære modeller viste tilfredsstillende resultater, var variasjonen i asfalttykkelse i datagrunnlaget relativt begrenset (omtrent 18–29 cm). Dette gjorde det vanskelig å identifisere tykkelseeffekten fullt ut og begrenset modellens bruksområde.

For å overvinne denne begrensningen ble det utviklet en simuleringsbasert temperaturkorleksjonsmodell basert på numeriske analyser av 500 vegkonstruksjoner med varierende asfalttykkelser og temperaturforhold. Modellen ble kalibrert ved hjelp av ikke-lineær optimalisering og validert mot både uavhengige numeriske simuleringer og gjentatte falloddsmålinger på en norsk vegstrekning. I tillegg ble modellen sammenlignet med den finske TPPT-modellen for temperaturkorleksjon av nedbøyningsbassenget, hvor den simuleringsbaserte modellen oppnådde lavere gjennomsnittlig relativ feil. Resultatene viser at modellen gir en pålitelig og presis temperaturkorleksjon når asfalttykkelsen er kjent.

På bakgrunn av resultatene anbefales den enkle lineære regresjonsmodellen for temperaturkorleksjon av nedbøyningsbassenget når informasjon om asfalttykkelse ikke er tilgjengelig. Når asfalttykkelsen er kjent, anbefales den simuleringsbaserte modellen, siden den inkluderer samspillet mellom temperatur og asfalttykkelse og er utviklet og validert for et betydelig bredere spekter av vegkonstruksjoner enn det som er representert i feltmålingene. Samlet gir disse to modellene et praktisk og konsistent grunnlag for temperaturkorleksjon av falloddsmålinger på nettverksnivå.

Det bør samtidig understrekes at feltmålingene i denne studien hovedsakelig ble gjennomført på europaveger og fylkesveger med relativt god strukturell tilstand. Selv om den simuleringsbaserte modellen er utviklet for et langt bredere spekter av vegkonstruksjoner, vil ytterligere feltvalidering på vegger med større variasjon i oppbygning, asfalttykkelse og bæreevne bidra til å styrke modellens brukbarhet ytterligere. Videre anbefales det å etablere temperaturmålestasjoner på flere vegstrekninger og ved flere dybder i asfaltlaget for å forbedre forståelsen av temperaturutviklingen under ulike klimatiske og konstruksjonsmessige forhold.

9. Anbefalinger

Basert på resultatene anbefales følgende:

- Temperaturkorreksjon av nedbøyningsbassenget på nettverksnivå bør baseres på lineære regresjonsmodeller når dekketykkelse ikke er tilgjengelig (formel nr.17), og simuleringsbaserte modellen når dekketykkelse er kjent (formel nr.20), da disse gir tilstrekkelig nøyaktighet og er godt egnet for praktisk bruk.
- Overflatetemperatur kan benyttes i operativ bruk når midtdekk-temperatur ikke er tilgjengelig, da forskjellene i korrigerte resultater er små innenfor anbefalt temperaturområde.
- Temperaturkorreksjon av hele nedbøyningsbassenget anbefales for å sikre en konsistent strukturell vurdering (formel nr.17 uten dekketykkelse og formel nr.20 med dekketykkelse).
- Videre arbeid bør inkludere flere fallodd-målinger på veger med større variasjon i konstruksjon, tilstand og dekketykkelse, spesielt mindre veger og veger i svakere strukturell tilstand.
- GPR-målinger og kjerneboringer bør gjennomføres systematisk for å dokumentere konstruksjonsoppbygning og undersøke effekten av tykkelse og andre strukturelle forhold.

10. Referanser

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.

Baltzer, S., & Jansen, J. M. (1994). *Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements*. In 4th International Conference, Bearing Capacity of Roads and Airfields FHWA, University of Minnesota, Army Corps of Engineers, NRC Canada, FAA (Vol. 1).

Chen, D. H., Bilyeu, J., Lin, H. H., & Murphy, M. (2000). Temperature correction on falling weight deflectometer measurements. *Transportation research record*, 1716(1), 30-39.

Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., Fdez-Vidal, X. R., & Besteiro, R. (2025). Wavelet analysis and sinusoidal modelling of environmental variables in a weaned piglet farm. *Building and Environment*, 113049.

Fernando, E. G., Liu, W., & Ryu, D. (2001). *Development of a procedure for temperature correction of backcalculated AC modulus* (No. FHWA/TX-02/1863-1.). Bryan, TX, USA: Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.

FHWA. (2017). Using Falling Weight Deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis, Volume III: Guidelines for deflection testing, analysis, and interpretation (Report No. FHWA-HRT-16-011). Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Retrieved from: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16011/002.cfm>

Hamidi, A., Saarenketo, T., Majjala, P., & Foroutan Mirhosseini, A. (2026). Introducing a simulation-based model for temperature correction of falling weight deflectometer measurements. *Road Materials and Pavement Design*, 1-30.

Kim, Y. R., Hibbs, B. O., & Lee, Y. C. (1995). *Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli*. *Transportation Research Record*, (1473).

- Kim, Y. R., Hibbs, B. O., & Lee, Y. C. (1994). *New temperature correction procedure for FWD deflectionsof flexible pavements*. In 4th International Conference, Bearing Capacity of Roads and AirfieldsFHWA, U of Minnesota, Army Corps of Engineers, NRC Canada, FAA (Vol. 1).
- Li, Y., Liu, L., & Sun, L. (2018). Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer. *Construction and Building Materials*, 160, 802-809.
- Mun Park, H., Kim, Y. R., & Park, S. (2002). *Temperature correction of multiload-level falling weight deflectometer deflections*. *Transportation Research Record*, 1806(1), 3-8.
- 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.
- Phillips, W. F. (1984). Harmonic analysis of climatic data. *Solar Energy*, 32(3), 319-328.
- Sletten, J (2022). *Temperature correction of deflection measurements of the road*, MSc Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, NTNU, Norway (Temperaturkorreksjon av nedbøyningsmålinger på vei, Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk, juni 2022).
- Statens vegvesen. (2021). *Feltundersøkelser: Håndbok R211 [Field investigations manual]*. Statens vegvesen. Hentet fra Vegvesenets åpne arkiv: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2733633>
- Statens vegvesen. (2022). *V230 Forsterkning av veger [Veiledning]*. Hentet fra Vegvesenets håndbokarkiv: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/3040391>
- Zhao, X., Shen, A., & Ma, B. (2020). Temperature response of asphalt pavement to low temperatures and large temperature differences. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(1), 49-62.



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