



VegDim

Klimadata

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1066



Tittel

VegDim

Undertittel

Klimadata

Forfatter

Rabbira Garba Saba

Avdeling

Teknologi Drift og vedlikehold

Seksjon

Vedlikehold og utbedring

Prosjektnummer

C13480

Rapportnummer

1066

Prosjektleder

Brynhild Snilsberg

Godkjent av

Brynhild Snilsberg

Emneord

VegDim, vegteknologi, ME-dimensjonering, tilstandsutvikling, klimadata

Sammendrag

VegDim (2018-2024) har vært et FoUI-program i Statens vegvesen, der målet har vært å utvikle og ta i bruk et ME-system for dimensjonering og analyser av vegoverbygninger. Dette vil gi oss mulighet til å beregne prognoser for tilstandsutvikling basert på nedbrytning pga klima- og trafikkbelastning. Denne rapporten beskriver klimadata som utgjør en del av inngangsdataene til dimensjonerings- og analysesystemet VegDim/ERAPave PP, samt en temperaturmodell som brukes til beregning av temperaturer på ulike dybder i overbygningen.

Title

VegDim

Subtitle

Climate Data

Author

Rabbira Garba Saba

Department

O&M Technology

Section

Maintenance and Upgrading Support

Project number

C13480

Report number

1066

Project manager

Brynhild Snilsberg

Approved by

Brynhild Snilsberg

Key words

VegDim, pavement engineering, ME-design, performance prediction, climate data

Summary

VegDim (2018-2024) was a R&D program conducted by the Norwegian Public Roads Administration. The goal was to develop and implement an ME pavement design system. Such system will provide the possibility to predict pavement deterioration caused by traffic and climate loading. This report describes climate data, which represents a part of the input data for VegDim/ERAPave PP pavement design and analysis system, as well as a temperature model that is utilized to calculate temperature at various depths in the pavement structure.



Forord

VegDim (2018-2024) har vært et FoUI-program i Statens vegvesen der målet var å utvikle et digitalt system for dimensjonering og analyser av vegoverbygninger basert på tilstandsutvikling. Dette er et mekanistisk-empirisk (ME) dimensjoneringsystem som vil gi oss mulighet til å beregne prognoser for tilstandsutvikling og levetid basert på nedbrytning pga klima- og trafikkbelastning.

Hovedleveransen fra FoUI-programmet er et nytt dimensjoneringsystem (dataverktøy) og en dimensjoneringspraksis der en har større fleksibilitet og mulighet til å dokumentere konsekvenser av ulike valg av materialer og lagtykkelser i vegbygging og vedlikehold.

Et ME-dimensjoneringsystem, som gir dokumentasjon på tilstandsutviklingen og levetiden til vegoverbygningen, vil gi et mye bedre beslutningsgrunnlag ved planlegging av veger. Dette vil gi grunnlag for optimalisert forvaltning av vegnettet (livsløpskostnader) og bedre langsiktige vedlikeholdsplaner. Ved bruk av dette verktøyet kan man også ta hensyn til miljø ved planlegging, bygging og vedlikehold av veger. Dette gjør at vi på en bedre måte kan oppnå reduksjon i energiforbruk og klimagassutslipp, som vil bidra til å oppnå nasjonale klimamål.

I FoUI-programmet VegDim ble et ME-system, kalt ERAPave PP (Elastic Response Analysis of Pavements – Performance Prediction), som er under utvikling ved Statens veg- og transportforskningsinstitutt (VTI) i Sverige, valgt for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. Et norsk, web-basert dimensjoneringsystem der ERAPave PP utgjør den ME-delen er under utvikling og kalles VegDim, det vil si at den har fått samme navn som FoUI-programmet. I denne rapporten brukes benevnelsen VegDim/ERAPave PP for å referere til både web- og desktopversjonene av ME-systemet

Denne rapporten beskriver klimadata som utgjør en del av inngangsdataene til VegDim/ERAPave PP, samt en temperaturmodell som brukes til beregning av temperaturer på ulike dybder i overbygningen. Rapporten er en leveranse fra arbeidspakken klimadata, som var ledet av Rabbira Garba Saba. Kjell Arne Skoglund, Brynhild Snilsberg, og Torbjørn Jørgensen har bidratt til arbeidet som ble gjort i arbeidspakken. Rapporten er utarbeidet av Rabbira Garba Saba. Brynhild Snilsberg, Sara Anastasio, og Joralf Aurstad har gjennomgått utkastet til rapporten og kommet med innspill.

Rabbira Garba Saba, arbeidspakkeleder Klimadata

Statens vegvesen, juni 2025

Innhold

Forord	1
Sammendrag	3
1 Innledning	4
2 Inngangsdata om klima i VegDim/ERAPave PP	5
2.1 Temperatur	5
2.2 Fuktinnhold	10
3 Referanser	14

Sammendrag

Klima har en betydelig effekt på egenskapene til vegbyggingsmaterialer samt vegens ytelse og levetid. I VegDim/ERAPave PP-systemet tas denne effekten i betraktning ved bruk av historiske klimadata for å beregne temperaturen i asfaltlagene og estimere fuktinnholdet i de ubundne lagene.

Temperaturen beregnes ved hjelp av en temperaturmodell der historiske data om lufttemperatur, vindhastighet og solinnstråling benyttes som inngangsdata. Den beregnede temperaturen på ulike dybder i asfaltlagene brukes sammen med asfaltmaterialenes dynamiske modulmasterkurver for å beregne respons og tilstandsutvikling for vegoverbygningen.

Effekten av fuktinnhold på egenskapene til de ubundne lagene hensyntas gjennom en modell som beskriver sammenhengen mellom stivhetsmodulen til ubundne materialer og metningsgrad (fuktinnhold). Det benyttes estimerte metningsgradverdier for ulike sesonger, der estimatene er basert på empiriske data og frostindeks for å ta hensyn til økt fuktinnhold i teleløsningsperioden.

Det er satt i gang et arbeid for å etablere et system som leverer inngangsdata til temperaturmodellen i et 1 km × 1 km grid-kart. Disse dataene skal modelleres og beregnes ved bruk av målt data fra nærliggende værstasjoner, samtidig som høydevariasjoner tas i betraktning.

I NordFoU-prosjektet NorDim (2025-2029) arbeides det med utviklingen av en modell for beregning av fuktinnhold i vegoverbygninger. Når disse forbedringene er på plass, vil klimaets effekt på tilstandsutviklingen for vegoverbygninger bli ivaretatt på en enda bedre måte i VegDim/ERAPave PP.

1 Innledning

VegDim (2018–2024) har vært et FoUI-program i Statens vegvesen, der målet har vært å utvikle og ta i bruk et digitalt mekanistisk–empirisk (ME) system for dimensjonering og analyse av vegoverbygninger. Et slikt system, kalt ERAPave PP (Elastic Response Analysis of Pavements – Performance Prediction), som er under utvikling av VTI (Statens veg- og transportforskningsinstitutt) i Sverige, ble valgt for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. Et norsk, web-basert dimensjoneringsystem der ERAPave PP utgjør den ME-delen er under utvikling og kalles VegDim, det vil si at den har fått samme navn som FoUI-programmet. I denne rapporten brukes benevnelsen VegDim/ERAPave PP for å referere til både web- og desktopversjonene av ME-systemet.

Klima har stor påvirkning på vegoverbygningens ytelse og må tas i betraktning ved dimensjonering og analyse av vegoverbygninger. Derfor er klimadata en av de viktigste inngangsdataene til VegDim/ERAPave PP-dataprogrammet.

På skrivende stund (juni 2025) utføres beregninger i VegDim/ERAPave PP basert på historiske klimadata hentet direkte fra Meteorologisk institutts værstasjoner. På sikt vil beregningene baseres på modellerte eller beregnede klimadata, der effekten av høydevariasjoner tas hensyn til.

I videreutviklingen av VegDim/ERAPave PP er det aktuelt å bruke fremtidige klimaprognoser, der effekten av klimaendringer tas i betraktning.

Denne rapporten beskriver klimadata som utgjør en del av inngangsdataene til VegDim/ERAPave PP, samt en temperaturmodell som brukes til beregning av temperaturer på ulike dybder i overbygningen.

2 Inngangsdata om klima i VegDim/ERAPave PP

På veger med fleksible dekkekonstruksjoner består vegoverbygningen av flere asfaltlag og ubundne lag. Egenskapene til disse materialene påvirkes av klimaet, spesielt temperatur og fuktinnhold, som har betydelig innflytelse på vegbyggingsmaterialers egenskaper.

Asfalt er et materiale med egenskaper som varierer med temperaturen. Ved lave temperaturer har asfalten god motstand mot deformasjoner, mens den ved høye temperaturer blir mykere og får redusert motstandsevne mot deformasjoner. Samtidig blir asfalten mer sprø ved lave temperaturer, noe som gir redusert motstand mot oppsprekking (utmatting). Derfor er det viktig å ta hensyn til temperaturens effekt på asfaltens egenskaper ved dimensjonering og analyse av vegoverbygninger.

I VegDim/ERAPave PP beregnes tøyninger og spenninger som oppstår under trafikklast, samt skadeutvikling over tid. I disse beregningene benyttes asfaltens dynamiske modul, som varierer med både temperatur og belastningstid (frekvens). For å finne riktig verdi for den dynamiske modulen må temperaturen i asfaltlagene tas med i beregningene. Dette gjøres ved hjelp av en masterkurve for dynamisk modul, som viser hvordan modulen varierer med temperatur og belastningsfrekvens.

Temperaturen i asfaltlagene inngår også i beregningen av skadeutvikling, spesielt permanente deformasjoner som bidrar til sporutvikling. I VegDim/ERAPave PP benyttes en temperaturmodell der lufttemperatur, vindhastighet og solinnstråling brukes som inngangsdata for å beregne temperatur på ulike dybder i asfaltlagene. Temperaturmodellen er beskrevet i kapittel 2.1 nedenfor.

Stivheten til ubundne granulære materialer og undergrunnen avhenger av fuktinnholdet. Dette tas hensyn til i VegDim/ERAPave PP ved bruk av en modell som beskriver sammenhengen mellom fuktinnhold (metningsgrad) og stivhet. Metningsgraden i de ubundne lagene påvirkes av vanntilførsel og dreneringstilstand, men fuktinnholdet i vegoverbygninger er generelt vanskelig å forutsi. I VegDim/ERAPave PP benyttes en forenklet tilnærming, der metningsgraden estimeres basert på dreneringstilstand og lengden på teleløsningsperioden. Dette er beskrevet i kapittel 2.2.

2.1 Temperatur

Som nevnt ovenfor benyttes en temperaturmodell for å beregne temperatur ved ulike dybder i vegoverbygningen i VegDim/ERAPave PP-verktøyet. Temperaturmodellen er en endimensjonal «Finite Control Volume» (FCV)-modell, som kan beregne temperatur ved ulike dybder og tidspunkter basert på historiske data om lufttemperatur, solinnstråling og vindhastighet. Modellen ble utviklet og validert i Sverige, og den er beskrevet i detalj i [1].

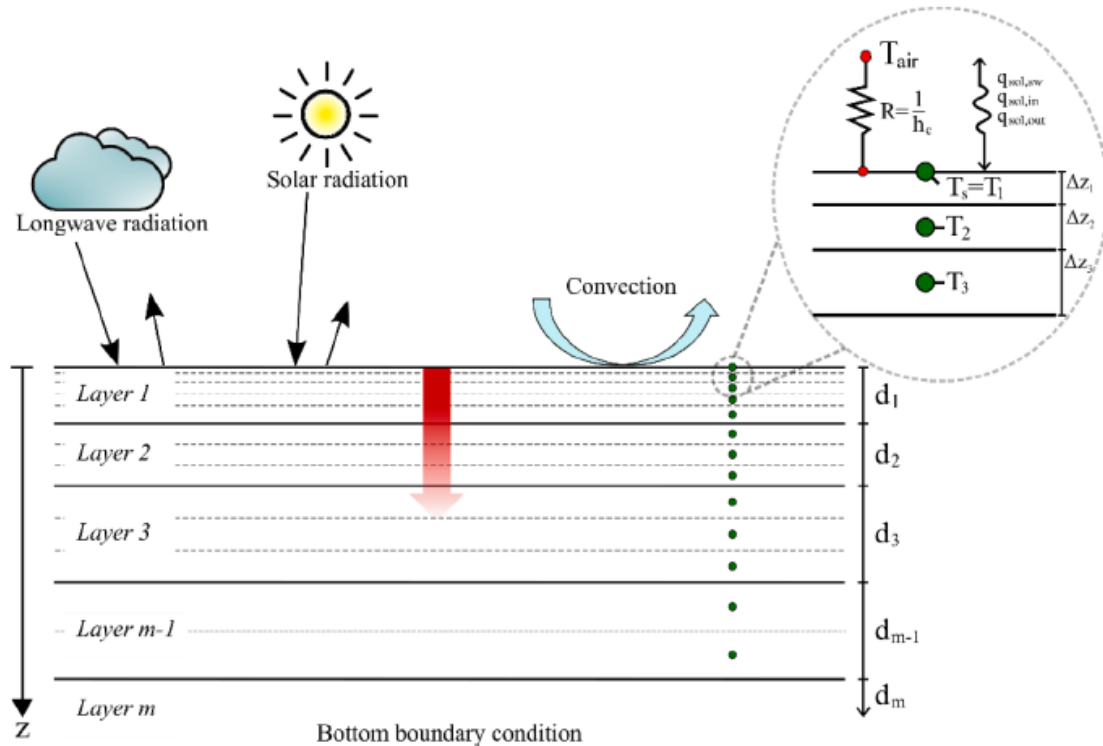
Nedenfor følger en kort oppsummering av beregningsprosessen basert på beskrivelsen i [1].

Beregningen av temperaturen er basert på varmebalanseligningen. Varmebalansen for den øvre randbetingelsen (forhold som må oppfylles ved vegoverflaten) fastsettes ut fra varmeoverføringen ved dekkeoverflaten, som følge av samspillet mellom vegdekket og omgivelsene. Denne varmebalansen bestemmes av:

- i) varmeledning på grunn av temperaturforskjellen mellom vegdekkets overflate og den omkringliggende luften,
- ii) konveksjon som følge av vindbevegelse ved vegdekkets overflate,
- iii) solens kortbølget stråling, og
- iv) innkommende og utgående langbølget stråling.

Etter at den øvre randbetingelsen er fastsatt basert på omgivelsene, deles opp (diskretiseres) vegoverbygningen, og hvert lag av vegdekket deles videre inn i mindre, tynne kontrollvolumer (tynne skiver av lagene). Varmebalanseligningen formuleres for hvert kontrollvolum, der varme overføres mellom nabovolumer. Et konstant tidstrinn, Δt , på én time brukes for oppdeling av tiden (tidsdiskretisering).

Figur 2.1 illustrerer variablene som vurderes ved den øvre randbetingelsen, samt diskretiseringen av vegoverbygningen i kontrollvolumer (FCV-er).



Figur 2.1 Illustrasjon av varmeoverføring mellom en lagdelt overbygning og dens omgivelser [1].

Beregningen av hver komponent av varmestrømningen ved dekkeoverflaten i modelleringsprosessen er beskrevet nedenfor:

Kortbølget solinnstråling

Varmefluksen ved dekkeoverflaten fra kortbølget solstråling (den delen av solens stråling som har korte bølgelender, typisk området 0,2 til 4 mikrometer (μm)), betegnet som $q_{\text{sol},\text{sw}}$, er den netto solstrålingen som absorberes av vegdekkets overflate. Den er gitt ved ligning 2.1.

$$q_{\text{sol},\text{sw}} = (1 - \alpha)Q_{\text{sol}} \quad (2.1)$$

Der α er albedo, en dimensjonsløs refleksjonskoeffisient, og Q_{sol} er den globale solinnstrålingen som hentes fra metrologiske data. Albedo representerer forholdet mellom den reflekterte og den innkommende strålingen på en overflate. Denne parameteren avhenger av tilstanden til vegdekkets overflate. Den typiske verdien for albedo ligger i området 0,04–0,18 for asfalt.

Langbølget solinnstråling

Deler av solinnstrålingen absorberes av atmosfæren og stråles videre til jorden som langbølget stråling (typisk bølgelengde i området 4 til 100 mikrometer (μm)). Den langbølgede solinnstrålingen beregnes ved bruk av ligning 2.2:

$$q_{sol,in} = \epsilon_a \sigma (T_{air} + 273,15)^4 \quad (2.2)$$

Der ϵ_a er absorpsjonskoeffisienten, σ er Stefan-Boltzmanns konstant ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$), og T_{air} er lufttemperaturen ($^{\circ}\text{C}$).

Utgående langbølget stråling

Den utgående langbølgede strålingen som slippes ut fra jordens overflate til atmosfæren beregnes ved bruk av Stefan-Boltzmanns lov gitt i ligning 2.3:

$$q_{sol,out} = \epsilon \sigma (T_s + 273,15)^4 \quad (2.3)$$

Der ϵ er emissivitetskoeffisienten (strålingsevnen) til overflaten og T_s er vegdekkets overflatetemperatur ($^{\circ}\text{C}$). Emissivitetskoeffisienten for tørr asfalt ligger i området 0,85 – 0,90.

Konveksjon

Den konvektive varmekraften, q_{conv} , mellom luften og vegdekkets overflate, som oppstår på grunn av luftstrømning eller bevegelse, beregnes ved bruk av ligning 2.4:

$$q_{conv} = h_c (T_{air} - T_s) \quad (2.4)$$

Der h_c er konveksjonskoeffisienten. Det finnes flere empiriske ligninger for beregning av konveksjonskoeffisienten i litteraturen. I VegDim/ERAPave PP brukes Vehrencamps modell, som er gitt i ligning 2.5, for å beregne konveksjonskoeffisienten:

$$h_c = 698,24a \left(0,00144 \left\{ \text{abs} \left[\frac{(T_s + 273,15) + (T_{air} + 273,15)}{2} \right] \right\}^{0,3} * U^d + 0,00097 [\text{abs}((T_s + 273,15) - (T_{air} + 273,15))^{0,3}] \right) \quad (2.5)$$

Der $a = 1,4$ og $d = 0,5$ er empiriske modellparametere, U er vindhastighet (m/s).

Forutsatt konstant termisk ledningsevne og isotrope lag, kan varmeledning inn i hvert kontrollvolum uttrykkes ved den endimensjonale varmeledningsligningen vist i 2.6:

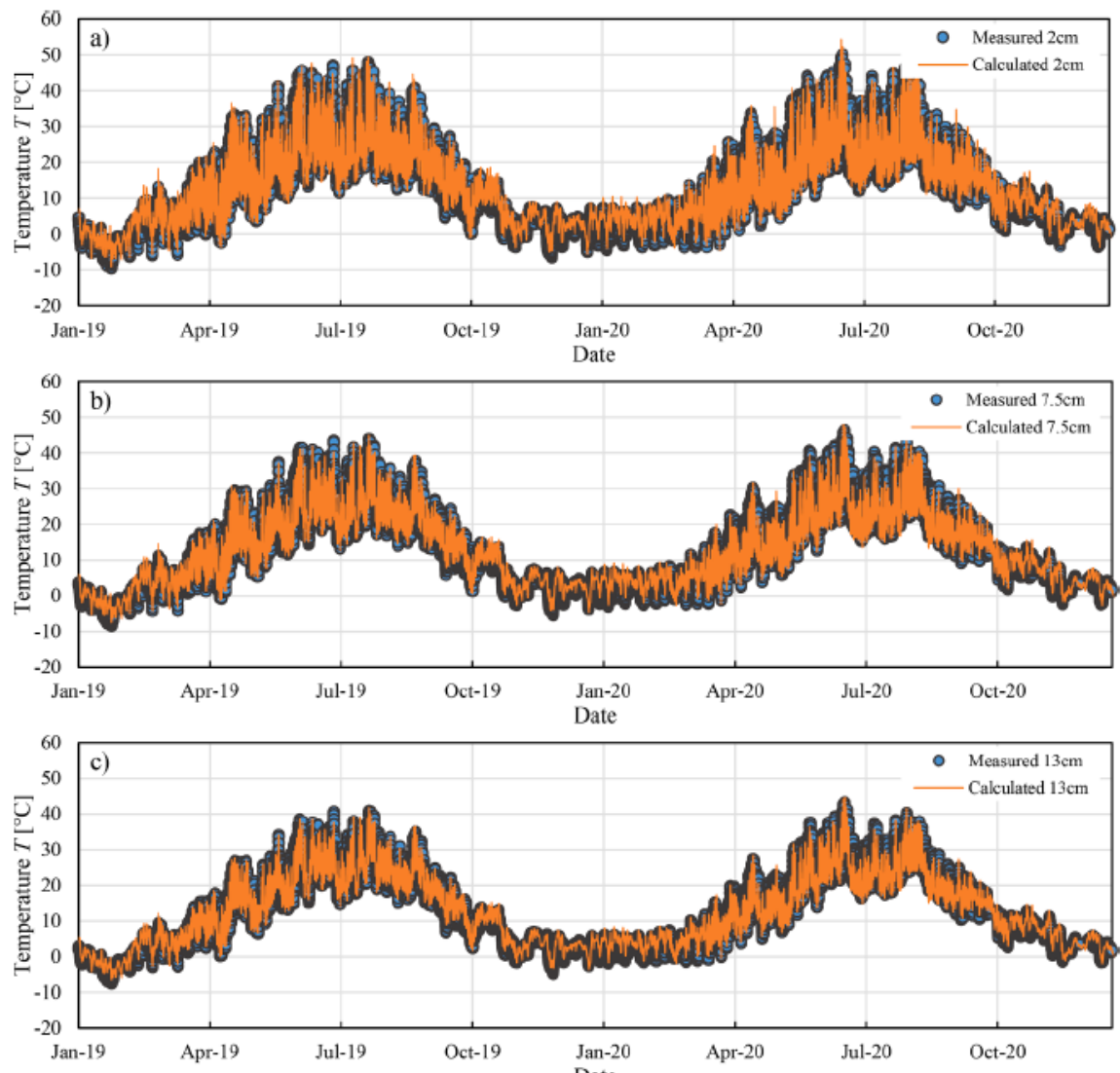
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

Der ρ er densiteten (kg/m^3), c_p er varmekapasiteten ($\text{J}/\text{kg K}$), k er varmeledningsevnen (W/mK), t er tid (t), og z er dybde (m).

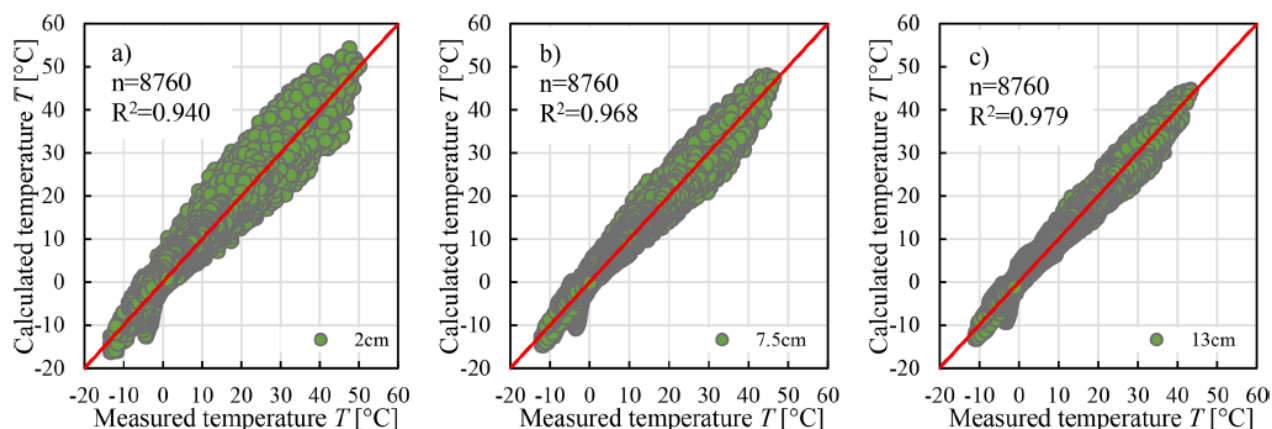
En implisitt tidsintegrasjonsmetode (en numerisk metode for å løse tidsavhengige differensialligninger) benyttes for temperaturberegningene gjennom hele dybden.

Temperaturen beregnes ved midtdybden for hvert asfaltlag, og de beregnede temperaturene brukes sammen med asfaltens masterkurve for å beregne respons (tøyninger og spenninger) og tilstandsutvikling for vegoverbygningen.

Temperaturmodellen ble validert ved bruk av målte temperaturdata fra flere vegstrekninger i Sverige. Figurene 2.2 og 2.3 viser noen av resultatene fra valideringsarbeidet. En detaljert beskrivelse av dette arbeidet er gitt i [1].



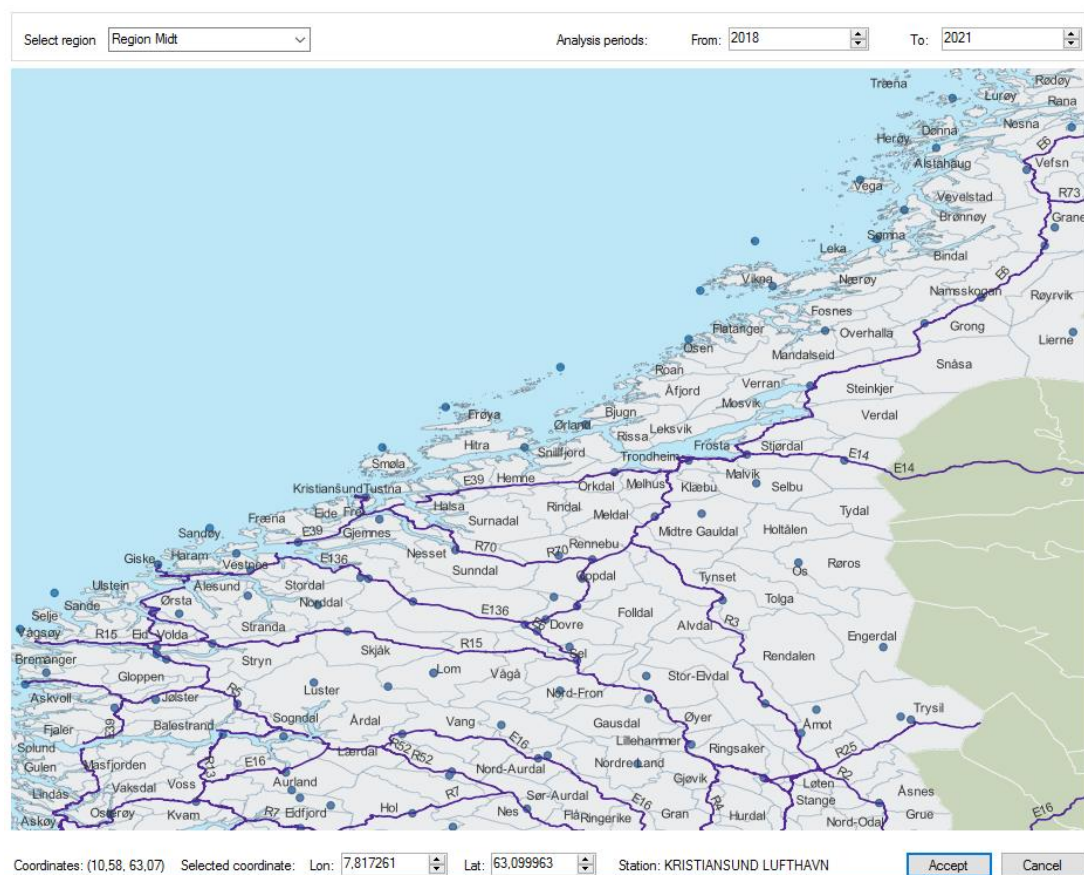
Figur 2.2: Målt vs beregnet temperatur i asfaltlagene ved Ullevileden teststrekning ved a) 2 cm, b) 7.5 cm, og c) 13 cm dybde [1].



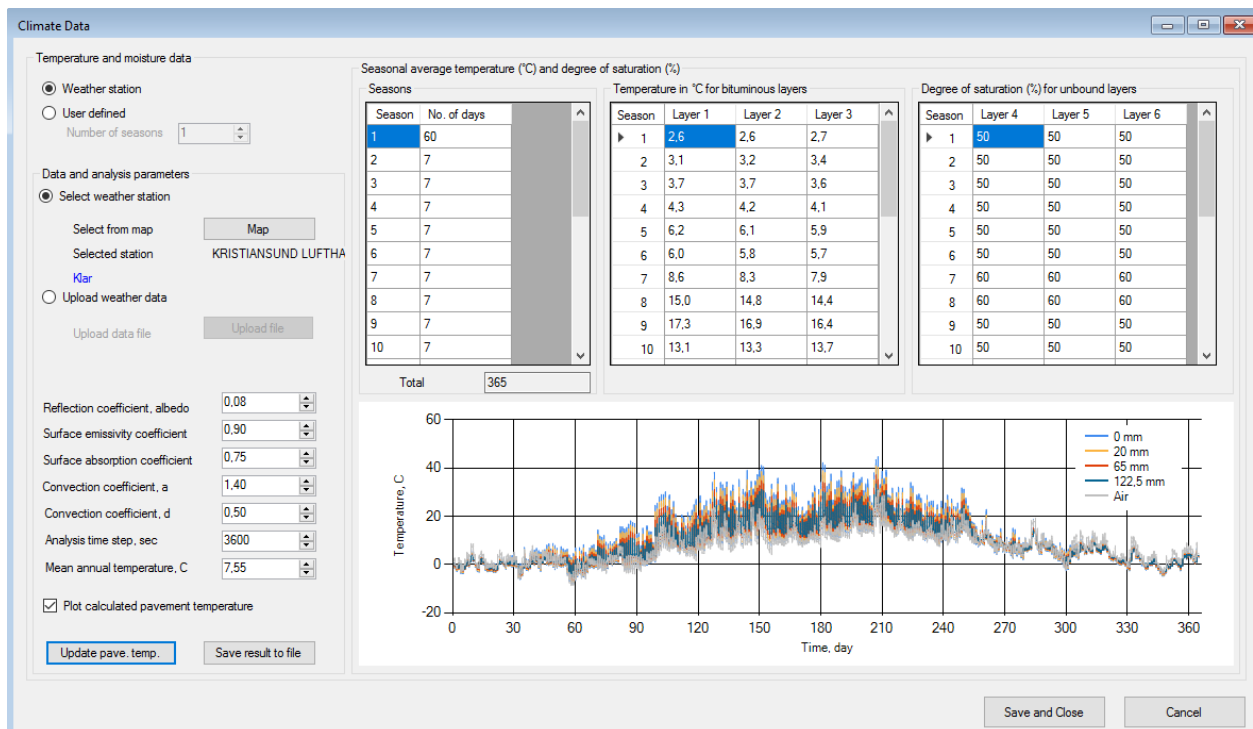
Figur 2.3: Sammenligning av målt og beregnet temperatur i asfaltlagene ved Ullevileden teststrekning ved a) 2 cm dybde, b) 7.5 cm dybde, og c) 13 cm dybde [1].

I ERAPave PP benyttes en kartløsning (Google maps) for å hente inngangsdata fra Meteorologisk institutt sine databaser. Kartløsningen gjør det mulig å spesifisere vegens beliggenhet enten ved å klikke i kartet eller ved å angi koordinater. Programmet henter deretter de nødvendige inngangsdataene fra nærmeste værstasjon for en spesifisert tidsperiode og beregner temperaturen på ulike dybder i asfaltlagene.

Beregningen i VegDim/ERAPave PP utføres ved å dele året inn i ulike klimasesonger. Temperaturen beregnes deretter for hver klimasesong. Figurene 2.4 og 2.5 viser skjermbilder fra ERAPave PP som illustrerer kartløsningen og temperaturberegningen.



Figur 2.4: Kartløsning for innhenting av klimadata.



Figur 2.5: Eksempel på beregnet temperatur på ulike dybder i asfaltlagene.

2.2 Fuktinnhold

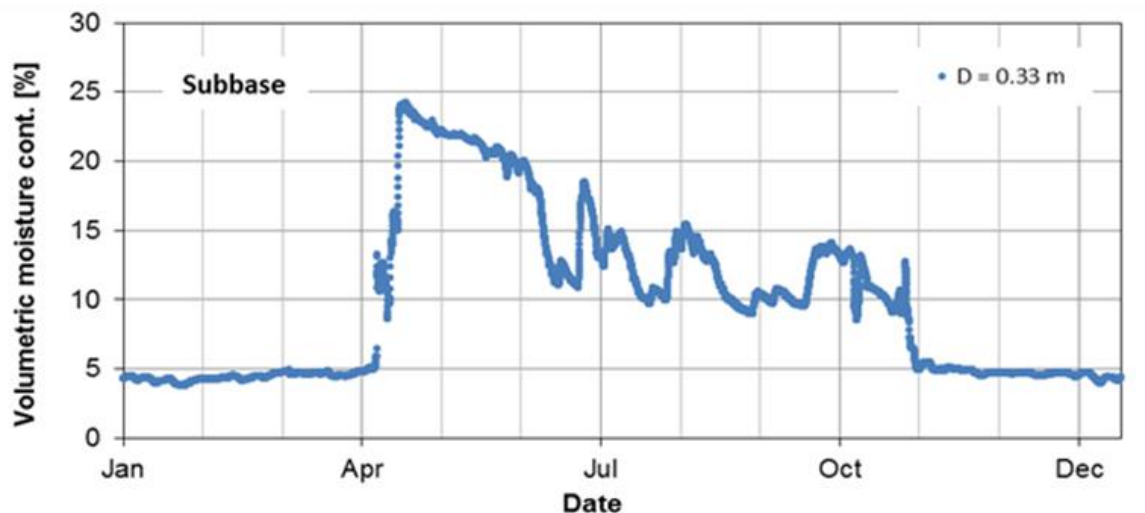
Fuktinnhold påvirker egenskapene til vegbyggingsmaterialer og undergrunn, særlig egenskapene til ubundne granulære materialer og undergrunn. For mye fukt i vegoverbygningen kan føre til redusert stivhet i de ubundne lagene, noe som igjen kan resultere i redusert bæreevne og økt deformasjon i disse lagene.

Fuktinnholdet i de granulære lagene varierer gjennom året og avhenger av:

- Vanntilførsel (nedbør, snøsmelting osv.)
- Dreneringstilstand
- Grunnvannsnivå
- Frost og teleløsning
- Materialenes sammensetning (gradering og finstoffinnhold)

Et litteratursøk rapportert i [2] viser at i områder uten frost og med lavt grunnvannsnivå, når fuktinnholdet under et vegdekke en likevektstilstand (tilnærmet naturlig fuktinnhold) en tid etter vegens oppbygging og forblir stabilt. I områder med tele, teleløsning og høyt grunnvannsnivå, derimot, inntreffer ingen slik likevektstilstand og fuktinnholdet varierer gjennom året. Fuktinnholdet øker kraftig i teleløsningsperioden. Figur 2.6 viser variasjonen av målt fuktinnhold i et forsterkningslag gjennom ett år. Vi ser en markant økning i fuktinnholdet i teleløsningsperioden (ca. april-mai) [3].

Påvirkningen av grunnvannsnivået avhenger av jordarten i undergrunnen. Feltforsøk fra andre land viser at fuktinnholdet i overbygningen påvirkes av grunnvannet dersom dybden fra overflaten er mindre enn 6 m for leire, 3 m for sandholdig leire eller silt, og 1 m for sand [4].



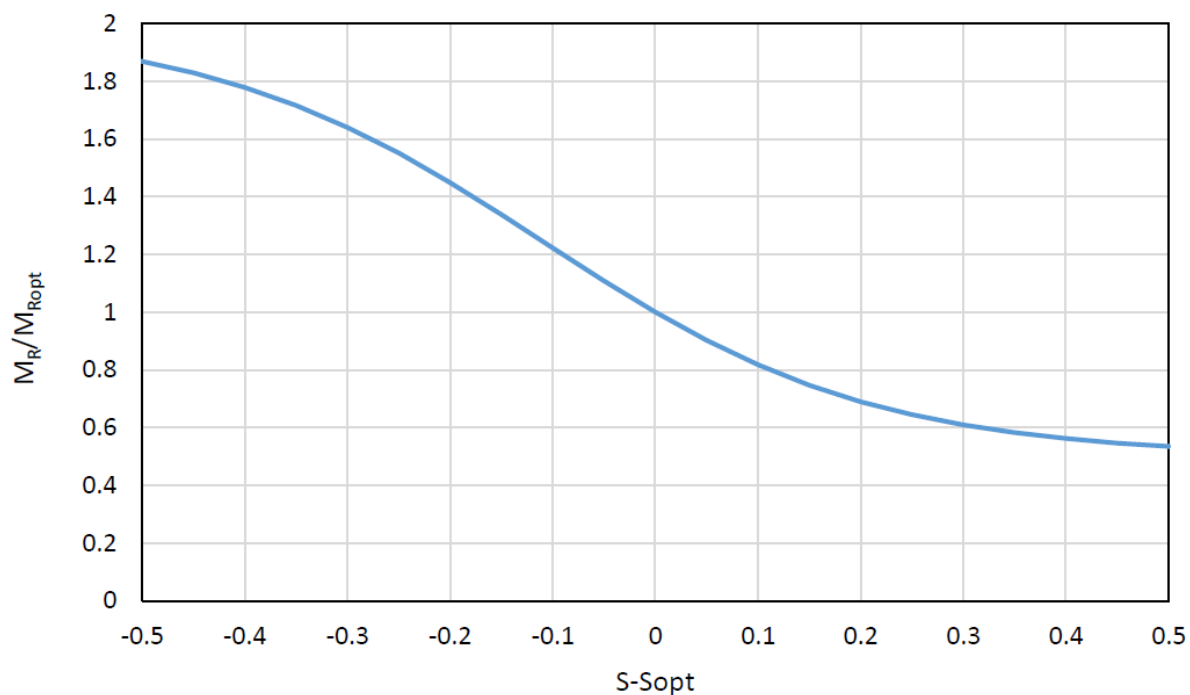
Figur 2.6: Variasjon av fuktinnhold i forsterkningslag [3].

Det er komplisert å modellere eller beregne fuktinnhold i vegoverbygninger, ettersom mange faktorer påvirker fuktinnholdet, og det finnes begrenset målte data fra feltstudier. Effekten av fuktinnhold på egenskapene til enkelte ubundne materialer har imidlertid blitt testet i laboratorier og i akselererte storskala testopplegg.

Basert på slike studier er det utviklet en modell som beskriver sammenhengen mellom fuktinnhold og stivhetsmodul for ubundne granulære materialer. Denne modellen, gitt i ligning 2.7, er implementert i VegDim/ERAPave PP [5].

$$\log \frac{M_R}{M_{opt}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp\left(\ln \frac{-b}{a} + k_m(S - S_{opt})\right)} \quad (2.7)$$

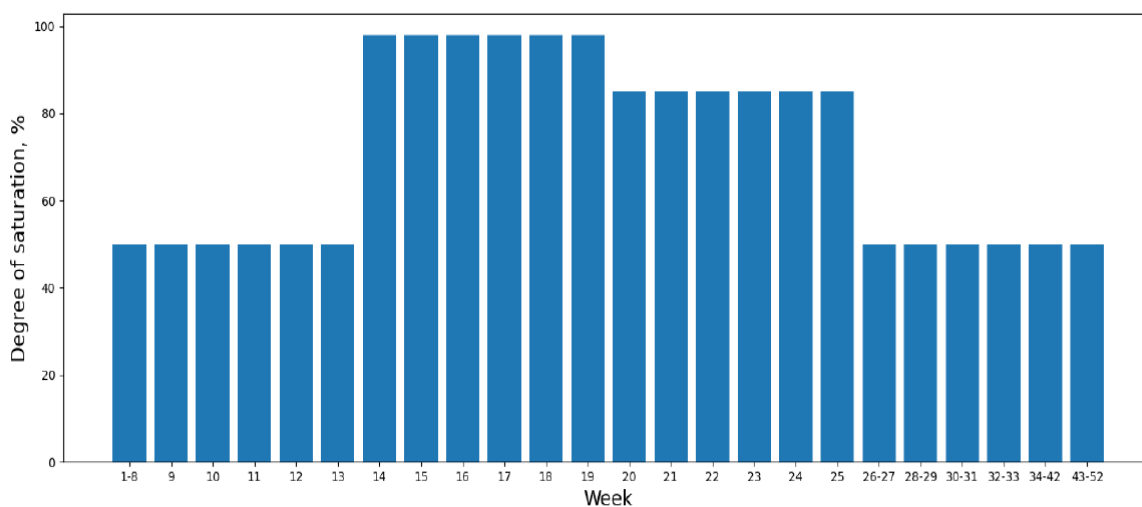
Der M_R er stivhetsmodulen ved en gitt metningsgrad (S), M_{opt} er stivhetsmodulen ved optimum metningsgrad (S_{opt}), og a , b , og k_m er modellparametere. Figur 2.7 viser sammenhengen mellom stivhetsmodulen og fuktinnholdet der modellparametere $a = -0,3$, $b = 0,3$, og $k_m = 6$ ble benyttet.



Figur 2.7: Sammenheng mellom stivhetsmodul og metningsgrad [5].

I den nåværende versjonen av VegDim/ERAPave PP gis en estimert verdi for metningsgraden. Disse verdiene er basert på empiriske data. Det vurderes to til tre nivåer av metningsgraden: én for teleløsningsperioden, når de ubundne lagene er nær fullstendig mettet, og én for resten av sesongen, når de ubundne lagene har en naturlig metningsgrad.

Lengden på teleløsningsperioden og nivået av metningsgraden avhenger både av frostindeks (FI) og dreneringsforholdene i vegoverbygningen. Dreneringsforholdene klassifiseres i tre kategorier: god, middels og dårlig. Figur 2.8 viser et typisk eksempel på sesongvariasjonen av metningsgraden i VegDim/ERAPave PP. Dataene i Figur 2.8 gjelder for FI > 1200 og dreneringsklasse middels.



Figur 2.8: Eksempel på sesongvariasjon av metningsgraden i VegDim/ERAPave PP [5].

Lengden på teleløsningsperioden avhenger av frostindeksen (FI). Tabell 2.1 viser inndelingen i klimasoner basert på frostindeksen, samt den tilsvarende lengden på teleløsningsperioden og metningsgradverdiene som benyttes i VegDim/ERAPave PP.

Tabell 2.1: Lengde på teleløsningsperioden og metningsgradverdier som benyttes i VegDim/ERAPave PP.

Klimasone	Frostindeks (FI, døgn- °C)	Lengde på teleløsningsperioden (døgn)	Metningsgrad i teleløsningsperioden (%)		
			God	Middels	Dårlig
1	< 300	14	60	85	98
2	301 - 600	28	60	85	98
3	601 - 900	42	85/60	98/85	98
4	901 - 1200	56	85/60	98/85	98
5	> 1200	84	85/60	98/85	98

3 Referanser

- [1] Saliko, D., Ahmed, A., & Erlingsson, S. (2023), Development and validation of a pavement temperature profile prediction model in a mechanistic-empirical design framework, *Transportation Geotechnics* 40 (2023) 100976.
- [2] Arampamoorthy, H & Patrick, J. (2010), Design moisture condition guidelines for pavement design and material assessment, Opus International Consultants, Central Laboratories, Lower Hutt, New Zealand, <https://nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/424/docs/424.pdf>
- [3] Klas Hermelin (2022), e-post kommunikasjon.
- [4] Drumm, E.C. & Meier, R. (2003), LTPP Data Analysis: Daily and Seasonal Variations in Insitu Material Properties, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, USA, https://www.trb.org/publications/nchrp/nchrp_w60.pdf
- [5] Ahmed A. & Erlingsson, S. ERAPave PP users' guide.



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