

VegDim - Sluttrapport

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1100

Illustrasjon: Visuell kommunikasjon



Tittel

VegDim - Sluttrapport

Title

VegDim - Final report

Undertittel**Subtitle****Forfatter**

Brynhild Snilsberg

Author

Brynhild Snilsberg

Avdeling

Teknologi Drift og vedlikehold

Department

O&M Technology

Seksjon

Vedlikehold og utbedring

Section

Maintenance and Upgrading Support

Prosjektnummer

C13480

Project number

C13480

Rapportnummer

1100

Report number

1100

Prosjektleder

Brynhild Snilsberg

Project manager

Brynhild Snilsberg

Godkjent av

Arbeidspakkeledere

Approved by

Arbeidspakkeledere

Emneord

VegDim, ERAPave PP, mekanistisk-empirisk dimensjoneringssystem (ME), vegteknologi

Key words

VegDim, ERAPave PP, mechanistic-empirical pavement design system (ME), pavement engineering

Sammendrag

VegDim (2018-2024) har vært et FoU 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.

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.

Denne rapporten oppsummerer arbeidet som er gjort i prosjektet.

This report summarizes work done in the project.



Forord

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

Det finnes mange ME-system i verden, og vi hadde ingen ambisjon om å utvikle et helt nytt system for Norge. I begynnelsen av prosjektet valgte vi et ME-system som VTI i Sverige utvikler, ERAPave PP, og vi inngikk et samarbeid med VTI og Trafikverket for felles utvikling av dette systemet, og tilpasse det til norske forhold. Vi kom godt på veg med dette, men et slikt system vil aldri bli helt ferdig, og vil kreve kontinuerlig utvikling og forbedring. Derfor har vi inngått et videre samarbeid gjennom et NordFoU prosjekt NorDim (2025-2029) med VTI og Trafikverket.

ERAPave PP er foreløpig kun tilgjengelig i en desk-top versjon som må lastes ned av hver enkelt bruker. Vi valgte derfor i 2023 å starte utviklingen av en norsk web-versjon av ERAPave PP som vi har kalt VegDim. Modeller fra ERAPave PP implementeres i VegDim. I tillegg har vi fått digitalisert dagens erfaringsbaserte dimensjoneringsmetode som er lagt inn i samme web-løsning. VegDim har denne nettadressen: vegdim.atlas.vegvesen.no

I FoUI-programmet er det gjennomført utredninger som direkte grunnlag for denne utviklingen, og noen utredninger med faglig tilknytning. Dvs. VegDim-prosjektet har hatt et perspektiv med nytte utover verktøyutviklingen. Dette er også beskrevet i denne sluttrapporten.

På vegne av prosjektgruppa ønsker jeg å takke alle som har vært involvert i utviklingen av VegDim og ERAPave PP. Vi håper dette vil være gode verktøy for vegteknologer, vegplanleggere, studenter, forskere og andre som er interessert i vegteknologi!

Brynhild Snilsberg, prosjektleder

Statens vegvesen, november 2025



VegDim illustrasjon: Michelle Stoltenberg, Statens vegvesen

Innhold

Forord	1
Sammendrag	4
Summary	5
1. Innledning.....	6
1.1 Bakgrunn for VegDim.....	7
1.2 Mål.....	7
1.3 ME-dimensjonering.....	8
1.4 Fordeler ved ME-dimensjonering	9
1.5 Avgrensninger	10
2. Organisering.....	11
2.1 Arbeidspakker.....	11
AP 1 Prosjektledelse	11
AP 2 Valg av ME dimensjoneringssystem	11
AP 3 Kalibrering	11
AP 4 Materialdata	11
AP 5 Trafikkdata	11
AP 6 Klimadata	11
AP 7 Frostmodell	12
AP 8 Krav.....	12
AP 9 Implementering, pilotering og kompetanse	12
AP 10 Analyser	12
2.2 Andre samarbeidspartnere.....	12
3. Resultater	13
3.1 Valg av ME-system (AP 2).....	13
3.2 Modeller i ERAPave PP.....	14
3.2.1 Responsmodell.....	15
3.2.2 Tilstandsutviklingsmodeller	17
3.2.3 Tilpasning av ERAPave PP til Norge.....	25
3.3 Utvikling av norsk web-versjon.....	26
3.4 Inndata.....	29
3.4.1 Materialdata (AP 4).....	29
3.4.2 Klimadata (AP 6).....	32
3.4.3 Trafikkdata (AP 5).....	33
3.5 Krav (AP 8)	37

3.5.1	Sporutvikling.....	38
3.5.2	Utmatting av asfaltdekket.....	39
3.5.3	Tøyning mot undergrunn	40
3.5.4	Telehiv - frostsikring.....	41
3.6	Kalibrering (AP 3).....	44
3.6.1	Referansestreknings	46
3.6.2	Kalibreringskoeffisient.....	50
3.7	Analyser (AP 10)	51
3.8	Merverdi av VegDim: Kompetanseutvikling i vegteknologi	53
4.	Implementering (AP 9)	54
4.1	Kompetanse/opplæring (AP 9)	55
5.	Rapporter/publikasjoner.....	57
5.1	Delrapporter fra arbeidspakkene (AP)	57
	AP 1 Prosjektledelse	57
	AP 2 Valg av ME dimensjoneringsystem	57
	AP 3 Kalibrering	57
	AP 4 Materialdata	57
	AP 5 Trafikkdata	57
	AP 6 Klimadata	58
	AP 7 Frostmodell	58
	AP 8 Krav.....	58
	AP 9 Implementering, pilotering og kompetanse	58
	AP 10 Analyser	58
5.2	PhD avhandlinger (doktorgradsoppgaver).....	58
5.3	Vitenskapelige publikasjoner	58
5.4	Studentoppgaver	59
	M.Sc. (masteroppgaver).....	59
	B.Sc. (bacheloroppgave).....	60
6.	�konomi	61
7.	Avsluttende kommentarer	62
8.	Veien videre	63

Sammendrag

VegDim (2018-2024) har vært et FoUI-program i Statens vegvesen med mål om å utvikle et digitalt system for dimensjonering og analyser av vegoverbygninger basert på tilstandsutvikling. Prosjektet har samarbeidet med VTI og Trafikverket i Sverige og utviklet en norsk web-versjon av ERAPave PP (Elastic Analysis of Pavements – Performance Prediction), kalt VegDim.

Bakgrunn for VegDim er at det norske dimensjoneringsystemet i N200 Vegbygging er basert på erfaringer og har detaljerte krav, men er lite fleksibelt for nye materialer og endringer i trafikk og klima. VegDim skal være et mer fleksibelt og moderne system.

Prosjektet ble organisert i flere arbeidspakker (AP) med ansvarlige for hver pakke, inkludert prosjektledelse, valg av ME-system, kalibrering, materialdata, trafikkdata, klimadata, frostmodell, krav, implementering og analyser.

ERAPave PP ble valgt som det mest passende ME-systemet for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. VegDim er under utvikling som en webapplikasjon i Statens vegvesens applikasjonsplattform Atlas.

Materialdata, klimadata og trafikkdata ble samlet inn og analysert for å gjøre implementering av systemet lettere. Materialdatabase ble etablert og integrert i VegDim/ERAPave PP for de mest brukte vegbyggingsmaterialer og undergrunn. Det er tilrettelagt for henting av klimadata fra værstasjoner ved bruk av en kartløsning. Data fra noen WIM (Weigh-In-Motion)-installasjoner og Bridge-WIM ble analysert for å få bedre oversikt over reell trafikkbelastning, og forbedre inngangsdata om trafikk.

Regelverk for vegdimensjonering i Norge, N200 Vegbygging, ble oppdatert og det ble åpnet for å benytte VegDim/ERAPave PP. Nye krav til tilstandsutvikling, inkludert sporutvikling, utmatting av asfaltdekket, tøyning mot undergrunn og telehiv, ble implementert i N200 Vegbygging i juli 2024.

Referansestrekninger ble etablert for å kalibrere prognoser for tilstandsutvikling (VegDim/ERAPave PP beregnede verdier) mot målt tilstandsutvikling i felt. Det ble gjort et forsøk på å kalibrere sporutviklingsmodellene, og en kalibreringskoeffisient ble beregnet ved bruk av data fra referansestrekninger, og implementert i VegDim/ERAPave PP.

Implementering av VegDim vil kreve opplæring og informasjon til brukere. Kurs og opplæringsmateriale er under utvikling for ulike målgrupper, inkludert vanlige brukere, superbrukere og ledelse.

ME-dimensjoneringsystemer kan brukes til å gjøre analyser for å vurdere effekter av endringer i materialer, klima, trafikk mm på levetid/tilstandsutvikling, miljø og kostnader. Analyser ble gjennomført for å sammenligne dimensjonering med erfaringsbasert metodikk og ERAPave PP.

Arbeid med videreutvikling og forbedring av VegDim vil fortsette gjennom et samarbeid med Trafikverket i NordFoU-prosjektet NorDim (2025-2029).

Rapporten gir en detaljert beskrivelse av arbeidet som er gjort, resultatene som er oppnådd, og planene for videre utvikling og implementering av VegDim i Norge.

Summary

VegDim (2018-2024) has been an R&D program within the Norwegian Public Roads Administration aimed at developing a digital system for the design and analysis of pavements based on performance prediction. The project has collaborated with the Swedish National Road and Transport Research Institute and the Swedish Transport Administration in further development of ERAPave PP (Elastic Analysis of Pavements – Performance Prediction). A Norwegian web-version of ERAPave PP, called VegDim, was also developed.

The background for VegDim is that the Norwegian design system in N200 Road Construction is based on experience and has detailed requirements but is not very flexible for new materials and changes in traffic and climate. VegDim aims to be a more flexible and modern system.

The project was organized into several work packages with responsible parties for each package, including project management, selection of ME system, calibration, material data, traffic data, climate data, frost model, requirements, implementation, and analyses.

ERAPave PP was chosen as the most suitable ME system for further development and adaptation to Norwegian conditions. VegDim is being developed as a web application on the Norwegian Public Roads Administration's application platform Atlas.

Material data, climate data, and traffic data were collected and analyzed to facilitate the implementation of the system. A material database was established and integrated into VegDim/ERAPave PP for the most commonly used road construction materials and subgrade. It is arranged to retrieve climate data from weather stations using a map solution. Data from some WIM (weigh-in-motion) and Bridge-WIM were analyzed to get a better overview of actual traffic load and improve input data on traffic.

The regulations for pavement design in Norway, N200 Road Construction, were updated, and it was opened to use VegDim/ERAPave PP. New requirements for condition development, including rutting, asphalt fatigue, subgrade strain, and frost heave, were implemented in N200 Road Construction in July 2024.

Reference road sections were established to calibrate forecasts for condition development (VegDim/ERAPave PP calculated values) against measured pavement performance in the field. An attempt was made to calibrate the rutting models, and a calibration coefficient was calculated using data from reference sections and implemented in VegDim/ERAPave PP.

The implementation of VegDim will require training and information for users. Courses and training materials are being developed for various target groups, including regular users, super users, and management.

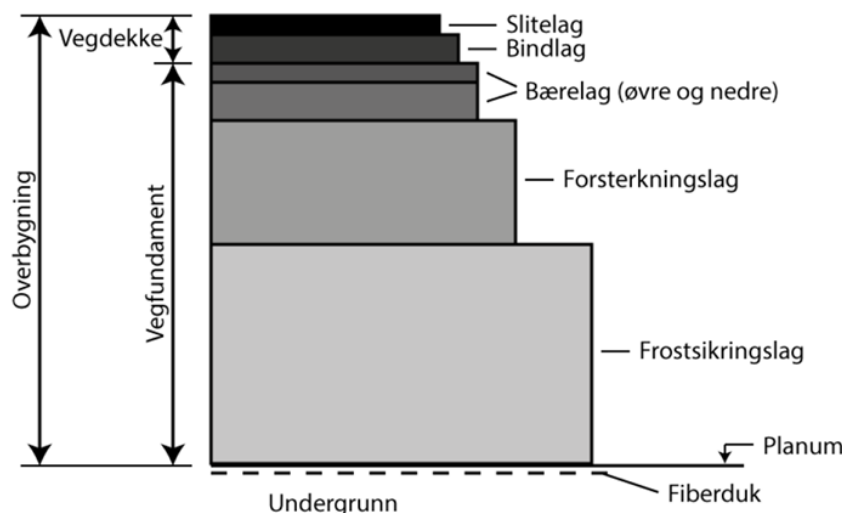
ME design systems can be used to perform analyses to assess the effects of changes in materials, climate, traffic, etc., on service life/pavement performance, environment, and costs. Analyses were carried out to compare design with experience-based methodology and ERAPave PP.

Work on further development and improvement of VegDim will continue through collaboration with the Swedish Transport Administration in the NordFoU project NorDim (2025-2029).

The report provides a detailed description of the work done, the results achieved, and the plans for further development and implementation of VegDim in Norway.

1. Innledning

En vegoverbygning er en lagdelt konstruksjon, som er satt sammen av flere ulike typer materialer, se Figur 1. Sammen skal disse materialene fordele lasten fra trafikken til undergrunnen slik at det ikke oppstår skadelige eller uakseptable deformasjoner. Overbygningen skal ha tilstrekkelig bæreevne hele året og opprettholde sin funksjon gjennom hele vegens dimensjoneringsperiode.



Figur 1: Eksempel på en vegoverbygning (Kilde: [Statens vegvesen rapport nr. 626](#))

Formålet med dimensjonering av en vegoverbygning er å komme fram til en oppbygging og utforming som gjør at vegen tåler de klima- og trafikkpåkjenninger den blir utsatt for i løpet av levetiden. Dette sikrer god fremkommelighet for trafikantene, minimerer vedlikeholdsbehov og må utføres på en slik måte at vegnettet får riktig kvalitet, levetid og totalkostnad. Riktig dimensjonering og god utførelse av vegen har stor betydning for miljøpåvirkning (LCA) og levetidskostnader (LCC).

Dimensjonering av overbygninger kan gjøres med to typer dimensjoneringsystemer: **empirisk** (erfaringsbasert) eller **mekanistisk-empirisk (ME)**. I tillegg til observasjoner og erfaringer fra virkelige veger er ME-dimensjonering basert på fysikkens lover og matematiske modeller for å forstå og forutsi hvordan ulike materialer og strukturer oppfører seg under belastning. Nødvendig detaljeringsnivå på grunnlagsdata for dimensjoneringen slik som trafikkdata, klimadata og materialbeskrivelse er betydelig større ved ME-dimensjonering enn ved empirisk dimensjonering. Datagrunnlaget og manglende beregningsmodeller i en empirisk dimensjonering gjør det det umulig å beregne hvordan ulike lag og materialer i vegoverbygningen blir belastet under ulike forhold, og metoden er derfor lite fleksibel og anvendbar hvis forutsetningene for erfaringsgrunnlaget blir endret.

1.1 Bakgrunn for VegDim

N200 Vegbygging, det norske regelverket for vegbygging, er basert på erfaringer og har mange detaljerte krav. Selv om systemet er robust (enkelt og har en viss sikkerhetsfaktor), er det lite fleksibelt for bruk av nye materialer og for endringer i trafikk og klima. Man kan ikke beregne tilstandsutvikling ut fra ulike valg, eller dokumentere effekt av endringer i materialer, trafikkbelastning eller klimaendringer. Det er også manuelt, og det finnes ikke noe digitalt hjelpemiddel som sjekker at regelverket er tilfredsstillt.

Det er behov for et mer fleksibelt og moderne dimensjoneringsystem som er brukervennlig, digitalt og sørger for at kravene etterleves. Et ME- dimensjoneringsystem og analyseverktøy gir også mulighet til å beregne prognoser for tilstandsutvikling og levetid, f.eks. sporutvikling fra piggdekkslitasje og permanente deformasjoner, telehiv, utmatting av asfaltlagene mm. Dette er viktige data for å beregne levetidskostnader (LCC) og miljøpåvirkning (LCA), for vedlikeholdsplanlegging og vurdere effekter av endringer i trafikk (lengre og tyngre kjøretøy) og klimaendringer (økte nedbørsmengder og temperatur).

Det er også behov for et system for å optimalisere vegoverbygninger og materialbruk som gir større mulighet for innovasjon og utvikling i bransjen. Visualisering av tilstandsutvikling gir bedre kunnskap av hva som påvirker nedbrytningen av veger, og det vil bli mulig å ta hensyn til lokale forhold.

Med økende fokus på bærekraft og krav om at vegbygging og vedlikehold skal vurderes fra totale levetidskostnader, miljømessige og sosiale konsekvenser, er det behov for et bedre system for å gjøre riktige miljøvalg i dimensjonering av vegoverbygninger. Levetiden av ulike konstruksjoner og materialer er en viktig parameter for å gjennomføre LCC og LCA med bedre nøyaktighet. Dagens grunnlag i disse analysene er relativt usikkert, med manglende dokumentasjon på levetid (her gjøres det i dag bare «grove» antagelser).

1.2 Mål

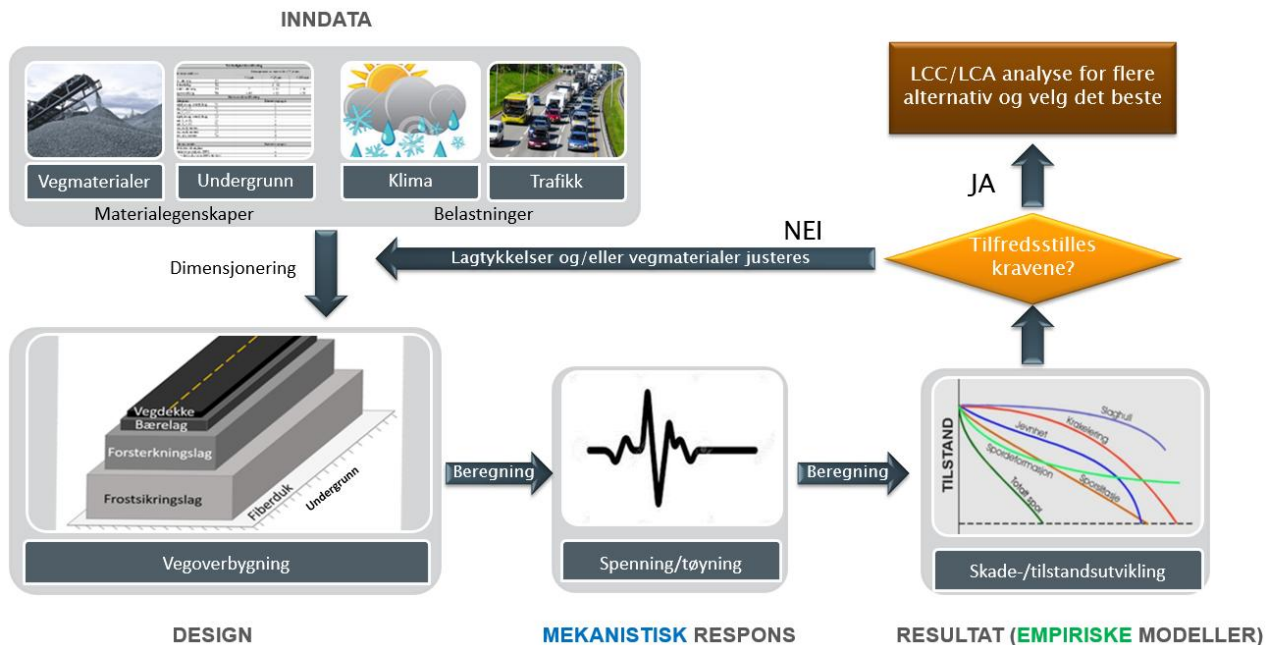
Målet med FoUI-programmet var å utvikle og ta i bruk et ME-system for dimensjonering og analyse av vegoverbygninger i Norge. Verktøyet skal tilpasses norske forhold og byggemetoder slik at livsløpskostnader og miljøeffekter kan tas hensyn til ved planlegging og optimalisering av vegoverbygninger.

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 standard.

1.3 ME-dimensjonering

Figur 2 viser en prinsippskisse over flyten i et ME-system for dimensjonering og analyse av vegoverbygninger.

ME (**mekanistisk-empirisk**) dimensjoneringssystem



Figur 2: Flyten i et ME-system (Illustrasjon: Brynhild Snilsberg)

Inndata i et ME-dimensjoneringssystem omfatter materialelegenskaper for vegbyggingsmaterialene og undergrunnen, samt data om de klimatiske påkjenningene og trafikkbelastningen. Dette må brukeren angi/velge. Deretter dimensjonerer brukeren en vegoverbygning (dvs. velger materialer og lagtykkelser). Så gjennomføres en beregning av spenninger og tøyninger som oppstår i vegoverbygningen og undergrunnen ut fra belastningene den utsettes for. Beregningene gjøres ved bruk av responsmodeller, og dette er den mekanistiske delen av dimensjoneringssystemet. Deretter benyttes empiriske tilstandsutviklingsmodeller for å beregne skade-/tilstandsutvikling for vegoverbygningen og undergrunnen, eksempelvis sporutvikling grunnet piggdekkslitasje og/eller deformasjoner i de ulike lagene, telehiv, utmatting mm. Resultatet sammenlignes med krav som stilles til de ulike tilstandene, og hvis kravene er tilfredsstilt er vegoverbygningen et mulig alternativ. Dette kan gjøres for ulike vegoverbygninger som tilfredsstiller kravene, som deretter kan analyseres for levetidskostnader og/eller miljøeffekter, og brukeren kan velge det alternativet som er best egnet. Hvis kravene ikke er tilfredsstilt må brukeren justere på vegoverbygningen, dvs. velge andre materialer og/eller justere lagtykkelser inntil kravene er tilfredsstilt.

1.4 Fordeler ved ME-dimensjonering

Det er mange fordeler et ME-dimensjonerings- og analyseverktøy vil gi sammenlignet med dagens praksis (erfaringsbasert dimensjonering) av vegoverbygninger. De viktigste er:

- **Kvalitetsgevinster og reduserte kostnader til forvaltning, drift og vedlikehold av veg –** ME-dimensjonering vil føre til bedre kvalitetssikring og større nøyaktighet og pålitelighet for resultatene fra dimensjoneringen. Dette vil gi kvalitetsgevinster for mange sider av vegbygging og lengre levetid for vegoverbygninger. ME-dimensjonering beregner levetid og hvordan skadeutviklingen blir. Dette gir mulighet for langsiktig budsjettering og vedlikeholdsplanlegging, digital dokumentasjon på oppbygging og tilstandsutvikling, samt kobling til FDV- og BIM-system. Dette vil bidra til mer effektiv forvaltning og reduserte levetidskostnader.
- **Bedre etterlevelse av krav:** De som bruker det nye systemet vil få varsel når krav ikke overholdes. Dagens N200 Vegbygging oppleves av mange som omfattende og uoversiktlig. Prosjektet utvikler et digitalt verktøy med bedre brukerstøtte som vil sikre etterlevelse av regelverket. Digitalisering av dimensjonering av vegoverbygninger vil sikre etterlevelse av og videreutvikling av regelverket (N200 Vegbygging) som gir større fleksibilitet og bedre tilpasning til lokale forhold i dimensjonering av vegoverbygninger.
- **Reduserte utslipp:** ME-dimensjonering gir prognose for levetid for vegoverbygninger (i dag brukes antatte levetider), og dette vil gi mer realistiske LCA beregninger som gir bedre grunnlag for å gjøre riktige miljøvalg, og man kan vurdere ulike alternative vegoverbygninger ut fra miljøpåvirkning. Med ME-dimensjonering kan man dimensjonere for lengre levetid som også vil bidra til reduserte utslipp.
- **Mer kunnskap:** Det nye systemet vil gi mer kunnskap om hvordan ulike valg (ulike kombinasjoner av vegbyggingsmaterialer og lagtykkelser for vegoverbygninger) i dimensjonering påvirker skadeutvikling, levetid, kostnader og klimautslipp. I tillegg vil et digitalt verktøy som visualiserer skadeutviklingen og hvordan det er sammenlignet med kravene som stilles gi større fokus på og forståelse av vegteknologi. Arbeidsformen kan også bidra til større tillit til arbeidsfeltet generelt og resultatene fra dimensjoneringen med tilhørende tilstandsutvikling spesielt.
- **Økt datakvalitet og lettere tilgang på dokumentasjon:** Et digitalt dimensjoneringssystem gir bedre kvalitetssikring, dokumentasjon, nøyaktighet og pålitelighet for resultatene fra dimensjonering av vegoverbygninger. Dette vil gi kvalitetsgevinster for mange sider av vegbygging. ME-systemer kan bidra til raskere avklaring på mange problemstillinger, og vil kunne virke effektiviserende for flere delprosesser i et veganleggs livsløp fra planlegging via bygging til driftsfase. I dag er prosessen for dimensjonering av vegoverbygning manuell. I tillegg er det svært tidkrevende å fremskaffe dokumentasjon på eksisterende vegoverbygninger. Dette vil være essensielt i et fremtidig FDV system og BIM-modeller.
- **Redusert entreprisekostnader:** Et ME-system vil gi større fleksibilitet i valg av løsninger. F.eks. for vegbyggingsmaterialer kan det bli enklere å ta i bruk nye materialer og bruke lokale materialer i veglinja, og justere lagtykkelser for å tilfredsstille kravene som settes til tilstandsutvikling. Dette kan gi store besparelser: Reduserte kostnader for transport og produksjon av materialer, bedre tilpasning til lokale forhold. Bedre dokumentasjon vil gi lavere tidsbruk. Bedre tilpasning og optimalisering til lokale forhold.

- **Løse nye oppgaver:** ME-dimensjonering vil gi økt utredningskapabilitet for overordnede utredninger for revidering av vegnormaler og retningslinjer eller endring av annet regelverk, men også for analyse og alternativvurdering i vegprosjekter. Det vil muliggjøre analyser av effekter av fravik fra krav, konsekvenser for vegens nedbrytning og skadeutvikling pga økte trafikkbelastninger, hvordan endret klima påvirker tilstandsutvikling mm. I skrivende stund har vi ingen verktøy for å gjøre slike beregninger og hvilken effekt det har på nedbrytning av veger.

Kulepunktene over peker på en rekke fordeler og muligheter som et ME-dimensjonerings- og analyseverktøy gir med hensyn til kvalitetsforbedring, kostnadsbesparelser og ivaretagelse av miljø og andre samfunnsmessige virkninger. Noen av disse fordelene og mulighetene kan imidlertid innebære interne målkonflikter og vil ikke alltid være realiserbare samtidig. Det er derfor viktig at man tenker helhetlig på vegoverbygningens livssyklus samtidig som man ivaretar andre mål i henhold til overordnede premisser for vegprosjektet og driftsfasen for å sikre den riktige avveiningen mellom ulike mål.

Vurdering av kvalitative gevinster ved implementering av VegDim/ERAPave PP i Norge er beskrevet i [ViaNova rapport 2020-08-11 Gevinstrealisering](#).

1.5 Avgrensninger

Prosjektet har kun fokusert på vegoverbygninger med asfalt, og omfatter ikke andre vegoverbygninger med grus, belegningsstein eller betong som toppdekke. Drift av veger og tilknyttede miljø- og optimaliseringsspørsmål er ikke inkludert i dette prosjektet (det finnes ulike LCA og LCC verktøy som kan benyttes).

Systemet som er under utvikling vil kunne brukes både for nybygging og for vedlikehold/forsterkning av eksisterende veger, men for eksisterende veger vil det kreve god kunnskap om vegens oppbygging og tilstand. Innhenting av data for eksisterende veg inngår ikke i prosjektet.

2. Organisering

Prosjektet ble igangsatt før omorganisering av Statens vegvesen i 2020. Etter omorganiseringen ble fagpersoner fra vegteknologi i Vegdirektoratet splittet mellom Teknologivdelingen på divisjon Drift og vedlikehold og Vegteknologiseksjonen på Myndighet og regelverk. Prosjektet har derfor vært et samarbeid mellom disse to enhetene, med fagfolk fra begge enheter, og prosjektledelse og finansiering fra divisjon Drift og vedlikehold.

I dette kapitlet beskrives kort de ulike arbeidspakkene som ble opprettet, med ansvarlige og hovedmål, samt andre samarbeidspartnere som har bidratt inn i prosjektet.

2.1 Arbeidspakker

Det er mye som må på plass før man kan ta i bruk et ME-dimensjonerings- og analyseverktøy for vegoverbygninger. Vi definerte derfor tidlig i prosjektet ulike arbeidspakker (AP) for å sikre god ansvarsfordeling og fremdrift på de ulike oppgavene med ansvarlige og hovedmål for hver AP.

AP 1 Prosjektledelse

- Ansvarlig: Brynhild Snilsberg (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Sikre god prosjektledelse og fremdrift, og koordinering mellom partnere både nasjonalt og med Sverige

AP 2 Valg av ME dimensjoneringsystem

- Ansvarlig: Rabbira Garba Saba (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Velge ME-system som skal benyttes i Norge

AP 3 Kalibrering

- Ansvarlig: Johnny M Johansen (ViaNova) og Rabbira Garba Saba (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Testing og kalibrering av ERAPave PP for norske forhold

AP 4 Materialdata

- Ansvarlig: Rabbira Garba Saba (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Skaffe de nødvendige materialdataene for de mest brukte norske vegbyggingsmaterialer og undergrunn

AP 5 Trafikkdata

- Ansvarlig: Leif Bakløkk (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Skaffe oversikt over belastning/vekter (aksellaster, antall aksler pr kjøretøy og totalvekter) for de tunge kjøretøyene for vegnettet i Norge

AP 6 Klimadata

- Ansvarlig: Rabbira Garba Saba (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Tilrettelegge innhenting og bruk av norske klimadata i ERAPave PP.

AP 7 Frostmodell

- Ansvarlig: Kjell Arne Skoglund (Statens vegvesen Myndighet og regelverk)
- Hovedmål: Etablere modell for beregning av frostnedtrengning og telehiv i ERAPave PP

AP 8 Krav

- Ansvarlig: Kjell Arne Skoglund (Statens vegvesen Myndighet og regelverk)
- Hovedmål: Tilpasse norsk regelverk (N200 Vegbygging) til nytt dimensjoneringsystem (ME-dimensjonering)

AP 9 Implementering, pilotering og kompetanse

- Ansvarlig: Joralf Aurstad (Statens vegvesen Myndighet og regelverk)
- Hovedmål: Bygge langsiktig kompetanse innen analytisk dimensjonering av veger i Norge, samt sikre god plan for implementering av ERAPave PP i Norge

AP 10 Analyser

- Ansvarlig: Sara Anastasio (Statens vegvesen Drift og vedlikehold)
- Hovedmål: Bruke VegDim/ERAPave PP til å dokumentere hvordan vi i fremtiden bør bygge vegoverbygninger i Norge for å få en optimal vegoverbygning med tanke på lang levetid, lave livsløpskostnader og minst mulig klimabelastning/energiforbruk

2.2 Andre samarbeidspartnere

I Norge var det viktig for prosjektet å ha et godt samarbeid med erfarne vegteknologimiljø. Det er også viktig å ha satsninger innen vegteknologi som gir merverdi for hele fagmiljøet i landet. Vi hadde gjennom hele prosjektet et godt samarbeid med NTNU, der 2 professorer, 1 forsker og 3 post.doc studenter var involvert. I tillegg var UiA en samarbeidspartner en periode der en professor hadde 1 års forskertermin i samarbeid med prosjektet. Vi hadde også utlysning av et konsulentoppdrag der ViaNova vant, og vi fikk erfarne vegteknologer og vegplanleggere med på laget. Internt i Statens vegvesen bidro Fagressurs med feltnmålinger og labtesting.

I Sverige inngikk vi en samarbeidsavtale med Trafikverket om felles utvikling av ERAPave PP, og vi hadde god kontakt med VTI som utvikler ERAPave PP-programmet.

3. Resultater

Mye arbeid med utvikling og tilpasning av ME-dimensjoneringsystem i Norge er blitt gjort i VegDim-prosjektet. Dette kapitlet beskriver arbeidet og de viktigste resultatene som prosjektet har oppnådd.

3.1 Valg av ME-system (AP 2)

Det eksisterer flere ME-systemer i verden, og det er derfor fornuftig å vurdere om noen av disse egner seg for våre behov slik at vi ikke behøver å utvikle et nytt system i Norge. I begynnelsen av prosjektet gjennomførte vi derfor en evaluering av eksisterende ME-system som kunne tilpasses til norske forhold og som har tilstrekkelig fleksibilitet for videreutvikling, implementering og drift. Vurderingskriteriene som ble brukt var:

1. Mulighet til beregning av tilstandsutvikling
2. Skadetype(r) som ligger til grunn i ME-systemet er relevante for norske forhold
3. Fleksibilitet: mulighet til videreutvikling og justering av systemet
4. Frostdimensjonering er inkludert eller mulig å ta inn i systemet
5. Inndata om trafikkbelastning: mulighet for bruk av aksellastspektrum
6. Klimamodell er inkludert eller mulig å ta inn i systemet
7. Enkelthet i forhold til tilpasning til norske forhold
8. Tilgjengelighet og pris

Vurderingen er nærmere beskrevet i Statens vegvesen rapport nr. 524 ([Analytisk dimensjonering av vegkonstruksjoner: Evaluering og valg av system for norske forhold](#)). Resultatet er oppsummert i Figur 3.

System	Land	Vurdering opp mot kriterier 1 - 8							
		1	2	3	4	5	6	7	8
PMSObjekt	SE	Nei	Delvis	Nei	Ja	Nei	Nei	Nei	Gratis
ERAPave PP	SE	Ja	Ja	Ja	Ja ¹	Ja	Ja ²	Ja	Gratis
MMOPP nivå 3	DK	Ja	Ja	Nei	Nei	Nei	Nei	Uklart	Gratis
AASHTOWare ME	USA	Ja	Ja	Ja ³	Nei ⁴	Ja	Ja	Ja	Lisens
AdtoPave	DE	Nei	Delvis	Nei	Ja	Ja	Ja	Nei	Lisens
ALIZE –LCPC	FR	Nei	Delvis	Nei	Ja	Nei	Nei	Nei	Lisens
MnPave	USA	Nei	Delvis	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Gratis
I3C -ME	CA	Uklart	Delvis	Nei	Ja	Nei	Ja	Ja	Gratis
Østerrikske ME	AT	Nei	Delvis	Nei	Nei	Uklart	Nei	Nei	Uklart

¹ Under utvikling som en del av klimamodul

² Sporutvikling (både fra piggdekkslitasje og deformasjon) er inkludert i ERAPave PP

³ Utvikles og oppdateres kontinuerlig av AASHTO

⁴ Sannsynlig at en frostdimensjoneringsmodul utvikles og inkluderes i systemet i nær framtid

Figur 3: Evaluering av aktuelle ME-system

ERAPave PP (Elastic Analysis of Pavements – Performance Prediction) pekte seg ut som det systemet som var mest passende for videreutvikling og tilpasning til norske forhold:

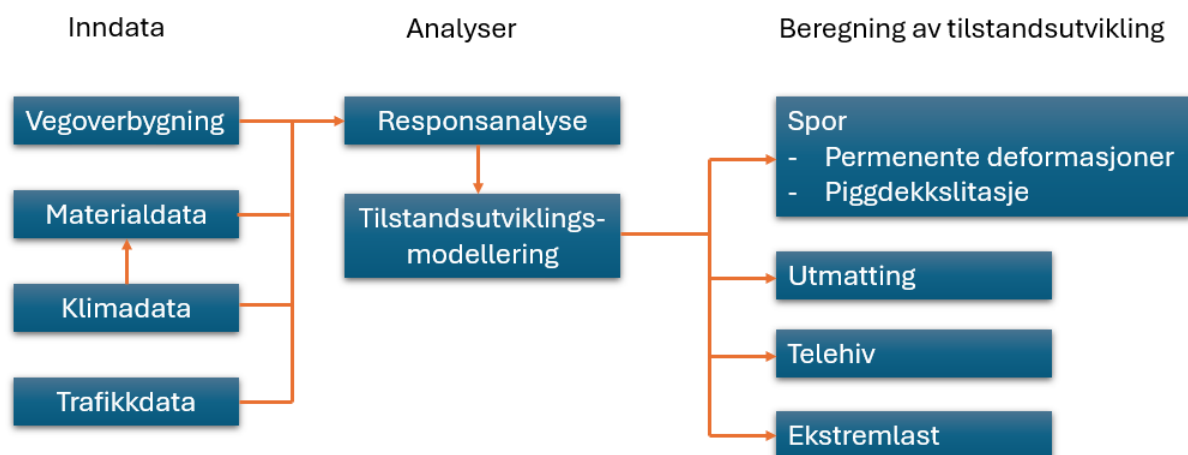
- ERAPave PP er under utvikling som gir mulighet til å gjøre nødvendige endringer.
- Dimensjoneringen er basert på sporutvikling, inkludert piggdekkslitasje, i tillegg til utmatting, som er veldig relevante skademekanismer for norske forhold.
- Det kan brukes både som dimensjonerings- og analyseverktøy.
- Trafikverket i Sverige er interessert i videreutvikling og bruk av ERAPave PP. Dette betyr at vi får en samarbeidspartner i utviklingsarbeidet og videre drift/oppdatering.
- Forholdene i Sverige er sammenlignbare med Norge når det gjelder klima, trafikk, materialtyper og byggemetoder, noe som kan gjøre det lettere å tilpasse ERAPave PP-systemet til norske forhold.
- En del av modellene som brukes i ERAPave PP er de samme som brukes i AASHTOWare ME. Dvs. de er utprøvde og funnet å være i rimelig god overensstemmelse med realistisk skadeutvikling, noe som også gir økt trygghet.
- ERAPave PP-modellene er validert ved bruk av akselererte forsøk i HVS (Heavy Vehicle Simulator).

Vi inngikk dermed et samarbeid med Trafikverket og VTI (Statens väg- och transportforskningsinstitut) i Sverige, der følgende oppgaver ble prioritert:

- Utvikling av klimamodell og frostdimensjoneringsmodul.
- Innhenting av materialdata, trafikkdata, og klimadata.
- Kalibrering av tilstandsutviklingsmodellene i ERAPave PP.
- Etablering av opplegg for videreutvikling, oppdatering og drift av VegDim/ERAPave PP-systemet.

3.2 Modeller i ERAPave PP

I dette avsnittet er modeller for responsanalyse og tilstandsutvikling som inngår i VegDim/ERAPave PP kort beskrevet. For mer informasjon om ERAPave PP vises det til VTI [Project: ERAPave PP - vti.se](http://project.ERAPavePP-vti.se).

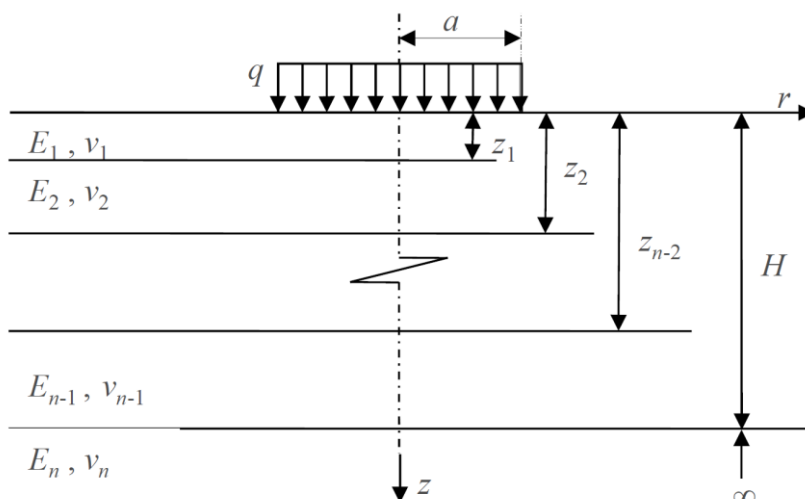


Figur 4: Skjematisk bilde av ERAPave PP. Kilde: oversatt fra VTI

Figur 4 viser hvordan flyten foregår i ERAPave PP. De fleste av modellene var allerede på plass i ERAPave PP da VegDim ble startet, men frostmodellen (beregning av frostnedtrengning og telehiv) og klimamodellen (beregning av temperatur i vegoverbygningen for beregning av permanente deformasjoner og utmatting i asfaltlag) ble utviklet og tatt inn gjennom prosjektperioden.

3.2.1 Responsmodell

Responsmodellen beregner spenninger og tøyninger som oppstår i vegoverbygningen pga trafikkbelastning under de gjeldende klimatiske forholdene. Responsmodellen som brukes er basert på elastisitetsteori for lagdelte vegoverbygninger (multi-layered elastic theory, MLET) som antar at alle materialer er homogene, isotrope og lineært elastiske, og at lagene har uendelig horisontal utstrekning og konstant tykkelse. Hjullast er modellert som en sirkulær kontaktflate med konstant trykk, og ved flere hjullaster brukes superposisjons prinsippet. Figur 5 illustrerer en typisk lagdelt vegoverbygning. Asfalt behandles som lineær-elastiske materialer, mens ubundne materialer og undergrunn kan behandles som lineær-elastiske eller ikke-lineær-elastiske (spenningsavhengige) materialer.



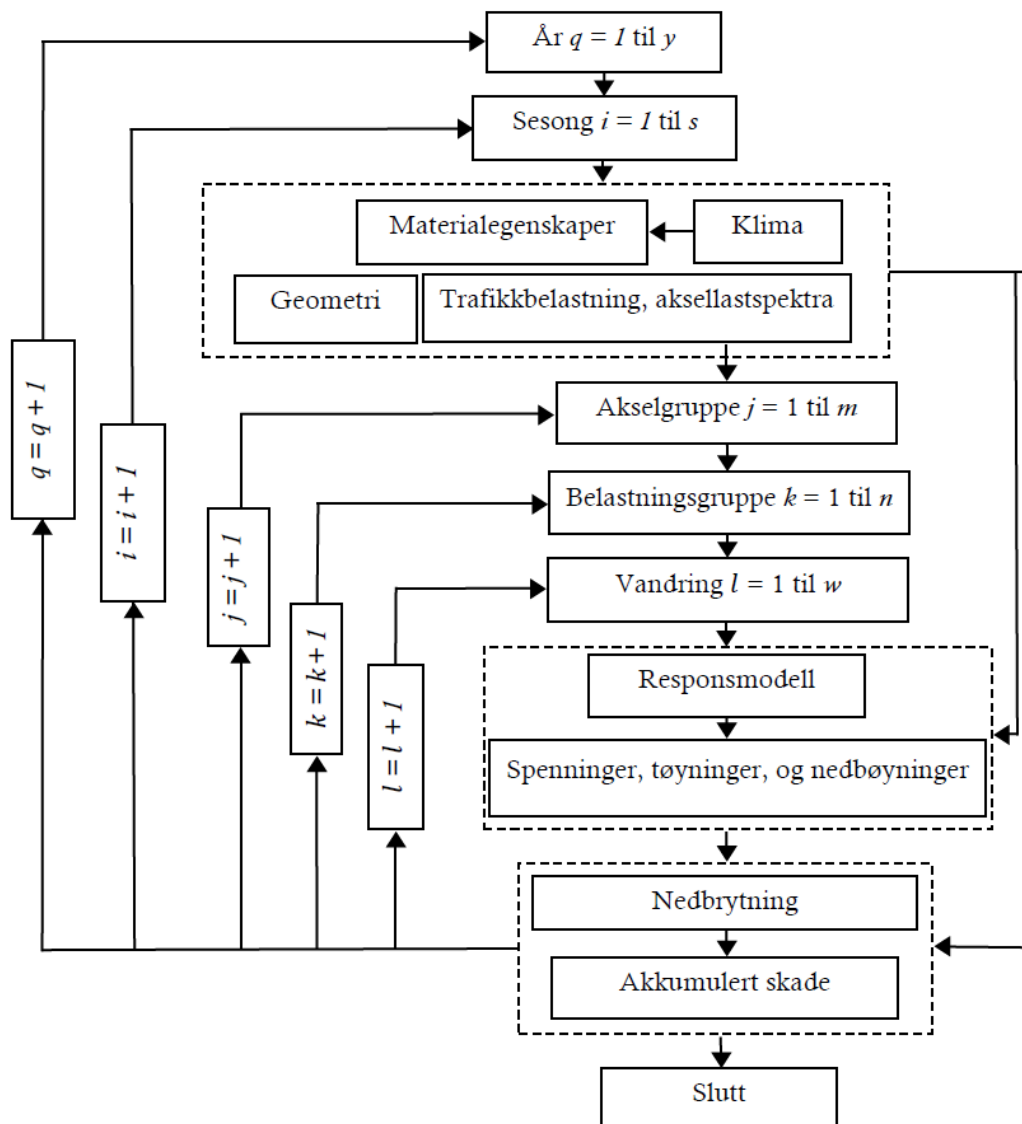
Figur 5: Illustrasjon av en typisk lagdelt vegoverbygning med E =stivhetsmodul, v =Poissons ratio, z_i =dybden til toppen av hvert lag, q = vertikalt trykk av en sirkulær last med radius= a , H =total tykkelse på vegoverbygningen, r og z er radielle og vertikale koordinater. Kilde: VTI

Mer detaljert beskrivelse av bruk av MLET i ERAPave PP er gitt i Erlingsson og Ahmed¹.

Figur 6 viser flyten i en ME-dimensjoneringsprosess. Dimensjoneringsperioden er delt inn et antall sesonger, der hver sesong er karakterisert med et sett av ulike klima- og trafikkforhold. For hver sesong blir vegoverbygningen analysert ved bruk av responsmodellen for de klimatiske forholdene og trafikkbelastningen den utsettes for. Avhengig av type trafikkdata som brukes kan analysen gjennomføres en gang per sesong (hvis ekvivalent standard axle load, ESAL, er inndata) eller flere ganger (hvis axle-load-spectra, ALS, brukes fra weigh-in-motion, WIM, eller bridge-weigh-in-motion, BWIM). Etter at responsanalysen for en gitt sesong er gjennomført, vil bidrag til nedbrytning/skade i vegoverbygningen pga trafikk og klima bli beregnet. Beregning av

¹Erlingsson, S. & Ahmed, A.: [Fast layered elastic response program for the analysis of flexible pavement structures: Road Materials and Pavement Design: Vol 14 , No 1 - Get Access](#)

tilstandsutvikling gjøres ved å bruke tilstandsutviklingsmodeller (også kalt transfer funksjoner). Spor (permanente deformasjoner for alle lag i vegoverbygningen inkludert undergrunnen og piggdekkslitasje for øverste asfaltlag) og utmatting av asfaltlagene er hovedskadetyperne i ERAPave PP. Disse prosessene gjentas for alle sesongene og skade summeres gjennom dimensjoneringsperioden. Sluttresultatet beregningene er data som viser skadeforløp (spor, utmatting mm) gjennom dimensjoneringsperioden for den angitte vegoverbygningen og materialer som utsettes for antatte belastninger fra klima og trafikk. ME-dimensjonering er dermed en iterativ prosess hvor man velger en vegoverbygning med et sett av materialelegenskaper og så gjennomfører ME-analyser for å forutsi hvordan vegoverbygningen vil prestere, slik at man kan justere lagtykkelser eller materialtyper inntil en akseptabel tilstandsutvikling er oppnådd i form av prognoser for skadeutvikling.



Figur 6: Flytskjema for dimensjonering ved bruk av ERAPave PP. Kilde: VTI (oversatt til norsk)

3.2.2 Tilstandsutviklingsmodeller

Tilstandsutviklingsmodellene beregner prognoser for nedbrytning/skadeutvikling over tid, og visualiseres i grafer med tilstandsutvikling som funksjon av tid.

Spormodeller

Totalt spor er summen av permanente deformasjoner i alle lag (asfaltlag, ubundne lag og undergrunn) og piggdekkslitasje i øverste asfaltlag.

Permanente deformasjoner

Hvert lag i overbygningen kan bidra i ulik grad til den totale permanente deformasjonen avhengig av lagtykkelse og stivhet til laget. Modell for sporutvikling pga permanente deformasjoner:

$$\delta_p = \int_0^\infty \varepsilon_p dz = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{p,i} \Delta z_i \quad [1]$$

der δ_p er spordybden, ε_p er permanent tøyning og Δz_i er tykkelse på lag i , n er totalt antall dellag.

Permanent deformasjonsmodell for **asfalt** er en funksjon av antall trafikkpasseringer, dekketemperaturen og resilient vertikalt tøyning som beregnes i responsmodellen:

$$\varepsilon_p(N) = aT^b N^c \varepsilon_r \quad [2]$$

der ε_p er akkumulert permanent tøyning etter N antall trafikklastrepetisjoner, T er asfalttemperaturen i °C, og a , b og c er regresjonskoeffisienter estimert fra labtesting, og ε_r er resilient vertikal tøyning som beregnes i responsmodellen.

Det er to permanente deformasjonsmodeller for **ubundne materialer og undergrunn** i ERAPave PP, der modell [4] er den som anbefales:

$$\varepsilon_p = a e^{-\left(\frac{b}{N}\right)^c} \varepsilon_r \quad [3]$$

der ε_p er akkumulert permanent tøyning etter N antall trafikklastrepetisjoner, a , b og c er materialparametere bestemt i lab, og ε_r er resilient vertikal tøyning som beregnes i responsmodellen.

$$\varepsilon_p = (a(S) + b) N^{c(\varepsilon_r)} \varepsilon_r \quad [4]$$

der ε_p er akkumulert permanent tøyning etter N antall trafikklastrepetisjoner, a (avhengig av metningsgrad S), b og c er materialparametere bestemt i lab (treaks), og ε_r er resilient vertikal tøyning som beregnes i responsmodellen.

Piggdekkslitasje

Den svenske VTI Slitagemodell (VTI Prognosmodell för beläggningsslitage) brukes for beregning av piggdekkslitasje. Den inneholder to submodeller som man kan velge mellom, der den ene tar utgangspunkt i kulemølleverdi og egenskaper til tilslaget, mens den andre bruker Prall-verdi og egenskaper ved dekketypen.

Basismodellen er at slitasjehastigheten W er gitt som:

$$W = f(x) * f_m * AADT_L * W_p * \frac{SST}{100} * W_{veh} \quad [5]$$

hvor

$$f(x) \text{ er en normalfordelt frekvensfunksjon } f(x) = \frac{1}{2,506 * \sigma} * e^{-0,5 \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2}$$

σ er standardavvik for valgt vegtype

x er avstanden i tverrprofilet

f_m er en materialfaktor

$AADT_L$ er årsdøgntrafikk for lette kjøretøy i valgt kjørefelt

W_p er slitasjeperioden

SST er gjennomsnittlig piggdekkandel i sesongen

W_{veh} er slitasjen per kjøretøy, for tiden satt til 0,00102 mm/kjøretøy

For begge submodeller brukes følgende inndata om trafikk for beregningene: Årsdøgntrafikk for lette kjøretøy ($AADT_L$) i valgt kjørefelt, piggdekkandel, slitasjeperiode (antall dager med piggdekkandel > 5 %), fartsgrense (km/t), vegtype og om det brukes salting eller ikke i vinterdriften (ja/nei). Vandring for de lette kjøretøyene (mm) og dimensjoneringsperiode (år) er oppgitt tidligere i programmet, og brukes også i beregningene.

For **kulemøllemodellen** er inndata for vegdekket: kulemølleverdi (A_N), maksimal steinstørrelse (D_{max} , mm) og andel tilslag > 4 mm (SMA_4 , vekt-%).

$$\text{Relativ slitasje: } RW = 2,493 + 0,144 * A_N - 0,069 * D_{max} - 0,017 * SMA_4 \quad [6]$$

Regresjonsmodellen er gyldig for A_N mellom 3-13, D_{max} fra 8 til 20 og SMA_4 mellom 40-75 vekt-%.

For **Prall-modellen** er inndata for vegdekket: Prall-verdi (A_P , cm³) og dekketype

$$\text{Relativ slitasje: } RW = 0,32 + 0,04 * A_P \quad [7]$$

Modellen er gyldig for A_P mellom 13-46 cm³.

For begge modeller er materialfaktoren $f_m = RW * f_v * f_s * f_{st}$

Hvor RW er relativ slitasje, f_v er en fartsfaktor, f_s er en saltfaktor, og f_{st} er en piggfaktor (empirisk satt til 0,75). Materialfaktorene er angitt i Tabell 1.

Tabell 1: Materialfaktorer for fart, salt og piggedekk

Fartsfaktor		Saltfaktor		Piggfaktor
Fart*	f _v	Salt	f _s	f _{st}
50	0,65	Ja	1,0	0,75
70	0,90			
90	1,20	Nei	0,8	
110	1,50			

* For andre hastigheter (v, km/t): $f_v = 0,0143 * v - 0,0775$, $R^2=0,9982$

Slitasjefordeling: Det er også en modell som beregner slitasjefordelingen på tvers av kjørefeltet, som er basert på trafikdens vandring (se Tabell 2):

$$\text{Slitasjefordeling: } f(x) = \frac{1}{2,506 * \sigma} * e^{-0,5\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad [8]$$

der $f(x)$ er normal frekvens fordelings funksjon, σ er standard avvik vandring for lette kjøretøy, og x er posisjonen (mellom $-1500 < x < 1500$ i trinn på 50 mm).

Tabell 2: Estimert trafikkvandring for norske vegtyper

Vegtype	ÅDT	Fartsgrense (km/t)	Vegbredde (m)	Vandring Lette kjøretøy Std.av. (mm)	Vandring Tunge kjøretøy Std.av. (mm)
H1	<6000	80	3,25	184	139
H2	6000-12000	90	3,5	199	150
H2 m/forbikj.	6000-12000	90	2X3,25	255	209
H3	>12000	110	2x3,5	362	208
Hø1 2f	<4000	80	3	172	130
Hø1 1f	<500	80	3	172	130
Hø1 minste	<4000	80	2,75	140	100
Hø2	<12000	60	3	172	130
L1	<15000	60/80	3	172	130
L2	<300	50	Ca. 4	238	179

Klima-/temperaturmodell

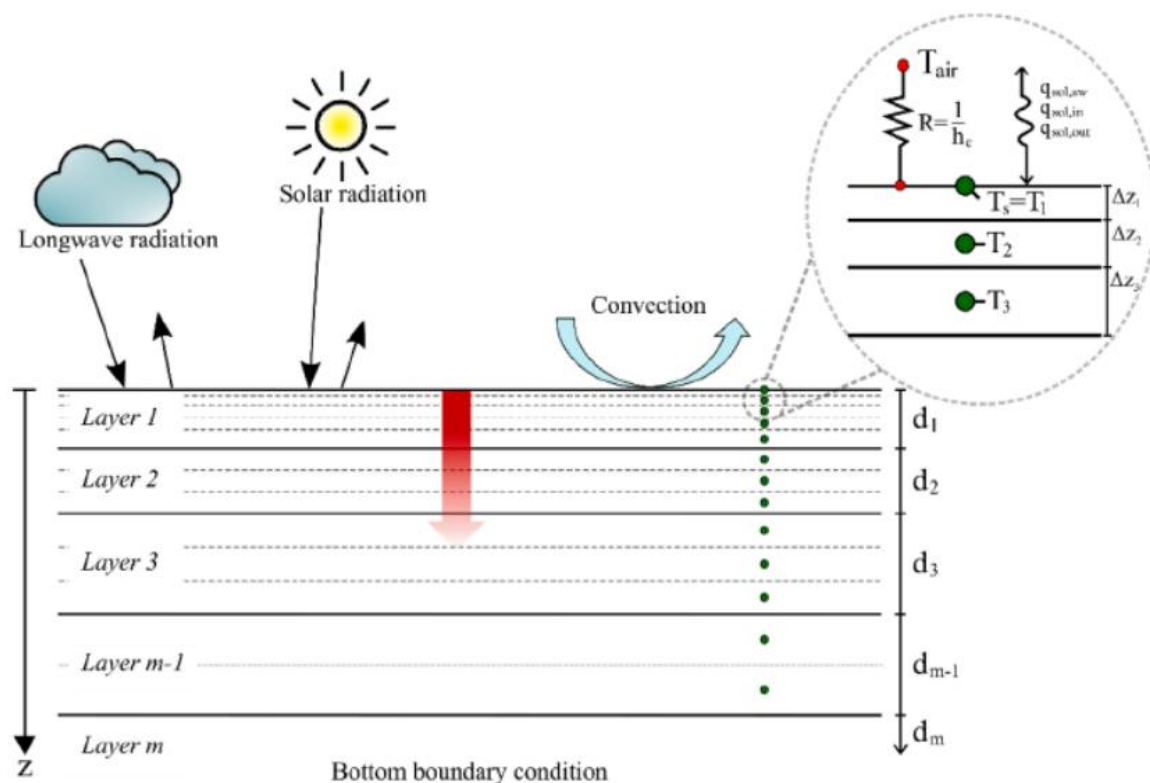
I VegDim/ERAPave PP brukes en modell for å beregne temperatur ved ulike dybder i vegoverbygningen. Temperaturmodellen er en endimensjonal «Finite Control Volume» FCV-modell, som kan beregne temperatur ved ulike dybder og tidspunkter basert på historiske data om lufttemperatur, solinnstråling og vindhastighet.

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 varmembalansen bestemmes av:

- varmeledning på grunn av temperaturforskjellen mellom vegdekks overflate og den omkringliggende luften,
- konveksjon som følge av vindbevegelse ved vegdekks overflate,
- solens kortbølget stråling, og
- innkommende og utgående langbølget stråling.

Etter at den øvre randbetingelsen er fastsatt basert på omgivelsene, deles (diskretiseres) vegoverbygningen opp, 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 7 illustrerer variablene som vurderes ved den øvre randbetingelsen, samt diskretiseringen av vegoverbygningen i kontrollvolumer (FCV-er).



Figur 7: Illustrasjon av varmeoverføring mellom en lagdelt overbygning og dens omgivelser. Kilde: VTI

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 0,2-4 μm), betegnet som $q_{sol,sw}$, er den netto solstrålingen som absorberes av vegdekkets overflate:

$$q_{sol,sw} = (1 - \alpha)Q_{sol} \quad [9]$$

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 4-100 μm):

$$q_{sol,in} = \epsilon_a \sigma (T_{air} + 273,15)^4 \quad [10]$$

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, $q_{sol,out}$, beregnes ved bruk av Stefan-Boltzmanns lov:

$$q_{sol,out} = \epsilon \sigma (T_s + 273,15)^4 \quad [11]$$

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 konvekktive varmefluksen, q_{conv} , mellom luften og vegdekkets overflate, som oppstår på grunn av luftstrømning eller bevegelse:

$$q_{conv} = h_c (T_{air} - T_s) \quad [12]$$

der h_c er konveksjonskoeffisienten, T_{air} er lufttemperaturen og T_s er vegdekkets overflatetemperatur ($^{\circ}\text{C}$).

Det finnes flere empiriske ligninger for beregning av konveksjonskoeffisienten, h_c . I VegDim/ERAPave PP brukes Vehrencamps modell:

$$h_c = 698,24a(0,00144\{abs[\frac{(T_s+273,15)+(T_{air}+273,15)}{2}]\}^{0,3} \times U^d + 0,00097[abs((T_s + 273,15) - (T_{air} + 273,15))]^{0,3}) \quad [13]$$

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:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [14]$$

der ρ er densiteten (kg/m^3), c_p er spesifikk varmekapasitet (J/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.

Frostmodell og beregning av telehiv

Beregning av frostnedtrengning og telehiv i VegDim/ERAPave PP gjøres ved hjelp av SSR-modellen (Seppo-Saarelainen-Routanousu). Modellen baserer seg på varmebalanse, se Figur 8, der all varmen går opp til overflata gjennom det allerede frosne laget:

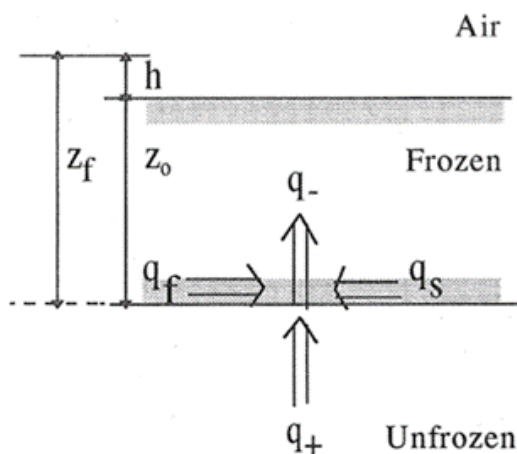
$$q_- = q_+ + q_f + q_s \quad [15]$$

der q_- = varmestrøm gjennom det frosne laget og opp til overflata

q_+ = varmestrøm fra den ufrosne grunnen

q_f = varmestrøm fra frysing av porevann

q_s = varmestrøm fra segregasjon (islinsdannelse)



Figur 8: Varmestrøm i vegoverbygningen (Kilde: VTI)

Varmebalansen kan også skrives på følgende måte:

$$k_f \cdot \frac{dT_-}{dz} = k_t \cdot \frac{dT_+}{dz} + L \cdot \frac{\Delta z_0}{\Delta t} + L_w \cdot SP \cdot \frac{|T_p|}{z^*} \quad [16]$$

der k_f = varmeledningsevne i de frosne lagene [W/(mK)]

$$\frac{dT_-}{dz} = \frac{T_f - T_p}{z^*} = \text{temperaturgradienten gjennom de frosne lagene [K/m]}$$

der T_f = frysetemperaturen til materialet

T_p = gjennomsnittlig overflatetemperatur i tidsinkrementet Δt [°C]

$$z^* = k_{fz} \cdot \sum \left(\frac{z_i}{k_{fi}} \right) + 0.5 \cdot \Delta z_0 = k_{fz} \cdot R_{fz} + 0.5 \cdot \Delta z_0 ; [\text{m}]$$

der k_{fz} = samlet varmeledningsevne i de frosne lagene ned til frostfronten [W/(mK)]

z_i = tykkelse av et frossent lag

k_{fi} = varmeledningsevne i et frossent lag [W/(mK)]

R_{fz} = frostmotstanden i de frosne lagene $= \sum \left(\frac{z_i}{k_{fi}} \right) ; [\text{m}^2\text{K/W}]$

k_t = varmeledningsevnen i de ufrosne lagene [W/(mK)]

$\frac{dT_+}{dz}$ = temperaturgradienten gjennom de ufrosne lagene [K/m]

L = volumetrisk latent varme fra frysing av materialer med opprinnelig vanninnhold [Wh/m³]

Δz_0 = frostfrontens nedtrengning i tidsinkrementet Δt ; [m]

Δt = tidsinkrement [h]

L_w = volumetrisk latent varme fra frysing av vann [Wh/m³] = 93 kWh/m³ = 334 MJ/m³

SP = segregasjonspotensialet for materialet ved gitt effektivspenning [m²/(Kh)]

T_p = gjennomsnittlig overflatetemperatur i tidsinkrementet Δt ; [°C]

Når likningen for varmebalansen løses med tanke på den inkrementelle frostnedtrengningen, Δz_0 , får vi:

$$\Delta z_0 = (T_f - T_p) \cdot \frac{1 - SP \cdot \frac{L_w}{k_{fz}}}{L_{fz} \cdot R_{fz}} \cdot \Delta t - \frac{S \cdot k_{tz} \cdot \frac{dT_+}{dz}}{L_{fz}} \cdot \Delta t \quad [17]$$

der $L_{fz} = w_t \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot L_w$ = volumetrisk latent varme fra frysing av materialer ved frysefronten [Wh/m³]

der w_t = vanninnhold (som desimaltall)

ρ_d = tørrdensiteten til materialet [kg/m³]

ρ_w = densiteten til vann [kg/m³], normalt 1000 kg/m³

S = koeffisient som beskriver intensiteten i jordvarmen ($S = 1,0$ i november avtakende til $0,7$ i april)

k_{tz} = varmeledningsevnen i ufrosset materiale ved frostfronten [W/(mK)]

Frostmodellen beregner frostnedtrengning og telehiv for en dimensjonerende frosts sesong (f.eks. en frostmengde som statistisk sett vil oppstå hvert 50. år) og er dermed en risikovurdering og ikke en beregning for reell tilstandsutvikling for hver enkelt vinter (årlig frosts sesong).

Utmatting

Modellen for utmatting (anbefalt av Shell) som er implementert i VegDim/ERAPave PP, relaterer den horisontale strekktøyningen ved bunnen av asfalten til antall lastsykluser til brudd:

$$N = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} E^{-f_3} \quad [18]$$

der N er antall lastsykluser til utmattingsbrudd (oppsprekking), f_1 , f_2 and f_3 er konstanter, ε_t er strekktøyning ved bunnen av asfaltlaget ($\mu\text{m}/\text{m}$), og E er stivhetsmodulen (MPa). Formelen kan også skrives som:

$$\log(N) = f_1 - f_2 * \log(\varepsilon_t) - f_3 * \log(E) \quad [19]$$

der N er antall lastsykluser til utmattingsbrudd (oppsprekking), f_1 , f_2 and f_3 er materialkonstanter, ε_t er strekktøyning ved bunnen av asfaltlaget ($\mu\text{m}/\text{m}$), og E er stivhetsmodulen (MPa) ved 10°C.

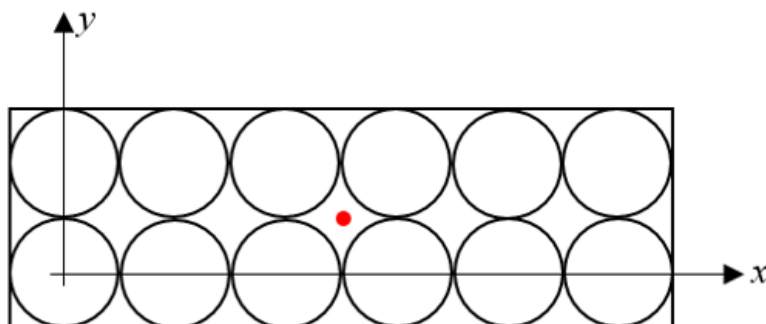
Utmattingsskade fra hver sesong og/eller belastningsnivå er akkumulert basert på Miners hypotese:

$$D_R = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad [20]$$

der D_R er skadegrad (damage ratio), N er antall lastsykluser til utmattingsbrudd for belastningsnivået i sesong i (oppsprekking), n er antall lastsykluser i sesong i , og m er antall sesonger.

Maksimal tøyning på toppen av undergrunnen

Tøyning under ekstremlast på toppen av undergrunnen kontrolleres mot maksimal tillatt tøyning for å unngå at overbygningen svikter under en slik belastning. Det beregnes en effekt på vegoverbygningen av en ekstremlast på 130 kN. I beregningen fordeles lasten jevnt over et rektangulært område med dimensjon på 200 x 600 mm, se Figur 9. Lastområdet består av 12 sirkulære arealer, der hvert sirkulært areal bærer 1/12 av den totale lasten.



Figur 9: Lastkonfigurasjon for ekstremlaster (Kilde: VTI)

Tøyningen er beregnet ved bruk av MLET som beskrevet i 3.2.1 Responsmodell.

3.2.3 Tilpasning av ERAPave PP til Norge

ERAPave PP er utviklet i Sverige og tilpasset svenske forhold og inndata, og programmet eksisterer i engelsk og svensk versjon. Det var derfor viktig å få tilpasset programmet til norske forhold og inndata. Dette har omfattet at databasen for vegbyggingsmaterialer og undergrunner ble oppdatert med norske materialer, kobling mot norske klimastasjoner og -data ved bruk av en kartløsning, og oversetting av betegnelser i programmet til norsk. Det ble gjort en første runde med kalibrering av sporutviklingsmodellen til norske forhold, og det ble satt inn en kalibreringskoeffisient for totalt spor i ERAPave PP. Arbeidet med kalibrering er nærmere beskrevet i 3.6 Kalibrering (AP6).

3.3 Utvikling av norsk web-versjon

I begynnelsen av 2023 startet prosjektet diskusjoner med IKT ansvarlig på Drift og vedlikehold i Statens vegvesen om fremtidig drift, oppdateringer, videreutvikling, support m.m. av ERAPave PP, og det ble klart at en desktop-versjon av ERAPave PP ikke passet norske behov og systemtekniske krav. En desktop-versjon ville medført at hver enkelt bruker trenger en versjon lokalt på sin PC. Dette er problematisk av flere grunner, blant annet pga. at mange firma har strenge sikkerhetskrav for nedlastninger, ulike versjoner ihht. oppdateringer av programvaren mm. Det ble konkludert med at det var ønskelig å utvikle en webapplikasjon i Statens vegvesens applikasjonsplattform (Atlas), og et utviklingsteam under Drift og vedlikehold ble tildelt oppgaven.

Utviklingsteamet startet for fullt arbeidet i sommeren 2023 hvor de gjennomførte kvalitativt innsiktsarbeid. Innsiktsarbeidet bestod av intervjuer med ulike brukergrupper og interessenter, og lesning av fagstoff og regelverk for opparbeidelse av domeneforståelse. Det ble også opprettet en arbeidsgruppe bestående av fagpersoner/domeneeksperter, designer og teknologer som videre har jobbet med tverrfaglig samskapning av webapplikasjonen. Innsikten ble raskt omformet til en prototype som ble brukertestet på både interne og eksterne vegteknologer og vegplanleggere for å validere løsningsforslaget så tidlig og billig som mulig. Her avdekket teamet brukervennlingshetsutfordringer og faglige hindringer som det ble jobbet videre med. Med et løsningsforslag klart begynte utviklingen av webapplikasjonen høsten 2023, og da så utviklingsteamet en mulighet for å tilgjengeliggjøre en N200 krav-kontroller for dagens erfaringsbaserte dimensjoneringsmetodikk. Dette endte opp med å bli den første versjonen av webapplikasjonen, og løsningen ble lansert 19. desember 2023. Det la fundamentet for utvikling av modulen for ME-dimensjonering, samtidig som de la til rette for at de første brukerne kunne ta i bruk løsningen. For implementering av ME-dimensjonering i Norge er det også en fordel at den er tilgjengelig i samme web-grensesnitt som den erfaringsbaserte modulen.

ME-modulen ble lansert 26. september 2025 med modellene for sporutvikling og telehiv, inklusiv mulighet for å laste inn egne materialer i programmet. Modell for beregning av utmatting i asfaltlag ligger foreløpig i en testversjon, og må verifiseres før den legges ut web-løsningen. Modell for beregning av maksimal tøyning mot undergrunn er ikke tilgjengelig enda i ME-modulen, men er neste på prioriteringslisten.



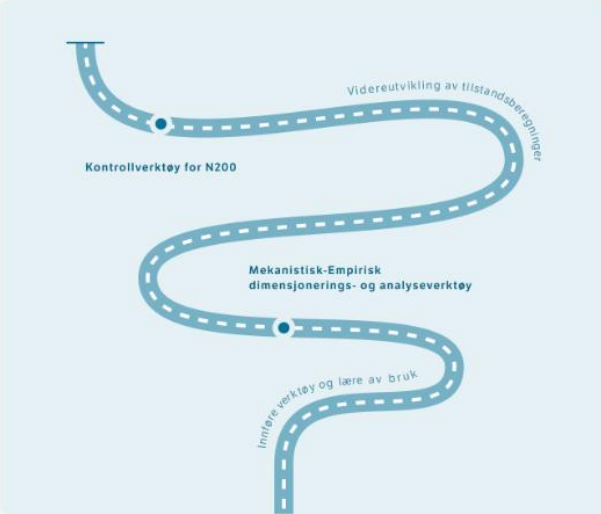
Statens vegvesen

Velkommen til VegDim

Vegvesenets system for dimensjonering av nye veger i henhold til N200 Vegbygging.

Start dimensjonering





Hva er VegDim i dag?

I dag er VegDim et kontrollverktøy som kan brukes når man dimensjonerer nye vegoverbygninger. Man kan bruke verktøyet for å verifisere at vegoverbygningene er utformet i henhold til de viktigste skal-kravene i N200. Verktøyet tydeliggjør eventuelle avvik og viser hvordan man går fram for å tilfredsstille kravene.

Hva er VegDim i framtiden?

Framover utvikler vi VegDim til å bli et mekanistisk-empirisk dimensjonerings- og analyseverktøy for nye vegoverbygninger. Man skal kunne bruke verktøyet for å hente ut prognoser for sporutvikling, utmatting, piggdekkslitasje og telehiv for gitte vegoverbygninger. Prognosene for tilstandsutvikling bygger videre fra ERAPave PP (utviklet av VTI)

Figur 10: Åpningssiden til VegDim på vegdim.atlas.vegvesen.no

Velg dimensjoneringsmetode

Statens vegvesen sin N200 Vegbygging legger opp til to ulike måter å dimensjonere veger på. Velg den metoden som du ønsker å bruke.

Avbryt



Mekanistisk-empirisk dimensjonering



Tradisjonell N200-dimensjonering

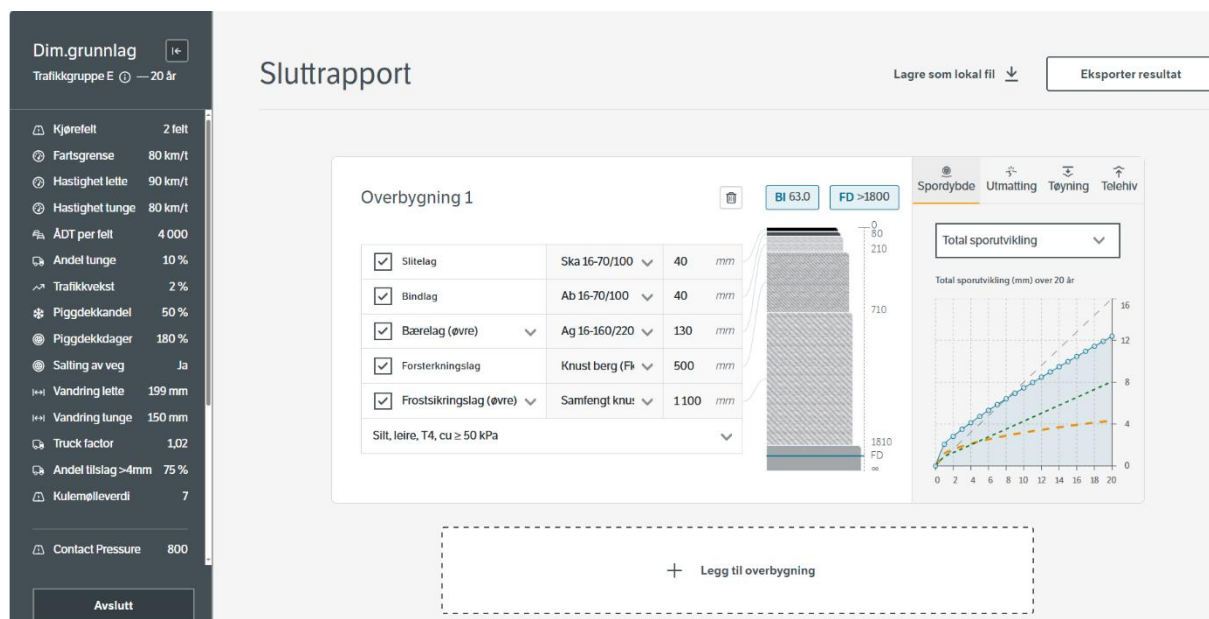
[Oversikt over krav fra N200](#) [Les mer om VegDim](#)



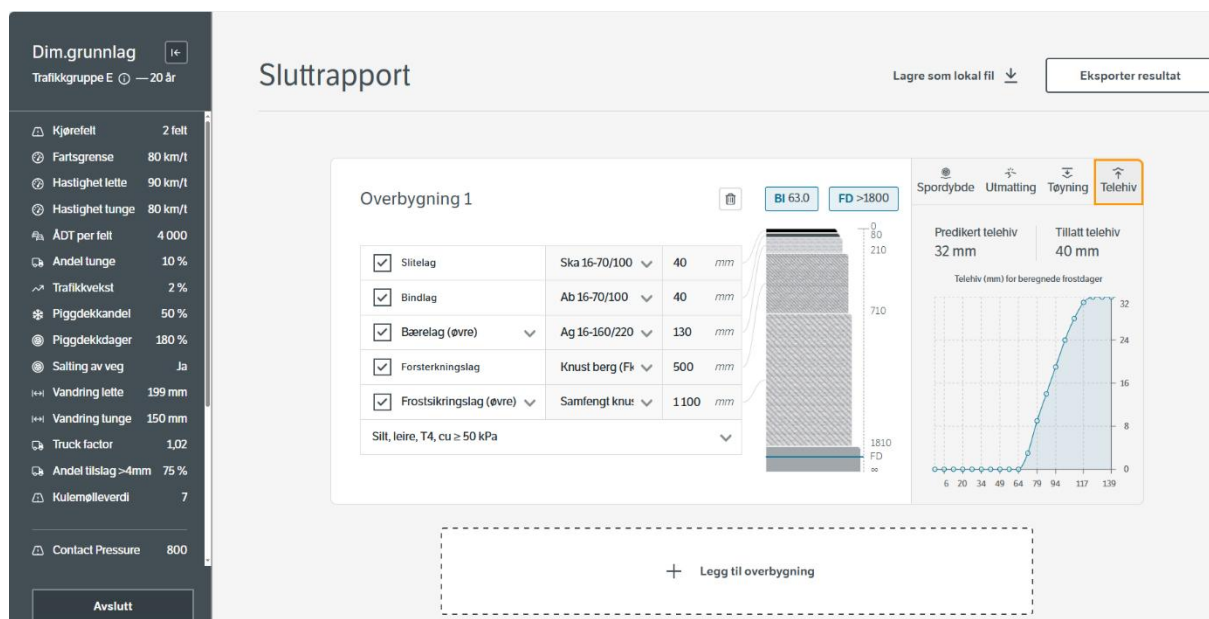
Statens vegvesen

Figur 11: Metodevelgeren i VegDim på vegdim.atlas.vegvesen.no/velgdimensjoneringsmetode/

I 2024 jobbet utviklingsteamet med å bygge en webapplikasjon med funksjonaliteten fra ERAPave PP. Dette innebar blant annet en portering fra C++, som ERAPave PP er programmert i, til Java som Statens vegvesen bruker. Det var også mye arbeid med å forstå både domenet og koden fra ERAPave PP, i samarbeid med utvikleren fra VTI. På slutten av året var tilstandsutviklingsmodellene for telehiv og sporutvikling på plass i en testversjon og klar for kalibrering. Videre står utmatting og tøyning for tur. Det har vist seg mer komplisert og tidkrevende enn først antatt å kopiere modellkoden fra ERAPave PP, og vi vurderer derfor mulighet for å utvikle de to siste modellene (utmatting av asfaltdekket og tøyning mot undergrunn) selv. Dette arbeidet vil skje etter at prosjektet er avsluttet.



Figur 12: Skjermbilde fra VegDim med eksempel på visualisering av prognose for total sporutvikling (blå linje) som er summen av deformasjon i alle lag (oransje linje) og piggdekkslitasje (grønn linje), sammenlignet med krav (stiplet grå linje)



Figur 13: Skjermbilde fra VegDim med eksempel på visualisering av predikert telehiv gjennom frostsesonen

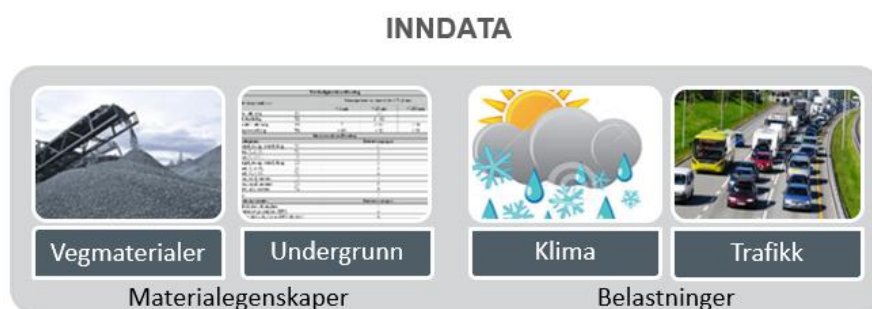
For å kunne validere at Statens vegvesen sin nye løsning ga de samme resultatene som ERAPave PP, var det nødvendig å basere webapplikasjonen på en omskriving som strukturelt er veldig lik ERAPave PP med hensyn til kode for konfigurasjon, beregningsmetoder, dimensjoneringsgrunnlag og resultater. Dette gjorde det mulig for oss å kjøre sammenlignbare tester for å verifisere at webapplikasjonen ga tilsvarende resultater som ERAPave PP, gitt det samme dimensjoneringsgrunnlaget.

Målet med den første versjonen av den norske webapplikasjonen var å få beregningsmotoren opp og gå, slik at flere kan teste beregningsmetodene, og det har vi lykket med. Tanken er å videreutvikle denne applikasjonen iterativt over tid, samtidig med at fagkunnskapen utvikles videre.

Resultatet av denne første porteringen av kode fra ERAPave PP er imidlertid ikke en ideell måte å strukturere en webapplikasjon på. For at applikasjonen skal kunne videreutvikles må det jobbes videre med omstrukturering og optimalisering. Dette vil gjøre applikasjonen enklere å vedlikeholde, men også gjøre det lettere å videreutvikle og tilpasse beregningsmodellene etter hvert.

3.4 Inndata

En viktig del av et ME-system er gode og pålitelige inndata, både for materialer i vegoverbygningen og undergrunn, men også for belastninger som klima og trafikk forårsaker. Tilgang på slike data er også svært viktig for implementering og pålitelighet til systemet. Prosjektet har derfor lagt stor vekt på å fremskaffe materialelegenskaper, klimadata og trafikkdata for Norge som beskrevet i de neste avsnittene.



Figur 14: Inndata i VegDim/ERAPave PP

3.4.1 Materialdata (AP 4)

Dimensjonering med bruk av ME-system krever andre typer materialelegenskaper og testmetoder sammenlignet med erfaringsbasert dimensjonering. For implementering av et ME-system er det viktig å ha data på de mest brukte materialene og de vanligste undergrunnene. Dette har vist seg som en kritisk faktor for hvor lang tid det har tatt å implementere lignende system i andre land. Det finnes mange ulike vegbyggingsmaterialer og undergrunnstyper i Norge. Det er svært ressurskrevende å få materialdata for disse, og prosjektet har derfor ikke hatt mulighet til å få testet eller estimert verdier for alle mulige varianter og det dukker stadig opp nye materialer. Det er derfor viktig å prioritere de materialene som er mest brukt. I begynnelsen av prosjektet

gjennomførte vi derfor en kartlegging blant i Statens vegvesen om hva som er de mest brukte materialene i vegbygging i Norge, og prioriterte å få egenskapene til disse materialene inn i en database, se Tabell 3.

På sikt vil vi åpne systemet for at brukere kan teste og legge inn sine egne materialer.

Tabell 3: Liste over norske materialer som inngår i materialdatabasen i VegDim/ERAPave PP

Lag	Materiale
Asfalt (slitelag, bindlag, bærelag)	Ab 11 (bindemiddel: 70/100, PMB) Ab 16 (bindemiddel: 70/100, PMB) Agb 11 (bindemiddel: 160/220, 330/430) Agb 16 (bindemiddel: 160/220, 330/430) Ska 11 (bindemiddel: 70/100, PMB) Ska 16 (bindemiddel: 70/100, PMB) Ma 11 (bindemiddel: V1500, V6000) Ma 16 (bindemiddel: V3000, V9000, V12000) Ag 16 (bindemiddel: 70/100, 160/220) Ap 16 (bindemiddel: 70/100)
Bærelag (ubunden)	Ak (sortering: 0/11, 0/16, 0/22, 0/32) Gk (sortering: 0/22, 0/32, 0/45, 0/63) Knust slagg (sortering: 0/22, 0/32, 0/45, 0/63) Fk (sortering: 0/22, 0/32, 0/45, 0/63) Fp (32, 45) Knust betong Gjb I (sortering: 0/22, 0/32, 0/45, 0/63) Resirkulerte materialer Gjn (sortering: 0/22, 0/32, 0/45, 0/63) Emulsjonsgrus Eg (til forkiling) Skumgrus (til forkiling) Bitumenstabilisert grus Bsg Bitumenanrikt grus Bag
Forsterkningslag	Pukk (sortering: 11/90, 16/90) Kult (sortering: 22/125, 22/180) Samfengt (sortering: 0/63, 0/90, 0/125, 0/180) Slagg i forsterkningslag Knust betong Gjb I i forsterkningslag Knust betong Gjb II i forsterkningslag Oppgravingsmasse og overskuddsmasse Gjn i forsterkningslag
Frostsikringslag	Løsmasser Knust berg i frostsikringslag Oppgravingsmasse og overskuddsmasse Gjn i frostsikringslag Lettklinker Skumglass Slagg i frostsikringslag Knust betong Gjb I i frostsikringslag Knust betong Gjb II i frostsikringslag
Undergrunn	Steinfylling /bergskjæring T1 Steinfylling /bergskjæring T2 Grus, $CU \geq 15$, T1 Grus, $CU < 15$, T1 Sand, $CU \geq 15$, T1 Sand $CU < 15$, T1 Grus, sand, morene, T2 Grus, sand, morene, T3 Silt, leire, T4, $cu \geq 50$ kPa Silt, leire, T4, $37,5 \leq cu < 50$ kPa Silt, leire, T4, $25 \leq cu < 37,5$ kPa Silt, leire, T4, $cu < 25$ kPa

Beregning av spenninger og tøyninger (responsmodellen) i VegDim/ERAPave PP er basert på elastisitetsteori for lagdelte konstruksjoner der de elastiske materialegenskapene inngår som inndata. Elastiske materialegenskaper som omfatter E-modul/stivhetsmodul og tverrkontraksjonstall² for asfaltmaterialer og ubundne materialer (inkludert undergrunn) må bestemmes. I tillegg må materialegenskaper for beregning av tilstandsutvikling også bestemmes.

For asfalt ble dynamisk modul bestemt ved lab-testing. Den dynamiske modulen avhenger av temperatur og belastningshastighet (frekvens), og fremstilles ved bruk av en masterkurve med den dynamiske modulen som en funksjon av frekvens eller temperatur. Testingen ble gjennomført på lab-tilvirkede prøver med tilslag fra Vassfjell, grus fra Forset, og kalkmel fra Hylla. Testingen for å bestemme dynamisk modul er basert på EN 12697-26.

Masterkurve for asfalt etableres ved bruk av ligning [21]:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(f_r)}} \quad [21]$$

der E^* er den dynamiske modulen, δ og $\delta + \alpha$ representerer verdien av den dynamiske modulen ved henholdsvis uendelig lav og uendelig høy frekvens, β og γ er modellparametere, og f_r er den reduserte frekvensen.

For beregning av piggdekkslitasje er det to modeller i ERAPave PP som krever ulike inndata som hver enkelt bruker må skaffe selv:

- **Kulemøllemodellen:** det må angis mølleverdi (A_N), andel av tilslagsmaterialet som er større enn 4 mm, og største steinstørrelse for tilslaget i tillegg til om vegen saltes eller ikke (ja/nei)
- **Prall-modellen:** Prall-verdi for asfaltmassen må angis i tillegg til om vegen saltes eller ikke (ja/nei)

Ubundne materialer er ofte grove materialer som er vanskelig å teste i laboratoriet. Stivhetsmodulen til de ubundne materialene påvirkes av spenningsnivået og fuktinnholdet, og beregnes med ligning [22]:

$$\log \frac{M_R}{M_{opt}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp\left(\ln \frac{-b}{a} + k_m(S - S_{opt})\right)} \quad [22]$$

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.

Det er derfor viktig å ha estimerer for stivhetsmodul og dens variasjon. For de grove ubundne materialene (forsterkningslagsmaterialer og frostsikringsmaterialer) ble ulike metoder brukt for å estimere E-modulverdier: etterregning av E-modul fra bæreevnemålinger (fallodd), og litteratursøk for å se om det finnes data fra andre land og annen testing. For noen undergrunnsmaterialer (silt og marin leire) ble det gjennomført lab-testing med treks hos VTI for å bestemme stivhetsmodul. Andre materialdata omfatter varmeledningsevne, latent fusjonsvarme, segregasjonspotensial, og tørrdensitet.

Arbeidet med materialdatabasen er nærmere beskrevet i [Statens vegvesen rapport nr.1067](#).

² Også kalt Poissons tall, som er et mål for hvor mye materialet utvider seg i tverretningen når det blir trykket sammen i lengderetningen

3.4.2 Klimadata (AP 6)

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 (ligning [22]) som beskriver sammenhengen mellom stivhetsmodulen til ubundne materialer og metningsgrad (fuktinnhold), se Tabell 4. 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.

Tabell 4: Lengde på teleløsningsperioden og metningsgradverdier som benyttes i VegDim/ERAPave PP. Metningsgrad i teleløsningsperioden er basert på dreneringstilstand (god, middels, dårlig), og teleløsningsperioden kan deles i to perioder med to ulike metningsgrader for første/andre halvdel av teleløsningsperioden.

Klima- sone	Frostindeks (F2, h°C)	Lengde på teleløsningsperioden (døgn)	Metningsgrad i teleløsningsperioden (%)		
			God	Middels	Dårlig
1	< 7 200	14	60	85	98
2	7 200-14 400	28	60	85	98
3	14 400-21 600	42	85/60	98/85	98
4	21 600-28 800	56	85/60	98/85	98
5	> 28 800	84	85/60	98/85	98

Det pågår et arbeid med å etablere et system som leverer inngangsdata til temperaturmodellen i et 1x1 km grid-kart. Disse dataene skal modelleres og beregnes ved bruk av målte 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.

[Statens vegvesen rapport nr. 1066](#) beskriver arbeidet som er gjennomført i prosjektet.

Frostmodellen som brukes i ERAPave PP (SSR-modellen) krever en del klimadata som brukes til å beregne frostnedtrengning og telehiv. Viktige klimadata i modellen er frostmengde og årsmiddeltemperatur.

[Statens vegvesen rapport nr. 1089](#) beskriver eksisterende modeller og nye muligheter for modellering av telehiv for det norske vegnettet.

3.4.3 Trafikkdata (AP 5)

Trafikkbelastning er, i tillegg til klima, en av de viktigste nedbrytningsfaktorene for vegoverbygninger. Det er spesielt de tunge kjøretøyene (ÅDTT) som bryter ned vegoverbygningen i tillegg til at piggdekk sliter på det øverste asfaltlaget. Det er derfor viktig å ha god oversikt over ÅDT, ÅDTT, piggdekkandel og kjøretøyenes vektdata (aksellaster og antall aksler).

Tunge kjøretøy

Belastning fra tunge kjøretøy er den viktigste trafikkrelaterte faktoren for nedbrytning av vegoverbygninger. I Norge har vi god oversikt over antall tunge kjøretøy (ÅDTT) som trafikkerer vegnettet basert på lengderegistrering, men lite informasjon om den reelle vekten og akselkonfigurasjoner for de tunge kjøretøyene. For beregning av tilstandsutvikling på vegnettet er det nødvendig med informasjon om vekt og antall aksler for de tunge kjøretøyene. Slike data er tilgjengelig fra bl.a. WIM-installasjoner (Weigh-In-Motion). I prosjektet ble det gjennomført en analyse av data fra fire utvalgte WIM-installasjoner (Rv3 Ånestad, E39 Øysand, E6 Verdal og E8 Skibotn) i tillegg til at vi fikk installert WIM på E6 Helgeland.

Beregning av trafikkbelastning i N200 Vegbygging:

$$N = 365 \cdot C \cdot E \cdot \text{ÅDTT} \cdot f \cdot \frac{(1,0+0,01p)^{20}-1}{0,01p} \quad [23]$$

der:

- N = antall ekvivalente 10 tonns aksler i dimensjoneringsperioden (20 år)
- C = gjennomsnittlig antall aksler/tungt kjøretøy (2,4)
- E = gjennomsnittlig ekvivalensfaktor for akslene på tunge kjøretøy (E=0,427 for veger med tillatt aksellast på 10 tonn). E beregnes ut ifra vekt på de enkelte akslene og deres bidrag til nedbrytning av vegen sammenlignet med en 10 tonns aksel (ut ifra 4. potensregelen³)
- ÅDTT = gjennomsnittlig antall tunge kjøretøy/døgn i åpningsåret for vegen (alle kjøretøy med lengde > 5,6 m)
- f = fordelingsfaktor for tungtrafikken i kjørefeltene. Beregnes ut fra mengde tungtrafikk på dimensjonerende kjørefelt i forhold til total mengde tungtrafikk over alle kjørefelt:
 - 1-feltsveg: f = 1,0
 - 2-feltsveg: f = 0,50
 - 4-feltsveg: f = 0,45
 - 6-feltsveg: f = 0,40
- p = forventet årlig trafikkvekst for tunge kjøretøy (%)

C og E er de to faktorene som angir belastningen fra tungtrafikken i det norske dimensjoneringsystemet. I vegnormalen er det imidlertid ikke beskrevet hvordan akselgrupper (boggiaksler, trippelaksler osv.) skal behandles ved beregning av nedbrytende effekt. Derfor er det i denne analysen valgt å benytte samme beregningsmetode som i Sverige ved behandling av nedbrytende effekt fra ulike akselgrupper.

³ 4. potensregelen: nedbrytningen for alle aksellaster regnes om til den nedbrytningen et antall standardaksler vil gi (som standardaksel benyttes en enkel aksel med tvillingmontert hjul med 10 tonns aksellast i det norske dimensjoneringsystemet): Ekvivalensfaktor = (Aksellast/Standardaksellast)⁴

I Sverige beregner en ikke faktorene C og E som i Norge. De beregner først en B-faktor for hvert enkelt kjøretøy etter følgende formel:

$$B_{kj\ddot{o}ret\ddot{o}y} = \sum_{i=1}^j \left(\frac{\text{akselast}}{\text{standard aksellast}} \right)^4 \quad [24]$$

der i = enkeltaksling eller akselgruppe

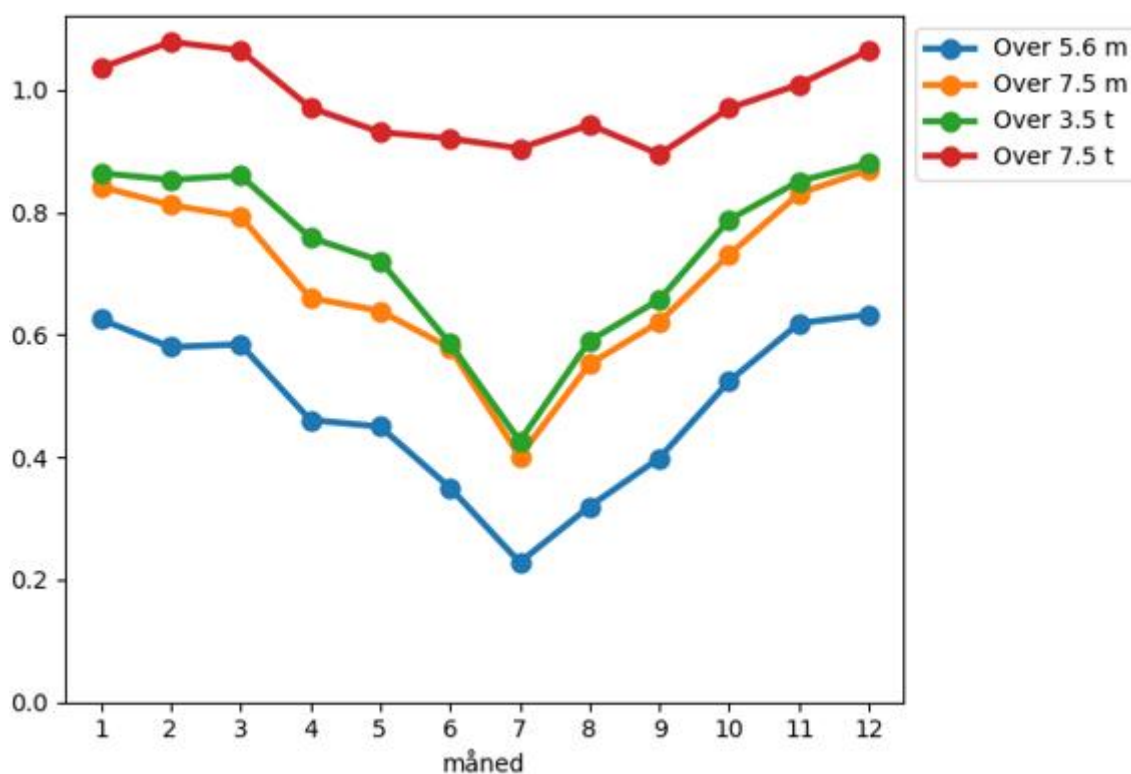
B-faktoren betegnes ofte som ESALS (Equivalent Single Axle LoadS) og i ERAPave PP betegnes den som «Truck factor».

B-faktoren for en veg eller et prosjekt beregnes som gjennomsnittlig nedbrytende effekt etter følgende formel:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n B_{kj\ddot{o}ret\ddot{o}y} \quad [25]$$

der n = antall tunge kjøretøy som trafikkerer vegen i beregningsperioden

Figur 15 viser B-faktor beregnet for de fire WIM-installasjonene som inngår i analysen i VegDim. De fire kurvene fremstiller B-faktoren med forskjellig utvalg av hvilke kjøretøy som inngår i beregningen, dvs. kjøretøy med lengde over 5,6 eller 7,5 meter og vekt over 3,5 eller 7,5 tonn.



Figur 15: B-faktor for forskjellig grunnlag av hvilke kjøretøy som inngår i beregningene

Ved trafikkregistreringer i Norge registreres ÅDTT som kjøretøy over 5,6 meter (blå kurve i figur 15). Dette medfører en betydelig reduksjon i B-faktor (relativ nedbrytende effekt) spesielt på noen veger i sommermånedene fordi mange lette kjøretøy (bobiler, varebiler, minibusser og personbiler med henger eller campingvogn) registreres som tunge kjøretøy.

Det anbefales derfor at grensen for lengdeklassifiseringen av tunge kjøretøy økes fra 5,6 til 7,5 meter. En vil da oppnå et mer reelt skille på at alle kjøretøyene som registreres som tunge også bidrar til nedbrytningen av vegene. Dette vil også gi bedre samsvar med kjøretøyforskriften og

vegnormalenes definisjon av ÅDTT (kjøretøy med tillatt totalvekt over 3,5 tonn) samt tilsvarende grense i Sverige.

Basert på erfaringene fra denne analysen anbefales det også at vi i Norge går over til B-faktor som på flere måter vil være både enklere og ryddigere enn å beholde C- og E-faktorene vi i dag benytter.

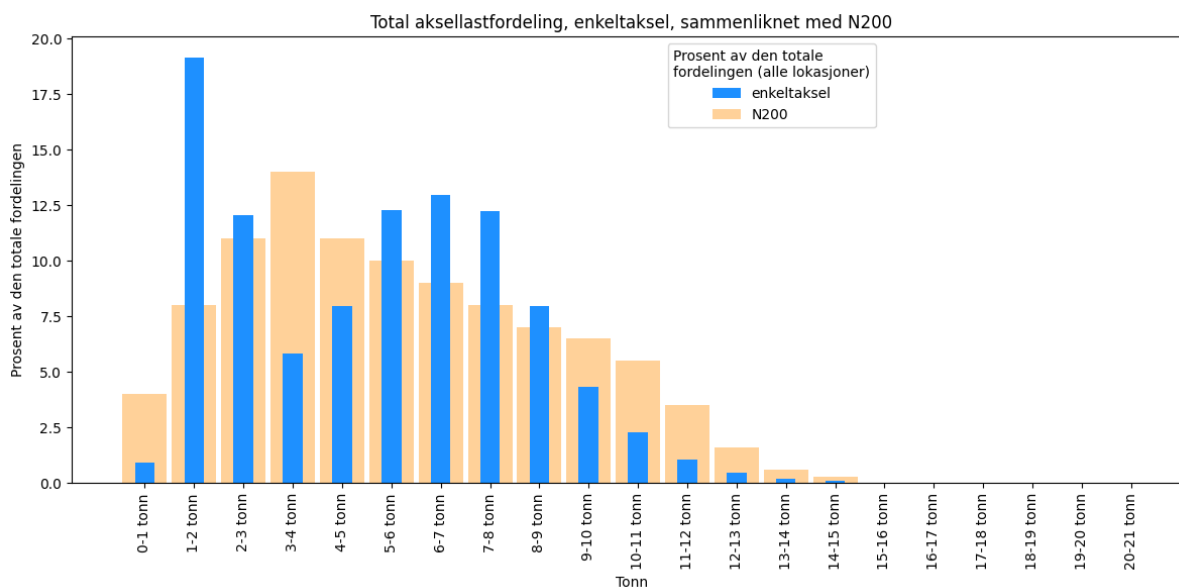
Ved ME-dimensjonering benyttes i dag en gjennomsnittlig B-faktor («Truck factor») på 1,02 som er basert på normalverdiene for C og E i N200. Disse faktorene varierer imidlertid mye, avhengig av trafikksammensetningen på den aktuelle veglenken. Figur 16 illustrerer dette, der trafikkdata for Sørbryn, Ånestad og Tangensvingen er vist i et kartutsnitt av vegene i området. Data for Ånestad og Tangensvingen er skaffet til veie gjennom registreringer med Bridge-WIM i prøveprosjektet med 74-tonn tømmervogntog og bearbeidet i VegDim.

Bedre dokumentasjon av belastningen fra de tunge kjøretøyene vil gi mulighet til å optimalisere vegoverbygningene bedre i forhold til reell belastning på den aktuelle strekningen og gi en mer korrekt beregning av tilstandsutviklingen.



Figur 16: Trafikklenker for tre veglenker (målepunkter) i Stange og Elverum

Basert på data fra de fire utvalgte WIM-installasjonene er det i VegDim også beregnet aksellastfordelinger og totalvekter for tunge kjøretøy. Figur 17 viser aksellastfordelingen for enkeltaksler, der de blå søylene viser fordelingen slik den er registrert i dag og de oransjegule søylene viser fordelingen i N200.



Figur 17: Aksellastfordeling for enkeltaksler i N200 sammenliknet med oppdaterte registreringer i VegDim

Aksellastfordelingene i N200 er basert på vektregistreringer av tunge kjøretøy på 1970-tallet. Våre beregninger i VegDim er som nevnt basert på registreringer i fire WIM-installasjoner der alle kjøretøy med lengde over 5,6 meter regnes med. Derfor er det til dels betydelig forskjell på fordelingen som er lagt til grunn i N200 og aksellastfordelingen for de kjøretøyene som i dag registreres som tunge kjøretøy (ÅDTT), spesielt for de små aksellastene.

[Statens vegvesen rapport nr. 1092](#) gir en nærmere beskrivelse av arbeidet med beregning av trafikkbelastning fra tunge kjøretøy.

Piggdekkslitasje

For beregning av piggdekkslitasje brukes den svenske VTI Slitagemodell (VTI Prognosmodell för beläggningsslitage) der kun de lette kjøretøyene inngår. Trafikkdata som brukeren må angi er beskrevet i 3.2.2 *Tilstandsutvikling under Piggdekkslitasje*.

3.5 Krav (AP 8)

ME-dimensjonering er en ny måte å dimensjonere vegoverbygninger på som vil kreve endringer i regelverket for vegbygging i Norge, N200 Vegbygging, for at det skal tillates bruk av VegDim og ERAPave PP som dimensjoneringsmetoder. N200 ble revidert og ny normal ble publisert 5. juli 2024 der det ble åpnet for å benytte programvarene VegDim og ERAPave PP, men inndata og resultater fra dimensjoneringen må sendes til Vegdirektoratet for gjennomgang og godkjenning. Dette er fordi dimensjonering med VegDim/ERAPave PP er å anse som en pilot, og at det dermed er viktig å sikre at dimensjoneringsverktøyene blir benyttet etter hensikten og at de gir rimelige resultater. Vegdirektoratet ønsker dessuten å skaffe erfaring med bruk av disse applikasjonene for å kunne foreta justeringer både i selve applikasjonene og i de kravene som stilles i N200 Vegbygging. Dette ble kort beskrevet i forordet i N200: *«Videre innføres mulighet for å bruke dimensjoneringsystemet VegDim/ERAPave PP. For å minimere risiko og vinne erfaring, skal dimensjonering etter VegDim/ERAPave PP sendes inn til Vegdirektoratet, Myndighet og regelverk for gjennomgang og godkjenning.»*

Videre legges det til grunn at dimensjoneringsgrunnlaget i delkap. 3.1 og materialkravene i kap. 4 i N200 benyttes. F.eks. gjelder dette trafikkgrunnlaget, krav til grunnundersøkelser, bruksområder for materialtyper og en del andre dimensjoneringsmessige vurderinger. Det kan være forhold omtalt i delkap. 3.1 som er dekket på andre måter i VegDim/ERAPave PP – i så fall kan man benytte det som ligger i VegDim/ERAPave PP. Et eksempel her kan være teleteknisk materialklassifisering. Hovedhensikten bak det å legge eksisterende dimensjoneringsgrunnlag og materialkrav til grunn, er at man kan ha et felles grunnlag sammen med tradisjonell dimensjonering der dette er mulig og hensiktsmessig. I kapittel 3 *Dimensjonering av vegoverbygning* ble derfor følgende formulering tatt inn: *«Dimensjoneringen kan foretas på to måter, enten som beskrevet i kapitlene 3.1-3.9, eller ved hjelp av dimensjoneringsystemet VegDim/ERAPave PP beskrevet i kapittel 3.10. Dimensjoneringsgrunnlaget i kapittel 3.1, tabell 3.2.1—1 og materialkrav i kapittel 4 legges til grunn også for dimensjonering med VegDim/ERAPave PP.»*

Det nye delkapitlet 3.10 *Dimensjonering ved hjelp av VegDim/ERAPave PP* beskriver de nye kravene som er tatt inn for dimensjonering: tilstandsutvikling over tid (maksimalt tillatt spor og utmatting), maksimal tillatt tøyning mot undergrunnen og størrelse på maksimalt tillatt telehiv. Dette er nærmere beskrevet i [Statens vegvesen rapport nr. 1094](#), og oppsummert i de følgende avsnittene i rapporten.

Kravene til sporutvikling, utmatting og tøyning mot undergrunn er tilsvarende som Trafikverket stiller, mens telehiv er egne norske krav.

3.5.1 Sporutvikling

På store deler av vegnettet er sporutvikling den viktigste årsaken til reasfaltering, og det er derfor viktig å stille krav til spor for å sikre god levetid for hele vegoverbygningen. For riksveg er utløsende vedlikeholdskrav 25 mm (for ÅDT 0-5 000) og 20 mm (for ÅDT >5 000) beregnet som 90 persentil av 20 meters verdier for parsell med 1000 meters lengde. Det skyldes at dype spor kan være trafikkfarlig, spesielt ved regn (pga. fare for vannplaning og vannsprut) og vedlikehold blir vanskelig (f.eks. snø-/isfjerning).

Sporutvikling kan deles inn i 3 hovedtyper: slitasjespor (i øverste asfaltlag pga piggdekkslitasje), plastisk sammentrykking (i alle lag inklusiv undergrunn) og skjærdeformasjoner (sideveis forskyvning av asfaltmassen og ubundne lag). Jo lenger ned i vegoverbygningen skaden skjer, jo vanskeligere er det å få gjort noe med den. Det er derfor viktig å dimensjonere en vegovebygning som er sterk nok til å tåle belastningene den blir utsatt for.

Kravene til sporutvikling er satt til maksimal årlig sporutvikling (mm/år) som er summen av deformasjon og piggdekkslitasje for ulike ÅDT-intervaller og fartsgrenser. Det er strengere krav til årlig sporutvikling jo høyere fartsgrense på vegen (km/t), og det aksepteres høyere årlig sporutvikling for høyere trafikkmengde (ÅDT), se Tabell 5.

Tabell 5: Krav til maksimal årlig sporutvikling (mm/år). Kilde: N200 Vegbygging:2024

ÅDT	Vegens fartsgrense (km/t)						
	110	100	90	80	70	60	≤ 50
0 - 250	-	-	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8
251 - 500	-	-	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8
501 - 1000	-	-	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
1001 - 2000	-	-	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
2001 - 4000	-	-	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1
4001 - 8000	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	1,1
> 8000	0,8	0,9	0,9	1,1	1,1	1,3	1,3

Dette er det samme som de svenske kravene, bortsett fra at det ikke er satt krav til årlig sporutvikling for veger med ÅDT mindre eller lik 4 000 med fartsgrenser på 100 eller 110 km/t siden disse kombinasjonene ikke er aktuelle på det norske vegnettet.

3.5.2 Utmatting av asfaltdekket

Utmatting («trettthetsbrudd») er en viktig skademekanisme for asfaltdekker og oppstår pga gjentatte belastninger hvor hver enkelt strekkspenning er mindre enn materialets styrke. Utmatting skyldes at trafikkklaster (repeterte belastninger og nedbøyninger fra tunge kjøretøy) forårsaker gjentatte horisontale strekkspenninger i underkanten av asfalten som over tid vil overskride asfaltens strekkstyrke og forårsaker utmattingssprekker. Oppsprekking svekker vegoverbygningen i betydelig grad og fører til en akselerert skadeutvikling. Den lastfordelende evnen til asfaltdekket blir kraftig redusert og vann trenger lettere ned i de underliggende granulære lag som dermed også mister mye av sin stivhet og deformasjonsmotstand. Resultatet blir en raskere utvikling av spor og ujevnheter.

Kravet for utmatting er at Palmgren-Miner-sum («damage ratio») skal være mindre eller lik 0,5 etter 20 år, noe som betyr at det er en gjenværende utmatningslevetid for asfalten.

Som kjent oppstår i teorien omfattende utmattingsskader (brudd i materialet) når Palmgren-Miner-summen blir 1,0. Tanken bak kravet er at man ønsker å ha en viss sikkerhet mot sprekkedannelse ved utmatting. Dersom slike sprekker først oppstår, er de vanskelige å bli kvitt ved vanlig vedlikeholdsasfaltering siden refleksjonssprekker kan oppstå (dvs. at sprekker i underliggende asfalt initierer nye sprekker i nye, overliggende lag). En fullstendig reparasjon vil derfor ofte kreve at man fjerner dekket i hele sin tykkelse og legger nytt dekke.

Også dette kravet er likt med det svenske kravet.

3.5.3 Tøyning mot undergrunn

Under ekstreme laster kan tøyningen mot undergrunnen overskride undergrunnsmaterialets styrke, og kan forårsake store deformasjoner og setninger. Det er kostbart å reparere slike skader. Dette er særlig relevant for veger med relativt tynne overbygninger. Det er derfor viktig å stille krav og kontrollere at tøyningen ikke overskrider maksimal tillatt tøyning for undergrunnsmaterialet.

Det stilles krav til tøyning mot undergrunnen, dvs. hvor stor den vertikale trykktøyningen kan være. Kravene avhenger av type jordart i undergrunnen (som friksjonsjordarter og kohesive jordarter) og frostmengde F_{50} ($h^{\circ}C$), se Tabell 6 og 7. Kravene vil sikre at undergrunnen ikke blir overbelastet ved store laster og dermed fører til rask utvikling av deformasjoner, herunder hjulspor, i overbygningen.

Tabell 6: Krav til maksimal tøyning for friksjonsjordarter. Kilde: N200 Vegbygging:2024

Frostmengde F_{50} ($h^{\circ}C$)	< 7200	7200 - 14400	14400 - 21600	21600 - 28800	≥ 28800
Maks. tøyning	0,0025	0,0024	0,0023	0,0022	0,0021

Tabell 7: Krav til maksimal tøyning for kohesive jordarter (silt og finere materiale). Kilde: N200 Vegbygging:2024

Frostmengde F_{50} ($h^{\circ}C$)	< 7200	7200 - 14400	14400 - 21600	21600 - 28800	≥ 28800
Maks. tøyning	0,0018	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014

Kravene er tilsvarende som de svenske, men de svenske kravene benytter «klimatzon» som inngangsparameter. Klimasonene er koblet mot metningsgrad som brukes i beregning av tøyning mot undergrunn. Kaldere klima gir lengre teleløsningsperiode og høyere metningsgrad avhengig av dreneringstilstand, se Tabell 4 i 3.4.2 Klimadata. Høyere metningsgrad kan føre til større risiko for skadelige permanente deformasjoner. Derfor settes kravet til maksimalt tillatte elastiske tøyninger strengere for høyere metningsgrad og altså kaldere klima.

Det som ligger til grunn for inndelingen av klimasonene i Sverige er variasjon i frostmengder – nærmere bestemt ut fra F2 med definerte intervaller for de ulike sonene. I Norge er ikke frostmengden F2 i bruk i ved dimensjonering av veg og det ble søkt etter alternativer for å unngå å måtte innføre enda en ny parameter som kun skulle benyttes for disse kravene. I Norge er frostmengden F50 en kjent størrelse, og det ble utført et arbeid for å relatere F2 og F50 slik at vi kunne benytte F50 som inngangsparameter. Derfor er F50 en inngangsparameter i kravene, og denne må som sagt i denne sammenhengen tolkes som et uttrykk for metningsgrad i undergrunnsmaterialene for ulike klimaregimer.

NB! I Tabell 6 og 7, som er tatt fra N200 Vegbygging (2024), oppgis verdier for F50, men dette er egentlig F2 verdier. Dette skal korrigeres når N200 revideres neste gang.

3.5.4 Telehiv - frostsikring

Frostsikring av veg i Norge tar utgangspunkt i undergrunnens telefarlighet som beskriver et materiales evne til å oppta vann under frysing. Telefarligheten er definert gjennom telefarlighetskriterier basert på innhold av materiale < 20 µm regnet av materiale < 22,4 mm. Det tas også hensyn til innhold av materiale < 2 µm og < 200 µm. Ut fra dette kategoriseres telefarligheten i fire telefarlighetsklasser fra T1 til T4, se Tabell 8. Det kreves frostsikring kun der undergrunnen er i telefarlighetsklasse T3 eller T4. Merk at det er to ulike tilfeller av T3-materialer som vist i Tabell 8. Avhengig av ÅDT og antall kjørefelt baseres frostmengden på 10-årsfrost (F10) eller 50-årsfrost (F50). Maksimal overbygningstykkelse er begrenset til 1,8 m (ÅDT ≤ 8 000) eller 2,4 m (ÅDT > 8 000).

Tabell 8: Telefarlighetskriterier i N200 Vegbygging

Tabell 3.1.3.1—1 — Inndeling av undergrunnen i telefarlighetsklasser

Telefarlighetsklasse	Masseprosent av materiale < 22,4 mm		
	< 2 µm	< 20 µm	< 200 µm
Ikke telefarlig T1		< 3	
Litt telefarlig T2		3 - 12	
Middels telefarlig T3	^a	> 12	< 50
Meget telefarlig T4	< 40	> 12	> 50

^a I tillegg regnes jordarter med mer enn 40 % < 2 µm som middels telefarlig T3.

Telehiv kan oppstå hvis det er telefarlige materialer i vegoverbygningen og/eller i undergrunnen, tilgang på vann og nok frostmengde. Hvis alle disse tre faktorene er til stede, vil vann trekkes opp til frysefronten. Dette vannet danner islinser, som fører til volumøkning og telehiv. Hvis dette løftet skjer ujevnt, vil det forårsake store problemer pga ujevnheter. Når islinsene smelter i teleløsningen, øker vanninnholdet i de granulære lagene og undergrunnen, noe som reduserer bæreevnen. Veiens bæreevne er derfor på sitt laveste i denne perioden, og det kan oppstå betydelige skader ved tung trafikk på vegene. Dimensjoneringstabellen i tidligere utgaver av N200 Vegbygging sørget for tilstrekkelig bæreevne i denne perioden, men tok ikke hensyn til omfanget av telehiv. Brukes VegDim/ERAPave PP i frostdimensjonering skal ikke beregnet maksimalt telehiv (mm) overstige verdier angitt i Tabell 9.

Tabell 9: Krav til maksimalt telehiv (mm). Kilde: N200 Vegbygging:2024

Vegtype ^a , fartsgrense	Maksimalt telehiv (mm)	Unntak og kommentarer
Motorveg, 110 km/t	20	
Motorveg, 100 km/t	25	
Riksveg, 90 km/t	30	
Riksveg, 80 km/t, annen veg 90 km/t	40	Der ÅDT < 1500: 50 mm
Riksveg, 70 km/t, annen veg 80 km/t	50	Der ÅDT < 1500: 60 mm
Riksveg, 60 km/t, annen veg 70 km/t	60	Der ÅDT < 1500: 70 mm
Alle veger, 50 km/t eller lavere, annen veg 60 km/t	70	
Veger/gater med kantstein, med eller uten fortau ^b Gang-/sykkelveg med sidestilt kantstein	60	Uavhengig av ÅDT. For veger med strengere krav, gjelder de kravene foran dette kravet.
Gang-/sykkelveg, atskilt fra veg, uten sidestilt kantstein Sykkelveg med fortau med mellom-liggende ikke-avvisende kantstein	80	
Sykkelekspressveg	60	
Tverrsnitt av veg inn mot bundne høyder, eks. — bru — planovergang jernbane — betongdekker som er (tilnærmet) frostfritt fundamentert	10	For en utkiling vil kravet gjelde i det tverrsnittet av vegen som ligger inn mot den bundne høyden.

^a Med annen veg menes fylkesveg eller kommunal veg.

^b Veg og fortau utføres med så lik som mulig frostteknisk dimensjonering.

Kravene angir maksimalt tillatt telehiv som funksjon av vegtype, fartsgrense og ÅDT. Hensyn er også tatt til om det bygges med kantstein og om vegen er inn mot bundne høyder slik som bru.

Å prosjektere veger på en slik måte at man tillater forutbestemte nivåer av telehiv, er nytt i norsk dimensjoneringssammenheng. I tradisjonell dimensjoneringspraksis, som fortsatt er et alternativ i N200 Vegbygging, har man enten frostsikret for å unngå telehiv, eller så har man ikke frostsikret og dermed tillatt de telehivene av ukjent størrelse som måtte komme. Skillet mellom frostsikret og ikke frostsikret veg har gått ved ÅDT på 1500, jf. krav 3.2.1-2. Riktignok har man benyttet litt ulike dimensjonerende frostmengder og også hatt maksimale frostsikringsdybder – men begge deler vil i praksis innebære at et telehiv av ukjent størrelse vil kunne oppstå når disse forutsetningene overskrides i kalde vintre. Hensikten med å tillate telehiv er at man da kan bygge tynnere overbygning og dermed spare byggekostnader.

Men økt ujevnhet på vegen innebærer økte kostnader til vedlikehold og økte trafikantkostnader. Hva man skal sette som krav til tillatte telehiv kan dermed ses på som en kost-nytte-vurdering. I VegDim er det gjort noen forsøk på å gjøre slike vurderinger og beregninger, men datagrunnlaget og modellrammeverket har vært for spinkelt til at det er konkludert entydig. Det som er sett på er vegholderkostnader og trafikantkostnader opp mot nytte og vi har noen holdepunkter her. Trafikksikkerhet ble også vurdert, men ble utelukket fordi det var vanskelig, for ikke å si umulig, å gjøre noen som helst vurderinger med det datagrunnlaget som foreligger.

I Sverige har det gjennom PMS Objekt vært mulig å beregne telehiv og dermed sette krav til telehivets størrelse. De svenske kravene har på papiret vært nokså romslige for en del veger – i alle fall i teorien – og det ble derfor gjort en egen vurdering for norske forhold. Det skal også sies at de svenske kravene har vært under revisjon.

I fastsetting av norske krav har det vært en vurdering at ujevne telehiv, som kan forekomme både på tvers og på langs av vegen, er uheldig siden dette kan føre til oppsprekking. Jevne telehiv er i teorien ufarlig, men når telehivet blir stort, skal det godt gjøres i praksis at telehivet blir helt jevnt. Derfor vil en begrensning i maksimalt telehiv også være gunstig for å unngå for store ujevne telehiv. En tommelfingerregel som er blitt brukt, er at når de maksimale telehivene overstiger 100 mm så begynner også de ujevne telehivene å skape problemer. De norske kravene er derfor satt slik at det maksimalt tillatte telehivet er for gang-/sykkelveg med 80 mm. For bilveg er det veger med hastighet 50 km/t som har det høyest tillatte telehivet med 70 mm.

For riksveger, som er de viktigste vegene, er kravene til telehiv satt noe strengere enn for andre veger. Veger for gående og syklende har lavere krav enn bilveger. Dette har sammenheng med kost-nytte-vurderinger av omfanget av frostsikring og vil slik sett være en naturlig prioritering.

Veger med høy fartsgrense har strengere krav enn veger med lavere fartsgrense. Ved høyere fartsgrenser vil påvirkningen på kjøretøyene være større ved et gitt telehiv enn for en veg med lavere fartsgrense. Sammenhengen er at vertikal uavfjæret kraft ved passering av en gitt ujevnhet er proporsjonal med kvadratet av hastigheten. Likevel er ikke kravet ved 100 km/t satt så strengt som en fjerdedel av tillatt verdi ved 50 km/t. Begrunnelsen for dette er at ved 100 km/t bygger man flerfeltsveg – typisk 4 felt eller flere, og det bygges med tykkere overbygning. Begge deler vil bidra til å jevne ut telehiv.

For veger med lav ÅDT, under 1500 kjøretøy, er det også tillatt noe høyere telehiv. Dette er også ut fra kost-nytte-vurderinger.

Det er tatt hensyn til om hvorvidt vegen bygges med kantstein. Kantstein vil utgjøre et fastere element i vegen, men vil også i noen grad kunne bevege seg med telehivet. Kravet til maksimalt telehiv er derfor redusert noe der det er kantstein. På den andre siden, om kantstein skulle komme ut av stilling eller bli skadet, så er dette et vegelement det er relativt enkelt å erstatte. Av denne grunn er det ikke vesentlig strengere krav når det bygges med kantstein.

3.6 Kalibrering (AP 3)

Kalibrering av VegDim/ERAPave PP er viktig for å sikre pålitelige resultater ved anvendelse og dermed tillit til dimensjoneringsmetoden.

Et ME-system består, som navnet tilsier, av både mekanistiske og empiriske (statistiske) modeller.

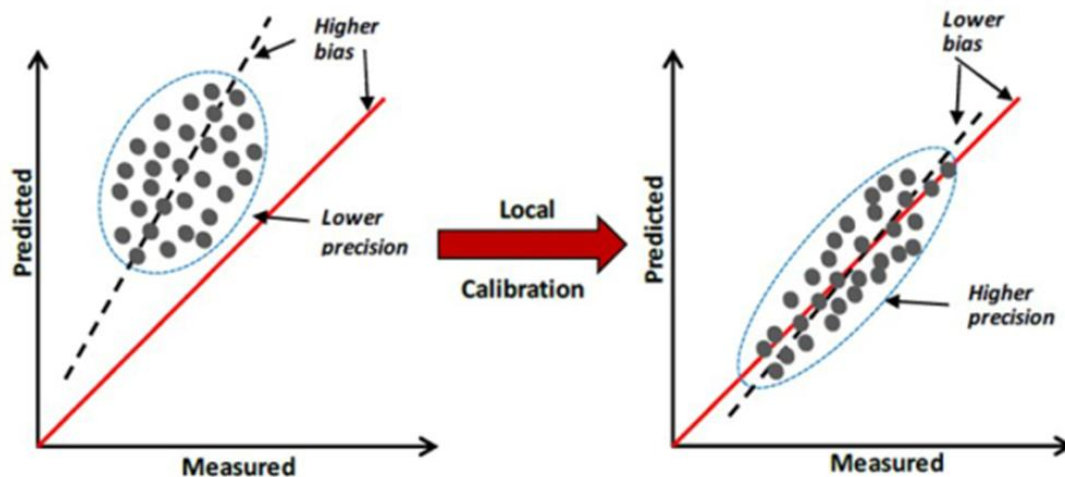
Den **mekanistiske delen** av ME-dimensjonering består av modeller som beregner de primære lastresponsene (spenninger og tøyninger) i ulike lag og dybder i vegoverbygningen og undergrunnen basert på påkjenninger den utsettes for. I ERAPave PP brukes tradisjonell elastisitetsteori for lagdelte konstruksjoner for disse beregningene. Dette er beskrevet i 3.2.1 *Responsmodell*. Responsmodellen er basert på grunnleggende mekanistiske prinsipper (matematiske) som det ikke er behov for å kalibrere.

Den **empiriske delen** av ME-dimensjonering består av tilstandsutviklingsmodeller som er basert på statistisk analyse av skadeutvikling for de meste kjente skademekanismene. For nordiske forhold er sporutvikling, telehiv og utmatting viktige skademekanismer som det er viktig å ta hensyn til ved dimensjonering. Kalibrering av disse tilstandsutviklingsmodellene betyr å sammenligne beregnet tilstandsutvikling til målt tilstandsutvikling på veg, og beregne kalibreringskoeffisienter. For å kunne gjøre dette må det etableres referansestrekninger som kan brukes til å sammenligne felt mot beregninger. Strekningene må ha god spredning med hensyn til trafikk, klima, materialvalg og alder i forhold til forventet dekkelevetid for å kunne dekke variasjonsbredden i ulike vegtyper og belastninger.

Det ble derfor etablert referansestrekninger for å kalibrere prognosene for tilstandsutvikling mot målt tilstandsutvikling i felt. Per i dag er det kun **total sporutvikling** vi har mulighet for å kalibrere, og ikke delt på deformasjon i ulike lag eller piggdekkslitasje. Vi får ikke sjekket beregnet telehiv mot målt telehiv på grunn av manglende data. Vi har heller ikke data til å kalibrere modellene for utmatting. Tøyning mot undergrunn har ikke behov for kalibrering siden modellen er basert på responsmodellen.

Målet med kalibrering er todelt:

1. Fjerne systematiske forskjeller mellom beregnet og målt tilstandsutvikling (reducere bias)
2. Redusere de tilfeldige variasjoner mellom beregnet og målt tilstandsutvikling (øke presisjon, redusere spredning)



Figur 18: Illustrasjon av systematiske forskjeller (bias) og tilfeldige variasjoner (Kilde: [Statens vegvesen rapport nr. 903](#))

AASHTO PEMED beskriver at kalibrering omfatter 3 hovedtrinn:

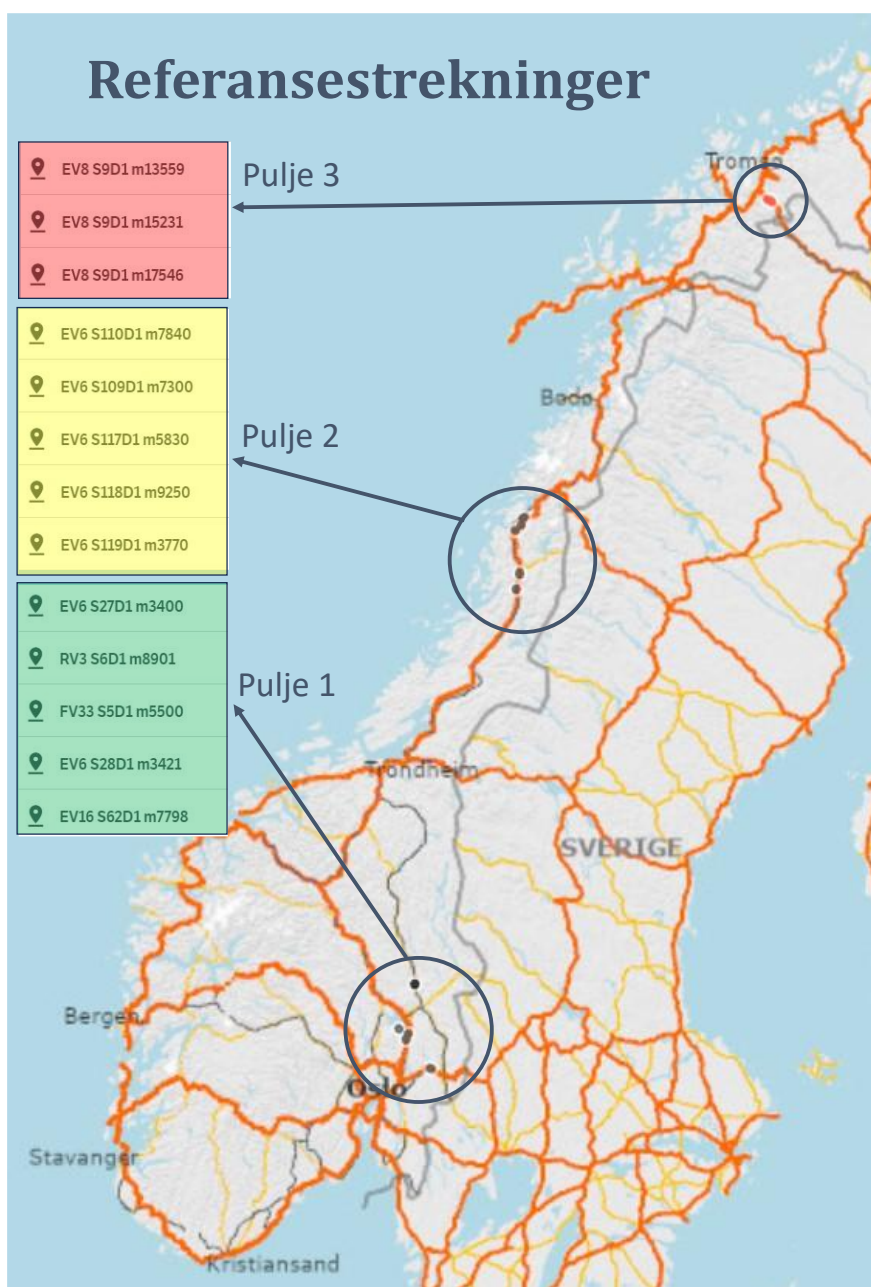
- **Verifisering:** Vurdere om modellen for tilstandsutvikling/spor er relevant og fanger opp de forhold (undergrunn, vegoverbygning, materialer, klima, trafikk, o.a.) som er av betydning for tilstandsutviklingen på en måte som er i overensstemmelse med faglig skjønn, erfaring og objektive kriterier.
- **Kalibrering:** Anvendelse av en matematisk operator på tilstandsprognosen (beregningsresultat, dvs. sporutviklingsforløp eller definert indikator for sporutvikling) for å redusere avvik mellom målt spor og beregnet (prediktert) spor mest mulig.
- **Validering:** Kontroll av resulterende (prediktert) spor (sporutviklingsforløp eller definert indikator for sporutvikling) etter kalibrering på et sett referansestrekninger (som ideelt sett ikke er de samme som ble brukt ved verifiseringen)

3.6.1 Referansestreknings

I prosjektet har vi brukt store ressurser på å etablere referansestreknings for å kontrollere beregnet sporutvikling mot målt sporutvikling. Referansestrekningsene består av vegseksjoner med lengde 300 m, ett kjørefelt. Grunnlaget består av 21 referansestreknings, men fordi 5 av disse er preget av feil ved produksjonen av asfaltmaterialene, er kun 16 referansestreknings benyttet i arbeidet med samlede vurderinger av resultater for referansestrekningsene.

Datagrunnlaget for referansestrekningsene omfatter data fra prosjekterings- og byggefase samt tilstandsregistreringer. I tillegg er det gjennomført feltmålinger (georadar og fallodd) samt laborietesting av borprøver (asfalt) uttatt på referansestrekningsene.

Referansestrekningsene ble valgt ut i 3 omganger (puljer), se Figur 19.



Figur 19: Oversikt over referansestreknings

Tabell 10: Pulje 1 – referansestreknings i område øst

Nr.	Navn	Vegreferanse
1-1	E6 Espa Felt 3	Ev6 S27D1 m3400-3700
1-2	E6 Espa nord Felt 3	Ev6 S28D1 m3421-3721
1-3	Fv 33 Totenvika Felt 2	Fv33 S5D1 m5500-5800, Felt 2
1-4	E16 Kongsvinger Felt 4	Ev16 S62D1 m7798-8098
1-5a	Rv 3 Åsta Felt 1	Rv3 S6D1 m8901-9201, F1
1-5b	Rv 3 Åsta Felt 2	Rv3 S6D1 m8901-9201, F2



Figur 20: Pulje 1 – referansestreknings i område øst

Pulje 2: 9 strekninger på E6 Helgeland (Bertilforsen, Strendene, Gløsen, Gofahaugen og Angermoen) i område nord, se Tabell 11 og Figur 21. Strekningene er forholdsvis ensartede, og strekning 3, 4 og 5 er preget av spesielle forhold ved produksjon av asfalt som gir nedbrytningsmekanisme for slitelaget som ikke er modellert i VegDim, trolig pga. steinslipp og dårlig bestandighet. Også bindlag og bærelag har samme produksjonsforhold. Vi måtte derfor fjerne 5 av strekningene i den samlede vurderingen av resultater (de i Gløsen, Gofahaugen og Angermoen). Strekning 1 og 2 kan ha lignende produksjonsforhold som de 3 nordligste strekningene, men ble tatt med i analysen.

Tabell 11: Pulje 2 – referansestrekninger i område nord på E6 Helgeland (F1 angir kjørefelt 1, F2 angir kjørefelt 2)

Nr.	Navn	Vegreferanse
2-1 F1	E6 Bertilforsen	Ev6 S109D1 m7300-7600
2-1 F2	E6 Bertilforsen	Ev6 S109D1 m7300-7600
2-2 F1	E6 Strendene	Ev6 S110D1 m7840-8140, F1
2-2 F2	E6 Strendene	Ev6 S110D1 m7840-8140, F2
2-3 F1	E6 Gløsen	Ev6 S117D1 m5816-6116
2-3 F2	E6 Gløsen	Ev6 S117D1 m5816-6116
2-4 F1	E6 Gofahaugen	Ev6 S118D1 m9250-9550
2-5 F1	E6 Angermoen	Ev6 S119D1 m3770-4070
2-5 F2	E6 Angermoen	Ev6 S119D1 m3770-4070

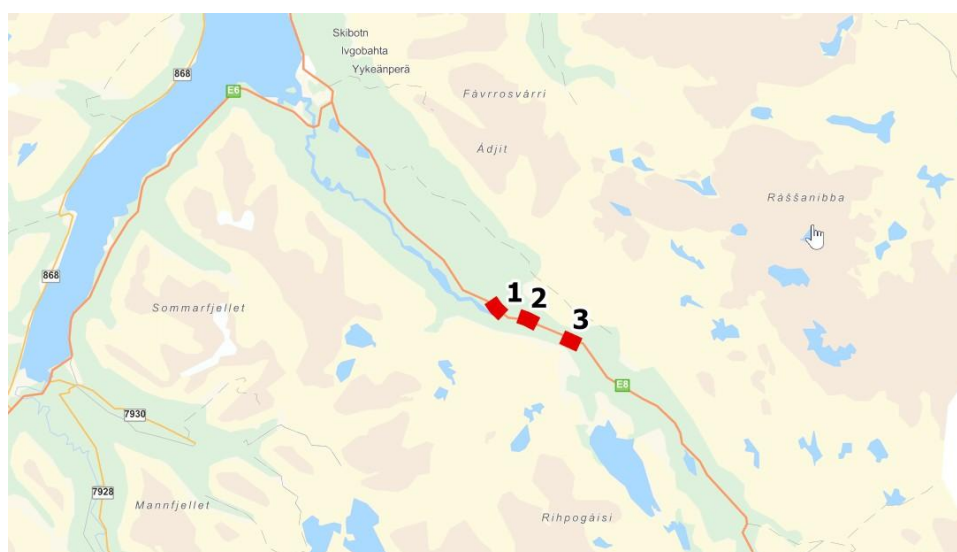


Figur 21: Pulje 2 – referansestrekninger i område nord på E6 Helgeland

Pulje 3: 6 strekninger på E8 Skibotn i område nord, se Tabell 12 og Figur 22. Strekningene er ensartede mht. vegtype, vegoverbygning, trafikk og klima. Populasjonen gir dermed i realiteten bare «ett» bidrag til verifisering og kalibrering av VegDim. Men populasjonen gir på den andre siden informasjon om VegDim's respons på mindre forskjeller i inndata.

Tabell 12: Pulje 3 – referansestrekninger i område nord på E8 Skibotn (F1 angir kjørefelt 1, F2 angir kjørefelt 2)

Nr.	Navn	Vegreferanse
3-1 F1	E8 S9D1 m13559	E8 S9D1 ca m13559- ca m13800
3-1 F2	E8 S9D1 m13559	E8 S9D1 ca m13559- ca m13800
3-2 F1	E8 S9D1 m15231	E8 S9D1 ca m15231- ca m15481
3-2 F2	E8 S9D1 m15231	E8 S9D1 ca m15231- ca m15481
3-3 F1	E8 S9D1 m17546	E8 S9D1 ca m17546- ca m17746
3-3 F2	E8 S9D1 m17546	E8 S9D1 ca m17546- ca m17746



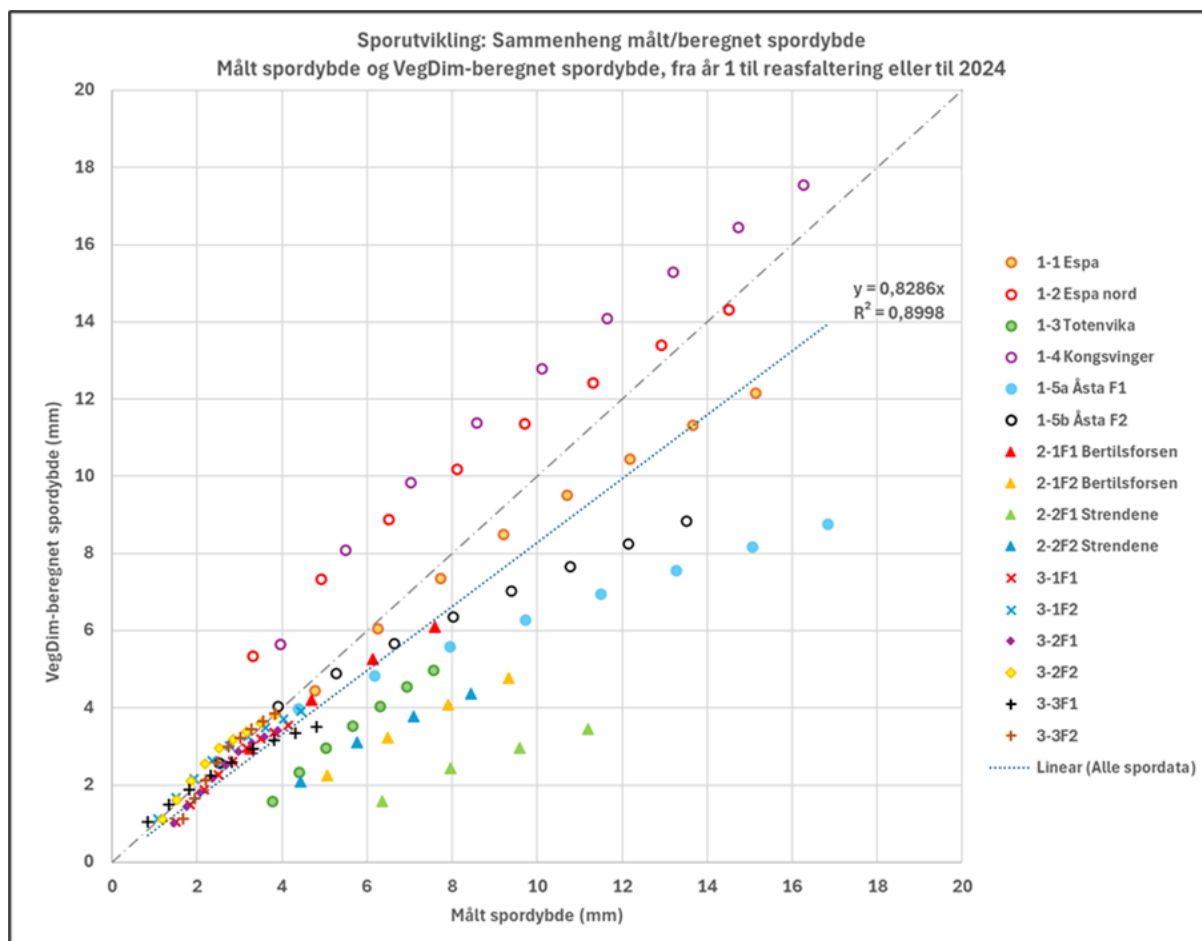
Figur 15: Pulje 3 – referansestrekninger i område nord på E8 Skibotn

Totalt sett utgjør dette i praksis kun 8 ulike strekninger når vi vet at strekninger som skal benyttes til kalibrering må ha god spredning med hensyn til trafikk, klima, materialvalg, undergrunn og alder i forhold til forventet dekkelevetid. Anbefalt antall referansestrekninger i det amerikanske AASHTO PMED er 20 – 30 vegstrekninger for kontroll av de enkelte tilstandskriteriene. Vi vil trolig aldri kunne få etablert tilstrekkelig antall referansestrekninger for å gjennomføre en statistisk trygg kalibrering av modellene i Norge, men dette er et første steg på vegen. Dette betyr at kalibrering vil være en viktig aktivitet fremover også etter at prosjektet er avsluttet for å sikre pålitelige resultater ved anvendelse av VegDim/ERAPave PP og tillit til ME-dimensjonering, og vi må derfor etablere flere strekninger som kan følges opp.

3.6.2 Kalibreringskoeffisient

Detaljert beskrivelse, vurderinger og resultater er nærmere beskrevet i ViaNova rapport [VegDim – Kalibrering av spormodul](#). Sammenheng mellom målt og VegDim-beregnet total spordybde (deformasjon i alle lag og piggdekksslitasje) for referansestrekningene er vist i Figur 23.

Sammenligningen viser skjevhet mellom fordelingene for målt og VegDim-beregnet spordybde samt stor spredning i resultat for de ulike referansestrekningene. Hovedtrekkene i sporutviklingen for målt og VegDim-beregnet er forskjellig, med lineært kurveforløp for målt spordybde og krumt kurveforløp i de første årene med avtagende årlig sporutvikling for VegDim-beregnet spordybde.



Figur 23: Sammenheng mellom målt og VegDim-beregnet spordybde for referansestrekningene (Kilde: ViaNova rapport [VegDim – Kalibrering av spormodul](#))

Regresjonslinjen for alle spordybdeverdiene viser følgende (regresjonslinje gjennom origo):

- VegDim-beregnet spordybde = $0,8286 \times \text{Målt spordybde [mm]}$
- Målt spordybde = $1,2069 \times \text{VegDim-beregnet spordybde [mm]}$

Vi har dermed foreløpig valgt å bruke 1,2069 som kalibreringskoeffisient for spordybde i VegDim/ERAPave PP.

Regresjonslinjen i Figur 23 er tvangsstyrt gjennom origo selv om datasettet tilsier en viss forskjell mellom målt og beregnet spordybde ved åpningstidspunkt for vegen og starttidspunkt for beregning.

Videre arbeid skal vurdere endringer i modellparametere for tilstandsutviklingsmodellene for å bedre tilpasse beregnet tilstandsutvikling til målt tilstandsutvikling. Det må vurderes å skille piggdekkslitasje fra deformasjoner siden disse er to forskjellige skademekanismer.

3.7 Analyser (AP 10)

ME-dimensjoneringssystemer kan i tillegg til dimensjonering av vegoverbygninger brukes til å gjøre analyser, blant annet for å gjøre riktige valg med hensyn til miljø (LCA) og kostnader (LCC). Andre typer analyser kan være å vurdere effekter på levetid og tilstandsutvikling, f.eks. pga

- Klimaendringer: endring i årsmiddeltemperatur, frostmengde, fuktinnhold i vegoverbygningen mm
- Endringer i trafikkbelastning: andel tunge, trafikkvekst, aksellast på tunge kjøretøy, kjørehastighet, piggdekkandel, vandring mm
- Fravik fra krav: vegbyggingsmaterialer, lagtykkelser, vegbredder mm

Lang levetid og god tilstandsutvikling er viktig for å redusere klimagassutslipp og livsløpskostnader fra bygging, drift og vedlikehold. Levetid og forventet tilstandsutvikling vil være viktige inngangsparametere i LCA og LCC analyser og vil gjøre disse analysene mer nøyaktige siden det i mange tilfeller brukes standardverdier uavhengig av valgt vegoverbygning og inngangsdata. Ved bruk av ME-systemer vil man kunne synliggjøre effekter på levetid, tilstandsutvikling, vedlikeholdsbehov, miljøkonsekvenser og kostnader ved å gjøre ulike valg i dimensjonering og oppbygging av en vegoverbygning.

I prosjektet ble det gjennomført analyser der man sammenlignet dimensjonering ved bruk av erfaringsbasert metodikk og ME-dimensjonering for vegoverbygninger. Dette ble gjort for lokasjoner i ulike deler av landet (Drammen, Hjerlinn, Molde og Melhus) og med ulike dimensjoneringsperioder (2, 5, 10, 20, 50 og 100 år). En dimensjoneringsperiode på 20 år er standard i dagens regelverk, men internasjonalt ses det på lengre dimensjoneringsperioder pga hensyn til klima og levetidskostnader. Lokasjonene er valgt for å representere forskjellige forhold (dimensjoneringsklasse, klima, trafikkbelastning og undergrunn), se Tabell 13 for datagrunnlag. ERAPave PP ble benyttet i analysearbeidet siden web-versjonen av VegDim ikke var klar til bruk enda. VegLCA ble brukt til å beregne CO₂-ekvivalenter for vegoverbygningene, men det ble ikke gjennomført en kostnadsanalyse pga vi manglet data til å lage en prislister for å sammenligne kostnader fra utbyggings- og vedlikeholdsprosjekt.

Målet med analysen var:

1. Presentere resultater fra case-studier og simuleringer som sammenligner ERAPave PP med N200, med fokus på sporutvikling (deformasjon og piggdekkslitasje).
2. Kartlegge de viktigste forskjellene mellom ERAPave PP og N200.
3. Vurdere om dimensjonering med N200 oppfyller de spesifikke kravene for ERAPave PP dimensjonering som det åpnes for i N200 (2024-utgaven).
4. Identifisere potensielle miljøfordeler ved å bruke ERAPave i forhold til N200
5. Kartlegge mulige feil og ikke-brukervennlige aspekter av ERAPave PP, og foreslå forbedringer for å gjøre systemet mer brukervennlig.

Tabell 13: Datagrunnlag

Generelt	Enhet	Drammen	Hjerkinn	Molde	Melhus
Lokasjon		EV18 S46D1 M3500-M4000	EV6 S56D1 M2800-M3300	EV39 S21D1 M7000-M7500	EV6 S72D1 M6200-M6700
Dim.klasse		H3	H1	H1	H3
Hastighet	km/t	90	80	80	90
Antall kjørefelt		4	2	2	4
Vegbredde	m	21,5	9	9	21,5
Undergrunn		T4	T3	T3	T2

Klimadata	Enhet	Drammen	Hjerkinn	Molde	Melhus
Årsmiddeltemperatur	°C	6,52	1,14	6,31	6,42
Frostmengde F10	t°C	15 044	38 716	4 011	12 079
Frostmengde F50	t°C	21 972	46 848	6 223	17 818
Frostmengde F100	t°C	24 902	50 285	7 159	20 244
Koordinater		59,7004 N 10,24508 E	62,189239 N 9,49535 E	62,841025 N 7,599996 E	63,294529 N 10,277636 E

Trafikkdata	Enhet	Drammen	Hjerkinn	Molde	Melhus
ÅDT		34 907	2 175	3 000	16 465
ÅDT _T		4 627	486	511	2 172
Tunge kjøretøy	%	13,3	22,3	17	13,2
Trafikkvekst	%	2	2	2	2
N		18 923 578	2 208 501	2 322 107	8 883 080
Trafikkgruppe		F	D	D	E
Piggdekkandel	%	13	44	41	15

Analysen er nærmere beskrevet i [Statens vegvesen rapport nr. 1065](#), og viser at ME-dimensjonering gir mulighet for en tynnere vegoverbygninger for noen av lokasjonene.

Analysen viser at man kan forvente flere viktige endringer og forbedringer etter introduksjon av et ME-dimensjoneringsystem for vegoverbygninger:

- Bedre tilpasning til lokale forhold
- Økt (beregnet) levetid
- Økt miljøvennlighet
- Bedre kostnadseffektivitet

Samlet sett kan bruk av ERAPave PP som dimensjoneringsystem for vegoverbygninger forbedre både kvaliteten og bærekraften til vegoverbygninger, noe som er viktig for fremtidens infrastruktur.

Selv om ERAPave PP er et moderne, fleksibelt og framtidsrettet system for dimensjonering av vegoverbygning, har det også noen svakheter:

- Lite brukervennlighet: Per i dag er programmet lite intuitivt og krever litt ekstra arbeid med innlegging av inngangsdata
- Begrenset materialvalg: Det var ikke mulig å velge isolasjonsmaterialer i frostsikringslag da analysen ble gjennomført
- Svart boks: Det er litt uklart hvordan noen av valgene påvirker resultater

Videre er det viktig å merke seg at ERAPave PP-systemet er under kontinuerlig utvikling for å inkludere flere parametere og forbedre nøyaktigheten i dimensjoneringen. Implementeringen av disse kravene sikrer at vegoverbygninger ikke bare oppfyller dagens standarder, men også er rustet til å håndtere fremtidige utfordringer knyttet til trafikkbelastning og klimatiske forhold. Dette bidrar til å skape en mer robust og bærekraftig infrastruktur.

3.8 Merverdi av VegDim: Kompetanseutvikling i vegteknologi

FoUI-program er viktig for å sikre langsiktighet i faglig utvikling og rekruttering. Innen vegteknologi er det få miljø i Norge som har god fagkompetanse og det er lite forsknings- og utviklingsaktivitet. Norge har også ligget etter våre naboer og andre sammenlignbare land i forhold til utvikling og bruk av ME-dimensjoneringsystemer som gir bedre forståelse av nedbrytningen av vegoverbygningen. Ved å benytte dataprogram hvor en kan «leke» seg med forskjellige vegoverbygninger og se på hvilken holdbarhet/skadeutvikling forskjellige valg gir, blir oppgaven mer interessant og givende enn om man benytter dagens skjemaserte system. Vi mener dette vil ha positiv virkning både på rekruttering og interessen for fagområdet generelt.

VegDim har bidratt til fokus på vegteknologiområdet i Norge, og det har gjennom prosjektet blitt gjennomført

- Studentoppgaver: 9 masteroppgaver og 1 bacheloroppgave
- Flere studenter har hatt sommerjobb
- 4 PhD-studier
- 3 post.doc forskere
- 2 forskerterminer

Dette er viktig for fremtiden for faget å gjøre det interessant og relevant, da det er få studenter som velger vegfag og det er lav rekruttering til bransjen.

4. Implementering (AP 9)

Implementering er når resultatene fra prosjektet tas i bruk. Som omtalt tidligere er dette et omfattende og langsiktig arbeid, mye er blitt gjort gjennom prosjektet og mye må fortsette i årene etter at prosjektet er avsluttet. En del av grunnstrukturen er på plass, men det kreves mye jobb når man skal innføre et helt nytt dimensjoneringsystem med nye arbeidsprosesser og avanserte modeller. Innføringen er også kombinert med et skifte i tenkesett og metode. Det er derfor viktig med **informasjon, involvering og opplæringstilbud** for å skape tillit til bakenforliggende modeller, metode og programvare samt resultater, anvendelse og nytte. Og det er viktig med forankring i sektoren/bransjen (veggholdere, rådgivende ingeniører og entreprenører). Opplæring og bruk av metoden ved universitet og høyskoler utgjør en viktig del av innføringen. Dette vil ha betydning for anvendelsen, både på kort og lang sikt.

En kort historisk beskrivelse av utvikling, kalibrering og implementering av AASHTOWare PMED og PMS Objekt, verktøy for dimensjonering og analyse av vegoverbygninger i henholdsvis USA og Sverige, er beskrevet i [Statens vegvesen rapport nr. 903](#).

I USA startet de opp FoU-prosjekt på ME-dimensjonering på 1990-tallet. Det var først i 2008 de hadde en første versjon klar, og selve implementeringen i delstatene tok i gjennomsnitt 7,5 år. Men det er uklart hvordan implementeringstiden ble definert i de ulike delstatene. Det tar lang tid å implementere slike systemer pga. IT-programmets kompleksitet, tilgjengelighet av nødvendige data, behovet for lokal kalibrering m.m. Erfaringene fra USA viser at det må gis tid for og brukes ressurser på:

- Etablere datagrunnlag (trafikk, materialer, undergrunn, klima).
- Verifisering, kalibrering og validering (riktig antall referansestrekninger og statistisk signifikans).
- Opplæring av brukere og over-/sideordnet personell (ME-dimensjonering, MEPDG-metoder/prosedyre og programvare).
- Brukerstøtte, vedlikehold og utvikling av programvare.

Tilsvarende erfaringer har de gjort i Sverige ved innføring av PMS Objekt. De startet utviklingen på 1990-tallet, første versjon var klar i 2000, men det var først i 2008 at PMS Objekt ble anvendt i stor skala. De viktigste momentene de trekker fram er:

- Det tar tid å implementere et nytt dimensjoneringsystem fordi det som oftest er kombinert med et stort skifte i metode og tenkesett. Det er viktig å la implementeringen ta tid, men samtidig støtte den nye metoden for dimensjonering gjennom å stille krav til at metoden og verktøyet benyttes.
- Universitet og høyskoler er viktige elementer i implementeringen.
- Opplæring og kurs for bransjen er en kritisk del i implementeringen og anvendelsen. Medarbeidere hos veggholdere må være godt opplærte i bruken av programmet og ha god forståelse av programmet og av de bakenforliggende teoriene.
- Regelverket må ajourføres i henhold til nytt tankesett, nye metoder og nytt verktøy. Det fungerer dårlig dersom regelverket motarbeider den nye dimensjoneringsystematikken.

VegDim har tatt lærdom av dette, og har derfor hatt fokus på:

- **Inndata:** Framskaffe datagrunnlag for materialer, undergrunn, klima og trafikk (AP 4, 5 og 6).
- **Kalibrering:** Etablere referansestreknings for å sikre at beregnede verdier for tilstandsutvikling (totalt spor) er i overensstemmelse med tilstandsutvikling i felt (AP 3).
- **Regelverksutvikling:** Tilpasse det norske regelverket (N200 Vegbygging) til ME-dimensjoneringsmetode (AP 8).
- **Opplæring og informasjon:** Lage kurs og opplæringsmateriale for vanlige brukere, superbrukere og ledere, samt bidra til at det undervises på universitet og høyskoler (AP 9).

I tillegg har vi informert ulike brukergrupper om prosjektet og systemet på fagkonferanser andre fora i prosjektperioden for å sikre forankring i bransjen (alle AP).

Det er også plukket ut pilotprosjekter for uttesting av VegDim/ERAPave PP (sammenligning med erfaringsbasert dimensjonering). Denne aktiviteten gjenstår i påvente av ferdigstilling av programvaren.

Det er lagt opp til en gradvis implementering av VegDim/ERAPave PP i Norge med kontroll av beregningsresultater og godkjenning av disse gjennom krav i N200 Vegbygging. Det vil bli tilbudt opplæring til brukere, som beskrevet i 4.1 *Kompetanse/opplæring (AP 9)*.

4.1 Kompetanse/opplæring (AP 9)

Et av målene i prosjektet var å bidra til å bygge langsiktig kompetanse i Norge innen ME-dimensjonering av veger og sikre en god plan for implementering av VegDim/ERAPave PP i Norge. Det ble derfor satt i gang arbeid med å lage kurs/opplæringsmateriale i ME-dimensjonering generelt og i bruk av VegDim/ERAPave PP spesielt, med hovedfokus på dimensjonering av vegoverbygning i vegprosjekter samt spesialisert bruk i utredninger, analyser m.m. Det forutsettes at målgruppene har basiskompetanse i vegteknologi gjennom eksisterende opplæringstilbud.

Det ble definert 2 målgrupper for opplæringen:

1. **Vegplanleggere/vegteknologer:** Personer med utførelsesoppgaver innen vegteknologi og vegplanlegging på vegutbyggingsprosjekter, inkludert vegutbedringsprosjekter.
 - A. **Vanlige brukere:** Gruppe som vil bruke programmet sporadisk.
 - B. **Superbrukere:** Vegplanleggere med spesiell interesse og de fleste vegteknologene.
2. **Ledelse:** Personer som har ansvar for «operativ ledelse» dvs. prosjektledere, byggeledere og anleggsledere på vegutbyggingsprosjekter, inkludert vegutbedringsprosjekter.

For de ulike målgruppene er det pr. juni 2025 laget skisser til kursprogram (fysiske kurs med undervisning og øvinger/demoer) med ulik fordypning og lengde:

Gruppe 1A Vanlige brukere (2 dager/12 timer)

- Hva er ME-dimensjonering og -analyse av vegoverbygninger?
- Faglig grunnlag for dimensjonering ved bruk analytiske dimensjoneringssystemer.
- Beskrivelse av ERAPave PP; inngangsdata, beregningsrutiner og beregningsresultater.
- Dimensjoneringskriterier. Spor, telehiv, jevnhet, frost. ERAPave sammenlignet med N200.
- ERAPave PP brukt i utbedringsprosjekter.
- Praktisk bruk av ERAPave PP. Eksempler og øvingsoppgaver.

Gruppe 1B Superbrukere (1 dag/6 timer)

- Hva er ME-dimensjonering og -analyse av vegoverbygninger – andre systemer?
- Eksempler på andre responsmodeller og tilstandsutviklingsmodeller.
- Endringer av inngangsparametere. Følsomhetsanalyse.
- Kvalitetssikring og kontroll av beregningsresultatene.
- Praktisk bruk av ERAPave PP. Endringer av inngangsdata.

Gruppe 2 «Operative ledere» (halv dag/3 timer)

- Hva er ME-dimensjonering og -analyse av vegoverbygninger. Faglig grunnlag for dimensjonering ved bruk analytiske dimensjoneringssystemer.
- Dimensjoneringskriterier. Spor, telehiv, jevnhet. ERAPave PP sammenlignet med N200.
- Beskrivelse av ERAPave PP; inngangsdata, beregningsrutiner og beregningsresultater. Demonstrasjon av ERAPave PP.

Det ble gjennomført et første pilot-kurs for gruppe 1A i november 2025.

5. Rapporter/publikasjoner

I dette kapitlet er det laget en oversikt over ulike rapporter og publikasjoner som er laget gjennom prosjektet.

5.1 Delrapporter fra arbeidspakkene (AP)

AP 1 Prosjektledelse

Johansen, Johnny M.; Ødegård, Ingvild; Evensen, Ragnar: [Gevinstrealisering \(Brage\)](#). ViaNova rapport, 2020-08-11

Johansen, Johnny M.; Evensen, Ragnar; Holen, Åsmund: [Levetid for vegdekker Norge og Sverige \(Brage\)](#). ViaNova rapport, 2023-12-19

AP 2 Valg av ME dimensjoneringsystem

Saba, Rabbira Garba: [Analytisk dimensjonering av vegkonstruksjoner: Evaluering og valg av system for norske forhold \(Brage\)](#). Statens vegvesens rapporter; 524, 2019-12

AP 3 Kalibrering

Evensen, Ragnar; Johansen, Johnny M.: [Utvikling, kalibrering og implementering \(Brage\)](#). Statens vegvesens rapporter; 903, 2022-12

Johansen, Johnny M.; Evensen, Ragnar; Holen, Åsmund; Hannasvik, Lisa T.: [VegDim - Kalibrering av spormodul](#), ViaNova rapport, 2025-04-11

Evensen, Ragnar: [VegDim. Kalibrering av VegDim/ERAPave PP. E-moduler fra nedbøyningsmålinger på referansestrekninger](#). ViaNova rapport, 2025-09-15

AP 4 Materialdata

Ulvik, Arnhild: [Vanninnhold i tilslagsmaterialer \(Brage\)](#). Statens vegvesens rapporter; 879, 2022-11

Zhang, Xuemei: [Aldring av bituminøse bindemidler \(Brage\)](#). Statens vegvesens rapporter, 968, 2024-03

Saba, Rabbira: [VegDim – Materialdata](#). Statens vegvesen rapport nr. 1067, 2025-06-25

AP 5 Trafikkdata

Böhm, Maximilian; Haugen, Torbjørn; Riddervold Levy, Jorunn; Rodum Bjøru, Anna: [Vehicle weight data from speed enforcement systems: The ATK/WIM project](#). Statens vegvesens rapporter; 222, 2019-05

Garba Saba, Rabbira: [Nøyaktighet ved WIM \(Weigh-In-Motion\) målinger: En litteraturstudie \(Brage\)](#). Statens vegvesens rapporter; 735, 2021-10

Bakløkk, Leif Jørgen: [VegDim – Analyse av data fra WIM \(Weigh-In-Motion\), Trafikkbelastning ved dimensjonering av vegoverbygninger](#), Statens vegvesen rapport nr. 1092, 2025-10-30

AP 6 Klimadata

Saba, Rabbira: [VegDim – Klimadata](#). Statens vegvesen rapport nr. 1066, 2025-06-25

AP 7 Frostmodell

Skoglund, Kjell Arne; Berntsen, Geir: [VegDim - Modellering av frostnedtrengning og telehiv](#). Statens vegvesen rapport nr. 1089, 2025-10-23.

AP 8 Krav

Johansen, Johnny M.; Evensen, Ragnar; Holen, Åsmund: [Vegoverbygning. Krav, byggemåter, materialer Norge - Sverige \(Brage\)](#). ViaNova rapport, 2022-05-13

Skoglund, Kjell Arne; Dongmo-Engeland, Berthe Julienne: [VegDim – Dimensjoneringskrav](#), Statens vegvesen rapport nr. 1094, 2025-10-31

AP 9 Implementering, pilotering og kompetanse

(ingen)

AP 10 Analyser

Anastasio, Sara: [VegDim - Sammenligning av ERAPave PP med dagens empiriske dimensjoneringsystem N200 Vegbygging](#). Statens vegvesen rapport nr. 1065, 2025-06-25

5.2 PhD avhandlinger (doktorgradsoppgaver)

Chen, Hao: [Laboratory-based modelling of viscoelastic properties of asphalt pavement \(NTNU Open\)](#). Doctoral theses at NTNU, 2023:207

Fladvad, Marit: [Optimal utilisation of unbound crushed aggregates for road construction \(NTNU Open\)](#). Doctoral theses at NTNU, 2020:307

Hannasvik, Lisa: [Properties of coarse unbound granular material used in road construction \(NTNU Open\)](#). Doctoral theses at NTNU, 2024:467

Zhang, Xuemei: [Laboratory Investigation on Development of Bitumen Exposed to Chemicals \(NTNU Open\)](#). Doctoral theses at NTNU, 2022:186

5.3 Vitenskapelige publikasjoner

Anastasio, Sara; Snilsberg, Brynhild; Saba, Rabbira Garba; Winnerholt, Tomas: Development and implementation of a mechanistic-empirical systems for pavement design in Norway. Net Zero Future 2024

Anastasio, Sara; Snilsberg, Brynhild; Lunaas, Thor Asbjørn; Sund, Even K.: The Norwegian Approach to Future Design, Construction, Maintenance, and Rehabilitation of Asphalt Pavements. TRA 2024

Chen, Hao; Barbieri, Diego Maria; Hoff, Inge; Mork, Helge; Wathne, Pål; Liu, Gang. Construction of asphalt mixture master curves for a Norwegian mechanistic-empirical pavement design system. Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and

Airfields, Volume 2. Proceedings of the eleventh international conference CRC Press 2021
<https://doi.org/10.1201/9781003222897> CC BY-NC-ND 4.0 license

Chen, Hao; Barbieri, Diego Maria; Zhang, Xuemei; Hoff, Inge. Reliability of Calculation of Dynamic Modulus for Asphalt Mixtures Using Different Master Curve Models and Shift Factor Equations. *Materials* 2022 ;Volum 15.(12)

Chen, Hao; Mulugeta, Alammie, Mequanent; Barbieri, Diego Maria; Zhang, Xuemei; Gang, Liu; Hoff, Inge. Comparative study of indirect tensile test and uniaxial compression test on asphalt mixtures: Dynamic modulus and stress-strain state. *Construction and Building Materials* 366 (2023) 130187

Hannasvik, L. T., Kierstein, R., Johansen, J. M., Evensen, R., & Hoff, I. (2024). Stiffness of coarse unbound granular material used in road construction. *Transportation Geotechnics*, 46, 101271.

Hannasvik, L. T., Mork, H., Evensen, R., Johansen, J. M., Hoff, I., & Kierstein, R. (2025). In-Situ Plate Load Test Measurements of Stress Distribution Properties for Coarse Unbound Granular Materials. *Transportation Geotechnics*, 101580.

Hannasvik, L. T., Hoff, I., & Barbieri, D. M. (2024). Stiffness evaluation of coarse unbound granular materials using large-scale repeated load triaxial test. *Transportation Geotechnics*, 49, 101423.

Hao Chen, Rabbira Garba Saba, Gang Liu, Diego Maria Barbieri, Xuemei Zhang, Inge Hoff, Influence of material factors on the determination of dynamic moduli and associated prediction models for different types of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 365 (2023) 130134

Snilsberg, Brynhild; Saba, Rabbira Garba; Bakloekk, Leif J.: Further Development and Implementation of a Mechanistic-Empirical Design and Analysis System for Pavement Structures in Norway. TRA 2024

Xuemei Zhang , Hao Chen, Rabbira Garba Saba, Lisa Tronhuus Hannasvik. Lateral and longitudinal variations in dynamic modulus of asphalt pavement: Surface layer and base layer, *Construction and Building Materials* 381 (2023) 131304

5.4 Studentoppgaver

M.Sc. (masteroppgaver)

Afeworki, Yonatan Russom: [Developing a master curve \(E*\) database for asphalt mixtures containing various percentages of recycled asphalt \(AURA\)](#). UiA 2024

Andresdottir, Herbjörg: [Plate load testing - Effects of in situ conditions, test procedure and calculation method](#). NTNU 2019

Børseth, Martin: [Evaluering av skadeutvikling på asfaltdekker under fremtidig klima \(NTNU Open\)](#). NTNU 2024

Koa, Iris Kristin: [Calibration and development of a numerical method for frost protection](#). NTNU 2019

Kværnmo, Marit Helene Uppstrøm: [Nedbrytning av veg ved bruk av tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn](#). NMBU 2021

Schwan, Filipe B.: Investigation of asphalt pavements' fatigue life – A laboratory investigation. NTNU 2024

Stolpestad, Siri: [Frost protection of roads. The use of crushed rock aggregate in a frost protection layer](#). NTNU 2020

Wathne, Pål: [Evaluering av ulike modeller for konstruksjon av masterkurver for dynamisk E-modul til asfaltmaterialer](#). NTNU 2020

Økern, Jonas: [Mechanical characterization of quarry fines for road frost protection layers](#). NTNU 2020

B.Sc. (bacheloroppgave)

Carlsen, Fredrik A. Ø.: Analyse av vegkonstruksjoner dimensjonert med ERAPave PP. UiT Narvik 2024

6. Økonomi

Kostnadsrammen for VegDim var 25 mill. kr for hele prosjektperioden (2018-2024). Dette ble hovedsakelig brukt på konsulentbistand og 3 post.doc. stillinger ved NTNU.

I tillegg ble det brukt en del interntid fra Teknologivdelingen på divisjon Drift og vedlikehold og Vegteknologiseksjonen på Myndighet og regelverk i prosjektet. Det ble også brukt litt ressurser fra Fagressurs for å få tilstandsdata og materialelegenskaper for referansestrekningene.

Det ble også bruk IKT midler i 2023-2024 for å finansiere den norske web-utviklingen av VegDim, men dette var finansiert utenom prosjektets midler.

7. Avsluttende kommentarer

Muligheten til å bruke VegDim/ERAPave PP i dimensjonering og analyser av vegoverbygninger i Norge er et stort fremskritt for vegteknologimiljøet og vil gi oss mange nye muligheter som beskrevet i avsnitt 1.4 *Fordeler ved ME-dimensjonering*.

Men det er også viktig å påpeke at det vil kreve mer kunnskap om vegteknologi og ME-dimensjonering, og mer detaljerte data om materialer og belastning fra klima og trafikk for å kunne bruke VegDim/ERAPave PP. Derfor er vi i gang med å utvikle kurs/opplæringstilbud for ulike brukergrupper, som beskrevet i avsnitt 4.1 *Kompetanse/opplæring (AP 9)*. Det er også gjennomført mye arbeid med å skaffe inngangsdata på materialer, klima og trafikk for å lette implementeringen av VegDim/ERAPave PP, se avsnitt 3.4 *Inndata*.

Regelverket og kravene som stilles til tilstandsutvikling i N200 Vegbygging er nye, og Statens vegvesen må få erfaring på om verdiene som er satt fungerer eller trenger justeringer. Det kreves derfor at dimensjonering etter VegDim/ERAPave PP sendes inn til Vegdirektoratet, Myndighet og regelverk, for gjennomgang og godkjenning, se avsnitt 3.5 *Krav (AP 8)*.

I tillegg er det viktig at modellene som beregner forventet tilstandsutvikling representerer virkeligheten. Det er gjennomført en enkel kalibrering av sporutviklingsmodellen, se avsnitt 3.6 *Kalibrering (AP 3)*, men det gjenstår mye arbeid for å få kalibrert alle tilstandsutviklingsmodellene og validert modellene.

Nå når prosjektet er avsluttet, vil hovedleveransen og navnet, dvs. det digitale dimensjoneringsverktøyet **VegDim** (vegdim.atlas.vegvesen.no) som inkluderer både den erfaringsbaserte metodikken og ME-dimensjonering, leve videre og videreutvikles.

8. Veien videre

Prosjektet har kommet langt i å utvikle og implementere et ME-system for dimensjonering og analyse av vegoverbygninger i Norge. Men et slikt system vil aldri bli helt ferdig, og vil kreve kontinuerlig forbedring og utvikling i tillegg til drift. Derfor har vi inngått et videre samarbeid med Trafikverket gjennom et NordFoU prosjekt **NorDim (2025-2029)** der hovedmålet er å videreutvikle ERAPave PP-systemet til bruk for vedlikehold og forsterkning av eksisterende veger samt forbedre modeller for beregning av tilstandsutvikling og kobling mot eksisterende data (tilstandsdata og byggedata).

Målsetting med NordFoU-prosjektet er å:

- Utvikle og implementere en forsterknings-/utbedringsmodul for eksisterende veg
- Kalibrere og forbedre tilstandsutviklingsmodellene (piggdekkslitasje, deformasjon og oppsprekkingsmodeller for asfalt)
- Forbedring og implementering av materialmodeller for ubundne materialer
- Forbedre grunnlagsdata om trafikkvandring og fuktinnhold

I tillegg må vi fortsette med følgende aktiviteter i Norge:

- Kompetanse/opplæring: gjennomføre kurs og opplæringstilbud for bransjen
- Drift av norsk web-løsning: når en første versjon av VegDim med alle tilstandsutviklingsmodeller i VegDim er lansert må det etableres et driftsopplegg for å håndtere oppdatering og videreutvikling (programvarefunksjonalitet og brukergrensesnitt), spørsmål fra brukere mm.
- Datagrunnlag (materialer, undergrunn, trafikk, klima) må videreutvikles og forbedres
- Ajourføring av regelverket må tilpasses og ligge i forkant av praktisk implementering.

Det anbefales at det i tillegg til egnet kursmateriell for ERAPave PP/VegDim foreligger en god dokumentasjon av ERAPave PP:

- Systemdokumentasjon (IT-system, systemkrav, m.m.)
- Faglig dokumentasjon (teorimanual)
- Brukerveiledning for dimensjonering
- Eksempelsamling (vedlegg til brukerveiledning)



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