



Analytisk dimensjonering av vegkonstruksjoner

Evaluering og valg av system for norske forhold

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 524



Tittel

Analytisk dimensjonering av vegkonstruksjoner

Undertittel

Evaluering og valg av system for norske forhold

Forfatter

Rabbira Garba Saba

Avdeling

Vegavdelingen

Seksjon

Drift, vedlikehold og vegteknologi

Prosjektnummer

605377

Rapportnummer

Nr. 524

Prosjektleder

Brynhild Snilsberg

Godkjent av

Brynhild Snilsberg

Emneord

Analytisk dimensjoneringssystem, vegkonstruksjoner, responsmodeller, tilstandsutviklingsmodeller

Sammendrag

FoU programmet VegDim (2018 – 2022) har som hovedmål å velge, tilpasse til norske forhold og ta i bruk et eksisterende mekanistisk – empirisk (analytisk) dimensjoneringssystem for vegkonstruksjoner. Moderne mekanistisk – empiriske dimensjoneringssystemer gir mulighet for beregning av fremtidig tilstandsutvikling for vegkonstruksjoner basert på material-, trafikk- og klimadata. Dette gir større fleksibilitet og mulighet til optimalisering av vegkonstruksjonen i forhold til livsløpskostnader og miljøeffekter. En gjennomgang og vurdering av aktuelle eksisterende dimensjoneringssystemer er gjort for å danne grunnlag for valg av det beste systemet for norske forhold. Gjennomgangen er basert på tilgjengelig litteratur og informasjon. Denne rapporten gir en kort beskrivelse av eksisterende mekanistisk – empiriske (ME) dimensjoneringssystemer samt evaluering av disse og valg av et system for tilpasning til norske forhold.

Antall sider 15

Dato 9. desember 2019

Title

Analytical Design of Pavement Structures

Subtitle

Evaluation and Choice of a System for Norwegian Conditions

Author

Rabbira Garba Saba

Department

Roads Department

Section

Operation, Maintenance and Road Technology

Project number

605377

Report number

No. 524

Project manager

Brynhild Snilsberg

Approved by

Brynhild Snilsberg

Key words

Analytical design system, pavement, response models, performance models

Summary

The main goal of the R&D program VegDim (2018 -2022) is to choose, adopt to Norwegian conditions and implement an existing mechanistic - empirical design system for pavement structures. Modern mechanistic – empirical pavement design systems provide the possibility to predict pavement performance based on data for material, traffic, and climate. This will provide larger flexibility and the possibility to optimize the pavement design with respect to life cycle costs and environmental effects. A review and evaluation of existing and relevant design systems was conducted to provide basis for choice of a system that best fits the Norwegian conditions. The review is based on available literature and information. This report gives a short description of existing mechanistic - empirical (ME) pavement design systems as well as the evaluation of these systems and choice of a system for adoption to the Norwegian conditions.

Pages 15

Date December 9, 2019

Forord

Målet med FoU-programmet VegDim (2018 – 2022) er å tilpasse til norske forhold og ta i bruk et eksisterende analytisk (mekanistisk – empirisk) dimensjoneringsystem for dekkekonstruksjoner. Hovedleveransen fra FoU-programmet vil være et nytt dimensjoneringsystem (dataverktøy) og en dimensjoneringspraksis der en har større fleksibilitet og mulighet til å dokumentere konsekvenser av ulike valg av materialer og lagtykkelser i vegbygging og vedlikehold. Dette verktøyet skal tilpasses norske forhold og byggemetoder slik at livsløpskostnader og miljøeffekter blir tatt hensyn til ved planlegging og optimalisering av vegkonstruksjoner.

Et moderne dimensjoneringsystem som gir dokumentasjon på tilstandsutviklingen og levetiden til vegkonstruksjonen vil gi et mye bedre beslutningsgrunnlag ved planlegging av veier. Dette vil gi grunnlag for optimalisert forvaltning av vegnettet (livsløpskostnader) og bedre langsiktige vedlikeholdsplaner.

Ved bruk av dette verktøyet kan man også ta hensyn til miljø ved planlegging, bygging og vedlikehold av veier. Dette gjør at vi på en bedre måte kan oppnå reduksjon i energiforbruk og klimagassutslipp, som vil bidra til å oppnå nasjonale klimamål.

Denne rapporten gir en kort beskrivelse av eksisterende mekanistisk – empiriske (ME) dimensjoneringsystemer samt evaluering av disse og valg av et system for tilpasning til norske forhold. Rapporten er et resultat av en gjennomgang og vurdering av aktuelle eksisterende dimensjoneringsystemer som er gjort for å danne grunnlag for valg av det beste systemet for norske forhold. Gjennomgangen er basert på tilgjengelig litteratur og informasjon. Rapporten er utarbeidet av Rabbira Garba Saba, Statens vegvesen, Vegdirektoratet.

Brynhild Snilsberg

Statens vegvesen

Innhold

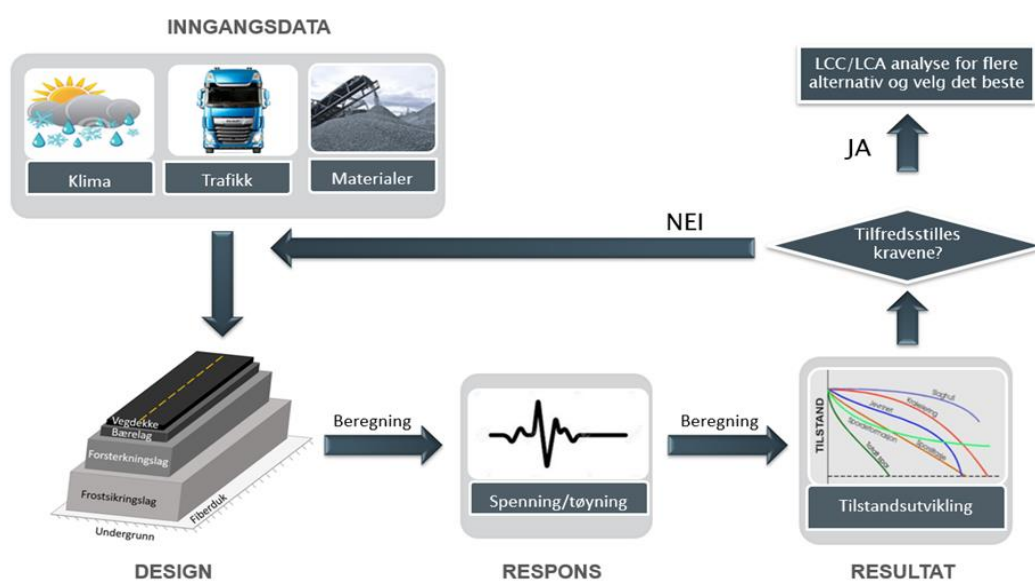
1	Innledning	1
2	Mekanistisk – empiriske (ME) dimensjoneringsystemer	1
2.1	Beregning av respons	2
2.2	Beregning av skadeutvikling	3
2.3	Behov for materialdata i ME–dimensjoneringsystemer	4
2.4	Behov for kalibrering av tilstandsutviklingsmodeller.....	5
3	Eksisterende ME–dimensjoneringsystemer	5
3.1	Type 1 ME–dimensjoneringsystemer	5
3.2	Type 2 ME–dimensjoneringsystemer	6
4	Vurdering av eksisterende ME–dimensjoneringsystemer	9
4.1	Vurderingskriterier	9
4.2	Vurdering og valg av system.....	10
4.3	Valg av system.....	11
5	Referanser	12

1 Innledning

Hovedmålet for FoU-programmet VegDim (2018 – 2022) er å vurdere, velge, tilpasse til norske forhold og ta i bruk et eksisterende mekanistisk-empirisk (analytisk) dimensjoneringsystem. En gjennomgang og vurdering av aktuelle eksisterende dimensjoneringsystemer er gjort for å danne grunnlag for valg av det beste systemet for norske forhold. Gjennomgangen er basert på tilgjengelige litteratur og informasjon. Denne rapporten gir en kort beskrivelse av eksisterende mekanistisk – empiriske (ME) dimensjoneringsystemer samt evaluering av disse og valg av et system for tilpasning til norske forhold.

2 Mekanistisk – empiriske (ME) dimensjoneringsystemer

Dimensjonering av en vegkonstruksjon (vegoverbygning) handler om bestemmelse av lagtykkelser og valg av materialer for å komme fram til en vegkonstruksjon som har tilstrekkelig bæreevne til å tåle både trafikk- og klimabelastningene den blir utsatt for, og som har tilstrekkelige funksjonsegenskaper. Det finnes to tilnærminger til dimensjonering av en vegoverbygning, empirisk og mekanistisk-empirisk (også kalt analytisk). Den empiriske tilnærmingen baserer seg på erfaring mens den mekanistisk – empiriske tilnærmingen baserer seg på en ingeniørfaglig dimensjoneringsprosess, der man optimaliserer valg av lagtykkelser og materialer ut ifra beregnede tøyninger, spenninger og skadeutvikling som oppstår i vegkonstruksjonen under trafikkbelastning. Spenningene og tøyningene som oppstår i ulike dybder i vegkonstruksjonen beregnes ved bruk av mekanistiske prinsipper (gitt i kapittel 2.1) og brukes videre i empiriske tilstandsutviklingsmodeller for å beregne forventet skadeutvikling over tid. Beregningene utføres ved bruk av dataprogrammer der trafikk-, klima-, og materialdata utgjør de viktigste inngangsparametere. Figur 1 viser en prinsippskisse for ME-dimensjoneringsystemer.



Figur 1: Prinsippskisse, ME-dimensjoneringsystemer

Dimensjoneringen utføres ved bruk av en iterativ prosess der man, for en antatt vegkonstruksjon, beregner respons (spenninger og tøyninger) og herav skadeutvikling over tid. Skadeutviklingen, for eksempel i form av spordybde, kan da vurderes i forhold til grenseverdier (for eksempel maksimum tillatt spordybde). Man kan også sette grenseverdier for spenninger og tøyninger for de forskjellige materialene (lagene i vegkonstruksjonen) og bruke disse som vurderingsgrunnlag. Hvis resultatet ikke er tilfredsstillende må man gjenta prosessen, endre konstruksjonen (lagtykkelser eller/og materialtyper) og utføre beregningene om igjen. Ved å gjenta prosessen kan man generere alternative konstruksjoner som kan vurderes og optimaliseres i forhold til livsløpskostnader (LCC) og miljøeffekter (LCA).

Som man kan se fra figur 1 har beregningene som gjøres i ME-systemene to hovedkomponenter; responsberegning (dvs. tøyninger og spenninger) og skadeberegning (tilstandsutvikling). For de aller fleste av ME-systemene utføres responsberegningen ved bruk av lineærelastisitetsteorien for lagdelte konstruksjoner (Linear Elastic Multi-layer Theory) som baserer seg på mekanistiske prinsipper. Skadeutviklingen beregnes ved bruk av empiriske modeller som kalles tilstandsutviklingsmodeller (performance models eller transfer functions). Tilstandsutviklingsmodellene beregner skader som utvikler seg over tid basert på respons (tøyninger og spenninger). Tilstandsutviklingsmodellene er empiriske modeller som er utviklet basert på tilstandsdata fra spesifikke områder/land. For å kunne anvende dem under andre forhold må derfor disse modellene kalibreres ved bruk av data fra felt- og laboratorietesting.

2.1 Beregning av respons

I ME-dimensjoneringssystemene beregnes, som nevnt ovenfor, tøyninger, spenninger og nedbøyinger som oppstår i en vegkonstruksjon under belastning ved bruk av lineærelastisitetsteorien for lagdelte konstruksjoner. Modellene som brukes til å utføre denne beregningen kalles responsmodeller. En responsmodell er en dataalgoritme (dataprogram) som løser de matematiske ligningene som gir vegkonstruksjonens respons på belastning, dvs. tøyninger, spenninger og nedbøyinger. Vegkonstruksjonens respons på belastning uttrykkes ved bruk av flere matematiske ligninger som er utledet fra de grunnleggende mekanistiske prinsipper. Lineærelastisitetsteorien for lagdelte konstruksjoner som ligger til grunn for beregning av vegkonstruksjonens respons ble utviklet av Donald Burmister og ble først publisert i 1943 [1]. Denne teorien forutsetter at:

- Materialene i de forskjellige lagene opptrer som lineært elastiske og materialeegenskapene kan uttrykkes ved bruk av elastisitetsmodul og Poisson-tall (tverrkontraksjonstall).
- Materialene er homogene og isotrope (samme egenskaper i alle retninger).
- Hjullasten er aksesymmetrisk.
- Lagene strekker seg uendelig i horisontaltretning og undergrunnen strekker seg uendelig også i vertikalretning.

Metoden går ut på å finne en matematisk løsning for en fjerdegrads differensialligning som ofte betegnes som «stress function» for hvert lag basert på mekanistiske grunnprinsipper slik som [2]:

- Likevektsligninger
- Kompatibilitetsbetingelsen (kinematikklikninger)
- Materiallov (Hookes lov)
- Grensetilstand mellom lagene

Ut ifra løsningen får man tøyninger, spenninger og nedbøyinger ved forskjellige koordinatpunkter i konstruksjonen. Siden dette innebærer svært omfattende beregninger er det ikke enkelt å utføre manuelt. Derfor omfattet de tidligste løsningene et begrenset antall lag (Burmisters løsning gjaldt for bare to-lagskonstruksjoner). Men utviklingen i datamaskinteknologi og dataprogrammer har gjort at det i dag er mulig å utføre slike beregninger i løpet av bare få sekunder, for ubegrenset antall lag og punkter. I flere land er det utviklet dataprogrammer med formål å beregne respons i en vegkonstruksjon under belastning, dette dannet grunnlaget for utvikling av ME-dimensjoneringsystemer.

ME-dimensjoneringsystemene som er i bruk i dag er bygget på disse responsprogrammene og består av, i tillegg til responsprogrammene, programmoduler for håndtering av inngangs- og utgangsdata og moduler for beregning av skadeutvikling. Noen av ME-systemene har også tilknyttede material-, trafikk- og klimadatabaser. De mest brukte responsprogrammene har vært:

- BISAR (Shell)
- Chevron (USA)
- WESLEA (USA)
- JULEA (Israel+ USA)
- ELSYM 5 (USA)
- NOAH (Nynäs)

Disse responsprogrammene er alle basert på lineærelastisitetsteorien for lagdelte konstruksjoner. Det finnes noen andre responsprogrammer som er basert på elementmetode (FEM), men disse brukes mest i forskningssammenheng.

2.2 Beregning av skadeutvikling

Repeterte belastninger på vegkonstruksjonen fører til utvikling av ulike typer skader slik som utmatting, deformasjoner, slitasje, lavtemperaturoppsprekking osv. Det er repeterte/gjentatte tøyninger som oppstår i konstruksjonen som forårsaker disse skadene. Skadene utvikler seg over tid. Beregning av skadeutviklingen gjøres ved bruk av empiriske modeller der de beregnede responsverdiene (tøyninger og spenninger) brukes som inngangsdata. Levetiden til en vegkonstruksjon nåes når den akkumulerte skaden overstiger grenseverdier i forhold til de krav som er satt.

Tilstandsutviklingsmodellene er i utgangspunktet korrelasjonsmodeller som beskriver forholdet mellom målt tilstandsutvikling og noen faktorer som anses å ha påvirkning på tilstandsutviklingen. Det finnes mange forskjellige tilstandsutviklingsmodeller eller forslag til tilstandsutviklingsmodeller. De fleste av disse er helt empiriske/statistiske modeller som er utviklet for bruk på vegnetts nivå, dvs. for å anslå tilstandsutvikling for et bestemt vegnett i en tidsperiode. Disse brukes ofte i sammenheng med dekkevedlikeholdssystemer (PMS – Pavement Management System). Tilstandsutviklingsmodellene som brukes i ME-dimensjoneringsystemer derimot er mer detaljerte og baserer seg på spesifikke

materialegenskaper og konstruksjonenes respons på belastning. Her brukes forskjellige modeller for forskjellige materialer eller lag i vegkonstruksjonen. Hovedfaktorene som inngår i modellene som brukes til beregning av skadeutvikling i et asfaltlag er:

- Asfaltlagets respons på belastning (tøyninger/spenninger i asfaltlaget)
- Asfaltmaterialets dynamiske E-modul
- Temperatur
- Antall lastrepetisjoner

I modellene som brukes til beregning av skadeutvikling i de ubundne lagene inngår følgende hovedfaktorer:

- Lagets respons på belastning (tøyninger/spenninger i lagene)
- Elastisitetsmodul
- Fuktinnhold
- Antall lastrepetisjoner

Det er bare noen få eksisterende ME-dimensjoneringsystemer som har innebygde tilstandsutviklingsmodeller og som gir mulighet til beregning av skadeutvikling. De fleste eksisterende ME-dimensjoneringsystemer baserer seg på beregning av maks tillatte aksellastrepetisjoner ut ifra tøyning som oppstår i underkanten av asfaltlaget eller på toppen av undergrunnen. Eksisterende ME-systemer er beskrevet i kapittel 3.

2.3 Behov for materialdata i ME-dimensjoneringsystemer

Som nevnt foran baserer ME-systemene seg på elastisitetsteorien der de elastiske materialegenskapene elastisitetsmodul og tverrkontraksjonstall står sentralt. Noen av systemene bruker også enkelte materialegenskaper i tillegg for modellering av klimatiske effekter, frost osv. Elastisitetsmodulen er den viktigste materialeenskapen som må skaffes ved testing av materialene i lab. Siden elastisitetsmodulen til et asfaltmateriale (kalt dynamisk modul) varierer med temperatur og belastningsfrekvens, er det viktig å teste materialet på forskjellige frekvenser og temperaturnivåer slik at en «master curve» for den dynamiske modulen kan etableres. For ubundne materialer er det best å teste materialene ved forskjellige spenningsnivåer siden elastisitetsmodulen til ubundne materialer er spenningsavhengig (selv om de fleste ME-systemene betrakter disse materialene som lineært elastiske).

Typiske verdier for tverrkontraksjonstallet er 0,35 for asfalt, 0,4 for ubundne materialer og 0,45 for undergrunn. Disse verdiene anses å være gode nok for dimensjoneringsformål, dvs. at man ikke trenger å bestemme tverrkontraksjonstallet ved forsøk.

En materialdatabase som inneholder de nødvendige materialegenskapene til standardmaterialene/mest brukte materialene må etableres og integreres i et ME-dimensjoneringsystem. En slik database vil forenkle implementering og praktisk bruk av ME-systemer siden man da kan unngå testing av materialene på nytt hver gang disse

materialene velges. Etablering av materialdatabasen vil være en viktig del av arbeidet med tilpasning av et ME-system til lokale forhold.

2.4 Behov for kalibrering av tilstandsutviklingsmodeller

Som nevnt ovenfor er det empiriske tilstandsutviklingsmodeller som brukes til beregning av skadeutvikling i ME dimensjoneringsystemer. Det er viktig at disse modellene kalibreres til reelle tilstandsdata/skadeutviklingsdata for å kunne tilpasse et ME dimensjoneringsystem til lokale forhold. Kalibreringen går ut på bestemmelse av modellparametere, dvs. konstantene i tilstandsutviklingsmodellene. Kalibreringen kan basere seg på felldata fra eksisterende veier eller akselererte forsøk og kan også omfatte data fra laboratorietesting av materialer. Noen eksisterende ME-systemer har modeller som allerede er kalibrert opp mot felldata og inneholder lokale kalibreringsfaktorer for å tilpasse til et annet sted (eks. AASHTOWare ME). Men de fleste ME-systemer har ikke noe klart opplegg for kalibrering.

3 Eksisterende ME-dimensjoneringsystemer

Det er liten forskjell mellom ME-systemene når det gjelder metode for beregning av respons (spenninger og tøyninger) siden de aller fleste er basert på forannevnte lineærelastisitetsteori og responsprogrammer. Men det finnes en del forskjell i hvordan de håndterer data for trafikk- og klimabelastninger og friksjon mellom lagene. I EU prosjektet AMADEUS (Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures) som ble avsluttet i år 2000, ble det utført en ganske omfattende vurdering av responsmodeller og ME-dimensjoneringsystemer [3]. Vurderingen var basert på beregninger på utvalgte vegkonstruksjoner, akselererte forsøk og analyser av data fra forsøksstrekninger. Konklusjonen fra dette prosjektet var at de beregnede responsverdiene fra de ulike modellene/systemene var nesten like og disse verdiene stemte rimelig godt overens med målte responsverdier fra akselererte forsøk.

Hovedforskjellen mellom de ulike ME-systemene ligger i hvordan skadeutviklingen/tilstandsutviklingen beregnes og knyttes til dimensjoneringen. I forhold til beregning og håndtering av skadeutviklingen kan dimensjoneringsystemene deles i to hovedtyper. Type 1 ME-dimensjoneringsystemer baserer seg på beregnet fremtidig skadeutvikling, mens type 2 dimensjoneringsystemer er basert på beregnet tillatt antall aksellastrepetsjoner.

I det følgende gis en kort beskrivelse av de to typene og noen eksempler.

3.1 Type 1 ME-dimensjoneringsystemer

Type 1 systemer er basert på direkte beregning av tilstandsutvikling (spordybde, oppsprekking, ujevnhet, osv.) over tid for hele dimensjoneringsperioden. Man får altså et bilde av hvor raskt skadene utvikler seg over dimensjoneringsperioden. Her brukes beregnede responser i de empiriske tilstandsutviklingsmodellene for å forutsi skadeutviklingen. Beregnet tilstand vurderes i forhold til gitte krav; for eksempel beregnet spordybde vurderes i forhold til maksimal tillatt spordybde. Ut ifra vurderingen velger man tykkelser og materialtyper som gir en vegkonstruksjon som tilfredsstillere kravene for de

ulike skadetyper. At man kan regne ut/forutsi tilstandsutviklingen over hele livsløpet er en stor fordel fordi man da blir i stand til å optimalisere dimensjoneringen basert på LCCA (Life Cycle Cost Analysis), LCA og fremtidig behov for vedlikehold. Et minus med type 1 ME-systemene er at de er relativt omfattende og krevende i forhold til kalibrering. Det finnes relativt få type 1 ME-systemer, noen eksempler er vist i tabell 1.

3.2 Type 2 ME-dimensjoneringsystemer

Type 2 systemer er basert på estimering av maksimalt tillatte antall lastrepetisjoner ved bruk av beregnede tøyninger. Dette for å sikre at konstruksjonen har kapasitet til å tåle dimensjonerende antall ekvivalente standardaksler. Dimensjonerende antall standardaksler regnes ut ifra trafikkmengden som kommer til å bruke veien i dimensjoneringsperioden. Maksimalt tillatte antall lastrepetisjoner beregnes ved bruk av Miners hypotese (Miner's rule) og maksimale tøyingsverdier fra responsberegningen. Beregning av maksimalt tillatte lastrepetisjoner er basert på utmatting i asfaltlaget i de fleste type 2 systemer, dvs. det tas hensyn til skadeutviklingen uten å direkte regne ut skadens omfang. Her brukes beregnet maksimal strekktøyning i underkanten av asfaltlaget som inngangsparameter (et eksempel fra PMS Objekt er vist i figur 2). Noen av disse systemene regner også ut maksimalt tillatte lastrepetisjoner basert på deformasjon i undergrunnen (ved bruk av beregnet maksimal vertikaltøyning på toppen av undergrunnen). En del type 2 systemer har også satt maksimumsgrenser på tøyning i underkant av asfaltlaget og spenning på toppen av undergrunnen. Det finnes et relativt stort antall type 2 systemer som er utviklet av universiteter, forskere osv., men en stor andel av disse er ikke tatt i bruk. Tabell 2 gir noen eksempler på type 2 systemer.

Tabell 1: Eksempler på type 1 ME-systemer

ME-system	Land	Responsmodell	Skadetyper som danner grunnlag for dimensjonering	Merknad
AASHTOWare ME	USA	MLET (JULEA)	Sporutvikling Utmatting Lavtemperatur- oppsprekking «Top-down» oppsprekking IRI	Mest omfattende ME-system [4]
SA – MEPDS	Sør-Afrika	MLET	Sporutvikling Utmatting	Omfattende system, baserer seg på HVS og feltforsøk [5]
MMOPP nivå 3	Danmark	MLET (method of equivalent thickness), 4 lag	Sporutvikling Utmatting IRI	Brukes i Danmark [6]
ERAPave	Sverige	MLET	Sporutvikling (deformasjon og slitasje) Utmatting	Under utvikling ved VTI [7]
CalME	USA (California)	MLET	Sporutvikling Utmatting	Mye likhet med AASHTOWare ME når det gjelder trafikk- og klimainput. Forskjell ifht. modell for sporutvikling [8]
VESYS	USA	MLVET	Sporutvikling utmatting	Tar hensyn til asfaltens viskoelastiske egenskaper. Flere versjoner, har blitt brukt i sammenheng med FoU [9, 10]

MLET = Multi-Layer Elastic Theory

MLVET = Multi-Layer Visco-Elastic Theory

Tabell 2: Eksempler på type 2 ME-systemer

ME system	Land	Responsmodell	Grunnlag for beregning av maks tillatte lastrepetisjoner	Merknad
PMS Objekt	Sverige	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	I bruk i Sverige i over ti år. Mulighet for beregning av telehiv [11].
MMOPP nivå 2	Danmark	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen. Grenser for spenningsnivåer.	Brukes i Danmark [6].
CIRCLY	Australia	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	Brukes av Austroads (Australia og New Zealand) og andre internasjonale konsulenter. Mulighet for bruk av aksellastspektrum [12].
AdtoPave	Tyskland	MLET	Utmatting, vurdering av risiko for sporutvikling	Omfattende klimamodell for beregning av temperaturvariasjoner i asfaltlaget. Mulighet for bruk av aksellastspektrum [13].
MnPave	USA (Minnesota)	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	Brukes av Mn DOT [14].
ALIZE – LCPC	Frankrike	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	Brukes i Frankrike og deler av Afrika. Har frostberegningsmodell [15].
Østerrikske ME system	Østerrike	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	Spennings basert utmattingsmodell. Flere nivåer ift materialdata og trafikkdata [16].
I3C ME	Canada	MLET	Utmatting, deformasjon i undergrunnen	Utviklet av universitet i Laval. Har redigerbar database for materialer og trafikk, som en bruker kan endre [17].

$$N_{till,bb} \geq N_{ekv}$$

$$N_{till,bb} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{bb,i}}}$$

$$N_{bb,i} = f_s \frac{2,37 \cdot 10^{-12} \cdot 1,16^{(1,8T_i+32)}}{\varepsilon_{bb,i}^4}$$

Formel 4.4-3 Verifisering av bærighet med avseende på utmattning hos bitumenbundne lager

N_{ekv} = Ekvivalent antal standardaxlar

m = Antal klimatperioder

n_i = Antal dygn under klimatperiod "i"

$N_{bb,i}$ = Tillåtet antal standardaxlar for bitumenbundet barylager under klimatperiod "i"

f_s = Korrigeringsfaktor med avseende på befintlig belaggnings sprickighet og krackelering. Se 4.5.7.1

For nybyggnad er $f_s = 1,0$

$\varepsilon_{bb,i}$ = Største horisontella dragtøining i bitumenbundet barylager for klimatperiod "i" vid belastning med en standardaxel på vøgytan.

T_i = Temperatur (°C) i bitumenbunden belagging for klimatperiod "i"

Figur 2: Eksempel på formel for beregning av maks antall tillatte lastrepetisjoner [11]

4 Vurdering av eksisterende ME-dimensjoneringsystemer

4.1 Vurderingskriterier

Målet med VegDim-prosjektet er å velge, tilpasse og implementere et eksisterende dimensjoneringsystem. Som nevnt ovenfor finnes det mange forskjellige dimensjoneringsystemer rundt omkring i verden. Disse systemene er utviklet og kalibrert opp mot spesifikke forhold, dvs. de er basert på materialer, oppbyggingsmetoder, klima- og trafikkforhold som gjelder for et bestemt land eller område. For å kunne anvende slike systemer i et annet land eller område, med andre klima- og trafikkforhold der det brukes andre materialer og oppbyggingsmetoder, må disse systemene tilpasses og kalibreres. Sånn sett finnes det ikke noe ferdiglagt system som kan implementeres i Norge. Vurdering av eksisterende ME-systemer må gjøres opp mot følgende kriterier:

1. **Mulighet til beregning av tilstandsutvikling.** Dette er veldig viktig med tanke på å være i stand til å optimalisere vegkonstruksjonen basert på livsløpskostnader og miljøeffekter. Systemene som kan beregne tilstandsutvikling kan også brukes som analyseverktøy.
2. **Relevansen av skadetype(r) som ligger til grunn i ME-systemet.** I de aller fleste av eksisterende ME-systemer er det skadetyper utmatting som er avgjørende/ dimensjonerende. I Norge er ofte spordannelse den viktigste skadetyper, og som ofte utløser dekkefornying eller forsterkning. Det er derfor viktig at dette blir ivarettatt ved valg av dimensjoneringsystem for norske forhold.
3. **Fleksibilitet – mulighet til videreutvikling og justering.** Dette er viktig med tanke på videreutvikling av systemet, forbedring av modellene basert på fremtidig forskning og feltmålinger, og oppdatering av dataprogrammet.
4. **Frostdimensjonering.** Frostsikring av vegkonstruksjoner er veldig viktig i Norge. De fleste av eksisterende ME-systemer har ingen frostdimensjoneringsmodul eller/og er ikke tilrettelagt for tilknytting til en slik modul.
5. **Inngangsdata om trafikkbelastning– mulighet for bruk av aksellastspektrum.** I de fleste dimensjoneringsystemer omregnes antall dimensjonerende tunge kjøretøy til antall ekvivalente standard singelaksler ved bruk av den omdiskuterte fjerdepotensreglen (eller variasjoner av den). Dette betegnes ofte som en svakhet i disse systemene siden man ikke tar hensyn til effekten av forskjellige akselkonfigurasjoner/grupper og hjulmontasjer. Bruk av aksellastspektrum, dvs. aksellastfordelinger for de forskjellige akselkonfigurasjonene, direkte i responsberegningen vil derfor være en fordel.
6. **Klimamodell.** Klimatiske forhold har stor påvirkning på egenskapene til vegbyggingsmaterialer. Det er derfor viktig at dimensjoneringsystemene har en klimamodell som kan, ut ifra værdata, regne ut temperatur- og fuktprofiler i vegkonstruksjonen.
7. **Enkelthet i forhold til tilpasning til norske forhold.** Noen eksisterende systemer er ikke tilrettelagt for kalibrering og tilpasning til andre/lokale forhold.
8. **Tilgjengelighet.** Flere av de eksisterende ME-systemene kan fås gratis, men disse mangler ofte opplegg for videreutvikling og oppdatering.

4.2 Vurdering og valg av system

Bare noen få av de eksisterende ME systemene kan tenkes å være relevante for norske forhold. Dette pga. ulikheter i bl.a. klima, materialtyper og konstruksjonsoppbygging. Ut ifra en foreløpig vurdering basert på klimaforhold, er ni ME-systemer valgt ut for videre evaluering. Disse systemene er så vurdert opp mot de åtte kriteriene gitt i kapittel 4.1 ovenfor. Man har forsøkt å svare på følgende spørsmål knyttet til overnevnte kriterier:

1. Gir systemet mulighet til beregning av tilstandsutvikling?
2. Er skadetyper som ligger til grunn i systemet relevante for Norge?
3. Har systemet tilstrekkelig fleksibilitet for videreutvikling og oppdatering?
4. Har systemet frostdimensjoneringsmodul eller mulighet til utvikling av slik modul?

5. Gir systemet mulighet til bruk av aksellastspektrum?
6. Har systemet en klimamodell?
7. Har systemet opplegg for kalibrering og tilpasning til andre forhold?
8. Hvordan kan systemet anskaffes?

Resultat fra vurderingen er oppsummert i tabell 3.

Tabell 3: Vurdering av utvalgte systemer

System	Land	Vurdering opp mot kriterier 1 – 8							
		1	2	3	4	5	6	7	8
PMS Objekt	SE	Nei	Delvis	Nei	Ja	Nei	Nei	Nei	Gratis
ERAPave	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 slitasje og deformasjon) er inkludert i ERAPave

³ Utvikles og oppdateres kontinuerlig av AASHTO

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

4.3 Valg av system

Aktuelle ME-dimensjoneringsystemer er vurdert basert på en litteraturgjennomgang og annen tilgjengelig informasjon. Målet med vurderingen er å velge ut et eksisterende ME-system som kan tilpasses til norske forhold så smidig som mulig, og som har tilstrekkelig fleksibilitet for videreutvikling, implementering og drift. Ut ifra en helhetlig vurdering (sammenfattet i tabell 3) peker ERAPave seg ut som det systemet som er mest passende for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. Dette på grunn av at:

- ERAPave er under utvikling, noe som gir mulighet til å gjøre nødvendige endringer for tilpasning til norske forhold.
- Dimensjoneringen i ERAPave er basert på sporutvikling, inkludert slitasjespor, i tillegg til utmatting. Dette er veldig relevant for norske forhold.
- ERAPave kan brukes både som dimensjoneringsverktøy og analyseverktøy.
- Trafikverket i Sverige er interessert i videreutvikling og bruk av ERAPave. Dette betyr at vi får en samarbeidspartner i utviklingsarbeidet og videre drift/oppdatering.
- Forholdene i Sverige er sammenlignbare med Norge når det gjelder klima, materialtyper og byggemetoder, noe som kan gjøre det lettere å tilpasse ERAPave-systemet til norske forhold.

- En del av modellene som brukes i ERAPAVE er de samme som brukes i AASHTOWare. Dvs. de er utprøvd og funnet å være i rimelig god overensstemmelse med realistisk skadeutvikling, noe som også gir økt trygghet.
- ERAPave-modellene er validert ved bruk av akselererte forsøk i HVS (Heavy Vehicle Simulator).

På grunnlag av dette er ERAPave valgt for videreutvikling og tilpasning til norske forhold. Arbeidet med videreutvikling og tilpasning vil fremover utføres i nært samarbeid med Trafikverket og VTI (Statens väg- og transportforskningsinstitut) og vil omfatte:

- Utvikling av klimamodell og frost dimensjoneringsmodul.
- Etablering av databaser for inngangsdata, dvs. materialdata, trafikkdata, og klimadata.
- Kalibrering av tilstandsutviklingsmodellene i ERAPave.
- Etablering av opplegg for videreutvikling, oppdatering og drift av ERAPave-systemet.

5 Referanser

[1] Brown S. (1967), Stresses and deformations in flexible layered pavement systems subjected to dynamic loads, PhD thesis, University of Nottingham.

[2] Charyulu M. K., (1964), Theoretical stress distribution in an elastic multi-layered medium, PhD dissertation, Iowa State university.

[3] AMADEUS (2000), Advanced Models for Analytical Design of European Pavement structures, final report, BRRC (coordinator).

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 2008), Mechanistic –Empirical Pavement Design Guide, A manual of practice, interim edition.

[5] South African National Roads Agency LTD (2013), South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10: Pavement Design, revision 1.0.

[6] Vejdirektoratet (2013), Håndbog: Dimensionering af befæstelser og forstærkningsbelægninger, Danmark.

[7] Ahmad, A. (2014), Mechanistic–Empirical Modelling of Flexible Pavement Performance: Verifications Using APT Measurements, PhD dissertation, KTH.

[8] Harvey J. & Basheer I. (2011), California's transition to mechanistic – empirical pavement design, Technology transfer program vol. 3, no.1.

[9] Federal Highway Administration (1978), Predictive design procedures, VESYS user's manual, FHWA, Office of Research and Development.

[10] Zhou F., & Scullion, T. (2002), VESYS5 rutting model calibrations with local accelerated pavement test data and associated implementation, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System.

- [11] Trafikkverket (2011), TRVK Väg: Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion, TRV 2011:072.
- [12] Austroads (2017), Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Austroads Ltd.
- [13] Research Society for Roads and Traffic (Forschungsgesellschaft für strassen- und verkehrswesen) (2009), Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface, RDO – Asphalt 09, Germany.
- [14] Minnesota DOT (2012), MnPave user's Guide.
- [15] ALIZE – LCPC, software for pavement structures analysis and design, website: www.alize-lcpc.com.
- [16] Eberhardsteiner, L., Marchart, B. & Blab, R (2016), Design of bituminous pavements in Austria – a mechanistic approach, Proceedings of the 6th Eurobitume & Euroasphalt Congress, Prague, Czech Republic.
- [17] Bilodeau, J-P., Dore, G & Grellet, D. (2017), Mechanistic-empirical flexible pavement design using i3C-me, paper presented at the 2017 conference of the Transportation Association of Canada.



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 6706 Etterstad 0609 OSLO
Tlf: (+47) 22073000
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen