

VEJE

DIMENSIONERING AF
BEFÆSTELSER OG
FORSTÆRKNINGSBELÆGNINGER

Vejreglernes struktur

I henhold til § 6, stk. 1, i Lov om offentlige veje (Vejloven) (Trafikministeriets lovebkendtgørelse nr. 671 af 19. august 1999), kan trafikministeren (nu transport- og energiministeren) fastsætte almindelige regler og normer for anlæg, vedligeholdelse og drift af de offentlige veje, herunder for vejenes forhold til omgivelserne, for entreprisbetingelser og for sådanne forhold, som i øvrigt er af betydning for vejnettets ensartethed og trafiksikkerhed.

I henhold til § 24, stk. 3, i Lov om private fællesveje (Privatvejsloven) (Trafikministeriets lovebkendtgørelse nr. 670 af 19. august 1999), kan trafikministeren (nu transport- og energiministeren) fastsætte almindelige regler og normer for anlæg, udvidelse og ombygning af private fællesveje, herunder for vejenes forhold til omgivelserne og for sådanne forhold, som i øvrigt er af betydning for vejenes ensartethed og trafiksikkerhed.

Komplekset af almindelige regler og normer på vejområdet benævnes vejregler og inddeles i følgende kategorier: normer, retningslinier, vejledninger og kommentarer.

- ” **Normer** omfatter fundamentale forudsætninger og krav.
- ” Normtekster kan være forsynet med kommentarer, men vil normalt ikke angive metoder, der bør eller kan anvendes for at få de specificerede krav opfyldt.
- ” Normer skal altid følges. Amtskommunale og kommunale vejbestyrelser og vejmyndigheders fravigelse af
- ” normer udstedt med hjemmel i Vejlovens § 6 og Privatvejslovens § 24, stk. 3, kan dog ske med dispensation
- ” fra Vejdirektoratet, mens Vejdirektoratets fravigelse af sådanne normer kræver dispensation fra Trafikministeriet (nu Transport- og Energiministeriet).
- ” Normer er anført med dobbelt anførselstegn i margenen.
- ’ **Retningslinier** er regler til anvendelse under normale forhold.
- ’ Retningslinier indeholder angivelse af metoder, der bør anvendes til løsning af bestemte problemer og kan
- ’ indeholde anbefalinger af typeløsninger og typekonstruktioner til brug under specificerede betingelser.
- ’ Retningslinier bør så vidt muligt følges, medmindre omstændighederne i konkrete tilfælde gør det nødvendigt
- ’ eller fordelagtigt at fravige dem.
- ’ Retningslinier er anført med enkelt anførselstegn i margenen.
- Vejledninger** indeholder rådgivning baseret på ajourført erfaringsmateriale, og deres anvendelse vil normalt være hensigtsmæssig.
- Vejledninger er ikke anført med særskilt markering i margenen.
- ’ **Kommentarer** indeholder forklaringer og uddybende tekst til ovennævnte normer, retningslinier og vejledninger.
- ’ Kommentarer kan ligeledes indeholde henvisninger til andre bindende regler.
- ’ Kommentarer er anført med punktum i margenen.

Et vejregelhæfte kan principielt indeholde alle kategorier:

- ” Normer
- ’ Retningslinier
- ’ Vejledninger
- ’ Kommentarer

Et vejregelhæfte kan herudover indeholde regler om vejafmærkning, udstedt med hjemmel i færdselslovens § 95, stk. 3.

I henhold til § 95, stk. 1, i Færdselsloven, fastsætter transport- og energiministeren bestemmelser om udformningen og betydningen af færdselstavler, afmærkning på kørebanen, signalanlæg og anden afmærkning eller indretning på eller ved vej til regulering af eller til vejledning for færdslen. Reglerne herom findes i Vejdirektoratets bekendtgørelse nr. 784 af 6. juli 2006 om vejafmærkning med senere ændringer (Vejafmærkningsbekendtgørelsen).

I henhold til § 95, stk. 3, i Færdselsloven, fastsætter transport- og energiministeren bestemmelser om anvendelsen af afmærkningen i § 95, stk. 1, herunder om indhentelse af samtykke fra politiet. Reglerne herom findes først og fremmest i Vejdirektoratets bekendtgørelse nr. 783 af 6. juli 2006 om anvendelse af vejafmærkning (Anvendelsesbekendtgørelsen). Regler udstedt med hjemmel i Færdselslovens § 95, stk. 3, kan med samtykke fra politiet fraviges med dispensation fra Vejdirektoratet.

FORORD

Tilblivelse

Vejregelrådet nedsatte i marts 1996 en arbejdsgruppe med det formål at opdatere vejreglerne for dimensionering af befæstelser, omfattende følgende vejregler:

- 7.10.03, Vejregel for dimensionering af befæstelser
- 7.30.01, Vejregel for dimensionering af forstærkningsbelægninger

Vejregel Arbejdsgruppe 3.4 (senere Arbejdsgruppe P.21) påbegyndte sit arbejde under et kommissorium, der pålagde den at:

- Registrere og revidere eksisterende dimensioneringsmetoder for veje, stier og fortove, herunder kantforstærkning og sideudvidelse.
- Dimensioneringsmetoderne skal tage højde for såvel statiske som dynamiske belastninger, og omfatte både stive, halvstive og fleksible belægninger, samt belægninger udført af belægningssten.

Arbejdsgruppen havde i 2007 følgende medlemmer:

Gregers Hildebrand, Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut, formand
Christian Busch, COWI, sekretær
Søren Gleerup, Gleerup RCI
Jørn Kristiansen, Carl Bro Pavement Consultants
Karsten Mølgård, Horsens Kommune
Niels Månsson, Vejle Kommune
Per Ullidtz, Dynatest
Claus Thorup, Colas Danmark A/S

Endvidere har følgende medvirket i arbejdsgruppen:

Mogens Rasmussen, Vejdirektoratet,
H. J. Ertman, Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut
Vagn Leerskov, Århus Amt
Steffen B. Hvorslev, SBH Consult
Erik Voldby, Spedalsø Betonvarefabrik
Erik Nielsen, Asfaltindustrien

Under arbejdsprocessen er arbejdsgruppen nået til den erkendelse, at det ikke med den nuværende viden er muligt at give retningslinier for dimensionering ved simulering af stive befæstelser på en måde, der er konsistent med den metodik, der er udviklet for fleksible befæstelser.

Simulering af stive befæstelser er herefter udgået af arbejdsgruppens område, og den hidtidige metodik er tillempet analytisk dimensioneringsmetodik og indlagt i et EDB program.

Arbejdsgruppen arbejder dog videre med at indføre simulation for halvtive befæstelser.

Vejreglen består af følgende elementer:

- En trykt del (nærværende dokument), der indeholder retningslinier for fastlæggelse af dimensioneringsgrundlaget (trafikbelastning, materialeegenskaber) samt kortfattet vejledning i anvendelse af dimensioneringsprogrammet MMOPP2007 (Mathematical Modeling Of Pavement Performance version 2007) - i det følgende blot betegnet MMOPP.
- Installationspakken til dimensioneringsprogrammet MMOPP, inklusive den aktuelt gældende parameter database.
- En manual til MMOPP, der redegør for den teoretiske baggrund for MMOPP programmet.

Vejreglen kan anvendes til dimensionering af både fleksible, halvtive og stive befæstelser. Der er defineret 3 niveauer for dimensionering:

- Niveau 1, Katalogbefæstelser - befæstelsen fastlægges ud fra et trykt katalog.
- Niveau 2, Analytisk-Empirisk Dimensionering - befæstelsen dimensioneres på grundlag af dimensioneringskriterier ud fra prædefinerede eller brugervalgte trafik- og materialeparametre.
- Niveau 3, Dimensionering ved simulation - befæstelsen dimensioneres på grundlag af simulerede nedbrydningsforløb til at overholde standardiserede eller brugervalgte krav til holdbarhed og pålidelighed.

For alle typer befæstelser foreligger mulighed for dimensionering på niveau 1. På niveau 2 kan dimensioneres fleksible, halvtive og beton-befæstelser, og på dette niveau kan der også dimensioneres forstærkning af fleksible befæstelser. Dimensionering på niveau 3, hvor der ligeledes er mulighed for optimering af anlægssomkostningen, er kun mulig for fleksible befæstelser, og endnu ikke fuldt udviklet, hvorfor dimensionering på dette niveau indtil videre bør betragtes som retningsgivende.

Vejregelforslaget blev, godkendt til at udsende som vejregelforberedende arbejde på et møde i Vejregelrådet i september 2001. I oktober 2003 blev programmet, denne vejregel samt brugervejledningen udgivet som vejregelforberedende rapport til frivilligt brug. I april 2004 blev den vejregelforberedende rapport revideret på grund af en redaktionel ændring i brugervejledningen samt en rettelse til programmet ("Æ10" specifikationen og en række andre belastningsspecifikationer blev fjernet fra programmets database).

I marts 2005 blev den reviderede udgave af programmet, vejreglen og brugervejledningen godkendt af vejregelrådet som gældende.

Den foreliggende udgave er en justering af vejreglens udgave, dateret marts 2005.

I forhold til denne udgave er det analytiske dimensioneringskriterium for cementstabiliseret grus, der var baseret på de svenske standarder erstattet af dimensioneringskriterier for både cementstabiliseret grus og sand, udviklet på grundlag af VI rapport 138, "Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements", der blandt andet baserede sig på de i 2003 gennemførte fuldskala udmattelsesforsøg med 6 forsøgsbelægninger.

Endvidere er indført stokastisk simulation af frostnedtrængning, hvilket har gjort simulationsberegninger for sporkøring konsistente for alle underbundstyper.

Vejreglen

- Der er indført 3 nye cementbundne bærelagstyper. Materialernes E-moduler er sammenkædet med deres 360-døgns trykstyrke ud fra sammenhænge angivet af American Concrete Institute (ACI).

Programmet

- De gennemførte ændringer har ikke ændret på programmets funktion.
- Indførelsen af stokastisk beregning af frostnedtrængning medfører at gamle, lokale databaser hos brugerne ikke kan anvendes med det nye program, og at der bør gennemføres et højere antal simulationer ved dimensionering på niveau 3.

Vejreglen planlægges udbygget med mulighed for at kunne dimensionere cementstabiliserede bærelag ved simulation (niveau 3) ved en revision, der forventes afsluttet ultimo 2007.

Godkendelse

Den reviderede vejregel, programmet og brugervejledningen blev godkendt af Vejreglerådet den 13. marts 2007.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1.	VEJREGLENS ANVENDELSE	2
1.1	Begrænsninger	2
1.2	Præcision i simulation	3
1.3	Praktiske forhold	3
1.4	Nomenklatur	3
2.	DIMENSIONERING AF NYE BELÆGNINGER	4
2.1	Katalogmetoden	4
2.2	Analytisk-empirisk dimensionering og dimensionering ved simulation	4
3.	DIMENSIONERING AF FORSTÆRKNINGSBELÆGNINGER	8
4.	MATERIALETYPER	9
4.1	Udførelsestekniske hensyn	9
4.2	Materialeparametre i MMOPP	9
4.3	Materialeparametre, asfaltlag	10
4.4	Hastighedsreduktion af asfalt E-moduler	11
4.5	Materialeparametre, betonbelægningssten	11
4.6	Materialeparametre, øvrige lag	13
4.7	Jordbundsforhold	13
4.8	Dimensioneringskriterier og levetider	14
5.	KATALOG	16
6.	ANALYTISK-EMPIRISK DIMENSIONERING, EKSEMPEL	19
6.1	Problem	19
6.2	Opstilling af forudsætninger	19
6.3	Automatisk analytisk dimensionering	20
6.4	Manuel analytisk dimensionering	21
6.5	Dimensionering af miljøprioriteret gennemfart	22
6.6	Dimensionering af alternativ med CG bærelag	23
6.7	Dimensionering ved simulering og optimering	24
6.8	Forstærkningsdimensionering	27
7	DOKUMENTATION	28

1. VEJREGLENS ANVENDELSE

Et vejanlægs klasse og omfang er normalt bestemmende for valg af vejbefæstelsens type og for den nøjagtighed, hvormed man ønsker vejbefæstelsen dimensioneret.

Denne vejregel angiver derfor forskellige dimensioneringsmetoder, der kan anvendes afhængigt af anlæggenes betydning og omfang.

Det er naturligvis vanskeligt at foretage en inddeling af vejanlæg i få grupper, uden at grænserne mellem grupperne bliver uskarpe, men vejreglerne opererer med følgende grove inddeling:

Større anlæg

Mellemstore anlæg

Mindre og mindre betydende anlæg

For den første gruppe, større anlæg, bør vejbefæstelsen dimensioneres efter både den analytisk-empirisk metode og simulationsmetoden, som beskrevet i nærværende Vejregel.

Ved mellemstore anlæg kan dimensioneringen foretages af den projekterende instans ved anvendelse af Vejreglens analytisk-empiriske dimensioneringsprogram eller dens simulationsprogram.

Ved mindre anlæg og mindre betydende anlæg foretages normalt ingen egentlig dimensionering. For den sidste gruppe, hvor man i mange tilfælde mangler grundige forundersøgelser, kan befæstelsen "dimensioneres" ved valg i et standardkatalog. Et sådant katalog er indeholdt i vejreglens Tabel 16.

For belægninger med betonbelægningssten (BBS) har det ikke været muligt under det gennemførte vejregelarbejde at fastlægge en analytisk-empirisk dimensioneringsmetode, hvorfor der alene foreligger katalog-befæstelser, angivet i Tabel 18. Belægninger med BBS kan anvendes for anlæg på alle niveauer, eventuelt i forbindelse med kompetent rådgivning for mellemstore og større anlæg.

1.1 Begrænsninger

Der gøres opmærksom på, at simulationsprogrammet er **kalibreret til danske forhold**.

Dette medfører, at simulationsberegninger skal udføres under anvendelse af databasens standard parametre for at være i overensstemmelse med vejreglen.

1.2 Præcision i simulation

Simulationsberegning er en stokastisk proces, hvor skønnet over de ”sande” værdier af middel og spredning for de forskellige levetidsmål bliver mere præcist, jo flere simulationer, der foretages.

Det er f.eks. nødvendigt at foretage ca. 1.000 simulationer for at bestemme 85 % fraktiler for levetiderne med en præcision bedre end 4 %. Så høje simulationstal er med de nuværende processorhastigheder ikke praktiske i en indledende dimensioneringsproces, og måske heller ikke rimelige, når de øvrige usikkerheder i fastlæggelse af klima m.m. tages i betragtning.

Vurdering af et slutresultat, eller sammenligning af 2 alternative vejbefæstelser bør dog altid baseres på et højt antal simulationer.

1.3 Praktiske forhold

Dimensioneringsmetoderne er i stand til at fastlægge belægnings-tykkelser for et givet vejprojekt, differentieret ud fra mange forskellige forhold.

Ved det endelige valg af tykkelser skal der også tages hensyn til arbejdets praktiske gennemførelse.

Brugerens valg af materialer svarer til den færdige konstruktion. Som oftest udlægges slidlaget først året efter bærelaget, og man skal i den forbindelse være opmærksom på, at et GABII lag ifølge Vejregel for varmblandet asfalt skal afdækkes med et tættere asfaltmateriale, inden det udsættes for trafik og senest ½ år efter udlægning.

Tilsvarende bør man ved konstruktioner med CG-bærelag specificere et binderlag.

1.4 Nomenklatur

Følgende betegnelser, som ikke er defineret i den generelle nomenklatur, er anvendt i nærværende vejregel:

Trafikklasser: Angivelse af vejens trafikintensitet i 8 klasser, benævnt T0 til T7. Den laveste klasse, T0, er alene beregnet for trafik med lette køretøjer, for de øvrige er opdelingen baseret på dagstrafikken, målt i antal lastbiler eller i $\text{Æ}10$ aksler (se nedenfor).

Dimensioneringsbelastning: Betegnelse for den belastningstype, der anvendes i dimensioneringsberegningerne. Vejreglen anvender en 10 tons aksel, repræsenteret ved 2 tvillinghjul, med en C-C afstand mellem dækkene på 350 mm. Denne belastning benævnes ”Ækvivalent 10-ton aksel”, eller kort: ” $\text{Æ}10$ -aksel”.

Dimensioneringstrafik: Antal af påvirkninger af den ovenfor angivne dimensioneringsbelastning, $\text{Æ}10$, som vejbelægningen skal kunne holde til. Antallet betegnes som $N_{\text{Æ}10}$. Der kan dog specificeres et antal påvirkninger over et kortere tidsrum, f.eks. $N_{\text{Æ}10}/\text{dag}$,

2. DIMENSIONERING AF NYE BELÆGNINGER

Metoderne forudsætter, at der fastlægges en dimensioneringstrafik samt at underbunden og de indgående lags materialeegenskaber (E-værdier og andre materialeparametre) er kendte eller antaget. Endvidere er det en forudsætning, at god anlægsteknisk praksis følges ved udlægning af de enkelte lag. De lagtykkelser, der findes ved hjælp af diagrammerne, er dimensioneringslagtykkelser, idet afvigelser fra disse ikke må være større end normaltolerancer, beskrevet i udbudsmaterialet.

2.1 Katalogmetoden

Der er skelnet mellem følgende 8 trafikklasser jfr. Tabel 1. Der er forudsat tosporet vej med normal køresporsbredde.

Klasse	Lastbiler på vejen pr. døgn i begge retninger tilsammen	$N_{\text{Æ}10}$ pr. dag i spor (øvre grænse)	Dimensioneringstra- fik $N_{\text{Æ}10}/\text{år}$
T0*	Kun lette køretøjer	-	-
T1	Mindre end 1	0,5	75
T2	Op til 75	20	7.300
T3	75 til 150	50	18.300
T4	150 til 600	200	73.000
T5	600 til 1400	500	180.000
T6	1400 til 2000	800	300.000
T7	Flere end 2000	1500**	500.000**
Note * I klasse T0 bør træffes aktive foranstaltninger mod at tunge køretøjer – herunder snerydningsmateriel - færdes på vejene			
** Principielt ubegrænset – de angivne værdier bruges som standardværdier i dimensioneringsprogram			

Tabel 1 Trafikklasser

2.2 Analytisk-empirisk dimensionering og dimensionering ved simulation

Trafikbelastningen udtrykkes ved $N_{\text{Æ}10}$, antal ækvivalente 10 t akseltryk (Æ10) pr. kørespor i dimensioneringsperioden

$N_{\text{Æ}10}$ beregnes af formlen:

$$N_{\text{Æ}10} = P \cdot K_F \cdot K_K \cdot K_R \cdot F_{SS} \cdot \Sigma (F_{\text{Æ}10} \cdot L)$$

P er en vækstfaktor, der tager højde for trafikstigningen gennem dimensioneringsperioden.

P (i rent tal) beregnes ud fra den årlige stigning α (i rent tal) i Æ10 belastning og dimensioneringsperioden n (i år) ud fra formlen:

$$P = \frac{(1 + \alpha)^n - 1}{\alpha}$$

Ovenstående formel er gældende, såfremt der er tale om en stigende tilvækst (samme procentdel stigning af forrige års trafik).

Hvis der er tale om konstant tilvækst (samme procentdel af 1. års trafik) anvendes formlen:

$$P = n \times (1 + (n - 1) \times \frac{\alpha}{2})$$

Ved dimensionering ud fra simulering foretager programmet selv en løbende opskrivning af trafikmængden med den valgte stigningsprocent. Nedbrydningsberegningerne foretages så ved en simulation af trafik påført som 10 t tvillingmonterede aksler.

K_F er en korrektionsfaktor, der tager højde for lastbilernes fordeling over vejens tværsnit, som angivet i nedenstående tabel:

Vejbredde	K_F
Smalle veje, hvor trafikken forventes at køre i et spor.	1,0
2-sporede veje	0,5
4-sporede veje	0,45

Tabel 2 Korrektionsfaktor for fordeling

K_K er en korrektionsfaktor, der tager højde for kanalisering af trafikken, f.eks. i forbindelse med miljøprioriterede gennemfarter, som angivet i nedenstående tabel

Kanaliseringsgrad	K_K
Opmarchfelter, kanaliserede kryds med kantsten	2,0
Miljøprioriteret gennemfart og lignende	1,5
Normal køresporsbredde (3,75 m)	1,0

Tabel 3 Korrektionsfaktor for kanalisering

K_R er en korrektionsfaktor, der tager højde for særlige forhold, som f.eks. vridning, der gør sig gældende i rundkørsler.

Rundkørselstype	K_R
Lige vej	1,0
Rundkørsel med enkelt kørespor	2,0
Rundkørsel med 2 eller flere kørespor	1,0

Tabel 4 Korrektionsfaktor for rundkørsler

2.2.1 Valg af Æ10-faktor ($F_{\text{Æ10}}$)

Ved trafiktællinger foretages også en typeopdeling af de talte køretøjer. For hver enkelt type skal anvendes en specifik Æ10 faktor, således at fastlæggelsen af L foregår som en summation.

Æ10-faktorerne er i de følgende tabeller opdelt efter køretøjsart på to forskellige måder. Den ene er den traditionelle opdeling af køretøjer i lastbiler, påhængsvogntog, sættevognstog og busser, som er kendt fra manuelle tællinger. Den anden opdeling er foretaget af hensyn til mulighederne for at udnytte resultaterne fra maskinelle længdeklassifikationer. Her opdeler man typisk køretøjerne efter længdegrænserne 5,8 m og 12,5 m. Disse resultater er behæftet med noget større usikkerhed, da personbiler med påhæng (trailer eller campingvogn) bliver registreret sammen med busser og lastbiler.

2.2.2 Standard-faktorer for alle veje undtagen bygader

De faktorer, der skal bruges i de fleste tilfælde (alle veje på nær egentlige bygader), fremgår af Tabel 5 og Tabel 6. I Tabel 5 er Æ10-faktorerne opdelt efter køretøjsarten og i Tabel 6 efter køretøjslængden. I Tabel 6 (køretøjslængder mere end 5,8 m) er faktorerne både angivet for køretøjer under og over 12,5 m og for alle køretøjer over 5,8 m.

Køretøjsart	$F_{\text{Æ10}}$
Lastbiler	0,4
Påhængsvogntog	1,5
Sættevognstog	1,2
Busser	0,6

Tabel 5 Æ10-faktorer opdelt på køretøjsart

	Længdegruppe	$F_{\text{Æ10}}$
Ved opdeling af lastbiler i 2 længdegrupper	5,8 - 12,5 m	0,35
	Over 12,5 m	1,35
Uden opdeling af lastbiler i længdegrupper	Over 5,8 m	0,75

Tabel 6 Æ10-faktorer opdelt efter køretøjslængde

2.2.3 Standard-faktorer bygader

For egentlige bygader er faktorerne - på nær for busser - mindre end for det øvrige vejnet.

Køretøjsart	$F_{\text{Æ10}}$
Lastbiler	0,3
Påhængsvogntog	0,9
Sættevognstog	0,5
Busser	0,6

Tabel 7 Æ10-faktorer opdelt på køretøjsart, bygader

2.2.4 Super- single- korrektion, F_{ss}

	Længdegruppe	$F_{\text{Æ10}}$
Ved opdeling af lastbiler i 2 længdegrupper	5,8 - 12,5 m	0,25
	Over 12,5 m	0,65
Uden opdeling af lastbiler i længdegrupper	Over 5,8 m	0,30

Tabel 8 Æ10-faktorer opdelt efter køretøjslængde, bygader

Som nævnt skal der ved anvendelsen af Æ10-faktorerne udover akseltrykkene også tages hensyn til dækmonteringen, idet der skal korrigeres for monteringen af supersingledæk. Denne korrektion fremgår af Tabel 9, idet den høje værdi for kommuneveje bør anvendes på trafikveje og den lave på andre kommunale veje.

Vejtype	F_{ss}
Motorveje	1,3
Øvrige hovedlandeveje og landeveje	1,3
Kommuneveje	1,0 - 1,2

Tabel 9 Korrektionsfaktor for supersingledæk

L er antal lastbiler (incl. busser) pr. år i begge retninger. En lastbil er i denne sammenhæng et køretøj på over 3,5 t tilladt totalvægt.

Udviklingen i lastbiltrafikken og dermed Æ10 belastning kan variere med ændringer i de overordnede samfundsmæssige planlægningsforudsætninger, ligesom der kan være tale om regionale forskelle. Der kan endvidere være et ønske om at beregne den samlede trafikbelastning for forskellige dimensioneringsperioder.

Hvor der anvendes trafiktællinger som basis for dimensioneringen, findes L ud fra formlen:

$$L = \text{Årsdøgntrafik} \cdot 365 \cdot (\text{lastbilprocent}/100) \cdot 0,86$$

Lastbilprocenten i ovenstående formel angiver procenten hverdage mellem kl. 6 - 18, mens **korrektionsfaktoren 0,86** tager højde for at der er mindre lastbiltrafik på hverdage mellem kl. 18 - 6 og i weekender.

Dimensionering af forstærkningsbelægninger kan i den nuværende udgave af MMOPP alene udføres som analytisk dimensionering.

Som forberedelse til en forstærkningsdimensionering opdeles strækningen ved hjælp af egnede statistiske metoder i delstrækninger, der statistisk set kan betragtes som ensartede med hensyn til materialer, lagtykkelser, nedbrydningstilstand m.v..

Inddata til dimensioneringen er:

- trafik, beregnet efter samme metodik som for nye belægninger
- data for den eksisterende belægning, hvor der anvendes gennemsnitlige lagtykkelser og 75 % fraktiler for lagenes E-moduler (dvs. at 75 % af E-modulerne er højere end de indtastede værdier)
- forstærkningslagets E-modul (typisk 2000 MPa eller 3000 MPa afhængigt af om der anvendes bitumen 70/100 eller 40/60 som bindemiddel)

E-modul data vil typisk komme fra faldlodsforsøg. For asfaltlaget bør de regningsmæssigt korrigeres til referencetemperaturen på 20°C inden beregning af 75 % fraktilen. Mange faldlodsprogrammer kan udføre denne korrektion automatisk, ellers kan anvendes en omregning efter nedenstående formel, hvor t er asfalttemperaturen i °C:

$$E(20^{\circ}\text{C}) = E(t) \times [1 - 2 \times \log_{10}(20^{\circ}\text{C}/t)]$$

Selve dimensioneringen foretages ved at programmet justerer forstærkningslagets tykkelse indtil lineærelastiske beregninger viser at spændingskriterierne på oversiden af de ubundne lag samt underbund, samt tøjningskriteriet i undersiden af det eksisterende asfaltlag alle er overholdt.

4. MATERIALETYPER

4.1 Udførelsestekniske hensyn

For forskellige materialetyper bør der af udførelsesmæssige og beregningsmæssige grunde overholdes visse praktiske minimumstykkelser.

Disse forhold er afspejlet i vejreglens katalogbefæstelser.

Vedrørende valg af minimumslagtykkelser for materialer henvises i øvrigt til relevante forskrifter.

4.2 Materialeparametre i MMOPP

MMOPP programmet indeholder tre niveauer af dimensionering:

- Niveau 1 – Katalogbefæstelser
- Niveau 2 – Analytisk-empirisk dimensionering
- Niveau 3 – Dimensionering ved simulation

Ved fastlæggelsen af Katalogbefæstelserne, og ved dimensionering både analytisk-empirisk og ved simulation fordres kendskab til materialernes E-moduler og Poisson's forhold, v. Sidstnævnte er sat til 0,35 for alle materialer bortset fra beton, som tillægges værdien 0,15, og cement-stabiliseret grus, CG, som tillægges værdien 0,25.

I nedenstående skemaer er der for de mest almindelige forekommende materialer angivet elasticitetsegenskaber. Anvendelse af disse E-værdier forudsætter, at materialerne opfylder de gældende udbuds- og anlægfskrifter.

4.3 Materialeparametre, asfaltlag

Dybde under vejoverflade	Materiale	Bitumen	E-værdi [MPa]	Interval for lagtykkelse [mm]
Indtil 100 mm	OB og MOB	Alle typer	500	10/15
	TB k	330/430	500	10/25
	TB k	250/330	500	10/25
	TB k	160/220	1000	15/25
	TB k	70/100	1000	15/25
	PA	330/430	500	15/45
	PA	250/330	500	15/45
	AB	160/220	1000	20/55
	AB	70/100	2000	20/55
	AB*	40/60	3000	25/55
	SMA	40/60	3000	25/50
	SMA	Modificeret	3000	25/50
	DA	Modificeret	1500	40/45
	ABB	40/60	3000	40/90
	ABB	Modificeret	3000	40/90
	GAB 0	70/100	2000	35/70
	GAB 0	40/60	3000	40/75
	GAB I	70/100	2000	50/100
	GAB I	40/60	3000	60/110
	GAB II	40/60	3000	80/180
	Semifleksibel	70/100	8000	40/80
Over 100 mm	ABB	40/60	5000	40/90
	ABB	Modificeret	5000	40/90
	GAB 0	70/100	3000	35/70
	GAB 0	40/60	5000	40/75
	GAB I	70/100	3000	50/100
	GAB I	40/60	5000	60/110
	GAB II	40/60	5000	80/180
*) AB med bitumen 40/60 anvendes i særlige tilfælde, f.eks. ved tungt trafikerede kørebaner, kryds og opmarchbaner.				

Tabel 10 Materialeparametre, asfaltlag

4.4 Hastighedsreduktion af asfalt E-moduler

Ved en reduktion af kørselshastigheden til under 60 km/h vil asfaltens visko-elastiske karakter medføre en reduktion af E-modulet.

Det kan for almindelige danske asfaltmaterialer antages at størrelsen af reduktionen afhænger af hastigheden som angivet i nedenstående tabel.

Hastighed [km/h]	E-modul korrektionsfaktor
60 og derover	1,0
30	0,8
10	0,5
5	0,4
2,5	0,3

Tabel 11 Korrektion af asfalt E-moduler for hastighed

Denne reduktion kan anvendes manuelt i de analytisk-empiriske dimensioneringsberegninger, men det anbefales i stedet at anvende MMOPP programmets indbyggede automatiske korrektionsformel.

4.5 Materialeparametre, betonbelægningssten

Befæstelser med betonbelægningssten (BBS) anvendes på veje og pladser med trafikeringshastigheder under 60 km/h.

For BBS befæstelser er det formen, tykkelsen og læggemønsteret der har indflydelse på belægningens bæreevne. Betonbelægningssten defineres her som følger:

$$\begin{aligned} \text{Længde/tykkelse} &\leq 4 \\ \text{Arealet af stenen} &\leq 1 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Med dimensioner udover dette er der tale om fliser – og de viste katalogbefæstelser mv. er ikke gældende.

Betonbelægningssten produceres i 60, 70, 80, 90 og 100 mm tykkelse. I kataloget er angivet de anbefalede minimumstykkelser. Benyttes tykkere sten kan bærelagstykkelsen reduceres. Som hovedregel vil en forøgelse af stentykkelsen med 10 mm betyde at SG-laget kan mindskes med 20 mm og bundne bærelag med 10 mm.

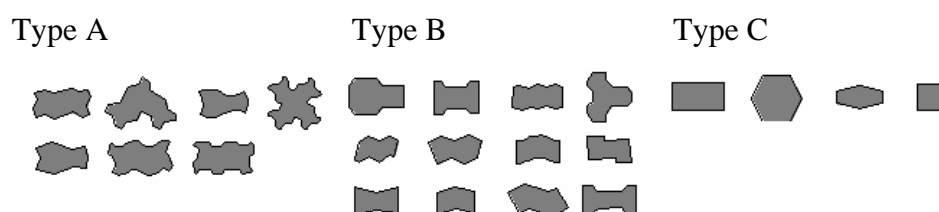
Betonbelægningssten udlægges på et lag afretningsgrus (AG), typisk ca. 30 mm tykt.

Der eksisterer mange forskellige udformninger af BBS, men de kan alle deles ind i følgende tre hovedtyper:

Type A: Fortandede sten der griber ind i hinanden og derved modvirker bevægelser mellem stenene i såvel tvær- som længdeaksen.

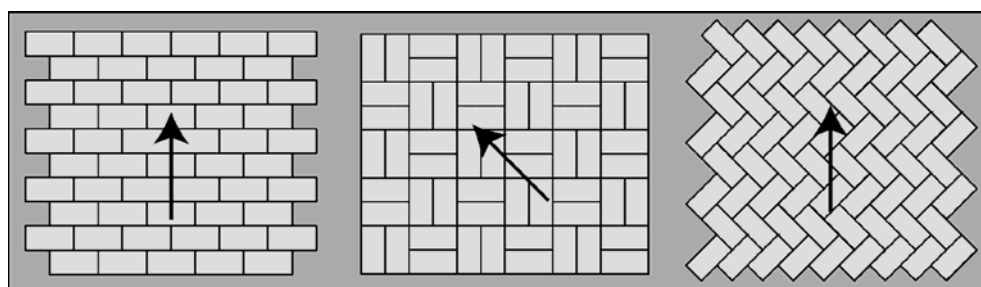
Type B: Fortandede sten der griber ind i hinanden og derved modvirker bevægelser mellem stenene i én retning.

Type C: Sten der ikke har nogen låse-effekt.



Figur 1 Eksempler på de forskellige stentyper

Med hensyn til læggemønster eksisterer der grundlæggende følgende tre hovedtyper, hvor pilene angiver den optimale kørselsretning:



Figur 2 Løberforbandt, blokforbandt og Vinkelforbandt (sildebensmønster)

Sildebensmønsteret/vinkelforbandtet er alt andet lige det mest effektive til at modstå trafikens påvirkninger (specielt horisontale kræfter fra bremsende, accelererende og svingende trafik). Derefter kommer blokforbandtet og til sidst løberforbandtet. Der bør altid vælges det mest effektive mønster som det er muligt at lægge den aktuelle sten i.

4.6 Materialeparametre, øvrige lag

Materiale	E-modul (MPa)	Min. tykkelse (mm)
Cementbeton, uarmeret	35.000	150
Cementstabiliseret grus, intakt lag (værkblandet), trykstyrke 10 MPa	15.000	150
Cementstabiliseret grus, intakt lag (værkblandet), trykstyrke 8 MPa	13.000	150
Cementstabiliseret sand, intakt lag (værkblandet), trykstyrke 6 MPa	7.000	150
Skærvemacadam (SKM)	1.000	70
Singelsmacadam (SIM)	600	70
Stabilt grus (SG)	300	150
Knust Genbrugsbeton, Kvalitet A (KGBA)	400	150
Knust Genbrugsbeton, Kvalitet B (KGBB)	300	150
Knust Genbrugsbeton, Kvalitet C (KGBC)	200	150
Knust Genbrugsasfalt (KGA)	300	150
Knust Tegl	250	150
Forbrændingsslagge	70	150
Bundsikringslag, sand (BL)	100	200

Tabel 12 Materialeparametre, øvrige lag

4.7 Jordbundsforhold

Den samlede tykkelse af vejbefæstelsen fastlægges ud fra hensynet til frosthævningsrisiko i kombination med trafikklassen. Såfremt strækningens jordarter ikke kan fastlægges ud fra tidligere erfaringer, der giver et vel underbygget kendskab til jordbundsforholdene, bør der udføres undersøgelse i marken.

Er de aktuelle jordarters opfrysning-risiko ikke bestemt på anden måde, kan værdierne i nedenstående skema benyttes.

Risikogruppe	Frostsikker	Frosttvivlsom	Frostfarlig
<div>Materiale-typer</div> <div>Trafik-klasse</div>	Sand og grus uden betydende partier af silt og siltholdigt ler	Moræneler og ler	Silt og meget siltholdige jordarter med mulighed for vandtilførsel Forbrændingsslagge og flyveaske ¹⁾
T0, T1	Som bestemt ud fra analytisk-empirisk dimensionering	400 mm	500 mm
T2		500 mm	700 mm
T3		600 mm	800 mm
T4, T5, T6, T7		700 mm	900 mm
Note 1): Aktuel frosthævningsrisiko bør fastlægges ved laboratorieundersøgelse			

Tabel 13 Mindste totale belægningstykkelser under hensyn til frosthævningsrisiko

Ved fastlæggelse af disse tykkelser er det forudsat, at der etableres et velfungerende afløbssystem for såvel overfladevand som for grundvand. Hvor der anvendes kantsten eller rørlagt afløb fra kørebanen og befæstet fortov eller rabat, kan ovennævnte tykkelser for frostsikring reduceres med 100 mm.

Ved anlæggets gennemførelse bør jordarter og forhold i råjordsplanum sammenholdes med de for dimensioneringen fastsatte jordarter og forhold, hvorefter de endelige overbygningstykkelser fastsættes.

Med hensyn til E-værdier for underbund kan anføres nedenstående retningsgivende værdier:

Jordarter	E-modul (MPa)
Moræneler, kalkfrit ¹⁾	10 - 20
Moræneler, kalkholdigt ¹⁾	20 - 50
Moræneler, fedt, kalkholdigt ¹⁾	10 - 30
Senglaciale ler- og siltaflejringer ¹⁾	5 - 15
Sand, fint (frostfarligt)	40 - 70
Sand	70 - 150
Grus	100 - 300
Andre materialer ²⁾	Se note 2)
Noter: 1) Afhængigt af in situ vandindhold	
2) Fastlægges ud fra felt- eller laboratoriemålinger	

Tabel 14 E-værdier for underbund

Som standardværdier for underbundsbetegnelserne "Frostsikker", "Frostvivlsom" og "Frostfarlig" anvendes i MMOPP 100 MPa, 40 MPa og 20 MPa.

4.8 Dimensioneringskriterier og levetider

Analytisk-empirisk dimensionering

Ved denne type dimensionering, der er baseret på lineærelastiske beregninger med uendelig vandret udstrækning af lagene, fastlægges lagtykkelserne ud fra dimensioneringskriterier, der sammenkæder trafikmængden, udtrykt ved antallet af $\text{Æ}10$ aksler, $N_{\text{Æ}10}$, og de dynamiske påvirkninger, der kan tillades i de enkelte lag under $\text{Æ}10$ aksellasten.

Dimensioneringskriterierne har følgende form:

Ubundne materialer – tilladelig største lodrette trykspænding på oversiden af laget:

$$\sigma_z = 0,086 \text{ MPa} \times (E/160 \text{ MPa})^{1,06} \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,25}$$

Asfalt – tilladelig største vandrette træktøjning i undersiden af asfaltlaget:

$$\varepsilon_h = -0,000250 \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,191}$$

Ved forstærkningsberegninger beregnes tøjningen i undersiden af det gamle asfaltlag.

Beton - tilladelig største vandrette træktøjning i undersiden af betonpladen:

$$\varepsilon_h = -0,000041 \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,13}$$

Cementstabiliseret grus (CG) og sand (CS) - tilladelig største vandrette træktøjning i undersiden af laget. Denne værdi afhænger af materialets start E-modul, E_{INIT} , samt hvilken grad af nedbrydning, der accepteres ved dimensioneringsperiodens udløb. Nedbrydningsgraden karakteriseres ved materialets slut E-modul, E_{TERM} . De anvendte værdier og tilhørende kriterieligninger fremgår af Tabel 15.

Materiale	Trykstyrke (MPa)	E_{INIT} (MPa)	E_{TERM} (MPa)	Kriterieligning
CG	10	15.000	2.000	$\varepsilon_h = -0,000090 \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,125}$
CG	8	13.000	2.000	$\varepsilon_h = -0,000075 \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,139}$
CS	6	7.000	1.000	$\varepsilon_h = -0,000070 \times (N_{\text{Æ}10}/10^6)^{-0,213}$

Tabel 15 Kriterier for cementstabiliserede materialer

De valgte slutværdier sikrer at CG-materialet efter dimensioneringsperiodens udløb vil bevare en bæreevne på mindst 1.500 MPa, mens CS-materialets bæreevne vil ligge mellem et skærvemacadamlag og et lag singelsmacadam.

Dimensionering ved simulation

I simulationsberegningerne, der er baseret på Ækvivalente Tykkelsers Metode, fastlægges for valgte befæstelsesopbygninger fire forskellige levetider, der alle angives i år. Disse levetider er baseret på kriterier for belægningens tilladelige tilstand, som følger:

IRI – belægningens jævnhed

Tilladelig værdi: 4 m/km

Sporkøring – gennemsnitlig spordybde af sektion:.

Tilladelig værdi: 10 mm

Typisk er målte spordybder på op til 15 mm acceptable ved normale tværfald. Den valgte grænseværdi giver rum for en 5 mm sporkøring af asfalthagene, fremkommet ved forskydningsdeformationer, der ikke tages i regning i MMOPP.

E_{SNIT} - forhold mellem asfalthagets gennemsnitlige E-modul og et intakt asfalthag med de aktuelle materialers standard E-moduler.

Tilladelig værdi: 0,67

Når denne værdi nås, er der risiko for begyndende revnedannelser i køresporet

E_{MIN} - forhold mellem den mindste E-modul af asfalthaget og et intakt asfalthag med de aktuelle materialers standard E-moduler

Tilladelig værdi: 0,33

Når denne værdi nås, er der risiko for begyndende slaghuller i køresporet.

5. KATALOG

	Fleksible belægninger 10 års trafik						
	Trafikklasse						
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6 & T7
Lastbiler per døgn ¹	Kun lette køretøjer ³	< 1	1-75	75-150	150-600	600-1400	
Æ10 belastning ²		0	< 20	20-50	50-200	200-500	> 500
Asfalt + SG	30 mm PA 250/330 120 mm SG 150 mm BL	20 mm PA 250/330 50 mm GAB 0 70/100 150 mm SG 180 mm BL	20 mm PA 250/330 80 mm GAB1 70/100 150 mm SG 250 mm BL	25 mm PA 250/330 60 mm GAB 0 70/100 60 mm GAB 1 70/100 150 mm SG 305 mm BL	25 mm PA 250/330 60 mm GAB 0 70/100 90 mm GAB 1 70/100 170 mm SG 355 mm BL	30 mm AB 70/100 60 mm ABB 40/60 65 mm GAB I 40/60 215 mm SG 350 mm BL	Benyt dimensionerings software
			25 mm AB 160/220 70 mm GAB 0 70/100 150 mm SG 255 mm BL	25 mm AB 160/220 50 mm GAB 0 70/100 60 mm GAB 1 70/100 150 mm SG 315 mm BL	30 mm AB 70/100 60 mm GAB 0 70/100 75 mm GAB 1 70/100 160 mm SG 375 mm BL	35 mm SMA 40/60 60 mm ABB 40/60 60 mm GAB 1 40/60 215 mm SG 350 mm BL	Benyt dimensionerings software
			15 mm TB-k 80 mm GAB 1 70/100 150 mm SG 255 mm BL	15 mm TB-k 60 mm GAB 0 70/100 60 mm GAB 1 70/100 150 mm SG 315 mm BL	20 mm TB-k 60 mm GAB 0 70/100 90 mm GAB 1 70/100 170 mm SG 360 mm BL	20 mm TB-k 65 mm ABB 40/60 75 mm GAB I 40/60 210 mm SG 330 mm BL	Benyt dimensionerings software
Asfalt + SIM		20 mm PA 250/330 100 mm SIM ⁴⁾ 280 mm BL ⁵⁾	40 mm PA 250/330 210 mm SIM ⁴⁾ 260 mm BL ⁵⁾	25 mm PA 250/330 60 GAB 0 70/100 200 mm SIM 315 mm BL ⁵⁾	30 mm AB 70/100 70 mm GAB 0 70/100 230 mm SIM 370 mm BL ⁵⁾		
Asfalt + SKM		20 mm PA 250/330 100 mm SKM ⁴⁾ 280 mm BL ⁵⁾	20 mm PA 250/330 200 mm SKM ⁴⁾ 280 mm BL ⁵⁾	25 mm PA 250/330 240 mm SKM ³⁾ 335 mm BL ⁵⁾	30 mm AB 70/100 60 mm GAB 0 70/100 200 mm SKM 410 mm BL ⁵⁾	30 mm AB 70/100 60 mm GAB 0 70/100 250 mm SKM 360 mm BL ⁵⁾	Benyt dimensionerings software
Noter:	1. Lastbiler på vejen pr. døgn i begge retninger til sammen. (Se endvidere Tabel 1) 2. N _{Æ10} per dag i spor (øvre grænse) 3. Belægningstypen er alene tænkt anvendt til stier i parker og tilsvarende, hvor der ikke forekommer trafik med tunge køretøjer 4. Toplagsfyldt Singelsmacadam hhv. Skærvemacadam 5. Overfladen af bundsikringslaget bør udføres som kørestabil						

Tabel 16 Fleksible belægninger til 10 års trafik på frostvivlsom underbund (40 MPa). For andre E-moduler af underbunden kan foretages analytisk dimensionering, dels for 40 MPa, dels for den aktuelle værdi, hvorefter tykkelsen af bundsikringslaget justeres ud fra forskellene mellem de 2 dimensioneringer.

Nedenstående tabel er en mere fuldstændig oversigt over materialer, der kan anvendes i befæstelser under normale hensyn til trafikintensiteten.

Tabellen kan anvendes til valg af andre materialetyper i katalog-befæstelserne i Tabel 16.

Befæstelses-type	Eksempler på asfaltmaterialer der kan anvendes for de forskellige trafikklasser					
	T0, T1 & T2	T3	T4	T5	T6	T7
Lastbiler per døgn ¹	-75	75-150	150-600	600-1400	1400-2000	>2000
Æ10 belastning ²	<20	20-50	50-200	200-500	500-800	>800
Slidlag	OB	OB	OB			
				MOB		
	PA 330/430					
	PA 250/330	PA 250/330	PA 250/330	PA 250/330		
	AB 160/220	AB 160/220				
			AB 70/100	AB 70/100	AB 40/60	AB 40/60
		SMA	SMA	SMA	SMA	SMA
				DA	DA	DA
	TB k 250/330					
		TB k 160/220				
			TB k 70/100	TB k 70/100	TB k 40/60	
Bindelag				ABB 40/60	ABB Mod.	ABB Mod.
Bærelag	GAB 0 70/100	GAB 0 70/100	GAB 0 70/100			
	GAB I 70/100	GAB I 70/100				
			GAB I 40/60	GAB I 40/60		
			GAB II	GAB II	GAB II	GAB II
Noter:	1. Lastbiler på vejen pr. døgn i begge retninger til sammen. (Se endvidere Tabel 1)					
	2. N _{Æ10} per dag i spor (øvre grænse)					

Tabel 17 Eksempler på asfaltmaterialer der kan anvendes for de forskellige trafikklasser

	Befæstelser med betonbelægningssten til 10 og 20 års trafik					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Lastbiler per døgn ¹	Kun lette køretøjer	< 1	1-75	75-150	150-600	600-1400
Æ10 belastning ²		0	< 20	20-50	50-200	200-500
BBS + SG 10 års trafik	60 mm BBS 30 mm AG 120 mm SG ³ 150 mm BL ³	60 mm BBS 30 mm AG 120 mm SG ³ 190 mm BL ³	80 mm BBS 30 mm AG 190 mm SG 200 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 240 mm SG 250 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 290 mm SG 300 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 330 mm SG 250 mm BL
BBS + SG 20 års trafik	60 mm BBS 30 mm AG 120 mm SG ³ 150 mm BL ³	60 mm BBS 30 mm AG 120 mm SG ³ 190 mm BL ³	80 mm BBS 30 mm AG 240 mm SG 150 mm BL ³	80 mm BBS 30 mm AG 270 mm SG 220 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 330 mm SG 260 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 370 mm SG 210 mm BL
BBS + CG 10 års trafik		60 mm BBS 30 mm AG 120 mm CG 190 mm BL ³	80 mm BBS 30 mm AG 135 mm CG 255 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 155 mm CG 335 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 175 mm CG 415 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 210 mm CG 370 mm BL
BBS + CG 20 års trafik		60 mm BBS 30 mm AG 120 mm CG 190 mm BL ³	80 mm BBS 30 mm AG 155 mm CG 235 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 170 mm CG 320 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 195 mm CG 395 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 230 mm CG 350 mm BL
BBS + Asfalt 10 års trafik		60 mm BBS 30 mm AG 80 mm GAB I 70/100 230 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 95 mm GAB I 70/100 295 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 110 mm GAB I 70/100 380 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 130 mm GAB I 70/100 460 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 145 mm GAB I 70/100 435 mm BL
BBS + Asfalt 20 års trafik		60 mm BBS 30 mm AG 80 mm GAB I 70/100 230 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 110 mm GAB I 70/100 280 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 125 mm GAB I 70/100 365 mm BL	80 mm BBS 30 mm AG 140 mm GAB I 70/100 450 mm BL	90 mm BBS 30 mm AG 155 mm GAB I 70/100 425 mm BL
Anbefalet BBS stentype	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B	A	A
	Vælges andre stentyper end de anbefalede, bør kompetent rådgivning indhentes for at sikre belægningens funktionsegenskaber. Se endvidere afsnittet om materialeparametre					
Noter:	1. Lastbiler på vejen pr. døgn i begge retninger til sammen. (Se endvidere Tabel 1) 2. N _{Æ10} per dag i spor (øvre grænse) 3. De anbefalede tykkelser stammer fra tyske katalogbefæstelser, og overholder derfor ikke de normale anbefalede minimumstykkelser (se Tabel 12)					

Tabel 18 *Befæstelser med betonbelægningssten til 10 og 20 års trafik på frosttvivlsom underbund (40 MPa)*

6. ANALYTISK-EMPIRISK DIMENSIONERING, EKSEMPEL

6.1 Problem

En hovedlandevej skal forlægges som 4-sporet omfartsvej, befæstelsen ønskes udført med en traditionel SG belægning, dimensioneret for en 20-årig periode. Underbunden er klassificeret som frosttvivlsom, med en dimensionerings E-modul på 50 MPa, og der anvendes ikke kantsten eller anden særlig afvandingsforanstaltning.

Trafiktællinger har givet som resultat, at der ved ibrugtagningstidspunktet kan forventes 1200 lastbiler over 5,8 m's længde dagligt i begge retninger tilsammen. Der forventes en jævn trafikstigning på 50 lastbiler pr. døgn over hele perioden.

6.2 Opstilling af forudsætninger

Der er tale om en 4-sporet vej, derfor er dimensioneringstrafikken 0,45 gange den totale Æ10 trafikmængde (Tabel 2).

Trafikstigningen 1. år er $50/1200 = 0,0417$. Vækstfaktoren P (konstant vækst over hele perioden) er da:

$$P = 20 \times (1 + 19 \times 0,0417/2) = 27,9$$

Vejen er klassificeret som hovedlandevej, der kan derfor regnes med 0,75 Æ10 aksel pr. lastbil (Tabel 6). Supersinglekorrektionen aflæses til 1,3 (Tabel 9).

hvorved dimensioneringstrafikken i et spor over hele perioden bliver:

$$27,9 \times 0,45 \times 1,0 \times 0,75 \times 1,3 \times 1200 \times 0,86 \times 365 = 4.600.000 \text{ Æ10 aksler}$$

MMOPP kan ikke regne med konstant vækst, hvorfor trafikken fordeles jævnt ud over de 20 år med en vækst på 0 % pr år, altså:

$$N_{\text{Æ10}}/\text{år} = 230.000 \text{ Æ10 aksler}$$

Lastbilmængden ved periodens start placerer vejen i trafikklasse T5, men den gennemsnitlige Æ10 belastning svarer til trafikklasse T6 (Tabel 1). Da lastbilmængden ligger relativt højt i T5 vælges at dimensionere ud fra T6.

6.3 Automatisk analytisk dimensionering

Der startes med en T6 befæstelse på frosttvivlsom underbund. Der vælges 30 mm SMA 40/60, 50 mm ABB Modificeret og GAB II 40/60 bærelag.

Resulterende befæstelse får en samlet asfalttykkelse på 160 mm, en SG-tykkelse på 240 mm og en BL-tykkelse på 350 mm.

Herefter udføres en finjustering for underbunden, der er 50 MPa, og ikke standardværdien på 40 MPa, ved at ændre denne værdi i inputvinduet. Så trykkes på "Standard E", og der vælges "Brug standard asfalt E-værdier", og der trykkes igen "Analytisk". Dette giver anledning til en opjustering af asfalttykkelsen til 161 mm, mens SG-laget uændret forbliver 240 mm og en nedjustering af bundsikringslaget til 299 mm, hvorved kravet om en totaltykkelse på 700 mm overholdes (se Tabel 13).

Dette tilsyneladende paradoks at et stærkere underlag kræver større styrke i belægningens overbygning er helt i tråd med den lineærelastiske beregningsmodel og praktiske forhold. På et stivere underlag vil en given overbygning få en formindsket trykspredningseffekt – "trykkeglen" indsnævres. Dette fører til at trykket på både SG-laget og bundsikringslaget øges. For at holde levetiden uændret fordres det at stivheden af den overliggende belægning øges. I det aktuelle tilfælde var der behov for en stivhedsforøgelse for at beskytte SG-laget, men der ikke fordredes nogen ekstra SG-tykkelse for at neutralisere effekten på oversiden af bundsikringslaget. Der kan også forekomme tilfælde, der fører til andre kombinationer af tykkelsesjusteringer.

I vinduet "Input Parametre" ændres trafikmængden til slut fra 300.000 til 230.000 og antal år fra 10 til 20. Tryk på "Analytisk" fører til nedenstående belægning.

The screenshot shows a software window titled "Input parametre". It contains several input fields and buttons. The "Materiale" section has a table with columns "Materiale", "Tykkelse", and "E-værdi". The "Materiale" column has a dropdown menu with "Nyt lag" selected. The "Tykkelse" column has input fields with values 0, 172, 250, 287, and 50. The "E-værdi" column has input fields with values 0, 3755, 300, 100, and 50. There are buttons "Gem", "Start", "Slut", "Analytisk", "Optimizer", "Levetid, år", and "Standard E". The "Navn" field contains "Eksempel 2007a2" and the "Længde" field contains "30". The "Hjul" field contains "1", "Antal pr. år" contains "230000", and "Vækst, %" contains "0". There are buttons "Total.xls", "Grafik.xls", and "Data.xls". The "Min hastighed" field contains "60", "Max hastighed" contains "80", and "Start årstid" contains "5". The "År i simulering/dimensionering" field contains "20" and "Antal simuleringer" contains "10". There are buttons "Lag" and "Vis resultater".

Materiale	Tykkelse	E-værdi
Nyt lag	0	0
30 AB 40/60	172	3755
50 ABB 0	250	300
GAB II 40/60	287	100
SG	50	50

Figur 3 Analytisk dimensionering - automatisk generede lagtykkelser

6.4 Manuel analytisk dimensionering

I ovenstående tilfælde resulterer den automatiske dimensionering i en lagtykkelse for SG-laget, der ud fra et udførelsesmæssigt synspunkt er uhensigtsmæssig. Der anvendes sjældent tykkelser af dette lag, der er større end 200 – 220 mm, da større lagtykkelser principielt skal udlægges i 2 lag. Opbygningen bør derfor justeres i henhold til dette krav.

Dette gøres ved hjælp af funktionsknappen ”Levetid, år”. Når denne aktiveres, åbner et vindue, der viser den analytisk bestemte levetid for alle lag, sammen med den kritiske påvirkning (tøjning i asfalt, tryk på ubundne lag samt underbund).

The 'Input parametre' window contains the following fields and values:

Materiale	Tykkelse	E-værdi
Nyt lag	0	0
30 AB 40/60	191	3868
SG	200	300
Bundsikring	309	100
Frosttvlslom		50

Other parameters: Navn: Eksempel 2007a3, Længde: 30, Hjul: 1, Antal pr. år: 230000, Vækst, %: 0, Min hastighed: 60, Max hastighed: 60, År i simulering/dimensionering: 20.

The 'Levetid, år' window displays the following table:

Lag	E-værdi	Response	Tilladelig	Levetid, år
1	3868	162	187	41.6
2	300	0.091	0.114	50.1
3	100	0.036	0.036	20.1
4	50	0.017	0.017	22.6

Figur 4

Figur 4 viser en justering af Eksempel 2007a2 til en maksimumstykkelse for SG-laget på 200 mm. Det ses, at der kræves yderligere 19 mm asfalt. Bundsikringslaget kunne teoretisk kan reduceres til 290 mm, men derved ville man ikke længere overholde kravet om en totaltykkelse på 700 mm.

6.5 Dimensionering af miljøprioriteret gennemfart

Ved en krydsning af cykelsti ønskes skabt veldefinerede trafik- og oversigtsforhold for cyklisterne, og der etableres derfor indsnævring til et spor i hver retning. Det forventes at dette vil nedsætte hastigheden fra over 60 km/h til 30 km/h igennem indsnævringen. Der anvendes beregning med automatisk hastighedskorrektion af asfaltens E-modul, og der skal derfor justeres på værdierne af ”Min hastighed” og Max hastighed”.

Der bør specificeres et interval, hvis man efterfølgende vil gennemføre en simulation, idet en ensartet hastighed i alle simulationer vil medføre urealistiske beregningsmæssige resonansfænomener. Der indsættes derfor værdier, der ligger lige langt på hver side af 30 km/h, for eksempel 50 % hhv. under og over den forventede trafikeringshastighed eller plus/minus 10 km/h – her er valgt 20 km/h og 40 km/h.

Dimensioneringstrafikken kommer nu til at svare til forholdene på 2-sporede veje, og beregnes derfor som 50/45 af dimensionerings- trafikken på 4-sporede strækninger (se Tabel 2). Samtidig opjusteres dimensioneringstrafikken med faktoren $K_K = 1,5$ for kanalisering (Tabel 3). Trafikeringshastigheden sættes til mellem 20 og 40 km/h.

Disse justerede værdier indsættes i vinduet ”Input parametre” i MMOPP, og der dimensioneres ”Analytisk” med valg af ”Brug standard asfalt E-værdier”. Dette fører til en asfalttykkelse på 201 mm og en SG-tykkelse på 260 mm. Manuelt justeres disse tykkelser så til 225 mm henholdsvis 200 mm med en bundsikringstykkelse på 305 mm, hvorved levetidskrav og udførelseskrav bliver overholdt.

Øverst til højre i skærbilledet, ved siden af teksten ”E-værdi”, vises den hastighedsreducerede beregningsværdi for asfaltlagets E-modul, i dette tilfælde 3143 MPa, hvilket er 78 % af standardværdien svarende til trafikeringshastigheder over 60 km/h. Dette stemmer godt overens med tabelværdien 0,8 i Tabel 11.

Input parametre

Materiale	Tykkelse	E-værdi
Nyt lag	0	0
30 AB 40/60	225	4027
SG	200	300
Bundsikring	305	100
Frostvivlsom		50

Navn: Eksempel 2007b1 Længde: 30

Hjul: 1 Antal pr. år: 380000 Vækst, %: 0

Min hastighed: 20 Max hastighed: 40

År i simulering/dimensionering: 20 Antal sim:

Buttons: Gem, Start, Slut, Analytisk, Optimér, Levetid, år, Standard E

Lag	E-værdi	Response	Tilladelig	Levetid, år
1	4027	153	170	34.4
2	300	0.078	0.101	56.4
3	100	0.031	0.031	20.1
4	50	0.015	0.015	20.0

Figur 5 Fleksibel befæstelse for miljøprioriteret gennemfart

6.6 Dimensionering af alternativ med CG bærelag

Specielt ved lave hastigheder kan anvendelse af cementbundne materialer være en fordel, da deres E-modul ikke afhænger af belastningsfrekvensen. Dette fremgår tydeligt af nedenstående figur, hvor der i vinduet "Input parametre" lige over "Gem"-knappen kan aflæses at der i den aktuelle dimensionering regnes med et E-modul af de bundne lag (asfalt plus CG) på 7648 MPa, mens det for den tilsvarende beregning på forrige side fremgår at de bundne lag (her alene asfalt) kun tillægges en E-modul på 3143 MPa.

Nedenfor er vist en dimensionering af en alternativ befæstelse, udført med et 10 MPa CG-bærelag i stedet for GAB I materialet.

Det ses, at man ved anvendelse af CG erstatter 145 mm GAB II og 200 mm stabilgrus med 171 mm CG og 150 mm stabilgrus. Tykkelsen af bundne lag øges altså med 26 mm, men der spares 50 mm stabilgrus og 6 mm bundsikringslag.

I praksis vil det endvidere være muligt helt at udelade det velgraderede SG-lag og i stedet udføre den øverste del af bundsikringslaget i materialer med lempeligere krav til kornkurvens sammensætning, blot de udgør en stabil platform for udlægning og komprimering af CG-materialet.

The screenshot shows a software window titled "Input parametre". It contains several input fields and buttons. The "Materiale" section has a table with columns for "Materiale", "Tykkelse", "E-værdi", and "7648". The table lists "Nyt lag", "30 AB 40/60", "50 ABB 0", "CG 10 MPa 0", "SG", "Bundsikring", and "Frostvivlsom". The "Tykkelse" column has values 0, 251, 150, 299, and 50. The "E-værdi" column has values 0, 9798, 300, 100, and 50. The "7648" column has a value of 7648. There are buttons for "Gem", "Start", "Slut", "Analytisk", "Optimer", "Levetid, år", and "Standard E". The "Navn" field contains "Eksempel 2007c". The "Længde" field contains 30. The "Hjul" field contains 1. The "Antal pr. år" field contains 380000. The "Vækst, %" field contains 0. The "Min hastighed" field contains 20, "Max hastighed" contains 40, and "Start årstid" contains 5. The "År i simulering/dimensionering" field contains 20, and "Antal simuleringer" contains 10. There are buttons for "Total.xls", "Grafik.xls", and "Data.xls". A "Lag" button is at the bottom, and a "Vis resultater" button is at the bottom right.

Materiale	Tykkelse	E-værdi	7648
Nyt lag	0	0	Gem
30 AB 40/60	251	9798	Start
50 ABB 0	150	300	Slut
CG 10 MPa 0	299	100	Analytisk
SG	50	50	Optimer
Bundsikring			Levetid, år
Frostvivlsom			Standard E

Figur 6 Halvstiv befæstelse for miljøprioriteret gennemfart

6.7 Dimensionering ved simulering og optimering

Den i Eksempel 2007a3 (Figur 4) dimensionerede befæstelse ønskes undersøgt i levetidsmæssig sammenhæng, og en eventuelt anlægsteknisk billigere løsning ønskes.

Først undersøges den aktuelle befæstelses levetider ved simulation. I denne sammenhæng er det væsentligt at den virkelige trafikstigning modelleres troværdigt.

En iterativ anvendelse af de to ligninger for trafikstigningsfaktorer viser at der opnås praktisk taget samme totale trafikmængde ved anvendelse af en starttrafik på 186.000 Æ10 aksler og en årlig stigning på 2,8 % af forrige års trafik.

Input og resultat af en simulation med 10 kørsler, 50 års simulationslængde, er vist nedenfor.

The screenshot displays two windows from a pavement design software. The 'Input parametre' window on the left contains fields for material selection, thickness, and simulation parameters. The 'Resultater' window on the right shows a table of simulation results for 10 runs.

Input parametre

Materiale	Tykkelse	E-værdi
Nyt lag	0	0
30 AB 40/60	195	3890
50 ABB 0	200	300
GAB II 40/60	305	100
SG		50
Bundsikring		
Frostvivlsom		

Buttons: Gem, Start, Slut, Analytisk, Optimer

Navn: Eksempel 2007d

Hjul: 1

Antal pr. år: 186000

Vækst, %: 2.8

Min hastighed: 60, Max hastighed: 50

År i simulering/dimensionering: 50

Resultater

	IRI	Spor	Esnit	Emin
1	41.87	27.42	50.00	50.00
2	50.00	29.39	50.00	50.00
3	50.00	32.39	50.00	50.00
4	42.39	28.39	50.00	48.87
5	32.67	24.42	50.00	50.00
6	36.00	30.87	50.00	50.00
7	34.39	27.42	50.00	50.00
8	35.87	25.87	50.00	50.00
9	44.39	23.87	50.00	44.83
10	36.39	21.42	39.67	37.00
Snit	40.4	27.1	49.0	48.1
stdev	6.31	3.35	3.27	4.21
logSnit	40.0	27.0	48.9	47.9
sdf	1.17	1.13	1.08	1.10

Buttons: Luk

Figur 7

Tabellen viser, at befæstelserne i alle henseender overholder kravene om 15 års levetid på et 85 % niveau, idet Snit – stdev i alle tilfælde er større end 15 år, lavest for sporkøringskriteriet, noget højere for jævnhedskriteriet (IRI), og meget højere for E_{SNIT} kriteriet, der svarer til revnedannelse, samt E_{MIN} kriteriet, der udtaler sig om dannelse af slaghuller.

Det vælges nu at undersøge, hvorvidt der kan opstilles billigere løsninger, der på et 85 % niveau opfylder alle kriterierne.

Hvis løsningen skal være billigere, skal asfaltlaget, som er det klart dyreste, gøres tyndere. Stabilgruslaget kan eventuelt også gøres tyndere, men i det foreliggende tilfælde er dette næppe ønskeligt, hvorfor en tykkelsesforøgelse op til 220 mm vælges - dette kan eventuelt give mulighed for yderligere reduktion af asfalttykkelse. Begge tykkelser varieres i spring af 5 mm, startende ved 145 mm hhv. 200 mm, med indgangsparametre som vist nedenfor: Bundsikringstykkelsen sættes lavt, idet det udfyldte felt "Minimums tykkelse" sikrer at de sædvanlige krav til totaltykkelse overholdes.

	Fra	Til	Trin	Pris/m3
30 AB 40/60	175	195	4	2000
SG	200	220	4	300
Bundsikring	200	200	1	200

	IRI	Sporkøring	Gennemsnits E-værdi	Mindste E-værdi
Levetid, år	20	20	20	20
Pålidelighed%	85	85	85	85
Minimums tykkelse	700		Start	Slut

Figur 8 Inddata til optimering

Mens optimeringen kører vises et skærbillede som nedenfor, og når den billigste løsning er fundet indsættes resultatet i skærbilledet "Input Parametre" (Figur 10).

Simulering Nr	4
År fra start	19.00
IRI	3.12
Sporkøring	11.88
Gennemsnits E-værdi	0.96
Mindste E-værdi	0.87
<input type="checkbox"/> Stop	Luk

Figur 9 Simulationstæller

Input parametre

Materiale	Tykkelse	E-værdi	
Nyt lag	0	0	Gem
30 AB 40/60 50 ABB 0 GAB II 40/60	175	3774	Start
SG	215	300	Slut
Bundsikring	310	100	Analytisk
Frosttvivlsom		50	Optimer
Navn: Eksempel 2007e	Længde: 30		Levetid, år
			Standard E
Hjul: 1			
Antal pr. år: 186000			
Vækst, %: 2.8			Total.xls
Min hastighed: 60 Max hastighed: 80 Start årstid: 5			Grafik.xls
År i simulering/dimensionering: 50 Antal simuleringer: 10			Data.xls
Lag			
Vis resultater			

Figur 10 Optimeret belægning med hensyn til anlægspris

Optimeringen viser, at det er muligt at opnå den ønskede pålidelighed i dimensioneringen ved at reducere asfalttykkelse til 175 mm samtidig med at SG-tykkelsen øges til 215 mm 220 mm. Totaltykkelsen er fastholdt på 700 mm.

Et fornyet tryk på "Optimer" knappen viser, hvilken pålidelighed der beregnes for at de forskellige kriterier overholdes.

Optimer

	Fra	Til	Trin	Pris/m3
30 AB 40/60	175	195	4	2000
SG	200	220	4	300
Bundsikring	200	200	1	200
	IRI	Sporkøring	Gennemsnits E-værdi	Mindste E-værdi
Levetid, år	20	20	20	20
Pålidelighed%	100.0	88.3	100.0	99.6
Minimums tykkelse	700	Reset	Start	Slut

Figur 11 Pålidelighed for optimeret belægning

6.8 Forstærkningsdimensionering

Ud fra tykkelses- og faldlodsmålinger er der på en vejstrækning bestemt følgende data:

	Tykkelse	E-modul (MPa)		
	(mm)	Middel	Spredning	75 % fraktil
Asfalt	160	2383	758	1872
Stabilgrus	220	300	62	258
Bundsikring	340	94	15	84
Underbund		44	12	36

Tabel 19 Indgangsdata til forstærkningsberegning

Belægningen ønskes forstærket, således at den kan bære en årlig trafikmængde på 240.000 Æ10 aksler i 15 år.

De beregnede 75 % fraktiler, lagtykkelser og trafikdata indtastes i et eksisterende skærbillede, for eksempel svarende til Eksempel 2007a.

Da der er tale om en relativt høj trafikintensitet, forudsættes det at der skal anvendes 40/60 bitumen i forstærkningslaget. Dette er ligeledes forudsat for den eksisterende asfalt, og MMOPP stiller, når man vil gemme data, spørgsmål om den intakte værdi af lagets E-modul, svarende til den aktuelle tykkelse og bitumentype. Til dette svares blot OK, informationen har ingen betydning for den analytiske dimensionering, men vil indgå som information for den kommende simulationsdimensionering af forstærkningslag.

Som udgangspunkt indtastes en tykkelse på 10 mm og en E-modul på 3000 MPa i felterne for "Nyt lag". Når der indtastes data i disse felter spærres knappen "Start", der normalt igangsætter en simulation.

Dimensioneringen foretages ved at trykke på "Analytisk" – der findes en nødvendig forstærkningstykkelse på 74 mm.

Figur 12 Dimensionering af forstærkningsbelægning

7 DOKUMENTATION

MMOPP programmet kan udskrive beregningsdokumentation i form af Excel regneark, med forskellige detaljeringsgrader. Dataoverførsel til regnearkene initieres ved at trykke på den relevante af de 3 knapper over ”Vis resultater” knappen i nederste højre hjørne af vinduet ”Input parametre”.

I stigende detaljeringsgrad fås følgende output:

”Data-xls” giver en basal oversigt over input, som den fremgår af ”Input parametre” vinduet, samt en tabel over levetider, bestemt ved simulation. Nedenfor er angivet output fra Eksempel 2007d.

”Total-xls” giver en mere dybgående oversigt over input, nu også omfattende bl.a. klimadata, samt over output, bl.a. omfattende slutdeformationer af de enkelte lag.

”Grafik-xls” giver en total oversigt over udviklingen i de gennemførte simulationer for de 4 levetidsparametre, IRI, sporkøring, E-snit og E-min.

Herunder er gengivet udskrift fra ”Data-xls”

Projekt:	Eksempel 2007d			Dato:	20-02-2007
c:\Program Files\Mmopp2007\mmopp2007a.mdb					
Klima:	Standard				
Belastning:	Standard				
Grænser:	Standard				
Hjul	Antal	Vækst, %			
1	186000	2.8			
Længde, m:	30				
Min hastighed, km/h:	60				
Max hastighed, km/h:	80				
Start årstid:	5				
År i simulering/dimension	50				
Antal simuleringer:	10				
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1	195	3890	30 AB 40/60 + 50 ABB 0 + GAB II 40/60		
2	200	300	SG		
3	305	100	Bundsikring		
4		50	Frosttvivlsom		
Levetid (år)					
Nummer	IRI	Sporkøring	E-snit	E-min	
1	41.9	27.4	50	50	
2	50	29.4	50	50	
3	50	32.4	50	50	
4	42.4	28.4	50	48.9	
5	32.7	24.4	50	50	
6	36	30.9	50	50	
7	34.4	27.4	50	50	
8	35.9	25.9	50	50	
9	44.4	23.9	50	44.8	
10	36.4	21.4	39.7	37	

Figur 13 Dokumentationsudskrift

Kolofon

Titel: Vejregel. Dimensionering af befæstelser

Dato Marts 2007

Redaktion: Vejdirektoratet, Vejregelrådet

Foto:

Tegninger:

Copyright: Vejdirektoratet

Udgiver Vejdirektoratet

ISSN: 1600-006X

ISBN: 87-7923-930-5