

Vejregel Arbejdsgruppe P.21

MMOPP Dimensioneringsprogram for vejbefæstelser

Brugervejledning

Marts 2007

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
2	Programmets principper	5
2.1	Programmets formål	5
2.2	Analytisk dimensionering	5
2.2.1	Ubundne materialer	5
2.2.2	Asfaltmaterialer	6
2.2.3	Cementbundne bærelagsmaterialer	7
2.2.4	Betonbelægninger	8
2.3	Dimensionering ved simulation	8
2.3.1	Overordnet	8
2.3.2	Modeller	8
2.3.3	Befæstelsesmodel	9
2.3.4	Belastningsmodel	10
2.3.5	Klimamodel	11
2.3.6	Responsmodel	13
2.3.7	Strukturel nedbrydning (af asfaltlag)	14
2.3.8	Permanent deformation	15
3	Programmets installation	17
3.1	Systemkrav	17
3.2	Installation	17
4	Programmets anvendelse	18
4.1	Generelt	18
4.1.1	Metodik	18
4.1.2	Funktion	18
4.2	Analytisk dimensionering	18
4.2.1	Standarddimensionering	18
4.2.2	Brugerdefineret dimensionering	21
4.2.3	Manuel analytisk dimensionering	25
4.2.4	Forstærkningsberegning	26
4.3	Simulation	27
4.3.1	Generelt	27
4.3.2	Vinduet "Input parametre"	29
4.3.3	Vinduet "Klima"	30
4.3.4	Vinduet "Belastning"	31
4.3.5	Vinduet "Grænser"	32
4.3.6	Vinduet "Lag"	33
4.3.7	Simulation	35
4.3.8	Optimering	35
4.4	Dokumentation	38
5	Referencer	41

1 Indledning

MMOPP er et dimensioneringsprogram, der er knyttet til vejreglen for dimensionering og forstærkning af vejbefæstelser. Vejreglen indeholder retningslinier for fastlæggelse af dimensioneringstrafik og valg af materialer, samt katalogbefæstelser for fleksible belægninger og belægninger med betonbelægningssten samt forstærkningsbelægninger.

Programmet er udviklet af Vejregel arbejdsgruppe P.21 (tidligere benævnt Vejregel arbejdsgruppe 3.4).

Programmet kan dimensionere fleksible, halvstive og betonbelægninger efter analytisk metode, og foretage simulation af nedbrydningsforløb for fleksible befæstelser.

Brugervejledningen indeholder en principiel beskrivelse af programmets funktion, samt anvisninger på hvorledes der laves inddata og udtrages resultater af programmets forskellige funktioner.

Også efter at programmet er blevet frigivet til almindelig brug kan der blive arbejdet med kalibrering af programmet til den bedst mulige overensstemmelse med virkeligheden. Dette kan føre til ændringer af den ”gældende” vejregel database, således at beregninger kan falde lidt anderledes ud, end hvad der er vist i manualen.

Denne manuals skærbilleder er baseret på databasen ”mmopp05a.mdb”. Denne database vil også i fremtiden være en del af installationspakken, således at det vil være muligt at gennemregne manualens eksempler, blot skal man så skifte til den ”gældende” database for at udføre faktiske dimensioneringsopgaver.

Denne vejledning er udarbejdet efter at programmet er blevet testet hos udvalgte brugere siden 1998.

I oktober 2003 blev programmet, den tilhørende 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 vejreglerådet som gældende.

Den foreliggende udgave af brugervejledningen er en udbygning af brugervejledningen fra marts 2005.

I forhold til den tidligere udgave er følgende væsentlige tilføjelser til vejreglen og programmet foretaget:

Vejreglen

- Den midlertidige materialetype cementstabiliseret grus (CG) er blevet erstattet af 3 nye materialetyper, 2 CG og 1 cementstabiliseret sand (CS), hver karakteriseret ved E-modul og trykstyrke
- For disse materialer er indført analytiske dimensioneringskriterier baseret 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.

Programmet

- Der er indført stokastisk simulation af frostnedtrængningsdybden. Dette styrer, hvilke lag der i den enkelte vintersimulation faktisk gennemgår en tøbrudsfasen.

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 denne brugervejledning blev godkendt af Vejregelrådet den 13. marts 2007.

2 Programmets principper

2.1 Programmets formål

Programmets formål er at sætte brugeren i stand til at dimensionere befæstelser under hensyntagen til trafik, materialer og klimaforhold. Belægningsdimensioneringen kan foretages ved 2 principielt forskellige metoder:

- enten ved traditionel analytisk dimensionering
- eller ved at foretage et antal simulationer af befæstelsernes nedbrydning, hvorunder det fastlægges, hvornår belægningerne ikke længere overholder visse, forud definerede krav (levetidskriterier) til asfaltenedbrydning, jævnhed, og sporkøring.

For simulationer med samme tykkelser af lagene i befæstelsen vil fås forskellige levetider indtil kriterierne ikke er overholdt. Ud fra dette kan man vurdere den sikkerhed, hvormed konstruktionen overholder kriterierne.

I forbindelse med fastlæggelse af nedbrydningsmodeller er arbejdsgruppen gået ud fra en antagelse om at de befæstelser, der ifølge den gamle vejregel var dimensioneret for 10 år, i gennemsnit havde en levetid m.h.t. jævnhed på 15 år. Dette svarer til at befæstelserne med en sandsynlighed på 70 %-90 % ville overholde jævnhedskriteriet i 10 år. Forudsætningen svarer også til den nedbrydningsmodel for jævnhed, der er indbygget i vejman.dk programmet, der anvendes til prioritering af vedligeholdsarbejder på større veje i Danmark.

2.2 Analytisk dimensionering

Ved analytisk dimensionering af befæstelser kontrolleres, at visse kritiske påvirkninger (p), beregnet i befæstelsen under en dimensioneringsbelastning (\mathcal{A}_{10}) overholder en matematisk givet sammenhæng med materialeegenskaber og antal påvirkninger ($N_{\mathcal{A}_{10}}$) af den pågældende dimensioneringsbelastning (\mathcal{A}_{10} aksel), der generelt kan angives på formen (dimensioneringskriteriet):

$$p = A \times (E/E_{\text{ref}})^B \times (N_{\mathcal{A}_{10}}/10^6)^C$$

2.2.1 Ubundne materialer

For ubundne materialer er den kritiske påvirkning det lodrette tryk på oversiden af laget. Kriterieligningens form afhænger af materialets E-modul, som angivet i nedenstående ligninger:

$$\sigma_Z = 0,12 \text{ MPa} \times (E/160 \text{ MPa}) \times (N_{\mathcal{A}_{10}}/10^6)^{-0,307} \quad \text{for } E > 160 \text{ MPa}$$

$$\sigma_Z = 0,12 \text{ MPa} \times (E/160 \text{ MPa})^{1,16} \times (N_{\mathcal{A}_{10}}/10^6)^{-0,307} \quad \text{for } E < 160 \text{ MPa}$$

Problemet med dette kriterie er, at beregning af den kritiske spænding sker for en ikke-eksisterende belastning, $\bar{E}10$ belastningen, der repræsenterede påvirkningen fra et tvillinghjul på en 10 tons aksel plus 20 % stødtillæg som en 6 tons cirkulær enkeltbelastning med et kontaktryk på 0,7 MPa. Dette medfører, at der for materialer placeret højt i konstruktionen beregnes op til 30 % lavere påvirkninger under et tvillinghjul end under $\bar{E}10$ belastningen, mens der dybere i befæstelsen ikke findes nogen forskel.

For at afhjælpe dette misforhold er gennemført en reanalyse af befæstelser, fastlagt ud fra de gældende dimensioneringskriterier og passageantal mellem ca. 30.000 og 3 millioner passager. For disse befæstelser er udført beregning af de kritiske påvirkninger under et tvillinghjul med 6 tons belastning. Disse påvirkninger er så anvendt til at udvikle et kriterium, der nu er baseret på en mere realistisk repræsentation af belastningen, samtidig med at de i videst muligt omfang fører i befæstelser, der svarer til resultaterne af den hidtidige dimensioneringsmetode:

Det findes, at den 2-delte dimensioneringsligning kan reduceres til nedenstående generelt gældende form:

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

idet det bemærkes, at der samtidig skete en justering af asfaltkriteriet, som omtalt i det følgende afsnit.

2.2.2 Asfaltmaterialer

For asfaltmaterialer med et "normalt" bitumenindhold havde Kirk's kriterie oprindeligt formen:

$$\varepsilon_h = -0,000200 \times (N/10^6)^{-0,178}$$

hvor ε_h er den reelle tværgående tøjning i undersiden af asfaltlaget (altså beregnet under en tvillinghjulsbelastning). Begrundelsen for at betragte den tværgående tøjning er, at det fremherskende første nedbrydningsfænomen er langsgående revner, der logisk umiddelbart kan sættes i forbindelse med denne påvirkning.

Matematisk var tvillinghjulsberegningen vanskelig at håndtere, da kriteriet blev udviklet, men da det kan vises, at den tværgående tøjning, beregnet under $\bar{E}10$ belastningen, generelt er 50 % højere end under tvillinghjulsbelastningen, omformedes kriteriet til den ækvivalente form:

$$\varepsilon_h = -0,000300 \times (N/10^6)^{-0,178}$$

Dette fungerede udmærket indtil fremkomsten af supersingleakslen, under hvilken der ville komme reelle tøjninger af samme størrelsesorden som under $\bar{E}10$

akslen. Teoretisk skulle dette medføre en stærkt accelereret nedbrydning af befæstelserne.

Da dette imidlertid ikke blev tilfældet, bortset fra en forstærket sporkøringstendens, blev årsagerne til asfaltens revnedebrydning revurderet. Nyere forskning forklarer revnedannelsen som et resultat af den energi, der tilføres befæstelsen, og i denne sammenhæng er den største træktøjning - uanset hvilken retning den har - mere deskriptiv. For tvillinghjulsbelastningen er den langsgående tøjning størst, og i øvrigt også nogenlunde 50 % større end den tværgående.

De danske dimensioneringsregler har altså ved et matematisk tilfælde i 25 år baseret sig på en værdi, der svarede til den "korrekt" beregnede største træktøjning i undersiden af asfalten.

Der indgår imidlertid i overgangen mellem laboratorieforsøg og observeret nedbrydning en række korrektionsfaktorer af mere eller mindre arbitrær størrelse, og ved tilpasningen af et nyt dimensioneringskriterie, der tager sigte på de "reelle" tøjninger er det derfor tilladeligt at foretage nogen justering.

Det findes ved den kombinerede tilpasning af asfalt- og ubundne dimensioneringskriterier, at den bedste overensstemmelse opnås, hvis asfaltkriteriet (for GAB I) får formen:

$$\varepsilon_h = -0,000230 \times (N/10^6)^{-0,191}$$

2.2.3 Cementbundne bærelagsmaterialer

Dimensionering af lag opbygget af disse materialer er baseret på analytiske dimensioneringskriterier fastlagt ud fra VI Rapport 138, "Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements", der blandt andet baserede sig på de i 2003 gennemførte fuld-skala udmattelsesforsøg med 6 forsøgsbelægninger

Dimensioneringskriterierne for Cementstabiliseret grus (CG) og sand (CS) fastlægger den største tilladelige 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 nedenstående tabel.

Materiale	Trykstyrke (MPa)	E_{INIT} (MPa)	E_{TERM} (MPa)	Kriterieligning
CG	10	15.000	2.000	$\varepsilon_h = -0,000090 \times (N_{Æ10}/10^6)^{-0,125}$
CG	8	13.000	2.000	$\varepsilon_h = -0,000075 \times (N_{Æ10}/10^6)^{-0,139}$
CS	6	7.000	1.000	$\varepsilon_h = -0,000070 \times (N_{Æ10}/10^6)^{-0,213}$

Tabel 1 Dimensioneringskriterier for cementbundne bærelag

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.

2.2.4 Betonbelægninger

For betonbelægninger findes, under anvendelse af en E-modul på 35.000 MPa, og et Poisson's forhold på 0,15, at der kan anvendes et tøjningskriterie af formen:

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

2.3 Dimensionering ved simulation

2.3.1 Overordnet

Simulation af en vejbefæstelses nedbrydning under trafik foregår ved matematisk at lade et hjul passere en befæstelse af en given længde under varierede klima- og hastighedsforhold.

I modsætning til mere traditionelle dimensioneringer, der også kan tage årstider i betragtning ved at beregne nedbrydningsbidragene for den trafikmængde, der over hele levetiden forekommer i de enkelte klimaperioder, foretager simulationsmetodikken beregningerne årstidstro, således at der gennemregnes en række ensartede klimaforløb med den aktuelle årlige trafikmængde.

Herved fås en rekursiv effekt af de tidligere års nedbrydning, således at den stigende ujævnhed fører til kraftigere stødpåvirkninger, der igen fører til accelereret nedbrydning osv.

2.3.2 Modeller

Simulationsprogrammet baseres på en række matematiske modeller af interaktionen mellem hjul og belægning, og de påvirkninger, som belastningerne medfører nede i befæstelsen.

Der anvendes følgende modeller:

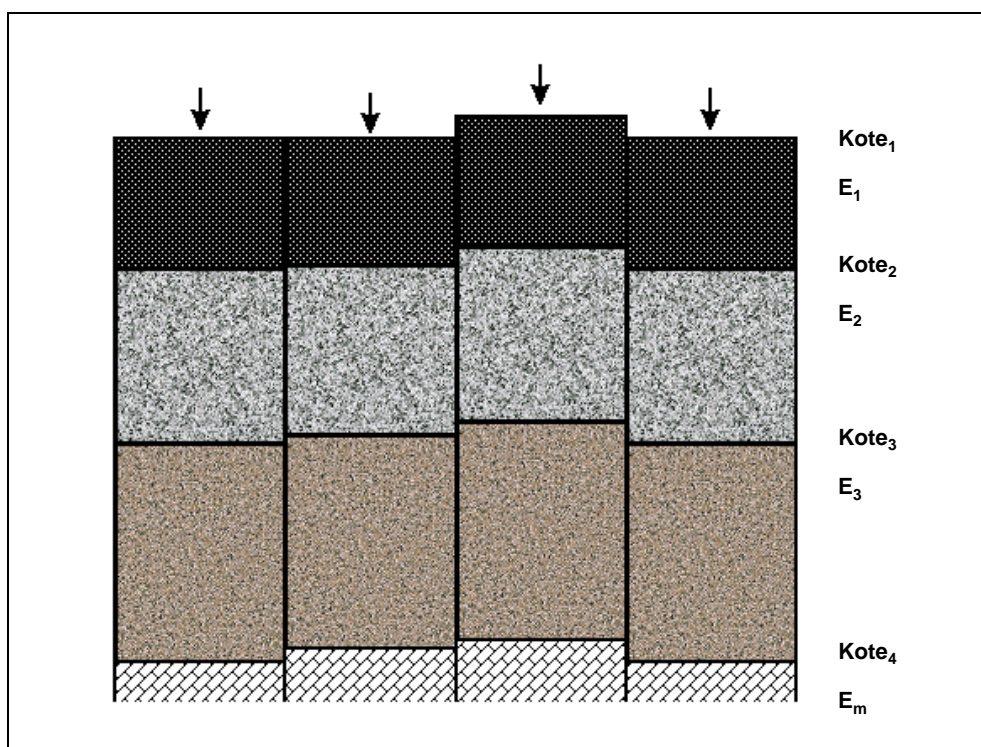
- a) Befæstelsesmodel, der fastlægger de enkelte lags egenskaber og lagtykkelser samt belægningens overflade.
- b) Belastningsmodel, der fastlægger sammenhængen mellem vejoverfladens geometri og hjulets bevægelser og påvirkninger på vejoverfladen.
- c) Klimamodel, der fastlægger sammenhæng mellem materialernes deformationsegenskaber og klimaet.

- d) Responsmodel, der beskriver hvorledes en påvirkning af vejoverfladen fordeles ned gennem befæstelsen. Til denne simulering anvendes Odemark-Boussinesq's teori.
- e) Strukturel nedbrydning (revner), der fastlægger sammenhæng mellem dynamiske påvirkninger og nedbrydning af asfaltlagene.
- f) Permanente deformationer (jævnhed og sporkøring), der fastlægger sammenhæng mellem dynamiske påvirkninger og permanente deformationer

2.3.3 Befæstelsesmodel

Befæstelsesmodellen består af 2 dele, nemlig en geometrisk del, der fastlægger belægningens overflade og de enkelte lags tykkelser, samt en materialedel, der fastlægger E-modulerne i hvert enkelt punkt.

Længden af strækningen kan varieres. Som standardværdi i programmet anvendes 30 m, cirka svarende til længden af AASHO forsøgets observationsstrækninger på 100 fod. Delstrækninger af 300 mm's længde betragtes som homogene elementer, for hvilke der fastlægges overflade, lagtykkelser og E-moduler som angivet på nedenstående figur.



Figur 1 Elementer i befæstelse

Alle lagoverflader og materialeegenskaber bestemmes ud fra en "2. ordens autoregressiv proces", hvor værdien af et givet element afhænger af værdien af de to foregående punkter ud fra en såkaldt autokorrelation - en høj autokorrelationskoefficient angiver megen lille variation fra punkt til punkt.

For hvert lag angives middellagtykkelse, spredning på overfladekoten samt 1. og 2. autokorrelationskoefficient for overfladen. Ud fra disse værdier genereres overfladerne.

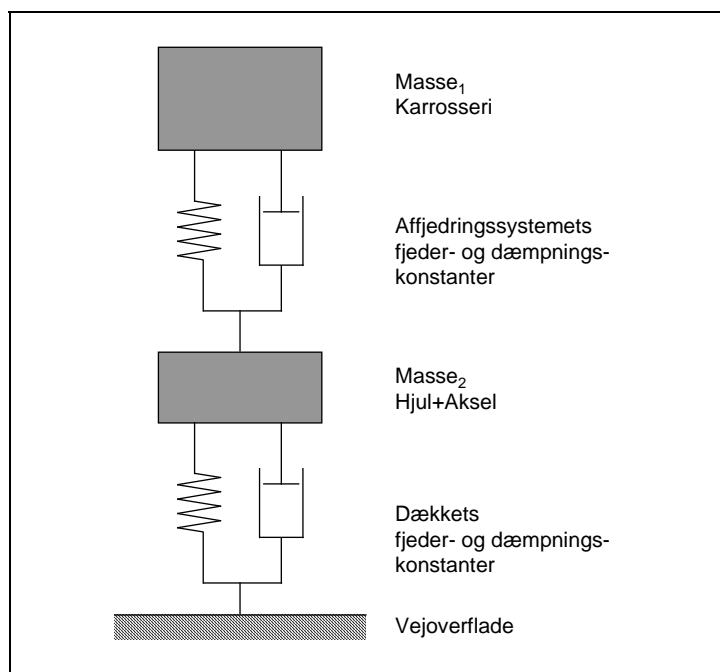
Overfladens jævnhedsmål, IRI værdien, beregnes ud fra overfladekoterne i midten af det enkelte element.

For materialebeskrivelserne gælder det, at deformationsegenskaberne ikke vil følge en almindelig normalfordeling, men derimod en logaritmisk normalfordeling, dvs. at logaritmerne til E-modulerne vil følge en normalfordeling. I en normalfordeling angiver spredningen, hvor meget der skal lægges til/trækkes fra for at nå ud til 84 % hhv. 16 % fraktilerne. For logaritmer til værdier gælder, at addition/subtraktion svarer til multiplikation/division for de egentlige værdier. Spredningerne på logaritmerne til E-moduler svarer derfor til spredningsfaktorer (sdf, Standard Deviation Factor) for de egentlige E-moduler.

De værdier, der inddateres til programmet svarer til de normalt anvendte værdier i vejreglerne. Disse er imidlertid ikke gennemsnittene for lag, men svarer til 25 % fraktilerne, dvs. at 75 % af E-modulerne for laget på strækningen ligger højere end den angivne værdi. Programmet foretager selv de nødvendige omregninger.

2.3.4 Belastningsmodel

Interaktionen mellem hjul og vejbane beskrives ved et enkelthjuls eller tvillinghjuls 2-masse visko-elastisk system, hvor brugeren kan definere masserne af hjul inkl. aksel og karrosserivægt samt fjeder- og dæmpningskonstanterne mellem hjul og vejbane (dækket), samt hjul+aksel og karrosseri (affjedringssystemet).



Figur 2 Belastningsmodel

2.3.5 Klimamodel

Klimamodellen indeholder 2 delmodeller, der fastlægger materialernes E-moduler i de forskellige årstider, hhv. beregner dybden af frostnedtrængning i vinterperioden.

E-modul model

Der opereres med enkle tabelfunktioner for materialernes E-moduler i de forskellige klimaperioder (årstider). Det anvendes let modificerede udgaver af de svenske vejreglers klimaparametre for Skåne. Tabellen nedenfor angiver periodelængder og forhold mellem E-modulerne i de respektive perioder. Det ses, at de E-moduler, der angives som input til programmet, svarer til sommerperiode betingelserne, hvor der er angivet en faktor på 1,0 for alle lag.

Periode	Dage	Temperatur	E ₁	E ₂	E ₃	E _m
-	-	°C	faktor	faktor	faktor	faktor
Vinter	49	-2	4	4,2	10	20
Vinter tød	10	1	3,7	0,33	10	20
Tødbrud	15	1	3,7	0,67	0,7	0,6
Senvår	46	4	3,1	1,0	0,85	0,8
Sommer	143	20	1,0	1,0	1,0	1,0
Hedebølge	10	50	0,3	1,0	1,0	1,0
Efterår	92	7	2,6	1,0	1,0	1,0

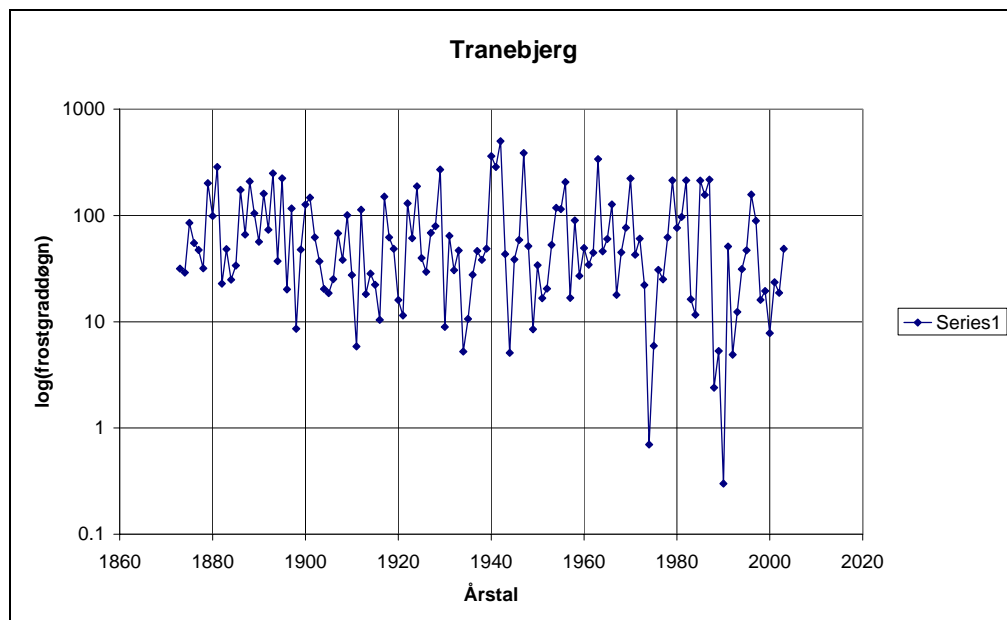
Tabel 2 Parametre i klimasimulation

Frostnedtrængningsmodel

Frostnedtrængning i belægningen beregnes ud fra en model, angivet i de Schweiziske normer:

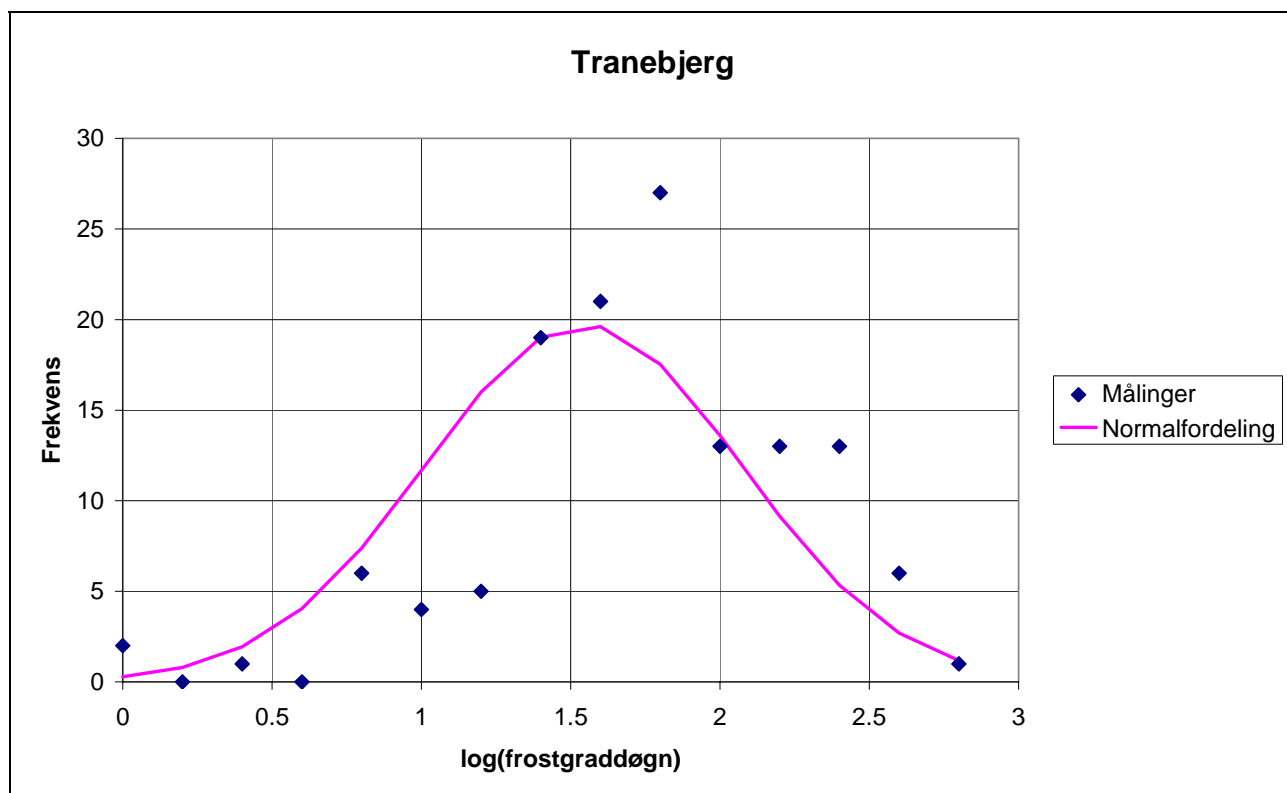
$$\text{Frostnedtrængning} = 45 \text{ mm} \times \text{frostgraddøgn}^{0.5} + \text{befæstelsestykkelse (mm)}/2$$

Frostgraddøgn beregnes ud fra en tidsrække for årene 1873 til 2003 registreret af DMI på Tranebjerg (station 27080). Der er dagligt angivet de 24 foregående timers maksimums og minimums temperatur. Under antagelse af at gennemsnit af max og min også er døgnet's gennemsnit er beregnet akkumulerede frostgraddøgn for alle perioder med negative temperaturer, og det højeste antal frostgraddøgn for hvert år er gemt som årets frostgraddøgn, angivet i nedenstående figur.



Figur 3 Frostgraddøgn 1873-2003

Denne række frostgraddøgn kan beskrives ved en logaritmisk normalfordeling med gennemsnit 1,64 (43,9 °C×døgn) og spredning 0,53 (standard deviation factor sdf 3,39).



Figur 4 Fordeling af frostgraddøgn

Ud fra den logaritmiske normalfordeling vælger programmet hvert år et tilfældigt antal frostgraddøgn og beregner frostnedtrængningen ud fra den tidligere angivne formel.

2.3.6 Responsmodel

Som standard anvendes ækvivalente tykkelsers metode. Korrektionsfaktorerne i beregningerne varierer som funktion af materialeegenskaber og lagtykkelser, som angivet i nedenstående tabel:

Befæstelses- type	2-lags		3-lags		4-lags	
Betingelse	$h_e < 0,6a$	ellers	$h_e < 0,6a$	ellers	$h_e < 0,6a$	ellers
f_1	beregn.	0,8	beregn.	0,8	beregn.	0,8
Betingelse	$\frac{E_{\text{øvre}}}{E_{\text{nedre}}} < 2$	ellers	$\frac{E_{\text{øvre}}}{E_{\text{nedre}}} < 2$	ellers	$\frac{E_{\text{øvre}}}{E_{\text{nedre}}} < 2$	
f_2			1	0,92	1	0,92
f_3					1	0,92
f_m	1	0,82	1	0,82	1	0,82

Tabel 3 Korrektionsfaktorer i beregninger med ækvivalente tykkelsers metode

I ovenstående tabel er:

h_e den ækvivalente dybde

a radius i belastningen

$E_{\text{øvre}}$	E-modul af laget over den skilleflade, hvor påvirkningerne beregnes
E_{nedre}	E-modul af laget under den skilleflade, hvor påvirkningerne beregnes
f_x	korrektionsfaktoren i den x-te skilleflade for omregning mellem den rene 3.rods beregnede dybde z ($z = t_{\text{øvre}} \times (E_{\text{øvre}}/E_{\text{nedre}})^{1/3}$) og den ækvivalente dybde, h_e ($h_e = f_x \times z$)
$t_{\text{øvre}}$	tykkelse af laget over den skilleflade, hvor påvirkningerne beregnes
beregn.	Angivelse af at korrektionsfaktoren f_1 beregnes ud fra formlen $f_1 = 1 + 0.6 \times (a/z)^2$

2.3.7 Strukturel nedbrydning (af asfaltlag)

Der anvendes en model, der ud fra beregnede tøjninger i asfaltens underside fastlægger revneinitieringen i overensstemmelse med traditionelle kriterier, udviklet f.eks. fra 3-punkts bøjeforsøg. Udbredelsen op gennem laget beregnes herefter i overensstemmelse med forenklede modeller for "fracture mechanics". Efterhånden som revnerne udbredes, reduceres lagets E-modul. I denne sammenhæng betragtes befæstelsens asfaltlag under ét, med materialeparametre, der svarer til et vægtet gennemsnit af slid-, binder- og bærelag.

Fracture mechanics er en forholdsvis kompliceret analysemetodik, der beregner udviklingen af revner igennem et homogent materiale ud fra spændingskoncentrationerne omkring revnens spids. Der betragtes både effekt af forskydnings-spændinger og bøjningstrækspændinger, således at der for befæstelser med samme lagtype men med afvigende understøtningsforhold, kan forekomme forskellige udviklingsmønstre. For alle udviklinger gælder dog, at de vil forløbe relativt langsomt i starten for herefter at accelerere til et vist niveau, der forbliver konstant til revnen er nået helt igennem laget.

I MMOPP udtrykkes effekten ved en nedskrivning af asfaltlagets E-modul efter en formel af udseendet:

$$E_{\text{efter}} = E_{\text{før}} \times \left(1 - 0,5 \times \left(\frac{\varepsilon_{\text{aktuel}}}{\varepsilon_{\text{tilladelig, 1 million}} \times (VB/10\%)} \right)^n \times \frac{dN}{k_{\text{temperatur}} \times CP_{\text{faktor}}} \right)$$

i denne formel er:

$\varepsilon_{\text{aktuel}}$	den beregnede tøjning i asfaltlagets underside
$\varepsilon_{\text{tilladelig, 1 million}}$	den tilladelige tøjning i asfaltlagets underside v. 10^6 passager
VB	bitumenindholdet i volumenprocent
n	udmattelsesmodellens eksponent - hér anvendes Kirk's eksponent på 5,62
dN	antal passager i perioden

$k_{temperatur}$	en temperaturkorrektion, der gør materialet mindre brudfølsomt ved høje temperaturer
CP_{faktor}	en fast konstant, der kalibrerer forløbet til faktiske forhold

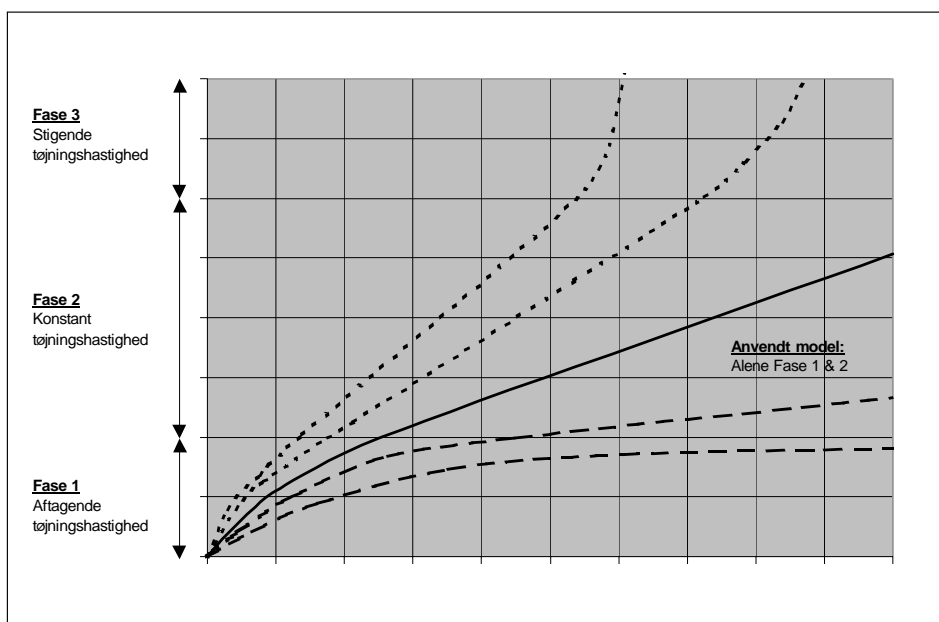
2.3.8 Permanent deformation

Den permanente deformation beregnes ud fra ækvivalente tykkelsers metode og dynamisk beregnede spændinger (på grundlag af de dynamiske E-moduler). Disse anvendes så til beregning af den permanente deformation ud fra et plastisk E-modul.

Et materiales plastiske deformation kan forløbe i op til 3 faser:

- Fase 1 Materialets plastiske deformationshastighed er aftagende
- Fase 2 Materialets plastiske deformationshastighed er konstant
- Fase 3 Materialets plastiske deformationshastighed er stigende

Overgangen mellem de tre faser sker typisk ved konstante niveauer af permanent deformation, som angivet på nedenstående figur. Fase 3 forekommer ikke under normale driftsforhold, idet den svarer til at belægningen er i en kollapssituation. Fase 3 er følgelig ikke medtaget i programmet.



Figur 5 Model for permanent deformation

Den plastiske tøjning er ikke nødvendigvis proportional med det vertikale tryk, der påføres af hjulbelastningerne. Den generelle form for Fase 1 er:

$$\varepsilon_p = A \times N^B \times (\sigma_1/\sigma')^C \quad \text{for } \varepsilon_p < \varepsilon_0$$

og for Fase 2:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 + (N - N_0) \times A^{1/B} \times B \times \varepsilon_0^{1-1/B} \times (\sigma_1/\sigma')^{C/B} \quad \text{for } \varepsilon_p > \varepsilon_0$$

i hvilke

$$N_0 = \varepsilon_0^{1/B} \times A^{-1/B} \times (\sigma_1/\sigma')^{-C/B}$$

De indgående spændinger er de til enhver tid beregnede værdier i top og bund af befæstelsens enkelte lag, således at der løbende tages hensyn til materialernes årstidsbestemte variationer samt asfaltlagets nedbrydning.

Simulationerne nulstiller den permanente deformationstæller (N) efter hver tøbrudsfase, da frost/tø cykler erfaringsmæssigt fører til nogen omlejring af mikrostrukturen, svarende til den forstyrrelse, der sker under indbygningen af en vej.

Nulstillingen sker kun såfremt der er sket en frostnedtrængning på minimum 10 mm i laget, idet den totale frostnedtrængning beregnes som angivet i afsnit 2.3.5.

For at denne nulstilling ikke skal føre til overdrevent store permanente tøjninger, ses der bort fra den del af deformationen, der hidrører fra de første 1000 passager. Ligesom ved strukturel nedbrydning betragtes befæstelsens asfaltlag under ét.

Det skal endelig bemærkes, at de deformationer, der beregnes i programmet, er dem, der forårsages af normal efterkomprimering og begrænset forskydning i lag, der ikke udsættes for strukturel "flydning". De kraftige sporkøringer, der kan forekomme, når man for givne lag overskrider materialernes forskydningsstyrke, som f.eks. i asfaltmaterialer under ekstreme varmeperioder, eller i enskornede sandmaterialer, der overbelastes og derved går i brud, kan ikke tages i regning af programmet. Sikring mod denne nedbrydningstype kan bl.a. ske ved udførelse af sporkøringsforsøg.

3 Programmets installation

3.1 Systemkrav

Programmet kan afvikles under alle Windows 32-bit styresystemer.

Såfremt man ønsker at gå direkte ind i MMOPP programmets database, kan dette gøres i Microsoft Access 7 eller højere.

3.2 Installation

Programmet, der er samlet i en selvudpakkende fil, SETUPMMOPP2007.EXE, kan downloades fra www.vejregler.dk.

Programmet installeres ved at køre filen SETUPMMOPP2007.EXE.

Der kommer det traditionelle spørgsmål, hvorvidt man vil installere i default biblioteket C:\PROGRAM FILES\MMOPP2007\ (engelsksproget opsætning) eller C:\PROGRAMMER\MMOPP2007\ (dansk opsætning).

Man kan vælge at gøre dette, eller vælge et vilkårligt andet bibliotek.

Hvis man ikke vælger standardbiblioteket skal man, når installationen er gennemført, sikre sig, at der i MMOPP.INI filens 3. linie står adressen på det bibliotek, der er installeret i.

Herefter skulle programmet være klar til kørsel ved dobbeltklik på programikonet (MMOPP2007.exe), der er blevet genereret i den aktuelle program folder eller på MMOPP2007 ikonen i start-menuen.

Programmet installeres med en database, der p.t. hedder MMOPP2007A.MDB. Navnet angiver, at dette er en database fra 2007, og at det er version A. Der vil senere kunne komme reviderede databaser, navngivet efter samme princip.

Det er i øvrigt en god idé at lave en ny database for hvert nyt projekt. På denne måde sikrer man sig mod et uoverskueligt antal belægningsalternativer i databasen, og databasen kan lagres sammen med projektets øvrige dokumentation. Samtidigt bør man gemme en kopi af selve programbiblioteket, da det ikke er sikkert at fremtidige MMOPP-versioner kan køre på gamle databaser.

4 Programmets anvendelse

4.1 Generelt

4.1.1 Metodik

Med introduktionen af den nye vejregel og MMOPP programmet foretages der i forhold til den tidligere vejregel en mere differentieret opdeling efter trafikmængder. Endvidere har udviklingen inden for produktionen af bituminøse befæstelsesmaterialer ført til et væsentligt bredere sortiment end tidligere.

Samtidig har udviklingen inden for computerhastigheden gjort det muligt at få en befæstelse dimensioneret analytisk lige så hurtigt som at foretage opslag i et katalog. Et traditionelt katalog indgår derfor ikke i programmet, men findes i vejreglen.

4.1.2 Funktion

MMOPP programmet har 2 principielle funktionsmetoder:

- Dimensionering efter traditionel analytisk metodik, enten med simple trafik- og materialevalg (erstatte katalogfunktionen) eller en mere brugerdefineret inputmodel (svarer til den gamle diagrammetode).
- Dimensionering ved simulation af nedbrydningsforløb, enten ved efterkontrol af en given befæstelses levetid(er) eller ved optimering, hvor der findes den i anlæg mest økonomiske befæstelse, der vil opfylde givne krav til levetid.

Programmet anvender sædvanlige SI-enheder. I programmets "hovedvindue", "Input Parametre" (se side 29) vises de aktuelle enheder for data, der ikke er dimensionsløse, når musemarkøren føres ind over det pågældende felt.

Der er endnu ikke indbygget en egentlig "help"-funktion.

Programmet afsluttes ved at trykke på knappen "Slut" i vinduet "Input parametre" (se afsnit 4.3.2)

4.2 Analytisk dimensionering

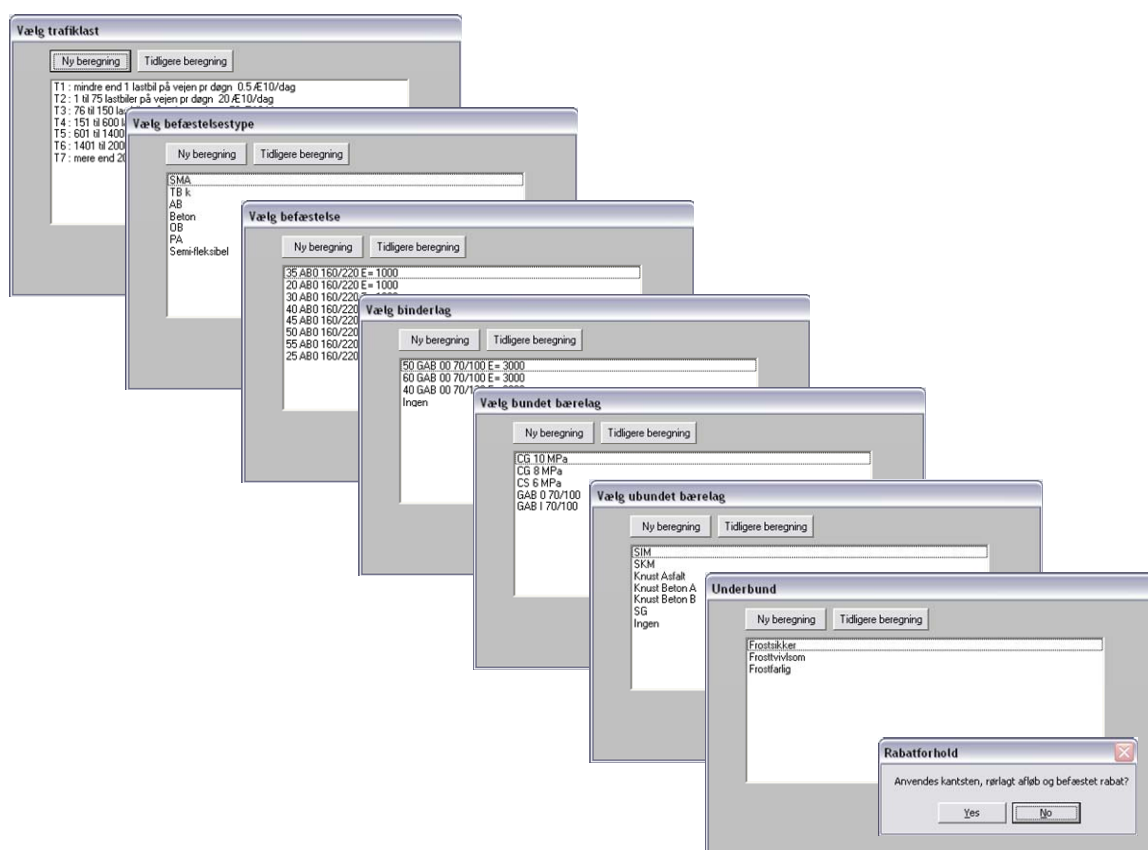
4.2.1 Standarddimensionering

Når programmet startes op fås et skærmbillede med valget mellem "Ny beregning" eller "Tidligere beregning". Vælges "Ny beregning" føres man gennem valg af følgende parametre:

- Trafikklasse T1 til T7, med baggrund blandt andet i inddelingerne i vejregler for varmbladet asfalt

- Slidlagstype
- Slidlagstykkel (mm)
- Type og tykkelse (mm) af et eventuelt bindelag
- Type af bundet bærelag
- Type af ubundet bærelag
- Type af underbund (frostsikker, frosttvivlsom eller frostfarlig).
- Hvis der er angivet frosttvivlsom eller frostfarlig skal der af hensyn til opfrysningssikkerheden endelig oplyses, hvorvidt der er "drænet" (rørslagt afløb eller befæstet rabat) eller "udrænet" (i form af grøft eller lignende).

Alt foregår i samme skærbillede, og er illustreret i nedenstående figur, der viser valgene frem til en traditionel SG-befæstelse for trafikklasse T3, svarende nogenlunde til den gamle vejregels "middel trafik". Figuren viser 8 på hinanden følgende skærbilleder.



Figur 6 Simpel dimensionering - inddateringssekvens

Så snart denne information er givet, foretager MMOPP en analytisk dimensionering i overensstemmelse med de i afsnit 2.2 angivne kriterier og anvendelse af en 5 tons tvillinghjulsbelastning som dimensioneringspåvirkning. For asfalt-lagenes vedkommende foretages dimensioneringen ved regulering af bærelagstykkel, og lagets gennemsnitlige E-modul justeres løbende. Antal aksler beregnes ud fra det antal år, der er angivet i feltet "Antal år i simulering".

Beregningerne foretages i MMOPP med WESDEF programmet, der er indbygget som en DLL subrutine. Dette er et lineærelastisk program på linie med BISAR, ELSYM5 og CHEVRON, og vil derfor give lidt anderledes resultater end DELSAN programmet, der er baseret på ækvivalente tykkelsers metode.

Efter dimensioneringen fremkommer den resulterende befæstelse i MMOPP programmets hovedskærm-billede, der viser detaljerne for befæstelsen:

Figur 7 Input parametre - hovedskærm-billede

Den gule farve i feltet for asfalttykkelse angiver, at der er anvendt minimums-tykkelse, idet GAB I ikke må udlægges i mindre end 50 mm.

I nogle tilfælde kan man komme til at vælge materialekombinationer, der gør at der ved dimensioneringen findes tykkelser for det bundne bærelag, der overstiger den anbefalede maksimumstykkelse. Feltet med asfaltlagets tykkelse vil så blive markeret med rødt. Figur 8 viser et sådant eksempel, hvor der til en trafikklasse T2 belægning som slidlag er valgt en 15 mm OB på et GAB0 70/100 bærelag. Sidstnævnte har en maksimal tykkelse på 75 mm, hvorfor den dimensioneringsmæssigt bestemte kombinerede asfalttykkelse på 95 mm bliver for stor.

Figur 8 Input parametre - overskridelse af maksimaltykkelser

4.2.2 Brugedefineret dimensionering

Ændring af trafikprognose

Såfremt brugeren ønsker at styre trafikparametrene ud over den opsplitning, der angives ved klassedelingen T1 til T7, kan dette gøres ved at justere på parametrene "Antal pr. år", "Vækst, %" og "År i simulering/dimensionering".

Dimensioneringen udføres ved at trykke på knappen "Analytisk", hvorefter de justerede belægningstykkelser umiddelbart fremkommer.

Valg af andet materiale

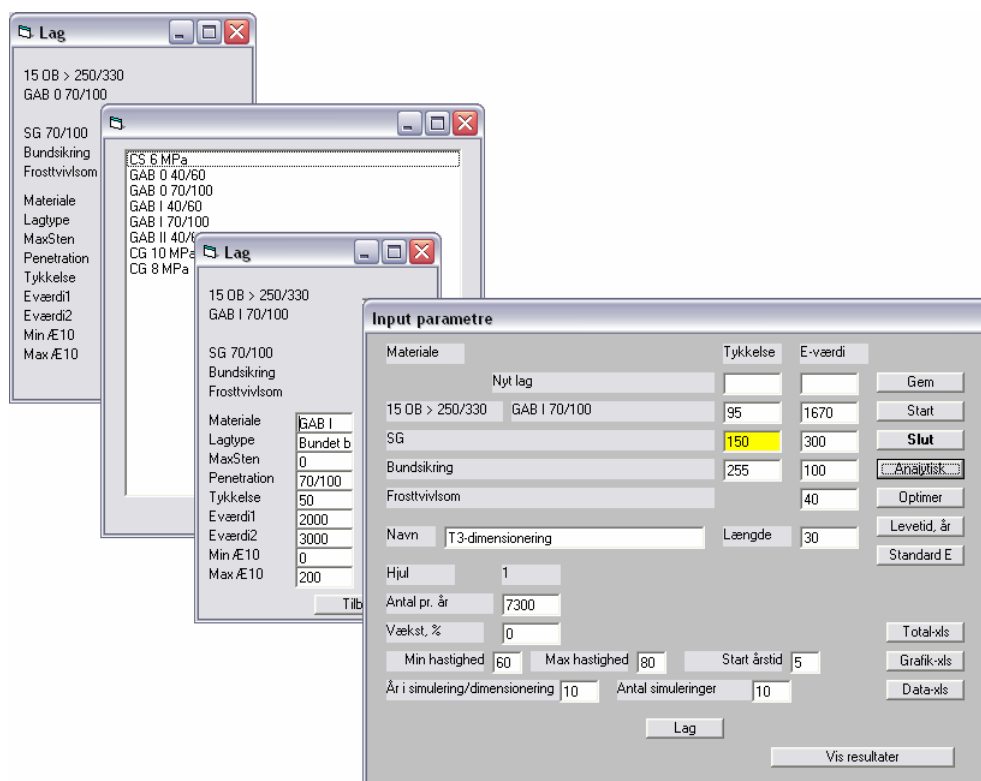
Valg af et andet materiale kan f.eks. være relevant, når dimensioneringen har fastlagt tykkelsen af asfaltbærelaget ud fra minimumslagtykkelsen.

Ændring foretages ved at udføre følgende operationer:

1. Der klikkes på knappen "Lag"
2. I det fremkomne skærbillede klikkes på det lag, der skal ændres
3. Der fremkommer nu et unavngivet skærbillede, der viser relevante alternativer til det givne lag. I dette skærbillede klikkes på det ønskede erstatningslag, der så automatisk indsættes som erstatning
4. I skærbilledet "Lag" klikkes på knappen "Tilbage"

5. I skærbilledet "Input parametre" klikkes på "Analytisk", hvorefter de justerede belægningstykkelser umiddelbart fremkommer.

Nedenstående figur illustrerer, hvorledes det for tykke GAB 0 bærelag i forrige eksempel erstattes med GAB I materiale. Et fornyet tryk på "Analytisk" knappen fjerner den røde markering.



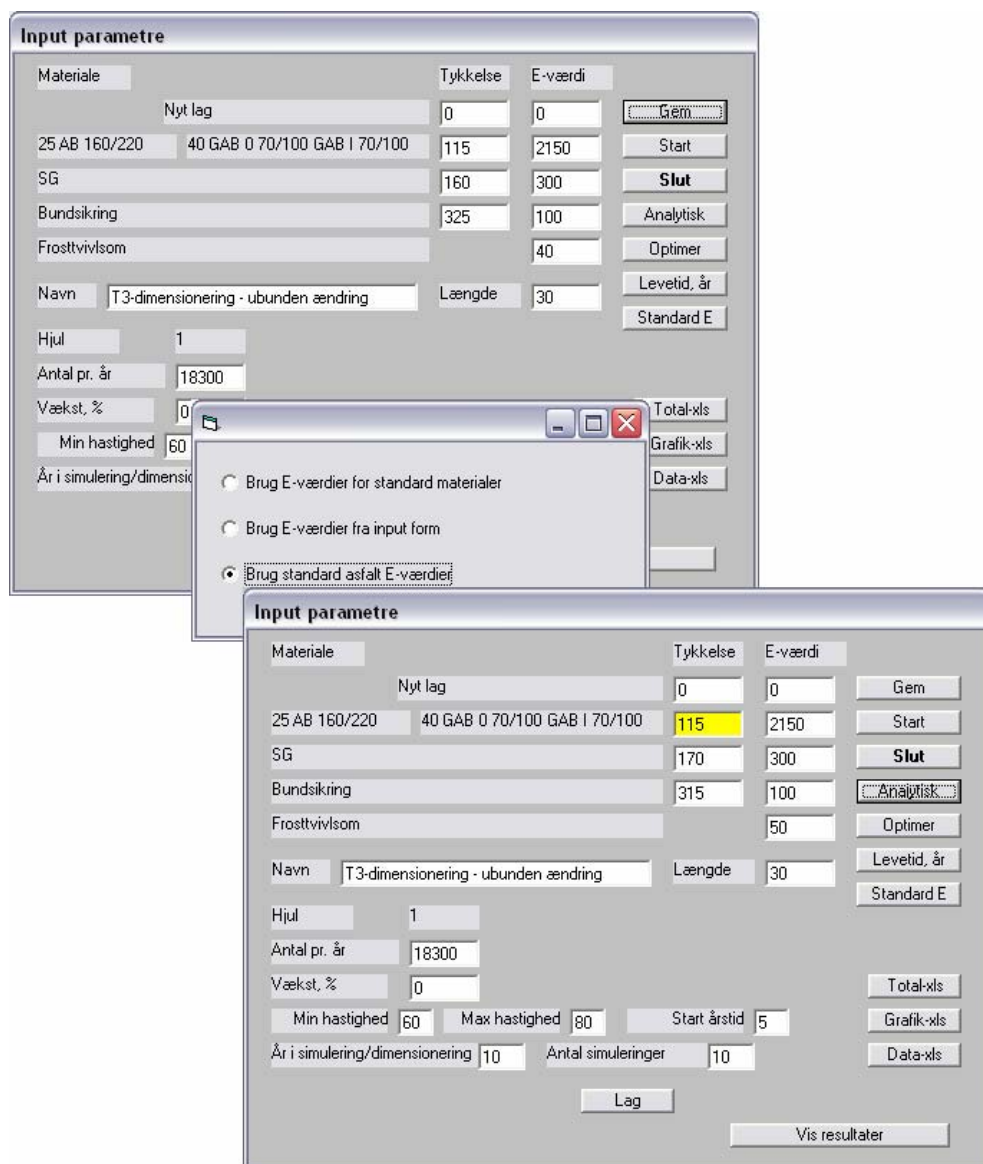
Figur 9 Valg af andet materiale

E-moduler for ubundne materialer

Skal dimensionering baseres på andre E-moduler for ubundet bærelag, bundsikring eller underbund end materialernes standardværdier udføres følgende operationer:

1. Den/de ændrede værdier indtastes i skærbilledet "Input parametre"
2. Der klikkes på knappen "Standard E" og i det fremkomne unavngivne skærbillede vælges "Brug standard asfalt E-værdier" og klikkes på "OK"
3. I skærbilledet "Input parametre" klikkes på "Analytisk", hvorefter de justerede belægningstykkelser umiddelbart fremkommer.

Nedenstående figur viser dimensionering for en underbundsmodul på 50 MPa.



Figur 10 Ændring af E-modul for ubundne lag

Det ses at den stivere underbund giver anledning til en øgning af SG-tykkelsen, mens totaltykkelsen holdes konstant.

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 bundsikrings-laget 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 bundsikringslaget, men der ikke fordredes nogen ekstra asfalt-tykkelse for at neutralisere effekten på oversiden af SG-laget. Der kan også forekomme tilfælde, der fører til andre kombinationer af tykkelsesjusteringer.

Justering af asfalt E-modul for hastighed

Analytisk dimensionering for trafik med hastigheder under 60 km/h udføres ved at reducere asfaltens E-modul. For normalt forekommende danske asfaltmaterialer kan det antages, at forholdet mellem asfalt E-moduler E_V og E_{60} ved hastighederne V hhv. 60 km/h kan beregnes af formlen:

$$E_V/E_{60} = (V/60 \text{ km/h})^{0,37}$$

En reduktion af hastigheden til 30 km/h fører ifølge denne model til en reduktion af E-modulen til 77 %. MMOPP programmet kan udføre denne justering automatisk på grundlag af middelværdien værdien for "Min hastighed" og "Max hastighed" i vinduet "Input parametre". Der bør specificeres et interval, specielt hvis man efterfølgende vil gennemføre en simulation, idet en ensartet hastighed i alle simulationer vil medføre urealistiske beregningsmæssige resonansfænomener

Ved en sådan justering af hastigheder ændres E-modulen for asfalten ikke umiddelbart i datafeltet, da denne værdi er udgangspunkt for simulationsberegningerne (se afsnit 4.3) I stedet vises den justerede asfalt E-modul, 1693 MPa i skærbilledet "Input parametre" til højre for overskriften "E-værdi". Nedenstående figur viser resultatet af en hastighedsreduktion til gennemsnitligt 30 km/h.

Materiale		Tykkelse	E-værdi	1693
Nyt lag		0	0	Gem
25 AB 160/220	40 GAB 0 70/100 GAB I 70/100	118	2169	Start
SG		170	300	Slut
Bundsikring		312	100	Analytisk
Frostvivlsom			40	Optimer
Navn	T3-dimensionering - langsom kørsel	Længde	30	Levetid, år
				Standard E
Hjul	1			
Antal pr. år	18300			
Vækst, %	0			Total.xls
Min hastighed	20	Max hastighed	40	Start årstid 5
År i simulering/dimensionering	10	Antal simuleringer	10	Grafik.xls
				Data.xls
Læg				Vis resultater

Figur 11 Hensyntagen til langsom trafik i analytisk dimensionering

4.2.3 Manuel analytisk dimensionering

I visse situationer kan de analytisk bestemte dimensioner være uhensigtsmæssige. Det kan f.eks. gælde ved sideudvidelser, hvor der ønskes en bestemt asfalttykkelse, eller hvis den analytisk fastlagte SG-tykkelse bliver for stor til, at laget kan indbygges i ét lag.

Til at håndtere denne situation kan MMOPP separat beregne den analytiske levetid af de enkelte lag i vinduet "Input parametre". Beregningen aktiveres ved at klikke på knappen "Levetid år". I et lille sidevindue vises nu levetiden i år for den aktuelle konstruktion og trafikbelastning, og det er muligt at justere tykkelser (i vinduet "Input parametre"), således at krav til en hensigtsmæssig opbygning kan overholdes.

Nedenstående eksempel viser justering af en T7-belægning, hvor et 260-mm SG-lag nedjusteres til en tykkelse på 200 mm, idet der kompenseres med 24 mm tykkere asfalt og 10 mm tykkere bundsikringslag, og mindste levetid for alle lag stadig holdes over 15 år.

The screenshot shows the 'Input parametre' window with the following settings:

- Materiale:** 30 AB 40/60, 50 ABB 0, GAB II 40/60
- Tykkelse:** 186, 3841, 260, 390, 40
- E-værdi:** 3841, 300, 300, 100, 40
- Navn:** T7-dimensionering - automatisk
- Længde:** 30
- Hjul:** 1
- Antal pr. år:** 500000
- Vækst, %:** 0
- Min hastighed:** 60, **Max hastighed:** 80, **Start årstid:** 5
- År i simulering/dimensionering:** 15, **Antal simuleringer:** 10

The side window displays the following table:

Lag	E-værdi	Response	Tilladelig	Levetid, år
1	3841	160	170	20.7
2	300	0.100	0.101	15.6
3	100	0.031	0.032	15.2
4	40	0.012	0.012	15.2

The bottom part of the image shows the same 'Input parametre' window with the following settings:

- Materiale:** 30 AB 40/60, 50 ABB 0, GAB II 40/60
- Tykkelse:** 210, 3963, 200, 400, 40
- E-værdi:** 3963, 300, 300, 100, 40
- Navn:** T7-dimensionering - automatisk
- Længde:** 30
- Hjul:** 1
- Antal pr. år:** 500000
- Vækst, %:** 0
- Min hastighed:** 60, **Max hastighed:** 80, **Start årstid:** 5
- År i simulering/dimensionering:** 15, **Antal simuleringer:** 10

The side window displays the following table:

Lag	E-værdi	Response	Tilladelig	Levetid, år
1	3963	146	170	33.6
2	300	0.077	0.101	45.3
3	100	0.031	0.032	15.8
4	40	0.012	0.012	15.7

Figur 12 Manuel analytisk dimensionering

4.2.4 Forstærkningsberegning

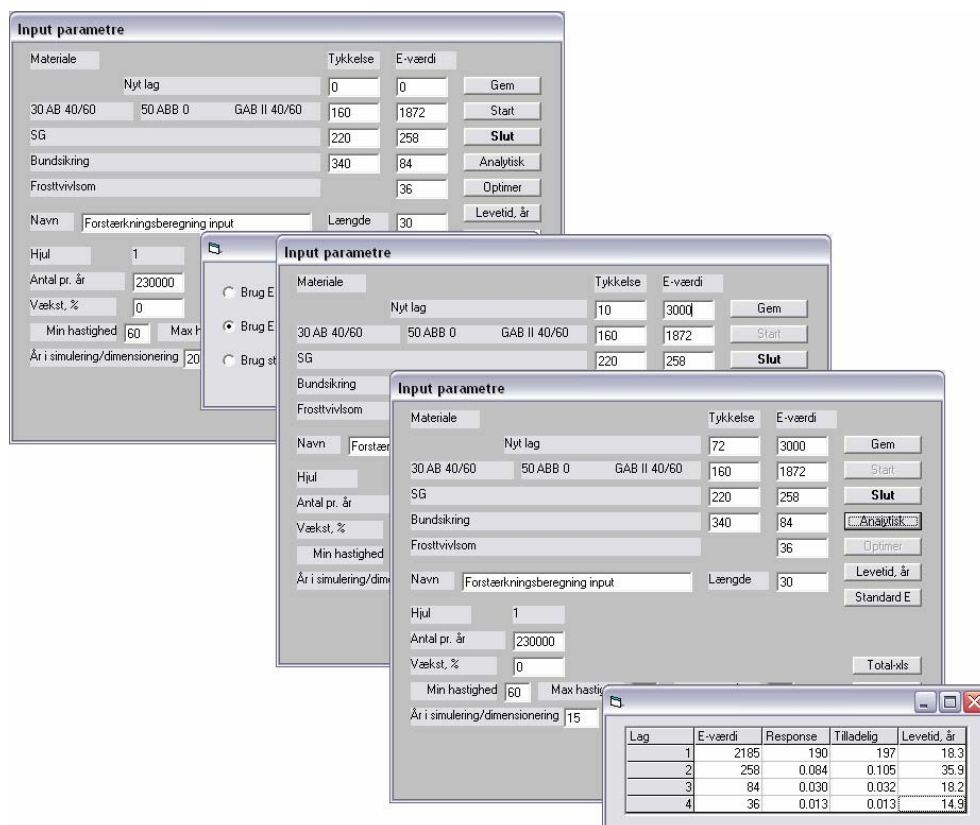
MMOPP kan udføre analytiske forstærkningsberegninger på grundlag af inddata, der angiver lagenes gennemsnitstykkelser og E-modulernes 75 % fraktiler (75 % af E-modulerne højere end den angivne værdi).

MMOPP kombinerer tykkelser og E-moduler for nyt og eksisterende asfaltmateriale til et vægtet gennemsnit på samme måde som ved sammenvægtningen af slid-, binder- og bærelag, og beregner en kritisk tøjning i bunden af det eksisterende asfaltlag.

Der anvendes følgende fremgangsmåde:

1. Først genereres en belægning, der svarer til den aktuelle. Dette gøres lettest ved at udføre en "almindelig" analytisk dimensionering, hvor der vælges materialer, svarende til det registrerede, og så justerer trafikbelastningen til et niveau, der resulterer i tykkelser, der nogenlunde svarer til de registrerede.
2. Herefter indtastes de aktuelle tykkelser og E-moduler (75 % fraktiler). For forstærkningsmaterialet indtastes en E-modul, svarende til den aktuelle bitumentype, 2000 MPa for 70/100, 3000 MPa for 40/60 bitumen, og som udgangspunkt en foreløbig tykkelse på 10 mm. Når der indtastes data i disse felter, spærres knappen "Start", der normalt igangsætter en simulation (se afsnit 4.3)
3. Når dette er gjort klikkes på "Analytisk", hvorefter de justerede belægningstykkelser umiddelbart fremkommer
4. Resultatet kan gemmes ved at klikke på "Gem". MMOPP spørger da om den intakte værdi af det eksisterende lags E-modul svarer 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.

Nedenstående figur viser eksempel på en forstærkningsdimensionering.



Figur 13 Forstærkningsdimensionering

4.3 Simulation

4.3.1 Generelt

Simulation af nedbrydningsforløb gøres på grundlag af valgte befæstelser, belastninger og acceptgrænser for nedbrydning. Der kan alene foretages simulation for befæstelser bestående af fleksible lag, da arbejdsgruppen har vurderet at erfaringsgrundlaget for befæstelser med CG bærelag og betonbefæstelser var for svagt til at tjene som grundlag for udarbejdelse af nedbrydningsmodeller.

Baseret på arbejdsgruppens erfaringer og data fra bl.a. vejman.dk systemet er nedbrydningsmodellerne tilpasset følgende betingelser:

- Belægningerne når i løbet af 15 år gennemsnitligt en IRI på 2,8 m/km, svarende til vejman.dk nedbrydningsmodellen.
- Asfaltlagenes nedbrydning forløber således, at 75 % af belægningerne efter 15 år har en gennemsnitlig E-modul, der er højere end 2/3 af startværdien.

Databasen MMOPP07A.MDB indeholder standardværdier for alle disse parametre.

I det følgende er redegjort for de umiddelbart tilgængelige inputværdier i MMOPP's skærbilleder.

En del af disse skærbilleder er deaktiveret i vejregeludgaven af MMOPP, for at sikre, at der kun anvendes inddata, der er i overensstemmelse med vejreglens forudsætninger.

4.3.2 Vinduet "Input parametre"

The 'Input parametre' window is a dialog box for configuring simulation parameters. It includes the following elements:

- Material Selection:** A list of materials (20 TB k 70/100, 50 ABB 40/60, GAB I 40/60, SG, Bundsikring, Frostvivlsom) with corresponding thickness (Tykkelse) and E-value (E-værdi) fields.
- Simulation Parameters:** Fields for 'Nyt lag' (New layer), 'Navn' (Name: T5 belægning), 'Længde' (Length: 30), 'Hjul' (Wheels: 1), 'Antal pr. år' (Number per year: 180000), 'Vækst, %' (Growth, %: 0), 'Min hastighed' (Min speed: 60), 'Max hastighed' (Max speed: 80), 'Start årstid' (Start year: 5), 'År i simulering/dimensionering' (Years in simulation/dimensioning: 10), and 'Antal simuleringer' (Number of simulations: 10).
- Action Buttons:** 'Gem' (Save), 'Start', 'Slut' (End), 'Analytisk', 'Optimer', 'Levetid, år' (Lifetime, years), 'Standard E', 'Total-xls', 'Grafik-xls', 'Data-xls', 'Lag' (Layer), and 'Vis resultater' (Show results).

Figur 14 Input parametre

Vinduet indeholder inputfelter for de 4 normale lag i en fleksibel befæstelse samt forstærkningslag. For det bundne lag er anført de op til 3 dellag, det kan bestå af, med angivelser af de valgte tykkelser for de to første - det tredje lags tykkelse er forskellen mellem disse to og totaltykkelsen i inputfeltet. Endelig er anført længden af simulationsstrækningen.

Der vises også overordnede belastningsdata (detaljeret i afsnit 4.3.4), start årstidsdata, simuleringsdata (år og antal) samt valgknap for detaildata vedrørende lagenes materialedata.

Endelig er der en 3 valgknapper, der igangsætter overførsel af dokumentationsdata til Excel regneark.

- "Total-xls" giver en fuldstændig udskrift af alle beregningsdata, inklusive parametre i de grundlæggende beregningsrutiner.
- "Grafik-xls" giver overførsel af data til grafisk fremstilling af de forskellige nedbrydningsforløb
- "Data-xls" giver en overførsel af data, der normalt kan betragtes som fyldestgørende dokumentation for en belægningsdimensionering.

4.3.3 Vinduet "Klima"

Dette vindue er deaktiveret i vejregeludgaven af MMOPP

Årstid	Dage	Temp	E-værdi koeficient pr. lag			
			Lag1	Lag2	Lag3	Lag4
Vinter	49	-2	4	4.2	10	20
Vinter tø	10	1	3.7	0.33	10	20
Tøbrud	15	1	3.7	0.67	0.7	0.6
Senvår	46	4	3.1	1	0.85	0.8
Sommer	143	20	1	1	1	1
Hedeblø	10	35	0.3	1	1	1
Efterår	92	7	2.6	1	1	1

Standard
Beton
Standard2
Std.Frost

Ny årstid
Fjern årstid
Gem som
Standard

Tilbage Frost Graddøgn 44 sdf 3.4

Figur 15 Klima data

Vinduet indeholder de faktorer, der i de enkelte årstider ganges på input E-værdierne for at få årstidens E-værdier. F.eks. vil man for lag 2 (SG) i vinterperioden have en E-modul på $300 \times 4,2 = 1260$ MPa.

Temperaturangivelsen tjener til en beregning af asfaltmaterialernes revneinitieringsfølsomhed, der reduceres ved høje temperaturer (større tøjning tillades uden at det fører til revner, når asfalten er blød).

De angivne temperaturer er lufttemperaturer. Denne omregnes af programmet til asfalttemperatur under hensyntagen til lagtykkelsen efter en model baseret på "Shell pavement design manual".

Ændrede temperaturbetingelser kan gives et nyt navn i feltet under "Gem som" knappen.

Felterne "Frostgraddøgn" og "sdf" indeholder parametrene, der bestemmer den stokastisk beregnede frostnedtrængning, som angivet i afsnit 2.3.5

Når der er valgt klima trykkes på "Tilbage" knappen.

4.3.4 Vinduet "Belastning"

Dette vindue er deaktiveret i vejregeludgaven af MMOPP

Belastning	
Dæktryk	0.7
Hjulafstand	350
Masse af hjul	500
Affjedret masse	4500
Fjederkonstant, hjul	1000
Fjederkon., affjedring	650
Dæmpning, hjul	0.5
Dæmpning, affjedring	8

Standard 1
Mixed 1
Mixed 2
Langsom 1
Supersingle 1
Æ10 1
EU standard 1
EU standard 2
Koncept 1
EU standard 3
Std.-dmp 1
Std.+dmp 1
Std.-fjd 1
Std.+fjd 1

Figur 16 Belastningsdata

Vinduet indeholder dæktryk, masser, fjederkonstanter og dæmpningskonstanter.

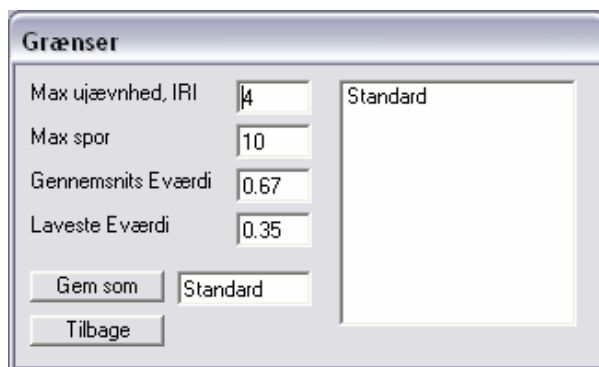
Der kan for en given simulation påføres belastningskombinationer af belastninger fra i alt 6 forskellige enkelt- eller tvillinghjulstyper. Disse defineres i "Belastningsvinduer", hvor de ved tryk på "Tilføj til" knappen indsættes i den ønskede belastningskombination.

I det viste eksempel er der to belastninger i kombinationen "Mixed". Belastningen tildeles automatisk et nummer i kombinationen. Når man er færdig med at tilføje/rette, trykkes på "Tilbage". I vinduet "Input parametre" kan man herefter angive 1. års trafik og vækstrater separat for de enkelte belastninger i kombinationen.

I den analytiske dimensionering regner MMOPP som standard med 20 % stødtillæg. Hvis man ønsker at lave en analytisk dimensionering med kun 10 % stødtillæg må hjulenes "Masse af hjul" og "Affjedret masse" hver især reduceres med en faktor $110/120 = 0,92$. Denne belastning kan alene anvendes til analytisk dimensionering – ved simulationsberegninger for lavere hastigheder bliver de dynamiske påvirkninger automatisk reduceret, hvorfor der her skal anvendes den fulde belastning.

4.3.5 Vinduet "Grænser"

Dette vindue er deaktiveret i vejregeludgaven af MMOPP



Figur 17 Levetidsgrænser

Dette vindue aktiveres fra "Grænser" knappen i "Input parametre".

Vinduet indeholder de konstanter, der afgør hvorvidt levetiden er opbrugt i henhold til kriterierne IRI, Max. sporkøring, Gennemsnits E-værdi (af asfalten) og Laveste E-værdi (af asfalten).

Når der er valgt grænser trykkes på "Tilbage" knappen.

4.3.6 Vinduet "Lag"

Dette vindue aktiveres fra "Lag" knappen i "Input parametre".

15 TB k 250/330	
50 ABB 40/60	
GAB I 40/60	
SG	
Bundsikring	
Frosttvivlsom	
Materiale	TB k
Lagtype	Slidlag
MaxSten	0
Penetration	250/330
Tykkelse	15
Eværdi1	500
Eværdi2	500
Min Æ10	0
Max Æ10	20

Figur 18 Lagdata

I dette vindue vises de brugerdefinerbare parametre vedrørende materialernes anvendelse og materialeegenskaber, som følger:

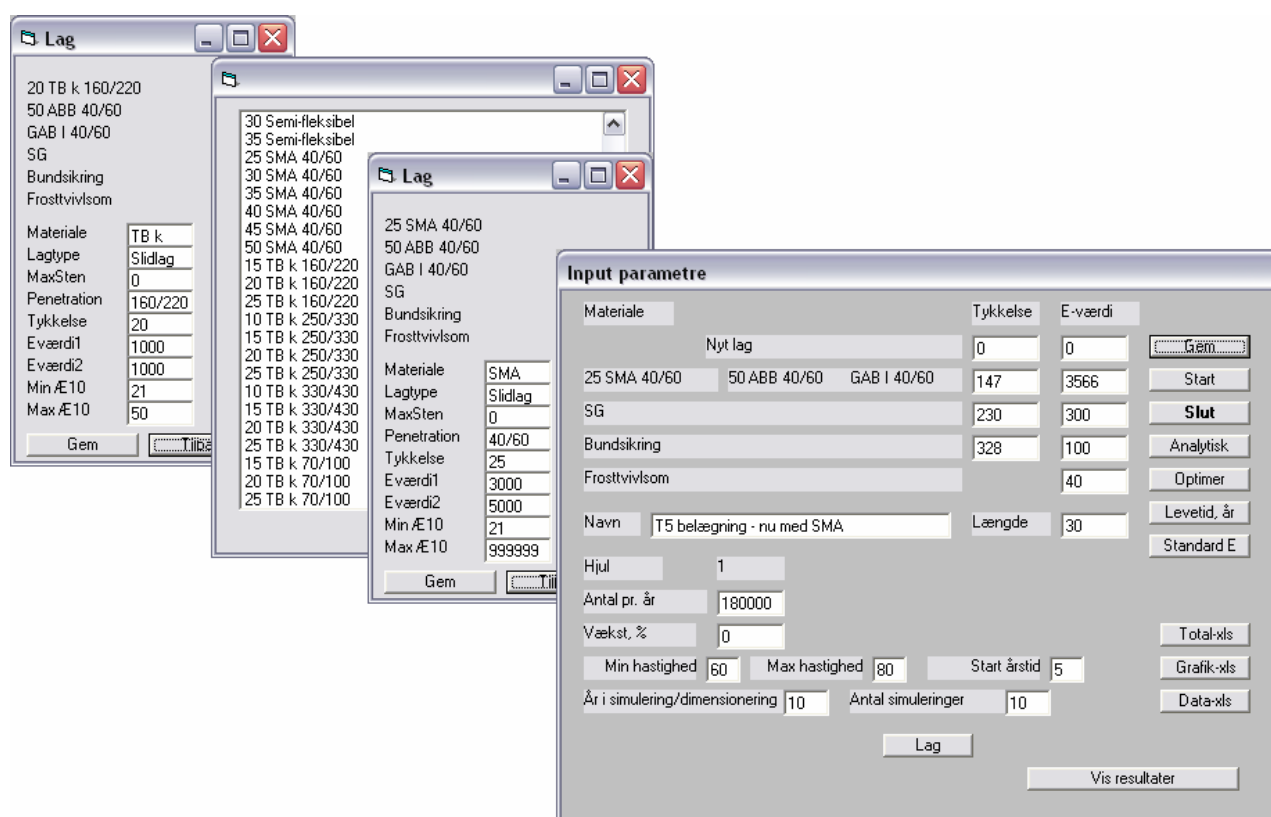
- Materiale: Betegnelse, for asfaltmaterialer i overensstemmelse med vejreglen for varmblandet asfalt
- Lagtype: slidlag, bindelag, bundet bærelag, ubundet bærelag, bundsikring, underbund
- Maksimal stenstørrelse (alene asfaltmaterialer)
- Penetration af udgangsbitumen - alene asfaltmaterialer
- Tykkelse - kun slid- og bindelag
- Eværdi1 - E-modulen af laget, der anvendes som udgangspunkt i simulationsberegningerne, og for asfaltmaterialer den værdi, der tillægges materialet i analytisk dimensionering, hvis det ligger i de øverste 100 mm af befæstelsen
- Eværdi2 - E-modulen der tillægges asfaltmaterialer i analytisk dimensionering, hvis det ligger under de øverste 100 mm af befæstelsen
- Min Æ10 - den laveste daglige Æ10 belastning i spor, som materialet bør anvendes for
- Max Æ10 - den højeste daglige Æ10 belastning i spor, som materialet bør anvendes for

En lagudskiftning i en befæstelse udføres ved at klikke på laget i befæstelsen. Herved aktiveres et ubenævnt vindue, der viser relevante erstatningslag. Ved at klikke på det ønskede lag indsættes det som erstatning i befæstelsen.

I det nedenfor viste eksempel erstattes tyndlagsbelægning 20 mm TB k 70/100 med 25 mm skærvemastiks SMA 40/60.

Efter udskiftningen gennemføres en redimensionering ved at trykke på "Analytisk".

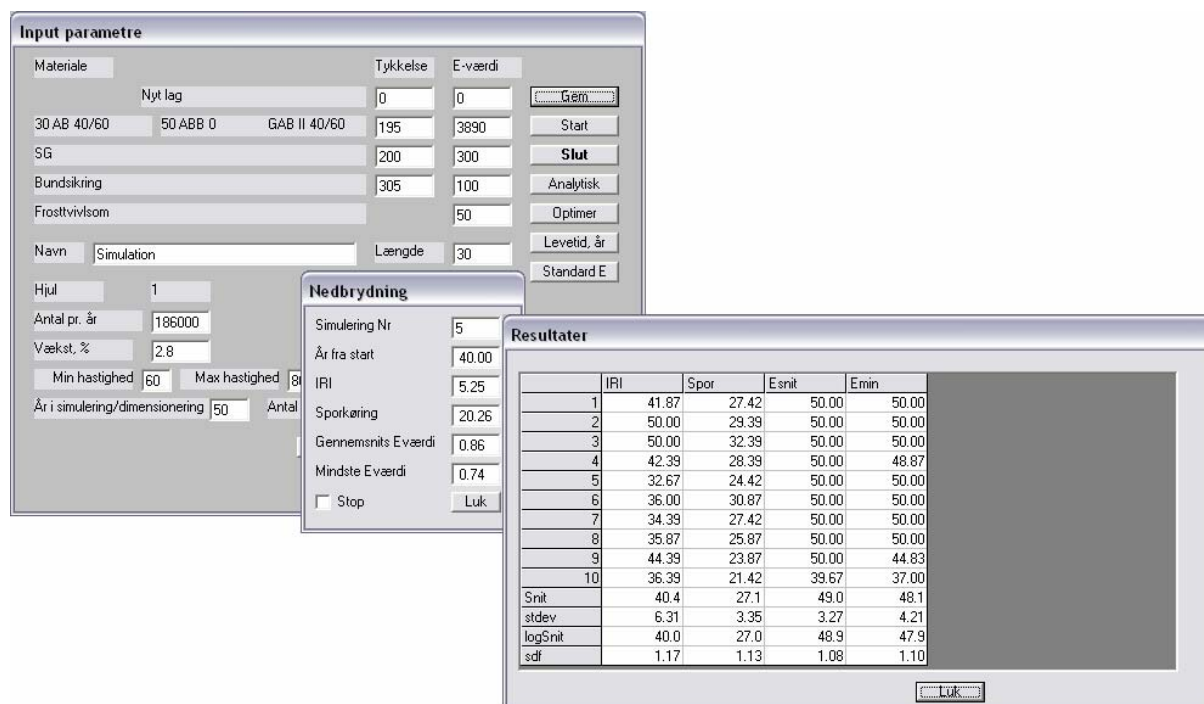
Når alle parametre er på plads kan de gemmes under navn - tryk på "Gem".



Figur 19 Udskiftning af lag i befæstelse

4.3.7 Simulation

Simulation startes nu ved at trykke "Start", hvorefter vinduet "Nedbrydning" kommer til syne. I dette kan løbende følges, hvor langt beregningerne er nået. Hvis man ønsker at afbryde simulationen, trykkes med musen i det lille kvadratiske felt, markeret "Stop", så lukker simulationen "pænt" ned og programmet kan afsluttes endeligt ved at klikke på "Slut" i vinduet "Input Parametre"



Figur 20 Simulation og resultatvindue

Når simulationen er afsluttet, forsvinder "Nedbrydning". Simulationens hovedresultater kan nu kaldes frem ved tryk på knappen "Vis resultater".

I vinduet "Resultater" kan aflæses levetiderne, som defineret i afsnit 4.3.5 i de enkelte kørsler, samt Middel og Standardafvigelse hhv. Logaritmisk middel og standard afvigelses faktor.

4.3.8 Optimering

Programmets sidste facilitet er en anlægsomkostnings optimering i forhold til specifikke krav til levetider.

Ved i vinduet "Input parametre" at trykke på "Optimer" fås et skærbillede for input at optimeringsforudsætningerne

I dette kan inddateres det belægningsinterval, der skal afsøges, samt materialepriser.

Initialprisen for de enkelte lag vil være fælles for alle befæstelser, der gennemføres simulation for. Analyserne baserer sig på beregning af forskelspriser mellem forskellige belægningsopbygninger. Der skal derfor indtastes ”deltapriser” (de variable omkostninger pr. m³, leveret og indbygget) på de varierede lag – for asfalt altså prisen på bærelaget, ikke slid- og binderlag.

For hvert enkelt lag angives finheden af søgningen. Hvis man for eksempel vil undersøge for asfalttykkelserne mellem 170 mm og 195 mm i 5 mm trin indtastes ”Fra”-værdien som 170 og ”Til”-værdien som 195, og der angives 5 trin.

Hvis man ønsker at overholde de ”normale” krav til frostsikring kan standardværdien i feltet ”Minimumstykkelse” bibeholdes – hvis der ønskes undersøgt tyndere konstruktioner indtastes for eksempel 0.

Nederst angives den sikkerhed med hvilken kriterierne ønskes overholdt. Der er her stillet ensartede krav til en 85 % sikkerhed for at IRI, sporkøring, gennemsnitlig nedbrydning af asfaltlagene og lokale svigt i asfaltlaget ikke bliver kritisk.

Optimer

	Fra	Til	Trin	Pris/m3
30 AB 40/60	170	195	5	2000
SG	180	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			

Input parametre

Materiale	Tykkelse	E-værdi
Nyt lag	0	0
30 AB 40/60	175	3774
SG	220	300
Bundsikring	305	100
Frostvivlssom	50	

Navn: Optimering Længde: 30

Hjul: 1

Antal pr. år: 185000

Vækst, %: 2.8

Min hastighed: 60 Max hastighed: 80 Start årstid: 5

År i simulering/dimensionering: 50 Antal simuleringer: 10

Buttons: Gem, Start, Slut, Analytisk, Optimer, Levetid, år, Standard E, Total.xls, Grafik.xls, Data.xls

Resultater

	IRI	Spor	Esnit	Emin
1	34.39	24.39	40.00	36.67
2	31.39	20.39	34.87	26.67
3	40.39	27.42	50.00	50.00
4	40.42	22.42	50.00	50.00
5	43.42	25.39	50.00	50.00
6	26.39	20.39	37.00	27.87
7	50.00	31.39	50.00	50.00
8	36.39	23.39	44.83	41.67
9	25.39	18.39	30.00	26.83
10	44.67	26.39	50.00	48.87
Snit	37.3	24.0	43.7	41.1
stddev	8.01	3.87	7.63	10.38
logSnit	36.5	23.7	43.0	39.7
sdf	1.25	1.17	1.21	1.32

Optimer

	Fra	Til	Trin	Pris/m3
30 AB 40/60	170	195	5	2000
SG	180	220	4	300
Bundsikring	200	200	1	200

	IRI	Sporkøring	Gennemsnits E-værdi	Mindste E-værdi
Levetid, år	20	20	20	20
Pålidelighed%	99.6	85.7	100.0	99.3
Minimums tykkelse	700			

Buttons: Reset, Start, Slut

Figur 21 Optimering til 85 % pålidelighed

Optimeringen startes med "Start" knappen, hvorefter det velkendte kombinations-skærm billede "Input parametre" og "Nedbrydning" dukker frem.

I dette skærm billede kan man løbende følge beregningerne: "Input parametre" opdateres løbende med tykkelserne, og "Nedbrydning" viser forløbet i den enkelte simulation.

Figur 21 viser fremgangsmåden ved en fuld variation optimering med variation af asfalt- og SG-laget. Den er baseret på belægningssimuleringen, vist i Figur 20, hvor det er sandsynligt, at det vil være muligt at finde andre løsninger, der overholder 85 % sikkerhed for at opnå levetider på mindst 15 år, idet middel ÷ spredning for alle levetids mål er større end 15 år.

Så snart der er fundet en løsning, der opfylder kriterierne, og det ved senere startede simulationer konstateres, at disse er dyrere, afbrydes disse.

Kun det optimale befæstelsesresultat gemmes.

Når optimeringen er tilendebragt, vises den resulterende befæstelse under det oprindelige startnavn, der altså nu har fået ændret indhold. Det kan derfor anbefales at ændre navn på inddatasættet inden en optimering påbegyndes. Samtidig viser vinduet "Optimer" de resulterende sikkerheder for at de stillede levetidskrav overholdes af den fundne befæstelse.

Optimeringen kan eventuelt udføres som en 2-trins proces, hvor der først undersøges for det dyreste lag (asfalten) mens de øvrige holdes fast. Når man ved denne kørsel finder et resultat, skal alle billigere løsninger have mindre asfaltykkelser, hvilket kun kan ske ved kompensation i de to billige lag.

Moderne PC'er med clockfrekvenser på over 1 GHz kan dog på en rimelig tid gennemføre en optimering hvor alle lag varieres inden for deres relevante områder.

Det ses i den nederste visning af "Optimer" i Figur 21, at pålidelighedskravene er overholdt for den resulterende belægning, der gav en 20 mm reduktion af asfaltykkelsen, og en tilsvarende forøgelse af SG-laget til med 20 mm.

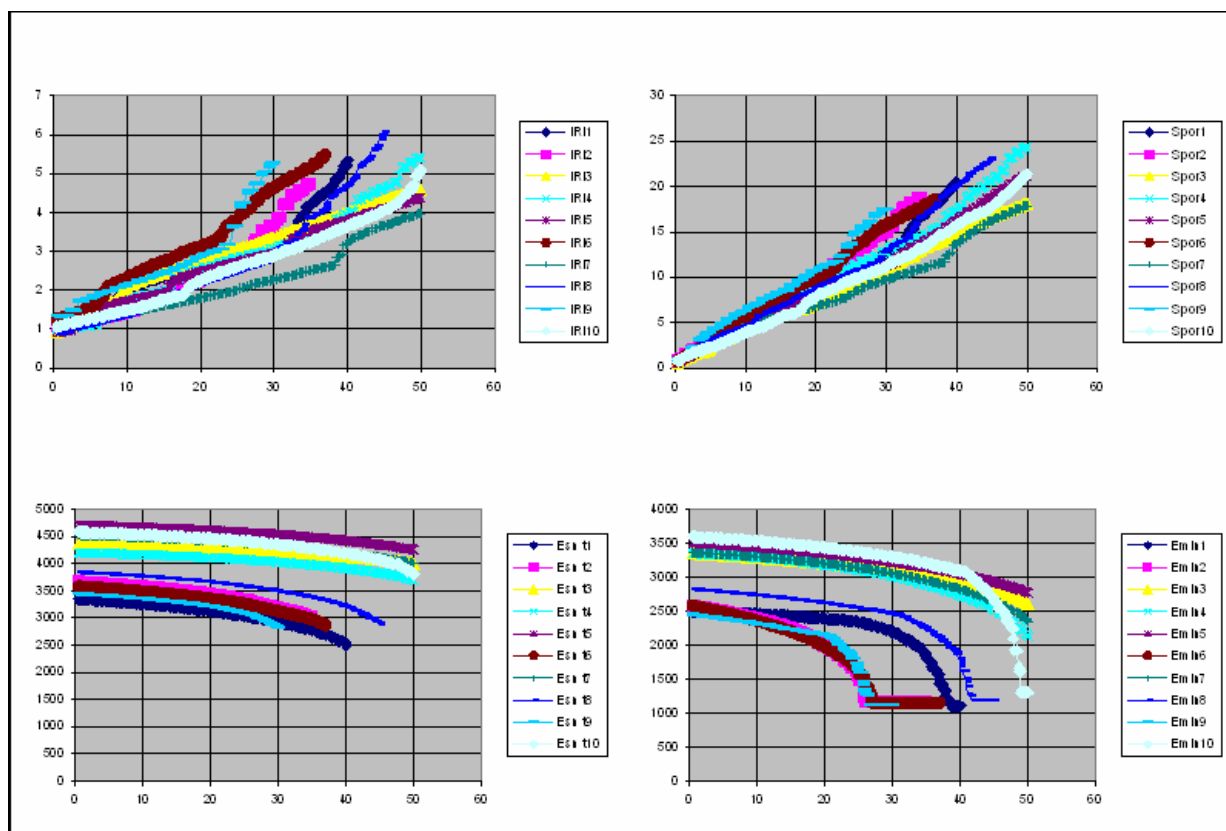
4.4 Dokumentation

Som omtalt under afsnit 4.3.2 kan MMOPP udskrive forskellige former for dokumentation af input og resultater fra de gennemførte beregninger.

Nedenfor er gengivet dokumentationsudskriften for dimensioneringen i Figur 21, overført ved at klikke på knappen "Data-xls", samt resultatet af et sæt simulationsberegninger, overført til Excel regneark ved at klikke på knappen "Grafik-xls",

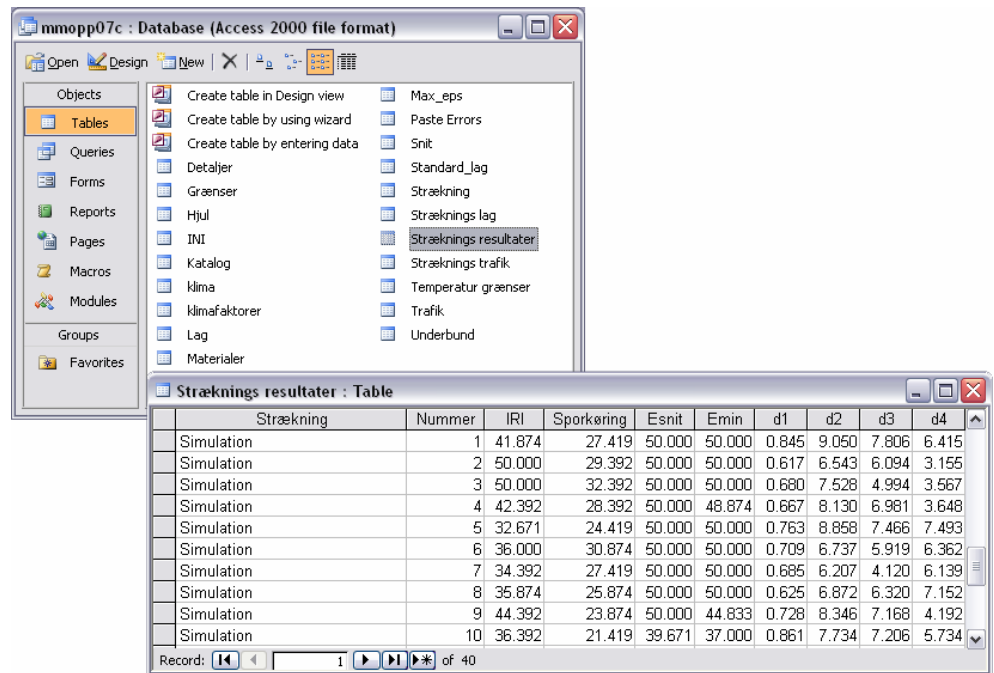
Projekt:	Optimering			Dato:	05-02-2007
D:\Data\Mopdata4\Freeze\mmopp07c.mdb					
Klima:	Standard				
Belastning:	Standard				
Grænser:	Standard				
Hjul	Antal	Vækst, %			
	1	186000	2.8		
Længde, m:	30				
Min hastighed, km/h:	60				
Max hastighed, km/h:	80				
Start årstid:	5				
År i simulering/dimension:	50				
Antal simuleringer:	10				
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi,MPa	Materiale		
	1	175	3774	30 AB 40/60 + 50 ABB 0 + GAB II 40/60	
	2	220	300	SG	
	3	305	100	Bundsikring	
	4		50	Frosttvivlsom	
Levetid (år)					
Nummer	IRI	Sporkøring	Esnit	Emin	
	1	34.4	24.4	40	38.7
	2	31.4	20.4	34.9	26.7
	3	40.4	27.4	50	50
	4	40.4	22.4	50	50
	5	43.4	25.4	50	50
	6	26.4	20.4	37	27.9
	7	50	31.4	50	50
	8	36.4	23.4	44.8	41.7
	9	25.4	18.4	30	26.8
	10	44.7	26.4	50	48.9

Figur 22 Dokumentationsudskrift



Figur 23 Grafer over nedbrydningsforløb, IRI, sporkøring, Esnit og Emin

Endelig skal det nævnes, at alle ind- og uddata gemmes i den Access 7 database, der er defineret i filen MMOPP.INI (se afsnit 3.2). Særligt tabellen "Strækningsresultater" er interessant - den indeholder for alle udførte kørsler de 4 levetider (IRI, Sporkøring, E_{SNIT} og E_{MIN}) samt slutdeformationen af lagene 1-4 i kolonnerne d1 til d4.



mmopp07c : Database (Access 2000 file format)

Objects: Tables, Queries, Forms, Reports, Pages, Macros, Modules, Groups, Favorites

Create table in Design view
Create table by using wizard
Create table by entering data

Max_eps
Paste Errors
Snit
Standard_lag
Strækning
Stræknings lag
Stræknings resultater
Stræknings trafik
Temperatur grænser
Trafik
Underbund

Detailjer
Grænser
Hjul
INI
Katalog
Klima
Klimafaktorer
Lag
Materialer

Stræknings resultater : Table

	Strækning	Nummer	IRI	Sporkøring	Esnit	Emin	d1	d2	d3	d4
Simulation		1	41.874	27.419	50.000	50.000	0.845	9.050	7.806	6.415
Simulation		2	50.000	29.392	50.000	50.000	0.617	6.543	6.094	3.155
Simulation		3	50.000	32.392	50.000	50.000	0.680	7.528	4.994	3.567
Simulation		4	42.392	28.392	50.000	48.874	0.667	8.130	6.981	3.648
Simulation		5	32.671	24.419	50.000	50.000	0.763	8.858	7.466	7.493
Simulation		6	36.000	30.874	50.000	50.000	0.709	6.737	5.919	6.362
Simulation		7	34.392	27.419	50.000	50.000	0.685	6.207	4.120	6.139
Simulation		8	35.874	25.874	50.000	50.000	0.625	6.872	6.320	7.152
Simulation		9	44.392	23.874	50.000	44.833	0.728	8.346	7.168	4.192
Simulation		10	36.392	21.419	39.671	37.000	0.861	7.734	7.206	5.734

Record: 1 of 40

Figur 24 Strækningsresultater fra Access database

5 Referencer

1. Kopperman et al., "ELSYM 5, Elastic 5-Layer System under Multiple Loads", Federal Highway Administration, Washington D.C., 1986
2. Warren og Dieckmann, "Chevlay n-layer Program", Chevron Research Corporation, 1963
3. De Jong, Peutz og Korswagen, "Computer program BISAR. Layered Systems Under Normal and Tangential Loads", Koninklijke/Shell Laboratorium, 1973
4. Ertman og Stubstad, "DELSAN - Dimensionering af Fleksible Vejbefæstelser ved brug af HP-41C/HP-97 Programmer", Laboratorierapport 49 B, Statens Vejlaboratorium, 1981

Kolofon

Titel: Vejregel. Dimensionering af befæstelser, Brugervejledning

Dato Marts 2007

Redaktion: Vejdirektoratet, Vejregelrådet

Foto:

Tegninger:

Copyright: Vejdirektoratet

Udgiver Vejdirektoratet

ISSN: 1600-006X

ISBN: 87-7923-930-5