

En sammenligning av metoder for mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger for norske forhold

Ida-Elise Lindset Trangen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Helge Mork, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: En sammenligning av metoder for mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger for norske forhold A comparison of mechanistic-empirical pavement design methods for Norwegian conditions	Dato: 07.06.16		
	Antall sider (inkl. bilag): 185		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Ida Elise Trangen			
Faglærer/veileder: Helge Mork			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: -			

Ekstrakt:

Dimensjonering av vegoverbygninger har tradisjonelt vært basert på empiriske metoder, og den norske dimensjoneringsmodellen fremstår som rent empirisk for brukeren. Den siste tiden har det vært ideer for å inkludere mer analytiske aspekter i dimensjoneringsprosessen.

Mekanistisk-empirisk dimensjonering anvendes i flere forskjellige dimensjoneringsprogrammer verden over. I denne oppgaven vil tre ulike mekanistisk-empiriske dimensjoneringsprogrammer, MMOPP, PMS Objekt og ADtoPave, testes ut for norske forhold. Disse testene danner utgangspunktet for en sammenligning mot den norske empiriske modellen. Denne oppgaven er basert på et litteraturstudie og et casestudie. Casestudiet har en blanding av reelle og fiktive data, mens materialdataene som anvendes allerede ligger inne i programmet. Den empiriske beregningen ble utført ved bruk av ”Håndbok N200 Vegbygging” utgitt av Statens vegvesen (SVV).

Vegoverbygningene som ble analysert i denne oppgaven var den empirisk beregnede, en underdimensjonert, en overdimensjonert og en optimal vegoverbygning fra hvert program. Denne oppgaven skal besvare følgende tre spørsmål: (1) Hvordan er brukervennligheten, (2) hvilke resultater ble funnet i casestudiet, og (3) er disse programmene egnet for norske forhold?

Alle programmene ga forskjellige resultater, men alt tyder på at den empirisk dimensjonerte vegoverbygningen er innenfor deres dimensjoneringskriterie. Programmene har i tillegg ulike fordeler, ulemper og kompleksitet. Vurdert med tanke på norske forhold virker PMS Objekt å gi de beste resultatene. Dette fordi programmet har inkludert telehiv i sine beregninger.

Stikkord:

1. Mekanistisk-empirisk dimensjonering
2. PMS Objekt
3. MMOPP
4. ADtoPave

Ida Elise Trangen

(sign.)

Forord

Denne masteroppgaven er utført på instituttet for bygg, anlegg og transport, og er skrevet ved Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim, vår 2016.

Masteroppgaven er en spesialisering innen veg, transport og geomatikk, med hovedtema innen vegteknologi. Masteroppgaven er sammensatt av en prosessrapport, en vitenskapelig artikkel og vedlegg. Oppgaven er utført under veiledning av førsteamanuensis Helge Mork, som også er medforfatter av den vitenskapelige artikkelen.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Helge Mork, for gode innspill, tilbakemeldinger og hjelp under hele prosjekt- og masteroppgaven. Samtidig vil jeg takke Rabbira Saba for nyttige innspill og hjelp med innhenting av teori. Det rettes en stor takk til Thomas Winnerholt, Susanne Baltzer, Sabine Leischner, Uwe Reinhardt og Alexander Zeissler for hjelp med opplæring og litteratur rundt de ulike dimensjoneringsprogrammene. Jeg vil takke NVF for stipendet jeg fikk som har gjort det mulig for meg å reise til Dresden, der jeg ble lært opp i bruk av programvaren og fikk hente hjem ADtoPave. Kontorgjengen skal få en stor takk for god støtte, kake og hjelp under hele oppgaveskrivingen. Sist men ikke minst, vil jeg takke alle mine venner og bekjente som har hjulpet til med korrekturlesing og programmering i LaTeX.

Trondheim, 7. Juni, 2016



Ida Elise Trangen

Sammendrag

Denne oppgaven er sammensatt av en prosessrapport, en vitenskapelig artikkel og vedlegg.

Den norske dimensjoneringsmodellen er empirisk bygd opp. Dette systemet baserer seg på indeksmetoden, og tar utgangspunkt i tabeller og formler i “Håndbok N200 Vegbygging”. Parameterne og kriteriene i denne metoden blir satt på generell basis, og varierer lite med tanke på lokale forhold. Derimot har man mekanistisk-empirisk dimensjonering som tar inn flere og lokale parametere. Ønsket med denne oppgaven er å se på ulike mekanistisk-empiriske dimensjoneringsprogrammer, se på brukergrensesnittene og hvordan de fungerer for norske forhold.

Programmene som benyttes er PMS Objekt fra Sverige, MMOPP fra Danmark og ADtoPave fra Tyskland. MMOPP og PMS Objekt er i bruk i deres hjemland, mens ADtoPave er nyutviklet og skal implementeres i det tyske systemet på sikt. Alle programmene har ulike funksjoner og oppsett, og gir en god variasjon på dimensjoneringsprogrammer som kan implementeres i Norge.

Denne oppgaven er utarbeidet ved bruk av et litteraturstudie og et casestudie. Litteraturstudiet har gitt informasjon som var nødvendig for å kunne gå videre med casestudiet. I casestudiet ble det gjennomført tre ulike tester. Den første testen gikk ut på en sammenligning av horisontale tøyninger i bunnen av asfaltlagene mellom MMOPP og PMS Objekt. Dette for å få en indikasjon på forskjellene mellom disse to programmene. Den andre testen bestod av tre deler. Den første delen inneholdt programmenes evaluering av tre typer vegoverbygninger. Den første vegoverbygningen var kalkulert ut fra den norske empiriske modellen, den andre var en underdimensjonert vegoverbygning og den siste var en overdimensjonert vegoverbygning. I tillegg til dette ble det i den andre delen av testen gjennomført en sammenligning mellom de utregnende optimerte vegoverbygningene. Den siste delen av testen bestod av en sammenligning av optimale vegoverbygninger uten frostsikringslag. Denne sammenligningen så på utmattingene som oppstod i vegoverbygningen, og ga en indikasjon på styrken til de ulike vegoverbygningene. I den siste testen ble det gjort en vurdering av brukergrensesnittet til de ulike programmene. Her ble det sett på positive og negative sider, i tillegg til hvilke parametere som utgjorde beregningsgrunnlaget og hvilke som ble kalkulert. Videre ble det

sett på hvilke ekstra funksjoner som er inkludert. Beregningene ble utført i programmene og alt arbeidet ble deretter videreført til Excel for videre vurdering.

Ut fra resultatene som ble funnet kunne man se at både MMOPP og ADtoPave ikke hadde gode grunnlag med tanke på tele og frost. I tillegg er MMOPP (analytisk-empirisk metode) noe simpelt og bruker mye asfalt i sine vegoverbygninger. ADtoPave har brukerspråk på tysk og er for komplekst i denne sammenheng. Derfor er det konkludert med at PMS Objekt passer best til norske forhold. Dette programmet passer med tanke på tele, brukervennlighet og kompleksitet.

Summary

This thesis consists of a process report, a scientific article, and appendices.

The Norwegian design model is based on an empirical method. This system uses the index method, which is based on the tables and formulas in “Handbook N200 Road Construction”. Parameters and criteria are determined on a general basis, and vary little looking at local conditions. However, a mechanistic-empirical design method exists which takes in multiple- and local parameters in to account. The goal for this thesis is to look at different mechanistic-empirical software tools for design of road pavements to see if these can be suited for Norwegian conditions. In addition, the usability is evaluated.

The programs used in this thesis are PMS Object from Sweden, MMOPP from Denmark and ADtoPave from Germany. MMOPP and PMS Object are already in use, while ADtoPave is newly developed and will be implemented in the German system when it is completed. All programs have different functions and layouts, providing a great variety for the tests done in this thesis.

The methodology in this thesis consists of a literature study and case study. The literature study has provided information which was necessary for the tests done in the case study. Three different tests were conducted in the case study. The first test was looking at the calculation of horizontal strains in the bottom of the asphalt layers in both MMOPP and PMS Object. These horizontal strains were compared and gave an indication of the differences between these two programs. The second test consisted of three parts. The first part was an evaluation on how the programs reacted to three already set pavements. The first pavement was calculated using the Norwegian empirical model, the other was an under-designed pavement and the last was an over-designed pavement. In part two, a comparison between optimum pavements was conducted. By using the same input parameters, the programs calculated their own optimum pavements that were compared. The third part was a comparison of optimum pavements without a frost protection layer. These pavements should be within the criteria for the program, and were carried out because of lack in frost calculations in some of the programs. The last test was an assessment of the usability of the programs and the empirical method. This test looked at positive and negative aspects of the programs. Furthermore, the last test looked at

the input, output and the programs additional functions. An evaluation was prepared in an Excel-file and discussed in this thesis.

Based on the results obtained in the tests both MMOPP and ADtoPave did not handle the frost well. In addition, MMOPP (analytical-empirical method) is too simple and uses too much asphalt in its pavements. ADtoPave uses German as the user-language in the program and it is too complex in this context. Therefore, in conclusion PMS Object is the most suited program for Norwegian conditions in terms of frost, usability and complexity.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
I Prosessrapport	1
1 Introduksjon	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Målsetting og forskningsspørsmål	4
1.3 Begrensninger	4
2 Metode	7
2.1 Metode	7
2.1.1 Litteraturstudie	8
2.1.2 Casestudie	10
2.2 Arbeid som ikke ble brukt videre	11
3 Teori	13
3.1 Empirisk dimensjonering	13
3.1.1 AASHTO Road Test	13
3.1.2 Empirisk dimensjonering ved bruk av “Håndbok N200 Vegbygging” i Norge	14
3.2 Mekanistisk-empirisk dimensjonering	16
3.3 Skademekanismer	19
3.4 Dimensjoneringsprogrammene	24
3.4.1 ADtoPave	25
3.4.2 PMS Objekt	32

3.4.3	MMOPP	39
4	Utførelse, resultater og diskusjon	45
4.1	Utførelse	45
4.1.1	Utførelse av sammenligningen av MMOPP og PMS Objekt	45
4.1.2	Utførelse av sammenligning av vegoverbygninger	47
4.1.3	Utførelse av analyse av brukervennlighet	51
4.2	Resultat	51
4.2.1	Resultat av sammenligning av MMOPP og PMS Objekt	51
4.2.2	Resultat av sammenligning av vegoverbygninger	53
4.2.3	Resultater fra analyse av brukervennlighet	61
4.3	Diskusjon	64
4.3.1	Sammenligning av MMOPP og PMS Objekt	64
4.3.2	Sammenligning av vegoverbygninger	65
4.3.3	Analyse av brukervennlighet	66
5	Konklusjon	71
6	Videre arbeid	73
	Referanser	74

II Vitenskapelig artikkel

III Vedlegg

Vedlegg 1 - Oppgavetekst

Vedlegg 2 - Empirisk beregnede vegoverbygninger

Vedlegg 3 - Resultater ADtoPave

Vedlegg 4 - Resultater MMOPP

Vedlegg 5 - Resultater PMS Objekt

Vedlegg 6 - Tøyningsanalyse

Figurer

3.1	Indeksmetoden (Statens vegvesen, 2014b)	15
3.2	Oversikt over mekanistisk-empirisk dimensjonering (European Comission, 1999)	18
3.3	Dannelse av islinser (Hurtigarbeidende arbeidsgruppe frost og Aksnes, 2013) .	23
3.4	Aksellastklasser og deres frekvenser (Wellner, 2009)	26
3.5	Inndeling av klimasoner i Tyskland (Wellner, 2009)	27
3.6	Temperaturfordeling fra sone 1 i Tyskland (Wellner, 2009)	28
3.7	Temperaturgradient i vegoverbygning med asfaltdekke (Wellner, 2009)	28
3.8	Resultat i ADtoPave (Wellner, 2009)	31
3.9	Klimasoner i PMS Objekt (Andersson og Winnerholt, 2011a)	33
3.10	Trafikkberegning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)	35
3.11	Bæreevneberegning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)	37
3.12	Telehivberegning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)	38
3.13	Resultat av analytisk-empirisk dimensjonering i MMOPP (Vejregler, 2013a) .	42
3.14	Resultat av simulering i MMOPP (Vejregler, 2013a)	44
4.1	Fremgangsmåte for optimering av vegoverbygninger i PMS Objekt og ADtoPave	50
4.2	Utsnitt av normal-, under- og overdimensjonerte vegoverbygninger	54

Tabeller

3.1	Krav og toleranser for geometri(mm) og jevnhet, asfalt og betongdekke (Statens vegvesen, 2014b)	21
3.2	Oversikt over skademekanismer (Statens vegvesen, 1996/2014)	24
3.3	Trafikklasser (Vejregler, 2013a)	41
4.1	Horisontale tøyninger i underkant av asfaltlagene i PMS Objekt og MMOPP	52
4.2	Testing av horisontale tøyninger mot kriteriet i PMS Objekt	52
4.3	Testing av horisontale tøyninger mot kriteriet i MMOPP	52
4.4	Materialvalg i testene	53
4.5	Resultat MMOPP	56
4.6	Resultat PMS Objekt	57
4.7	Resultat ADtoPave	58
4.8	Sammenligning av de forskjellige dimensjoneringsprogrammene mot N200	59
4.9	Sammenligning av N200 og dimensjoneringsprogrammene uten frostsikringslag	60
4.10	Utregning av styrkeindeks for de ulike vegoverbygningene fra programmene og den empirisk beregnende	61
4.11	Brukergrensesnittet til programmene	62
4.12	Vurdering av brukergrensesnittet	63
4.13	Input og output i programmene brukt under testene	70

Nomenklatur

ADtoPave

γ	Sikkerhetsfaktor
ε^k	Opprinnelig elastisk strekk ved testing
a	Materialkarakteristikk satt fra utmatelssetesting
D	Utmatting
E_{v2}	Deformasjonsmodul under statisk last på overflaten av ubundne lag eller undergrunnen
F	Sikkerhetsfaktor for undergrunn og forsterkningslag
p	Trafikkøkning
P_i	Aksellast
p_i	Kontakttrykk
r	Kontakttrykkradius
SF	Shift-faktor fra laboratoriet til virkelige verden
$vorh.\sigma$	Eksisterende maksimal vertikal spenning på overflaten av ubundne lag eller undergrunnen
$vorh.N$	Reell lastforandring på grunn av akselpasseringer i dimensjoneringsperioden
$zul.\sigma$	Tillatt maksimal vertikal spenning på overflaten av ubundne lag eller undergrunnen
$zul.N$	Tillatt lastforandring på grunn av akselpasseringer i dimensjoneringsperioden

MMOPP

α	Årlig økning av Æ10-belastninger
σ_z	Kritisk/tillatt spenning øverst i de ubundne lagene
ÅDT	Årsdøgntrafikk
ÅDT _L	Årsdøgntrafikk for lange kjøretøy
ÅDT _T	Årsdøgntrafikk for tunge kjøretøy
Æ10	Dimensjoneringsbelastning: "Vejregelen" anvender en 10 tons aksel representert ved to tvillinghjul med en C-C astand mellom dekkene på 350mm, og den er kalt en Æ10-aksel (Vejregler, 2013a)
ε_h	Kritisk/tillatt tøyning nederst i asfaltlaget
A, B, C	Empiriske faktorer satt av laboratorieforsøk
E	E-modul
E/E_{ref}	Materialegenskaper (E-modul)
E_{min}	Laveste E-verdi i asfalten
E_{snit}	Gjennomsnittlig E-verdi i asfalten
$F_{\text{Æ10}}$	Korreksjonsfaktor som av kjøretøysart og vegtype (Se tabell i (Vejregler, 2013a)
F_{SS}	Korreksjonsfaktor som tar høyde for hjul/dekk (Se tabell i (Vejregler, 2013a)
K_F	Korreksjonsfaktor som tar høyde for lastebilenes dordeling over vegens tversnitt (Se tabell i Vejregler, 2013a)
K_K	Korreksjonsfaktor som tar høyde for kanalisering av trafikken i forbindelse med miljøprioriterende gjennomfart (Se tabell i Vejregler, 2013a)
K_R	Korreksjonsfaktor som tar høyde for spesielle forhold som ved svinger i en rundkjøring (Se tabell i Vejregler, 2013a)
L	Er antal lastebiler og busser (vekt over 3.5 tonn) per år i begge retninger (0.86 tar høyde for forskjellige fordeling av trafikk på forskjellige tider av døgnet)
N	Antall dimensjoneringsbelastninger

n	Dimensjoneringsperioden [år]
$N_{\text{Æ}10}$	Antall dimensjoneringsbelastninger med Æ10
P	Vekstfaktor
p	Kritiske påkjenninger i vegoverbygningen
PMS Objekt	
ÅDT_k	ÅDT kjørefelt
$\varepsilon_{bb,i}$	Største horisontaltøyning i bitumenbundet lag for klimaperioden i ved belastning med en standard aksel på vegoverbygningen
$\varepsilon_{te,i}$	Største vertikale tøyning i undergrunnen for klimaperioden i ved belastning med en standard aksel på vegoverbygningen
A	Andel tunge kjøretøy [%]
B	Antall ekvivalente standardaksler
B_{just}	Justert antall ekvivalent standardaksel per tungt kjøretøy
f_a	Justeringsfaktorer for kjørefeltsbredde (Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_b	Justeringsfaktorer for vegtype (Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_c	Justeringsfaktorer for referansehastighet (Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_d	Korrigeringsfaktor med som ser på fukt og vann i undergrunn, finnes i kapittel 4.5.7.1 i TRVK Väg(Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_s	Korrigeringsfaktor med som ser på eksisterende sprekker eller krakkelering, finnes i kapittel 4.5.7.1 i TRVK Väg(Andersson og Winnerholt, 2011a)
j	1, 2, 3 ... n
k	Antatt trafikkøkning per år i % for tunge kjøretøy
m	Antall klimaperioder
M_r	Stivhetsmodul
n	Dimensjoneringsperiode i år

TABELLER

n_i	Antall døgn under klimaperiode i
$N_{bb,i}$	Tillatt antall standard aksler for bitumenbundne bærelag under klimaperiode i
N_{ekv}	Antall ekvivalente standardaksler for valgt dimensjoneringsperiode
$N_{te,i}$	Tillatt antall standard aksler for undergrunnen under klimaperiode i
$N_{till,bb}$	Tillatt antall standard aksler når man tar hensyn til bitumenbundne lag
$N_{till,te}$	Tillatt antall standard aksler når man tar hensyn til undergrunnen
T_i	Temperatur [$^{\circ}$ C] i bitumenbundne lag for klimaperiode i
$VViS$	Vägverkets VäderinformationsSystem

Empirisk dimensjonering

ΔPSI	Endring i vegoverbygningens nytte
\hat{ADT}_T	Gjennomsnittlig antall tunge kjøretøy per døgn i vegens åpningsår
a_i	Lastfordelingskoeffisienter for hvert lag
a_n	Lagkoeffisient (AASHTO Road Test)
BI	Bærelagsindeks
C	Gjennomsnittlig antall aksler per tungt kjøretøy (settes lik 2.4)
D_n	Lagtykkelse
E	Gjennomsnittlig ekvivalensfaktor for akslene på tunge kjøretøy
E_i	E-modul for hvert lag
f	Fordelingsfaktor
h_i	Lagtykkelser i vegoverbygningen
I	Indeksverdier
m_n	Dreneringskoeffisient
M_R	Elastisitetsmodulen til undergrunnen

N	Antall ekvivalente 10-tonns aksellaster per felt i dimensjoneringsperioden
p	Årlig trafikkvekst for tunge kjøretøy [%]
S_0	Standardfeil
SI	Styrkeindeks
SN	Strukturelt nummer
w_{18}	Antall ESAL som vil resultere i ΔPSI
Z_R	Standardavvik

Andre forkortelser og symboler

$E_{al,n}$	E-modul for hvert bitumenlag
$E_{al,tot}$	E-modul totalt for bitumenlagene
$ESAL$	Ekvivalent standard aksel
FEM	Finite elementmetode
IRI	International Roughness Index, jevnhet måles med IRI som enhet (Berntsen, 1997)
$t_{al,n}$	Tykkelse for asfaltlag n
$t_{al,total}$	Tykkelse totalt for bitumenlagene

Diskusjon

η	Porøsitet
λ_{fr}	Varmeledningsevne fryst
λ_{ufr}	Varmeledningsevne ufryst
ω	Vanninnhold
ρ	Tørrdensitet
σ_r	Vann metningsgrad

TABELLER

$\sigma_{z,n}$	Vertikal spenning i toppen av lag n (ubundne lag)
$\mathring{\text{ÅDT}}_k$	$\mathring{\text{ÅDT}}$ kjørefelt
$\mathring{\text{ÅDT}}_T$	$\mathring{\text{ÅDT}}$ tunge
ε	Horisontaltøyning i bunnen av bitumenlagene
$\varepsilon_{bb,i}$	Største horisontaltøyning i bitumenbundet lag for klimaperioden i ved belastning med en standard aksel på vegoverbygningen
$\varepsilon_{enkeltlast}$	Horisontaltøyning i topp av undergrunn grunnet enkeltlast
$\varepsilon_{enkeltlast}$	horisontaltøyning i topp av undergrunn grunnet enkeltlast for klimaperioden i
$\varepsilon_{te,i}$	Største vertikale tøyning i undergrunnen for klimaperioden i ved belastning med en standard aksel på vegoverbygningen
A_n	Aksellastfordeling
B	Antall ekvivalente standardaksler
D_{prog}	Utmattingsprognose
D_t	Utmatting etter dimensjoneringsperiode
E	E-modul
$E_{n,i}$	E-modul for lag n og klimaperiode i
E_{v2}	Deformasjonsmodul under statisk last på overflaten av ubundne lag eller undergrunnen
F	Sikkerhetsfaktor for undergrunn og forsterkningslag
f	Frekvens
f_1	Faktor for telling av trafikk i en eller begge retninger
f_2	Faktor for feltbredde
f_3	Faktor for gradient på vertikalkurvatur på vegen
f_A	Faktor for snittaksler over 3,5t

f_a	Justeringsfaktorer for kjørefeltsbredde (Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_b	Justeringsfaktorer for vegtype (Andersson og Winnerholt, 2011a)
f_c	Justeringsfaktorer for referansehastighet (Andersson og Winnerholt, 2011a)
h_{tot}	Total tykkelse av vegoverbygningen
K	Kostnadsestimat
n	Dimensjoneringsperiode
n_n	Levetid for lag n
$N_{\text{Æ}10}/\text{år}$	Antall dimensjoneringsbelastninger med Æ10 per år
N_{ekv}	Antall ekvivalente standardaksler for valgt dimensjoneringsperiode
N_{maks}	Maksimum antall akseloverfarer
$N_{till,bb}$	Tillatt antall standard aksler når man tar hensyn til bitumenbundne lag
$N_{till,te}$	Tillatt antall standard aksler når man tar hensyn til undergrunnen
p	Årlig trafikkvekst for tunge kjøretøy [%]
p_z	Faktor for årlig trafikkvekst for tunge kjøretøy [%]
r	Kontakttrykkradius
S_t	Kontakt mellom materialene i vegoverbygningen [bitumenbundet = 100 %, ubundet = 0 %]
SF	Shift-faktor fra laboratoriet til virkelige verden
T	Temperatur
T_n	Temperaturfordeling
v	fart
v_{maks}	Maksimums fart
v_{min}	Minimums fart

Oversettelse

Her er en oversettelse av ord og uttrykk på tysk som er brukt i denne oppgaven

Tysk

Asphaltbinderschicht (ABS)
Asphaltpaket
Achslastklassen
Achsübergänge
Asphaltdeckschicht (ADS)
Anzahl
Asphalttragschicht (ATS)
Aufführen
Befestigungsaufbau
Befestigungsschichten
Belastungsparameter
Berechnungseinstellungen
Berechnungsoptionen
Boden
Ermüdungsstatus (Erm.)
Frostsicheren
Frostschutzschicht (FSS)
Geschätzte
Häufigkeitsverteilung
Jahre
Kosten
Mindestdicke
Nachweispunkte
Nutzungsdauer (ND)
Nutzungszeitraum
Oberbau

Norsk

Asfalt bindlag
Asfaltlagene (pakken)
Aksellastklasser
Akselovergang
Asfalt dekke
Antall
Asfalt bærelag
Listen
Vegoverbygningens struktur
Vegoverbygningslag
Belastningsparametre
Beregningsinnstillinger
Beregningsalternativer
Undergrunn
Utmattelesstatus
Frostsikkert
Frostsikrings lag (FSS)
Estimert
Frekvensfordeling
År
Kostnader
Minimumstykkelse
Bevispunkter
Levetid
Dimensjoneringsperiode
Overbygning

TABELLER

Oberflächentemperaturen	Overflatetemperatur
Prognose	Prognose
Querdehnzahl	Poissons tall
Radkontaktspannung	Hjulets kontakttrykk
Steifigkeiten	Stivheter
Temperaturverlauf (Temp.)	Temperaturfordeling
Tiefe	Dybde
Tragschichten ohne Bindemittel (TOB)	Bære-/forsterkningslag uten bindemiddel
Verkehrsbelastung	Trafikkbelastning
Verteilung	Fordeling
Zulässige	Tillatte

Del I
Prosessrapport

Kapittel 1

Introduksjon

Dette kapittelet vil ta for seg bakgrunn, målsetting, forskningsspørsmål og begrensninger av masteroppgaven. Videre vil oppgaven ta for seg metodebruk, for deretter å gå dypere inn i litteratur og teori. Til slutt blir det gitt hvordan testene har blitt utført, resultatet med diskusjon og konklusjon. Prosessrapporten vil avslutningsvis ta opp hvilke arbeid som kan gjøres videre innen dette tema.

1.1 Bakgrunn

I dag bruker man “Håndbok N200 Vegbygging” for dimensjonering av vegoverbygninger i Norge. Denne baserer seg på empirisk metode, hvor parametere og kriterier settes ut fra tabeller i håndboken. Vegprosjektene blir dimensjonert på generell basis med lite tilnærming til lokale forhold. Dette kan føre til over- og underdimensjonering, noe som igjen fører til økte kostnader på vegprosjektene. Slike problemer kunne vært løst ved bruk av andre dimensjoneringsmetoder som tar mer hensyn til lokale forhold. I land som Sverige, Danmark og Tyskland er det tatt i bruk dimensjoneringsprogrammer som bruker mekanistisk-empirisk dimensjonering. Den mekanistisk-empiriske dimensjoneringen tar inn flere og mer lokale parametere. Programmene beregner og analyserer disse verdiene og kalibrerer til slutt mot krav som er satt. Ved å implementere slike dimensjoneringsprogrammer kan man få vegprosjekt tilpasset til de lokale forhold, som igjen gir bedre løsninger og bedre lønnsomhet. Denne masteroppgaven skal se på dimensjoneringsprogrammene fra Sverige, Danmark og Tyskland. Programmene skal testes og sammenlignes opp mot det empiriske systemet brukt i Norge, og om de fungerer for norske forhold. Programmene som skal testes ut er PMS Objekt, MMOPP og ADtoPave. Det er utført et forstudie til denne oppgaven høst 2015. Dette er et litteraturstudie med navn “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger”. Teoridelen i denne masteroppgaven baserer seg på litteratur hentet fra denne oppgaven, og det er derfor mye som er gjengitt. Likevel vil

man i tillegg finne mer utdypet og supplerende litteratur under noen av temaene.

1.2 Målsetting og forskningsspørsmål

Målet med denne oppgaven er å gi et innblikk i forskjellige typer dimensjoneringsprogrammer. Sammenligningene som er gjennomført skal gi kunnskap om programmene og vise forskjellene fra program til program. Det vil i tillegg være et mål å se på brukervennligheten til programmene. Dette for å få en indikasjon på hvor lett programmet er å implementere i det norske systemet. Til slutt vil det bli gjort en evaluering om programmene kan egne seg for norske forhold. Forskningsspørsmålene er tilnærmet de samme som ble satt i prosjektoppgaven med unntak av noen justeringer.

1. I hvilken grad passer ADtoPave, MMOPP og/eller PMS Objekt til norske forhold, og hvilke justeringer bør gjøres?
2. Hvilke resultater får man ved bruk av et casestudie, og hvordan kan disse brukes for å svare på det første forskningsspørsmålet?
3. Hvilke av programmene har det beste brukergrensesnittet?

Det første spørsmålet ønsker å se på sammenligning av programmene opp mot det norske empiriske systemet ved bruk av samme inngangsdata. Dette dras videre inn i spørsmål to som undersøker hvordan resultater kan anvendes for å besvare foregående forskningsspørsmål. Det siste spørsmålet vil dra sammen svarene fra de andre forskningsspørsmålene og se på helheten. Det vil gå inn på hvordan det var å lære seg programmene, og gi en kvalitativ vurdering av de forskjellige programmene.

1.3 Begrensninger

I denne oppgaven er det satt en del begrensninger for å få gjennomført de forskjellige analysene og sammenligningene. Ved oppstart av oppgaven ble følgende begrensninger satt:

- Se kun på nye vegkonstruksjoner
- Se kun på fleksible vegoverbygninger
- Data brukt er fra E6, Skedsmo/Berger/Gardermoen

Etter hvert som oppgaven tok form måtte andre begrensninger også settes. Det var store forskjeller i resultatene fra programmene, noe som begrenset sammenligningsmulighetene. For å få mest mulig sammenlignbare verdier ble det brukt analytisk-empirisk dimensjonering i MMOPP. I tillegg ble det kun gjennomført direkte sammenligning mellom MMOPP og PMS Objekt, siden disse programmene hadde horisontale tøyninger under asfaltlagene som resultat. Det ble i tillegg tatt en avgjørelse om å bruke innlagte materialdata i sammenligningen av vegoverbygninger. Dette fordi det i MMOPP ikke er mulig å legge inn egendefinerte data, og det ikke var mulig å finne komplekse nok data til å passe inn i ADtoPave.

Kapittel 2

Metode

Dette kapitlet vil gå inn på hvilke metoder som er brukt. Metodekapitlet vil først ta for seg teorien om metodebruk for deretter å gå dypere inn i litteraturstudiet og casestudiet som er gjennomført i denne oppgaven.

2.1 Metode

I denne oppgaven ble det brukt øvingsoppgaver og fiktive data når forfatter skulle få en innføring i de forskjellige dimensjoneringsprogrammene. I testene og i analysene ble det brukt datamateriale fra E6 Berger/Skedsmo/Gardermoen. Det er også tatt utgangspunkt i norske forhold, og det er så langt som mulig brukt håndbøker fra Statens vegvesen ved dimensjonering av de empirisk beregnede vegoverbygningene.

Det er i denne oppgaven brukt både kvalitative og kvantitative metoder i testing og analyse. Kvantitativ metode går ut på å ha målbare data. Det vil si at man får ut data i målbare enheter som man kan bruke videre til utregninger og kalkulasjoner (Dalland, 2012). I denne oppgaven er det brukt kvantitativ metode ved sammenligning av tøyninger, ettersom man her får ut tall man kan direkte sammenligne. Den kvalitative metoden tar for seg meninger og informasjon man ikke kan tallfeste. Dette er en metode hvor man samler inn variert informasjon for å få en helhetlig forståelse av tema man undersøker (Olsson, 2014). Denne metoden er brukt til å vurdere brukergrensesnittet av programmene. Den siste metoden brukt i denne masteroppgaven er en “miks av kvalitativ og kvantitativ metode”. Dette gjør at man får en større bredde i dataene ved å kunne forklare de kvantitative dataene ved hjelp av kvalitative undersøkelser (Creswell, 2014). Denne metoden ble gjennomført ved hjelp av triangulering. Triangulering brukes for å svare på forskningsspørsmål med flere metoder, og for å få et bedre og bredere overblikk over hele tema og dets resultater. Ved bruk av flere innfallsvinkler, både kvantitative og kvalitative, får man et større perspektiv, en bedre

relevans og pålitelighet av helhetsbilde (Fellows og Liu, 2008). Denne metoden ble brukt ved sammenligning av vegoverbygninger, og består av både kvalitativ og kvantitativ utprøving.

Det er viktig at informasjon man bruker er relevant for oppgaven, men samtidig at kildene man bruker skal være pålitelige. Når det er samlet inn informasjon er det å se på kvaliteten til kildene viktig (Everett og Furuseth, 2012). Det finnes ikke mye tilgjengelig litteratur for dimensjoneringsprogrammene som ble brukt. Derfor ble det gjort en grundig gjennomgang av det som ble funnet. I de tilfeller hvor det er oppstått usikkerhet er det brukt kommunikasjon med fagpersoner for å støtte opp om teorier og litteratur.

2.1.1 Litteraturstudie

Litteraturstudiet ble i hovedsak gjennomført i forstudiet av masteroppgaven som resulterte i prosjektoppgaven “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015). Videre i denne oppgaven er det gått grundig inn på forståelsen og bruken av dimensjoneringsprogrammene. Det er i denne oppgaven tatt med de mest relevante kapitlene fra prosjektoppgaven, men det bes likevel om å gå inn i prosjektoppgaven for en dypere forståelse.

For å komme frem til relevant og pålitelig litteratur i bøker, vitenskapelige artikler og tidligere masteroppgaver, har det blitt gjort grundige søk i søkemotorer som Google Scholar, Science Direct, Elsevier og Oria. Det ble i starten søkt mer generelt, men ved å øke mengden relevante ord ble antall dokumenter og bøker kuttet ned. En begrensning som ble satt var at dokumentene måtte være engelsk- eller skandinaviskspråklige. Både norske og engelske søkeord ble brukt for å få et bredere utvalg av litteratur, og for å få litteratur med god kvalitet. Metoden som ble brukt for å plukke ut hvilke litteratur som ble benyttet videre ble gjort ved gjennomlesning av sammendrag, abstract og titler. Det ble også gjort et søk etter nøkkelord i tekstene for å se om de var relevante med tanke på til tema. Ettersom det ikke var mye litteratur om PMS Objekt, MMOPP og AdtoPave ble det tilsendt litteratur, som brukerveiledninger og håndbøker, per e-post fra fagpersoner i Sverige, Danmark og Tyskland. Det ble i tillegg brukt mye tid på å laste ned, og sette seg inn i, programmene.

MMOPP

For MMOPP ble det gjort søk på Vejdirektoratets hjemmeside. Det var her programmet ble lastet ned. På denne hjemmesiden lå også håndbok og brukerveiledning som beskriver programmet og krav som skal følges. Videre ble det kontaktet fagperson via e-post for et bedre teorigrunnlag og for å bli mer kjent med programvaren.

PMS Objekt

For PMS Objekt ble det gjort søk på Trafikverket sine hjemmesider. Her lå dokumenter på krav og kriterier for bygging av veg i Sverige. I tillegg ble programmet lastet ned fra deres hjemmeside. Det ble opprettet e-post kontakt med fagpersoner for hjelp i opplæringsprosessen og for å utvikle kunnskapen om programmet. Det var ikke mulig å finne en brukerveiledning eller manual til programmet på nett, noe som ble ettersendt av Thomas Winnerholt.

ADtoPave

Dette programmet er så nytt at informasjon på engelsk ikke var mulig å finne på nett under litteratursøket. Derfor ble brukerveiledning sendt per e-post, først på tysk og senere på engelsk. Her ble det også opprettet mail-korrespondanse, og det ble gjennomført en studietur til Dresden for å få en bedre innføring i programvaren. Siden programmet bruker masterkurver som materialdata for asfaltlagene, ble det gjort litteratursøk for å forstå masterkurver og hvordan man beregner disse. Materialeegenskapene gjengitt i masterkurver blir lite brukt i Norge, og derfor var det dårlig med norsk datagrunnlag. Det ble derfor valgt å bruke tyske materialdata for forsøkene ettersom disse ga bedre resultater.

Informasjonsinnhenting fra eksperterter

Ettersom programmene hadde lite litteratur og informasjon tilgjengelig på nettet eller i bøker, ble det opprettet kontakt med eksperter fra de ulike landene. Det ble for PMS Objekt og MMOPP tatt kontakt per e-post, hvor det gjennom hele masterperioden ble holdt løpende kontakt med spørsmål-svar korrespondanse. Det ble også satt et møte mellom kontaktperson for PMS Objekt og forfatter av masteroppgaven for en nærmere gjennomgang av PMS Objekt. For ADtoPave ble det gjennomført en studietur til Dresden hvor eksperter på programmet hjalp til med opplæringsprosessen og teorigrunnlaget. Dette oppholdet varte en uke, hvor mye nyttig informasjon ble innhentet. Ettersom dette programmet er helt nytt, var det ingen engelsk informasjon på nett. Kontakten ble opprettholdt med Dresden under hele masterperioden. Informasjonen som ble gitt var vanskelig å validere opp mot noe annet, og dette må tas i betraktning når det gjelder pålitelighet. Informasjonen kan ikke vurderes som ren fakta, siden det ikke kan valideres, men på grunn av dårlig litteraturgrunnlag på enkelte felt var det likevel nødvendig.

Fagpersoner som ble ansett som eksperter på sitt fagområde er listet under:

- Thomas Winnerholt, Trafikverket (PMS Objekt)
- Anders Wengelin, KTH (PMS Objekt)

- Susanne Baltzer, Vejdirektoratet (MMOPP)
- Sabine Leischner, TU Dresden (ADtoPave)
- Uwe Reinhardt, TU Dresden (ADtoPave)
- Alexander Zeissler, TU Dresden (ADtoPave)

Datainnsamling

Det var noe forskjellige data som trengtes for de ulike programmene. Dette delkapittelet tar for seg hvordan alle disse dataene ble samlet inn.

Det ble hentet inn klimadata fra Gardermoen/Skedsmo fra eKlima sine hjemmesider, hvor det ble oppgitt gjennomsnittstemperaturer for hver dag i hele 2005 og hele 2014 (Meteorologisk institutt, 2015). Disse dataene ble bearbeidet i Excel til det formatet som trengtes i programmet som skulle brukes.

Aksellastfordeling på E6 ved Berger/Skedsmo ble lest ut fra en graf gitt i rapporten “Bedre utnyttelse av vegens bæreevne” (Senstad, 1994) fra Vegdirektoratet. Ikke alle programmene trengte aksellastfordeling, og da ble det hentet ut annen veginformasjon som antall felt, ÅDT, vegtype, ÅDT_{lang} og fart fra nasjonal vegdatabank (NVDB) (Statens vegvesen, 2015). Her gikk man inn i vegkartet, og kunne søke seg inn på Berger/Skedsmo/Gardermoen hvor man hentet ut relevante data. Data fra både NVDB og aksellastfordelingen ble lastet inn i Excel og bearbeidet til riktige formater der. I tillegg ble “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b) og “Håndbok N100 Veg-og gateutforming” (Statens vegvesen, 2014a) brukt for vegbredde, feltbredde, vegskulderbredde og standard vegoverbygning. Det ble brukt vegutforming lik H9-hovedveger fra N100 og vegoverbygninger bygd ut fra trafikkklasse F fra N200. Materialdataene brukt i forsøkene er de materialene som allerede ligger inne i programmene. Dette fordi det i noen av programmene ikke var mulig å legge inn egendefinerte materialdata eller at disse datasettene var mer komplekse enn det var mulig å få tak i. Dette gjelder spesielt for materialdata som skulle legges inn i ADtoPave hvor det var nødvendig med masterkurver eller materialdata hvor egenskaper som frekvens, temperatur og fasevinkel var representert.

2.1.2 Casestudie

Det ble i denne masteroppgaven utført et casestudie hvor man gikk mer i dybden på MMOPP, PMS Objekt, AdtoPave og det empiriske grunnlaget som er brukt i Norge. Dette for å få en bedre forståelse og innsikt i hvordan disse programmene fungerer (Olsson, 2014). Målet med dette casestudiet er å sammenligne programmene og se på brukergrensesnittet.

Den største delen av casestudiet går ut på å sammenligne vegoverbygninger. Det ble i første omgang brukt empiriske resultater fra den norske dimensjoneringsmodellen i programmene. Programmene viste om vegoverbygningene var innenfor krav eller ikke. Dette ble gjort for en vanlig-, en under- og en overdimensjonert vegoverbygning. Etter dette ble det utført en optimalisering av en vegoverbygning ved hjelp av hvert enkelt program. Dette for å se hvordan vegoverbygningen ville se ut fra programmets perspektiv med samme inngangsdata. De optimerte vegoverbygningene ble så sammenlignet og validert. Det ble i tillegg gjennomført en test for å se på utmatting av asfaltlagene, ettersom ADtoPave ikke ser på skademekanismer relatert til frost. En vegoverbygning beregnet ved hjelp av den empiriske indeksmetoden, kapittel 3.1, uten frostsikringslag ble utformet. I tillegg ble en optimal vegoverbygning kalkulert for hvert program. I denne delen av oppgaven ble det brukt en “miks av kvantitativ og kvalitativ metode” (Creswell, 2014). Flere av resultatene kom ut som tallverdier, for eksempel lagtykkelser, og disse kunne man direkte sammenligne med hverandre. Likevel ble det benyttet kvalitativ vurdering om programmene godkjente de empiriske vegoverbygningene. I tillegg ble andre innspill, som for eksempel testen for utmatting av asfaltlagene, evaluert.

Det ble i tillegg gjennomført en sammenligning av horisontale tøyninger i underkant av asfaltlagene i MMOPP og PMS Objekt. Siden begge disse programmene gir ut de kritiske horisontale tøyningene, ble det mulig å sammenligne verdiene direkte og finne den prosentvise forskjellen. Tøyningene som ble funnet ble sjekket opp mot krav satt i programmene. Dette viser da til en kvantitativ metode. Disse tallene ble videre evaluert og analysert.

I den siste delen ble brukergrensesnittet til programmene vurdert. Her ble det sett på hvilke inngangsdata man trengte, hvilke resultater man får, hvilke funksjoner man finner i de ulike programmene og hvordan brukervennligheten var. Denne delen gir en helhetlig oversikt og vurdering av hvert enkelt program, med deres svake og sterke sider. Metoden som ble brukt her er en ren kvalitativ, hvor man ser på informasjon gitt fra alle tre programmene. Det er forfatter, ved hjelp av supplerende litteratur og eksperthjelp, som har tatt en konklusjon av brukergrensesnittene til de forskjellige programmene.

2.2 Arbeid som ikke ble brukt videre

Det har gjennom hele utarbeidelsen av denne oppgaven kommet opp problemer som har medført at man ikke kunne gå videre med ønskede løsninger.

Først var målet å bruke like inngangsdata for å få en mer riktig sammenligningsprosess. Det ble etter nøye vurdering valgt å gå for en annen løsning siden det å hente ut materialdata for asfaltlagene i ADtoPave ble for komplekst.

Planen var å bruke dimensjonering ved simulering i MMOPP. Dette ble heller ikke gjennomført i testene, som ble utført i denne oppgaven, ettersom denne metoden ikke ga ut

sammenlignbare resultater. Derfor ble testene utført med analytisk-empirisk dimensjonering i stedet for.

Det har under hele oppgaven vært et mål om å utføre tester på fire programmer; MMOPP, PMS Objekt, ADtoPave og AASHTOWare Pavement ME Design. Problemet med AASHTO WARE Pavement ME Design var at det ikke var mulig å få programmet og lisensen til å fungere. Etter samtaler med IT avdelingen ved NTNU og eksperthjelp fra AASHTOWare i Texas kom man ikke frem til en løsning på problemene. Det ble forsøkt i flere runder å re-installere programmet på flere maskiner, men ingen fant årsaken til problemene. Dette medførte at programmet ikke kunne brukes til testene som ønsket.

Kapittel 3

Teori

Dette kapittelet vil ta for seg teori- og litteratur grunnlaget for forsøkene som er gjort og programmene som er brukt. Litteraturstudie til denne oppgaven ble gjort som et forstudie til masteroppgaven, og finnes som prosjektoppgave fra høst 2015 med navn “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015). Dette kapittelet vil være en videreføring av litteraturstudiet. De viktigste temaene og forklaringene er gjentatt i denne oppgaven, men med supplerende informasjon og litteratur. Først vil empirisk og mekanistisk-empirisk dimensjonering bli forklart og utdypet, og deretter vil det bli gitt en beskrivelse av forskjellige type skademekanismer og hvordan disse oppstår. Disse temaene er viktige å repetere ettersom de representerer store deler av oppgaven. Kapittelet om skademekanismer er utarbeidet på en ny måte i forhold til prosjektoppgaven, med fokus på skademekanismene som brukes i dimensjoneringsprogrammene. Til slutt vil dimensjoneringsprogrammene som er blitt testet i denne oppgaven bli gjennomgått.

3.1 Empirisk dimensjonering

Empiriske modeller er ofte basert på vegtester og erfaring, og avhenger av trafikk med hensyn til parametere som undergrunnens bæreevne (E-modul), vegens strukturelle styrke og styrkeindeks (SI) (Caliendo, 2012). Empirisk dimensjonering er opphavet til mange typer dimensjoneringsystemer, og det er det som er benyttet i Norge i dag.

3.1.1 AASHTO Road Test

Den første formelen for empirisk dimensjonering av vegoverbygninger ble utviklet i USA. Denne metoden er noe mer komplisert enn den norske versjonen, men er grunnlag for mange av de empiriske metodene som brukes i dag. Dimensjoneringsformelen er basert på AASHTO

Road Test som ble gjennomført fra 1958 til 1959. Testen ble gjort på fire lukkede baner, med en kjørebane i hver retning (i tillegg ble det laget to mindre baner for å se på spesialtilfeller) (Papagiannakis og Masad, 2008). Testbanen ble delt inn i deler med forskjellige materialer, overbygninger og dekker. Lastebilen satt inn i kjørekonfigurasjonen hadde en gitt tyngde og ble brukt i åtte timer per dag. Disse kjørsyklusene ble periodisk observert, og det ble tatt tester av vegens jevnhet og dens utmatting. Banen ble nedbrutt og ødelagt i løpet av to år. Selv om det var en del begrensninger, er dette den første databasen med informasjon angående levetid for vegoverbygninger. Ut fra parametere som ble innsamlet ble det, i samarbeid med American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), utviklet en empirisk dimensjoneringsformel for vegoverbygninger. Denne formelen er fortsatt i bruk flere steder (Papagiannakis og Masad, 2008). Ligning 3.1 viser dimensjoneringsformelen som ble utviklet av AASHTO, og den løses med hensyn på strukturelt nummer, SN (Structural Number) (Papagiannakis og Masad, 2008).

$$\log(w_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{(4.2-1.5)}}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (3.1)$$

Videre brukes formelen for SN for å finne lagtykkelsene i vegoverbygningen, og denne er gitt i ligning 3.2 (Papagiannakis og Masad, 2008).

$$SN = aD_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \quad (3.2)$$

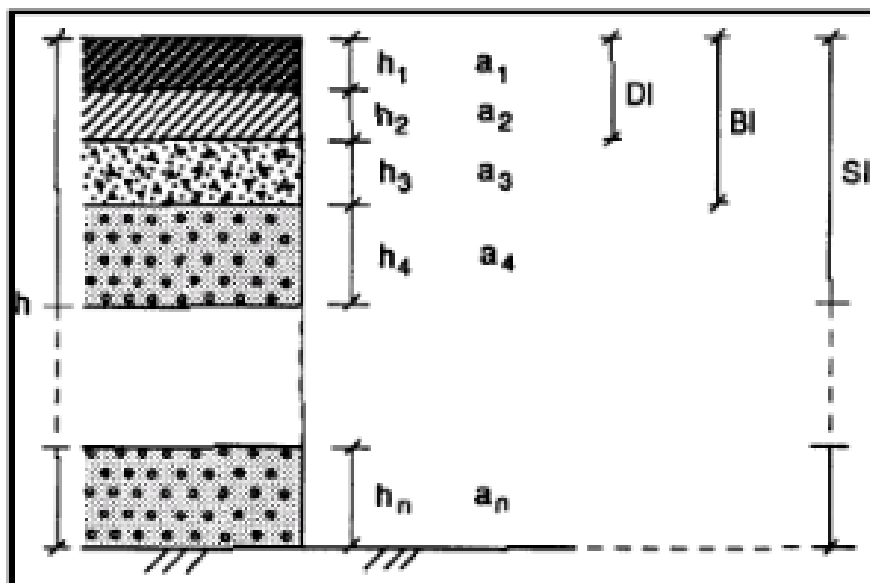
3.1.2 Empirisk dimensjonering ved bruk av “Håndbok N200 Vegbygging” i Norge

Empirisk dimensjonering er metoden som blir brukt i Norge for å dimensjonere vegoverbygningen. Metoden er kalt indeksmetoden og den er sammensatt av enkle statistiske parametere med hensyn på bæreevnen i vegoverbygningen (Statens vegvesen, 2014b). Denne dimensjoneringsmetoden bruker et fast uttrykk for trafikkbelastning, hvor man regner ut summen av ekvivalente 10-tonns aksler per felt som er gitt i ligning 3.3 (Statens vegvesen, 2014b). Ut fra summen av ekvivalente 10t aksler kan man finne trafikkgruppen. Trafikkgruppene er gitt fra A-F i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b), og indikerer om det er en høytrafikkert veg eller en lavtrafikkert veg. Det er ut fra disse trafikkgruppene man velger lagtykkelser for vegoverbygningen man ønsker å dimensjonere. Tabellene med disse verdiene er gitt i tabeller i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b).

$$N = f \times \text{ÅDT}_T \times 365 \times \frac{1.0 + (0.01 \times p)}{0.01 \times p} \times C \times E \quad (3.3)$$

For å forklare hvordan lastene forplanter seg nedover i vegoverbygningen blir det brukt lastfordelingskoeffisienter for hvert lag, gitt som a_i . Lastfordelingskoeffisienten er en stivhetsparameter, og gir en indikasjon på hvor mye last hvert lag tåler. Denne regnes ut i forhold til referansemateriale som i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b) er satt som forsterkningsgrus, hvor $a = 1,0$ og E-modul = 111MPa. Lastfordelingskoeffisienten settes ut fra materialets relative evne til å fordele lasten i vegoverbygningen (Statens vegvesen, 2014b). Uttrykket for lastfordelingskoeffisienten for asfaltmaterialer er gitt i ligning 3.4. Det finnes forskjellige ligninger for lastfordelingskoeffisienter for andre materialer, og koeffisientene finnes i en tabell gitt i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b).

$$a_i = 0.21 \times \sqrt[3]{E_i} \quad (3.4)$$



Figur 3.1: Indeksmetoden (Statens vegvesen, 2014b)

Indeksmetoden er en måte å finne lastfordelingen nedover i en vegoverbygning. Indeksverdiene regnes ut som en sum av lagets tykkelse multiplisert med lagets lastfordelingskoeffisient. Variablene og metoden er vist i figur 3.1. Denne indeksen gir en indikasjon på styrken til laget. Man har, som vist i figur 3.1, flere typer indeksverdier. En av disse er bærelagsindeks (BI). Denne verdien beregner indeksverdier for hvert lag ned til det første laget som har $a_i < 1,25$. I tillegg har man styrkeindeksen (SI) som ser på styrken til hele vegoverbygningen helt ned til undergrunnen. Denne indeksen er vist i ligning 3.5 (Statens vegvesen, 2014b). Det som

er viktig å legge merke til er at a_i , som er gitt i dette avsnittet og i ligning 3.5, ikke er de samme som de som brukes i den amerikanske formelen for strukturelt nummer. Dette er lastfordelingskoeffisienter, mens a i den amerikanske formelen er en lagkoeffisient.

$$SI = \sum_{i=1}^n a_i \times h_i \quad (3.5)$$

I tillegg til indeksmetoden tar man i Norge hensyn til frostmengden i det området man ønsker å dimensjonere vegen for. Dette for å få et frostsikringslag som er riktig i med tanke på området. Fra tabeller, gitt i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b), finner man frostdybden i vegoverbygningen. Og ut fra disse verdiene finner man hvor tykk den totale vegoverbygningen må være. Det tas også her hensyn til frostsikringslagets materiale. Frostmengder for hver kommune finnes i vedlegg 2 i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b), og har overskridelsesperioder på 2-, 5-, 10- og 100-år. Det er i denne tabellen også gitt korreksjonsfaktorer som angir maksimum og minimum frostmengde innad i kommunen.

For å kunne skille de forskjellige materialene i forhold til bæreevne og telefare er det i “Håndbok N200 Vegbygging” delt inn i bæreevnegrupper og telefarlighetsgrupper (Statens vegvesen, 2014b). Bæreevnegruppene er delt inn fra 1 til 7 hvor bæreevnegruppe 1 har den beste bæreevnen. Telefarlighetsgruppene er delt inn T1 til T4 hvor T4 er den mest telefarlige gruppen (Statens vegvesen, 2005). Ut fra dimensjoneringsstabeller i “Håndbok N200 Vegbygging” vil man da kunne finne ønskede lagtykkelser i forhold til trafikkgrupper, bæreevnegruppe og telefarlighetsgruppe (Statens vegvesen, 2014b).

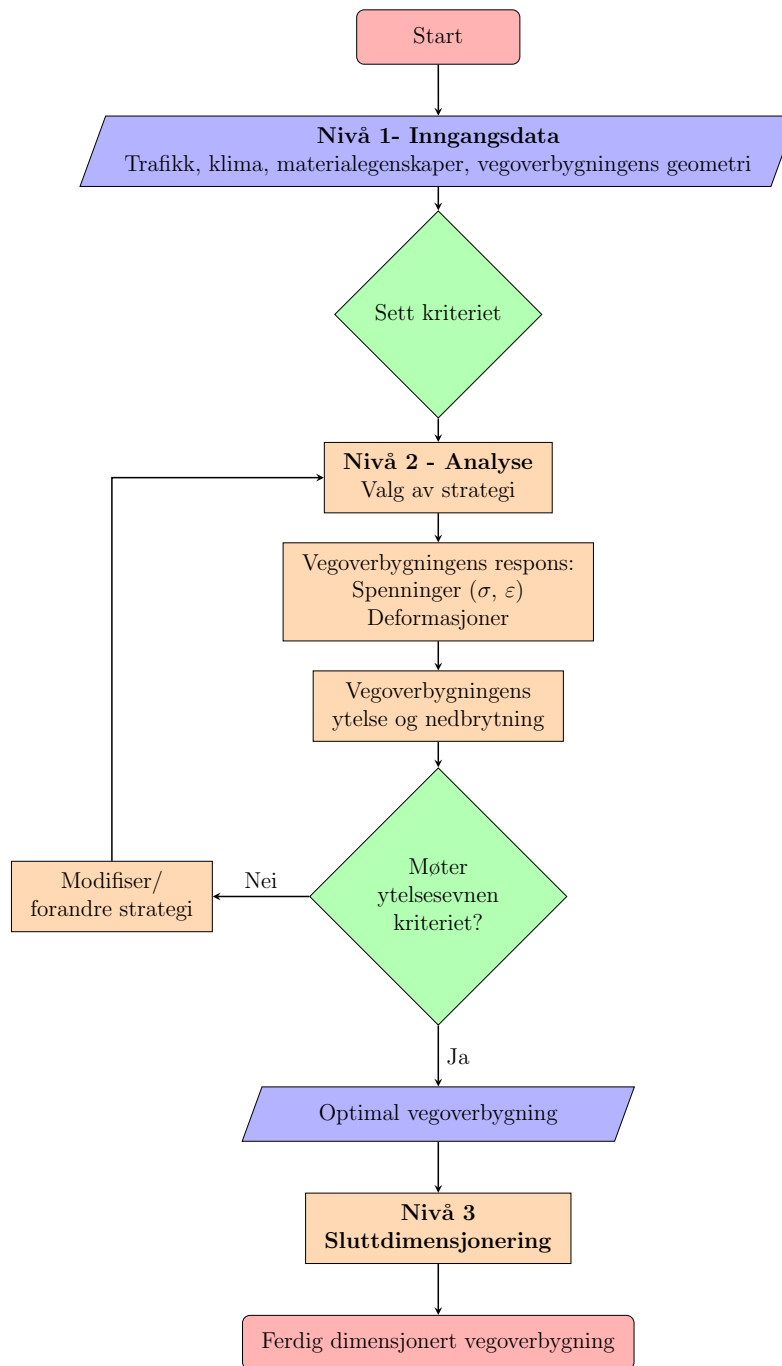
3.2 Mekanistisk-empirisk dimensjonering

I dette delkapitlet vil mekanistisk-empirisk dimensjonering bli gjennomgått. Denne dimensjoneringsmetoden vil ta for seg hovedprinsippene og oppbyggingen av dimensjoneringsmetoden. Dette er kun et utdrag, og ønsker man mer litteratur som går i dybden anbefales det å lese oppgaven “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015).

Oppbyggingen av Mekanistisk-empirisk dimensjonering er vist som et flytdiagram i figur 3.2 (NCHRP, 2004). Flytdiagrammet viser skritt for skritt hvordan denne dimensjoneringsmetoden går frem, og hvordan data blir analysert før det gis ut som endelig resultat. Mekanistisk-empirisk dimensjonering går et steg videre i dimensjoneringsprosessen, enn hva empirisk dimensjonering gjør. I denne dimensjoneringsmetoden tas det med analyse av vegoverbygningens respons, ytelse og nedbrytning. Ut fra dette får man spenninger, tøyninger og skademekanismer som kan oppstå i vegoverbygningen. Den mekanistisk-empiriske dimensjoneringsmetoden kombinerer da den empiriske og den mekanistiske dimensjoneringen ved å

beregne lagtykkelsene, spenninger, tøyninger og deformasjoner mekanistisk, og kalibrere dette empirisk opp mot satte krav (Statens vegvesen, 2014b).

I flytskjema i figur 3.2 vil man se at den mekanistisk-empiriske dimensjoneringen går trinnvis. I det første nivået blir det tatt inn forskjellige data fra kategoriene trafikk, klima, materialegenskaper og veggeometri. Dette tas videre inn i nivå to som analyserer verdiene for å finne vegoverbygningens respons, nedbrytning og ytelsesevne. Siste nivå, nivå 3, omhandler sluttdimensjonering, og går ut på å velge alternativ, strategi og lage en livsløpsanalyse for alternativet som ble valgt (NCHRP, 2004). Dette er et teoretisk oppsett på hvordan denne type dimensjonering fungerer, og kan variere fra dimensjoneringsprogram til dimensjoneringsprogram.



Figur 3.2: Oversikt over mekanistisk-empirisk dimensjonering (European Comission, 1999)

Om man ønsker en mer inngående forståelse av hvert trinn i denne prosessen kan man gå inn i “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015) og lese nivå for nivå. Dette kapitlet skal nå ha gitt en pekepinn på hva mekanistisk-empirisk dimensjonering er. PMS Objekt, MMOPP og ADtoPave har alle litt forskjellig oppbygging, men grunnprinsippene vil være de samme som nevnt over. Det vil bli gått mer i dybden på de forskjellige programmene i kapittel 3.4.1, 3.4.2 og 3.4.3

3.3 Skademekanismer

Denne delen vil gi beskrivelser av forskjellige typer skademekanismer, og gå mer inn på de skademekanismene som er brukt i de ulike dimensjoneringsprogrammene. Dette kapitlet er også et utdrag fra “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015), med noen forandringer og tilleggsinformasjon. Ønsker man å gå mer i dybden vises det til denne prosjektoppgaven i tillegg til referansene som er oppgitt.

Skademekanismene som blir presentert er hentet fra “Håndbok V261 Skadekatalogen for bitumiøse vegdekker” (Statens vegvesen, 1996/2014) og “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b). Skader som oppstår i vegoverbygningen kan oppstå på grunn av forskjellige faktorer, og noen av skadeprosessene kan overlape hverandre. Vanlige skademekanismer som man finner i vegoverbygningen er ujevnheter, oppsprekking og hull i dekket. Grunnen til at skademekanismer bør tas på alvor er fordi de kan påvirke kjørekraft, fremkommelighet og trafikksikkerheten. Tabell 3.2 gir en oversikt over flere av skadetyper som kan oppstå i vegoverbygningen og viser årsaken til at de har oppstått. Denne tabellen er hentet direkte ut fra “Håndbok V261 Skadekatalogen for bitumiøse vegdekker” (Statens vegvesen, 1996/2014).

Videre i dette kapitlet er det gitt skademekanismer og forhold som finnes i dimensjoneringsprogrammene brukt i denne oppgaven. Definisjonene for flere av skademekanismene er hentet direkte fra “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b).

Jevnhet på langs

“Uttrykk for jevnhet i vegens lengderetning slik denne innvirker på kjørekraften i et standardisert kjøretøy (personbil) IRI uttrykkes normalt i mm/m” (Statens vegvesen, 2014b).

I Europeisk praksis blir det sett på som jevnhet, men i USA blir det sett på som ujevnheter, altså det motsatte. Uansett hvilke form man bruker av ordet er man ute etter det samme. Det ble opprinnelig utviklet for å finne kjørekraft for bilistene, men har i senere tid blitt brukt til å se på den strukturelle nedbrytning av vegen. Årsaker til ujevnheter er trafikk, klima (tele), vegens levetid og materialegenskaper (Lay, 2009). Krav til jevnhet blir uttrykt med IRI-verdier og rettholt-verdier. Målinger med rettholt har, i henhold til “Håndbok N200 Vegbygging”, mål å “unngå lokale ujevnheter ved dagskjøter, endeavslutninger, kummer

og sluk og andre stopp og uregelmessigheter i asfaltutleggingen” (Statens vegvesen, 2014b). Rettholt kommer i tillegg til kravene om IRI-verdier (Statens vegvesen, 2014b).

Kravene som er satt for jevnhet i Norge er gitt i tabell 3.1, og er hentet direkte fra “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b).

Tabell 3.1: Krav og toleranser for geometri(mm) og jevnhet, asfalt og betongdekke (Statens vegvesen, 2014b)

Toleranse	Hoved-og samleveger (H, S)	Andre veger (A, G/S)
	Enkeltverdi	Enkeltverdi
Bindlag og underkant betongdekke		
Høyde ⁽¹⁾	+ 15	+ 25
- maksimum	-15	-25
- minimum		
Jevnhet på tvers ⁽²⁾	8	10
- målt med 3 m rettholt, maksimum	4	6
Langsgående skjøter, maks ⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾		
Jevnhet på langs	6	8
- målt med 3 m rettholt, maksimum		
Slitelag		
Høyde ⁽¹⁾	+ 10	+ 20
- maksimum	-10	-20
- minimum		
Jevnhet på tvers ⁽²⁾	6	8
- målt med 3 m rettholt, maksimum	5	7
- målt med bilmontert laser, maks.	4	6
Langsgående skjøter, maks ⁽⁷⁾		
Jevnhet på langs ⁽²⁾	6	8
- målt med 3 m rettholt, maksimum	2,0	2,5
- IRIved ÅDT ≥ 3000 , maksimum ⁽³⁾ (mm/m)	2,5	3,0
- IRIved ÅDT < 3000 , maksimum ⁽³⁾ (mm/m)		
Tverrfall, avvik fra prosjektert ⁽⁴⁾	4	6
- maksimum(mm)		
Bredde ⁽⁵⁾	+ 100	+ 100
- maksimum	+0	+0
- minimum		
Lagtykkelse ⁽⁶⁾		
- asfalt	Min. 2 ganger øvre siktstørrelse.	
- betong	Min. prosjektert tykkelse minus 20 mm	
<p>(1) Gjelder enkeltpunkt. Gjelder for betongdekker generelt. For asfaltdekkerer krav tilhøydernormalt begrenset til steder hvor det er nødvendig pga. tilpasning til konstruksjoner o.l.</p> <p>(2) Jevnhetskravene skal også gjelde for skjøter.</p> <p>(3) Målt med bilmontertlaser, angis som 90%-verdi pr. kjørefelt med lengde 600-1600 meter</p> <p>(4) Målt manuelt over 2 m eller med bilmontert laser.</p> <p>(5) Horisontalt avvik fra de prosjekterte ytterbegrensningene.</p> <p>(6) Gjelder enkeltpunkt.</p> <p>(7) Målt med 1 m rettholt, evt 1 m vater</p> <p>(8) Gjelder dersom bindlag skal fungere som midlertidig slitelag</p>		

Sporutvikling/ jevnhet på tvers

Sporutvikling/ jevnhet på tvers er *“uttrykk for hvor mye en overflate avviker fra en plan flate. Måles vanligvis med rettholt. På ferdig dekkeoverflate brukes ofte måleutstyr basert på laser og ultralyd” (Statens vegvesen, 2014b).*

Man beregner ofte spordybden ut fra avstanden fra hjulsporryggen til bunnen av hjulsporet. Utstyr som laser og rettholt er vanlig ved måling av spordybde (Statens vegvesen, 2014b). Årsaken til spordannelse er ofte slitasje og nedbrytning av vegoverbygningen på grunn av trafikk og materialsvikt. Med slitasje på grunn av trafikk menes piggdekkslitasje og påkjenninger fra tunge kjøretøy. Problemer som oppstår når spordannelse er et faktum er vannplaning og nedsatt trafikksikkerhet (Lay, 2009). I tillegg kan vegen brytes ned fortere dersom skadene først har oppstått. Dette ved at vann trekker ned i vegoverbygningen, og gjør mer skade enn om det hadde blitt ledet unna. Vann kan komme ned gjennom sprekker i ujevnhetene (Statens vegvesen, 1996/2014).

Kravene som er satt for sporutvikling, jevnhet på tvers, i Norge er gitt i tabell 3.1.

Utmatting

“Utmatting kan defineres som nedbrytning eller sprekkdannelse på grunn av gjentatte belastninger” (Myre, 1996).

Det er en sammenheng mellom tøyningen som skjer i vegkroppen og antall laster som passerer over. Etter hvert som lastrepetisjonene øker, øker også tøyningens forløp og til slutt vil sprekkdannelse oppstå. Ved mer sprekkdannelse vil påkjenningene på vegen øke, som igjen resulterer i permanente deformasjoner (Myre, 1996). Faktorer som har påvirkning til utmatting av vegkonstruksjonen er trafikk, klima, vegens egenskaper og oppbygging.

Bæreevne

Bæreevne er “største aksellast en veg kan ta over en tidsperiode (dimensjoneringsperioden) uten at vegens tilstand, ved normalt vedlikehold, faller under en definert akseptabel grense. Dårlig bæreevne gir utslag i en dekkelevetid som er lavere enn normert dekkelevetid” (Statens vegvesen, 2014b).

Høyeste last som kan aksepteres med tanke på sprekkdannelse og deformasjoner (Andersson og Winnerholt, 2011a).

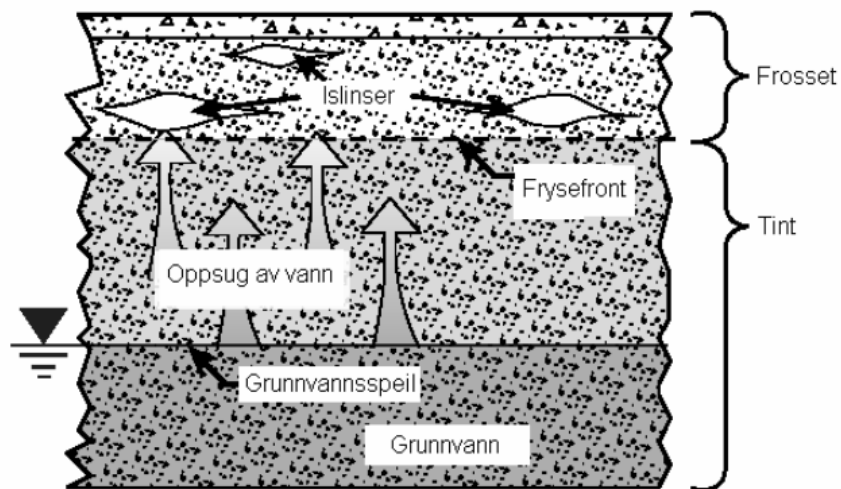
Dette er ikke en direkte skademekanisme, men det er definisjon som er nødvendig å vite til senere i masteroppgaven ettersom bæreevne et viktig begrep innen vegteknologi. Det som er gitt her er den norske bæreevnedefinisjonen gitt i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b). Ser man på definisjonen fra “TRVK Väg” fra Sverige er det mer

fokus på skademekanismene. Dette ser da mer på kriteriene for spenningene og tøyningene i vegoverbygningen, og når disse er nådd (Andersson og Winnerholt, 2011a).

Telehiv

Telehiv er “løft som følge av frost og påfølgende teledannelse i underliggende telefarlige jordarter” (Statens vegvesen, 2014b).

Telehiv kan oftest sees som deformasjoner og sprekkdannelse, og gir nedsatt kjørekraft og sikkerhet (Statens vegvesen, 1996/2014). Telehiv forekommer på grunn av at telefarlige materialer finnes i undergrunnen. Et materiale er telefarlig på grunnlag av dets vanninnhold, kapillaritet og dens permeabilitet. De mest telefarlige materialene har høyt vanninnhold, stor kapillaritet og høy permeabilitet (Andersson og Winnerholt, 2011c). I Norge finnes det fire telefarlighetsgrupper, disse er delt fra T1-T4. T3 og T4 er materialene som kan forårsake telehiv i vegoverbygningen (Statens vegvesen, 2014b). Telehiv oppstår når øvre sjikt i vegoverbygningen fryser, og gjør at det dannes undertrykk ved telefronten. Dette undertrykk fører til at vann kommer til for å utligne trykket. Vannet fryser ved telefronten og islinser blir dannet. Det er islinsene som presser opp overbygningen som resulterer i telehiv (Andersson og Winnerholt, 2011c). Figur 3.3 viser hvordan disse islinsene blir dannet.



Figur 3.3: Dannelse av islinser (Hurtigarbeidende arbeidsgruppe frost og Aksnes, 2013)

Tabell 3.2: Oversikt over skademekanismer (Statens vegvesen, 1996/2014)

Oversikt over skademekanismer i bitumiøse vegdekker		
Nr.	Skadetype	Skadeårsak
1.	Langsgående sprekker	Telehiv: - Variasjoner i undergrunnens telefarlighet - Ulik frostnedtrengning - Mangelfull drenering
		Breddeutvidelse
		Svake kanter/ smal skulder
		Dårlige dekkeskjøter
2.	Tversgående sprekker	Telehiv
		Svinn (Krymping): - Svinn, bærelag av Cg - Refleksjon fra underliggende sprekker - Lave temperaturer
3.	Krakelering	Ustabilt bærelag
		Bæreevnesvikt: - Dårlig materialkvalitet, for eksempel vannømfintlighet - For små lagtykkelser - Mangelfull drenering
		For tynt dekke
4.	Slaghull	Videreutvikling av krakelering
		Lokale feil i materialer eller utførelse
5.	Overflateskader	Dårlig utførelse
		Dårlig materialkvalitet
		Mekaniske skader
		Dårlig opptørkingsforhold
6.	Spor (i vegens lengdeprofil)	Aldring
		Telehiv
		Setninger
7.	Spor (i vegens tverrprofil)	Etterkomprimering
		Piggdekkslitasje
		Ustabilt dekke
		Ustabilt bærelag og/eller forsterkningslag
		Svak undergrunn

3.4 Dimensjoneringsprogrammene

I denne delen av oppgaven vil det bli gitt bakgrunnsinformasjon om de ulike dimensjoneringsprogrammene som er brukt samt informasjon om hvordan man bruker programmene. Det er også i denne delen hentet ut en del utdrag fra prosjektoppgaven “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015), men det er også lagt til mer bakgrunns-

litteratur og forklaring om bruk av programmene.

3.4.1 ADtoPave

ADtoPave (Analysing and Dimensioning Tool for Pavements) er et dimensjoneringsverktøy laget i Tyskland. Programmet er per dags dato brukt av forskere, men vil i fremtiden ta over for det empiriske systemet RStO som brukes i Tyskland i dag. ADtoPave er programmert og laget av Alexander Zeißer og Uwe Reinhardt ved det tekniske universitetet i Dresden, og det er finansiert av IDSV GmbH (Zeissler, 2016). Det er i samarbeid med disse og brukerveiledningen at denne teoridelen er blitt formulert. Det er til nå ikke mye annen litteratur for dette programmet, ettersom det er helt i oppstartsfasen.

ADtoPave er et linear-elastisk program som bruker multi-lags teori, MLT, i sine beregninger (Wellner, 2009). Beregningsprogrammet som benyttes til disse beregningene er BISAR (Zeissler, 2016). Etter hvert som programmet utvikles er det ønske om å implementere FEM, for å få mer presise utregninger og mulighet til å se på mer komplekse situasjoner. Mer komplekse situasjoner kan for eksempel være boogie- aksler og trippel- aksler (Reinhardt, 2016). I dag er hovedfokuset til programmet nye konstruksjoner, og det beregner utmattingsforløpet til vegen gjennom dens levetid (Reinhardt, 2016). Etter hvert som programmet utvikles vil målet være å få lagt inn beregninger av spor- og sprekkdannelse, dette for å få et bedre overblikk over livsforløpet til vegoverbygningen (Zeissler, 2016).

Inngangsparameterne i ADtoPave er trafikkdata, klimadata og materialdata. I tillegg må man legge inn dimensjoneringsperioden.

I programmet er trafikkdataene gitt som aksellastfordeling. Denne aksellastfordelingen er gitt i prosent antall aksler for hver type aksel. Tabell i figur 3.4 viser en fordeling gitt i “Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09” (Wellner, 2009). Disse aksellast fordelingene ligger inne i programmet, men det er i tillegg mulig å legge inn egendefinerte fordelinger. Dette ble gjort i testene i denne oppgaven, hvor aksellast data fra Berger ble brukt. ADtoPave bruker en lastmodell som baserer seg på uttrykket gitt i ligning 3.6. Radiusen, r , er satt lik 150mm, og ligger i programmet som en satt parameter. Lastene varierer for hver aksellastklasse som blir beregnet. For at MLT beregningene skal fungere er aksellasten forenklet slik at man kun ser på en single-aksel delt på to. Det vil si at om man har en 10t aksellast vil lasten på kontaktflaten være 5t. Ut fra disse variablene kan man regne ut kontaktrykket (p_i) (Reinhardt, 2016). Det er ikke mulig med dagens modell å se på andre type akselsammensetninger som tvillinghjul og trippelaksel.

$$P_i = p_i \times \pi r^2 \quad (3.6)$$

Designation	Axle load class (static axle load) [t]										
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	>20
BAB long-distance traffic*	2.8396	21.4670	26.4848	30.7195	11.7032	4.9098	1.6540	0.2087	0.0126	0.0007	0.0001
BAB combined traffic **	3.4940	24.9439	27.4935	26.3373	11.0538	4.6596	1.7180	0.2711	0.0257	0.0031	
BAB local traffic***	4.0101	36.7995	29.3512	17.1376	7.5290	3.8888	1.1408	0.1399	0.0031		

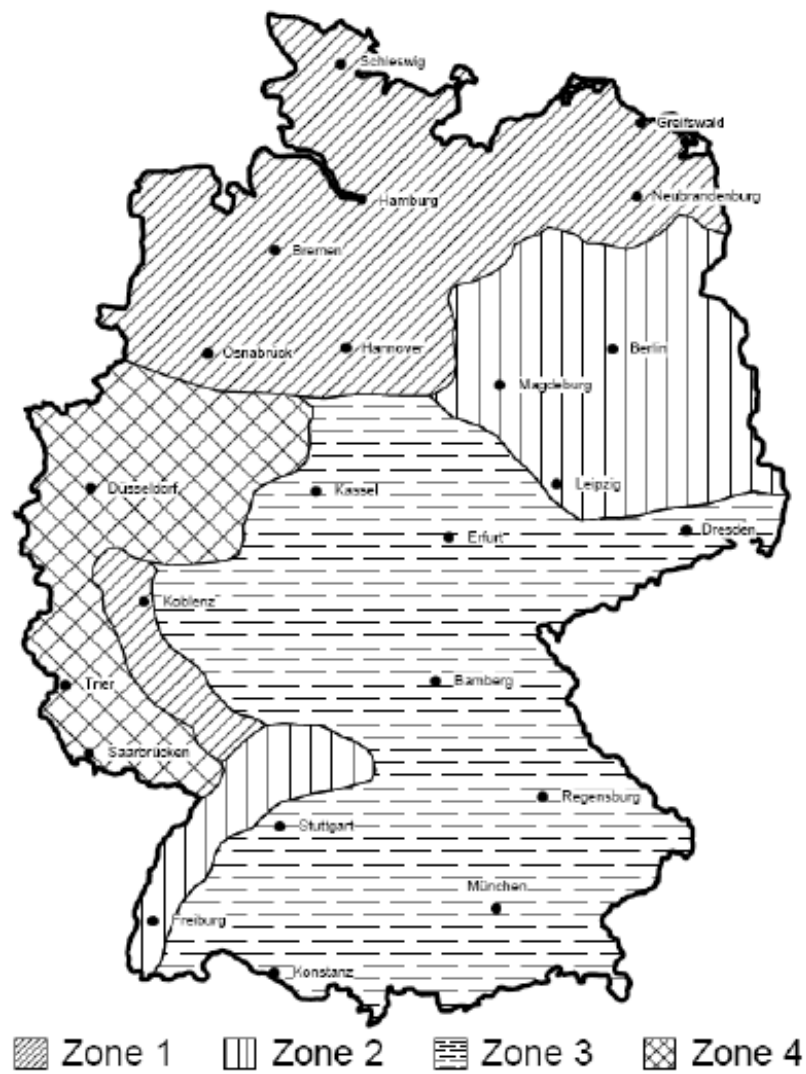
* Long-distance traffic corresponds to connection function levels 0 and I, "continental/large-scale" according to the Guidelines for the construction of state roads [Richtlinien zur Anlage von Landstraßen, RAL] or the Guidelines for the construction of roadways [Richtlinien zur Anlage von Autobahnen, RAA].

** Combined traffic corresponds to connection function level II "nationwide" according to the RAL/RAA

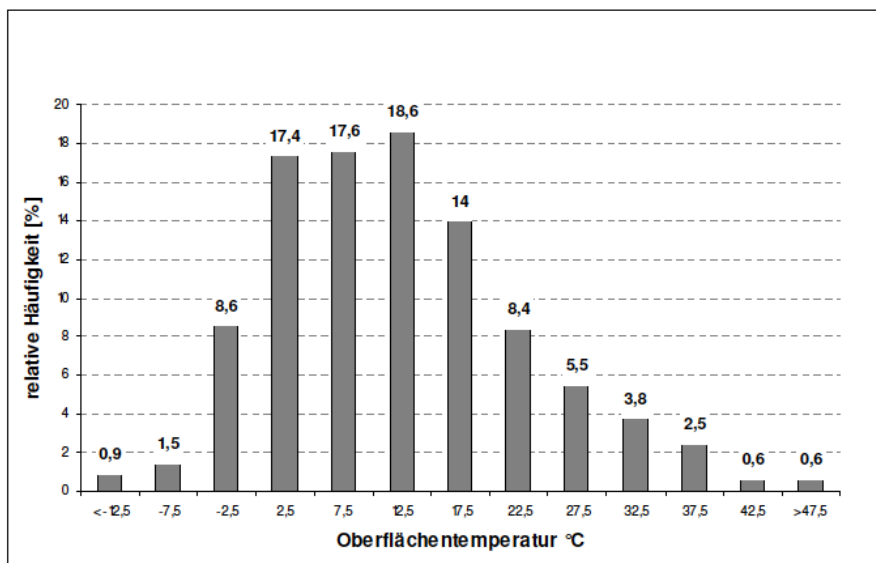
*** Local traffic corresponds to connection function level III "regional" according to the RAL/RAA

Figur 3.4: Aksellastklasser og deres frekvenser (Wellner, 2009)

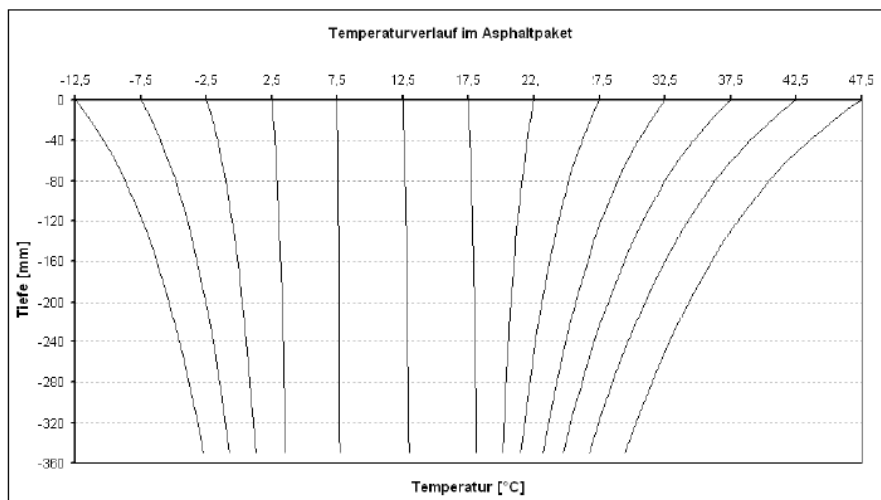
Tyskland har fire klimasoner som vist i figur 3.5, og denne figuren er hentet "Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09" (Wellner, 2009). Disse sonene har hver sin statistiske fordeling av overflate-temperaturen over asfalten. Temperaturfordelingen er fordelt i grupper med variasjon på 5 grader, de starter med gruppen -12,5 grader og øker deretter med 5 og 5 grader oppover. En av fordelingene, fra sone 1, er vist i figur 3.6. Det er denne temperaturfordelingen sammen med temperaturgradienten, som blir forklart senere i kapitlet, som er klimadataene for dette programmet. I ADtoPave ligger alle klimasonene inne i programmet, men det er i tillegg mulig å legge inn egendefinerte klimafordelinger. Dette er benyttet i forsøkene gjort i denne oppgaven ved å legge inn norske temperaturdata for Gardermoen/Skedsmo.



Figur 3.5: Inndeling av klimasoner i Tyskland (Wellner, 2009)



Figur 3.6: Temperaturfordeling fra sone 1 i Tyskland (Wellner, 2009)



Figur 3.7: Temperaturgradient i vegoverbygning med asfaltdekke (Wellner, 2009)

Materialeegenskapene blir gitt som masterkurver for asfaltlagene og E-modul verdier for de ubundne materialene i ADtoPave. Masterkurvene ser på sammenheng mellom frekvens, temperatur og E-modul, og sammen med fasevinkelen for materialet kan man da lage en S-graf kalt en masterkurve. Denne viser oppførselen til materialet ved forskjellige temperaturer

og frekvenser. Hvert materiale har hver sin masterkurve, og disse legges inn i programmet for videre analyse. Det ligger allerede kalibrerte materialdata i programmet, men man kan legge inn egendefinerte. For å finne de riktige parameterne for en masterkurve kan man bruke triaksial-test i laboratoriet (Wellner, 2009).

Beregningsmodellen i programmet deler asfaltlagene inn i delsjikt. Dette gjør at E-modulene kan justeres etter temperaturgradientene som brukes. Temperaturgradientene blir brukt for å sette E-modulene nedover i lagene. I tillegg blir de brukt for å skille ut om det er hopp i materialkombinasjonene mellom sjiktene (Wellner, 2009). Figur 3.7 viser denne temperaturgradienten ved forskjellige temperaturer og lagtykkelser. Denne gradienten er for asfaltlagene, mens for de ubundne materialene er E-modulen konstant. Før beregningen av utmatting blir de ubundne materialene testet og validert. Med beregnede vertikal spenningene i toppen av hvert ubundet lag kan man beregne maksimal antall akseloverfarer (Reinhardt, 2016). Formlene for beregning av vertikal spenning og antall akseloverfarer er gitt i formel 3.7 og 3.8 (Wellner, 2009). Om antallet akseloverfarer for de ubundne lagene er høyere enn det reelle antall akseloverfarer i dimensjoneringsperioden er laget validert. Dersom de ubundne lagene ikke er innenfor det gitte kriteriet, må lagene justeres før man kan gå videre. Under selve beregningen av utmattingsstatusen til vegoverbygningen blir kun stivheten til de ubundne materialene brukt (Reinhardt, 2016).

$$zul.\sigma = \frac{0,00875 \times E_{v2}}{(1 + 0,7 \times \log vorh.N) \times \gamma} \quad (3.7)$$

$$zul.N = 10^{\frac{1}{0,7} \left(\frac{0,00875 \times E_{v2}}{vorh.\sigma_z \times \gamma} \right)} \quad (3.8)$$

Programmet bruker alle disse inngangsparameterne i sine beregninger. Inngangsparameterne blir analysert av programmet, og ved hjelp av Miners' hypotese vil det bli utregnet et utmattingsforløp. Formlene 3.10 og 3.11 viser hvordan miners' hypotese beregnes (Wellner, 2009). Antall lastsituasjoner for et bestemt belastningsforhold, $vorh.N_{ij}$, beskriver hvor mange akseloverfarer man kan ha av en type aksel under et gitt klimaforhold. For eksempel kan man se på en 10t aksel med temperaturgruppe 12,5°C. Det legges i tillegg inn trafikkforandringer, p , i denne parameteren (Reinhardt, 2016). “ p ” i denne sammenheng er ikke den samme som “ p_i ” i lastmodellen. Maksimalt antall akseptable lastsituasjoner for et bestemt belastningsforhold, $zul.N_{ij}$, ser på kritiske horisontal tøyninger i vegoverbygningen. For dette programmet er dette punktet satt til å være under de bitumenbundne lagene, siden de høyeste tøyningen oppstår i dette sjiktet. Ut fra kontaktrykket utregnet i lastmodellen sammen med klimagradianten, stivheten og tykkelse blir tøyningen regnet ut. Det er denne som brukes i ligning 3.11 (Reinhardt, 2016). Det tas med en SF-faktor for å få resultatene kalibrert for reelle forhold. I tillegg er det lagt inn sikkerhetsfaktorer for å forsikre seg om at det ikke blir noe form for underdimensjonering. Tabeller med disse faktorene finnes i “Guidelines for

mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09” (Wellner, 2009).

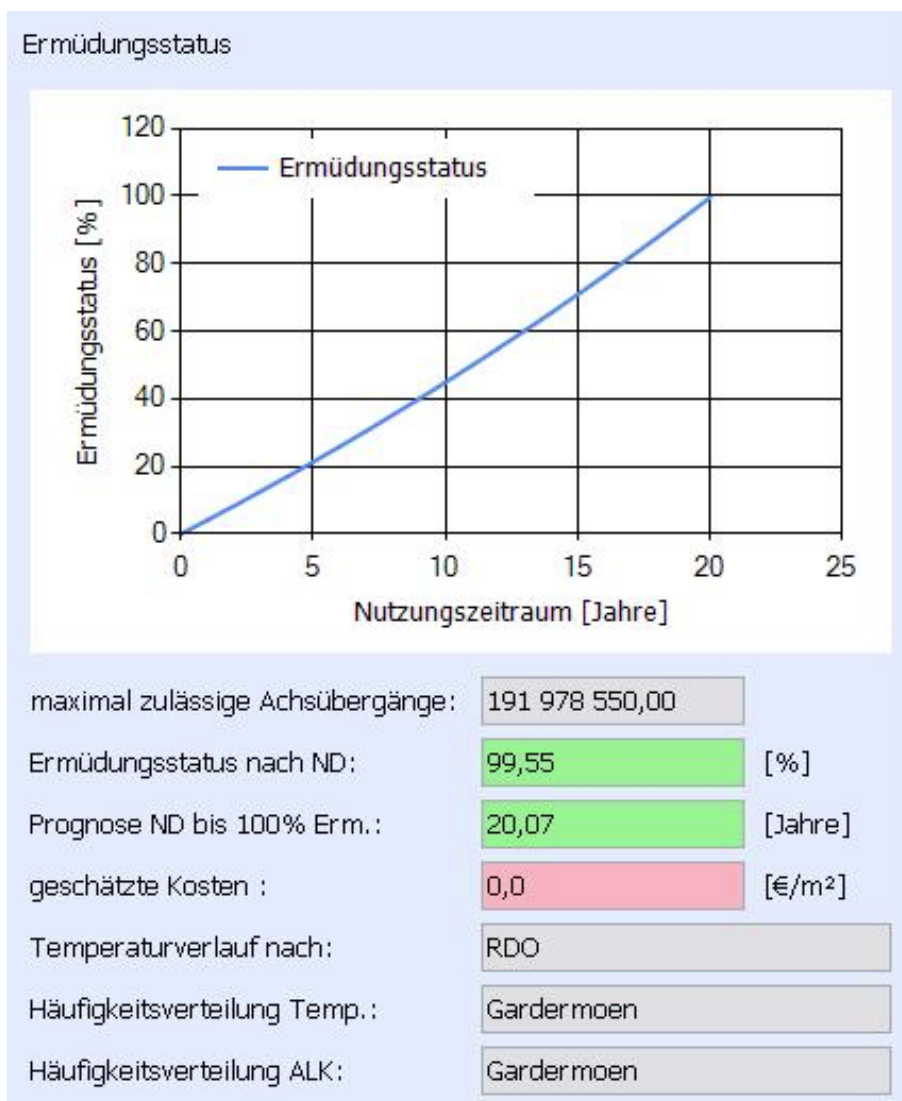
$$D = \sum_{MINER} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{vorh.N_{ij}}{zul.N_{ij}} \leq 1 \quad (3.9)$$

$$vorh.N_{ij} = \text{ÅDT}_T \times (1 + p) \times \text{andel akselklasse} \times \text{andel klimaperiode} \quad (3.10)$$

$$zul.N_{ij} = \frac{SF}{F} \times a \times \varepsilon^k \quad (3.11)$$

Det er 11 akselklasser og 13 temperaturklasser som gir 143 lastkombinasjoner som beregnes for et år, dette gjøres ved det første summetegnet i Miners’ hypotese. Deretter vil summetegn nummer to i Miners’ hypotese ta inn dimensjoneringsperioden (Reinhardt, 2016), og ut fra dette vil man da få utmattingsforløpet for hele dimensjoneringsperioden.

Figur 3.8 viser resultatet i ADtoPave. Her vises maksimalt antall aksellaster som kan kjøre over før utmatting, utmatting under dimensjoneringsperioden og hvilke levetid som er oppnådd ved 100% utmatting. Dette kan da brukes i evaluering av vegoverbygningens sluttprosessen. Man ønsker 100% utmatting så nærme dimensjoneringsperioden som mulig for ikke å få over- eller underdimensjonering. Ut fra resultatet går man tilbake og optimerer vegoverbygningen i forhold til satt dimensjoneringsperiode ved å justere på lagtykkelsene.



Figur 3.8: Resultat i ADtoPave (Wellner, 2009)

Dette programmet er fortsatt i utviklingsfasen. Målet er å gjøre det mer avansert, men først skal denne delen av programmet prøves ut. Deretter blir det vurdert nye implementeringer fortløpende. Første prioritet vil være å få inn flere resultater som spor- og sprekkdannelse. Deretter også å få inn beregningsmodeller som inkluderer FEM (Zeissler, 2016). I kapittel 4 vil det bli gjennomgått casestudiet gjort i denne oppgaven, hvor man går mer inn i programmets funksjoner og resultat. I tillegg er det i del III vedlegg 3 gitt fullstendige resultater fra ADtoPave testingen.

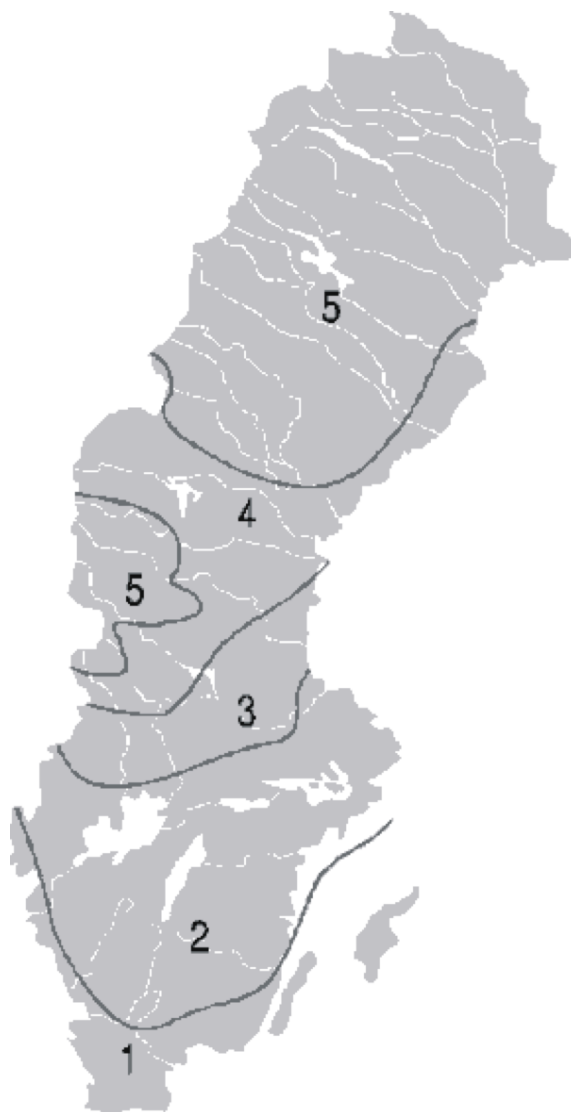
3.4.2 PMS Objekt

PMS Objekt, Pavement Management System Objekt, er et svensk dimensjoneringsprogram som brukes til dimensjonering av nye vegoverbygninger i tillegg til at det er et hjelpemiddel for vedlikehold og rehabilitering av eksisterende veger (Trafikverket, 2005). Programmet inneholder en database med en standard vegoverbygning som er avhengig av materialet i undergrunnen. Brukeren av programmet vil først velge en standard vegoverbygning, for deretter å modifisere denne for å imøtekomme de spesifikke kravene til bæreevne for det valgte prosjektet (Busch mfl., 2010). Programmet er et dimensjoneringsprogram som inneholder modeller basert på lineær-elastisk teori (Saba mfl., 2006). PMS Objekt følger krav og råd satt i “TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion” (Andersson og Winnerholt, 2011a) og “TRVK Väg - Trafikverkets tekniska råd Vägkonstruktion” (Andersson og Winnerholt, 2011b).

PMS Objekt er sammensatt av modeller som er gitt i delkapitler under, tre av disse er beregningsmodeller.

Klimamodellen

Klimamodellen i PMS Objekt er delt inn i fem klimasoner og seks klimaperioder. Klimasonene er gitt i figur 3.9. Klimaperiodene er inndelt i vinter, teeløsning vinter, teeløsning, senvår, sommer og høst (Evensen, 2007). I TRVK Väg er det gitt en oversikt over temperaturer og lengde på hver periode. Disse varierer da fra periode til periode og fra sone til sone (Andersson og Winnerholt, 2011a). E-modulene i materialene blir da bestemt etter perioder, hvor referanse periode er sommer og 18 °C (Winnerholt, 2016).



Figur 3.9: Klimasoner i PMS Objekt (Andersson og Winnerholt, 2011a)

Materialmodellen

I TRVK Väg er det gitt tabeller over stivhetsmodulene, M_r , for de forskjellige overbygningsslagene i forhold til klimaperiode og klimasone (Andersson og Winnerholt, 2011a). Dette gjelder da bundne og ubundne materialer, mens for materialene i undergrunnen er det gitt tabeller for klimaperiode og materialtype (Evensen, 2007). I materialmodellen er det mulig å legge inn egendefinerte materialer. Her legger man inn type materiale, vannkvote, tørrdensitet, porøsitet,

metningsgrad, varmeledningsevnen for frosset og ufrosset materiale. Stivhetsmodulen kan settes i forhold til fem forskjellige forhold gitt fra en til fem i manualen til PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015).

1. Konstant - Stivhetsmodulen blir ikke påvirket av ytre forhold.
2. Klimaperioder - Stivhetsmodulen vil ha ulike verdier for hver klimaperiode.
3. Dreneringsgrad og klimaperiode - Stivhetsmodulen settes ut fra dreneringsgrad i materiale og klimaperiode
4. Klimasone og klimaperiode - Stivhetsmodulen vil settes etter både klimasone og klimaperiode
5. Klimasone, klimaperiode samt lagets tykkelse - Stivhetsmodulen vil settes ut fra klimaperiode og klimasone i tillegg påvirkes den av lagtykkelsen.

Material dataene tar man videre til bestemmelse av vegoverbygning, der setter man sammen den konstruksjonen man ønsker ut fra materialene man har definert eller ut fra de som er gitt i programmet. Man legger i tillegg inn undergrunn. Den kan også være egendefinert om ønskelig og legges inn på samme måte som med materialene over (Winnerholt og Viktorsson, 2015)

Trafikkmodellen og lastmodellen

Den første beregningsmodellen går på trafikk- og lastberegning. Lastmodellen er satt som en 100kN tvillinghjulbelastning med c-c avstand på 300mm og kontakttrykk lik 0,8MPa. Ut fra dette kan man beregne kontaktrykkradiusen, r , som gis i ligning 3.6 i kapittel 3.4.1. Denne radiusen blir da på 100mm. Og det er denne kontaktflaten man beregner lastene ut fra. Trafikkmodellen beregner antall ESAL for vegoverbygningen man dimensjonerer, og er vist i formel 3.12 (Andersson og Winnerholt, 2011a). Denne verdien kommer da oftest ut som en millionverdi. Det som ikke legges inn i denne formelen er fordelingen av tunge kjøretøy i forhold til felt, og dette må da regnes ut på egenhånd. Man må derfor i faktoren for andel av tunge kjøretøy, A , legge inn hvor stor del av tungtrafikken som kjører i feltet man ser på. For utregningen av ESAL i formel 3.12 er noen av parameterne egendefinerte mens resten kan hentes i “TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion” (Andersson og Winnerholt, 2011a). Faktor B finnes ved å slå opp i en tabell i ATB Väg (Evensen, 2007). Det er også viktig å påse at andel tunge kjøretøy, A , er gitt som en prosentverdi i denne formelen. Det er i figur 3.10 vist hvordan trafikkberegningsvinduet ser ut i PMS Objekt.

$$N_{ekv} = \text{ÅDT}_k \times 3,65 \times A \times B_{just} \times \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{k}{100}\right)^j \quad (3.12)$$

$$B_{just} = B \times f_a \times f_b \times f_c \quad (3.13)$$

Figur 3.10: Trafikkberegning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)

Skademodellen

Den andre beregningsmodellen i PMS Objekt er bæreevneberegning. Denne er basert på den lineær-elastiske modellen som blir brukt, og består av kalkulasjoner av tøyninger. Det blir beregnet horisontale tøyning i underkant av asfaltlagene, vertikale tøyning i toppen av undergrunnen og vertikal tøyninger i undergrunn grunnet maksimal enkelt-last (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Formel 3.14 viser kriteriet for bæreevnen slik den blir benyttet i programmet for horisontal tøyning i underkant av asfaltlagene. Formel 3.15 viser hvordan man regner ut tillatt antall standardakslene over et år, mens formel 3.16 beregner tillatt antall standardakslene for hver klimaperiode (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Det samme gjøres for vertikale tøyning i toppen av undergrunnen. I formel 3.17 ser man kriteriet, og formlene for utregning av tillatt antall standardakslere for vertikal tøyning i toppen av undergrunnen er gitt i formel 3.18 og 3.19 (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Enkelt-lasten testes ikke, men er en

teoretisk last beregnet som en maksimal last som trolig kan forekomme på vegoverbygningen. Beregningen sjekkes da opp mot maksimale vertikaltøyninger i PMS Objekt. Et eksempel på en reell last er en stor kran eller en stor maskin som skal kjøre på vegen (Winnerholt, 2016).

$$N_{till,bb} \geq N_{ekv} \quad (3.14)$$

$$N_{till,bb} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{bb,i}}} \quad (3.15)$$

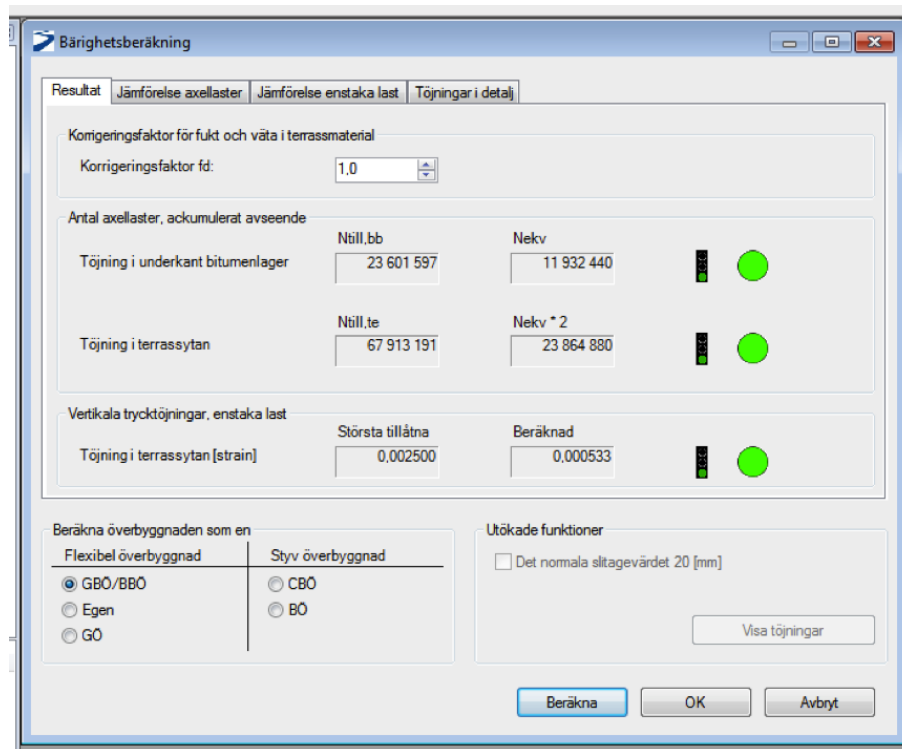
$$N_{bb,i} = f_s \times \frac{2.37 \times 10^{-12} \times 1.16^{(1.8 \times T_1 + 32)}}{\varepsilon_{bb,i}^4} \quad (3.16)$$

$$N_{till,te} \geq 2 \times N_{ekv} \quad (3.17)$$

$$N_{till,te} = \frac{365}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{te,i}}} \quad (3.18)$$

$$N_{te,i} = f_d \frac{8,06 \times 10^{-8}}{\varepsilon_{te,i}^4} \quad (3.19)$$

Det er i figur 3.11 vist hvordan bæreevneberegningstvinduet ser ut i PMS Objekt. Dette vinduet viser ESAL og tillatt antall standardakslene under asfaltlagene og på toppen av undergrunnen. I tillegg vises vertikal tøyningen for beregning av enkelt-last. Det er ikke ofte enkeltlasten blir dimensjonerende, men det kan skje ved veldig løs undergrunn og ved kort avstand ned til undergrunnen. Dette skjer veldig sjeldent ved nye vegoverbygninger fordi det er krav om minstetykkelse på de ubundne materialene, men kan forekomme ved rehabilitering av veger (Winnerholt, 2016). Grønt lys indikerer at vegoverbygningen er innenfor krav, gult lys indikerer at vegoverbygningen maksimalt ligger 10% over krav og rødt indikerer at man er under krav (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Mye grønt er ikke alltid bra, mens gult kan være vel så bra for å unngå overdimensjonering (Winnerholt og Viktorsson, 2015).

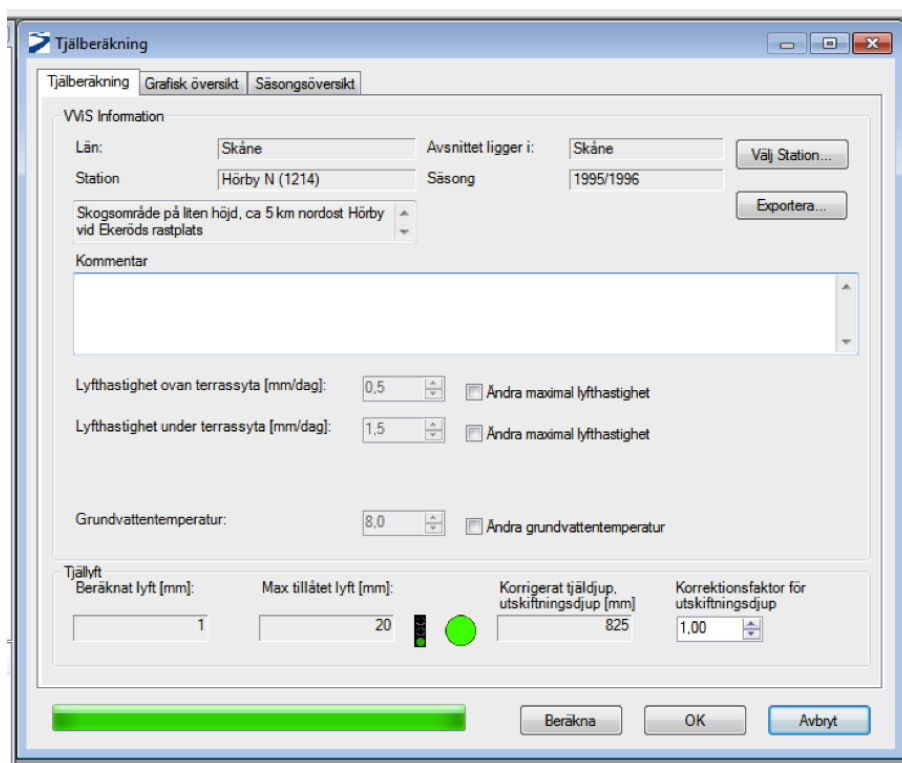


Figur 3.11: Bæreevneberäkning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)

Telemodellen

Den tredje beregningsmodellen i PMS Objekt er telehivberegningen. Beregningsmodellen simulerer fryseprosessen og hvordan frosten forplanter seg nedover i vegoverbygningen (Busch mfl., 2010). Det er den perioden som har de største telehivene som vil bli den dimensjonerende. Det er delt inn i flere perioder om våren siden dette er et område hvor telehiv fort oppstår på grunn av varierende temperaturer rundt 0 °C. I PMS Objekt velger man undergrunn, og med dette telefarlighetsklasse og materialeegenskaper, dette kan man finne i tabell 4.3-1 i “TRVK Väg” (Andersson og Winnerholt, 2011a) og Bilaga 1, tabell 2.1 i “TRVMB 301 Beräkning av tjällyftning” (Andersson og Winnerholt, 2011c). Disse parameterne er avgjørende for om det oppstår telehiv eller ikke. For mer forklaring på telefarlighet se kapittel 3.3 under “Telehiv”. Selve modellen beregner varmeledning og telehivshastigheten i vegoverbygningen. Vegoverbygningen deles inn i celler, og varmeflyten beregnes mellom respektive celler. Når man kommer ned til telefronten antas det at temperaturen er null grader, og at effekten av det fryste materialet er at det tørker ut. Dette vil føre til et undertrykk i materialet, og at materialet vil suge til seg vann for å utligne trykket. Når vann kommer til telefronten vil

det fryse, og islinser vil dannes hvis telefarlige materiale. Islinsene vil da føre til telehiv i vegoverbygningen (Andersson og Winnerholt, 2011c). Klimadata hentes fra valgt VViS-stasjon som allerede ligger inne i PMS Objekt. Man velger en VViS-stasjon som ligger der du ønsker å ha vegen eller en VViS-stasjon som har de samme klimaforhold som den aktuelle strekningen har. Disse klimadataene er hentet fra oktober til april, ettersom dette er månedene som er viktige å se på i forhold til telehiv (Andersson og Winnerholt, 2011c). Resultatet som da gis ut er frostdybden og høyden på telehivet målt i mm. Det er i figur 3.12 vist hvordan telehivsberegningsvinduet i PMS Objekt er ut. Dersom telehivet er for høyt, over kriteriet som settes, vil det lyse rødt. Da må man justere frostsikringslaget eller fjerne telefarlig materiale i undergrunnen. Lysene i telehivs vinduet i PMS Objekt fungerer som i bæreevneberegningen i PMS Objekt, og er forklart under kapittelet “Skademodellen”.



Figur 3.12: Telehivberegning i PMS Objekt (Winnerholt og Viktorsson, 2015)

Avanserte funksjoner i PMS Objekt

PMS Objekt består i tillegg av syv mer avanserte funksjoner, de er listet under som i “Pavement Performance Models (NordFoU-PPM) - Identification and selection of Pavement Performance

Models” (Busch mfl., 2010).

1. Det kan gjennomføres trafikkberregning og bæreevneberregning med forskjellig type aksellast.
2. Det kan gjennomføres berregninger av bæreevne der deformasjoner, spenninger og tøyninger blir berregnet på vilkårlige punkt i eksisterende vegoverbygning.
3. Det kan gjennomføres responsberregning som berregner vertikalspenninger i overflaten av undergrunnen.
4. Det kan gjennomføres berregninger av vegoverbygningens ytelse som kan kontrollere nedbrytningen til en planlagt vegoverbygning.
5. Det kan gjennomføres uttredelse av egenskapene til materialene brukt i vegoverbygningen slik at det videre kan berregnes overbygningssvikt.
6. Det kan gjennomføres fall-lodd berregning som grunnlag for E-modul for tre-lags spenningsanalyser.
7. Det kan gjennomføres volum- og kostestimater som berregner materialmengde og kostnader for den aktuelle vegoverbygningen.

For å validere resultatene av PMS Objekt er resultatene blitt testet og sammenlignet med målte data fra LTPP (Long-Term Pavement Performance) databasen i Sverige. Resultatet av disse viser at PMS Objekt har en god nøyaktighet med tanke nedbrytning av vegoverbygningen sammenlignet med observerte data (Göransson, 2004).

3.4.3 MMOPP

MMOPP står for “Mathematical Methods of Pavement Performance” og er et dansk dimensjoneringsprogram (Vejregler, 2013b). Programmet er basert og knyttet opp mot den danske håndboken “Dimensjonering af Befæstelser og Forsterkningsbelægninger” (Vejregler, 2013a), og viser retningslinjer for dimensjonering av vegoverbygninger (Vejregler, 2013a). MMOPP er utviklet av Vejregelgruppen kalt “Dimensionering af befæstelser”, og det nåværende programmet og brukerveiledning ble publisert i 2003. Siden det har det vært flere revideringer av program og brukerveiledning. Det er versjonen fra 2013 og dets brukerveiledning som er brukt i denne masteroppgaven (Vejregler, 2013b).

MMOPP er delt inn i tre deler: Den første er den katalog bestemte, den andre er den analytisk-empirisk og den siste er berregninger ved hjelp av simulering. Den første delen er helt

empirisk og følger håndbøker og standardene. Programmet benyttes på de analytisk-empirisk beregningene og beregning ved simulering (Vejregler, 2013a).

Noen av fanene i programmet er deaktivert for bruk. Dette er for å sikre at man tar inn riktig inngangsparametere, som igjen er i overensstemmelse med “Vejregelen”. Dersom man ønsker å aktivere disse fanene må formannen i “Vejregelgruppen” kontaktes. Fanene dette gjelder er klima, belastning og grenser (Vejregler, 2013b). I denne masteroppgaven ble dette gjort, og forandring for disse parameterne kunne dermed gjøres. Videre vil det bli gitt en kort beskrivelse av analytisk-empirisk dimensjonering og dimensjonering ved simulering i MMOPP.

Analytisk-empirisk dimensjonering i MMOPP

Dette er en tradisjonell analytisk beregningsmetode. Mulige beregninger er enten beregninger gjort med trafikk- og materialdata i programmet (nivå 1) eller en mer brukerdefinert inputmodell (nivå 2) (Vejregler, 2013b).

Inngangsparameterne i programmet er trafikkmengde, materialdata og tykkelse på lagene. Under analytisk-empirisk dimensjonering tas det ikke med klimadataparametere. Først settes antall dimensjoneringsbelastninger ($N_{\text{Æ}10}$) per år ut fra formlene 3.20, 3.21 og 3.22, og ut fra disse svarene blir trafikkklasse bestemt i tabell 3.3. Lastmodellen består av en Æ10 last som brukes i programmet som en 10 tonns tvillinghjulbelastning, med 20% støtt tillegg (Vejregler, 2013b). Den har et kontakttrykk på 0,7MPa og en c-c avstand mellom hjulene på 350mm (Vejregler, 2013b). Ut fra formel 3.6 i kapittel 3.4.1 ADtoPave vil man da få en trykkflate på 100 mm. Etter at trafikkklasse er bestemt, bestemmes materialene som overbygningen skal bestå av. Her bestemmes også initiell lagtykkelse for slite- og bindlag. Materialene som kan brukes er allerede bestemt i programmet, og man kan her velge fra en liste over forskjellige materialer gitt i programmet. Det mulig å bruke analytisk-empiriske dimensjonering for dimensjonering av fleksible, halvstive og stive vegoverbygninger.

$$N_{\text{Æ}10} = P \times K_F \times K_K \times K_R \times F_{SS} \times \sum F_{\text{Æ}10} \times L \quad (3.20)$$

$$P = \frac{(1 + \alpha)^n - 1}{\alpha} \quad (3.21)$$

$$L = \text{ÅDT} \times 365 \times \frac{\text{ÅDT}_T[\%]}{100} \times 0.86 \quad (3.22)$$

Tabell 3.3: Trafikklasser (Vejregler, 2013a)

Klasse	Lastbiler på vejen pr. døgn i begge retninger tilsammen	$N_{\text{Æ10}}$ -pr. dag i spor (øvre grænse)	Dimensjonerings-trafik $N_{\text{Æ10}}/\text{år}$
T0 ¹⁾	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 ²⁾	500.000 ²⁾
Noter	1) I klasse T0 bør træffes aktive foranstaltninger mod at tunge køretøjer - herunder snerydningsmateriel - færdes på vejene 2) Principielt ubegrænset - de angivne værdier bruges som standardværdier i dimensioneringsprogram		

I beregningsmodellen blir inngangsparameterne lagt inn i programmet og analysert. Der blir det beregnet responsen til vegoverbygningen som uttrykkes i spenninger og tøyninger (Vejregler, 2013b). For å beregne spenningene og tøyningene brukes det amerikanske elastisitetsprogrammet WESDEF (Baltzer, 2016). De beregnede spenningene og tøyningene skal være mindre enn de tillatte spenningene og tøyningen. Dimensjoneringskriteriet til modellen er gitt i ligning 3.23 (Vejregler, 2013a). Dersom de beregnede spenningene og tøyningene ikke overholder dimensjoneringskriteriet, justerer MMOPP lagtykkelsen. Kriterieligningene for spenning i overflaten av ubundne lag og tøyning i bunnen av asfaltlaget er gitt i formel 3.24 og 3.25 (Vejregler, 2013a).

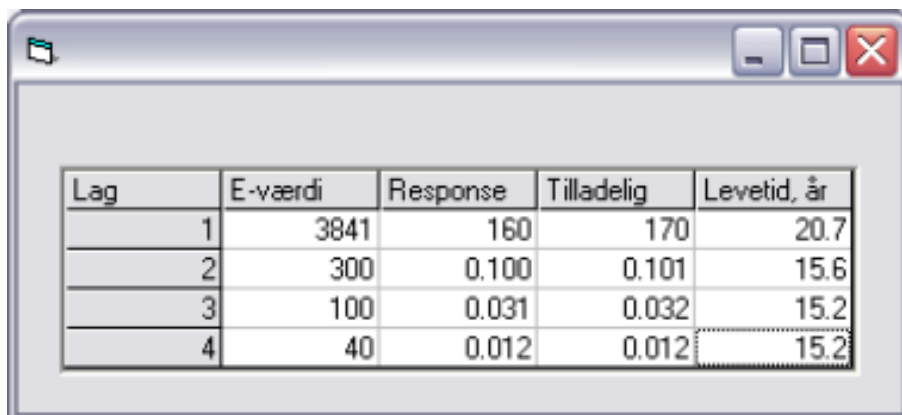
$$p = A \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^B \times \left(\frac{N_{\text{Æ10}}}{10^6} \right)^C \quad (3.23)$$

$$\sigma_z = 0,086 \text{MPa} \times \left(\frac{E}{160 \text{MPa}} \right)^{1,06} \times \left(\frac{N_{\text{Æ10}}}{10^6} \right)^{-0,25} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_h = -0,000250 \left(\frac{N}{10^6} \right)^{-0,191} \quad (3.25)$$

I asfaltlagene blir kun tykkelsen på bærelaget justert, mens E-modulene justeres løpende. MMOPP vil da fortsette med disse beregningene og justeringene frem til dimensjoneringskriteriene er overholt og alle beregnede spenninger og tøyninger er mindre enn de tillatte

spenningene og tøyningene (Baltzer, 2016). I figur 3.13 ser man hvordan MMOPP legger frem resultatene. Man får oversikt over E-verdier, spenninger/tøyninger som blir regnet ut (responsen), spenninger/tøyninger satt av kriteriet (tillatt) og levetid i år. Dette kan så hentes ut som en Excel-fil og videre analyseres. Det er brukt analytisk-empirisk dimensjonering videre under testene gjort i denne oppgaven. Man kan se det fulle resultatet i del III, vedlegg 4.



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

Figur 3.13: Resultat av analytisk-empirisk dimensjonering i MMOPP (Vejregler, 2013a)

Simulering i MMOPP

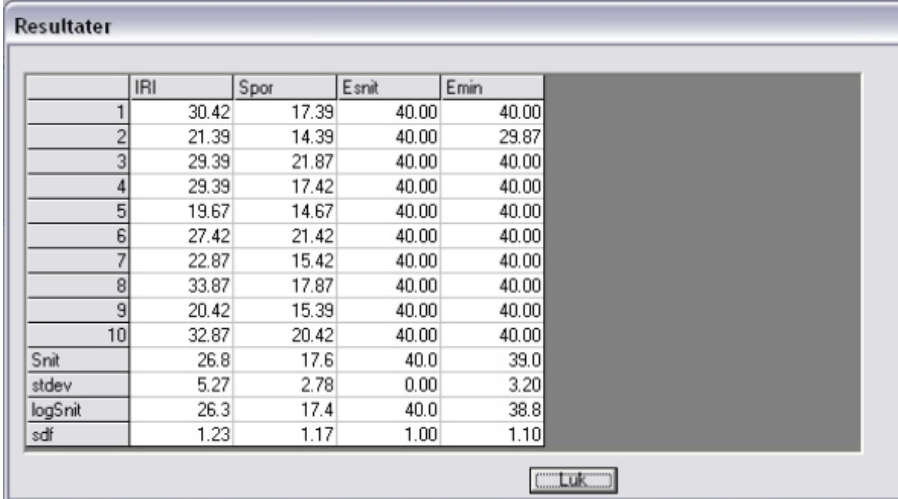
Dette er en dimensjoneringsmetode hvor det blir foretatt flere simuleringer av vegoverbygningens nedbrytning. I denne simuleringen vil det bli fastsatt hvor og når vegoverbygningen ikke lengre overholder krav til asfaltnedbrytning, jevnhet (IRI) og spordannelser (permanent deformasjon). Dimensjonering i MMOPP vil gi den mest økonomisk gunstige vegoverbygningen siden den oppfylder kriteriene i dimensjoneringsperioden (Vejregler, 2013b). Dimensjonering ved simulering i MMOPP er bygd opp av flere matematiske modeller og det vil videre bli gått litt dypere inn i hver enkel modell, og forklaringene er tatt fra “Håndbog: MMOPP dimensjoneringsprogram for vejbefæstelser brukervejledning - anlæg og planlægning” (Vejregler, 2013b).

- Vegoverbygningsmodell - I denne modellen velges lagenes egenskaper og lagtykkelse samt dekkets overflateegenskaper.
- Belastningsmodell - I denne modellen fastsettes sammenhengen mellom vegoverflatens geometri, hjulets bevegelser og deres påvirkninger på vegoverflaten.

- Klimamodell - I denne modellen fastlegges sammenhengen mellom materialenes deformasjonsegenskaper og klimaet. MMOPP sin klimamodell er kalibrert mot sydsvenske klimadata, og det er satt et standard klima for hele Danmark (Baltzer, 2016).
- Responsmodell - I denne modellen regnes det hvordan påkjenninger i vegoverflaten fordeler seg ned gjennom vegovebygning, og i denne simuleringen anvendes Odemark-Boussinesq's teori (Spenningsanalyse kan man lese om i prosjektoppgaven "Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger" (Trangen, 2015)).
- Strukturell nedbrytning (sprekker/E-modul verdier) - I denne modellen fastsettes sammenhengen mellom dynamiske påkjenninger og nedbrytningen av asfaltlaget.
- Permanente deformasjoner (jevnheter(IRI) og spordannelse) - I denne modellen fastsettes sammenheng mellom dynamiske påkjenninger/spenninger og permanente deformasjoner (Vejregler, 2013b).

I brukerveiledningen til MMOPP står alle modellene forklart grundig i tillegg til at det er vist hvordan man bruker dem, med unntak av de fanene som er deaktiverte og er dermed allerede er satt (Vejregler, 2013b).

Simuleringsdelen tar utgangspunkt i 30m av vegen man ønsker å dimensjonere, og tar ut 10 deler på 300mm lengde hver på denne strekningen (Baltzer, 2016). Grunnen til at delene er på 300mm, er at hver del er ca. det samme som ett lastebilhjulsavtrykk. Hver av disse delstrekningene har angitte E-modul verdier og tykkelse. Modellene oppfatter disse verdiene som middelveier, og bruker en "random-generator" til å variere tykkelsene og E-modul verdiene for at hver av de 10 forskjellige strekningene blir noe forskjellige. Programmet vil ta inn variasjonene av vegoverbygningens lagtykkelser, elastisk stivhet, plastiske parametere og dynamiske lastkombinasjoner i forhold til tid og sesong for hver del. Videre brukes det en inkrementell-rekursiv metode i MMOPP. Inkrementell-rekursiv metode vil si at resultat fra hver tidsperiode eller sesong vil bli brukt som inngangsparameter for den neste tidsperioden eller sesongen. Ut fra dette kan man da se den gradvise nedbrytningen av vegoverbygningen over tid (Ullidtz, 2002). Dette gjøres for å få beregningene mest lik virkeligheten som mulig. Klimamodellen vil ta inn årsvariasjonene i klima og dette vil lage ytteligere variasjoner i E-modulverdier fra delstrekning til delstrekning. Belastningsmodellen vil se på kjøretøyet som beveger seg på vegen, dens belastning og fjærkonstant. Dette vil gi en dynamisk påvirkning siden lagtykkelsene i de forskjellige delstrekningene vil gi små humper som vises som ujevnheter(Baltzer, 2016).



	IRI	Spor	Esnit	Emin
1	30.42	17.39	40.00	40.00
2	21.39	14.39	40.00	29.87
3	29.39	21.87	40.00	40.00
4	29.39	17.42	40.00	40.00
5	19.67	14.67	40.00	40.00
6	27.42	21.42	40.00	40.00
7	22.87	15.42	40.00	40.00
8	33.87	17.87	40.00	40.00
9	20.42	15.39	40.00	40.00
10	32.87	20.42	40.00	40.00
Snit	26.8	17.6	40.0	39.0
stdev	5.27	2.78	0.00	3.20
logSnit	26.3	17.4	40.0	38.8
sdf	1.23	1.17	1.00	1.10

Figur 3.14: Resultat av simulering i MMOPP (Vejregler, 2013a)

Nedbrytningeneforløpet i MMOPP vises som permanente deformasjoner, sprekker og utmatting (Saba mfl., 2006). Utmatting og sprekkdannelse vil bli gitt ut som E_{min} og E_{snit} , mens jevnhet og permanente deformasjoner vises som IRI- og sporverdier. Alle verdiene i simuleringresultatet blir gitt ut som år innenfor krav (Baltzer, 2016). Ved reduksjon i E-verdier kan man se at det oppstår rifter eller sprekkdannelse. Ved 2/3 av den opprinnelige E-verdien har det oppstått sprekker og ved 1/3 er det oppstått slaghull (Baltzer, 2016). Disse verdiene vil gis ut som utgangsparameterne som vist i figur 3.14. Det er i denne oppgaven valgt å bruke analytisk-empirisk dimensjonering, og det blir derfor sett bort fra simulering i MMOPP videre i oppgaven.

Kapittel 4

Utførelse, resultater og diskusjon

Dette kapitlet vil se på utførelsen av testene som ble gjort. Det vil i tillegg beskrive resultatene som er fremkommet under testingen av programmene gjort i casestudiet. Til slutt vil det bli gitt en diskusjon av de ulike resultatene.

4.1 Utførelse

Dette kapitlet ser på utførelsen av de forskjellige testene i detalj. Den første testen ser på sammenligning av horisontaltøyninger i bunnen av asfaltlag i PMS Objekt og MMOPP. Test to går ut på å vurdere innsatte vegoverbygninger i programmene, og å bestemme optimale vegoverbygninger. Test tre er en evaluering av brukervennligheten til de ulike programmene som er testet.

4.1.1 Utførelse av sammenligningen av MMOPP og PMS Objekt

Dette delkapitlet går inn på hvordan sammenligningen mellom PMS Objekt og MMOPP ble utført. Disse to programmene gir begge ut dimensjonerende horisontale tøyingsverdier i bunnen av i de bitumiøse lagene. MMOPP gir i tillegg ut vertikale spenninger i forsterkningslag, frostsiringslag og i undergrunnen, mens PMS Objekt gir ut vertikale tøyning i undergrunnen og ved enkelt-last. Siden det kun var horisontaltøyninger i underkant av asfaltlagene som var de samme, var det disse som ble sammenlignet. Ønsket var at disse tøyningene kunne beskrive forskjellene mellom programmene. Det ble i denne beregningen av horisontale tøyninger brukt samme lastmodell i begge programmer. Lastmodellen er den samme som brukes i PMS Objekt og er videre lagt inn i MMOPP. Denne modellen har kontaktrykk på 0,8MPa og c-c avstand på 300mm (Andersson og Winnerholt, 2011a). For å forenkle innsatte data i MMOPP ble det i tillegg forutsatt at 50kN er det samme som 5t for aksellasten. Dette må da tas med som

en feilkilde ved sammenligning av horisontal tøyningene. Det vil si at i PMS Objekt ble det regnet med 100kN tilsammen over akselen, mens i MMOPP ble det regnet med 10t. Det ble heller ikke gjort rede for hvilke tverrkontraksjonstall som ble satt for hvert materiale, og det kan derfor være en variasjon på disse fra program til program.

I MMOPP sin analytisk-empiriske dimensjonering tas det ikke inn klimaparametere. Det vil si at E-modulene forblir konstante gjennom året, uten påvirkning av ytre forhold (Vejregler, 2013b). Når E-modulverdiene fra MMOPP ble lagt inn i PMS Objekt ble det derfor brukt materialmodellen for ”konstante E-moduler” i PMS Objekt. Det vil si at materialdataene brukt i MMOPP ble de samme som i PMS Objekt. Likevel må man sette verdier for tørrdensitet, porøsitet, metningsgrad, varmeledningsevne for frossent og ufrossent materiale i PMS Objekt. Dette er ikke mulig i MMOPP, men likevel er dette verdier som ikke har mye påvirkning for tøyingsforløpet i asfaltlaget. Dette er verdier som ligger inne for beregning av tele som ikke er en del av denne testen (Andersson og Winnerholt, 2011a). I PMS Objekt må det også velges en klimasone, denne ble satt til Skåne i sone 1. Grunnen til dette er at MMOPP er kalibrert mot sydsvenske data. MMOPP bruker som tidligere nevnt ikke klimadata i denne beregningen, og det blir derfor ikke gått noe mer inn på dette.

Det ble laget seks vegoverbygninger med varierte materialdata i MMOPP. I MMOPP slås de tre bitumenbundne lagene sammen til et lag, med samme E-modul. Dette gjøres med en formel 4.1 innlagt i programmet. Slik blir horisontaltøyningene beregnet i bunnen av den totale tykkelsen på de tre lagene. Det vil si mellom bitumenbundet og ubundet material. Vegoverbygningen til MMOPP vil da bestå av; lag 1 asfaltlag, lag 2 forsterkningslag, lag 3 frostsikringslag og lag 4 undergrunnen. Det er denne type vegoverbygning som ble lagt inn i PMS Objekt.

$$E_{al,tot} = \frac{(E_{al,1} \times t_{al,1}) + (E_{al,2} \times t_{al,2}) + (E_{al,3} \times t_{al,3})}{t_{al,totalt}} \quad (4.1)$$

Beregningene startet derfor med å legge inn inngangsparametere i MMOPP, og deretter kjøre testen i samme program. Etter dette ble verdiene for E-modul og lagtykkelser tatt videre og lagt inn i PMS Objekt. Her ble beregningen gjennomført med de samme inngangsparametere. Ut fra programmene fikk man de beregnede horisontaltøyningene i bunnen av asfaltlaget. For å finne tøyingsverdiene ble det i MMOPP brukt analytisk-empirisk dimensjonering og i PMS Objekt bæreevneberegning. Alle resultatene ble lagt inn i en Excel-fil og sammenlignet. Det ble til slutt funnet prosentvis forskjell mellom de beregnede horisontale tøyningene, og det var disse som ble utgangspunkt for diskusjon og konklusjon. Det fullstendige resultatet finnes i Del III, vedlegg 6.

Det ble i tillegg gjort en beregning av de horisontale tøyningene opp mot kriteriene satt i programmene. I MMOPP er kriteriet gitt som tillatt horisontal tøyning i bunnen av asfaltlagene, og derfor kunne resultatene av beregnede horisontal tøyninger sammenlignes

direkte. I PMS Objekt måtte de beregnede horisontale tøyningene beregnes om til tillatt antall standard aksler for de bitumenbundne lagene, $N_{bb,i}$. Dette ble gjort ved at de horisontale tøyningene ble satt inn i formel for $N_{bb,i}$, hentet fra formel 3.16 i kapittel 3.4.2. Siden E-modulen er konstant og man ser bort fra klima vil $N_{till,bb}$ være lik $N_{bb,i}$, se formel 3.16 i kapittel 3.4.2. Denne beregningen ble gjort for hånd, og det ble derfor gjort en del tilnærminger. Temperaturen i formelen for tillatt antall standard aksler, $N_{till,bb}$, ble beregnet ut fra første test med bruk av ”solver” funksjonen i Excel. I tillegg ble f_s satt lik 1. Siden disse tilnærmingerne ble gjort, ble beregningene av tillatt antall standard aksler gjort for alle de horisontale tøyingsverdiene fra både PMS Objekt og MMOPP. Dette for å sjekke om verdiene for PMS Objekt varierte mye fra håndberegning til programberegning. Forskjellene var minimale med tanke på at kriteriet med ekvivalente standard aksler gitt i millioner.

Alle resultatene fra denne testen er gitt i kapittel 4.2.1

4.1.2 Utførelse av sammenligning av vegoverbygninger

Dette delkapittelet går inn på hvordan sammenligningen av vegoverbygningene ble gjennomført, og hvordan den videre ble analysert.

Først ble det regnet ut et empiriske grunnlag som ut fra den norske dimensjoneringsmetoden. Denne vegoverbygningen er en H9 veg ved Gardermoen/Skedsmo/Berger. Det ble tatt utgangspunkt i dimensjonering etter “Håndbok N200 Vegbygging”, og vegoverbygningen ble utformet ut fra den normale vegstandarden der. ÅDT for denne vegen er 63770, og det gir trafikkklasse F ut fra ligning 3.3 gitt i kapittel 3.1. Indeksmetoden ble brukt for å sjekke vegoverbygningen opp mot krav som er satt i håndboken. Videre ble denne overbygningen forandret til en overdimensjonert vegoverbygning og en underdimensjonert vegoverbygning for bruk i testen. Full utregning finner man i del III, vedlegg 2.

ADtoPave

I ADtoPave ble det brukt materialdata som allerede var kalibrert i programmet, det vil si at det ble brukt tyske materialdata. Klima- og trafikkdata ble tatt fra det innsamlede datamaterialet fra Berger/Skedsmo/Gardermoen, og konstruksjonen som ble brukt som standard var hentet fra “Håndbok N200 Vegbygging”. Alle inngangsdata ble lagt inn som angitt. Først ble de empirisk beregnede vegoverbygningene lagt inn og validert etter kriteriene satt i programmet. Dette ble videre lagt inn i en Excel-fil og vurdert sammen med de andre programmene. Videre ble det gått tilbake i konstruksjonen og gjort justeringer i lagene for å optimalisere konstruksjonen i best mulig grad, denne prosessen vises i flytdiagrammet i figur 4.1. Tykkelsen på slit- og bindlag ble beholdt for å ha noe konstant slik at optimeringen gikk lettere. Dimensjoneringsperiode og trafikkøkning ble satt likt som de andre programmene. Målet var å få en konstruksjon som overholdt levetiden, men som ikke skulle overdimensjoneres.

Det ble gått frem og tilbake mellom konstruksjonen og resultatet frem til en den optimale konstruksjonen var funnet. Konstruksjonen og resultatet ble så lastet ned og tatt med i analysen opp mot de andre programmene. Bilder fra hele prosessen er gitt i del III, vedlegg 3.

MMOPP

I MMOPP ble verdien for $N_{\text{Æ}10}$ beregnet først for å finne den rette trafikklassen, se kapittel 3.4.3. Deretter ble de empirisk beregnede vegoverbygningene hentet inn og materialene valgt etter kalibrerte materialdata i MMOPP. I hovedvinduet i programmet ble det lagt inn tallet for $N_{\text{Æ}10}$, trafikkøkning, dimensjoneringsperiode og fart. Deretter ble analysen gjennomført i lik grad som for ADtoPave, men i MMOPP regner programmet ut den optimale vegoverbygningen ut fra kriteriene som er satt. Bruker trenger derfor ikke å gå frem og tilbake for optimering. Resultatene og konstruksjonen ble tatt med videre til analyse opp mot de andre programmene. Del III, vedlegg viser hele denne prosessen.

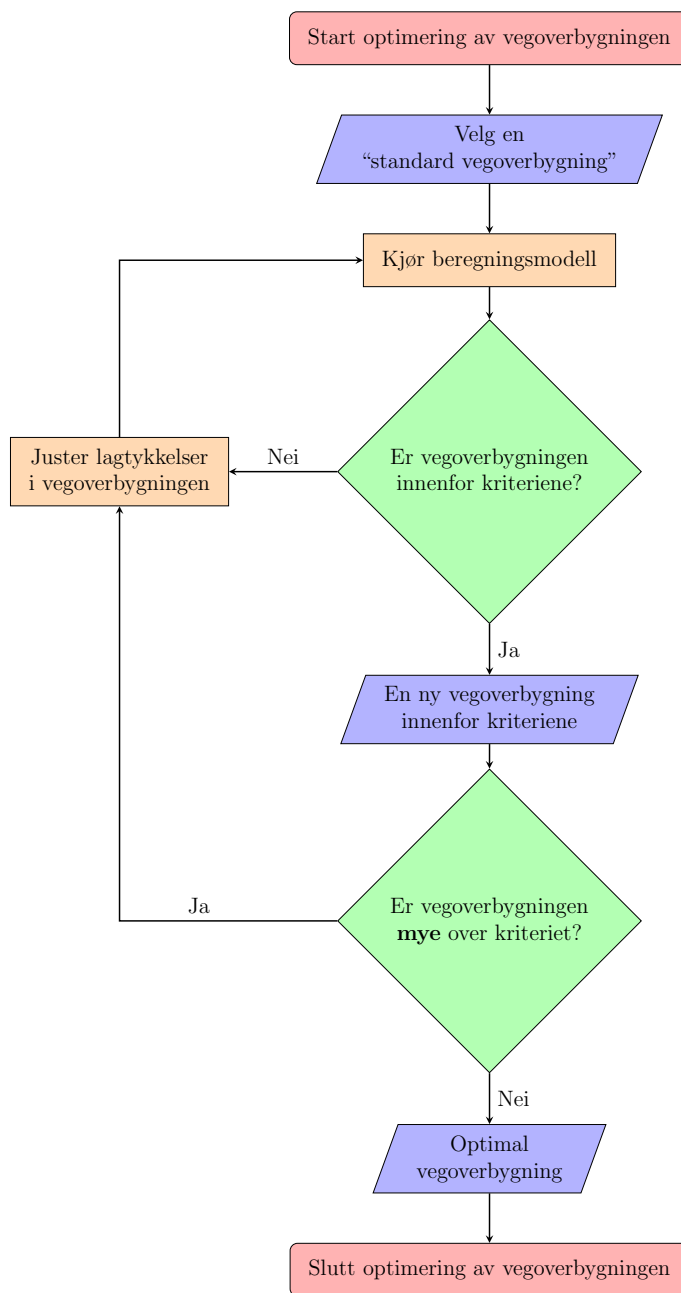
PMS Objekt

I PMS Objekt ble det også brukt kalibrerte materialdata som allerede er innlagt i programmet. Disse materialene ble satt sammen til vegkonstruksjonene laget med den empiriske metoden. Klimadata for Berger/Skedsmo/Gardermoen ble lastet ned, og sendt videre til Thomas Winnerholt i Sverige. Han fant, ut fra gitte data, at Hån i Värmtland i Sverige har tilnærmet samme klimaforhold. Ut fra dette ble klimasone og VViS-stasjon valgt. Analysen av de empirisk dimensjonerte vegoverbygningene ble gjennomført både for bæreevne og telehiv. Videre gikk man tilbake til vegkonstruksjonen for å optimalisere denne innenfor valgt dimensjoneringsperioden, dette vises i flytdiagrammet i figur 4.1. Resultater og den optimale konstruksjonen ble hentet ut som en rapport, og denne ligger vedlagt i del III, vedlegg 5.

Analysen av vegoverbygningene

Analysen ble gjennomført ved å se på de ulike resultatene og sammenligne de kvalitativt og kvantitativt. Det ble i første omgang gått gjennom hvordan de forskjellige dataene responderte på de innlagte empiriske vegkonstruksjonene. Om det var likheter i hvilke som godtok disse og ikke. Videre ble det gått gjennom grunner for at forskjellene oppstod slik som de gjorde. Det neste steget i prosessen var å analysere de optimerte vegoverbygningene, og å se på årsaker til de forskjellige resultatene. Siden det var små problemer med at ADtoPave ikke tok med teleproblematikk ble det også gjennomført en test for utmatting av en vegoverbygning uten frostsikringslag. Denne gikk ut på å sammenligne optimale vegoverbygningene uten frostsikringslag. Man kunne da se om overbygningen kunne motstå de lastene den ville blitt utsatt for. Ettersom frostsikringslaget sin mening er å beskytte mot frost ikke bidrar til økt

bæreevne, vil man kunne se om styrken på vegoverbygningen holder mål. Analysen her ble å se på hvor forskjellige de ulike optimale vegoverbygningene ble uten frostsikringslag, og om noen skilte seg mer ut enn de andre. Den empiriske kalkulerte vegoverbygningen uten frostsikringslag ble her endret til å være innenfor indeksmetode-kravene i henhold til “Håndbok N200 Vegbygging” før testen ble gjennomført (Statens vegvesen, 2014b). Det ble i tillegg beregnet styrkeindeks for alle vegoverbygningene for å få et bedre sammenligningsgrunnlag. Til slutt ble alle resultatene diskutert for så å danne en konklusjon.



Figur 4.1: Fremgangsmåte for optimering av vegoverbygninger i PMS Objekt og ADtoPave

4.1.3 Utførelse av analyse av brukervennlighet

Det ble til slutt gjennomført en kvalitativ undersøkelse av brukergrensesnittet til de ulike programmene. Det ble her valgt å lage en oversiktstabell for hvert program hvor det ble lagt inn nødvendige inngangsparametere, resultater man oppnår og hvilke andre funksjoner som var tilgjengelig i programmet. I tillegg ble det lagt inn kommentarer om hvordan brukeropplevelsen var, og hvordan brukerveiledningene kom til hjelp. Ut fra dette ble det satt opp både positive og negative sider ved hvert av programmene man har kommet frem til gjennom utprøvningsperioden. Hensikten med denne delen av casestudiet er å trekke tråder mellom begge de foregående testene, få en god forståelse av brukeropplevelsen og undersøke om programmene egner seg for norske forhold. Det ble i diskusjonen trukket inn resultater fra de andre forsøkene og helheten av oppgaven blir vurdert. Ut fra disse testene og tilhørende diskusjon ble det laget en konklusjon som gir svar på forskningsspørsmålene.

4.2 Resultat

Det er blitt gjennomført tre tester i denne masteroppgaven. Hvordan utførelsen av disse testene ble gjennomført er forklart i kapittel 4.1. I dette kapitlet vil resultatene fra de ulike testene bli presentert og kommentert.

4.2.1 Resultat av sammenligning av MMOPP og PMS Objekt

I denne testen ble det gjennomført en sammenligning av horisontale tøyninger i bunnen av asfaltlaget. Full forklaring av utførelsen er beskrevet i kapittel 4.1.1. Dataene er fremstilt og evaluert i en Excel-fil som er vedlagt i del III, vedlegg 6. Tabell 4.1 viser en enklere fremstilling av resultatene. Det ble gjennomført seks ulike tester, hvor man varierte vegoverbygningene fra test til test. Dette ved å forandre materialene i konstruksjonen og tykkelsene. I tabell 4.4 kan man se disse forandringene, og hvilke materialer som ble brukt. Forskjellene ga litt forskjellige tøyningssituasjoner, som igjen ga litt forskjellige resultater. I siste kolonne i tabell 4.1 er det gitt hvor mye større tøyningene i PMS Objekt er i forhold til MMOPP. Gjennomgående har PMS Objekt 4-6% høyere tøyninger enn MMOPP. Dette tallet er nokså konstant.

Det er i tabell 4.2 og 4.3 gitt resultatene for å vurdere horisontal tøyningene opp mot krav. Man ser i tabell 4.2, hvor det vurderes opp mot PMS Objekt sine krav, at ingen av vegoverbygningene er innenfor kravet. Dette indikeres med et minustegn. I tabell 4.3, ser man at alle de horisontale tøyningene er innenfor kravet til MMOPP. Dette indikeres med et positive tall.

Tabell 4.1: Horisontale tøyninger i underkant av asfaltlagene i PMS Objekt og MMOPP

Resultat tøyingsanalyse							
Test	Lag	Hvor	Type	Beregnet ε i MMOPP [μ s]	Beregnet ε i PMS Objekt [μ s]	Forskjell	Forskjelle [%]
A	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	128,1	121	7,1	5,5 %
B	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	126,2	121	5,2	4,1 %
C	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	125,2	120	5,2	4,2 %
D	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	127,4	122	5,4	4,2 %
E	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	127,9	121	6,9	5,4 %
F	1-3	Bunn av bærelag	Horisontal tøyning, ε	121,7	116	5,7	4,7 %

Tabell 4.2: Testing av horisontale tøyninger mot kriteriet i PMS Objekt

Horisontale tøyninger opp mot kriteriene satt i PMS Objekt					
Test	Kriterier i PMS Objekt	Bregnede Ntill, bb i MMOPP	Innenfor krav?	Bregnede Ntill, bb i PMS Objekt	Innenfor krav?
A	17 076 102	2 806 081	-14270021	3 524 968	-13551134
B	17 076 102	2 978 923	-14097179	3 524 968	-13551134
C	17 076 102	3 075 242	-14000860	3 643 944	-13432158
D	17 076 102	2 868 263	-14207839	3 410 808	-13665294
E	17 076 102	2 823 673	-14252429	3 524 968	-13551134
F	17 076 102	3 444 565	-13631537	4 173 157	-12902945

Tabell 4.3: Testing av horisontale tøyninger mot kriteriet i MMOPP

Horisontale tøyninger opp mot kriteriene satt i MMOPP					
Test	Kriterier i MMOPP	MMOPP	Innenfor krav?	PMS Objekt	Innenfor krav?
A	128,5	128,1	0,4	121,0	7,5
B	128,5	126,2	2,3	121,0	7,5
C	128,5	125,2	3,3	120,0	8,5
D	128,5	127,4	1,1	122,0	6,5
E	128,5	127,9	0,6	121,0	7,5
F	128,5	121,7	6,8	116,0	12,5

Tabell 4.4: Materialvalg i testene

Materialvalg ved testing						
Test	Lag	Name			Thickness	E-verdi
A	Slit-, Bind- og Bærelag	45 AB 70/100	40 ABB Mod.	GAB 0 70/100	271	2755
	Forstl.	SG I			290	350
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			440	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40
B	Slit-, Bind- og Bærelag	45 AB 70/100	40 ABB Mod.	GAB II 40/60	236	3809
	Forstl.	SG I			310	350
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			440	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40
C	Slit-, Bind- og Bærelag	45 SMA Mod.	40 ABB Mod.	GAB II 40/60	231	4051
	Forstl.	SG I			310	350
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			450	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40
D	Slit-, Bind- og Bærelag	45 AB 70/100	40 GAB 0 70/100	GAB II 40/60	240	3609
	Forstl.	SG I			310	350
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			440	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40
E	Slit-, Bind- og Bærelag	35 SMA Mod.	45 GAB 0 70/100	GAB I 70/100	272	2736
	Forstl.	SG I			290	350
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			430	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40
F	Slit-, Bind- og Bærelag	SMA Mod.	ABB Mod.	GAB II 40/60	257	4141
	Forstl.	Knust Asfalt (KAS)			270	250
	Frostskl.	Bundsikring II $U \leq 3$			460	100
	Undergrunn	Frosttvilvsom			-	40

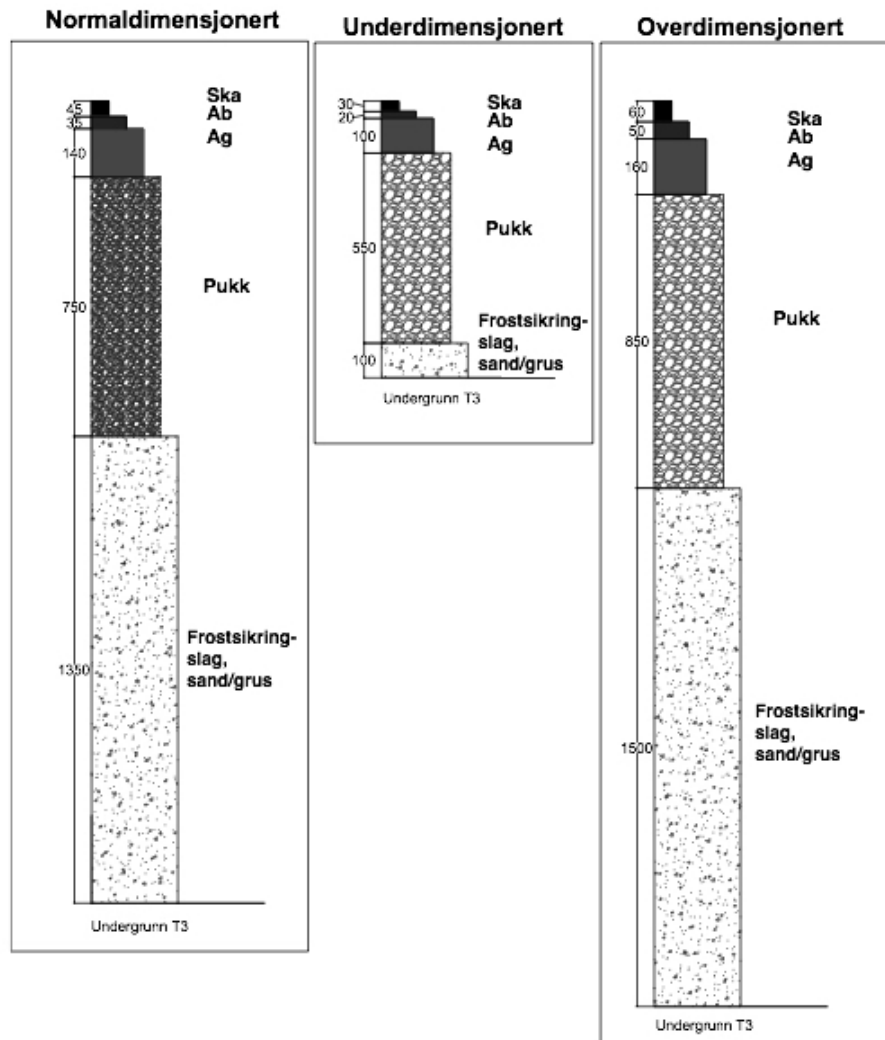
4.2.2 Resultat av sammenligning av vegoverbygninger

Denne testen er delt opp i tre deler. Utførelsen av denne testen er forklart i kapittel 4.1.2, mens i dette kapittelet vil det bli gitt resultater.

Normal-, under- og overdimensjonert- vegoverbygning

Det ble gjennomført en beregning etter den norske empiriske dimensjoneringsmetoden, og ved bruk av denne ble det kommet frem til en normal dimensjonert vegoverbygning. Det ble i tillegg laget en under- og overdimensjonert vegoverbygning, som begge var langt over eller langt under kravene fra indeksmetoden, kapittel 3.1. Alle tre vegoverbygningene ble brukt i uttesting av programmene. De ble lagt inn som inngangsparametere, sammen med trafikk- og klimadata fra Gardermoen/Skedsmo/Berger, og programmene gjorde sine beregninger utfra dem. Videre, i tabell 4.5, 4.6 og 4.7, blir resultatene fra denne testen lagt frem. Et pluss tegn

indikerer at resultatet er innenfor krav og et minus tegn indikerer at resultatet er utenfor krav. Vegoverbygningene som ble beregnet etter det norske empiriske dimensjoneringsmetoden er gitt i figur 4.2. Den fullstendige utregningen av den norske empiriske metoden er gitt i del III, vedlegg 2. Der vises det hvordan hele den norske metoden fungerer i praksis idag.



Figur 4.2: Utsnitt av normal-, under- og overdimensjonerte vegoverbygninger

Norsk empiriske vegoverbygning vs. MMOPP

I dette underkapittelet ser man hvilke resultater MMOPP ga ut under de den første delen av testen. Siden det ligger inne forhåndsbestemte tykkelser på slit- og bindlag var det ikke mulig å legge inn de norske empiriske vegoverbygningene som gitt. Det ble valgt lagtykkelser så nærme som mulig, og den totale tykkelsen ble overholdt. Det ble i tillegg valgt materialvalg så likt som den norske empiriske vegoverbygningen som mulig. Resultatene er gitt som plusstegn og minustegn i tabell 4.5, og det er gitt fire tegn tilsammen. Hvert tegn gir et resultat for et lag. Første tegn er asfaltlagene, andre tegn er forsterkningslag, tredje tegn er frostsikringslag og det siste tegnet indikerer resultatet fra undergrunnen. Resultatet indikerer at den normaldimensjonerte vegoverbygningen ikke er innenfor krav i lag 2, forsterkningslaget, hvor kravet til tillatte vertikale spenninger ikke overholdes. I den underdimensjonerte vegoverbygningen var det kun frostsikringslaget som var innenfor kravet til tillatte vertikale spenninger. Derimot var den overdimensjonerte vegoverbygningen innenfor krav for alle lag. Likevel var forsterkningslaget bare litt over kravet. Det fullstendige resultatet hentet fra programmene er vist i del III, vedlegg 4. Etttersom programmet ikke gir ut resultatene som filer ved innleggelse av egendefinerte tykkelser er det tatt skjermbilde av programmet og dets oppsett som vises i vedlegget.

Tabell 4.5: Resultat MMOPP

Resultat MMOPP						
Lag	Type lag	Materiale	Lagtykkelse N200 [mm]	Materiale	Lagtykkelse MMOPP [mm]	Resultat
Normaldimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	45	SMA Mod.	45	+
	Bindlag	Ab	35	ABB Mod.	40	
	Bærelag	Ag	140	GAB	135	
2	Forst.lag	Pukk	750	SG I	750	-
3	Frost.lag	Grus	1350	Bundsikring II $U \leq 3$	1350	+
4	Undergrunn	T3		Frosttvivlsom		+
Total tykkelse [mm]		2320		2320		
Undedimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	30	SMA Mod.	30	-
	Bindlag	Ab	20	ABB	40	
	Bærelag	Ag	100	GAB	80	
2	Forst.lag	Pukk	600	SG I	550	-
3	Frost.lag	Grus	100	Bundsikring II $U \leq 3$	100	+
4	Undergrunn	T3		Frosttvivlsom		-
Total tykkelse [mm]		800		800		
Overdimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	60	SMA Mod.	55	-
	Bindlag	Ab	50	ABB Mod.	50	
	Bærelag	Ag	160	GAB	165	
2	Forst.lag	Pukk	850	SG I	850	+
3	Frost.lag	Grus	1500	Bundsikring II $U \leq 3$	1500	+
4	Undergrunn	T3		Frostvivilsom		+
Total tykkelse [mm]		2620		2620		

Norsk empirisk vegoverbygning vs. PMS Objekt

Det er i dette kapittelet gitt resultater fra det samme forsøket bare utført i PMS Objekt. Vegoverbygningene som ble lagt inn var den utregnede norske empiriske versjonen som er i henhold til norske kriterier, i tillegg til den over- og underdimensjonerte vegoverbygningen. Tabell 4.6 viser resultatene som er gitt ved hjelp tre tegn. Det første tegnet indikerer bæreevne i asfaltlagene, andre tegn indikerer bæreevne i undergrunnen og den siste indikerer telehiv og frostdybde. Tre plusstegn er gitt for den overdimensjonerte og den normaldimensjonerte vegoverbygningen, noe som indikerer at de begge er godt over kravene som er satt. Den underdimensjonerte er derimot i utenfor krav for både tele og bæreevne. Det fulle resultatet hentet fra programmene er vist i del III, vedlegg 5.

Tabell 4.6: Resultat PMS Objekt

Resultat PMS Objekt						
Lag	Type lag	Materiale	Lagtykkelse N200 [mm]	Materiale	Lagtykkelse PMS Objekt [mm]	Resultat
Normaldimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	45	Bitumenbundet slitlager	45	+
2	Bindlag	Ab	35	Bindlager	35	
3	Bærelag	Ag	140	Bitumenbundet bærlager	140	
4	Forst.lag	Pukk	750	Førstærkningslager	750	
5	Frost.lag	Grus	1350	Skyddslager	1350	
6	Undergrunn	T3		4a -Blandkornig jord >30%		+
Total tykkelse [mm]		2320		2320		+
Undedimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	30	Bitumenbundet slitlager	30	-
2	Bindlag	Ab	20	Bindlager	20	
3	Bærelag	Ag	100	Bitumenbundet bærlager	100	
4	Forst.lag	Pukk	600	Førstærkningslager	550	
5	Frost.lag	Grus	100	Skyddslager	100	
6	Undergrunn	T3		4a -Blandkornig jord >30%		-
Total tykkelse [mm]		800		800		-
Overdimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	60	Bitumenbundet slitlager	60	+
2	Bindlag	Ab	50	Bindlager	50	
3	Bærelag	Ag	160	Bitumenbundet bærlager	160	
4	Forst.lag	Pukk	850	Førstærkningslager	850	
5	Frost.lag	Grus	1500	Skyddslager	1500	
6	Undergrunn	T3		4a -Blandkornig jord >30%		+
Total tykkelse [mm]		2620		2620		+

Norsk empirisk vegoverbygning vs. ADtoPave

I denne testen ble det gjort det samme som de foregående kapitlene viser. Resultatet er gitt som et pluss eller et minus tegn, og dette er gitt i tabell 4.7. Plusstegnet indikerer at utmattingsforløpet er innenfor kravet, mens minustegn indikerer at vegoverbygningen er utenfor dette kravet. Den overdimensjonerte og den normaldimensjonerte vegoverbygningen er innenfor kravene til utmatting i ADtoPave, mens den underdimensjonerte er utenfor kravet. Det fulle resultatet hentet fra programmet er vist i del III, vedlegg 3. Etttersom programmet ikke gir ut resultatene som filer er det tatt skjermbilde av programmet og dets oppsett som vises i vedlegget.

Tabell 4.7: Resultat ADtoPave

Resultat ADtoPave						
Lag	Type lag	Materiale	Lagtykkelse N200 [mm]	Materiale	Lagtykkelse ADtoPave [mm]	Resultat
Normaldimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	45	ADS	45	+
2	Bindlag	Ab	35	ABS	35	
3	Bærelag	Ag	140	ATS	140	
4	Forst.lag	Pukk	750	ToB	750	
5	Frost.lag	Grus	1350	FSS	1350	
6	Undergrunn	T3		Boden		
Total tykkelse [mm]		2320		2320		
Undedimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	30	ADS	30	-
2	Bindlag	Ab	20	ABS	20	
3	Bærelag	Ag	100	ATS	100	
4	Forst.lag	Pukk	600	ToB	550	
5	Frost.lag	Grus	100	FSS	100	
6	Undergrunn	T3		Boden		
Total tykkelse [mm]		800		800		
Overdimensjonert vegoverbygning						
1	Slitelag	Ska	60	ADS	60	+
2	Bindlag	Ab	50	ABS	50	
3	Bærelag	Ag	160	ATS	160	
4	Forst.lag	Pukk	850	ToB	850	
5	Frost.lag	Grus	1500	FSS	1500	
6	Undergrunn	T3		Boden		
Total tykkelse [mm]		2620		2620		

Norsk empiriske vegoverbygning vs. MMOPP vs. PMS Objekt vs. ADtoPave

Det ble i del to av testen utregnet optimale vegoverbygninger fra alle programmene. Slit- og bindlag i alle programmene ble holdt konstant slik som lagene i den empirisk beregnede vegoverbygningen, mens de andre lagene ble justert til å i møtekomme kravene til hvert enkelt program. Likevel er de tilpasset slik at man er nærmest mulig kriteriet for ikke å få overdimensjonering. I MMOPP er denne prosessen automatisk, men i ADtoPave og PMS Objekt må bruker selv gjøre denne optimering. Denne prosessen er forklart i figur 4.1 i

kapittel 4.1.2. I tillegg ser man for PMS Objekt, under evaluering, at det står et tilde-symbol. Dette symbolet står for at bæreevnen i asfaltlagene er 10% unna kravet, men fortsatt over krav. Dette tegnet er en indikasjon på at vegoverbygningen ikke overdimensjoneres. Å få for mange plusstegn i programmet kan føre til overdimensjonering (Winnerholt og Viktorsson, 2015). I tabell 4.8 er alle de optimale vegoverbygningene satt sammen i en tabell. De ulike programmene har beregnet disse vegoverbygningene ut fra de samme klima og trafikkdataene, mens materialdataene følger programmene. Materialdataene er de samme som ble brukt i den første delen av denne testen. Disse materialene har, i størst mulig grad, fokusert på å være nærmeste mulig de materialene brukt ved den norske empiriske dimensjoneringsmetoden, vist i figur 4.2. Man ser ut fra tabell 4.8 at ADtoPave dimensjonerer den tynneste vegoverbygningen, mens den norske empiriske metoden har dimensjonert den tykkeste vegoverbygningen. PMS Objekt er det programmet som er nærmeste den norske modellen, men likevel er det 108 cm som skiller disse to. Det er i de nedre lagene, forsterkningslag og frostsikringslag, forskjellen mellom PMS Objekt og den norske modellen er størst. Likevel er det PMS Objekt sine lagtykkelser som er nærmest lagtykkelsene til den empirisk beregnede, med unntak av bærelaget hvor MMOPP er nærmest. MMOPP har i tillegg det desidert tykkeste bærelaget. Ved å ha et tykkere bærelag vil styrken forbedres betraktelig. Ut fra tabell 4.8 ser man at både MMOPP og ADtoPave har tynne frostsikringslag. Grunnen til dette er at programmene ikke tar hensyn til frost i sine beregninger. MMOPP tar ikke med klima i beregningene sine, men tar hensyn til undergrunnen som er noe telefarlig. ADtoPave har fastsatt undergrunn etter E-modul verdier og fokuserer her ikke på frosten, men har likevel med klimadata i sine beregninger. Klimadataene tas mer i betraktning ved høye temperaturer, hvor asfalten blir bløt og kan gi deformasjoner (Reinhardt, 2016). Del tre av denne testen, gitt i kapittel 4.2.2, tar hensyn til at programmene ikke er så sterke på frostberegningene.

Tabell 4.8: Sammenligning av de forskjellig dimensjoneringsprogrammene mot N200

Optimaldimensjonert vegoverbygning				
Description	N200	MMOPP	PMS Objekt*	ADtoPave
Total tykkelse	232 cm	100,6 cm	124 cm	72 cm
Slitelag	45 mm	45 mm	45 mm	45 mm
Bindlag	35 mm	40 mm	35 mm	35 mm
Bærelag	140 mm	161 mm	110 mm	90 mm
Forsterkningslag	750 mm	320 mm	400 mm	250 mm
Frostsikringslag	1350 mm	440 mm	650 mm	300 mm
Undergrunn	T3	Frostvivilsom	4a -Blandkornig jord <30%	Boden
Evaluering	-	++++	~++	+

* Symbolet tilde [~] betyr at vegoverbygningen er maximum 10% høyere enn kravet

Utmattningstest av vegoverbygning uten frostsikringslag for den norske empiriske modellen, MMOPP, PMS Objekt og ADtoPave

Ettersom forskjellene ble store i testen med beregninger av optimale vegoverbygninger, ble det i tillegg gjennomført en test for vegoverbygninger uten frostsikringslag. Denne testen ble gjennomført for å se hvor tykke lagene ble uten at utmattelse i vegoverbygningen oppstår. I denne testen ble det sett bort fra frostsikringslag og frost generelt. ADtoPave og MMOPP ble beregnet på vanlig måte uten frostsikringslag. Den norske empiriske modellen ble beregnet etter indeksmetoden, slik at overbygningen uten frostsikringslaget var innenfor bæreevnekrav. I PMS Objekt ble skadmodellen fortsatt brukt, mens telemodellen ble sett bort fra. Alle vegoverbygningene ble optimert på samme måte som tidligere og resultatene ble satt inn i tabell 4.9. I denne tabellen ser man at programmene nærmer seg noe mer i tykkelser på vegoverbygningene. Den empiriske modellen er fortsatt mye tykkere, men forskjellene på programmene er nå nede på 26 cm. Her får man også en god indikasjon over hvor mye tynnere vegoverbygningene ble ved å se bort fra frosten. Likevel er det fortsatt ADtoPave som har den tynneste vegoverbygningen, men nå er det MMOPP som er nærmest den norske empiriske modellen. Ettersom ønsket her er å undersøke om styrken var forskjellig for de ulike vegoverbygningene ble styrkeindeks beregnet for hver overbygning i denne delen, og denne beregningen vises i 4.10. Her ser man at MMOPP er den som er nærmest den norske empiriske vegoverbygningen i styrke. Lastfordelingskoeffisientene er satt etter de norske materialene. Denne testen er en tilnærming, og vil kun gi en indikasjon på hvor nærme de ulike vegoverbygningene er fra hverandre i styrke.

Tabell 4.9: Sammenligning av N200 og dimensjoneringsprogrammene uten frostsikringslag

Optimaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag				
Description	N200	MMOPP	PMS Objekt*	ADtoPave
Total tykkelse	107 cm	87,9 cm	70,5 cm	61,5 cm
Slitelag	45 mm	45 mm	45 mm	45 mm
Bindlag	35 mm	40 mm	35 mm	35 mm
Bærelag	140 mm	174 mm	125 mm	85 mm
Forsterkningslag	850 mm	620 mm	500 mm	450 mm
Undergrunn	T3	Frostvivilsom	4a -Blandkornig jord <30%	Boden
Evaluation	+	+++	+ ~	+

* Symbolet tilde [~] betyr at vegoverbygningen er maximum 10% høyere enn kravet

Tabell 4.10: Utregning av styrkeindeks for de ulike vegoverbygningene fra programmene og den empirisk beregnende

Lag	a_i	Styrkeindekser			
		N200	MMOPP	PMS Objekt	ADtoPave
Slitelag	3	$4,5cm \times 3 = 13,5$	$4,5cm \times 3 = 13,5$	$4,5cm \times 3 = 13,5$	$4,5cm \times 3 = 13,5$
Bindlag	3	$3,5cm \times 3 = 10,0$	$4,0cm \times 3 = 12,0$	$3,5cm \times 3 = 10,0$	$3,5cm \times 3 = 10,0$
Bærelag	3	$140cm \times 3 = 42,0$	$174cm \times 3 = 52,2$	$125cm \times 3 = 375$	$85cm \times 3 = 255$
Forsterkningslag	1,1	$850cm \times 1,1 = 93,5$	$620cm \times 1,1 = 68,2$	$500cm \times 1,1 = 550$	$450cm \times 1,1 = 495$
Total styrkeindeks, SI		159,5	145,9	116,5	99

4.2.3 Resultater fra analyse av brukervennlighet

I dette forsøk ble programmene analysert etter brukerperspektivet. Det ble sett på hvilke inngangsparametere programmet trenger for å kunne utføre beregninger, hvilke resultater man kunne hente ut fra programmene og hvilke tilleggsapplikasjoner de forskjellige programmene har innlagt. Til slutt ble det sett på de positive og negative brukeropplevelsene som har kommet frem under de ulike forsøkene som ble beskrevet i foregående kapitler. Tabell 4.11 viser inngangsparameterne, resultat og ekstra funksjoner i hvert program. Man ser i denne tabellen at det er noen av parameterne som gjentar seg, mens noen er veldig ulike fra program til program. Dessuten er det mange av resultatsparameterne som er ulike. Dette gir forskjellige muligheter i forhold til hva man ønsker å se på og hvilke resultater man er ute etter. I tillegg er mengden av tilleggsapplikasjoner veldig forskjellig. ADtoPave har veldig få, årsaken kan være at dette programmet fortsatt er i oppstartsfasen. Ønsket er å utvikle dette programmet til å gi ut flere type resultater og ha flere ekstra applikasjoner (Zeissler, 2016). PMS Objekt på den andre siden har mange avanserte funksjoner, som kan gi ekstra resultater. Det krever litt mer øvelse for å utføre disse, men det er en god mulighet for å finne akkurat det man er ute etter. Siden det i denne omgang ble sett på den analytisk-empiriske metoden til MMOPP er dimensjonering ved hjelp av simulering lagt til som en ekstra funksjon. Dette er en helt egen del av programmet, som utfører simuleringer og gir ut andre resultater enn den analytisk-empiriske metoden.

Tabell 4.11: Brukergrensesnittet til programmene

Brukergrensesnitt			
N200	ADtoPave	MMOPP (Analytisk-Empirisk)	PMS Objekt
Inngangsparametere:	Inngangsparametere:	Inngangsparametere:	Inngangsparametere:
Dimensjoneringsperiode	Aksellastfordeling	Dimensjoneringsperiode	Dimensjoneringsperiode
Frostmengde	Dimensjoneringsperiode	Fart	Fart
Grunnforhold	Forskjellige parametere til beregning finnes i brukermanual/i programmet	Grunnforhold	Feltbredde
Trafikkøkning	Grunnforhold	Materialvalg i programmet	Forskjellige parametere til beregning finnes i brukermanual/i programmet
Ønskede materialvalg	Klimafordeling	Trafikkøkning	Grunnforhold
ÅDT	Klimagradiant gjennom vegoverbygningen (valgfri)	Ønskede materialvalg	Klimasone
ÅDT _{TUNG}	Materialdata (frekvens, temperatur, fasevinkel = masterkurve)	ÅDT	Materialvalg etter klimatiske forhold
	“Standard vegoverbygning” ved start av beregning	ÅDT _{TUNG}	Skulderbredde
	Trafikkøkning		“Standard vegoverbygning” ved start av beregning
	ADT		Total vegbredde
	ADT _{TUNG}		Trafikkøkning
			Type veg
			VViS-Stasjon
			ADT
			ADT _{TUNG}
Resultat:	Resultat:	Resultat:	Resultat:
Dimensjonerende trafikkmengde	Maksimal antall aksellaster	E- verdier for hvert lag	ESAL
Vegovebygning i overensstemmelse med tabeller i N200	Prognose ved 100% utmatting	Levetid	Frostdybde
	utmatningsstatus ved endt dimensjoneringsperiode	Optimal vegoverbygning	Kritiske tøyninger i asfaltlag, undergrunn og ved plate-test av asfaltlag
		Responderende spenninger i lag 2, lag 3 og undergrunn	Telehiv
		Responderende tøyning i lag 1 (asfaltlagene)	Tillatt antall standard aksler for asfaltlagene, undergrunn og ved plate-test av asfaltlag
		Tillatt tøyning i lag 1 (asfaltlagene)	
		Tillatte spenninger i lag 2, lag 3 og undergrunn	
Ekstra:	Ekstra:	Ekstra:	Ekstra:
	Kan legge inn og få estimert kostnader	Simulering med output IRI, spordybde, E-verdi(sprekkdannelse), her tas også klimaet inn til betraktning	Avanserte funksjoner: - Avansert bæreevneberegning - Avansert enkel lastberegning - Falloddsberegninger - Nedbrytning av vegoverbygningen (piggdekkslitasje) - Vegoverbygningsmassenes egenskaper - Volum og kostnadsberegninger

Tabell 4.12 viser de positive og negative brukeropplevelsene som er oppfattet gjennom

testperioden og ved forfatters opplæring i programmene. Det er i denne vurderingen tatt utgangspunkt for en norsk bruker som kan forstå nordiske og engelsk språk. Det er her tatt med litt forskjellige meninger, og tyngden av meningen kan variere. Slik som at ADtoPave har fått et negativt trekk fordi programspråket er på tysk, noe som igjen gjør det vanskelig å bruke for en norsk bruker. Dette er noe som er under bearbeidelse, og etter hvert vil programmet få engelsk språk. Derfor er dette en negativitet som teller lite i det lange løp. Ser man på PMS Objekt, tar programmet kun inn klimasoner i Sverige. Dette gjør at det ikke er mulig å legg inn egendefinerte klima. Dette teller mer negativt ettersom man må forandre deler av programmet for å kunne få det til å passe til norske forhold. Da må man få delt inn Norge i soner og deretter legge dette inn i selve programvaren. Det gjør ikke programmet veldig fleksibelt for brukere utenfor Sverige. Det vil bli gått mer inn på resultatene fra tabell 4.12 i diskusjonene.

Tabell 4.12: Vurdering av brukergrensesnittet

Brukergrensesnitt			
N200	ADtoPave	MMOPP (Analytisk-Empirisk)	PMS Objekt
Pluss (+):	Pluss (+):	Pluss (+):	Pluss (+):
Enkel i bruk, på norsk, med alt forklart i N200	Man ser hele utmattingsforløpet og antallet aksellaster som fører til 100% utmatting	Beregner den optimale vegoverbygningen selv, ut fra gitte inngangsparametere	Teleberegning som gir gode data som er viktige i forhold til norske forhold
	Enkelt og greit oppsett av programmet med god oversikt	Enkelt og oversiktlig oppsett	Godt oppsett med enkelt oppsett
	Grei engelsk oversettelse av brukerveiledning	God brukerveiledning	God brukermanual, med følgende krav og råd
Minus (-):	Minus (-):	Minus (-):	Minus (-):
Ikke spesifisert for hvert enkelt prosjekt	Tar ikke med teleproblematikk	Ikke egendefinerte materialer	Klimasoner/VViS-stasjoner kun for Sverige
Kan lede til feildimensjonerings	Må justere seg frem til optimal vegoverbygning selv	Klima tas ikke med i denne delen av beregningen	Må justere seg frem til optimal vegoverbygning selv
Tar ikke inn nye materialer eller nye metoder	Mye og kompliserte materialdata	Vanskelig å få spesifisert for hvert enkelt prosjekt. Noe enklere ved simulering, men mye ligger allerede inne i programmet og er vanskelig å justere	
	Programspråk tysk, og tyske håndbøker, lite oversettleser annet enn brukerveiledning		

4.3 Diskusjon

4.3.1 Sammenligning av MMOPP og PMS Objekt

Det ble gitt i resultatet, kapittel 4.2.1, at tøyningene i PMS Objekt er noe høyere enn i MMOPP. Tabell 4.1, i kapittel 4.2.1, viser faktisk 4-6% høyere verdier for PMS Objekt enn MMOPP. Årsaker til dette kan være at programmene bruker forskjellige beregningsmodeller. PMS Objekt bruker beregningsprogrammet BISAR mens MMOPP bruker WESDEF. Forskjellene her kan ligge i den matematiske beregningsteknikken til de ulike beregningsmodellene. Det kan være forskjell i måten disse modellene beregner seg frem til tøyningene på. Man vet i tillegg at det ligger en feilkilde i tilnærmingen av at $5t = 50\text{kN}$, 50kN tilsvarer egentlig 5098kg . Dette fører til at lastmodellen i de ulike programmene er noe forskjellig, og kan føre til ulike resultater. Man vet heller ikke tverrkontraksjonstallet, ν , for materialene som er lagt inn i programmene. Forskjeller i ν kan også gi et utslag på utregningen av de horisontale tøyningene. PMS Objekt tar i tillegg inn flere materialeegenskaper enn det MMOPP gjør. Disse egenskapene er vanninnhold, tørrdensitet, porøsitet, vannmetningsgrad, varmeledningsevne fryst og varmeledningsevne ufryst (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Disse ble satt i forhold til standard i PMS Objekt, men likevel er dette parametere som ikke er med i beregningen i MMOPP. Det er likevel usannsynlig at disse parameterne vil gi store utslag ettersom de i første omgang legges inn på grunn av frostberegningen i PMS Objekt. Dersom det er noe påvirkning fra disse parameterne vil det i så fall være som en innvirkning på E-modulen til de ulike materialene i vegoverbygningen.

I den andre delen av denne testen ble det sett på de horisontale tøyningene opp mot kriteriene i de ulike programmene. Fra kapittel 4.2.1, tabell 4.2 og 4.3 ser man at vegoverbygningene er innenfor krav i MMOPP, men utenfor krav i PMS Objekt. Ut fra dette kan man trekke slutningen at PMS Objekt har noe strengere krav enn MMOPP. Det er satt gjennomsnittlige tall som ikke er fullt så gode som de programmene selv beregner. Likevel gir det en god indikasjon på hvor stor variasjon det er fra kravene i programmene til til de beregnede verdiene. Man ser fra resultatene, gitt fra PMS Objekt, til de manuelle beregningene at det er en variasjon på tusen aksler på det meste, se tabell 4.2 i kapittel 4.2.1. Denne variasjonen har likevel lite å si når forskjellen til de ekvivalente standardakslene er på millioner aksler 3.4.2. Ut fra dette kan man anta at denne testen gir en akseptabel indikasjon på hvordan de horisontale tøyningene ligger i forhold til krav. Ved å teste MMOPP sine resultater opp mot PMS Objekt sine krav, og vice versa, kunne man se hvor strenge kravene var i forhold til resultatene.

Ut fra beregningene i denne oppgaven er det funnet høyere horisontal tøyninger i PMS Objekt enn MMOPP, og at PMS Objekt har strengere krav enn MMOPP.

4.3.2 Sammenligning av vegoverbygninger

Ut fra tabell 4.5, 4.6 og 4.7 fra kapittel 4.2.2 kunne man dra noen slutninger om hvordan de ulike programmene vurderte ulike vegoverbygninger. Den normaldimensjonerte vegoverbygningen beregnet ut fra den norsk-empiriske beregningsmodellen var innenfor kriteriene i både PMS Objekt og ADtoPave. Derimot var den ikke innenfor i alle lag i MMOPP. Ut fra dette ser man at hvert av programmene evaluerer vegoverbygningene ulikt. Dersom man ser på den overdimensjonerte og den underdimensjonerte vegoverbygningen stemte alle programmene overens. Den overdimensjonerte var over krav mens den underdimensjonerte var under krav. Dette viser at ved store utslag i vegoverbygningen vil programmene trekke de samme slutningene, mens ved mer optimale løsninger vil de gi forskjellige resultat. Alle tre dimensjoneringsprogrammene ser på utmatting i underkant av asfaltlagene (kapittel 3), og gir ut verdier for dette. For denne delen har alle tre programmene også gitt ut de samme vurderingene. Det vil si at det ene symbolet i ADtoPave, det første symbolet i PMS Objekt og det første symbolet i MMOPP er like for de ulike vegoverbygningene, se tabell 4.5, 4.6 og 4.7 under kapittel 4.2. De nordiske programmene ser i tillegg på deformasjoner i undergrunnen ved beregning av vertikale tøyninger eller spenninger. MMOPP vurderer i tillegg vertikalspenningene i forsterkningslag og frostsikringslag (kapittel 3.4.3), mens PMS Objekt i stedet vurderer tele (kapittel 3.4.2). Det er derfor i disse delene at hovedforskjellene i vurdering av vegoverbygninger oppstår. Grunnen til at MMOPP gir en annen vurdering av den normaldimensjonerte vegoverbygningen enn de to andre programmene er at dette faller innenfor vertikalspenninger i forsterkningslaget som ikke er mulig å sammenligne med de andre.

Ser man videre på de optimale vegoverbygningen, vist i 4.8 i kapittel 4.2.2, er det store forskjeller. Det er hele 160cm i forskjell fra den empirisk dimensjonerte til ADtoPave sin optimerte vegoverbygning. Mesteparten av denne forskjellen skyldes frostsikringslaget. Siden ADtoPave ikke har med tele i beregningene sine er dette en grunn for den store forskjellen. MMOPP og PMS Objekt er noe mer like og nærmere den empiriske modellen. Likevel er det 108cm fra PMS Objekt, som har den tykkeste vegoverbygningen, til den empiriske modellen. Det man også ser er at MMOPP har mye tykkere asfaltlag. Mens PMS objekt og ADtoPave har 190mm og 170mm tykke asfaltlag, har MMOPP hele 246mm. Her kan det være en styrkeforskjell, men dette testes ved indekismetoden i neste del av denne testen. Grunnen til at asfaltlaget blir satt tykkere er sannsynligvis fordi kriteriesettingene er forskjellige. Ut fra den første testen ser man at horisontal tøyningene ikke har så store forskjeller at det ville gitt så store utslag i lagtykkelser. Derfor er det rimelig å anta at forskjellene ligger innenfor kriteriesettingen.

Siden ADtoPave ikke tar med frostsikring i beregningen av utmatting, kapittel 3.4.1, er det også gjennomført en utmattingstest for en vegoverbygning uten frostsikringslag. Ved å fjerne frostsikringslagene, kan man kun fokusere på utmattingen til de ulike vegoverbygningene, og se bort fra deformasjon og frost. I tabell 4.9 i kapittel 4.2.2 ser man hvilke resultater denne delen

endte opp med. I tabellen ser man at verdiene for vegoverbygningstykkelser er noe mer samlet, men likevel er tykkelsen for den empiriske modellen noe høyere. Det er her en forskjell på 26,4cm mellom de ulike programmene. I tillegg er det mellom ADtoPave, den smaleste overbygningen, og den empiriske modellen 45,5 cm. Man ser likevel en reduksjon i forskjellene i forhold til testen med sammenligning av optimale vegoverbygninger. Det man kan se her er at PMS Objekt er mer lik ADtoPave, noe som indikerer at utmattingsberegningene i disse programmene er like. Ut fra beregningen av de optimale vegoverbygningene med frostsikringslag var forskjellene mellom disse programmene store, noe som indikerer at telemodellen i PMS Objekt har stor påvirkning med valg av tykkelse på vegoverbygningen. I forsøket av optimale vegoverbygninger var forskjellen mellom total tykkelse ADtoPave og PMS Objekt 52cm, mens i utmattningstesten er forskjellen i total tykkelse kun 9cm. Dette viser at en stor forskjell skjer fra å ha med frostsikringslag til ikke å ha det med. Siden man ser likhetene i bæreevneberegningene, kan det i tillegg tyde på like materialdata. Den største forskjellen i disse programmene finnes i bærelaget. Dette kan være på grunn av at materialet brukt som standard i ADtoPave er stivere enn det som brukes lengre nord i Europa. Hovedproblemene til Tyskland er deformasjoner og utmatting på grunn av varme, og derfor må det brukes stivere asfalt. Penetrasjonsverdien på bitumen i Tyskland er ofte på 10/40 (Zeissler, 2016). PMS Objekt har derimot like klimatiske forhold som Norge og vil i større grad bruke mykere asfaltlag som kan holde mot tele. Det er her oftere brukt bindemiddel med penetrasjonsverdi på 70/100 (Andersson og Winnerholt, 2011a). MMOPP har her også de desidert tykkeste asfaltlagene med 259 mm, opp mot 205 mm og 165 mm i PMS Objekt og ADtoPave. Ut fra styrkeindeksberegningen i tabell 4.10 i kapittel 4.2.2 ser man at det MMOPP som har den høyeste styrkeindeksen av programmene. Tykke asfaltlag har da en stor påvirkning på denne beregningen, siden disse lagene har høye lastfordelingskoeffisienter. Når asfaltlagene er tykkere enn i den empiriske dimensjoneringsmodellen gjør dette nesten opp for tynnere forsterkningslag. Derfor ser man at styrkemessig er MMOPP sin vegoverbygning nærmest den empiriske dimensjonerte vegoverbygningen. Og begge disse har en del høyere styrkeindeksverdier enn de to andre programmene.

Ut fra dette kan man se at MMOPP har noe høyere styrkeindekser enn de andre programmene, mens PMS Objekt har den tykkeste vegoverbygningen når man tar tele i betraktning.

4.3.3 Analyse av brukervennlighet

Det er både fordeler og ulemper med empirisk dimensjoneringsmetode slike som den man bruker i Norge. Fordelene med denne metoden er at den er enkel i bruk, og har enkelt definerte parametere. Det er en enkel opplæringsprosess ved å følge eksempler som allerede er gitt i “Håndbok N200 Vegbygging” (Statens vegvesen, 2014b). Metoden gir i tillegg raske svar ved at parametere og formler allerede er gitt i håndboken. Likevel er det større ulemper med denne metoden. Parameterne som ligger i håndbøkene er standardiserte og gir ikke gode indikasjoner

på hvordan forholdene er på et enkelt prosjekt. De viser i svært liten grad særegenskaper for et gitt prosjekt og de er ofte svært forenklet. Dette gjør at over-og underdimensjonerings av vegoverbygninger kan oppstå. Ved underdimensjonering kan skademekanismer oppstå som videre kan føre til redusert sikkerhet for trafikantene. Ved overdimensjonering vil man ha benyttet for mye materialer, som gir en høy kostnad på vegen. Metoden tar heller ikke inn nedbrytningsforløpet, utmatting eller vegoverbygningen respons i betraktning. Dersom det kommer inn nye metoder eller materialer er ikke dimensjoneringsmetoden egnet til å se på disse forandringene. Det er store forskjeller mellom programmene testet ut og den ferdige beregnede vegoverbygningen fra N200. Dette kan på et vis indikere at det er mange måter å dimensjonere på, og muligheten for feildimensjonering er tilstede.

Det er av forfatter funnet en del meninger om de ulike programmene i tidligere utgitte rapporter, som er beskrevet i litteraturstudiet “Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger” (Trangen, 2015). Disse er tatt med for å få inn en større belysning av sterke og svake sider ved programmene.

Jesper Elsander påpeker de sterke og svake sider for PMS Objekt i rapporten utgitt av Saba mfl., 2006, og de er:

“Styrkene ved modellen er at det gir økonomisk akseptable vegger i hele landet, dimensjoneringssystemet er validert med observerte sprekker på vegen og gir nokså gode resultater. Den er i tillegg bygd på velprøvde teknologier, og i forhold til tele er det realistiske temperaturdata som er tatt med. Svakheterne med programmet er at det kun tar med utmattingsproblematikk, ikke deformasjoner som spordannelse. Systemet tar kun inn standard materialer, og det er da ikke lov å ta inn andre typer materialer, spesielt i forhold til flere typer fleksible dekker. Det er heller ikke oppgitt realistiske verdier for stivhetsmodul, disse verdiene er dermed bare tatt direkte fra modellen.” (Saba mfl., 2006, egen oversettelse)

Disse sterke og svake sidene er tatt i forhold til programmet fra 2000, utprøvingene i denne masteroppgavene er gjort med nyere versjon av PMS Objekt, PMS Objekt 5.0.1. Det er nå mulig å legge inn egne materialer og spordannelser som en avansert funksjon. Likevel er det kun spordannelse grunnet piggdekkslitasje som er tatt til betraktning (Winnerholt og Viktorsson, 2015). Det er ingen av inngangsparameterne som er veldig vanskelig å innhente, men det er et problem å bruke svenske klimadata for norske forhold. Man kan bruke klimasoner og VViS-stasjoner som er like de norske forholdene man ønsker å se på, men dette er noe tungvint. Det er heller ikke alltid like lett å finne disse likhetene, og i denne oppgaven ble Tomas Winnerholt kontaktet for innhenting av disse dataene. PMS Objekt sin store fordel er telemodellen. Dette programmet er det eneste programmet i testene gjort i denne oppgaven med fokus på tele. Telehiv er et kjent problem i Norden, og som er viktig å ta til betraktning

ved nybygging av veger. Programmet er noe mer komplisert enn for eksempel MMOPP, men en god manual gjorde opplæringsprosessen noe enklere. Skal man se med norske øyne må man likevel gjøre en rekke justeringer for å kunne implementere dette programmet i Norge. Alle klimasonene og VViS-stasjonene, se kapittel 3.4.2, er satt i forhold til Sverige. I Norge må man da finne et likt system å legge inn store mengder klimadata i programmet, for så å kalibrere det opp mot disse. I tillegg lager ikke programmet den optimale vegoverbygningen selv, dette må bruker selv gjøre. Dette fører til at man kan få feilkilder ved at man justerer på forskjellige lag for å komme frem til den optimale vegoverbygningen.

For MMOPP ble det også funnet sterke og svake sider utgitt i tidligere rapporter (Trangen, 2015). I rapporten utgitt av Saba mfl., 2006 er det skrevet:

“Fordelene med programmet er at det er dimensjonert på grunnlag av fysiske parametere som er dannet ved utprøving i en dansk testmaskin. Den er kalibrert etter danske data, og dette gjør den enkel i bruk for dimensjonering av vegeer i Danmark. Likevel er det mulig å kalibrere MMOPP for andre land og forhold. MMOPP er også relativt enkel i bruk, dette inkluderer innsamling av data.” (Saba mfl., 2006, egen oversettelse)

I tillegg er det i denne rapporten gitt negative sider ved programmet ved at flere av faktorene som strukturell nedbrytning (sprekker) og permanente deformasjoner (jevnheter og spordannelse) er vanskelige å kalibrere (Saba mfl., 2006). Og i “Vurdering av EDB-system for beregning av nedbrytning av veg” (Evensen, 2007) er det nevnt at “det ikke er noen verktøy som kobler fuktforholdene til vegoverbygningen inn i programmet. Det er kun E-modulene under de forskjellige klimaperiodene som er tatt med” (Evensen, 2007). Ut fra forfatter og andre rapporter kan man si at MMOPP er et enkelt program å sette seg inn i. Forfatter har også konkludert med at dette programmet er enklest å lære. Det har gode håndbøker og en god brukerveiledning som kommer godt med under opplæringsprosessen. Det gir gode og oversiktlige resultater, som enkelt kan benyttes videre. Heller ingen av inngangsparameterne var kompliserte å innhente. Likevel, som beskrevet i sitatene, er det litt vanskelig å se alle resultatene i sammenheng med prosjektet man ønsker å bygge. Det er i tillegg i den analytisk-empiriske delen av MMOPP ikke tatt med klimaparametere. Dette gjør at man i mindre grad kan se hvordan for eksempel tele utarter seg i vegkroppen. Det er forhåndsinnlagte materialdata som gjør det enkelt å forstå hvilke materialer som kan benyttes i forhold til trafikkklasse, se kapittel 3.4.3. Likevel kan man ikke legge inn egendefinerte materialer som gjør det vanskelig å teste i forhold til norske materialdata. Norske materialdata bør legges inn i MMOPP for bedre tilpasning til norske forhold. Ved bruk av dimensjonering ved simulering bør programmet i tillegg kalibreres for norske klimadata.

ADtoPave er helt nytt, og ikke helt ferdig utviklet. Derfor er det heller ikke mange meninger om programmet enda. Det man kan se fra forsøkene gjort i denne masteren er at programmet har et

akseptabelt og brukervennlig oppsett. Det gir resultat hvor man kan se hele utmattingsforløpet til vegoverbygningen, og i tillegg få ut maks antall overfarter før total utmatting. Ut fra disse parameterne kan man se når vegoverbygningen ikke vil holde kriteriene lengre. Likevel er det en del negative sider ved programmet. Av inngangsparameterne er det materialdataene for asfaltlagene og aksellastfordelingen som er vanskelig å innhente. Dette er datamateriale som til nå er lite brukt i Norge. Materialdataene for asfaltlagene består av mange materialparametere og er kompliserte å legge inn. Likevel gir det gode materialdata som er riktige med tanke på reelle forhold ute på prosjektet, se kapittel 3.4.1. Man må i dette programmet, slik som i PMS Objekt, gå frem og tilbake mellom vegoverbygningen og resultatet for å optimere vegoverbygningen. Dette kan fort føre til feilkilder ved at det er opp til hver enkelt person hvordan denne optimeringen gjøres. Til slutt er det et problem med språket, og det er vanskelig å teste ut dette programmet uten tyskkunnskaper. Det er blitt oversatt en brukerveiledning, men selve programspråket er fortsatt på tysk. Engelsk programspråk er under utvikling, men det kan ta noe tid før hele programmet og alle håndbøkene er oversatt. Justeringer som bør gjøres for norske forhold å inkludere klimaberegninger innen frost, i tillegg bør programmet være på et skandinavisk eller engelsk språk.

Til slutt er det gitt en oppsummerende tabell som gir alle inngangsparameterne i kategorier. Her ser man forskjellen i kompleksitet, og man ser i tillegg hva man trenger for å kunne kjøre beregninger i programmene. Dette gir en indikasjon på hvor mye arbeid som må legges i det å samle inn data. Resultatsparameterne viser hva man får ut av programmet, og kan gi en indikasjon på hvordan man bør gå frem videre i sluttprosessen ved dimensjonering av vegoverbygningen. Det er i denne tabellen kun sett på parametere som legges direkte inn i programmet. I nomenklaturen, under kapittelet diskusjon, ser man hva de forskjellige symbolene/forkortelsene står for.

Tabell 4.13: Input og output i programmene brukt under testene

Parametertype	MMOPP*	PMS Objekt***	ADtoPave
Input			
Material	Forhånds definert	$E_{n,i}$	E
		ω	f
		ρ	T
		η	E_{v2}
		σ_r	φ
		$\lambda_{fr} / \lambda_{ufr}$	
		Standard undergrunn	
Klima	-	klimasone	T_n
		VViS-stasjon	
Trafikk	$N_{\#10}/\text{år}$	ADT _k	A_n
	p	f_a	p
	v_{min}	f_b	ADT _T
	v_{maks}	f_c	f_A
	standard lastmodell**	B	f_1
		ADT _T	f_2
		p	f_3
		p_z	
		r	
Vegens geometri	Ligger inne i $N_{\#10}/\text{år}$	v	Standard vegoverbygning
		feltbredde	S_t
		vegbredde	h_{tot}
		“Standard vegoverbygning”	
		Skulderbredde	
	Vegtype		
Annet	n	n	n
			F_n SF
Resultat			
Output	E	N_{eku}	N_{max}
	ε	$N_{till,bb}$	D_t
	$\sigma_{z,n}$	$N_{till,te}$	D_{prog}
	n_n	$\varepsilon_{enkeltlast}$	K
		$\varepsilon_{bb,i}$	
		$\varepsilon_{te,i}$	
		$\varepsilon_{enkeltlast,i}$	
	Frostdybde [mm]		
	Telehiv [mm]		

* analytisk empirisk

** Kan legge inn egendefinert

*** Det er ikke tatt med avanserte funksjoner

Kapittel 5

Konklusjon

Man har i denne oppgaven hatt som mål å få et bedre innblikk i teoriene bak forskjellige dimensjoneringsprogrammer, og hvordan de fungerer for norske forhold.

Ut fra første test gjort i denne oppgaven kan man se at PMS Objekt har strengere krav enn MMOPP, og at dette programmet gir ut høyere horisontale tøyninger. Ut fra dette er det konkludert med at PMS Objekt heller beregner noe for høye horisontale tøyninger som kan være lurt i forhold til underdimensjonering. Da er man sikker på at man beregner høye nok tøyninger og at underdimensjonering unngås. Likevel må man ta til betraktning at det har kommet opp en del feilkilder under uttesting som er nærmere forklart i diskusjonen. Likevel er kravene strenge og man får ikke godkjent vegoverbygningen med for høye verdier.

Ut fra den neste testen var det derimot MMOPP som var noe mer streng på kravene. Mens PMS Objekt og ADtoPave vurderte den normaldimensjonerte vegoverbygningen kalkulert med den norske empiriske metoden til å være innenfor krav, konkluderte MMOPP at den var utenfor. I den siste delen av denne testen viser MMOPP at dens vegoverbygning har det tykkeste asfaltlaget noe som gjør at denne modellen styrkemessig er nærmest den empiriske modellen. Dette bekreftes ut fra beregninger gjort med indeksmetoden hvor MMOPP og den normaldimensjonerte vegoverbygning har minst forskjell i styrkeindeks, og SI-verdiene deres er høyere enn begge de andre programmene. Ut fra dette kan man konkludere med at styrkeberegningene i MMOPP og den empiriske modellen må ha noen likheter. PMS Objekt og ADtoPave er svært like under testing av utmatting av asfaltlagene, og man kan se at disse programmene har like utmattingsberegninger. Likevel teller telemodellen mye inn på resultatene i PMS Objekt, noe som fører til økte forskjeller mellom programmene ved dimensjonering av optimale vegoverbygninger med frostsikringslag. Grunnlaget for denne konklusjonen er at ADtoPave ikke har teleberegning i sine dimensjoneringsberegninger av vegoverbygninger.

Den siste testen går mer i dybden på brukeropplevelsen. Alle programmene har sterke og

svake sider med forskjellig grad av kompleksitet. MMOPP kom ut som det letteste programmet å lære seg, med god brukermanual og enkelt oppsett. Justeringer som likevel bør gjøres er det å få inn mer klimatiske forhold i sine beregninger, i tillegg må programmet kalibreres i forhold til norske materialdata. ADtoPave er det nyeste programmet som ble testet ut og mest komplekst. Dette gjør at det er noe vanskeligere å lære seg, i tillegg til at det har svært komplekse inngangsdata. For at dette programmet skal kunne brukes i Norge må det for det første oversettes til engelsk eller norsk. Dette vil bedre brukeropplevelsen betraktelig. I tillegg bør det vurderes å legge inn litt flere modeller som tele og andre skademodeller. Dette for å gi en bedre indikasjon på nedbrytningen av vegoverbygningen og eventuelle telehiv. Til slutt har man PMS Objekt som er middels komplekst i forhold til de andre programmene. Det har et ryddig oppsett, med en god brukerveiledning og gode håndbøker. PMS Objekt tar med frostberegninger som er viktig for norske forhold. Justeringer som bør gjøres er å kalibrere alle klimasonene og VViS-stasjonene opp mot norske forhold, og norske klimadata.

Ut fra forsøkene som er gjort kan man si at flere av programmene kan passe til norske forhold om justeringer blir gjort. Likevel er det PMS Objekt som utmerker seg som det beste alternativet. Dette programmet er lett å lære seg, og besitter et godt brukergrensesnitt. Programmet tar med problematikken rundt tele, noe som er viktig for dimensjonering til norske forhold. Programmet har lik utmattingsberegning som ADtoPave, derimot tar PMS Objekt med telen i betraktning, og legger til et ordentlig frostsikringslag. Programmet har noe strengere krav enn MMOPP, men dette sørger for sikre resultater. PMS Objekt krever visse justeringer og modifikasjoner, men dette er uavhengig av hvilket program som anvendes. Likevel er det konkludert med at dette programmet kan gi tilsvarende resultater som eksisterende system i Norge.

Kapittel 6

Videre arbeid

Det vil etter denne oppgaven fortsatt være mange ubesvarte spørsmål før man kan skifte ut hele det empiriske systemet. I tillegg er det lurt å vurdere kombinasjoner av programmer, og i tillegg teste ut enda flere programmer. Videre arbeid etter den oppgave ville vært å se på flere programmer, kanskje helst med like klimaforutsetninger som Norge. Et viktig steg bør være å få testet ut AASHTOWare Pavement ME Design. Dette er en stort og kompleks program, med mange muligheter og nivåer. I tillegg vil det anbefales å teste programmene i denne oppgaven med like materialdata slik at man unngår feilkilder man får ved bruk av forskjellige materialer. I tillegg kan det anbefales å gå videre med MMOPP, og teste dimensjonering ved simulering. Her tas det inn flere parametere som kan være nyttige å se på med tanke på norske forhold.

Referanser

- Andersson, Per og Winnerholt, Tomas (2011a). *TRVK Väg. Anläggningsstyring - krav 2011:072*. 781 87 Borlänge: Trafikverket.
- Andersson, Per og Winnerholt, Tomas (2011b). *TRVK Väg. Anläggningsstyring - råd 2011:073*. 781 87 Borlänge: Trafikverket.
- Andersson, Per og Winnerholt, Tomas (2011c). *TRVMB 301 Beräkning av tjällyftning. Anläggningsstyring - råd 2011:084*. 781 87 Borlänge: Trafikverket.
- Baltzer, Susanne (2016). Personal correspondence.
- Berntsen, Geir (1997). “Metoder for rehabilitering av veger”. I: *Metoder for rehabilitering av veger*. URL: http://ansatte.hin.no/gbe/ark-97/arkh-1.html#_Toc391094857 [31.04.16].
- Busch, C., Holst, M.L. og Christiansen, A.S. (2010). “Pavement Performance Models (NordFoU-PPM) - Identification and selection of Pavement Performance Models”. I: *NordFoU - Nordic Cooperation Program 1*.
- Caliendo, C. (2012). “Local Calibration and Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Flexible Pavement Design”. I: *Journal of Transportation Engineering* 138.3.
- Creswell, John W. (2014). *Research Design*. 4th. Sage Publications, Inc.
- Dalland, Olav (2012). *Metode og oppgaveskriving*. 5th. Gyldendal Akademisk.
- European Commission (1999). *COST 333 Development of New Bituminous Pavement Design Method - Final Report of the Action*. European Commission.

REFERANSER

- Evensen, R. (2007). "Vurdering av EDB-system for beregning av nedbrytning av veg". I: *Statens vegvesen and Vegdirektoratet* 2520.
- Everett, Euris L. og Furuseth, Inger (2012). *Masteroppgaven*. 2nd. Universitetsforlaget.
- Fellows, Richard og Liu, Anita (2008). *Research Methods for Construction*. 3rd. Blackwell Publishing Ltd.
- Göransson, N. (2004). "Validering av PMS Objekt: Delmoment för nybyggnation". I: *Statens väg- och transportforskningsinstitut VTI notat* 2-2004.
- Hurtigarbeidende arbeidsgruppe frost og Aksnes, Jostein (2013). *Frostsikring av norske veger*. Tekn. rapp. 338. Statens Vegvesen.
- Lay, M.G. (2009). *Handbook of Road Technology*. 4th. Spon Press.
- Meteorologisk institutt (2015). *eKlima*. URL: http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL%20[10.05.16].
- Myre, Jostein (1996). *Utmatting av asfaltdekker*. Tekn. rapp. 785. Statens Vegvesen.
- NCHRP (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures - Final Report". I: *Transportation Research Board* 1-37A.
- Olsson, Nils (2014). *Praktisk rapportskrivning*. Fagbokforlaget.
- Papagiannakis, A.T. og Masad, E.A. (2008). *Pavement Design and Materials*. 1st. John Wiley & Sons, Inc.
- Reinhardt, Uwe (2016). Personal correspondence.
- Saba, R.G., Huvstig, A., Hildebrand, G., Sund, E., Evensen, R., Sigursteinsson, H. og Elsander, J. (2006). "Performance Prediction Models for Flexible Pavements: A State-of-the-art Report". I: *Statens vegvesen* 2477.
- Senstad, Paul (1994). *Bedre utnyttelse av vegens bæreevne*. Sluttrapport for erstatningsområdet 75. Veglaboratoriet, Oslo: Vegdirektoratet.

- Statens vegvesen (1996/2014). *Håndbok V261 Skadekatalog for bituminøse vegdekker*. Statens vegvesen og Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2005). *Håndbok 18 Vegbygging*. Statens vegvesen og Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2014a). *Håndbok N100 Veg- og gateutforming*. Statens vegvesen og Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2014b). *Håndbok N200 Vegbygging*. Statens vegvesen og Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2015). *Vegkart*. URL: [http://www.vegvesen.no/fag/Teknologi/Nasjonal+vegdatatabank/Kart%20\[10.05.16\]](http://www.vegvesen.no/fag/Teknologi/Nasjonal+vegdatatabank/Kart%20[10.05.16]).
- Trafikverket (2005). *ATB Väg 2005*. URL: [http://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/tekniska-dokument/vagteknik/aldre-versjoner-av-atb-vag/atb-vag-2005/%20\[10.05.16\]](http://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/teknik/tekniska-dokument/vagteknik/aldre-versjoner-av-atb-vag/atb-vag-2005/%20[10.05.16]).
- Trangen, Ida-Elise (2015). *Mekanistisk-empirisk dimensjonering av vegoverbygninger*. Tekn. rapp. NTNU.
- Ullidtz, P. (2002). "Analytical Tools for Design of Flexible Pavements". I: *Key note address, Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, Denmark*.
- Vejregler (2013a). *Håndbog: Dimensjonering av befæstelser og forsterkningslægninger brukervejledning - anlæg og planlægning*. Vejdirektoratet.
- Vejregler (2013b). *Håndbog: MMOPP dimensjoneringsprogram for vejbefæstelser brukervejledning - anlæg og planlægning*. Vejdirektoratet.
- Wellner, Frohmut (2009). *Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09*. Draft. Research Society for Roads og Traffic. Dresden.
- Winnerholt, Thomas (2016). Personal correspondence.
- Winnerholt, Tomas og Viktorsson, Per (2015). *Manual för PMS Objekt 5.0.1*. draft. Trafikverket.

REFERANSER

Zeissler, Alexander (2016). Personal correspondence.

Del II

Vitenskapelig artikkel

Vitenskapelig artikkel - A comparison of mechanistic-empirical pavement design methods for Norwegian conditions

Denne vitenskapelige artikkelen ble utarbeidet som et samarbeid mellom Ida Elise Trangen og Helge Mork. Abstract er sendt inn til vurdering til "Tenth international conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017)". I påvente av tilbakemelding fra denne konferansen er et utkast for artikkelen utformet. Ettersom det per dags dato ikke er mottatt tilbakemelding, er det heller ikke gitt sideantall eller oppsett for artikkelen. Utkastet gitt her er derfor kun et utdrag, og vil bli arbeidet med videre utover året. Det er heller ikke lagt inn nomenklatur i artikkelen, dette finnes i starten av oppgaven.

A comparison of mechanistic-empirical pavement design methods for Norwegian conditions

Ida Elise Trangen^{a,1,1}, Helge Mork^b

^a*Ekromskogen 15A, 7016 Lillehammer*

^b*NTNU*

Abstract

Pavement design has traditionally been based on empirical methods, and the current Norwegian pavement design method appears as purely empirical to the user. However, for years there have been ideas to include analytical aspects into the design process. Mechanistic-empirical design is used in different pavement design software in different parts of the world. In this paper three different mechanistic-empirical design software tools, PMS Objekt, MMOPP and ADtoPave, are considered for Norwegian conditions. The outputs from these software tools are compared against empirical output from the Norwegian design method. The study is based on a literature review and a case study. The case study is a mix of real and fictitious data. However, the material data used are already in the software. The empirical analysis was conducted by using Handbook N200 from the Norwegian Public Roads Administration (NPRA). The pavements analysed in the case study were the one found empirically, an under-designed one, an overdesigned one and an optimum pavement from each software tool. The following three questions are discussed: (1) How is the usability, (2) which results are found for the case study, and (3) are these software suitable for Norwegian conditions? All the software give different results, but all indicate if the pavements are within their design criteria. The software has different advantages, limitations and complexity. Considering Norwegian conditions, PMS Objekt seems to give the best results, taking frost heave into account.

Keywords: Mechanistic-empirical design, PMS Objekt, MMOPP, ADtoPave, Pavement design

1. Introduction

There has been a normal practice to use empirical design methods for the pavement design in different countries in the world, where one of these is Norway. The Norwegian method is based on calculations with input parameters taken from tables and diagrams in handbooks from the Norwegian Public Roads Administration (NPRA). This is a method that could work fine, but can be the reason for under- and over-designed pavement structures,

Email addresses: idaelise91@gmail.com (Ida Elise Trangen), helge.mork@ntnu.no (Helge Mork)

and does not facilitate new methods and materials or support changes of climate and traffic load. This is critical looking at economical reasons and safety. Therefore, this paper will look at mechanistic-empirical design methods that might reduce possible incorrect design, and at the same time fit Norwegian conditions. Mechanistic-empirical design includes an analysis of pavement responses, and field calibrated distress models, and is therefore just applicable as software tools. Input parameters are usually site conditions, climate data and traffic conditions. By calculating and analyse these, and checking the output against empirical criteria, the pavement will be fit for the project site by layer and/or material adjustment. This paper will look into three such software tools; PMS Objekt from Sweden, MMOPP from Denmark and ADtoPave from Germany. The research is looking at the usability of the software tools and if they work for Norwegian conditions.

2. Theory

2.1. Definitions

2.1.1. Empirical design

Empirical models are usually based on road tests and experience. These models depend on the traffic, and parameters such as material properties, measures of structural strength, for example the strength index (SI) [1]. The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) developed the first formula for empirical design of pavement in the US, based on the so-called AASHTO Road Test. This test and formula is the origin of many types of empirical design systems in the world. Equation 1 shows the formula conducted[2].

$$\log(w_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{(4.2-1.5)} \frac{\Delta PSI}{1094}}{(SN+1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (1)$$

Empirical design is the method currently used for pavement design in Norway. The method is based on the index method, and is composed of simple static parameters[3]. The principals is shown in figure 1. This design method uses a fixed expression for traffic loads, where the sum of ESALs over the design period is calculated. The traffic calculation is given by equation 2 [3].

$$N = f \times \text{AADT}_T \times 365 \times \frac{1.0 + (0.01 \times p)}{0.01 \times p} \times C \times E \quad (2)$$

A load distribution coefficient, a_i , is used to express the relative load distribution ability for materials in the pavement. This parameter expresses the relative stiffness compared to the reference material, and the values for the different materials are given in Handbook N200 [3]. The parameters are given by equation 3, and are used in the index formula shown in equation 4.

$$a_i = 0.21 \times \sqrt[3]{E_i} \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^n a_i \times h_i \quad (4)$$

In addition to the index method, the Norwegian empirical method incorporates frost protection, and material properties related to frost heave and bearing capacity. These parameters are also found in tables in the handbook, as well as the final tables on how to design different pavement structures[3].

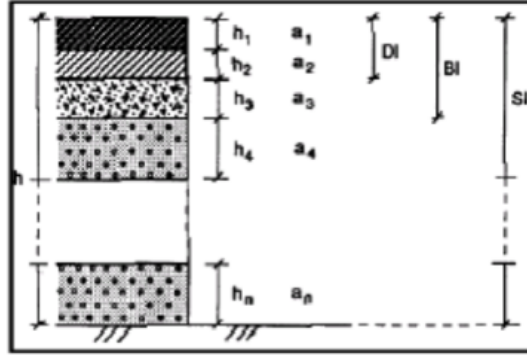


Figure 1: The index method [3]

2.1.2. Mechanistic-empirical design

Mechanistic-empirical design is composed of a mechanistic part and an empirical part. The empirical part of an M-E design is the calibration of laboratory distress criteria into field damage models, based on observations from a full-scale test section or in service roads. The laboratory distress criteria, which are used, are usually based on stress or strain values. The mechanistic part of the M-E Design method is the stress- and strain analysis and the damage accumulation calculation based on these damage models [3]. The design method is divided into different levels. The first level is the input parameters categorised as traffic, climate, material properties and road geometry. These input data are taken to the next level, where the analysis is performed. The analysis includes calculation of the responses, the performance, and the damage accumulation. The final level is looking at the final process of the pavement design. It might include the life-cycle-analysis and strategies around how to select the pavement [4].

2.2. ADtoPave

ADtoPave (Analysing and Design Tool for Pavements) is a software tool developed in Germany. ADtoPave is currently used by researchers, but will probably take over for the empirical system RStO in the future. ADtoPave is using a linear elastic model to describe the materials. Furthermore, it uses the multi-layer theory (MLT) for the calculation of load responses [5] by the calculation tool BISAR from Shell [6]. The main focus of the software

tool is the design of new pavements, and it calculates asphalt fatigue for the design period [5]. The input parameters for ADtoPave are axle load distribution, master curves for the asphalt materials, modulus of elasticity for the granular material, temperature distribution and temperature gradient in the pavement layers. In addition, the design period is chosen for the calculation. These data are analysed by the software tool using Miners hypothesis for calculation of the fatigue process. A factor, SF, is included in the calculation of Miners hypothesis to transform the result from laboratory to real-life damages. In addition, safety factors are used to ensure that there will be no lack of bearing capacity in the pavement. A table with these factors is found in Guidelines for mathematical design of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09 [5]”. The results of this software tool are given as maximum number of ESALs when 100% fatigue is reached, the fatigue process and when the structure has reached its 100% capacity. When the results are obtained, one can go back and optimise the pavement to fit the design period.

2.3. MMOPP

MMOPP is an acronym for ”Mathematical Methods of Pavement Performance” and is a Danish software tool [7]. The software tool is based on the Danish manual Dimensjonering af Befæstelser og Forsterkningsbelægninger[8]”, and this sets the criteria for the software tool [8]. The Vejregelgruppen called Design af befæstelser developed MMOPP, and the current software tool and user manual was published in 2003. For this paper the revised version from 2013 and its manual is used [7].

MMOPP is divided into three parts: The first is the catalogue based, the second is the analytical-empirical and the third is calculation by simulation. The first part is entirely empirical and follows the Danish handbooks. The software tool MMOPP is used for analytical-empirical design and for design by simulation [8]. For this paper, only the analytical-empirical mode of MMOPP is used.

2.3.1. Analytical-empirical dimensioning in MMOPP

This is a traditional analytical analysis. The design criteria are given in formula 5 [8]. The input data are traffic volume obtained from the formula 6, 7 and 8 and material data embedded in the software. These parameters are used for stress and strain calculation, by the use of the American software tool WESDEF[9]. The stresses and strains are calculated for an equivalent 10 t load called an $\mathbb{A}10$ load. An $\mathbb{A}10$ is a 10 ton axle with twin wheels, with 20 % dynamic addition. The axle load is distributed over two circular areas with a 0,7 MPa contact pressure, and the distance between these areas is 350 mm[7]. The calculated stresses and strains should be less than the critical stresses and strains, and the calculated critical stresses and strains are shown in formula 5. These critical stresses and strains are used as design criteria[8]. MMOPP will adjust the layers in the pavement until the design criteria are fulfilled.

$$p = A \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^B \times \left(\frac{N_{\mathbb{A}10}}{10^6} \right)^C \quad (5)$$

$$N_{\mathbb{A}10} = P \times K_F \times K_K \times K_R \times F_{SS} \times \sum F_{\mathbb{A}10} \times L \quad (6)$$

$$P = \frac{(1 + \alpha)^n - 1}{\alpha} \quad (7)$$

$$L = \text{AADT} \times 365 \times \frac{\text{AADT}_T}{100} \times 0.86 \quad (8)$$

2.4. PMS Objekt

PMS Objekt is a Swedish software tool used to design new pavements, and an aid for maintenance and rehabilitation of existing roads. The software tool includes a database with a set of standard pavements that are dependent on the subgrade. The software tool begins with the standard pavement, then the user has to modify the pavement to meet the specific demands for the selected project [10]. The software tool includes analytical extrapolated models. The models are based on linear elastic theory [11]. PMS Objekt follows criteria and advice set in TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion” [12] and TRVK Väg - Trafikverkets tekniska råd Vägkonstruktion” [13]. The software tool is also a pavement management system that is used for the public road network in Sweden [12].

PMS Objekt is composed of different models, of which some are calculation models. The models are listed beneath. In addition, there are more advanced functions in the software that are more specific for in-depth investigations [14].

2.4.1. Climate model

In the climatic model in PMS Objekt, Sweden is divided into five climate zones and six climatic periods. The climatic periods are divided into winter, thaw winter, thaw, late spring, summer and autumn, for which the temperature, and thereby the stiffness of biuminous materials, vary by a certain factor [15].

2.4.2. Traffic model and load model

The first calculation model is a traffic model, where ESAL is calculated as shown in formula 9 [14]. The load model gives the parameters for the traffic calculation. The design load is given as a 10 t axle load with twin wheels with contact pressure 800 kPa and c-c 300 mm. [12].

$$N_{ekv} = \text{AADT}_k \times 3,65 \times A \times B_{just} \times \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{k}{100}\right)^j \quad (9)$$

$$B_{just} = B \times f_a \times f_b \times f_c \quad (10)$$

2.4.3. Material model

Here the stiffness moduli, E/M_r , are set for different pavement layers in relation to the climatic periods and the climate zones [15].

2.4.4. Damage model

The second calculation model in PMS Objekt deals with bearing capacity calculations. Bearing capacity is defined as the highest load that can be accepted considering development of cracks and deformation [12]. This model is based on calculation of strains. Horizontal tensile strain at the bottom of the asphalt layers and the vertical compressive strain at the top of the subgrade are calculated for the design load. In addition, a vertical strain in the subgrade due to a simple load are calculated [14]. Formula 11 and 12 show the criteria for the allowed number of standard axles for the different types of strains [14].

$$N_{till,bb} \geq N_{ekv} \quad (11)$$

$$N_{till,te} \geq 2 \times N_{ekv} \quad (12)$$

2.4.5. Frost calculation

The third calculation model in PMS Objekt deals with the frost depth and the frost heave calculation. The model simulates the freezing process, and how the frost penetrates through the pavement [10]. The outputs of this model are frost heave [mm] and frost depth [mm] [14].

3. Findings and discussion

This exploratory case study was performed by using qualitative, quantitative and mixed methods [16]. The case study was divided into three different experiments; (1) is a comparison between horizontal strains at the bottom of the asphalt layers calculated by the software tools PMS Objekt and MMOPP, (2) is a comparison of different results between all the software tools and the Norwegian empirical method, and (3) is an evaluation of the usability of the different software tools and the Norwegian empirical method. Three pavements were designed by the Norwegian empirical method; one normal-designed, one over-designed and one under-designed. The data used for the design were subgrade material T3 (average frost susceptible), climate and traffic data from Gardermoen/Skedsmo/Berger in Norway. The climate and traffic data was collected from the Norwegian Meteorological Institute and the NPRA, respectively.

3.1. Comparison between horizontal strains for PMS Objekt and MMOPP

Table 1 shows the result of the calculations made in the software tools. The input parameters in PMS Objekt and MMOPP were the same. The trial was performed for six different pavements. As shown in the table 1 the values from PMS Objekt are about 4-6% higher than the results given by MMOPP, even though the inputs are supposed to be similar. The load models are set to be the same, but an estimation that 5t is the same as 50kN is done. In addition, the Poisson's ratio is not given in the calculation. Both of these might be the reason for different results. The software tools do not use the same calculation program either. PMS Objekt uses BISAR while MMOPP uses WESDEF. Neither of the programs is calculating anything wrong, but there might be a variance in the results due to different mathematical

calculation techniques. However, there is a difference that seems constant throughout the experiment. It is difficult to make a conclusion regarding these values, as there is no right or wrong answer to what the correct values are.

Tabell 1: Comparison between horizontal strains for PMS Objekt and MMOPP

Pavement	Type*	Critical strain bottom of asphalt layers, ε_h [μs]		Difference [μs]	Difference [%]
		Critical strain MMOPP [μs]	Critical strain PMS Objekt [μs]		
1	Horizontal strain, ε_h	128,1	121	7,1	5,5
2	Horizontal strain, ε_h	126,2	121	5,2	4,1
3	Horizontal strain, ε_h	125,2	120	5,2	4,2
4	Horizontal strain, ε_h	127,4	122	5,4	4,2
5	Horizontal strain, ε_h	127,9	121	6,9	5,4
6	Horizontal strain, ε_h	121,7	116	5,7	4,7

* Bottom of the asphalt layers

Tabell 2: Materialinformation

Test	Layer	Name			Thickness [mm]	E [MPa]
A	1	AB 70/100	ABB Mod.	GAB 0 70/100	271	2755
	2	SG I			290	350
	3	Frost protection layer			440	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40
B	1	AB 70/100	ABB Mod.	GAB II 40/60	236	3809
	2	SG I			310	350
	3	Frost protection layer			440	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40
C	1	SMA Mod.	ABB Mod.	GAB II 40/60	231	4051
	2	SG I			310	350
	3	Frost protection layer			450	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40
D	1	AB 70/100	GAB 0 70/100	GAB II 40/60	240	3609
	2	SG I			310	350
	3	Frost protection layer			440	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40
E	1	SMA Mod.	GAB 0 70/100	GAB I 70/100	272	2736
	2	SG I			290	350
	3	Frost protection layer			430	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40
F	1	SMA Mod.	ABB Mod.	GAB II 40/60	257	4141
	2	Crushed asphalt (KAS)			270	250
	3	Frost protection layer			460	100
	4	Frost susceptible subgrade			-	40

3.2. The comparison of results and optimal pavements

Three pavements from the Norwegian pavement design handbook were analysed with the software tools. Looking at the results in table 3, it is seen that the normally designed pavement is within the criteria for both PMS Objekt and ADtoPave. However, this is not the case for MMOPP, where the second layer is outside the criterium. For the over- and under-designed pavements it is seen that both follow the empirical model. The over-designed is within the criteria for all the software tools, while the under-designed is not. This might show that with major differences in pavement structures, the software tools tell the same,

but when there are more optimum solutions there might be differences. Furthermore, it seems like MMOPP might have some stricter criteria than the other two.

Next there is a table 4 looking at the optimum pavements from the software tools. The upper asphalt layers were set, while the rest were adjusted to fit the criteria for the design period. Looking at the pavements there is a major difference between the empirical pavement and the optimum pavement from ADtoPave. PMS Objekt and MMOPP are closer to the empirical design. The difference in thickness between the thickest pavement calculated by the software tools and the empirical calculated, is 108 cm. However, MMOPP has a thicker lower asphalt layer that might result in a more similar bearing capacity for the empirically found pavement. The load distribution coefficient, see subsection 2.1.1, is high for asphalt, and by calculating the strength index for all the pavements this conclusion can be drawn. Since ADtoPave has little input on frost, a bearing capacity test is carried out between the empirical calculated pavement and the software tools. The frost protection layer (FPL) was removed from all the pavements, and the empirical pavement was calculated to follow the index method, see subsection 2.1.1. The results of this test are shown in table 5. The differences between the software tools and the empirical method are smaller. PMS Objekt and ADtoPave have relatively similar results, and a conclusion can be that the bearing capacity calculation for these models is similar. However, Sweden is a cold county, similar to Norway, and is probably using softer asphalt material than Germany. This might be the reason for the difference in layer thicknesses that has occurred in this test. MMOPP still has the thickest asphalt layers, and that increases the total bearing capacity. Again the thickness of the pavement shows that MMOPP has stricter criteria and will therefore be the one pavement closest to the empirical one.

Tabell 3: Evaluation of criteria

Description	N200	MMOPP*	PMS Objekt**	ADtoPave***
Normal empirical designed	Wear course: 45mm	+ - + +	+ + +	+
	Bind. course: 35mm			
	Base course: 140mm			
	Subbase: 750mm			
	FPL: 1350mm			
Total thickness: 232cm				
Under-designed	Wear course: 30mm	- - + -	- - -	-
	Bind. course: 20mm			
	Base course: 100mm			
	Subbase: 550mm			
	FPL: 100mm			
Total thickness: 80cm				
Over-designed	Wear course: 60mm	+ + + +	+ + +	+
	Bind. course: 50mm			
	Base course: 160mm			
	Subbase: 850mm			
	FPL: 1500mm			
Total thickness: 626cm				

* Each symbol indicates the layers asphalt layer, sub base, frost protection and subgrade. Plus means that the stresses and strains are within the criteria, and minus that they are outside the criteria

** Each symbol stands for the calculation done in the software; the two first indicates if the pavement are within the bearing capacity criteria for the bottom of the asphalt layer and the top of the subgrade, the last symbol indicates if the pavement is within the frost criteria.

*** The symbol indicates if the pavement is within the fatigue criterium

3.3. Evaluation of the usability of the different software and the Norwegian empirical method

Both the software tools and the Norwegian empirical method have their limitations, advantages and different level of complexity. First, the different input and output parameters

Tabell 4: Comparison of optimum pavements

Description	N200	MMOPP	PMS Objekt*	ADtoPave
Total thickness	232cm	100,6cm	124cm	72cm
Wearing course	45mm	45mm	45mm	45mm
Binder course	35mm	40mm	35mm	35mm
Base course	140mm	161mm	110mm	90mm
Subbase	750mm	320mm	400m	250mm
Frost protection layer	1350mm	440mm	650mm	300mm
Subgrade	T3	Frost susceptible	4a - Frost susceptible	E-value = 40MPa
Evaluation	-	++++	~++	+

* the symbol tilde [~] means that the pavement is within 10 % of the criterium, but still inside the criterium

Tabell 5: Comparison of optimum pavements by looking at the bearing capacity

Description	N200	MMOPP	PMS Objekt	ADtoPave
Total thickness	107 cm	87,9 cm	70,5 cm	61,5 cm
Wear. course	45 mm	45 mm	45 mm	45 mm
Binder course	35 mm	40 mm	35 mm	35 mm
Base course	140 mm	174 mm	125 mm	85 mm
Subbase	850 mm	620 mm	500 mm	450 mm
Subgrade	T3	Frost susceptible	4a - Frost susceptible	E = 40 MPa

Tabell 6: E-moduli for each layer in the calculation of optimum pavements

Description	MMOPP [MPa]	PMS Objekt [MPa]	ADtoPave [MPa]
Wear. course	3000	4000	-
Binder course	3000	4000	
Base course	Total for asphalt layers	2923	
Subbase	350	450	150
Frost protection layer	100	100	120
Subgrade	40	50	40

were investigated. In addition, the extra applications of the software tools were reviewed. From this an evaluation was performed as shown in table 7. The positive and the negative aspects indicate how these methods works and how the usability is.

4. Conclusion

This paper has considered different parts of the software tools PMS Objekt, MMOPP and ADtoPave. The usability of the software tools is generally good. The easiest might be MMOPP since the software tool has a simple setup and a good manual. However, PMS Objekt was easier to understand after learning the different functions, and this software tool has extra applications. ADtoPave is still in the start-up face, and therefore the software tool is still mainly in German, consequently, it is more complicated to use. The material data used in this software tool are also very complex, and certain laboratory tests are needed to find the master curves. The overall result from the testing shows that PMS Objekt has the most to offer for Norwegian conditions, as it includes a frost heave calculation in addition to the bearing capacity test. In the extra applications there is also a function looking at rutting due to studded tires. This function is very likely to be used for Norway. MMOPP (analytical-empirical method) is a good software tool, but with the lack of climate data

Tabell 7: Evaluation of the usability

Usability				
	N200	MMOPP	PMS Objekt	ADtoPave
Positive	Easy to use with good explanations in the handbook N200	Calculates the optimum pavement by it self	Frost heave calculations included	A continuous fatigue damage graph for the whole design period
		Easy to understand the software tool, good layout	Easy to understand the software tool, good layout	Good layout
			English interface in the software	English translated manual
Negative	Not specialized for each project	Does not consider frost heave	Climate zones just for Sweden	Does not consider frost
	No analysis of the response, pavement performance and damage accumulation. May lead to design errors	Not possible to customize material data	The user has to adjust the layers when performing optimization	The user has to adjust the layers when performing optimization
	Few design parameters	The climate is not taken into consideration	Swedish interface in manual and handbooks	Complicated material data
	Interface in Norwegian	Difficult to get the project to be specialized to one place		German interface for the software tool and the handbooks
		Danish interface for the software tool, the manual and the handbooks		

and no focus on frost, it is not well suited for Norwegian conditions. ADtoPave has a lot of potential, but also has a lack in focus on frost and winter climate. And the software interface is still in German, which makes it hard to implement at the moment.

Acknowledgements

We want to thank the German, Swedish and Danish experts helping with the research for this project, and who made it possible to learn to use the software tools in three months.

Referanser

- [1] C. Caliendo, Local calibration and implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide for flexible pavement design, *Journal of Transportation Engineering* 138 (3).
- [2] A. Papagiannakis, E. Masad, *Pavement Design and Materials*, 1st Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [3] Statens vegvesen, *Håndbok N200 Vegbygging*, Statens vegvesen and Vegdirektoratet, 2014.
- [4] NCHRP, *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures - final report*, Transportation Research Board 1-37A.

-
- [5] Wellner, Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO-Asphalt 09, Research Society for Roads and Traffic, Dresden, draft Edition (2009).
 - [6] A. Zeissler, Personal correspondence (2016).
 - [7] Vejregler, Håndbog: MMOPP dimensjoneringsprogram for vejbefæstelser brukervejledning - anlæg og planlægning, Vejdirektoratet, 2013.
 - [8] Vejregler, Håndbog: Dimensjonering av befæstelser og forsterkningslægninger brukervejledning - anlæg og planlægning, Vejdirektoratet, 2013.
 - [9] S. Baltzer, Personal correspondence (2016).
 - [10] C. Busch, M. Holst, A. Christiansen, Pavement performance models (NordFoU-PPM) - identification and selection of pavement performance models, NordFoU - Nordic Cooperation Program 1.
 - [11] R. Saba, A. Huvstig, G. Hildebrand, E. Sund, R. Evensen, H. Sigursteinsson, J. Elsander, Performance prediction models for flexible pavements: A state-of-the-art report, Statens vegvesen 2477.
 - [12] Per AnderssonTomas Winnerholt, Trvk vä g, Anlä ggningsstyring - krav 2011:072, Trafikverket, 781 87 Borlä nge (6 2011).
 - [13] Per AnderssonTomas Winnerholt, Trvk vä g, Anlä ggningsstyring - råd 2011:073, Trafikverket, 781 87 Borlä nge (6 2011).
 - [14] Tomas WinnerholtPer Viktorsson, Manual fr PMS Objekt 5.0.1, Trafikverket, draft Edition (2015).
 - [15] R. Evensen, Vurdering av EDB-system for beregning av nedbrytning av veg, Statens vegvesen and Vegdirektoratet 2520.
 - [16] Robert K. Yin, Case Study Research, 5th Edition, Sage Publications, Inc., 2014.

Del III
Vedlegg

Vedlegg 1 - Oppgavetekst

I dette vedlegget legges det ved oppgaveteksten i henhold til instituttet for bygg, anlegg og transport, NTNU, sine retningslinjer.

MASTEROPPGAVE
(TBA4940 Veg, masteroppgave)

VÅREN 2016
for
Ida Elise Trangen

En sammenligning av metoder for mekanistisk-empiriske dimensjonering av vegoverbygninger for norske forhold
English: A comparison of mechanistic-empirical pavement design methods for Norwegian conditions

BAKGRUNN

I dag bruker man "Håndbok N200 Vegbygging" som baserer seg på empirisk metode for dimensjonering av vegoverbygninger i Norge. Dimensjoneringen av vegoverbygninger vil derfor skje på generell basis med lite tilnærming til lokale forhold. Dette kan føre til over- og underdimensjonering. Slike problemer kunne vært unngått ved bruk av andre dimensjoneringsmetoder. I land som Sverige, Danmark og Tyskland er det tatt i bruk mekanistisk-empiriske dimensjoneringsprogrammer. Den mekanistisk-empiriske dimensjoneringen tar inn flere og lokale parametere. Programmene beregner og analyserer disse verdiene, og kalibrer tilslutt opp mot satte krav og kriterier. Ved å implementere slike dimensjoneringsprogrammer kan man få vegprosjekter som er tilpasset lokale forhold, som igjen gir bedre løsninger og bedre lønnsomhet. Denne masteroppgaven ser på dimensjoneringsprogrammene PMS Objekt fra Sverige, MMOPP fra Danmark og ADtoPave fra Tyskland.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

I denne oppgaven skal PMS Objekt, MMOPP og ADtoPave sammenlignes opp mot den norske empiriske metoden for dimensjonering av vegoverbygninger. I tillegg skal man teste og evaluere om programmene fungerer i forhold til norske inngangsdata. Tilslutt skal brukergrensesnittet evalueres for de ulike programmene.

Målsetting og hensikt

Målet med denne oppgaven er å gi et innblikk i forskjellige type dimensjoneringsprogrammer. Sammenligningene som er gjennomført skal gi kunnskap og vise forskjellene fra program til program. Det vil i tillegg være et mål å se på brukervennligheten til programmene. Dette for å få en indikasjon på hvor lett programmet er å implementere i det norske systemet. Tilslutt vil hensikten være å gi en evaluering av programmene og vurdere om de kan egne seg for norske forhold.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

1. Hvilke justeringer bør gjøres, og i hvilken grad passer ADtoPave, MMOPP og/eller PMS Objekt til norske forhold?
2. Hvilke resultater oppnås ved bruk av et casestudiet, og hvordan kan disse anvendes for å besvare foregående forskningsspørsmål?
3. Hvilket program har det beste brukergrensesnittet?

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidingen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ eksternt samarbeidspartner.

Masteroppgaven regnes ikke som ferdig levert før kandidaten har levert innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i Sentralbygg II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og eksternt samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om eksternt veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v. Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til sonja.hammer@ntnu.no

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskade-forsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Bygg, anlegg og transport

Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: -

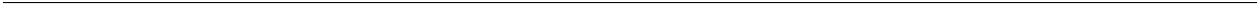
Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 25.05.2016

Underskrift



Faglærer



Vedlegg 2 - Empirisk dimensjonert vegoverbygning fra N200

Dette vedlegget inneholder beregning av normaldimensjonert, overdimensjonert og underdimensjonerte vegoverbygninger i henhold til norsk empirisk beregningsmetode. I tillegg ligger utregningen av en normaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikring som er innenfor indeksskravene.

Vegoverbygningen

Trafikkklasse Gardermoen/Skedsmo/Berger			
f	0,4	p	0,02
ÅDT_T	0,096	n	20
ÅDT	63770	C	2,4
ÅDT_T	6121,92	E	0,424
N	22099216		
Trafikkklasse	F		

$$N = f \times \text{ÅDT}_T \times 365 \times ((1+p)^n - 1) / (p) \times C \times E$$

Generell informasjon:

I området ved E6 Gardermoen/Skedsmo/Berger skal det da lages en 4-felts, H9, motorveg. Undergrunnen i dette området er T3, og bæreevnegruppe vil da være Bg 5. Ønsket bruk av materiale er Ska i dekke, Ab i bindlag, Ag i bærelag, Pukk/Grus i forsterkningslag og knust grus/sand (noe telefarlig) i frostsikringslaget

Forklaring om utregning for de ulike lagene:

Bitumenlag

512.1 angir for den aktuelle trafikkmengden at dekke skal bestå av 4,5cm slitelag og 3,5cm bindlag. Bærelagsindeksene er hentet ut fra tabell 510.9 i "Håndbok N200 Vegbygging". Krav er hentet i figur 512.2 i "Håndbok N200 Vegbygging".

Frostdøgn

Frostdøgn er hentet fra Skedsmo kommune, og det er brukt maks korreksjonsfaktor for dimensjonerende frostmengde fordi Gardermoen som ligger lengre nord. Disse verdigene er hentet fra vedlegg i "Håndbok N200 Vegbygging".

Forsterkningslag

Ut fra figur 512.2 kan man da finne tykkelsen på forsterkningslaget. I denne oppgaven er det ønsket å bruke kult med lastfordelingskoeffisient 1,1 hentet fra "Håndbok N200 Vegbygging". Det vil medføre at man kan redusere tykkelsen på laget ved å dele på lastfordelingskoeffisienten.

Frostsikringslag

Frostsikringslaget er av litt telefarlig grus/sand i telefarlighetsgruppe T2 og bæreevnegruppe 4 i henhold til figur 510.3 i "Håndbok N200 Vegbygging". Total overbygningstykkelse finner man i 511.4 ut fra frostmengden og materialet i undergrunnen alt dette er hentet fra vedlegget i "Håndbok N200 Vegbygging". Denne tykkelsen blir justert etter verdien på stedet som er satt til middeltemperatur 5,5 grader hentet fra klima fra Skedsmo/Gardermoen 2004/2005. Man trekker fra tykkelsen på forsterkningslaget og asfalletagene for å finne frostsikringslaget. Egenskaper til frostsikringslaget er Cu <15, T2 gir a=0,75 og finnes i "Håndbok N200 Vegbygging". Tykkelsene fra frostsikringslag og forsterkningslag avrundes til nærmeste 5- eller 10-er.

Kontroll mot anleggtekniske forhold og kontroll av styrke indeks (SI)

Undergrunnen består av T3, og det må kontrolleres om tykkelsen til lagene tilfredstiller kravene til anleggtekniske forhold i henhold til figur 512.2 og figur 511.3 i "Håndbok N200 Vegbygging". Med T3 grunn er krav til forsterkningslag 90 cm finnes i 511.3 i "Håndbok N200 Vegbygging". Dimensjonering må også kontrolleres mot bæreevneforhold. Stykeindeksene bli beregnet: Dekketykkelsene ganget med sine lastfordelingskoeffisienter, forsterkningslag ganget med sin lastfordelingskoeffisient og frostsikringslag ganget med sin lastfordelingskoeffisient

Lag	Lastfordelingskoeffisienter (a)
1	3
2	3
3	3
4	1,1
5	0,75

Krav til Styrkeindeks

Lag	Krav
Bitumenlag	65
Forsterkningslag	90
Total styrke	155

Normal dimensjonert vegoverbygning

Bitumenlag

Figur 512.2 Angir flere typer bærelag, men valgt er 14 cm Ag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]
Slitelag	SMA	4,5
Bindlag	Ab	3,5
Bærelag	Ag	14
Total tykkelse		22

Frostdøgn

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Årsmidtemp	5,5	
F_10	14000	
F_100	24000	Dimensjonerende på så stor veg
Min	0,99	
Maks	1,23	
F	29520	F_100 x Maks

Forsterkningslag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]	a	SI	Avrundet tykkelse
Forsterkningslag	Pukk	80	1,1	72,7	75

Frostsikringslag

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Frostdybde	2,4	m
Koefisient	0,955	interpolasjon
Total tykkelse	2,3	m
Frostsikringslag		Grus/sand noe telefarlig, T2
Bæreevnegruppe	4	

Undergrunn T3

Total vegoverbygning

Forklaring	Tykkelse [cm]	Avrundet [cm]
Total tykkelse for hele konstruksjonen	230	
Total tykkelse for lag over frostsikringslag	97	97
Tykkelse frostsikringslag	133	135
Total tykkelse etter avrundinger		232

Lag	Tykkelse [cm]	a	Indeks	Krav
1	4,5	3	13,5	-
2	3,5	3	10,5	-
3	14,5	3	43,5	-
Total bitumenlag				67,5
4	75	1,1	82,5	90
5	135	0,75	101,25	-
Total SI				251
Forskjell/innenfor krav:				96

Denne vegoverbygningen er innenfor kravet!

Underdimensjonert vegoverbygning

Bitumenlag

Type lag	Materiale	Tykkelse
Slitelag	SMA	3
Bindlag	Ab	2
Bærelag	Ag	10
Total tykkelse		15

Frostdøgn

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Årsmidtemp	5,5	
F_10	14000	
F_100	24000	Dimensjonerende på så stor veg
Min	0,99	
Maks	1,23	
F	29520	F_100 x Maks

Forsterkningslag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]	a	SI	Avrundet tykkelse
Forsterkningslag	Pukk	60	1,1	54,5	55

Frostsikringslag

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Frostdybde	2,4	m
Koefisient	0,955	interpolasjon
Total tykkelse	2,3	m
Frostsikringslag		Grus/sand noe telefarlig, T2
Bæreevnegruppe	4	
<i>Undergrunn T3</i>		

Total vegoverbygning

Forklaring	Tykkelse [cm]	Avrundet [cm]
Total tykkelse for hele konstruksjonen	230	
Total tykkelse for lag over frostsikringslag	70	70
Tykkelse frostsikringslag	160	10
Total tykkelse etter avrundinger		80

Lag	Tykkelse [cm]	a	Indeks	Krav
1	3		3	9
2	2		3	6
3	10		3	30
Total bitumenlag				45
4	55	1,1		60,5
5	10	0,75		7,5
Total SI				113
Forskjell/innenfor krav:				-42

Denne vegoverbygningen er underdimensjonert!

Overdimensjonert vegoverbygning

Bitumenlag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]
Slitelag	SMA	6
Bindlag	Ab	5
Bærelag	Ag	16
Total tykkelse		27

Frostdøgn

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Årsmidtemp	5,5	
F_10	14000	
F_100	24000	Dimensjonerende på så stor veg
Min	0,99	
Maks	1,23	
F	29520	F_100 x Maks

Forsterkningslag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]	a	SI	Avrundet tykkelse
Forsterkningslag	Pukk	90	1,1	81,8	85

Frostsikringslag

Forklaring	Mengde	Enhet/kommentar
Frostdybde	2,4	m
Koefisient	0,955	interpolasjon
Total tykkelse	2,3	m
Frostsikringslag		Grus/sand noe telefarlig, T2
Bæreevnegruppe	4	
Undergrunn T3		

Total vegoverbygning

Forklaring	Tykkelse [cm]	Avrundet [cm]
Total tykkelse for hele konstruksjonen	230	
Total tykkelse for lag over frostsikringslag	112	112
Tykkelse frostsikringslag	118	150
Total tykkelse etter avrundinger		262

Lag	Tykkelse [cm]	a	Indeks	Krav
1	6	3	18	-
2	5	3	15	-
3	16	3	48	-
Total bitumenlag			81	65
4	85	1,1	93,5	90
5	150	0,75	112,5	-
Total SI			287	155
Forskjell/innenfor krav:			132	

Denne vegoverbygningen er overdimensjonert!

Normaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag

Bitumenlag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]
Slitelag	SMA	4,5
Bindlag	Ab	3,5
Bærelag	Ag	14
Total tykkelse		22

Forsterkningslag

Type lag	Materiale	Tykkelse [cm]	a	SI	Avrundet tykkelse
Forsterkningslag	Pukk	90	1,1	81,8	85

Total vegoverbygning

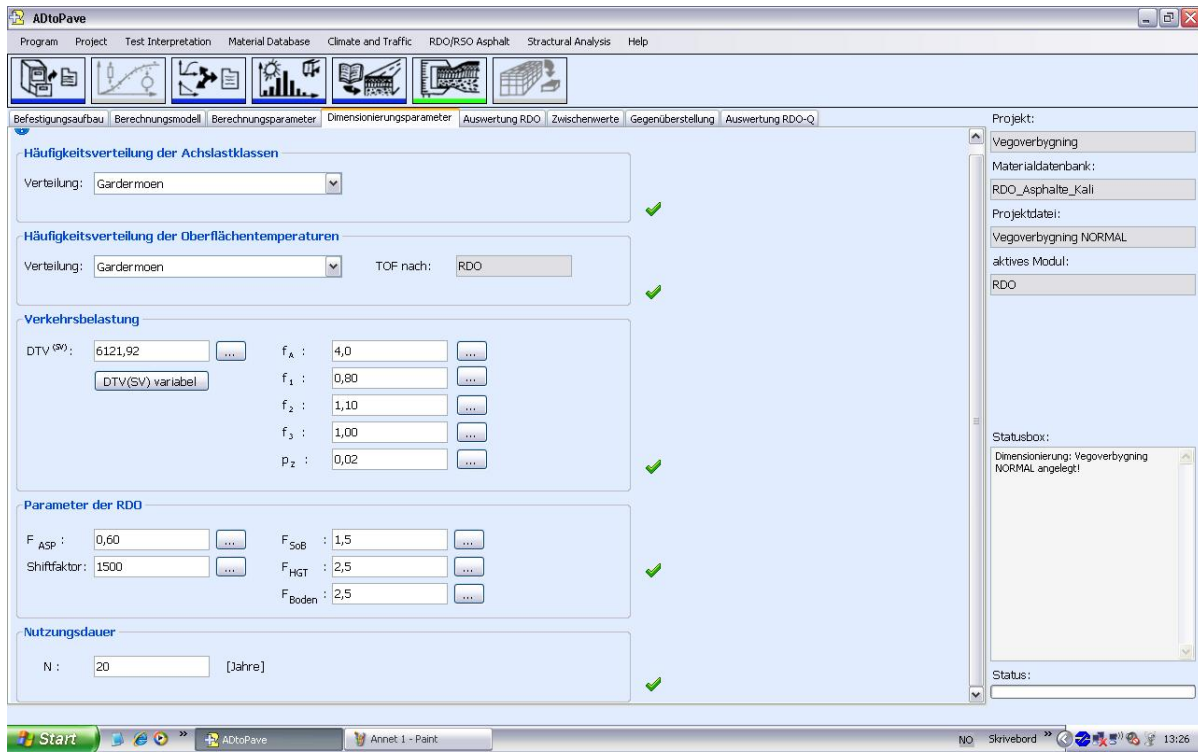
Forklaring	Tykkelse [cm]	Avrundet [cm]
Total tykkelse for hele konstruksjonen	-	-
Total tykkelse for lag over frostsikringslag	107	107
Tykkelse frostsikringslag	-	-
Total tykkelse etter avrundinger		107

Lag	Tykkelse [cm]	a	Indeks	Krav
1	4,5	3	13,5	-
2	3,5	3	10,5	-
3	14	3	42	-
Total bitumenlag			66	65
4	85	1,1	93,5	90
5	-	0,75	-	-
Total SI			160	155
Forskjell/innenfor krav:			5	

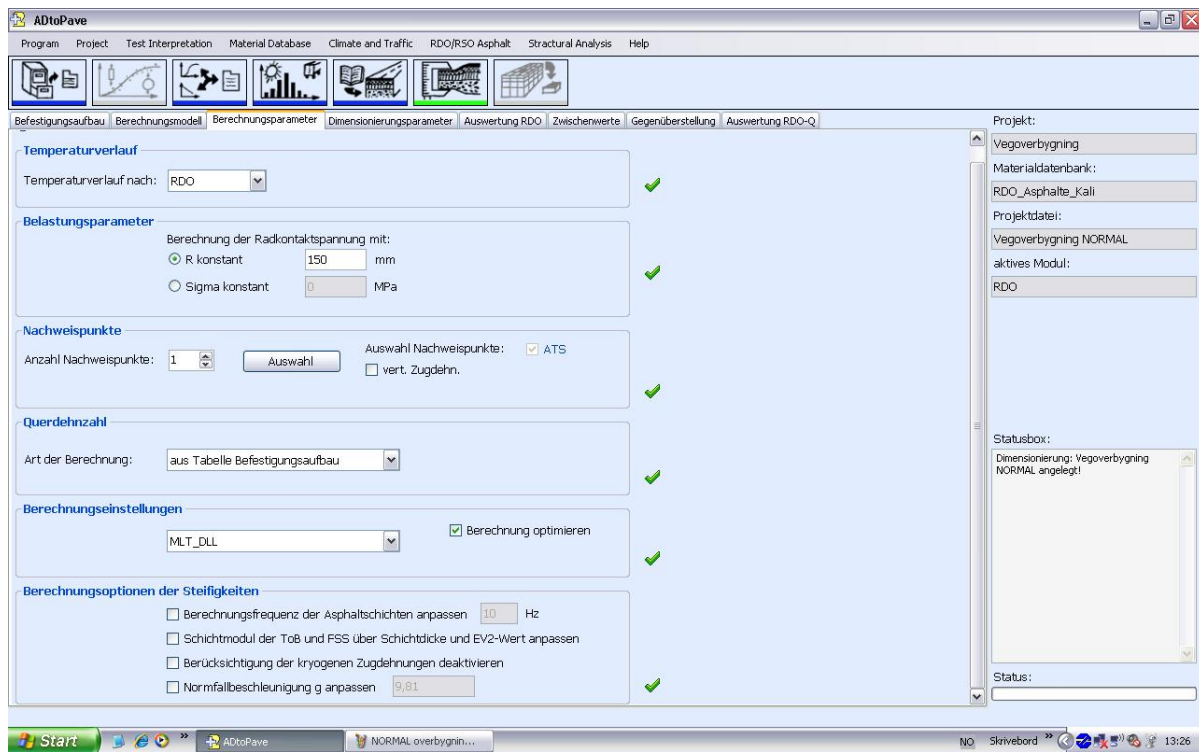
Denne vegoverbygningen er innenfor indekstrav!

Vedlegg 3 - ADtoPave

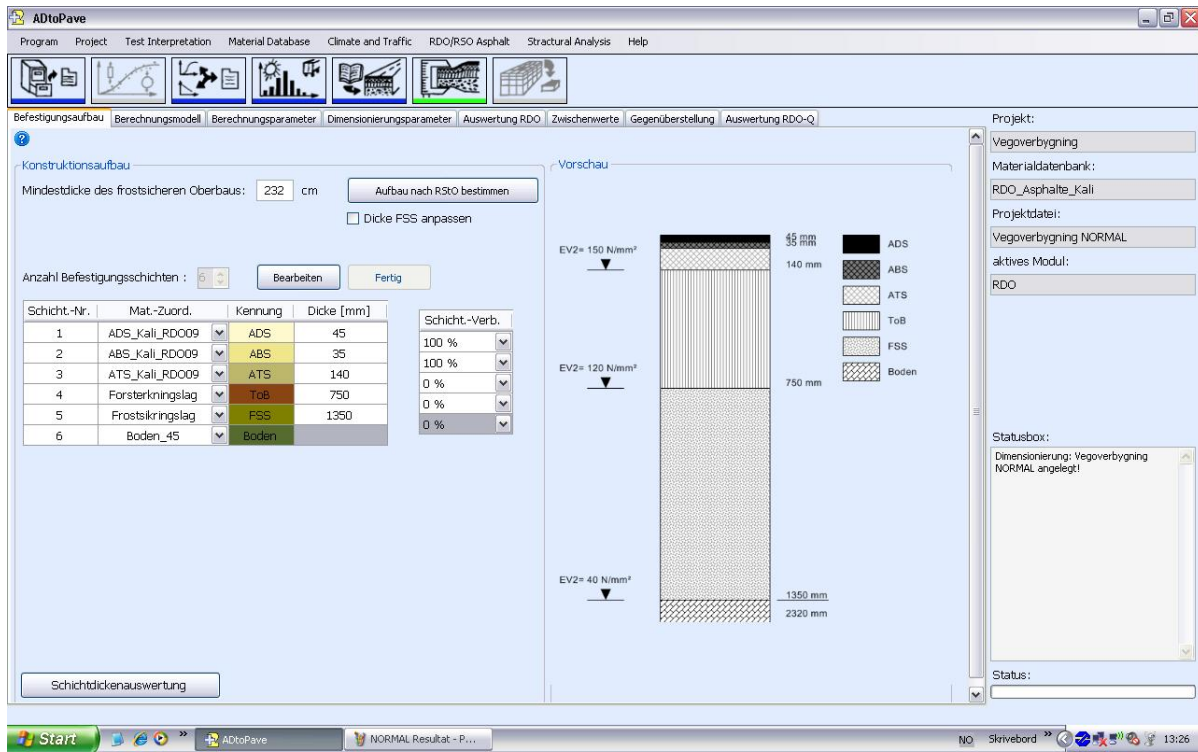
I dette vedlegget vises resultater og utførelse av programmet ADtoPave. Det man ser er vegoverbygningen man legger inn ved oppstart, resultatvinduet og utmattelsesgrafene.



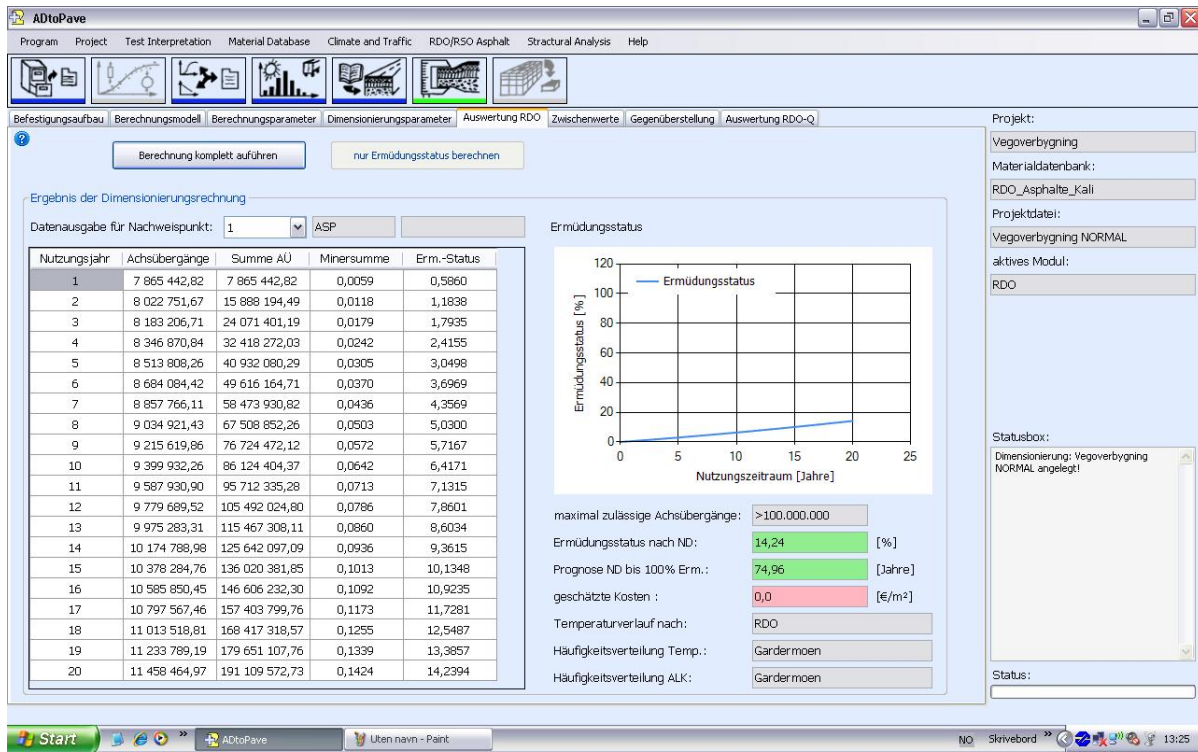
Figur 1: Inputvindu 1



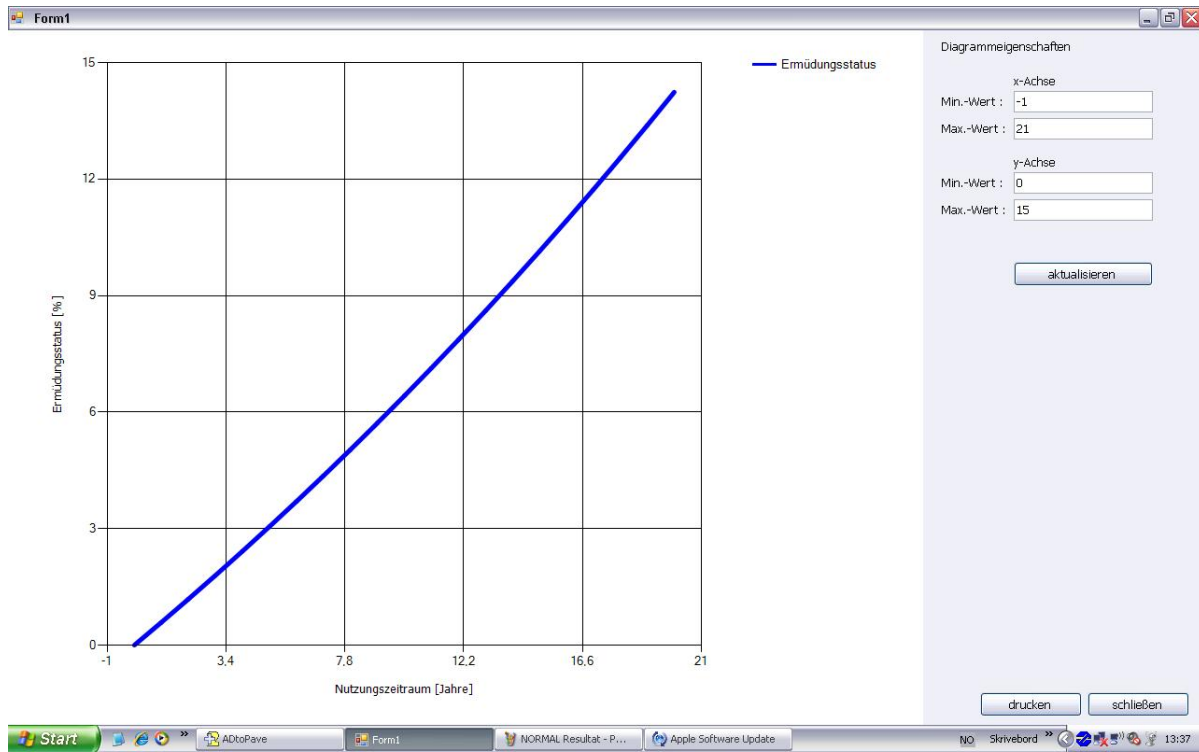
Figur 2: Inputvindu 2



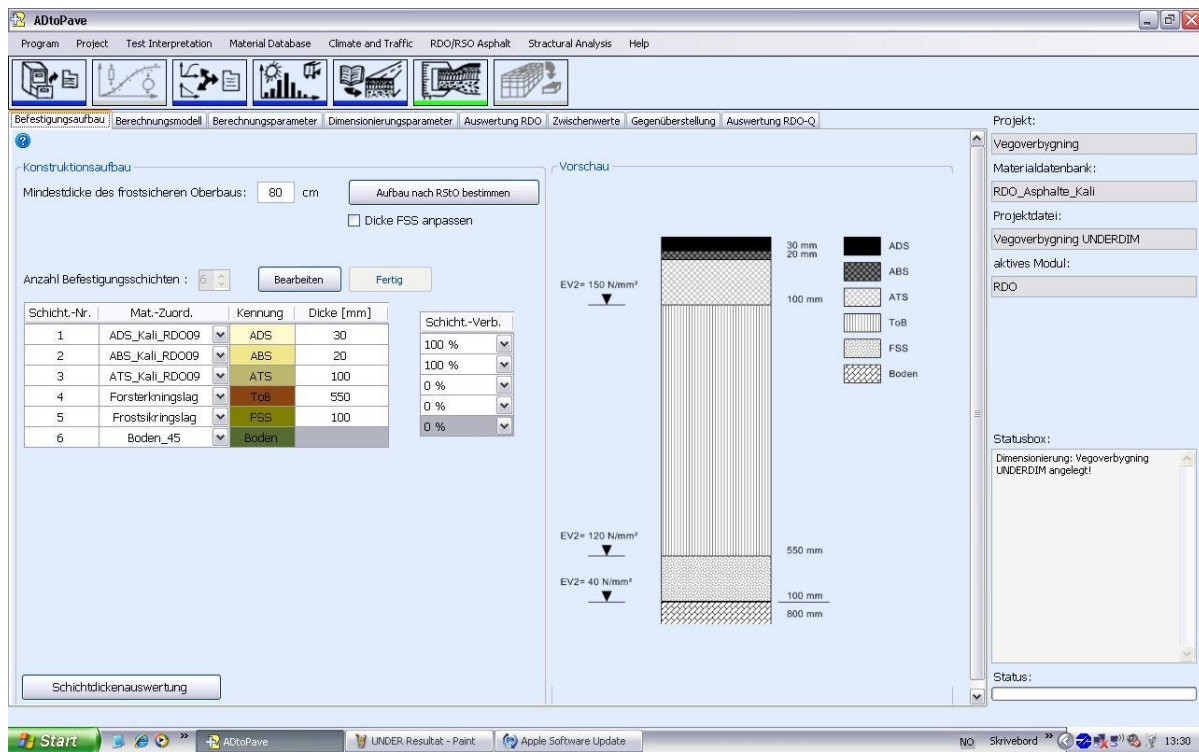
Figur 3: Normaldimensionert vegoverbygning



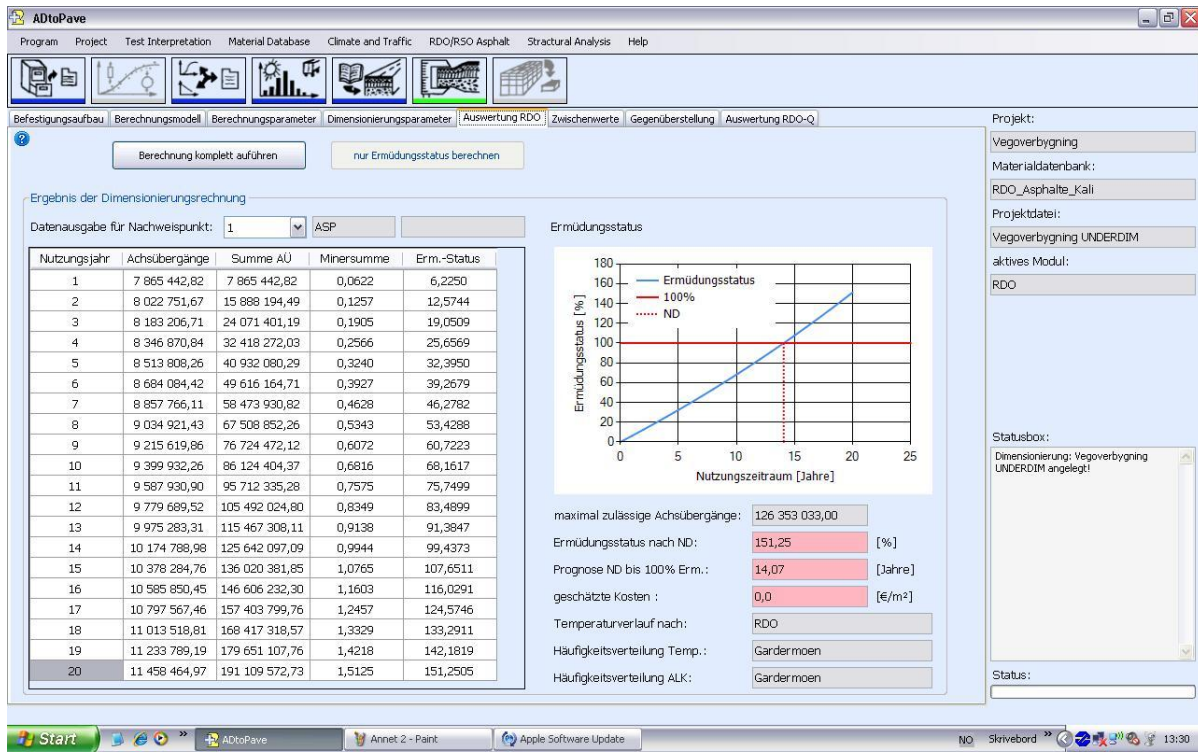
Figur 4: Resultat av normaldimensjonert vegoverbygning



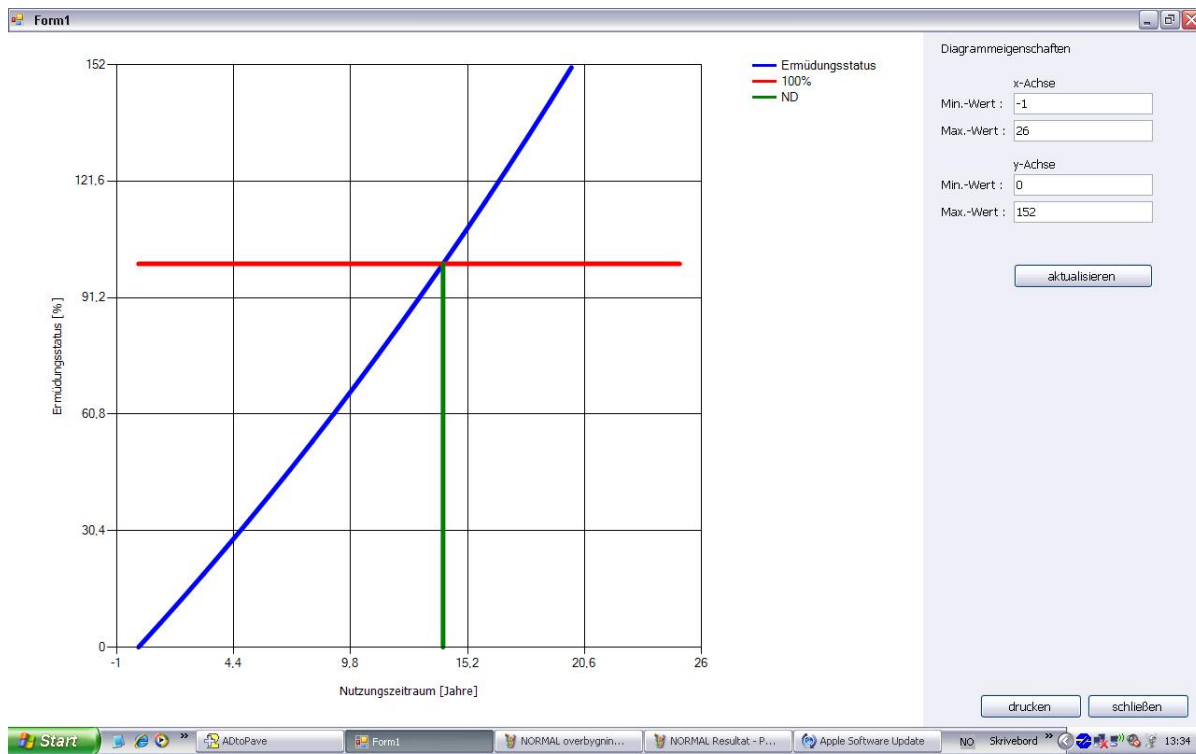
Figur 5: Utmattingsstatus for normaldimensjonert vegoverbygning



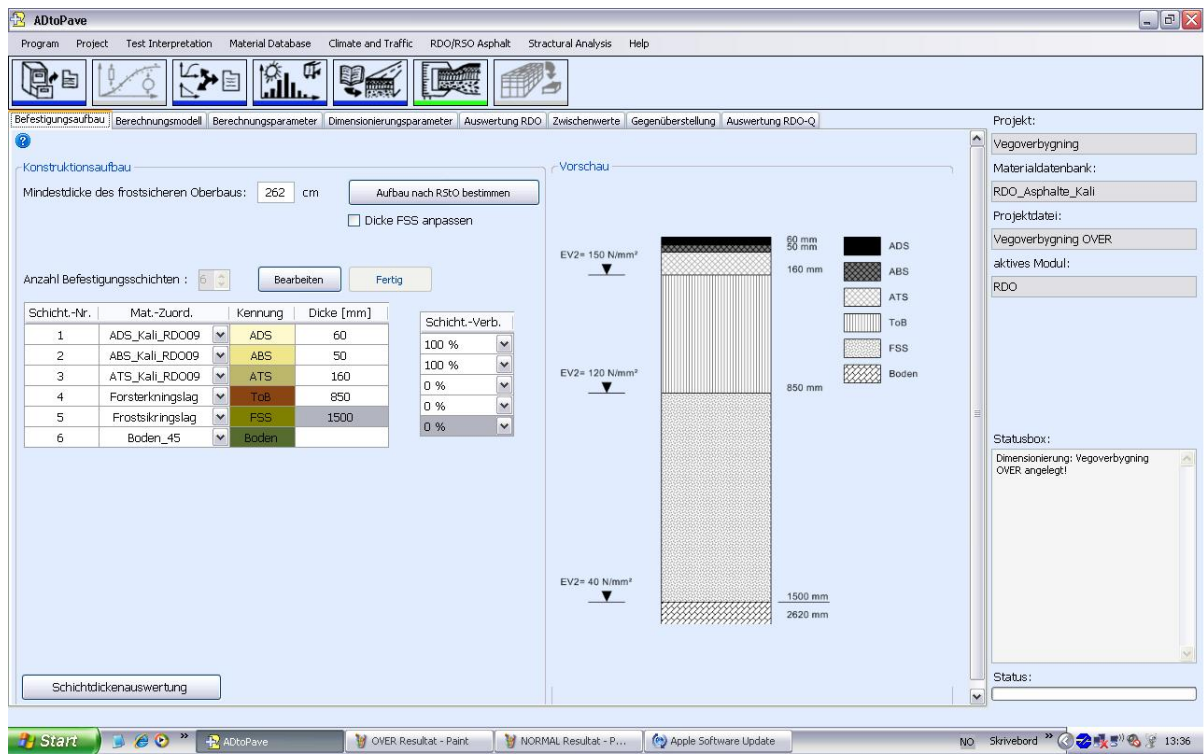
Figur 6: Underdimensionert vegoverbygning



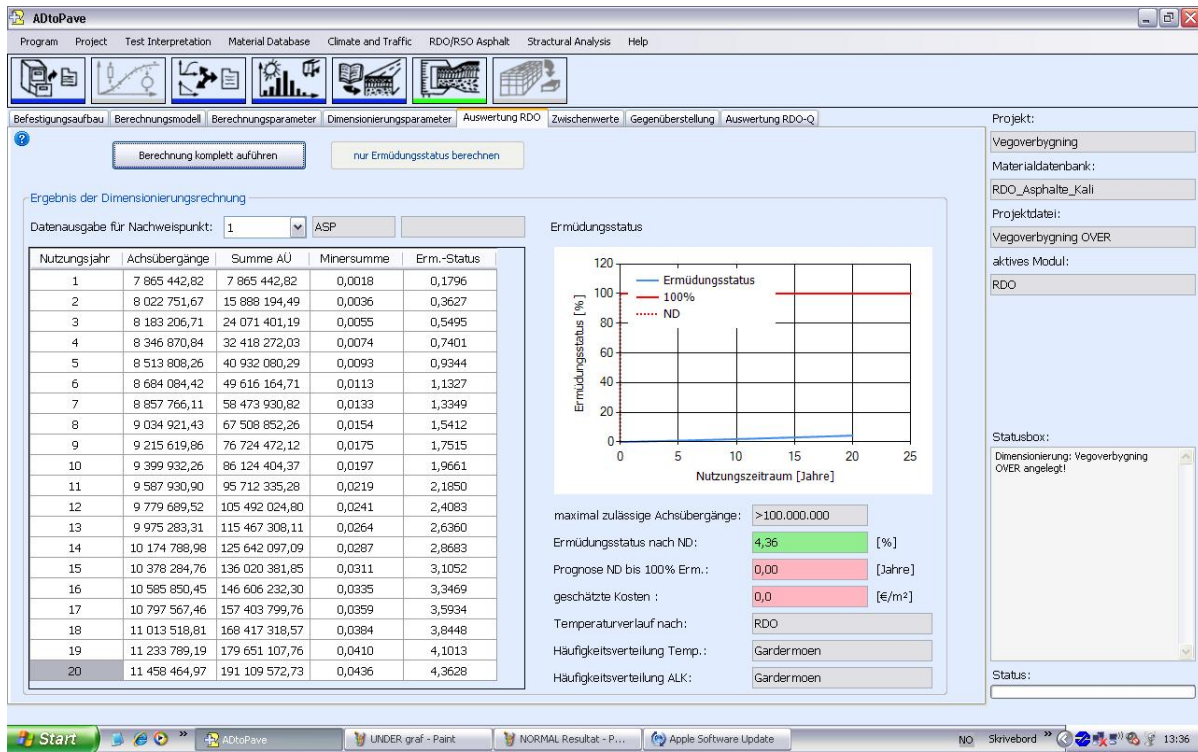
Figur 7: Resultat av underdimensjonert vegoverbygning



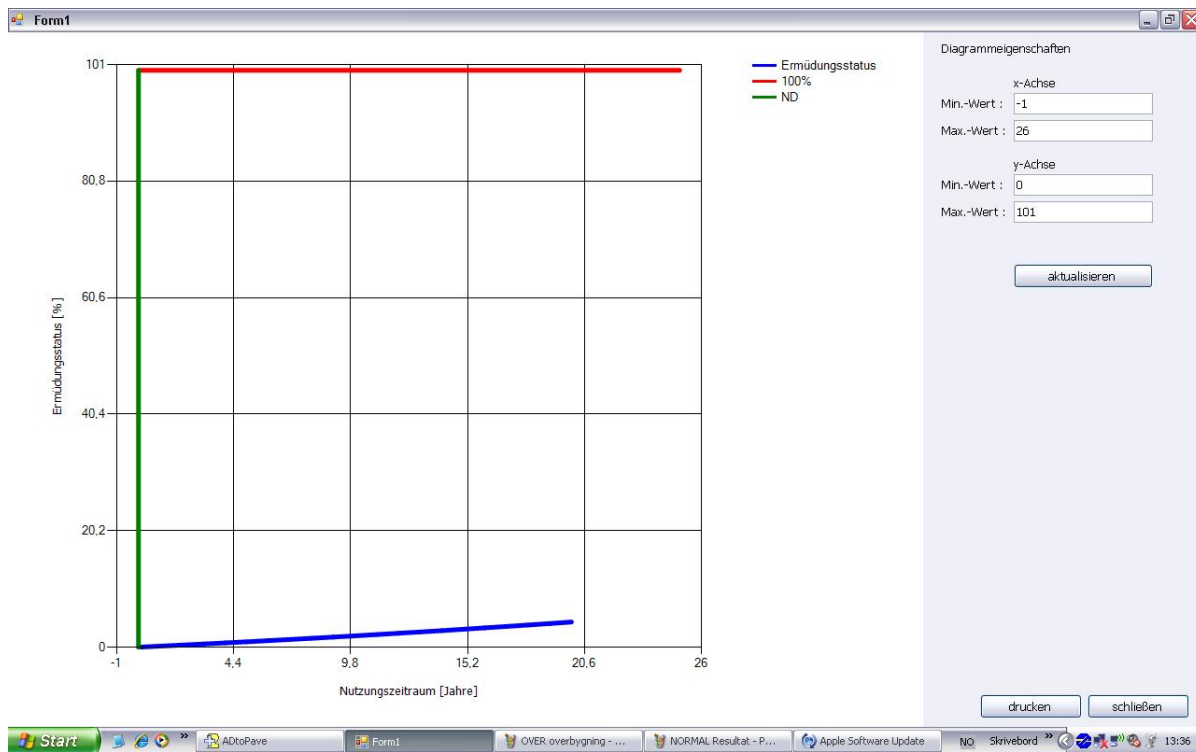
Figur 8: Utmattingsstatus for underdimensionert vegoverbygning



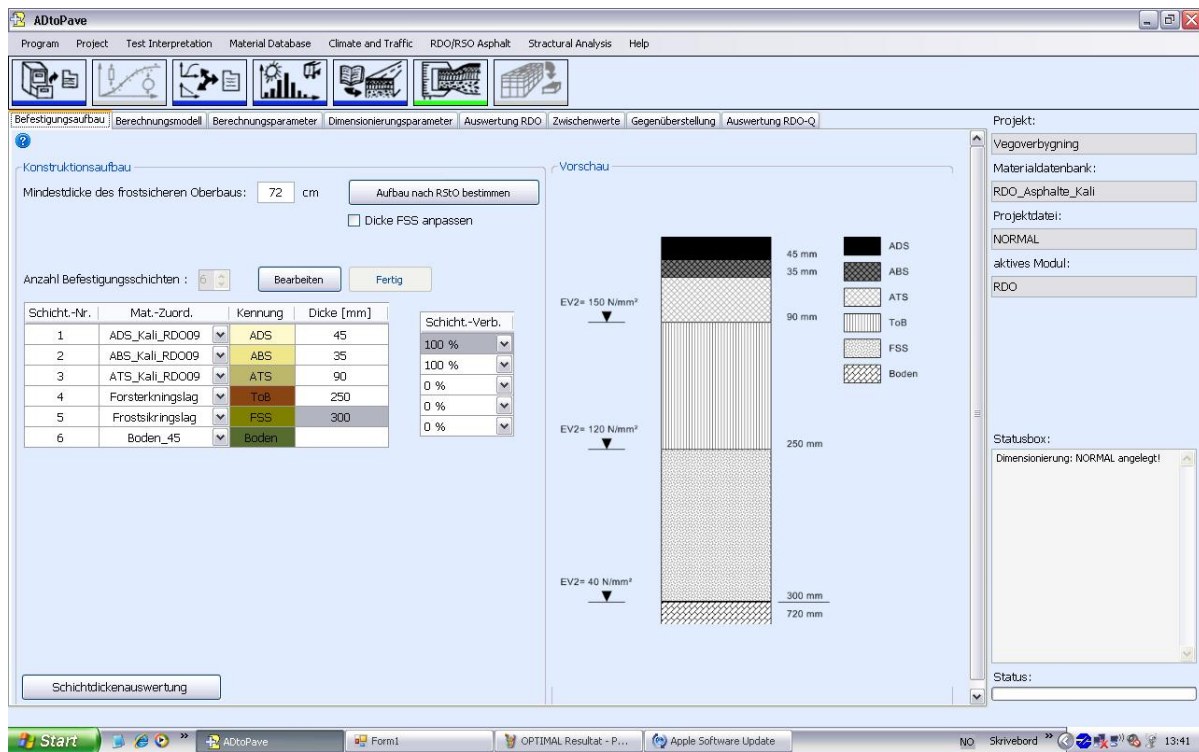
Figur 9: Overdimensjonert vegoverbygning



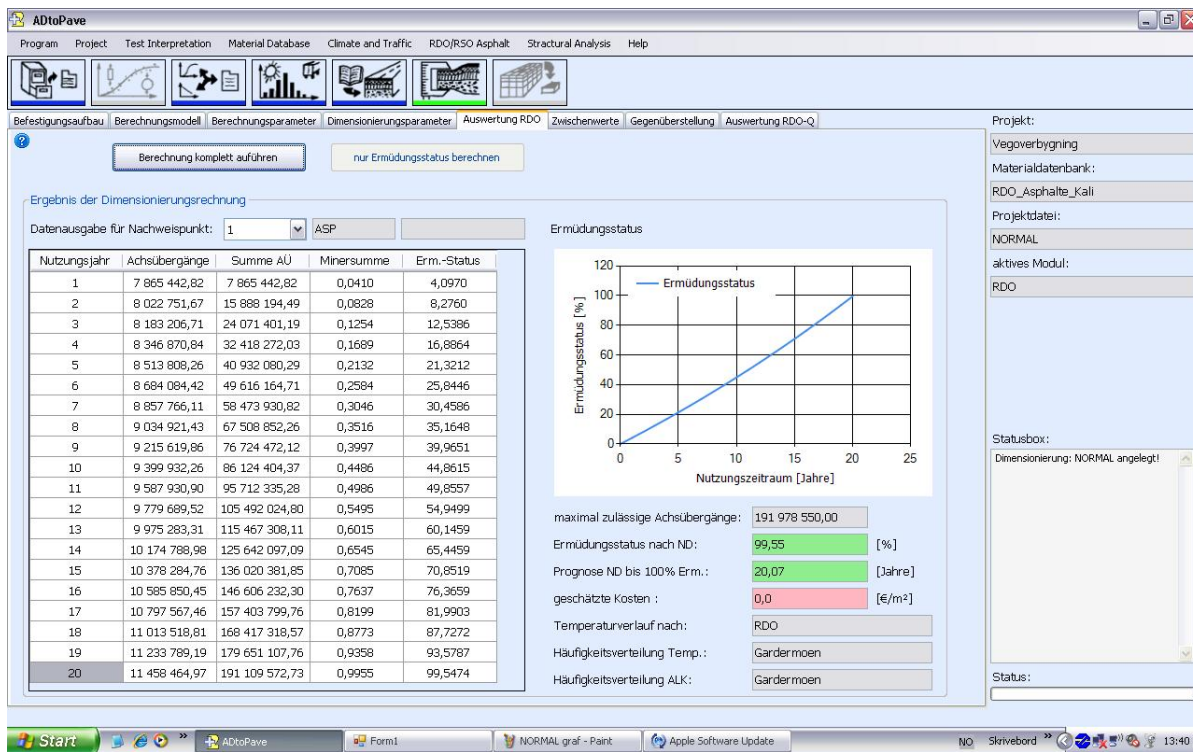
Figur 10: Resultat av for overdimensjonert vegoverbygning



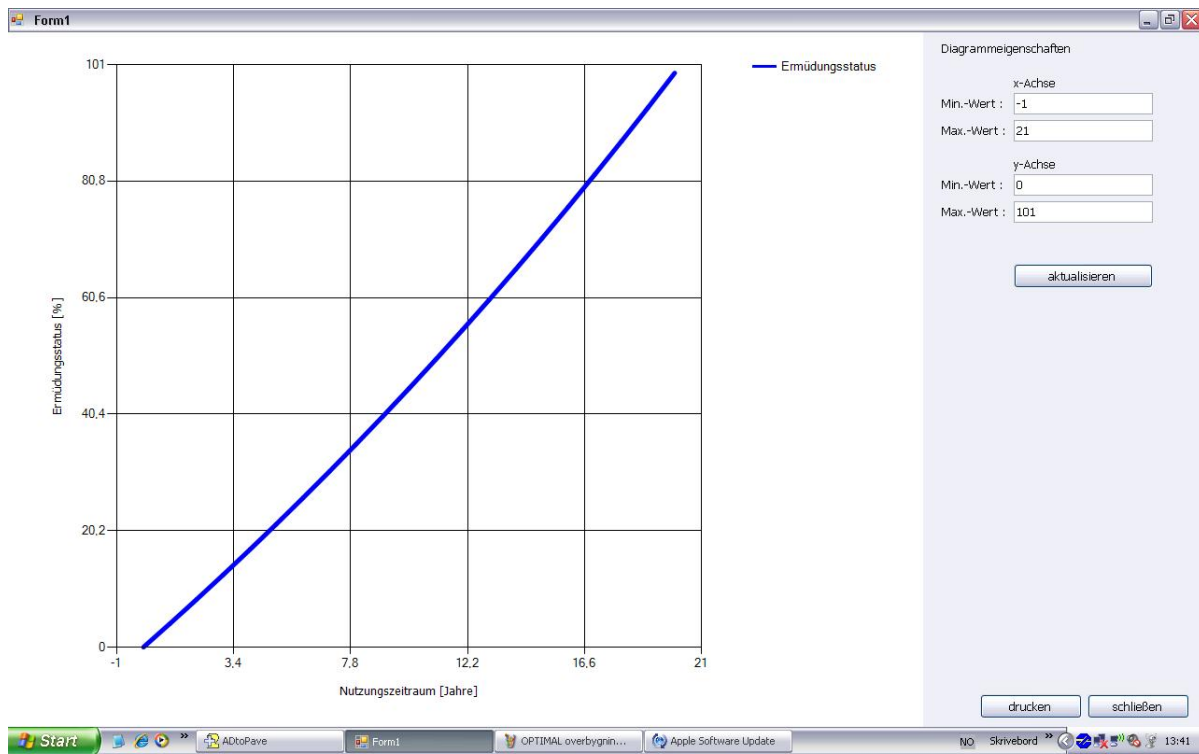
Figur 11: Utmattingsstatus for overdimensionert vegoverbygning



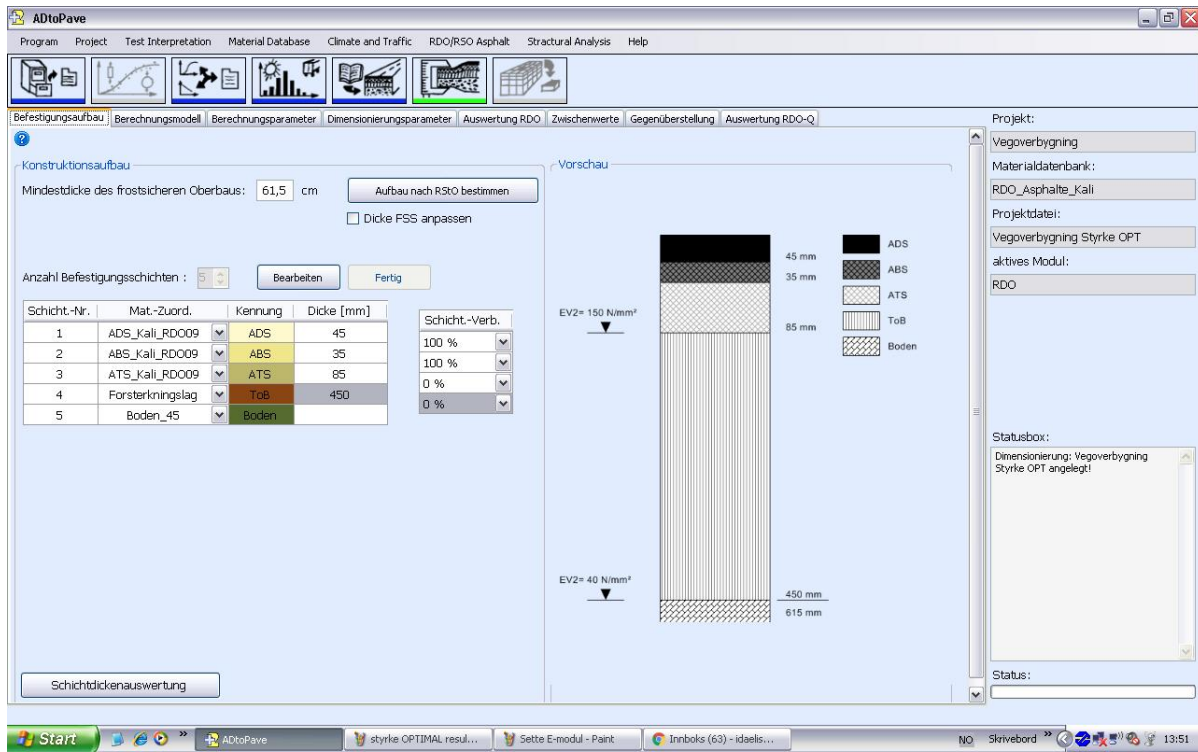
Figur 12: Optimaldimensjonert vegoverbygning



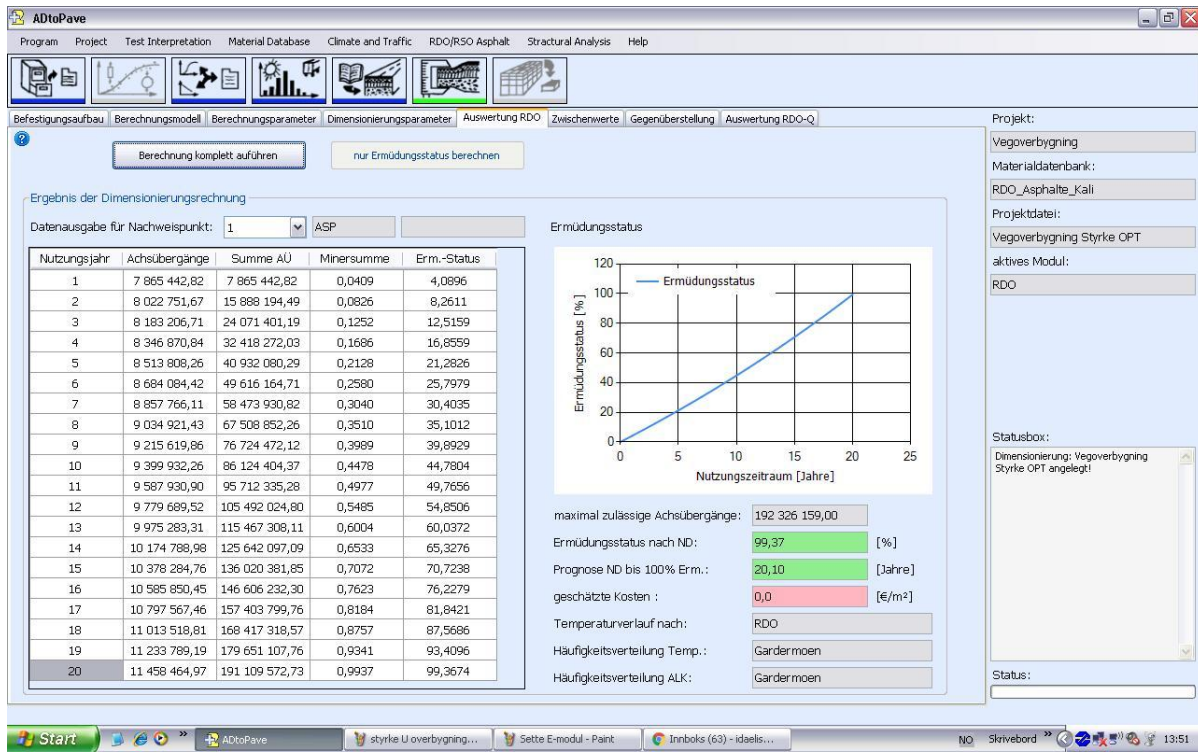
Figur 13: Resultat av for optimaldimensjonert vegoverbygning



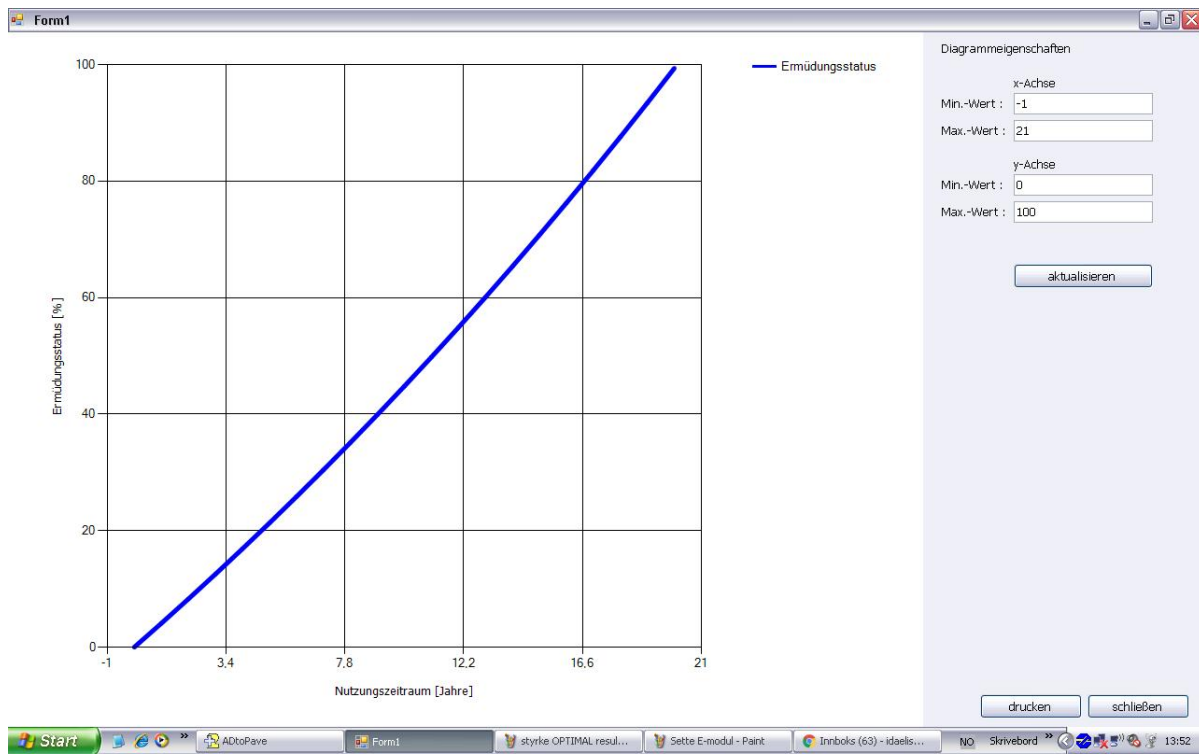
Figur 14: Utmattingsstatus for optimaldimensionert vegoverbygning



Figur 15: Optimaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag



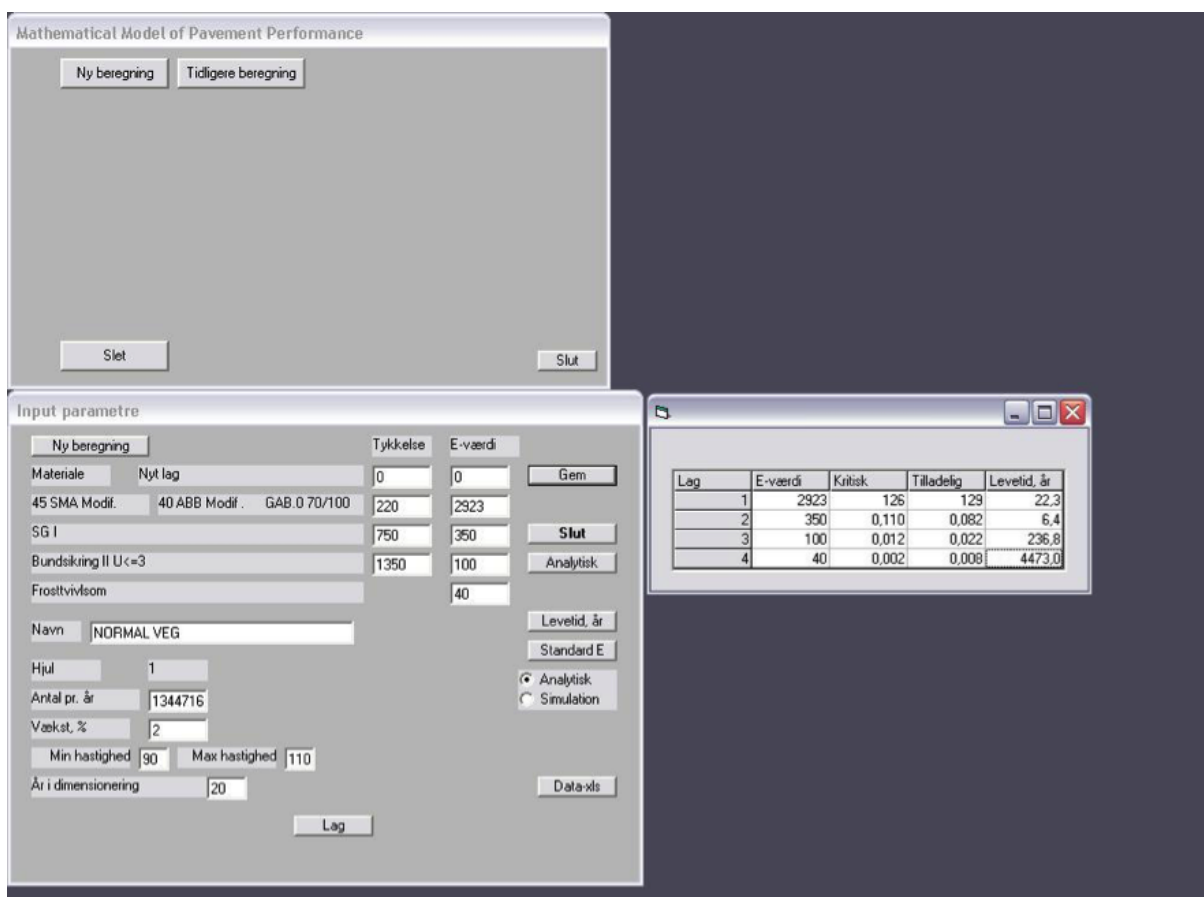
Figur 16: Resultat av for optimaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag



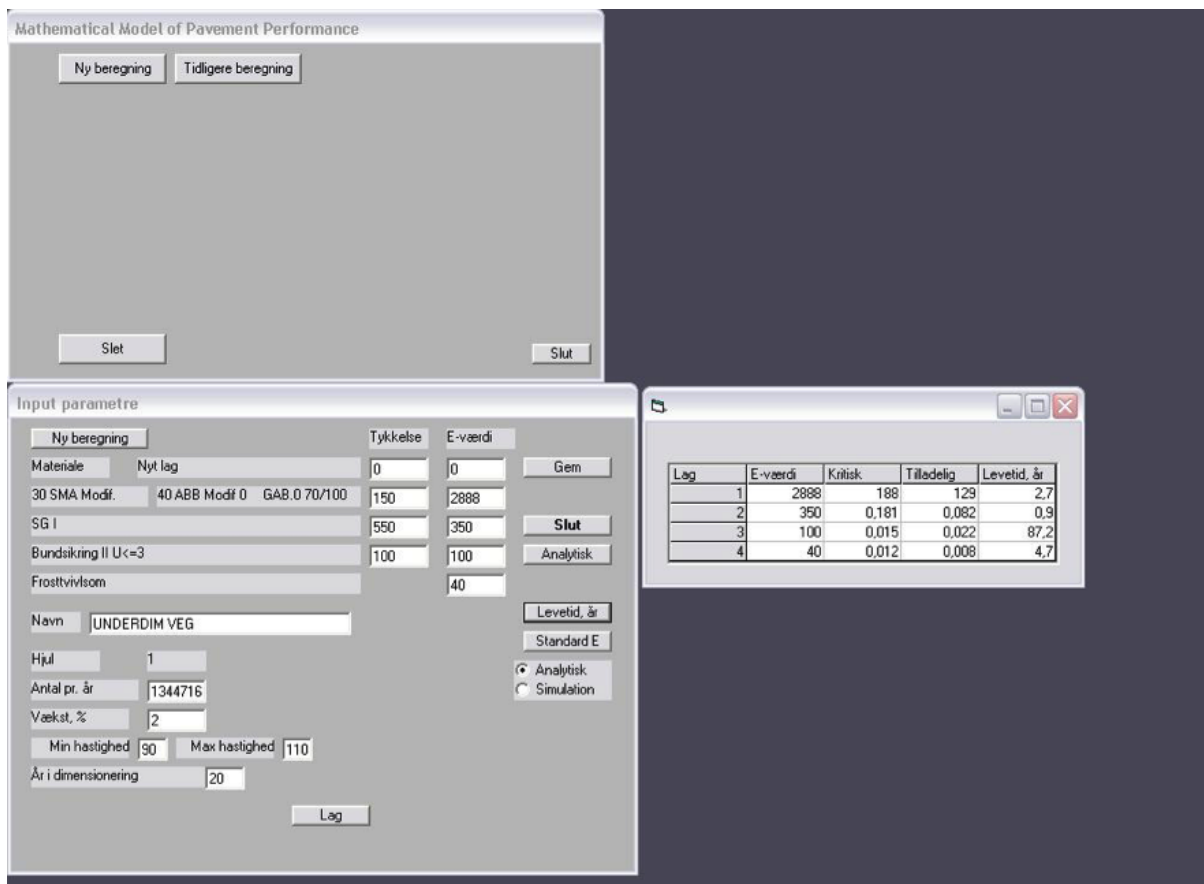
Figur 17: Utmattingsstatus for optimaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag

Vedlegg 4 - MMOPP

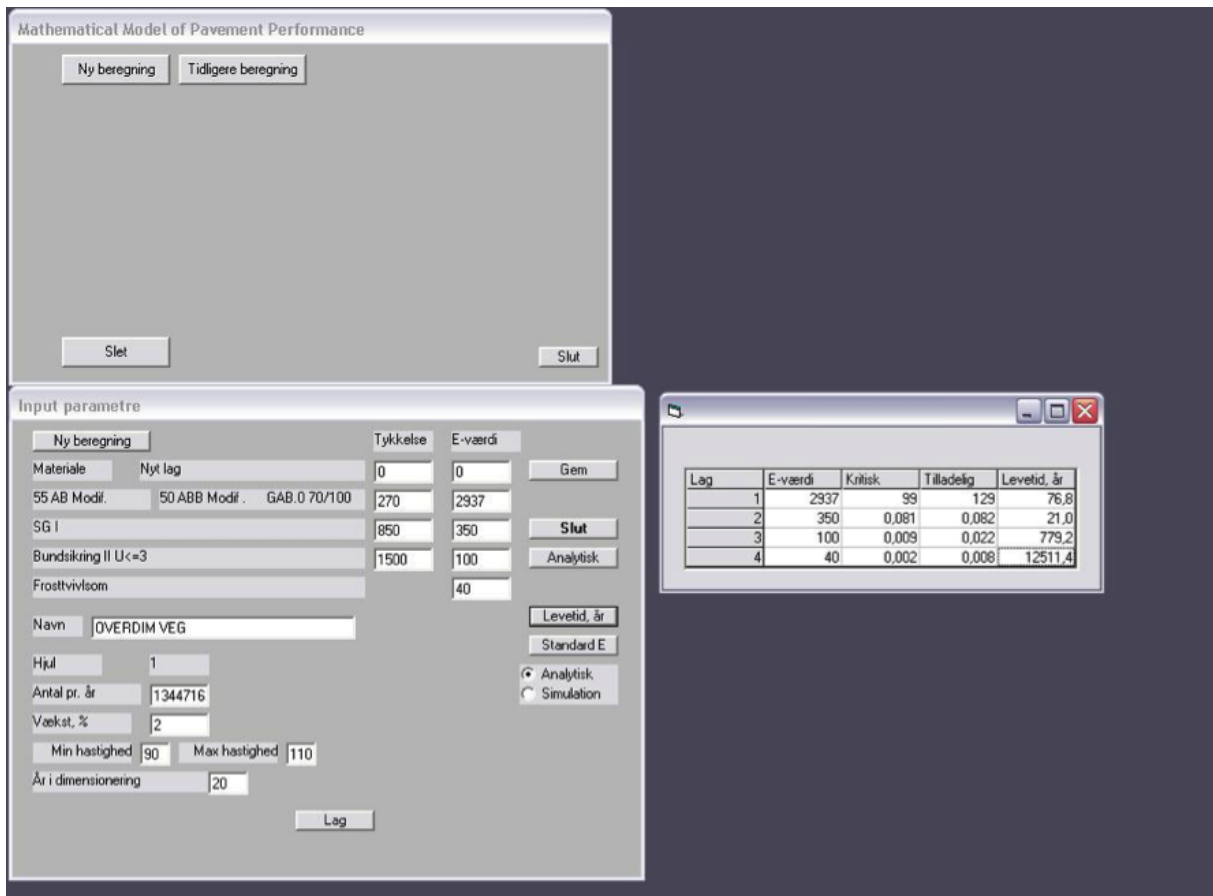
I dette vedlegget vises resultater og utførelse av programmet MMOPP. Det man ser er resultatvinduet og hovedvinduet.



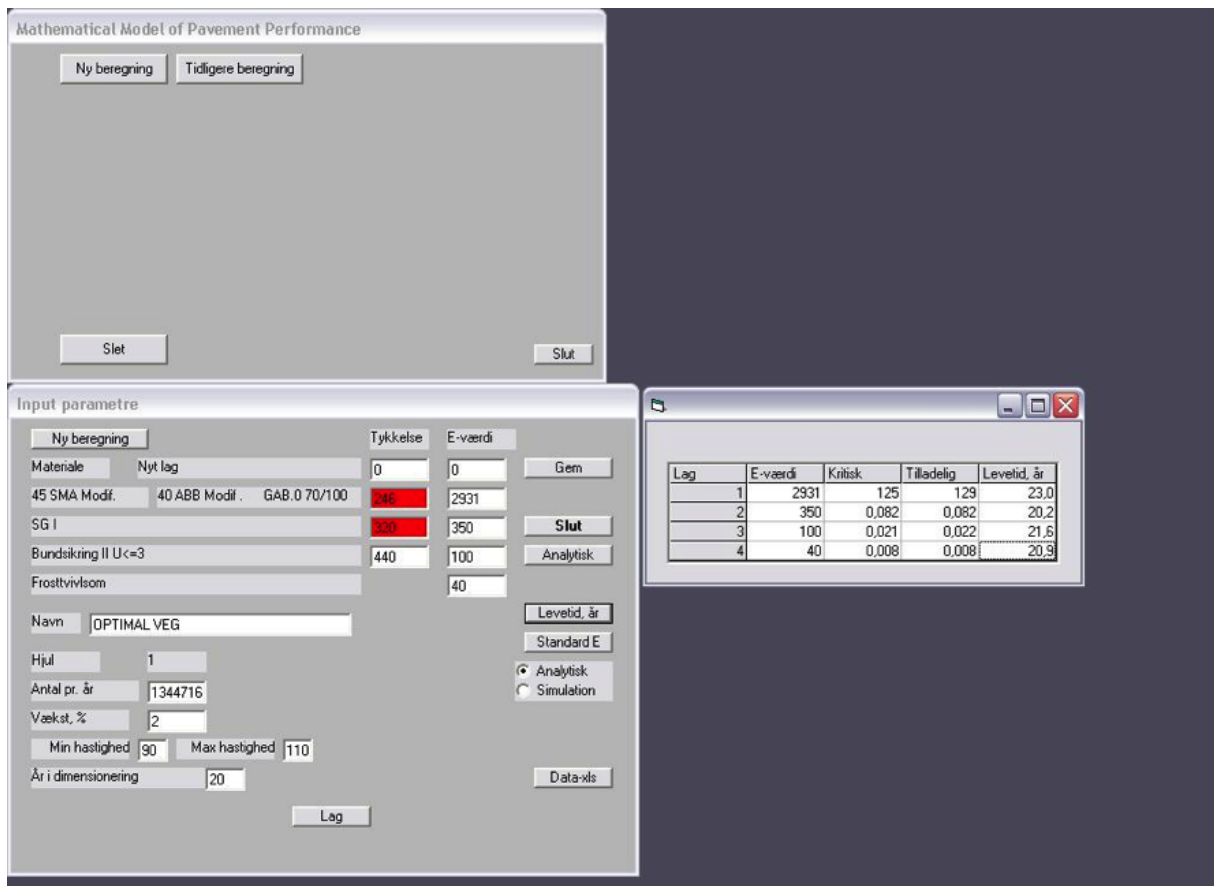
Figur 18: Normaldimensionert vegoverbygning



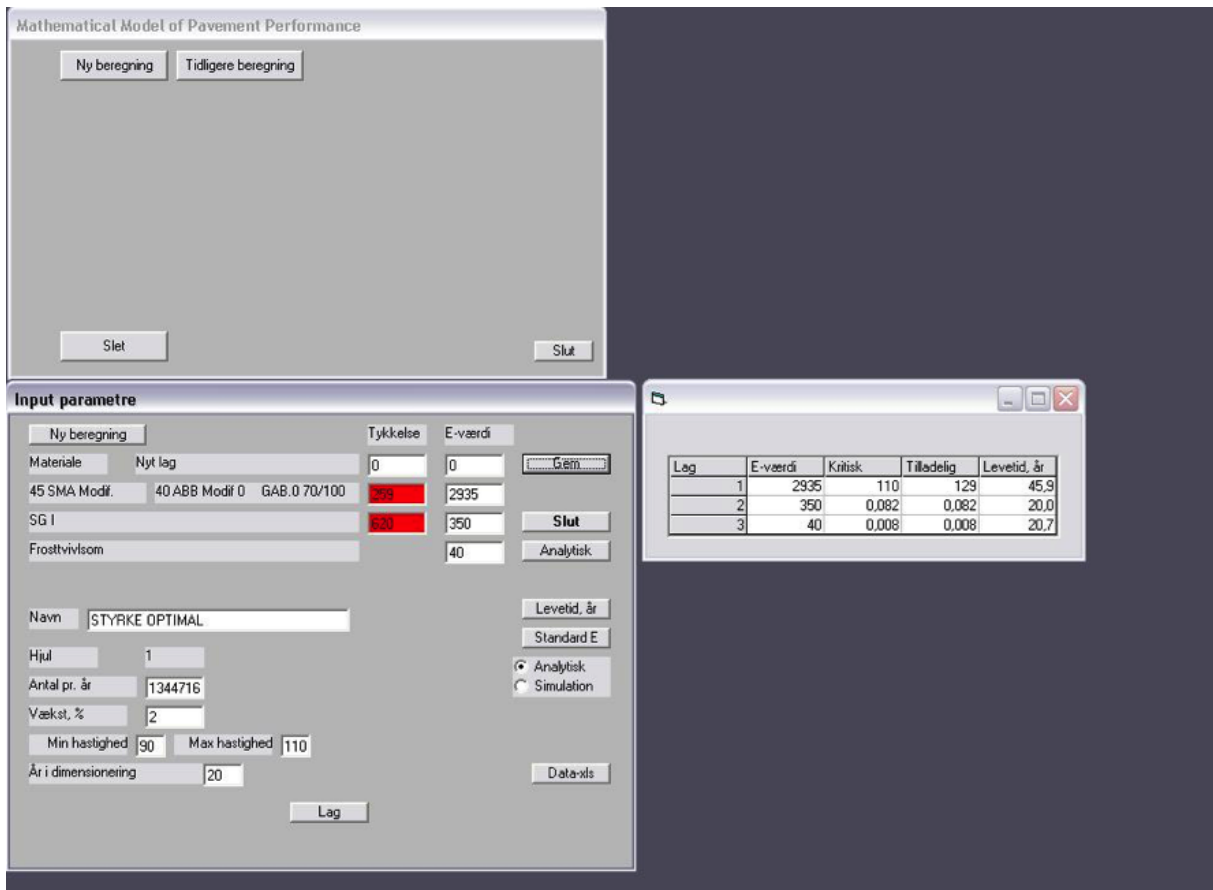
Figur 19: Underdimensionert vegoverbygning



Figur 20: Overdimensionert vegoverbygning



Figur 21: Optimaldimensjonert vegoverbygning



Figur 22: Optimaldimensjonert vegoverbygning uten frostsikringslag

Vedlegg 5 - PMS Objekt

I dette vedlegget vises resultater og utførelse av programmet PMS Objekt. Rapporten lagt inn er det PMS Objekt som skriver etter at forsøkene er kjørt.

Created with PMS Object 2000 version 5.0
Printed: 26.05.2016 15:41

Project information - TEST A-F + vegoverbygninger

Created: 12.04.2016 13:12

Annotations to the project

Section information - Vegoverbygning

Section no: 7
Section type: NEW CONSTRUCTION
Created: 20.04.2016 14:27
Road number: vanlig
Climatic zone: Klimatzon 2
Reference speed: 100
Number of lanes: 4
County: Värmland
Design period(years): 20
Section length: 100
Road width: 23
Width of shoulder: 3
Roadtype: Motorway
Lanes: K1
Starting pointX:
Starting pointY:
Starting pointZ:
Ending pointX:
Ending pointY:
Ending pointZ:
Slope 1:
Slope 2:
Shoulder: 0
Created by:
Organization:

Annotations

--Sidbrytning--

Comments

No comments or annotations for this section.

Traffic calculation section

Method for calculation: According to TRVK VÄG
AADTk: 15 943
Presumed traffic change per year: 2
Share of heavy vehicles: 8
ESAL's per heavy vehicle(B): 1,3
Adjusted Bf = (B x fa x fb x fc): 1,48 = 1,3 x 1,1 x 1,15 x 0,9
Calculated number of ESAL's: 17 076 102

--Sidbrytning--

Road construction

Pavement type: Normal Vegoverbygning
Own pavement type: YES
Material type, subgrade: 4a - Blandkornig jord > 30%
Frost susceptibility class: 3 - Måttligt tjällyftande

Layer

Layer overview

Layer	Thickness	Changed	Name	
1	45	NO	Bitumenbundet slitlager	
2	35	NO	Bindlager	
3	140	NO	Bitumenbundet bärlager	
4	750	NO	Förstärkningslager krossat material	
5	1350	NO	Skyddslager	
6	0	NO	4a - Blandkornig jord > 30%	UPPER
FOUNDATION LEVEL				

Total thickness above upper foundation level 2320

Stiffness modulii [MPa]

Layer	Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
1	14500	13000	12000	11500	4000	11000
2	15000	15000	10000	10000	4000	10000
3	11500	10000	9000	8500	2500	8000
4	450	450	450	450	450	450
5	1000	1000	70	85	100	100
6	1000	1000	30	40	50	50

Other properties

Layer	Lift	ω	ρ	η	σ_r	λ_{ofr}	λ_{fr}
1	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2

2	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
3	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
4	NO	0,03	2000	0,25	0,24	1,33	1,02
5	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43
6	YES	0,2	1700	0,36	0,94	1,61	2,5

--Siddbrytning--

Bearing capacity calculation

Calculation method: GravelBitumenPavement

Adjustment factor due to drainage(FD): 1,0

Number of axle loads, according to:

Strain at the bottom of bitumen bound layer

Nallow, bb: 44 016 574
Neqviv: 17 076 102
Quotient: 0,39

Strain in formation

Neqviv: 11 987 078 785
Neqviv * 2: 34 152 204
Quotient: 0,00

Vertical compression strain

Strain at formation level, isolated load

Calculated: 0,0002
Maximum allowed: 0,0024
Quotient: 0,07

Strains in detail

Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated

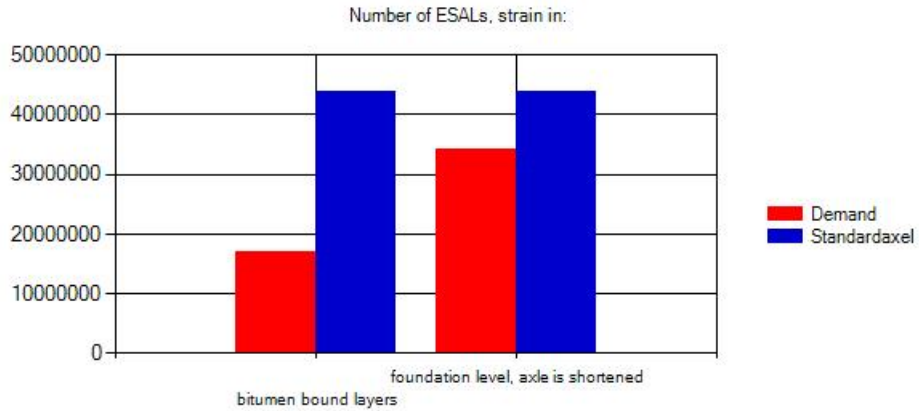
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000051	0,000056	0,000064	0,000066	0,000126	0,000068

Compression strain on formation level, accumulated

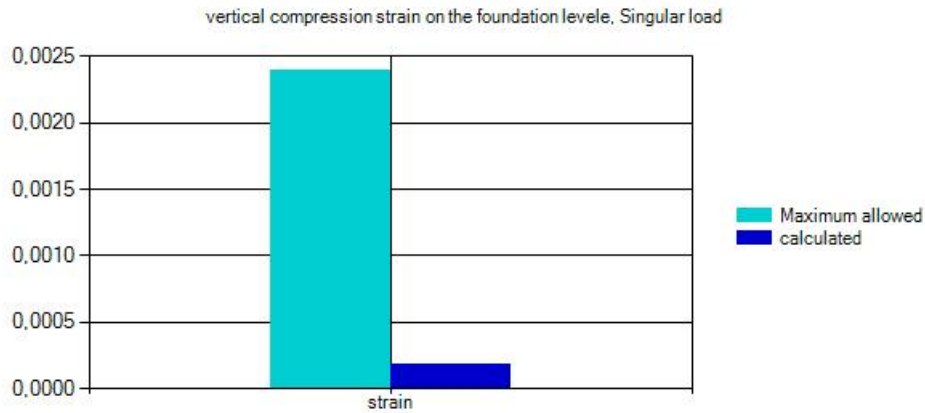
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000005	0,000005	0,000068	0,000056	0,000053	0,000049

Compression strain on formation level due to singular load

Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000013	0,000013	0,000176	0,000146	0,000138	0,000127



Number of loadings - refers to foundation level and bitumen bound layers



Compression strain on formation level due to singular load
--Sidbrytning--

Frost heave calculation

VViS file:	1705
Calculated lift:	0
Calculated maximum frost depth (mm):	973
Maximum adjusted frostdept(mm):	973
Max allowed lift:	20
Lift speed above foundation level (mm/day):	0,5
Lift speed below foundation level (mm/day):	1,0
Gruondwater temperature(C):	6,0
Quotient:	0,00
VViS stationsname:	Hån
N coordinat:	6600888
E coordinat:	318477
H coordinat:	0
Used season:	92/93

Lift speed below foundation level (mm/day) changed from: 1,5 to 1

Comments and annotations:



Max tillåtet tjällyft och beräknat tjällyft

Season	Hive [mm]	Utskiftningsdjup [mm]	Utskiftningsdjup adj.[mm]
1992/1993	0	973	973
1993/1994	0	1163	1163
1994/1995	0	973	973
1995/1996	0	1237	1237
1996/1997	0	1090	1090
1997/1998	0	869	869
1999/2000	0	970	970
2000/2001	0	994	994
2001/2002	0	1004	1004
2002/2003	0	1137	1137
2005/2006	0	1108	1108
2006/2007	0	900	900
2007/2008	0	659	659
2008/2009	0	1006	1006
2009/2010	0	1312	1312
2010/2011	0	1347	1347
2011/2012	0	1002	1002

\par \plain\fs28\b Advanced bearing capacity calculation \plain\fs20

Advanced bearing capacity calculation not performed

Advanced singular load

Advanced singular load calculation not performed

\par \plain\f2\fs28\b Calculation of properties for bitumen bound mixes \plain\f2\fs20

Properties for bitumen bound layer not used

\par \plain\f2\fs28\b Wearing calculation \plain\f2\fs20

No rutting calculation performed

--Sidbrytning--

Volumes and costs

Calculation not performed.

--Sidbrytning--

Section information - Vegoverbygning U

Section no: 9
Section type: NEW CONSTRUCTION
Created: 20.04.2016 14:27
Road number: Underdimensjonert
Climatic zone: Klimatzon 2
Reference speed: 100
Number of lanes: 4
County: Värmland
Design period(years): 20
Section length: 100
Road width: 23
Width of shoulder: 3
Roadtype: Motorway
Lanes: K1
Starting pointX:
Starting pointY:
Starting pointZ:
Ending pointX:
Ending pointY:
Ending pointZ:
Slope 1:
Slope 2:
Shoulder 0
Created by:
Organization:

Annotations

--Sidbrytning--

Comments

1. Bearing capacity does not meet TRVK Väg requirements
2. Frost heave does not meet TRVK Väg requirements

Traffic calculation section

Method for calculation: According to TRVK VÄG
AADTk: 15 943
Presumed traffic change per year: 2
Share of heavy vehicles: 8
ESAL's per heavy vehicle(B): 1,3
Adjusted Bf = (B x fa x fb x fc): 1,48 = 1,3 x 1,1 x 1,15 x 0,9
Calculated number of ESAL's: 17 076 102

--Sidbrytning--

Road construction

Pavement type: Underdim veg
Own pavement type: YES
Material type, subgrade: 4a - Blandkornig jord > 30%
Frost susceptibility class: 3 - Måttligt tjällyftande

Layer

Layer overview

Layer	Thickness	Changed	Name	
1	30	NO	Bitumenbundet slitlager	
2	20	NO	Bindlager	
3	100	NO	Bitumenbundet bärlager	
4	550	NO	Förstärkningslager krossat material	
5	100	NO	Skyddslager	
6	0	NO	4a - Blandkornig jord > 30%	UPPER

FOUNDATION LEVEL

Total thickness above upper foundation level 800

Stiffness modulii [MPa]

Layer	Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
1	14500	13000	12000	11500	4000	11000
2	15000	15000	10000	10000	4000	10000
3	11500	10000	9000	8500	2500	8000
4	450	450	450	450	450	450
5	1000	1000	70	85	100	100

6 1000 1000 30 40 50 50

Other properties

Layer	Lift	ω	ρ	η	σ_r	λ_{ofr}	λ_{fr}
1	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
2	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
3	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
4	NO	0,03	2000	0,25	0,24	1,33	1,02
5	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43
6	YES	0,2	1700	0,36	0,94	1,61	2,5

--Sidbrytning--

Bearing capacity calculation

Calculation method: GravelBitumenPavement

Adjustment factor due to drainage(FD): 1,0

Number of axle loads, according to:

Strain at the bottom of bitumen bound layer

Nallow, bb: 5 473 761
Nequiv: 17 076 102
Quotient: 3,12

Strain in formation

Nequiv: 33 339 877
Nequiv * 2: 34 152 204
Quotient: 1,02

Vertical compression strain

Strain at formation level, isolated load

Calculated: 0,0007
Maximum allowed: 0,0024
Quotient: 0,28

Strains in detail

Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated

Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000087	0,000095	0,000109	0,000112	0,000195	0,000115

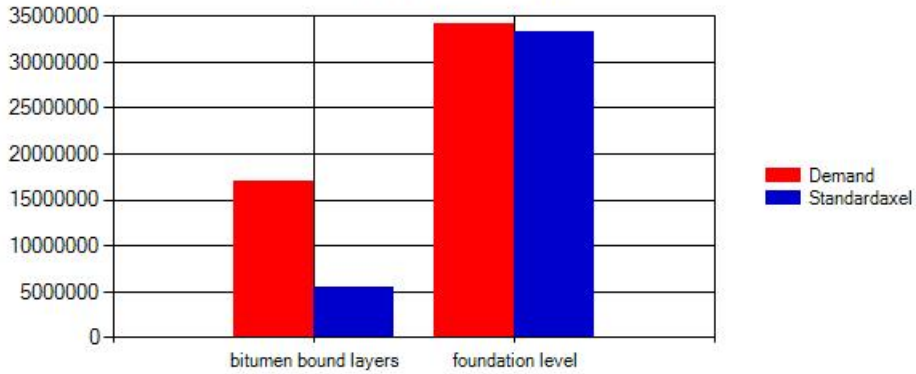
Compression strain on formation level, ackumulated

Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000030	0,000031	0,000257	0,000231	0,000245	0,000211

Compression strain on formation level due to singular load

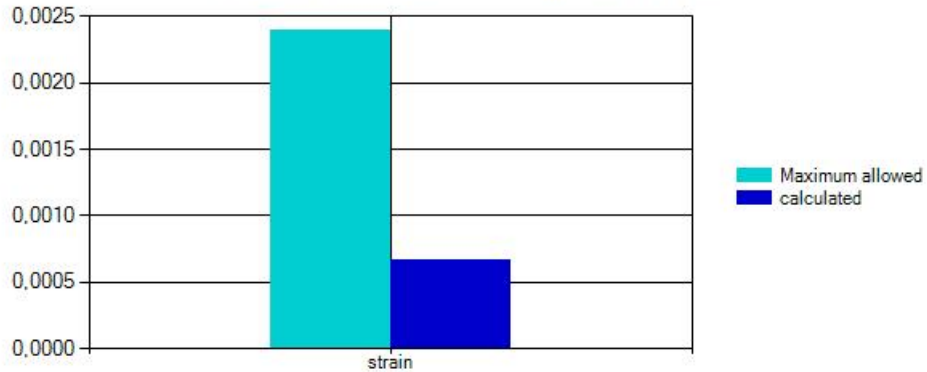
Winter 0,000078 **Thawing winter** 0,000079 **Thawing** 0,000663 **Late spring** 0,000594 **Summer** 0,000630 **Fall** 0,000544

Number of ESALs, strain in:



Number of loadings - refers to foundation level and bitumen bound layers

vertical compression strain on the foundation levele, Singular load



Compression strain on formation level due to singular load
--Sidbrytning--

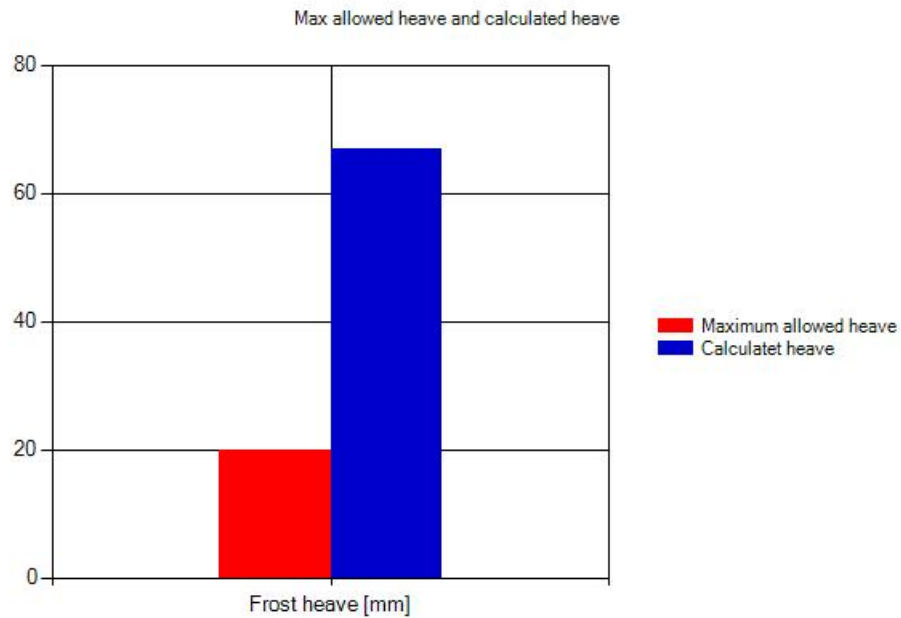
Frost heave calculation

VViS file:		1705
Calculated lift:	67	
Calculated maximum frost depth (mm):		1110
Maximum adjusted frostdept(mm):	1110	
Max allowed lift:	20	
Lift speed above foundation level (mm/day):		0,5
Lift speed below foundation level (mm/day):		1,0
Grundwater temperature(C):	6,0	
Quotient:		3,35

VViS stationsname: Hån
N coordinat: 6600888
E coordinat: 318477
H coordinat: 0
Used season: 10/11

Lift speed below foundation level (mm/day) changed from: 1,5 to 1

Comments and annotations:



Max tillåtet tjällyft och beräknat tjällyft

Season	Hive [mm]	Utskiftningsdjup [mm]	Utskiftningsdjup adj.[mm]
1992/1993	0	800	800
1993/1994	38	948	948
1994/1995	0	800	800
1995/1996	43	994	994
1996/1997	18	948	948
1997/1998	0	741	741
1999/2000	0	783	783
2000/2001	5	816	816
2001/2002	7	817	817
2002/2003	29	948	948
2005/2006	29	948	948
2006/2007	0	800	800
2007/2008	0	608	608
2008/2009	9	827	827
2009/2010	59	1110	1110
2010/2011	67	1110	1110

2011/2012 10 809 809

\par \plain\fs28\b Advanced bearing capacity calculation \plain\fs20

Advanced bearing capacity calculation not performed

Advanced singular load

Advanced singular load calculation not performed

\par \plain\fs28\b Calculation of properties for bitumen bound mixes \plain\fs20

Properties for bitumen bound layer not used

\par \plain\fs28\b Wearing calculation \plain\fs20

No rutting calculation performed

--Sidsbrytning--

Volumes and costs

Calculation not performed.

--Sidsbrytning--

Section information - Vegoverbygning O

Section no:	11
Section type:	NEW CONSTRUCTION
Created:	20.04.2016 14:28
Road number:	Overdimensjonert
Climatic zone:	Klimatzon 2
Reference speed:	100
Number of lanes:	4
County:	Värmland
Design period(years):	20
Section length:	100
Road width:	23
Width of shoulder:	3
Roadtype:	Motorway
Lanes:	K1
Starting pointX:	
Starting pointY:	
Starting pointZ:	
Ending pointX:	
Ending pointY:	
Ending pointZ:	
Slope 1:	
Slope 2:	
Shoulder	0
Created by:	
Organization:	

Annotations

--Sidsbrytning--

Comments

No comments or annotations for avsnittet.

Traffic calculation section

Method for calculation: According to TRVK VÄG
AADTk: 15 943
Presumed traffic change per year: 2
Share of heavy vehicles: 8
ESAL's per heavy vehicle(B): 1,3
Adjusted Bf = (B x fa x fb x fc): 1,48 = 1,3 x 1,1 x 1,15 x 0,9
Calculated number of ESAL's: 17 076 102

--Sidsbrytning--

Road construction

Pavement type: Overdim veg
Own pavement type: YES
Material type, subgrade: 4a - Blandkornig jord > 30%
Frost susceptability class: 3 - Måttligt tjällyftande

Layer

Layer overview

Layer	Thickness	Changed	Name	
1	60	NO	Bitumenbundet slitlager	
2	50	NO	Bindlager	
3	160	NO	Bitumenbundet bärlager	
4	850	NO	Förstärkningslager krossat material	
5	1500	NO	Skyddslager	
6	0	NO	4a - Blandkornig jord > 30%	UPPER

FOUNDATION LEVEL

Total thickness above upper foundation level 2620

Stiffness modulii [MPa]

Layer	Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
1	14500	13000	12000	11500	4000	11000
2	15000	15000	10000	10000	4000	10000

3	11500	10000	9000	8500	2500	8000
4	450	450	450	450	450	450
5	1000	1000	70	85	100	100
6	1000	1000	30	40	50	50

Other properties

Layer	Lift	ω	ρ	η	σ_r	λ_{ofr}	λ_{ifr}
1	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
2	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
3	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
4	NO	0,03	2000	0,25	0,24	1,33	1,02
5	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43
6	YES	0,2	1700	0,36	0,94	1,61	2,5

--Siddbrytning--

Bearing capacity calculation

Calculation method: GravelBitumenPavement

Adjustment factor due to drainage(FD): 1,0

Number of axle loads, according to:

Strain at the bottom of bitumen bound layer

Nallow, bb: 148 327 669
Neqviv: 17 076 102
Quotient: 0,12

Strain in formation

Neqviv: 26 377 555 412
Neqviv * 2: 34 152 204
Quotient: 0,00

Vertical compression strain

Strain at formation level, isolated load

Calculated: 0,0001
Maximum allowed: 0,0024
Quotient: 0,06

Strains in detail

Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated

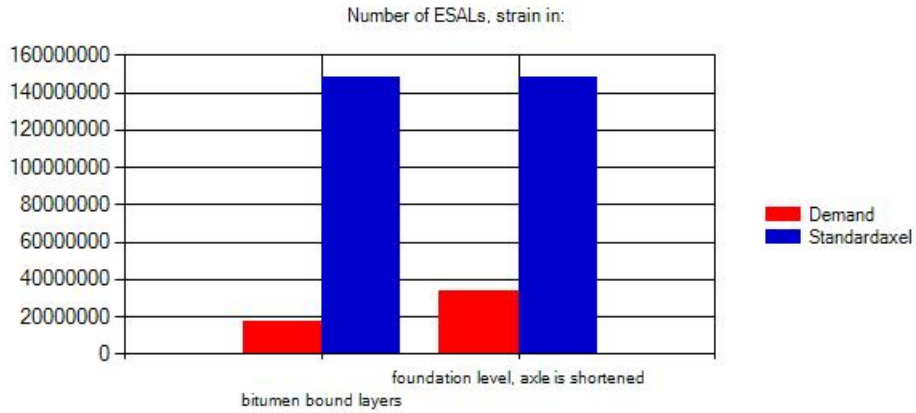
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000037	0,000041	0,000047	0,000049	0,000096	0,000050

Compression strain on formation level, ackumulated

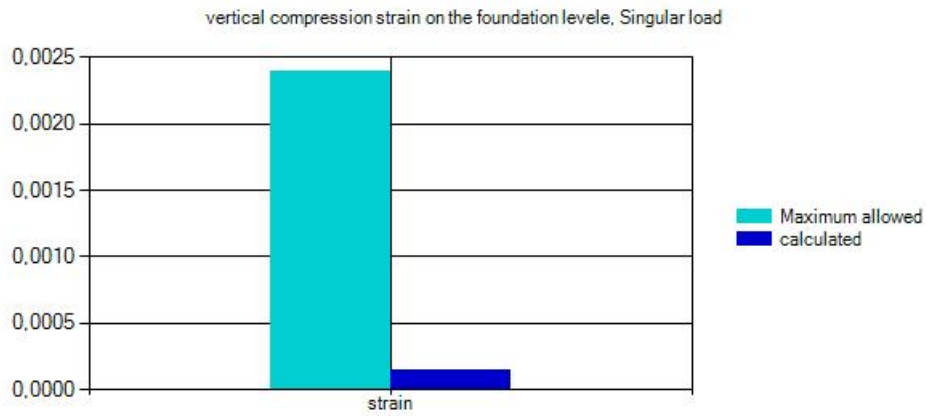
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000004	0,000004	0,000056	0,000046	0,000043	0,000040

Compression strain on formation level due to singular load

Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000010	0,000010	0,000146	0,000120	0,000113	0,000103



Number of loadings - refers to foundation level and bitumen bound layers



Compression strain on formation level due to singular load
--Sidbrytning--

Frost heave calculation

VViS file:	1705
Calculated lift:	0
Calculated maximum frost depth (mm):	1011
Maximum adjusted frostdept(mm):	1011
Max allowed lift:	20
Lift speed above foundation level (mm/day):	0,5

Lift speed below foundation level (mm/day): 1,0
Grundwater temperature(C): 6,0
Quotient: 0,00
VViS stationsname: Hån
N coordinat: 6600888
E coordinat: 318477
H coordinat: 0
Used season: 92/93

Lift speed below foundation level (mm/day) changed from: 1,5 to 1

Comments and annotations:



Max tillåtet tjällyft och beräknat tjällyft

Season	Hive [mm]	Utskiftningsdjup [mm]	Utskiftningsdjup adj.[mm]
1992/1993	0	1011	1011
1993/1994	0	1272	1272
1994/1995	0	1010	1010
1995/1996	0	1291	1291
1996/1997	0	1177	1177
1997/1998	0	910	910
1999/2000	0	981	981
2000/2001	0	1120	1120
2001/2002	0	1120	1120
2002/2003	0	1226	1226
2005/2006	0	1171	1171
2006/2007	0	958	958
2007/2008	0	683	683

2008/2009	0	1120	1120
2009/2010	0	1372	1372
2010/2011	0	1394	1394
2011/2012	0	1120	1120

\par \plain\fs3\fs28\b Advanced bearing capacity calculation \plain\fs2\fs20

Advanced bearing capacity calculation not performed

Advanced singular load

Advanced singular load calculation not performed

\par \plain\fs2\fs28\b Calculation of properties for bitumen bound mixes \plain\fs2\fs20

Properties for bitumen bound layer not used

\par \plain\fs2\fs28\b Wearing calculation \plain\fs2\fs20

No rutting calculation performed

--Sidbrytning--

Volumes and costs

Calculation not performed.

--Sidbrytning--

Section information - Styrke optimal vegoverbygning

Section no: 14
Section type: NEW CONSTRUCTION
Created: 24.04.2016 13:07
Road number: optimal
Climatic zone: Klimatzon 2
Reference speed: 100
Number of lanes: 4
County: Värmland
Design period(years): 20
Section length: 100
Road width: 23
Width of shoulder: 3
Roadtype: Motorway
Lanes: K1
Starting pointX:
Starting pointY:
Starting pointZ:
Ending pointX:
Ending pointY:
Ending pointZ:
Slope 1:
Slope 2:

Shoulder 0
Created by:
Organization:

Annotations

--Sidsbrytning--

Comments

1. Frost heave does not meet TRVK Väg requirements

Traffic calculation section

Method for calculation: According to TRVK VÄG
AADTk: 15 943
Presumed traffic change per year: 2
Share of heavy vehicles: 8
ESAL's per heavy vehicle(B): 1,3
Adjusted Bf = (B x fa x fb x fc): 1,48 = 1,3 x 1,1 x 1,15 x 0,9
Calculated number of ESAL's: 17 076 102

--Sidsbrytning--

Road construction

Pavement type: Pavement not saved but it has been changed!
Own pavement type: YES
Material type, subgrade: 4a - Blandkornig jord > 30%
Frost susceptibility class: 3 - Måttligt tjällyftande

Layer

Layer overview

Layer	Thickness	Changed	Name	
1	45	NO	Bitumenbundet slitlager	
2	35	NO	Bindlager	
3	125	NO	Bitumenbundet bärlager	
4	500	NO	Förstärkningslager krossat material	
5	0	NO	4a - Blandkornig jord > 30%	UPPER

FOUNDATION LEVEL

Total thickness above upper foundation level 705

Stiffness modulii [MPa]

Layer	Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
-------	--------	----------------	---------	-------------	--------	------

1	14500	13000	12000	11500	4000	11000
2	15000	15000	10000	10000	4000	10000
3	11500	10000	9000	8500	2500	8000
4	450	450	450	450	450	450
5	1000	1000	30	40	50	50

Other properties

Layer	Lift	ω	ρ	η	σ_r	λ_{ofr}	λ_{fr}
1	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
2	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
3	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
4	NO	0,03	2000	0,25	0,24	1,33	1,02
5	YES	0,2	1700	0,36	0,94	1,61	2,5

--Siddbrytning--

Bearing capacity calculation

Calculation method: GravelBitumenPavement

Adjustment factor due to drainage(FD): 1,0

Number of axle loads, according to:

Strain at the bottom of bitumen bound layer

Nallow, bb: 26 291 773
Neqviv: 17 076 102
Quotient: 0,65

Strain in formation

Neqviv: 34 644 250
Neqviv * 2: 34 152 204
Quotient: 0,99

Vertical compression strain

Strain at formation level, isolated load

Calculated: 0,0006
Maximum allowed: 0,0024
Quotient: 0,27

Strains in detail

Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated

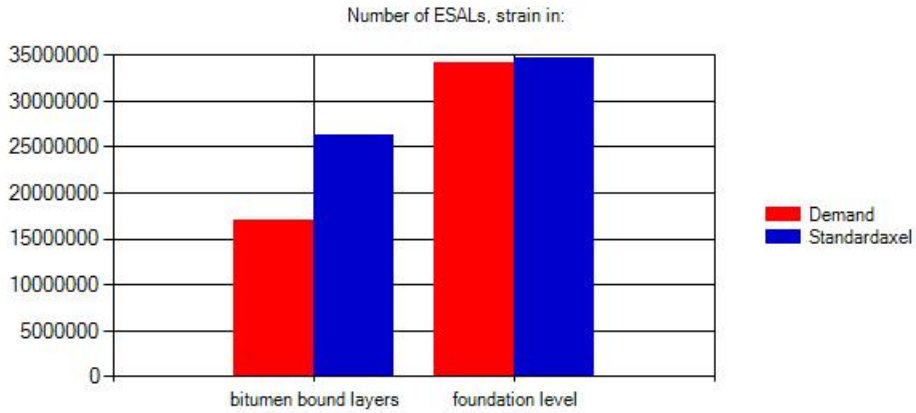
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000056	0,000061	0,000076	0,000078	0,000141	0,000080

Compression strain on formation level, ackumulated

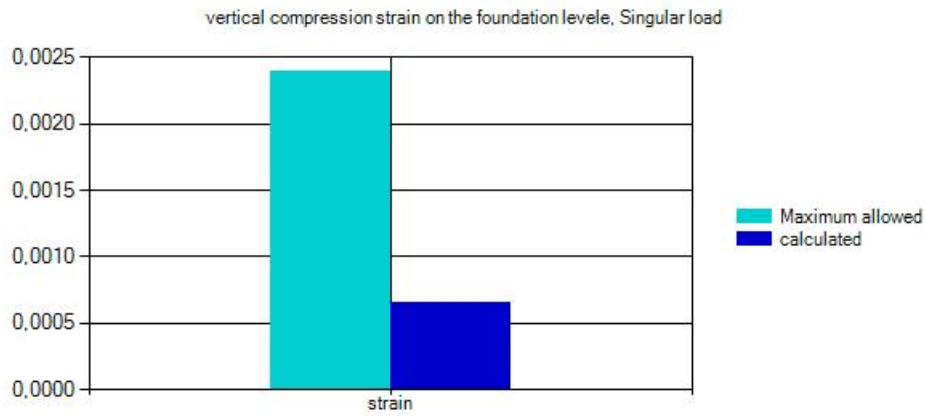
Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000029	0,000030	0,000233	0,000212	0,000252	0,000197

Compression strain on formation level due to singular load

Winter	Thawing winter	Thawing	Late spring	Summer	Fall
0,000074	0,000076	0,000600	0,000547	0,000646	0,000508



Number of loadings - refers to foundation level and bitumen bound layers



Compression strain on formation level due to singular load
--Sidbrytning--

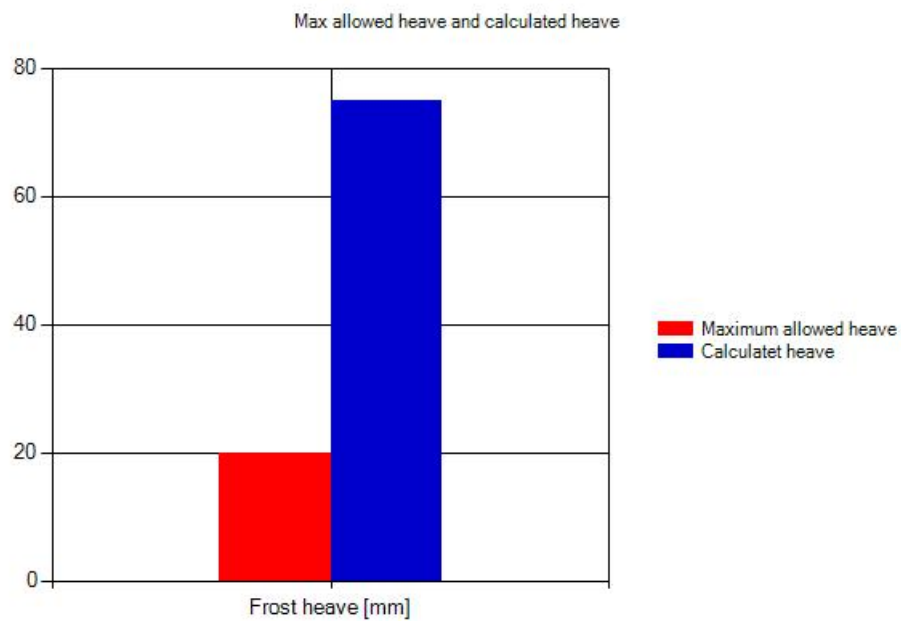
Frost heave calculation

VViS file:		1705
Calculated lift:	75	
Calculated maximum frost depth (mm):		1096
Maximum adjusted frostdept(mm):	1096	
Max allowed lift:	20	
Lift speed above foundation level (mm/day):		0,5

Lift speed below foundation level (mm/day): 1,0
Grundwater temperature(C): 6,0
Quotient: 3,75
VViS stationsname: Hån
N coordinat: 6600888
E coordinat: 318477
H coordinat: 0
Used season: 10/11

Lift speed below foundation level (mm/day) changed from: 1,5 to 1

Comments and annotations:



Max tillåtet tjällyft och beräknat tjällyft

Season	Hive [mm]	Utskiftningsdjup [mm]	Utskiftningsdjup adj.[mm]
1992/1993	14	823	823
1993/1994	54	953	953
1994/1995	12	823	823
1995/1996	48	987	987
1996/1997	27	866	866
1997/1998	7	721	721
1999/2000	12	823	823
2000/2001	17	823	823
2001/2002	17	823	823
2002/2003	41	953	953
2005/2006	47	827	827
2006/2007	13	823	823
2007/2008	0	623	623

2008/2009	24	823	823
2009/2010	66	1036	1036
2010/2011	75	1096	1096
2011/2012	26	823	823

\par \plain\fs28\b Advanced bearing capacity calculation \plain\fs20

Advanced bearing capacity calculation not performed

Advanced singular load

Advanced singular load calculation not performed

\par \plain\fs28\b Calculation of properties for bitumen bound mixes \plain\fs20

Properties for bitumen bound layer not used

\par \plain\fs28\b Wearing calculation \plain\fs20

No rutting calculation performed

--Siddbrytning--

Volumes and costs

Calculation not performed.

Vedlegg 6 - Tøyning

Dette vedlegget viser utregningen av de horisontale tøyningforskjellene i PMS Objekt og MMOPP.

Oversikt inndata					
Gardermoendata			MMOPP		
Forklaring	Data	Enhet/kommentar	Forklaring	Data	Enhet/kommentar
ADT	63770		K_F	0,40	80% i ytre felt
ADT_T	9,60	%	K_K	1,00	Normal k-bredde
Fart	100	km/h	K_R	1,00	
Kjørefelt	4		F_SS	1,80	Motorveg
Undergrunn	T3	Sand/Morene	F_Æ10	0,80	Standard
Trafikkøkning	2	%	p	24,30	
N200/N100 H9-veg			Fordeling	0,86	Over dagen
			N_Æ10	26894328,96	
			N_Æ10/år	1344716	
Forklaring	Data	Enhet	Trafikkklasse	T7	(Se utregning)
Kjørefelt		3,5 m			
Skulder		3 m			
Bredde m/ midtdeler		23 m			
Dimensjoneringsperiode		20 år			

MMOPP

Test A					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
AB 70/100	45		2000		
ABB Mod.	40		3000		
GAB 0 70/100			271	2755	
SG I			290	350	
Bundsikring II U<=3			430	100	
Frostvivilsom				40	
Prosjekt: Test A - PMS Objekt		Dato:		04.06.16	
C:\MMOPP\veiregel\mmopp2013a.mdb					
Belastning:	Type:	PMS Objekt	Antal:	32673062	
Befestelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1	271		2755 45 AB 70/100 + 40 ABB Modif 0 + GAB.0 70/100		
2	290		350 SG I		
3	430		100 Bundsikring II U<=3		
4			40 Frostvivilsom		
Kritisk og tilladelig påvirkning					
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig	Levetid	
1	el	128,1	128,5	microstrain	20,4
2	zz	,0782	,0825	MPa	24,7
3	zz	,0216	,0219	MPa	21,1
4	zz	,0082	,0083	MPa	20,3

Test B					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
AB 70/100		45		2000	
ABB Mod.		40		3000	
GAB II 40/60			236		3809
SG I			310		350
Bundsikring II U<=3			440		100
Frostvulvisom					40
Projekt: Test B - PMS Objekt		Dato:		04.06.16	
C:\MMOPPvejregelmmopp2013a.mdb					
Belastning:	Type:	PMS Objekt	Antal:	32673062	
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1	236		3809 45 AB 70/100 + 40 ABB Modif 0 + GAB II 40/60		
2	310		350 SG I		
3	440		100 Bundsikring II U<=3		
4			40 Frostvulvisom		
Kritisk og tilladelig påvirkning					
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid
1	el	126,2	128,5	microstrain	22,0
2	zz	,0821	,0825	MPa	20,3
3	zz	,0217	,0219	MPa	20,6
4	zz	,0082	,0083	MPa	20,6

Test C					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
SMA Mod.		45		3000	
ABB Mod.		40		3000	
GAB II 40/60			231		4051
SG I			310		350
Bundsikring II U<=3			440		100
Frostvulvisom					40
Projekt: Test C - PMS Objekt		Dato:		04.06.16	
C:\MMOPPvejregelmmopp2013a.mdb					
Belastning:	Type:	PMS Objekt	Antal:	32673062	
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1	231		4051 45 SMA Modif. + 40 ABB Modif 0 + GAB II 40/60		
2	310		350 SG I		
3	440		100 Bundsikring II U<=3		
4			40 Frostvulvisom		
Kritisk og tilladelig påvirkning					
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid
1	el	125,2	128,5	microstrain	23,0
2	zz	,0820	,0825	MPa	20,5
3	zz	,0218	,0219	MPa	20,3
4	zz	,0082	,0083	MPa	20,3



Test D					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
AB 70/100		45		3000	
GAB 0 70/100		40		3000	
GAB II 40/60			240		3609
SG I			310		350
Bundsikring II U<=3			440		100
Frostvivilsom					40
Projekt: Test D - PMS Objekt Dato: 04.06.16 C:\MMOPPvejregel\mmopp2013a.mdb Belastning: Type: PMS Objekt Antal: 32673062					
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1		240	3609 45 AB 70/100 + 40 GAB.0 70/100 + GAB II 40/60		
2		310	350 SG I		
3		440	100 Bundsikring II U<=3		
4			40 Frostvivilsom		
Kritisk og tilladelig påvirkning					
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid
	1 el	127,4	128,5	microstrain	21,0
	2 zz	,0825	,0825	MPa	20,0
	3 zz	,0217	,0219	MPa	20,6
	4 zz	,0082	,0083	MPa	20,8

Test E					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
SMA Mod.		35		3000	
GAB 0 70/100		45		2000	
GAB I 70/100			272		2736
SG I			290		350
Bundsikring II U<=3			430		100
Frostvivilsom					40
Projekt: Test E - PMS Objekt Dato: 04.06.16 C:\MMOPPvejregel\mmopp2013a.mdb Belastning: Type: PMS Objekt Antal: 32673062					
Befæstelse					
Lag	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
1		272	2736 35 SMA Modif. + 45 GAB.0 70/100 + GAB.I 70/100		
2		290	350 SG I		
3		430	100 Bundsikring II U<=3		
4			40 Frostvivilsom		
Kritisk og tilladelig påvirkning					
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid
	1 el	127,9	128,5	microstrain	20,5
	2 zz	,0781	,0825	MPa	24,9
	3 zz	,0215	,0219	MPa	21,3
	4 zz	,0082	,0083	MPa	20,4



Test F					
MMOPP					
Overbygning	Tykkelse	Total tykkelse	E-modul	E- modul totalt	
SMA Mod.	45		3000		
ABB Mod.	55		3000		
GAB II 40/60			257	4141	
Knust Asfalt (KAS)			270	250	
Bundsikring II U<=3			460	100	
Frostvivisom				40	
Projekt:	Test F - PMS Objekt			Dato:	04.06.16
C:\MMOPPvejregelmopp2013a.mdb					
Belastning:	Type:	PMS Objekt	Antal:	32673062	
Befæstelse	Tykkelse, mm	E-værdi, MPa	Materiale		
Lag	1	257	4141 45 SMA Modif. + 55 ABB Modif 0 + GAB II 40/60		
	2	270	250 Knust Asfalt (KAS)		
	3	460	100 Bundsikring II U<=3		
	4		40 Frostvivisom		
Kritisk og tilladelig påvirkning	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid
Lag	1 el	121,7	128,5	microstrain	26,6
	2 zz	,0579	,0577	MPa	19,8
	3 zz	,0215	,0219	MPa	21,4
	4 zz	,0082	,0083	MPa	20,8

Oversikt inndata		
PMS Objekt		
Forklaring	Data	Enhet/kommentar
ADT_k	15943	
f_a	1,1	Feltbredde
f_b	1,15	Europaveg
f_c	0,9	Fart
B	1,3	
General for Test A-F		
Section no:	1	
Section type:	New Construction	
Road number:	A-F	
Climatic zone:	Klimatzon 1	
Reference speed:	100	
Number of lanes:	4	
County:	Skåne	
Design period (years):	20	
Section length:	100	
Road width:	23	
Width of shoulder:	3	
Roadtype:	Motorway	
Lanes:	K1	
Traffic calculation section		
Method for calculation:	According to TRVK VÅG	
AADTk:	15943	
Presumed traffic change per year:	2	
Share of heavy vehicles:	8	
ESAL's per heavy vehicle(B):	1,3	
Adjusted Bf = (B x fa x fb x fc):	1,48 = 1,3 x 1,1 x 1,15 x 0,9	
Calculated number of ESAL's:	17076102	



PMS Objekt										
Test A										
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr
1	271	Lag 1 Test A	2755	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2
2	290	Lag 2 Test A-E	350	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9
3	430	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43
4	0	Frosttvlisom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64

Strain at the bottom of bitumen bound layer	
Nallow, bb:	3 508 449
Neqviv:	17 076 102
Quotient:	4,87 
Strain in formation	
Neqviv:	43 703 229
Neqviv * 2:	34 152 204
Quotient:	0,78 
Vertical compression strain	
Strain at formation level, isolated load	
Calculated:	0,0005
Maximum allowed:	0,0025
Quotient:	0,21
Strains in detail	
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated	0,000121
Compression strain on formation level, accumulated	0,000207
Compression strain on formation level due to singular load	0,000535



Test B											
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr	
1	236	Lag 1 Test B	3809	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2	
2	310	Lag 2 Test A-E	350	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9	
3	440	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43	
4	0	Frosttivilsom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64	

Strain at the bottom of bitumen bound layer	
Nallow, bb:	3 572 822
Nequiv:	17 076 102
Quotient:	4,78 
Strain in formation	
Nequiv:	43 246 387
Nequiv * 2:	34 152 204
Quotient:	0,79 
Vertical compression strain	
Strain at formation level, isolated load	
Calculated:	0,0005
Maximum allowed:	0,0025
Quotient:	0,21
Strains in detail	
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated	0,000121
Compression strain on formation level, accumulated	0,000208
Compression strain on formation level due to singular load	0,000537



Test C											
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr	
1	231	Lag 1 Test C	4051	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2	
2	310	Lag 2 Test A-E	350	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9	
3	440	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43	
4	0	Frosttivilsom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64	

Strain at the bottom of bitumen bound layer	
Nallow, bb:	3 665 083
Nequiv:	17 076 102
Quotient:	4,66 
Strain in formation	
Nequiv:	42 382 767
Nequiv * 2:	34 152 204
Quotient:	0,81 
Vertical compression strain	
Strain at formation level, isolated load	
Calculated:	0,0005
Maximum allowed:	0,0025
Quotient:	0,22
Strains in detail	
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated	0,00012
Compression strain on formation level, accumulated	0,000209
Compression strain on formation level due to singular load	0,000539



Test D												
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr		
1	240	Lag 1 Test D	3609	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2		
2	310	Lag 2 Test A-E	350	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9		
3	440	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43		
4	0	Test A-F Frosttvislomsom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64		

Strain at the bottom of bitumen bound layer		
Nallow, bb:	3 464 269	
Nequiv:	17 076 102	
Quotient:		4,93 
Strain in formation		
Nequiv:	43 720 122	
Nequiv * 2:	34 152 204	
Quotient:		0,78 
Vertical compression strain		
Strain at formation level, isolated load		
Calculated:	0,0005	
Maximum allowed:	0,0025	
Quotient:		0,21
Strains in detail		
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated		0,000122
Compression strain on formation level, accumulated		0,000207
Compression strain on formation level due to singular load		0,000535

Test E												
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr		
1	272	Lag 1 Test E	2736	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2		
2	290	Lag 2 Test A-E	350	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9		
3	430	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43		
4	0	Test A-F Frosttvislomsom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64		

Strain at the bottom of bitumen bound layer		
Nallow, bb:	3 526 537	
Nequiv:	17 076 102	
Quotient:		4,84 
Strain in formation		
Nequiv:	43 999 034	
Nequiv * 2:	34 152 204	
Quotient:		0,78 
Vertical compression strain		
Strain at formation level, isolated load		
Calculated:	0,0005	
Maximum allowed:	0,0025	
Quotient:		0,21
Strains in detail		
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated		0,000121
Compression strain on formation level, accumulated		0,000207
Compression strain on formation level due to singular load		0,000534

Test F													
Layer	Thickness	Name	E-verdi	Lift	w	r	h	sr	lofr	lfr			
1	257	Lag 1 Test F	4141	NO	0,01	2200	0,17	0,13	2	2			
2	270	Lag 2 Test F	250	NO	0,08	2000	0,25	0,64	1,67	1,9			
3	460	Lag 3 Test A-F	100	NO	0,13	1900	0,28	0,88	1,8	2,43			
4	0	Frosttvivisom	40	YES	0,25	1700	0,35	1	1,65	2,64			

Strain at the bottom of bitumen bound layer	
Nallow, bb:	4 158 392
Neqviv:	17 076 102
Quotient:	4,11 
Strain in formation	
Neqviv:	44 425 842
Neqviv * 2:	34 152 204
Quotient:	0,77 
Vertical compression strain	
Strain at formation level, isolated load	
Calculated:	0,0005
Maximum allowed:	0,0025
Quotient:	0,21
Strains in detail	
Tensile strain in bitumen bound layer, accumulated	0,000116
Compression strain on formation level, accumulated	0,000206
Compression strain on formation level due to singular load	0,000533

Tøyingsanalyse						
Test A						
Kritisk og tilladelig påvirkning						
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid	
1 el		128,1	128,5	microstrain	20,4	
2 zz		,0782	,0825	MPa	24,7	
3 zz		,0216	,0219	MPa	21,1	
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,3	
Strains in detail						
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,000121				
Compression strain on formation leve		0,000207				
Compression strain on formation leve		0,000535				
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]
1	Bunn	Tøyning, ε	128,1	121	7,1	5,5 %

Test B						
Kritisk og tilladelig påvirkning						
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid	
1 el		126,2	128,5	microstrain	22,0	
2 zz		,0821	,0825	MPa	20,3	
3 zz		,0217	,0219	MPa	20,6	
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,6	
Strains in detail						
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,000121				
Compression strain on formation leve		0,000208				
Compression strain on formation leve		0,000537				
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]
1	Bunn	Tøyning, ε	126,2	121	5,2	4,1 %

Test C						
Kritisk og tilladelig påvirkning						
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid	
1 el		125,2	128,5	microstrain	23,0	
2 zz		,0820	,0825	MPa	20,5	
3 zz		,0218	,0219	MPa	20,3	
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,3	
Strains in detail						
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,00012				
Compression strain on formation leve		0,000209				
Compression strain on formation leve		0,000539				
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]
1	Bunn	Tøyning, ε	125,2	120	5,2	4,2 %

Test D						
Kritisk og tilladelig påvirkning						
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig		Levetid	
1 el		127,4	128,5	microstrain	21,0	
2 zz		,0825	,0825	MPa	20,0	
3 zz		,0217	,0219	MPa	20,6	
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,8	
Strains in detail						
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,000122				
Compression strain on formation leve		0,000207				
Compression strain on formation leve		0,000535				
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]
1	Bunn	Tøyning, ε	127,4	122	5,4	4,2 %

Test E							
Kritisk og tilladelig påvirkning							
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig	Levetid			
1 el		127,9	128,5	microstrain	20,5		
2 zz		,0781	,0825	MPa	24,9		
3 zz		,0215	,0219	MPa	21,3		
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,4		
Strains in detail							
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,000121					
Compression strain on formation leve		0,000207					
Compression strain on formation leve		0,000534					
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]	
1	Bunn	Tøyning, ε	127,9		121	6,9	5,4 %

Test F							
Kritisk og tilladelig påvirkning							
Lag	Type	Kritisk	Tilladelig	Levetid			
1 el		121,7	128,5	microstrain	26,6		
2 zz		,0579	,0577	MPa	19,8		
3 zz		,0215	,0219	MPa	21,4		
4 zz		,0082	,0083	MPa	20,8		
Strains in detail							
Tensile strain in bitumen bound layer,		0,000116					
Compression strain on formation leve		0,000206					
Compression strain on formation leve		0,000533					
Lag	Hvor	Type	Kritisk MMOI	Kritisk PMS Objekt	Forskjell	Forskjell[%]	
1	Bunn	Tøyning, ε	121,7		116	5,7	4,7 %

Tøyningene opp mot kriteriene satt i MMOPP					
Test	MMOPP	PMS Objekt	Kriterier i MMOPP	Innenfor krav (MMOPP)?	Innenfor krav (PMS Objekt)?
A	128,1	121	128,5	0,4	7,5
B	126,2	121	128,5	2,3	7,5
C	125,2	120	128,5	3,3	8,5
D	127,4	122	128,5	1,1	6,5
E	127,9	121	128,5	0,6	7,5
F	121,7	116	128,5	6,8	12,5

Test	Beregnete Ntill, bb rundet til nærmeste 1000 (MMOPP)*	Beregnete Ntill, bb rundet til nærmeste 1000 (PMS Objekt)*	Kriterier i PMS Objekt	Innenfor krav (MMOPP)?	Innenfor krav (PMS Objekt)?
A	2806081	3524968	17076102	-14270021	-13551134
B	2978923	3524968	17076102	-14097179	-13551134
C	3075242	3643944	17076102	-14000860	-13432158
D	2868263	3410808	17076102	-14207839	-13665294
E	2823673	3524968	17076102	-14252429	-13551134
F	3444565	4173157	17076102	-13631537	-12902945

*Disse verdiene er regnet ut for hånd og derfor stemmer de ikke helt overens med de programberegnete, likevel skal det git en god indikasjon

**Ti = 3,84

	Utenfor kriteriet
	Innenfor kriteriet