



STYVHETSANALYS AV VÄGKONSTRUKTIONER

JON SVENSSON

Geotechnical Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--15/5054--SE (1-74) | ISSN 0349-4977 MASTER'S DISSERTATION

STYVHETSANALYS AV VÄGKONSTRUKTIONER

JON SVENSSON

Supervisors: Prof. OLA DAHLBLOM and ALEX SPETZ, MSc; Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund together with DANIEL BALTROCK, Geotechnician; Peab Anläggning AB. Examiner: KENT PERSSON, PhD; Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund.

> Copyright © 2015 Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering (LTH), Lund University, Sweden. Printed by Media-Tryck LU, Lund, Sweden, August 2015 (*Pl*).

For information, address: Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering (LTH), Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden. Homepage: http://www.geoteknik.lth.se

Abstract

In order to measure the stiffness properties of a soil, a method called the plate loading test is used. Based on this test a modulus called E_{v2} [Pa] is obtained among others. When building a road construction there are different requirements for this E_{v2} -modulus for different layers in the road.

According to the Swedish Transport Administration regulatory document $TRVK \ V\ddot{a}g$ and the dimensioning category 2, the thickness of the unbounded layers in the road construction are not allowed to be less than 500 mm, which leads to that there are no defined E_{v2} requirements for constructions where the thickness of unbound layers is less than this. When coarse-grained and composite soils, which are included in material type 2 and 3B, have a good bearing capacity, road structures built on these soils easily, from a bearing capacity standpoint, could have been constructed with a thickness of the unbound layers that is thinner than 500 mm. When these soils are found in the south of Sweden the ground frost would not be a problem, especially due to the low frost susceptibility of the soil.

By using numerical analyses in COMSOL Multiphysics a relationship between Young's modulus E of a soil and the measured E_{v2} is established. Using this result it is investigated for which values of E_{v2} a subgrade consisting of coarse-grained and composite soils should have for making it acceptable to reduce the thickness of the unbound layers below 500 mm. The evaluation is based on the strain- and bearing capacity requirements defined by the Swedish Transport Administration with help of PMS Objekt and COMSOL Multiphysics and plate loading tests on the mentioned type of subgrades.

Results from analyses show a linear relationship between Young's modulus E of a soil and measured E_{v2} -modulus. Based on this, exponential required E_{v2} -relationships are derived for subgrades consisting of coarse-grained and composite soils which depend on the thicknesses of the unbound layers and the traffic load. These new recommended requirements appear to be properly aligned with the existing ones.

Keywords: Plate loading test, Bearing capacity, Stiffness analysis, Strain moduli, Undbound material, Unbound sub-base, Coarse-grained soil, Composite soil

Sammanfattning

För att mäta en jords styvhetsegenskaper kan en metod vid namn statisk plattbelastning utnyttjas. Utifrån detta fås bl.a. en deformationsmodul E_{v2} [Pa]. Vid vägbyggnad ställs olika krav på denna E_{v2} -modul för olika lager i vägkonstruktionen.

Enligt Trafikverkets styrdokument TRVK Väg och dimensioneringsklass 2 ska tjockleken på vägkonstruktionens obundna lager ej understiga 500 mm, vilket leder till att det inte finns några definierade E_{v2} -krav för konstruktioner vars tjocklek på obundna lager understiger detta. Då grov- och blandkorniga jordar, vilka tillhör materialtyp 2 och 3B, har goda bärighetsegenskaper hade dock vägkonstruktioner byggda på dessa jordarter ur bärighetssynpunkt mycket väl kunnat vara uppbyggda av obundna lager vars tjocklek är mindre än 500 mm. När dessa jordarter återfinns i landets södra delar hade inte heller tjälen varit några problem, framförallt tack vare jordmaterialens låga tjälfarlighet.

Med användning av numeriska beräkningar med COMSOL Multiphysics upprättas ett samband mellan en jords elasticitetsmodul E och uppmätt E_{v2} . Utifrån detta resultat undersöks vilka värden på E_{v2} en terrassyta bestående av grov- och blandkorniga jordarter bör ha för att tjockleken på obundna lager ska kunna reduceras under 500 mm. Utvärderingen baseras på Trafikverkets töjnings- och bärighetskrav med hjälp av *PMS Objekt* samt *COMSOL* Multiphysics och utförda statiska plattbelastningar på terrasser av nämnd typ.

Resultatet från utförda analyser visar ett linjärt samband mellan ett jordmaterials E-modul och uppmätt E_{v2} -modul. Utifrån detta tas exponentiella E_{v2} -kravförhållanden fram för terrassmaterial bestående av grov- respektive blandkorniga jordar för olika tjocklekar på obundna lager samt trafikbelastning. Dessa nya rekommenderade krav visar sig stämma väl överens med redan befintliga.

Nyckelord: Statisk plattbelastning, Bärighetskrav, Styvhetsanalys Deformationsmodul, Obundna material, Förstärkningslager, Terrass, Grovkornig jord, Blandkornig jord

Förord

Detta examensarbete skrevs i samarbete med Institutionen för byggvetenskaper vid LTH och Peab Anläggning AB under våren 2015.

Ett stort tack riktas till den fantastiska handledartrion beståendes av professor Ola Dahlblom och doktorand Alex Spetz, LTH, samt geotekniker Daniel Baltrock, Peab Anläggning AB, som alltid svarat på frågor, kommit med idéer och styrt detta examensarbete i rätt riktning. Ett tack vill jag även tillägna universitetslektor Sven Agardh som alltid varit öppen för att hjälpa till.

Då detta examensarbete kan ses som en punkt för mina femåriga studier vid LTH vill jag även passa på att tacka alla inblandade som bidragit till en fantastisk studietid. Slutligen vill jag även uttrycka min uppskattning till min underbara familj som alltid funnits där och stöttat mig i alla lägen.

Lund, 10 augusti 2015

Jon Svensson

Definitioner

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring				
Andel tunga fordon	A	%-	Andel av den totala trafiken som utgörs av				
		enheter	tunga fordon				
Antal dygn under	n_i	dygn	Antal dygn som innefattas i aktuell klimat-				
klimat period i			period vid bärighetsberäkning av specifikt				
			vägsnitt				
Antal klimatperio-	m	st	Antal klimatperioder som innefattas vid bä-				
der			righetsberäkning av specifikt vägsnitt				
Aritmetiskt medel-	\bar{x}		Genomsnittligt värde för ett antal enskilda				
värde			mätvärden. Beräknas enligt ekvation 2.12				
			på sida 17				
Belastningsplattans	r	m	Radien hos belastningsplattan som utnytt-				
radie			jas vid statisk plattbelastning				
Bitumenbundet			Kan även beskrivas som asfaltslager och in-				
lager			nefattar i detta arbete bitumenbundet slit-				
			lager samt bitumenbundet bärlager				
Bärlager			Lager i vägkonstruktionen vars huvudsakli-				
			ga syfte är att ta upp och fördela trafikbe-				
			lastningen till underliggande material				
COMSOL Multiphy-			Mjukvaruplattform som kan användas för				
sics			att modellera och simulera fysikaliska pro-				
			blem				
Dimensioneringsklass	DK		När en väg dimensioneras kan detta göras				
			utifrån tre klasser:				
			DK1: Tabellmetod som grundar sig i Tra-				
			fikverkets dokument VVMB 302				
			DK2: Empirisk/mekanistisk dimensionering				
			DK3: Avancerade mekaniska modeller samt				
			laboratorieprovning				

Tabell 1: Definitioner

Tabell 1: Definitioner

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring
Deformationsmodul	E_{v1}, E_{v2}	MPa	Används för att karakterisera en jords deformerbarhet. Värdet utgår från förs- ta respektive andra belastningskurvan an- passad efter mätpunkter i ett spännings- sättningsdiagram erhållet vid statisk platt- belastning. Beräknas enligt ekvation 2.11 på sida 16
Densitet	ρ	kg/m ^o	Matt på ett materials tathet och definieras som massa per volymenhet
Ekvivalent antal standardaxlar	N_{ekv}	st	Kan förenklat beskrivas som ett utryck för hur många standardaxlar den totala trafik- belastningen motsvarar under vägens livs- längd. Beräknas enligt ekvation 2.1 på sida 9
Ekvivalent antal standardaxlar per tungt fordon	В	st	Hur många standardaxlar ett tungt fordon antas motsvara
Elacticitetsmodul	E	Pa	Beskriver hur spänningar och töjningar för- håller sig till varandra
Element			Vid numerisk analys delas hela modellen upp i mindre delar, där enskild del kallas element. Hur elementindelningen är gjord beskrivs i ett elementnät
Enskilt mätvärde	x_i		Värdet från en enskild observation i ett stickprov
Extremlast			Beskrivs i avsnitt 2.1.4
Fixlager			Randvillkoret tillåter varken deformation eller rotation i någon riktning
Flexibel överbygg- nad			Överbyggnad vars ingående lager endast är obundna eller obundna och bitumenbundna
Förstärkningslager			Lager i vägkonstruktionen vars huvudsak- liga syfte är att fördela trafikbelastningen vidare ner till undergrunden
Grovt fel	G_f		Enskild avvikelse som över-/understiger ett bestämt gränsvärde och avgör om det är ett uppenbart fel
Homogent material			Ett material som är uppbyggt på samma sätt överallt
Isotropt material			Ett material vars egenskaper är oberoende av riktningen

Tabell 1: Definitioner

Begrepp	Beteckning	\mathbf{Enhet}	Förklaring
Justerat antal stan-	B_{just}	st	Ekvivalent antal standardaxlar per tungt
dardaxlar per tungt			fordon justerat enligt ekvation 2.3 på sida
fordon			9
Justeringsfaktorer	f_a, f_b, f_c		Justeringsfaktiorer som utnyttjas vid beräk-
			ning av N_{ekv} . Återfinns i tabell 2.4-2.6 på
			sida 10
Klimatperiods längd	n_i	dygn	Ett år sägs vara indelat i sex klimatperioder
			vars längd varierar beroende på klimatzon.
			Dessa finns beskrivna i tabell 2.1 på sida 7
Klimatzon			Sverige delas in i fem olika klimatzoner
			eftersom vägbyggnadsmaterial påverkas av
			fukt och temperaturvariationer. Indelning-
			en kan ses i figur 2.1 på sida 6
Korrigeringsfaktorer	f_d, f_s		Korrigeringsfaktorer som utnyttjas vid be-
			räkning av tillåtna töjningar i vägkonstruk-
			tionen. Sätts till 1 vid nybyggnation
Linjärelastisk			Spänningar och töjningar förhåller sig till
			varandra enligt Hookes lag enligt ekvation
			3.1 på sida 19
Materialtyp 2			Grovkorniga jordarter som grus, sand, san-
			dig grus, grusig sand, grusmorän och sand-
			morän. Tillhör tjälfarlighetsklass 1
Materialtyp 3B			Blandkorniga jordarter som siltig sand, sil-
			tig grus, siltig sandmorän och siltig grusmo-
			rän. Tillhör tjälfarlighetsklass 2
Maximal medelnor-	σ_{1max}	Pa	Maximal medelnormalspänning som utnytt-
malspänning			jas i den första belastningscykeln vid statisk
			plattbelastning
Maximal töjning i	$\varepsilon_{te,max}$		Största vertikala töjning som uppstår i ter-
terrassytan			rassytan med belastning av extremlast på
			vägytan
Medelnormalspänning	σ_0	Pa	Medelnormalspänning som verkar direkt
			under belastningsplattans centrum vid sta-
			tisk plattbelastning
Nötningszon			Nötningszonen består av spår på grund av
			avnötning, en komponent som är initialt
			spår och efterpackning. Utförs ingen beräk-
			ning på nötningszon kan denna sättas till 20
			mm och inte ingå i bärighetsberäkning
Observation			En mätning i ett stickprov

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring
Obundna lager			Innefattar obundet bärlager, förstärknings-
			lager och skyddslager
Parametersvep			Indata till simuleringen varieras och ett re-
			sultat för varje enskilt värde ges
PMS Objekt			Vägdimensioneringsprogram som grundar
			sig i Trafikverkets dimensioneringsklass 2
			som presenteras i $TRVK V \ddot{a}g$
Randvillkor			Extra krav som läggs till differentialekvatio-
			ner och modeller för att få en entydig lös-
			ning
Rekommenderat	$E_{v2,mt2},$		Framtaget rekommenderat E_{v2} -krav för ter-
E_{v2} -krav	$E_{v2,mt3B}$		rassytan bestående av materialtyp 2 respek-
			tive 3B
Rullager			Randvillkor som tillåter vertikal, men ej ho-
			risontell deformation
Skyddslager			Eventuellt lager i vägkonstruktionen vars
			huvudsakliga syfte kan vara att bidra till
			minskad tjällyftning och/eller hindra under-
			grundsmaterial att tränga upp i förstärk-
			ningslagret
Slitlager			Översta lagret i en vägöverbyggnad vars hu-
			vudsakliga syfte är att ge körbanan sådana
			egenskaper att trafiksäkerhet, transporteko-
			nomi och komfort tillgodoses
Spänning	σ	Pa	Definierat som kraft verkande över en yta
Standardaxel			Beskrivs i avsnitt 2.1.3
Statisk last			Last som ej varierar med tiden
Statisk plattbelast-			Förfarande som utnyttjas för att bestämma
ning			styvhet och packning i jordlager. Beskrivs i
			avsnitt 2.3
Statistisk acceptans-			Kravnivåer som beror på statistik. Ett ex-
nivå			empel kan vara att krav ställs på att det
			aritmetiska medelvärdet för ett antal mät-
			ningar måste överskrida ett visst gränsvärde
			med hänsyn till standardavvikelser
Stickprovsstandard-	s		Mått på i vilken utsträckning värden avvi-
$\operatorname{avvikelse}$			ker från medelvärdet. Beräknas enligt ekva-
			tion 2.13 på sida 17
Stickprovsstorlek	$\mid n$	st	Antalet observationer i ett stickprov

Tabell 1: Definitioner

Tabell 1: Definitioner

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring
Stickprovsvarians	s^2		Utnyttjas vid beräkning av stickprovsstan-
			dardavvikelsen och beräknas enligt ekvation
			2.14 och 2.15 på sida 17
Styvhetsmodul	M_s	Pa	Moduler liknande elasticitetsmoduler som
			används vid töjningsberäkning enligt di-
			mensioneringsklass 2. Framtagna utifrån ta-
			bellmetod som tidigare utnyttjades vid di-
			mensionering av vägkonstruktioner. Dessa
			beror på klimatperiod och klimatzon
Största töjning i bi-	$\varepsilon_{bb,i}$		Största horisontella dragtöjning som upp-
tumenbundet lager	,		står i bitumenbundet bärlager för klimat-
			period i med belastning av en standardaxel
			på vägytan
Största töjning i ter-	$\varepsilon_{te,i}$		Största vertikala töjning som uppstår i ter-
rassytan			rassytan för klimatperiod i med belastning
			av en standardaxel på vägytan
Symmetri			Randvillkoret åstadkommer att modeller
			speglas över den symmetriska ytan
Sättning	δ	m	Markytans deformation på grund av under-
			liggande lagers kompression
Teknisk livslängd /	n_d	år	Under hur lång tid olika delar i konstruktio-
Avsedd dimensione-			nen är tänkt uppfylla sina krav. Livslängden
ringstid			brukar sättas till 20 år för bundna material
			och 40 år för terrassen
Temperatur i bitu-	T_i	°C	Temperaturen i bitumenbundna belägg-
menbunden belägg-			ningar beror på klimatperiod och klimatzon
ning			enligt tabell 2.2 på sida 7
Terrassyta			Gräns mellan över- och underbyggnad eller
			mellan överbyggnad och undergrund. Ytan
			skapas genom att justera naturliga jord-
			/bergmassor längs vägsträckningen
Tillåtet antal stan-	N _{till,bb}	st	Hur många standardaxlar som tillåts för att
dardaxlar för bitu-	,		töjningar i underkant av bitumenbundet la-
menbundet lager			ger godkänns. Värdet måste överskrida N_{ekv}
			och beräknas enligt ekvation 2.5 på sida 11
Tillåtet antal stan-	$N_{bb,i}$	\mathbf{st}	Hur många standardaxlar som tillåts för att
dardaxlar för bitu-			töjningar i underkant av bitumenbundet la-
menbundet lager un-			ger godkänns under en viss klimatperiod.
der klimatperiod i			Beräknas enligt ekvation 2.6 på sida 11

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring
Tillåtet antal stan-	$N_{till,te}$	st	Hur många standardaxlar som tillåts för
dardaxlar för terras-			att töjningar i terrassytan godkänns. Vär-
sytan			det måste överskrida 2 N_{ekv} och beräknas
			enligt ekvation 2.8 på sida 12
Tillåtet antal stan-	$N_{te,i}$	st	Hur många standardaxlar som tillåts för att
dardaxlar för terras-			töjningar i terrassytan godkänns under en
sytan under klimat-			viss klimatperiod. Beräknas enligt ekvation
period <i>i</i>			2.9 på sida 12
Tjocklek förstärk-	d_{fl}	m	Tjockleken på beräknat förstärkningslager
ningslager	-		
Tjälfarlighetsklass			Jordmaterial delas in i fyra olika tjälfar-
			lighetsklasser beroende på dess tjällyftande
			egenskaper
Trafikökning per år	k	%-	Hur mycket trafikökningen för tunga fordon
för tunga fordon		enheter	antas öka per år
Tungt fordon			Fordon vars bruttovikt överstiger 3.5 ton
Tvärkontraktionstal	ν		Även kallat Poissons tal och beskriver hur
			ett material reagerar på tryck och drag. Ta-
			let är definierat som kvoten mellan relativ
			ändring av tjocklek och relativ ändring av
			längd. Varierar för olika material mellan -1
			och 0.5
Töjning	ε		Definieras som relativ längdändring, dvs.
			ett mått på deformationsgraden
Underbyggnad			Huvudsakligen tillförda jord-/bergmassor
			som vanligtvis är placerade mellan terras-
			syta och undergrund
Undergrund			Mark som tar upp lasten från ovanliggande
			konstruktion
Vägkonstruktion			Innefattar hela konstruktionen såsom väg-
			kropp, undergrund, diken, avvattningssy-
			stem, slänter m.m.
Vägkropp			Innefattar över- och underbyggnad

Tabell 1: Definitioner

Begrepp	Beteckning	Enhet	Förklaring			
Årsdygnstrafik	ÅDT	Fordon/	Medeltrafikflödet per dygn för ett visst år			
		dygn	som belastar en vägsträcka. ÅDT kan pre-			
			senteras på olika sätt enligt nedan:			
			$ÅDT_{tot} = \text{Totalt trafikflöde i båda riktning-}$			
			arna			
			$\AA{DT_k} = ext{Trafikflöde}$ i ett körfält			
			$ÅDT_{tot,tung}$ = Totalt trafikflöde för tunga			
			fordon i båda riktningarna			
			$ÅDT_{k,tung} = \text{Trafikflöde för tunga fordon i}$			
			ett körfält			
			$ÅDT_{k,just} =$ Trafikflöde justerat per körfält			
Överbyggnad			Del av konstruktionen som ligger ovan-			
			för terrassytan. Denna kan innefatta slitla-			
			ger, bärlager, förstärkningslager, skyddsla-			
			ger m.m.			

Innehåll

1	Inle	edning	1
	1.1	Bakgrund	1
	1.2	Syfte	2
	1.3	Metod	2
	1.4	Disposition	2
	1.5	Avgränsningar	3
n	Tee		-
4	1e0 9.1	Dimensionaring	ן ג
	2.1	Difficilisionering	ย ธ
		2.1.1 Forussaumingar utilran dimensioneringskiass 2	D c
		2.1.2 Killilat	ົ
		$2.1.3 \text{Standardaxer} \qquad \qquad$	5
		$2.1.4 \text{Extreminast} \dots \dots$	1
		2.1.5 Tojning underkant bitumenbundna lager	1 ก
	0.0	2.1.0 10Jining I terrassytan	2
	2.2 0.2	Statisk platthelestning	5 5
	2.5	2.21 Eärferende 11	ן ב
		2.5.1 Forlarande 18	ן ב
	<u>م</u>	2.5.2 Resultat	5 7
	2.4	Statistisk acceptails	(
3	Mo	dellering 19	9
	3.1	Linjärelastisk modell	9
	3.2	Dimensionering med hjälp av PMS Objekt	3
	3.3	Modeller i COMSOL Multiphysics	4
		3.3.1 Töjningsmodellering utifrån lastfall	5
		3.3.2 Statiska plattbelastningar	1
4	Ber	äkningar och resultat	5
-	<u> </u>	Verifiering av COMSOL-modell	5
	T . I	411 Beräkninger $3!$	5
		$4.12 \text{Resultat} \qquad \qquad 36$	6
	4 2	Förhållande mellan E_{re} och E_{re}	ĥ
	1.4	$4 2 1 \text{Beräkningar} \qquad \qquad$	ĥ
		4.2.2 Besultat	, 7
		1.2.2 resultat	•

	4.3	Rekommenderade E_{v2} -krav	3
		4.3.1 Beräkningar	3
		4.3.2 Resultat $\ldots \ldots 4$	1
5	Disk	ussion och slutsats 4'	7
	5.1	Diskussion \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 4	7
	5.2	Förslag till vidare forskning 4	9
6	Refe	renser 5	1
Bi	lagor	53	3
	B1	Töjningar i COMSOL och PMS	õ
	B2	Statiska plattbelastningar	7

Kapitel 1

Inledning

1.1 Bakgrund

Stora delar av framförallt det skånska vägnätet är byggt, och kommer även i framtiden att byggas, på grovkorniga och blandkorniga jordarter som enligt AMA Anläggning 13 (Svensk Byggtjänst, 2014) klassificeras som materialtyp 2 och 3B med tjälfarlighetsklass 1 respektive 2. Materialtyp 2 och 3B innefattar jordarter som grusmorän, sandmorän, siltig grusmorän och siltig sandmorän. En typisk vägkonstruktion i Skåne beskrivs förenklat i figur 1.1. Då ett terrassmaterial tillhörande materialtyp 2 eller 3B bärighetsmässigt har liknande egenskaper som förstärkningslagret är det miljömässigt, ekonomiskt och byggtekniskt fördelaktigt att utnyttja terrassmaterialet istället för att schakta bort och ersätta med ett krossmaterial.



Figur 1.1: Exempel på berört tvärsnitt

I nuläget finns det ingen vedertagen dimensioneringsmetod för denna konstruktion. Det dimensioneringsprogram som oftast används för dimensionering av vägkonstruktioner är PMSObjekt (PMS Objekt, 2012) som grundar sig i TRVK Väg (Trafikverket, 2011a) och dimensioneringsklass 2, vilket föreskriver att den minsta tjockleken på obundna lager får vara 500 mm. Det är därför nödvändigt med en mer lätthanterlig metod för att kunna dra nytta av den underliggande terrassen och därigenom minska tjockleken på förstärkningslagret.

Kontroller av obundna lager i en vägkonstruktion utförs enligt TRVKB 10 Obundna lager (Trafikverket, 2011b). En kontroll som utförs enligt denna handling är statisk plattbelastning.

Denna metod utförs genom att en cirkulär platta stegvis belastas samtidigt som deformationen på underliggande material registreras. Resultatet är ett spännings-sättningsdiagram där deformationsmodulerna E_{v1} och E_{v2} kan utvärderas. I *TRVKB 10 Obundna lager* ges krav på E_{v2} samt kvoten E_{v2}/E_{v1} på terrassen respektive översta obundna lagerytan.

Den nya modellen för att dimensionera de obundna lagren i vägkonstruktionen bör grunda sig på de parametrar som fås ur en statisk plattbelastning. Den parameter som troligtvis är enklast att koppla till modellen är deformationsmodulen E_{v2} .

1.2 Syfte

Det huvudsakliga syftet med detta examensarbete är att hitta en metod, som kan kopplas till *PMS Objekt* och *TRVK Väg*, för att dimensionera de obundna lagren i vägkroppen i förhållande till terrassens egenskaper i form av uppmätt deformationsmodul, E_{v2} . Principen är att samma kontrollmetoder som anges i *TRVKB 10 Obundna lager* ska kunna utnyttjas men med andra kravnivåer, framförallt med avseende på terrassen.

1.3 Metod

För att uppnå det huvudsakliga syftet delas detta in i delmål enligt nedan.

- 1. Ta fram en modell i *COMSOL Multiphysics* (COMSOL Multiphysics, 2014) som genomför töjningsberäkningar på ett sätt som kan likställas med *PMS Objekt* och *TRVK Väg*.
- 2. Modellen i *COMSOL Multiphysics* som verifierats i punkt 1 ligger till grund för en ny modell av statiska plattbelastningar utförda på terrass bestående av materialtyp 2 och 3B. Här utnyttjas redan utförda mätningar för att få fram ett förhållande mellan deformationsmodulen E_{v2} och elasticitetsmodulen E.
- 3. I ett tredje steg beräknas vilka elasticitetsmoduler för terrassen som krävs för att en vägkonstruktion ska bli godkänd ur bärighetssynpunkt när tjockleken på förstärkningslagret minskas. Dessa framtagna elasticitetsmoduler beräknas sedan om med hjälp utav förhållandet framtaget i punkt 2 till rekommenderade värden för E_{v2} på terrassytan.

1.4 Disposition

I arbetet behandlar de olika kapitlen följande:

Kapitel 2 tar upp bakomliggande teori och förutsättningar som utnyttjas genomgående i arbetet och ligger till grund för uppbyggda modeller, beräkningsgångar och slutsatser.

- Kapitel 5 utnyttjar beräkningsgång, resultat och bakomliggande teori för att diskutera och dra slutsatser. Här besvaras även syftet med arbetet och förslag ges till vidare forskning.

Kapitel 6 presenterar vilka referenser som utnyttjats i arbetet.

Bilagor presenteras slutligen som ett komplement.

1.5 Avgränsningar

Endast vägar vars terrass består av materialtyp 2 och 3B och vars geografiska läge innefattas av klimatzon 1 kan dimensioneras enligt framtagen modell. Detta eftersom tjälen, och inte bärigheten, är dimensionerande för förstärkningslagrets tjocklek i landets nordligare klimatzoner.

Typen av vägkonstruktioner avgränsas även till konstruktioner med flexibel överbyggnad med beräknat $ÅDT_{tot} \geq 2~000$ fordon per dygn och vägobjekt vars totala yta inklusive ramper $\geq 5~000 \text{ m}^2$. Detta för att kunna utnyttja bärighetskrav enligt *TRVKB 10 Obundna lager*.

Vid beräkningar utnyttjas en standardiserad vägkropp som uppifrån består av 40 mm bitumenbundet slitlager, 120 mm bitumenbundet bärlager och 80 mm obundet bärlager. Tjockleken på nästkommande lager, förstärknings- och skyddslagret, antas variera.

Vid all modellering i *COMSOL Multiphysics* begränsas materialmodellerna i detta arbete till linjärelastiska i enlighet med dimensioneringsklass 2.

Kapitel 2

Teori

2.1 Dimensionering

För att beräkna och bestämma tillåtna töjningar i en vägkonstruktion utgår detta arbete ifrån dimensioneringsklass 2 enligt $TRVK V \ddot{a}g$, vilket även dimensioneringsprogrammet PMS Objekt utgår ifrån. Hur stora töjningar som får uppkomma i vägkonstruktionen beror på vilken trafikmängd som förutsätts belasta vägen samt klimatet (Trafikverket, 2011).

2.1.1 Förutsättningar utifrån dimensioneringsklass 2

När töjningar och spänningar beräknas i en vägkonstruktion enligt dimensioneringsklass 2 ska beräkningarna grunda sig i en linjärelastisk materialmodell där ingående material antas vara homogena, isotropa och vars egentyngder försummas. Specifika egenskaper för ingående material presenteras under avsnitt 2.1.2 och 3.1. (Trafikverket, 2011a)

Vägöverbyggnaden anses vara oändligt utbredd i horisontalled och när konstruktionen består av en flexibel överbyggnad ska ett styvt lager med oändligt djup antas 3 meter under vägytan. Påförda laster antas vara statiska. (Trafikverket, 2011a)

Varje vägren och körfält får dimensioneras enskilt utifrån vilken trafik som kommer att belasta just detta. Dock ska tjockleken på överbyggnaden vara konstant över hela vägbredden och för vägavsnitt med endast ett körfält i vardera riktningen ska de två körfälten dimensioneras efter det med högst förväntad belastning. (Trafikverket, 2011a)

Då tjockleken på bitumenbundna lager understiger 45 mm ska deras bärighetsegenskaper bortses ifrån i bärighetsberäkningen. Vid nybyggnad får slitlagertjockleken inte understiga 30 mm. Ligger slitlagret direkt på ett bundet lager ska en nötningszon beräknas. Denna nötningszon får ej ge något bidrag i bärighetsberäkningen. Genomförs ingen beräkning av nötningszon kan denna anses vara 20 mm, vilket dras bort från slitlagret. (Vägverket, 2005)

Enligt dimensioneringsklass 2 ska, för flexibla överbyggnader, den totala tjockleken av obundna lager uppgå till minst 500 mm (Trafikverket, 2011a). I detta arbete undersöks det om,

och hur, tjockleken på dessa lager kan minskas under specifika förhållanden.

2.1.2 Klimat

Vägkonstruktioner ska dimensioneras med beaktande av deras geografiska läge. Detta framförallt för att ta hänsyn till hur mycket tjälen inverkar i form av tjällyft och tjäldjup samt hur ingående material påverkas av klimatet.

Klimatzoner och klimatperioder

Sverige delas in i fem klimatzoner enligt figur 2.1. Vid gränsfall mellan två klimatzoner ska alltid den övre klimatzonen väljas. (Trafikverket, 2011a)

Detta arbete begränsas till klimatzon 1.



Figur 2.1: Indelning av klimatzoner (Trafikverket, 2011a)

Vidare delas det svenska året in i sex klimatperioder som antas ha olika stor utsträckning i de olika klimatzonerna, vilket redovisas i tabell 2.1. Materialegenskaper som temperatur i bitumenbunden beläggning (tabell 2.2) samt styvhetsmoduler för ingående material (tabell 3.1-3.5, avsnitt 3.1) antas variera mellan klimatperioder och klimatzoner. (Trafikverket, 2011a)

Klimatperioders längd, n_i [dygn]							
	Klimatzon						
Kiimatperiod	1	2	3	4	5		
Vinter	49	80	121	151	166		
Tjällossningsvinter	10	10					
Tjällossning	15	31	45	61	91		
Senvår	46	15					
Sommar	153	153	123	77	47		
Höst	92	76	76	76	61		

Tabell 2.1: Klimat
perioders längd n_i mätt i dygn under året i de olika klimat
zonerna, efter $TRVK\ V\ddot{a}g$

Tabell 2.2: Dimensionerande temperatur i bitumen
bunden beläggning T_i mätt i °C beroende på klimat
period och klimatzon, efter TRVK Väg

Temperatur bitumenbunden beläggning, T_i [°C]								
Vlime to original		Klimatzon						
Kiimatperiod	1	2	3	4	5			
Vinter	-1.9	-1.9	-3.6	-5.1	-7.0			
Tjällossningsvinter	1.0	1.0						
Tjällossning	1.0	2.3	4.5	6.5	7.5			
Senvår	4.0	3.0						
Sommar	19.8	18.1	17.2	18.1	16.4			
Höst	6.9	3.8	3.8	3.8	3.2			

Tjäle

Med avseende på jordarters tjällyftande egenskaper delas dessa in i fyra tjälfarlighetsklasser, vilka presenteras i tabell 2.3 (Trafikverket, 2011a).

Detta arbete berör endast jordarter tillhörande tjälfarlighetsklass 1 och 2.

Tabell	2.3:	Beskrivning	av	tjälfarlighetsklasser	samt	exempel	på	ingående	jordarter,	efter
TRVK	$V\ddot{a}g$	1								

Tjälfarlig-	Beskrivning	Exempel på	
hetsklass		jordarter	
1	Icke tjällyftande jordarter. Dessa kännetecknas av att	Gr, Sa, saGr,	
	tjällyftningen under tjälningsprocessen i regel är obe-	grSa, GrMn,	
	tydlig. Klassen omfattar materialtyp 2 samt organiska	SaMn	
	jordarter med organisk halt $> 20\%$ (6B).		
2	Något tjällyftande jordarter. Dessa kännetecknas av	siSa, siGr,	
	att tjällyftningen under tjälningsprocessen är liten.	${ m siSaMn},$	
	Klassen omfattar materialtyp 3A och B.	${ m siGrMn}$	
3	Dessa kännetecknas av att tjällyftningen under tjälningspro-	Cl, ClMn,	
	cessen är måttlig. Klassen omfattar materialtyp 4A och B	siMn, siDy	
	samt 6A.		
4	Mycket tjällyftande jordarter. Dessa kännetecknas av att tjäl-	Si, clSi, siCl,	
	lyftningen under tjälningsprocessen är stor. Klassen omfattar	SiMn	
	materialtyp 5.		

2.1.3 Standardaxel

En personbil påverkar nedbrytningen av en väg betydligt mindre än vad ett tungt fordon gör. För att kunna uttrycka vilken last som belastar vägen under dess livstid definieras därför en standardaxel. Standardaxeln är en sorts medelbelastning som representerar all trafikbelastning från tunga fordon (Trafikverket, 2011c). På grund av att personbilar har jämförelsevis liten inverkan på nedbrytningen bortses i många fall trafiken från dessa vid dimensionering. (Agardh & Parhamifar, 2011)

En standardaxel definieras som en hjulaxel med parmonterade hjul belastad med 100 kN jämnt fördelat på samtliga hjul. Hjulen i ett hjulpar är placerade med ett c/c-avstånd på 0.3 m och varje hjul antas ha en cirkulär kontaktyta med vägen belastad med ett konstant tryck på 800 kPa. Standardaxeln beskrivs i figur 2.2. (Vägverket, 2005)



Figur 2.2: Schematisk beskrivning av en standardaxel, efter TRVK Väg

Ekvivalent antal standardaxlar

Utifrån en prognos över vilken trafikmängd som kommer att belasta vägen under det bundna bärlagrets tekniska livslängd, som enligt Agardh & Parhamifar (2011) vanligtvis sätts till 20 år, ska ekvivalent antal standardaxlar beräknas. Detta kan förenklat beskrivas som ett uttryck för hur många standardaxlar den totala trafiken, innehållande olika sorters fordon, som belastar vägen under dess livslängd motsvarar. Beräkningen av ekvivalent antal standardaxlar N_{ekv} utförs enligt nedan:

$$N_{ekv} = \mathring{A}DT_k \ 3.65 \ A \ B_{just} \ \sum_{j=1}^{n_d} \left(1 + \frac{k}{100}\right)^j =$$
(2.1)

$$= \begin{cases} \stackrel{A}{A}DT_k \ 3.65 \ A \ B_{just} \ \left(1 + \frac{100}{k}\right) \ \left(\left(1 + \frac{k}{100}\right)^{n_d} - 1\right) & \text{om} \quad k \neq 0\\ \stackrel{A}{A}DT_k \ 3.65 \ A \ B_{just} \ n_d & \text{om} \quad k = 0 \end{cases}$$
(2.2)

där

$$B_{just} = B f_a f_b f_c \tag{2.3}$$

 och

 ${A}DT_k =
{A}rsdygnstrafik, trafikflöde i ett körfält [fordon/dygn]}$ ${A} =
{A}ndel tunga fordon [\% - enheter]}$ ${B}_{just} =
{J}usterat antal standardaxlar per tungt fordon [st]}$ ${n_d} =
{A}vsedd dimensioneringstid [år]}$ ${j} = 1,2,3 \dots n$

- k= Antagen trafikökning per år för tunga fordon $[\%-{\rm enheter}]$
- B = Ekvivalent antal standardaxlar per tungt fordon [st]
- $f_a =$ Justeringsfaktor avseende körfältsbredd, se tabell 2.4
- $f_b =$ Justeringsfaktor avseende vägtyp, se tabell 2.5
- f_c = Jusetringsfaktor avseende referenshastighet, se tabell 2.6

(Trafikverket, 2011a)

Tabell 2.4: Bestämning av justeringsfaktorn f_a , efter TRVK Väg

Körfältsbredd [m]	f_a
> 4.25	0.75
4.00	0.90
3.75	1.00

Tabell 2.5: Bestämning av justeringsfaktorn f_b , efter TRVK Väg

Vägtyp	f_b
Europaväg	1.15
Större riksväg, $ÅDT_k > 4\ 000$	1.10
Riksväg, $ÅDT_k \le 4\ 000$	1.05
Riksväg, Länsväg, $ÅDT_k > 2\ 000$	1.00
Länsväg, $ÅDT_k \leq 2\ 000$	0.97
Godsled, timmerränna	1.20
Pendlingsväg	0.95
Annan vägtyp än beskriven ovan	0.70 - 1.20

Tabell 2.6: Bestämning av justeringsfaktorn f_c , efter TRVK Väg

Referenshastighet $[km/h]$	f_c
≤ 30	1.35
40	1.20
50	1.10
60	1.06
70	1.03
80	1.00
90	0.95
≥ 100	0.90

2.1.4 Extremlast

Utöver standardaxeln ska vägkonstruktionen dimensioneras för en extremlast, som ibland kallas enstaka last. Denna representerar en extrem belastning på vägkonstruktionens yta och används vid beräkning av maximal vertikal töjning på terrassytan, vilket beskrivs under avsnitt 2.1.6. Extremlasten definieras som en last på 130 kN som verkar jämnt fördelat på en rektangulär yta 0.2×0.6 m. Extremlasten kan även definieras som 12 cirkulära ytor med diameter 100 mm där varje yta ska bära lika stor del av den totala lasten. Extremlasten beskrivs i figur 2.3. (Trafikverket, 2011a)



Figur 2.3: Schematisk beskrivning av extremlast, efter TRVK Väg

2.1.5 Töjning underkant bitumenbundna lager

För en vägkonstruktion bestående av minst ett bitumenbundet lager som överstiger 75 mm finns det en begränsning för de horisontella töjningarna i bitumenbundet bärlager, bestående av AG och bitumentyp 160-220. Töjningarna får maximalt bli så stora att nedanstående förhållande fortfarande råder:

$$N_{till,bb} \ge N_{ekv} \tag{2.4}$$

där

$$N_{till,bb} = \frac{365}{\sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{N_{bb,i}}}$$
(2.5)

$$N_{bb,i} = f_s \, \frac{2.37 \cdot 10^{-12} \cdot 1.16^{1.8T_i + 32}}{\varepsilon_{bb,i}^4} \tag{2.6}$$

 och

 $N_{till,bb}$ = Tillåtet antal standardaxlar för bitumenbundet bärlager [st]

 $N_{bb,i}$ = Tillåtet antal standardaxlar för bitumenbundet bärlager under klimatperiod i [st]

m =Antal klimatperioder [st] (enligt tabell 2.1)

 n_i = Antal dygn under klimatperiod *i* [dygn] (enligt tabell 2.1)

 $f_s = \text{Korrigeringsfaktor}$ avseende befintlig beläggnings sprickighet och krackelering (sätts till 1 vid nybyggnation)

 $T_i =$ Temperatur i bitumenbunden beläggning [°C] (enligt tabell 2.2)

 $\varepsilon_{bb,i}$ = Största horisontella dragtöjning i bitumenbundet bärlager för klimat
period i vid belastning med en standardaxel på vägytan

(Trafikverket, 2011a)

2.1.6 Töjning i terrassytan

För vägkonstruktioner med åtminstone ett bitumenbundet lager finns två krav på den vertikala töjningen i terrassytan, ett för belastning med standardaxel och ett för belastning med extremlast.

Standardaxel

Den vertikala töjningen i terrassytan för belastning av en standardaxel på vägytan får maximalt bli så stor att nedanstående förhållande fortfarande råder:

$$N_{till,te} \ge 2 N_{ekv} \tag{2.7}$$

där

$$N_{till,te} = \frac{365}{\sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{N_{te,i}}}$$
(2.8)

$$N_{te,i} = f_d \, \frac{8.06 \cdot 10^{-8}}{\varepsilon_{te,i}^4} \tag{2.9}$$

 och

 $N_{till,te}$ = Tillåtet antal standardaxlar för terrassytan [st]

 $N_{te,i}$ = Tillåtet antal standardaxlar för terrassyta under klimatperiod i [st]

 $f_d =$ Korrigeringsfaktor avseende fukt och väta i terrassmaterialet (sätts till 1 vid nybyggnation)

 $\varepsilon_{te,i}=$ Största vertikala töjning i terrassytan för klimat
period ivid belastning med en standardaxel på vägytan

(Trafikverket, 2011a)

Extremlast

Den maximala vertikala töjningen som uppkommer i terrassytan vid belastning av extremlast $\varepsilon_{te,max}$ begränsas med hänsyn till klimatzon. Maximala trycktöjningar för varje klimatzon presenteras i tabell 2.7. (Trafikverket, 2011)

Tabell 2.7: Maximala töjningar som får uppstå i terrassytan då vägytan belastas med extremlast, efter $TRVK\ V\ddot{a}g$

Klimatzon	1	2	3	4	5
Töjning, $\varepsilon_{te,max}$	0.0025	0.0024	0.0023	0.0022	0.0021

Då detta arbete är avgränsat till klimatzon 1 erhålls den maximala töjningen till 0.0025 då vägytan belastas med extremlast.

2.2 Bärighetskrav för en vägkonstruktion

För en nybyggd vägkonstruktion som antas belastas med ett totalt trafikflöde överstigande 2 000 fordon per dygn i båda riktningarna, $ÅDT_{tot}$, och om ytan överstiger 5 000 m² inklusive ramper, ställs bärighetskrav på två nivåer för en flexibel överbyggnad med avseende på statistisk acceptansnivå. Den översta nivån är alltid den översta ytan på det obundna lagret. Den understa nivån är ytan på skyddslagret i fallet att terrassen ligger mer än 750 mm under överytan på det översta obundna lagret. I fallet då terrassytan ligger 750 mm eller närmare ytan på det översta obundna lagret är det terrassytan som är den understa nivån.

Den statistiska acceptansnivån kontrolleras genom statisk plattbelastning vilket beskrivs i avsnitt 2.3. De olika bärighetskraven för de ingående lagren gäller färdiga ytor inom en lutning på 1:2 från släntkrönet, vilket illustreras i figur 2.4. Kraven ska uppfyllas i samband med att nästa lager läggs ut så att de uppmätta egenskaperna ej hinner ändras i allt för stor utsträckning. Kontrollerna utförs i form av stickprover. Blir samtliga observationer godkända och visar på små variationer är det tillräckligt med fem observationer men om någon observation underkänns krävs åtta. Statistisk acceptanskontroll beskrivs utförligare under avsnitt 2.4. (Trafikverket, 2011b)



Figur 2.4: Bärighetskrav gäller inom en lutning på 1:2 från släntkrön, efter $TRVKB\ 10\ Obundna\ lager$

Kontroll av bärighetskrav får ej genomföras under tjällossning eller tjälade förhållanden. För att materialet ska vara otjälat innebär detta att jordtemperaturen minst är +1 °C ner till 0.2 m på hösten och att materialet är tinat ner till 0.6 m på våren. (Vägverket, 2005)

De obundna överbyggnadsmaterialen, dvs bärlager, förstärkningslager och eventuellt skyddslager, ska ha sådana egenskaper att de är volymbeständiga och i stort behåller sina hållfasthetsegenskaper under hela dimensioneringsperioden. Materialen måste även vara acceptabla ur miljö- och hälsosynpunkt samt inte vålla problem vid återanvändning, deponering eller nedbrytning. Dessutom måste de godkännas av beställaren. (Trafikverket, 2011c)

Eftersom detta arbete utreder E_{v2} -krav på terrassytan presenteras endast de krav som gäller för denna yta och kan ses i tabell 2.8. Dessa gäller när terrassytan befinner sig högst 750 mm under översta ytan för obundet bärlager. Bärighetskrav för vägkonstruktionens övriga ytor återfinns i *TRVKB 10 Obundna lager*. (Trafikverket, 2011b)

Tabell 2.8: Bärighetskrav för terrass vid nybyggnation med avseende på statistisk acceptansnivå, efter $TRVKB\ 10\ Obundna\ lager$

Acceptansintervall	Ett av nedanstående krav ska väljas			
Jordterrass	n = 8	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 40 + 0.96 s$		
500 - 550 mm under obunden bärlageryta	n = 5	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 40 + 0.83 s$		
= underkant förstärkningslager	$G_f \text{ om } x_{i_{E_{v2}}} < 3$	32 MPa		
Jordterrass	n = 8	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 30 + 0.96 s$		
551 - 650 mm under obunden bärlageryta	n = 5	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 30 + 0.83 s$		
= underkant förstärkningslager	$G_f \text{ om } x_{i_{E_{v2}}} < 2$	20 MPa		
Jordterrass	n = 8	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 20 + 0.96 s$		
651 - 750 mm under obunden bärlageryta	n = 5	$\bar{x}_{E_{v2}} \ge 20 + 0.83 s$		
= underkant förstärkningslager	$G_f \text{ om } x_{i_{E_{v2}}} < 1$	15 MPa		

2.3 Statisk plattbelastning

Statisk plattbelastning är en metod som används för att bestämma ett jordlagers elasticitetsoch deformationsegenskaper. Metoden kan utnyttjas på grovkorniga och blandkorniga jordar samt på styva och fasta finkorniga jordar. (Hermelin, 2014)

2.3.1 Förfarande

Tillvägagångssättet grundar sig i att en underliggande jordmassa belastas med en cirkulär platta, en så kallad belastningsplatta. Plattans diameter är antingen 300, 600 eller 762 mm och höjden ska vara minst 25 mm för en platta med diameter 300 mm och minst 40 mm för övriga. I detta examensarbete studeras en belastningsplatta vars diameter är 300 mm, vilket är den vanligast förekommande vid vägbyggnad. (Hermelin, 2014)

Först utförs en förbelastning av den plana provytan med spänningen 0.01 MPa som verkar på belastningsplattan under 30 sekunder varpå mätinstrumenten nollställs. Därefter belastas plattan i sju steg: 0.08, 0.16, 0.24, 032, 0.40, 0.45 och 0.50 MPa. (Hermelin, 2014)

Belastningsnivåerna ska verka i två minuter, alternativt tills sättningshastigheten är noll, innan nästa belastning påförs. Vid kontroll av överbyggnadslager ska den första belastningsnivån verka i två minuter och de efterföljande i minst en minut. (Hermelin, 2014)

När en belastningsplatta med diameter 300 mm används avbryts belastningsökningen antingen när spänningen 0.5 MPa uppnås eller när sättningen 5 mm uppnåtts. Belastningsplattan avlastas i tre steg: 50, 25 och 0 % av den maximalt pålagda lasten där nästkommande avlastning sker två minuter efter att föregående avlastningsnivå uppnåtts. När detta förförande är genomfört upprepas detta, men endast till den näst högst uppnådda lasten. I fallet då 5 mm sättning uppnås innan en spänning på 0.5 MPa nåtts avbryts pålastningen och plattan avlastas i de tre steg som tidigare angivits. När den andra pålastningen sedan utförs görs detta i 6 steg upp till 90 % av den maximala spänningen vid den första pålastningen. (Hermelin, 2014)

2.3.2 Resultat

Sättningen som uppstår mitt under plattan registreras och plottas mot påförd spänning i ett spännings-sättningsdiagram. Sättningen innefattar såväl elastisk som plastisk sättning. Mot de plottade spännings-sättningspunkterna anpassas sedan en andragradskurva som utnyttjas för att ta fram en deformationsmodul, E_v . Detta görs för de båda belastningscyklerna och två deformationsmoduler, E_{v1} för den första belastningscyklen samt E_{v2} för den andra, kan tas fram. (Hermelin, 2014)

Ett exempel på ett spännings-sättningsdiagram likt det som är beskrivet ovan kan ses i figur2.5



Figur 2.5: Exempel på spännings-sättningsdiagram

Andragradskurvan som är anpassad efter de uppmätta spännings-sättningspunkterna beskrivs enligt:

$$\delta = a_0 + a_1 \,\sigma_0 + a_2 \,\sigma_0^2 \tag{2.10}$$

där

 $\delta = S$ ättning i belastningsplattans centrum [mm]

 $\sigma_0 = Medelnormalspänningen under plattan [MPa]$

 $a_0, a_1, a_2 =$ Konstanter i andragradspolynomet

För att utifrån detta beräkna deformationsmodulen utnyttjas:

$$E_v = 1.5 r \frac{1}{a_1 + a_2 \sigma_{1max}} \tag{2.11}$$

där

r = Belastningsplattans radie [mm]

 $\sigma_{1max}=$ Maximal medel
normalspänning vid den första belastningen [MPa]

(Hermelin, 2014)

I avsnitt 2.2 beskrivs de krav för E_{v2} som gäller för terrassytan. Krav för övriga ytor finns angivna i TRVKB 10 Obundna lager.

För mer ingående information angående statisk plattbelastning hänvisas till *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning* (Hermelin, 2014).
2.4 Statistisk acceptans

Det är allmänt känt att vid byggande av en vägkonstruktion är det i praktiken omöjligt att utföra allting precis så som framtagna bygghandlingar föreskriver. Detta medför att slutresultatet inte överesnstämmer helt med grundläggande beräkningar, utan vägens slutgiltiga egenskaper kommer att påverkas av faktorer såsom vem som utför arbetet, ändringar i förutsättningar och heterogenitet i nyttjade material. Avvikelser som dessa går inte att komma ifrån, men så länge dessa håller sig inom rimliga gränser spelar detta ingen större roll för slutproduktens kvalitet. (Vägverket, 1994)

Utöver avvikelser i byggskedet tillkommer avvikelser vid kontroll av konstruktionens egenskaper. Dessa avvikelser kan bero på fel i mätutrustning, den mänskliga faktorn mm. Detta gör det svårt att avgöra vad som är faktiska avvikelser i konstruktionen och vilka avvikelser som uppkommer på grund av fel i mätningsutförandet. (Vägverket, 1994)

För statiska plattbelastningar görs ett urval av ett antal mätpunkter som får ses som representativa för hela objektet. Urvalet sker slumpmässigt med hjälp av en slumptalstabell eller teknisk utrustning. Om mätpunkterna väljs helt slumpmässigt, utan koppling till varandra, kan detta ses som att alla punkter ges lika möjlighet att väljas. Detta leder till att mätvärdena kan vara allt från mycket representativa till inte speciellt representativa för hela kontrollobjektet. Vilket av de två går inte att säga. Det enda som kan konstateras är att en metod som i genomsnitt ger representativa värden har utnyttjats och att erhållna värden får ses som representativa. (Vägverket, 1994)

Efter genomförda mätningar beräknas ett aritmetiskt medelvärde och en stickprovsstandardavvikelse beräknas. Detta jämförs sedan med ställda krav för att kontrollera att dessa inte underskrids. Uppfyller mätningarna ställda krav antas objektet inte avvika mer än vad som är tillåtet och objektet godkänns. (Vägverket, 1994)

Aritmetiskt medelvärde \bar{x} definieras som

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \tag{2.12}$$

där

n = Stickprosvstorlek [st]

 $x_i = \text{Enskilt}$ mätvärde

Stickprovsstandardavvikelsen s beräknas som roten ur stickprovsvariansen s^2 enligt:

$$s = \sqrt{s^2} \tag{2.13}$$

där

$$s^{2} = \frac{1}{n} \sum (x_{i} - \bar{x})^{2}$$
(2.14)

Det har visat sig att stickprovsvariansen beräknat på detta sätt inte är en vänteriktig skattning av populationsvariansen, dvs. variansen för hela kontrollobjektet. För gällande krav har därför beräkningen av stickprovsvariansen anpassats något för att stämma bättre överens med populationsvariansen och beräknas enligt:

$$s^{2} = \frac{1}{n-1} \sum \left(x_{i} - \bar{x}\right)^{2} \tag{2.15}$$

(Vägverket, 1994)

Enligt avsnitt 2.2 ges inga maximikrav på standardavvikelsen vid kontroll av E_{v2} , men kravet på medelvärdet ökar linjärt med ökad standardavvikelse med $E_{v2 \, krav} + 0.83 \, s$. Underkänns en enskild mätning ökas antalet mätningar från 5 till 8 och kravet på medelvärdet ökas med $E_{v2 \, krav} + 0.96 \, s$. Detta illustreras i figur 2.6.



Kapitel 3

Modellering

För att beräkna spänningar och töjningar i en vägkropp utnyttjas oftast en linjärelastisk modell där ingående material antas vara homogena och isotropa, vilket inte helt stämmer överens med verkligheten. Asfaltmaterial uppvisar tid- och temperaturberoende (viskoelastiska) egenskaper samtidigt som obundna material har plastiska egenskaper. Utöver detta kan materialen i en vägkropp sällan anses vara homogena och isotropa då dessa endast packas vertikalt. Detta leder naturligtvis till att de får olika egenskaper i horisontal- och vertikalled. (Agardh & Parhamifar, 2011)

Användning av avancerade modeller som beaktar dessa egenskaper kräver kännedom om flera materialparametrar som inte kan bestämmas i fält. På grund av detta används en linjärelastisk modell som endast kräver parametrarna elasticitetsmodul E och tvärkontraktionstal ν . (Agardh & Parhamifar, 2011)

I *TRVK Väg* och dimensioneringsklass 2 föreskrivs att en linjärelastisk materialmodell används och ingående material anses vara homogena och isotropa (Trafikverket, 2011). Detta arbete förutsätter ovanstående och uppbyggda modeller i *PMS Objekt* och *COMSOL Multiphysics* antas linjärelastiskt material.

3.1 Linjärelastisk modell

I en linjärelastisk modell beskrivs sambandet mellan spänning σ och töjning ε genom Hookes lag:

$$\sigma = E \varepsilon \tag{3.1}$$

där

E = Elasticitetsmodul [Pa]

Förhållandet visas i figur 3.1, där det också illustreras att på- och avlastning följer samma linjära kurva.



Figur 3.1: Förhållande mellan spänning och töjning enligt Hookes lag

Enligt avsnitt 2.3 är spännings-sättningsförhållandet för den andra pålastningen vid statisk plattbelastning näst intill linjärt, se figur 3.2. Ett rimligt förfarande är att modellera endast den andra belastningscykeln och då antaga ett linjärt beteende.



Figur 3.2: Endast andra belastningscykeln modelleras och antas ha ett linjärt beteende

Agardh¹ menar att vägkroppar tidigare dimensionerades enligt tabellmetod och att ett nytt tillvägagångssätt som grundar sig i linjärelastiska beräkningar togs fram. Tanken var att ta fram något som liknade elasticitetsmoduler för ingående material med rimliga värden och vars resultat vid bärighetsberäkning efterliknade de som gavs med tidigare tabellmotod. Dessa moduler, som fick benämningen styvhetsmoduler, var troligvis tänkta att bytas ut mot mer korrekta moduler, men då styvhetsmodulerna ger acceptabla resultat har dessa behållits och används som standard vid dimensionering.

I detta arbete antas elastisitetsmodulerna för ingående material i vägkropparna ha samma värde som styvhetsmodulerna, M_s , vilka utnyttjas i dimensioneringsklass 2 enligt TRVK Väg.

¹Sven Agardh, Universitetslektor i vägbyggnad LTH, muntlig konversation 2015-05-22

Dessa återfinns i tabell 3.1 - 3.5 och varierar för de olika klimatperioderna och klimatzonerna. Då detta arbete endast behandlar klimatzon 1 utnyttjas endast dessa styvhetsmoduler. Styvhetsmodulerna ligger till grund för såväl dimensioneringen i *PMS Objekt* som uppbyggda modeller i *COMSOL Multiphysics*.

Tabell 3.1: Styvhetsmoduler, M_s , för bitumenbundet slitlager av typ AB med tjocklek mindre än 50 mm beroende på klimatperiod och klimatzon, efter $TRVK V \ddot{a}g$

Styvhetsmodul, M_s [MPa]							
${ m Bitumenbundet\ slitlager,\ typ\ AB,\ tjocklek\ <\ 50 { m mm}}$							
Vlimetrariad		K	limatzon	L			
Kiimatperiod	1	2	3	4	5		
Vinter	$14\ 500$	14 500	15 500	$17\ 000$	18 500		
Tjällossningsvinter	13 000	13 000					
Tjällossning	13 000	12000	10 500	9500	9 000		
Senvår	11 000	11 500					
Sommar	3 500	4000	4 500	4000	4 500		
Höst	9 000	$11 \ 000$	11 000	$11 \ 000$	11 500		

Tabell 3.2: Styvhetsmoduler, M_s , för bitumenbundet bärlager av typ AG med tjocklek mindre än 100 mm beroende på klimatperiod och klimatzon, efter $TRVK V \ddot{a}g$

Styvhetsmodul, M_s [MPa]							
Bitumenbundet bärlager, typ AG, tjocklek $< 100 \mathrm{mm}$							
Klimetneried		K	limatzon	L			
Klimatperiod	1	2	3	4	5		
Vinter	12500	12 500	13 500	14 500	16 500		
Tjällossningsvinter	$10\ 500$	10 500					
Tjällossning	10 500	10 000	8 500	7 500	7000		
Senvår	9 000	9500					
Sommar	2500	3 000	3 500	3 000	3 500		
Höst	7 500	9 000	9 000	9 000	9 000		

Styvhetsmodul, M_s [MPa]							
Bitumenbundet bärlager, typ AG, tjocklek ≥ 100 mm							
Klimstnoried		K	limatzon	L			
Kimatperiod	1	2	3	4	5		
Vinter	11 500	11 500	12 500	13 500	15000		
Tjällossningsvinter	10 000	10 000					
Tjällossning	10 000	9000	8 000	6500	6 000		
Senvår	8 000	8 500					
Sommar	2000	2500	3 000	2500	3 000		
Höst	6500	8 000	8 000	8 000	8 500		

Tabell 3.3: Styvhetsmoduler, M_s , för bitumenbundet bärlager av typ AG med tjocklek större än 100 mm beroende på klimatperiod och klimatzon, efter TRVK Väg

Tabell 3.4: Styvhetsmoduler, $M_s,$ för obundna överbyggnadsmaterial beroende på klimatperiod, efter $TRVK \ V \ddot{a}g$

Styvhetsmodul, M_s [MPa]					
Obundna överbyggn	adsmateria	1			
Klimathaniad	Dönlogon	Förstärkn	ingslager	Classed de la sura	
Kiimatperiod	Dariager	Okrossat	Krossat	Skyddslager	
Vinter	1 000	1 000	450	1 000	
Tjällossningsvinter	150	1 000	450	1 000	
Tjällossning	300	160	450	70	
Senvår	450	240	450	85	
Sommar	450	240	450	100	
Höst	450	240	450	100	

Tabell 3.5: Styvhetsmoduler, $M_s,$ för underbyggnad och undergrund beroende på klimatperiod, efter $TRVK \ V \ddot{a}g$

Styvhetsmodul, M_s [MPa]							
Material i underbyggnad och undergrund							
Klimatnariad		Materi	ialtyp				
Rimatperiou	2	3	4	5			
Vinter	1 000	$1 \ 000$	1 000	1 000			
Tjällossningsvinter	1 000	1 000	1 000	1 000			
Tjällossning	70	35	30	10			
Senvår	85	50	40	20			
Sommar	100	100	50	45			
Höst	100	100	50	45			

3.2 Dimensionering med hjälp av PMS Objekt

Dimensioneringsprogrammet PMS Objekt utgår från TRVK $V\ddot{a}g$ och dimensioneringsklass 2, vilket beskrivs i avsnitt 2.1.

Första steget vid dimensionering av en vägkonstruktion med hjälp av *PMS Objekt* är att ta fram ett mått på den trafik som kan antas belasta vägen under dess livslängd, dvs. ta fram ett värde på N_{ekv} . Hur N_{ekv} beräknas beskrivs i avsnitt 2.1.3.

Nästa steg är att definiera konstruktionens uppbyggnad, dvs. tjocklek hos ingående lager samt lagrens material. Här finns fördefinierade materialegenskaper där styvhetsmodulerna M_s är det som är intressant i detta arbete. Dessa finns listade i tabell 3.1 - 3.5.

Det tredje steget innebär en bärighetsberäkning, dvs. en kontroll om den tänkta konstruktionen kommer att uppfylla bärighetskraven som ställs i TRVK Väg. Detta görs genom att programmet beräknar $N_{till,bb}$ och $N_{till,te}$ och kontrollerar om:

$$N_{till,bb} \ge N_{ekv} \tag{3.2}$$

 och

$$N_{till,te} \ge 2 N_{ekv} \tag{3.3}$$

Hur $N_{till,bb}$ och $N_{till,te}$ beräknas beskrivs i avsnitt 2.1.5 respektive 2.1.6.

I detta steg beräknas även vertikal töjning i terrassytan vid belastning av extremlast. Töjningen får enligt avsnitt 2.1.6 inte överstiga 0.0025 för klimatzon 1 under någon klimatperiod. Även horisontell töjning som uppstår under bitumenbundet lager samt vertikal töjning som uppstår på terrassens ovanyta vid belastning av en standardaxel beräknas i detta steg och kan avläsas för de olika klimatperioderna. Samtliga töjningar används senare för att bekräfta töjningsmodellerna i *COMSOL Multiphysics*. Töjningarna beräknas tvådimensionellt med utbredda laster enligt definition i avsnitt 2.1 och spänningarna antas spridas linjärelastiskt enligt Hookes lag. Lagren antas ha en oändlig utsträckning i horisontalled och materialen antas homogena och isotropa.

Som ett sista steg kan konstruktionen tjälberäknas, men eftersom detta arbete avgränsas till klimatzon 1 antas att tjälen ej är dimensionerande, utan bärigheten. Därför nyttjas ej detta sista steg.

I detta arbete utnyttjas version 5.0.1 av PMS Objekt.

3.3 Modeller i COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics är en generell mjukvaruplattform som kan användas för att modellera och simulera fysikbaserade problem. Programmet grundar sig i avancerade, numeriska metoder utifrån finita elementmetoden och kan, precis som namnet antyder, ta hänsyn till flera olika fysikaliska fenomen. I detta arbete utnyttjas version 5.0.1.

Samtliga modeller i *COMSOL Multiphysics* i detta arbete är uppbyggda på liknande sätt, nämligen som en halv kub med dimensionerna $1.5 \times 3 \times 3$ m med symmetri, vilket motsvarar en kub med sidorna $3 \times 3 \times 3$ m. Detta illustreras i figur 3.3.



Figur 3.3: En halv kub med symmetri motsvarar en kub med sidorna $3 \times 3 \times 3$ m

Gällande randvillkoren nyttjas för samtliga modeller symmetri enligt föregående stycke och rullager över återstående vertikala ytor. Rullagret tillåter vertikal, men ej horisontal deformation. Kubens undre yta har randvillkoret fixlager, vilket förhindrar såväl horisontell som vertikal deformation. En spännings-/tryck-/lastyta, beroende på modell, modelleras på kubens övre yta och återstående ytor antas vara fria. Detta visas för enskilda modeller i figur 3.4, 3.6 och 3.8.

Modellens utseende och randvillkor grundar sig i $TRVK V \ddot{a}g$ och dimensioneringsklass 2 där det föreskrivs att ett styvt lager med oändligt djup antas på 3 meters djup, att vägöverbyggnaden anses vara oändligt utbredd i horisontalled samt att påförda laster antas vara statiska. Detta tas upp i avsnitt 2.1.1.

Samtliga material antas ha ett linjärelastiskt beteende och tvärkontraktionstalet $\nu = 0.35$, bortsett från stålet i belastningsplattan. Densiteten, ρ , antas vara 2 200 kg/m³ för bundna material, 2 000 kg/m³ för det obundla bärlagret samt förstärkningslagret och till 1 900 kg/m³ för skyddslager samt terrass.

3.3.1 Töjningsmodellering utifrån lastfall

Då *TRVK Väg* utgår från två olika lastfall för att definiera tillåtna töjningar i vägkonstruktionen byggs två modeller upp i *COMSOL Multiphysics*; en som avser töjning vid belastning av en standardaxel och en som avser töjning vid belastning av extremlast. De två olika lastfallen och tillhörande töjningskrav beskrivs i avsnitt 2.1.3 respektive 2.1.4.

De två modellerna utgår från samma grundmodell som beskrivs inledningingsvis i avsnitt 3.3, dvs. en halv kub med sidorna $1.5 \times 3 \times 3$ m med symmetri, motsvarande en kub med dimensionerna $3 \times 3 \times 3$ m. Vidare är modellerna indelade i de sex olika lagren den studerade vägkroppen är uppbyggd av. Det översta lagret motsvarar 40 mm bundet slitlager, det andra 120 mm bundet bärlager, det tredje 80 mm obundet bärlager, det fjärde förstärkningslager med varierande tjocklek, det femte 30 mm eller obefintligt skyddslager och det sjätte lagret motsvarar terrassen vars tjocklek antas vara resterande djup ned till tre meter. Gällande det bundna slitlagret reduceras dess tjocklek med 20 mm i modellerna på grund av att detta betraktas som nötningszon vilken inte kan tillgodräknas vid bärighetsberäkning. Uppbyggnaden av de två modellerna illustreras i figur 3.4 och 3.6.

Elasticitetsmodulerna E för ingående lager i vägkonstruktionerna ges samma värde som styvhetsmodulerna M_s som utnyttjas i TRVK Väg och presenteras i tabell 3.1 – 3.5 i avsnitt 3.1. Således beräknas en töjning för varje klimatperiod i klimatzon 1 i de olika kravpunkterna. Töjningskraven beskrivs i avsnitt 2.1.5 och 2.1.6.

Standardaxel

Modellen för att beräkna töjningar vid belastning av en standardaxel utgår från den grundmodell som beskrivs inledningsvis under avsnitt 3.3, dvs en halv kub med sidorna $1.5 \times 3 \times 3$ m och kan ses i figur 3.4. På överytan av modellen placeras en cirkel med centrum 0.15 m från snittytan och med radie 0.1 m. Symmetrin kommer att motsvara en kub med sidorna $3 \times 3 \times 3$ m och två cirkulära ytor med ett c/c-avstånd på 0.3 m, vilket motsvarar kontaktytorna från det ena hjulparet i definitionen av en standardaxel (avsnitt 2.1.3). Avståndet mellan de två hjulparen är så pass stort att spänningsspridningarna mellan de två ej kommer påverka varandra, varav endast det ena hjulparet modelleras. Radien på en kontaktyta bestäms genom att varje däck antas ta upp en fjärdedel av den totala lasten samtidigt som spänningen på en kontaktyta är 800 kPa. Detta leder till:

$$\frac{\frac{100}{4}}{800} = 0.03125 \text{m}^2$$
$$\pi r^2 = 0.03125 \text{m}^2 \Rightarrow r = 0.1 \text{m}$$

där

r =Radien hos belastningsplattan [m]

Modellen är indelad i de sex lagren som vägkroppen antas bestå av och som beskrivs i avsnitt 3.3.1. Det översta lagret är indelat i fyra rätblock för att kunna generera ett bra elementnät. De två yttre rätblocken i detta lager har samma dimensioner, nämligen 1.5×1.3 m i xy-planet. Rätblocket direkt under den cirkulära kontaktytan har dimensionen 0.3×0.4 m i xy-planet och det sista rätblocket har dimensionerna 1.2×0.4 m i xy-planet. Samtliga rätblock i detta lager har en utsträckning i z-led som motsvarar tjockleken på bitumenbundet slitlager reducerat med 20 mm.

Ytan i botten av kuben modelleras som fast inspänd och samtliga omslutande vertikala ytor modelleras som rullager, bortsett från ytan där symmetri gäller. På den cirkulära ytan, motsvarande ett däcks kontaktyta, verkar en utbredd last som genererar en spänning på 800 kPa. Övriga ytor modelleras som fria. Antagna randvillkor visas i figur 3.4.



Figur 3.4: Randvillkor för standardaxelmodell

I följande stycken beskrivs modellens elementnät. I figur 3.5 illustreras elementnätet, vilket kan vara ett stöd till nedanstående beskrivning.

På grund av att tryckytan är cirkulär genereras ett elementnät bestående av tetraediska element, vars sidolängd varierar mellan 0.0303 och 0.242 m, för denna och rätblocket direkt under den cirkulära ytan. Anledningen till att även rätblocket utgörs av tetraediska element är för att kunna skapa ett bra elementnät för den cirkulära ytan och att generera en övergång till övriga rätblocksformade geometrier med sexsidiga element. Elementfördelningen kring tryckytan kan ses i figur 3.5b. De sexsidiga elementen i resterande geometrier utgår från det tvådimensionella elementnätet på överytor tillhörande de tre resterande rätblocken i det översta lagret.

De två yttre överytorna är uppdelade på samma sätt, men spegelvänt. Sträckan intill den rektangulära yta som innesluter den cirkulära tryckytan delas upp i fem lika stora element. Resterande sträcka delas upp i sex element vars storlek blir mindre desto närmare belastningsplattan de befinner sig, där det största elementet är fem gånger så stort som det minsta. Motstående yta delas således upp i 11 element vars storlek är mindre ju närmare symmetriplanet de är placerade. Även i detta fall är det största elementet fem gånger så stort som det minsta. Gällande sträckorna längs y-axeln delas dessa upp i sju element vars storlek minskar desto närmare den cirkulära tryckytan de är placerade, där det största elementet är sju gånger så stort som det minsta.

Indelningen av element på överytan på det mellanliggande, avlånga rätblocket görs med sex lika stora element längs kortsidorna och sex element längs långsidorna. Elementen är mindre ju närmre tryckytan de är placerade, där det största elementet är fem gånger större än det minsta.

Elementnätet i xy-planet gäller genomgående för samtliga lager, bortsett från lagret som motsvarar terrassen, och utgår från fördelningen på översta lagrets ovansida. Ovansidan av terrasslagret delar samma elementnät som övriga modellen, men övergår till lika stora element längs y-axeln i lagrets undersida.

Indelningen av element i z-led varierar mellan de olika lagren beroende på lagrens tjocklek. Det översta lagret (bundet slitlager) består av ett element i z-led, nästkommande lager (bundet bärlager) är uppdelat i två element och tredje lagret sett uppifrån (obundet bärlager) består av ett element. Då det fjärde lagret (förstärkningslagret) varierar i tjocklek kommer detta att delas in i ett element per 0.1 m. Det femte lagret (skyddslagret) består av ett element och det sjätte lagret (terrassen), som är det understa lagret, består av 11 element vars storlek är större med djupet. Det största elementet är här fem gånger så stort som det minsta.

Då den största horisontella respektive vertikala töjning som uppstår i det bitumenbundna lagret respektive på terrassens överyta ska utnyttjas vid bärighetsberäkning enligt avsnitt 2.1.5 och 2.1.6, jämförs töjningarna som uppstår i det bitumenbundna lagret och över terrassens ovanyta. Då det visar sig att största horisontella töjning alltid uppstår i en punkt i det bitumenbundna lagrets underyta mitt mellan tryckytorna samt alltid i en punkt mitt mellan tryckytorna på terrassens ovanyta registreras endast töjningarna i dessa två punkter.



Figur 3.5: Elementnät för standardaxelmodell

Extremlast

Precis som föregående modell utgår denna från grundmodellen som beskrivs i avsnitt 3.3 med dimensionerna $1.5 \times 3 \times 3$ m och kan ses i figur 3.6. Denna modell är indelad, liksom den för belastning av en standardaxel, i de sex lagren som den analyserade vägkroppen antas bestå av och som beskrivs i avsnitt 3.3.1. Skillnaden gentemot modellen med belastning av en standardaxel är att istället för den cirkulära ytan på modellens ovanyta modelleras en rektangulär yta med dimensionerna 0.6×0.1 m. Symmetrin längs snittytan ger inte bara en kub med dimensionerna $3 \times 3 \times 3$ m, utan även en rektangulär yta med måtten 0.6×0.2 m som motsvarar belastningsytan för extremlast, vilken beskrivs i avsnitt 2.1.4.

Som tidigare beskrivits modelleras bottenytan som fast inspänd och samtliga omslutande vertikala ytor, bortsett från ytan över vilken symmetri antas gälla, ges randvillkoret rullager. På den rektangulära ytan verkar en kraft på 65 kN, vilket på grund av symmetrin motsvarar en kraft på 130 kN verkande på ytan 0.6×0.2 m, vilket är definitionen av extremlast. Övriga ytor modelleras som fria. Antagna randvillkor illustreras i figur 3.6.



Figur 3.6: Randvillkor för extremlastmodell

I figur 3.7 illustreras elementnätet vilket kan vara ett stöd till nedanstående beskrivning.

Hela modellens elementnät utgår från elementnätet i den rektangulära tryckytan. Ytan ges ett jämnt fördelat rektangulärt nät med fyra element längs kortsidorna och 12 element längs långsidorna. Detta leder till att motstående långsida i den större överytan även den består av 12 lika stora element och kortsidorna fyra element där elementstorleken minskar ju närmare snittytan de är placerade. Här är det största elementet fem gånger större än det minsta. Gällande långsidan längs snittytan delas denna sträcka upp i tre, där den mellanliggande sammanfaller med den ena långsidan av tryckytan och delar därför antal element med denna. De två yttre sträckorna är lika långa och består vardera av 12 element vars storlek minskar ju närmare tryckytan de är placerade, där det största elementet är sju gånger större än det minsta. Tillsammans bildar detta fyrhörniga element.

Ovanstående elementnät gäller för xy-planet i hela modellen. Fördelningen i z-led varierar

med djupet likt modellen för standardaxellast. Det översta lagret (bundet slitlager) består av ett element, det andra (bundet bärlager) består av två och det tredje (obundet bärlager) består av ett. Det fjärde lagret (förstärkningslagret) varierar i tjocklek och består av ett element per 0.1 m. Det femte lagret (skyddslagret) består av ett element och det sjätte lagret (terrassen) består av 10 element vars storlek ökar med djupet, där det största elementet är åtta gånger så stort som det minsta.

Då den maximala vertikala töjningen i terrassens ovanyta ska kontrolleras så att denna inte överstiger tillåtet maxvärde enligt avsnitt 2.1.6 jämförs töjningen som uppstår över terrassytan. Det noteras då att maximal töjning uppstår i en punkt mitt under tryckytan på terrassens ovanyta. Därför registreras endast de vertikala töjningarna som uppstår i denna punkt.





Figur 3.7: Elementnät för extremlastmodell

3.3.2 Statiska plattbelastningar

Vid modellering av statiska plattbelastningar utnyttjas än en gång grundmodellen i form av en halv kub med dimensionerna $1.5 \times 3 \times 3$ m, vilket illustreras i figur 3.8. I centrum på toppen av den halva kuben modelleras belastningsplattan i form av en halv cylinder med diametern 0.3 m och höjden 0.03 m. Symmetrin medför att detta motsvarar en kub med dimensionerna $3 \times 3 \times 3$ m och en hel cylinder med mått enligt tidigare.

Belastningsplattan antas bestå av konstruktionsstål med elasticitetsmodulen E = 200 GPa, tvärkontraktionstalet $\nu = 0.33$ och densiteten $\rho = 7$ 850 kg/m³. Kuben antas motsvara terrassen och antas ha samma egenskaper som tidigare modellerade terrass, nämligen tvärkontraktionstalet $\nu = 0.35$ och densiteten $\rho = 1$ 900 kg/m³. Elasticitetsmodulen varieras för att uppnå samma deformation som för utförda statiska plattbelastningar.

En jämnt utbredd last, vars värde beror på genomförd statisk plattbelastning, verkar på plattans ovanyta. Övriga ytor ges de gemensamma randvillkor som gäller för de olika modellerna och beskrivs ovan. Modellens utseende och antagna randvillkor beskrivs i figur 3.8.



Figur 3.8: Randvillkor för plattbelastningsmodell

I följande stycken kommer elementnätet att beskrivas, vilket illustreras i figur 3.9 och kan vara ett stöd till nedanstående beskrivning.

På grund av plattans cylindriska form är dess elementnät utformat med tetraediska element vars sidolängd varierar mellan 0.0545 och 0.303 m. Den rektangulära ytan direkt under plattan består av rektangulära element med en sidolängd varierande mellan $6.06 \cdot 10^{-4}$ och 0.04 m anpassade efter cylinderns elementnät, se figur 3.9b.

Elementnätet för resterande överyta av den översta geometrin är i sin tur uppdelat efter föregående yta längs de båda kortsidorna utmed *x*-axeln och längs den bortersta långsidan utmed *y*-axeln. Dessa består av samma antal element som motsvarande sida i den rektangulara ytan direkt under plattan, men med samma storlek. Närmsta långsida blir uppdelad i tre delsträckor, där den mellersta delen tillhör den rektangulära ytan direkt under plattan och de två yttre har samma längd. De två senare består av sex element vars storlek minskas desto närmare belastningsplattan de är placerade, där det största elementet är fem gånger så stort som det minsta.

Utformningen av elementen på den översta ytan gäller för hela modellen. Höjden på elementen varierar däremot med djupet. Det första lagret består av ett element i höjd medan det undre består av 12 element vars höjd är större med djupet, där det största elementet är sex gånger så stort som det minsta.

För att kunna bestämma vilket värde på E i COMSOL Multiphysics som motsvarar ett uppmätt E_{v2} -värde i fält kontrolleras deformationen som uppkommer vid pålagd spänning i en punkt i den modellerade jorden direkt under plattans centrum. För att den modellerade deformationen i denna punkt ska anta samma värde som motsvarande punkt under den andra belastningscykeln i den verkliga plattbelastningen varieras elasticitetsmodulen via ett parametersvep tills detta uppnås. När detta är gjort för samtliga provresultat för statiska plattbelastningar plottas erhållna elasticitetsmoduler gentemot uppmätta E_{v2} -värden och ett samband kan tas fram.



Figur 3.9: Elementnät för plattbelastningsmodell

Kapitel 4

Beräkningar och resultat

4.1 Verifiering av COMSOL-modell

4.1.1 Beräkningar

För att undersöka om uppbyggda modeller i *COMSOL Multiphysics* ger samma töjningar som beräknas i *PMS Objekt* byggs vägkroppar med varierande lagertjocklekar upp i de båda programmen. Samtliga vägkonstruktioner består uppifrån av 40 mm bundet slitlager, 120 mm bundet bärlager och 80 mm obundet bärlager. Nästkommande lager är förstärkningslagret, vars tjocklek är 500, 400 eller 300 mm. Det femte lagret sett uppifrån är skyddslagret vilket endast är med i tre av de modellerade konstruktionerna och tjockleken är då 30 mm. Det understa lagret är terrassen, vars tjocklek är resterande djup ner till tre meter. Med tre olika tjocklekar på förstärkningslagret och två olika tjocklekar på skyddslagret kontrolleras således sex konstruktioner för varje lastfall. De sex olika konstruktionerna presenteras i tabell 4.1. Hur modellerna byggs upp i *PMS Objekt* och *COMSOL Multiphysics* beskrivs i kapitel 3.

Lagertjocklekar för kontrollerade vägkonstruktioner [mm]						
T			Konstr	uktion		
Lager	1	2	3	4	5	6
Bitumenbundet slitlager	40	40	40	40	40	40
Bitumenbundet bärlager	120	120	120	120	120	120
Obundet bärlager	80	80	80	80	80	80
Förstärkningslager	500	400	300	500	400	300
m Skyddslager	30	30	30	0	0	0
Terrass	$2 \ 230$	$2 \ 330$	2 430	$2 \ 260$	$2 \ 360$	2 460

Tabell 4.1: Uppbyggnad av de sex kontrollerade vägkonstruktionerna

Sex konstruktioner för standardaxelmodellen och sex konstruktioner för extremlastmodellen byggs således upp i *COMSOL Multiphysics*. Modellerna beskrivs i avsnitt 3.3.1. De töjning-

ar som tas fram jämförs med de som beräknas med hjälp av *PMS Objekt*. Är differensen mellan de olika resultaten tillräckligt liten kan modellen i *COMSOL Multiphysics* anses vara representativ och utnyttjas vidare för att ta fram ett förhållande mellan E och E_{v2} .

4.1.2 Resultat

Differens mellan töjningsberäkningarna i *COMSOL Multiphysics* och *PMS Objekt* för de olika töjningsnivåerna för de olika konstruktionerna redovisas i tabell 4.2. Medel- och maximala differensen som presenteras i tabellen omfattar samtliga sex klimatperioder för de olika konstruktionerna. Fullständig redovisning av töjningar och differenser presenteras i bilaga B1. På grund av den minimala differensen modellerna emellan kan de båda modellernas töjningsberäkningar likställas.

Tabell 4.2: Sa	mmanfattning av	$\operatorname{differenser}$	i töjningsl	oeräkningar	mellan	modelle	r i COM	MSOL
Multiphysics	och PMS Objekt							

		Konstruktion					
		1	2	3	4	5	6
	$\varepsilon_{bb,i}$	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5
Medeldifferens [%]	$\varepsilon_{te,i}$	1.6	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1
	$\varepsilon_{te,max}$	1.5	1.5	1.6	1.5	1.3	1.5
Maximal differens [%]	$\varepsilon_{bb,i}$	0.8	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0
	$\varepsilon_{te,i}$	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0
	$\varepsilon_{te,max}$	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3

4.2 Förhållande mellan E_{v2} och E

4.2.1 Beräkningar

Då modellerna i COMSOL Multiphysics verifierats i avsnitt 4.1 kan en liknande modell för statiska plattbelastningar utförda på terrass utnyttjas för att ta fram hur E_{v2} -värden uppmätta i fält förhåller sig till elasticitetsmodulen för framtagna modeller i COMSOL Multiphysics. Modellen byggs upp enligt avsnitt 3.3.2 och utnyttjas för 10 utförda plattbelastningar på terrass bestående av materialtyp 2 och 3B. Mätningarna är utförda på samma sätt som beskrivs i avsnitt 2.3.

På grund av den linjärelastiska modellen återskapas endast den andra belastningscykeln för varje plattbelastning i *COMSOL Multiphysics*. I tabell 4.3 sammanfattas en deformation som den högst erhållna spänningen orsakad av påförd last i den andra belastningscykeln ger i de olika mätningarna. Här visas även framräknat E_{v2} -värde. Plattbelastningarna i sin helhet återfinns i bilaga B2.

	Statiska plattbelastningar				
Mätning	Spänning [MPa]	Deformation [mm]	E_{v2} [MPa]		
1	0.450	0.78	133.5		
2	0.450	0.88	119.4		
3	0.450	1.16	90.2		
4	0.220	1.00	50.7		
5	0.450	0.94	111.3		
6	0.450	0.96	107.4		
7	0.450	1.88	57.8		
8	0.450	1.22	84.9		
9	0.225	2.40	22.6		
10	0.226	2.41	24.4		

Tabell 4.3: Sammanfattning av andra belastningscykeln för utförda statiska plattbelastningar

Genom ett parametersvep varieras elasticitetsmodulen i modellen tills samma deformation uppnås vid motsvarande spänning som för andra belastningscykeln för plattbelastningarna och ett förhållande mellan E och E_{v2} tas fram.

4.2.2 Resultat

I tabell 4.4 redovisas E_{v2} utifrån de mätningar som utförts i fält (beskrivs i föregående avsnitt) och motsvarande elasticitetsmodul som tagits fram genom analys i *COMSOL Multiphysics*. Även den procentuella differensen mellan dessa redovisas.

Tabell 4.4: Sammanfattning av andra belastningscykeln för utförda statiska plattbelastningar med motsvarande elasticitetsmodul i *COMSOL Multiphysics*

	Statiska plattbelastningar					
Mätning	E_{v2} [MPa]	E [MPa]	Differens [%]			
1	133.5	107.4	10.8			
2	119.4	95.1	11.3			
3	90.2	72.0	11.2			
4	50.7	40.7	10.9			
5	111.3	89.0	11.1			
6	107.4	87.1	10.4			
7	57.8	44.3	13.2			
8	84.9	68.4	10.8			
9	22.6	17.3	13.3			
10	24.4	17.3	17.0			

Förs värdena på deformationsmodulen E_{v2} och elasticitetsmodulen E in i ett diagram kan ett linjärt samband mellan dessa tas fram enligt:

$$E_{v2} = 1.2214 E + 2.2209 \tag{4.1}$$

Detta illustreras i figur 4.1.



Figur 4.1: Linjärt förhållande mellan E och E_{v2}

4.3 Rekommenderade E_{v2} -krav

4.3.1 Beräkningar

När ett förhållande mellan E och E_{v2} är framtaget utnyttjas *PMS Objekt* för att kontrollera vilken E-modul som lägst krävs för att en konstruktion ska godkännas i bärighetsberäkningen. *PMS Objekt* kan utnyttjas eftersom det i avsnitt 4.1 bekräftats att töjningsberäkningarna är likvärdiga mellan *COMSOL* och *PMS*. På så sätt kan krav på E_{v2} räknas fram för olika tjocklekar på förstärkningslagret enligt det linjära förhållandet i ekvation 4.1.

Elasticitetsmodulerna utgår i detta fall från styvhetsmodulerna M_s vilka varierar för de olika klimatperioderna. För att beräkna töjningar i konstruktionen för egendefinierade elasticitetsmoduler varieras dessa utifrån hur styvhetsmodulerna för de olika klimatperioderna ursprungligen förhåller sig till varandra. För terrassmaterial av materialtyp 2 förhåller styvhetsmodulerna sig till varandra enligt tabell 4.5 och för materialtyp 3B enligt tabell 4.6.

Materialtyp 2						
Klimatperiod	M_s [MPa]	Kvot $[M_{s,i}/M_{s,sommar}]$				
Vinter	1 000	10.00				
Tjällossningsvinter	$1\ 000$	10.00				
Tjällossning	70	0.70				
Senvår	85	0.85				
Sommar	100	1.00				
Höst	100	1.00				

Tabell 4.5: Förhållande mellan styvhetsmodulerna M_s för terrassmaterial av materialtyp 2 i klimatzon 1

Tabell 4.6: Förhållande mellan styvhetsmodulerna M_s för terrassmaterial av materialtyp 3B i klimatzon 1

Materialtyp 3B					
Klimatperiod	M_s [MPa]	Kvot $[M_{s,i}/M_{s,sommar}]$			
Vinter	1 000	10.00			
Tjällossningsvinter	1 000	10.00			
Tjällossning	35	0.35			
Senvår	50	0.50			
Sommar	100	1.00			
Höst	100	1.00			

Vägkonstruktionerna som kontrolleras består precis som tidigare av 40 mm bundet slitlager, 120 mm bundet bärlager och 80 mm obundet bärlager. Förstärkningslagrets tjocklek antas variera mellan 200 och 500 mm i 12 steg á 25 mm. Utöver detta kontrolleras lägst godkända elasticitetsmodul för tjocklekarna 420, 470, 550, 570 och 650 mm på förstärkningslagret. Detta dels för att ytterligare styrka framtaget förhållande, dels för att kontrollera hur resultatet förhåller sig till befintliga krav på E_{v2} som presenteras i tabell 2.8 i avsnitt 2.2. Skyddslagrets tjocklek sätts till 0 mm och lägst godkända elasticitetsmodul tas fram för 18 olika tjocklekar på förstärkningslagret.

Eftersom töjningskraven utgår ifrån vilken trafik i form av ekvivalent antal standardaxlar N_{ekv} (avsnitt 2.1.3) som antas belasta vägen tas värden på lägsta godkända elasticitetsmodul fram för tre olika värden på $ÅDT_k$, nämligen 2 000, 3 000 och 4 000 fordon/dygn. Övriga ingångsparametrar för att beräkna N_{ekv} behålls konstanta när $ÅDT_k$ varieras och sätts till:

A = 14 %-enheter $B_{just} = 1.52$ st n = 20 år k = 2 %-enheter B = 1.52 st $f_a = f_b = f_c = 1$

Beräkningen av N_{ekv} utförs av *PMS Objekt*, men tillvägagångsättet beskrivs under avsnitt 2.1.3.

För att beräkna $N_{till,bb}$ och $N_{till,te}$ används ingångsparametrarna:

$$m = 6 \text{ st}$$

 $n_i =$ Enligt tabell 2.1 på sidan 7 (klimatzon 1)

 $T_i =$ Enligt tabell 2.2 på sidan 7 (klimatzon 1)

$$f_s = f_d = 1$$

 $\varepsilon_{bb,i}$, $\varepsilon_{te,i}$ och $\varepsilon_{te,max}$ beräknas i *PMS Objekt*. Enligt avsnitt 4.1 motsvarar detta beräkningar i *COMSOL Multiphysics*. Även beräkningen av $N_{till,bb}$ och $N_{till,te}$ utförs av *PMS Objekt*, men tillvägagångsättet beskrivs under avsnitt 2.1.5 och 2.1.6.

För att en konstruktion ska bli godkänd krävs det att nedanstående krav uppfylls:

$$N_{till,bb} \ge N_{ekv} \tag{4.2}$$

$$N_{till,te} \ge 2 N_{ekv} \tag{4.3}$$

$$\varepsilon_{te,max} \le 0.0025 \tag{4.4}$$

När lägsta godkända elasticitetsmodul för de olika tjocklekarna på förstärkningslagret är framtagen räknas lägsta godkända värde på E_{v2} ut med hjälp av framtaget förhållande (ekvation 4.1). För att ta fram lägsta rekommenderade E_{v2} -värden beräknas dessa utifrån lägsta accepterad elasticitetsmodul för klimatperioden sommar. Framräknade lägst godkända E_{v2} värden plottas sedan mot tjockleken på förstärkningslagret för de tre olika trafikbelastningarna och ett krav som beror på $ÅDT_k$ och tjockleken på förstärkningslagret kan tas fram. Ett rekommenderat E_{v2} -kravförhållande för $ÅDT_k = 2~000, 3~000$ och 4 000 tas fram för materialtyp 2, $E_{v2,mt2}$, samt för materialtyp 3B, $E_{v2,mt3B}$.

Rekommenderade E_{v2} -krav beräknas med hjälp av förhållanden som togs fram i föregående stycke för tjocklekar på förstärkningslagret mellan 250 och 500 mm. Detta presenteras i tabell 4.9 och nyttjas vid dimensionering och kontroll. Dessutom presenteras ytterligare tabell 4.10 och 4.11 för att kunna jämföra nya framtagna, rekommenderade E_{v2} -krav med redan befintliga. Eftersom befintliga krav gäller för total tjocklek på obundna lager reduceras detta med 80 mm, vilket representerar tjockleken på obundet bärlager. Dessutom gäller nuvarande krav enligt tabell 2.8 för intervall på tjocklekar på obundna lager. Därför räknas rekommenderade krav för motsvarande intervall för tjockleken på förstärkningslagret fram och jämförs med befintliga.

Det rekommenderade värdet på E_{v2} gäller för hela terrassytan. Vid utförande av statiska plattbelastningar fås endast punktvärden och för att anta ett värde som gäller för hela ytan

ställs kravet på ett aritmetiskt medelvärde $\bar{x}_{E_{v2}}$ som justeras beroende på stickprovsstandardavvikelsen s. Här nyttjas befintliga E_{v2} -krav som tas upp i avsnitt 2.2 och nya krav blir:

$$\bar{x}_{E_{v2}} \ge \begin{cases} E_{v2,mti} + 0.96 \ s & \text{om} \quad n = 8\\ E_{v2,mti} + 0.83 \ s & \text{om} \quad n = 5 \end{cases}$$
(4.5)

där

 $E_{v2,mti}$ = Rekommenderat krav på E_{v2} för terrassyta bestående av materialtyp 2, $E_{v2,mt2}$, eller materialtyp 3B, $E_{v2,mt3}$ [Pa]

För att definiera grovt fel, G_f , utnyttjas ett aritmetiskt medelvärde $\bar{x}_{G_f,terrass}$ av kvoten mellan G_f och $\bar{x}_{E_{v2}}$ hos redan definierade krav på terrassen i tabell 2.8:

$$\bar{x}_{G_f, terrass} = \frac{\frac{32}{40} + \frac{20}{30} + \frac{15}{20}}{3} = 0.74 \tag{4.6}$$

Definitionen av grovt fel definieras som:

$$G_f < 0.74 E_{v2,mti}$$
 (4.7)

4.3.2 Resultat

Lägsta accepterad *E*-modul hos terrassmaterialet för olika tjocklekar på förstärkningslagret och olika trafikbelastning har tagits fram i *PMS Objekt*. De tre olika trafikbelastningarna genererar följande ekvivalent antal standardaxlar:

$$N_{ekv} = \begin{cases} 3 849 940 & \text{för} \quad \mathring{A}DT_k = 2 000 \\ 5 774 910 & \text{för} \quad \mathring{A}DT_k = 3 000 \\ 7 699 880 & \text{för} \quad \mathring{A}DT_k = 4 000 \end{cases}$$

Lägst accepterade E-moduler räknas sedan om genom framtaget förhållande (ekvation 4.1) till ett lägst tillåtet E_{v2} -värde för en viss tjocklek på förstärkningslagret och en viss trafikbelastning. Resultatet för terrass bestående av materialtyp 2 presenteras i tabell 4.7 och för materialtyp 3B i tabell 4.8.

Terrass av materialtyp 2							
Tiogklak	$ADT_k = 2 \ 000$		$\mathring{A}DT_k = 3\ 000$		$ÅDT_k = 4\ 000$		
förstärkningslagor	E	E_{v2}	E	E_{v2}	E	E_{v2}	
d = [mm]	terrass	terrass	terrass	terrass	terrass	terrass	
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
650	7.5	11.4	10.5	15.1	13.5	18.7	
570	12.5	17.5	17.5	23.6	22.0	29.1	
550	14.0	19.3	19.5	26.0	25.0	32.8	
500	20.0	26.7	27.5	35.8	34.0	43.8	
475	24.0	31.5	32.5	41.9	40.0	51.1	
470	25.0	32.8	33.5	43.1	41.5	52.9	
450	28.5	37.0	38.5	49.2	47.0	59.6	
425	34.0	43.8	45.0	57.2	55.0	69.4	
420	35.0	45.0	46.5	59.0	56.5	71.2	
400	40.5	51.7	53.0	67.0	63.5	79.8	
375	48.0	60.9	62.0	78.0	74.0	92.6	
350	56.5	71.2	72.0	90.2	85.5	106.7	
325	66.0	82.8	83.5	104.2	98.0	121.9	
300	77.0	96.3	96.5	120.1	112.5	139.6	
275	90.0	112.2	111.0	137.8	128.0	158.6	
250	104.0	129.3	127.5	158.0	146.0	180.6	
225	119.5	148.2	145.0	179.3	165.5	204.4	
200	137.0	169.6	165.0	203.8	187.0	230.6	

Tabell 4.7: Lägsta accepterade E-modul hos terrass bestående av materialtyp 2 och accepterad E_{v2} -modul på terrassytan enligt ekvation 4.1

Terrass av materialtyp 3B							
Tiocklok	$ÅDT_k = 2 \ 000$		$ÅDT_k = 3\ 000$		$ÅDT_k = 4\ 000$		
förstärkningslagor	E	E_{v2}	E	E_{v2}	E	E_{v2}	
d = [mm]	terrass	terrass	terrass	terrass	terrass	terrass	
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
650	8.5	12.6	12.0	16.88	15.0	20.54	
570	14.0	19.3	19.5	26.0	24.5	32.2	
550	16.0	21.8	22.0	29.1	28.0	36.4	
500	22.4	29.6	31.0	40.1	38.5	49.2	
475	27.0	35.2	37.0	47.4	45.0	57.2	
470	27.5	35.8	37.5	48.0	46.5	59.0	
450	32.0	41.3	43.0	54.7	52.5	66.3	
425	38.0	48.6	51.0	64.5	61.0	76.7	
420	39.0	49.9	52.0	65.7	63.0	79.2	
400	45.0	57.2	59.0	74.3	71.0	88.9	
375	53.0	67.0	70.0	87.7	82.5	103.0	
350	62.5	78.6	80.5	100.5	95.0	118.3	
325	73.5	92.0	93.0	115.8	109.5	136.0	
300	85.5	106.7	107.5	133.5	125.0	154.9	
275	99.5	123.8	123.5	153.1	143.0	176.9	
250	115.0	142.7	141.0	174.4	162.5	200.7	
225	132.0	163.5	161.0	198.9	184.0	227.0	
200	151.0	186.7	182.5	225.1	208.0	256.3	

Tabell 4.8: Lägsta accepterade E-modul hos terrass bestående av materialtyp 3B och accepterad E_{v2} -modul på terrassytan enligt ekvation 4.1

Värden på tjockleken av förstärkningslagret d_{fl} och motsvarande värde på minsta accepterbara E_{v2} framgår av figur 4.2 och 4.3. Figurerna visar också exponentialfunktioner som anpassats efter inritade värden enligt:

$$E_{v2,mt2} = \begin{cases} 606 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} \quad \mathring{A}DT_k = 2 \ 000\\ 694 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} \quad \mathring{A}DT_k = 3 \ 000\\ 751 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} \quad \mathring{A}DT_k = 4 \ 000 \end{cases}$$
(4.8)

$$E_{v2,mt3B} = \begin{cases} 665 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} & \text{\AA}DT_k = 2 \ 000\\ 766 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} & \text{\AA}DT_k = 3 \ 000\\ 838 \ e^{-0.006 \ d_{fl}} & \text{om} & \text{\AA}DT_k = 4 \ 000 \end{cases}$$
(4.9)

där

 $E_{v2,mt2} =$ Lägsta accepterade värde för E_{v2} på terrassytan för materialtyp 2 [MPa] $E_{v2,mt3B} =$ Lägsta accepterade värde för E_{v2} på terrassytan för materialtyp 3B [MPa] $d_{fl} =$ Tjocklek på förstärkningslager [mm]



Figur 4.2: Lägsta accepterade värde på E_{v2} hos terrassyta tillhörande materialtyp 2 beror exponentiellt på tjockleken på förstärkningslagret d_{fl}



Figur 4.3: Lägsta accepterade värde på E_{v2} hos terrassyta tillhörande materialtyp 3B beror exponentiellt på tjockleken på förstärkningslagret d_{fl}

Utifrån ekvation 4.8 och 4.9 beräknas rekomenderade E_{v2} -krav för tjocklekar på förstärkningslagret mellan 200 och 500 mm för var 10 mm, vilket presenteras i tabell 4.9.

Framtagna E_{v2} -krav ur exponentiellt förhållande [MPa]							
Tjocklek	Ma	terialty	р2	Materialtyp 3B			
${ m f\"orst\"arkningslager}$	$ÅDT_k$			ADT_k			
[mm]	2000	3000	4000	2000	3000	4000	
500	30	35	37	33	38	42	
490	32	37	40	35	40	44	
480	34	39	42	37	43	47	
470	36	41	45	40	46	50	
460	38	44	48	42	48	53	
450	41	47	50	45	51	56	
440	43	50	54	47	55	60	
430	46	53	57	50	58	63	
420	49	56	60	54	62	67	
410	52	59	64	57	65	72	
400	55	63	68	60	69	76	
390	58	67	72	64	74	81	
380	62	71	77	68	78	86	
370	66	75	82	72	83	91	
360	70	80	87	77	88	97	
350	74	85	92	81	94	103	
340	79	90	98	86	100	109	
330	84	96	104	92	106	116	
320	89	102	110	97	112	123	
310	94	108	117	104	119	130	
300	100	115	124	110	127	139	
290	106	122	132	117	134	147	
280	113	129	140	124	143	156	
270	120	137	149	132	152	166	
260	127	146	158	140	161	176	
250	135	155	168	148	171	187	

Tabell 4.9: E_{v2} -krav framtaget ur exponentiellt förhållande (ekvation 4.8 och 4.9) för olika värden på $ÅDT_k$ och tjocklekar på förstärkningslagret

I tabell 4.10 och 4.11 presenteras befintliga och föreslagna E_{v2} -krav för olika tjocklekar på förstärkningslagret. I tabellen tas inte hänsyn till standardavvikelsen, vilken är densamma för de olika kraven enligt ekvation 4.5.

Tabell 4.10: Jämförelse mellan framtagna rekommenderade E_{v2} -krav och befintliga utan hänsyn till standardavvikelse för materialtyp 2

Jämförelse rekommenderade E_{v2} -krav med befintliga för materialtyp 2							
Tjocklek	Dofinition	Reko	mmenderade [[MPa]			
förstärkningslager			$ÅDT_k$				
$d_{fl} \; [\mathrm{mm}]$	[MPa]	2000	3000	4000			
420 - 470	40	49 - 36	56 - 41	60 - 45			
471 - 570	30	36 - 20	41 - 23	45 - 25			
571 - 670	20	20 - 11	23 - 12	24 - 13			

Tabell 4.11: Jämförelse mellan framtagna rekommenderade E_{v2} -krav och befintliga utan hänsyn till standardavvikelse för materialtyp 3B

Jämförelse rekommenderade E_{v2} -krav med befintliga för materialtyp 3B						
Tjocklek	Bofintliga	Reko	mmenderade [MPa]		
förstärkningslager			$ÅDT_k$			
$d_{fl} \; [\mathrm{mm}]$	[MPa]	2 000	3000	4000		
420 - 470	40	54 - 40	62 - 46	67 - 50		
471 - 570	30	39 - 22	45 - 25	50 - 27		
571 - 670	20	22 - 12	25 - 14	27 - 15		

Rekommenderat krav på aritmetiskt medelvärde för E_{v2} , $\bar{x}_{E_{v2}}$, är enligt ekvation 4.5:

$$\bar{x}_{E_{v2}} \ge \begin{cases} E_{v2,mt2} + 0.96 \ s & \text{om} \quad n = 8\\ E_{v2,mt2} + 0.83 \ s & \text{om} \quad n = 5 \end{cases}$$
(4.10)

för materialtyp 2 och:

$$\bar{x}_{E_{v2}} \ge \begin{cases} E_{v2,mt3B} + 0.96 \ s & \text{om} \quad n = 8\\ E_{v2,mt3B} + 0.83 \ s & \text{om} \quad n = 5 \end{cases}$$
(4.11)

för materialtyp 3B. Definitionen för grovt fel
, ${\cal G}_f,$ är enligt ekvation 4.7:

$$G_f < \begin{cases} 0.74 \ E_{v2,mt2} & \text{för materialtyp 2} \\ 0.74 \ E_{v2,mt3B} & \text{för materialtyp 3B} \end{cases}$$
(4.12)

Kapitel 5

Diskussion och slutsats

5.1 Diskussion

Som kan ses i tabell 4.2 blir storleken på töjningarna i bitumenbundna lager i stort sett samma i *PMS Objekt* och *COMSOL Multiphysics*, med en maximal differens mellan framtagna töjningar i de två programmen på 1 %. Detta beror troligtvis på att spänningsspridningen med djupet endast sker genom 40 mm bitumenbundet slitlager och 120 mm bitumenbundet bärlager, varpå skillnader mellan *PMS Objekts* tvådimensionella och *COMSOL Multiphysics* tredimensionella spänningsfördelning med djupet ej kommer att ha så stor inverkan. Inte heller eventuell inverkan av randvillkor kommer att spela in i någon större utsträckning, varav skillnaden i töjning knappt blir märkbar.

Att spänningsspridningen endast sker i de bitumenbundna slit- och bärlagren är troligtvis även anledningen till att töjningsdifferensen på terrassytan är marginellt större än den under bitumenbundna lager. Spänningsfördelningen med djupet sker således genom en större mäktighet, vilket leder till att eventuella differenser i spänningsfördelning gör större avtryck. Dock kan en maximal differens mellan töjningar framtagna i de två programmen på 2.4 % anses vara så pass liten att töjningsberäkningarna med de två olika programmen kan anses motsvara varandra.

Differensen mellan elasticitetsmoduler E framtagna genom parametersvep i COMSOL Multiphysics och motsvarande E_{v2} -modul för andra belastningscykeln vid statisk plattbelastning är enligt tabell 4.4 relativt konstant för de 10 mätpunkterna. Ytterligare syns ett tydligt linjärt samband mellan värden på E och E_{v2} införda i ett diagram enligt figur 4.1 i ekvation 4.1. Med detta som grund kan förhållandet i ekvation 4.1 antas vara en god approximation för att beräkna E_{v2} utifrån E och vice versa.

Trots att styvhetsmodulerna M_s definierade i $TRVK V \ddot{a}g$ ej kan påstås vara verkliga elasticitetsmoduler kan dessa utnyttjas som det sistnämnda eftersom de ger rimliga värden på styvhetsegenskaper för ingående material. Dessutom utnyttjas samma tillvägagångssätt som för bärighetsberäkning enligt dimensioneringsklass 2. Då styvhetsmodulerna för ingående material i överbyggnaden ej ändras har denna samma styvhetsegenskaper som nyttjas i dimensioneringsklass 2. Förhållandet mellan styvhetsmodulerna behålls för att ta fram nya moduler, i detta fall styvhetsmoduler, för terrassen och eftersom dessa antas variera och förhålla sig till varandra på samma sätt som tidigare mellan de olika klimatperioderna kan detta ses som en god uppskattning av styvheten hos terrassen.

Skillnaden mellan föreslagna E_{v2} -krav och befintliga är att de föreslagna som tas fram i detta arbete gäller för olika värden på $ÅDT_k$, samt att de skiljer sig för olika terrassmaterial. Föreslagna E_{v2} -krav kan därför anses vara mer anpassade och representativa för de förhållanden som gäller för ett specifikt vägprojekt. Däremot måste fortfarande E_{v2} -krav för ovanliggande lager i konstruktionen uppfyllas vid nyttjande av nya rekommenderade krav på terrassen.

De tre befintliga E_{v2} -kraven på terrassytan gäller för intervallen 500 - 550, 551 - 650 respektive 651 - 750 mm för tjockleken på obundna lager enligt tabell 2.8. I tabell 4.10 och 4.11 presenteras rekommenderade E_{v2} -krav beräknade med ekvation 4.10 och 4.11 för motsvarande tjocklek på förstärkningslagret, dvs. tjockleken på obundna lager reducerat med 80 mm. Det visar sig att majoriteten (14 av 18) beräknade E_{v2} -intervall innefattar motsvarande befintliga krav. Övriga fyra krav-intervall överstiger befintliga krav. Detta innebär att rekommenderade E_{v2} -krav beräknade med ekvation 4.10 och 4.11 antas stämma väl överens med befintliga krav och kan med god approximation utnyttjas för att beräkna rekommenderade E_{v2} -värden för tunnare tjocklekar på förstärkningslagret än vad som idag är tillåtet enligt TRVK Väg.

Anledningen till att rekommenderade E_{v2} -krav är hårdare för terrass bestående av materialtyp 3B än för terrass bestående av materialtyp 2 är att elasticitetsmodulen antas ha en större variation mellan klimatperioderna. Trots att de två materialtyperna antas ha identisk styvhet under 4 av de 6 klimatperioderna kommer E-modulen för materialtyp 3 att anta ett lägre värde under såväl tjällossning som senvår. Eftersom modulerna antas variera i förhållande till varandra ställs därför högre krav på uppmätt E_{v2} , vilket är framräknat utifrån lägsta godkända elasticitetsmodul för klimatperioden sommar.

Skälet till att rekommenderade krav grundas på sommarens elasticitetsmodul är att statisk plattbelastning ej får utföras under tjällossning eller tjälade förhållanden, vilket innebär att endast senvår, sommar och höst återstår som alternativ. Eftersom sommar och höst har likvärdiga elasticitetsmoduler och att elasticitetsmodulen under senvår underskrider dessa två blir framtagna krav på säkra sidan om E_{v2} -kraven grundar sig i E-modulen under klimatperioden sommar.

Rekommenderat värde på E_{v2} gäller för hela terrassytan, men då det inte går att utföra statiska plattbelastningar på hela ytan får medelvärdet av ett antal stickprov ses som representativt. För att med säkerhet kunna säga att medelvärdet av plattbelastningarna gäller för hela ytan måste hänsyn tas till hur mycket mätvärdena varierar sinsemellan. Om varje mätning ger exakt samma värde, dvs. om standardavvikelsen är 0, måste uppmätt värde på E_{v2} motsvara det rekommenderade kravet. Om resultaten från mätningarna däremot skiljer sig gentemot varandra kan inte längre medelvärdet i sig ses som representativt för hela ytan och kravet måste ökas för att ta hänsyn till hur mätningarnas uppmätta E_{v2} -värden skiljer sig från varandra. För att säkerställa att hela ytan åtminstone har styvheten som motsvaras av E_{v2} -kravet tas därför hänsyn till standardavvikelsen. Detta görs på samma sätt som ut-

nyttjas i befintliga krav, dvs. E_{v2} -kravet ökat med 0.96 s för 8 observationer respektive 0.83 s för 5 observationer.

Avgörande för hur många observationer, dvs. mätningar, som genomförs beror på om gränsvärdet för grovt fel underskrids vid någon enskild mätning. Definitionen för grovt fel sattes enligt ekvation 4.7 till $G_f < 0.74 E_{v2,mti}$. Underskrids detta ej och variationen mellan mätningarna är liten kan antalet mätningar begränsas till 5 och således begränsas även ökningen av E_{v2} -kravet med hänsyn till standardavvikelsen till 0.83 s. Underskrids gränsvärdet för grovt fel för en observation ökas antalet observationer till 8, och därför även E_{v2} -kravet med hänsyn till standardavvikelsen till 0.96 s.

Om statiska plattbelastningar utförs på en terrassyta där en tänkt dimensionerad överbyggnad ska anläggas och resultaten från plattbelastningen ej uppfyller de rekommenderade kraven på E_{v2} kan tabell 4.9 utnyttjas för att härleda vilken tjocklek på förstärkningslagret som krävs. Genom att beräkna $\bar{x}_{Ev2} - 0.96 s$ fås ett värde på E_{v2} som måste underskridas i tabell 4.9. På så sätt kan för gällande materialtyp och $ÅDT_k$ en rekommenderad tjocklek på förstärkningslagret tas fram.

För att detta arbete skulle kunna genomföras och resultatet kunna jämföras med de krav som gäller idag har tjockleken och egenskaperna av bundna lager antagits konstanta och endast tjockleken av förstärkningslagret samt trafikbelastningen varierats. När vägkonstruktioner dimensioneras i praktiken anpassas ofta tjockleken och egenskaperna av de bundna lagren för att ta hänsyn till antagen trafikbelastning. Det kan därför vara problematiskt att genomgående utnyttja de E_{v2} -krav som tas fram i detta arbete för alla vägkonstruktioner. Eftersom förhållandet mellan terrassens E-modul och uppmätt värde på E_{v2} inte påverkas av vilken konstruktion som byggs ovanpå denna, kan det linjära förhållandet mellan dessa två moduler (ekvation 4.1) utnyttjas för att räkna fram nya krav för olika typer av vägkonstruktioner. Med andra ord kan E_{v2} -krav på terrassytan för specifika konstruktioner tas fram genom att utnyttja förfarandet som beskrivs under avsnitt 4.3, dvs. ta fram lägsta accepterade E-modul för terrassen i *PMS Objekt* och räkna om denna med hjälp av ekvation 4.1 till rekommenderat E_{v2} -krav på ytan. I övrigt kan definierade hänsynskrav för standardavvikelse och definerat värde för grovt fel utnyttjas enligt ekvation 4.5 respektive 4.7.

Begränsningen till linjärelastiska modeller i detta arbete beror bl.a. på att linjärelastiska modeller förespråkas i dimensioneringsklass 2 i TRVK Väg vilket också ansågs vara en rimlig begränsning i ett inledande skede av arbetet. Efterhand som arbetet fortlöpt har detta även setts som en rimlig begränsning i avseende till datorkapacitet och tid. Trots att resultaten stämmer väl överens med de krav som finns angivna idag hade det varit intressant att undersöka och jämföra dessa med resultat från modeller som tar hänsyn till plastiska och hårdnande egenskaper.

5.2 Förslag till vidare forskning

Detta arbete betraktar endast en vägkonstruktion vars beteende antas vara linjärelastiskt och en intressant vidareutveckling är att kontrollera hur bärighetsegenskaperna hos konstruk-

tionen påverkas om en annan materialmodell än den linjärelastiska använts. Resultatet från en modell som tar hänsyn till beteenden som plasticitet och hårdnande hade varit intressant. Hela utförandet av statisk plattbelastning kan modelleras och en kontroll över storleken på de kvarstående deformationerna i en vägkonstruktion efter belastning med ett visst antal standardaxlar är två fall som kan studeras.

Nya E_{v2} -krav kan tas fram för andra materialtyper och eventuellt andra klimatzoner än de som tas upp i detta arbete. I detta fall bör dock hänsyn tas till inverkan av tjäle och övrig väta i materialen. Även att ta fram nya E_{v2} -krav för övriga ytor i vägkonstruktionen som beror på $ÅDT_k$ och lagertjocklek är en intressant vidareutveckling. Därigenom hade dessa krav varit bättre anpassade för specifika förhållanden.

Kapitel 6

Referenser

Agardh, S. & Parhamifar, E., 2011. Kompendium i Vägbyggnad, Lund: KFS i Lund AB.

COMSOL Multiphysics (Version 5.0.1) 2014. [Datorprogram], COMSOL AB

Hermelin, K., 2014. Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning, u.o.: Trafikverket.

Karlsson, M. & Moritz, L., 2014. Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13, u.o.: Trafikverket.

PMS Objekt (Version 5.0.1), 2012. [Datorprogram], Trafikverket

Ottosen, N. & Petersson, H., 1992. Introduction to the Finite Element Method, u.o.: Prentice Hall.

Svensk Byggtjänst, 2014. AMA Anläggning 13. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten. u.o.:Svensk Byggtjänst.

Trafikverket, 2011a. TRVK Väg, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2011b. TRVKB 10 Obundna lager, Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2011c. TRVR Väg, Borlänge: Trafikverket.

Vägverket, 1994. Statistisk acceptanskontroll, u.o.: Vägverket.

Vägverket, 2005. ATB Väg 2005, Borlänge: Vägverket.
Bilagor

		40 mm Buni	det slitlager				40 mm Bund	let slitlager			Γ	40 mm Bunc	det slitlager		
		120 mm Bui	ndet bärlag	er			120 mm Bur	ndet bärlage	ar			120 mm Bur	ndet bärlage	Ju Ju	
		80 mm Obu	ndet bärlag	er			30 mm Obui	ndet bärlag	er			80 mm Obui	ndet bärlag	er	
		500 mm Föl	rstärkningsl:	ager		-	400 mm För.	stärkningsl	ager			300 mm För.	stärkningsl	ager	
		30 mm Skyc	ldslager				30 mm Skyd	dslager				30 mm Skyd	dslager		
Årstid			PMS	Differens	%			PMS	Differens	%			PMS	Differens	%
	ebb,i	7.05E-05	7.00E-05	4.50E-07	0.3%	ebb,i	7.00E-05	6.90E-05	9.63E-07	0.7%	ebb,i	6.92E-05	6.90E-05	1.79E-07	0.1%
Vinter	εte,i	2.90E-05	3.00E-05	-1.05E-06	-1.8%	ste,i	3.52E-05	3.60E-05	-8.48E-07	-1.2%	εte,i	4.34E-05	4.40E-05	-5.97E-07	-0.7%
	ste max	7.38E-05	7.60E-05	-2.22E-06	-1.5%	ete max	8.93E-05	9.10E-05	-1.66E-06	-0.9%	ete max	1.10E-04	1.12E-04	-2.03E-06	-0.9%
	sbb,i	1.05E-04	1.03E-04	1.67E-06	0.8%	ebb,i	1.04E-04	1.02E-04	1.99E-06	1.0%	ebb,i	1.03E-04	1.01E-04	1.99E-06	1.0%
Tjäl,vinter	ste,i	3.20E-05	3.30E-05	-1.02E-06	-1.6%	ste,i	3.82E-05	3.90E-05	-8.46E-07	-1.1%	εte,i	4.58E-05	4.60E-05	-2.48E-07	-0.3%
	ste max	8.14E-05	8.30E-05	-1.58E-06	-1.0%	ete max	9.69E-05	9.90E-05	-2.13E-06	-1.1%	ste max	1.16E-04	1.17E-04	-1.17E-06	-0.5%
	sbb,i	1.01E-04	1.01E-04	1.40E-07	0.1%	sbb,i	1.04E-04	1.04E-04	-5.00E-08	0.0%	εbb,i	1.09E-04	1.10E-04	-1.28E-06	-0.6%
Tjällossning	εte,i	2.44E-04	2.36E-04	8.26E-06	1.7%	εte,i	2.88E-04	2.89E-04	-1.07E-06	-0.2%	εte,i	3.49E-04	3.60E-04	-1.11E-05	-1.6%
	ste max	6.26E-04	6.09E-04	1.71E-05	1.4%	ste max	7.36E-04	7.44E-04	-7.53E-06	-0.5%	ste max	8.91E-04	9.25E-04	-3.44E-05	-1.9%
•	sbb,i	1.07E-04	1.06E-04	6.90E-07	0.3%	sbb,i	1.09E-04	1.09E-04	8.00E-08	%0.0	sbb,i	1.13E-04	1.14E-04	-7.10E-07	-0.3%
Senvar	ste,i	2.05E-04	2.07E-04	-1.78E-06	-0.4%	ste,i	2.47E-04	2.54E-04	-7.30E-06	-1.5%	ste,i	3.05E-04	3.18E-04	-1.27E-05	-2.0%
	ste max	5.25E-04	5.33E-04	-7.73E-06	-0.7%	εte max	6.30E-04	6.54E-04	-2.39E-05	-1.9%	ete max	7.78E-04	8.17E-04	-3.89E-05	-2.4%
	ebb,i	1.97E-04	2.00E-04	-2.54E-06	-0.6%	ebb,i	1.98E-04	2.01E-04	-2.57E-06	-0.6%	ebb,i	2.01E-04	2.04E-04	-2.91E-06	-0.7%
Sommar	εte,i	1.77E-04	1.84E-04	-7.15E-06	-2.0%	εte,i	2.24E-04	2.31E-04	-7.47E-06	-1.6%	εte,i	2.91E-04	2.99E-04	-8.17E-06	-1.4%
	ste max	4.51E-04	4.72E-04	-2.14E-05	-2.3%	εte max	5.68E-04	5.92E-04	-2.41E-05	-2.1%	ete max	7.37E-04	7.63E-04	-2.62E-05	-1.7%
	εbb,i	1.19E-04	1.18E-04	6.50E-07	0.3%	ebb,i	1.20E-04	1.20E-04	4.10E-07	0.2%	εbb,i	1.24E-04	1.23E-04	5.60E-07	0.2%
Höst	ste,i	1.51E-04	1.57E-04	-6.11E-06	-2.0%	εte,i	1.85E-04	1.93E-04	-7.71E-06	-2.0%	εte,i	2.33E-04	2.41E-04	-8.13E-06	-1.7%
	ste max	3.85E-04	4.04E-04	-1.87E-05	-2.4%	εte max	4.72E-04	4.95E-04	-2.30E-05	-2.4%	ste max	5.92E-04	6.17E-04	-2.52E-05	-2.1%
		40 mm Bun	det slitlager				40 mm Bund	let slitlager				40 mm Bund	det slitlager		
		120 mm Bui	ndet bärlag	er			120 mm Bun	ndet bärlage	er			120 mm Bur	ndet bärlage	L.	
		80 mm Obu	ndet bärlag	er			30 mm Obui	ndet bärlag	er			80 mm Obui	ndet bärlag	er	
		500 mm För	stärkningsl	ager		-	400 mm För	stärkningsl	ager			300 mm För	stärkningsl	ager	
		0 mm Skyde	Islager				0 mm Skydd	slager				0 mm Skydd	slager		
		3B terrass					3B terrass	1				3B terrass			
Årstid		COMSOL	PMS	Differens	%		COMSOL	PMS	Differens	%		COMSOL	PMS	Differens	%
	ebb,i	7.04E-05	7.00E-05	4.25E-07	0.3%	ebb,i	6.99E-05	6.90E-05	9.41E-07	0.7%	ebb,i	6.92E-05	6.90E-05	1.57E-07	0.1%
Vinter	εte,i	3.05E-05	3.10E-05	-4.93E-07	-0.8%	εte,i	3.72E-05	3.80E-05	-8.32E-07	-1.1%	εte,i	4.61E-05	4.60E-05	7.50E-08	0.1%
	ste max	7.77E-05	8.00E-05	-2.29E-06	-1.5%	ete max	9.44E-05	9.60E-05	-1.59E-06	-0.8%	ete max	1.17E-04	1.18E-04	-1.35E-06	-0.6%
	ebb,i	1.05E-04	1.03E-04	1.64E-06	0.8%	ebb,i	1.04E-04	1.02E-04	1.96E-06	1.0%	ebb,i	1.03E-04	1.01E-04	1.96E-06	1.0%
Tjäl,vinter	εte,i	3.36E-05	3.40E-05	-3.93E-07	-0.6%	εte,i	4.01E-05	4.00E-05	1.35E-07	0.2%	εte,i	4.81E-05	4.80E-05	1.35E-07	0.1%
	ste max	8.55E-05	8.70E-05	-1.49E-06	-0.9%	εte max	1.02E-04	1.03E-04	-1.16E-06	-0.6%	ete max	1.22E-04	1.23E-04	-1.22E-06	-0.5%
	sbb,i	1.01E-04	1.01E-04	2.00E-07	0.1%	sbb,i	1.04E-04	1.05E-04	-9.20E-07	-0.4%	εbb,i	1.09E-04	1.10E-04	-1.03E-06	-0.5%
Tjällossning	εte,i	2.49E-04	2.41E-04	8.16E-06	1.7%	εte,i	2.95E-04	2.96E-04	-1.47E-06	-0.2%	εte,i	3.58E-04	3.69E-04	-1.12E-05	-1.5%
	ste max	6.38E-04	6.21E-04	1.75E-05	1.4%	εte max	7.53E-04	7.61E-04	-7.84E-06	-0.5%	ste max	9.13E-04	9.47E-04	-3.38E-05	-1.8%
	εbb,i	1.07E-04	1.06E-04	7.40E-07	0.3%	ebb,i	1.09E-04	1.09E-04	1.80E-07	0.1%	εbb,i	1.14E-04	1.14E-04	-4.80E-07	-0.2%
Senvår	εte,i	2.11E-04	2.13E-04	-1.55E-06	-0.4%	ste,i	2.55E-04	2.63E-04	-7.77E-06	-1.5%	εte,i	3.17E-04	3.30E-04	-1.28E-05	-2.0%
	ste max	5.41E-04	5.49E-04	-7.92E-06	-0.7%	ste max	6.52E-04	6.75E-04	-2.34E-05	-1.8%	ste max	8.08E-04	8.46E-04	-3.79E-05	-2.3%
	εbb,i	1.97E-04	2.00E-04	-2.65E-06	-0.7%	ebb,i	1.98E-04	2.01E-04	-2.65E-06	-0.7%	εbb,i	2.01E-04	2.04E-04	-2.99E-06	-0.7%
Sommar	ste,i	1.89E-04	1.96E-04	-7.45E-06	-1.9%	ste,i	2.40E-04	2.48E-04	-8.07E-06	-1.7%	εte,i	3.14E-04	3.22E-04	-7.61E-06	-1.2%
	ste max	4.80E-04	5.01E-04	-2.07E-05	-2.1%	εte max	6.09E-04	6.33E-04	-2.38E-05	-1.9%	ste max	7.96E-04	8.22E-04	-2.59E-05	-1.6%
	ebb,i	1.19E-04	1.18E-04	6.00E-07	0.3%	ebb,i	1.20E-04	1.20E-04	3.70E-07	0.2%	ebb,i	1.24E-04	1.23E-04	5.20E-07	0.2%
Höst	εte,i	1.60E-04	1.66E-04	-6.12E-06	-1.9%	ste,i	1.97E-04	2.05E-04	-7.55E-06	-1.9%	εte,i	2.50E-04	2.58E-04	-8.41E-06	-1.7%
	ete max	4.U8E-U4	4.2/E-U4	-1.89E-U5	-2.3%	ete max	5.03E-04	5.2bE-04	-2.32E-U5	-2.3%	Ete max	b.34E-U4	0.6UE-U4	-2.6UE-U5	¥0'7-

B1 Töjningar i COMSOL och PMS

B2 Statiska plattbelastningar

Mätning 1



Provningsresultat, statisk plattbelastning

Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:		Entreprenör: Utförd av:	Peab Anläggning AB Per Ljungqvist
Provningsdatum:	2015-03-19	Material:	Terrass
Provningsplats:	Punkt 1		
Registreringsnr:	P1503-045		
Beställare:	Peab Anläggning AB		

	Först	ta bel	astni	ng						Andr	a bela	astnir	ng			
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,40	0,80	1,18	1,54	1,90	2,08	2,28	2,24	2,06	1,60	1,78	1,92	2,06	2,20	2,30	2,38



		1:a belastning	2:a belastning
ao	mm	-0,026	1,587
a ₁	mm/(MN/m ²)	5,427	2,287
a ₂	mm/(MN/m ²)	-1,627	-1,202

	Resultat	
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1
48,8	133,5	2,74



Provningsresultat, statisk plattbelastning

Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:

Provningsdatum:	2015-03-19
Provningsplats:	Punkt 2
Registreringsnr:	P1503-046
Beställare:	Peab Anläggning AB

Entreprenör: Peab Anläggning AB Utförd av: Per Ljungqvist Material: Terrass

	Först	ta bel	astni	ng						Andr	a bela	astnir	g			
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,30	0,58	0,74	0,98	1,26	1,36	1,52	1,46	1,28	1,02	1,22	1,36	1,50	1,64	1,78	1,90



		1:a belastning	2:a belastning
a	mm	0,091	1,021
a ₁	mm/(MN/m ²)	2,783	2,147
a ₂	mm/(MN/m ²)	0,151	-0,526

	Resultat	
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1
78,7	119,4	1,52



Provningsresultat, statisk plattbelastning Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:

Provningsdatum: 2015-03-19 Provningsplats: Punkt 1 Registreringsnr: P1503-047 Beställare: Peab Anläggning AB Entreprenör: Peab Anläggning AB Utförd av: Material:

Per Ljungqvist Terrass

	Först	ta bel	astni	ng						Andr	a bela	astnir	ng			
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,82	1,98	2,88	3,72	4,36	4,68	5,06	4,92	4,66	4,04	4,28	4,50	4,68	4,86	5,04	5,20



		1:a belastning	2:a belastning
a ₀	mm	-0,389	4,031
a ₁	mm/(MN/m ²)	16,296	2,931
a ₂	mm/(MN/m ²)	-10,957	-0,873

		Resultat	
Ev	₁(MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1
	20,8	90,2	4,34



Provningsresultat, statisk plattbelastning Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:

Objekt:		Entreprenör:	Peab Anläggning AB
		Utförd av:	Per Ljungqvist
Provningsdatum:	2015-03-19	Material:	Terrass
Provningsplats:	Punkt 2		
Registreringsnr:	P1503-048		
Beställare:	Peab Anläggning AB		

	Första belastning					Andra belastning					
Normalspänning, (MN/m ²)	0,06	0,12	0,18	0,24	0,12	0,06	0,01	0,06	0,12	0,18	0,22
Sättning, (mm)	1,06	2,52	3,80	5,04	4,92	4,74	4,22	4,58	4,80	5,02	5,22



		1:a belastning	2:a belastning
ao	mm	-0,475	4,187
a ₁	mm/(MN/m ²)	26,617	6,041
a ₂	mm/(MN/m ²)	-15,278	-6,662

Resultat								
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1						
9,8	50,7	5,17						



Provningsresultat, statisk plattbelastning

Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:		Entreprenör: Utförd av:	Peab Anläggning AB Per Ljungqvist
Provningsdatum:	2013-05-31	Material:	Terrass
Provningsplats:	Punkt 1		
Registreringsnr:	P1305-038		
Beställare:	Peab Anläggning AB		

	Först	örsta belastning						Andra belastning								
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,40	0,86	1,30	1,66	2,02	2,28	2,46	2,30	2,10	1,54	1,76	1,94	2,10	2,22	2,40	2,48



		1:a belastning	2:a belastning
ao	mm	-0,072	1,533
a ₁	mm/(MN/m ²)	6,150	2,670
a ₂	mm/(MN/m ²)	-2,162	-1,298

Resultat								
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1						
44,4	111,3	2,51						



Provningsresultat, statisk plattbelastning Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:

Objekt:		Entreprenör: Utförd av:	Peab Anläggning AB Per Ljungqvist
Provningsdatum:	2013-05-31	Material:	Terrass
Provningsplats:	Punkt 2		
Registreringsnr:	P1305-039		
Beställare:	Peab Anläggning AB		

	Först	örsta belastning						Andra belastning								
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,40	1,04	1,66	2,32	2,90	3,06	3,54	3,42	3,22	2,60	2,80	2,96	3,12	3,28	3,44	3,56



		1:a belastning	2:a belastning
ao	mm	-0,310	2,594
a ₁	mm/(MN/m ²)	8,967	2,325
a ₂	mm/(MN/m ²)	-2,717	-0,459

Resultat								
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1						
29,6	107,4	3,63						



Provningsresultat, statisk plattbelastning Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

Objekt:		Entreprenör:	Peab Anläggning AB
		Utförd av:	Per Ljungqvist
Provningsdatum:	2013-06-26	Material:	Terrass
Provningsplats:	Rondell Nydala, punkt 1 ommätning	1	
Registreringsnr:	P1306-078		
Beställare:	Peab Anläggning AB		

	Först	örsta belastning							Andra belastning							
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,78	1,46	2,08	2,80	3,44	3,96	4,06	3,82	3,40	2,18	2,70	3,08	3,40	3,66	3,90	4,06



		1:a belastning	2:a belastning
ao	mm	0,012	2,161
a ₁	mm/(MN/m ²)	9,440	6,422
a ₂	mm/(MN/m ²)	-2,235	-5,058

Resultat										
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1								
27,0	57,8	2,14								



Provningsresultat, statisk plattbelastning Enligt Vägverkets metodbeskrivning 606:1993

 Objekt:
 Entreprenör: Utförd av:
 Peab Anläggning AB

 Provningsdatum:
 2013-06-26
 Material:
 Terrass

 Provningsplats:
 Rondell Nydala, punkt 2 ommätning
 Terrass

 Registreringsnr:
 P1306-079
 Peab Anläggning AB

	Först	örsta belastning						Andra belastning								
Normalspänning, (MN/m ²)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45	0,50	0,25	0,12	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,45
Sättning, (mm)	0,52	1,04	1,42	1,80	2,08	2,34	2,56	2,44	2,16	1,40	1,66	1,92	2,12	2,34	2,50	2,62



		1:a belastning	2:a belastning
a ₀	mm	0,071	1,372
a ₁	mm/(MN/m ²)	6,191	3,664
a ₂	mm/(MN/m ²)	-2,548	-2,031

Resultat										
Ev ₁ (MPa)	Ev ₂ (MPa)	Ev2/Ev1								
45,8	84,9	1,86								

	-						_			
Leveranti	ör 🛛		-							Λ
Provtaga	re	Lars A	lm							
Rapport i	d	20120	662				w I			
Projekt						-	_			
Objekt		20120	920							
Lager		Terras	s			PrintLogga	.bmp 270x	80 SPL	Logger prin	tout ver. 0.3
Sektion/s	ida	1					Stat	isk		
Mätpunkt	long-lat	;					Plat	thelastr	ninasmä	itning
Rutnät							i iai	ibelasti	ingsine	uning
Mätpunkt	N;Ö	0.0;0.0)							
Platdiam	eter	300						506:199	3	
Jordart								1		
CMV						Rappo	ort id	20120	662	
Plattfyllna	d	Sand								
Vattenhal	t	Torr				Datum/tio	l start	2012-09-	20 09:09:4	47
Motvikt						Datum/tic	l klart	2012-09-	20 09:26:	19
Väderlek		Halvkl	art							
Väderlek	igår									
Tempera	tur	ca 15	grader							
Luftfuktio	het	-								
Vind						Utskriftsd	latum	2012-09-	20 14:58:0)2
Leet	Chitaina	4.144	Tidounit	0-1		1				
(MN/m2)	(mm)	as/at (mm/min)	hh:mm:ss	, in the second s						
0.019	0.00	0.000	00-10-20	-0,5-			_			
0.040	0,00	0,000	09:12:31							
0.093	1.55	0,000	00:12:37	-1-						
0,000	2.47	0,000	09:13:55	-1,5-			_			
0.162	3,60	0,000	09:14:55							
0,102	4 07	0,000	00-15-45	-2-						
0,200	5.56	0,000	09:16:17	-2.5-						
0.249	6.40	0,000	09:16:47	-,-						
0.124	6.18	0,000	09:18:59	ε -3-						
0.055	5.71	0,000	00:20:11	- <u></u>						
0,000	4 33	3 160	00:22:34	- <u>-</u> 3,5-				k		
0.051	4.92	0.000	09:24:48	S -4-					\leftarrow	
0,000	5 31	0,000	09:25:01							
0.125	5.64	0,000	09:25:15	-4,5-	\sim		1			
0 164	6.03	0,000	09:25:35	-5-					X	
0 202	6.40	0,000	09:25:53	-						<hr/>
0.202	6.73	0,000	09:26:19	-5,5-		\mathbf{N}	~			4
0,220	0,10	0,000	00.20.10	-						
<u> </u>				-6-			\ •			
<u> </u>				-6,5-			+		-	
1		r.		-						•
				-7-) (,05	0,1	0,15	0,2	0,25
							Last (MI	V/m2)		
Last	Sigma1max	a0	a1	a2		Ev	Ev2/Ev1			
nr.	(MN/m ²)	(mm)	[mm/(MN/m ²)]	[mm/(MN/r	m²)²] [M	IN/m²]				
1 🗆	0,249	-0,141	18,260	33,83	4	8,4				
2 🔵	0,225	4,496	8,198	7,098	3 3	22,6	2,68			
ver. 5-43										

Loverenti	ār.	1							_	
Drouteger	01 F0	1000	las							
Provtagal		Lars A	ulli leeo							
Rapport	d	20120	662							
Projekt									_	
Objekt		20120	1920			Printl on	aa hmn 270v	90 591	Logger priz	tout ver. 0.3
Lager		Terras	38			PrintLog	ga.omp 270x	au ort	Logger pri	itout ver. 0.5
Sektion/s	ida	2					Stat	isk		
Mätpunkt	long-lat	;					Plat	tbelasti	ningsmä	itning
Rutnät										
Mätpunkt	N;O	0.0;0.0)				100	COC-100	22	
Platdiam	eter	300					VV	000.19	90	
Jordart						Dann	ort id	20420	0000	1
CMV						Карр		20120	2002	
Plattfylina	ad	Sand								
Vattenhal	t	Torr				Datum/	tid start	2012-09	-20 10:07:5	59
Motvikt						Datum/	tid klart	2012-09	-20 10:23:0	09
Väderlek		Halvkl	art							
Väderlek	igår									
Tempera	tur	ca 15	grader							
Luftfuktig	het	-								
Vind						Utskrift	sdatum	2012-09	-20 15:00:0	00
Last	Sättning	ds/dt	Tidpunkt	0						•
(MN/m2)	(mm)	(mm/min)	hh:mm:ss	0.5-						
0,017	0,00	0,330	10:08:34	-0,5						
0,045	0,56	0,000	10:10:42	-1-		<u> </u>				
0,083	1,08	0,000	10:11:05			7				
0,124	2,10	0,000	10:11:27	-1,5-						
0,161	3,25	0,000	10:12:15				\backslash			
0,199	4,36	0,000	10:13:03	-2-			प			
0,221	4,95	0,000	10:13:30	-2,5-						
0,252	6,25	0,000	10:14:29							
0,124	5,93	0,000	10:15:55	-3-						
0,057	5,40	0,000	10:17:03	bulu				^		
0,004	4,09	0,000	10:19:26	\$ -3,5-						
0,050	4,82	0,000	10:21:31	-4-				$\langle \rangle$		
0,092	5,16	0,000	10:21:47							
0,131	5,54	0,000	10:21:59	-4,5	\rightarrow					
0,109	5,66	0,000	10:22:39							
0,202	6.50	0,000	10.22.01	-5-					7	
0,220	0,50	0,000	10.23.09							
<u> </u>				-5,5						
<u> </u>				-6-			~	×	\sim	
L		-								
				-6,5- 0	0,0	IS 0,	,1 0,1 Last (Mi	5 0, N/m2)	2 0,2	5 0,3
Last	Sigma1max	a0	a1	a2		Ev	Ev2/Ev1			
nr.	(MN/m ²)	(mm)	[mm/(MN/m ²)]	[mm/(MN/m ²) ²	1 0	4N/m²]				
10	0,252	-0,131	11,461	54,566		8,9				
2 🔵	0,226	4,448	7,009	8,834		24,4	2,73			
								_		
ver. 5-43										