

Thesis 320

Dimensionering av tillfälliga vägar

En modellansats

Filippa Höög

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Copyright © Filippa Höög

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5287)/1-90/2018
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2018

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5287)/1-90/2018

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 320

ISSN 1653-1922

Author: Filippa Höög
Title: Dimensionering av tillfälliga vägar - en modellansats
English title: Designing of temporary roads – a model attempt
Language: Svenska
Year: 2018
Keywords: Dimensionering; Tillfälliga vägar; Tillfällig; Grusöverbyggnad; Grusväg; Spårdjup
Citation: Filippa Höög, Dimensionering av tillfälliga vägar - en modellansats. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2018. Thesis. 320

Pavements in Sweden today are often designed to have a life span of at least 20 years. This means that pavements are designed to endure all seasons for 20 years: 20 winters, 20 spring thaws, 20 summers and so on. For those occasions where a life span less than 20 years is requested, there is no standardized method to use today. Designing is instead usually done either by scaling down the results from a 20-year-life span-design or by re-using design solutions from other projects. However, the use of these kinds of methods does not ensure that best possible designing is made.

The aim of this thesis is therefore to investigate whether or not the designing of temporary gravel roads can be done in a more sophisticated way. A way better adjusted after the conditions the road will actually experience during its life time.

The results show that it is possible to develop a model for temporary gravel roads that predicts the rutting. A model that furthermore can be used for designing the road.

The results indicate that often too strong pavements are being used for temporary roads today. The thesis model does however show some inconsistencies with theory. Because of this, further work with the model and the study of temporary road design is needed.

Trafik och väg
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola, LTH
Lunds Universitet
Box 118, 221 00 LUND

Transport and Roads
Department of Technology and Society
Faculty of Engineering, LTH
Lund University
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Innehåll

Förord

Sammanfattning

Summary

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	3
1.3	Avgränsning	4
1.4	Rapportens disposition	4
2	Metod	5
3	Litteraturstudie	6
3.1	Väggkroppens uppbyggnad	6
3.2	Överbyggnaden	7
3.2.1	Flexibel överbyggnad	7
3.2.2	Styv överbyggnad	8
3.2.3	Kompositöverbyggnad	9
3.3	Nedbrytning av vägen	9
3.3.1	Bärighet	9
3.3.2	Strukturellt slitage	10
3.3.3	Ytligt slitage	13
3.4	Dimensionering av överbyggnader	14
3.4.1	Historia	14
3.4.2	Spännings- och töjningsberäkning	15
3.4.3	I Sverige idag	15
3.5	Regressionsanalys	23
4	Framtagande av modell	26
4.1	Val av nedbrytningsmått	26
4.2	Val av parametrar	26

4.2.1	Struktur	27
4.2.2	Trafik	27
4.2.3	Klimat	28
4.3	Parametrarnas påverkan på deformationen	29
4.3.1	Metod	29
4.3.2	Resultat för dumper	46
4.3.3	Resultat för lastbil	46
4.4	Samband mellan parametrar och deformation	47
4.4.1	Metod	47
4.4.2	Resultat för dumper	47
4.4.3	Resultat för lastbil	49
5	Digitalt verktyg	51
6	Jämförelse med andra modeller	52
6.1	Skogsstyrelsen	52
6.2	Trafikverket	54
7	Diskussion och slutsatser	57
7.1	Resultatdiskussion	57
7.2	Metoddiskussion	61
7.3	Slutsatser	62
7.3.1	Förslag på fortsatt arbete	65
	Referenser	66
	Bilaga 1 – Fullständiga spårdjupsberäkningar dumper	
	Bilaga 2 – Fullständiga spårdjupsberäkningar lastbil	

Förord

Detta examensarbete har genomförts i samarbete med Skanska Sverige AB under våren och sommaren 2018 som det slutliga momentet på civilingenjörsutbildningen inom väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Sven Agardh på LTH för hjälp och engagemang under arbetets gång. Vidare vill jag även tacka min handledare Roger Nilsson på Skanska Sverige AB för värdefull kunskap och utvecklande idéer.

Lund, augusti 2018

Filippa Höög

Sammanfattning

Nya vägöverbyggnader i Sverige idag dimensioneras ofta till att ha en livslängd på minst 20 år. Detta innebär bland annat att överbyggnader dimensioneras för att klara alla årets årstider under 20 år: 20 vintrar, 20 tjällossningar, 20 somrar och så vidare. För de tillfällen då en livslängd under 20 år efterfrågas finns det idag ingen standardiserad dimensioneringsmetod. Projektering sker främst genom att antingen resultat från en 20-årsdimensionering skalas ner eller genom att dimensioneringslösningar från tidigare projekt återanvänds. Att använda sig av dessa tillvägagångssätt innebär dock inte alltid en optimal dimensionering.

Syftet med examensarbetet är därför att undersöka om dimensioneringen av tillfälliga vägar med grusöverbyggnad kan göras mer förfinad och bättre anpassad för de förhållanden som faktiskt kommer råda under vägens livstid.

Arbetets övergripande metod är enligt nedan:

1. Litteraturstudie
2. Framtagande av metod
3. Digitalt verktyg
4. Jämförelse med andra modeller
5. Diskussion och slutsatser

Där modellframtagandets metod är enligt:

1. Beslut om vilken typ av deformation modellen ska avse
2. Identifiering av vilka parametrar modellen ska beakta
3. Hitta hur parametrarna tillsammans varierar med den valda deformationen
4. Presentation av samband mellan parametrar och deformation = modell

Resultaten visar att det går att ta fram en modell som beräknar spårdjupet för tillfälliga vägar, vilket alltså kan användas för att dimensionera tillfälliga vägar. I modellen är följande indata:

- Lagertjocklek bärlager
- Lagertjocklek förstärkningslager
- ÅDT/körfält
- Antal dagar sommar
- Antal dagar vinter
- Antal dagar tjällossning

-
- Fordonstyp

Vid jämförelse med andra modeller visar resultaten indikationer på att visst överdimensionerande görs idag. Dock visar resultaten även på vissa inkonsekvenser mellan den framtagna modellen och teorin. Med anledning av detta föreslås bland annat fortsatt arbete med modellen och med arbetet om dimensionering av tillfälliga vägar.

Summary

Pavements in Sweden today are often designed to have a life span of at least 20 years. This means that pavements are designed to endure all seasons for 20 years: 20 winters, 20 spring thaws, 20 summers and so on. For those occasions where a life span less than 20 years is requested, there is no standardized method to use today. Designing is instead usually done either by scaling down the results from a 20-year-life span-design or by re-using design solutions from other projects. However, the use of these kinds of methods does not ensure that best possible designing is made.

The aim of this thesis is therefore to investigate whether or not the designing of temporary gravel roads can be done in a more sophisticated way. A way better adjusted after the conditions the road will actually experience during its life time.

The overall method of the work is as below:

6. Literature study
7. Development of the model
8. Digital tool
9. Comparison to other models
10. Discussion and conclusions

Where the method for the developing can be described as:

5. Decision on what type of deformation to considerate
6. Identification of relevant parameters
7. Find how the parameters vary with the chosen deformation
8. Presentation of relationship between parameters and deformation = model

The results show that it is possible to develop a model for temporary gravel roads that predicts the rutting. A model that furthermore can be used for designing the road. The following is used as input to the model:

- Thickness base course
- Thickness subbase
- AADT/lane
- Days of summer
- Days if winter
- Days of spring thaw

-
- Type of vehicle

The results indicate that often too strong pavements are being used for temporary roads today. The thesis model does however show some inconsistencies with theory. Because of this, further work with the model and the study of temporary road design is needed.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sveriges vägnät består av ca 600 000 km väg som brukar delas in i allmänna och enskilda vägar (Tabell 1; Trafikverket (2017)). Allmänna vägar är samlingsnamnet för de statliga och kommunala vägarna och de enskilda vägarna fungerar som ett viktigt komplement till de allmänna vägarna, för att framkomlighet och tillgänglighet ska kunna uppnås i hela landet (Trafikverket, 2018a). Drygt hälften av de enskilda vägarna är skogsbilvägar till exempel (Skogskunskap, 2016a). Staten och kommunerna ansvarar för de allmänna vägarna och en vägförening, vägsamfällighet eller motsvarande ansvarar vanligtvis för de enskilda vägarna. Hur Sveriges vägnät är fördelat utifrån denna indelning visas i Tabell 1. Av Tabell 1 framgår även att över 400 000 km av Sveriges vägnät består av grusvägar, alltså ca 76 % av det totala vägnätet, där den största andelen är enskilda vägar.

Tabell 1. Sveriges vägnät

	Total längd (km)	Varav grus (km)
Statliga vägar	98 500 ¹	20 000 ²
Kommunala vägar	42 300 ¹	1 200 ²
Enskilda vägar med statsbidrag	74 700 ³	63 800 ⁴
Enskilda vägar utan statsbidrag	391 300 ³	377 700 ⁴
Totalt	606 800	462 700

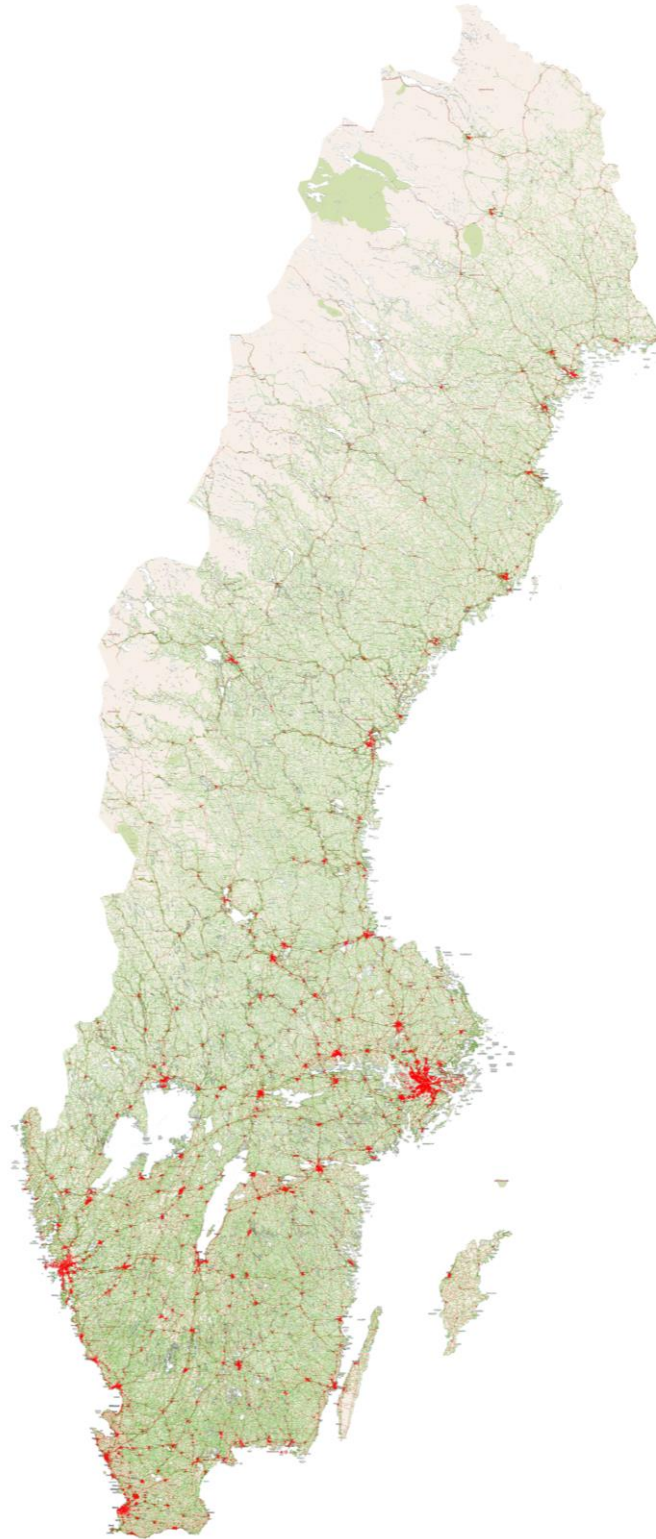
För vidare visualisering av hur stor andel av det svenska vägnätet som består av grusvägar respektive belagda vägar, se Figur 1. Figuren är baserad på kartmaterial från den nationella vägdatabasen (NVDB) och visar grusvägar i grönt och belagda vägar i rött.

¹ Källa: (Trafikverket, 2017)

² Källa: (Edvardsson, 2015)

³ Data uttaget ur NVDB 2018-01-29 av Anne-Lie Ericsson (nationell planerare, Trafikverket). E-post 2018-02-06.

⁴ Data uttaget ur NVDB 2018-01-29 av Anne-Lie Ericsson (nationell planerare, Trafikverket). E-post 2018-02-07.



Figur 1. Grusvägar (grönt) och belagda vägar (rött) i Sverige (Trafikverket, 2018b)

Förutom den stora mängden grusvägar i form av främst enskilda vägar, finns även grusvägar som inte täcks in i ovanstående statistik. Bland annat så byggs grusvägar i samband med olika typer av anläggningsprojekt, exempelvis vägprojekt. Dessa vägar kan vara helt interna, där bara byggtrafik är tänkt att färdas, men de kan också vara mer externa och fungera som omledningsvägar där alltså även allmän trafik är tänkt att färdas.

Många grusvägar är av en mer permanent form, skogsbilvägar till exempel, men det finns också tillfällen då grusvägar är tänkta att vara mer tillfälliga. Exempelvis ovan nämnda fall: interna byggvägar eller omledningsvägar i samband med anläggningsprojekt liknande vägprojekt.

Nya vägöverbyggnader i Sverige idag dimensioneras ofta till att ha en livslängd på minst 20 år (Agardh & Parhamifar, 2014). Detta innebär bland annat att överbyggnader dimensioneras för att klara alla årets årstider under 20 år: 20 vintrar, 20 tjällossningar, 20 somrar och så vidare. För de tillfällen då en livslängd under 20 år efterfrågas finns det idag ingen standardiserad dimensioneringsmetod⁵. Det misstänks istället att projektering främst sker genom att resultat från en 20-årsdimensionering skalas ner, men det misstänks även att dimensioneringslösningar från tidigare projekt återanvänds i nya projekt.

Att använda sig av dessa tillvägagångssätt innebär dock inte alltid en optimal dimensionering. Nedskalning av en 20-årsdimensionering kan exempelvis innebära att en viss andel tjällossning inkluderas i dimensioneringen, trots att vägen endast ska ligga en sommar – något som antyder att vägen kan bli överdimensionerad. På samma sätt kan erfarenhetsbaserad dimensionering leda till både under- och överdimensionering då förhållandena troligtvis inte är desamma som för referensprojektet.

Att optimera tjockleken på överbyggnader kan således ha flera fördelar. Bland annat kan ett minskat överdimensionerande minska användandet av naturens resurser (i form av exempelvis krossmaterial) och minska den belastning på miljön som ett vägbygge kan innebära. Att förebygga underdimensionerande skulle vidare kunna innebära att extra kostnader för framtida underhållsåtgärder hölls nere.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka om dimensioneringen av tillfälliga vägar med grusöverbyggnad kan göras mer förfinad och bättre anpassad för de förhållanden som faktiskt kommer råda under vägens livstid. Målet med arbetet är därför att utarbeta en dimensioneringsmodell, specifikt anpassad för denna typ av vägar. Till detta är vidare ett mål att modellen med lätthet ska kunna användas i fält på projekt, på ett sätt som gör användaren medveten om vad som ligger bakom de resultat modellen producerar.

Som stöd i arbetet är följande forskningsfrågor framtagna:

- Hur sker dimensioneringen av tillfälliga vägar idag?
- Går det att ta fram en dimensioneringsmodell specifikt anpassad för vägar med korta livslängder?

⁵ Sven Agardh, universitetslektor PhD, institutionen Trafik och väg (Lunds tekniska högskola), muntligt samtal 2017-10-09

-
- Vilka parametrar bör dimensioneringen av en väg som ska ligga en begränsad tid ta hänsyn till?
 - Hur påverkar de olika parametrarna den slutgiltiga dimensioneringen?
 - Kan skillnad ses på en väggkropp dimensionerad enligt någon av dagens metoder jämfört med en väggkropp dimensionerad enligt den anpassade modellen? I så fall, vilka skillnader?

1.3 Avgränsning

Litteraturstudien innefattar både belagda och icke-belagda vägar, för att ge läsaren en helhetsbild av ämnet. Den metod som arbetats fram fokuserar på vägar med grusöverbyggnad.

Den modell som är framtagen gäller främst lågtrafikerade vägar som belastas med tyngre fordon.

Arbetet fokuserar på vägbyggnad i Sverige. Detta innebär att endast nuvarande dimensioneringsmetoder i Sverige studeras i litteraturstudien och att den modell som är framtagen främst är anpassad för svenska förhållanden

1.4 Rapportens disposition

Rapporten är indelad i fyra delstycken som överensstämmer arbetets delstap:er:

- Litteraturstudie

Utgångsläge etableras och bakgrundsfakta presenteras.

- Framtagande av modell

Utarbetning av dimensioneringsmodell: beskrivning av processen och resultat

- Digitalt verktyg

Utförning av digitalt verktyg: beskrivning av framtagningsprocessen och hur verktyget fungerar

- Jämförelse med andra modeller

Den framtagna modellens resultat jämförs med andra, idag existerande, modellers resultat.

- Diskussion och slutsatser

Diskussion kring viktiga resultat och övergripande slutsatser om arbetet.

2 Metod

För att forskningsfrågorna ska kunna besvaras och de uppsatta målen ska kunna uppnås är följande moment identifierade som delstap:er:

1. Litteraturstudie
2. Framtagande av modell
3. Digitalt verktyg
4. Jämförelse med andra modeller
5. Diskussion och slutsatser

Litteraturstudien kartlägger dagens kunskap inom området. Studien omfattar dagens tillvägsgångssätt och bakomliggande beräkningsmodeller för väggroppar både med och utan asfaltslager.

Utifrån litteraturstudien påbörjas ett arbete med modellframtagning. Utarbetning av modellen sker teoretiskt, i samråd med handledare och övriga branschinsatta och grundar sig på existerande dimensioneringsmetoder och kunskaper. Modellframtagandet sker i följande fyra steg:

1. Beslut om vilken typ av deformation modellen ska avse
2. Identifiering av vilka parametrar modellen ska beakta
3. Hitta hur parametrarna tillsammans varierar med den valda deformationen
4. Presentation av samband mellan parametrar och deformation = modell

Till modellen tas även ett lättanvänt, mindre och digitalt program fram.

Den framtagna modellens resultat jämförs vidare med resultat från modeller som används idag.

Examensarbetets sista del analyserar, sammanfattar och diskuterar de resultat som kommit fram under arbetets gång.

3 Litteraturstudie

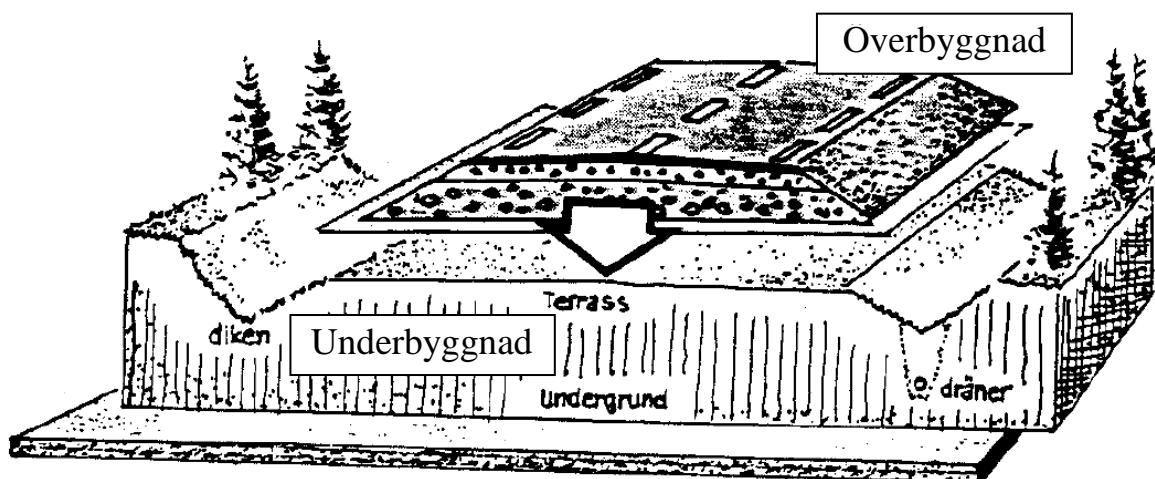
3.1 Vägkroppens uppbyggnad

Vid anläggandet av en väg är något av det första som sker en grov utjämning av befintlig mark – terrassering. I vissa fall rör sig om bortschaktande av material, där vägen går i skärning, och i vissa fall behöver material fyllas på, där vägen går i bank. När material behövs fyllas på till terrassnivå kallas denna utfyllnad underbyggnad (se Figur 2). Begreppet underbyggnad finns dock även när vägen går i skärning och avser då nivån mellan terrass och dikesbotten (Granhage, 2009).

Ovanpå terrassen kan ett materialskiljande lager placeras, exempelvis en fiberduk, om terrasmaterialet är finkornigt och det finns risk för att det blandar sig med överliggande lager. Risk finns annars för att formförändringar och bärighetsnedsättningar uppstår (Granhage, 2009).

På det eventuella materialavskiljande lagret anläggs vidare överbyggnaden (se Figur 2), som har tre huvuduppgifter (Agardh & Parhamifar, 2014):

- Transportera bort vatten från vägyta och vägkropp
- Motstå belastningar från trafiken utan att stora deformationer uppstår i vägkroppen och sprida lasten till underbyggnaden
- Erbjuder en jämn yta i längs- och tvärled



Figur 2. Vägkroppens olika delar (Granhage, 2009)

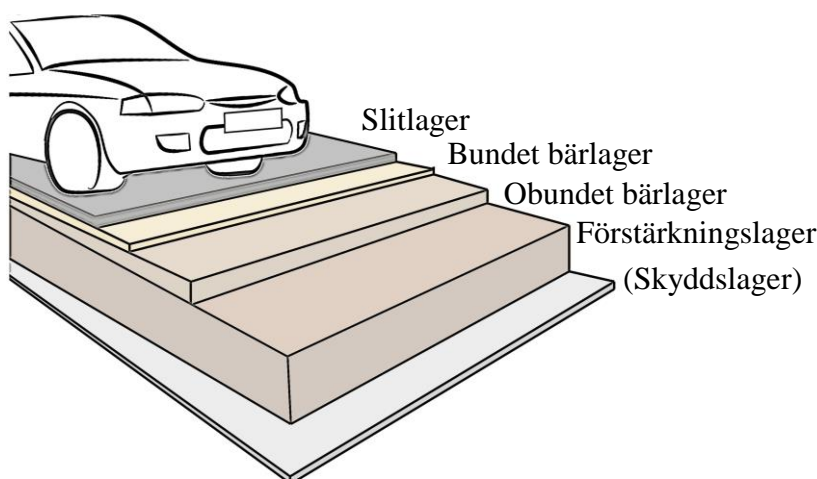
3.2 Överbyggnaden

En överbyggnad kan utformas på en rad olika sätt, men övergripande ses följande huvudgrupper: flexibel överbyggnad, styv överbyggnad och kompositöverbyggnad (Huang, 2004).

Gemensamt för alla överbyggnadstyper är att vatten i de obundna lagren är skadligt, se avsnitt Nedbrytning av vägen 3.3. Med anledning av detta ställer Trafikverket kravet att överbyggnaderna ska konstrueras så att vatten kan dräneras bort och att de inte får innehålla några tjällyftande material (Trafikverket, 2011).

3.2.1 Flexibel överbyggnad

En flexibel överbyggnad består oftast av ett bärande lager av asfaltgrus (AG) och olika grusmaterial (Agardh & Parhamifar, 2014). Så gör även Sveriges vanligaste överbyggnad, grusbitumenöverbyggnaden (GBÖ). Denna överbyggnadstyp består uppifrån och ner av: slitlager, bundet bärlager, obundet bärlager, förstärkningslager och eventuellt ett skyddslager (Agardh & Parhamifar, 2014)(se Figur 3).



Figur 3. Lagerföljd GBÖ (baserad på Folkbro (u.å.))

De olika lagren i överbyggnaden har olika funktioner:

Slitlager

Har som viktigaste funktion att ge körbanan sådana egenskaper att rimliga krav på trafiksäkerhet, transportekonomi och komfort tillfredsställs (Agardh & Parhamifar, 2014).

Bundet bärlager

Verkar främst för att fördela trafikens belastningar så att inte för stora deformationer eller påkänningar uppstår i underliggande lager (Agardh & Parhamifar, 2014).

Obundet bärlager

Har likt det bundna bärlagret till uppgift att fördela trafikens belastningar till underliggande lager. Materialet i detta lager ska ha sådana egenskaper att överbyggnadens hållfasthet behålls under hela den tekniska livslängden (Agardh & Parhamifar, 2014). Då materialet i

detta lager är spänningsberoende är det vidare viktigt att detta lager packas (Agardh & Parhamifar, 2014).

Förstärkningslager

Ska fördela lasterna från det obundna bärlagret ner i undergrunden. Detta lager har också till uppgift att fungera som dräneringslager om det finns risk för vatteninträngning i överbygganden och leda ut vattnet till vägens avvattningssystem (Agardh & Parhamifar, 2014). Detta lager ska liksom det bundna bärlagret också packas.

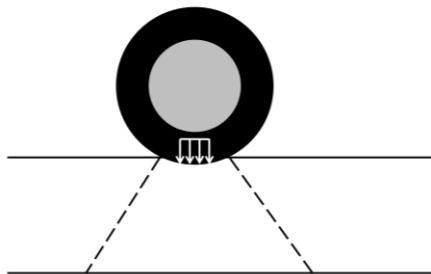
Skyddslager

Används inte alltid, men kan användas av främst två anledningar (Agardh & Parhamifar, 2014):

- För att minska tjällyftningar om det är tjälfarligt material i undergrunden och köldmängden är stor
- För att förhindra att finkornigt material i undergrunden tränger upp i förstärkningslagret, om vägen byggs på sådan undergrund

En flexibel överbyggnad kan också bestå av enbart obundna lager (Trafikverket, 2011), vilket till exempel en grusväg gör. Grusvägar är i princip utformade på samma sätt som en GBÖ, men utan ett bundet bärlager och med ett slitlager i grus istället för asfaltbetong (Agardh & Parhamifar, 2014).

När trafikbelastning sker på en flexibel överbyggnad uppstår en mindre deformation lokalt, medan lasten fördelas ned i konstruktionen (Mamlouk, 2006). Lasten fördelas på en mindre yta högre upp i konstruktionen och på en större yta lägre ned i konstruktionen (Mamlouk, 2006), se illustration i Figur 4.



Figur 4. Lastfördelning flexibel överbyggnad

Lastfördelningens utseende innebär att den största spänningen ses i den övre delen av överbyggnaden och att spänningen sjunker när djupet ökar (Mamlouk, 2006). Detta innebär vidare att det är viktigt att ha material med bra bärighet högst upp i överbyggnaden och att bärighetskraven på materialen är lägre längre ner i konstruktionen (Mamlouk, 2006).

3.2.2 Styv överbyggnad

I Sverige används vanligen tre olika överbyggnader, varav en är styv: cementbitumenöverbyggnad (CBÖ) (Agardh & Parhamifar, 2014). En annan styv överbyggnad som också används är betongöverbyggnad (BÖ) (Agardh & Parhamifar, 2014). CBÖ är uppbyggd med samma femlagermodell som GBÖ, men slitlagret är av betong

istället för asfaltbetong. Detta lager är också det viktigaste lastfördelande lagret i styva överbyggnader (Agardh & Parhamifar, 2014) då styvheten möjliggör plattverkan (eng: rigid slab action) i konstruktionen.

I The Handbook of Highway Engineering (2006) beskriver Wei och Fwa närmare hur lastfördelning hos styva överbyggnader sker, och jämför med den hos flexibla överbyggnader. Wei och Fwa beskriver att flexibla överbyggnader designas för att med tillräcklig tjocklek fördela aktuell last, medan styva överbyggnader förlitar sig på plattverkan (eng: rigid slab action) för att sprida lasten över ett större område.

3.2.3 Kompositöverbyggnad

Överbyggnadstypen kallas även till exempel halvstyv (Agardh & Parhamifar, 2014) eller halvflexibel (Kandiel, 2017) och syftar på en överbyggnad som innehåller både asfaltbetong och betong (Huang, 2004).

3.3 Nedbrytning av vägen

Från det att vägen är färdigbyggd startar dess nedbrytning. Till skillnad från många andra konstruktioner går nämligen en väg inte till brott på ett tydligt sätt, utan bryts sakta ned och tillståndet förändras med tiden (Agardh & Parhamifar, 2014).

3.3.1 Bärighet

Enligt Agardh & Parhamifar (2014) kan begreppet bärighet sammanfattas till att vara ett sätt att beskriva vägens förmåga att bära tung trafik. Vidare definition av begreppet kan dock variera, men en som vanligtvis används i Sverige är Trafikverkets: högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor och deformationer (Trafikverket, 2011).

I Sverige sker en indelning av det allmänna vägnätet med avseende på bärighet med hjälp av fyra bärighetsklasser. Varje klass innebär bland annat krav på maximal tillåten bruttovikt, vilka visas i Tabell 2. I Tabell 2 syns även att höjningar skett av de maximala bruttovikterna de senaste åren. År 2015 höjdes den maximalt tillåtna bruttovikten på BK1-vägar från 60 till 64 ton (Transportstyrelsen, 2015) och år 2017 etablerades en helt ny bärighetsklass. En bärighetsklass som innebär en maximal tillåten bruttovikt på 74 ton (Näringsdepartementet, 2017).

Tabell 2. Bärighetsklasser, maximal tillåten bruttovikt i ton (Transportstyrelsen, 2015); (Transportstyrelsen, 2017); (Näringsdepartementet, 2017)

Bärighetsklass	Före 2015	2015-2017	2017-
1	60	64	64
2	51,4	51,4	51,4
3	37	37	37
4	-	-	74

Bärighet kan också mätas upp på olika sätt. Ett sätt att beskriva bärigheten är att mäta den deformation som uppstår i väggkroppen under känd last. Deformationen som uppstår kan då användas som ett bärighetsmått (Agardh & Parhamifar, 2014). För vidare läsning om metoder och mått för att beskriva bärigheten hänvisas läsaren till exempelvis Ezzadin (2015).

3.3.2 Strukturellt slitage

Det strukturella tillståndet beskriver vägens förmåga att stå emot en försämring till följd av trafikens och klimatets påverkan (Agardh & Parhamifar, 2014). För lågtrafikerade vägar är det strukturella tillståndet den viktigaste faktorn för vilken tillgänglighet vägen har (Edvardsson, 2013). Det som bidrar till det strukturella slitaget är trafiken och klimatet var för sig, men faktorerna kan även samverka (Edvardsson, 2015).

3.3.2.1 Trafikberoende

Strukturella förändringar i väggkroppen kan bland annat ske på grund av bärighetsberoende nedbrytning (Wågberg, 2003). Den bärighetsberoende nedbrytningen orsakas av den tunga trafiken och resulterar i skador i form av spår- och/eller sprickbildning (Wågberg, 2003).

Spårbildningen som uppstår är på grund av att den tunga trafiken orsakar deformationer i väggkroppens obundna lager eller i undergrunden (Wågberg, 2003). Hur stora deformationerna blir avgörs till stor del av hur tjockt asfaltlager vägen har. Ett tjockt asfaltlager minskar påfrestningarna på de obundna lagren vilket ger mindre deformationer och motsatsen gäller vid tunnare asfaltlager (Wågberg, 2003). Det är framförallt de tunga fordonens axellast som avgör hur stora påkänningarna blir, men för vägar med tunnare asfaltlager (även grusvägar (Edvardsson, 2015) spelar även ringtrycket (=däcktrycket (Svenska akademien, 2009)) roll.

Sprickbildningen uppstår till följd av att den tunga trafiken pressar ned asfaltlagret lite vid varje överfart (Wågberg, 2003). Varje nedpressning orsakar en dragtöjning i asfaltlagrets underkant och efter ett visst antal överfarter utmattas asfaltlagret varpå sprickor uppstår i underkant av lagret. Sprickor som växer, söker sig uppåt och till slut blir synliga på ytan (Wågberg, 2003).

3.3.2.2 Klimatberoende

Strukturellt slitage i form av klimatberoende skador uppstår i regel i samband med ojämna tjällyftningar och vid tjällossning (Wågberg, 2003), där den gemensamma nämnaren är *tjäle*.

Tjäle är ett fenomen som uppstår i samband med att lufttemperaturen sjunker under 0°C när en långsam nedfrysning av marken börjar ske från markytan (Berglund, 2009). I samband med denna nedfrysning börjar iskristaller bildas i jorden som vidare växer till plana islinser. Då is har en volym som är ca 9 % större än vattnets kan bildning av islinser leda till tjällyftning (Berglund, 2009). För att tjällyftning ska ske krävs dock att samtliga tre villkor är uppfyllda (Hou, Sterling, & Voller, 2003):

- Temperaturen är sådan att frysning är möjlig
- Tillgängligt vatten finns i jordprofilen.

- Fysiska sammansättningen av jorden är sådan som tillåter kapillär vattentransport, det vill säga att jorden skall ha lämplig permeabilitet (=tjälfarlig jord)

Om det tjälfarliga materialets egenskaper varierar eller om vatteninnehållet varierar så uppstår dessutom ojämna tjällyftningar (Wågberg, 2003). Tjällyftning i en väggropp kan leda till både tjälspäckor och krackelering av ytskiktet med särskilt stor risk om tjällyftningen varit ojämn (Berglund, 2009). Tjällyftning kan vidare innebära att inte bara markytan höjs utan även att större material transporteras uppåt i jorden, som exempelvis stenar och block (Olin, 2016).

En tjälad väggropp kan dock även ge positiva effekter på vägens egenskaper. Bland annat så innebär en frusen väggropp att de obundna lagrens styvhet ökar då isen håller samman partiklarna i dessa lager (Berglund, 2009). Även i de bundna lagren ses en ökad styvhet, till följd av den ökade styveten som bindemedlet får vid låga temperaturer. Även de islinser som bildas i terrassen vid tjälbildning bidrar till en ökad styvhet i väggroppen (Berglund, 2009).

I samband med tjällossning blir temperaturen varmare och islinserna börjar smälta ovanifrån. Samtidigt som underliggande material inte smält kan detta leda till ytuppmjukning (se Figur 5). Fenomenet innebär alltså att vägens övre del har ett överskott av vatten, till följd av att de nedre lagren är frusna och avrinningen därmed är begränsad. Detta fenomen är vanligt vid tjällossning, men också vid kraftigt regn och kan leda till att vägbanan blir gytjig och kan drabbas av lättare spårbildningar (Edvardsson, 2015).



Figur 5. Ytuppmjukning med spårbildning som följd (Skogskunskap, 2016b)

Under tjällossningen blir vidare de obundna lagren i väggroppen övermättade med vatten och bärigheten i vägen minskar (Wågberg, 2003). Detta kan vidare medföra att lastrestriktioner införs för vägen eller att den helt stängs av (Berglund, 2009).

Vatten har stor betydelse för vägens tillstånd och kallas ofta vägens största fiende (Olin, 2016). Några problem relaterade till vatten i väggroppen, vilket kan vara en följd av att vatten blivit stående på vägbanan, se Figur 6, är alltså till exempel tjälskador, men även uppkomsten av slaghål och deformationer (Olin, 2016). Vidare ses även:

- Minskad bärighet i vägen till följd av minskad friktion mellan partiklarna i väggroppen

- Nära upplösning av bitumen
- Upplösning av finmaterial



Figur 6. Stående vatten på vägbanan (Foto: Mats Hannerz)

Med anledning av de problem vatten för med sig är det av yttersta vikt att avvattnings och dränering av väggroppen utformas och underhålls på ett korrekt sätt. *Avvattnings*, för att leda bort vatten från vägytan så att vatten inte tränger ned och dränering (Granhage, 2009). *Dränering*, för att se till att det vatten som finns i marken inte får tillfälle att påverka väggroppen (Granhage, 2009).

Vattnen spås vidare bli en allt större utmaning för vägarna i framtiden. Detta till följd av bland annat stigande temperaturer och ökad nederbörd.

Årsmedelnederbörden i Sverige väntas öka mellan 20-60 % (beroende på scenario) innan seklets slut, jämfört med perioden 1961-1990 (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, 2017). Vidare syns även trender som pekar på högre vintertemperaturer och att dessa lett till större tillrinning, vid jämförelse av perioderna 1961-1990 och 1991-2008 (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, 2017). Även mindre vårflooder har observerats till följd av ett tunnare snötäcke (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, 2017).

Skogskunskap (Skogskunskap, 2016c) menar att kortare, blötare och varmare vintrar sätter stor press på skogsbilvägarna. Till exempel kan fler perioder med temperaturer som skiftar mellan plus och minus leda till att de problem som uppstår i samband med tjällossning blir fler (Skogskunskap, 2016c). Vidare kan perioden med snötäcke minska (Skogskunskap, 2016c), men även alltså tjockleken på snötäcket. Detta leder i sin tur till minskad isolering för vägen och ökad utsatthet för vatten och kyla. Trots att Skogskunskap nämner att denna problematik kommer drabba skogsbilvägar, bedöms även liknande vägar kunna drabbas av motsvarande problematik.

3.3.3 Ytligt slitage

Eftersom grusvägar är ungefär likadant uppbyggda som den vanligaste överbyggnadstypen GBÖ (se avsnitt Flexibel överbyggnad 3.2.1) är de bärighetsmässiga skadorna samma för grusvägar och asfaltvägar (Agardh & Parhamifar, 2014). Däremot skiljer sig ytskadorna åt.

För belagda vägar inträffar framförallt två olika typer av ytligt slitage: nötning från dubbdäck och åldring av beläggnings yta (Wågberg, 2003).

Nötning från dubbdäck är den huvudsakliga orsaken till ytligt slitage på högtrafikerade gator och som det antyds uppstår slitaget till följd av användningen av dubbdäck vintertid (Wågberg, 2003). På vägar som är lägre trafikerade orsakas slitaget istället främst av att beläggnings åldras. Åldrandet sker huvudsakligen genom oxidation och förlust av lättflyktiga beståndsdelar, vilket leder till hårdare och mindre elastiskt bitumen (Wågberg, 2003).

För grusvägar uppstår ytligt slitage vanligtvis för att finmaterialet i slitlagret dammar bort på grund av att dammbindning inte utförts (Edvardsson, 2015). Just vägdammet ställer, förutom problem med att finmaterialet försvinner, även till problem för boende utmed grusvägen, trafikanter och miljön (Olin, 2016).

En annan effekt av att finmaterialet försvinner är att grövre material också slits loss och bildar strängar av löst grus längs vägmitt och vägkant. Brist på finmaterial kan också ge problem i form av korrugering.

Korrugering (tvättbräda, se Figur 7) uppstår om det är för mycket sand i grusslitlagret och för lite finmaterial (Edvardsson, 2015). En anledning till att finmaterialet dammar bort kan, som nämnt, vara bristfällig dammbindning. För mycket sand i grusslitlagret kan däremot uppstå som en följd av trafiken brutit ned gruset i slitlagret till mindre fraktioner (Agardh & Parhamifar, 2014).



Figur 7. Korrugering (tvättbräda) (Foto: Mats Hannerz)

3.4 Dimensionering av överbyggnader

3.4.1 Historia

Överbyggnadsdimensioneringen världen över var fram till 1920-talet rent empiriskt betingad och kopplingen mellan befintlig mark och väggropp var svag: samma tjocklek på väg anlades på platser som hade helt olika markförhållanden (Huang, 2004). I slutet av årtiondet började dock olika former av markklassificeringssystem arbetas fram och framförallt, slutligen kopplas ihop med att olika jordar har olika bärighet. O J Porter utvecklade California Bearing Ratio (CBR)-testet för California Highway Department som ett sätt att studera ett materials bärighet i laboratioemiljö (Nguyen & Abbas, 2015). Testet går ut på att jämföra materialets motstånd med motståndet från en standardsten vid krossning och på så vis erhålla ett CBR-värde, som är kvoten mellan dessa (Nguyen & Abbas, 2015). Ett värde som sedan kopplades ihop till tjockleken på överbyggnaden (Huang, 2004).

I samband med andra världskriget ökade intresset för vägar med god bärighet och CBR-metoden blev av intresse för de amerikanska ingenjörstrupperna. Metoden studerades utförligt av trupperna och kom att bli väldigt populär även efter kriget (Huang, 2004).

Från det sena 1950-talet till det tidiga 1970-talet genomgick dimensioneringen av överbyggander stora förändringar. Exempelvis så genomförde American Association of State Highway Officials (AASHO) under 1950-talet ett fullskaligt vägtest för att utvärdera hur olika axellaster bidrog till en vägs nedbrytning (O'Flaherty & Hughes, 2015). Detta vägtest utmynnade sedan i *AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements*, en skrift som sedan dess genomgått flera uppdateringar och användes i många länder än idag (O'Flaherty & Hughes, 2015).

Förutom påverkan från fullskaliga vägtest förändrades även dimensionering av överbyggnader genom att väggroppens spänningar och töjningar började beaktas (Huang, 2004). Dimensioneringen gick alltså från att tidigare ha varit rent **empirisk** till att bli mer **mekanistiskt-empiriskt**. En av de senaste metoderna som grundar sig på detta är Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) (Pereira & Pais, 2017) metod där överbyggnadens bärighet beräknas baseras på årstid för att ta hänsyn till materialets olika beteenden vid olika klimatförhållanden (Pereira & Pais, 2017).

Under de senaste åren har det även forskats på helt **mekanistiska** (analytiska) metoder (Agardh & Parhamifar, 2014). Med dessa metoder är tanken att de totala påkänningarna under en vägs livslängd beräknas och att dessa sedan inte får överstiga respektive materials hållfasthet i väggroppen (Agardh & Parhamifar, 2014).

Många dimensioneringsmetoder baseras på beräkningar av vägens *livslängd* (Agardh & Parhamifar, 2014), exempelvis i form av hur många standardaxlar vägen håller för. För att detta ska vara möjligt måste vägens tillstånd vid livslängdens slut definieras, vilket kan göras exempelvis genom spårdjup eller mängd sprickor (Agardh & Parhamifar, 2014). Det kan dock finnas sammanhang då den som dimensionerar vägen inte vill använda just de kriterierna (på exempelvis spårdjupet) som dimensioneringsmetoden utgår från. I dessa sammanhang kan det därför vara aktuellt med metoder som istället beräknar vägens *tillstånd*. Dessa metoder är ofta *inkrementella* och tillståndet beräknas för en viss tidsperiod i taget så att nedbrytningen kan följas kontinuerligt (Agardh & Parhamifar, 2014).

3.4.2 Spännings- och töjningsberäkning

Beroende på hur väggroppen modelleras fås olika sätt att beräkna spänningar och töjningar, och resultaten blir olika nära verkligheten. Den teori som är den mest använda idag vid överbyggnadsdimensionering är den *linjärelastiska teorin*. Teorin antar att en kropp återhämtar sig efter avlastning samt att materialet är både homogent och isotopt (lika egenskaper i alla riktningar) (Agardh & Parhamifar, 2014). Enligt denna teori kan förhållandet mellan spänning och töjning uttryckas enligt Hookes lag, se Ekvation 1 (Agardh & Parhamifar, 2014):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Ekv. 1})$$

där

E = styvheten

σ = vertikala spänningen

ϵ = töjningen

Boussinesq utvecklade år 1885 en teori som bygger på just detta (Huang, 2004). Vidare bygger Boussinesqs teori på en homogen, elastisk halvsfär med oändlig area och oändligt djup som belastas av en punktlast (Huang, 2004). Teorin användes före 1943 flitigt vid överbyggnadsdimensionering, men kunde dock inte riktigt representera väggroppens egentliga uppbyggnad med flera lager med olika egenskaper.

Detta kunde däremot den teori som Burmister utvecklade 1943 bättre ta hänsyn till (Huang, 2004). Burmister utvecklade till en början lösningar för ett tvålagarsystem, men förlängde detta sedan till att bli lösningar till ett trelagarsystem (Huang, 2004). Idag kan teorin appliceras på ett system med fler lager än detta, tack vare datorer.

Användning av den linjärelastiska teorin vid överbyggnadsdimensionering har dock sina svagheter. Till exempel så är de obundna materialen i en väggropp för det mesta plastiska egenskaper (Agardh & Parhamifar, 2014), något som de linjärelastiska modellerna inte tar hänsyn till (Nilsson & Huvstig, 2009). Enligt Nilsson och Huvstig (2009) kan man därför istället beräkna den elastiska responsen (spänningar och töjningar) med ett *finit elementprogram*. Dock brukar linjärelastisk multilagerteori föredras framför finita elementmodeller tack vare sin beräkningsmässiga prestationsförmåga vid upprepade användning (Erlingsson & Ahmed, 2013).

Vidare tar linjärelastiska modeller inte heller hänsyn till beroendet av belastningstiden hos bitumenbundna material, varför *viskoelastiska lösningar* även kommit att bli intressanta vid dimensionering av överbyggnader (Magnusson & Paterson, 2005). Dessa lösningar tar bättre hänsyn till asfaltgrusets viskoelastiska egenskaper, alltså att materialet besitter både de elastiska egenskaperna hos en solid kropp och de viskösa egenskaperna hos en vätska (Huang, 2004).

3.4.3 I Sverige idag

3.4.3.1 Trafikverket

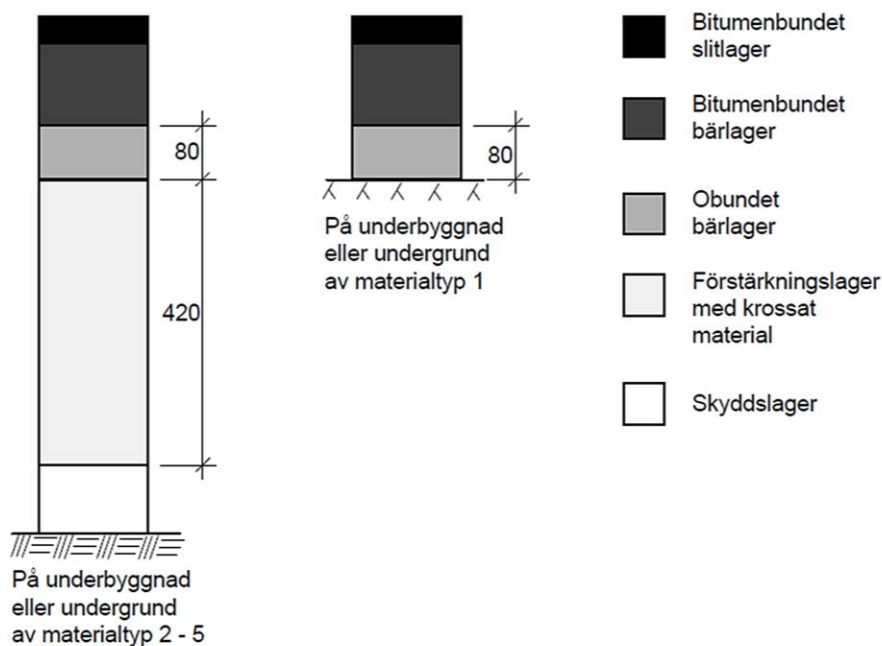
Vid upphandling av planering, projektering, byggande, drift och underhåll av väg använder sig Trafikverket av dokumentet *TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion* för att ange vilka krav de ställer (Trafikverket, 2011). Bland annat anger TRVK Väg (2011) att

de vägöverbyggnader som Trafikverket upphandlar ska dimensioneras enligt någon av de tre dimensioneringsklasserna: DK1, DK2 eller DK3.

DK1 används då vägen har en maximal trafikbelastning på 500 000 standardaxlar under sin livslängd (Trafikverket, 2011). För denna typ av dimensionering ska *Dimensionering av lågtrafikerade vägar* (VVMB302) användas (Trafikverket, 2011). Beräkningsgången enligt denna skrift för nybyggnad är (Vägverket, 2009):

1. Bestäm klimatzon enligt VVTK VÄG.
2. Kontrollera referenshastighet, VR.
3. Beräkna antalet standardaxlar enligt VVTK VÄG
4. Dela in vägen i sträckor inom vilka likartade förhållanden råder med avseende på materialtyper, tjälfarlighetsklasser och dräneringsförhållanden i underbyggnad och undergrund.
5. Bestäm mått enligt Figur 3-1 och Tabell 3-2 med avseende på trafik och tjällyftning.

De hänvisade Figur 3-1 och Tabell 3-2 finns återgivna i Figur 8 och



Figur 3-1 Grusbitumenöverbyggnad

Figur 8. Hänvisad Figur 3-1 VVMB302 (Vägverket, 2009)

Tabell 3. Hänvisad Tabell 3-2 VVMB302 (Vägverket, 2009)

Tabell 3-2 Dimensionering av överbyggnad enligt DK1 - nybyggnad

GBÖ	KZ 1 - 2	KZ 3	KZ 4	KZ 5
Antal standardaxlar	500 000	500 000	500 000	500 000
Bitumenbundet slit- och bärlager	45	45	45	45
Obundet bärlager	80	80	80	80
Förstärkningslager	420	420	420	420
<i>Tillägg för att motverka tjällyft</i>				
Tjälfarlighetsklass 3 i terrass VR = 80 km/h eller högre	0	150	225	300
Tjälfarlighetsklass 3 i terrass VR = 70 km/h eller lägre	0	50	125	200
Tjälfarlighetsklass 4 i terrass VR = 80 km/h eller högre	200	450	650	1000
Tjälfarlighetsklass 4 i terrass VR = 70 km/h eller lägre	50	200	350	650

DK 2 används i de fall då trafikbelastningen är över 500 000 standardaxlar under vägens livslängd (Agardh & Parhamifar, 2014). Dimensioneringsmetoden är empirisk-mekanistisk och kan beräknas för hand, men stöds även av datorprogrammet PMS Objekt (Agardh & Parhamifar, 2014) som tillhandahålls gratis av Trafikverket.

DK3 används bland annat vid extrema laster. Stor frihet i val av dimensioneringsmetod finns och innebär att andra teorier än linjärelastisk kan användas.

3.4.3.2 Skanska Sverige AB

Richard Nilsson⁶ beskriver att Skanska Sverige AB tänker olika kring dimensionering vid olika typer av tillfälliga vägbyggnationer. I det fall en tillfällig transportväg för dumpers och lastbilar vid ett bygge ska anläggas, sker dimensionering ofta inte alls⁶. Lagerupbyggnad löses baserat på erfarenhet i produktionen, då man brukar ha stor erfarenhet av vad som fungerar och inte fungerar⁶. Om möjligheten finns så kan utnyttjande ske av ny väglinje genom utläggning av förstärkningslager, som alltså ska bli en del av den nya vägen i ett senare skede men som under byggtiden nyttjas av byggtrafik⁶. Nilsson beskriver vidare att förstärkningslagret justeras innan det obundna bärlagret läggs på (se vidare avsnitt Flexibel överbyggnad 3.2.1) varför eventuella orenheter (exempelvis lera) från transportererna också rensas bort och inte byggs in i den färdiga konstruktionen.

I det fall en mer permanent väg ska byggas, till exempel en grusöverbyggnad i samband med en vindkraftsutbyggnad där vägen sedan ska byggas kvar, sker dimensioneringen något annorlunda⁶. Tillfartsvägarna är i det antagna fallet ofta icke-existerande eller dåliga, transporter och maskiner (mobilkranar, betongbilar och så vidare) är ofta väldigt tunga och en stor andel eventuella risker beaktas, varvid Nilsson⁶ nämner exempelvis:

⁶ Richard Nilsson, specialist väg PhD, Skanska Sverige AB, mailkontakt 2018-04-06

- Kostnad om den planerade transporten inte kan genomföras på grund av vägproblem?
- Finns risk att vindkraftsdel går sönder om exempelvis vägslänt kollapsar?
- Böter för entreprenören i samband med fördröjning?

På grund av dessa faktorer menar Nilsson att det eventuellt är en billig försäkring att välja en mer robust lösning, än en tunnare variant som teoretiskt ska hålla. De regelverk som ändå används som stöd vid denna typ av mer permanent dimensionering är *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion* (Trafikverket, 2011) samt *Anvisningar för projektering och byggande av skogsbilvägar klass 3 och 4* (Skogsstyrelsen, 2011), med vissa justeringar med avseende på framförallt fordonsvikter uppger Nilsson. Den faktiska dimensioneringen sker dock slutligen med hjälp av Skanska Sverige Abs egenutvecklade vägdimensioneringsprogram DIM4.5. Ett program som liknar Trafikverkets dimensioneringsprogram PMS Objekt, men som enligt Nilsson är mer flexibelt.

3.4.3.3 Skogsstyrelsen

I skogsbruket delas vägarna in i vägklasser utifrån *tillgänglighet* och *geometrisk standard* (Skogskunskap, 2016d).

Tillgänglighet

Tillgänglighet motsvarar ungefär vägens bärighet och bestäms utifrån vid vilken tid på året vägens bärighet når upp till Trafikverkets bärighetsklass 1 (BK1), alltså när vägen klarar en maximal fordonsvikt på 64 ton (Skogskunskap, 2016d). Graderingen sker enligt en skala A-D (se Figur 9).



Figur 9. Tillgänglighetsklasser skogsbilvägar A-B (överst), C-D (nederst) (Foto: Mats Hannerz)

Geometrisk standard

Geometrisk standard motsvarar hur snabbt fordonet kan köra och graderas enligt en skala 1-4, där 1 motsvarar 60 km/h och 4 motsvarar 20 km/h (Skogskunskap, 2016d). Klassificering enligt geometrisk standard håller dock på att ersättas av SVDB:s funktionella vägklasser (0-9) som istället beskriver hur vägen används och underhålls (Skogskunskap, 2016a).

Hur den slutliga klassificeringen sker utifrån tillgänglighet och geometrisk standard ses i Tabell 4.

Tabell 4. Skogbilvägar klassificering (Skogskunskap, 2016d)

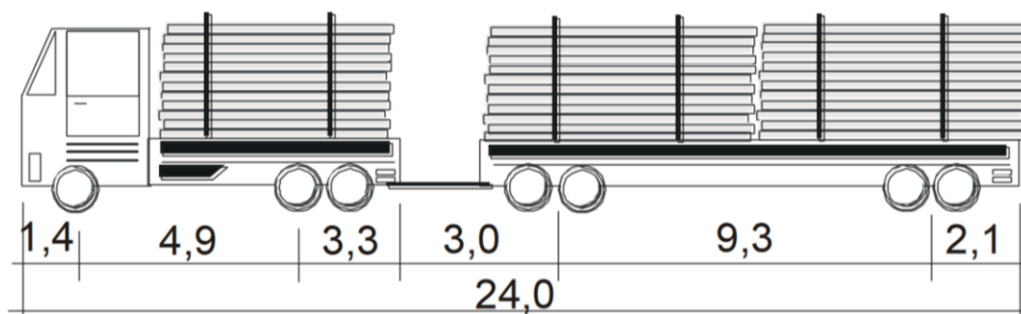
TILLGÄNGLIGHET	GEOMETRISK STANDARD			
	1 60 km/h	2 40 km/h	3 30 km/h	4 20 km/h
A Last- och personbilstrafik hela året	1A	2A	3A	
B Lastbilstrafik hela året utom vid svår tjällossning. Personbilstrafik hela året.	1B	2B	3B	
C Lastbilstrafik hela året utom under tjällossnings- och ihållande regnperioder. Personbilstrafik hela året utom under tjällossningen		2C	3C	4C
D Lastbilstrafik i huvudsak vintertid. Persobilstrafik även sommartid.				4D

Det typfordon som vidare betraktas vid dimensionering har följande egenskaper (Skogskunskap, 2016e):

- 24 m långt
- 2,6 m bredd
- 4,5 m högt
- 64 ton totalvikt
- Fyraxligt släp
- En styrande axel
- Tre boggier
- Maximal axellast 12 ton⁷
- Maximal boggielast 18 ton⁷

⁷ Något högre dimensionerande värden i samband med broar (Skogskunskap, 2016e)

För bättre förståelse kan det beskrivna typfordonet jämföras med Trafikverkets typfordon *Skogsbil Ls* (se Figur 10), där enda skillnaden ligger i att Trafikverkets typfordon *Skogsbil Ls* är 2,55 m brett istället för 2,6 m (Trafikverket & Sveriges kommuner och landsting (SKL), 2015).



Figur 10. Typfordon Skogsbil Ls (Trafikverket & Sveriges kommuner och landsting (SKL), 2015)

3.4.3.4 Beskrivning av tabellmetod

Vid nybyggnation av skogsbilvägar är det vanligast att de tillhör vägklass 3 eller 4 (Larsson, 2016). Detta då vägklass 1 och 2 avser en vägstandard som främst används på stomvägnätet, vilket till stor del redan är utbyggt (Larsson, 2016). Vid dimensionering av skogsbilvägar klass 3 och 4 används i dag Skogsstyrelsen *Anvisningar för projektering och byggande av vägklass 3 och 4* (Skogsstyrelsen, 2011), enligt Bergqvist, Bradley, Björheden, och Eliasson (2017). Detta sätt att dimensionera innebär en tabellmetod där tabellerna bygger på:

- Undergrundens materialtyp
- Vägbyggnadstyp (skärning eller bank)
- Avsedd tillgänglighetsklass

Från den första tabellen som används (se Tabell 5) fås total överbyggnadstjocklek. Vidare tjocklekar på respektive lager fås därefter från den andra tabellen (se Tabell 6).

Tabell 5. Underlag för dimensionering av överbyggnad (Skogsstyrelsen, 2011)

Material i underbyggnad eller undergrund	Tjälfarlighetsgrupp I-III	Total överbyggnadstjocklek (cm) för tillgänglighetsklass A-D						
		A		B		C		D
		Skärning	Bank	Skärning	Bank	Skärning	Bank	
Grus Sandigt grus Grusig morän Sandig morän	I	15		5, 7 el 10		5, 7 el 10		0
Grusig sand Sand Grovmö	I	20		15		15		10
Grusig morän Sandig morän Normalmorän	II	30	20	20	15	15	5	0
Sandig moig morän Lerigmorän Moränlera	II	40	30	30	20	20	15	
Moig morän Mjäligmorän Finmo Mjåla Grovlåra Grovmellanlåra	III	60	50	40	30	30	20	5
Fin mellanlåra Finlåra	II	40	30	30	20	30	15	
Torv Gyttja, Dy		60		50				40

Tabell 6. Överbyggnadens sammansättning (Skogsstyrelsen, 2011)

Tjocklek	Sammansättning
5	Avser 5 cm slitlager
10	Avser 5 cm slitlager och 5 cm bärlager alt. 10 cm bärlager
15	Avser 5 cm slitlager och 10 cm bärlager alt. 15 cm bärlager
20-60	Avser 5 cm slitlager och/eller 10-15 cm bärlager varjämte resterande del av överbyggnaden utförs som förstärkningslager, enligt vidare instruktioner i anvisningarna

I anvisningarna finns därefter krav på de ingående materialen i de olika lagren.

Bergqvist, Bradley, Björheden, och Eliasson (2017) påpekar dock att tabellerna inte tar hänsyn till vare sig trafikmängd, däcktryck eller om en tunnare konstruktion kan göras, om viss spårbildning tillåts.

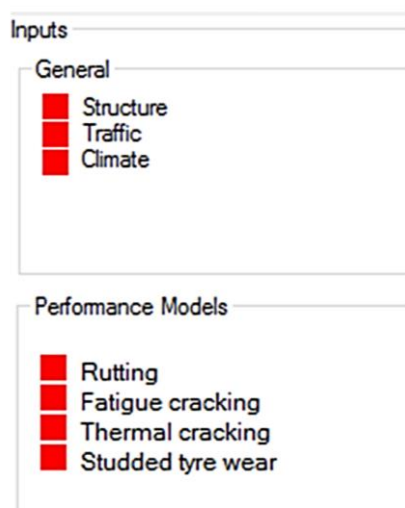
3.4.3.5 Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI)

Erlingsson och Ahmed avslutade år 2013 ett arbete vars huvudsyfte var att utarbeta ett snabbt och pålitligt elastiskt multilagerprogram (Erlingsson & Ahmed, 2013). Resultatet av arbetet är EraPave (Elastic Response Analysis of flexible PAVements).

Programmet är ett elastiskt responsanalysprogram som beräknar vägkonstruktioners respons på trafikbelastning baserat på Burmisters teori (se avsnitt Spännings och töjningsberäkning 3.4.2.) om multipla lager och elasticitet (MLET, MultiLayer Elastic Theory) (Erlingsson & Ahmed, 2013).

I dagsläget är programmet inte fullt färdigutvecklat. Programmet kan till exempel just nu beräkna nedbrytning med avseende på utmattningssprickor och spårdjup. I framtiden kommer dock beräkning även kunna ske på termiska sprickor och nötning till följd av dubbdäcksanvändning.

Programmet möjliggör fem olika typer av indata, fördelat på två övergripande kategorier: generellt och baserat på tillståndsmoell. Utdatan från programmet, vilket alltså i dagsläget är utmattningssprickor och spårdjup, presenteras i en Microsoft Excel-fil efter att en körning gjorts i programmet. Spårdjupsberäkningarna görs inkrementellt, för ett år i taget. Resultaten från spårdjupsberäkningarna blir därför dels spårdjup i mm år för år, men också en tillhörande graf över utvecklingen över dimensioneringsperioden.

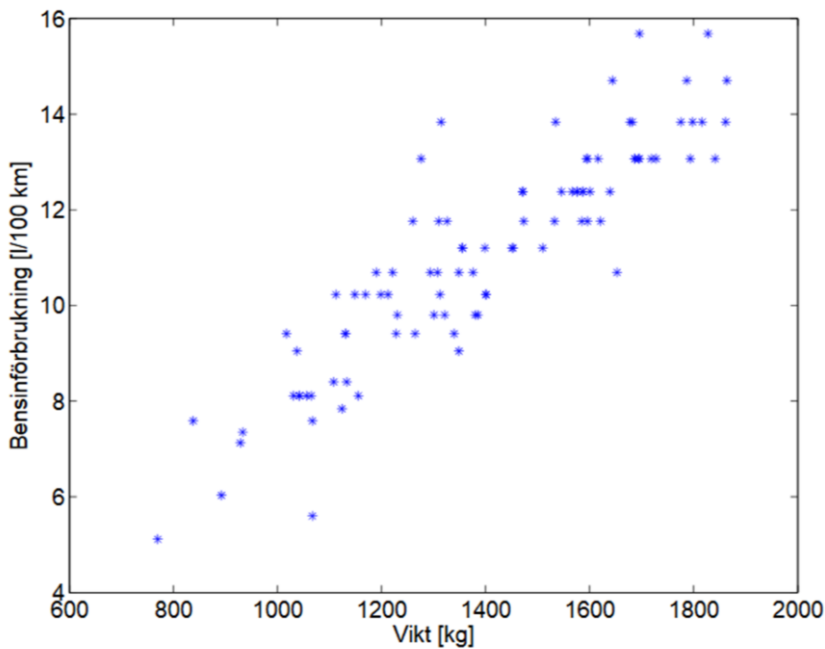


Figur 11. Input EraPave
(skärmsklipp från programmet)

Programmet tillhandahålls gratis av VTI och kan laddas ned via institutets hemsida (Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI, u.å.).

3.5 Regressionsanalys

För att studera sambandet mellan två eller flera variabler kan en *regressionsanalys* göras (Matematikcentrum, 2014). Analysen innebär att en variabel ses som responsvariabel med en eller flera förklarande variabler (Matematikcentrum, 2014). Därefter ansätts detta samband följa en viss modell, varefter det bäst anpassade sambandet enligt vald modell bestäms. För att exemplifiera tas situationen i Figur 12.



Figur 12. Slumpmässigt urval av bilar, bensinförbrukning mot vikt (Matematikcentrum, 2014)

Figuren visar på mätningar av bensinförbrukning och vikt där det bedömts som att bensinförbrukningen beror på vikten på bilen, snarare än tvärtom. Responsvariabeln (y) är alltså bensinförbrukningen och den förklarande variabeln (x) är vikten. Om hänsyn också tas till att de genomförda mätningarna påverkas av en slumpmässig störning kan följande regressions samband sättas upp, se Ekvation 2 (Matematikcentrum, 2014):

$$y = f(x) + \text{"slump"} \quad (\text{Ekv. 2})$$

Där alltså

y = responsvariabel

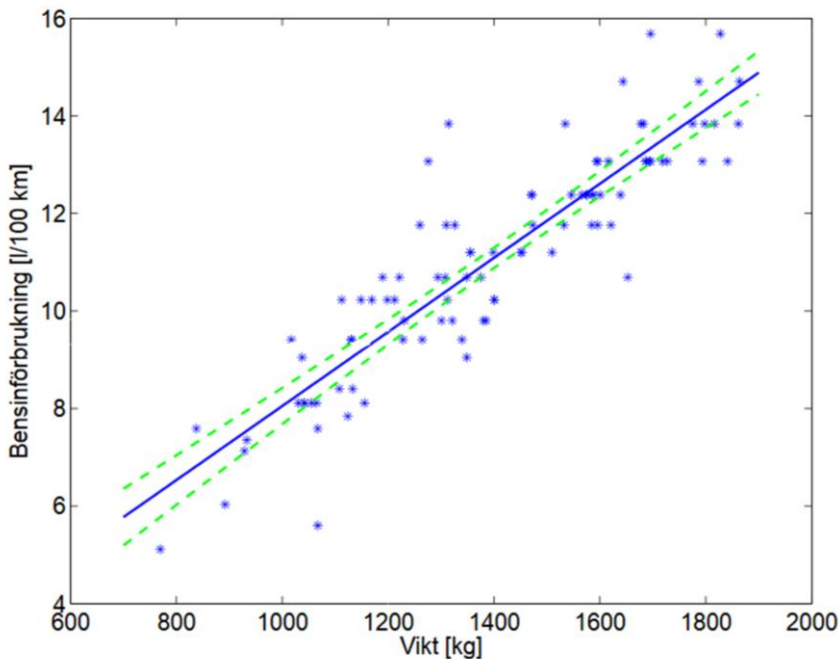
$f(x)$ = regressionsfunktion med förklarande variabel x

I de fall regressionsfunktionen $f(x)$ är linjär med avseende på de förklarande parametrarna fås *linjär regression* (Matematikcentrum, 2014), vilket enligt Figur 12 skulle kunna vara aktuellt i detta exempelfall. Är det dessutom, som i detta fall, endast en förklarande variabel handlar det dessutom mer specifikt om *enkel linjär regression* (Matematikcentrum, 2014).

I fallet enkel linjär regression används följande modell (Matematikcentrum, 2014):

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \text{ där } \varepsilon_i \in (0, \sigma)$$

Där minsta kvadratmetoden används för att skatta parametrarna α och β och det faktum att α och β är normalfördelade utnyttjas för att få fram deras konfidensintervall, alltså det intervall som med 95 % säkerhet täcker det sanna värdet på respektive parameter (Matematikcentrum, 2014). Resultat av att ha genomfört dessa steg i det aktuella exempelfallet ger en skattad regressionslinje med tillhörande konfidensintervall enligt Figur 13.

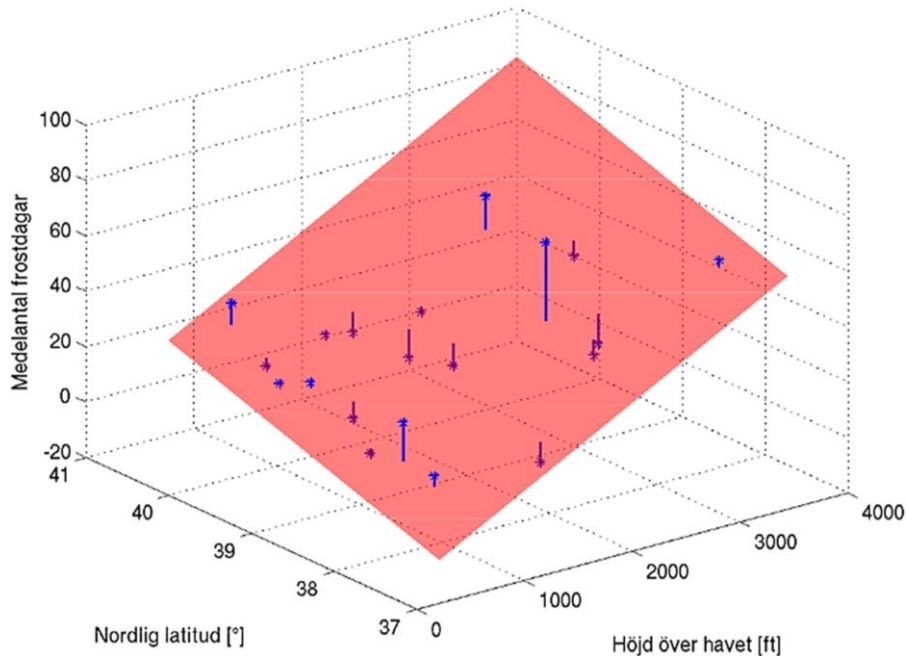


Figur 13. Skattad regressionslinje i blått och konfidensintervall för linjen som funktion av x i grönt (Matematikcentrum, 2014).

I det fall den linjära regressionsmodellen har fler än en förklarande variabel är benämningen på analysen istället *multipl linjär regression* och det modellantagande som görs är istället:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i$$

För p st förklarande x-variabler. Istället för en regressionslinje fås i detta fall istället ett regressionsplan (se Figur 14). Vid fler än två förklarande variabler blir det dock svårt att visualisera den genomförda regressionsanalysen.



Figur 14. Exempel på regressionsplan (Lübeck, 2014)

För att studera hur väl det framtagna sambandet förklarar data kan *förklaringsgraden* (R^2) studeras. R^2 kan definieras som (Matematikcentrum, 2014):

$$R^2 = \frac{\text{variation förklarad av modellen}}{\text{total variation}}$$

R^2 blir ett värde mellan 0 och 1 och ju närmare 1 värdet blir, i desto högre utsträckning kan datan förklaras av det framtagna sambandet.

För mer ingående läsning kring ämnet *regressionsanalys* hänvisas läsaren till exempelvis Matematikcentrums skrift "Sambandsanalys – regression och korrelation" (2014).

4 Framtagande av modell

Metoden för modellframtagandet är grovt beskriven under avsnittet Metod. En påminnelse visas i Figur 15.



Figur 15. Metod för modellframtagning

4.1 Val av nedbrytningsmått



Tunga fordon på grusvägar bidrar till bärighetsberoende nedbrytning och ett strukturellt slitage av vägen som resulterar i skador som spår-och/eller sprickbildning (Edvardsson, 2015). Spårbildning bedöms kunna utgöra en särskilt stor säkerhetsrisk i samband med smala entreprenadvägar och tunga fordon. Risker som bland annat avkörningar och vältning. Med anledning av detta är den modell som tagits fram med avseende på spårdjup.

Spårdjup betraktas vidare som en utparameter i modellen. Alternativet hade varit att låta krav på spårdjup agera inparameter och utparameter det antal standardaxlar det kravet innebär. Bedömningen görs dock att detta förfarande inte är praktiskt aktuellt utan att intresset hos anläggare av entreprenadvägar ligger i frågan ”hur tunt kan vi bygga? Kan vi acceptera det spårdjupet?”.

4.2 Val av parametrar



Olin (2016) identifierar fyra faktorer som bidrar till nedbrytningen av en grusväg: väggroppens utformning, trafiken, klimatet samt hyvling och plogning. Med anledning av

detta fanns det en önskan om att metoden skulle ta hänsyn till dessa faktorer. Tanken är dock att metoden ska vara lättanvänd och att den indata metoden kräver ska vara lätt tillgänglig.

Den påverkan hyvling och plogning kan ha på vägen (förändrad kornstorleksfördelning i översta lagret och reducerat tvärfall (Olin, 2016)) bedöms inte vara lätt tillgänglig information, varför denna faktor inte beaktas i modellen. Annat än genom uppmaningen att iakta aktsamhet vid eventuell hyvling eller plogning, så att inte tvärfall eller kornstorleksfördelning påverkas.

Faktorer som beaktas är därför väggkroppens utformning (struktur), trafiken och klimatet. Några eller flera av dessa faktorer brukar även beaktas i andra dimensioneringsmetoder (se I Sverige idag 3.4.3) vilket ses som en fördel. En fördel i form av ökad sannolikhet för möjlig jämförelse mellan den framarbetade metoden och andra, nu existerande metoder.

4.2.1 Struktur

En grusöverbyggnad består vanligtvis av grusslitlager, bärlager, förstärkningslager och eventuellt skyddslager (se avsnitt Flexibel överbyggnad 3.2.1). Slitlagrets viktigaste funktion är dock att ge körbanan sådana egenskaper att rimliga krav på trafiksäkerhet, transportekonomi och komfort tillfredsställs (se avsnitt 3.2.1), vilket anses kunna uppfyllas vid körning direkt på bärlagret i detta arbete. Detta då arbetet endast beaktar tyngre fordon i låga hastigheter på lågtrafikerade vägar.

Vidare antas skyddslagrets funktion kunna uppfyllas genom anpassning av tjockleken på förstärkningslagret, varför ett särskilt skyddslager inte beaktas i modellen. De lager modellen beaktar är därför **bärlager** och **förstärkningslager**.

Enligt Agardh och Parhamifar (2014) är materialens styvhet och tjocklekar de faktorer som främst påverkar nedbrytningen hos en normal väg. Med anledning av detta beaktas även aktuella **styvhetsmoduler** för de olika lagren och **undergrunden**. Då fukthalten vidare har stor betydelse (se avsnitt Klimatberoende 3.3.2.2) för styvheten hos obundna material (Agardh & Parhamifar, 2014) beaktas även **fukthalt** för de olika lagren och undergrunden.

4.2.2 Trafik

Enligt Olin (2016) är trafiken tillsammans med klimatet de faktorer som har störst påverkan på nedbrytningen (se vidare avsnitt Strukturellt slitage 3.3.2). Särskilt de tunga fordonen orsakar stor del av nedbrytningen. **Antalet fordon** har stor betydelse för trafikens påverkan på nedbrytningen, men även fordonens hastighet och hur stor spridning på vägbanan trafiken har påverkar nedbrytningen (Agardh & Parhamifar, 2014).

Fordonens hastighet är främst en faktor som bidrar till nedbrytningen hos asfatsbelagda vägar, då det är framförallt asfaltmaterial som påverkas av belastningstiden (Agardh & Parhamifar, 2014). Med anledning av detta beaktas inte hastighet i detta arbete. Vidare beaktas inte heller spridning av trafiken i detta arbete, då det antas att entreprenadvägar är så pass smala att spridningen blir försumbar. Det antas alltså vidare att all trafik kör i samma spår.

Eftersom nedbrytningen sker i kontakten mellan däck och vägen påverkar kontakten hur mycket vägens tillstånd förändras (Agardh & Parhamifar, 2014), se även avsnitt Trafikberoende 3.3.2.1. Kontaktytan påverkas bland annat av antalet axlar på fordonet, hur

axlarna belastas samt vilken däcktyp som används (Agardh & Parhamifar, 2014) varför **aktuell fordonstyp** på vägen beaktas.

Enligt Roger Nilsson⁸ påverkas entreprenadvägar olika av **lastbilar** och **dumprar**, detta till stor del beroende på fordonens olika däckutseende och däckkonfiguration. Modellen tar därför hänsyn till båda dessa fordon.

4.2.3 Klimat

Väggkroppens olika lager har olika egenskaper under de olika årstiderna. Bitumenet i de bundna lagren är till exempel ett flexibelt material som mjuknar vid värme och hårdnar vid kyla (Agardh & Parhamifar, 2014), materialet är alltså temperaturberoende. Detta avspeglar sig på de bundna lagrens elasticitetsmodul som är lägre under årets varma perioder och högre under årets kalla perioder (Agardh & Parhamifar, 2014). För obundna lager har dock inte temperaturen lika stor betydelse, utan det är istället vatteninnehållet som ger variationer av styvhetsmodulen under året (Agardh & Parhamifar, 2014). Den omgivande temperaturen påverkar vatteninnehållet i de obundna lagren, men det som i slutändan verkar nedbrytande för lagren är alltså vatteninnehållet.

Med avseende på vägens tillstånd kan året delas in i tre säsonger: vinter, tjällossning och sommar (Agardh & Parhamifar, 2014). Under vintern, när temperaturen sjunker under 0°C i väggkroppen, fryser materialen och de blir styvare med ökad bärighet som följd (ROADDEX Network, 2013). Bärigheten hos frusna vägar vintertid är bättre än vad den är under sommarförhållanden (ROADDEX Network, 2013). Detta trots att sommaren medger ett lägre vatteninnehåll i vägkonstruktionen, tack vare evaporation (ROADDEX Network, 2013). Det frusna vattnet i väggkroppen ändrar dock form och innebär andra egenskaper hos vägen i samband med vårens varmare temperaturer. Det frusna vattnet börjar smälta, tjällossning sker och med det en ökning av vatteninnehållet i vägen (Berntsen & Saarenketo, 2005). Vilket vidare innebär minskad bärighet hos vägen (Berntsen & Saarenketo, 2005). Vid slutet av sommaren stabiliserar sig fukthalten (Berntsen & Saarenketo, 2005).

Det är alltså lämpligt att beakta tre årstider i modellen: **sommar, vinter och tjällossning** där varje årstid visar på variation i vatteninnehåll som avspeglar sig på variation av styvhetsmodul.

En av anledningarna till att arbetet görs är för att tillfälliga vägar inte ska dimensioneras med hänsynstagande till årstider som inte inträffar under dess livslängd. I modellen ligger därför fokus på dimensionering av vägar vars livslängd är en eller ett par årstider. Antagandet görs vidare att en väg som ska dimensioneras enligt modellen inte ska uppleva en årstid mer än en gång, vilket vidare innebär att maximal dimensioneringsperiod för modellen är ett år.

⁸ Roger Nilsson, senior manager PhD, Skanska Sverige AB, telefonkontakt 2018-04-05

4.3 Parametrarnas påverkan på deformationen



4.3.1 Metod

För att se hur de olika parametrarna påverkar spårdjupet krävs någon form av beräkningar. Den övergripande metod som väljs för detta är med hjälp av ett datorprogram. Metoden väljs då beräkningar underlättas och mindre justeringar kan göras utan större tidsförluster. Krav på datorprogrammet är bland annat att användaren kan påverka indatan i hög utsträckning. Detta för att minska andelen förutsättningar som programmet själv väljer, så att så hög transparens som möjligt finns mellan in- och utdata. Särskilt klimatförhållandena ska användaren kunna påverka. Vidare är ett krav på programmet att det ska beräkna spårdjupet och presentera det som utdata och inte beakta spårdjup som ett krav vid beräkning av antal standardaxlar. Detta enligt avsnitt Val av nedbrytningsmätt 4.1.

Ett program som ganska väl uppfyller dessa krav är EraPave, vilket är vidare beskrivet under avsnitt 3.4.3.5. Innan programmet används behövs dock visst förarbete göras, för att väva ihop krav och möjligheter från EraPave med tankar kring de parametrar som identifierats som viktiga. Programmet inkluderar en exempelfil med vad som ska vara rimliga ingångsvärden. Exempelfilen betraktar en femlagerväg (se Flexibel överbyggnad 3.2.1). Denna används så dock lite som möjligt för att körningarna i programmet ska motsvara det aktuella scenariot så bra som möjligt.

4.3.1.1 Struktur

EraPave beaktar vägens uppbyggnad under fliken ”struktur” (se Figur 16). Indata som krävs är: materialsort, tjocklek och styvhetsmodul för de olika lagren. Poissons tal och enhetsvikt antas (likt den exempelfil som följer med programmet) vara samma för alla lager och enligt de värden som visas i Figur 16.

Pavement structure

Number of layers: 3 Number of stress sensitive unbound layer: 0

Pavement geometry and material properties

Layer	Material	Thickness (cm)	Modulus (MPa)	Poisson's Ratio (-)	Unit weight (kN/m ³)
1	Crushed rock		450	0,35	25
2	Crushed rock		450	0,35	25
3	Fine sand	1E+300	100	0,35	25

Constants for stress sensitiv unbound layers

Layer	K1 (-)	K2 (-)	K3 (-)	Ko (-)	Sublayers

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{3p}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Mr = resilient modulus (kPa) P = mean stress (kPa) and pa = 100kPa
k1, k2 and k3 = constants tau_oct = octahedral shear stress (kPa)

Ok Cancel

Figur 16. EraPave, flik struktur

De materialval som kan göras i EraPave är (på engelska):

- bituminous
- crushed rock
- natural gravel
- cement treated
- fine sand
- silty sand
- clay

Bärlager och förstärkningslager antas bestå av krossgrus, då alternativet naturgrus är miljömässigt ohållbart och enligt Miljöbalken 9 kap. 6f §1 (SFS 1998:808, Miljöbalken) endast får användas till ändamål där materialet är oersättligt – vilket inte bedöms aktuellt i detta fall.

Vidare är morän Sveriges vanligaste jordart och täcker ungefär 75 % av landets yta (Sveriges geologiska undersökning, u.å.). I stora delar av Sverige domineras moränen av sand och silt, vilket gör denna morän till Sveriges i särklass vanligaste jordart (Sveriges geologiska undersökning, u.å.). Med anledning av detta antas en undergrund bestående av siltig-sandig morän i detta arbete. Siltig-sandig morän finns dock inte som materialval i EraPave.

Materialtypen *fine sand* väljs istället då *crushed rock* och *natural gravel* antas avse en för grovkornig materialsort och *silty sand* och *clay* antas innebära egenskaper (kopplat till tjälfarlighet och permeabilitet) som inte är aktuella i den siltiga-sandiga moränen.

Tjockleken på bär- respektive förstärkningslager antas kunna variera mellan 0,01-15 cm respektive 0,01-40 cm (EraPave medger inte inmatning 0 cm). Dessa intervall är baserade på de maximala tjocklekarna för bär- och förstärkningslager enligt Skogsstyrelsens tabell (se avsnitt Skogsstyrelsen 3.4.3.3). Detta då denna tabell beaktar tyngre fordon och vägar med längre livslängd än vad som är utgångspunkten i detta arbete och alltså kan antas motsvara en form av extremfall i detta arbete.

Under fliken ”klimat” beräknar EraPave årstidseffekter på vägkroppens bärighet utifrån optimal styvhetsmodul med hjälp av fukthalter relaterade till olika årstider, se vidare i avsnitt Klimat 4.2.3. De styvhetsmoduler som efterfrågas under fliken ”struktur” är de optimala, alltså de styvhetsmoduler som råder vid optimal fukthalt. Optimal fukthalt antas inträffa under sommaren (se avsnitt 4.2.3), varför styvhetsmoduler för de olika lagren under sommaren eftersöks i programmet.

Trafikverket anger i sin skrift *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion* (Trafikverket, 2011) värden på styvhetsmoduler (elasticitetsmoduler) för bärlager och krossat förstärkningslager för fem olika årstider: vinter, tjällossningsvinter, tjällossning, senvår, sommar och höst. Värden för sommar visas i Tabell 7.

Siltig-sandig morän motsvaras av materialtyp 3B i *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion* (Trafikverket, 2011), en materialtyp som enligt samma skrift har styvhetsmodulen 100 MPa under sommaren (se Tabell 7).

Tabell 7. Styvhetsmoduler sommar (MPa)

	Styvhetsmodul (MPa)
Bärlager	450
Förstärkningslager (krossat)	450
Undergrund	100

4.3.1.2 Trafik

EraPave beaktar trafikens inverkan under fliken ”trafik” (se Figur 17). Antal fordon beaktas genom bland annat ÅDT per körfält och dimensioneringsperiod. Fordonstyp beaktas genom bland annat axelkonfiguration, kontaktryck, kontakradie och axellast.

The screenshot shows the 'EraPave' software interface with two main panels: 'Traffic input data' and 'ALS summary'.

Traffic input data

Axle Configuration

- Axel configuration: [Dropdown menu]
- Contact pressure (kPa): [Input field]
- Contact radius (cm): [Input field]
- Axle load (kN): [Input field]
- Wheel spacing (cm): [Input field with value 35]
- Axle spacing (cm): [Input field]
- Traffic wander Std deviation (cm): [Input field with value 25]
- Select WIM data: [Select WIM data button]
- WIM data is not loaded

Traffic Volume

- AADT per lane: [Input field]
- Load equivalency factor (LEF): [Input field with value 1,3]
- Growth rate (%): [Input field with value 0]
- Percent heavy traffic (%): [Input field with value 100]
- Design period (years): [Input field with value 1]

ALS summary

Bin (kN)	Steering	Single	Tandem	Tridem	Quad

Distribution of axle types in the AADT (%)

Steering	Single	Tandem	Tridem	Quad
100	125	95	25	0

Buttons: Ok, Cancel

Figur 17. EraPave, flik trafik

Grusöverbyggander i Sverige används för vägar med en årsdygnstrafik (ÅDT) lägre än 250 fordon/dygn (Edvardsson, 2015), vilket antas vara värden på total årsdygnstrafik. Omvandlat till arbetsfordon en vanlig dag innebär det $250/8 = 31$ överfarter per timme. Förutsatt att vägen inte är byggd som en slinga, utan att ett fordon passerar vägen två gånger för infart/utfart, innebär detta vidare ca 15 fordon/timme på vägen (som alltså kör fram och tillbaka). Ett fordon var fjärde minut bedöms som ett extremfall, men inte en omöjlighet.

För att den modell som tas fram ska kunna användas även i sammanhang utanför entreprenadvägarna, exempelvis andra tillfälliga grusvägar, används Edvardssons värden i detta arbete. Det antas att total årsdygnstrafik på 250 fordon/dygn motsvaras av ÅDT per körfält på 125 fordon/dygn.

De dumprar och lastbilar som Skanska Sverige AB använder sig av i samband med anläggningsarbeten är ofta tillverkade av Volvo⁹. Tillverkarna är även relevanta ur ett branschperspektiv då delen som tillverkar lastbilar är största tillverkare av tunga lastbilar i Europa (Volvo Lastvagnar, u.å.) och delen som tillverkar anläggningsmaskiner är en av världens största tillverkare av anläggningsmaskiner (Volvo Construction Equipment, u.å.).

Med anledning av detta baseras modellen på fordon från denna tillverkare. De aktuella delarna av Volvokoncernen är Volvo Construction Equipment (Volvo CE) som tillverkar dumprar och Volvo Lastvagnar som tillverkar lastbilar. I arbetet beaktas inte enstaka stora laster.

⁹ Roger Nilsson, senior manager PhD, Skanska Sverige AB, telefonkontakt 2018-04-05

Dumper

Enligt Karl-Gustav Petersson¹⁰ är ramstyrda dumprar i storleksklassen 40-45 ton den dumpervariant Volvo Construction Equipment säljer mest av. Utifrån detta väljs dumpern A45G som exempelfordon (se Figur 18).



Figur 18. Dumper A45G (Volvo Construction Equipment, u.å.)

Från fordonets produktblad (Volvo Construction Equipment, 2018) fås följande information:

- Däck vid standardutrustning: 29.5R25.
- Största marktrycket vid lastat fordon är det som uppmäts bak. Detta är (vid användning av däcken 29.5R25) 174 kPa.
- Största totalvikten uppmäts bak och är 50 500 kg.

Axelavstånd (cm)

Avståndet mellan de två bakaxlarna anges vara **194 cm** (Volvo Construction Equipment, 2018).

Axellast (kN)

Axellasten beräknas utifrån hur fordonets bakre totallast fördelar sig på de två bakre axlarna:

$$\frac{m \cdot g}{2} = \frac{50\,500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{2} = 247,70 \dots \text{ kN} \approx \mathbf{248 \text{ kN}}$$

Kontaktradie (cm)

Den totala bakre lasten fördelar sig på den sammanlagda ytan som de fyra däckens markkontakt innebär (x), vilket ger det tidigare angivna bakre marktrycket. Ur detta samband kan därefter den totala kontaktytan beräknas:

$$\frac{50\,500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{x} = 174 \text{ kPa} = 174 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow x = 2,84 \dots \text{ m}^2$$

¹⁰ Karl-Gustav Petersson, product manager, Volvo Construction Equipment, mailkontakt 2018-04-16

Om kontaktytan för *ett däck* mot marken förenklas till att ha en cirkulär form kan kontaktradien beräknas på följande sätt:

$$A_{\text{cirkel}} = \pi r^2 = \frac{2,84 \dots}{4} \Rightarrow r = 0,47 \dots \text{ m} \approx \mathbf{48 \text{ cm}}$$

Kontakttryck (kPa)

Axellasten antas fördela sig jämnt mellan de två hjulen på axeln, vilken därefter sprids ut på den antagna cirkulära kontaktytan mellan ett hjul och marken:

$$\frac{\frac{247,70 \dots \text{ kN}}{2}}{\frac{2,84 \dots \text{ m}^2}{4}} = \frac{247,70 \dots \text{ kN}}{2} \cdot \frac{4}{2,84 \dots \text{ m}^2} = \mathbf{174 \text{ kPa}}$$

Vilket alltså stämmer överens med det angivna bakre marktrycket.

Lastbil

På frågan ”vilken är Er vanligaste/mest uthyrda lastbil i samband med anläggningsarbeten” ger Robert Celec¹¹ modellen FMX 8x4 tridem vagn som ett exempel, varför fordonet FMX D13 jämnlast 8x4 Tridem luftfjädrad väljs som exempelfordon. Ett exempel på hur FMX 8x4 tridem vagn kan se ut visas i Figur 19.



Figur 19. Lastvagn FMX 8x4 tridem (Volvo Lastvagnar, u.å.)

Fordonet finns i nio olika längdvarianter, där sju av dem innebär att avståndet mellan första och sista axeln överstiger 6,4 meter. Fordonet antas alltså generellt ha ett avstånd mellan första och sista axel som överstiger 6,4 meter. Om ett fordon med fyra (eller fler) axlar har ett avstånd mellan första och sista axeln som överstiger 6,4 meter får dess totala bruttovikt inte överstiga 32 ton, om fordonet ska färdas på en BK1-väg (se avsnitt Bärighet 3.3.1),

¹¹ Robert Celec, product manager, Volvo Trucks, mailkontakt 2018-04-06

enligt Transportstyrelsens skrift *Lasta lagligt* (Transportstyrelsen, 2017). Detta oavsett vad fordonets totala tekniska maxvikt är. Då det inte är ovanligt att en lastbil ska ta sig mellan den interna byggvägen och en BK1-väg beaktas de legala BK1-vikterna.

Vidare får vikten fram inte överstiga 10 ton och att vikten bak inte överstiga 24 ton (Transportstyrelsen, 2017). Om fordonet ska utnyttjas maximalt ur lastsynpunkt och samtidigt vara lagligt lastat fås att vikten på de bakre axlarna får vara sammanlagt 24 ton och 8 ton på framaxeln. Enligt Celec⁸ är den tekniska vikten på varje axel normalt 9 ton, varför den föreslagna viktfördelningen också är tekniskt rimlig. Från detta fås vidare de eftersökta parametrarna.

Axelavstånd (cm)

Avståndet mellan de tre bakaxlarna är 137 cm respektive 138 cm. Genomsnittet beräknas:

$$\frac{137 + 138}{2} = 137,5 \text{ cm} \approx \mathbf{138 \text{ cm}}$$

Avstånd mellan hjul i hjulpar (cm)

35 cm⁸

Axellast (kN)

Axellasten beräknas utifrån hur fordonets bakre totallast fördelar sig på de tre bakre axlarna.

$$\frac{m \cdot g}{3} = \frac{24\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{3} = 78,48 \text{ kN} \approx \mathbf{78 \text{ kN}}$$

Kontaktradie (cm)

Enligt fordonets produktdatablad (Volvo Trucks, 2018) är de däck som fås vid standardutförande av typen 315/80R22.5. Dessa däck har vid lasten 64 kN på framaxeln och 95 kN per axel bak (tandem) i båda fallen kontaktarean 55 000 mm² per däck (Canestrari, o.a., 2018). Antagandet görs därför att däcken vid den aktuella axellasten 78 kN även de kommer ha denna kontaktarea. Kontaktradien fås, vid antagande om cirkulär kontaktyta, till:

$$A_{\text{cirkel}} = \pi r^2 = 0,055 \text{ m}^2 \Rightarrow r = 0,13 \dots \text{ m} \approx \mathbf{13 \text{ cm}}$$

Kontakttryck (kPa)

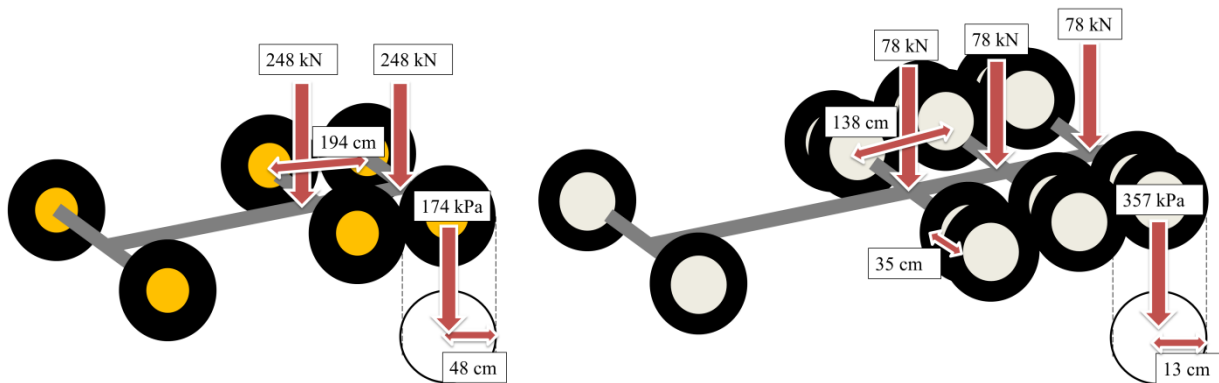
Vid antagandet om att varje bakre axellast fördelar sig jämnt på sina fyra däck fås kontakttrycket som:

$$\frac{78,48 \text{ kN}}{4} = \frac{78,48 \text{ kN}}{0,055 \text{ m}^2} = 356,75 \dots \text{ kN/m}^2 \approx \mathbf{357 \text{ kPa}}$$

En sammanfattning av den information som används för de olika fordonstyperna visas i Tabell 8 och Figur 20.

Tabell 8. Innebörd av parametern *fordonstyp* för de båda valen dumper och lastbil

	Dumper	Lastbil
Axelkonfiguration	Tandemaxel/singelhjul	Tridemaxel/dubbelhjul
Kontakttryck (kPa)	174	357
Kontaktradie (cm)	48	13
Axellast (kN)	248	78
Avstånd mellan hjul i hjulpar (cm)	-	35
Axelavstånd (cm)	194	138

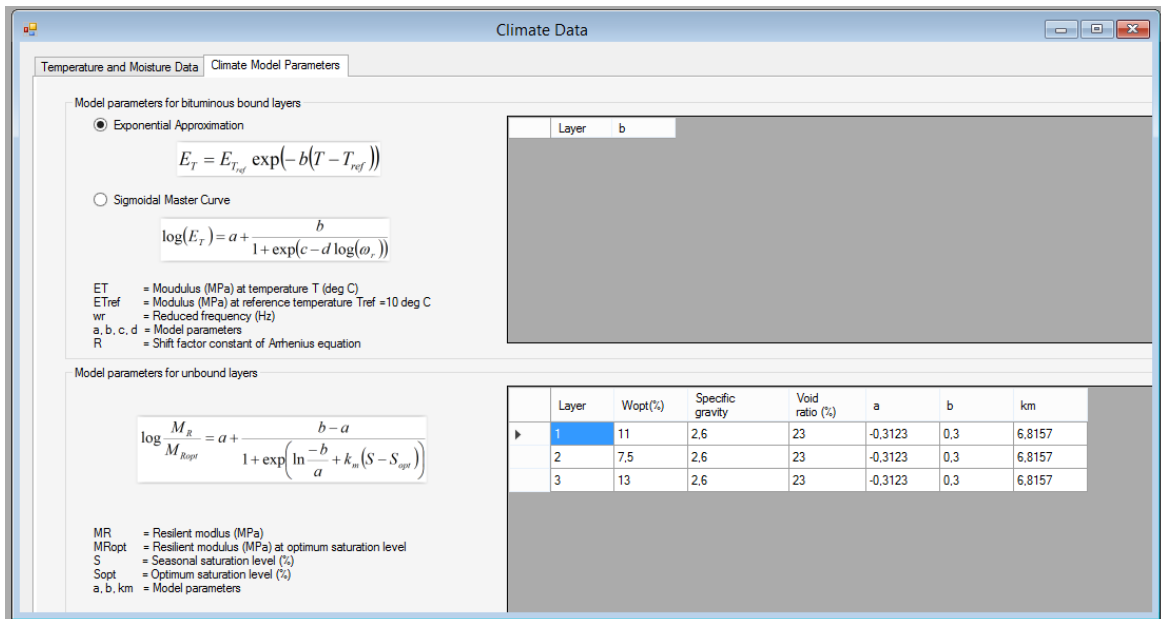


Figur 20. Innebörd av parametern *fordonstyp* för de båda valen dumper och lastbil – visualisering

4.3.1.3 Klimat

EraPave beaktar klimatets inverkan på nedbrytningen under fliken ”klimat” (se Figur 21 och Figur 22).

Figur 21. EraPave, flik klimat 1 (2)



Figur 22. EraPave, flik klimat 2 (2)

Värden för *specific gravity* och *void ratio* tas utifrån exempelfilens värden för bär- och förstärkningslager och parametrarna a, b och k_m är enligt NCHRP (2000) för grovkorniga material:

$$a = -0,3123$$

$$b = 0,3$$

$$k_m = 6,8157$$

Den klimatmodell som programmet använder sig av är framtagen av National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 2000) och utgår från optimal styvhet vilken är relaterad till optimal fukthalt. Årstidsvariationer på bärigheten beräknas därefter utifrån årstidsberoende fukthalter. För att kunna beakta de tre årstiderna sommar, vinter och tjällossning krävs alltså *fukthalter för dessa årstider* samt optimala fukthalter för de olika lagren – vilket antas vara detsamma som fukthalter för sommarperioden.

Bristfällig avvattning och rådande klimat påverkar fukthalten i vägkroppen (se Agardh & Parhamifar, 2014). I detta arbete görs dock antagandet att avvattningen är god och att variation av fukthalten i vägkroppen endast är klimatberoende.

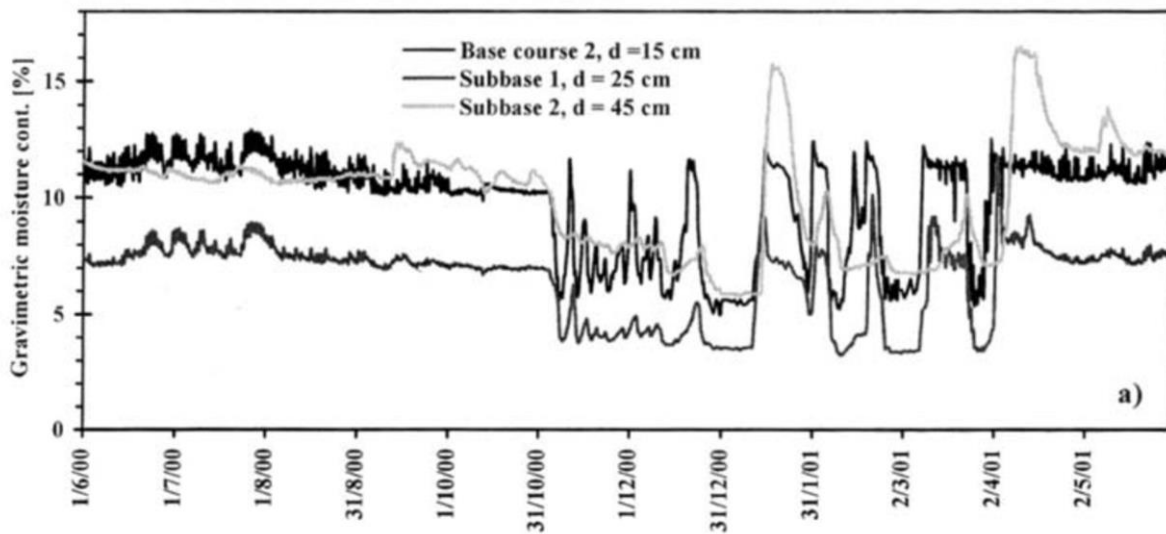
Enligt Berntsen och Saarenketo (2005) presenterade Bjarnason, Erlingsson & Thorison år 2002 mätningar av vatteninnehåll i två olika testvägar på Island: en nära Vesturlandsvegur och en nära Thingvallavegur. Båda vägarna anges ha slitlager, men på större delen av det isländska vägnätet är detta lager ofta en ytbehandling¹². En ytbehandling som troligtvis är något tätare än ett grusslitlager, men som kan ses som något mellan asfalt och grus¹². Med

¹² Sven Agardh, universitetslektor PhD, institutionen Trafik och väg (Lunds tekniska högskola), mejlkontakt 2018-05-08

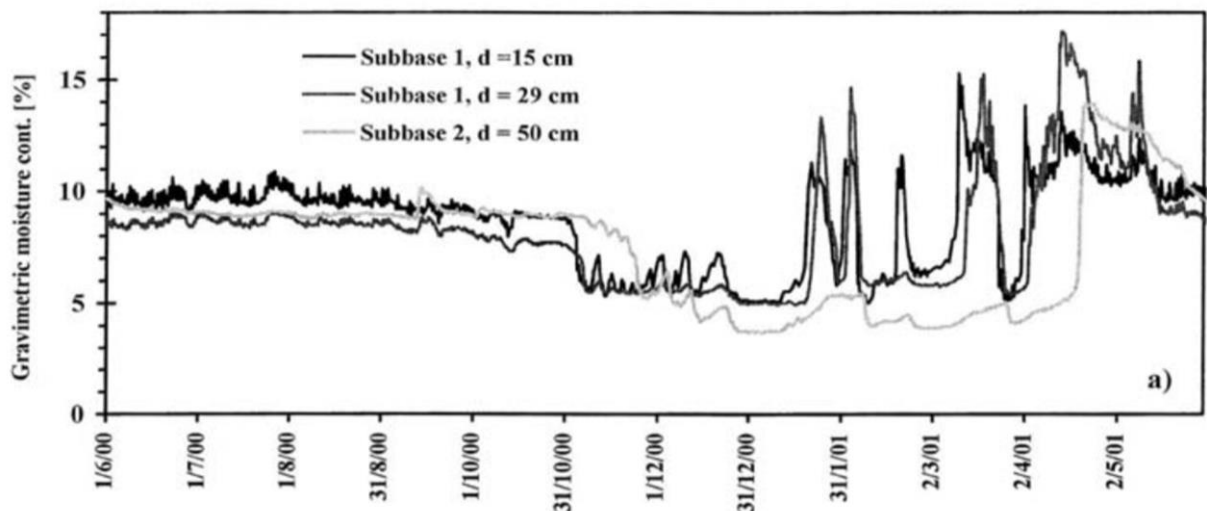
anledning av detta antas de uppmätta vattenhalterna även vara relevanta ur ett grusvägsperspektiv. Vägarans uppbyggnad visas i Tabell 9 och resultaten från mätningarna visas i Figur 23 och Figur 24.

Tabell 9. Uppbyggnad av modellväg och de två testvägarna

Modell	Vesturlandsvegur	Thingvallavegur
Bärlager 0-20 cm krossgrus	Slitlager 4,6 cm	Slitlager 3,6 cm
	Bärlager 1 3,4 cm krossgrus	Bärlager 1 6 cm krossgrus
	Bärlager 2 8,8 cm krossgrus	Bärlager 2 8 cm krossgrus
Förstärkningslager 0-45 cm krossgrus	Förstärkningslager 1 15,3 cm krossgrus	Förstärkningslager 1 27,5 cm sand
	Förstärkningslager 2 45 cm naturgrus	Förstärkningslager 2 46 cm sand
Siltig-sandig morän	Torv	-



Figur 23. Gravimetrisk vattenhalt Vesturlandsvegur (Berntsen & Saarenketo, 2005)



Figur 24. Gravimetrisk vattenhalt Thingvallavegur (Berntsen & Saarenketo, 2005)

Utifrån uppbyggnad och var i väggroppen mätningarna gjorts bedöms vägen nära Vesturlandsvegur vara mest lik modellvägen:

- förstärkningslager av krossgrus/naturgrus
- mätningar tagna i base course (bärlager) och subbase (förstärkningslager)
- lagertjocklekar mer lika modellvägens än Thingvallavegur (som är tjockare)

Värden på vattenhalter tas därför utifrån Figur 23, från base course 2 och subbase 1. Tjällossningen sker under sena mars/tidiga april (Berntsen & Saarenketo, 2005) och bedöms pågå till ca 31 maj. Därefter bedöms sommaren infalla. Sommaren bedöms övergå till vinter ca 31/10, då vattenhalten sjunker kraftigt vid denna tidpunkt och den vattenhalt som uppmätts är ofruset vatten (Berntsen & Saarenketo, 2005).

För värden på vattenhalt för undergrunden används Trafikverkets dimensioneringsprogram PMS Objekt. Materialtypen 3B (siltig-sandig morän) (Trafikverket, 2011) ger värden enligt Tabell 10. Dessa värden anges inte variera under året (Trafikverket, 2011).

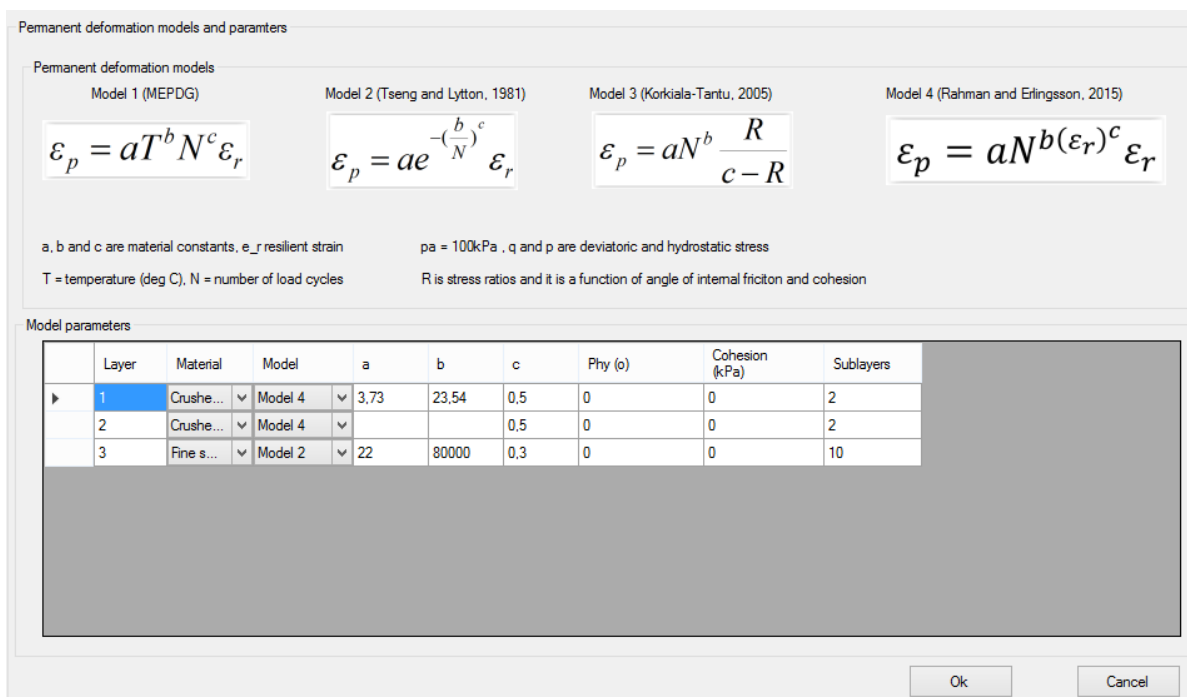
En sammanfattning av fukthalter utifrån årstid för de olika lagren visas i Tabell 10.

Tabell 10. Fukthalter (%)

	Sommar 1/6 - 30/10	Vinter 31/10 - 31/3	Tjällossning 1/4 - 31/5
Bärlager	11	7	11,5
Förstärkningslager	7,5	5	8
Undergrund	13	13	13

4.3.1.4 Spårdjupsmodell

EraPave beräknar spårdjup för varje lager och kan göra det utifrån fyra olika modeller, se Figur 25.



Figur 25. EraPave, flik spårdjup

Enligt mailkontakt med Shafiqur Rahman¹³ har spårdjupsmodell 2 (benämnd Tseng & Lytton 1981 i EraPave) tagits fram för finkornig undergrund, och presterat bra i laborieförsök som testat modellen för detta. Med anledning av detta väljs modell 2 för beräkning av spårdjup i undergrunden.

Vidare uppger Rahman att spårdjupsmodell 4 (benämnd Rahman & Erlingsson 2015 i EraPave) tagits fram utifrån triaxiella försök på grovkornigt material, varför modell 4 väljs för beräkning av spårdjup i bärlager och förstärkningslager.

Parametrarna a, b och c för modell 2 fås från programmets exempelfil, där värdena använts på liknande material i ett undergrundslager.

Parametrarna a, b och c för modell 4 har tillhandahållits av Abubeker Ahmed¹⁴ (se Figur 26) och är baserade på triaxiella försök utförda av Shafiqur Rahman och Sigurdur Erlingsson (se (Rahman & Erlingsson, 2015)). Parametrarna har inte validerats eller kalibrerats.

Fem material studerades i de triaxiella försöken, och parametrar togs fram för varje material: krossgrus från ett vägarbete i Sverige (VKB), två från Danmark (SG1 och SIEM30) och två från Sverige (samma material, två olika kornstorleksfördelningar – inte från vägarbete, Skärlunda n=0,35 och Skärlunda n=0,62) (Rahman & Erlingsson, 2015). Den materialtyp

¹³ Shafiqur Rahman, forskare Statens väg- och transportinstitut (VTI), mailkontakt 2018-05-08

¹⁴ Abubeker Ahmed, forskare Statens väg- och transportinstitut (VTI), mailkontakt 2018-04-10

vars parametrar som använts är VKB, då materialet är taget från ett vägarbete i Sverige och består av krossgrus – vilket bedömdes mest likt det aktuella fallet.

Material	w [% by weight]	Degree of saturation [%]	Dry density [gm/cc]	Degree of compaction [%]	Model parameters		Quality of fit	
					$(c = 0.5)$		R^2	Correct shakedown range predictions [%]
					a	b		
VKB	2	31,6	2,19	99	0,01282	0,067	0,97	
	4,5	71	2,19	99	0,00132	0,43328	0,994	
	6	94,7	2,19	99	0,00373	0,23535	0,959	

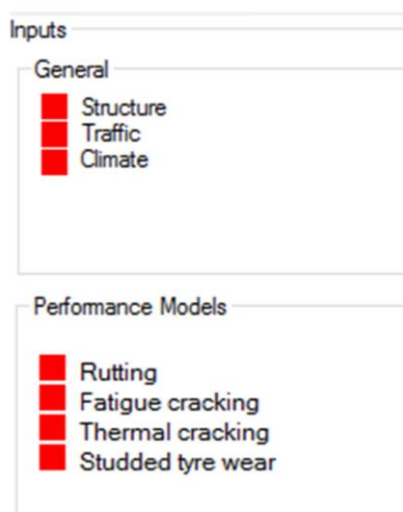
Figur 26. Tillhandahållna spårdjupsparametrar för modell 4 (VKB)¹⁴

De tillhandahållna parametrarna a och b har på inrådan från Rahman¹⁵ multiplicerats med 1000 respektive 100 innan de använts i EraPave.

För bärlagret och undergrunden är $w > 6\%$, oavsett klimat, vilket gör att parametrarna för $w=6\%$ används i alla körningar. För förstärkningslagret är dock $w=5\%$ vintertid och $> 6\%$ under sommar och tjällossning. Detta gör att parametrarna för detta lager varierar: värdena för $w=4,5\%$ vintertid och för $w=6\%$ under sommar och tjällossning.

4.3.1.5 Utgångsläge

Input till EraPave kan i dagsläget göras via tre kategorier som avser generell input (struktur, trafik och klimat) och två kategorier som avser input till de tillståndsm modeller som programmet i dagsläget kan hantera (spårdjup och utmattningssprickor), se Figur 27. Input i samtliga fem kategorier måste anges för att programmet ska kunna köras. Nedan följer en genomgång av vilken input som använts när för de fyra första kategorierna. Input för utmattningssprickor har matats in, men närmare beskrivning utelämnas då detta arbete inte beaktar utmattningssprickor.



Figur 27. Input EraPave (skärmsklipp från EraPave)

Följande förutsättningar benämns *utgångläge* och har antagits i samtliga körningar, se Figur 27-31.

Struktur

Pavement structure

Number of layers Number of stress sensitive unbound layer

Pavement geometry and material properties

Layer	Material	Thickness (cm)	Modulus (MPa)	Poisson's Ratio (-)	Unit weight (kN/m3)
1	Crushed rock		450	0,35	25
2	Crushed rock		450	0,35	25
3	Fine sand	1E+300	100	0,35	25

Constants for stress sensitiv unbound layers

Layer	K1 (-)	K2 (-)	K3 (-)	Ko (-)	Sublayers

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{3p}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Mr = resilient modulus (kPa) P = mean stress (kPa) and pa = 100kPa
 k1, k2 and k3 = constants tau_oct = octahedral shear stress (kPa)

Ok Cancel

Figur 28. Utgångläge struktur

Trafik

Axel configuration

Contact pressure (kPa)

Contact radius (cm)

Axle load (kN)

Wheel spacing (cm)

Axle spacing (cm)

Traffic wander Std deviation (cm)

Select WIM data

WIM data is not loaded

Traffic Volume

AADT per lane

Load equivalency factor (LEF)

Growth rate (%)

Percent heavy traffic (%)

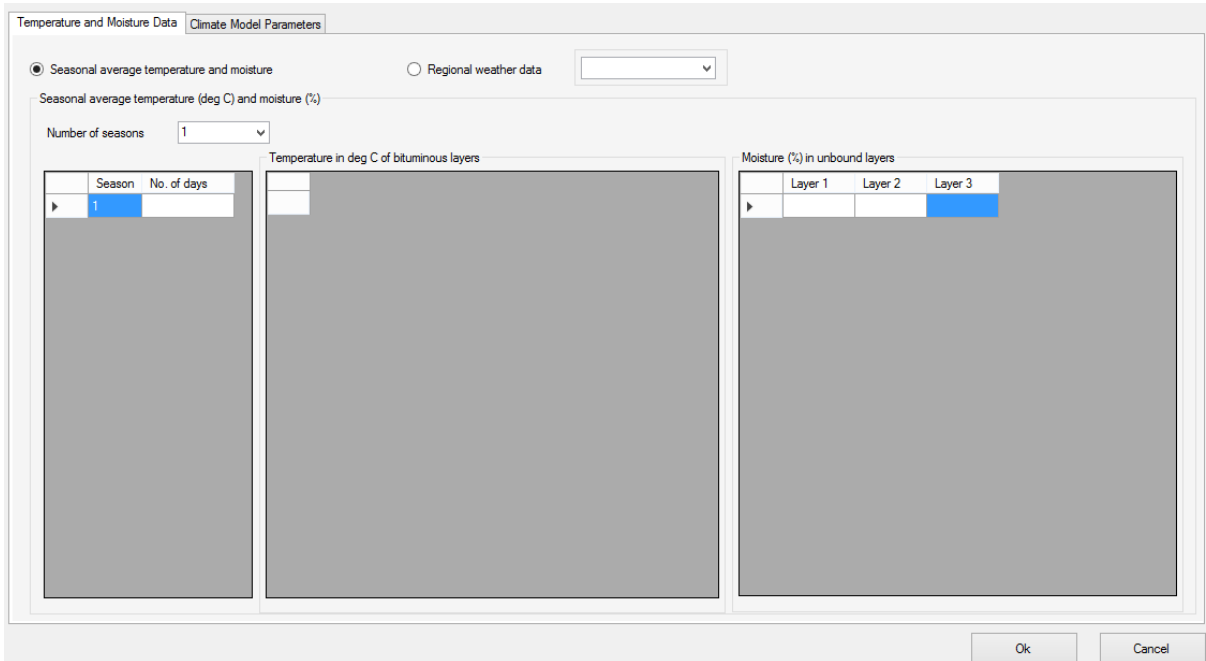
Design period (years)

Distribution of axle types in the AADT (%)

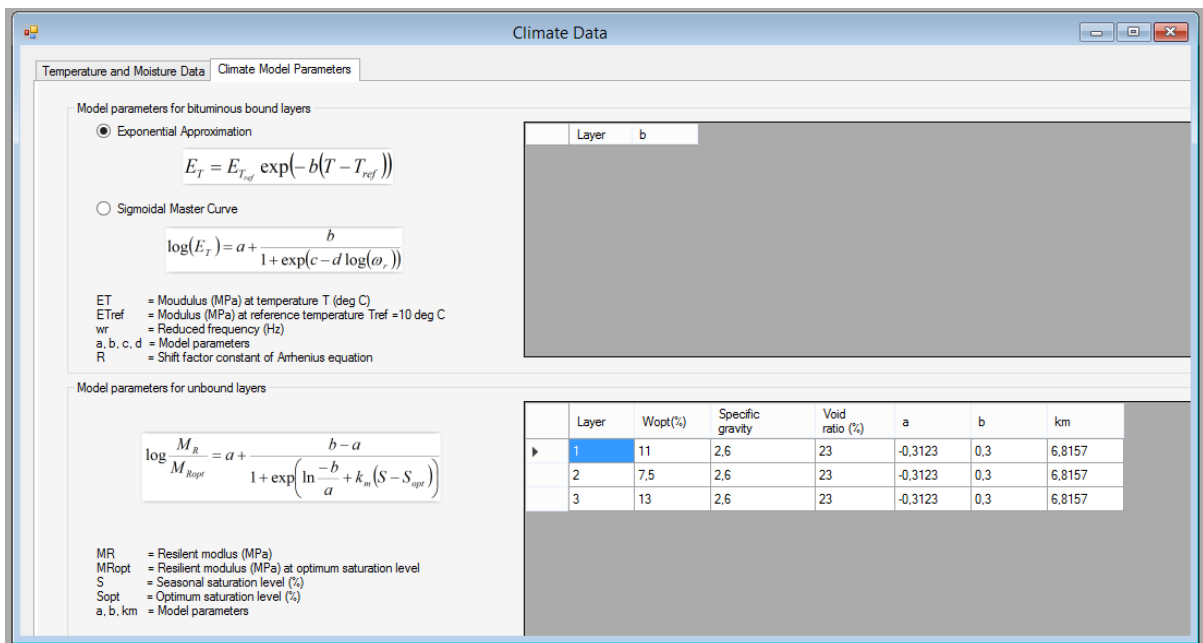
Steering Single Tandem Tridem Quad

Ok Cancel

Figur 29. Utgångläge trafik



Figur 30. Utgångsläge klimat 1(2)



Figur 31. Utgångsläge klimat 2(2)

Spårdjup

Permanent deformation models and parameters

Permanent deformation models

Model 1 (MEPDG) Model 2 (Tseng and Lytton, 1981) Model 3 (Korkiala-Tantu, 2005) Model 4 (Rahman and Erlingsson, 2015)

$$\varepsilon_p = aT^b N^c \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_p = ae^{-\left(\frac{b}{N}\right)^c} \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_p = aN^b \frac{R}{c-R}$$

$$\varepsilon_p = aN^{b(\varepsilon_r)^c} \varepsilon_r$$

a, b and c are material constants, e_r resilient strain p_a = 100kPa, q and p are deviatoric and hydrostatic stress
T = temperature (deg C), N = number of load cycles R is stress ratios and it is a function of angle of internal friction and cohesion

Model parameters

	Layer	Material	Model	a	b	c	Phy (o)	Cohesion (kPa)	Sublayers
▶	1	Crushe...	Model 4	3,73	23,54	0,5	0	0	2
	2	Crushe...	Model 4			0,5	0	0	2
	3	Fine s...	Model 2	22	80000	0,3	0	0	10

Ok Cancel

Figur 32. Utgångsläge spårdjup

4.3.1.6 Körningsberoende tillägg

För variation av strukturparametrarna *tjocklek bärlager* och *tjocklek förstärkningslager*:

- Tjocklek på bär- och förstärkningslager varierande enligt avsnitt 4.3.1.1
- Beroende på aktuell fordonstyp, axelkonfigurationsvärden för dumper eller lastbil
- ÅDT = 125 f/d
- Vatteninnehåll för de tre lagren enligt sommarvärden, se Tabell 10
- *Antal dagar* för säsongen 365
- Spårdjupsparametern *a* och *b* för förstärkningslagret sattes till sommarvärden ($w=7,5\%$, se Tabell 10 samt Figur 26): $a = 0,00373 \cdot 1000 = 3,73$, $b=0,2354 \cdot 100 = 23,54$

För variation av trafikparametern *ÅDT/körfält*:

- Tjocklek på bär- och förstärkningslager 5 cm
- Styvhetsmoduler för de tre lagren enligt sommarvärden, se Tabell 7
- ÅDT per körfält varierande mellan 0 och 125.
- Beroende på aktuell fordonstyp, axelkonfigurationsvärden för dumper eller lastbil
- Vatteninnehåll för de tre lagren enligt sommarvärden, se Tabell 10
- *Antal dagar* för säsongen 365

- Spårdjupsparametern a och b för förstärkningslagret sattes till sommarvärden ($w=7,5$ %, se Tabell 10 samt Figur 26): $a = 0,00373 \cdot 1000 = 3,73$, $b=0,2354 \cdot 100 = 23,54$

Vid ändring av dimensioneringsperioden till mindre än ett år svarar EraPave med att avrunda till 0. För att komma runt problemet och ändå visa på ett minskat antal fordon i de fall kortare dimensioneringsperioder betraktas, regleras detta via fältet *ÅDT per körfält* enligt:

$$x \cdot 365 = 125 \cdot \text{betraktat antal dagar}$$

Där x motsvarar det värde som matas in i programmet.

För variation av klimatparametern *antal dagar sommar*:

- Tjocklek på bär- och förstärkningslager 5 cm
- Styvhetsmoduler för de tre lagren enligt sommarvärden, se Tabell 7
- Beroende på aktuell fordonstyp, axelkonfigurationsvärden för dumper eller lastbil
- Antal fordon under aktuell period regleras med hjälp av ÅDT/körfält enligt:

$$x \cdot 365 = 125 \cdot \text{betraktat antal dagar}$$

Där x motsvarar det värde som matas in i programmet i fältet ÅDT/körfält.

- Vatteninnehåll för de tre lagren enligt sommarvärden, se Tabell 10
- För varje körning varierade *antal dagar* mellan 1 och 365, se Bilaga 1 och 2.
- Spårdjupsparametern a och b för förstärkningslagret sattes till sommarvärden ($w=7,5$ %, se Tabell 10 samt Figur 26)): $a = 0,00373 \cdot 1000 = 3,73$, $b=0,2354 \cdot 100 = 23,54$

För variation av klimatparametern *antal dagar vinter*:

- Tjocklek på bär- och förstärkningslager 5 cm
- Styvhetsmoduler för de tre lagren enligt vintervärden, se Tabell 7
- Beroende på aktuell fordonstyp, axelkonfigurationsvärden för dumper eller lastbil
- Antal fordon under aktuell period regleras med hjälp av ÅDT/körfält enligt:

$$x \cdot 365 = 125 \cdot \text{betraktat antal dagar}$$

Där x motsvarar det värde som matas in i programmet i fältet ÅDT/körfält.

- Vatteninnehåll för de tre lagren enligt vintervärden, se Tabell 10
- För varje körning varierade *antal dagar* mellan 1 och 365, se Bilaga 1 och 2.
- Spår djupsparametern a och b för förstärkningslagret sattes till vintervärden ($w=5\%$, se Tabell 10 samt Figur 26): $a = 0,00132 \cdot 1000 = 1,32$, $b = 0,4333 \cdot 100 = 43,33$

För variation av klimatparametern *antal dagar tjällossning*:

- Tjocklek på bär- och förstärkningslager 5 cm
- Styvhetsmoduler för de tre lagren enligt tjällossningsvärden, se Tabell 7
- Beroende på aktuell fordonstyp, axelkonfigurationsvärden för dumper eller lastbil
- Antal fordon under aktuell period regleras med hjälp av ÅDT/körfält enligt:

$$x \cdot 365 = 125 \cdot \text{betraktat antal dagar}$$

Där x motsvarar det värde som matas in i programmet i fältet ÅDT/körfält.

- Vatteninnehåll för de tre lagren enligt tjällossningsvärden, se Tabell 10
- För varje körning varierade *antal dagar* mellan 1 och 365, se Bilaga 1 och 2.
- Spår djupsparametern a och b för förstärkningslagret sattes till tjällossningsvärden ($w=8\%$, se Tabell 10 samt Figur 26), desamma som sommarvärdena: $a = 0,00373 \cdot 1000 = 3,73$, $b=0,2354 \cdot 100 = 23,54$

4.3.2 Resultat för dumper

Körningar med avvikande vintervärden för förstärkningslagret visade på orimliga resultat, ca 50 mm spår efter ett år vinter jämfört med 2 mm efter ett år sommar, trots högre styvhetsmodul under vintern. Med anledning av detta antas spår djupsparametrar för VKB 6 % gälla även vintertid för förstärkningslagret.

Totalt genomförs 120 körningar av programmet per fordonstyp (240 körningar totalt). Vid den aktuella parametrarnas körningar varierar endast den parametrarnas värde, övriga hålls konstanta. Varje körning genererar värden på spår djup där värdena för totalt spår djup antecknas. Resultaten av de genomförda beräkningarna i EraPave finns i sin helhet i Bilaga 1.

4.3.3 Resultat för lastbil

Körningar med avvikande vintervärden för förstärkningslagret visar på orimliga resultat, ca 150 mm spår efter ett år vinter jämfört med 7 mm efter ett år sommar, trots högre styvhetsmodul under vintern. Med anledning av detta antas spår djupsparametrar för VKB 6 % gälla även vintertid för förstärkningslagret.

Totalt genomförs 120 körningar av programmet per fordonstyp (240 körningar totalt). Vid den aktuella parametrarnas körningar varierar endast den parametrarnas värde, övriga hålls

konstanta. Varje körning genererar värden på spårdjup där värdena för totalt spårdjup antecknas. Resultaten av de genomförda beräkningarna i EraPave finns i sin helhet i Bilaga 2.

4.4 Samband mellan parametrar och deformation



4.4.1 Metod

För att erhålla ett matematiskt samband mellan inparametrarna och de beräknade totala spårdjupen görs två regressionsanalyser (för vidare detaljer se avsnitt Regressionsanalys 3.5), en för varje fordonstyp, med hjälp av datorprogrammet MatLab. MathWorks (utvecklare MatLab) rekommenderar att analysen inkluderar en konstanterm, då f-statistik och p-värden beräknas utifrån detta antagande och alltså blir inkorrekta annars (MathWorks, u.å.). Vidare anger MathWorks att R^2 -statistik kan bli negativ för modeller utan konstanterm, vilket då indikerar att modellen inte är lämplig för datan. Trots att det antas att initialt spårdjup är 0 mm antas alltså modellen innehålla en konstanterm. Termen antas dock inte ha någon praktisk betydelse.

Kommandot `regress` används enligt nedan, där indatan är kolumnerna i Bilaga 1 eller 2.

```
function Regression
ettor=ones(120,1);
load parametrar
X=[ ettor TjocklekBar TjocklekForstark ADT DagarSommar DagarTjallossning
DagarVinter];
Y=Spardjup;
[B,BINT,R,RINT,STATS] = regress(Y,X)
```

4.4.2 Resultat för dumper

Regressionsanalysen gav de resultat som finns presenterade i Tabell 11

Tabell 11. Resultat av regressionsanalys för dumper

	B	Konfidensintervall för B	
Konstant	-3,2926	-3,7564	-2,8289
Tjocklek bärlager	0,2917	0,2490	0,3343
Tjocklek förstärkningslager	0,0380	0,0264	0,0497
ÅDT/körfält	0,0158	0,0126	0,0190
Antal dagar sommar	0,0078	0,0071	0,0085
Antal dagar vinter	0,0080	0,0066	0,0093
Antal dagar tjällossning	0,0073	0,0059	0,0086

Det samband som föreslås är alltså:

$$S = -3,2926 + 0,2917t_{bär} + 0,0380t_{förstärk} + 0,0158 \cdot \text{ÅDT}_k + 0,0078\text{Å}_{\text{sommar}} \\ + 0,0080\text{Å}_{\text{vinter}} + 0,0073\text{Å}_{\text{tjällossning}}$$

Där

S = totalt spår djup (mm)

$t_{bär}$ = tjocklek bärlager (cm)

$t_{förstärk}$ = tjocklek förstärkningslager (cm)

ÅDT_k = årsdygnstrafik/körfält

Å_{sommar} = antal dagar sensommar/höst

$\text{Å}_{\text{tjällossning}}$ = antal dagar tjällossning

Å_{vinter} = antal dagar vinter

Det anropade kommandot presenterar även statistik om det framtagna sambandet. Denna statistik finns återgiven i Tabell 12.

Tabell 12. Statistik från regressionsanalys för dumper

	Värde
R²-värde	0,8997
F-statistik	169,0127
p-värde för hela modellen	0,0000
Estimering av felvarians	0,1935

4.4.3 Resultat för lastbil

Regressionsanalysen gav de resultat som finns presenterade i Tabell 13.

Tabell 13. Resultat av regressionsanalys för lastbil

	B	Konfidensintervall för B	
Konstant	-7,2117	-8,0090	-6,4143
Tjocklek bärlager	0,0857	0,0124	0,1590
Tjocklek förstärkningslager	-0,0262	-0,0462	-0,0062
ÅDT/körfält	0,0545	0,0490	0,0599
Antal dagar sommar	0,0238	0,0225	0,0251
Antal dagar vinter	0,0225	0,0202	0,0248
Antal dagar tjällossning	0,0165	0,0142	0,0188

Det samband som föreslås är alltså:

$$S = -7,2117 + 0,0857t_{bär} - 0,0262t_{förstärk} + 0,0545 \cdot \text{ÅDT}_k + 0,0238\text{Å}_{\text{sommar}} \\ + 0,0225\text{Å}_{\text{vinter}} + 0,0165\text{Å}_{\text{tjällossning}}$$

Där

S = totalt spår djup (mm)

$t_{bär}$ = tjocklek bärlager (cm)

$t_{förstärk}$ = tjocklek förstärkningslager (cm)

ÅDT_k = årsdygnstrafik/körfält

Å_{sommar} = antal dagar sensommar/höst

$\text{Å}_{\text{tjällossning}}$ = antal dagar tjällossning

Å_{vinter} = antal dagar vinter

Det anropade kommandot presenterar även statistik om det framtagna sambandet. Denna statistik finns återgiven i Tabell 14.

Tabell 14. Statistik från regressionsanalys för lastbil

	Värde
R²-värde	0,9402
F-statistik	296,1516
p-värde för hela modellen	0,0000
Estimering av felvarians	0,5720

5 Digitalt verktyg

Ett enklare digitalt verktyg tas fram med hjälp av programmet Microsoft Excel, där celler knyts till varandra enligt de samband som kommit fram av genomförda regressionsanalyser. Val av fordonstyp har i programmet lagts till som en parameter i kategorin ”Trafik”. En skärmdump från programmet visas i Figur 33.

		TRAFIK		KLIMAT			SPÅRDJUP (mm)
Tjocklek bärlager	Tjocklek förstärkningslager	Fordonstyp	ÅDT/körfält	Antal dagar sommar	Antal dagar vinter	Antal dagar tjällossning	
0,01-15 cm	0,01-40 cm	Dumper/Lastbil	0-125	0-365	0-365	0-365	
5	10	Lastbil	60	30	0	0	0,804
		Dumper Lastbil					

Figur 33. Skärmdump från framtaget beräkningsprogram

Då spår djupsberäkningar endast gjorts på de angivna intervallen för varje parameter, är det också endast inom dessa intervall som programmet är lämpligt.

6 Jämförelse med andra modeller

6.1 Skogsstyrelsen

För en mer detaljerad beskrivning av hur metoden fungerar, se avsnitt 3.4.3.3.

Antagandet görs att fordon på de studerade tillfälliga vägarna, exempelvis interna byggvägar, generellt håller låga hastigheter. Vidare görs antagandet att anläggare av de studerade vägarna, exempelvis entreprenörer, generellt vill använda dessa vägar på ett så effektivt sätt som möjligt och inte behöva stänga av vägarna vid sämre väderlek. Med viss reservation för extremfall.

Dessa antaganden medger en skogsbilsväggklass 4B enligt Skogskunskap (2016b), se Tabell 15.

Tabell 15. Skogsbilvägar klassificering (Skogskunskap, 2016d)

TILLGÄNGLIGHET	GEOMETRISK STANDARD			
	1 60 km/h	2 40 km/h	3 30 km/h	4 20 km/h
A Last- och personbilstrafik hela året	1A	2A	3A	
B Lastbilstrafik hela året utom vid svår tjällossning. Personbilstrafik hela året.	1B	2B	3B	
C Lastbilstrafik hela året utom under tjällossnings- och ihållande regnperioder. Personbilstrafik hela året utom under tjällossningen		2C	3C	4C
D Lastbilstrafik i huvudsak vintertid. Personbilstrafik även sommartid.				4D

För dimensionering enligt Skogsstyrelsens *Anvisningar för projektering & byggande av Väggklass 3 och 4* (2011) krävs vidare information om undergrunden och hurvida vägen ligger i skärning eller på bank. Antagandet görs att undergrunden är siltig-sandig morän och att avrinningen är god, vilket antas likställt med en väg på bank. Enligt dessa antaganden ger Tabell 16 en total överbyggnadstjocklek på 20 cm.

Tabell 16. Underlag för dimensionering av överbyggnad (Skogsstyrelsen, 2011)

Material i underbyggnad eller undergrund		Tjälfarlig-hetsgrupp I-III		Total överbyggnadstjocklek (cm) för tillgänglighetsklass A-D						
				A		B		C		D
				Skärning	Bank	Skärning	Bank	Skärning	Bank	
Grus	I	15		5, 7 el 10		5, 7 el 10		0		
Sandigt grus										
Grusig morän										
Sandig morän	I	20		15		15		10		
Grusig sand										
Sand										
Grovmo	II	30	20	20	15	15	5	0		
Grusig morän										
Sandig morän										
Normalmorän	II	40	30	30	20	20	15	0		
Sandig moig morän										
Lerigmorän										
Moränlera	III	60	50	40	30	30	20	5		
Moig morän										
Mjäligmorän										
Finmo	II	40	30	30	20	30	15	40		
Mjäla										
Grovlera										
Grov mellanlera	II	40	30	30	20	30	15	40		
Fin mellanlera										
Finlera										
Torv		60		50				40		
Gyttja, Dy		60		50				40		

En total överbyggnadstjocklek på 20 cm innebär vidare en sammansättning enligt Tabell 17, alltså 5 cm slitlager, 10-15 cm bärlager och eventuellt 5 cm förstärkningslager.

Tabell 17. Överbyggnadens sammansättning (Skogsstyrelsen, 2011)

Tjocklek	Sammansättning
5	Avser 5 cm slitlager
10	Avser 5 cm slitlager och 5 cm bärlager alt. 10 cm bärlager
15	Avser 5 cm slitlager och 10 cm bärlager alt. 15 cm bärlager
20-60	Avser 5 cm slitlager och/eller 10-15 cm bärlager varjämte resterande del av överbyggnaden utförs som förstärkningslager, enligt vidare instruktioner i anvisningarna

För jämförelse med den framtagna modellen ställs ett värsta-fall-scenario upp, för att undvika att gynnande sker för den egna modellen. ÅDT_k sätts till 125 och beräkningarna görs för ett år. Året är uppbyggt enligt Tabell 10, alltså:

- Sommar 152 dagar
- Vinter 152 dagar
- Tjällossning 61 dagar

Enligt den framtagna modellen skulle spårdjup enligt Tabell 18 ses efter ett års användning av vägen med ett fordon per ”körfalt” var fjärde minut, åtta timmar om dagen varje dag. Hänsyn har inte tagits till mindre effektiva dagar eller semesterdagar. Det högsta spårdjupet som uppmäts är för lastbilar då vägen består av 15 cm bärlager och 5 cm förstärkningslager. Spårdjupet är då ca 9 mm.

Tabell 18. Spårdjup enligt framtagna modell (i mm) - Skogsstyrelsen

	10 cm bärlager + 10 cm förstärkningslager	15 cm bärlager + 5 cm förstärkningslager
Dumper	4,83	6,09
Lastbil	8,24	8,80

6.2 Trafikverket

För en mer detaljerad beskrivning av hur metoden fungerar, se avsnitt 3.4.3.1

Beräkning görs enligt föreslagen beräkningsgång (Vägverket, 2009):

1. Bestäm klimatzon enligt VVTK VÄG.
Klimatzon 2 antas (se Trafikverket 2011)
2. Kontrollera referenshastighet, VR.
Referenshastigheten antas vara låg
3. Beräkna antalet standardaxlar enligt VVTK VÄG
Beräkningar görs enligt TRVK Väg (Trafikverket, 2011) med hjälp av formel enligt nedan, under antagandet att ingen trafikförändring sker.

$$N_{ekv} = \text{ÅDT}_k \cdot 3,65 \cdot A \cdot B \cdot f_a \cdot f_b \cdot f_c \cdot n$$

Där

$$\text{ÅDT}_k = 125 f/d$$

$A = \text{andel tunga fordon i \%} = 100$

$B = 3,0$ (enligt Vägverket (2005), lokal väg, mycket tung trafik)

$f_a = \text{justeringsfaktor körfältsbredd, } 3,5 \text{ m} \Rightarrow 1,1$

$f_b = \text{justeringsfaktor vägtyp, annan vägtyp} \Rightarrow 0,7$

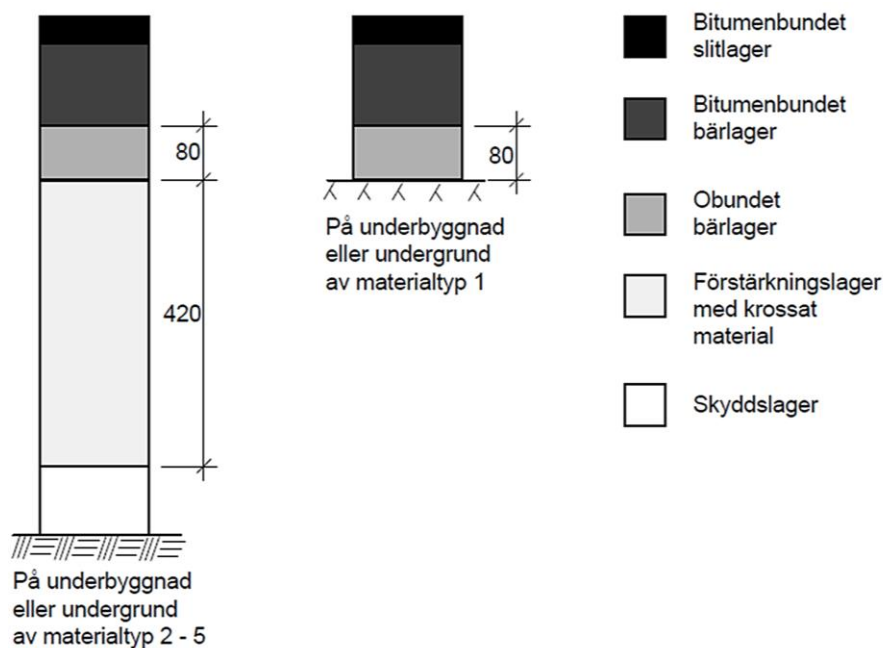
$f_c = \text{justeringsfaktor referenshastighet, } <30 \text{ km/h} \Rightarrow 1,35$

$n = \text{dimensioneringsperiod} = 1 \text{ år}$

$$\Rightarrow N_{ekv} = 125 \cdot 3,65 \cdot 100 \cdot 3,0 \cdot 1,1 \cdot 0,7 \cdot 1,35 \cdot 1 \approx 142\,282 < 500\,000$$

4. Dela in vägen i sträckor inom vilka likartade förhållanden råder med avseende på materialtyper, tjälfarlighetsklasser och dräneringsförhållanden i underbyggnad och undergrund.
En homogen sträcka beaktas. Siltig-sandig morän tillhör tjälfarlighetsklass II (Trafikverket, 2011).

5. Bestäm mått enligt Figur 3-1 och Tabell 3-2 med avseende på trafik och tjällyftning. Vid antagandet om att undergrunden är siltig-sandig morän (materialtyp 3B (Trafikverket, 2011)) anger hänvisad Figur 3-1(se Figur 34) en lageruppbyggnad där 42 cm förstärkningslager ska inkluderas,



Figur 3-1 Grusbitumenöverbyggnad

Figur 34. Hänvisad Figur 3-1 (Vägverket, 2009)

Vidare anger hänvisad Tabell 3-2 (se Tabell 19), tillsammans med antagandena om klimatzon och tjälfarlighetsklass, en överbyggnad bestående av: 4,5 cm bitumenbundet slit- och bärlager, 8 cm obundet bärlager och 42 cm förstärkningslager.

Tabell 19. Hänvisad Tabell 3-2 (Vägverket, 2009)

Tabell 3-2 Dimensionering av överbyggnad enligt DK1 - nybyggnad

GBÖ	KZ 1 - 2	KZ 3	KZ 4	KZ 5
Antal standardaxlar	500 000	500 000	500 000	500 000
Bitumenbundet slit- och bärlager	45	45	45	45
Obundet bärlager	80	80	80	80
Förstärkningslager	420	420	420	420
Tillägg för att motverka tjällyft				
Tjälfarlighetsklass 3 i terrass VR = 80 km/h eller högre	0	150	225	300
Tjälfarlighetsklass 3 i terrass VR = 70 km/h eller lägre	0	50	125	200
Tjälfarlighetsklass 4 i terrass VR = 80 km/h eller högre	200	450	650	1000
Tjälfarlighetsklass 4 i terrass VR = 70 km/h eller lägre	50	200	350	650

Med motsvarande antaganden om trafik, dimensioneringsperiod och årsuppbyggnad som i avsnitt 6.1 ger den framtagna modellen att dimensionering enligt DK1 skulle innebära de spår djup som visas i Tabell 20.

Tabell 20. Spår djup enligt framtagna modell (i mm) – DK1

8 cm obundet bärlager + 42 cm förstärkningslager

Dumper	5,46
Lastbil	7,23

7 Diskussion och slutsatser

7.1 Resultatdiskussion

Strukturparametrar

Enligt Agardh & Parhamifar (2014) bidrar ett tjockare materiallager till en bättre lastspridning till nästkommande lager. Detta indikerar vidare att ett tjockare materiallager bidrar till mindre deformation.

För beräkningar av spårdjup med avseende på dumper gällde dock:

- Tjockare bärlager \Rightarrow större spårdjup
- Tjockare förstärkningslager \Rightarrow större spårdjup upp till en viss punkt, varefter ökad tjocklek \Rightarrow minskat spårdjup.

För beräkningar med avseende på lastbil gällde inte detsamma som för dumper, utan:

- Tjockare bärlager \Rightarrow minskat spårdjup upp till en viss punkt, varefter ökad tjocklek \Rightarrow ökat spårdjup
- Tjockare förstärkningslager \Rightarrow fluktuerande spårdjup: initialt minskande, därefter medgav fortsatt ökad tjocklek till ökat spårdjup varefter ytterligare tjockare lager återigen gav ett minskat spårdjup.

Ungefär samma tendenser ses även efter att matematiska samband mellan lagertjocklekar och spårdjup tagits fram, se Tabell 21 och Tabell 22.

Tabell 21. Resultat regressionsanalys strukturparametrar, dumper

	B	Konfidensintervall för B	
Tjocklek bärlager	0,2917	0,2490	0,3343
Tjocklek förstärkningslager	0,0380	0,0264	0,0497

Tabell 22. Resultat regressionsanalys strukturparametrar, lastbil

	B	Konfidensintervall för B	
Tjocklek bärlager	0,0857	0,0124	0,1590
Tjocklek förstärkningslager	-0,0262	-0,0462	-0,0062

För fordonstypen dumper visar sambandet att:

- Ökning av både bärlager- och förstärkningslagertjocklek leder till ökat spårdjup

För fordonstypen lastbil visar sambandet att:

- Ökad bärlagertjocklek ger ökat spårdjup
- Ökad förstärkningslagertjocklek leder till minskat spårdjup

De genomförda beräkningarna visar alltså på delvis samstämmighet med teorin. De matematiska sambanden visar dock på svag samstämmighet med teorin. Enligt dem skulle en tunnare konstruktion ge längre livslängd och bäst konstruktion alltid vara ingen överbyggnad.

Varför det skiljer sig mellan beräkningar i EraPave och de framtagna matematiska sambanden kan vara för att varje beräkning i EraPave utgår ifrån ett specifikt fall. Således beror de beräknade resultaten på fler parametrar (exempelvis antaget klimat) än den som beaktas (exempelvis tjocklek bärlager). Vidare hade alltså andra resultat, och möjligtvis även andra tendenser, erhållits om andra beräkningssituationer studerats. De matematiska sambanden ger vidare inte ett situationsberoende resultat, utan en mer generell bild där samtliga situationer vägts samman – något som alltså skulle kunna vara en orsak till att skillnader syns mellan beräkningar och de matematiska sambanden.

Skillnader mellan beräkningar och samband kan även bero på att felaktiga antaganden gjorts i samband med regressionsanalyserna. Exempelvis har ett linjärt samband antagits mellan parametrar och spårdjup, vilket alltså kanske inte gäller. Dock visar statistik kopplat till de matematiska sambanden att sambanden ger en bra bild av datan.

R^2 -värdet är enligt teorin ett värde mellan 0 och 1 som anger i hur stor utsträckning datan kan förklaras av det framtagna sambandet. Ju närmare 1 värdet är, i desto högre utsträckning kan datan förklaras av det framtagna sambandet. R^2 -värdet för de två regressionsanalyserna var:

- Dumper: 0,8997
- Lastbil: 0,9402

Dessa värden anses vara nära 1, varför datan anses kunna förklaras av sambanden i hög utsträckning.

Vidare visar konfidensintervallen för B-värdena i samband med regressionsanalyserna inom vilket intervall B-värdena med 95 % sannolikhet ligger (MathWorks, u.å.). Inget av konfidensintervallen för någon parameter inkluderar 0, varför det kan sägas att alla framtagna B-värden är signifikant skilda från noll. Parametrarna hade alltså inte lika gärna kunnat strykas från modellen, något som vidare understryker samtliga parametrars, inklusive strukturparametrarnas, viktighet i modellen.

Att de matematiska samband som tagits fram beaktar lagertjocklekar på ett sätt som går emot teorin kan alltså inte helt förklaras av att de matematiska sambanden skulle vara felaktiga. Detta gäller vidare då tendenserna även ses vid genomförda spårdjupsberäkningar.

Förklaringar som kvarstår är därför:

- Brister i teorin
- Brister i beräkningarna

Med *brister i teorin* menas att den generella bild som presenteras i teorin eventuellt inte är tillämplig i detta fall. De ansatta styvhetsmodulerna och fukthalterna kan till exempel innebära att ökad tjocklek visst ger ökat spårdjup.

Brister i beräkningarna kan vara i form av att mindre lämpliga antaganden gjorts som påverkat de beräkningar som genomförts. Det misstänks till exempel att de materialparametrar som matats in för att motsvara undergrunden siltig-sandig morän i EraPave medgett en ”för bra” undergrund. Vid studie av spårdjup per lager ses nämligen att den större delen av deformationen genomgående sker i antingen bär- eller förstärkningslagret. Detta indikerar vidare att minst spårdjup erhålls om dessa lager helt enkelt inte finns. Alltså, precis som modellen visar, att tunnare lager \Rightarrow mindre spårdjup. Att undergrunden siltig-sandig morän skulle vara så pass stabil ses inte som en omöjlighet, men inte heller som normalfallet.

Trafikparametrar

För både lastbil och dumper visade både beräkningar och framtagna matematiska samband att ökad trafik ger ökat spårdjup. Detta stämmer med tidigare teorier om att trafik är en av de faktorer som har störst påverkan på nedbrytningen (Olin, 2016).

Samtliga spårdjupsberäkningar visar att lastbilar bidrar till större spårdjup än vad dumprar gör, vilket stämmer med teorin. Detta gäller eftersom lastbilar har högre kontaktryck (last i förhållande till däckens kontaktradie) än vad dumprar har. De matematiska sambanden visar dock inte helt samma bild. Sambanden anger att utvecklingen av spårdjup med avseende på klimatparametrarna är enligt teorin, men att utvecklingen av spårdjup med avseende på lagertjocklekar är större när det gäller dumper än lastbil. Denna skillnad mellan vad beräkningarna och de matematiska sambanden visar tros, likt strukturparametrarna, kunna bero på:

- att beräkningarnas resultat beror på de förutsättningar som antagits medan sambanden är generaliserade
- att de matematiska sambanden inte är en perfekt anpassning av beräkningsresultaten

Klimatparametrar

Vidare visar både spårdjupsberäkningar och matematiska samband för både dumper och lastbil på att ökad längd på årstid ger ökat spårdjup. Även detta stämmer med teorier om dimensioneringsperiodens och klimatets påverkan på nedbrytningen. Storleksmässigt stämmer dock inte riktigt resultaten med teorin.

Beräkningar för både dumper och lastbil visar på att tjällossning ger störst spårdjup, följt av sommar och sist vinter. Något som stämmer med teorin. Det matematiska sambandet visar dock inte detta utan visar istället, för båda fordonstyperna, att tjällossning är den årstid som påverkar spårdjupet minst. Denna skillnad mellan vad beräkningarna och de matematiska sambanden visar tros kunna förklaras på motsvarande sätt som för struktur- och trafikparametrarna.

Jämförelser

Under litteraturstudien framkom att den dimensionering av tillfälliga vägar som görs idag på Skanska Sverige AB i dagsläget är erfarenhetsbaserad eller icke-existerande. Ny väglinje kan utnyttjas för tillfälliga transporter genom att fordon tillåts köra på förstärkningslagret innan resterande väguppbyggnad sker. I de fall detta inte är möjligt sker istället uppbyggnaden av den tillfälliga utifrån erfarenhet inom produktionen utifrån vad som fungerat bra i tidigare projekt.

Detta arbete betraktar inte tillfälliga vägar som egentligen är ny väglinje under uppbyggnad, varför denna metod inte heller kan utvärderas i detta arbete.

Vissa svårigheter finns även med att utvärdera uppbyggnaden av tillfälliga vägar utifrån erfarenhet inom olika produktioner. Detta då de lagertjocklekar som faktiskt används vid denna typ av dimensionering är svårbedömda och troligtvis varierar beroende på produktion.

Ett försök gjordes dock genom att jämföra den framtagna modellen med två metoder som framkom som vanliga i samband med dimensionering av lågtrafikerade vägar: Skogsstyrelsens tabellmetod och Trafikverkets DK1-metod. Richard Nilsson anger till exempel att Skanska Sverige AB använder Skogsstyrelsen skrift (2011), se avsnitt Skanska Sverige AB 3.4.3.2 som stöd vid dimensionering av mer permanenta tillfälliga vägar.

Utifrån användandet av den framtagna modellen på de lagertjocklekar som föreslås vid användning av metoderna erhöles de värden på spårdjup som presenteras i Tabell 23 och Tabell 24.

Tabell 23. Spårdjup enligt framtagna modell (i mm) – Skogsstyrelsen

	10 cm bärlager + 10 cm förstärkningslager	15 cm bärlager + 5 cm förstärkningslager
Dumper	4,83	6,09
Lastbil	8,24	8,80

Tabell 24. Spårdjup enligt framtagna modell (i mm) – DK1

	8 cm obundet bärlager + 42 cm förstärkningslager
Dumper	5,46
Lastbil	7,23

De lagertjocklekar som användes i beräkningarna är troligtvis avsedda för en längre dimensioneringsperiod än det år som betraktas i den framtagna modellen. Möjligheten finns därför att fallet "ettårstrafik på 20-årsväg" betraktas, vilket kan vara en av anledningarna till de låga spårdjupen. Trafikverket menar dock att DK1 ska användas *upp till* 500 000 standardaxlar. Vidare saknas tydliga instruktioner på hur eventuell nedskalning (av båda metoderna) ska gå till, varför beräkningarna genomförts på detta sätt.

Edvardsson (2015) anger hur en grusväg ska tillståndsbedömas utifrån bärighetsberoende spår:

- Svårighetsgrad 1: spår i vägbanan på 10-25 mm
- Svårighetsgrad 2: Spår i vägbanan på 25–50 mm.

- Svårighetsgrad 3: Spår i vägbanan på mer än 50 mm.

Utifrån detta fås att ingen av de betraktade lageruppbyggnaderna ens uppnår svårighetsgrad 1 efter ett år. Något som även ska ställas i relation till att de angivna gränsvärdena avser personbilstrafik. Större spår djup bedöms kunna accepteras vid tyngre trafik med fler och/eller bredare hjul, samtidigt som god komfort uppnås.

7.2 Metoddiskussion

Den generella metoden för arbetet där utgångspunkten är en litteraturstudie som vidare arbete bygger på visade sig vara ett lyckat koncept. Litteraturstudien fungerade bra som introduktion till ämnet, men också som input till den egna modellen. Från litteraturstudien kom det exempelvis fram hur dimensionering sker i dagsläget i andra sammanhang samt vilka som är de främsta nedbrytningsfaktorerna. Något som kunde användas både som inspiration och direkt input till den egna modellen.

Litteraturstudien möjliggjorde vidare jämförelse mellan den framtagna och redan existerande metoder, vilket styrkt arbetet då modellen kunnat komma i ett realistiskt sammanhang.

Metoden för modellframtagningen finns återgiven i Figur 35.



Figur 35. Metod modellframtagning

Denna metod visade sig fungera väl på en övergripande nivå. Varje steg kunde genomföras på avsett sätt med resultat som i stort gav det som eftersökts. Vissa svårigheter uppstod dock i steg tre, då programmet EraPave skulle användas. EraPave saknar för tillfället användarinstruktioner och de förtydliganden som finns i programmet, som exempelvis vilka modeller som används för klimat- och spår djupsberäkningar, hjälper föga någon som inte redan är insatt i de modellerna. Det visade sig även att det som ses programmets stora fördel, de många möjligheter till detaljstyrning som finns i programmet, också kom med en baksida. De få förval som finns i programmet medgav nämligen att en gedigen studie av rimliga värden att sätta som input krävdes.

Den felkälla som noterats under arbetets gång är att spår djupsparametrarna a och b som använts i samband med spår djupsberäkning i EraPave är framtagna via triaxialförsök, men har i dagsläget inte validerats eller kalibrerats. Att validering och kalibrering är nödvändig innan parametrarna kan användas med full trovärdighet visade sig dock under arbetes gång. Användning av något annorlunda parametrar till följd av något lägre fukthalt i materialet (förstärkningslager vintertid) påvisade nämligen vad som bedömdes vara orimliga resultat på spår djupet. Resultat som dessutom avvek markant från tidigare då genomförda beräkningar. Detta gör vidare att visst ifrågasättande även kan göras av övriga resultat (trots rimliga värden) då de parametrarna som använts för de beräkningarna tagits fram på samma sätt som de parametrar som gav orimliga resultat.

7.3 Slutsatser

Slutsatser dras mot bakgrund av framkomna resultat och utgår från arbetets frågeställningar:

- Hur sker dimensioneringen av tillfälliga vägar idag?

Trafikverket rekommenderar att dimensionering av lågtrafikerade vägar sker enligt dimensioneringsklass (DK) 1. Lågtrafikerade vägar definieras som vägar där antalet standardaxlar inte väntas överstiga 500 000. Dimensionering sker utifrån en tabell som föreslår lagertjocklekar baserat på klimatzon, tjälfarlighetsklass i terrass och referenshastighet.

Skogsstyrelsen rekommenderar att skogsbilvägar i klass 3 och 4 dimensioneras enligt *Anvisningar för projektering och byggande av vägklass 3 och 4* (Skogsstyrelsen, 2011). Dimensionering enligt denna skrift sker utifrån en tabell som föreslås lagertjocklekar baserat på undergrundsmaterial, vägens tillgänglighetsklass och huruvida vägen ligger i skärning eller på bank.

Skanska Sverige AB dimensionerar ofta inte alla tillfälliga transportvägar för dumpers och lastbilar utan lageruppbyggnaden baseras på vad som fungerat tidigare på andra arbetsplatser. Ibland utnyttjas förstärkningslagret i ny väglinje som tillfällig transportväg. Mer permanenta tillfälliga vägar dimensioneras med stöd av *Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion* (Trafikverket, 2011) och/eller Skogsstyrelsens *Anvisningar för projektering och byggande av vägklass 3 och 4* (Skogsstyrelsen, 2011).

- Går det att ta fram en dimensioneringsmodell specifikt anpassad för vägar med korta livslängder?

Enligt det genomförda arbetet går det att bygga en modell utifrån resultat framtagna med hjälp av EraPave. I EraPave har dimensioneringsperioder ned till ett år kunnat betraktas. För att simulera kortare livslängder än så har resultat erhållits genom samma dimensioneringsperiod, men minskat ÅDT. EraPave kan behandla klimatperioder ned till en dag.

För att den framtagna modellen ska kunna ses som helt pålitlig krävs vidareutveckling och utvärdering. Utvärdering i form av HVS-tester eller praktiska mätningar skulle kunna stärka modellens trovärdighet.

- Vilka parametrar bör dimensioneringen av en väg som ska ligga en begränsad tid ta hänsyn till?

Tre övergripande kategorier identifierades som särskilt påverkande på nedbrytningen: väggroppens uppbyggnad (struktur), trafiken och klimatet. För väggroppens uppbyggnad framgick att lagertjocklek, styvhet och fukthalt är viktiga faktorer att beakta vid dimensionering. För trafikens påverkan identifierades det genomsnittliga trafikflödet under ett dygn (ÅDT), fordonstyp och dimensioneringsperiod som avgörande faktorer. Till klimatets påverkan kunde längd på årstid, fukthalt och styvhet (eller hur fukthalten påverkar styvheten) under årstiden identifieras som bidragande till nedbrytningen och vidare viktiga att beakta i modellen.

De parametrar som ingår i modellen är därför:

- Lagertjocklek bärlager
- Lagertjocklek förstärkningslager
- ÅDT/körfält
- Antal dagar sommar
- Antal dagar vinter
- Antal dagar tjällossning
- Fordonstyp

- Hur påverkar de olika parametrarna den slutgiltiga dimensioneringen?

Det samband som föreslås gälla för dumprar:

$$S = -3,2926 + 0,2917t_{bär} + 0,0380t_{förstärk} + 0,0158 \cdot \text{ÅDT}_k + 0,0078\text{Å}_{\text{sommar}} \\ + 0,0080\text{Å}_{\text{vinter}} + 0,0073\text{Å}_{\text{tjällossning}}$$

Det samband som föreslås gälla för lastbilar:

$$S = -7,2117 + 0,0857t_{bär} - 0,0262t_{förstärk} + 0,0545 \cdot \text{ÅDT}_k + 0,0238\text{Å}_{\text{sommar}} \\ + 0,0225\text{Å}_{\text{vinter}} + 0,0165\text{Å}_{\text{tjällossning}}$$

Där

S = totalt spår djup (mm)

$t_{bär}$ = tjocklek bärlager (cm)

$t_{förstärk}$ = tjocklek förstärkningslager (cm)

ÅDT_k = årsdygnstrafik/körfält

Å_{sommar} = antal dagar sensommar/höst

$\text{Å}_{\text{tjällossning}}$ = antal dagar tjällossning

Å_{vinter} = antal dagar vinter

- Kan skillnad ses på en väggropp dimensionerad enligt någon av dagens metoder jämfört med en väggropp dimensionerad enligt den anpassade modellen? I så fall, vilka skillnader?

De betraktade metoder som används idag ger resultat i form av lagertjocklekar. Den framtagna modellen ger resultat i form av spårdjup, vilket spårdjup vissa lagertjocklekar leder till. Metodernas resultat kan därför inte jämföras rakt av.

Om de lagertjocklekar som rekommenderas via dagens metoder utvärderas genom spårdjupsberäkning med den framtagna metoden ses dock en antydning till överdimensionering. Spårdjup som inte ses som problematiska för personbilar kunde observeras vid en dimensioneringsperiod på ett år.

Ytterligare en slutsats som kunnat dras under arbetets gång är att framtiden kommer ställa nya krav på hur vägarna utformas. Då permanenta vägar ofta dimensioneras med någon form av verktyg eller modell, där parametrarna kan justeras, bedöms detta främst kunna bli ett problem för tillfälliga vägar. Utan modell där förhållanden kan justeras, kan inte heller en god anpassning för framtiden ske. Särskilt tre faktorer kommer behöva tas hänsyn till i framtiden:

Tyngre fordon

2015 skedde en höjning av maximal totalvikt för BK1-vägar från 60 till 64 ton och 2017 instiftades en helt ny bärighetsklass i Sverige, BK4. En bärighetsklass som medger en maximal totalvikt på 74 ton. Denna nya bärighetsklass kommer initialt endast omfatta en begränsad del av det statliga vägnätet, men visionen är att hela BK1-vägnätet ska upplåtas för BK4 (Trafikverket, 2018c).

Med en trend som pekar mot tyngre och tyngre fordon som tar upp en större del av det statliga vägnätet, och med tanke på att dessa vägar omger de tillfälliga, är det inte omöjligt att även de tillfälliga vägarna också kommer uppleva en ökad trafikbelastning i framtiden. Att då dimensionera efter erfarenhet kan innebära problem, om erfarenheten av dessa fordon inte finns. En modell där parametrar som axellast, axelkonfiguration och axeltryck lätt kan justeras kan dock vara en hjälp i detta.

Förändrat klimat

SMHI spår ökad nederbörd på mellan 20-60 % innan seklets slut och har observerat mildare vintrar de senaste 20 åren (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, 2017). Skogskunskap bedömer vidare att dessa förhållanden bland annat kan innebära ökad tjällossningsproblematik (Skogskunskap, 2016c).

Att ökad vattenmängd skulle innebära en större påfrestning för vägen upplevs inte som någon större konstighet då vatten ofta anses vara vägens största fiende. Att däremot ha ett försvar som inte kan anpassa sig efter en ökad fiende upplevs däremot som en större konstighet. Att då istället ha ett försvar i form av en modell som lätt kan ta hänsyn till parametrar som fukthalt, fukthaltens påverkan på styvheten och längd på årstid kan vara ett bättre koncept

Resurshantering

För att hanteringen av naturresurser i samband med vägbyggnad ska bli mer hållbar är det enligt Miljöbalken (SFS 1998:808, Miljöbalken) inte tillåtet att använda naturgrus annat än om materialet är oersättligt. Med anledning av detta används mer och mer krossgrus i vägarna. Även om krossgrus är mer miljömässigt hållbart än naturgrus är det dock varken miljömässigt eller ekonomiskt försvarbart att använda mer krossgrus än vad som är nödvändigt.

Med erfarenhetsbaserad dimensionering eller dimensionering baserad på exempelvis årstider som inte inträffar finns dock risk för överdimensionering, något som även indikeras av resultaten i detta arbete. En metod som dels förutsätter krossgrus och dels beräknar deformation utifrån lagertjocklek kan dock hjälpa till att motverka detta. Metoden kan utvärdera huruvida en lagertjocklek är nödvändig eller om den kan minskas. Något som vidare kan bidra till ett hållbart vägbyggande, även i framtiden.

Trots ovan listade fördelar med en modell kan erfarenhet och tidigare kunskaper inte förringas. Vad som föreslås är dock att dessa kombineras med en mer teoretisk modell. Modellen kan då verka som stöd om kunskapen är bristfällig eller om kunskapen är kopplad till situationer som inte motsvarar dagsläget.

7.3.1 Förslag på fortsatt arbete

- Närmare utredning av varför ökade lagertjocklekar generellt ger större spår djup, exempelvis utvärdera andra materialparametrar för undergrunden
- Nya beräkningar i EraPave med parametrar som validerats och kalibrerats
- Praktiska mätningar för att utvärdera hur modellen presterar
- HVS-tester (Heavy Vehicle Simulator) för att utvärdera hur modellen presterar
- Uppföljning av hur tillfälliga vägar byggs ute i produktion. Sammanställning av ungefärliga lagertjocklekar.
- Fler mätningar av vattenhalter i grusvägar under längre tidsperioder i Sverige (=säsongsvariation)
- Fler mätningar av styvhetsmoduler i grusvägar under längre tidsperioder i Sverige (=säsongsvariation)
- Vidareutveckling av modellen så att nedbrytningsförloppet kan visas över tid
- Vidareutveckling av modellen som innefattar hur modellen påverkas av tyngre laster och högre fukthalter

Referenser

- Agardh, S., & Parhamifar, E. (2014). *Vägbyggnad*. Stockholm: Liber AB.
- Berglund, A. (2009). *Tjäle - en litteraturstudie med särskilt fokus på tjällossning*. (Forskningsrapport). Institutionen för Samhällsbyggnad. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Bergqvist, M., Bradley, A., Björheden, R., & Eliasson, L. (2017). *Validering av STP (Surfacing Thickness Program) för svenska förhållanden*. Arbetsrapport. Från Skogforsk nr. 920-2017. Uppsala: Skogforsk.
- Berntsen, G., & Saarenketo, T. (2005). *Drainage on low traffic volume roads*. (ROADX II Project). ROADX Network.
- Canestrari, F., D'Andrea, A., Ferrotti, G., Graziani, A., Partl, M. N., Petit, C., o.a. (2018). Advanced Interface Testing of Grids in Asphalt Pavements. i M. N. Partl (red), H. Di Benedetto (red), F. Canestrari (red), P. Marsac (red), & G. Tebaldi (red), *Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems* (ss. 127-202). Cham: Springer Nature.
- Edvardsson, K. (2013). *Lågtrafikerade vägar - en litteraturstudie utifrån nytta, standard, tillstånd, drift och underhåll*. VTI rapport 775. Linköping: VTI.
- Edvardsson, K. (2015). *Mer grus under maskineriet - handbok för tillståndsbedömning och underhåll av grusvägar*. Stockholm: Sveriges kommuner och landsting (SKL).
- Erlingsson, S., & Ahmed, A. (2013). Fast layered elastic response program for the analysis of flexible pavement structures. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (1), ss. 196-210, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.757558>.
- Ezzadin, B. (2015). *Bärighetsmätningar med Traffic Speed Deflectometer*. Examensarbete, Institutionen för Teknik och Samhälle. Lund: Lunds tekniska högskola.
- Folkbro. (u.å.). *Vägplan*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.folkbro.com/services/vagplan/>> [2018-08-22].
- Granhage, L. (2009). *Kompendium i vägbyggnad*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Hou, L., Sterling, R., & Voller, V. (2003). *Progressive lifting of shallow sewers due to frost heave*. Rapport MN/RC - 2003-25. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2 uppl., Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Kandiel, Z. (2017). *Dimensionering av överbyggnader i nordiska länder*. Examensarbete. Umeå: Umeå universitet.
- Larsson, A. (2016). *Påverkas geometriska krav på skogsbilvägar om ST-fordon införs? Adapting forest road geometric to heavy timber vehicles*. Kandidatuppsats, Institutionen för skog och träteknik. Växjö: Linnéuniversitetet. URN: urn:nbn:se:lnu:diva-54045.

-
- Lübeck, J. (2014). *Matematisk statistik AK för F,E,D,I,C,Pi; FMS012 - Föreläsningsanteckningar i statistikteori*. Matematikcentrum. Lund: Lunds universitet.
- Magnusson, F., & Paterson, D. (2005). *Program för överbyggnadsdimensionering i tungt belastade markområden*. Examensarbete, Institutionen för bygg och miljöteknik. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Mamlouk, M. S. (2006). Design of Flexible Pavements. i T. F. Fwa, *The handbook of Highway Engineering* (ss. 8-1--8-35). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Matematikcentrum. (2014). *Sambandsanalys - regression och korrelation*. Lund: Lunds universitet.
- MathWorks. (u.å.). *Regress - Multiple linear regression*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://se.mathworks.com/help/stats/regress.html>> [2018-05-18].
- NCHRP. (2000). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final document, Appendix DD-1. Illinois: Transportation Research Board of the National Research Council.
- Nguyen, B. T., & Abbas, M. (2015). Prediction of California Bearing Ratio from Physical Properties of Fine-Grained Soils. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 9 (2), ss. 136-141, DAI: urn:dai:10.1999/1307-6892/10000528.
- Nilsson, R., & Huvstig, A. (2009). *VägFEM – Ny modell för vägdimensionering med möjlighet till egna koncept och incitament*. (Projekt ID: 11719). Skanska Sverige AB.
- Näringsdepartementet. (2017). *74 tons lastbilar för jobb och klimat*. Pressmeddelande 2017-02-16. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2017/02/74-tons-lastbilar-for-jobb-och-klimat>> [2018-05-21].
- O'Flaherty, C., & Hughes, D. (2015). Introduction to pavement thickness. i C. O'Flaherty, & D. Hughes, *Highways: The location, design, construction and maintenance of road pavements* (ss. 305-344). 5 uppl., London: ICE Publishing.
- Olin, E. (2016). *Drift och underhåll av grusvägar - tillståndsbedömning samt analys av bärförmåga och grusslitlager*. Examensarbete, Institutionen för trafik och samhälle. Lund: Lunds tekniska högskola.
- Pereira, P., & Pais, J. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4 (4), ss. 316-346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.06.001>.
- Rahman, M. S., & Erlingsson, S. (2015). Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 16, No. 7, ss. 587-601.
- ROADX Network. (2013). *E-learning: Water and bearing capacity*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<http://www.roadex.org/e-learning/lessons/drainage-of-low-volume-roads/water-and-mechanical-properties-of-roads/>> [2018-05-08].
- SFS 1998:808. (Miljöbalken). Stockholm: Miljö- och energidepartementet.
- Skogskunskap. (2016a). *Skogsbilvägar och andra enskilda vägar*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/om-skogsbilvagar/skogsbilvagar-och-andra-enskilda-vagar/>> [2018-05-05].

-
- Skogskunskap. (2016b). *Skadekatalogen - vad kan vi göra åt vägskadorna?* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/drift-och-underhall/slitage-nedbrytning-och-skador-pa-vagen/skadekatalogen---vad-kan-vi-gora-at-vagskadorna/>> [2018-05-24].
- Skogskunskap. (2016c). *Vägen och klimatet.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/om-skogsbilvagar/behover-vi-fler-och-battare-vagar/vagen-och-klimatet/>> [2018-05-24].
- Skogskunskap. (2016d). *Vägklasser i skogen.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/om-skogsbilvagar/skogsbilvagar-och-andra-enskilda-vagar/vagklasser-i-skogen/>> [2018-05-20].
- Skogskunskap. (2016e). *Mått och anvisningar för skogsbilvägen.* <<https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/vagnatsplanering/matt-och-anvisningar-for-skogsbilvagen/>> [2018-05-16]; (Elektronisk källa) Tillgänglig.
- Skogsstyrelsen. (2011). *Anvisningar för projektering & byggande av Vägklass 3 och 4*. Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI. (u.å.). *Dimensioneringsmodeller.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.vti.se/sv/Forskningsomraden/Dimensioneringsmodeller/>> [2018-05-23].
- Svenska akademien. (2009). *Svensk ordbok.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://svenska.se/so/?id=43220&pz=7>> [2018-05-21].
- Sveriges geologiska undersökning. (u.å.). *Morän - spår av inlandsisen.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/inlandsisen/moran-spar-av-inlandsisen/>> [2018-05-15].
- Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI. (2017). *Klimat effekter - framtidens vatten.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.smhi.se/forskning/forskningsomraden/hydrologisk-forskning/klimat-effekter-framtidens-vatten-1.551>> [2018-05-24].
- Trafikverket & Sveriges kommuner och landsting (SKL). (2015). *Vägars och gators utformning - begrepp och grundvärden.* (TRV publikation 2015:090). Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket. (2011). *TRVK Väg - Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion.* TDOK 2011:264. Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket. (2017). *Väg.* (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/vag/>> [2018-02-14].
- Trafikverket. (2018a). *Enskilda vägar.* (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/vag/Enskilda-vagar/>> [2018-02-14].
- Trafikverket. (2018b). *NVDB på webb.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://nvdb2012.trafikverket.se/SeTransportnatverket>> [2018-02-07].
- Trafikverket. (2018c). *BK4 - ny bärighetsklass effektiviserar industrins godstransporter.* (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/barighetsklass-bk4/>> [2018-05-14].
- Transportstyrelsen. (2015). *Ändrade bruttoviktstabeller och krav för 64 ton tunga fordonskombinationer.* (Elektronisk källa) Tillgänglig:

-
- <<https://www.transportstyrelsen.se/sv/Nyhetsarkiv/andrade-bruttoviktstabeller-och-krav-for-64-ton-tunga-fordonskombinationer/>> [2018-05-21].
- Transportstyrelsen. (2017). *Lasta lagligt*. Publikationsnr. TS201616. Norrköping: Transportstyrelsen.
- Wei, L., & Fwa, T. F. (2006). Design of Rigid Pavements. i T. F. Fwa, *The handbook of Highway Engineering* (ss. 9-1--9-61). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Volvo Construction Equipment. (2018). *Produktblad A45G*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/articulated-haulers/brochures/brochure_a45g_t4f_sv_12_20052397_d.pdf?v=4uQ8Pw> [2018-05-14].
- Volvo Construction Equipment. (u.å.). *Dumper A45G*. [bild] <https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/articulated-haulers/walkaround/volvo-find-articulated-hauler-a45g-t2-t4f-1000x1000.jpg?v=P5kxPw> [2018-05-14].
- Volvo Construction Equipment. (u.å.). *Om Volvo CE*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.volvoce.com/sverige/sv-se/swecon/about-us/about-volvo-ce/>> [2018-05-18].
- Volvo Lastvagnar. (u.å.). *Lastvagn FMX 8x4 tridem*. [bild] <https://newcolorizer.volvotrucks.com/Assets/images/trucks/newfmx.png> [2018-05-14].
- Volvo Lastvagnar. (u.å.). *Om oss*. (Elektronisk källa) Tillgänglig: <<https://www.volvotrucks.se/sv-se/about.html>> [2015-05-18].
- Volvo Trucks. (2018). *Datablad FMX D13 jämnlast 8x4 Tridem luftfjädrad*. Volvo Truck Corporation.
- Wågberg, L.-G. (2003). *Bära eller brista. Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar*. 2:a upplagan. Stockholm: Svenska kommunförbundet, Vägverket och VTI.
- Vägverket. (2005). *ATB Väg, kapitel C Dimensionering*. VV Publ 2005:112. Borlänge: Vägverket.
- Vägverket. (2009). *Dimensionering av lågtrafikerade vägar - DK1 (VVMB302)*. Borlänge: Vägverket.



Bilaga 1 – Fullständiga spårdjupsberäkningar dumper

STRUKTUR		TRAFIK	KLIMAT			SPÅRDJUP (Total rut (mm))	
Tjocklek bärlager	Tjocklek förstärkningslager	ÅDT/körfält	Antal dagar sommar	Antal dagar vinter	Antal dagar tjällossning		
0,01-15 cm	0,01-40 cm	0-125	0-365	0-365	0-365		
1	0,01	5	125	365	0	0	1,453514013
2	0,8	5	125	365	0	0	1,553551293
3	1,5	5	125	365	0	0	1,677081979
4	2,2	5	125	365	0	0	1,837608681
5	3,0	5	125	365	0	0	2,073032967
6	3,7	5	125	365	0	0	2,319807396
7	4,5	5	125	365	0	0	2,639386235
8	5,2	5	125	365	0	0	2,938573152
9	5,9	5	125	365	0	0	3,247317982
10	6,7	5	125	365	0	0	3,599524417
11	7,4	5	125	365	0	0	3,895147119
12	8,2	5	125	365	0	0	4,210907011
13	8,9	5	125	365	0	0	4,461465895
14	9,6	5	125	365	0	0	4,683396938
15	10,4	5	125	365	0	0	4,893605251
16	11,1	5	125	365	0	0	5,044414352
17	11,9	5	125	365	0	0	5,177143454
18	12,6	5	125	365	0	0	5,259564786
19	13,3	5	125	365	0	0	5,3202643
20	15	5	125	365	0	0	5,356762144
1	5	0,01	125	365	0	0	1,453739605
2	5	4	125	365	0	0	2,463340282
3	5	6	125	365	0	0	3,250905683
4	5	8	125	365	0	0	3,976797562
5	5	10	125	365	0	0	4,508751561
6	5	12	125	365	0	0	4,818860466
7	5	14	125	365	0	0	4,932909035
8	5	16	125	365	0	0	4,91153084
9	5	18	125	365	0	0	4,804538848
10	5	20	125	365	0	0	4,64748636

11	5	22	125	365	0	0	4,477479233
12	5	24	125	365	0	0	4,308872789
13	5	26	125	365	0	0	4,150995393
14	5	28	125	365	0	0	4,01697902
15	5	30	125	365	0	0	3,903643101
16	5	32	125	365	0	0	3,815445644
17	5	34	125	365	0	0	3,752266217
18	5	36	125	365	0	0	3,713782796
19	5	38	125	365	0	0	3,695288614
20	5	40	125	365	0	0	3,695529906
1	5	5	0	365	0	0	0
2	5	5	7	365	0	0	1,152832848
3	5	5	14	365	0	0	1,507773996
4	5	5	20	365	0	0	1,700926748
5	5	5	26	365	0	0	1,847395774
6	5	5	32	365	0	0	1,966233066
7	5	5	39	365	0	0	2,082211791
8	5	5	45	365	0	0	2,168034517
9	5	5	51	365	0	0	2,244607173
10	5	5	57	365	0	0	2,313968784
11	5	5	64	365	0	0	2,387659634
12	5	5	70	365	0	0	2,445786671
13	5	5	76	365	0	0	2,500060873
14	5	5	82	365	0	0	2,55105735
15	5	5	89	365	0	0	2,607010066
16	5	5	95	365	0	0	2,65234147
17	5	5	101	365	0	0	2,695552183
18	5	5	107	365	0	0	2,736879276
19	5	5	114	365	0	0	2,782976415
20	5	5	125	365	0	0	2,851395262
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	18	0	0	0,113987626
3	5	5	125	35	0	0	0,405112165
4	5	5	125	52	0	0	0,660529703
5	5	5	125	69	0	0	0,883170683
6	5	5	125	86	0	0	1,113588724
7	5	5	125	103	0	0	1,278683707
8	5	5	125	120	0	0	1,473269995
9	5	5	125	137	0	0	1,59948852
10	5	5	125	154	0	0	2,271370154
11	5	5	125	171	0	0	1,861438241
12	5	5	125	188	0	0	1,94731169
13	5	5	125	205	0	0	2,076935869
14	5	5	125	222	0	0	2,159663008

15	5	5	125	239	0	0	2,238258746
16	5	5	125	256	0	0	2,350075016
17	5	5	125	273	0	0	2,414472945
18	5	5	125	290	0	0	2,518150132
19	5	5	125	307	0	0	2,584502279
20	5	5	125	365	0	0	2,851395262
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	0	18	0	0,104891587
3	5	5	125	0	35	0	0,383478354
4	5	5	125	0	52	0	0,629258592
5	5	5	125	0	69	0	0,842601242
6	5	5	125	0	86	0	1,062183931
7	5	5	125	0	103	0	1,218516222
8	5	5	125	0	120	0	1,402024114
9	5	5	125	0	137	0	1,519873199
10	5	5	125	0	154	0	1,625466215
11	5	5	125	0	171	0	1,763034443
12	5	5	125	0	188	0	1,841641783
13	5	5	125	0	205	0	1,960955404
14	5	5	125	0	222	0	2,03584679
15	5	5	125	0	239	0	2,106672633
16	5	5	125	0	256	0	2,208434894
17	5	5	125	0	273	0	2,265890353
18	5	5	125	0	290	0	2,35965262
19	5	5	125	0	307	0	2,418442692
20	5	5	125	0	365	0	2,656152117
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	0	0	18	0,11626205
3	5	5	125	0	0	35	0,410467386
4	5	5	125	0	0	52	0,668252036
5	5	5	125	0	0	69	0,893198997
6	5	5	125	0	0	86	1,126321338
7	5	5	125	0	0	103	1,293632349
8	5	5	125	0	0	120	1,491029432
9	5	5	125	0	0	137	1,619397249
10	5	5	125	0	0	154	1,735343906
11	5	5	125	0	0	171	1,886194257
12	5	5	125	0	0	188	1,973960923
13	5	5	125	0	0	205	2,10626329
14	5	5	125	0	0	222	2,191047144
15	5	5	125	0	0	239	2,271687394
16	5	5	125	0	0	256	2,386136295
17	5	5	125	0	0	273	2,452369329
18	5	5	125	0	0	290	2,558653233

19	5	5	125	0	0	307	2,627011827
20	5	5	125	0	0	365	2,901639136

Bilaga 2 – Fullständiga spårdjupsberäkningar lastbil

STRUKTUR		TRAFIK	KLIMAT			SPÅRDJUP (Total rut (mm))	
Tjocklek bärlager	Tjocklek förstärkningslager	ÅDT/körfält	Antal dagar sommar	Antal dagar vinter	Antal dagar tjällossning		
0,01-15 cm	0,01-40 cm	0-125	0-365	0-365	0-365		
1	0,01	5	125	365	0	0	11,13132399
2	0,8	5	125	365	0	0	10,93264971
3	1,5	5	125	365	0	0	10,30460474
4	2,2	5	125	365	0	0	9,549635153
5	3,0	5	125	365	0	0	8,704252437
6	3,7	5	125	365	0	0	8,155692991
7	4,5	5	125	365	0	0	7,742322521
8	5,2	5	125	365	0	0	7,547283593
9	5,9	5	125	365	0	0	7,45659217
10	6,7	5	125	365	0	0	7,467846005
11	7,4	5	125	365	0	0	7,538493459
12	8,2	5	125	365	0	0	7,709089919
13	8,9	5	125	365	0	0	7,941620173
14	9,6	5	125	365	0	0	8,252842707
15	10,4	5	125	365	0	0	8,702356101
16	11,1	5	125	365	0	0	9,1772403
17	11,9	5	125	365	0	0	9,785663783
18	12,6	5	125	365	0	0	10,35263706
19	13,3	5	125	365	0	0	10,94245346
20	15	5	125	365	0	0	12,34051082
1	5	0,01	125	365	0	0	11,18448542
2	5	4	125	365	0	0	8,061039881
3	5	6	125	365	0	0	7,401255111
4	5	8	125	365	0	0	7,502627904
5	5	10	125	365	0	0	7,804033418
6	5	12	125	365	0	0	8,089525079
7	5	14	125	365	0	0	8,285700186
8	5	16	125	365	0	0	8,395226431
9	5	18	125	365	0	0	8,435281699
10	5	20	125	365	0	0	8,415914894

11	5	22	125	365	0	0	8,365382696
12	5	24	125	365	0	0	8,290091023
13	5	26	125	365	0	0	8,203422192
14	5	28	125	365	0	0	8,112244793
15	5	30	125	365	0	0	8,020369984
16	5	32	125	365	0	0	7,931313631
17	5	34	125	365	0	0	7,847295854
18	5	36	125	365	0	0	7,769383768
19	5	38	125	365	0	0	7,697151165
20	5	40	125	365	0	0	7,630665144
1	5	5	0	365	0	0	0
2	5	5	7	365	0	0	1,924928612
3	5	5	14	365	0	0	2,691148738
4	5	5	20	365	0	0	3,190067309
5	5	5	26	365	0	0	3,612816492
6	5	5	32	365	0	0	3,985707754
7	5	5	39	365	0	0	4,376147053
8	5	5	45	365	0	0	4,682018108
9	5	5	51	365	0	0	4,966989109
10	5	5	57	365	0	0	5,234784634
11	5	5	64	365	0	0	5,529123617
12	5	5	70	365	0	0	5,768247327
13	5	5	76	365	0	0	5,996889645
14	5	5	82	365	0	0	6,216306925
15	5	5	89	365	0	0	6,461991528
16	5	5	95	365	0	0	6,66470488
17	5	5	101	365	0	0	6,860887176
18	5	5	107	365	0	0	7,051127462
19	5	5	114	365	0	0	7,266235342
20	5	5	125	365	0	0	7,59092792
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	18	0	0	0,313670315
3	5	5	125	35	0	0	0,761918056
4	5	5	125	52	0	0	1,120563996
5	5	5	125	69	0	0	1,47089446
6	5	5	125	86	0	0	1,877897296
7	5	5	125	103	0	0	2,214013544
8	5	5	125	120	0	0	2,637942645
9	5	5	125	137	0	0	2,963488156
10	5	5	125	154	0	0	3,285344904
11	5	5	125	171	0	0	3,696686927
12	5	5	125	188	0	0	3,983781602
13	5	5	125	205	0	0	4,389493659
14	5	5	125	222	0	0	4,702588848

15	5	5	125	239	0	0	5,014289074
16	5	5	125	256	0	0	5,41492459
17	5	5	125	273	0	0	5,695536943
18	5	5	125	290	0	0	6,093529238
19	5	5	125	307	0	0	6,40162212
20	5	5	125	365	0	0	7,59092792
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	0	18	0	0,256697803
3	5	5	125	0	35	0	0,617862178
4	5	5	125	0	52	0	0,90243684
5	5	5	125	0	69	0	1,176520667
6	5	5	125	0	86	0	1,492750374
7	5	5	125	0	103	0	1,749237454
8	5	5	125	0	120	0	2,07201258
9	5	5	125	0	137	0	2,31572754
10	5	5	125	0	154	0	2,555047042
11	5	5	125	0	171	0	2,861849179
12	5	5	125	0	188	0	3,07266722
13	5	5	125	0	205	0	3,372274467
14	5	5	125	0	222	0	3,600112904
15	5	5	125	0	239	0	3,826128275
16	5	5	125	0	256	0	4,118608499
17	5	5	125	0	273	0	4,320591252
18	5	5	125	0	290	0	4,609374229
19	5	5	125	0	307	0	4,829959127
20	5	5	125	0	365	0	5,68224918
1	5	5	125	0	0	0	0
2	5	5	125	0	0	18	0,323940098
3	5	5	125	0	0	35	0,788426139
4	5	5	125	0	0	52	1,161154663
5	5	5	125	0	0	69	1,526109389
6	5	5	125	0	0	86	1,950565007
7	5	5	125	0	0	103	2,302148777
8	5	5	125	0	0	120	2,745734065
9	5	5	125	0	0	137	3,087316287
10	5	5	125	0	0	154	3,425399422
11	5	5	125	0	0	171	3,857266313
12	5	5	125	0	0	188	4,159446074
13	5	5	125	0	0	205	4,586096281
14	5	5	125	0	0	222	4,916128602
15	5	5	125	0	0	239	5,244882848
16	5	5	125	0	0	256	5,666991598
17	5	5	125	0	0	273	5,963313851
18	5	5	125	0	0	290	6,383061158

19	5	5	125	0	0	307	6,70869008
20	5	5	125	0	0	365	7,965565908