

# TRVMB 114

Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat

TRV 2012:051

Titel: TRVMB 114

Utgivningsdatum: 2012-02-10

Utgivare: Trafikverket

Kontaktperson: Per Viktorsson

Uppdragsansvarig: Per Andersson

ISBN: 978-91-7467-250-3

Distributör: Trafikverket, 781 87 Borlänge, telefon: 0771-921 921.

Förord

## **Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat (TRV MB 114) .**

Bifogade beskrivning ska användas när sådana deflektionsmätdata används för att:

- klassa bärförmåga,
- utformna belastningsrestriktioner,
- prognosticera vägbanans tillståndsutveckling,
- planering av strukturella åtgärder samt
- vid efterkontroll av utförda strukturella åtgärder.

TRVMB 114 ersätterVVMB114.

Analyserna är i första hand avsedda för vägar med bitumenbundna lager.  
Metodbeskrivning för mätning av deflektionsdata se TRVMB 112.



Mats Karlsson  
cIVt

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Begrepp.....</b>	<b>3</b>
1.1	Allmänt .....	3
1.2	Beteckningar.....	3
1.3	Enheter.....	3
1.4	Benämningar.....	4
<b>2</b>	<b>Bruksvillkor .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Diskriminering av mätvärden .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Enkla bärighetsmått.....</b>	<b>9</b>
4.1	Allmänt .....	9
4.2	Ytmodul och medelmoduler .....	10
4.3	”Surface Curvature Index” .....	11
4.4	Uppskattad asfalttöjning.....	11
4.5	Krökningsradie .....	12
<b>5</b>	<b>Passningsräkning.....</b>	<b>12</b>
5.1	Allmänt .....	12
5.2	Data från provbelastning .....	12
5.3	Lagertjocklekar.....	12
5.4	Lagermodell.....	13
5.5	Beläggning.....	13
5.6	Obunden överbyggnad.....	13
5.7	Undergrund.....	13
5.8	Exempel på lagermodell .....	14
5.9	Materialparametrar .....	14
5.9.1	Tvärrkontraktionstal .....	14
5.9.2	Startmoduler .....	14
5.10	Kontroll av lösning.....	16
5.11	Begränsningar.....	17
5.12	Val av styvhetsmoduler baserade på E-moduler för beläggning.....	17
<b>6</b>	<b>Användning vid dimensionering .....</b>	<b>18</b>
6.1	Användning i DK2 .....	19
6.2	Användning i DK3 .....	19
<b>7</b>	<b>Klassning av bärförmåga.....</b>	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>Kontroll av utförd åtgärd .....</b>	<b>21</b>
8.1	Entreprenad med funktionsansvar .....	21
8.1.1	Linjärelastisk modell.....	21
8.1.2	Avancerade modeller.....	22
8.2	Entreprenad utan funktionsansvar (utförandeentreprenad) .....	22
<b>9</b>	<b>Rapport.....</b>	<b>22</b>
9.1	Rapportens omfattning .....	22
<b>10</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>22</b>
<b>11</b>	<b>Rekommenderad referenslitteratur.....</b>	<b>23</b>

# 1 Begrepp

## 1.1 Allmänt

Beskrivningen omfattar formler för beräkning av ”enkla bärighetsmått”, en enkel metod för bärförmågeklassning, analys av beläggningsmoduler med förslag till PMS objekt, samt en metod för efterkontroll av utförda bärighetshöjande åtgärder. Analyserna är i första hand avsedd för vägar med bitumenbundna lager och kan tillämpas vid dimensionering enligt TRVK Väg 2011 [2] kap 4 bärförmåga, stadga och beständighet. I beskrivningen förutsätts tillgång till deflektionsmätdata, insamlade vid provbelastning med fallviktsapparat enligt TRVMB 112 [1]. Uppgifter om vägytans och dräneringens tillstånd, lagertjocklekar, typ av material, temperatur-/klimatförhållanden används vid analysen. En handfull viktiga begrepp definieras i kapitel 1.4. I kapitel 2 framgår bruksvillkor för analysen, viktiga att känna till för väghållare och för alla som engageras i vägunderhållsprojekt. Hur sådana mätvärden som är uppenbart felaktiga ska hanteras, framgår av kapitel 3. Några bärighetsmått, vilka inte kräver omfattande beräkningsarbete redovisas i kapitel 4. Passningsräkning beskrivs i kap 5. I kapitel 6 beskrivs hur metodbeskrivningen används vid dimensionering. Kapitel 7 beskriver en klassning av vägens bärförmåga. Kontroll av utförda entreprenadarbeten beskrivs i kapitel 8. Hur analysen ska rapporteras beskrivs i kapitel 9. Referenser har samlats i kapitel 10.

## 1.2 Beteckningar

$D_0$	Deflektion [ $\mu\text{m}$ ] i centrum av belastningen
$D_r$	Deflektion [ $\mu\text{m}$ ] på avståndet $r$ från belastningscentrum
$r$	Avstånd [mm] från deflektionsgivare till belastningscentrum
$\nu$	Tvärkontraktionstal [dimensionslöst]
$\sigma_0$	Kontaktryck [MPa] under belastningsplattan. Med plattradien 150 mm och 50 kN belastning är kontaktrycket 0.7 MPa
$a$	Belastningsplattans radie [mm]. Oftast används plattor med $a = 150$ mm

## 1.3 Enheter

Längd	m
Kraft	N

Påkänning	Pa
Tunghet	kN/m <sup>3</sup>
Densitet	kg/m <sup>3</sup>
Temperatur	°C eller K

## 1.4 Benämningar

Bruksvillkor	Områden för mätstorhet respektive influensstorheter inom vilka ett mätdons fel och andra egenskaper ska uppfylla ställda specifikationer.
Bärförmåga (eller bärighet)	Högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer.
Deflektion	Vägytans nedböjning vid belastning från en fallviktsapparat.
Deflektionsbassäng	Vägytans nedböjning uppmätt i belastningscentrum och i andra punkter på olika avstånd därifrån.
Deformation	Form- eller volymändring som varje kropp undergår vid mekanisk belastning. ~ kan vara återgående vid avlastning (elastisk) eller permanent (plastisk).
Diskriminering av mätvärden	Systematisk metod att utesluta felaktiga eller av annat skäl opassande mätvärden.
DK1, DK2 och DK3	Dimensioneringsklass enligt TRVK Väg.
Elasticitetsmodul	En konstant som karakteriserar styvheten (sambandet mellan spänning och töjning) hos ett elastiskt material.

Fallviktsapparat Eng: Falling Weight Deflectometer, FWD	Apparat, vilken mäter vägytans nedsjunkning / deflektion, under belastning motsvarande en överfart av ett hjul från ett tungt fordon.
Förutvarande trafik	Den tunga trafik som belastat vägen under tiden från senaste strukturella åtgärd till tidpunkt för analys eller planerad åtgärd.
Homogent material	Ett material som är alltigenom likartat.
Isotropt material	Ett material som har samma egenskaper i alla riktningar.
Kriterium	Ett kriterium är en verbal beskrivning av den effekt, exempelvis utmattningssprickor eller deformationer, som är av intresse. Gränser (gränsvärden) sätts för att säkerställa en acceptabelt låg sannolikhet för den effekt som kriteriet definierar. Kriterier förklarar alltså orsakerna till de olika gränsvärdena. I detta sammanhang beräknas gränsvärden från kända samband mellan töjningsnivå och tillåtet antal lastväxlingar.
Lagermodell	Avbildning av vägkonstruktionen, där den delats in i konstruktiva lager. Vid tillämpad analys anges dessutom lagrens tjocklekar.
Linjärelastiskt system	Beräkningsmodell där sambandet mellan töjning och spänning är linjärt, såväl horisontellt som vertikalt.
Mätning	Serie åtgärder för bestämning av storhetsvärde.
Mätresultat	Produkten av mätetal och måttenhet. Mätvärde kan därvid ha korrigerats genom kalibrering för att ta kända systematiska fel i beaktande.
Mätstorhet	Egenskap som är föremål för mätning.

Mätvärde	Storhetsvärde jämfört med måttenhet. Kan vara identiskt med mätresultat.
Ojämnhetsprofil	De vertikala avvikelserna hos vägytan, jämfört med en etablerad referens parallell med färdriktningen.
Passningsräkning (eller bakåträkning)	Metod där styvhetstal för konstruktiva lager och undergrund ansätts och ytans nedsjunkning vid belastning beräknas, varefter en jämförelse görs med de uppmätta nedsjunkningarna. Därefter ändras modulerna i ett iterativt förfarande intill dess beräknade och uppmätta nedsjunkningar överensstämmer. Den sista moduluppsättningen ger så de påkänningar man är intresserad av - töjningar och spänningar.
Percentilvärde	d-percentilen avser det värde som underskrids av d% i fördelningen hos en värdemängd.
Referenstemperatur	Vid analys av lager med temperaturberoende egenskaper, ex.vis. bitumenbundna lager, måste den styvhet som beräknats vid den temperatur lagret hade vid provningstillfället omräknas till motsvarande styvhet vid referenstemperaturen. Detta är nödvändigt för att kunna göra jämförelser och dimensioneringsberäkningar.
RMS, Root Mean Square	Här avses effektivvärdet (RMS) av passningsfelet. RMS-värdet nyttjas för att bedöma graden av passning.
	$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2}$
där	<p><math>d_{ci}</math> = beräknad deflektion vid sensor i</p> <p><math>d_{mi}</math> = mätt deflektion vid sensor i</p> <p>n = antal sensorer som använts vid passningsräkningen</p> <p>Formel 1 Effektivvärde (RMS) av passningsfel</p>

Sprucket asfaltlager	Ett lager med asfaltmassa som är så svårt uppsprucket att det inte längre kan anses vara bundet genom kohesion av bitumen. Sådana lager anses i konstruktiv mening närmast fungera som ett friktionsmaterial, men med skillnaden att rörelser koncentreras till sprickplanen.
Standardaxel	Se TRVK Väg 2011 [2] kap 2 ,Tillåten trafik
Tvärkontraktion	Formändring hos konstruktionsmaterial. Tvärkontraktionen anger förhållandet mellan töjning tvärs krafriktningen och längs densamma. Den beskrivs med ett dimensionslöst tal, benämnt "Poissons tal".
Töjning	Dimensionslös storhet som anger relativ deformation av fasta eller flytande medier. Töjning i vägmaterial brukar anges i miljondelar ( $\mu$ -strain). Man skiljer mellan normaltöjning (längdändring hos linjeelement) och skjuvtöjning (vinkeländring mellan ursprungligen vinkelräta linjeelement). Summan av normaltöjningarna i ett element är riktningsoberoende och utgör den relativa volymändringen, dilatationen. Skjuvning sker under konstant volym och motsvaras enbart av formändring, deviation. Vid stor relativ deformation (töjning) blir analysen icke-linjär, och en uppdelning måste normalt ske i ren deformation och stelkroppsrotation.
Undergrundsmodul	Den genomsnittliga E-modulen för lagret mellan överbyggnadens underkant och ett oändligt tjockt fiktivt styvt lager i undergrunden, vilket börjar på den nivå som inte påverkas av lastimpulsen från fallviktsapparaten.
Underhållsbeläggning	Underhållsåtgärd avseende enbart bundna lager. ~ kan utgöras av enbart påbyggnad med slitlager, alternativt med bundet bär- och bindlager plus slitlager. ~ kombineras ofta med geometrijusteringar; fyllning i svackor samt fräsning av toppar. Geometrin kan optimeras med datorstöd. Utförande maskiner kan likaledes styras med datorstöd. Fläckvisa reparationer ingår ej i begreppet.
Vägbana	Körbana jämte vägrenar.

Vägojämnhet	Beteckning för avvikelser från ett verkligt plan med karaktäristiska dimensioner, vilka påverkar fordonsrörelser, färdupplevelse, dynamiska laster, avvattning och vinterväghållning.
Ytmodul	Den fiktiva modul som kan beräknas för en yta om underlaget antas bestå av endast ett homogent, isotropt och linjärelastiskt lager.

## 2 Bruksvillkor

Beskrivningen är avsedd att tillämpas på sådana konstruktioner, vars respons vid belastning motsvarande överfart av tunga fordon kan beskrivas av en linjärelastisk modell.

Deflektionsmätning ska vara utförd enligt TRVMB 112 [1]

Gränsvärden (enligt sprickkriteriet) för påkänningar i membranliknande beläggningar, dvs beläggningar tunnare än ca 75 mm, saknas för närvarande. Gränsvärden för påkänningar (enligt deformationskriteriet) inne i överbyggnaden saknas för närvarande. På vägvagnsytan där den befintliga överbyggnaden har kommit att innehålla uppenbart olämpligt vägmateriäl, kan detta medföra hög risk för deformationsskador oavsett om gränsvärdet för vertikal trycktöjning på terrass underskrids eller ej.

Dimensioneringen avser väg med normalt sidomothåll (stödremsa finns, innerläntan är inte brantare än 1:3). Om sidomothållet blir dåligt, krävs särskilda åtgärder utöver vad som framgår av dimensioneringsresultatet för att säkerställa acceptabel kantstabilitet.

Analys av E-moduler hos äldre beläggningar med passningsräkning avser att ge stöd till användaren vid val av styvhetstal vid dimensionering. Detta behandlas i kapitel 5.

Det finns en rad faktorer som inte täcks in av analys enligt kapitel 5. Resultaten kan därför behöva kompletteras med praktisk hänsyn till dessa. Ett exempel på sådan faktor är bristande stabilitet (trots god styvhet) i de aktuella vägmateriaälen.

Vid analys av vägkonstruktion grundlagd på mycket lös jord, ska konsultation med geoteknisk expertis ske.

Bärförmågeklassning enligt kapitel 7 avser i första hand "strukturell" styrka (egentligen motstånd mot utmattning i verklig eller fiktiv beläggning). Denna klassning kan tillämpas på alla vanliga vägkonstruktioner, oavsett typ av slitlager.

Mätningarna är att betrakta som färskvara med begränsad beständighet.

Beräkningar från mätningar äldre än ca 5 år bör betraktas som mycket otillförlitliga, annat än i trendanalyser med mätningar från flera olika år.

Från bruksvillkoren kan, utöver villkor för metodens validitet, även behov av framtida FoU-arbete utläsas.

## 3 Diskriminering av mätvärden

Deflektionsmätdata kan behöva uteslutas ur analysen av två skäl:

1. de är uppenbart felaktiga
2. de passar inte analysmodellen, se vidare nedan

Ett enkelt sätt att granska data är att rita upp och okulärt studera deflektionsbassängerna.

Diskriminering av mätdata ska utföras om deflektionsbassängen visar en orealistisk avbildning av responsen. Ett exempel på detta är att en punkt på bassängen avviker markant från närliggande punkter.

En deflektionsbassäng som inte minskar succesivt i riktning från lastcentrum är sannolikt felaktig. Även i fall där sådan bassäng inte är felaktig bör den dock uteslutas ur analysen.

Ingen deflektion får vid analysen vara 0 (noll).

Om konstruktionen har väsentligt skiftande egenskaper i längdled eller i tvärled just vid mätplatsen, kan detta ge upphov till en deflektionsbassäng med onormalt utseende. Detta kan vara fallet vid exempelvis ytor som är kraftigt spruckna och skadade eller lappade.

Mätdata (även mätpunkter) kan behöva diskrimineras också i ett mycket sent skede av analysen.

Ett exempel är att ingen rimlig lösning erhålls från beräkningen av E-moduler. Rimliga E-moduler för olika materialgrupper framgår i Tabell 21 till Tabell 3.

Om mätdata inte passar analysmodellen, ska modellen omprövas innan mätdata får uteslutas.

## 4 Enkla bärighetsmått

### 4.1 Allmänt

För en översiktlig och snabb uppskattning av det strukturella tillståndet kan vissa representativa parametrar användas. Det gemensamma för dessa är att de är enkla att beräkna med hjälp av mätta deflektioner.

Innan måtten beräknas, skall deflektionerna normeras linjärt tills de motsvarar den nominella lasten, om inte annat angetts är den 50,0 kN. Om kraften uppmäts till 50,9 kN innebär detta att alla deflektioner multipliceras med  $50,0/50,9 = 0,982$ . Vid större avvikelser än 5 % från nominell last är dock mätningen underkänd, se TRVMB 112 [1].

Nedan anges några mått som beskriver olika delar av vägkonstruktionen. Med hjälp av dessa kan alltså bärighetens variation längs vägen studeras (även  $D_0$  kan användas för en relativ jämförelse). Med beaktande av trafiklasten kan även en kvalitativ bedömning göras; bra eller dålig bärighet. En ”förenklad” dimensionering kan eventuellt också göras med hjälp av någon av dessa parametrar. Vid användning av måtten, undantaget ”Undergrundsmodul”, måste även beläggningstemperaturen beaktas.

## 4.2 Ytmodul och medelmoduler

Ytmodulen och medelmoduler kan beräknas om underlaget antas bestå av endast ett homogent, isotropt och linjärelastiskt lager. Ytmodulen och medelmoduler kan beräknas med hjälp av deflektionen mätt på olika avstånd från belastningscentrum, se Formel 1 och Formel 2

$$E_0 = \frac{1000 * f * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{D_0},$$

där  $E_0$  = ytmodul [MPa]  
 $f = 2$  för segmenterad belastningsplatta,  $f = \pi/2$  för styv belastningsplatta

Formel 1 Ytmodul i centrum av belastningen

Ytmodulen och medelmodulerna beskriver hela konstruktionens styvhet. Undergrundens styvhet har störst inverkan på den beräknade modulen.

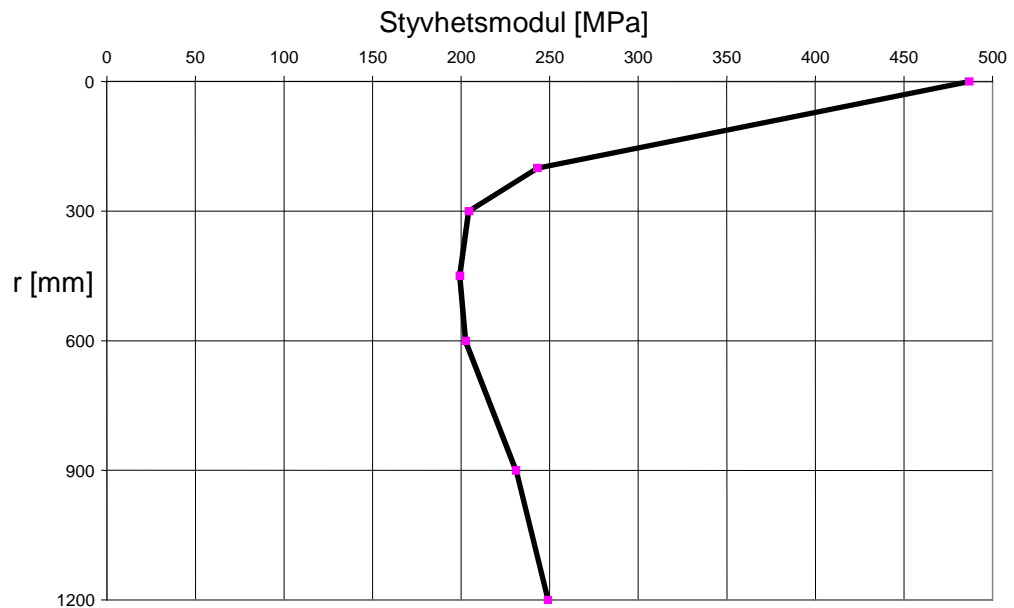
$$E_r = \frac{1000 * \sigma_0 * a^2 * (1 - \nu^2)}{D_r * r},$$

där  $E_r$  = medelmodul [MPa] på ett ekvivalent djup motsvarande  $r$

Formel 2 Medelmodul på avståndet  $r$  från belastningscentrum

Medelmodulen enligt ovan beskriver konstruktionens styvhet under ett ekvivalent djup motsvarande avståndet  $r$ .

Genom att plotta yt- och medelmodulerna mot radien (ekvivalent djup), kan en uppfattning om konstruktionens styvhet på olika nivåer erhållas. Se exempel i Figur 1.



Figur 1 Exempel på ytmodul och några medelmoduler i en mätpunkt

### 4.3 ”Surface Curvature Index”

”Surface Curvature Index”, SCI, är ett mått på styvheten av den övre delen av konstruktionen och kan användas för en relativ jämförelse. SCI beräknas enligt Formel 3.

$$SCI = D_0 - D_{300},$$

där SCI = ”Surface Curvature Index” [ $\mu\text{m}$ ]

Formel 3 Surface Curvature Index

### 4.4 Uppskattad asfalttöjning

Horisontell dragtöjning i underkant av beläggningen är ett mått på risken för utmattningssprickor i underkant av beläggningen. Den kan uppskattas med Formel 4.

$$\epsilon_a = 37,4 + 0,988 * D_0 - 0,553 * D_{300} - 0,502 * D_{600},$$

där  $\epsilon_a$  = töjning [ $\mu$ -strain] i underkant beläggning

Formel 4 Uppskattad asfalttöjning

Temperaturkorrigering av asfalttöjningen kan göras med Formel 8.

## 4.5 Krökningsradie

Krökningsradien på beläggningsytan är ett bärighetsmått som kan användas för en relativ jämförelse. De oberoende variablerna är samma som i SCI ovan. och tas med här eftersom parametern använts relativt ofta i forskningslitteraturen. Krökningsradien beräknas med Formel 5.

$$R_{300} = \frac{45000}{D_0 * \left(\frac{D_0}{D_{300}} - 1\right)}$$

där  $R_{300}$  = krökningsradie [m]

Formel 5 Krökningsradie

## 5 Passningsräkning

### 5.1 Allmänt

Med passningsräkning beräknas ytdeflektioner i ett linjärelastiskt system med givna E-moduler, lagertjocklekar och tvärkontraktionstal. Dessa ytdeflektioner jämförs sedan med de uppmätta. I ett iterativt förfarande ändras E-modulerna tills de mätta och beräknade deflektionerna uppfyller ett visst krav på överensstämmelse.

Passningsräkning ingår som en komponent i PMS Objekt helt fristående från dimensioneringsstegen i programmet. Den är medtagen som ett alternativt stöd för val av styvhetsmoduler hos beläggningar .

### 5.2 Data från provbelastning

För analysen behövs uppgifter enligt TRVMB112 om belastning, kraft och belastningsplattans radie, samt om deflektioner och deflektionssensorernas placering.

### 5.3 Lagertjocklekar

Kännedom om lagertjocklekar behövs. Information kan hämtas från olika källor, t.ex. provhåll, georadarundersökning och relationsritningar. De mest tillförlitliga uppgifterna om lagertjocklekarnas variation längs objektet ska användas.

## 5.4 Lagermodell

Antal lager skall vara tre, oräknat ett styvt skikt i undergrunden vid beräkning i PMS Objekt:s komponent Avancerade funktioner/Fallviktsberäkning. En lämplig lageruppdelning är då beläggning, obunden överbyggnad och undergrund.

## 5.5 Beläggning

För beräkning av beläggnings E-modul rekommenderas att lagret har en minsta tjocklek motsvarande halva radien av belastningsplattan, vilket normalt betyder minst 75 mm tjocklek. Vid tunnare beläggning antas en realistisk modul med hänsyn till temperatur och eventuell förekomst av sprickor. Notera att man närmast ytan mäter en tryckmodul, så inverkan av sprickor är då liten.

## 5.6 Obunden överbyggnad

Den obundna delen av överbyggnaden kan beräkningsmässigt hanteras indelat i bär- och förstärkningslager (/skyddslager) eller behandlas som ett enda obundet lager. Sammanlagda lager anger närmast medelmodulen för lagren. Passningen sker dock så att töjningen i gränstorna ligger så nära det är möjligt med passad respektive uppmätt deflektion.

Lagren bör inte vara tunnare än 100 mm för att erhålla rimliga E-moduler. Är de tunnare bör de i beräkningen slås samman med angränsande lager.

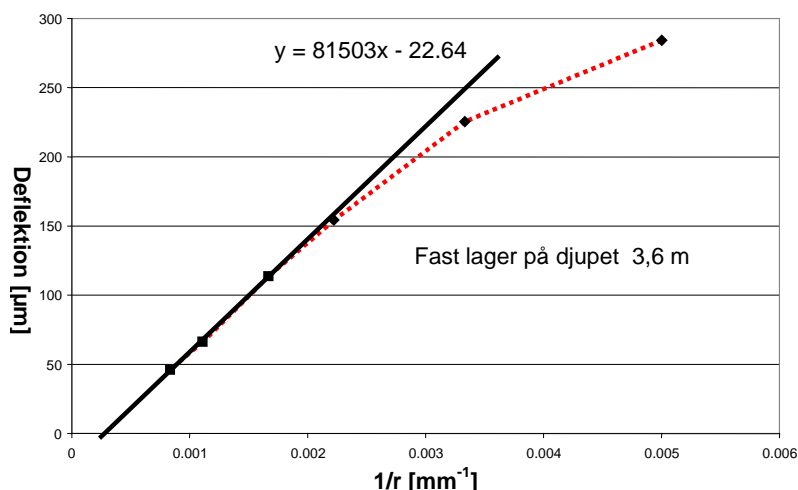
## 5.7 Undergrund

Undergrunden behandlas normalt som ett homogent lager vilande på ett styvt skikt (fast botten) på 3 m djup under vägytan. Det styva skiktet väljs för att det normalt ger mer realistiska E-moduler, samt en bättre överensstämmelse mellan mätt och beräknad deflektion.

E-modulen för det styva skiktet beräknas inte, utan låses till värdet 1 GPa. Om orrealistiska E-moduler och/eller dålig överensstämmelse mellan mätt och beräknad deflektionsbassäng erhålls, ska beräkning med alternativ lagermodell prövas t.ex utan styvt skikt i undergrunden.

I många fall finns fasta lager ovan 3 m djup. Djupet kan översiktligt uppskattas med hjälp av funktionen  $dx=f(1/r)$ . Linjen som går mellan punkterna för de yttersta givarna extrapoleras tills den skär x-axeln. Värdet på x-axelns skärningspunkt inverteras och representerar därefter djupet till det fasta lagret från ytan. För mätpunkten vars deflektioner plottats i Figur 2 kan djupet till fast lager bestämmas till  $1/(22,64/81503) = 3600$  mm, dvs. ca 3,6 m.

Det bör observeras att om undergrundens E-modul stiger mot djupet ger detta ungefär samma effekt på deflektionerna hos de yttre givarna.



Figur 2 Exempel på beräkning av djup till fast botten.

## 5.8 Exempel på lagermodell

Vid beräkning av E-moduler kan upprepade beräkningar behöva göras med alternativa lagermodeller för den mätta konstruktionen. Detta för att erhålla rimliga E-moduler liksom en god överensstämmelse mellan mätt och beräknad deflektionsbassäng.

I vissa fall erhålls bäst lösning utan ett styvt skikt underst.

Eftersom valt djup till fast botten i hög grad påverkar beräknade E-moduler rekommenderas att djupet 3 m, eller beräknat djup < 3 m, används.

## 5.9 Materialparametrar

### 5.9.1 Tvärkontraktionstal

Poissons tal varierar för olika material normalt mellan 0,15 (ex. betong) och 0,5 (ex. mjuk lera). Om inte andra uppgifter finns angivna är det lämpligt att använda värdet 0,35 för Poissons tal för samtliga material. Undantag är betong och det styva skiktet i botten, för vilka värdet sätts till 0,15. Detta motiveras med att inverkan på beräknade E-moduler är måttlig, materialtyp inte alltid är känd och man ibland slår ihop olika material till ett lager.

### 5.9.2 Startmoduler

I vissa beräkningsprogram måste ett startvärde antas för E-modulerna men i PMS objekt väljer programmet själv startvärden. I Tabell 1 - Tabell 3 anges typiska E-modulintervall för olika typer av material. Tabellerna kan även användas för att bedöma rimligheten av beräknade E-moduler.

För bituminösa material är E-modulen beroende av temperatur och belastningstid. Temperaturkorrigering utförs enligt formel 6. Korrigering för belastningstid behöver normalt inte göras.

Genom "åldring" (främst oxidering) av bindemedlet kan beläggningen bli styvare med tiden. Uppkomst av sprickor medför dock att den skenbara styvheten minskar. Ett annat problem som kräver speciell uppmärksamhet är delaminering av dåligt sammanklistrade bundna lager, vilket också leder till minskad styvhet.

Typiska E-modul intervall för oskadad beläggning framgår i Tabell 1.

Tabell 1 Typiska E-moduler för intakta bituminösa material vid +10 °C.

Materialtyp	E-modul intervall [MPa]
Slit-/bärlagermtrl	4000 - 12000
Varm återvinning	3000 - 10000
Kall återvinning	2000 - 6000

Cementbetong finns i olika kvaliteter. Ett bra riktvärde är 40 GPa.

För obundna material är E-modulen beroende av vatteninnehåll, och olika material är olika vattenkänsliga. Värden i tabeller avser otjälade förhållanden under sommar och höst.

Under vår/tjällossning är E-modulerna lägre i de flesta fall och då främst för de finkorniga materialen. E-modulerna är också beroende av den spänningsnivå materialet utsätts för. De tabellerade värdena bygger på svenska erfarenheter av fallviktmätningar på vägytan av befintliga vägar, med beräkningar utförda efter antagande om ett styvt skikt 3 m under vägytan.

Typiska E-modulintervall för obundna överbyggnadsmaterial framgår av Tabell 2.

Tabell 2 Typiska E-moduler för obundna överbyggnadsmaterial.

Materialtyp	E-modul intervall [MPa]
Bärlagermtrl	
enl. VVMB 120 siktkurvor	400-700
enl. BYA 84:s siktkurvor	200-700
CG	300-2000
övriga	150-600
Förstärkningsmtrl	
okrossat enl. VVMB 120:s siktkurvor	200-400
krossat enl. VVMB120: siktkurvor	300-600
enl. BYA 84:s krav	100-500
övriga	75-400
Skyddslager enl. VVMB120:s siktkurvor	60-130

Typiska E-modulintervall för undergrundsmaterial framgår av Tabell 3.

Tabell 3 Typiska E-moduler för undergrundsmaterial / underbyggnad

Materialtyp	E-modul intervall [MPa]
Organiska jordar	10-25
Ler	
Lös lera	5-25
Lera	20-60
Torrskorpelera	30-1000
Silt	15-45
Sand	30-100
Grus	75-150
Morän	
Finkornig morän	35-150
Grovkornig morän	125-500
Berg	
Bergbank	150-800

## 5.10 Kontroll av lösning

Resultatet av beräknade E-moduler ska granskas enligt nedanstående praxis. Det är lämpligt att göra dels en översiktlig granskning med datorstöd, och dels en detaljerad manuell granskning.

Tunna styva lager bidrar litet till ytdeflektionen, vilket medför att beräknad modul för ett sådant lager är osäker. Vidare har differenser mellan antagna och verkliga lagertjocklekar inverkan. Inverkan av 2 cm felaktig tjockleksuppgift är större om lagret bara är 1 – 2 dm tjockt, jämfört med om det är 4 – 5 dm tjockt. Samtidigt har en liten avvikelse på ett lager med hög styvhet stor inverkan eftersom responsen är en produkt av styvhet och tjocklek.

Vissa beräkningar kan resultera i:

Orealistiska E-moduler, jämfört med moduler angivna i Tabell 1 – Tabell 3.

Realistiska E-moduler, men dålig överensstämmelse mellan mätt och beräknad deflektionsbassäng.

Tidpunkten för fallviktsmätningen och vatten/fuktförhållandet i överbyggnad och undergrund är viktig information för att kunna fastställa om de beräknade E-modulerna är realistiska.

Beräknade E-moduler jämförs med de som återfinns i Tabell 1 - Tabell 3 för att bedöma om lösningen är realistisk. Enstaka mindre avvikelser medför i normalfallet liten betydelse efter den statistiska behandlingen.

För att bedöma överensstämmelsen mellan mätt och beräknad deflektionsbassäng studeras i första hand det beräknade RMS-värdet. Resultat från lösning med sämre (högre) RMS-värde än 3 % får inte presenteras utan att ha särskilt markerats som osäkert (exempelvis genom avvikande formatering; röd färg – fet stil, etc.). Det är önskvärt att RMS-värdet ligger under 1% för att få tillförlitliga E-moduler.

Om E-modulen för ett lager blir ”för låg” eller ”för hög”, påverkar det med automatik E-modulen för angränsande lager i omvänd riktning.

Speciellt för tunna lager kan beräknad E-modul avvika från de som angetts som typiska. Detta kan bero på avvikelse mellan verklig och antagen lagertjocklek, men också på begränsningar i den använda responsmodellen och/eller brister i beräkningsantaganden. Detta yttrar sig ofta i högt RMS-värde, dvs. dålig överensstämmelse mellan mätt och beräknad deflektionsbassäng.

Observera att för en ytbehandling så mäter man i regel tryckmodulen, som kan vara mycket stor (20 GPa). Det är fullt normalt och det tunna lagret påverkar ändå inte bärigheten speciellt mycket.

## 5.11 Begränsningar

Vissa begränsningar måste sättas vid acceptansen av lösningar.

Beläggningstjockleken ska vara  $\geq 75$  mm.

Antal lager ska normalt begränsas till tre (max fyra) (exklusive fast lager på  $\leq 3$  m djup). Tre-lagersystemet skall bestå av beläggning, obunden överbyggnad och undergrundsmaterial.

Vid en accepterad lösning ska normalt E-modulerna avta från ytan och nedåt. Om terrassmodulen avviker från den ordningen kan den accepteras om det finns andra argument för detta t.ex. bottenmorän, berg. Hos vissa jordarter kan grundvattenytan ge sken av ett fast lager vid dynamisk belastning, då vattnet dämpar alla rörelser.

RMS-värdet för en enskild punkt skall vara  $\leq 3$  %.

Om inte ovanstående krav är uppfyllda ska resultatet förkastas eller förklaras med en mer avancerad modell.

## 5.12 Val av styvhetsmoduler baserade på E-moduler för beläggning

Passningsräkning av E-modul görs oftast på beläggning som utsatts för trafik. Den kan vara i helt eller sprucket tillstånd.

Den passningsräknade E-modulen för beläggningslagret gäller för måttillfallets beläggningstemperatur.

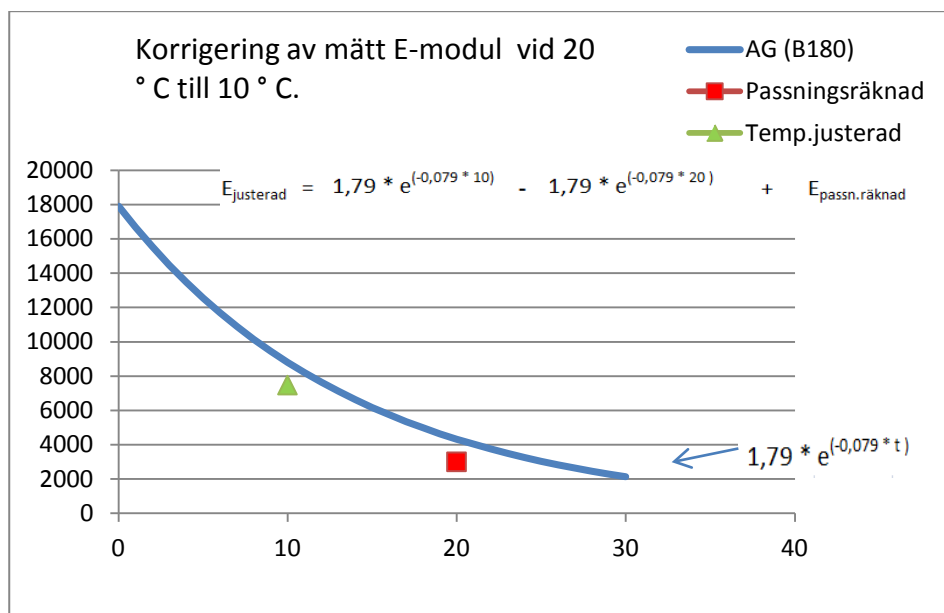
Denna modul omräknas till en referenstemperatur t.ex.  $10^{\circ}\text{C}$ . Det görs med formeln:

$$E_{\text{Justerad}} = E_{10^{\circ}\text{C}} - (E_{t^{\circ}\text{C}} - E_{\text{mätt}})$$

$E_{10^{\circ}\text{C}}$  och  $E_{t^{\circ}\text{C}}$  beräknas med formeln :

$E=1,79 \cdot 10^4 \cdot e^{(-0,071 \cdot t)}$  Där t är belägningens medeltemperatur i djupled.

### Formel 6 Samband temperatur och styvhetsmodul



En typisk E-modul för en oskadad beläggning framtagen med mätta data används eller beräknas med formel 6 för  $t=10^\circ \text{C}$ ,  $E_{\text{normal}}$ .

Därefter bildas kvoten  $k = E_{\text{justerad}} / E_{\text{normal}}$

Med denna kvot multipliceras PMS Objekts nominella styvhetsmoduler för varje säsong.

Om kvoten  $\geq 1$  görs ingen korrigerig

Om  $E_{\text{Passn}} < 1500$  är belägningen så sprucken att temperaturkorrigerig inte gäller, då används  $E_{\text{Passn}}$  för samtliga årstider i PMS Objekt.

Om justerade värden är orealistiska bör laboratorieundersökning av borrhärnor utföras.

Om en homogen beläggning mäts under varierade temperaturförhållanden vid samma tillfälle kan en s.k. masterkurva upprättas där passningsräknad E-modul är en funktion av temperaturen.

## 6 Användning vid dimensionering

I denna MB beskrivs stöd för dimensionering enl. DK2.

## 6.1 Användning i DK2

I PMS Objekt är de tabellerade styvhetsmodulerna anpassade för att ge töjningar som i kriteriet ger korrekta livslängder hos asfaltbetong, d.v.s. primärt inte för att vara typiska moduler mätta med bärighetsutrustning.

Dock kan passningsräknade moduler vara till stöd för användaren genom relativa jämförelser av beläggningar, se kapitel 5.12. Val av styvhetsmoduler baserade på E-moduler för beläggning.

## 6.2 Användning i DK3

I DK3 kan analysen tillämpas om användningen uppfyller villkoren i TRVK Väg.

# 7 Klassning av bärförmåga

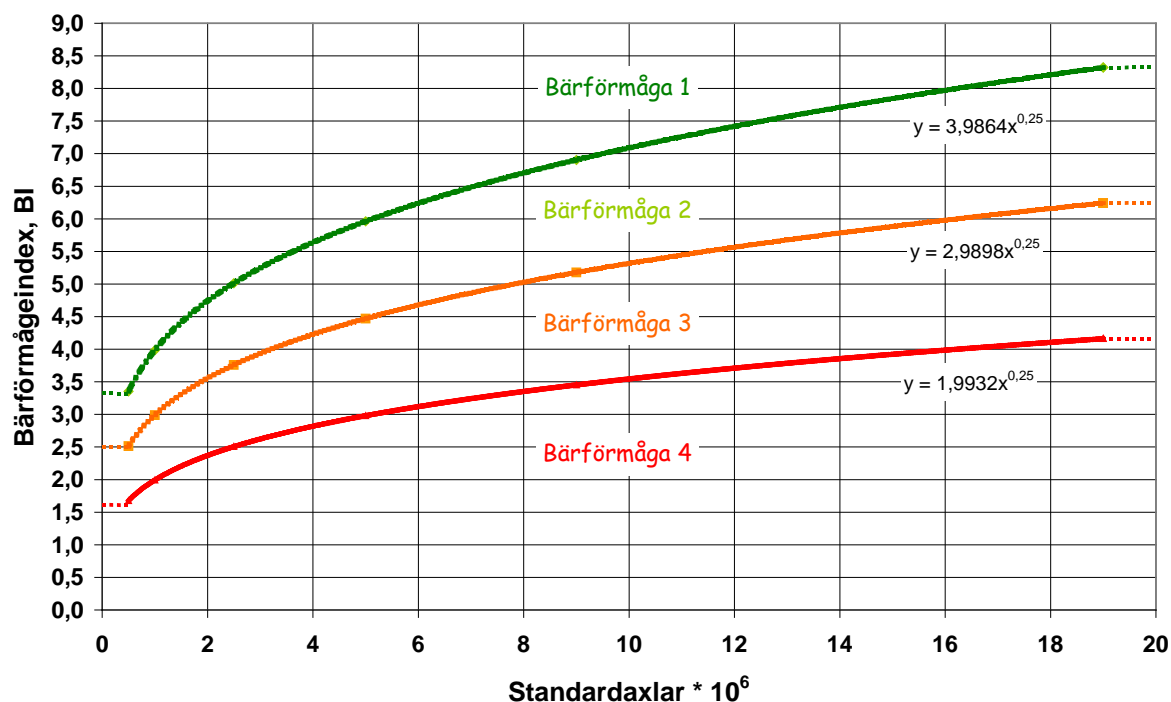
Vid flera aktiviteter inom vägförvaltningsarbetet - och vid dialoger med intressenter kring vägarnas bärighet - är det värdefullt att översiktligt kunna beskriva vägens bärförmåga på ett objektivt sätt. I Figur 3 beskrivs en metod för att beräkna ett sådant mått, baserat på ett index beräknat enligt Formel .

$$BI = \frac{1000}{\varepsilon_a} ,$$

där BI = bärförmågeindex [dimensionslöst]  
 $\varepsilon_a$  = uppskattad (ibland fiktiv) asfalttöjning [ $\mu$ -strain] enligt kapitel 4.4, eller asfalttöjning bestämd genom passningsräkning enligt kap 5.

Formel 7 Beräkning av bärförmågeindex

I Figur 3 visas hur klassning av bärförmåga utförs. Bärförmågan syftar här i första hand på ”strukturell” styrka (egentligen motstånd mot utmattning i verklig eller fiktiv beläggning) och kan tillämpas på alla vägar, oavsett typ av slitlager.



Figur 3 Bestämning av bärförmågeklass, med hänsyn till antal standardaxlar som belastar vägen under aktuell dimensioneringsperiod och representativt värde på bärförmågeindex (BI).

Klassningen är validerad mot fyra olika dataset enligt följande:

Mätningar på lågtrafikerade ”obyggda” vägar i Y-län

Mätningar på normenligt byggda vägar (VTI observationssträckor) före förstärkning

Mätningar på normenligt byggda vägar (VTI observationssträckor) efter förstärkning

Mätningar på samtliga av VTI:s observationssträckor

Klassningen för Bärförmåga 1 är jämförbar med bärförmåga hos GBÖ/BBÖ-Konstruktioner med AG-lager som dimensionerats enligt sprickkriteriet i TRVK Väg 2011 [2]. I klass Bärförmåga 4 hamnar bara mycket svårt skadade vägar.

Bärförmågeindex skall inte förväntas ändras mycket under de år vägen är oskadad. När beläggningen spricker minskar index, och vägen kan komma att klassas om. Vägar med sprickor trots god klassning behöver sannolikt inte särskilt kraftig förstärkning vid åtgärd.

För jämförelse av bärförmågeindex mellan olika vägar bör fallviktsmätningarna vara utförda under samma period på året, lämpligen sommar till höst. Det enligt Formel 4 beräknade värdet  $\epsilon_a$  korrigeras vid behov med hänsyn till temperatur enligt Formel 8.

$$\varepsilon_{a,10} = \frac{\varepsilon_{a,T}}{\left(\frac{T}{10}\right)^{0,0308 \cdot h_1^2 \cdot D_0}}$$

där  $\varepsilon_{a,10}$  = dragtöjning [ $\mu$ -strain] vid temperaturen +10°C  
 $\varepsilon_{a,T}$  = dragtöjning [ $\mu$ -strain] vid mättemperaturen T  
T = mättemperatur [°C]  
 $h_1$  = beläggningstjocklek [mm]

Formel 8 Temperaturkorrigering av asfalttöjning

För bestämning av bärförmågan behövs även uppgift om antal standardaxlar som beräknas belasta vägen under aktuell dimensioneringsperiod (ex. 20 år) med avdrag för den trafik som redan passerat.

## 8 Kontroll av utförd åtgärd

### 8.1 Entreprenad med funktionsansvar

#### 8.1.1 Linjärelastisk modell

Bärigheten hos en GBÖ kan kontrolleras m.h.t bärförmåga enl. kap 7 eller med passningsräkning enl kap 5. Spänningar och töjningar bestäms då med PMS Objekt.

Vid kontrollen skall uppgifter inhämtas om lagertjocklekar hos den utförda konstruktionen från säkrast möjliga källa (georadar, borrhål, relationshandlingar etc.)

Mätningen skall normalt ske efter ett års trafikering av vägytan och helst vid samma tid på året som den mätning som utgjorde underlag för dimensionering. Den skall ske i det yttre hjulspåret och utföras i minst 2 punkter per km för varje åtgärdat körfält, dock minst 20 punkter per homogent körfält. Rätten att styra valet av läge för provpunkterna förbehålles beställaren och kan utgå från de mätklasser som anges i TRVMB 112. Om inte denne utnyttjar rätten att styra valet, ska läget i längdled väljas slumpvis enligt VVMB 908 "Statistisk acceptanskontroll" inom varje km av körfältet.

Om mätningen utförs tidigare (t.ex. i samband med slutbesiktning) får resultatet behandlas med försiktighet med hänsyn till att en nylagd beläggning inte härdat.

Vid beräkning av den levererade bärförmågan ska hänsyn tas till det trafikarbete som skett mellan trafikpåsläpp och deflektionsmätning (efterkontrollen) – normalt ca ett års trafikarbete – innan den jämförs med den bärförmåga som beställd konstruktion enligt beräkning har.

## 8.1.2 Avancerade modeller

Om avancerade modeller används för att avgöra plastisk och elastisk del av deformationen, beräknas resterande livslängd med den elastiska töjningen. Avancerade modeller ska bara tillämpas i DK3, TRVK Väg.

## 8.2 Entreprenad utan funktionsansvar (utförandeentreprenad)

Även vid utförandeentreprenad som kontrolleras med fallviktsmätning ska denna metodbeskrivning användas.

## 9 Rapport

Rapport skall skickas till beställaren och den skall lämnas i digital form.

### 9.1 Rapportens omfattning

Rapportering skall i tillämplig mån innehålla uppgifter om:

Namn på vem/vilka som utfört analysen

Intygande av att analysen skett enligt denna metodbeskrivning, samt redogörelse för ev. avvikelser och kopia på godkännandebeslut för ev. avsteg från krav i denna beskrivning

Kopia på deflektionsmätfil enligt TRVMB 112 [1]

Analysprogram för beräkning av lagermoduler

Beräkningsresultat

## 10 Referenser

[1] *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat.* (2012). Trafikverket. Metodbeskrivning 112.

[2] TRVK Väg 2011

[3] Jansson, H. (1992). Regressionssamband för beräkning av påkänning i asfaltbeläggning ur deflektioner mätta med fallvikt. VTI notat nr V190-1992

[4] Djärf, L. (1996). Jordarters E-modul utvärderade ur nedsjunktningmätningar med fallviktsdeflektometer (FWD). VTI notat 49-1995

[5] Djärf, L. (1993). Modellutveckling, delprojekt inom huvudprojektet Dimensionering vid förbättring och underhåll. VTI notat V207-1993

[6] Förstärkningsåtgärder, publ 2008:15. Vägverkets publikation

[7] Djärf, L., et al. (1998). Effekt av olika förstärkningsåtgärder på asfaltbelagda vägar: delrapport 1. VTI notat 41-1998

[8] Carlsson, H. & Jansson, H. (2000). Årstidsvariation i materialstyvheter hos icke normenligt byggda vägar. VTI notat 2-2000

[9] Ullidtz, P. (1987). *Pavement Analysis*. Technical University of Denmark. Elsevier Science Publishers

[10] Falling Weight Deflectometer. Final Report of COST 336 Action (Final draft, 28 may 1999). European Commission, Directorate General Transport.

[11] Ullidtz, P. (1999). *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. Polyteknisk Forlag. ISBN 87-502-0801-2

[12] Jansson, H. (1994). A simple structural index based on FWD-measurement. BCRA94, proceedings

## 11 Rekommenderad referenslitteratur

Odemark, N. (1949). Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Statens Väginstitut, meddelande 77

Lenngren, C.A. (1990). Relating bearing capacity to pavement condition. KTH.

CROW Deflection profile – not a pitfall anymore.

Philip Hon (2010) Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material, Thesis 198, Lunds Tekniska Högskola.



Trafikverket, 781 87 Borlänge. Besöksadress: Röda vägen 1.  
Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 0243-795 90

[www.trafikverket.se](http://www.trafikverket.se)