

Provväg Skänninge

2: Inledande mätningar, material och vägyta



Jonas Ekblad
Robert Lundström

NCC Rapport 2014-02
Nynas AB
SBUF 12760
Trafikverket

Upplands Väsby 2014

Förord

Denna rapport utgör andra delen i redovisningen av Provväg Skänninges 1:a fas: planering, utförande och bestämning av materialegenskaper, och beskriver i huvudsak resultaten från utförd provning.

Provningen har utförts vid

- NCC:s laboratorium i Upplands Väsby
- Nynas laboratorium i Nynäshamn, och
- VTI i Linköping.

Finansieringen av projektet har i byggnadsfasen delats mellan NCC Roads AB och Nynas AB. I mät- och uppföljningsfasen har huvudsakligen Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) tillsammans med Trafikverket bidragit med medel.

Robert Lundström
R&D Manager
NCC Roads

Sammanfattning

NCC Roads och Nynas har tillsammans utfört en provväg med 8 delsträckor inom ramen för en totalentreprenad med funktionskrav på väg 50 mellan Mjölby och Motala i höjd med Skänninge. Denna rapport redovisar främst laboratorieprovning av ingående material och utförd beläggning.

Provningen har dels omfattat grundläggande kvalitetsgranskning som t.ex. sammansättning, dels funktionsrelaterade och -baserade egenskaper: motstånd mot permanenta deformationer och sprickbildning, och beständighet.

Undersökningar indikerar att varje delsträcka är byggd med avsedd beläggningstyp och att utlagd beläggning visar normal kvalitet avseende hålrums halt och sammansättning. Provning som genomförts med syfte att bedöma motstånd mot permanenta deformationer visar att Pmb-beläggningarna förväntas prestera bättre än Referensbeläggningarna. Referensbeläggningarna är generellt styvare medan bindemedelsprovningen visar högre grad av elasticitet, återfjädring, för Pmb-alternativen. Mätningarna visar också att det många gånger, med de metoder vi har, är svårt att jämföra penetrationsbitumen och modifierade bindemedel.

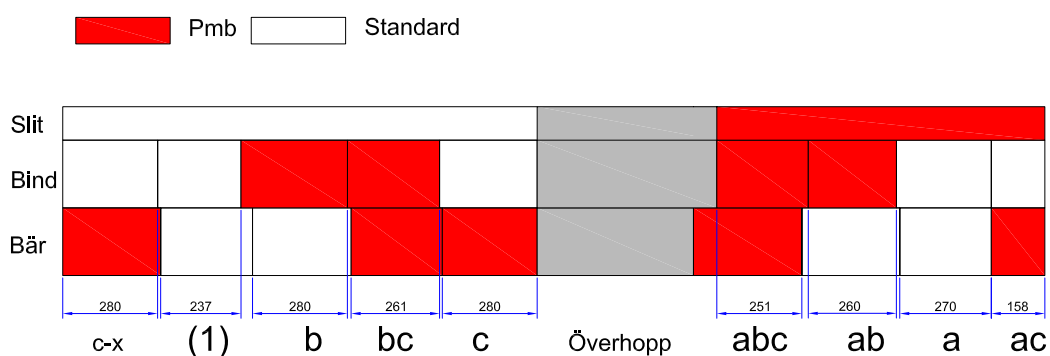
INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	5
2. PROVTAGNING.....	6
3. RESULTAT	7
3.1. BINDEMEDEL	7
3.2. ASFALTMASSA.....	13
3.3. BELÄGGNING	13
3.3.1. STYVHETSMODUL	13
3.3.2. PERMANENTA DEFORMATIONER.....	17
3.3.3. UTMATTNING.....	21
3.3.4. BESTÄNDIGHET: NÖTNINGSMOTSTÅND ENLIGT PRALL OCH VATTENKÄNSLIGHET (ITSR).....	22
3.4. VÄGYTA.....	24
4. DISKUSSION.....	27
REFERENSER	33

1. INTRODUKTION

Det övergripande syftet med detta projekt är att kvantifiera effekten av polymermodifierade beläggningsslager i termer av storheterna spårdjup och *IRI* (International Roughness Index) jämfört med motsvarande standardbeläggningar. Analysen baseras på en längre tids uppföljning av ett fältförsök. Hypotesen är att Pmb förbättrar beläggningens prestanda och provschemat är utformat för att kvantifiera denna hypotes. Försökets bakgrund och tillblivelse finns mer utförligt redovisat i rapport 1 *Planering och byggande*.

Fältförsöket är beläget längs väg 50 Mjölby-Motala i höjd med Skänninge, i norrgående K1. Försöksplaneringen är faktoriell med 3 faktorer (3 beläggningsslager) och 2 nivåer för varje faktor (bindemedelstyp) vilket ger ett 2³-faktoriellt försök med totalt 8 provsträckor enligt Figur 1.



Figur 1. Provsträckor: lagerföljder och sträcklängder(c-x i söder och längd i m).

Sträckbenämningen baseras på aktiva faktorer i respektive provcell: vi benämner lagren uppifrån a, b och c och definierar Pmb som aktiv nivå. Benämningen ac betyder då Pmb i lager a och c (slit- och bärlager).

Utförda beläggningsslager, tjocklek och bindemedelstyp, sammanfattas i Tabell 1. Huvudprincipen var att för varje enskilt lager utföra 2 varianter: dels den ordinarie beläggningen för entreprenaden i sin helhet, benämnd Referens, dels ett alternativ med högpresterande bindemedel valt för respektive lager.

Tabell 1. Beläggningsslager och bindemedel

Beläggningsslager	Massatyp	Bindemedel	
		Referens	Pmb
Slitlager 35 mm	Viacogrip	Qmb 45/80-50*	Nypol 76-28
Bindlager 50 mm	ABb 16	50/70	Z3**
Bärlager 65 mm	AG 22	70/100	Nynas Endura F1

* Lägre modifieringsgrad jämfört med PmB-alternativet

** Benämns Z3 då det i vissa avseenden är något för mjukt givet specifikationen för Endura Z3

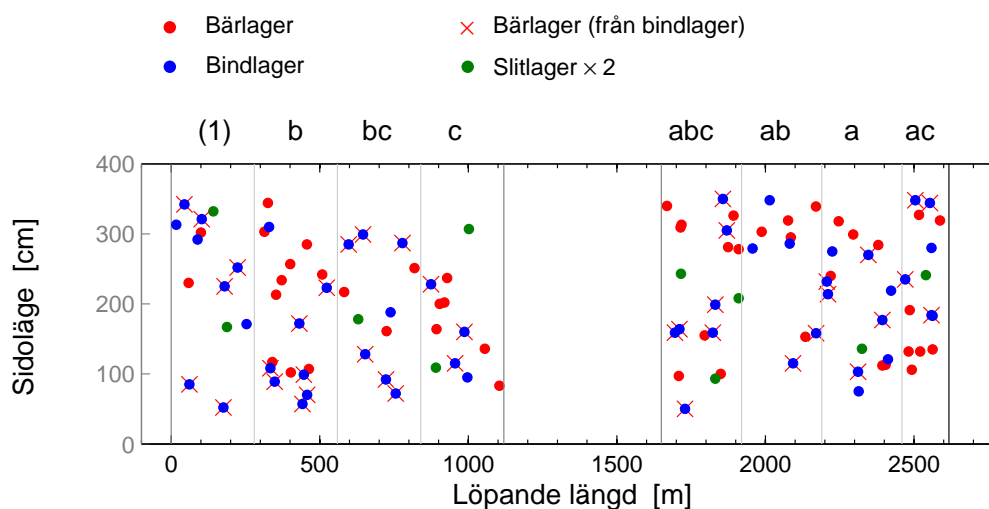
Provvägens planering och byggande redovisas i syskonrapporten *Provväg Skänninge 1: Planering och byggande*. Denna delrapport sammanställer de mätningar som gjorts i samband med byggandet, främst avseende de ingående materialens egenskaper.

2. PROVTAGNING

Prover har tagits ur produktionen vid 3 tillfällen eller platser:

- bindemedel ur tank vid asfaltverk
- massa vid asfaltverk eller från bil vid läggningen
- borrning av provkroppar ur färdig beläggning.

För att förklara vägens uppträdande är beläggningens egenskaper avgörande. Av denna anledning var beläggningsprovningen tämligen omfattande, trots att projektets huvudfokus är vägytan. Huvudprincipen vid borrningen var att betrakta varje beläggningstyp (lager och bindemedelstyp) som en population och ur denna slumpmässigt ta erforderligt antal prover; sträckornas delning har i detta sammanhang i sig ingen betydelse utan provtagningen skedde slumpmässigt inom beläggningstypen. Enskilda prover representerar således inte den sträcka de råkar vara borrade ur, utan är ett stickprov (sampel) ur beläggningstypen. Figur 2 sammanfattar provborrningen som slumpats i längs- och tvärled (läggningsbreddens yttersta 50 cm undantagna).



Figur 2. Borrschema för beläggningsprovning. Bärlager (från bindlager) innebär att båda lagren borrades och respektive bär- och bindlagerdel blev provkropp i provningsschemat. Vid varje slitlagerpunkt borrades 2 provkroppar.

Sammanlagt borrades 163 provkroppar från beläggningen. Till detta kommer ett antal prov, massa och beläggning, som analyserades i direkt samband med produktion för att säkerställa sammansättning och beläggningsproduktionen.

Provtagning av beläggningssmassa skiljer sig något från stickprovsprincipen då analys av återvunnet bitumen användes för att bekräfta att rätt beläggningstyp användes i respektive provsträcka och lager. Denna provtagning gjordes således sträckvis.

Mät- och analysmetoder beskrivs mer utförligt under respektive avsnitt.

3. RESULTAT

Mätresultaten avser nybyggd väg och sammanfattas i stigande nivå enligt kravhierarkin given i rapport 1:

- bindemedel
- asfaltmassa
- beläggning
- vägyta.

I de statistiska analyserna är nollhypotesen (H_0) i samtliga fall att ingen skillnad mellan medelvärden föreligger. Vald signifikansnivån (α) är 5 % dvs. vi förkastar nollhypotesen om $p < 0,05$ och konstaterar att det föreligger skillnad.

3.1. BINDEMEDEL

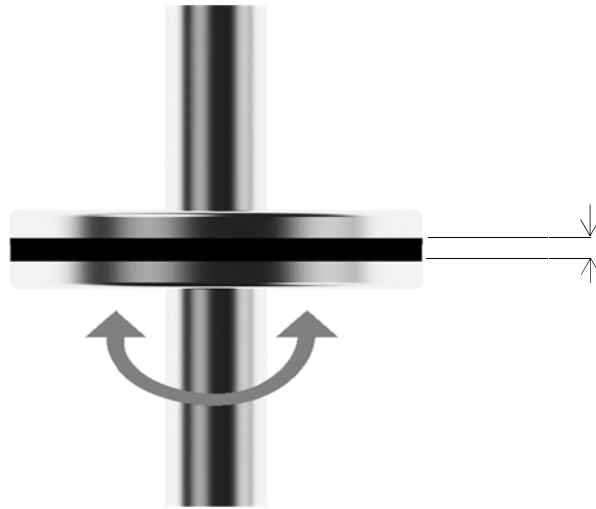
Bindemedelsprovningen har utförts av Nynas. Provtagningen omfattade prover ur tank och asfaltmassa från verk och bil ur vilken sedan bindemedlet återvunnits för analys.

Provschemat omfattade följande mätningar:

- penetration vid 25 °C
- mjukpunkt
- draghållfasthetsegenskaper (force ductility)
- brottseghet (fracture toughness temperature)
- oscillerande skjuvprovning (dsr)
- balkböjning, BBR (Bending beam reometer)
- kryp-återgångsprovning (multiple stress creep-recovery, MSCR).

En del av dessa provningar är allmänt kända medan andra beskrivs översiktligt i denna rapport.

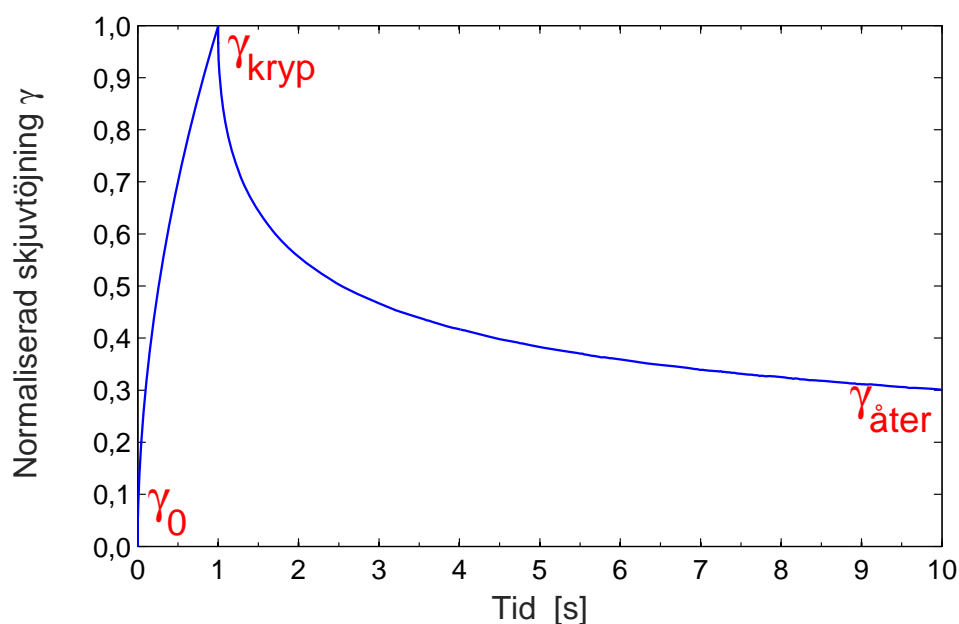
Dynamisk skjuvprovning och kryp-återgångsprovning baseras på samma provgeometri, parallella plattor som skjuvas i en reometer (Figur 3).



Figur 3. Provning i skjuvreometer med parallella plattor: oscillerande skjuvprovning (dsr) och kryp-återgångsprovning (multiple stress creep recovery).

Oscillerande skjuvprovning utfördes vid olika temperaturer och frekvenser: vid varje temperatur från 10 °C till 100 °C (i steg om 10 °C) utfördes mätning i frekvensområdet 0,1 till 100 rad/s. Resultaten presenteras som absolut skjuvmodul och fasvinkel.

Kryp-återgångsprovning (MSCR) omfattar en konstant spänningsbelastning under 1 s varefter spänningen släpps och återgående töjning mäts under ytterligare 9 s. Provningen sker vid 2 spänningsnivåer: 0,1 respektive 3,2 kPa. I detta fall var provningstemperaturen 64 °C och omfattade återvunnet bindemedel från respektive försökssträcka. För definition av beräkningsgrunder visas schematiskt provresultat i Figur 4.



Figur 4. Schematisk beskrivning av mätdefinition vid kryp-återgångsprovning.

Töjningen bestäms vid 3 tillfällen: direkt vid spänningspålast (γ_0), maximal nivå efter krypfasen (γ_{kryp}) och sedan efter totalt 10 s ($\gamma_{åter}$). Ur dessa mätningar bestäms sedan relativa återgången, R , (givet att $\gamma_0 = 0$) som:

$$R = \frac{\gamma_{kryp} - \gamma_{åter}}{\gamma_{kryp}} \quad 1$$

och den icke-återgående krypkompliansen, J'_{nr} (non-recoverable compliance) dvs. eftergivligheten beräknat på den icke återfjädrande deformationen (töjningen), bestäms enligt:

$$J'_{nr} = \frac{\gamma_{åter}}{\tau} \quad 2$$

där τ är skjuvspänning under krypfasen.

Brottseghet (fracture toughness) bestäms vid 3-punkts balkböjning med sprickanvisning. Provningsen genomförs vid flera temperaturer för att bestämma den temperatur vid vilken brottdeformationen, under metodens givna förhållanden, är 0,3 mm. Normalt blir bindemedel sprödare och tål mindre deformationer innan brott, med sjunkande temperatur. Den bestämda nivån, 0,3 mm, nås då vid lägre temperaturer för mer köldbästandiga bindemedel.

Grundläggande egenskaper och klassning för respektive bindemedel sammanfattas i Tabell 2.

Tabell 2. Egenskaper för jungfruligt bindemedel

	Bärlager		Bindlager		Slitlager	
	70/100	Endura F1	50/70	Z3	QMB	Nypol PG76-28
Performance grade, PG	64-22	76-34	64-22	82-28	64-22	76-28
Penetration [dmm]	84	93	55	46	68	67
Mjukpunkt [°C]	45,8	90,5	48,8	90,0	51,6	84,0
Force ductility 5 °C $E_{0,2-0,4}$ [J]	0,5	3,0	0,8	9,5	5,0	5,2
$G^* /\sin\delta = 1$ kPa [°C]	66	96	70	94	71	91
S = 300 MPa [°C]	-17	<-24	-14	-20	-12	-18
T_{FT} [°C]	-6	-32	-3	-14	-13	-24

PG enligt ASTM D6373

$|G^*|/\sin\delta$ från oscillerande skjuvprovning

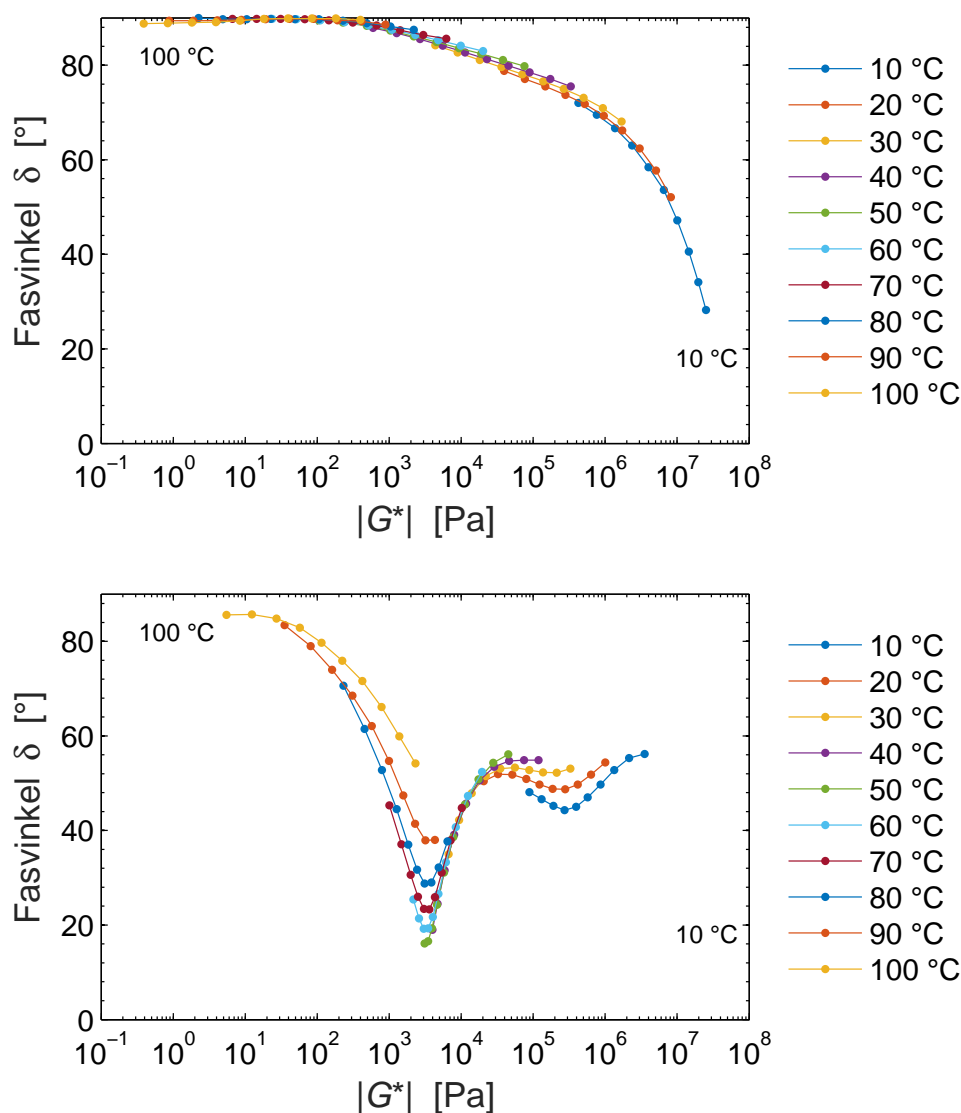
Force ductility, lagrad energi mellan 20 till 40 cm utsträckning

T_{FT} , Fracture toughness temperature, brottseghet

S, styvhet vid balkböjningsprovning, BBR

Det har genomförts en stor mängd reologisk provning i form av temperatur- och frekvenssvep med oscillerande skjuvprovning. I många fall när det gäller (icke-modifierade) bitumen kan dessa sammanfattas i tids- och temperaturskiftade mätningar, s.k. masterkurvor. Detta låter sig göra om materialen är s.k. termoreologiskt enkla och inte genomgår fasförändringar eller andra transitioner i mätområdet. Givet dessa förutsättningar kan frekvens och temperatur relateras och material kan sammanfattas i en kontinuerlig kurva. Detta gäller generellt för många materialegenskaper.

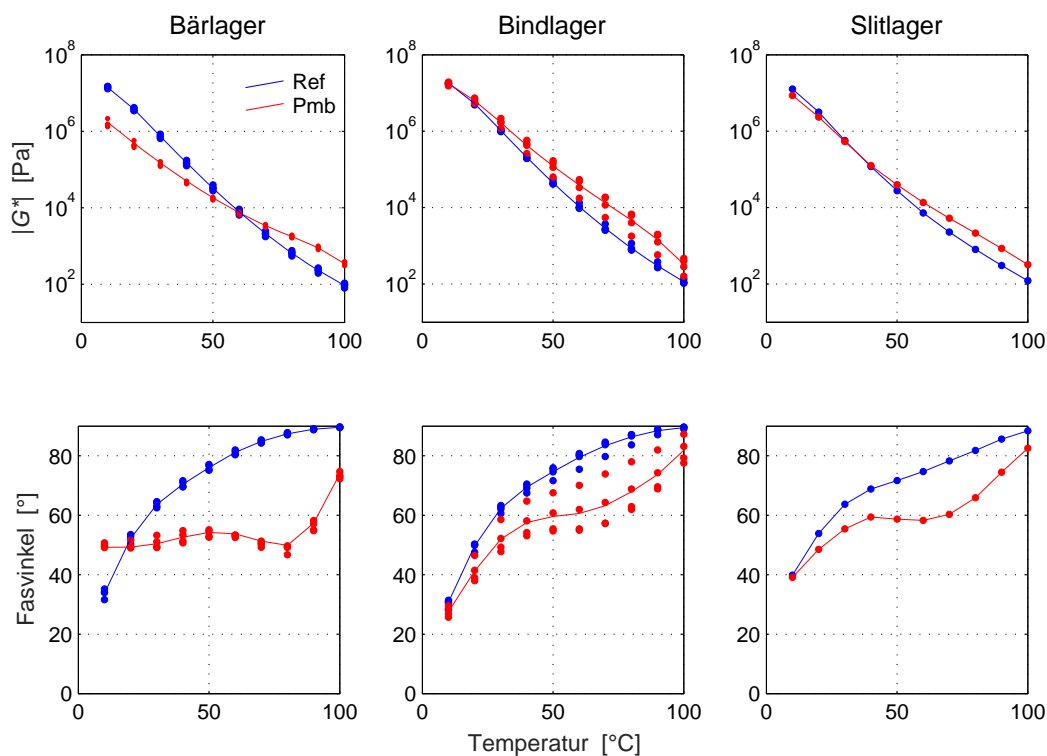
För att bedöma om det är möjligt att sammanfatta provningar i en masterkurva kan respektive mätning vid de olika temperaturerna visas som fasvinkeln som funktion av skjuvmodul (se Figur 5). Skiftbara mätningar bildar då en närmast kontinuerlig kurva.



Figur 5. Oscillerande skjuvprovning vid olika temperaturer: överst 70/100 och under Nynas Endura F1.

Figur 5 indikerar svårigheten att jämföra vanliga bitumen med modifierade bindemedel; Pmb uppvisar egenskaper som inte är skiftbara vilket kan vara rena temperatureffekter eller ökad grad av olinjära effekter. Detta gör det svårt att välja referens- eller jämförelsepunkt: ett relativt förhållande mellan de olika bindemedlen vid en viss tempetur och frekvens behöver inte nödvändigtvis vara detsamma vid andra, d.v.s. rangordningen beror på vilka omständigheter vi väljer. Detta samtidigt som det inte direkt finns någon given omständighet som kan sägas vara referenspunkt. Vi får ett stort antal jämförelser utan att i förväg veta vilken som har högst förklaringsgrad för, i slutändan, vägytans egenskaper.

Figur 6 sammanfattar mätningarna vid 10 rad/s för de olika temperaturerna. De olika bindemedlens generella karaktäristik illustreras men det finns även frekvenskillnader som inte framkommer i denna figur. För bär- och bindlager har 4 prover för respektive lager- och bindemedelstyp återvunnits och analyserats och för slitlaget 1 prov. Samtliga prov visas i Figur 6.



Figur 6. Resultat från oscillerande skjuvprovning, skjuvmodul och fasvinkel som funktion av temperatur vid 10 rad/s.

De modifierade bindemedlens något flackare temperaturberoende är tydligt i Figur 6; de är mjukare (lägre $|G^*|$) vid låga temperaturer och något styvare vid högre. Den högre andelen elasticitet för Pmb är också tydlig genom generellt lägre fasvinklar. Vidare är bindemedlen inom respektive lager tydligt skilda från varandra.

En viktig del av bindemedelsprovningen var att konstatera att rätt bindemedel använts i produktion och att logistiken fungerat. Utöver att vara en viktig parameter för att förklara beläggningens spårbildning är kryp-återgångsprovning (MSCR) en stark indikator för att konstatera att Referens- och Pmb-beläggning har hamnat i rätt försöksruta. Elastomermodifierade bindemedel präglas av mycket hög andel återgående deformation, återgången, R , är hög, jämfört med normala bitumen. Bestämningarna av återgången för återvunnet bindemedel från provsträckorna, sammanfattas i Figur 7.

	Pmb					Referens			
Slitlager	21					65			
Bindlager	3	12	71	80	4	83	55	3	2
Bärlager	92	1	2	95	93	95	1	2	95
Sträcka:	c-x	(1)	b	bc	c	abc	ab	a	ac

Figur 7. Återgång, R , (%) enligt ekvation 1 (0,1 kPa belastning vid 64 °C).

Det är tydlig skillnad mellan Pmb- och Referenslager. I synnerhet för bärlagret är återgången mycket hög för Pmb-delarna. För jungfruliga bindemedel i bär- och bindlager var återgången:

- 70/100 0%
- F1 96 %
- 50/70 0 %
- Z3 95 %.

Från kryp-återgångsförsöken beräknas även den s.k. icke-återgående krypkompliansen (ekvation 2). Denna parameter visar i vissa undersökningar högre förklaringsgrad avseende spårbildning än den parameter som används i PG-systemet, $|G^*|/\sin\delta$. Den synes dessutom vara mer generell och på ett bättre sätt omfatta såväl vanliga som modifierade bindemedel. Bahia m.fl. (2001) konstaterade, baserat på litteraturgenomgång och ambitiös laboratorieprovning att SHRP-parametern för permanent deformation ($1/J''$) inte ger en rättvisande bild när det gäller modifierade bindemedel. I sin rapport föreslog de även en provmetod baserad på krypprovning. Federal Highway Administration har sedan utvecklat en procedur som numera finns som standardiserad metod hos ASTM och AASHTO¹. Tabell 3 sammanfattar den icke-återgående krypkompliansen (enligt ekvation 2) för respektive bindemedel mätt vid 64 °C.

¹ASTM D7405 samt AASHTO T 350.

Tabell 3. Medelvärde av krypkomplians vid 64 °C före respektive bindemedel återvunnet från massa ($MSCR 3,2 \text{ kPa}^{-1}$)

	Referens	Pmb
Bärlager	2,4	0,05
Bindlager	1,6	0,31
Slitlager	2,1	0,22

Även kompliansen visar tydlig skillnad mellan Referens och Pmb.

3.2. ASFALTMASSA

I samband med läggningarna utfördes även produktionsprovning för att säkerställa att bindemedelshalt, kornstorleksfördelning och hålrums halt var inom normala gränser. Delar av dessa mätningar sammanfattas i Tabell 4.

Tabell 4. Sammanfattning av produktionsprovning för resp. massatyp

Lager	Typ	Bindemedelshalt [vikt-%]		Hålrums halt [vol.-%]		
		Recept	Mätt	Recept	Marshall	Borrad
Bärlager	Ref	4,8	4,8	4,8	3,5	4,5
	Pmb	5,1	5,0	4,0	4,1	3,9
Bindlager	Ref	5,5	5,5	3,2	3,5	5,2
	Pmb	5,8	6,0	3,3	2,6	3,0
Slitlager	Ref	5,3	5,2	3,2	3,4	
	Pmb	5,3	5,2	3,3	2,4	

Mätvärden i Tabell 4 är medelvärden baserade på minst 3, i regel avsevärt fler, stickprov. Inga avgörande avvikelser kan noteras.

3.3. BELÄGGNING

3.3.1. STYVHETSMODUL

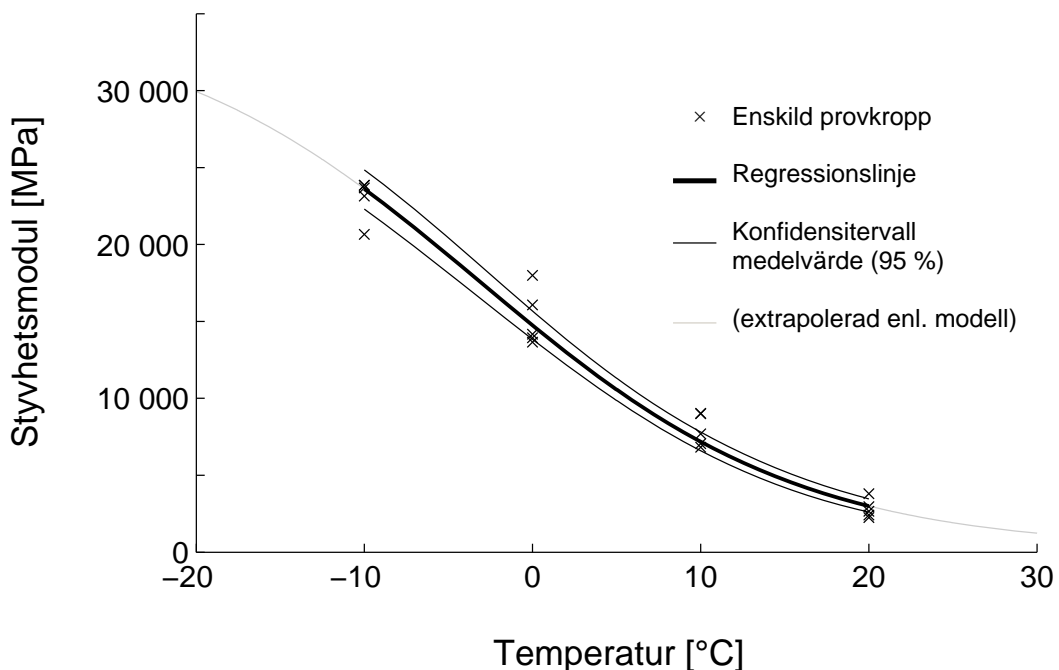
Mätning av styvhetsmodul utfördes på borrade provkroppar vid 4 temperaturer: -10, 0, 10 och 20 °C. Provningsen utfördes som indirekt dragförsök. Provkropparnas diameter var 100 mm och tjockleken strax under nominell lagertjocklek enligt Tabell 1. Belastningspulsens längd var 250 ms (124 ms stigtid) och kraften valdes så att den totala deformationen var kring 5 µm.

Uppmätt styvhet (S) passades till följande modell:

$$S = \frac{S_{max} - S_{min}}{1 + \beta_0 e^{\beta_1 T}} + S_{min}$$

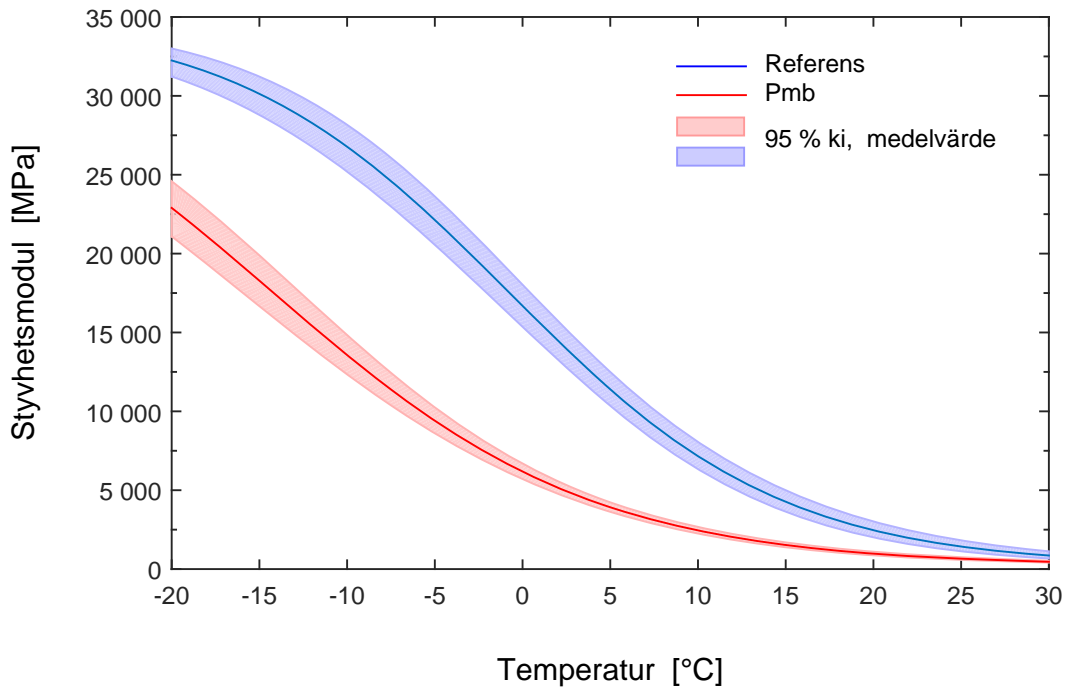
3

där S_{max} och S_{min} är beläggningsens högsta respektive lägsta styvhet, T är absolut temperatur (termodynamisk temperatur) och β_0 och β_1 är regressionsparametrar. För praktiskt bruk är erfarenhetsmässigt asfalts högsta modul kring 35 000 MPa och lägsta kring 200 MPa och detta tämligen oberoende av massa- och bindemedelstyp. Det som skiljer är vid vilken temperatur och belastningshastighet dessa nivåer nås. Antas S_{max} och S_{min} vara konstanta (35 000 resp. 200 MPa) beskriver ekvation 3, logaritmen av styvheten som en linjär funktion av temperaturen. Den s-formade funktionen i ekvation 3 har fördelen att den har ändliga asymptotiska nivåer vid låga och höga temperaturer, vilket väl stämmer med faktiska mätningar över breda temperaturintervall. Figur 8 visar ett typiskt exempel på erhållna resultat och passning till ekvation 3. För varje beläggningstyp analyserades 5 stickprov.



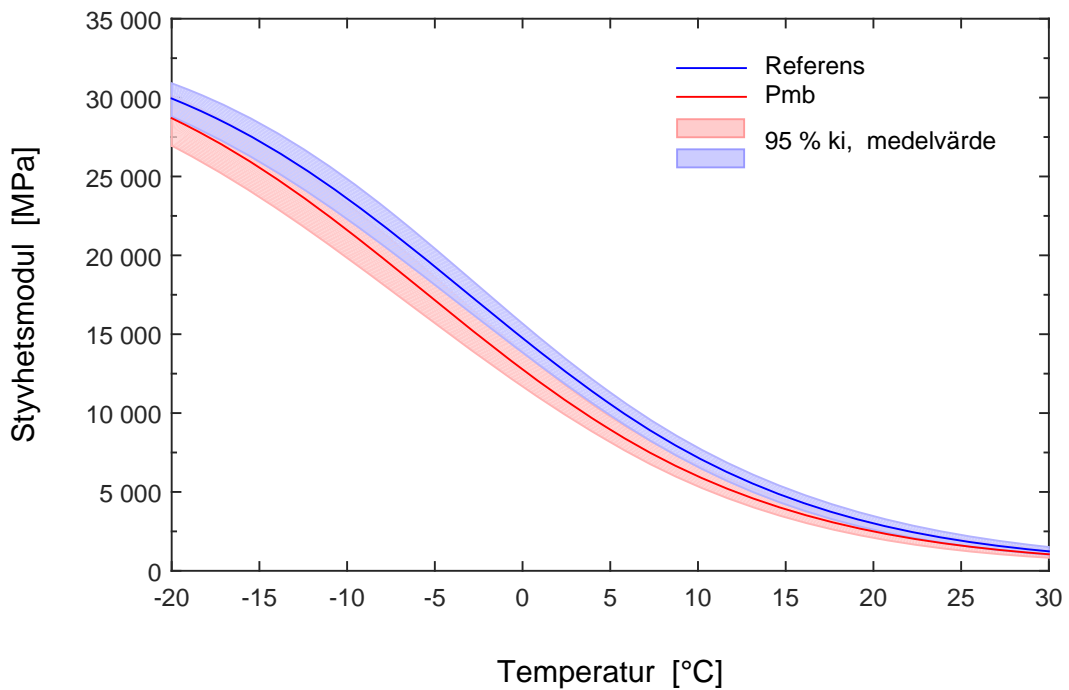
Figur 8. Regression av styvhetsmodul, typiskt exempel.

Mätningarna av beläggningsens styvhetsmodul sammanfattas i nedanstående figurer (Figur 9, Figur 10, Figur 11) som regressionslinje med konfidensintervall för medelvärdet extrapolerat till -20 °C och 30 °C. Figur 9 jämför beläggningar i bärlager.



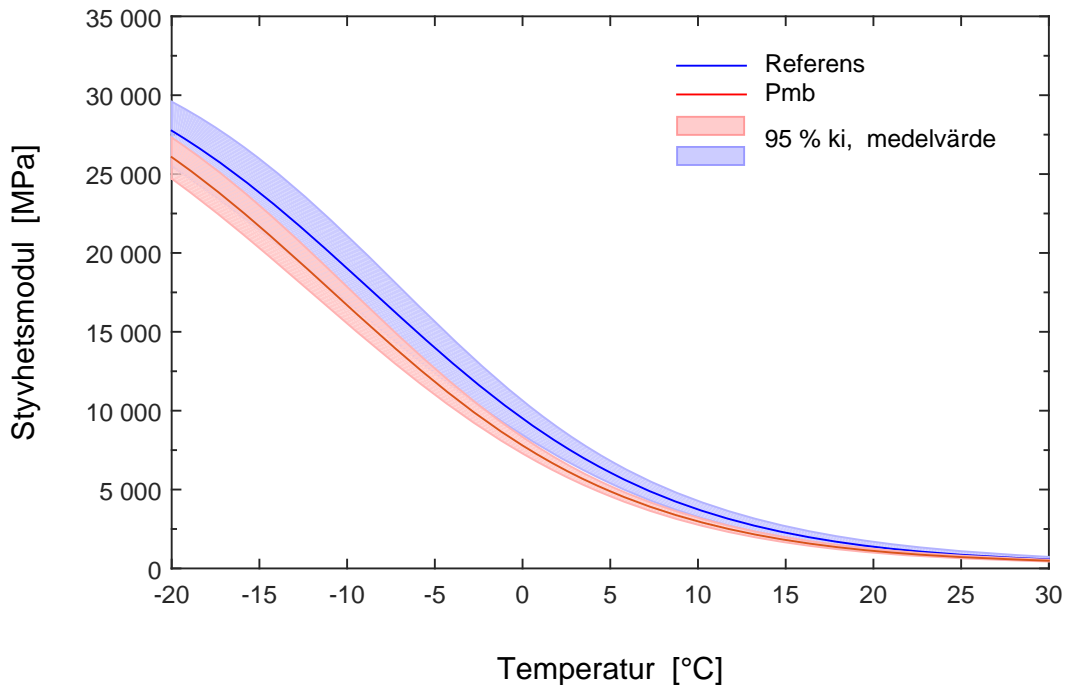
Figur 9. Styvhetsmodul för bärlager (enligt ekvation 3 med konfidensintervall).

Referensbärlagret är mycket styvare än motsvarande Pmb-beläggning. Referensbärlagret är det lager med högst styvhet av samtliga samtidigt som Pmb-bärlagret är det mjukaste. Figur 10 jämför på samma sätt bindlagrens styvhet



Figur 10. Styvhetsmodul för bindlager (enligt ekvation 3 med konfidensintervall).

Skillnaden i bindlagrens styvhet är mindre och i många fall statistiskt överlappande. Figur 11 sammanfattar slutligen styvhetsmodul som funktion av temperatur för slitlagren.



Figur 11. Styvhetsmodul för slitlager (enligt ekvation 3 med konfidensintervall).

Även för slitlagret är skillnaden mindre mellan Referens och Pmb-beläggning jämfört med bärlagret och i delar överlappande dvs. skillnaden är inte statistiskt signifikant. Tabell 5 sammanfattar samtliga beläggnings regressionskoefficienter tillsammans med förklaringsgrad (R^2)

Tabell 5. Regressionskoefficienter för respektive beläggning

Lager	Bindemedel	β_0 []	β_1 [1/K]	R^2
Slitlager	Ref	$3,49 \cdot 10^{-14}$	0,117	0,95
	Pmb	$4,80 \cdot 10^{-14}$	0,117	0,98
Bindlager	Ref	$4,69 \cdot 10^{-13}$	0,105	0,97
	Pmb	$8,25 \cdot 10^{-13}$	0,104	0,96
Bärlager	Ref	$7,37 \cdot 10^{-16}$	0,128	0,96
	Pmb	$4,23 \cdot 10^{-13}$	0,110	0,98

Sammantaget är referenskonstruktionen styvare i alla lager och mycket styvare i bärlager, framförallt vid lägre temperaturer. Vid en simulerad plattbelastning² vid 10 °C blir ytdeflektionen ungefär 0,4 mm för Referenskonstruktionen (1) mot 0,5 mm för Pmb-delen (abc). Även tryckspänningsnivån på terrassen blir något högre för Pmb-konstruktionen: 20 kPa mot 17 kPa. Dessa beräkningar bör endast ses som illustrerande exempel. Det bör påpekas att beläggningslagrens styvhet inte ensamt förklarar konstruktionens funktion.

3.3.2. PERMANENTA DEFORMATIONER

Beläggningsens beteende avseende ackumulerande deformationer under repeterad långvarig belastning undersöktes på 2 sätt:

- dynamisk krypprovning³ vid 40 °C (bär- och bindlager)
- Hamburg wheel-track vid 60 °C. (samtliga lager)

Dynamisk krypprovning utfördes på borrhärnor med diameter 150 mm, 5 stickprov ur bär- och bindlager. Provtjockleken var beläggningslagrets tjocklek. Belastningen med diametern 100 mm, bestod av fyrkantspulser med 1 s pålast, motsvarande 100 kPa, och 1 s avlast. Belastningsplattans nedsjunkning som funktion av antalet belastningspulser (totalt 3600) mättes.

Wheel-trackförsöken utfördes på laborietillverkade provplattor, 260 × 320 mm. Massakartongerna värmdes till 150 °C och plattorna packades tills nominell hålrums halt uppnåddes. Spårbildningen på 2 prov av varje blandning mättes under 20 000 pålastningar: 10 000 cykler fram- och återgående. Provning genomfördes i luft och i vatten vid 60 °C.

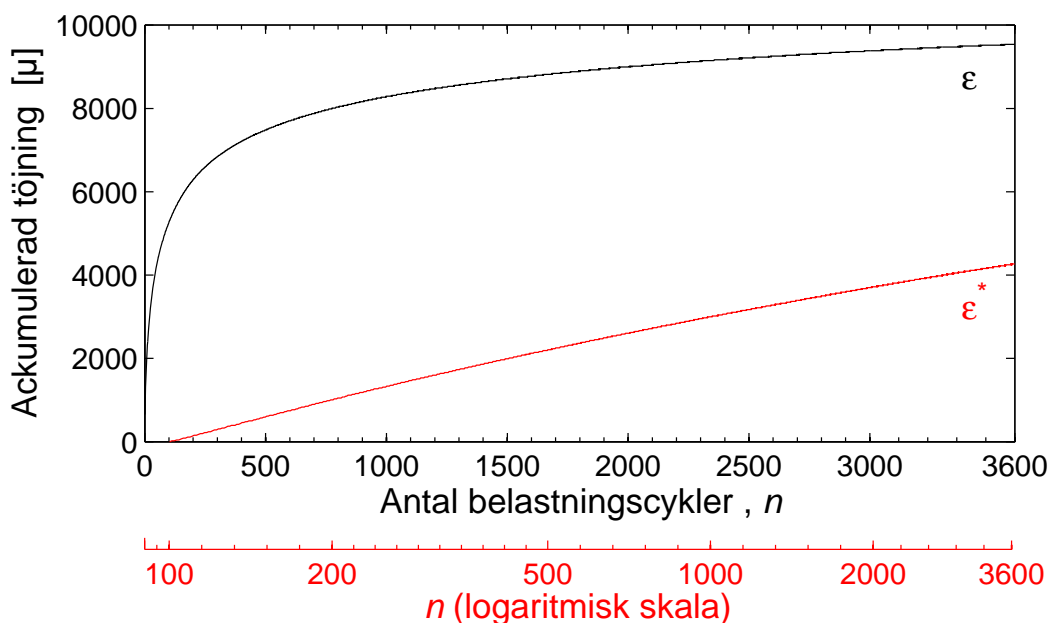
Ur mätningarna av ackumulerad deformation som funktion av antal belastningar, analyserades 2 parametrar:

- slutlig ackumulerad deformation
- kurvans lutning vid slut.

Figur 12 visar ett typiskt resultat från dynamisk krypprovning; wheel-trackresultat uppvisar generellt liknande mönster.

² Linjärelastisk multilager: obundna lager 0,5 m, 100 MPa; terrass 80 MPa

³ Pulserande kryptest



Figur 12. Exempel på resultat från provning av permanent deformation vid repeterad tryckbelastning (dynamisk kryp: resultat från provning (ε) och normaliserad töjning (ε^*) enligt ekvation 4).

Definitionen av slutlig deformation är rättfram. Lutningen definieras och bestäms enligt nedan. Vi väljer att exkludera de första 100 lastcyklerna av 2 skäl: ackumuleringen är både snabb och snabbt avtagande vilket är svårmodellerat samtidigt som detta förlopp kan skilja mellan enskilda provkroppar på ett närmast slumpmässigt sätt beroende på imperfektioner och varierande anliggning. Normaliserad töjning (ε^*), dvs. töjning efter 100 cykler, definieras således som:

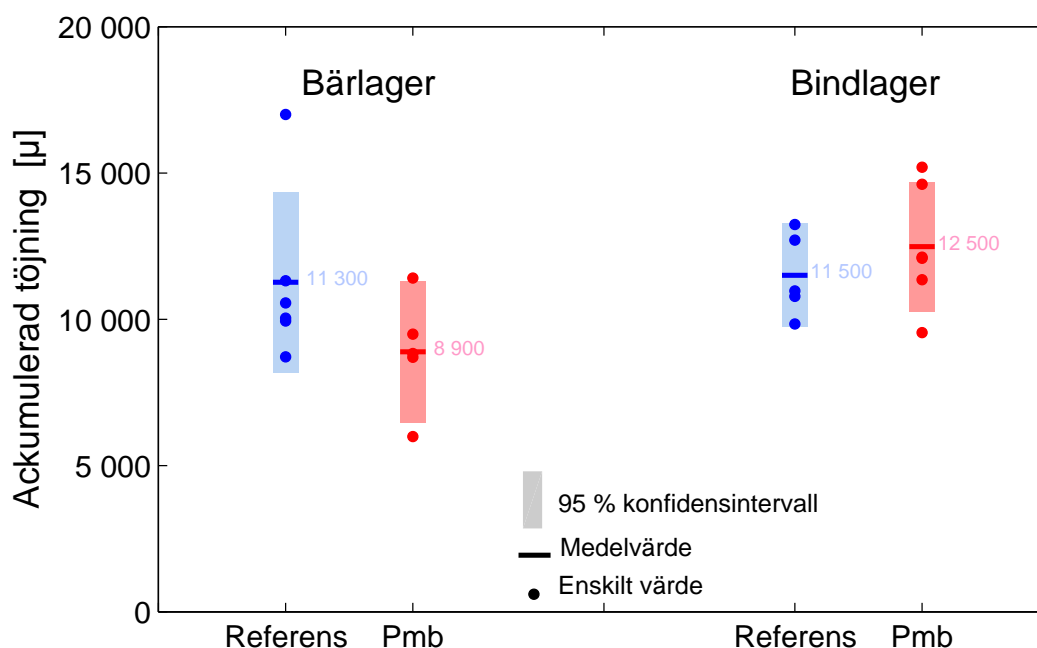
$$\varepsilon_n^* = \varepsilon_n - \varepsilon_{100} \quad n \geq 100 \quad 4$$

där ε_{100} är töjningen vid 100 lastcykler och ε_n uppmätt töjning vid lastcykel n . Den normaliserade töjningen uttryck sedan som en funktion av logaritmen av antalet belastningar enligt:

$$\varepsilon^* = \beta_0 + \beta_1 \log n + \beta_2 \log^2 n \quad 5$$

där β_i är regressionskoefficienter. Beräkningen exemplifieras i Figur 12. Kurvans lutning bestäms sedan vid 3600 lastpulser (eller 20 000 för wheel-track).

Resultat avseende slutlig töjning efter dynamisk krypprovning vid 40 °C sammanfattas i Figur 13.



Figur 13. Ackumulerad töjning efter 3600 lastpulser: enskilda resultat, medelvärde och konfidensintervall i bär- respektive bindlager.

Spridningen mellan provkroppar är ofta tämligen stor vid denna typ av provning, vilket är tydligt i Figur 13. Bestämda parametrar, slutlig töjning, normaliserad töjning samt lutning, sammanfattas i Tabell 6. För att undersöka om det förelåg någon skillnad mellan de olika beläggningarna genomfördes en envägs variansanalys för respektive parameter, vilket i Tabell 6 sammanfattas som differensen (Referens - Pmb) för respektive lager.

Tabell 6. Uppmätta och beräknade resultat från dynamisk krypprovning efter 3600 lastpulser. Statistiskt signifikanta differenser (Ref-Pmb) indikeras

Parameter	Bärlager		Bindlager	
	Ref	Pmb	Ref	Pmb
Ackumulerad töjning [μ]	11 300	8 900	11 500	12 500
Ref-Pmb	2 400		-1 000	
Normaliserad töjning [μ]	5 500	3 500	5 600	6 000
Ref-Pmb	2 000*		-400	
Lutning	4 200	2 000	4 100	3 100
Ref-Pmb	2 200*		1 000	

* Skillnaden är signifikant med 95 % säkerhet

Den enda statistiskt signifikanta skillnaden inom respektive beläggninglager är för bärlager (Referens och Pmb) avseende normaliserad töjning och lutning: Pmb-beläggningen visar lägre ackumulerad töjning efter 100 cykler och lägre lutning

vid 3600 cykler, jämfört med Referens. Det är även så att Pmb-bärlagret visar signifikant lägre normaliserad töjning och lutning än samtliga övriga lager. Övriga skillnader kan förklaras med slumpfel.

Resultat från wheel-track i form av uppmätt spår djup analyserades på motsvarande sätt. Då spår djupsutvecklingens mönster skilde alltför mycket mellan prover och beläggningstyper gick det inte på ett enkelt sätt karakterisera spår djupsutvecklingen i en lutningsparameter. För att om möjligt fånga den långsiktiga ackumuleringen, efter den initiala fasen, definieras en enkel lutningsterm som:

$$\Delta = S_{20\,000} - S_{10\,000} \quad 6$$

där Δ är skillnaden och $S_{20\,000}$ och $S_{10\,000}$ är spår djup efter 20 000 respektive 10 000 belastningar. Tabell 7 sammanfattar erhållna resultat.

Tabell 7. Resultat från provning med Wheel-trackutrustning: S , spår djup och Δ , skillnaden mellan spår djup efter 20 000 och 10 000 belastningar (mm)

Betingelse	Spår	Bärlager		Bindlager		Slitlager	
		Ref	Pmb	Ref	Pmb	Ref	Pmb
Luft	S	3,7	2,6	5,8	2,8	11,1	2,1
	Δ	0,5	0,3	1,5	0,3	5,3	0,3
Vatten	S	4,0	3,5	12,7	2,7	11,5	2,3
	Δ	0,6	0,6	6,1	0,3	5,8	0,4

En variansanalys för respektive lager med *Betingelse* och *bindemedel* (Ref kontra Pmb) som huvudeffekter visar några signifikanta skillnader avseende totalt spår djup:

- i bärlagret kan skillnaderna förklaras med slumpfel
- i bindlagret visar Pmb-beläggningen lägre spår djup och Referensens spår djup är högre vid vattenlagring. Övriga skillnader kan bero på slumpfel
- i slitlagret ger Referensbeläggningen högre spår djup men ingen påverkan av vatten.

I sammanhanget kan det påpekas att vid provning av Referensslitlager var spridningen mycket stor och något prov föll sönder under provning.

Motsvarande analys av lutningen (Δ) ger följande slutsatser:

- i bärlagret ökar spårbildningshastigheten under vattenlagring men det föreligger inga skillnader mellan bindemedelstyper
- i bärlagret ger Pmb-beläggningen lägre spårtillväxt

- övriga noterade skillnader kan bero på slumpfel; analysens styrka är dock svag p.g.a. den stora spridningen i Referensslitlagerbeläggnings.

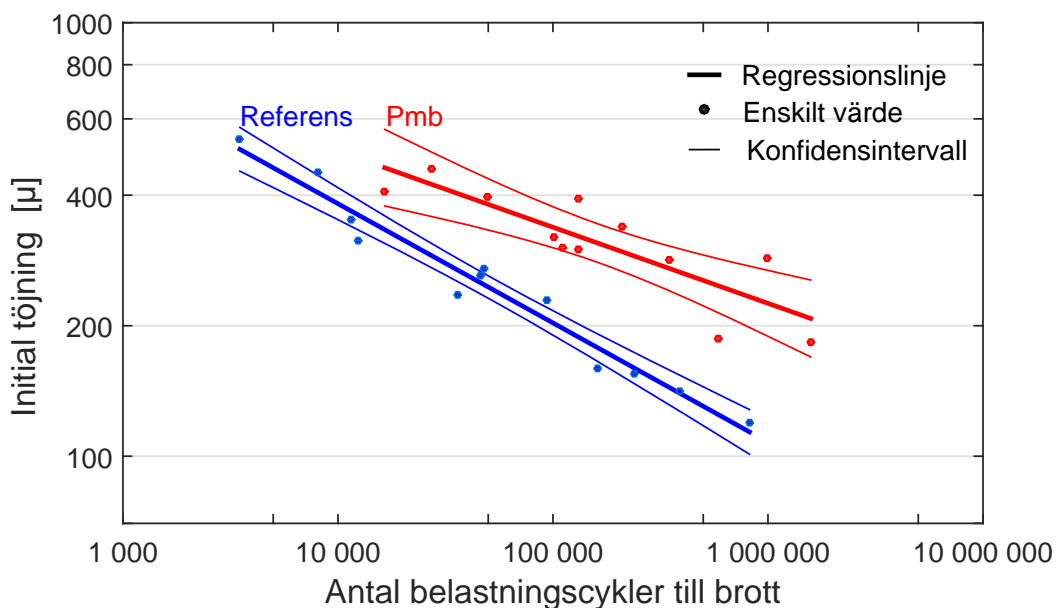
3.3.3. UTMATTNING

En skadetyper som förhoppningsvis inte kommer att bli framträdande på provvägen är sprickbildning då denna skada i regel utvecklas först efter en längre tid och sedan accelererande. Detta till skillnad mot spårbildning som generellt är linjär inom de områden spår normalt tillåts vara innan beläggnings åtgärdas. Bedömningen av beläggnings funktion i detta avseende kommer därför främst att ske på basis av laboratorieprovning.

Utmattningsprovningen av bärlager har utförts enligt Said (1995). Provningsen utfördes i indirekt drag på borrhärnor, 12 stickprov ur varje bärlagerbeläggning. Översiktligt består provningen av repeterade belastningar vid konstant kraftnivå och belastningen pågår till brott. Erhållna resultat uttrycks i Said (1995) som initial töjningsnivån (ϵ_i) som funktion av antalet belastningscykler (N_f) till brott:

$$\epsilon_i = K' \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-a} \quad 7$$

där K' och a är regressionskoefficienter. K' definieras som regressionslinjen töjningsnivå vid 1 miljon belastningscykler. Töjningen är inte konstant vid denna typ av provning utan initial töjningsnivå bestäms baserat på maximal deformation vid cykel 100 och minimal vid cykel 60. Figur 14 åskådliggör erhållna utmattningsresultat: initial töjning som funktion av antal belastningscykler och regressionspassning till ekvation 7 med medelvärdes konfidensintervall.



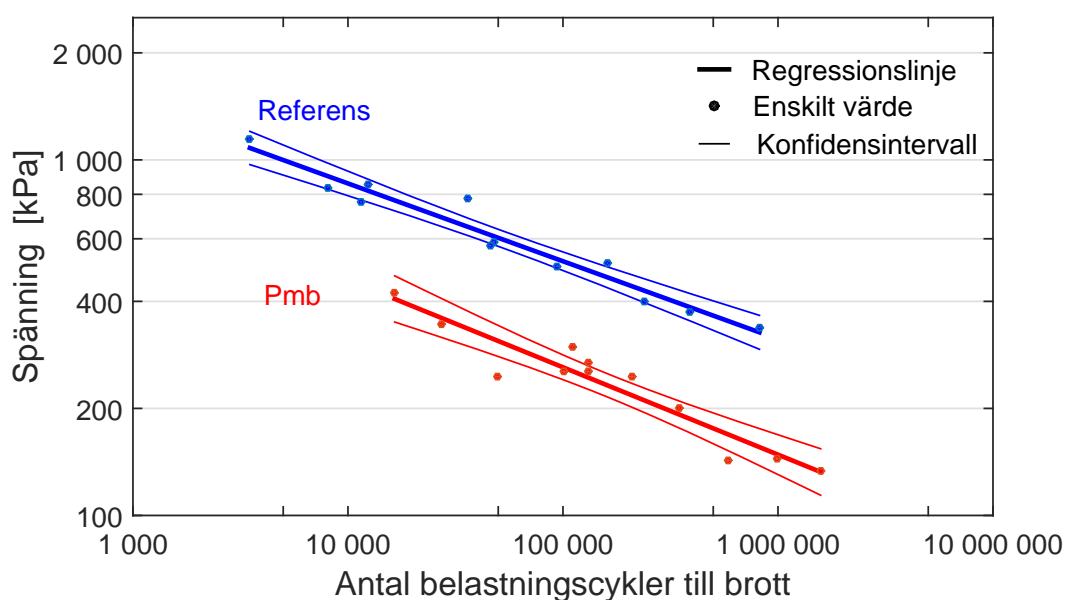
Figur 14. Initial töjningsnivå som funktion av antalet lastcykler till brott.

K' är en jämförelseparameter som definieras i Said (1995) och har använts i Trafikverkets regelverk och är den maximala belastningsnivå som beläggningen tål för att nå 1 miljon belastningscykler; desto högre denna nivå är desto högre motstånd mot utmattningsprickor. För dessa två beläggningstyper är K' :

- Referens 110 μ
- Pmb 230 μ .

Detta innebär att Pmb tål nära den dubbla töjningsnivån, jämfört med Referens, och fortfarande nå 1 miljon cykler.

Man kan även analysera VTI:s mätningar på det sätt de faktiska provningarna är utförda dvs. med konstant spänning: man har valt en kraftnivå och försöket har pågått till brott. Figur 15 sammanfattar en motsvarande statistisk analys som tidigare men med spänningsnivå som beroende variabel.



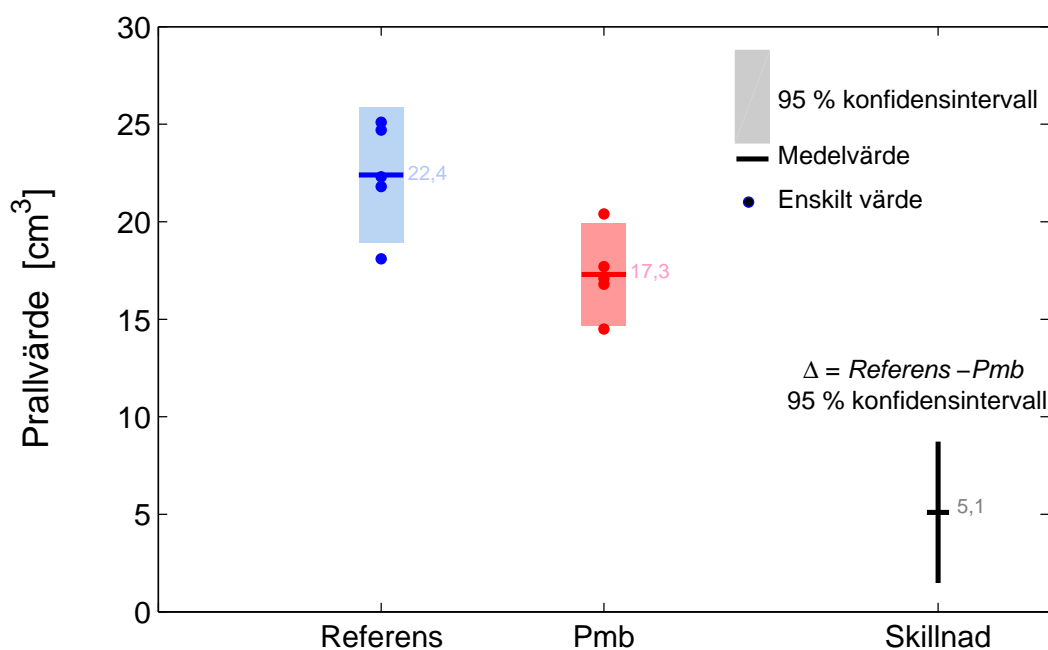
Figur 15. Spänning och motvarande antal belastningscykler till brott.

Uttryckt i spänningstermer bli relationen den motsatta; Referensbeläggningen tål högre belastningar. Uttrycks detta som K' enligt ekvation 7 med töjning ersatt med spänning blir resultatet:

- Referens 310 kPa
- Pmb 150 kPa.

3.3.4. BESTÄNDIGHET: NÖTNINGSMOTSTÅND ENLIGT PRALL OCH VATTENKÄNSLIGHET (ITSR)

Från vardera slitlagertyp borrades 5 prover slumpmässigt för undersökning av nötningsbeständighet enligt Prall. Resultaten sammanfattas i Figur 16.

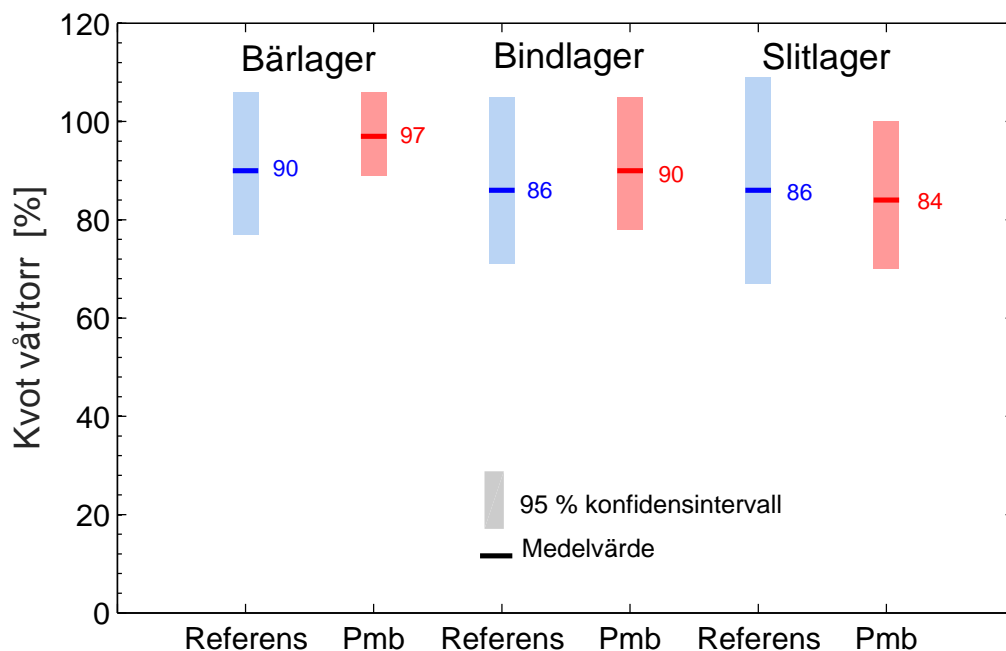


Figur 16. Nötning enligt Prall för slitlager: enskilda resultat, medelvärde, konfidensintervall och skillnad mellan Referens och Pmb.

Skillnaden i nötningsbeständighet är statistiskt signifikant: i genomsnitt är Prallvärdet ca 5 cm³ lägre för slitlager med PG 76-28. Det finns en liten skillnad i stenmaterial då Referensbeläggningen innehåller återvunnen asfalt. Skillnaden i de grövre fraktionerna bör dock vara liten då återvunnet asfaltgranulat främst innehåller finare material.

Vattenkänslighet (ITSR⁴) provades på borrhärnor ur bär- och bindlager medan slitlagret provades på laboratorietillverkade provkroppar (marshall). Figur 17 visar resultat med 95 % konfidensintervall för kvoten (enl. Fieller, 1940).

⁴ Indirect tensile strength ratio.



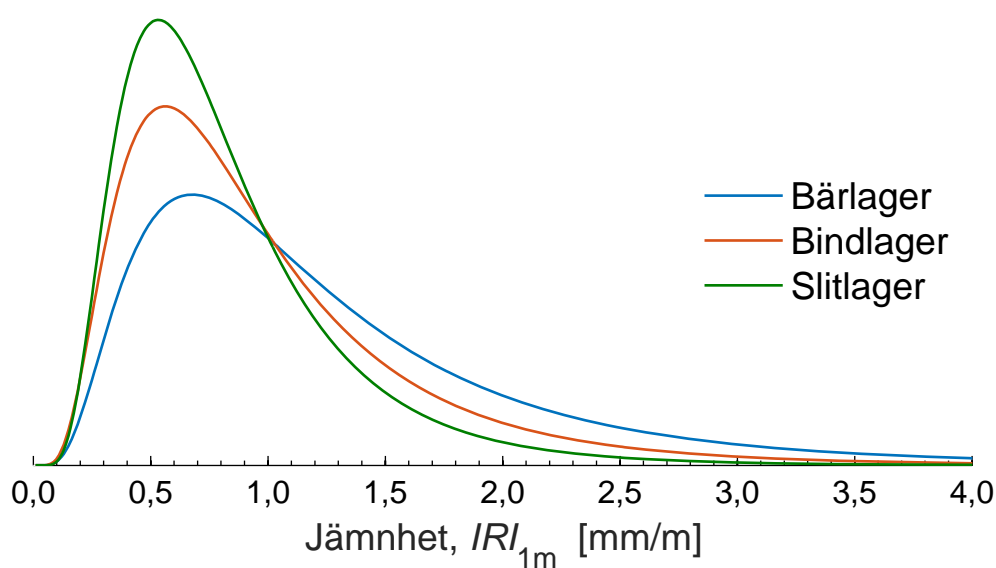
Figur 17. Vattenkänslighet uttryckt som kvoten av indirekt draghållfasthet för våtlagrade respektive torrlagrade provkroppar (konfidensintervall enligt Fieller, 1940).

Endast små skillnader i vattenkänslighet kan ses i Figur 17 och i inget fall är dessa statistiskt signifikanta. Det kan noteras att observerade mätvärden är statistiskt relativt svaga då de utgör kvoten av 2 medelvärden med spridning.

3.4. VÄGYTA

För provväg Skänninge kommer vägytans jämnhet att vara dit huvudintresset och -ansträngningarna riktas. Övriga undersökningar, främst redovisade i denna rapport, utförs dels för att kvalitetssäkra utförandet dels för att i någon mån utgöra förklarande faktorer vid analysen av vägytans jämnhet. I detta skede är det dock för tidigt att annat än mycket översiktligt redovisa jämnhet som den var i samband med färdigställandet. Mätstorheter och mätutrustning beskrivs i Trafikverkets metodbeskrivningar 121 och 122, som behandlar vägytemätning med mätbil.

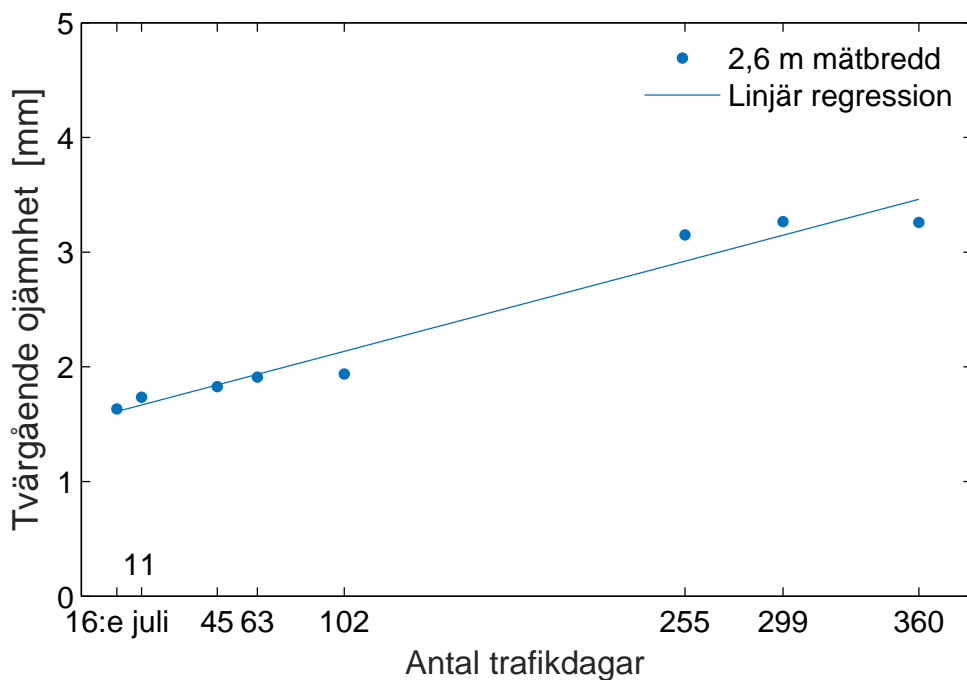
Mätningar har utförts på samtliga lager direkt efter färdigställandet. Figur 18 visar fördelningar (täthetsfunktion) av uppmätt längsgående jämnhet, *IRI* medelvärde över 1m, för de olika beläggningslagren. Visade täthetsfunktioner är lognormalfördelningar baserade på mätdata.



Figur 18. Fördelning av mätvärden, IRI_{1m} , avseende längsgående jämnhet på de 3 olika lagren: medelvärden för bärlager 1,30 mm/m; bindlager 0,99 mm/m; slitlager 0,82 mm/m.

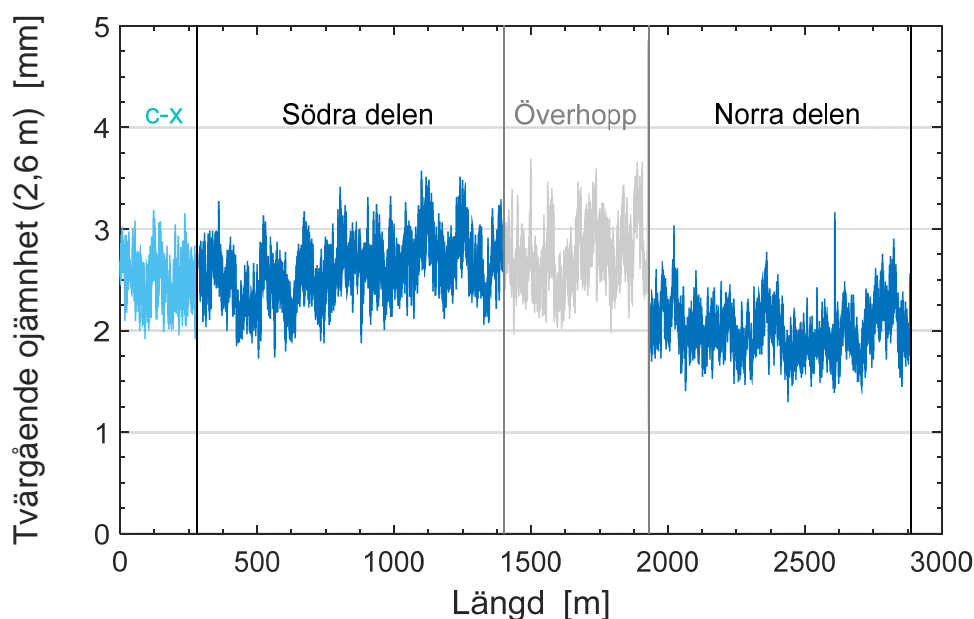
Figur 18 visar tydligt den successivt allt jämnare ytan med ökat antal lager: fördelningen förskjuts åt vänster. Det är inte meningsfullt att dela mätningarna efter provsträckor då den längsgående jämnheten i detta skede är produktionsrelaterad och svårigen kan tänkas bero på beläggningstyp.

Bär- och bindlager lades 2012 och slitlagret i stort sett 1 år senare. Bindlagret trafikerades under denna tid av ordinarie trafik. Vägytans jämnhet har mätts vid ett flertal tillfällen (sammanlagt 8 gånger). Även i detta fall blir ytterligare delning, per provsträcka, osäker, varför Figur 19 endast presenterar medelvärden för hela provsträckan (d.v.s. överhopp exkluderat).



Figur 19. Tvärgående ojämnhet (spår djup) under 1 års trafikering av bindlager: medelvärde för hela provvägen. Mätningen 16:e juli på ofrafikerad yta.

Det bör påpekas att mätningarna är på mycket låga absoluta nivåer varför inflytandet av mätonoggrannheter och varierande körmönster blir relativt större. Under hösten ökar spår djupet några enstaka tiondels mm. Efter vintern (mellan dag 103 och 255) ökar spår djupet med ungefär 1 mm. Detta kan ha flera orsaker, varav nötnings slitage är den uppenbara, eventuellt accentuerat av att bindlagrets stensammansättning (fördelning och kulkvarns värde) inte är avsedd att motstå slitage. Det var även så att den passerade vintern var osedvanligt sträng avseende djupgående tjäle. Spår djupsmätningarna är på en så låg absolut nivå att de påverkas av allmänna ojämnheter utöver trafikinducerad spår bildning. Tjälen kan ha orsakat små och utspridda ojämnheter som i den trådmodell som används för spår djupsbestämning detekteras som ojämnheter. Nivåerna är hur som helst små. Direkt innan läggning av slitlager var medelspår djupet 3,3 mm. Tvärgående ojämnheter efter slitlagerläggning visas i Figur 20.



Figur 20. Första mätningen av slitlagrets jämnhet: tvärgående (spår djup) 2,6 m mätbredd.

Slitlagret visar något högre spår djup direkt efter läggning jämfört med bindlagret. Nivåerna är dock tämligen låga och utgör dessutom referensnivåer utifrån vilka framtida spårutveckling analyseras. I övrigt kan man notera en oförklarad skillnad mellan delarna där den norr delen (Pmb-beläggning) förefaller ligga på en lägre nivå. Det fanns inga skillnader i använd utrustning eller i övriga omständigheter.

Mätning av vägytan kommer framgent att ske minst 2 gånger per år: vår och höst.

4. DISKUSSION

Då blicken främst är riktad mot framtiden och vägprestanda i form av vägytans jämnhet blir analysen i nuläget med nödvändighet lite andefattig. Redovisningen präglas av rapportering av en mängd laboratorieanalyser. Det finns i nuläget ännu inget att förhålla dessa mätningar till.

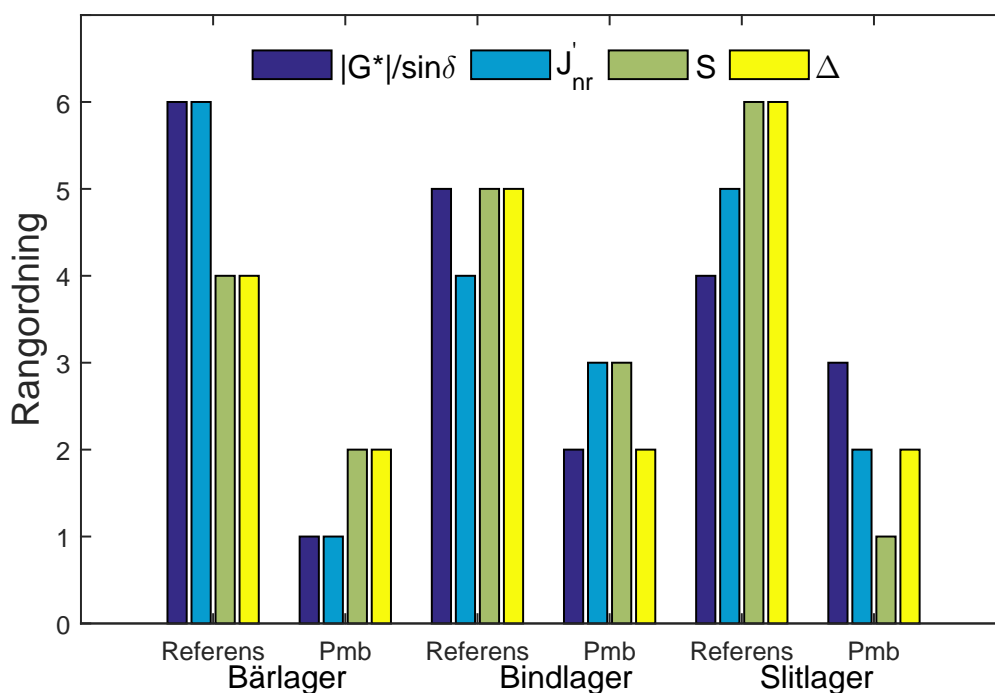
En viktig del av analyserna av återvunnet bindemedel var att bekräfta att beläggningen blev utförd enligt provschemat, d.v.s. att rätt beläggningstyp hamnade på rätt plats. Provning avseende bindemedlets elastiska egenskaper är i detta fall utslagsgivande då det är stor skillnad mellan Pmb- och Referensbindemedel. Bindemedel i bindlagret varierar något mer än övriga delar men det finns ingen tydlig anledning att tro att någon del inte utförts som avsett.

Laboratiormätningar syftar till att göra någon typ av prognos över framtida prestanda, att i förväg, baserat på erfarenhet, bedöma om utfört arbete förväntas uppfylla de krav man ställer. I detta projekt riktas uppmärksamheten mot vägytans egenskaper och då främst spår djup. Laboratiormätningar med syfte att bedöma

spårutvecklingen har utförts på både bindemedel och beläggning. I sammandrag omfattar denna provning följande bestämningar:

- $|G^*|/\sin \delta$ PG-parameter (bindemedel)
- J'_{nr} icke-återgående krypkomplians (bindemedel)
- S spårdjup i wheel-track (beläggning)
- Δ spårdjupsutveckling i wheel-track (beläggning)
- ε ackumulerad töjning vid dynamisk kryp (beläggning)
- Lutning lutning vid 3600 cykler under dynamisk kryp (beläggn.).

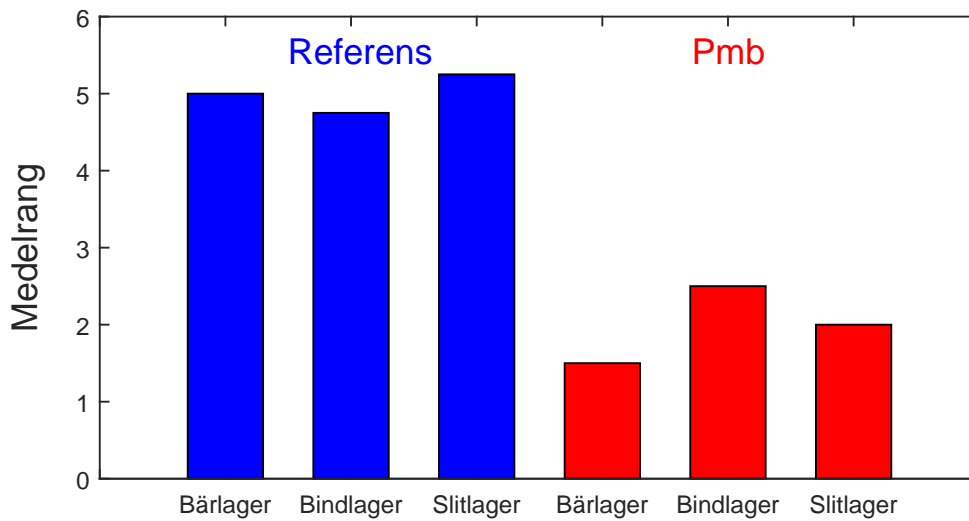
Samtliga dessa gör anspråk på att prediktera framtida uppträdande. Det visar sig att de inte nödvändigtvis är samstämmiga och framförallt inte lätt jämförbara. Det är däremot lättare att jämföra rangordningar. De 4 första parametrarna enligt ovan har bestämts för samtliga beläggningstyper. Dynamiskt krypförsök utfördes på borrhärdar och slitlagret bedömdes vara för tunt för att provning skall vara meningsfull. För varje parameter rangordnas beläggningstyperna efter motstånd mot permanenta deformationer där 1 är bäst. Figur 21 sammanfattar rangordningen avseende dessa parametrar uppdelade efter beläggningstyp.



Figur 21. Rangordning inom respektive laboratoriebestämd parameter för de olika beläggningstyperna.

Som synes i Figur 21 varierar rangordningen något men vissa mönster kan skönjas: exempelvis rangordnas Pmb-bärlagret i regel högt och Referensslitlagret lågt. Överlag verkar Pmb-beläggningarna rankas högre än Referensbeläggningarna. Eventuella rangordningsskillnader kan undersökas

statistiskt. Den genomsnittliga rangordningen för de olika beläggningarna visas i Figur 22.

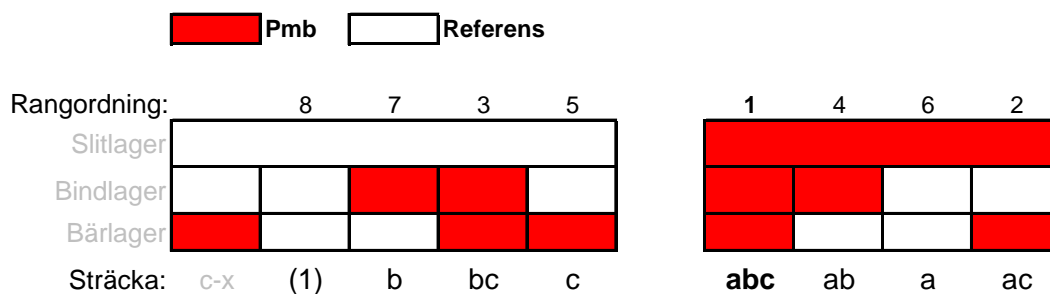


Figur 22. Genomsnittlig rangordning för de olika beläggningstyperna med avseende på motstånd mot permanent deformation.

Av de provade beläggningarna i Figur 22, har Pmb-bärlagret den bästa rangordningen och Referensslitlagret den sämsta. Friedmans rangordningstest visar att det föreligger statistiskt signifikanta skillnader mellan de använda bindemedlen ($p = 0,002$). För att undersöka vilka skillnader i rangordning som är statistiskt signifikanta genomförde ett s.k. Conover-test. Den huvudsakliga slutsatsen från denna analys är att gruppen med Pmb-beläggningar har signifikant bättre rangordning än gruppen Referensbeläggning. Inom respektive grupp kan skillnaderna förklaras med slumpfel. För bär- och bindlager kan motsvarande analys omfattande samtliga 6 parametrar i ovanstående lista utföras. Resultaten blir detsamma: Pmb-beläggningarna rangordnas signifikant bättre jämfört med Referensbeläggningarna.

Det bör påpekas den statistiska metoden (Friedmans rangordningstest) inte påverkas av uppmätta skillnaders storlek dvs. skillnaden mellan två beläggningstyper kan i praktiken vara försumbar, vilket dock inte visar sig i rangordningen. Vidare görs inte heller någon viktning av de enskilda mätningarna, samtliga mätningar tillskrivs samma grad av betydelse.

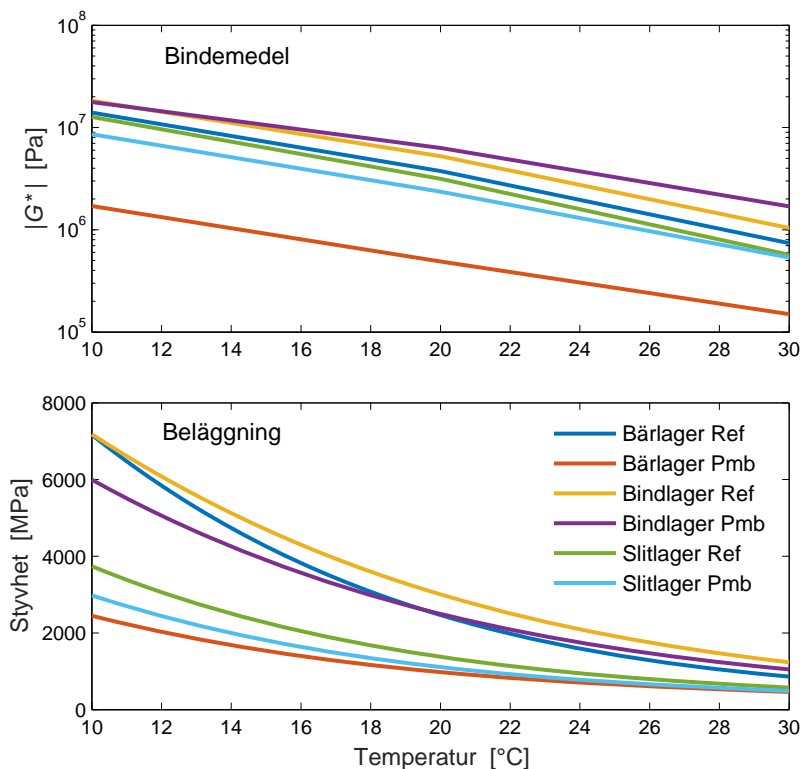
En till grundlös spekulation gränsande jämförelse mellan de olika delsträckorna kan göras genom att summera varje beläggningstyps rangordning. En sammanfattning av detta visas i Figur 23.



Figur 23. Summerad rangordning för respektive provvägsdel: sträckan abc med Pmb-beläggning i samtliga lager rangordnas som 1.

Som väntat rangordnas den helmodifierade sträckan som bäst och delen med enbart Referensbeläggning som sämst. Det bör starkt påpekas att denna jämförelse är mycket förenklad; inga hänsyn tas till respektive lagrets relativa andel i konstruktionen eller till faktisk spänningsfördelning; ett bärigt bindlager kan t.ex. minska det negativa inflytandet av ett mindre motståndskraftigt bärlager.

Bestämning av bindemedlets styvhet i laboratorium syftar bl.a. till att prediktera styvhet i färdig överbyggnad som i sin tur anses ha bäring på vägens framtida skada i termer av sprickor och spår. Figur 24 jämför bindemedlets styvhet med motsvarande beläggning i det temperaturintervall båda finns mätta.



Figur 24. Jämförelse mellan bindemedlets och beläggningens styvhet för de olika massatyperna.

Överensstämmelsen är hygglig men inte fullständig, det visuellt gyttriga intrycket till trots. Något annat är inte att förvänta då både stenmateriallets sammansättning och egenskaper, samt de volumetriska andelarna, sten, bindemedel och hålrum, skiljer. En komplicerande fråga är vad denna förment elastiska analys faktisk betyder för vägens uppträdande. Särskilt som bindemedlens och därmed i viss mån beläggnings reologiska signatur skiljer rätt mycket. Jämfört med Referenserna präglas Pmb-bindemedlen av hög grad av gummielasticitet: lite hårddraget kan Referenserna sägas vara rejält hårda och Pmb-alternativen mjukare men med hög grad av gummielasticitet. Den elastiska analys för att bedöma skada man normalt gör täcker nog inte dessa fall väl: den premierar hårdhet framför gummielasticitet. En elastisk analys av de provsträckor vi har visar att Pmb-beläggningarna utsätts för större töjningsnivåer vilket skulle betyda snabbare skada. Detta strider mot projektets grundhypotes: ”polymermodifierade bitumen (PmB) förbättrar beläggnings prestanda”. De utmattningsförsök som utförts är inte heller nödvändigtvis entydiga och lider även de av att beläggningsskategorier (Referens och Pmb) egenskaper skiljer så mycket att man inte riktigt provar samma sak, eller att analysen blir missvisande mer på grund av provmetoden än grundläggande uppträdande. En observation som var tydlig vid utmattningsförsöken var brottets förlopp och utseende: Referenser visade ett relativt snabbt och fullständigt brott medan Pmb-förloppen var mer utdragna och ledde emellanåt inte till fullständig kollaps.

De utmattningsförsök som utfördes visar också ett klassiskt dilemma med utfallets beroende av belastningstyp: konstant töjning eller konstant spänning. Resultaten är i regel inte samstämmiga utan beror även av faktorer som vi i analysen vill hålla utanför den rena utmattningen som styvhet och viskoelastisk status. I det här fallet med stor reologisk skillnad, hårt jämfört med elastiskt, är skillnaden osedvanligt tydlig. Det svenska ramverket för utmattning omfattar analys baserad på initial töjning. Under detta förefaller Pmb-beläggingen mer uthållig.

Laboratorieförsök genomförs som sagt för att prediktera framtida uppträdande eller för att bekräfta kvaliteten hos produkter med känt uppträdande. Mycket av den laboratorieprovning som utförts i detta projekt illustrerar svårigheten att jämföra bindemedel och beläggning med särskild reologi.

Baserat på undersökningar redovisade i denna rapport kan följande slutsatser dras:

- bindemedelsprovningen indikerar att varje delsträcka är byggd med avsedd beläggningstyp
- utlagd beläggning visar normal kvalitet avseende hålrumshalt och sammansättning

- provning som genomförts med syfte att bedöma motstånd mot permanenta deformationer visar att Pmb-beläggningarna förväntas prestera bättre än Referensbeläggningarna
- vattenkänsligheten är likvärdig mellan beläggningstyperna
- slitlagret med Pmb visar signifikant lägre nötning bestämd enligt Prall
- Referensbeläggningarna har generellt högre styvhetsmodul.

Återstår att tålmodigt invänta framtida och uppföljande mätningar av vägytans jämnhet.

REFERENSER

Bahia, H-U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A. och Anderson, R.M. 2001. *Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design*. NCHRP Report 459. National Cooperative Highway Research Program

Fieller, E.C. 1940. The biological standardization of insulin. *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society* 7(1): 1-64.

Said, S. 1995. *Bestämning av utmattningshållfasthet hos asfaltbetong genom pulserande pressdragprovning*. VTI Notat 1995:38. Väg- och transportforskningsinstitutet.