

Spårbildning i asfaltbeläggningar på provvägen E6 Fastarp-Heberg

Jonas Ekblad
Robert Lundström



NCC Rapport 2011-03
SBUF projekt 12473

Upplands Väsby 2011

FÖRORD

De laborativa delarna av undersökningen har utförts vid NCC:s laboratorium i Upplands Väsby och där i synnerhet Thomas Åström och Joakim Tegelberg som med sedvanligt engagemang och uppfinningsrikedom tog sig an provningar och mätningar.

Mätningar och redovisningar av spårdjupsmätningar med PRIMAL har utförts av Håkan Carlsson vid Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Borrningarna utfördes av NCC Roads laboratorium i Mariestad.

Finansieringen av projektet har varit delvis intern men huvudsakligen har Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) bidragit med medel. SBUF:s branschrepresentant var Kenneth Olsson från Skanska.

Med en tämligen liten insats och i kombination med tidigare mätningar har intressanta och klargörande resultat erhållits. Samtliga inblandade tackas för utfört arbete.

Robert Lundström
Upplands Väsby

Sammanfattning

Vägens funktion avgörs av egenskaper hos ytan. Dessa egenskaper är dessutom en viktig komponent i samband med funktionsentreprenader. Vanligt förekommande är krav på spårdjup, varför detta projekt syftar till att mer detaljerat förklara uppkommen spårbildning på provvägen E6 Fastarp-Heberg som är unikt väldokumenterad sedan färdigställandet 1996.

Provningar har utförts på 3 beläggningstyper: Referens (enligt BYA 84), FAS (högpresterande asfaltbeläggning) samt CBÖ (cementbundet bärlager). På dessa provsträckor mättes tvärprofilen för att beräkna spårdjupet, efter vilket prover borrades i samma tvärprofil. För varje beläggningsslager bestämdes sedan lagertjocklek och hålrumshalt.

Huvudsakligen indikerar analysen att uppkommet spårdjup främst beror av slitage och deformationer i beläggningen p.g.a. förtätning. För Referenssträckan uppmäts ytterligare spår som kan bero på deformationer i de undre liggande obundna lagren. För undersökta asfaltkonstruktioner var spårdjupet lägst för FAS-konstruktionen, följt av CBÖ-sträckan. Referenskonstruktionen uppvisade ungefär dubbla spårdjupet jämfört med FAS-sträckan: 17 mm resp. 9 mm, efter 14 års drift.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	4
2. TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR.....	5
3. METODER OCH PROVNINGAR	7
3.1. PROVSTRÄCKOR	7
3.2. MÄTNING OCH PROVTAGNING I FÄLT	8
3.3. LABORATORIEPROVNING	9
4. RESULTAT OCH ANALYS	10
4.1. SPÅRDJUP MED PRIMAL	10
4.2. LAGERTJOCKLEKAR	12
4.3. HÅLRUMSHALTER	17
4.4. BINDEMEDEL.....	25
5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	25
REFERENSER.....	29

1. INLEDNING

Provvägen längs E6 mellan Fastarp-Heberg är genom sin omfattning, totalt 19 delsträckor utförda med olika material och överbyggnadstyper, och långa löptid unik i Sverige. Den öppnades för trafik år 1996 och har sedan dess varit föremål för en tämligen ambitiös och framförallt kontinuerlig uppföljning, vilket har resulterat i ett flertal VTI-rapporter, men också artiklar i internationella tidsskrifter. De delar av vägen som avsågs att vara högpresterande utfördes med beläggningar utvecklade inom FAS (Föreningen Asfaltbeläggningar i Sverige).

Stora delar av provvägen närmar sig en första sammanhållande underhållsåtgärd (nytt slitlager) varför det är aktuellt med avslutande uppföljningar. VTI (Väg- och Transportforskningsinstitutet) genomförde, tillsammans med Trafikverket, planerade åtgärder och mätningar i mitten av juni 2010. Detta gav en möjlighet att genomföra detaljerade studier rörande de olika delsträckornas funktion.

Det övergripande syftet med detta projekt är att fördjupa kunskapen kring uppkomsten av spår. Spår djup som uppmäts på ytan beror generellt av en mängd olika faktorer och fördelas över vägkonstruktionens olika lager. Schematiskt kan orsaker till spårbildning vara:

- slitage/nötning från dubbdäck i slitlagret
- förtätning eller efterpackning av asfaltlager, obundna lager och undergrund
- permanenta deformationer och förskjutningar av asfalten i de olika lagren
- permanenta deformationer och förskjutningar i obundna lager och undergrund.

De vägytemätningar som årligen genomförts och publicerats kvantifierar det *sammanlagda* spår djupet men dess fördelning i de olika lagren har inte kunnat bestämmas. För en mer fullständig bedömning av de utförda konstruktionernas prestanda är det därför önskvärt att kunna kvantifiera den del av spår djupet som kan hänföras till respektive asfaltlager och mekanism (nötning i slitlager samt irreversibla deformationer i samtliga asfaltbundna lager).

Utöver att bidra med empiri för bedömning av valda konstruktionslösningar, kan undersökningens resultat ge ökad legitimitet till alternativa upphandlings-/entreprenadformer då det är möjligt att bedöma och påverka (genom materialval) olika dellagers livslängd på ett sätt som inte är möjligt med de dimensioneringsverktyg Trafikverket normalt använder: VVK Väg och PMS Objekt.

För att åstadkomma detta omfattar denna studie nya mätningar som tillsammans med tidigare mätningar analyseras för att klargöra orsaker till och fördelning av spår. I korthet handlar det om att utföra noggranna spår djupsmätningar och komplettera dessa med bestämning av lagertjocklekar från borrade provkroppar. Detta utförs på 3 utvalda delsträckor: Referens, FAS-sträcka och cementstabiliserad sträcka (CBÖ), och vid 2

platser på varje provsträcka. På varje provplats borras 11 borrhärdar fördelade över det högra hjulspåret i körfält K1. Borrhärdarna analyseras även med avseende på hållrumshalt för att bedöma eventuell förtätning, eller efterpackning, i syfte att lokalisera var i asfalten deformationer i form av spår uppstår.

Vad avser nya mätningar omfattar denna undersökning:

- vägtemätning med PRIMAL (se avsnitt 3.2)
- borrhärdning av provkroppar
- bestämning av enskilda lagertjocklekar
- bestämning av hållrumshalt i de olika lagren: samtliga lager och samtliga provkroppar.

Utöver dessa nya mätningar används och återanalyseras tidigare publicerade mätningar.

2. TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR

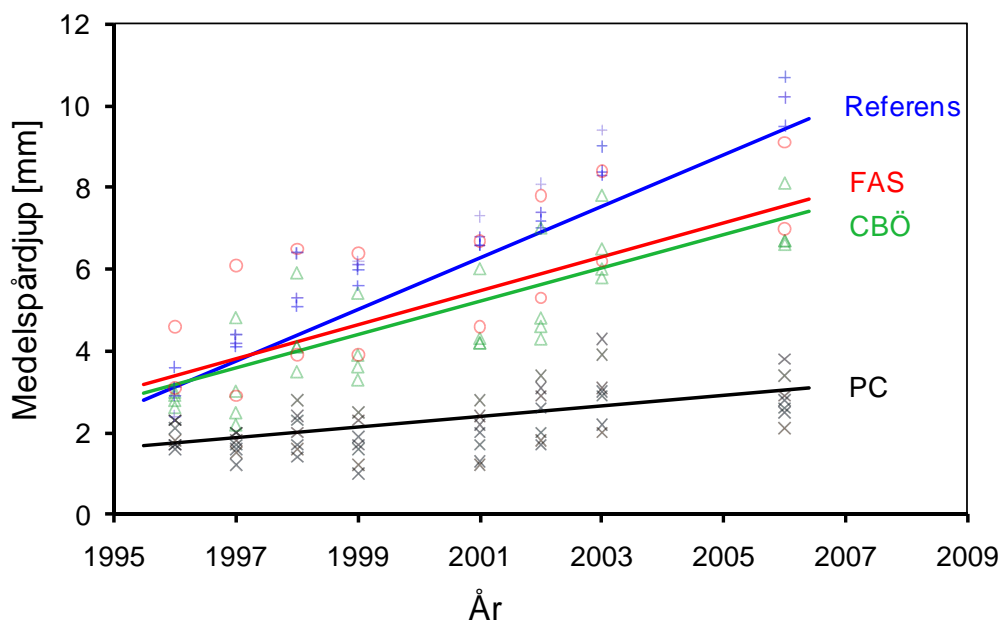
Med början strax norr om Halmstad byggdes 1995-1996 sammanlagt 19 olika provsträckor längs 21 km av den då nya E6:an. Det uttalade syftet med provsträckorna var att under lång tid undersöka och jämföra olika vägöverbyggnadstyper avseende bl.a. spårbildning (slitage och deformation), sprickbildning, underhållskostnader, friktion och buller. En större del, ca 2/3 av sträckan, utfördes med olika typer av cementbetongöverbyggnader och den resterande delen med varierande asfaltkonstruktioner. Resultat och uppföljningar har tidigare redovisats i ett stort antal rapporter och artiklar:

- Ulmgren (1996)
- Wiman, 1997
- Wiman och Eriksson (1997)
- Wiman, 1998
- Wiman, 1999
- Wiman, 2001
- Wiman, 2002
- Wiman m.fl., 2005
- Wiman, 2005
- Ulmgren och Lundström, 2006
- Said och Hakim, 2008
- Wiman m.fl., 2009
- Lundström m.fl., 2009.
- Said m.fl., 2010
- Said m.fl., 2011.
- Oscarsson, 2011
- Oscarsson och Popescu, 2011.

Förutom publicerade rapporter rörande mätningar av bl.a. slitage, friktion, buller, bärighet och övriga faktorer som temperatur och trafik, och egenskaper hos de ingående materialen, har en stor del av undersökningarna ägnats åt spårdjup. Wiman m.fl. (2009) redovisar mätningar med vägytemätbil fram till år 2006 d.v.s. under 10 års trafikering. Bestämning av medelspårdjup har genomförts med 3,2 m mätbredd och 13 mätgivare. Resultat av mätningar från sträckorna (utom de stålnätsarmerade) sammanfattas i figur 1 för respektive typöverbyggnad:

- Referens (BYA 84)
- FAS (högpresterande GBÖ)
- CBÖ (cementbundet bärlager, även benämnd CG)
- PC (betongöverbyggnad med portlandcement, BÖ).

Regressionslinjen för resp. överbyggnad omfattar samtliga observationssträckor för resp. typ.



Figur 1. Spårdjupsutveckling för de olika överbyggnadstyperna. Medelvärden för samtliga sträckor av samma typ: Referens, FAS, CBÖ (cementbundet bärlager) och PC (betongöverbyggnad, portlandcement). (Efter Wiman m.fl. 2009).

En statistisk analys av spårdjupsutvecklingen (d.v.s. regressionslinjens lutning) figur 1 visar ingen skillnad mellan FAS-sträckorna och CBÖ-sträckorna (Fisher LSD: risknivå 5 %); övriga skillnader är signifikanta d.v.s. spårdjupsutvecklingen är långsammast för betongöverbyggnader och snabbast för Referenssträckorna med FAS- och CBÖ-sträckorna däremellan.

Vad avser sprickbildning noterar Wiman m.fl. (2009) att asfaltsträckorna (Referens och FAS) generellt är i bra skick och nämner inte förekomst av någon sprickbildning. För

sträckor med cementbundet bärlager (CBÖ) noteras sprickbildning från och med år 1998. Överbyggnader av portlandcementbetong uppvisar sprickor i varierande grad. För att bedöma asfaltsträckornas livslängd med avseende på sprickbildning genomförde Said m.fl. (2010, 2011) ett antal mätningar och modellberäkningar. De bedömde att livslängden för de konventionellt byggda asfaltsträckorna var kring 20 år, medan livslängden för FAS-sträckorna bedöms vara minst 40 år, vad avser sprickbildning.

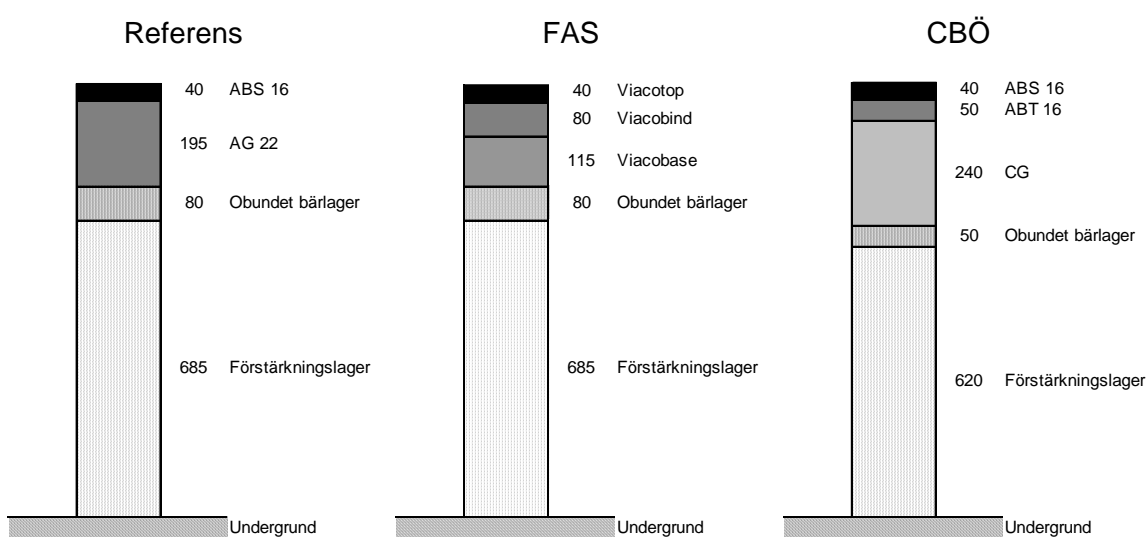
Även om en mängd undersökningar av spårdjup gjorts så har endast begränsade undersökningar av spårdjupets fördelning gjorts, d.v.s. uppdelning av deformationer i resp. asfalt och obundna lager. För att bedöma spårdjupets fördelning i de olika lagren mättes inledningsvis lagrens tjocklek med s.k. Stratotest (se avsnitt 4.2). Mätningar genomfördes fram till och med år 2000 och redovisas av Wiman, 2001 som konstaterar viss spårbildning främst i slitlagren men resultaten beskrivs som osäkra och med relativt stort bortfall av mätdata. Wiman skriver även att mätningarnas tillförlitlighet avtar väsentligt med avståndet från ytan. I övrigt är det i stort okänt var i konstruktionen spår uppkommer.

3. METODER OCH PROVNINGAR

3.1. PROVSTRÄCKOR

I detta projekt begränsades undersökningen till 3 olika överbyggnadstyper: Referens-, FAS- och CBÖ-sträckor. Dessa observationssträckors uppbyggnad visas i figur 2. I tidigare rapporter (t.ex. Wiman m.fl., 2009) har aktuella provsträckor tidigare benämnts:

- 12 Referens (HABS16, AG22)
- 13 FAS-konceptet
- 9 CBÖ (CG utan sprickanvisning).



Figur 2. Undersökta konstruktioners uppbyggnad och nominella lagertjocklekar.

Referens- och FAS-sträckorna består nominellt av sammanlagt 235 mm bundna lager och CBÖ-sträckorna av 330 mm: 90 mm asfalt och 240 mm hydrauliskt bundet lager. För aktuella provsträckor är terrassmaterialet ensartat och terrassen preparerades på samma sätt. Bär- och förstärkningslager består av samma material och utfördes i samma etapp i byggskedet. Inga avgörande anomalier avseende de obundna materialens tjocklek eller bärighet, uppmätt med statisk plattbelastning och fallvikt, noterades heller under byggandet.

Asfaltmassorna i FAS-konceptet är av skelettyp vilka främst präglas av en stor andel grovt stenmaterial som bildar ett bärigt och slitstarkt stenskelett; hålrummet fylls med mastix d.v.s. finmaterial och bindemedel. Referens- och CBÖ-sträckornas slitlager var ABS 16 (stenrik asfaltbetong) som även den är en massa av skelettyp, dock något mindre utpräglad.

För FAS-sträckorna är även bind- och bärlager uppbyggda av skelettmassa medan för Referens- och CBÖ-sträckor består dessa lager av beläggningssmassa med kontinuerlig eller tät kornstorleksfördelning (AG eller ABT).

Det bundna bärlagret på referenssträckorna (AG 22) lades i tre lager av nominellt samma tjocklek 65 mm, i fortsättningen numrerade uppifrån: bärlager 1 t.o.m. 3.

3.2. MÄTNING OCH PROVTAGNING I FÄLT

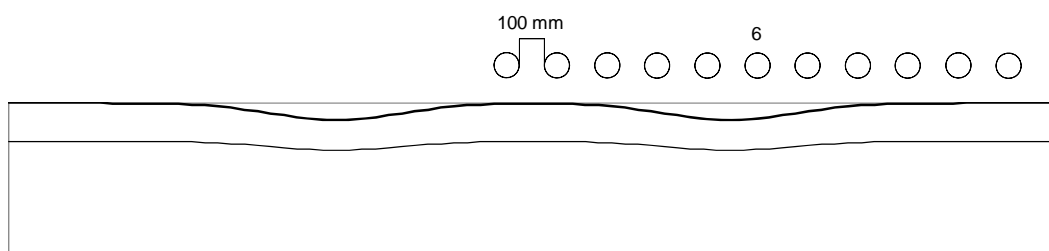
I samband med underhållsåtgärder sommaren 2010 utfördes mätningar och provtagning i fält. Bestämning av tvärprofilen utfördes av VTI med PRIMAL (se figur 3). På varje provsträcka bestämdes tvärprofilen vid 2 olika platser. Vid dessa platser borrades sedan provkroppar genom hela beläggningen för vidare analys i laboratorium.



Figur 3. Profilmätning med PRIMAL. Figuren visar bestämning av längsprofil.

PRIMAL-utrustningen består översiktligt av två delar: en fast del som genererar en referenshöjd i form av en laserstråle och en rörlig vagn som registrerar mätjulets läge relativt referensplanet samt färdad väg. I dessa mätningar har höjden bestämts var 20:e mm.

Efter att tvärprofilen bestämts med PRIMAL borrades 11 st. provkroppar fördelade över höger hjulspår, schematiskt beskrivet i figur 4.

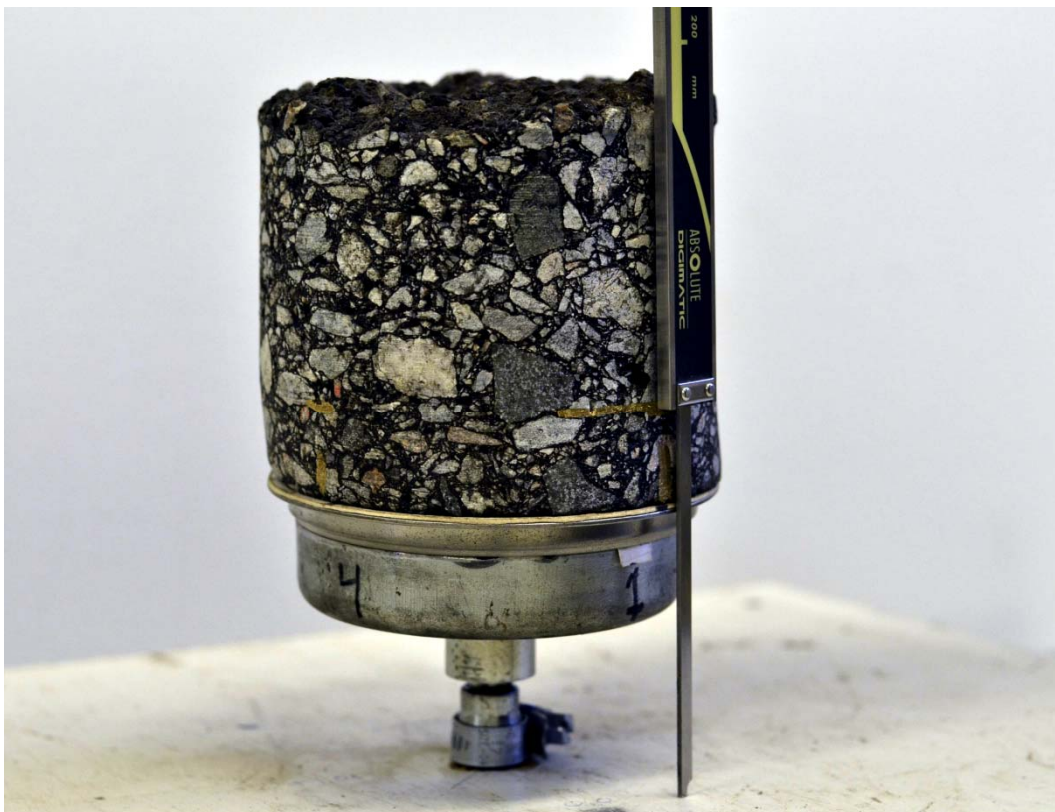


Figur 4. Placering av borrkärnor ($\varnothing 100$ mm) vid varje PRIMAL-profil.

Den mittersta provkroppen (nr. 6 i figur 4) borrades med centrum 3 m från dubben vid mittlinjen som markerar aktuell tvärprofil, vilket för de flesta sektioner motsvarar ungefär mitt i det högra hjulspåret. Borrkärnornas diameter var 100 mm och de borrades med 100 mm mellan ytterkanterna. Sammanlagt erhöles 66 borrkärnor: 3 provsträckor, 2 tvärprofiler per sträcka och 11 borrkärnor per tvärprofil.

3.3. LABORATORIEPROVNING

Laboratorieprovningen omfattade mätning av lagertjocklek och hålrums halt för varje provkropp och varje lager. Samtliga lagertjocklekar bestämdes på 4 ställen kring mantelytan med 90° förskjutning (se figur 5). Respektive mätpunkts numrering bestämdes av provkroppens ursprungliga orientering i vägkroppen.



Figur 5. Mätning av lagertjocklek.

Borrkärnorna sågades sedan i lagergränserna varefter skrym- och kompaktensitet bestämdes för varje enskild provkropp.

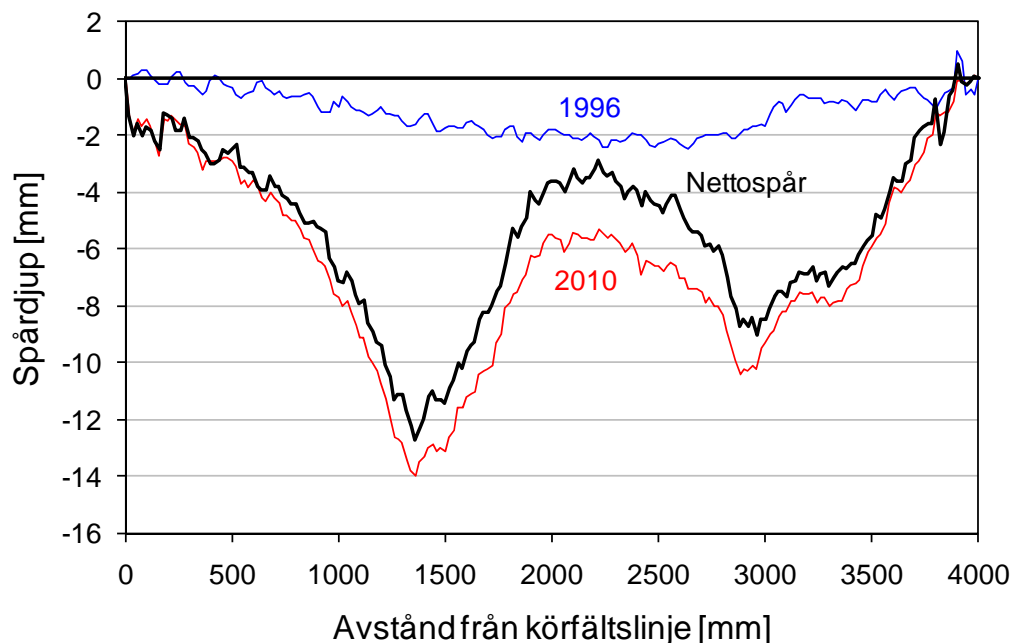
4. RESULTAT OCH ANALYS

I de flesta fall kombineras de nya mätningar som genomförts i detta projekt med tidigare redovisade mätningar; i några fall har äldre resultat analyserats på nytt för att kunna användas i denna redovisning. 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 $p < 0,05$.

4.1. SPÅRDJUP MED PRIMAL

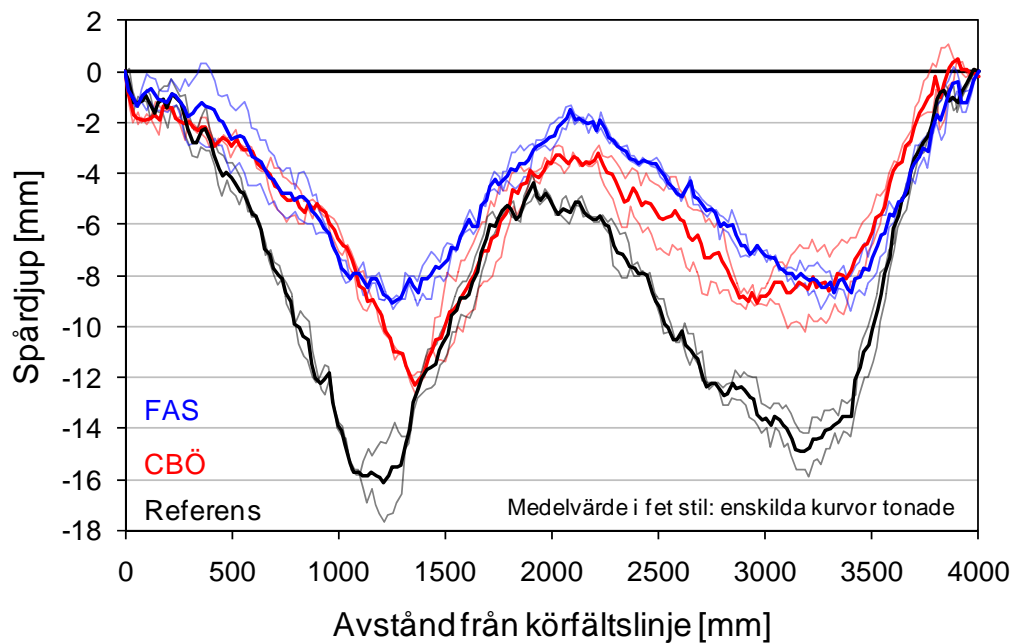
Samtliga tvärprofiler som mätts år 2010 mättes även inför trafiköppning 1996. För att analysera de spår som uppkommit sedan dess beräknas nettospår vilket visas i figur 6. Nettospåret beräknas för varje mätpunkt som spårdjupet 2010 minskat med initialt spårdjup 1996 d.v.s. endast uppkommet spår sedan trafiköppning inkluderas. Detta reducerar eventuellt spårdjup som beror av produktionsrelaterade orsaker. Maximalt spårdjup beräknas enligt den s.k. trådprincipen (se t.ex. VVMB 122, 2009). Detta innebär att med utgångspunkt i den uppmätta profilens ytterkanter dras en virtuell tråd mellan tvärprofilens högpunkter. Maximalt spårdjup bestäms sedan som det maximala

avståndet mellan denna tråd och den uppmätta vägytan. Detta innebär i exemplet nedan i figur 6, att för 1996 års mätning, innan trafikpåsläpp, uppmäts ett initialt spår djup som främst beror av byggandet och vald spår djupsmodell och inte av spår uppkommet efter trafik.



Figur 6. Tvärprofilmätning med PRIMAL: år 1996, 2010 samt nettospår (exempel från CBÖ-sträcka).

Den fortsatta analysen baseras således på nettospår, vilka genomgående är något lägre än det uppmätta spåret bestämt enligt trådprincipen baserat på mätningar med PRIMAL. Samtliga uppmätta tvärprofiler har definierande högpunkter i tvärprofilernas ytterkanter. På varje provsträcka bestämdes tvärprofilen vid två ställen. Figur 7 visar de enskilda nettoprofilerna och deras medelvärde för respektive konstruktionstyp.



Figur 7. Tvärprofiler från samtliga sträckor: medelvärde (fet) och enskilda mätningar (tonade).

Maximalt spår djup bestämdes enligt trådmodellen för varje enskild tvärprofil och för att undersöka skillnader i uppmätt spår djup mellan konstruktionstyperna genomfördes en envägs variansanalys (ANOVA). Resultaten visar att det föreligger statistiskt signifikant skillnad mellan samtliga konstruktionstyper d.v.s. FAS-sträckorna visar lägst spår djup och referenssträckorna högst (post-hoc-analys enligt Fisher least significant difference, LSD). Medelvärden för de olika sträckorna är:

- Referens 17 mm
- FAS 9 mm
- CBÖ 12 mm.

Trafikens sidlägesfördelning påverkar även fördelningen av uppkommet spår djup: koncentrerad trafik ger koncentrerat spår, vilket ger högt maximalt spår djup. För att reducera inverkan av trafikens fördelning över tvärprofilen analyserades även total spåryta definierat som ytan under den virtuella tråden för varje tvärprofil. Variansanalysen för spårytan ger signifikant större spåryta för referenssträckan jämfört med FAS- och CBÖ-sträckorna. Skillnaden mellan FAS och CBÖ vad avser spårytan kan förklaras med slumpfel.

4.2. LAGERTJOCKLEKAR

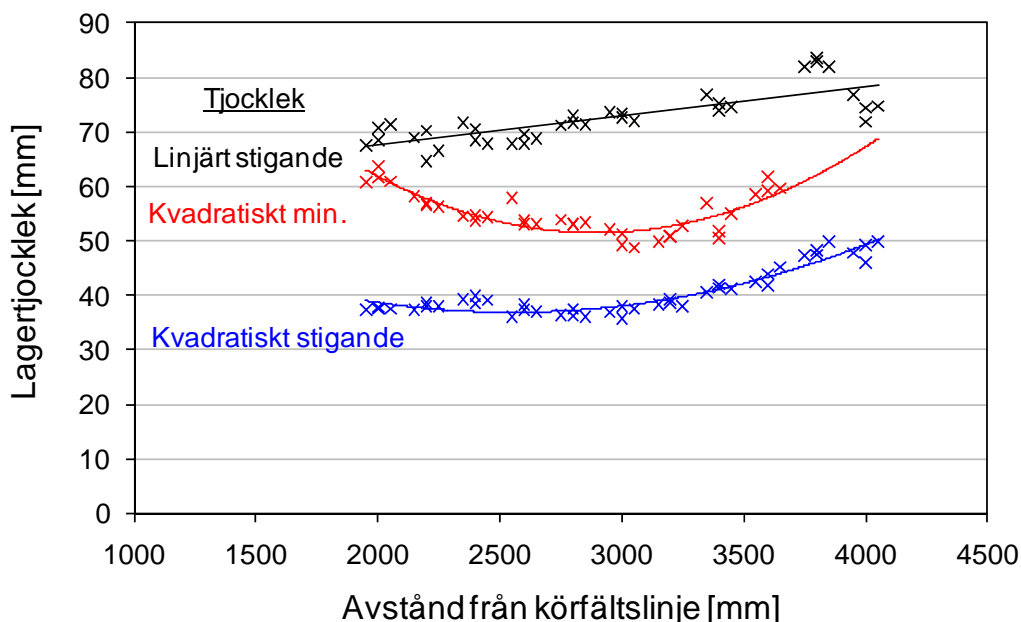
Lagertjockleken bestämdes genom mätning av varje enskild borrhärd och lager. Grundhypotesen är att spår uppträder som en skillnad i tjocklek längs tvärprofilen. För att bestämma denna tjockleksskillnad genomfördes kurvpasning med tjockleken som

funktion av avståndet från vänster körfältslinje. För uppmätta tjocklekar i denna undersökning uppträder 3 typfall, vilka visas i figur 8: tjockleken kan var linjärt eller kvadratisk stigande ut mot kanten, eller visa ett minimum som ett mer utpräglat spår (kvadratisk minimum). Samtliga lagertjockleksprofiler passades enligt följande (linjära) regressionsmodeller:

$$y = a + bx \tag{1}$$

$$y = c + dx + ex^2 \tag{2}$$

där y är tjocklek, x är avstånd, och a , b , c , och d är regressionskoefficienter. Kriteriet för att avgöra om tjockleksskillnaden kan tolkas som spår är att antingen b eller e är statistiskt signifikant positiva. För varje konstruktionstyp baserades regressionsanalysen på tjockleksprofiler från båda provplatserna på varje provsträcka.



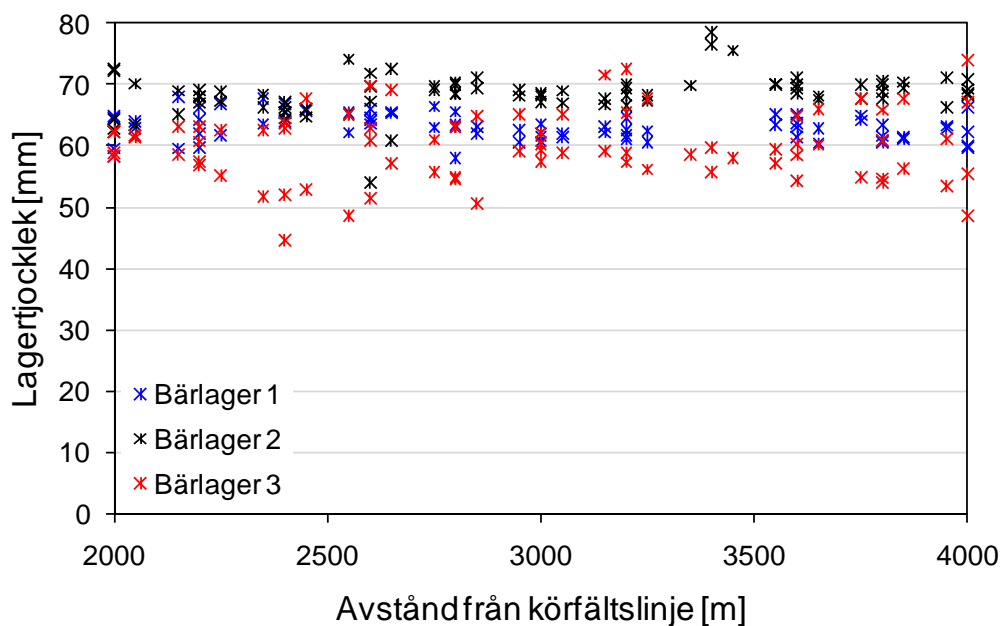
Figur 8. Exempel på beräkning av lagertjocklek som funktion av avstånd från körfältslinje. Typiska resultat.

Utfallet av regressionsanalysen sammanfattas i figur 9, där 1 indikerar signifikant tjockleksskillnad som kan tolkas som spår. För många av tjockleksprofilerna, framförallt för de undre liggande lagren, är det svårt att skönja något tydligt mönster för uppmätta tjocklekar, som kan tolkas som indikation på spårbildning.

Referens		FAS		CBÖ	
Slitlager	1	Slitlager	1	Slitlager	1
Bärlager 1	0	Bindlager	1	Bärlager	0
Bärlager 2	1	Bärlager	0		
Bärlager 3	0				

Figur 9. Sammanställning av tjockleksskillnad för resp. lager och konstruktionstyp. 1 indikerar signifikant tjockleksskillnad.

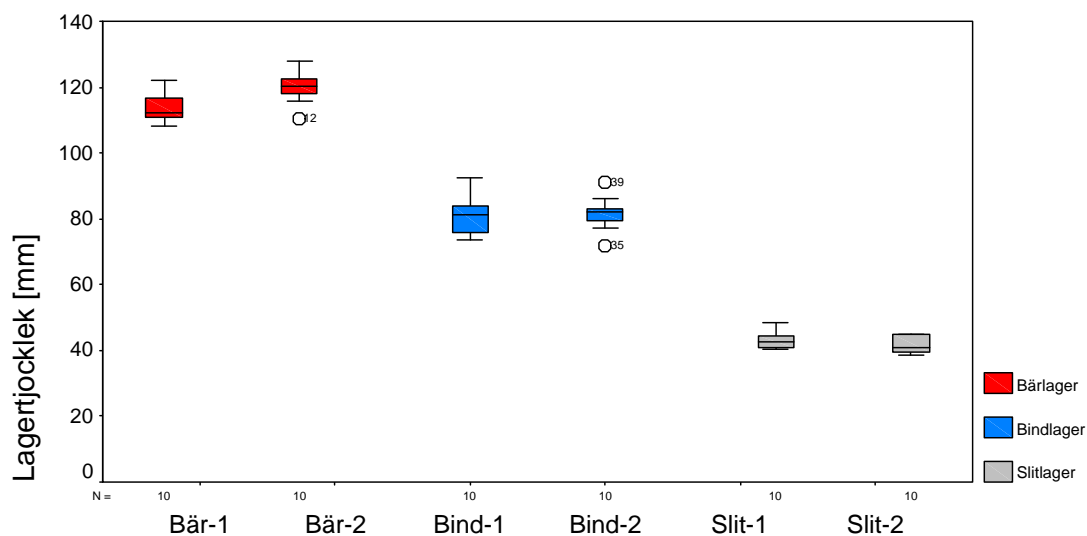
Det tydligaste mönstret är att samtliga slitlager visar signifikant tjockleksskillnad som enligt given modell, kan anses vara spår. Det är förväntat då detta lager dels utsätts för hög kompressiv belastning och även ackumulerar spår som beror av dubbdäcksslitage. I övrigt är tjockleksskillnaderna små eller inte signifikanta. I en del fall går det inte att se tydliga mönster över tvärprofilen. Detta illustreras i figur 10 där mätta tjocklekar för bärlagren i referenskonstruktionen sammanfattas.



Figur 10. Lagertjocklekar för bärlager på referenssträckan.

Enligt figur 9 är bärlager 2 signifikant tunnare inåt i körfältet. Förtunningen är av typen linjärt stigande vilket inte motsvarar typisk spårbildning. Tjockleksmätningen ger även ett visuellt spretigt intryck. Det är synbarligen tämligen stor spridning i bestämda tjocklekar. Detta har troligen flera orsaker. Delvis beror det av att lagret i fråga inte ursprungligen hade en enhetlig tjocklek utan varierade i tvärled men säkerligen också på att det inte är lätt att entydigt att vare sig definiera eller visuellt hitta distinkta lagergränser. För ett granulärt material vars partikelstorlek väsentligt överstiger önskad bestämningsnoggrannhet existerar helt enkelt ingen diskret entydig lagergräns.

Tjockleksvariation indikeras även av tidigare provning utförda på dessa provsträckor. Ulmgren (1996) redovisar mätningar av lagertjocklekar för FAS-sträckorna, vilka sammanfattas i figur 11. För varje beläggningstyp bestämdes lagertjocklekarna på 2 olika deltytor.



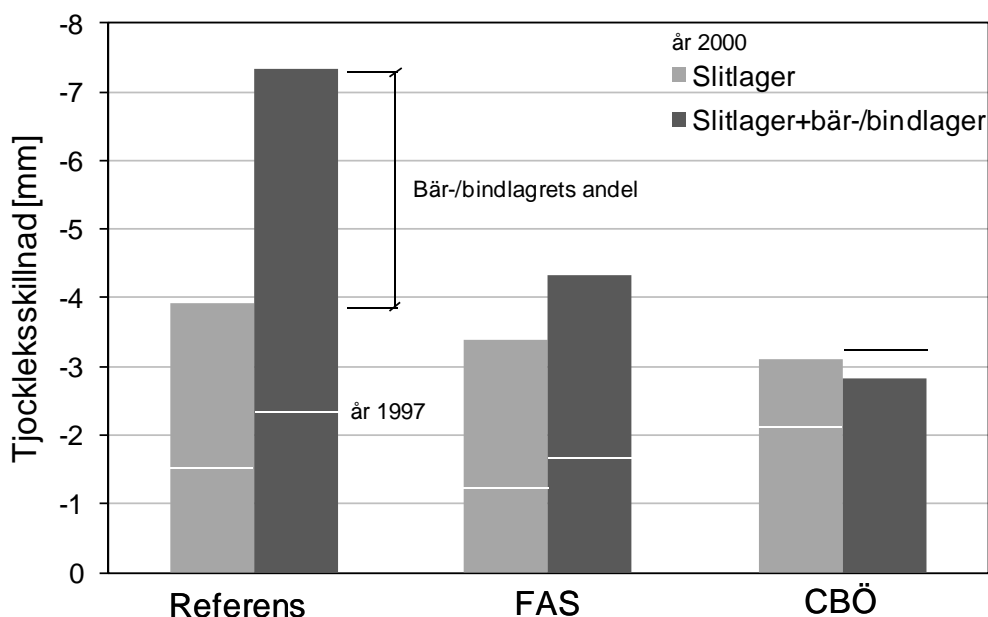
Figur 11. Uppmätta lagertjocklekar i samband med byggnation för FAS-sträckorna (efter Ulmgren, 1996).

Uppmätta lagertjocklekar i figur 11 visar spridning såväl inom som mellan provytorna. Spridningen överstiger i många fall det totala spårdjup som mätts med PRIMAL (se avsnitt 4.1).

Wiman (2001) redovisar lagertjockleksmätningar med s.k. Stratotest. Metoden innebär att under byggnation skiljs varje lager med en aluminiumplåt. Plåtens läge från ytan kan sedan detekteras och redovisas av Wiman (2001) som tjockleksskillnad mot ursprunglig tjocklek innan trafikpåsläpp 1996. Stratotestmätningar finns redovisade för åren 1997 och 2000. Instrumentering och mätning med Stratotest har skett vid 3 provplatser per sträcka och 11 mätningar längs tvärprofilen vid varje plats. För varje tvärprofil redovisas den största tjockleksskillnaden som i regel motsvarar positionen för maximalt spårdjup.

I figur 12 sammanfattas mätningarna av tjockleksförändringarna t.o.m. 1997 och 2000 jämfört med initialmätningen 1996. Figuren sammanfattar mätningar från de sträckor som deltagit i detta projekt d.v.s. sträckor 9, 12 och 13. Mätningarnas tillförlitlighet beskrivs av Wiman som begränsad och avtagande med djupet. Sammanfattningen omfattar de 2 översta beläggningsslager för resp. konstruktion: slitlager och bärlager 1 för referens, slitlager och bindlager för FAS och CBÖ. Wiman (2001) redovisar tjockleksskillnad för slitlagret enskilt och för beläggningen ner till under bär- eller bindlager (slitlager och underliggande lager summeras). Således indikeras det undre

lagrets andel av tjockleksminskningen av skillnaden mellan staplarna för resp. konstruktionstyp.



Figur 12. Medelvärde för maximal tjockleksskillnad för varje tvärprofil mätt med Stratotest för 1997 och 2000: år 2000 indikeras av staplar och 1997 med vågräta sträck i resp. stapel.

Figur 12 indikerar att fram till år 2000 verkar slitlagren blivit drygt 3 mm tunnare. För referenssträckorna kan även en avsevärd deformation i det översta bärlagret noteras. För FAS-sträckorna är bindlagrets förtunning avsevärt mindre och för CBÖ t.o.m. negativ d.v.s. tjockleksminskningen för den sammanvägda mätningen av slitlager och bindlager visar mindre minskning än mätningen endast över slitlagret. Det bör poängteras att av tekniska skäl är dessa mätningar något förskjutna i längsled, d.v.s. det är två separata mätningar med därtill hörande felkällor. Man kan även notera att vid denna mätplats är dessutom tjockleksskillnaden lägre 2002 jämfört med 1997. Sammanfattningen i figur 12 visar medelvärden som baseras på mätningar med stor variation. För att undersöka vilka skillnader som är statistiskt signifikant och vilka skillnader som kan bero på slumpfel, givet de felkällor som finns, genomfördes en variansanalys, för varje konstruktionstyp med beläggningslager och år som huvudeffekter. Inledningsvis konstaterades det att inte förelåg någon skillnad mellan konstruktionstyperna: skillnaden mellan tjockleksminskningar för de olika konstruktionstyperna kan förklaras med slumpfel (risknivå 5 %). I övrigt är den enda signifikanta effekten beläggningsens ålder (år): slitlagren på Referens och FAS-sträckorna har blivit tunnare i hjulspåret mellan 1997 och 2000, vilket även slitlager+bärlager 1 på referenskonstruktionen blivit. Övriga skillnader kan förklaras med slumpfel. I figur 12, som visar medelvärden, är det synbarligen stor skillnad mellan slitlagret enskilt och slitlager+bärlager men stor inomårsvariation medför att dessa skillnader kan förklaras med slumpfel. Överlag

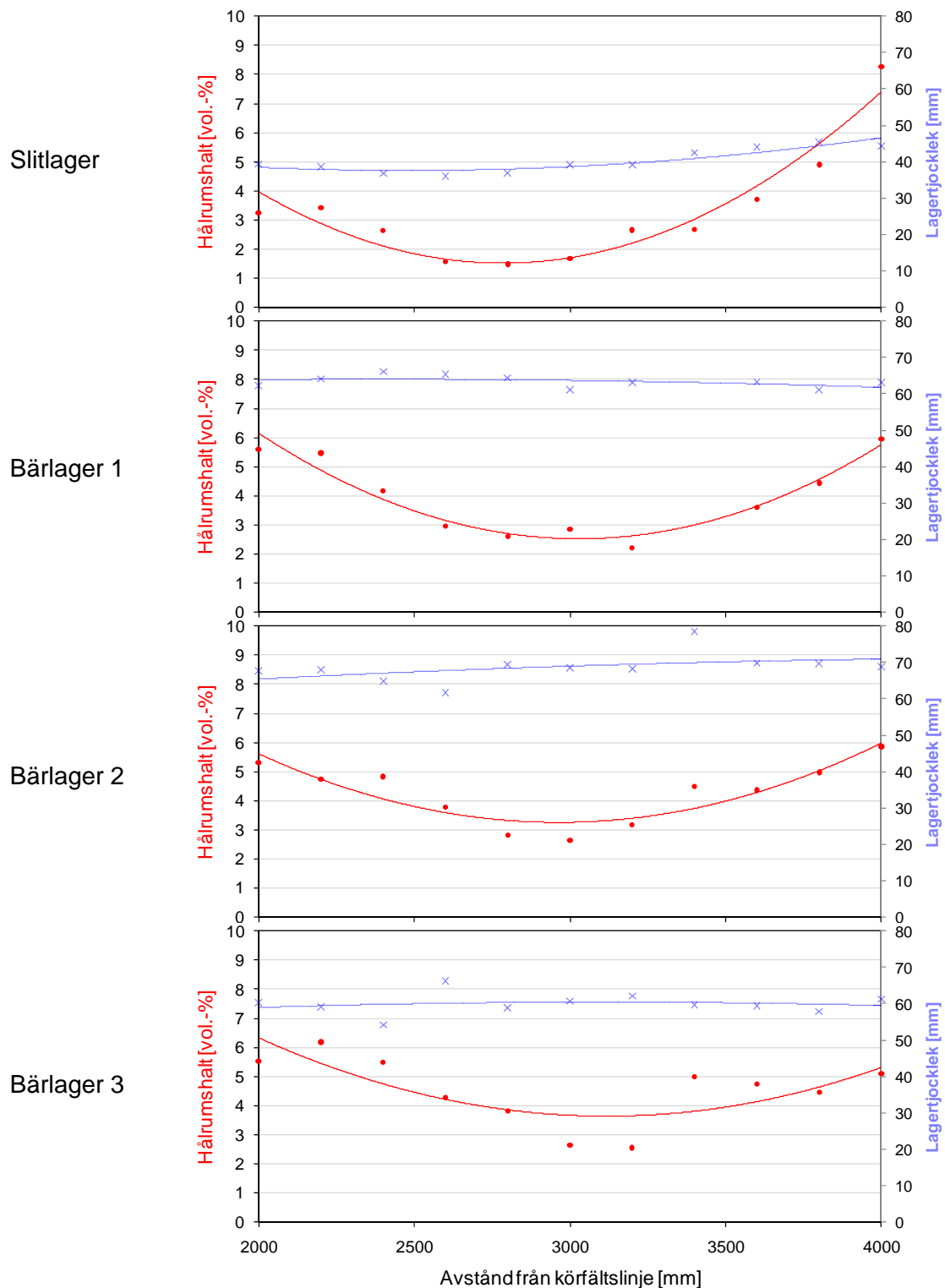
medför de förhållandevis stora variationerna att det är svårt att entydigt isolera enskilda effekter.

Såväl mätningar och analyser utförda inom detta projekt som tidigare resultat visar på svårigheten att bestämma spår baserat på tjocklekar och tjockleksförändringar. Det finns en mängd orsaker till resultatspridning: mättingsrelaterade eller normala variationer vid produktion.

4.3. HÅLRUMSHALTER

Hålrumshalten bestämdes för varje provkropp och hålrummets fördelning längs tvärprofilen analyserades på samma sätt som lagertjockleken, d.v.s. kurvpassning enligt ekvationerna 1 och 2 med villkoret att om lutning är enligt angivna kriterier konstateras en skillnad längs tvärprofilen som sannolikt beror av trafik och klassas som spår. Figur 13 visar typiska resultat, i detta fall för Referenskonstruktionens olika lager. För jämförelse återges även mätningar av lagertjockleken för samma tvärprofil.

Analysen av spårpåverkad hålrumshalt längs tvärprofilen sammanfattas i figur 14 där 1 indikerar statistiskt signifikant skillnad i hålrumshalt längs tvärprofilen med lägre hålrumshalt under det tänkta spåret jämfört med höger kant.



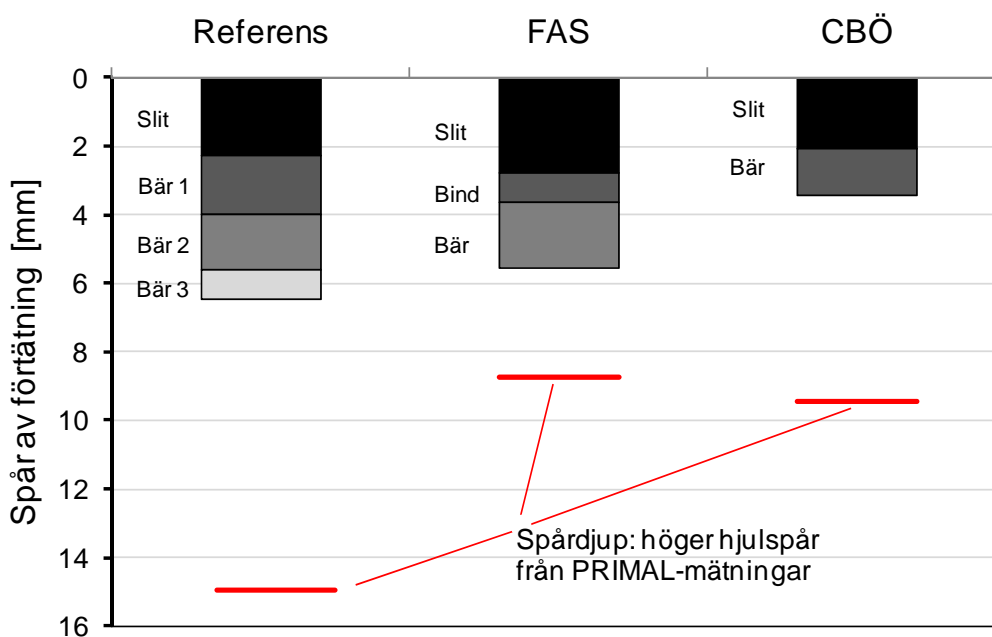
Figur 13. Fördelning av hålrumshalter längs tvärprofilen för de olika beläggningslagren i Referenskonstruktionen (medelvärden av de två tvärprofilerna). Figuren visar även lagertjockleken i blått.

Figur 13 visar ett tydligare spårliknande mönster jämfört med tjockleksmätningarna. I samtliga fall utom bärlagret på FAS-sträckan visar hålrums halten ett minimum ungefär mitt i det område borrhörnorna täcker (se figur 14).

Referens		FAS		CBÖ	
Slitlager	1	Slitlager	1	Slitlager	1
Bärlager 1	1	Bindlager	1	Bärlager	1
Bärlager 2	1	Bärlager	0		
Bärlager 3	1				

Figur 14. Sammanställning av hålrums skillnad för resp. lager och konstruktionstyp. Siffran 1 indikerar signifikant skillnad i hålrums halt längs tvärprofilen.

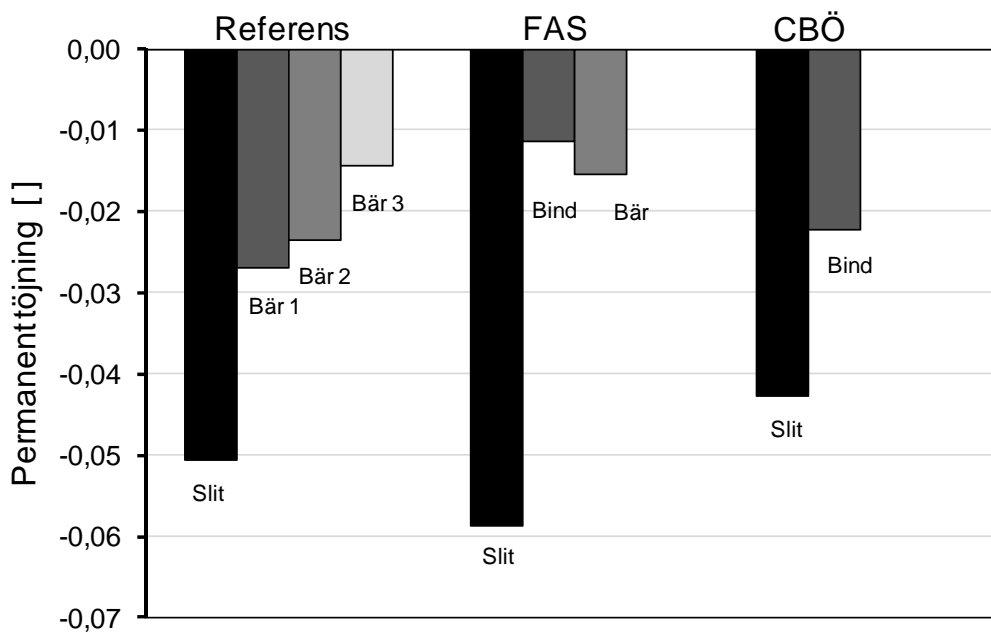
Att provkropparna har lägre hålrums halt i spåret innebär samtidigt att beläggningens volym även den har minskat i spåret, förutsatt att hålrums halten var jämn över tvärprofilen direkt efter utförandet. Om volymsförändringen sker i höjddled ger den upphov till spårbildning i form av s.k. permanenta deformationer. Under antagandet att deformationen huvudsakligen sker i höjddled kan ett spårdjup som beror av förtätning beräknas. Beräkningen baseras på kurvpassningen av hålrums halten över tvärprofilen som exemplifieras i figur 13. Hålrums halten till höger om spåret beräknas som medelvärdet av kurvan över profilens yttre 20 cm. Denna punkt blir då högpunkt i trådmodellen för att beräkna spårdjupet. Hålrums halten i spåret beräknas som kurvans minimum. För att beräkna den ackumulerade deformationen behöver även lagrets tjocklek i den högra högpunkten vara känd. Denna beräknas som medelvärdet av tjockleksmätningarnas yttre 20 cm. Modellen skattar ett spårdjup som beror av förtätningen som närmast kan liknas vid trådmodellen även om, i strikt mening, den vänstra högpunkten inte är känd. Resultatet av beräknat spårdjup orsakat av förtätning för varje materiallager sammanfattas i figur 15, där de enskilda lagrens andelar av den totala förtätningen framgår. I denna figur finns även det totala nettospårdjupet, uppmätt med PRIMAL och beräknat för det högra hjulspåret enligt trådmodellen, inlagt.



Figur 15. Ackumulerat spår orsakat av förtätning. Figuren visar även total spårbildning uppmätt med PRIMAL (nettopår i höger hjulspår).

Av figur 15 framgår det att Referenskonstruktionen uppvisar störst spår djup orsakat av förtätning i asfaltbeläggningen och att CBÖ-konstruktionen har lägst. I regel uppvisar slitlagren den största andelen ackumulerat spår. Med undantag av FAS-sträckans bindlager minskar andelen förtätning inducerat spår med konstruktionens djup. Detta förefaller rimligt då belastningen i form av trafik och höga sommartemperaturer minskar med ökat djup.

Utöver att vara det lager som ackumulerar mest deformationsrelaterat spår djup är slitlagret även det tunnaste lagret i respektive konstruktion. Detta sammantaget medför att den ackumulerade töjningen (tjockleksförändringen dividerat med ursprungstjockleken) är högst för dessa lager. Töjningen är ett normaliserat mått som möjliggör jämförelse mellan konstruktioner och beläggningsslager. Beräkningar av resp. lagers permanenta töjningar visas i figur 16.

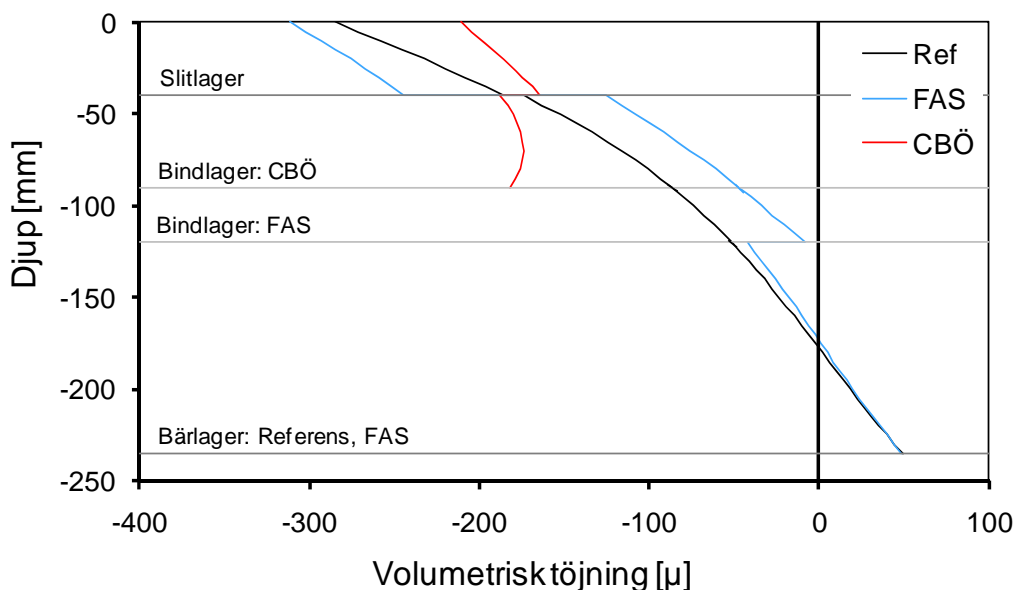


Figur 16. Ackumulerad permanent töjning, p.g.a. förtätning i de olika beläggningslagren.

Det framgår mer tydligt av figur 16, att slitlagren är de mest ansträngda i termer av ackumulerad (eller permanent) töjning orsakad av beläggningsens förtätning. Töjningen minskar, med undantag av bindlagret på FAS-sträckan, dessutom med beläggningsens djup. Bindlagret på FAS-sträckan kännetecknas av ett bärigt stenskelett och ett styvt bindemedel: 70/100 med tillsats av Uintaite, 10 % viktsandel av bitumenmängden (Ulmgren och Lundström, 2006).

För att undersöka inverkan av trafikbelastning på spårbildningen har en enkel strukturell analys utförts av respektive beläggningstyp. Som tidigare nämnts minskar generellt den mekaniska belastningen på beläggningsen orsakad av trafik med ökat djup. Spänningsbilden är dock komplicerad och det är dessutom inte helt klart vilka belastningar som mest bidrar till ackumulerad töjning. Från hålrumsrörelsemätningarna framgår det emellertid att beläggningsen i hjulspår har minskat i volym och figur 16 indikerar att den permanenta töjningen minskar med djupet. För att undersöka sambandet mellan den permanenta töjningen och beläggningsens påkänning beräknades den volumetriska töjningen som funktion av beläggningsdjupet. Strukturmodellen utgjordes av en lagrad konstruktion på s.k. oändlig halvrymd. Samtliga lager förutsätts vara homogena med oändlig utsträckning i två dimensioner. Materialen antages isotropt linjärt elastiska vilket, innebär att de kan fullständigt karakteriseras med elasticitetsmodul och Poissons tal. Tidigare mätningar av moduler finns publicerade av Viman (1997). Beräkningarna i BISAR genomfördes med moduler uppmätta vid 20 °C. Styvhetsmodulen för de obundna lagren i överbyggnaden sattes till 450 MPa och terrassens modul till 100 MPa. Poissons tal antas vara 0,35 för samtliga material.

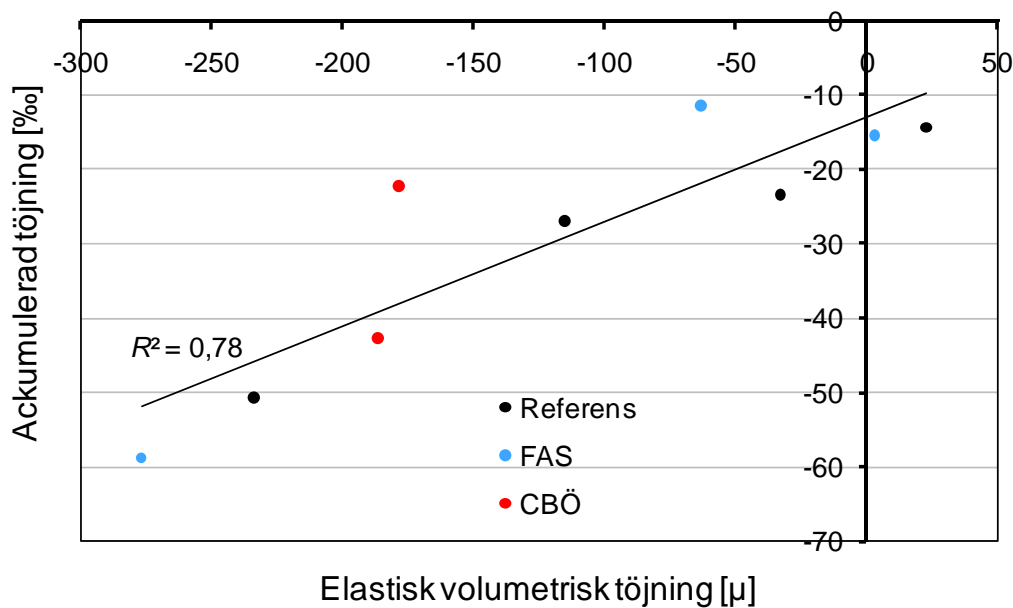
Belastningen utgjordes av en standardaxel och beräkningarna genomfördes i djupled under det ena hjulet. Utgångshypotesen var att beläggningen har förändrat volym varför den volumetriska töjningen beräknades. Den volumetriska töjningen är summan av töjningarna i huvudtöjningsriktningarna (eller huvudspänningsriktningarna). Töjningsberäkningarna för resp. konstruktion visas i figur 17. Negativ volumetrisk töjning indikerar volymminskning (vid låga töjningsnivåer). Inlagt i figuren finns även lagergränserna för de olika konstruktionerna; underkant slitlager är densamma för alla sträckorna medan tjockleken för övriga lager skiljer mellan de 3 olika konstruktionerna. Lagergränser syns även som en diskontinuitet i töjningskurvan för resp. konstruktionstyp.



Figur 17. Volumetrisk töjning för de olika beläggningslagren i de olika konstruktionstyperna: lagergränserna (underkant beläggningslager) indikeras med horisontell linje. Negativ töjning indikerar volymminskning.

Slitlagret i FAS-konstruktionen är det lager som utsätts för högst volumetrisk töjningsnivå (se figur 17). Det är också det lager som ackumulerat störst deformation orsakad av förtätning under de knappa 14 åren (se figur 15).

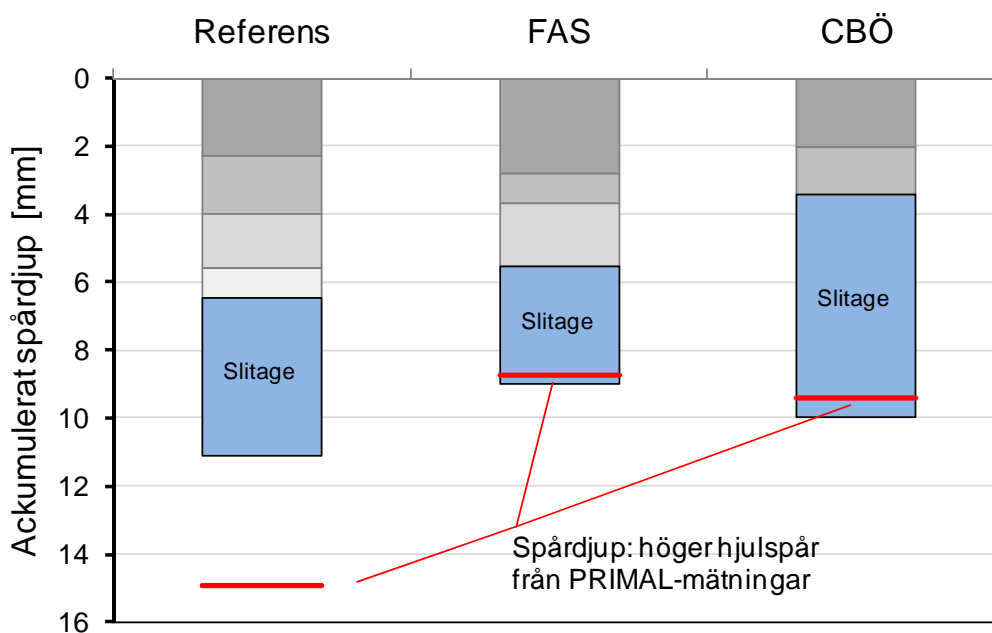
För att undersöka sambandet mellan den beräknade elastiska töjningen och den permanenta töjningen som ackumulerats under 14 års trafikbelastning, sammanställs dessa i figur 18. Den elastiska töjningen är beräknad som medelvärdet av den volumetriska töjningen i resp. beläggningslager. Bärlagret i Referenskonstruktionen är delat i 3 delar.



Figur 18. Ackumulerad töjning orsakad av förtätning (sänkt hålrums halt) som funktion av beräknad elastisk töjning.

Förklaringsgraden för denna modell är ganska hög, 78 %, d.v.s. en hög belastningsnivå avseende elastisk volumetrisk töjning medför högre andel ackumulerad töjning (se figur 18). De lager som uppvisat störst volymminskning, slitlagren, är också de som enligt beräkningarna utsätts för störst kompressiv töjningsbelastning.

Av figur 15 framgår att det spår orsakat av förtätning endast motsvarar en del av det totala spår djupet uppmätt med PRIMAL. För Referenskonstruktionen är skillnaden drygt 8 mm, FAS-sträckan drygt 3 mm, och för CBÖ-sträckan kring 6 mm. Återstående spår förklaras troligen mest av slitage av dubbdäckstrafik och övriga deformationer i obundna överbyggnadslager och undergrundsmaterial. Baserat på tidigare utförda mätningar kan slitagespårets storlek skattas. Fram till och med år 2003 utfördes slitagemätningar över sammanlagt 6 vintrar. Mätning av tvärprofiler, med samma längd som PRIMAL-mätningarna, d.v.s. 4 m, utfördes på hösten och sedan efterföljande vår. Grundförutsättningen är sedan att uppmätt spårskillnad antas vara orsakad av dubbslitage medan konstruktionen i övrigt är så styv att inga permanenta deformationer uppstår. Slitagespår beräknas som medelvärdet av tvärprofilen över 0,5 m över den position där maximalt spår djup uppmättes med PRIMAL. Detta avviker dock något för spår djupsmodellen som används vid PRIMAL-mätningarna. Slitaget fram till och med år 2010, när mätningarna redovisades i denna undersökning genomfördes, skattades baserat på linjär extrapolering av redovisat slitage fram till och med 2003 (Wiman m.fl., 2005). Förklaringsgraden för dessa linjära modeller är hög: Referens $R^2 = 0,98$, FAS 0,97, och CBÖ 1,00, vilket innebär att prediktionsfelet efter ytterligare 7 år med 95 % säkerhet är kring $\pm 0,5$ mm. Till det skattade spår djupet i figur 15 läggs det skattade spår djupet orsakat av slitage. Erhållet resultat redovisas i figur 19.



Figur 19. Spår orsakat av slitage, summerat till spår orsakat av förtätning: figuren visar även total spårbildning uppmätt med PRIMAL.

Figur 19 indikerar att för FAS- och CBÖ-sträckorna förklaras uppmätt spår djup helt av skattade spår djup orsakat av förtätning och slitage. För Referenssträckan återstår fortfarande kring 4 mm, vilket då kan utgöra deformationer i underliggande lager. Det cementstabiliserade lagret i CBÖ-konstruktionen är såväl styvt som tjockt varför det är rimligt att anta att deformationer i de undre liggande lagren är högst begränsade.

4.4. BINDEMEDEL

Efter att provkropparna analyserats med avseende på hålrum slogs beläggningssmassan samman för resp. beläggningsslager och bindemedlet återvanns för bestämning av penetration och mjukpunkt. Resultaten sammanfattas i tabell 1 i vilken även resultat från tidigare undersökningar (Viman, 2005) visas.

Tabell 1. Egenskaper för återvunnet bindemedel från resp. beläggningsslager för de olika provsträckorna, år 1996, 2003 och 2010 (1996 och 2003 från Viman, 2005)

Sträcka	Beläggning	Penetration [dmm]			Mjukpunkt [°C]		
		1996 ²	2003	2010	1996 ²	2003	2010
Referens	ABS 16		48	25		54	58,0
	AG:3 ¹			34			55,2
	AG:2		60 ³	26		51 ³	58,0
	AG:1			26			60,2

FAS	Slitlager		54	38		52	53,8
	Bindlager	19	19	11	68	66	76,8
	Bärlager	60	51	22	51	53	63,0

CBÖ	ABS 16			41			52,8
	ABT 16			39			53,8

¹ Det bundna bärlagret utfördes i 3 lager.

² Inte angivet från vilken FAS-sträcka (av 2). Resultat från 2003 och 2010 avser samma sträcka (13).

³ Avser hela AG-lagret.

Överlag är bindemedlen tämligen styva, särskilt bindlagret på FAS-sträckan. Det förefaller även som bindemedlen kontinuerligt har förhårdnat, i de fall analyser genomförts vid ökande beläggningssålder. Bindemedelsegenskaperna presenterade i tabell 1 är baserade på få prover från 2 olika undersökningar och är således främst indikativa.

5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER

De resultat i denna undersökning, från vilka de huvudsakliga slutsatserna kan dras, utgörs i regel inte av direkta mätningar utan är beräkningar från modeller med diverse randvillkor. Exempelvis baseras beräkningen av spårdjup orsakat av förtätning bl.a. på antaganden som att hålrumskillnaden beskrivs av ett andragradspolynom och att volymsskillnaden beror av förändring enbart i djupled. Rapporten beskriver i detalj de förutsättningar och antaganden som görs i beräkningarna. Avsevärd möda har lagts vid att resultaten från de sammantagna modellerna skall vara rationella och jämförbara.

Resultaten i denna undersökning indikerar att uppmätt spårdjup främst beror av slitage och förtätning i de asfaltbundna lagren. För Referenskonstruktionen, byggd enligt BYA

84, verkar även underliggande lager deformerats i någon mån. Deformationer i obundna lager och undergrund, kan på goda grunder anses vara mycket begränsade på CBÖ-sträckorna. Detta beroende på det mycket styva cementbundna lagret. Uppmätta spår på FAS-sträckan fördelas helt inom de asfaltbundna lagren, på samma sätt som för CBÖ-sträckan, vilket antyder att deformationerna i de undre lagren är små. Den avgörande skillnaden mellan FAS- och Referenskonstruktionen är FAS-sträckans styva bindlager. Till detta läggs även ett slitlager med större andel stor sten och bättre kulkvarnsvärde jämfört med slitlagren på de övriga sträckorna, vilket sammantaget bidrar till att FAS-sträckans spårutveckling är paritet med, eller bättre än, CBÖ-sträckans.

Det är dock inte bara spårdjupet som avgör beläggnings livslängd. Även andra skadetyper som sprickbildning kan vara avgörande. Detta är särskilt tydligt för CBÖ-sträckorna där sprickbildning noterats med början 1998. Någon sträcka har även åtgärdats. På motsvarande Referens- och FAS-sträckor har ingen sprickbildning konstaterats. Said och Hakim (2008) redovisar en skattning av framtida livslängd avseende sprickbildning för Referens- och FAS-konstruktionerna. Deras resultat indikerar en mycket längre livslängd för FAS-delen jämfört med Referens, upp till 10 gånger. Avseende jämförelse mellan FAS- och Referenskonstruktion är det således spårdjup som utgör det kriterium för vilket skillnaden är minst. Baserat på PRIMAL-mätningarna är livslängden för FAS-delen knappt dubbelt så lång som för Referensdelen, givet samma gränsvärde för funktionell livslängd.

Resultaten från mätningar av lagertjocklekar visade sig vara svårtolkade. Detta beror säkerligen på flera orsaker som, variationer i tjockleken vid utförandet och det svåra i att entydigt definiera distinkta lagergränser. Mätningar av lagertjocklekar i samband med beläggnings utförande år 1996, indikerar spridningar i nivå med och emellanåt överstigande det totala spårdjup uppmätt på överytan som skall förklaras, d.v.s. det relativt låga spårdjupet som mätts döljs i osäkerheten i tjockleksbestämningen och variationer vid utförandet. För partikulära material med maximal stenstorlek överstigande erforderlig mätnoggrannhet existerar inga entydiga lagergränser.

Eftersom mätningarna av slitaget avslutades 2003 och denna undersökning avser spårutveckling ackumulerad fram till 2010, innebär det att prediktionen av slitaget är en avsevärd extrapolering: skattningen avser värden 7 år längre fram än de 7 år den statistiska modellen baseras på. Som tidigare nämnts är prediktionsfelet efter extrapoleringen ganska litet ($\pm 0,5$ mm), vilket dock förutsätter att slitaget även fortsatt varit linjärt. Erfarenhetsmässigt är slitagespårutvecklingen i regel linjär. En omständighet som påverkar utfallet i detta specifika fall är eventuell trafikökning. Att den fortsatta utvecklingen varit linjär stöds av det faktum att även under den tid som slitaget mättes, 1996-2003, ökade trafiken: den årliga trafiktillväxten är i någon mening diskonterad i modellen som trots detta förefaller vara starkt linjär under mätperioden fram till 2003, vilket gör det rimligt att tro att slitaget fortsatt växa linjärt. Slitageskattningen försvåras dessutom något av att modellen för att beräkna spårdjupet skiljer sig något från den trådmodell som används vid PRIMAL-mätningarna.

Nötningsslitage beräknas som medelvärdet av 0,5 m i stort sett centrerat över det maximala spåret. Detta innebär att slitagespåret blir något lägre. En simulering av denna effekt på de PRIMAL-mätningar som genomförts i detta projekt ger att denna skillnad i snitt är mindre än 1 mm, vilket inte påverkar slutsatserna i någon nämnvärd omfattning, givet alla osäkerheter i övrigt. Skattningen av slitagespåret är behäftad med ett antal osäkerheter men bedöms ändå ge en rimlig bild av verkligt utfall.

Ända sedan huvudprinciperna för överbyggnadsdimensionering etablerades i slutet av 1950-talet och början av 1960-talet har grunden varit att relatera skada, i någon form, må det vara sprickor eller spårbildning, till beräknade elastiska töjningar i en lagrad konstruktion med isotropa elastiska material (se t.ex. Dormon, 1962; Peattie, 1962; Skok och Finn, 1962). Och ända sedan dess har det varit känt att detta, förstås, är en starkt förenklad modell; materialen är avsevärt mer komplicerade än linjärelastiska, konstruktionen mer komplicerad än multilagerteori, och inte minst är framtida omständigheter i form av temperatur, vatten och trafikbelastning såväl reducerade och normaliserade som okända. Trots detta, eller måhända på grund av, är det detta dimensioneringsparadigm som normalt fortfarande används. Resultaten i denna undersökning, avseende beläggningsförtätning, ger visst stöd åt grundantagandet att relatera elastiska och ackumulerade töjningar. Förvisso, är underlaget högst begränsat, sammanlagt 9 lager i 3 olika konstruktioner, men förklaringsgraden är ganska hög, med tanke på den begränsade mängden indata, styvhetsmodul vid 20 °C och lagertjocklekar, och att endast en töjningsinvariant nyttjas som förklarande oberoende variabel. Analysens skenbara enkelhet är samtidigt dess styrka. Förklaringsgraden är hög utan att modellen innehåller element som kräver indata i form av svärmätta eller antagna variabler; den ansluter även väl till den gedigna empiri som finns implicit i dagens dimensioneringsmodeller. Att öka förklaringsmodellens komplexitet med t.ex. mer utbyggda materialmodeller, numerisk lösningar av konstruktionen eller öka antalet oberoende variabler t.ex. spännings- eller töjningsinvarianter, innebär högre förklaringsgrad då antalet variabler ökar, men samtidigt kan precisionen i den enskilda variabeln minska och man förlorar den direkta kopplingen till den historiska erfarenhetsbasen. Att modellera vägkonstruktioner för att precis kunna prediktera uppträdandet, helst i termer av mätbar skada som spårdjup, är även framgent en komplicerad process med avvägningar mellan enkelhet, och tillgång till indata, och ökad komplexitet i delmodeller.

Baserat på resultat och analyser i denna undersökning kan följande slutsatser dras:

- För undersökta asfaltkonstruktioner var spårdjupet, mätt med PRIMAL, lägst för FAS-konstruktionen, följt av CBÖ-sträckan. Referenskonstruktionen uppvisade ung. dubbla spårdjupet jämfört med FAS-sträckan: 17 mm resp. 9 mm, efter 14 års drift.
- FAS- och CBÖ-sträckornas spårdjupsbildning förklaras av nötnings slitage i slitlagret och förtätning i asfaltbundna lager. För Referenskonstruktionen indikerar resultaten att även de undre liggande lagren, obundna material och terrass, deformerats i någon utsträckning.
- Generellt var det svårt att baserat på tjockleksmätningar av ingående beläggningsslag dra slutsatser kring spårdjupets fördelning mellan de olika lagren. Detta beror säkerligen på flera orsaker som variationer i tjockleken vid utförandet och det svåra i att entydigt definiera distinkta lagergränser.

REFERENSER

- Dormon G.M. 1962. The extension to practice of a fundamental procedure for the design of flexible pavements. *International conference on the structural design of asphalt pavements Proceedings, Ann Arbor USA 1962*, vol. 2: 785-793.
- Lundström, R., Karlsson, R. och Wiman, L.G. 2009. Influence of pavement materials on field performance. Evaluation of rutting on flexible, semi-rigid and rigid test sections after 7 years of service. *Road Materials and Pavement Design* 10(4): 689-713.
- Oscarsson, E. Modelling flow rutting in in-service asphalt pavements using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. 2011. *Road Materials and Pavement Design* 12(1): 37-56.
- Oscarsson, E. och Popescu, L. 2011. Evaluation of the CalME permanent deformation model for asphalt concrete layers. *International Journal of Pavement Research and Technology* 4(1): 21-33.
- Peattie K.R. 1962. A fundamental approach to the design of flexible pavements. *International conference on the structural design of asphalt pavements Proceedings, Ann Arbor, USA 1962*: 403-410.
- Said, S. och Hakim, H. 2008. *Evaluering av asfaltkonstruktion. E6 Fastarp-Heberg*. VTI rapport 609. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Said, S., Hakim, H., Carlsson, H. och Wiman, L.G. 2010. Pavement performance evaluation of flexible structures. In: *TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers DVD Paper #10-1777*.
- Said, S., Hakim, H., Carlsson, H. och Wiman, L.G. 2011. Fatigue life evaluation of flexible pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology* 4(2): 80-88.
- Skok Jr E.L. och Finn F. 1962. Theoretical concepts applied to asphalt concrete pavement design. *International conference on the structural design of asphalt pavements Proceedings, Ann Arbor USA 1962*: 412-440.
- Ulmgren, N. 1996. *Provväg E6 Fastarp-Heberg FAS konceptet*. Rapport 96-8 ASFALT. NCC Industri.
- Ulmgren, N. och Lundström, R. 2006. The SMA-principle applied to wearing, binder and base course layers- the Viaco concept. *10th International conference on asphalt pavements ISAP 2006 Quebec*.
- Wiman, L. och Eriksson, L. 1997. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Del 2: Laboratieprovning av bitumenbundna lager*. VTI notat 56:2-1997. Statens väg- och transportforskningsinstitut.

- Viman, L. 2005. *Provsträckor på E6, Fastarp-Heberg. Laboratorieprovning av bitumenbundna lager. Uppföljning efter 7 års trafik*. VTI notat 35-2005. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- VVMB 122. 2009. *Vägytemätning med mätbil; objektmetning*. Vägverket publikation 2009:79.
- Wiman, L.G. 1997. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Del 1: Byggnadsrapport*. VTI notat 56:1-1997. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G. 1998. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Lägesrapport hösten 1997*. VTI notat 27-1999. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G. 1999. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Lägesrapport hösten 1998*. VTI notat 29-1999. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G. 2001. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Lägesrapport hösten 2000*. VTI notat 26-2001. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G. 2002. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Resultat efter 5 års uppföljning, 1996-2001*. VTI notat 52-2002. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G., Carlsson, H., Viman, L. och Hultqvist, B-Å. 2005. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. Resultat efter 7 års uppföljning, 1996-2003*. VTI notat 25-2005. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- Wiman, L.G., Carlsson, H., Viman, L. och Hultqvist, B-Å. 2009. *Prov med olika överbyggnadstyper. Observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg 1996-2006*. VTI rapport 632. Statens väg- och transportforskningsinstitut.