

Provväg riksväg 40

4: Funktionsrelaterad provning efter 6 år



Jonas Ekblad (NCC Industry)
Peter Gustafsson (PEAB Asfalt)

SBUF 13318

Utveckling av alternativa beläggningkonstruktioner (Förstudie - Etapp 1c)

Förord

Detta är rapport 2 i redovisningen av provvägens prestanda efter 6 års användning och den 4:e i rapportserien kring provvägens planering, byggande och funktion. Systerrapporten till denna är benämnd *Provväg riksväg 40. 3: Vägens jämnhet efter 6 år och asfaltens klimatpåverkan*.

Rapporten omfattar vad som brukar benämnas funktionsbaserad och -relaterad provning vilka mest är betydelsefulla i planerings- och byggskede. Provtagningen inför 6-årsuppföljningen var ambitiös och mätningarna noggranna med genomgående hög precision.

Den viktiga uppföljningen av provvägen har utförts av PEAB Asfalt och NCC Industry gemensamt med stöd av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).

Sammanfattning

Provvägen byggdes för att undersöka effekten av att använda hårdare bitumensorter eller högpresterande modifierade bindemedel, jämfört med traditionella val. Denna rapport redovisar övrig mätning och provning utförd i ramen för provvägen utöver vägens jämnhet som redovisas i en systerrapport till denna (*Provväg riksväg 40. 3*).

Provvägen består av 5 delsträckor där referensen är traditionellt uppbyggd. Sträckornas bärighet har mätts med fallvikt och s.k. rullande fallvikt. Vid fallviktsmätningarna mättes även asfalttöjning från givare installerade vid byggnation. Borrprov togs från vägen och analyserades med avseende på permanenta deformationer. Vidare mättes även egenskaper från återvunnet bindemedel från borrproverna.

Bärighetsmätningarna visar högre bärighet för referensprovsträckan med tjockare asfaltlager medan övriga inte kan skiljas åt. Laboratieprovning av asfaltbeläggning och återvunnet bindemedel visar klara skillnader mellan använda material. Framst är det de polymermodifierade bindemedlen som visar förbättrade egenskaper. Det finns dock ingen korrelation mellan funktionsrelaterad provning redovisad i denna rapport och uppmätt spårdjupsutveckling redovisad i systerrapporten.

INNEHÅLL

1. INLEDNING.....	5
2. PROVVÄGEN	6
3. METOD	7
3.1. BÄRIGHET.....	7
3.2. ASFALTTÖJNING.....	8
3.3. MATERIALPROVNING.....	8
3.3.1. <i>Dynamisk krypprovning</i>	8
3.3.2. <i>Bindemedelsprovning</i>	8
4. RESULTAT	11
4.1. BÄRIGHET: FWD OCH TSD	11
4.2. TÖJNINGSGIVARE	14
4.1. BORRPROV FRÅN ASFALTLAGER	15
4.2. ÅTERVUNNET BINDEMEDEL	17
4.3. SAMMANFATTANDE ANALYS.....	20
5. DISKUSSION	23
REFERENSER	25

1. INLEDNING

Provvägsexperimentet riksväg 40 baserades på idén att det går att radikalt reducera total asfaltjocklek genom att använda mer högpresterande material, i det här fallet bindemedel med högre prestanda jämfört med mer standardmässiga val.

Denna del av 6-årsrapporteringen behandlar övrig provning utöver den direkt funktionella d.v.s. det som brukar benämnas funktionsbaserade och -relaterade egenskaper: materialprovning och bärighet. Vägytans jämnhet och beläggnings klimatpåverkan redovisas i systerrapporten till denna: *Provväg riksväg 40, 3. Vägens jämnhet efter 6 år och asfaltens klimatpåverkan*. Rapporterna skall ses som en helhet även om de kan läsas separat.

Ytterst är man huvudsakligen intresserad av det färdiga sammansatta byggnadsverkets funktion och mindre av detaljer kring använda konstruktionsdelar eller material. Detta gäller för brukandet. För projektering och byggande kan det krävas kunskap kring konstruktionsdelars och använda materials prestanda för att på ett bestämt sätt nå och sedan upprätthålla brukarkraven under en längre tid. Provvägen byggdes för brukarna men med målet att öka byggarens kunskap kring förutbestämbarhet avseende brukarkrav.

Teknisk prestanda kan bedömas eller mätas på en rad olika nivåer eller skeenden i bygg- och brukandefasen. Figur 1 illustrerar ett exempel på kravhierarki för vägar där överordnade trafikantkrav (nivå 1) länkas samman med funktionskrav på vägen (nivå 2) och beläggnings ned till egenskaper för enskilda delmaterial som asfalt, bitumen och stenmaterial (nivå 5).

Nivå	Byggdel/ komplexitet	Kravnivå	Frihetsgrader	Exempel vägar
0	Samhälle	Systemfunktion	Lösning	Väg, järnväg, båt, flyg
1	Vägnät	Användarkrav	Teknisk lösning	framkomlighet, säkerhet, tillgänglighet, komfort, transporttid
2	Väg	Funktionskrav	Konstruktiv lösning	jämnhet , friktion, buller
3	Vägdela	Konstruktionskrav	Konstr. detaljer	bärighet , strukturella krav
4	Lager	Lagerkrav	Material	motstånd mot utmattning och permanent deformationer , styvhet, beständighet, tjocklek
5	Material	Materialkrav	Produktionsmetod	sammansättning, stenkvalitet, kornstorleksfördelning, bindemedelshalt, hålrum, bindemedelskvalitet .

Figur 1. Olika nivåer avseende teknisk prestanda (efter Korteweg, 2002).

I praktiken är det egenskaper på nivå 2 som benämns funktionskrav. Det är också denna nivå som omfattas av Trafikverkets underhållsstandard genom benämningen ”funktionellt tillstånd” (Trv, 2012). Egenskaper på nivåer 3–5 benämns ofta funktionsbaserade och -relaterade. I den här rapporten används genomgående

termen funktionsrelaterad för mätningar på nivåerna under funktionsnivån. Avsikten med mätningar på dessa nivåer är att kunna prediktera funktionskrav på nivå 2 både avseende hur de kan uppnås och sedan beständigt upprätthållas.

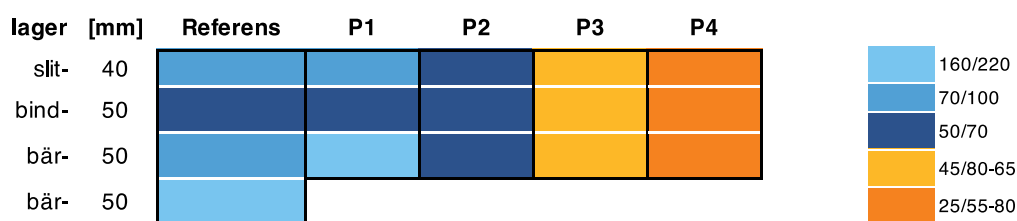
Inför anläggandet av provväg riksväg 40 genomfördes en stor mängd bindemedelsprovning för att fastställa provschemat och de slutligen bestämda beläggningstyperna. Under byggandet provades beläggningen och även vägens bärighet. Dessa provningar, inför och under byggandet, finns redovisade i 2 tidigare rapporter:

1. *Utveckling av alternativa beläggningskonstruktioner, Etapp 1a.*
(Gudmarsson, 2015)
2. *Reducerad beläggningstjocklek med alternativa bindemedel.*
(Gudmarsson, 2016)

I den 1:a rapporten redovisas omfattande bindemedelsprovning och beläggningssval medan den 2:a huvudsakligen redovisar provning av färdig asfalt och olika typer av bärighetsmätningar.

2. PROVVÄGEN

Vägens uppbyggnad är detaljerat beskriven i tidigare rapporter men sammanfattas för tydlighets skull även i denna rapport, figur 2.



Figur 2. Provsträckornas uppbyggnad och bindemedelstyper.

Referens är uppbyggd med vad som får kallas traditionella materialval (beläggnings- och bindemedelstyper). Provsträckorna, *P1–P4*, har sedan reducerad sammanlagd asfalttjocklek och andra bindemedelsval:

- P1** traditionell uppbyggnad med reducerad tjocklek (-5 cm)
- P2** hårdare penetrationsbitumen (-5 cm)
- P3** modifierat bindemedel (PMB) (-5 cm)
- P4** högmodifierat bindemedel (PMB) (-5 cm).

Beläggningstyperna i respektive lager var:

- slitlager ABS16
- bindlager ABb22
- bärlager AG22.

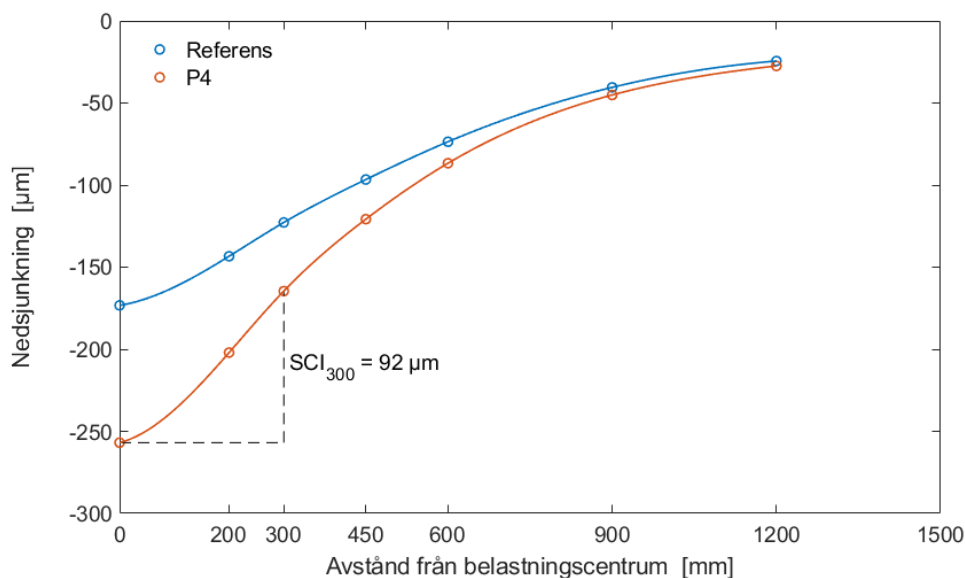
Provschemat omfattar 2 experiment: (1) effekt av reducerad total asfalttjocklek och (2) effekt av olika typer och grad av modifieringar jämfört med den s.k. traditionella lösningen (*Referens* och *P1*).

3. METOD

Som komplement till funktionsmätningarna i rapport 3 har funktionsrelaterad provning genomförts på nivåerna 3, 4 och 5 (vägdel, lager och material) enligt figur 1: bärighet på hela konstruktionen, asfaltsegenskaper för enskilda lager och slutligen bindemedlets egenskaper.

3.1. BÄRIGHET

Asfaltytans nedsjunkning vid belastning har bestämts med fallviktsapparat (FWD, Falling Weight Deflectometer) och rullande bärighetsmätning (TSD, Traffic Speed Deflectometer). Den grundläggande mätmodellen är den samma för båda metoderna men de skiljer något mättekniskt och vad avser belastningen, främst hur lasten påförs. Båda metoderna bestämmer nedsjunkningen under en last (normalt 50 kN) där lasten är transient på en stationär mätplats för fallviktsmätningen och under ett rullande hjul vid TSD-mätningen. Från dessa mätningar kan man definiera och bestämma en rad olika mått. Som bärighetsmått i den här undersökningen används s.k. Surface Curvature Index (*SCI*). Det har fördelen att det är enkelt geometriskt mått som inte är beroende av en rad ytterligare antaganden, Figur 3 visar bestämningen av SCI_{300} som är skillnaden i nedsjunkning mellan mätpunkten mitt under belastningen och 300 mm från denna.



Figur 3. Bestämning av SCI_{300} (Surface curvature index, *SCI*) från fallvikts- och TSD-mätningar; exemplet visar fallviktsmätning.

Geometriskt kan man beskriva SCI_{300} som ett mått på nedsjunkningens lutning nära belastningen och allmänt anses mätetalet främst bero på egenskaper i den övre delen

av konstruktionen, de bundna asfaltlagren. Tolkningen är att ett högre värde på lutningen (SCI_{300}) indikerar lägre motstånd mot deformation d.v.s. svagare lager. I fallet ovan är nedsjunkningen större och brantare nära centrum för *P4*. *Referens* har därför högre bärighet än *P4*. Det är värt att påpeka att nedsjunkningen styrs av hela konstruktionen och det är svårt att entydigt isolera olika delar av uppbyggnaden.

3.2. ASFALTTÖJNING

I samband med fallviktsmätningar under våren 2022 mättes även töjningen i respektive beläggnings underkant d.v.s. vid 19 cm för Referenssträckan och 14 cm för övriga. Givare utformade som mekaniska ankare försedda med trådtöjningsgivare (kvartsbrygga), installerades i samband med byggandet 2015: delas ut på obundet bärlager och asfalterades över. På varje delsträcka installerades 3 givare. Töjningar mättes även i samband med fallviktsmätningarna innan trafiköppning 2015.

3.3. MATERIALPROVNING

I samband med 6-årsuppföljningen provtogs minst 12 genomgående borrhärnor med diameter 150 mm ur varje provsträcka. Borrproven delades efter lagergränser och provkroppar från slit- och bindlager provades med avseende på motstånd mot permanenta deformationer (dynamiskt kryp) och hållrumshalt. Från AG-lager återvanns bindemedel för vidare analyser.

3.3.1. DYNAMISK KRYPPROVNING

Beläggningsens motstånd mot permanenta deformationer under repeterad långvarig belastning undersöktes genom s.k. dynamisk krypprovning som utfördes på borrhärnor med diameter 150 mm, 6 stickprov ur varje slit- och bindlager. Proven bestod av 2 staplade 30 mm borrhärnor. Provningsen utfördes vid 40 °C varvid belastningen påförs en lastplatta med diameter 100 mm och består av fyrkantspulser med 1 s pålastning, motsvarande 100 kPa, och 1 s avlastning. Belastningsplattans nedsjunkning som funktion av antalet belastningspulser mättes. Mätetalet är den totala relativa nedsjunkningen efter 3600 pulser.

3.3.2. BINDEMEDELSPROVNING

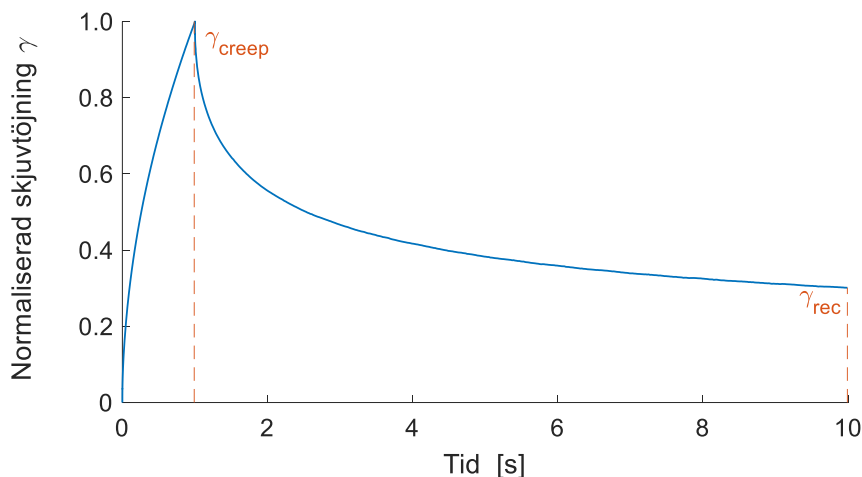
Provschemat för återvunnet bindemedel omfattade följande mätningar:

- penetration vid 25 °C
- mjukpunkt k&r
- oscillerande skjuvprovning (DSR)
- kryp-återgångsprovning (multiple stress creep-recovery, MSCR).

Mätningar av penetration och mjukpunkt är allmänt kända medan övriga beskrivs översiktligt nedan.

Oscillerande skjuvprovning och kryp-återgångsprovning baseras på samma provgeometri, parallella plattor som skjuvas i en reometer. Vid kryp-återgångsprovning (MSCR) påförs provet en konstant spänningsbelastning under

1 s varefter spänningen släpps och töjningen mäts under ytterligare 9 s. Provningsen sker vid 2 spänningsnivåer: 0,1 respektive 3,2 kPa och vid temperaturen 60 °C. För definition av beräkningsgrunder visas schematiskt ett typiskt provresultat i Figur 4. Ur mätningen bestäms 2 parametrar, relativ återgång och återstående krypkomplians.



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

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

$$R = \frac{\gamma_{\text{creep}} - \gamma_{\text{rec}}}{\gamma_{\text{creep}}} \quad 1$$

Ett högt värde betyder att den största delen av totaldeformationen är återgående d.v.s. elastisk, vilket är typiskt för SBS-modifierade bindemedel. Den återstående krypkompliansen¹, J'_{nr} d.v.s. eftergivligheten beräknat på den icke återfjädrande (kvarblivande) töjningen, bestäms enligt:

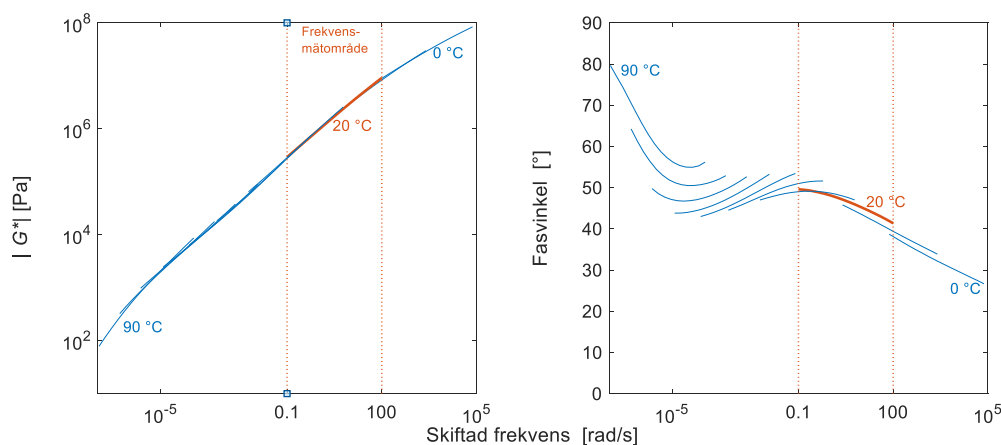
$$J'_{\text{nr}} = \frac{\gamma_{\text{rec}}}{\tau} \quad 2$$

där τ är skjuvspänning under krypfasen. J'_{nr} är den totala eftergivligheten vid en given belastning d.v.s. hur stor den totala kvarstående deformationen är efter en given belastningsnivå, och R hur stor del av den maximala töjningen som återgår.

Oscillerande skjuvprovning (DSR) utfördes vid olika temperaturer och frekvenser: 0 °C till 90 °C i steg om 10 °C i frekvensområdet 0,1 till 100 rad/s. Vid resultatbearbetningen beräknas absolut skjuvmodul och fasvinkel, och mätningarna sammanfattas i en s.k. masterkurva. Mätningarna av skjuvmodul vid de olika temperaturerna förskjuts längs x-axeln (frekvensaxeln) så de tillsammans bildar en

¹ efter den ursprungliga termen "non-recoverable shear compliance" eller icke-återgående krypkomplians

kontinuerlig kurva med utgångspunkt i mätningen vid referenstemperaturen 20 °C som är fix. Bestämningarna av fasvinkeln förskjuts sedan med samma skiftfaktorer. Typiska resultat för SBS-modifierade bitumen efter skiftning visas i Figur 5.



Figur 5. Skjuvmodul och fasvinkel, frekvenssväp vid olika temperaturer skiftade till referenstemperaturen 20 °C för återvunnet bindemedel 25/55-85.

Figur 5 indikerar visuellt svårigheten att konstruera masterkurvor för modifierade bindemedel då de uppvisar egenskaper som inte är skiftbara vilket kan vara rena temperatureffekter eller ökad grad av olinjära effekter. Det är speciellt tydligt för tidsberoendet, fasvinkeln, i det högra diagrammet. Mätningarna bildar inte en kontinuerlig kurva och kan inte fås att göra det med någon skiftning. Penetrationsbitumen är i regel mer skiftbara, kurvorna blir mer kontinuerliga.

Mätningar av frekvens- och temperaturberoende skjuvmodul uttryckt som masterkurvor passas till en modell beskriven av Di Benedetto m.fl. (2004) vilket är samma modell som i tidigare rapport 1. Skjuvmodulen (G^*) som funktion av belastningsfrekvensen beskrivs som:

$$G^*(\omega) = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\beta\omega\tau)^{-1}} \quad 3$$

där ω är vinkelfrekvensen, G_∞ är skjuvmodulens övre platånivå och G_0 dess lägre, och δ , k , h , β och τ är koefficienter. Samtliga parametrar bestäms genom numerisk optimering.

De använda skiftfaktorerna passas till den välkända WLF-ekvationen (Williams m.fl., 1955):

$$\ln(\alpha_T) = \frac{-c_1(T - T_{\text{ref}})}{c_2 + (T - T_{\text{ref}})} \quad 4$$

där α_T är skiftfaktor för varje temperatur T mot referenstemperatur T_{ref} och c_1 och c_2 är passade konstanter. Från dessa ekvationer kan man sedan bestämma skjuvmodul vid godtycklig temperatur och frekvens.

Skjuvmodulmätningarna analyseras även baserat på metodik från PG-systemet för bindemedelskaraktärisering (Performance Grade Binder Specification, se t.ex. ASTM (2013)). För laboratorieåldrat bindemedel (efter RTFOT) finns, för given temperaturklass, ett krav på att $|G^*|/\sin \delta$ mätt vid frekvensen 10 rad/s skall vara större än 2,2 kPa (δ är fasvinkel). Nivån gäller alltså för en given temperaturklass men om man har flera mätningar vid olika temperaturer kan man vända på utvärderingen och bestämma den temperatur vid vilken $|G^*|/\sin \delta$ är 2,2 kPa. Från de enskilda frekvenssvopen vid de olika temperaturerna används resultat vid 10 rad/s och från dessa interpoleras nivån 2,2 kPa och temperaturen bestäms.

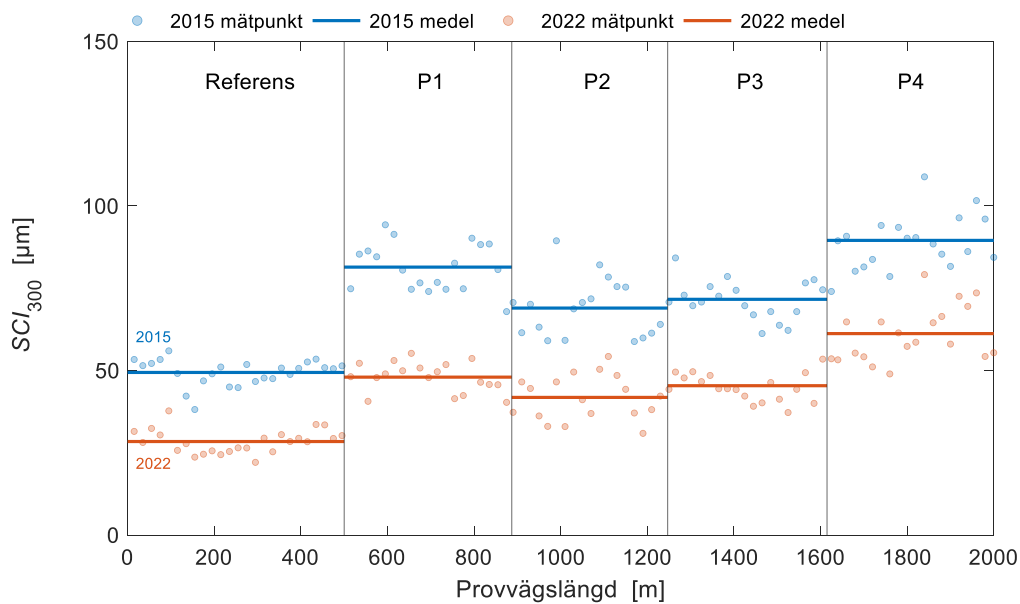
4. RESULTAT

Mätningar innehåller variation, utöver påverkan av kända faktorer, som kan bero på naturliga variationer för mätobjekten men även mätfel. För att skatta inverkan av dessa används statistiska metoder för att skilja mellan klara skillnader och skillnader som kan bero på slumpfel givet de spridningar som finns och den säkerhetsnivå vi väljer.

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 (95 % säkerhet).

4.1. BÄRIGHET: FWD OCH TSD

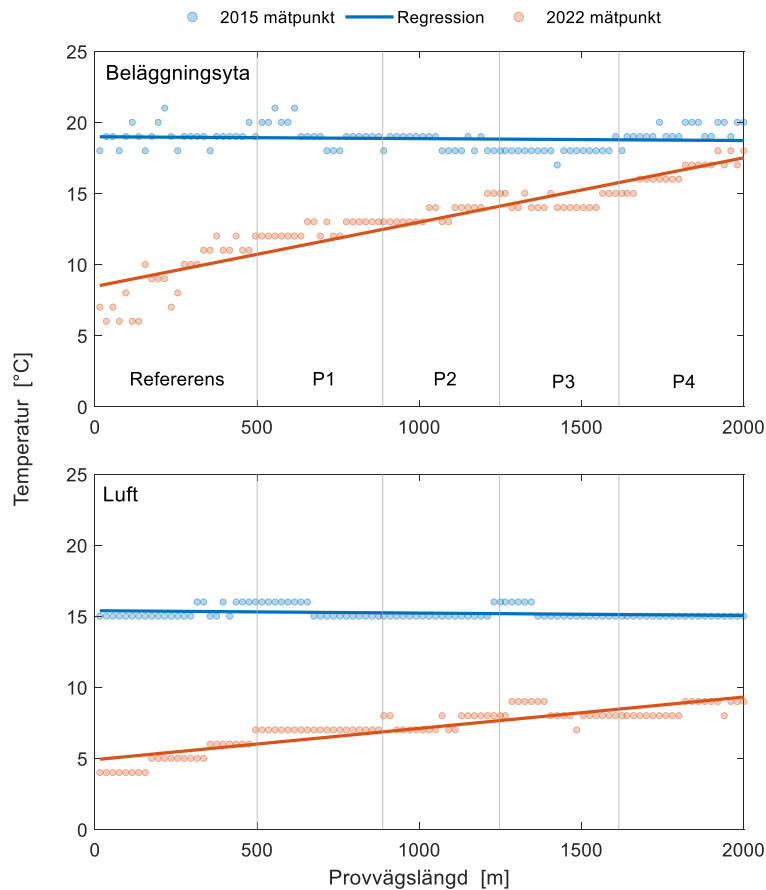
Fallviktsmätningar på obundet bärlager analyseras i rapport 3 huvudsakligen som indikator på provvägens homogenitet eller längsgående likhet. I den här delen analyseras fallviktsmätningar på asfaltytan som har utförts vid 3 tillfällen: hösten 2015 och på vårarna 2020 och 2022. Figur 6 sammanfattar resultat från strax innan trafiköppning 2015 och inför avslutande mätningar våren 2022. Figuren visar enskilda mätpunkter var 15:e m samt medelvärde för respektive provsträcka. I denna rapport utvärderas det s.k. Surface curvature index då det är fritt från en större mängd antaganden. Det är ett rent geometriskt mått, direkt bestämt från nedsjunkningen orsakad av belastningen.



Figur 6. Mätningar med tung fallvikt (FWD) på asfaltytan, hösten 2015 före trafikpåsläpp samt våren 2022 (Surface curvature index, SCI).

För att undvika visuellt gytter visar figuren endast mätningar från 2015 och 2022; resultat från 2020 ligger emellan dessa. En statistisk analys (multipel regression) med *år* och *provsträckor* som faktorer visar signifikans för *år*, SCI_{300} blir lägre med ökad vägålder (d.v.s. väggroppen blir styvare) och *Referens* har lägre medelvärde än övriga provsträckor som sinsemellan inte går att skilja, variationen kan bero på slumpfel.

Mätningarna och den statistiska analysen indikerar att bärigheten synbarligen har ökat och är högre 2022. Utvärderingen av erhållna resultat kompliceras dock av att mätningarna genomförts vid olika förhållanden, temperaturmässigt och vid okänd hydraulisk status för bundna lager och terrass. Det är t.ex. inte trivialt att vare sig bestämma eller kompensera för temperaturskillnader. Det tar 2–3 timmar att mäta med fallvikt över hela provsträckan och asfalttemperaturer kan variera under den enskilda mätningen men kanske mer mellan mättillfällena. Temperaturen i asfaltlagren är besvärlig att mäta då den varierar med djupet och temperaturgradienten påverkas av omgivande temperaturer (luft och obundna material), vindhastighet och inte minst värmestrålning. Vid fallviktsmätningarna mättes även luft- och yttemperatur vilka sammanfattas i figur 7.

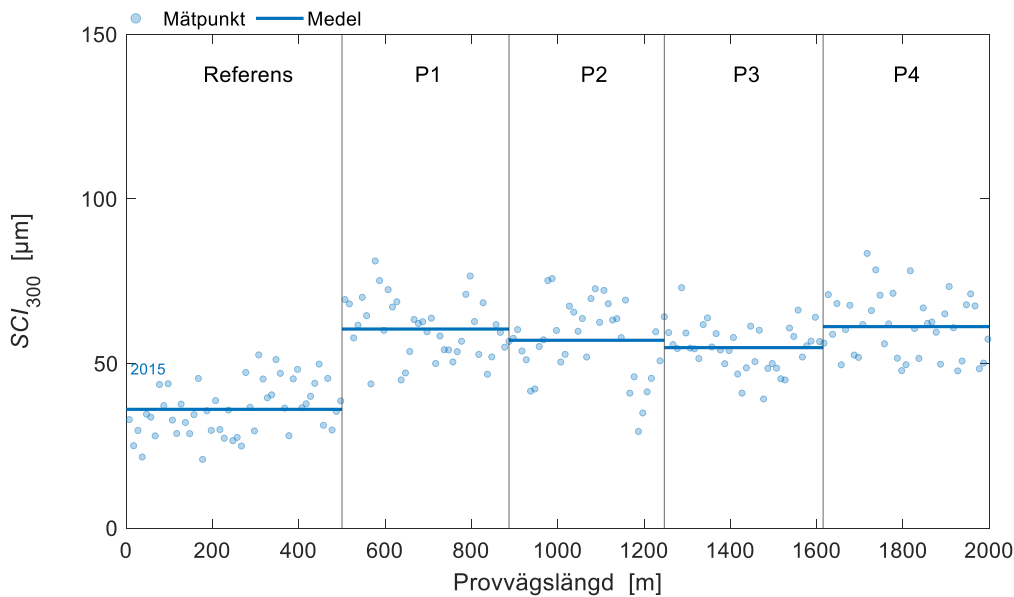


Figur 7. Temperaturer vid mätningar med tung fallvikt (FWD), hösten 2015 samt våren 2022.

Figuren visar bara 2015 och 2022 års mätningar då temperaturen 2020, även som för SCI_{300} , låg mellan 2015 och 2022 års mätningar med ett stigande förlopp likt 2022. Temperaturerna var högst 2015 med en medeltemperatur för asfalten kring 19 °C och lägst 2022 med medeltemperatur på 13 °C. Och temperaturökning under mätningen längs provsträckan var störst 2022 med en ökning med ca 12 °C att jämföras med närmast konstant temperatur kring 19 °C år 2015. Mätningarna 2015 utfördes på hösten (september) under en jämnvarm period med små dygnsliga variationer medan däremot natten mot vårmätningen 2022 (april) var kall (minusgrader) och med klart stigande temperaturer under förmiddagen. Som synligt i figuren är temperaturökningen i asfaltytan snabbare än lufttemperaturen samtidigt som temperaturgradienten är okänd. Temperaturen i asfalten är en osäkerhetsfaktor som är svår att justera för. Men även obundna material och terrass förändras över tid och inte minst kan även hydraulisk status (t.ex. vattenhalter) skilja.

Sammanfattningsvis avseende fallviktsmätningarna är det svårt att entydigt identifiera orsaker till de skilda resultaten; de kan bero på en mängd olika faktorer dessutom i komplex samverkan. Förhårdnande beläggning kan vara en orsak.

Bärighet mättes även med rullande bärighetsmätning (TSD) 2015 och utvärderingen av SCI_{300} visas i figur 8.



Figur 8. Mätningar med rullande bärighetsmätning (TSD) på asfaltytan, hösten 2015 innan trafikpåsläpp (Surface curvature index, SCI_{300}).

Den rullande bärighetsmätning visar ungefär samma mönster som fallviktsmätningarna men på systematiskt lägre nivåer. Korrelationen (Pearson r , $n = 101$) mellan de båda metoderna är 0,76 när den rullande bärighetsmätningens 10 m-medelvärden omsamlas till samma platser där fallviktsmätningarna genomfördes. Även här har vi skilda mätomständigheter avseende asfalttemperaturer och okända vattenhalter i obundna material och terrass. Vid mätningen var både beläggningsytans och luftens temperatur kring 10 °C.

Sammanfattningsvis är det svårt att dra klara slutsatser från bärighetsmätningarna då mätomständigheter varierat och det är svårt att kompensera för dessa variationer. Vid samtliga mätningar har den tjockare referenssträckan visat lägre SCI_{300} d.v.s. visat högre bärighet medan de övriga inte skiljer.

4.2. TÖJNINGSGIVARE

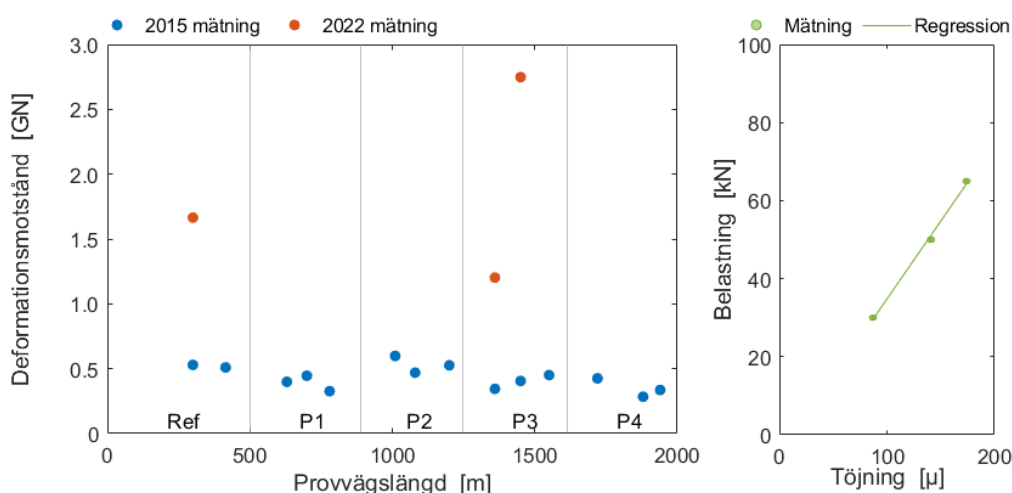
Vid byggnation byggdes töjningsgivare in i underkant av de asfaltbundna lagren, 3 per provsträcka. Det har varit ett stort bortfall av givare sedan den första mätningen då ytterligare 11 av de 14 fungerande töjningsgivarna fallit bort. Vid mätningen 2022 gav 3 givare någon form av mättekniskt acceptabla resultat. Töjningen mättes vid 3 belastningsnivåer: 30, 50 och 65 kN. Vi kan använda samtliga dessa mätningar genom att bestämma väggroppens deformationsmotstånd, R , bestämd efter asfalttöjning, definierat som

$$R = \frac{F}{\varepsilon}$$

5

där F är belastningskraft och ε är uppmätt asfalttöjning. Deformationsmotståndet bestäms sedan som linjens lutning i det högra diagrammet i figur 9 som exemplifierar definitionen av måttet. Höga töjningar i asfalten anses ge mer skada

(sprickbildning) och höga töjningar ger lägre beräknat deformationsmotstånd. Måttet kan därför användas för att inbördes jämföra provsträckorna: högre deformationsmotstånd kan indikera högre motstånd mot sprickbildning. Det vänstra diagrammet i figur 9 sammanfattar töjningsmätningarna 2015 och 2022.



Figur 9. Beräknat deformationsmotstånd från mätningar av asfalttöjning; högra figuren visar bestämningen av deformationsmotstånd vid 3 belastningsnivåer: deformationsmotståndet är linjens lutning.

Det är inte meningsfullt att analysera 2022 års resultat. Alltför många givare har fallit bort och de som i någon mening fortfarande ger utslag visar mycket stor variation. Det är svårt att förklara den stora skillnaden mellan mätningarna på sträcka P3: de ligger 90 m från varandra och de skiljer en faktor 2,3 avseende deformationsmotståndet medan skillnaden 2015 endast var 18 %. Till detta kommer svårigheten med asfalttemperaturer mer utförligt beskrivet i avsnitt 4.1.

Avseende 2015 års mätningar är det visuellt svårt att tydligt skilja sträckorna. För att jämföra medelvärden för delsträckorna genomfördes en variansanalys (ANOVA). Det finns ingen signifikans för skillnader mellan Referens och övriga: de skillnader som noteras kan bero på slumpfel. Den enda statistiskt signifikanta skillnaden är att P2 har högre deformationsmotstånd än P4 (d.v.s. lägre asfalttöjningar vid samma belastningar, styvare). Resultaten blir de samma även om vi undersöker de direkt uppmätta töjningarna vid de olika lastnivåerna: Referens kan inte skiljas från de övriga och P2 har lägre töjningsnivåer än P4 på alla nivåer.

Sammanfattningsvis visar mätningar av asfalttöjningarna inga tydliga skillnader mellan provsträckorna direkt efter byggandet 2015 och vid 6-årsuppföljningen har bortfallet av mätton varit stort.

4.1. BORRPROV FRÅN ASFALTLAGER

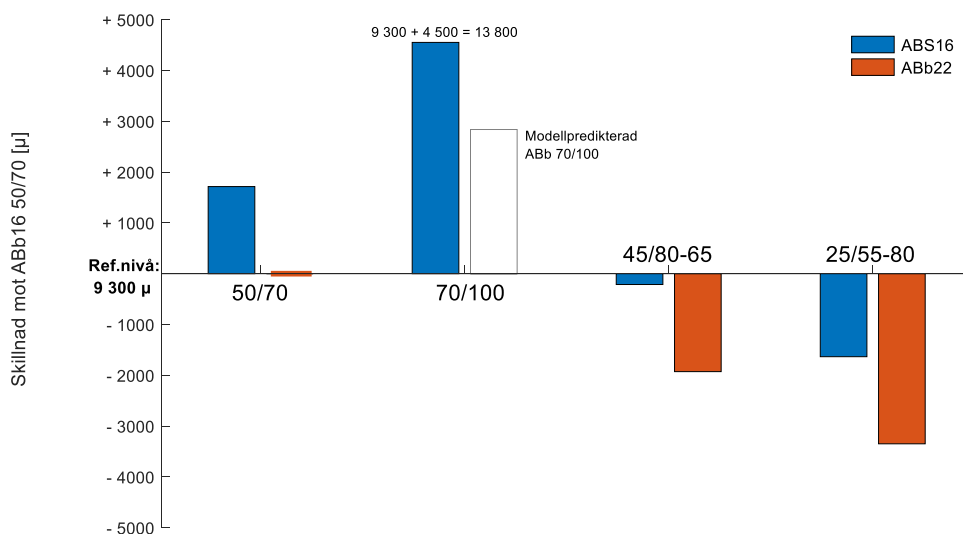
Från varje dellager och provsträcka bestämdes asfaltens hålrums halt på minst 3 provkroppar. Samtliga lager och beläggningstyper har genomsnittliga hålrums halter mellan 2,1–5,4 vol.-% och som förväntat något svagt ökande nedåt i konstruktionen d.v.s. bärlager har något högre hålrums halt än bind- och slitlager.

Sträckan *P4* har något högre hålrumsalter vilket även noterades vid byggandet 2015. Alla hålrumsalter är dock inom spann som normalt ger svaga eller inga samband till prestanda. Sammanfattningsvis, avseende hålrumsalter noteras inga betydande avvikelser.

Vid analysen av resultat från dynamisk krypprovning undersöktes eventuell inverkan av hålrumsalter. I inget fall var påverkan statistiskt signifikant. Utvärderingen baseras därför på skillnader mellan beläggningstyp (ABS16 eller ABb22) och de olika bindemedlen enligt:

$$y = \alpha_i + \beta \cdot mix + \gamma \cdot binder + \varepsilon \quad 6$$

Där y är uppmätt sluttöjning efter 3600 lastpulser, mix är asfaltlager, slit eller bindlager, $binder$ är bindemedelstyp, α , β och γ bestäms genom linjär regression och ε är kvarvarande fel. Resultaten från den statistiska analysen sammanfattas i figur 10 som visar skillnaden mellan respektive beläggning och referensbeläggningen ABb22 50/70, vilken kan betraktas som ett normalt bindlager. Resultaten för övriga lager jämförs därför med denna referensnivå som var 9 300 μ .

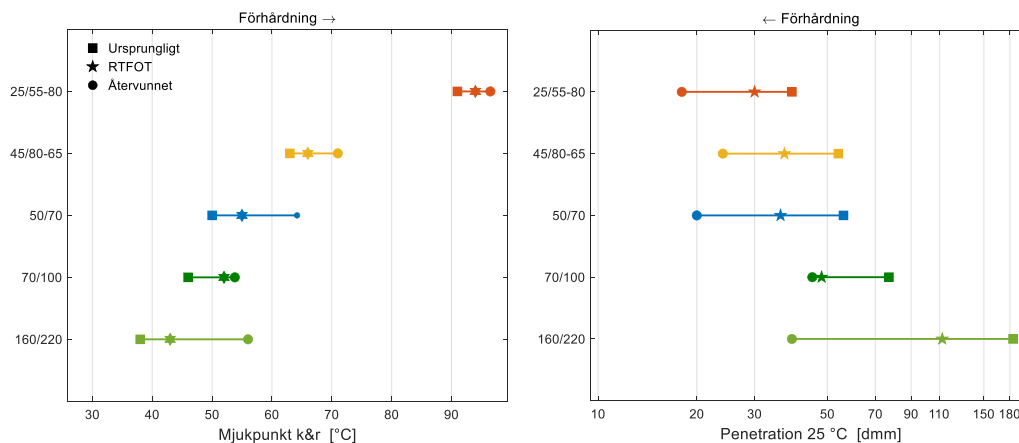


Figur 10. Skillnad från referensbeläggningen ABb22 50/70 för respektive beläggningstyp; figuren visar även beräknat värde för vad ABb22 70/100 skulle varit enligt modellen.

Den statistiska analysen ger klara skillnader mellan såväl beläggningstyp som mellan använda bindemedel. Bindlager, ABb22, ger lägre töjningar jämfört med ABS16, i genomsnitt ca 1 700 μ . Det högmodifierade bindemedlet 25/55-80 visar klart högst motstånd mot permanenta deformationer och 70/100 lägst. Figuren visar också att båda beläggningstyperna med polymermodifierade bindemedel har klart lägre deformationer än referensbeläggningen ABb22 50/70.

4.2. ÅTERVUNNET BINDEMEDEL

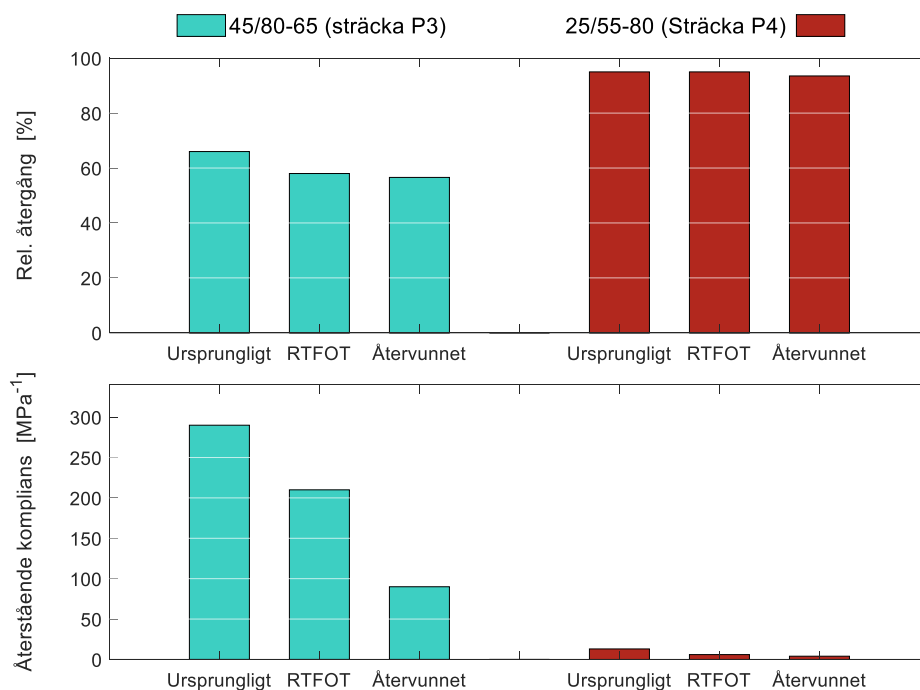
Undersökningen har även omfattat bindemedlets egenskaper efter 6 år och dess förändring från ursprungligt bindemedel. Bindemedel återvanns från borrprov från AG22-lagren. Figur 11 visar penetration och mjukpunkt för de olika bindemedlen vid 3 olika skeden: ursprungligt, laboratorieåldrat enligt RTFOT och sedan återvunnet från väg efter 6 år. Visuellt är de olika stadierna placerade i en linje men bindemedlet följer inte alla stegen utan i grunden är det 2 olika processer: (1) *Ursprungligt* till *RTFOT* som är en laboratoriesimulering av (2) det faktiska utfallet som är *Ursprungligt* till *Återvunnet från väg*.



Figur 11. Bindemedlens förändring från ursprungligt till efter RTFOT eller återvunnet från väg.

Bindemedlen förhårdnar i båda förloppen, laboratoriesimulering och verkligt utfall. Förhårdningen för det faktiska förloppet är avsevärt större än vid laboratoriesimuleringen. Det är dock värt att notera att borrprover från vägen även kan ha åldrats under 6 år, utöver påverkan vid asfalttillverkning, transport och utläggning. AG-lager ligger förmodligen något skyddade. I båda delfigureerna är linjens längd ett mått på förändringens storlek (notera den logaritmiska skalan för penetration). Förändringen under laboratoriesimuleringen, RTFOT, ger förändringar i hygglig paritet mellan bindemedlen medan det däremot är tämligen stora skillnader för det faktiska utfallet (återvunnet från väg). Förändringen är stor för 160/220 medan den är klart mindre för 70/100.

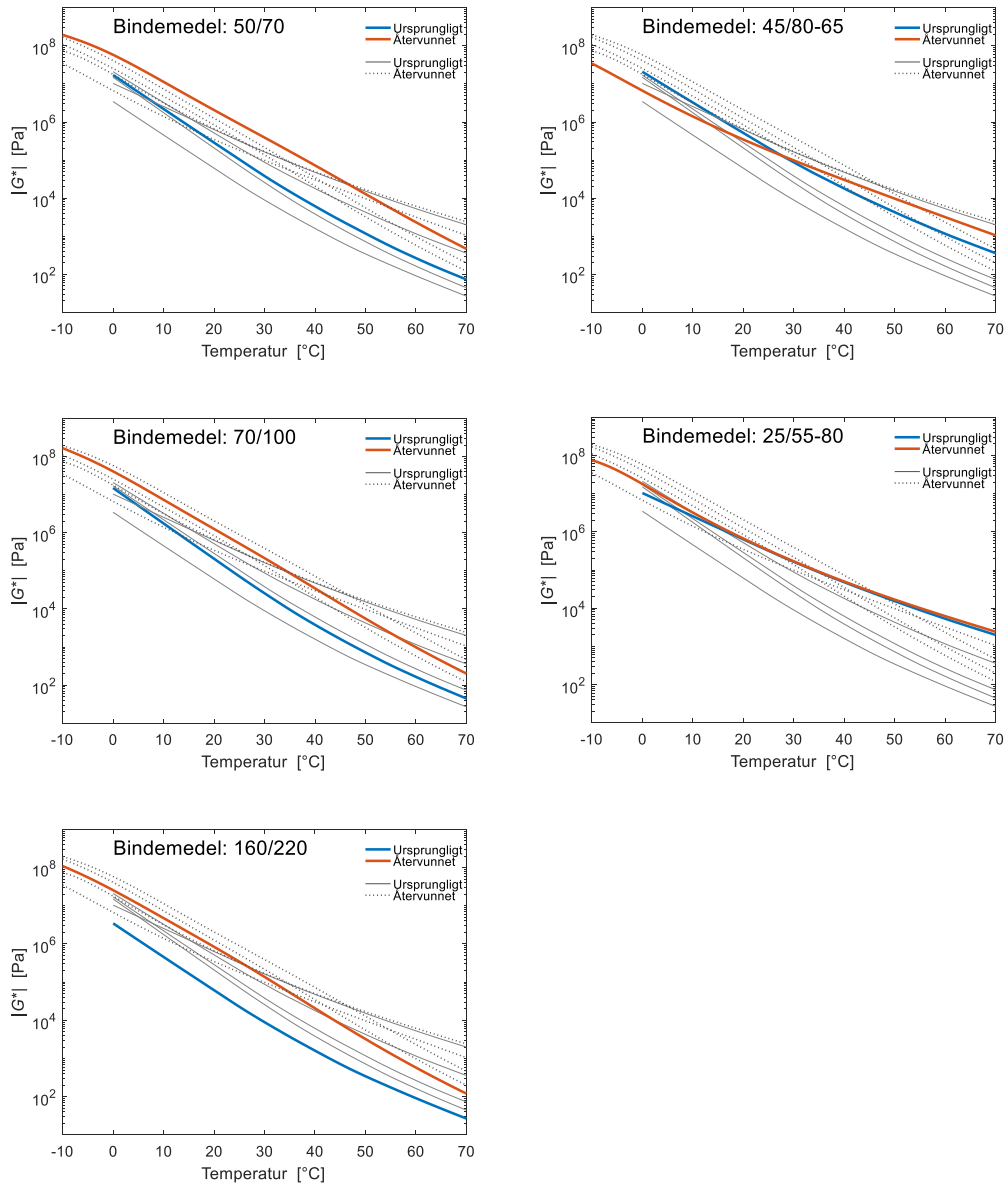
För de 2 modifierade bindemedel utfördes även krypprovning (MSCR) mer riktad mot elastiska modifierade bindemedel, vilket sammanfattas i figur 12 som elastisk återgång och komplians (eftergivlighet) vid 60 °C och belastningsnivån 3,2 kPa.



Figur 12. Resultat från krypprovning (MSCR) vid 3,2 kPa och 60 °C av de modifierade bindemedlen vid olika stadier.

Det är tydlig skillnad mellan såväl bindemedel som olika skeden. För den återstående kompliansen är skillnaden mätetalsmässigt mycket stor: för en given spänningsnivå är den kvarstående deformationen mycket större för 45/80-65, d.v.s. bindemedlet med mer normal modifieringsgrad, jämfört med det högmodifierade 25/55-80. För elastisk återgång noteras en sänkning för 45/80-65 i både laboratoriesimuleringen och det faktiska utfallet medan 25/55-80 förblir oförändrat. För den återstående kompliansen (kvarvarande deformation) är skillnaden mellan bindemedlen en faktor 25 (en faktor 3 för logaritmen). På grund av skalningen i figur 12 för kompliansen är inte påverkan för 25/55-80 visuellt tydligt men mätvärdena är ungefär halverade för båda förloppen jämfört med det ursprungliga bindemedlet.

Oscillerande skjuvprovning (DSR) utfördes på ursprungligt bindemedel, redovisat i rapport 1, och nu på återvunnet bitumen efter 6 år på vägen. Mätvärdesbehandlingen, beskriven i tidigare avsnitt 3.3.1, omfattar bestämning av en s.k. masterkurva för skjuvmodulen och en passning av justeringsfaktorernas temperaturberoende. Mätningarna sammanfattas i figur 13 som isokrona masterkurvor d.v.s. skjuvmodulen som funktion av temperaturen vid en bestämd frekvens, 0,1 Hz.



Figur 13. Isokrona masterkurvor för ursprungligt bindemedel och återvunnet från väg efter 6 år: referensfrekvens 0,1 Hz.

Använda penetrationsbitumen följer ett förväntat mönster av förhårdning av återvunna bindemedel jämfört med ursprungliga. De modifierade bindemedlen skiljer däremot något både mot penetrationsbitumen och sinsemellan. Bindemedlet med normalgradsmodifiering 46/80-65 visar ett flackare temperaturberoende vilket till och med ger en övergång jämfört med ursprungligt: vid högre temperaturer är det styvare och vid lägre mjukare. Det högmodifierade förefaller närmast opåverkat i DSR-provningen. För penetration och mjukpunkt var förändringen däremot i paritet med 45/80-65 fast från andra nivåer.

Figur 13 indikerar lite av problemet med att jämföra DSR-mätningar i form av kurvor: dels är kurvor generellt svåra att jämföra annat än kvalitativt (som högre eller lägre än) dels ger det ytterligare problem när man får korsande kurvor som för

45/80-65 då det inte finns någon given referenspunkt. Som mätvärde från skjuvprovningen kan i stället PG-temperaturen vid vilken $|G^*|/\sin \delta$ är 2,2 kPa användas. Temperaturer för de olika bindemedlen sammanställs i Tabell 1.

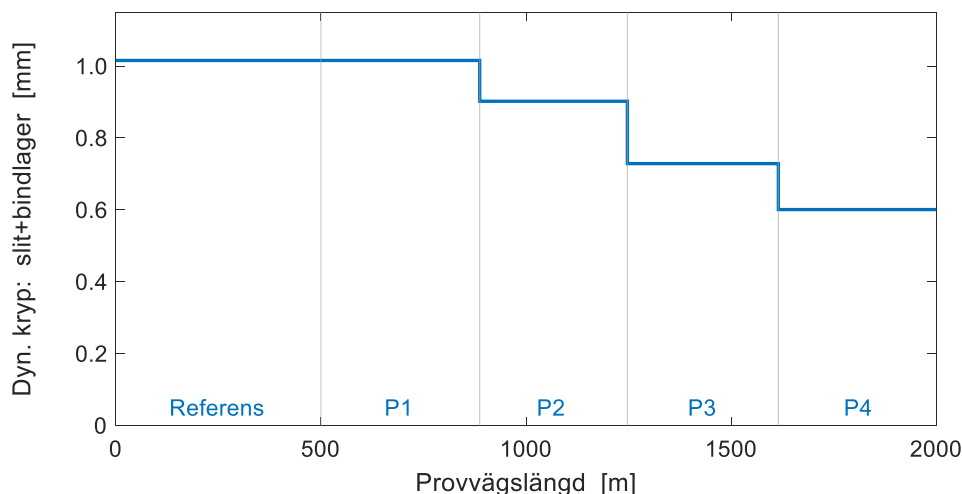
Tabell 1. Temperatur vid 2,2 kPa (10 rad/s) för återvunnet bindemedel efter 6 år [°C]

160/220	70/100	50/70	45/80-65	25/55-80
70	73	78	84	94

Sammanställning av beräknade PG-temperaturer visar stor skillnad mellan använda bindemedel. Det är klara steg mellan samtliga bindemedel. Beräkningen för 25/55-80 baseras på en mindre extrapolering då den högsta mättemperaturen var 90 °C. Notera att bestämningarna inte är direkt jämförbara med en standardiserad PG-bestämning utan använder endast samma metod på återvunnet bindemedel.

4.3. SAMMANFATTANDE ANALYS

Mätningar på funktionsnivåerna 3–5, funktionsrelaterad provning, syftar till att förklara, eller säkerställa, vägens funktion på nivå 2 d.v.s. det brukaren möter som t.ex. vägens jämnhet. Vi vill förklara den samverkande konstruktionens funktion, vilken inte omedelbart ges av enskilda analyser av delkomponenter eller delmaterial. Detta gör det också svårt att direkt jämföra provsträckorna på basis av provningen redovisad i denna rapport då varje provsträcka är uppbyggd av flera och olika lager och delmaterial. Vi konstruerar därför några förenklade konstruktionsmått, sammanvägda mätningar av delarna som skattar respektive provsträckas samverkande funktion. Som ett exempel på en sådan sammanvägd jämförelse baseras en förenklad prediktion av spårdjup per sträcka från dynamisk krypprovningen (avsnitt 4.1). För varje sträcka summeras deformationen i slit- och bindlager efter respektive lagertjocklek och töjningsresultat från dynamisk krypprovning. Resultatet visas i Figur 14. Det bör påpekas att detta är en stark förenkling av en faktisk konstruktion och nivåerna är endast relativt giltiga d.v.s. de kan endast jämföras inom figuren.



Figur 14. Summerad skattad deformation för slit- och bindlager (40 + 50 mm) från dynamisk krypprovning.

Referens och P1 har samma slit- och bindlager varför den summerade deformationen blir den samma. Man kan sedan tydligt notera att resultat från dynamisk krypprovning indikerar relativt starka förbättringar för sträckorna P2–P4.

Huvudsyftet är att undersöka huruvida material- och bärighetsprovningen kan beskriva eller förklara uppmätt spårdjupsutveckling från rapport 3. Vi undersöker därför sträckvis spårbildning som funktion av respektive sträckas sammanvägda mått som i exemplet dynamisk krypprovningen ovan. Figur 15 sammanfattar sträckvisa jämförelser på de 3 olika funktionsrelaterade nivåer undersökningen omfattar:

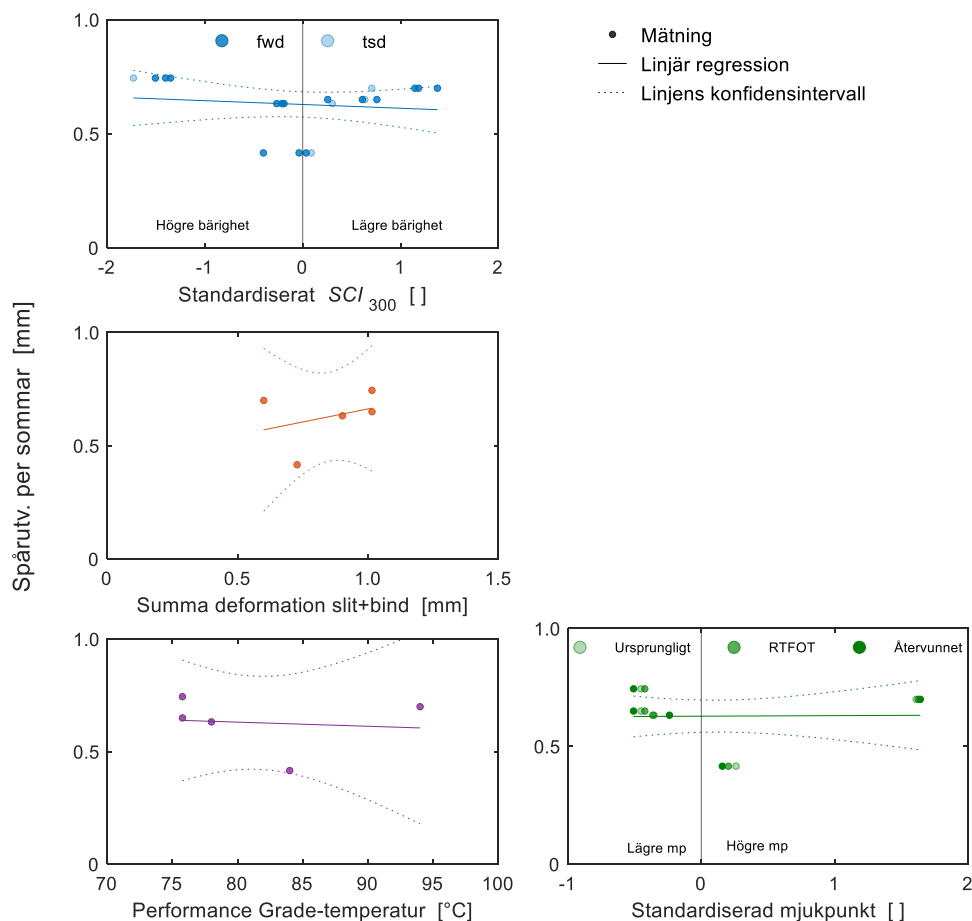
- 3 Vägdelt** bärighet
- 4 Lager** dynamisk kryp
- 5 Material** PG-temperatur och mjukpunkt.

För bärighet och mjukpunkt har vi flera mätningar vid olika tillfällen som huvudsakligen skiljer i nivå medan den inbördes ordningen är densamma. För att få mätningarna på jämförbar och gemensam skala standardiseras mätningarna enligt:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \qquad 7$$

där z är standardiserat mätvärde för resp. provning och mättillfälle, x är den enskilda mätningen, och \bar{x} och s är medelvärdet och standardavvikelse för samtliga mätningar vid respektive mättillfälle. Standardiseringen skiftar mätningar vid respektive tillfälle till medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. Standardiseringen behåller skillnaderna mellan mätningarna vid varje tillfälle men skiftar dem till en gemensam referenspunkt för de olika mättillfällena: värdet 0 motsvaras av medelvärdet för mättillfället, negativa z -värden innebär att mätvärdet är lägre än genomsnittet och positiva att det är högre. Standardisering skiftar mätvärden till en gemensam och jämförbar skala.

Bärighetsvärden mäts på hela konstruktionen medan jämförelser för dynamisk krypprovning, PG-temperatur och mjukpunkt baseras på en sammanvägning av slit- och bindlager för respektive sträcka. Figuren visar även linjär regression tillsammans med linjens konfidensintervall (95 % säkerhet).



Figur 15. Samband mellan uppmätt sommarspårbildning (mm per sommar) och funktionsrelaterad provning motsvarande olika nivåer i funktions-trappan.

Spårdjupsmätningarna redovisade i rapport 3 visade att spårdjupen överlag var låga och skillnaderna mellan provsträckorna inte var statistiskt signifikant; det fanns skillnader men de kan bero på slumpfel. Samtidigt visar mycket av den övriga provningen på skillnader mellan material och delsträckor. I flera fall mycket klara skillnader. Bärighetsmätningar, fallvikt och rullande deflektometer, är direkta mått för respektive provsträcka, utan konstruerad sammanvägning av flera mätningar, direkt under funktionsnivån spårdjup. Det finns inget som tyder på att de skillnader i bärighet som mäts ger skillnader i spårbildning mellan provsträckorna: korrelationen är låg och linjens lutning nära 0. Övriga mått är något konstruerade och indirekta vilket gör dem mer osäkra som indikatorer för de enskilda provsträckornas prestanda. Men inte heller för dessa finns det något tydligt samband: låga korrelationer och lutningar nära noll.

Analysen i detta avsnitt är något spekulativ i ett försök att sammanfatta erhållna resultat från den funktionsrelaterade provningen för att jämföra provsträckorna. Men en tolkning är att det inte finns några starka samband mellan provningen redovisad i denna rapport och uppmätt spårbildning under 6 år redovisad i systerrapporten, rapport 3.

5. DISKUSSION

Hela projektet har omfattat mätningar från funktionsrelaterad provning av ingående material, främst bitumen, över egenskaper hos beläggningen och hela konstruktionen, och slutligen till vägens funktion, vägytans jämnhet. Mycket av den funktionsrelaterade provningen redovisad i denna rapport och tidigare rapporter 1–2, indikerar stora skillnader mellan de olika bindemedlen och beläggningarna. Det gäller kanske framför allt bindemedelsprovningen som visar klara skillnader. Även provningen av respektive slit- och bindlagers motstånd mot permanenta deformationer, dynamisk krypprovning, visar tämligen tydliga skillnader mellan provsträckorna: hårdare bitumenkvaliteter och ökande grad av polymermodifiering ökar motståndet mot permanenta deformationer. Bärighetsmätningarna (SCI_{300}) vid nivån direkt under funktionsnivån, skiljer endast mellan *Referens* och övriga provsträckor vars skillnader sinsemellan kan bero på slumpfel. Det är förmodligen främst den avsevärda skillnaden i total asfalttjocklek som ger utslag i bärighetsmätningarna och egentligen inte materialskillnader. Lite tillspetsat kan man sammanfatta de funktionsrelaterade mätningarna som att desto längre från funktionsnivån 2 (spårbildning) mätningar sker desto större är uppmätta skillnader.

Resultat från rapport 3 visar att provvägen är stark och välbyggd med högst begränsad spårbildning. Huvudslutsatsen var att det inte finns någon skillnad. Det gör det förstås svårt att relatera funktionsrelaterad prestanda till skillnader som kan bero på slumpfel givet vald signifikansnivå 95 %.

Baserat på analyser av den funktionsrelaterade provningen och resultat redovisade i systerrapporten (3) kan följande slutsatser dras:

- laboratorieprovning av asfaltbeläggning och återvunnet bindemedel visar klara skillnader mellan använda material och provsträckor
- bärighetsmätning, FWD och TSD, visar högre bärighet för provsträckan med tjockare asfaltlager (*Referens* +5 cm asfalt); övriga kan inte skiljas åt
- det finns ingen korrelation mellan funktionsrelaterad provning och uppmätt spårdjupsutveckling.

Och för tydlighets skull upprepas en slutsats från rapport 3: delsträckan med normalmodifierat bindemedel (*P3*) visar lägst spårdjupsutveckling men det finns ingen statistisk signifikans för skillnader mellan provsträckorna, variationerna kan bero på slumpfel.

Och slutligen betona även i denna rapport att 6 år är måhända tillräckligt lång tid för att få indikation på spårbildning medan det är alltför kort för att notera annan skada som sprickbildning och bristande beständighet.

REFERENSER

- ASTM. 2013. *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. ASTM D6373-13. ASTM International.
- Di Benedetto, H., Olard, F, Sauzéat, C. och Delaporte, B. 2004. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design* 5 sup1: 163–202. DOI: 10.1080/14680629.2004.9689992.
- Gudmarsson, A. 2015. *Utveckling av alternativa beläggningskonstruktioner, Etapp 1a*. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, projekt 12926.
- Gudmarsson, A. 2016. *Reducerad beläggningstjocklek med alternativa bindemedel*. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, projekt 13107.
- Korteweg, A-L. 2002. Functional specifications in contracting. *Routes* (315): 22–34.
- Try. 2012. *Underhållsstandard belagd väg 2011*. Trafikverket 2012:074. (se även <https://pmsv4.trafikverket.se/about-underhallsstandard>).
- Williams, M.L., Landel, R.F. och Ferry, J.D. 1955. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society* 77: 3701–3707.