

Om mjukasfalt och inblandning av återvunnet asfaltgranulat



Jonas Ekblad
Robert Lundström

NCC Rapport 2014-01
SBUF 12015

Upplands Väsby 2014

Förord

Denna undersökning påbörjades för ganska många år sedan. Då som en fortsättning på ett tidigare SBUF-projekt *Mjuk asfalt Tillverkningstemperaturens inverkan på kvaliteten*. Tidsutdräkten har berott på oturliga haverier av kritisk laboratorieutrustning och, förstås, tiden själv som kontinuerligt förser oss med ytterligare att göra. Resultat- och innehållsmässigt har det däremot inte sviktat och det slutliga resultatet väl värt mödan.

Det är en laboratoriestudie och arbetet har huvudsakligen utförts vid NCC:s laboratorium i Upplands Väsby. Bindemedelsprovningen svarade Kristina Widenberg för (Vikström vid tiden för provningen) och beläggningsprovningen Thomas Åström; en förutsättning för klara slutsatser är noggranna och rediga mätningar.

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.

Till SBUF riktas tacksamhet för tålamod (och medel).

Robert Lundström
R&D Manager
NCC Roads

Sammanfattning

Mjukasfalt är en vanlig beläggningstyp samtidigt som återvinning av asfalt är en viktig miljö- och affärsmässig förutsättning vid asfaltproduktion. Frågeställningen i detta projekt var om det är möjligt att kompensera för det förhållandevis hårda bindemedlet i återvunnet asfaltgranulat genom att använda ett mjukbitumen med lägre viskositet än den man önskar i den slutliga beläggningen.

Provning av blandbarhet och diffusion genomfördes på rena bindemedel genom viskositetsmätningar. Beläggningsprovningen omfattade styvhetsmodul och ackumulerad deformation under pulserad belastning.

Erhållna resultat tyder på att mjukbitumen och granulatbindemedel är blandbara och detta kan beskrivas med enkla blandningsmodeller samt att mjukbitumen och asfaltgranulat blandas fullständigt genom diffusion. För beläggningen gäller att de mekaniska egenskaperna synes motsvara förväntade baserat på fullständigt blandade bindemedel, gammalt och nytt, och blandning sker direkt vid tillverkning och varmhållning.

Sammantaget indikerar denna laboratoriestudie att mjukasfalt kan produceras med tillsats av asfaltgranulat och erforderad bindemedelskvalitet kan nås genom blandning med nominellt mjukare kvaliteter.

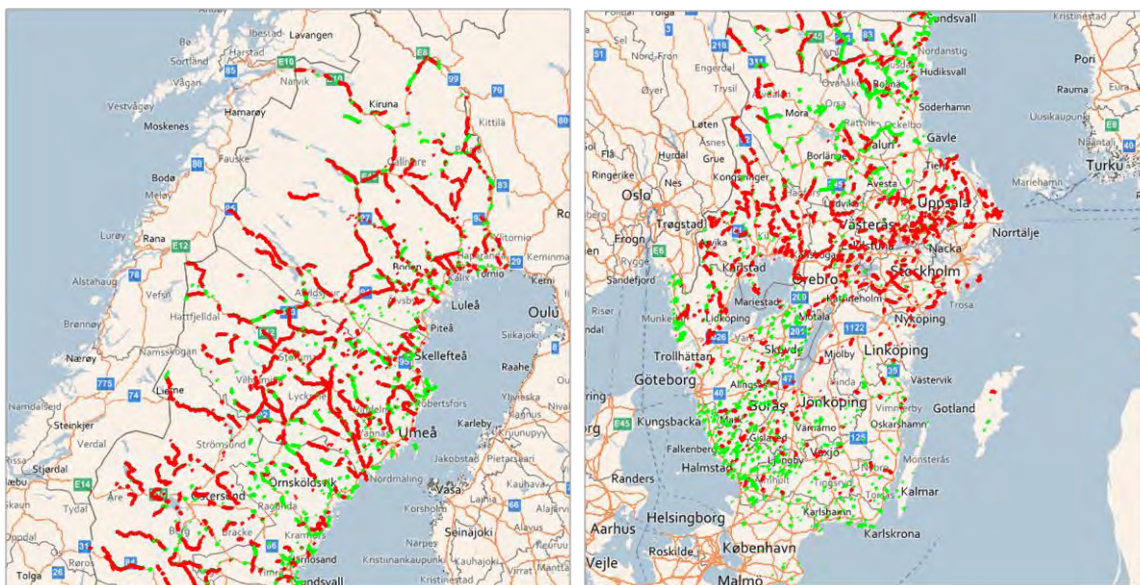
INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	5
2. TIDIGARE ERFARENHETER	6
3. MATERIAL OCH PROVNINGAR	9
3.1. BINDEMEDEL.....	9
3.1.1. <i>Viskositet</i>	9
3.1.2. <i>Diffusion</i>	12
3.2. BELÄGGNING	16
3.2.1. <i>Beläggningssmassa: MJOG 16</i>	16
3.2.2. <i>Styvhetsmodul</i>	18
3.2.3. <i>Ackumulerad deformation (dynamisk kryp)</i>	18
4. RESULTAT	18
4.1. BINDEMEDEL.....	18
4.1.1. <i>Viskositet: bindemedel och blandningar</i>	18
4.1.2. <i>Diffusion</i>	22
4.2. BELÄGGNING	24
4.2.1. <i>Styvhetsmodul</i>	24
4.2.2. <i>Ackumulerad deformation</i>	26
5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER	27
REFERENSER	33

1. INTRODUKTION

Vägar belagda med mjukbitumenbundet grus (mjog), utgör en stor och viktig del av det totala vägnätet (Figur 1). Mjukbitumenbundet grus och mjukgjort asfaltgrus (mjag) används i störst utsträckning på lågtrafikerade vägar. För dessa är det snarare påverkan av yttre faktorer som klimat och ojämn tjällyftning, som svarar för den huvudsakliga nedbrytningen. Konstruktionen och beläggningen måste dock vara tillräckligt stabil för att klara den tunga trafik som förekommer. Utifrån det alltid gällande villkoret att hushålla med energi och materiella resurser är det samtidigt viktigt att finna kvalitativ användning för återvunnen asfaltbeläggning.

Det huvudsakliga syftet med detta arbete är att undersöka huruvida återvunnen asfalt kan användas vid produktion av mjog och resultera i en beläggning som är likvärdig beläggning producerad med jungfruliga material, avseende mekaniska egenskaper som flexibilitet och bärighet.



Figur 1. Vägar med (översta) beläggningsslager av mjukbitumenbundet grus (mjog) i rött, ca 8 070 km, oljegrus i grönt ca 2 700 km (PMSV3, 2013).

Det är uppenbart att enbart tillsats av återvunnen asfalt innebär en förstyvning av beläggningen. Eftersom viskositeten hos bitumen från återvunnen beläggning är betydligt högre än hos mjukbitumen, innebär en tillsats av asfaltgranulat att bindemedlets genomsnittliga viskositet blir högre. Detta projekt avser undersöka hur mjukbitumen och bindemedel från asfaltgranulat kan blandas för att den sammantagna beläggningskvaliteten skall motsvara jungfruligt mjukbitumen av specificerad kvalitet.

Blandning av nytt respektive gammalt bindemedel styrs främst av 3 faktorer:

- spridning, d.v.s. hur väl det tillsatta bindemedlet fördelas
- mekanisk blandning
- diffusion.

De två första mekanismerna är i stort sett ögonblickliga vid blandningen. Diffusionen är däremot en tidsberoende process som initieras vid blandningen och vars hastighet beror av t.ex. ingående material, temperatur och skiktjocklekar. Detta arbete avser studera 3 frågeställningar:

- kommer gammalt och nytt bindemedel att blandas?
- hur fort går det?
- kan egenskaperna hos det blandade bindemedlet predikteras?

Dessa frågor hör ihop med black rock-antagandet d.v.s. att återvunnen asfalt främst kan betraktas som stenmaterial (därav black rock) och endast en mindre del av bindemedlet samverkar med nytillsatt bindemedel.

För att undersöka frågeställningarna omfattar undersökningen laboratoriemätningar av bindemedels- och massablandningar. Vad avser bindemedlen omfattar provningen viskositet hos jungfruliga mjukbitumen och återvunnet bindemedel från asfaltgranulat samt blandningar av dessa. Vidare avses att bestämma diffusionshastigheter för blandningen mjukbitumen och granulatbindemedel. Det är av vikt att uppmätta fenomen hos bindemedel även studeras på färdig beläggning. För att studera den färdiga massans egenskaper tillverkas laboratorieprovkroppar. Dessa provkroppars egenskaper, styvhetsmodul och resistens mot permanenta deformationer, bestäms som funktion av tid efter blandning.

2. TIDIGARE ERFARENHETER

Valda frågeställningar har studerats tidigare. Allmänt finns det rikligt med undersökningar som omfattat viskositet och diffusionshastigheter i binära blandningar. När det gäller vägbyggnadsmaterial, bitumen och beläggningssmassa, är det avsevärt knappare, framförallt gällande diffusion och diffusionshastigheter. Nedan ges en snabbt orienterande och översiktlig genomgång av tidigare undersökningar rörande bitumenblandningars viskositet och diffusion.

När det gäller att blanda vätskor med olika viskositet är det av vikt att kunna förutse den blandade viskositeten. För återvunnen asfalt omfattar det i regel antingen blandning med ett mjukare bitumen eller ett icke-bituminöst s.k. föryngringsmedel; gränsen mellan dessa kategorier är dock inte alltid självklar. En tänkt indelning i mjukgörande respektive, föryngrande tillsatser är dock möjlig. Det finns en mängd äldre undersökningar men några av de mer nyliga redovisas här. Chen m.fl. (2007) definierade en viskositetsrelation baserad på Arrhenius med en interaktionsterm (samverkansseffekt) tillagd (d.v.s. snarlikt Grunberg-Nissan, se avsnitt 1.1.1), och

noterade att, med undantag för brännolja som additiv, var förklaringsgraden hög för Arrheniusmodellen med interaktion. Lin m.fl. (2013) visar att vid blandning av åldrat bindemedel (bitumen) och syntetiska föryngringsmedel kan avvikelser från Arrheniusliknande samband (se avsnitt 1.1.1) vara avsevärd och att utfallet generellt är svårt att prediktera. I ASTM D4887 används en andelsbaserad viktning av dubbellogaritmerad viskositet, $\log(\log \eta)$. I någon mening baseras Trafikverkets blandningsmodeller för mjukpunkt och penetration på Arrheniusliknande samband då de är enkla kombinationer av viktandelar bindemedel (Trafikverket, 2011). En generalisering av litteraturen ger att vid blandning av bitumenlika bindemedel kan blandningens viskositet predikteras med enklare samband; desto mer väsensskilda komponenterna blir desto mer avviker blandningens viskositet från det enkla sambandet och kräver, vid någon nivå, en utökad modell.

Avseende blandning av bindemedel i massabeläggning är sambanden mer komplexa och samtidigt svårare att bestämma genom mätningar då dessa med nödvändighet behöver utföras på massaprover som ger en, ur bindemedelssynpunkt, utjämnande effekt. I återvinningssammanhang talar man emellanåt om s.k. black rock. Denna term avser återvunnen asfalt som i det närmaste endast kan betraktas som stenmaterial d.v.s. bindemedlet är så åldrat att det inte längre har några bindemedelslika egenskaper och det kommer heller inte att blandas med nytillsatt bindemedel. Termen skall förstås mest ses som en målerisk konceptuell beskrivning då viss blandning alltid sker; den utgör snarast kontrasten till fullständig och direkt blandning. I det följande ges några exempel på tidigare undersökningar. McDaniel m.fl. (2000) poängterar starkt att återvunnen asfalt inte uppträder som black rock, utan snarare erhålls full blandning som kan predikteras genom blandningsdiagram. I laboratorieundersökning McDaniel m.fl. redovisar, tillverkades 3 blandningar: (1) standardblandning, tillsatt återvunnen asfalt till en standardmassa; (2) bindemedel från återvunnen asfalt extraherades och blandades med nytt bindemedel innan bindemedelsblandningen sedan användes för massatillverkning (fullständig blandning); (3) slutligen en blandning med bara nytt bindemedel. Resultat från en mängd olika mekaniska provningar visar tydligt att de två första blandningarna är likvärdiga d.v.s. blandning av ny och gammal massa ger samma resultat som om bindemedlet först noggrant blandats (mekaniskt) innan massatillverkning. Detta är ett starkt indicium för att bindemedlet i återvunnen asfalt helt blandas med nytt under massatillverkning. I deras undersökning fungerar inte återvunnen asfalt som black rock. Även resultat från den tidigare refererade undersökningen av Chen m.fl. (2007) tyder på att blandningen av nytt och gammalt bindemedel är god, baserat på en försöksuppställning snarlik McDaniels m.fl. Det finns emellertid även undersökningar som pekar på en kvarstående mjukgörande effekt vid blandning av förhårdnad återvunnen asfalt och nytt bitumen, jämfört med att bara använda jungfruligt bindemedel, trots samma genomsnittliga bindemedelsviskositet (t.ex. Oliver, 2001).

Dynamiken avseende hur olika bituminösa bindemedel blandas genom diffusionsprocesser snarare än mekanisk blandning har studerats i tidigare undersökningar. Oliver (1974) sökte förbättra metoden för att förlänga hårt oxiderade slitlagers livslängd genom att behandla ytan med ett tunt bindemedel, eller olja, som därefter med tiden skall blandas med det ursprungliga bindemedlet. Vid laboratorieundersökningen studerades hur snabbt ett tunt lager med tritium-märkt (väteisotop, ^3H) lågvisköst material diffunderade in i ett cylindriskt bitumenprov. Oliver indikerade att när uppmjukande bindemedel endast tillförs ytan (d.v.s. utan mekanisk inblandning) är blandningsprocessen tidskrävande och kan troligen räknas i månader under vilken motverkande mekanismer som avdunstning och trafik verkar. En i dessa sammanhang ofta refererad undersökning publicerades av Carpenter och Wolosick (1980). Deras hypotes var att mjukgörande bindemedel först lägger sig som ett lager utanför det ursprungliga åldrade bindemedlet för att sedan diffundera in, och att detta kan studeras med stegvis extraktion av bindemedlet. Metodiken baseras på att lösningsmedel tillsätts asfaltmassan och hålls sedan av varpå bindemedlet återvinns och undersöks. Denna process upprepas sedan tills allt bindemedel är löst. Den stegvisa extraktionen utförs sedan på massor med olika lagringstid efter tillverkning. Bindemedlets penetration bestämdes och resultaten visar att efter kort lagringstid är det skillnad mellan de olika lagren: det yttersta lagret är mjukare. Skillnaden minskar sedan med ökad lagringstid. Huang m.fl. (2005) genomförde snarlik flerstegslösning av bindemedel och även de konstaterade att bindemedlet styvhet tilltar med öka antal extraktioner. Karlsson och Isacsson (2002, 2003a, 2003b) har ingående studerat diffusionsdynamiken i binära blandningar av främst förhårdnat bindemedel och någon mjukgörande tillsats. I dessa undersökningar använde de huvudsakligen infrarödspektroskopi för att kvantifiera diffusionsprocessen. Försöksuppställningen baserades på ett tvåskiktssystem, bitumen och mjukgörare (eller markör), varvid förändringen i absorptionsnivå i ett visst våglängdsområde kopplades till diffusion. Bland ett flertal slutsatser kan bl.a. följande nämnas: IR-spektroskopi förefaller kunna mäta diffusionsförloppet som i sin tur kan beskrivas med Ficks lag (se avsnitt 1.1.2) och för ett givet bitumen påverkas diffusionshastigheten endast marginellt av ökad grad av åldring (eller förhårdning).

Att studera diffusionsprocessen i samband med mjukgörning av beläggningssmassa är svårare. För att skatta hur lång tid det krävs för att en uppmjukande tillsats skall blandas med befintligt bindemedel i återvunnen asfalt vid en simulerad verksblandning, konstruerade Zaumanis och Mallick (2013) en numerisk modell över ett tänkt diffusionsförlopp. Slutsatsen var att vid 145 °C handlar det om tider under 1 minut för i stort sett fullständig blandning, men att det kan variera beroende på förnygringsmedlets sammansättning. De saknar dock empiriska data för att styrka modellens giltighet varför eventuella slutsatser bör vara försiktiga. Mallick m.fl. (2012) använde en liknande numerisk modell för att skatta temperaturer och blandning av förnygringsmedel och återvunnen asfalt vid remixing. Modellen indikerade att diffusionen är så starkt temperaturberoende att i praktiken äger ingen ytterligare diffusion rum vid temperaturer

under 100 °C. De genomförde även provningar av laboratorietillverkade prov. Föryngringsmedel blandades i åldrad beläggingsmassa och provkroppar tillverkades för att mäta styvhetstillväxten d.v.s. snarlikt beläggingsprovningen i denna undersökning. Föryngringsmedlet var en förhållandevis tunn olja, jämfört med de mjukbitumen som använts i föreliggande projekt: vid 100 °C är viskositeten för V1500 och V3000 kring 20 gånger högre jämfört med det föryngringsmedel Mallick m.fl. använde. Resultaten visar att styvheten kontinuerligt växer under de 65 dagar som undersökningen omfattade. Tillväxten var mellan 35 % och 100 % beroende på tillverkningsstemperaturen som varierade mellan 90 °C och 150 °C. Lagringstemperaturen mellan provningarna var 60 °C. Laboratieprovningarna tyder således på att diffusionsprocessen pågår även vid lägre temperaturer än de 100 °C den numeriska modellen indikerade.

3. MATERIAL OCH PROVNINGAR

Provningen kan sägas vara uppdelad i två delar:

- blandbarhet (prediktion av egenskaper)
- diffusionshastigheter

för att besvara de övergripande frågorna: kommer delarna att blandas? hur fort går det? vad får blandningen för egenskaper?

Provning för att studera detta utförs på bindemedel samt beläggingsprover.

1.1. BINDEMEDEL

För att bestämma diffusionshastigheter genomförs reologisk provning på ett tvåskiktssystem bestående av återvunnet bindemedel från asfaltgranulat samt jungfruligt viskositetsbitumen. Bindemedlens och bindemedelsblandningarnas viskositet bestäms med rotationsviskosimeter (Brookfield).

Viskositetsbitumen av 3 kvaliteter:

- V1500
- V3000
- V6000

erhölls från Nynas AB.

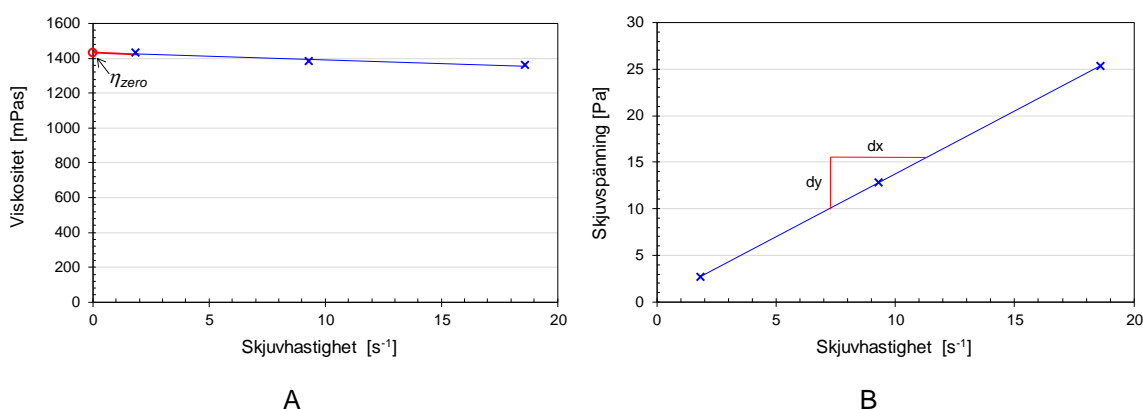
Asfaltgranulat togs från ett godtyckligt upplag och bindemedlet återvanns för vidare provning: penetration vid 25 °C, 21 dmm och mjukpunkt, 64,2 °C. Nedan beskrivs övrig provning mer detaljerat.

1.1.1. VISKOSITET

Använda bindemedel, och dess blandningar, viskositet bestämdes med rotationsviskosimeter (Brookfield). Detta utfördes vid 3 temperaturer: 60, 80 resp. 100

°C, och vid 6 olika blandningsandelar: 0, 20, 40, 60, 80 samt 100 % bindemedel från granulat blandat med resp. mjukbitumen.

Viskositeten är i regel inte konstant utan beror på såväl temperaur som skjuvhastighet. För att nå en jämförbar bas avseende viskositet kan provningen genomföras vid konstant och samma skjuvhastighet för alla prov. Alternativt kan mätningen genomföras i det s.k. Newtonska området d.v.s. viskositeten beror inte på skjuvhastigheten. Då det vid dessa provningar var mycket stor skillnad mellan de olika bindemedlen medger inte instrumentets prestanda, avseende kombinationen skjuvhastighet och vridmomentsmätning, att provningen kunde utföras vid samma skjuvhastighet. Av denna anledning genomfördes provningen vid 3 nivåer inom instrumentets mätområde avseende vridmoment: kring 5, 50, samt 75 % av maximal belastning. Sedan beräknades jämförelseviskositeten enligt 3 modeller: extrapolerad nollskjuvningsviskositet (η_{zero}) medelvärde (η_{mean}), och lutning (η_{slope}). Dessa modeller visas i Figur 2.



Figur 2. Beräkningsmodeller för viskositet (V3000, 20 % granulatbindemedel, provningstemperatur 80 °C).

Medelvärdet (η_{mean}) baseras på mätningarna vid de 3 olika skjuvhastigheterna. Nollskjuvningsviskositet (A i Figur 2) beräknas som skärningspunkten för en linjär regression av viskositeten som en funktion av skjuvhastigheten. Och slutligen B i Figur 2 som är lutningskoefficienten för en linjär regression av skjuvspänningen som funktion av skjuvhastigheten.

Anledningen till att beräkna viskositeten enligt flera modeller är som tidigare nämnts att det inte är helt rättframt att få enkel jämförbarhet mellan de olika blandningarnas viskositet.

Det primära syftet med viskositetsbestämningarna är att bestämma modeller för att prediktera olika blandningars viskositet. Den mest grundläggande binära blandningsmodellen baseras på andel av resp. vätska och dess viskositet och föreslogs av Arrhenius (1887):

$$\eta = A^x \cdot B^y$$

1

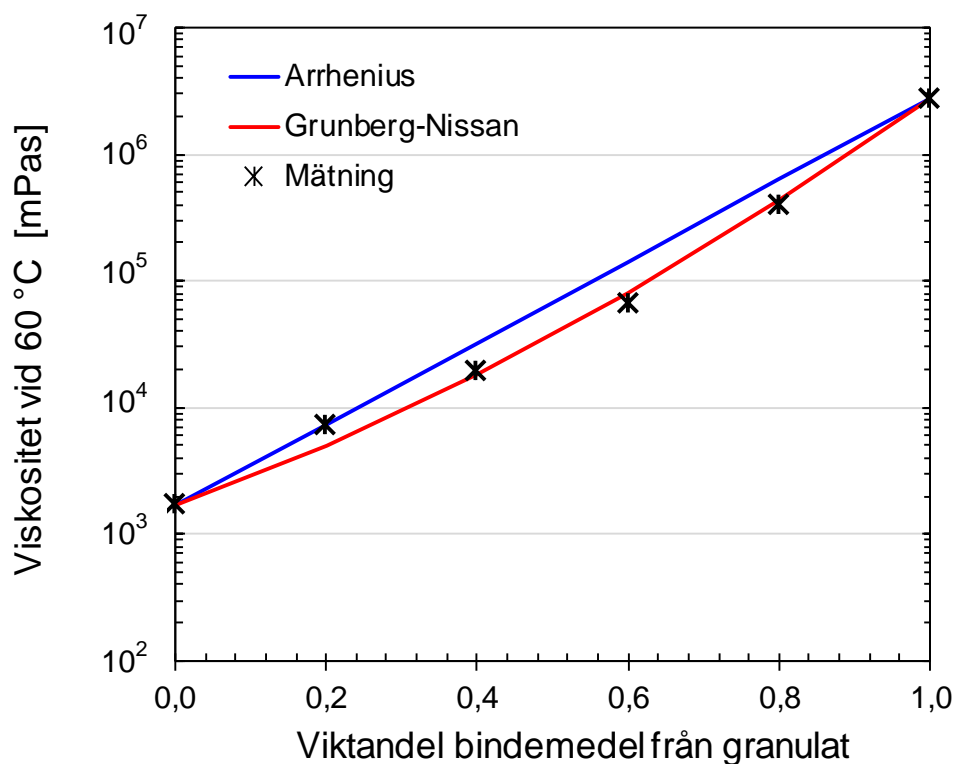
där η är vätskans viskositet, A och B är resp. delkomponents viskositet och, slutligen, x och y dess inblandningsandelar.

I många fall har det noterats att binära blandningar inte alltid följer denna linjära kombination av logaritmerad viskositet utan någon typ av interaktion mellan vätskorna kan observeras. Av denna anledning föreslog Grunberg och Nissan (1949) en utökning av Arrhenius modell:

$$\eta_s = N_1 \log \eta_1 + N_2 \log \eta_2 + N_1 N_2 d \quad 2$$

där η_s är blandningens viskositet, η_1 och η_2 är respektive delkomponents viskositet, N_1 och N_2 dess inblandningsandelar, och konstanten d som är karaktäristisk för den givna blandningen (och provningsbetingelser). Den sista termen i ekvation 2 utgör således en interaktionskompensering.

För mer komplicerade blandningar finns det ytterligare utbyggda modeller men i dessa provningar synes dessa två räcka för att beskriva erhållna resultat. Figur 3 visar typiska resultat från undersökningen passade till respektive modell.



Figur 3. Prediktionsmodeller för viskositet (VI500, 60 °C).

I detta fall följer Grunberg-Nissans modell mätningarna närmare än Arrhenius.

1.1.2. DIFFUSION

När vi blandar två olika bindemedel vill vi att de omedelbart skall blandas. Detta sker till stor del genom den mekaniska blandning tillverkningsprocessen innebär. Man kan dock tänka sig att tunna skikt kring stenpartiklar är mindre mottagliga för mekanisk blandning. Den fortsatta blandningen sker då genom bl.a. diffusion.

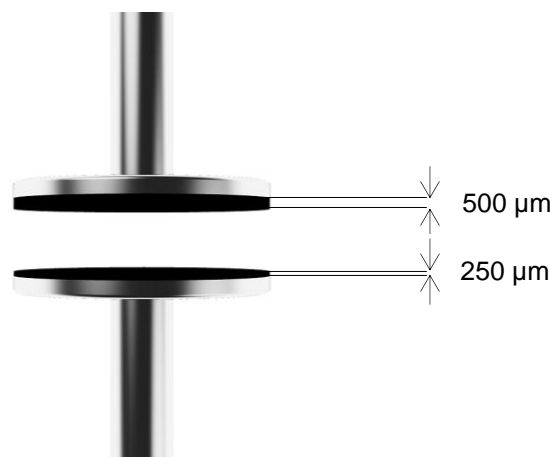
Diffusion som beror av koncentrationsskillnader (gradientdiffusion) kan beskrivas med Ficks (andra) lag (Fick, 1855):

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad 3$$

där y är koncentrationen, t är tid, k är diffusionskonstanten och x är längd. Den vänstra termen i ekvation 3 avser koncentrationsförändring (per tid) som är en funktion av koncentrationsgradienten (eller snarare derivatan av koncentrationsgradienten, den högaste termen) och diffusionskonstanten, som är en systemberoende konstant (d.v.s. beror av de två vätskorna).

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right)$$

Provnings- och analysförfarandet finns beskrivet i Karlsson m.fl. (2007) men det specifika tillvägagångssättet i denna undersökning redovisas även här. Bestämningen av diffusionshastighet baserades på mätning av komplex skjuvmodul i skjuvreometer för ett två-skiktssystem (mjukbitumen-granulatbindemedel) vid 3 olika temperaturer: 60, 80 resp. 100 °C. Provgemetri visas i Figur 4. För att öka mätningarnas upplösning utgjordes den totala tjockleken av 2/3 återvunnet granulatbindemedel och 1/3 mjukbitumen. Av praktiska skäl placerades granulatbindemedlet som det övre skiktet.



Figur 4. Provning av diffusion i skjuvreometer: parallella plattor, $\varnothing = 25$ mm.

När plattorna i Figur 4 bringas i kontakt kommer de två diskreta skikten att börja blandas genom diffusion. Den reologiska mätningen utförs sedan vid 10 rad/s och med ökande tidsintervall mellan mättillfällena. Dynamisk viskositet (η') bestäms som:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega}$$

4

där G'' är förlustmodul (viskös modul) och ω är vinkelhastigheten (frekvensen).

Vid försökets början utgörs provet av 2 distinkta skikt: ett mjukt och ett hårt. Hela provets skenbara viskositet (η_{meas}) påverkas i början främst av det mjuka skiktet och viskositeten förefaller låg. Allt eftersom skikten blandas ökar provets styvhet, främst beroende på förstyvning av det mjuka skiktet.

Det förstyvande förloppet kan beskrivas med en lösning av Ficks lag tillsammans med nödvändiga randvillkor och en modell för blandningars viskositet. Figur 5 visar några av de grundläggande förutsättningarna och definitionerna för 2 godtyckliga bindemedel (A, B).



Figur 5. Provning av diffusion i skjuvreometer: definition av geometri och koordinatsystem.

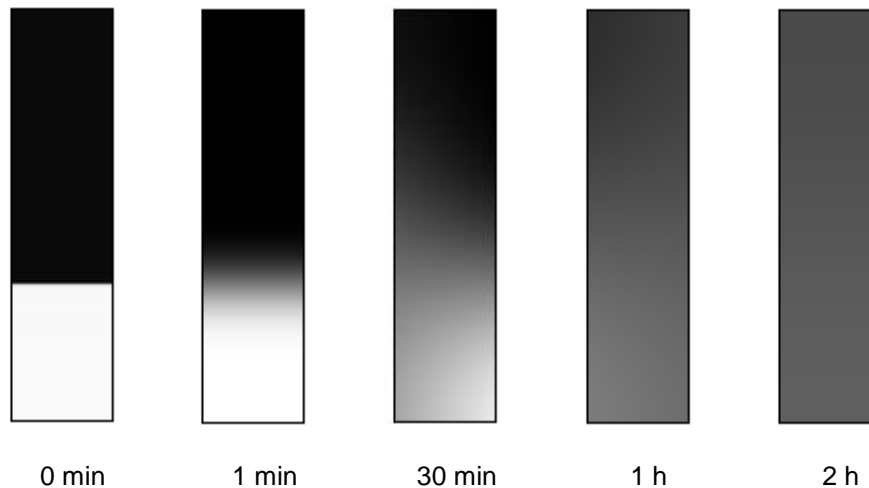
Diffusionen i termer av koncentration (c) kan bestämmas genom lösning av differentialekvationen (ekvation 3) med 3 givna randvillkor (Karlsson och Isacson, 2003b):

$$c(x, t) = (1 - \alpha)c_0 - \frac{2c_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha n \pi)}{n} \cos\left(\frac{x n \pi}{L}\right) e^{-\left(\frac{n \pi}{L}\right)^2 D t} \quad 5$$

där koncentrationen (c) av bindemedel B är en funktion av höjd (x) i Figur 5 och tid (t) och där:

- α är andel bindemedel A
- L är provets totaltjocklek
- n är antal element i Fourierserien (20)
- D är diffusionskonstanten.

Figur 6 visualiserar ett blandningsförlopp enligt ekvation 5 under ett försök vid 100 °C då förloppet är förhållandevis snabbt. Under provning vid 60 °C handlar det snarare om några dagars provtid.



Figur 6. Diffusion under reometerförsök (100 °C). Svart indikerar granulatbindemedel och vitt mjukbitumen.

Vid tiden 0 är det 2 diskreta skikt men redan efter 1 minut är blandningen tydlig. Efter 30 min är hela mjukbitumenskiktet påverkat medan det återstår en del opåverkat av granulatbindemedelsskiktet. Bindemedlen är i stort sett helt blandade efter 2 h.

Figur 6 avser dock koncentration (eller blandningen). Det som mäts under försöket är provets skenbara viskositet som inte är en linjär funktion av koncentrationen. Om vi, enligt tidigare, antar att en blandnings viskositet beskrivs av ett Arrheniussamband bestäms blandningars (η_{mix}) viskositet av:

$$\eta_{mix} = \frac{\eta_A^\alpha \eta_B}{\eta_B^\alpha} \quad 6$$

där η_A är viskositeten hos bindemedel A, η_B viskositeten för B och α är andel bindemedel A (se Figur 5).

För att numeriskt analysera provet i Figur 5 delas det vertikalt i 25 lika tjocka skikt, vilket vid den faktiska provningen motsvarar en skiktjocklek kring 30 μm beroende på den enskilda provningens uppmätta totaltjocklek. Vidare antas skjuvspänningen (τ) vara konstant i alla lager vid provningen. Skjuvtöjningen (γ) i provet (eller i ett enskilt lager) beräknas då som:

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta_{mix}} \quad 7$$

Det som mäts under provningen är den sammanlagda förskjutningen (d_{tot}) som är summan av förskjutningarna i varje enskilt lager:

$$d_{tot} = \sum_{i=1}^{25} \gamma_i L_i \quad 8$$

där γ_i är skjivtöjningen i det enskilda lagret och L_i dess tjocklek.

Den totala förskjutningen motsvaras samtidigt av produkten av den uppmätta töjningen (för hela provet) och den totala provtjockleken:

$$d_{tot} = \gamma_{tot} \cdot L \quad 9$$

där γ_{tot} är den mätta skjivtöjningen och L är provtjockleken.

Kombineras ekvation 8 och 9 erhålls då:

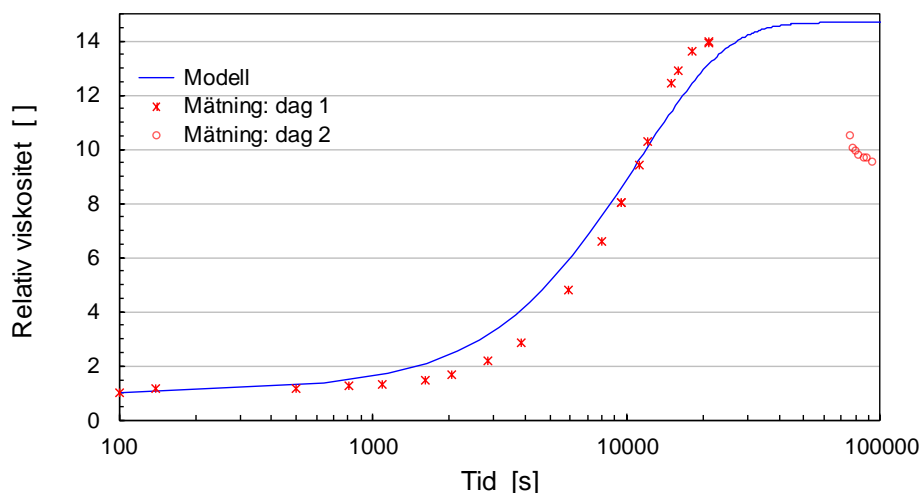
$$\gamma_{tot} \cdot L = \sum_{i=1}^{25} \gamma_i L_i \quad 10$$

Skjivtöjningarna (γ_{tot} och γ_i) i ekvation 10 ersätts då med töjningen för hela provet och för de enskilda lagren enligt ekvation 7. Det slutliga uttrycket för beräkningen av provets viskositet (η_{app}) blir då:

$$\eta_{app} = \frac{L \eta_B}{\sum_{i=1}^{25} \left(\frac{\eta_B}{\eta_A} \right)^{c(x_i, t)} \cdot L_i} \quad 11$$

För varje lager (i) och tidpunkt (t) bestäms koncentrationen, $c(x_i, t)$ enligt ekvation 5.

Provningsförfarandet medger ingen strikt kontroll av provets diameter varför den uppmätta absoluta viskositeten inte är känd. För att i beräkningen normalisera detta baseras den icke-linjära optimeringen på relativ viskositetsökning (relativt 1:a mätningen i det enskilda försöket). Passningen sker alltså av den beräknade relativa viskositetsökningen (η_{app}) jämfört med den uppmätta (η_{meas}) vilket exemplifieras i Figur 7.



Figur 7. Passning av mätdata till modellberäkning enligt ekvation 11(V3000 + granulatbindemedel vid 80 °C).

Figur 7 visar även en mätanomali som observerades i några fall. Viskositeten var väsentligt lägre då provningen fortsatte dag 2. Detta bedöms vara en instrumentartefakt som beror av dygnsliga variationer i omgivningstemperatur. Provningstemperaturen är konstant men hela instrumentets geometri förändras, om än lite, av temperaturförändringar, vilket påverkar provets tjocklek och framförallt diameter.

Ett försök per mjukbitumen (V1500, V3000) och temperatur genomfördes. Varje försök avslutades med att det färdigblandade provet justerades till känd geometri (tjocklek och höjd) varefter den absoluta viskositeten bestämdes.

1.2. BELÄGGNING

Motsvarande provning genomfördes även på laboratorietillverkade beläggningssprover: mekaniska prover för att avgöra grad av bindemedelsblandning och egenskaper som funktion av tid efter blandning för att bestämma förloppet.

Valda provningar är inte nödvändigtvis relevanta för denna typ av beläggning; de skall snarare ses som lämpliga mått för att undersöka ett mjukgörande bindemedels verkan i beläggningssmassa. För att nå en mer generell bild av inverkan av blandningseffekten undersöks beläggningssproverna vid 2 skilda reologiska omständigheter: snabb belastning vid förhållandevis låg temperatur och långsam belastning vid hög temperatur.

1.2.1. BELÄGGNINGSMASSA: MJOG 16

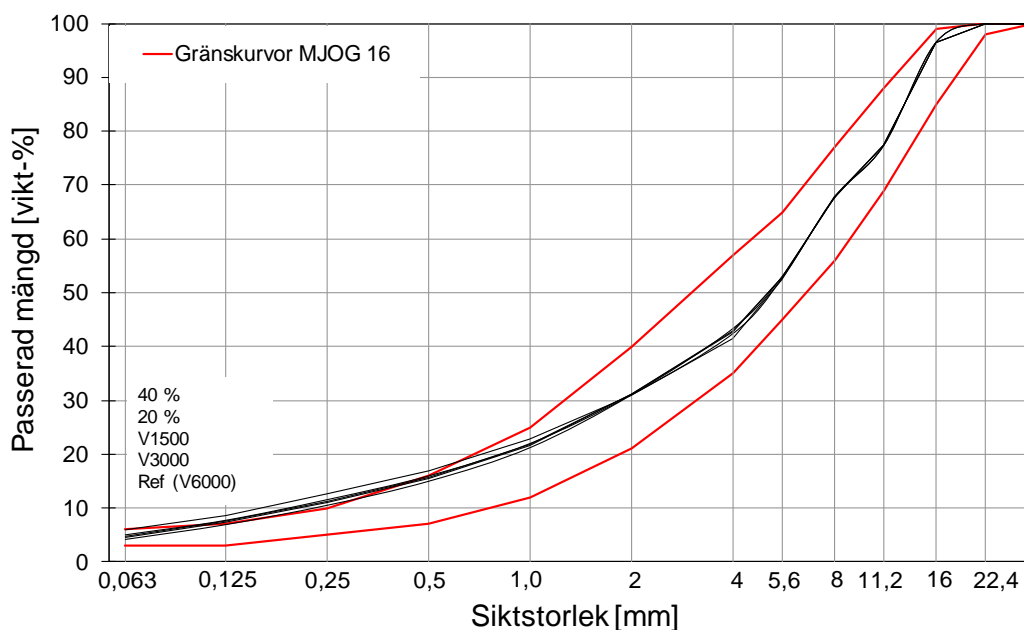
Sammanlagt omfattade provschemat 5 olika blandningar. Den grundläggande tanken var att utgå från en referensblandning med endast jungfruligt material. Denna referensmassa skall sen jämföras med massor baserade på mjukare bindemedel och återvunnet asfaltgranulat i proportioner så att den sammanlagda blandade bindemedelskvaliteten motsvarar referensblandningens. Referensblandningen utgjordes av MJOG V6000, mjukbitumenbundet grus med V6000 som bindemedel. Motsvarande blandade

bindemedel baserades på V1500 och V3000. Till detta kom också två blandningar där granulat tillsattes referensblandningen i bestämda proportioner. Utförda blandningar, andelar återvunnen asfalt och mätt eller skattad bindemedelsviskositet sammanfattas i Tabell 1. Andelar tillsatt granulat för blandningarna med V1500 och V3000 bestämdes baserat på Arrhenius blandningsmodell.

Tabell 1. Utförda blandningar: andelar och bindemedelsviskositet

Blandning	Granulat [vikt-%]		Viskositet 60 °C [Pas] mätt/skattad
	Andel av massa	Andel av bindemedel	
Referens (V6000)	0	0	7 090
V3000+granulat	10,9	13,5	7 090
V1500+granulat	15,4	18,9	7 090
V6000+20 % granulat	20,0	24,2	30 200
V6000+40 % granulat	40,0	45,9	111 000

I samtliga blandningar var den slutliga bindemedelshalten 4,0 vikt-%. Massornas nominella kornstorleksfördelning visas i Figur 8.



Figur 8. Kornstorleksfördelning för de olika blandningarna.

Skillnaden i kornstorleksfördelning mellan blandningarna är mycket liten.

Beläggningssmassan tillverkades vid 100 °C: såväl bindemedel, tillsatt stenmaterial som asfaltgranulat värmdes till denna temperatur. Massan delades ner för instampning av Marshallprovkroppar enligt sedvanlig procedur.

1.2.2. STYVHETSMODUL

Den snabba belastningen utgjordes av bestämning av styvhetsmodul i indirekt drag vid 5 °C. Provkropparnas diameter var 100 mm och tjockleken kring 60 mm. Belastningspulsens längd var 250 ms (124 ms stigtid) och kraften valdes så att den totala deformationen var kring 5 µm.

Provkropparna tillverkades på eftermiddagen dag 0. Efter avsvälning, någon timme, placerades provkropparna i klimatskåp vid 5 °C för att provas dagen efter. Den första provningen genomfördes efter knappt 24 h under vilka provkropparna förvarats vid 5 °C huvuddelen av tiden.

Provschemat var utformat så att samma uppsättning provkroppar provades efter: 1, 2, 4, 7, 16 och som kortast 38 dagar. Emellan provtillfällena förvarades provkropparna vid 20 °C. Inför provningen konditionerades proverna vid 5 °C under natten före. Varje provserie bestod av 4 provkroppar.

1.2.3. ACKUMULERAD DEFORMATION (DYNAMISK KRYP)

Beläggningens beteende under repeterad långvarig belastning undersöktes genom dynamisk krypprovning, ehuru något modifierad. Såväl provkropparnas som belastningsplattans diameter var 100 mm. Provkroppshöjden var kring 60 mm. Belastningen bestod av fyrkantspulser med 1 s pålast, motsvarande 100 kPa, och 1 s avlast. Belastningsplattans nedsjunkning som funktion av antalet belastningspulser mättes. Provningen utfördes vid 20 °C.

Provtillverkningen och förvaringen var snarlik den för styvhetsprovkroppar med undantaget att temperaturen vid såväl provning som förvaring var 20 °C. Provning genomfördes efter 1, 2, 4, 7, 17 respektive 30 dagar och omfattade 2 provkroppar per provtillfälle och provserie.

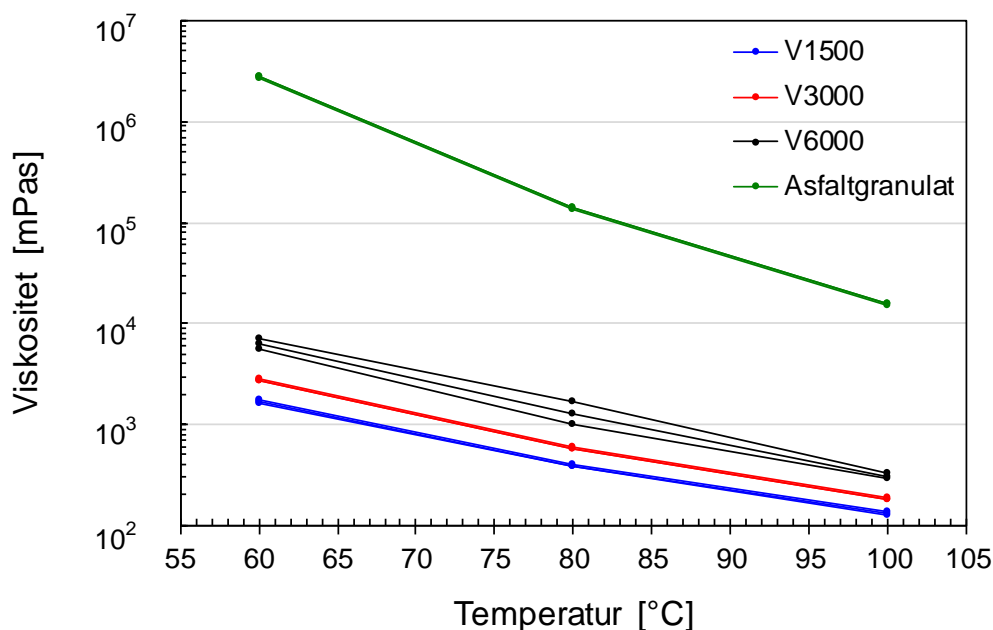
4. RESULTAT

I förekommande statistiska analyser är vald signifikansnivån (α) 5 % dvs. vi förkastar nollhypotesen om $p < 0,05$.

1.3. BINDEMEDEL

1.3.1. VISKOSITET: BINDEMEDEL OCH BLANDNINGAR

Viskositeten mättes vid 3 temperaturer med rotationsviskosimeter. För att få jämförbara resultat beräknades sedan viskositeten enligt 3 olika modeller. Figur 9 sammanfattar resultat från de i undersökningen ingående bindemedlen: mjukbitumen (V1500, V3000, V6000) och granulärbindemedel. För respektive bindemedel och temperatur visas resultat från samtliga 3 viskositetsmodeller.



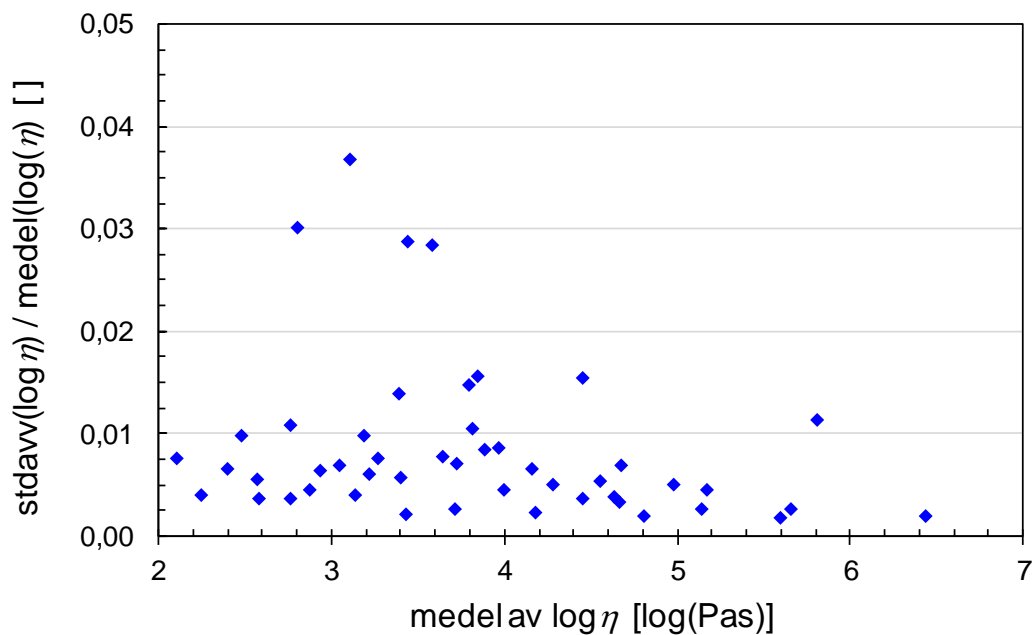
Figur 9. Viskositet för de olika bindemedlen bestämda enligt de tre olika metoderna (η_{mean} , η_{zero} , η_{slope}).

Viskositetens (η) förändring med temperatur kan i regel uttryckas med följande samband (Reynolds, 1866): logaritmen av viskositeten är en linjär funktion av temperaturen enligt:

$$\eta = a e^{bT} \quad 12$$

där T är temperatur och, a och b är konstanter. Resultat i Figur 9 visar dock snarast att sambandet är svagt kurvat men felet enligt ekvation 12 är litet i detta fall. För bredare temperaturspann eller mer komplicerade vätskor kan mer utbyggda modeller som Arrhenius eller WLF (Williams-Landel-Ferry) krävas.

Angående de 3 olika modellerna är det bara för V6000 det visuellt går att se någon skillnad mellan viskositetsbestämningarna. För att närmare undersöka skillnaderna bestämdes variationskoefficienten för de olika bestämningarna. Då blandningsmodellerna baseras på logaritmen av viskositet utfördes beräkningen av medelvärde och standardavvikelse på logaritmen av bestämda värden. Variationskoefficienten, kvoten av standardavvikelse och medelvärde (av de 3 olika bestämningarna) sammanfattas i Figur 10 som funktion av medelvärde.



Figur 10. Relativ skillnad mellan viskositet bestämd enligt 3 modeller.

Variationskoefficienten är i regel mycket låg, kring 1 %. Inget fall överstiger 4 %. De högsta noteringar härstammar från de skillnader för V6000 som syns i Figur 9.

Sammantaget tyder redovisade resultat på att beräknad viskositet varierar endast mycket lite beroende på hur den beräkningsmässigt bestäms. Detta indikerar i sin tur att respektive viskositetsbestämning är tämligen okänslig för skjuvhastighet inom de områden som använts vid provningen. De bestämda viskositeterna är således jämförbara trots det mycket stora spannet av viskositeter (knappt en faktor 20 000). I följande redovisningar används beräknad nollskjuvningsviskositet (η_0).

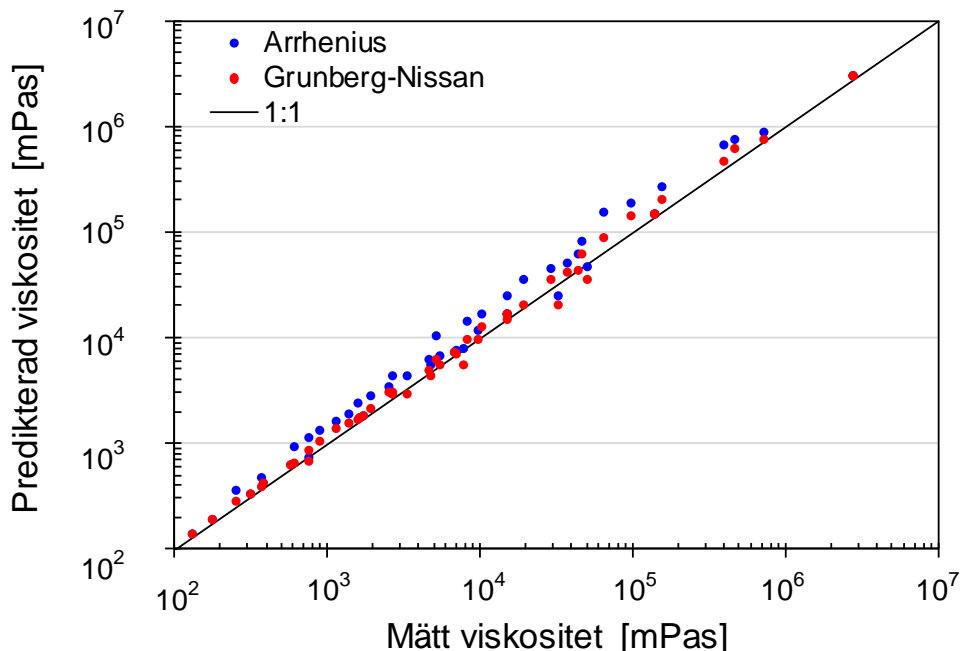
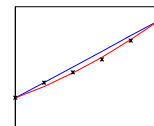
Vi kan nu börja analysera blandningsförsöken och blandningsmodellerna: Arrhenius och Grunberg-Nissan. Tabell 2 redovisar bestämd viskositet för de ingående basbindemedlen som sedan blandades i olika proportioner.

Tabell 2. Viskositet för de olika bitumentyperna och temperaturer, η_{zero} [mPas]

Bindemedel	60 °C	80 °C	100 °C
V1500	1760	396	134
V3000	2780	600	184
V6000	7090	1700	324
Återvunnet granulat	$2,830 \cdot 10^6$	142 500	15 760

Det är synbarligen mycket stor skillnad i viskositet mellan det hårda återvunna granulatbindemedlet och jungfruligt mjukbitumen.

Resultat från blandningarna passades enligt respektive modell. Figur 11 sammanfattar resultat från dessa som funktion av mätt viskositet. Om respektive modell fullständigt motsvarar mätt viskositet följer resultaten den inlagda linjen, 1:1.



Figur 11. Jämförelse mellan modellberäknade och mätta viskositetsvärden för samtliga blandningar.

I båda fallen är passningen tämligen god; visuellt förefaller det som prediktioner¹ enligt Arrhenius i regel överskattar viskositeten något.

För att statistiskt jämföra de båda modellerna utfördes en beräkning av kvadratsummavinst för den extra termen i Grunberg-Nissans modell ("extra-sum-of-squares"). Grunden i denna jämförelse är att skatta om den ökade förklaringsgrad en ytterligare term i regressionsmodellen ger är statistiskt signifikant d.v.s. ger en mer utbyggd modell bättre beskrivning av mätdata? I detta fall handlar det om att jämföra ekvation 1 och 2 och mer specifikt om termen d ger signifikant bättre beskrivning av mätresultatet. Den beräknade interaktionstermen sammanfattas i Tabell 3 för samtliga blandningar. I denna tabell indikeras även om Grunberg-Nissan ger en signifikant förbättrad beskrivning jämfört med den enklare Arrheniusmodellen.

¹ Grunberg-Nissan är ingen strikt prediktion då den innehåller en regressionsterm som baseras på mätningarna.

Tabell 3. Grunberg-Nissan, d , för de olika bitumentyperna och temperaturer
 η_{zero} [log Pas]

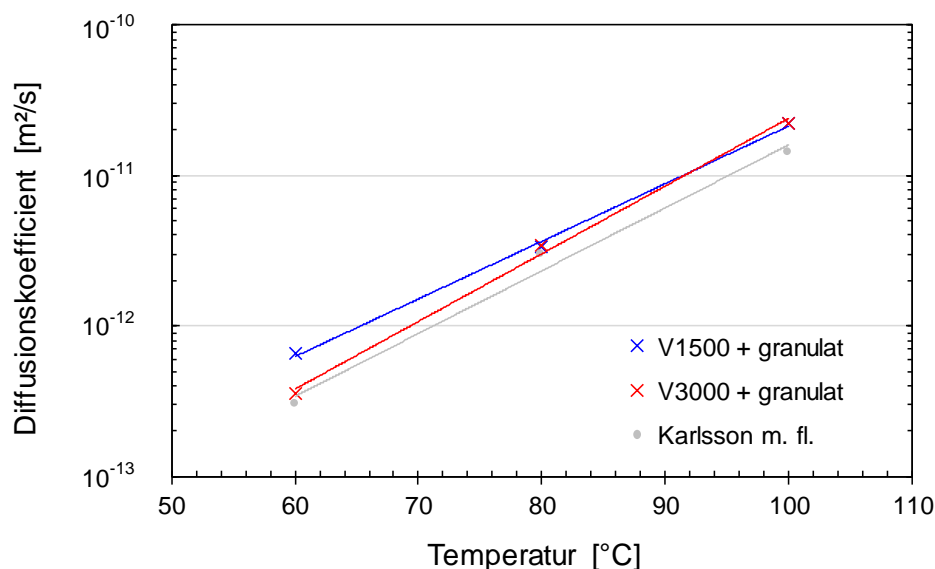
Bindemedel	60 °C	80 °C	100 °C
V1500 + granulat	-1,00	-0,72	-0,68
V3000 + granulat	-0,46	-0,46	-0,50
V6000 + granulat	-0,51	-0,94	-0,26

: $p < 0,05$

Man kan notera att för de flesta blandningar beskriver Grunberg-Nissans modell mätningarna närmare. Vidare är det också tydligt att interaktionstermen i samtliga fall är negativ.

1.3.2. DIFFUSION

Bestämningen av respektive blandnings diffusionskonstant utfördes genom provning av ett två-skiktssystem i skjuvreometer. Beräknade diffusionskonstanter ges i Figur 12.



Figur 12. Diffusionskonstanter som funktion av temperatur. Som jämförelse visas även resultat från en tidigare undersökning Karlsson m.fl. (2007).

Givet mät- och beräkningsosäkerheter är samtliga resultat samstämmiga och förefaller inte skilja starkt mellan mjukbitumensort. Diffusionskonstantens temperaturberoende går att beskriva med ett samband enligt ekvation 12, d.v.s. logaritmen av D är linjärt beroende av temperaturen. Förändringen i dessa fall motsvarar ungefär en fördubbling var 6:e °C.

Mätningen i skjuvreometer medgav ingen säker absolutbestämning av viskositeten under själva diffusionsförsöket. Däremot avslutades varje provomgång med en mätning med känd geometri. Detta främst för att, i efterhand, skatta om bindemedlen faktiskt

blandats samt om viskositeten motsvarar den som kan predikteras baserat på viskositetsmätningar med rotationsviskosimeter och blandningsmodell. Belastningen vid provning med skjuvreometer var oscillerande (sinusformad) medan rotationsviskosimeter använder kontinuerlig vridning (skjuvning). Cox-Merz regel (1958) ger dock att dessa skilda viskositetsbestämningar kan jämföras: rotationsviskositeten är lika med absolutbeloppet av den komplexa viskositeten $|\eta^*|$ om skjuvhastighet är lika med vinkelfrekvensen. Denna empiriska regel används för att jämföra diffusionsprovningarnas slutliga viskositet. Tabell 4 sammanfattar resultat från skjuvreometer och predikerad viskositet från tidigare givna blandningsmodeller. Ett mätvärde för överensstämmelse (Δ) beräknades enligt:

$$\Delta = \frac{\eta_{reo} - \bar{\eta}_{Arrhenius_G-N}}{\eta_{Arrhenius} - \eta_{G-N}} \quad 13$$

där η_{reo} är viskositet mätt med skjuvreometer, $\eta_{Arrhenius_G-N}$ är medelvärdet av prediktionen enligt respektive blandningsmodell, och $\eta_{Arrhenius}$ och η_{G-N} predikerad rotationsviskositet. Ett Δ -värde mellan -1 och 1 innebär att skillnaden mellan oscillerande provning och rotationsviskosimeter är mindre än skillnaden mellan predikerad blandad viskositet enligt de 2 blandningsmodellerna.

Tabell 4. Jämförelse mellan mätt viskositet och skattade enl. resp. blandningsmodell [Pas]

	V1500			V3000		
	60 °C	80 °C	100 °C	60 °C	80 °C	100 °C
Skjuvreometer	405	13,3	2,39	291	20,3	3,47
Arrhenius	242	20,0	3,22	281	23,0	3,58
G-N	145	13,8	2,28	223	18,2	2,77
Δ^* []	2,2	-0,6	-0,4	0,7	-0,1	0,4

* Ekv 13

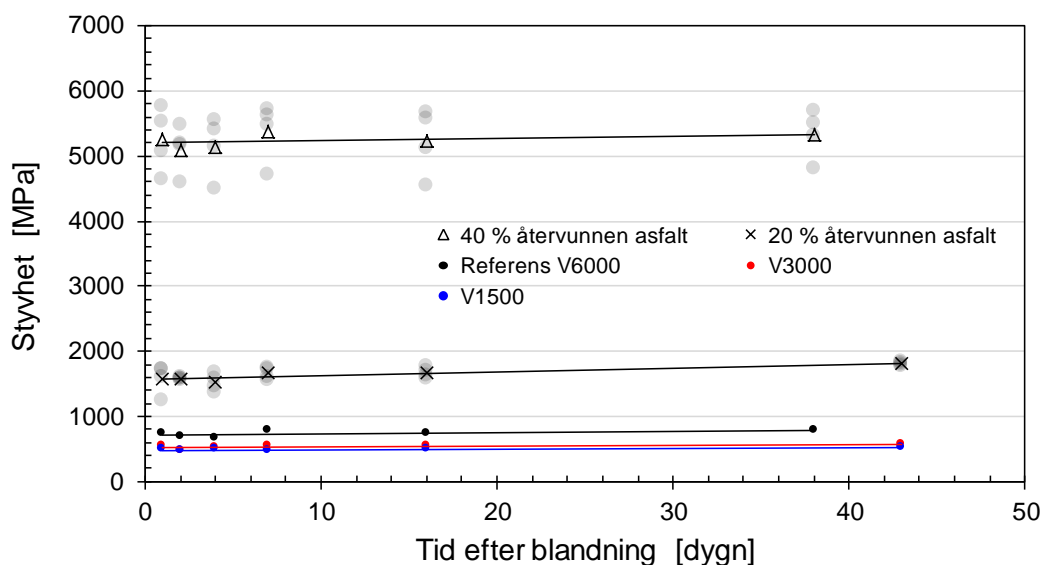
I samtliga fall, utom V1500 vid 60 °C, är skillnaden mellan oscillerande och kontinuerligt roterande provning, mindre än skillnaden mellan prediktioner av blandad viskositet från de 2 olika blandningsmodellerna. Detta betyder också att den slutliga viskositeten i diffusionsförsöken är i nivå med den från blandningsförsöken, vilket i sin tur indikerar att de två skikten blandats genom diffusion och att de även fullständigt blandats. Mätningarna är dock fåtaliga och behäftade med osäkerhet varför viss försiktighet bör användas vid tolkningen.

1.4. BELÄGGNING

Den grundläggande metodiken var att tillsätta återvunnet asfaltgranulat vid tillverkning av mjukbitumenbeläggning och därefter, på laboratorietillverkade provkroppar, mäta mekaniska egenskaper som funktion av lagringstid.

1.4.1. STYVHETSMODUL

Mätningarna av provkropparnas styvhetsmodul vid 5 °C som funktion av lagringstid (eller tid efter blandning) sammanfattas i Figur 13. Utöver varje provseries medelvärde visas enskilda provkroppar för de 2 provserier med högst styvhetsmodul. För de 3 övriga serierna var den relativa spridningen snarlik.

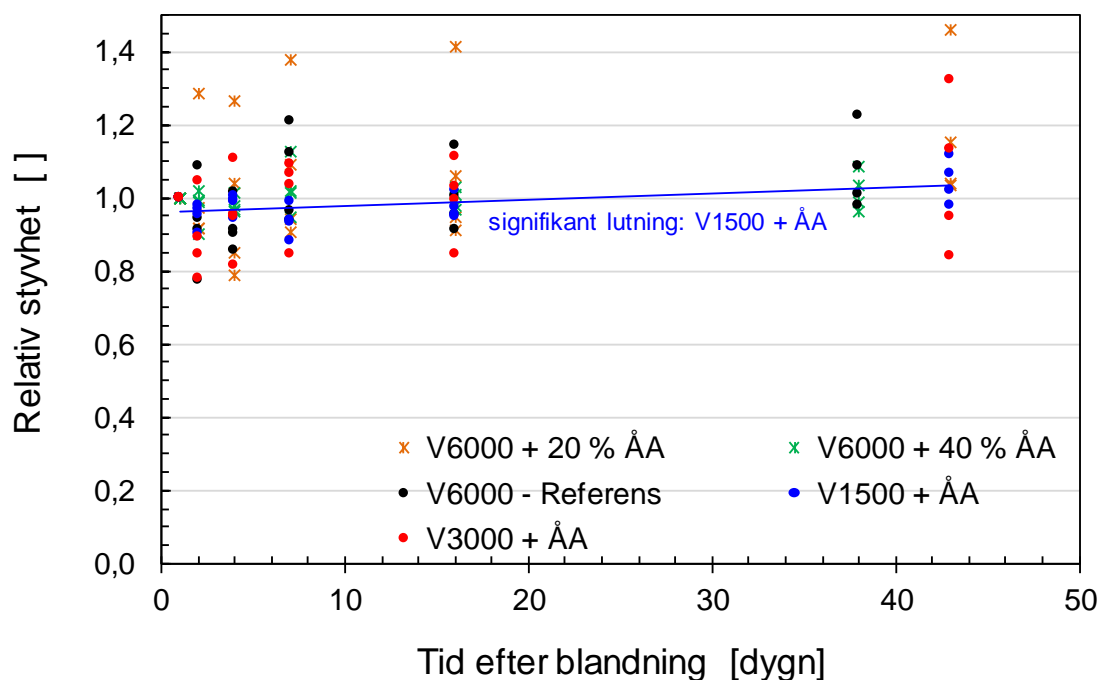


Figur 13. Styvhetsutveckling (medelvärde) för respektive massatyp. För serierna 20 % och 40 % visas även individuella provkroppar tillsammans med medelvärdet vid resp. lagringstid.

I inget fall är någon förändring över tiden tydlig. Det finns en tydlig skillnad mellan beläggning med hög andel återvunnen asfalt jämfört med de proportionerade² mjog-beläggningarna: blandningarna med V6000 och 20 % respektive 40 % asfaltgranulat är statistiskt signifikant styvare än mjog-beläggningarna (Referens, V1500 och V3000), som sinsemellan inte går att skilja d.v.s. skillnaderna kan bero på slumpfel.

Styvhetsmodulsmätningar räknas som oförstörande, vilket innebar att den relativa förändringen för varje enskild provkropp kan bestämmas som kvoten mellan mätning efter respektive lagringstid och den första mätningen (dag 1). Dessa relativa förändringar visas i Figur 14.

² Nominellt samma bindemedelsviskositet



Figur 14. Relativ styvhetsutveckling för enskilda prov som funktion av tid efter blandning.

Det något gytriga visuella intrycket av Figur 14 är signifikativt för mätningarna: ingen tydlig förändring med tiden kan skönjas samtidigt som den normala spridningen mellan provkroppar och enskilda mättillfällen är avsevärt större än eventuell förändring.

Resultat i Figur 13 och beräkningar i Figur 14 analyserade statistiskt. För varje massatyp beräknades styvhet och relativ styvhet som funktion av tid enligt 3 olika regressionsmodeller:

- linjär regression
- linjärt mot logaritmen av tid
- logaritmen linjär mot logaritmen av tid.

Förändringens (lutningens) signifikans sammanfattas i Tabell 5.

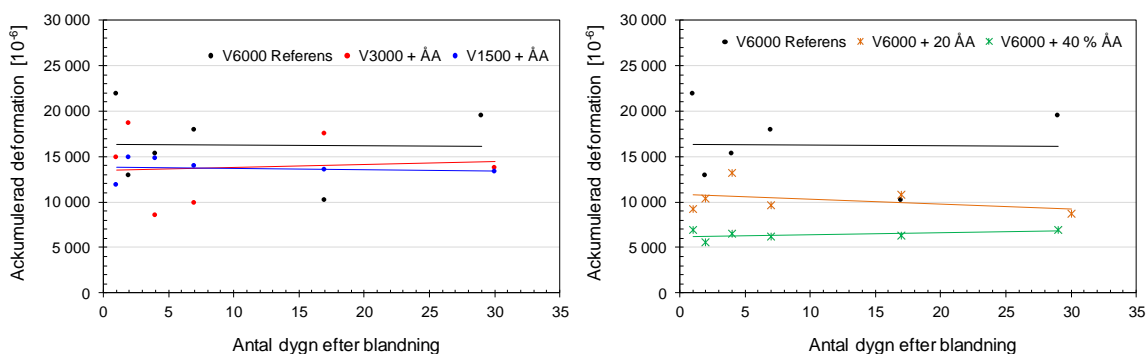
Tabell 5. Signifikans för lutning för resp. regressionsmodell (1 signifikant: 0 inte signifikant)

Data	Massa	$y = a + bx$	$y = a + b \log x$	$y = ax^b$
Absolut Figur 13	Referens	0	0	0
	V3000 + ÅÅ	0	0	0
	V1500 + ÅÅ	0	0	0
	6000 + 20 % ÅÅ	1	1	1
	6000 + 40 % ÅÅ	0	0	0
Relativ Figur 14	Referens	0	0	0
	V3000 + ÅÅ	0	0	0
	V1500 + ÅÅ	1	0	0
	6000 + 20 % ÅÅ	0	0	0
	6000 + 40 % ÅÅ	0	0	0

I de allra flesta fall går det inte belägga någon statistisk signifikant förändring (förstyvning) och i de fall signifikans föreligger är förändringshastigheten, i absoluta termer, låg. Resultaten tyder på att förändringen har skett innan den första provningen.

1.4.2. ACKUMULERAD DEFORMATION

Den mekaniska provningen omfattade även ackumulerad deformation vid repeterad belastning. Jämfört med mätningen av styvhetsmodul genomfördes denna under långsammare belastning och vid högre temperatur. Således skiljer sig beläggningsmassans reologiska status mellan provmethoderna. Provkropparnas relativa deformation efter 1000 belastningar åskådliggörs i Figur 15. Tillsammans med enskilda resultat visas även regressionslinjen för respektive blandning.



Figur 15. Ackumulerad deformation som funktion av antal dygn efter blandning. Som jämförelse visas V6000 Referens i båda figurerna.

Inte heller vid denna provning kan någon tydlig förändring beroende på lagringstid observeras. Resultaten från deformationsprovningen analyserades statistiskt på samma sätt som styvhetsmodulmätningarna. Inte i något fall är lutningen signifikant. Avseende ackumulerad deformation synes referensblandningen vara något mer deformationskänslig jämfört med massorna baserade på V1500 och V3000. Vid styvhetsmätningarna var det tvärtom. Det bör dock poängteras att i inget fall är skillnaderna statistiskt signifikanta utan kan förklaras av slumpfel.

Provningsförfarandet skiljer sig något från det som är vanligt för denna mätmetod. Variationskoefficienten var dock i medeltal 0,17, vilket är i paritet med precisionen avseende repeterbarhet, vid normalförfarande (Hakim och Viman, 2001).

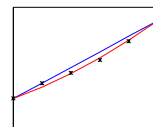
5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Den underliggande frågeställningen var: kan man, och i så fall i vilken utsträckning, använda återvunnen asfalt vid produktion av mjukbitumenbaserad beläggning. Detta konkretiserades sedan i denna undersökning till att omfatta:

- kommer gammalt och nytt bindemedel att blandas
- hur fort går det
- går det att förutse resultatet?

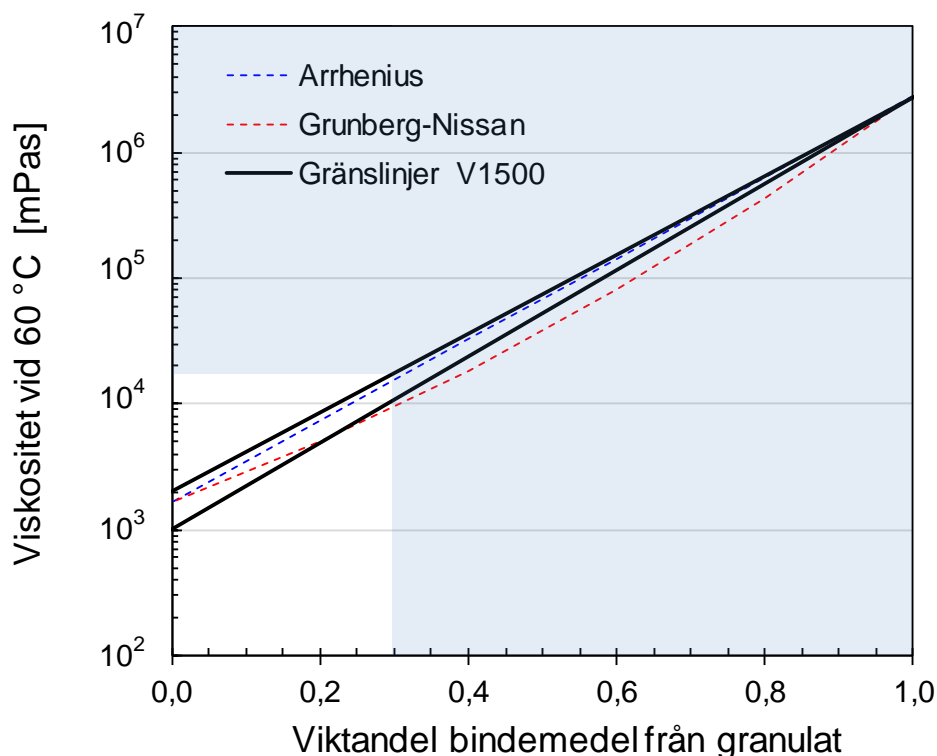
Det slutliga svaret ges av beläggningsens egenskaper men det kan av flera anledningar vara svårt att prova beläggning i fält då det saknas mätmetoder, det kan vara tekniskt svårt att mäta, störande inverkan av och det är, inte minst, tidskrävande. Av dessa anledningar genomfördes laboratorieprovning av förenklade system, i detta fall dels på rena bindemedel, dels på beläggningsprover. För att undersöka de grundläggande fenomenen blandbarhet och diffusion, är det enklast och tydligast att genomföra dessa på rena bindemedel men slutligen är det beläggningsens egenskaper som är avgörande. Bindemedelsprovningarna har därför även kompletterats med beläggningsprovning för att i görligaste mån bekräfta eller förkasta resultat från bindemedelsprovningen.

Provning av bindemedelens blandbarhet visade att mjukbitumen och återvunnet granulatbitumen kan blandas och att viskositeten går att prediktera med tämligen enkla blandningsmodeller, Arrhenius och Grunberg-Nissan. Förvisso visade analysen att det i de flesta fallen fanns interaktionseffekt d.v.s. en påverkan av just den provade kombinationen av bindemedel, vilket innebär att blandningens viskositet inte går att prediktera utan mer omfattande mätningar³. Den absoluta nivån av denna skillnad är emellertid liten, om än statistiskt signifikant. Figur 16 visar effekten av de olika blandningsmodellerna på bindemedelskombinationen med störst interaktionseffekt,



³ Eller snarare mätas och passas med regressionsanalys.

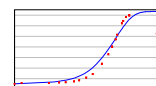
V1500 och granulatbindemedel. I figuren finns även specifikationsgränserna för V1500 inlagda (1000 resp. 2000 mPas)⁴.



Figur 16. Blandningsdiagram för V1500 och granulatbindemedel med specifikationsgränser för V1500.

Det icke färglagda området motsvarar ungefärligen andelsområdet inom vilket det är möjligt att blanda för att nå mjukbitumenkvaliteter. Inom detta område är det potentiella prediktionsfelet i paritet med normalt tillåten variation för V1500. En skattning baserad på Arrhenius skulle ge ett något mjukare bitumen än förutsett men egentligen inte mjukare än tillåten variation för V1500.

Ovanstående resultat indikerar att bindemedelen är blandbara och att viskositeten går att prediktera. Återstår då att undersöka om blandning kan ske utan mekanisk blandning. Diffusionsförsöken tyder på att så är fallet och att diffusionsförloppet går att tidsbestämma baserat på en lösning av Ficks lag. Provningsen är dock tekniskt utmanande. Det finns mätartefakter som okänd provgeometri, temperaturtransienter och instrumentförändringar. Möda har lagts vid att kompensera för detta men sammantaget innebär det att de absoluta nivåerna av bestämda diffusionskoefficienter således är behäftade med något ökad osäkerhet jämfört med övrig provning. Om man betänker bitumens komplexa sammansättning är det heller inte troligt att enskilda kemiska enheters diffusion går att sammanfatta i en gemensam konstant. Det är troligen mer av



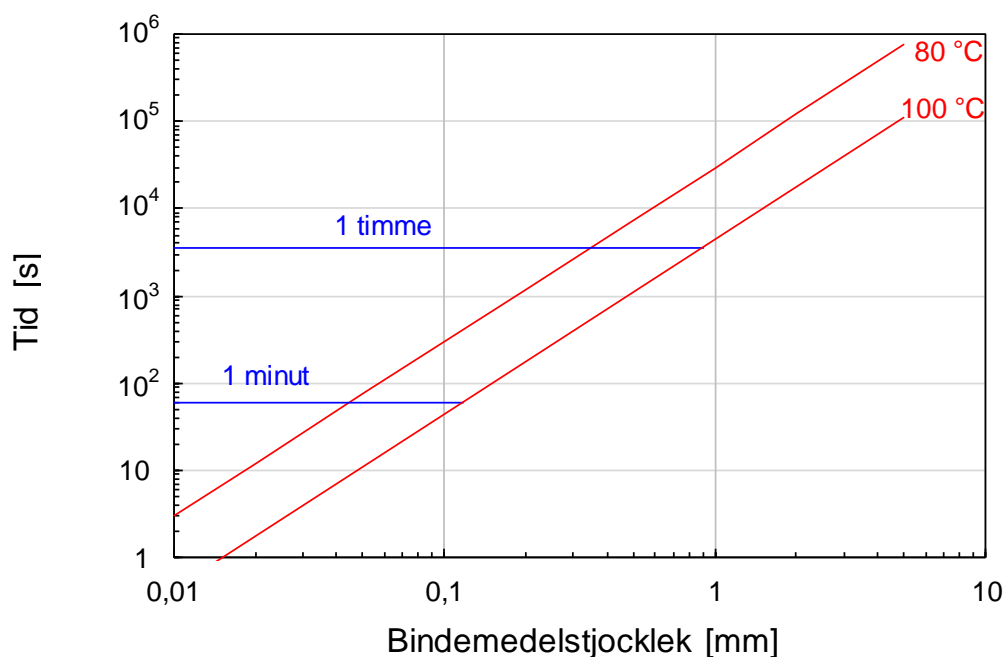
⁴ Egentligen 1000-2000 mm²/s men vi antar densiteten 1000 kg/m³.

ett kontinuerligt spektrum av konstanter. Men som praktiskt verktyg synes medelvärdet vara till fylles för att beskriva förloppet.

Efter att ha undersökt de rena bindemedlens egenskaper kan vi nu gå vidare med att undersöka motsvarande mekanismer på beläggningsprover och samma frågeställning gäller:

- får vi en förutsägbar effekt?
- hur fort går det?

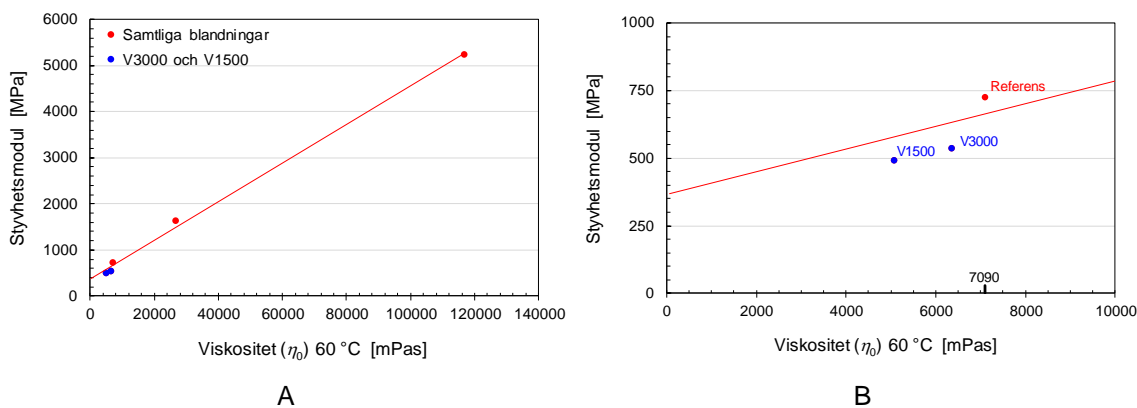
Vad gäller tidsförloppet indikerar provningen att bindemedelsblandningen sker innan den första provningen kan utföras, d.v.s. under det första dygnet. Då såväl den mekaniska blandningen som den efterföljande diffusionen är starkt temperaturberoende, är det troligt att den huvudsakliga blandningen sker under massatillverkningen och den efterföljande provtillverkningen. I denna undersökning var tillverkningsprocessens varaktighet kring 1 h. Vid normal beläggning är det säkert vanligt med tider som överstiger detta. Massablandningen i denna undersökning skedde vid 100 °C. Som jämförelse visas i Figur 17 även erforderlig tid för blandning som funktion av bindemedelstjockleken, vid 80 °C. Blandning definieras i det här fallet som 90 % av fullständig blandning.



Figur 17. Beräknad tid till 90 % av slutlig viskositet som funktion av bindemedelstjocklek (80 % nytt mjukbitumen, 20 % granulatbitumen).

Bindemedelstjockleken är okänd och säkerligen såväl diffus som fördelad. Vi känner inte heller effekten av eventuell interaktion med fillerdelen i massan. Det är därför svårt att direkt överföra dessa simuleringar (Figur 17) på undersökningens beläggningsprovning. Möjligen kan det vara så att partiell bindemedelsblandning sker vid provkroppstillverkningen vid hög temperatur, för att sedan bli så långsam att vi

egentligen inte hinner se starka effekter inom den månad provningen försiggick. Mot detta talar att om vi jämför de absoluta nivåerna vid de mekaniska provningarna med vad vi kan förvänta oss givet skattningar baserade på bindemedlets egenskaper, verkar det som att beläggningsproverna har nått förväntade nivåer. Blandningsschemat var konstruerat så att 3 av blandningarna skulle ge likvärdiga mekaniska egenskaper: V6000 som referens, V1500 och V3000 blandat med asfaltgranulat i andelar för att motsvara V6000. Den mekaniska provningen utfördes sedan vid 2 olika reologiska (tid och temperatur) tillstånd. Varken avseende styvhetsmodul eller ackumulerad deformation är skillnaden mellan grupperna statistiskt signifikant. Detta samtidigt som de observerade skillnaderna är små. Delar av noterade skillnader kan dessutom härledas till använd blandningsmodell. Vid massaproportioneringen användes Arrhenius samband som vi konstaterat, i vissa fall ger en svag överskattning av blandad viskositet. Om vi analyserar styvhetsresultaten finns det för blandningarna i denna undersökning ett starkt samband mellan styvhetsmodul och viskositet (Figur 18A).



Figur 18. Styvhetsmodul som funktion av bindemedlets viskositet.

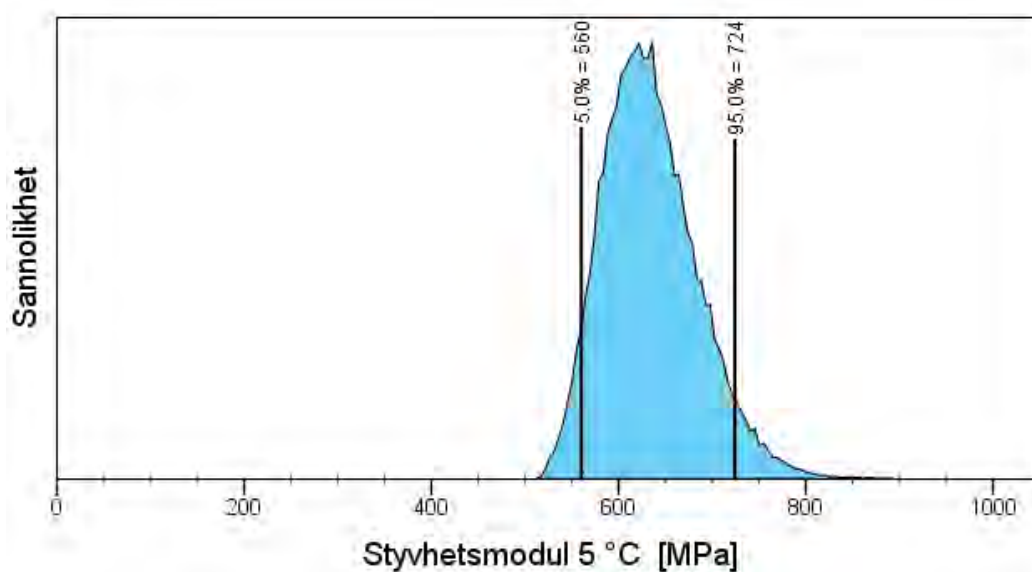
Figur 18B visar gruppen med nominellt likvärdiga egenskaper. Samtliga dessa proportionerades (Arrhenius) för att bindemedlets viskositet skulle vara 7090 mPas. I figuren avsätts dock styvhetsmodulen som funktion av den mer noggranna skattningen enligt Grunberg-Nissan. Det kan då noteras att en stor del av den lägre styvhetsmodulen förklaras av (den lilla) överskattningen av viskositeten: av den uppmätta maximala skillnaden på drygt 200 MPa förklaras kring hälften av den lägre viskositeten. I samband med detta, lätt spekulativa, resonemang är det värt att komma ihåg att ingen av de observerade skillnaderna är statistiskt signifikant utan de kan bero på slumpfel. Till detta kommer då att vi kan indikera att kausalt samband som delvis förklarar skillnaderna. Sammantaget styrker detta tolkningen att beläggningsproven faktiskt är färdigblandade vid första provningen:

- det finns ingen signifikant förändring med tid
- resultaten överensstämmer med förväntade färdigblandade nivåer.

Som redan nämnts är noterade skillnader eller avvikelser i regel små och dess praktiska betydelse begränsad. För att ytterligare illustrera detta utfördes en Monte Carlo-simulering med typiska variationer (fördelningar) hos påverkande faktorer:

- mjukbitumenviskositet
- granulatbindemedelsviskositet
- bindemedelshalter, jungfrulig massa och granulat
- bindemedelshalter
- andelar.

Grunden var Grunberg-Nissans blandningsmodell och styvhetsmodell enligt Figur 18A. Resultat från ett stort antal beräkningar sammanfattas i Figur 19.



Figur 19. Monte Carlo-simulerad styvhetsmodul (täthetsfunktion).

I denna simulering hamnar beläggningens styvhet mellan 510-720 MPa (90 % av fallen), vilket motsvarar det spann som uppmätts i denna undersökning.

Sammantaget indikerar resultaten i denna undersökning att återvunnen asfalt kan användas vid produktion av mjukbitumenbundet grus (mjog) och att den förhårdning granulatets bindemedel medför, kan kompenseras genom att som jungfruligt bindemedel använda en mjukare kvalitet än den man önskar i den färdiga beläggningen.

Baserat på resultat erhållna i denna undersökning kan följande slutsatser dras.

Avseende bindemedelsprovningen:

- Mjukbitumen och bindemedel från återvunnet granulat är blandbara.
- Blandad viskositet kan beräknas baserat på Grunberg-Nissans blandningsmodell med hög noggrannhet och med, i många fall, tillräcklig noggrannhet med Arrhenius modell.

- Mjukbitumen och asfaltgranulat blandas fullständigt genom diffusion och detta förlopp kan beskrivas med Ficks lag.

Och för beläggningsprovningen:

- De mekaniska egenskaperna synes motsvara förväntade baserat på fullständigt blandade bindemedel, gammalt och nytt.
- Bindemedlens blandning, gammalt och nytt, sker direkt vid tillverkning och varmhållning.

Sammantaget indikerar denna laboratoriestudie att mjukbitumenbaserad beläggning kan produceras med tillsats av återvunnet asfaltgranulat och erforderad bindemedelskvalitet kan nås genom blandning med nominellt mjukare kvaliteter mjukbitumen.

REFERENSER

- Arrhenius, S. 1887. Über die innere reibung verdünnter wässriger lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie, Stöchiometrie und Verwandtschaftslehre* 1: 285-287.
- ASTM D4887. 2011. Standard practice for preparation of viscosity blends for hot recycled asphalt materials. ASTM International.
- Carpenter, S. H. och Wolosick, J. R. 1980. Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material. *Transportation Research Record* 777: 15-22.
- Chen, J.S. Huang, C.C. Chu, P.Y. och Lin, K.Y. 2007. Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent. *Journal of Materials Science* 42: 9867-9876.
- Cox, W.P. och Merz, E.H. 1958. Correlation of dynamic and steady flow viscosities. *Journal of Polymer Science* 28(118): 619-622.
- Fick, A. 1855. Ueber diffusion. *Annalen der Physik* 170(1): 59-86.
- Grunberg, L. och Nissan, A.H. 1949. Mixture law for viscosity. *Nature* 164(4175): 799-800.
- Hakim, H. och Viman, L. 2001. *Ringanalys 2000*. VTI Notat 24. Väg- och transportforskningsinstitutet. Linköping.
- Huang, B. Li, G. Vukosavljevic, D. Shu, X. och Egan, B.K. 2005. Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record* 1929: 37-45.
- Karlsson, R. och Isacsson, U. 2002. Bitumen Rejuvenator Diffusion as Influenced by Ageing. *Road Materials and Pavement Design* 3(2): 167-182.
- Karlsson, R. och Isacsson, U. 2003a. Laboratory studies of diffusion in bitumen using markers. *Journal of Materials Science* 38: 2835-2844.
- Karlsson, R. och Isacsson, U. 2003b. Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15: 157-165.
- Karlsson, R. Isacsson, U. och Ekblad, J. 2007. Rheological characterisation of bitumen diffusion. *Journal of Material Science* 42:101-108.
- Lin, P-S. Chang, C-W. och Wu, T-L. 2013. The applicability of estimated equations of recycling agents on the viscosity variety of aged asphalt binders. *Advanced Materials Research* 723: 670-677.
- Mallick, R.B. Chen, B-L. Daniel, J.S. och Kandhal, P.S. 2012. Heating and its effect on hot in-place recycling of asphalt pavements with rejuvenator. *International Journal of Pavement Research and Technology* 5(6): 347-359.

- McDaniel, R.S. Soleymani, H. Anderson, R.M. Turner, P. och Peterson, R. 2000. *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method*. NCHRP Web Document 30 (Project D9-12).
- Oliver, J.W.H. 1974. Diffusion of oils in asphalts. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development* 13(1): 65-70.
- Oliver, J. 2001. The influence of the binder in RAP on recycled asphalt properties. *Road Materials and Pavement Design* 2(3): 311-325.
- PMSV3. 2013. *Trafikverket PMSV3 information om belagda vägar*.
<https://pmsv3.trafikverket.se/Pages/Start/DefaultView.aspx>, kontrollerad 13 dec 2013.
- Reynolds, O. 1886. On the theory of lubrication and its application Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 177: 158-234.
- Trafikverket. 2011. *TRVKB 10 Bitumenbundna lager*. TRV 2011:082. Trafikverket.
- Zaumanis, M. och Mallick, R.B. 2013. Finite element modeling of rejuvenator diffusion in RAP binder film- simulation of plant mixing process. In: *Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials*. Editors: Kringos, N. Birgisson, B. Frost, D. och Wang, L. 407-419.