

TILLSATSMEDEL MOT ÖVERTEMPERATUR VID ASFALTTILLVERKNING

- Laboratorieförsök -



Författare

Per Tyllgren
SVC

Projektnummer
SBUF 13199

Datum

April 2018

Finansierat av

SBUF 

 **Svenskt
VägCentrum**

På uppdrag av

SVEVIA

Förord

Rapporten bygger på insatser från olika håll. Flera tidigare SBUF-arbeten lade grunden och två examensarbeten på LTH stod för mätarbetet. SBUF stöttade projektet genom Svevia med uppbackning från Erik Andersson och Mats Jonsson. Skanskas VTC i Fosie tog fram provmaterial från asfalttillverkningen. Leverantörer av tillsatsmedel tillhandahöll provningsmaterial. Arwa Shukir, Martin Bakalov, Egzon Haxhibeqiri och Mohammed Mouhsen på LTH bidrog med fina insatser i sina examensarbeten. Ebrahim Parhamifar, elevernas kursledare, och Pajtim Sulejmani på avdelningen för Trafik och Väg vid LTH ställde välvilligt skolans resurser till förfogande. Jonas Ekblad, NCC, bidrog med värdefulla synpunkter på rapportens utformning och innehåll. Denna inledande etapp kunde slutföras tack vare ett generöst tillmötesgående från Anläggningsutskottet och Ruben Aronsson på SBUF. Till alla och en var ett varmt tack!

Malmö i april 2018

Per Tyllgren

/samordnare, handledare, författare/

Svenskt VägCentrum

Södertorpsvägen 116

215 65 Malmö

Tel: +46 706667299

e-post: per.tyllgren@vagcentrum.se

Hemsida: www.vagcentrum.se

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	i
ILLUSTRATIONER	ii
REFERAT	1
ABSTRACT	2
SAMMANFATTNING	3
SUMMARY.....	5
1. ORIENTERING, AVGRÄNSNING OCH SYFTE	7
2. GENOMFÖRANDE.....	8
3. TIDIGARE ARBETEN.....	9
4. PROBLEMBESKRIVNING	10
4.1 DEFINITION OCH ORSAKER TILL ÖVERTEMPERATUR	10
4.2 KONSEKVENSER AV ÖVERTEMPERATUR.....	10
4.2.1 Asfaltens hållbarhet.....	10
4.2.2 Asfaltverkets funktion	12
4.2.3 Emissioner	12
4.3 WMA/LTA	13
4.4 ASFALTÅTERVINNING	14
5. ALTERNATIV TILL ÖVERTEMPERATUR.....	16
5.1 ASFALTVERKET	16
5.2 TILLSATSMEDEL	16
5.2.1 Temperatursänkande tillsatsmedel	17
5.2.2 Föryngringsmedel.....	17
6. MATERIALUNDERSÖKNINGAR	19
6.1 VISKOSITET HOS BITUMEN OCH ASFALTBRUK	20
6.1.1 Inledande undersökning av asfaltbruk.....	20
6.1.2 Undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel	23
6.1.3 Undersökning av föryngringsmedel	26
6.2 VISKOELASTISKA EGENSKAPER HOS BITUMEN OCH ASFALTBRUK	
28	
6.2.1 Bitumen	30
6.2.2 Asfaltbruk.....	31
6.2.3 Blackdiagram.....	33
6.3 DUKTILITET.....	33
6.3.1 Bitumen	34
6.3.2 Asfaltbruk.....	35
6.3.3 Jämförelse mellan bitumen och asfaltbruk	35
7. DISKUSSION	37
7.1 MATERIAL	37
7.2 MÄTMETODER.....	38
8. SLUTSATSER	39
8.1 VISKOSITETSMÄTNING MED ROTATIONSVISKOSIMETER.....	39

8.1.1	Temperatursänkande tillsatsmedel	39
8.1.2	Föryngringsmedel.....	39
8.1.3	Filler och asfaltbruk.....	39
8.2	VISKOELASTISKA MÄTNINGAR MED DYNAMISK SKJUVREOMETER	
	39	
8.2.1	Temperatursänkande tillsatsmedel	39
8.2.2	Föryngringsmedel.....	40
8.2.3	Filler och asfaltbruk.....	40
9.	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	41
9.1	FÄLTFÖRSÖK	41
9.1.1	Förberedelser	41
9.1.2	Genomförande	41
9.2	EXAMENSARBETEN	41
	REFERENSER	42
	BILAGOR	1
	Bilaga 1. Blackdiagram	2

ILLUSTRATIONER

Tabell 1. Förklaring av beteckningar för provserier med temperatursänkande tillsatsmedel och föryngringsmedel.....	19
Tabell 2. Förklaring av beteckningar i resultattabellerna för RVB.....	20
Tabell 3. Tabell över resultat från inledande undersökning av asfaltbruk.....	21
Tabell 4. Tabell över resultat från bestämning av Stabiliseringsindex för filler i asfaltbruk.....	22
Tabell 5. Tabell över resultat från undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel till 70/100.....	24
Tabell 6. Tabell över resultat från undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel till asfaltbruk med 70/100.....	25
Tabell 7. Tabell över resultat från undersökning av föryngringsmedel till rent returbitumen.....	26
Tabell 8. Tabell över resultat från undersökning av föryngringsmedel till återskapat returafaltbruk.....	28
Tabell 9. Förklaring av beteckningar i resultattabellerna.....	29
Tabell 10. Parametrar och gränsvärden för bestämning av t-låg med BBR respektive DSR.....	29
Tabell 11. Sammanfattning och tolkning av resultaten från oscillerande sveptest på bitumenproverna.....	30
Tabell 12. Sammanfattning och tolkning av resultaten från oscillerande sveptest på asfaltbruk.....	31
Figur 1. Diagrammet visar förhårdningen av bitumen under tillverkningen jämfört med tiden på vägen. Schematiskt exempel från Shells asfalthandbok.....	11
Figur 2. Skillnad i viskositet mellan ett standardbitumen och bitumen i returafalt illustrerat i ett viskositetsdiagram (BTDC) enligt Heukelom.....	14

Figur 3. Inledande undersökning av asfaltbruk i ett viskositetsdiagram (BTDC) enligt Heukelom.....	21
Figur 4. Diagram för bestämning av Stabiliseringsindex för filler i asfaltbruk.	22
Figur 5. Heukelom BTDC-diagram över temperatursänkande tillsatsmedel i 70/100.	23
Figur 6. Heukelom BTDC-diagram över temperatursänkande tillsatsmedel i asfaltbruk med 70/100.	25
Figur 7. Heukelom BTDC över föryngringsmedel till rent returbitumen.	26
Figur 8. Heukelom BTDC över föryngringsmedel till återskapat retur-asfaltbruk.	27
Figur 9. Samband mellan oscillerande sveptest och BBR-parametrarna S(t) och m-värde enligt Rowe et al.	29
Figur 10. Grafisk redovisning av resultaten i Tabell 11 från oscillerande sveptest på bitumenproverna.	30
Figur 11. Grafisk redovisning av resultaten i Tabell 12 från oscillerande sveptest på asfaltbruk.	32
Figur 12. Samband mellan DSR-mätning och duktilitet.	34
Figur 13. Beräknad duktilitet i bitumen från sveptest med DSR.....	34
Figur 14. Beräknad duktilitet i asfaltbruk från sveptest med DSR.....	35
Figur 15. Jämförelse mellan duktilitet i bitumen och asfaltbruk.	35
 Bild 1. Smidig massa (t.v.) jämfört med en grymig massa som förlorat läggbarhet och hållbarhet.	11
Bild 2. Ventilationskanaler går från flera utsug med damm, fukt och rökgaser till filteranläggningen för rening och recirkulering av fillern.	12
Bild 3. Skanskas asfaltverk i Dalby med utrustning för återvinning av både kalldoserad och uppvärmd retur-asfalt.....	16

REFERAT

Rapporten beskriver första etappen av SBUF-projekt 13199 ”Metoder för att undvika övertemperering vid asfalttillverkning”. Syftet är att jämföra några olika tillsatsmedel med laboratoriemetoder och förbereda kommande försök i full skala. Laboratoriearbetena utfördes i två examensarbeten på Lunds Tekniska Högskola.

Asfalt behöver värme vid blandning och utläggning. I vissa situationer tillgrips särskilt höga temperaturer, som emellertid kan skada asfalten och förkorta livslängden.

Temperaturhöjningarna kan ersättas med tillsatser: *temperatursänkande tillsatsmedel* och *föryngringsmedel*. De förra tillåter att asfalttemperaturen kan sjunka utan att asfalten styvnar och de senare mjukar upp styv gammal asfalt inför återvinning, vilket minskar behovet av uppvärmning. I båda fallen kan asfaltverket hålla en jämn temperatur som passar både tillverkningsprocessen och asfaltmaterialet.

Rapporten tar upp bakomliggande orsaker och olika sätt att komma tillrätta med dem, bland annat med tillsatsmedel.

Olika blandningar med bitumen respektive asfaltbruk provas och utvärderas med rotationsviskosimeter och dynamisk skjuvreometer.

Rapporten avslutas med diskussion, slutsatser och förslag till fortsatta försök i full skala och nya examensarbeten.

ABSTRACT

The report describes the first leg of SBUF Project 13199 "Methods to Avoid High Temperatures in Asphalt Production". The purpose is to compare some additives using rheological laboratory methods to prepare for full-scale trials. The laboratory work was carried out in two theses at the Faculty of Engineering at Lund University.

Asphalt needs heat to accomplish proper workability. Sometimes, for special reasons, excessively high temperatures are used, which may damage the asphalt and shorten the life span.

Additives can replace the raising of temperature: *temperature reducing additives* and *rejuvenating agents*. The former allow the asphalt temperature to fall without the asphalt stiffening and the later soften rigid old asphalt for recycling, reducing the need of harmful heating. In both cases the asphalt plant can maintain a constant temperature level that fits both the production process and the handling with asphalt materials.

The report addresses the underlying causes and ways to deal with them, especially the additives. Different mixtures with bitumen and asphalt mastics are tested and evaluated with rotary viscometer and dynamic shear rheometer.

The report ends with discussions, conclusions and suggestions for further tests at full scale and proposals for new theses.

SAMMANFATTNING

Asfalt kräver rätt konsistens för att kunna blandas och läggas ut, som vanligtvis kontrolleras med hjälp av värme. Problem med trög konsistens ordnas med höjd temperatur och om så behövs över den optimala nivån, som valts med avseende på utsläpp, energianvändning, asfaltverkets funktion och asfaltens vägtekniska egenskaper och hållbarhet. Asfaltverkens värmetrummor har mycket hög kapacitet och det finns inga processtekniska hinder att uppnå temperaturer långt över vad som lämpar sig. Industriell energianvändning är också förhållandevis billig i Sverige. Konsekvenserna av övertemperatur drabbar alltså inte tillverkarna utan kunderna och miljön i form av sämre ekonomi och misshushållning med ändliga resurser.

Flera tillsatsmedel marknadsförs som ersättning för temperatur för att möjliggöra sänkningar eller för att undvika höjningar. De redovisas ofta i företagens egna utredningar. Det kan vara lämpligt med kompletterande utomstående betraktelser av vad som annars kan tyckas vara tillräckligt utrett.

Laboratoriearbetet genomfördes i två examensarbeten på LTH. Föreliggande sammanfattande rapport presenterar effekterna av olika tillsatsmedel för temperatursänkning och till föryngring av returafalt vid återvinning. Asfalt som måste förvaras länge hinner svalna och stelna och förstyvande tillsatsmedel behöver en motbalans under utläggning. Föryngring möjliggör ökad tillförsel av returafalt utan höjning av temperaturen och med bibehållen kvalitet.

Rent bitumen och asfaltbruk undersöktes med och utan tillsatsmedel. Effekterna bedömdes med obehandlade material som referens. Viskositeten mättes med rotationsviskosimeter, RVB, och de viskoelastiska egenskaperna med dynamisk skjuvreometer, DSR. Viskositetsmätningarna bygger på en metodik som utvecklats på LTH i en rad examensarbeten och som nu kan tillämpas på både bitumen och asfaltbruk. DSR-mätningarna utvärderades med utgångspunkt från kriterierna i Superpave, det amerikanska klassificeringssystemet för bitumen, som här på försök också tillämpas på asfaltbruk. Fördelen med att undersöka asfaltbruk är att det ligger ett steg närmare slutprodukten än bitumen.

Introduktionen av filler i sammanhanget, en komponent med skiftande egenskaper, förenklar visserligen inte utvärderingen men det är så verkligheten ser ut. Asfaltbruk har emellertid viskösa egenskaper som liknar bitumen och kan undersökas på motsvarande sätt. I stort bekräftar undersökningsresultaten av bitumen och asfaltbruk varandra.

Temperatursänkande tillsatsmedel visade mycket liten inverkan på bitumen, något mer på asfaltbruk men långt ifrån de 20-30 °C som nämns i prospekt och rapporter. Det måste finnas andra förklaringar än bituminets och asfaltbrukets viskositet till att asfaltmassa uppvisar bättre smidighet i utförda studier, oftast redovisad som förbättrad packningsförmåga. De viskoelastiska egenskaperna mätt med DSR påverkades inte heller särskilt mycket, bortsett från ett ämne med känd uppstyvande förmåga i färdig asfaltbeläggning.

Föryngringsmedlen tillsattes i halter som förändrade styvt returbitumen till en bitumenkvalitet liknande 70/100. Däremot blev föryngrat asfaltbruk betydligt styvare än nytillverkat asfaltbruk, trots att bitumenkvaliteterna i bruken var snarlika. Det beror på att returafalt innehåller mycket filler från fräsning och krossning av returafalten och från vägmiljön.

Ett inledande försök visade att mängden filler har stor inverkan på asfaltbrukets viskositet. Det är ingen nyhet men här framgick hur mycket det kan röra sig om. En sänkning från 40 till 33 vol% filler i asfaltbruket ändrar viskositeten lika mycket som

en höjning av temperatur med 20-30 °C, alltså samma temperaturvinst som eftersträvas och utlovas. Det ställer frågan om temperaturreducerande tillsatser i perspektiv.

De viskoelastiska effekterna av föryngringsmedlen på returbitumen under den gemensamma mjukpunkten på 47 °C, visade förbättrade egenskaper, alltså lägre temperatur för samma styvhet jämfört med nytillverkning, ända ner till under -20 °C.

Ett Blackdiagram visar sambandet mellan elasticitetsmoduler och fasvinklar. Här illustrerades att föryngringsmedlen *inte* återställer sambanden till ursprunget. Betydelse av detta behöver utforskas närmare liksom inverkan av åldring, vilket inte undersöktes i den här studien.

Efter denna inledande etapp föreslås att utvalda tillsatsmedel provas i full skala. Särskild uppmärksamhet bör riktas mot arbetsmiljöfrågor (rykighet och lukt) och bedömd och uppmätt hanterbarhet med temperatursänkande tillsatsmedel vid 20-30 °C under temperaturer för normal tillverkning.

SUMMARY

Asphalt requires accurate consistency to be properly mixed and laid out, which is usually controlled with the temperature. To improve workability it is easy to increase the temperature and if necessary above the optimal level of the mixing process. This level is chosen from several points of view: emissions, energy use, the asphalt plant operations, workability, asphalt pavement properties and durability. The capacity of a heating drum is very high and there are no processing obstacles to reach temperatures far beyond what is acceptable. Industrial energy costs are also relatively low in Sweden. Consequently, the effects of excessive temperatures will not significantly affect the manufacturers but the customers and the environment, resulting in poorer economy and misuse of finite resources.

Several additives are marketed as a replacement for temperature to allow reductions or to avoid adverse increases. They are often investigated in the company's own studies. It would be suitable to complete them with an outside study, although the substances may seem sufficiently investigated.

The laboratory work was conducted in two theses at LTH, the Faculty of Engineering at Lund University. This brief report presents the effects of various additives for temperature reduction and rejuvenation of reclaimed asphalt. Asphalt mixes that need to be stored for a long time cool and may harden and stiffening additives need a counterbalance during paving. Rejuvenation allows increased addition of reclaimed asphalt, maintaining quality and workability without increasing the temperature.

Pure bitumen and asphalt mastics were tested with and without additives. The effects were assessed with untreated materials as references. Viscosity was measured with a rotational viscometer, RVB, and viscoelastic properties with a dynamic shear rheometer, DSR. The viscosity measurements are based on a methodology developed at LTH in a number of theses, which now can be applied on both bitumen and asphalt mastics. The DSR measurements were evaluated with reference to the criteria of Superpave, the American bitumen classification system, which are applied tentatively on asphalt mastics. The advantage of investigating asphalt mastics is that the mixture is one step closer to the final product than merely bitumen.

The introduction of filler in this context, a component with varying properties, does not simplify the evaluation, but this is how it is in reality. However, the viscous properties of asphalt mastics are similar to that of bitumen and may be tested in a similar way. In general, the tests results of bitumen and asphalt mastics confirm each other.

Temperature reducing additives had very little effect on bitumen, slightly more on asphalt mastics, but far from those 20-30 °C mentioned in brochures and reports. There must be other reasons besides the viscosity of bitumen and asphalt mastics why asphalt mixes exhibit better workability in conducted studies, usually reported as improved compaction ability. The viscoelastic properties measured with DSR were not very affected, except for one substance having previously known stiffening effect at high pavement temperatures.

Rejuvenation agents were added at levels which change hard old bitumen to a bitumen quality similar to 70/100. *Rejuvenated mastics*, however, were significantly stiffer than newly manufactured mastics, although the bitumen viscosities were equivalent. This is due to the fact that reclaimed asphalt in general contains excessive amounts of filler from milling and crushing and from the road environment.

An initial experiment displayed that the amount of filler significantly affect the viscosity of asphalt mastics. This is nothing new but the experiment showed the order of magnitude. A reduction of filler content from 40 and 33 vol% in the asphalt mastics changes the viscosity as much as a raise of the temperature by 20-30 °C, which cor-

responds to the discussed temperature gain. It puts the question about temperature reducing additives into perspective.

The viscoelastic effects of rejuvenating agents on reclaimed bitumen below the joint softening point at 47 ° C showed improved properties, i.e. lower temperatures for the same stiffness compared to new products, down to below -20 ° C.

A Black diagram demonstrates graphically the relationship between viscoelastic modulus and phase angle. It changes after ageing but it was also shown that rejuvenation does *not* restore the relationship to its origin. The practical consequences need to be further explored as well as the impact of artificial ageing, which was not investigated in this study.

After this first leg of the project, it is proposed that selected additives are tested in full scale. Particular attention shall be paid to occupational health and safety issues (smokiness and odour). A key study should be the employees' impressions of workability with temperature reducing additives at mixing temperatures 20-30 ° C below normal.

1. ORIENTERING, AVGRÄNSNING OCH SYFTE

Bitumen är en värmekänslig produkt eftersom den tillverkas genom destillation. Ytterligare värme under tillverkningen av asfalt, vid mötet med upphettat stenmaterial under kraftig omblandning, förskjuter bitumens egenskaper ytterligare åt det styvare hållet. Avgången av de lättare destillaten fortsätter lite till. Det har varit känt sedan asfaltteknikens begynnelse och kan inte undvikas. Genom empirisk utveckling lärde man sig emellertid att sig ta höjd för detta och väljer lite mjukare bitumen för att de önskade egenskaperna ska finnas efter utläggning och avsvälning. Därefter förändras bitumen ytterligare åt det styvare hållet men nu mycket långsamt över många år (Figur 1). En av anledningarna till att asfaltbeläggningar måste underhållas och till slut ersättas beror på denna förändringsprocess. Även här har den ursprungliga bitumenkvaliteten valts med höjd för att asfalten ska hålla avsedd tid och gärna så länge som möjligt. Därför har det varit viktigt att tillverkaren av asfalt visar försiktighet vid uppvärmningen och kör processerna på samma sätt från gång till annan. Den här försiktigheten tycks ha trubbats av under senare år (Tyllgren, 2013).

Asfaltens konsistens är avgörande för en god fördelning av asfaltbruk på stenmaterialet och för att asfaltmassan ska kunna bredas ut jämnt och komprimeras till en stabil och beständig beläggning (Hesami, 2014). Yrkesarbetarna är observanta på detta och meddelar asfaltverket så snart massorna visar sig svårlagda. Reaktionen blir i de flesta fall att temperaturen höjs tills utläggarna blir nöjda. Problemet är att höjningen kan åsamka en oönskad förhårdning av bituminet, som kan leda till förtida materialsläpp och sprickor (Bild 1).

Asfaltverket har vanligtvis ett temperaturområde där olika processteg fungerar bäst. Det viktigaste är hanteringen av filler och fukt genom rök-gaskanalerna till filtret för avskiljning och återföring av fillern till blandaren. För hög eller för låg temperatur leder till försämrad rening eller fuktutfällningar i kanalerna och i värsta fall till att filtren förstörs.

Bevarad bitumenkvalitet, rätt konsistens och ett väl fungerande asfaltverkets är behov som ska tillfredsställas vid en och samma temperatur, den optimala (Tyllgren, 2013). Om något av behoven skulle kräva avsteg från den optimala temperaturen måste man först söka efter andra sätt att tillmötesgå önskemålen. I annat fall uppstår ett läge där ett tillverkningsproblem löses på bekostnad av asfaltkvaliteten.

Alla alternativ till temperaturförändringar bör inventeras för att säkerställa att optimal temperatur används i normalfallet. Bland marknadsförda alternativ finns tillsatsmedel som ska göra det möjligt att sänka temperaturen med bibehållen asfaltkvalitet (Johansson/Lindahl 2010; Oscarsson, 2014). Ett sätt att minska behovet av övertemperatur vid återvinning är att föryngra retur-asfalten (Tyllgren, 2010; Gudmarsson, 2015). Härutöver finns en rad processtekniska möjligheter men den här utredningen avgränsas till att gälla tillsatsmedel.

Denna inledande etapp avser att karaktärisera bitumenblandningar med tillsatsmedel ur reologisk synvinkel och jämföra effekterna sinsemellan och med referensmaterial utan inblandning. Resultaten ska utgöra avstamp för nästa etapp i form av fullskalig provning av utvalda ämnen.

2. GENOMFÖRANDE

Den experimentella delen av arbetet utfördes som två examensarbeten vid Lunds Tekniska Högskola, ett av högskoleingenjörer från Helsingborg och ett av studenter vid civilingenjörsutbildningen i Lund.

Mätningarna utfördes på avdelning Trafik och Väg inom institutionen Teknik och Samhälle i avdelningens asfaltlaboratorium för reologiska studier.

Bitumen tillhandahölls av Nynas och filler för tillverkning av asfaltbruk kom från Skanskas asfaltverk i Dalby. Fillermaterialen undersöktes och preparerades på Skanskas laboratorium VTC i Fosie, som också extraherade bitumen och filler från retur-asfalt.

Viskositeten mättes på bitumen och på asfaltbruk (bitumen blandat med filler mindre än 0,063 mm) med en rotationsviskosimeter (RVB) av fabrikat Brookfield DV-II + Pro Extra, enligt ett förfarande som utvecklats på LTH i en rad examensarbeten. Det motsvarar konventionella metoder som Kula & Ring och mätning med glaskapillärer.

Viskoelastiska egenskaper mättes med dynamisk skjuvreometer (DSR) av fabrikat Anton Paar, MCR 302. Jämförelseparametrar hämtades från det amerikanska klassificeringssystemet Superpave (Superpave, 2003) och från DSR-mätningarna beräknade samband med andra metoder, som Bending Beam Rheometer, BBR, (Rowe et al, 2014) och duktilitet (Glover et al, 2005).

Arbetena genomfördes under våren och hösten 2017 (Shukir/Bakalov, 2017; Mouhsen/Haxhibeqiri, 2017). Denna redovisning utelämnar beskrivningarna av mätprocesserna och rådatan av utrymmesskal. Den som vill fördjupa sig i detaljerna kring genomförandet hänvisas till examensrapporterna.

3. TIDIGARE ARBETEN

Flera projekt har berört tillverkningstemperaturens betydelse för varmasfalt och arbetsmiljön. Bland exemplen, många finansierade av SBUF, finns:

- Lågtempererad varmasfalt (LTA), Peab/Vägverket/SBUF (Johansson C., Lindal T., 2010)
- Bättre arbetsmiljö för asfaltarbete på väg, Skanska/SBUF (Tyllgren P., 2007)
- Föryngring av returasfalt med miljöanpassade tillsatsmedel, Skanska/SBUF (Tyllgren P., 2010)
- Optimal temperatur vid varmblandad asfalttillverkning, OTA, Skanska/SBUF (Tyllgren P., 2013)
- Tillsatser för temperatursänkning av asfalt med högpresterande bitumen, Skanska/SBUF (Oscarsson E., 2014)
- Utveckling av SBS-emulsioner med rejuvenatorer, Peab/SBUF (Gudmarsson A., 2015)

Föryngringsmedlens mekanismer och inverkan på bitumens struktur och reologi belystes i ett doktorandarbete på KTH:

- Undersökning av bindemedelsföryngring med relevans vid asfaltåtervinning (Karlsson R., 2002)

Mätmetoderna har sin bakgrund i ett doktorandarbete på KTH, i två examensarbeten på LTH och i en rapport till Europhalt & Eurobitume 2016 i Prag:

- Characterisation and Modelling of Asphalt Mastics and Their Effect on Workability (Hesami E. 2014)
- Rotationsviskosimeter, RVB (Nilsgart E., Grybb, T. 2014)
- Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk (Håkansson A., Härstedt M. 2015)
- Assessment of asphalt binder viscosities with a new approach (Parhamifar E., Tyllgren P. 2016)

Mätresultaten i denna rapport togs fram i två examensarbeten på LTH under 2017:

- Förbättring av asfaltens konsistens med tillsatsmedel (Shukir A., Bakalov M. 2017)
- Påverkan av asfaltens egenskaper efter förbättrad konsistens (Mouhsen M., Haxhibeqiri E. 2017)

Detta arbete har hämtat kunskap och inspiration från alla rapporterna medan mätresultaten i huvudsak kommer från de två examensarbetena på LTH.

4. PROBLEMBESKRIVNING

4.1 DEFINITION OCH ORSAKER TILL ÖVERTEMPERATUR

Övertemperatur kallas den som överstiger den optimala för varmmassatillverkning. Optimal temperatur ligger i Sverige vanligtvis mellan 150-165 °C men kan variera i vårt avlånga land (Tyllgren, 2013).

Vanliga skäl till övertemperatur är:

1. Kall och fuktig väderlek
2. Lång förvaringstid i fickor eller på lastfordon
3. Inblandning av material med lägre temperatur
4. Kvalitetshöjande men samtidigt förstövande tillsatsmedel
5. Hårda bitumensorter.

1. infaller i början och särskilt i slutet av säsongen. 2. sker vid handläggning eller långa transporter. 3. handlar vanligtvis om kalldoserad eller uppvärmd returafalt med temperaturer som understiger optimal blandningstemperatur. 4. är ofta polymermodifierat bitumen. 5. kräver helt naturligt extra uppvärmning.

4.2 KONSEKVENSER AV ÖVERTEMPERATUR

Nackdelen med fortvarig användning av övertemperatur är i första hand inte merkostnaden för uppvärmningen. Den är förhållandevis liten i sammanhanget. Ökningen av koldioxidutsläpp är också marginell men är ändå en nackdel som inte ska avfärdas. Den stora skadan är förstövningen av bituminet, som kan orsaka förkortad livslängd hos asfaltbeläggningen. Det ökar kostnaderna för beläggningsunderhållet och ökar sammantaget utsläppen av koldioxid som en effekt av att underhåll måste ske med tätare intervall.

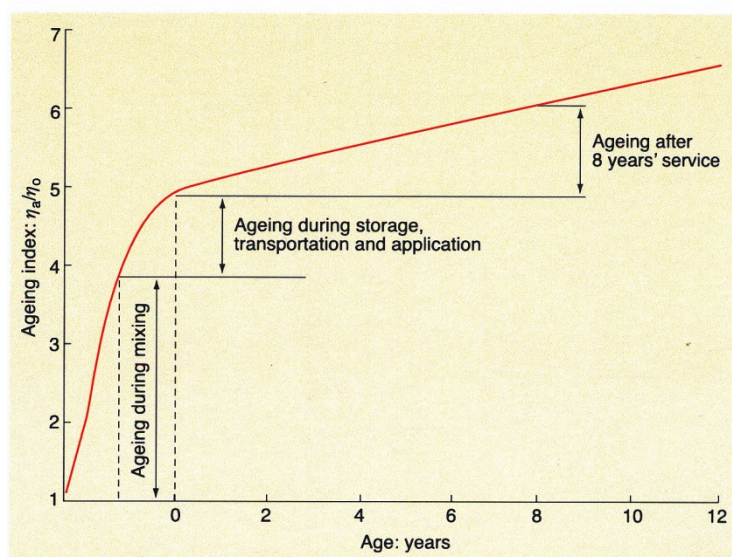
Temperaturer utanför det optimala intervallet har negativa konsekvenser på olika områden:

1. Asfaltens hållbarhet
2. Asfaltverkets funktion
3. Emissioner.

Det finns utredningar som belyser detta men det är svårt att sätta siffror på effekterna. De flesta håller ändå med om att det finns miljömässiga, ekonomiska och tekniska konsekvenser av sådan betydelse att det motiverar åtgärder. Nedanstående är en sammanställning av tidigare rapporter (Tyllgren, 2007; Tyllgren, 2013).

4.2.1 Asfaltens hållbarhet

Normal asfalt



Figur 1. Diagrammet visar förhårdningen av bitumen under tillverkningen jämfört med tiden på vägen. Schematiskt exempel från Shells asfalthandbok.

Oförsiktig användning av värme gör bituminet hårdare än vad som tas höjd för i recepten. Det kan förkorta hållbarheten, som tar pengar ur vägenslagen på sätt som är svåra att upptäcka. Figur 1 visar ett schematiskt exempel på hur förhårdningen kan ske. Oförsiktig uppvärmning i tillverkningsfasen kan motsvara många års åldrande på vägen (Shell, 2003).

Modifierad asfalt

Syftet med modifiering av asfalt är att göra beläggningen mer motståndskraftig mot trafikens påkänningar. Polymerer, gummi eller fibrer gör beläggningen seg och stark men också massan trögarbetad, vilket klaras med hög tillverkningstemperatur. Tillsatsmedlen skyddar emellertid inte bituminet mot värme. Oxidationen (förhårdningen) fördubblas för var 10:e °C som temperaturen ökar över 100 °C (Shell, 2003), motsvarande en ökning av mjukpunkten med 1,25 °C (Tyllgren, 2013). Skadan maskeras av att förväntat resultat av modifieringen är just ökad styvhet.

Behovet av höga temperaturer med modifierade asfaltsorter kan ha normaliserat användningen av övertemperatur i andra sammanhang. Kanske är detta orsaken till att respekten för skadeverkningarna har minskat.

Handläggningsmassor



Bild 1. Smidig massa (t.v.) jämfört med en grymig massa som förlorat läggbarhet och hållbarhet.

Vid handläggning märks skiftningar åt det styva hållet på flera sätt. Massan blir inte bara tung att bearbeta. Ytan får inte den jämna och släta struktur med bruk runt stenmaterialet som behövs för hållbarheten. Efterhand som massan stelnar blir massan grusaktig i konsistensen, som kommer av att asfalten rullar ihop sig till granuler. Dessa förmår inte de lätta packningsredskapen som används vid handläggning att pressa samman. Ytan får en grov karaktär och blir helt enkelt osnygg. Vatten och luft

släpps in i beläggningen, som leder till ett tidigt sönderfall genom accelererad åldring.

Ökningen av temperaturen för att förlänga hanteringstiden på handläggningsmassor skapar en ond spiral. Ju mer temperaturen höjs desto hårdare blir så småningom bituminet och desto fortare blir massan svår att lägga ut. En obetänksam överhettning kan alltså styva upp en handläggningsmassa och göra den oläggbar vid en temperatur som normalt borde räcka.

4.2.2 Asfaltverkets funktion

Värmetrummans brännare har hög kapacitet. Stenmaterialet kan värmas i princip hur mycket som helst. Gränsen nås när andra delar av asfaltverket tar skada. Den värmekänsliga funktionen är reningen av rökgaser genom filteranläggningen.



Bild 2. Ventilationskanaler går från flera utsug med damm, fukt och rökgaser till filteranläggningen för rening och recirkulering av fillern.

Rökgaserna från värmetrumman och evakueringsluften från asfaltverkets olika utrymmen med undertryck tar med sig fukt, damm och förbränningsrester som avskiljs i filteranläggningen. Fukten kommer från stenmaterialet och uppvärmd returafalt, som ofta har hög fukthalt. Luft och gas måste ha tillräckligt hög temperatur och hastighet för att inte fukten ska falla ut på ventilationskanalernas insidor och slutligen i stoftavskiljningens filter. Utfälld fukt binder findelar till avlagringar på kanalernas insidor, som tynger ner konstruktionen och till slut måste avlägsnas för hand, vilket är ett smutsigt och mödosamt arbete. Fukt som stannar i filtren av för låg temperatur gör att de till slut täpps igen och upphör att fungera.

Det optimala läget är att hålla rökgasernas fukthalt på en jämn och låg nivå. Det sker genom att styra luftmängd och värme till ett balansläge när filtret renar som bäst utan fuktutfällningar någonstans i kanalerna. För hög temperatur riskerar att bränna sönder filter av textiltyp. Det kräver ett jämnt körsätt i processens alla steg. Valet av stenmaterialtemperatur får inte hamna utanför det optimala temperaturspannet och inte variera för mycket mellan asfaltsorterna.

4.2.3 Emissioner

Yttre miljön

Utsläpp från asfalttillverkning handlar om partiklar och gasformiga ämnen. Någon utlakning av betydelse förekommer inte. Den viktigaste påverkan av omgivningen, vid sidan av damm och buller, är koldioxiden från fossila bränslen, som är den vanliga energikällan i asfalthanteringen. Många provar koldioxidneutrala bränslen men

nettoutsläpp finns då istället någon annan stans i tillverkningskedjan av oljor från djur- eller växtriket och pulverbränslen.

Växthusgaser uppstår inte bara vid tillverkningen av asfalt utan kommer också från tillverkning av asfaltens komponenter (bitumen och stenmaterial), transporterna och utläggningen. Emissionerna kan inte undvikas men de kan minimeras, bl. a. genom att undvika övertemperaturer. Låg temperatur får samtidigt inte vålla annan miljöbelastning eller alltför korta livscykler, som i sig belastar miljön genom frekvent underhåll och täta ombyggnader.

Arbetsmiljön

Asfaltarbetarnas hälsoläge och arbetssituation har belysts i flera arbeten. Stressen över trafiksituationen är den helt dominerande orosfaktorn. Några bestående hälsoeffekter av emissioner har inte konstaterats. Däremot kan rök och lukt, framförallt orsakade av höga temperaturer, ge upphov till besvärande men övergående huvudvärk och illamående. Situationen ska emellertid inte undervärderas bara för att den inte är hälsovådlig. Ett gott välbefinnande under den yrkesaktiva perioden är ett lika självklart krav som att slippa bestående hälsoeffekter senare i livet.

Övertemperaturer kan orsaka mångdubbelt högre emissioner av rök, lukt och ämnen med betydelse för komforten i arbetet. Samtidigt arbetar personalen i en öppen och ofta väl ventilerad miljö som minskar exponeringen. Situationen är en annan i stillastående luft, t ex inomhus eller i trånga stadsmiljöer. Asfältläggarens förare har svårare att dra sig undan emissionerna än övriga i laggarlaget. I det fallet har användningen av hytter inneburit en avsevärd förbättring.

4.3 WMA/LTA

Sökandet efter beläggningstekniker som inte behöver värme eller bara måttlig uppvärmning är av gammalt datum. Inledningsvis var det av nödvändighet, eftersom möjligheterna till uppvärmning var ovanliga och framförallt kostsamma. Bland tidiga exempel är oljegrus, som tillsammans med tankbeläggningar var vanligt förekommande i svensk glesbygd fram till 1980-talet. Kallblandad asfalt, AEB Ö (öppen asfaltemulsionsbetong), var flitigt i bruk under en lång följd av år från mitten av 1970-talet, som den tidens miljöanpassade beläggningsmaterial. Den fungerade bra som asfaltbärlager på grusbärlager men var inte särskilt hållbar som slitlager. Detsamma gäller en rad av efterföljare. Hållbarhet och finish kan möjligen klara behoven på lågtrafikerade vägar men inte mer än så.

I slutet av 1990-talet lanserade Veidekke/Shell i Norge ett nytt beläggningskoncept, Warm Mix Asphalt, WMA, som snabbt fick stor uppmärksamhet världen över. Avsikten var att med hjälp av olika metoder och tillsatser sänka tillverkningstemperaturen för varmasfalt med i storleksordningen 30 °C. Det skulle spara energi och minska utsläppen av koldioxid, eftersom varmasfalt i huvudsak värms med oljebrännare. Samtidigt nylanserades gamla exempel på kalltillverkad asfalt, som ansågs uppnå samma kvalitet som varmasfalt. Mer om olika tekniker och material finns att läsa om på hemsidan <http://www.warmmixasphalt.org/>.

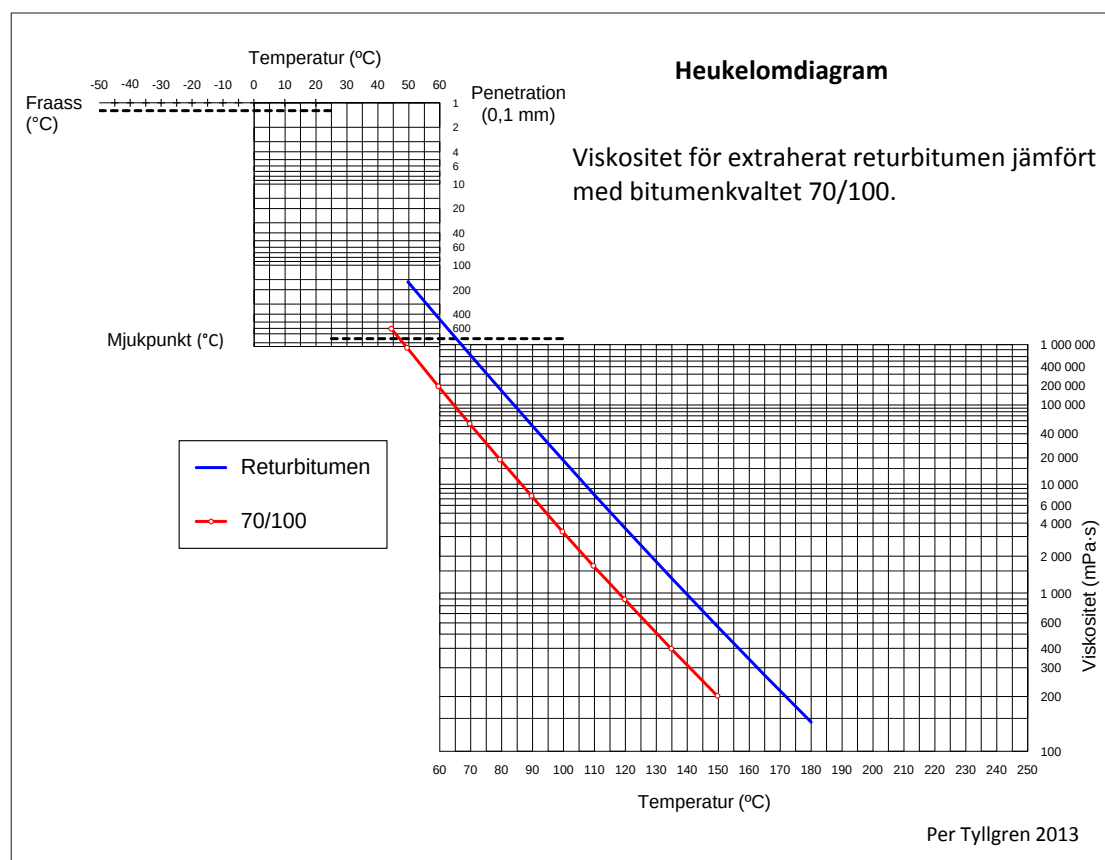
WMA, eller LTA (LågTempererad Asfalt) som tekniken kallas i Sverige, motiveras i huvudsak av minskat energibehovet men bättre arbetsmiljö och varsamhet med bituminets reologiska fördelar och hållbarhet har också nämnts. Allt bygger på att LTA resulterar i samma beläggningskvalitet som konventionell varmasfalt. I annat fall äts vinsterna och koldioxidreduceringen upp av kortare livslängd. Det räcker med några få år så blir resultatet istället en ekonomisk förlust och mer koldioxid från ökat underhåll.

En minskning med 30 °C låter kanske mycket men ett enkelt överslag visar att energibesparingen blir mycket liten, eftersom stenmaterialet ändå måste värmas över 100 °C och all fukt kokas bort under ett par minuter i värmtrumman. Besparingen är maximalt 0,5 l brännolja av totalt ca 6 l per ton asfalt. Uppvärmningskostnaden är dessutom en liten post bland alla andra för tillverkningen av asfalt. Sparad energikostnad på i storleksordningen 5 kr/ton asfalt ska jämföras med ett försäljningsvärde på 350-400 kr/ton asfalt. Till detta ska läggas kostnaden för tillsatsmedel och investeringar i doseringsutrustningar. Produktionsledet ser alltså ingen större vinning av den här tekniken om man inte säkras täckning för merkostnaderna och skäligen vinst genom att den beställs av kundsidan.

Olika försök med LTA/WMA har visat att det *går* att tillverka asfalt vid en temperatur 30 °C lägre än normalt men att hållbarheten bibehålls är *inte* bevisat. Det behövs många jämförande uppföljningar innan det kan anses belagt. Snarare finns misstankar om att livslängden förkortas jämfört med konventionell varmasfalt. På lågtrafikerade vägar kan det fungera i likhet med mjukasfalt men det är en helt annan historia.

4.4 ASFALTÅTERVINNING

Vid återvinning tillsätts returafalt antingen kallt eller uppvärmt till 10-40 °C under normal asfalttemperatur, av säkerhetsskäl. Högre temperatur riskerar helt enkelt att sätta eld på returafalten. Nytt stenmaterialet måste därför ges extra värme för att kompensera för detta.



Figur 2. Skillnad i viskositet mellan ett standardbitumen och bitumen i returafalt illustrerat i ett viskositetsdiagram (BTDC) enligt Heukelom.

Problemet vore tillräckligt stort om returafalten hade samma kvalitet som nytillverkad asfalt. Så är nu inte fallet utan bitumen i returafalt är mycket hårdare än någon förekommande bitumenkvalitet. Extraherat returbitumen skulle behöva ytterli-

gare 20 °C för att få samma viskositet som nytillverkat bitumen 70/100 enligt Figur 2. I kapitel 6.1.3 framgår att det kan röra sig om betydligt större höjningar än så, närmare 90 °C men mer om den saken i det följande. Obehandlad returafalt blandar sig med nya material i form av klumpar (*black rock*; am. uttryck). Resultatet blir en stum och livlös asfaltmassa som bland annat inte kan komprimeras på vanligt sätt (Tyllgren, 2010).

Uppvärmningen av *kalldoserad* asfalt kan bara ske med övertemperatur i nytt stenmaterial. Det sätter en låg gräns för hur mycket returafalt som kan tillsättas. Det har förekommit höjningar till över 200 °C för att kunna sätta till lönsamma mängder, vilket är helt förkastligt ur alla synvinklar, förutom en, ekonomin i tillverkningen (Tyllgren, 2013).

5. ALTERNATIV TILL ÖVERTEMPERATUR

Tillsatser som syftar till att ge asfaltbeläggningen goda egenskaper på vägen kan samtidigt göra asfaltmassan svårhanterlig under blandning och utläggning. Ett annat fall som behöver hjälp med smidigheten är asfaltmassor som förvaras en längre tid innan de läggs ut, till exempel handläggningsmassor. Vanligtvis löses alla de här problemen med ökad temperatur. Med temperatursänkande tillsatser kan det undvikas.

Vid återvinning tillsätts returafalt antingen kallt eller uppvärmt. I båda fallen understiger temperaturen i returafalten önskad sluttemperatur. Det kräver förhöjd temperatur på det nya stenmaterialet, ibland kraftigt ökad, eftersom returafalt är mycket styvare än nytillverkad asfalt. Föryngringsmedel förbättrar situationen avsevärt men returafalten har fortfarande lägre temperatur än önskad sluttemperatur. En kombination med temperatursänkande tillsatsmedel kan tillåta höga tillsatser av returafalt och en något sänkt sluttemperatur på färdig asfalt (Tyllgren, 2013).

5.1 ASFALTVERKET

De flesta asfaltverken kan variera temperaturen över ett brett register utan större problem. Överhettade rökgaser kan kylas ned med extra luftintag före filtret. Fukt från blöt kalldoserad asfalt kan avledas från asfaltblandaren via särskilda utsläpp för att inte fälla ut i ventilationskanalerna eller filtret.



Bild 3. Skanskas asfaltverk i Dalby med utrustning för återvinning av både kalldoserad och uppvärmd returafalt.

Problem kan uppstå om temperaturen måste ändras från tid till annan på grund av särskilda behov i vissa leveranser. Det tar tid innan en ny temperaturnivå har stabiliserats. Antingen drabbas slutet eller början av föregående eller efterkommande tillverkning av fel temperatur eller så får verket tömmas på stenmaterial. Det underlättar således om all tillverkning kan ske vid en och samma temperatur på inmatat stenmaterial.

Problem kan uppstå om temperaturen måste ändras från tid till annan på grund av särskilda behov i vissa leveranser. Det tar tid innan en ny temperaturnivå har stabiliserats. Antingen drabbas slutet eller början av föregående eller efterkommande tillverkning av fel temperatur eller så får verket tömmas på stenmaterial. Det underlättar således om all tillverkning kan ske vid en och samma temperatur på inmatat stenmaterial.

5.2 TILLSATSMEDEL

Vid sidan av processtekniska åtgärder på ett asfaltverk finns möjligheten att med tillsatsmedel påverka asfaltmassans smidighet, tillfälligt under hanteringen eller permanent i massans egenskaper. Den här studien inriktas på olika marknadsförda tillsatsmedel, som uppges göra asfaltmassan smidig 20-30 °C under normal blandningstemperatur. Medlen presenteras på tillverkarnas eller återförsäljarnas hemsidor. Flera av företagen har låtit genomföra studier som uppvisar gynnsamma effekter. Den här undersökningen omnämner inga resultat och gör inga utvärderingar av dessa studier. Ansatsen är att påstådda effekter gäller tills motsatsen har påvisats.

Ett rimligt antagande är att effekten av temperatursänkande tillsatsmedel också bör gälla omvänt, det vill säga ersätta höjd temperatur.

Huruvida föryngringsmedel helt återställer gammalt bitumen till nytt är omdebatterat (Karlsson, 2002; Tyllgren, (2010). Frågan blir inte slutligt besvarad i den här utredningen.

5.2.1 Temperatursänkande tillsatsmedel

I samband med lanseringen av Lågtempererad Asfalt, LTA, presenterades en rad tekniker och tillsatsmedel som skulle underlätta sänkningen av tillverkningstemperaturen. Flera av dem presenteras via ovan nämnda länk till hemsidan för tillverkare av WMA, *Warm Mix Asphalt* (<http://www.warmmixasphalt.org/>).

Bland tillsatsmedel för möjlig sänkning av temperaturen, och därmed också för förbättrad konsistens istället för med höjd temperatur, provades i den här undersökningen:

1. ZycoTherm (Zydex)
2. Rediset LQ-1101CE (AkzoNobel)
3. Sasobit (Sasol)
4. Redux (Sasol).

Blandningen av bitumen och *ZycoTherm* kan göras i förväg vid utlastningsdepot eller på plats vid ett asfaltverk. Basbituminet väljs efter typen av asfaltmassa, i den här undersökningen 70/100. Syftet med *ZycoTherm* är att kunna sänka tillverkningstemperaturen i varmblandad asfalttillverkning med 25-30°C under normal tillverknings-temperatur. Ämnet marknadsförs också som vidhäftningsmedel för asfalt och som jordförbättringsmedel. *ZycoTherm* rapporteras förbättra packning, stabilitet och förmågan att motstå trafikbelastningar.

Rediset-LQ 1101CE är både ett temperatursänkande tillsatsmedel och vidhäftningsmedel för asfalt. *Rediset-LQ* omnämns i samband med LTA och ska göra det möjligt att sänka tillverkningstemperaturen för asfalt med 20-30 °C.

Sasobit är ett syntetiskt vax tillverkat enligt Fischer-Tropsch-metoden. Vaxer av det här slaget används industriellt över hela världen inom en rad områden. Vaxet har en smältpunkt strax under temperaturnivån där asfalt blandas och hanteras. I smält form anses vaxet smörja asfalten och därmed möjliggöra en sänkning av temperaturen med upp till 30 °C. När asfalten svalnat kristalliserar vaxet och bidrar då till att ge asfalten ytterligare stabilitet. Vaxet har också egenskapen att vid uppvärmning smälta vid högre temperatur än det kristalliserar vid avsvälning (hysteresiseffekt). Det säkerställer att asfaltmassan inte stelnar innan den hunnit läggas ut och komprimerats, under 80 °C, och att asfaltbeläggningen inte mjuknar i varma klimat förrän vid mycket hög temperatur, över 100 °C. Den hittills vanligaste produkten är *Sasobit*. *Redux* är en ny variant med lägre smältpunkt.

5.2.2 Föryngringsmedel

Andra tillsatsmedel som indirekt minskar behovet av hög temperatur är föryngringsmedel till returafalt. De underlättar blandningen av returafalt med jungfruliga material utan temperaturhöjning av nytt stenmaterial, som annars krävs. Slutresultatet liknar också mer en nytillverkad produkt. Syftet är att underlätta ökad tillsats av returafalt, som annars upplevs som processtekniskt besvärlig och hanteringsmässigt som en försämring.

I den här undersökningen provades följande föryngringsmedel:

1. Nygen 910 (Nynas)
2. Storflux (Storimpex)

3. Sylvaroad RP1000 (Kraton)

Nygen 910 tillverkas av Nynas AB och är ett hydrerat petroleumdestillat för föryngning av returasfalt. Hydreringen gör att ämnet bedöms gynnsamt i miljöhänseende.

Företaget Störimpex sysslar med återvinning av industrirester och bland dem finns returoljor. *Storflux* är en raffinerad returolja för föryngning.

Sylvaroad RP1000 är en raffinerad tallolja från pappersindustrin. Sylvaroad tillverkas av företaget Arizona Chemicals, som numera ingår i Kraton-koncernen. Företaget etablerades 1945 och är verksamt inom olika produktområde såsom gummi, medicinsk teknologi och tillsatsmedel för asfalt.

Nygen 910 och *Storflux* har för övrigt undersökts ingående av Peab i ett tidigare SBUF-projekt (Gudmarsson, 2015).

6. MATERIALUNDERSÖKNINGAR

I två examensarbeten vid Ingenjörshögskolan i Helsingborg och Civilingenjörsutbildningen i Lund på Lunds Tekniska Högskola, undersöktes effekterna på bitumen respektive asfaltbruk av olika tillsatsmedel för bättre hanterbarhet och ökad återvinning av returafalt utan övertemperatur.

Examensarbetena stöddes ekonomiskt av SBUF genom Svevia och utfördes på LTH:s laboratorium i Lund med skolans instrument för viskositetsmätning med RVB (RotationsViskosimeter modell Brookfield DV-II + Pro Extra) och viskoelastiska egenskaper med DSR (Dynamisk SkjuvReometer modell MCR 302, Anton Paar). Arbetena var färdiga i december 2017.

Samtliga mätvärden redovisas i examensarbetenas bilagor (Shukir/Bakalov, 2017; Mouhsen/Haxhibeqiri, 2017). För den som vill veta mer om resultaten rekommenderas en genomläsning av dessa, som innehåller ingående redovisningar av metoderna och genomförandet, bland annat om provberedning.

Efter önskemål från leverantörshåll anonymiseras resultaten. I resultatdelen littereras därför produkterna slumpmässigt inom respektive grupp utan koppling till tidigare presentation.

Bitumenproverna som baserades på kvaliteten 70/100 littererades på följande sätt:

Tabell 1. Förklaring av beteckningar för provserier med temperatursänkande tillsatsmedel och föryngringsmedel.

Beteckning	Beskrivning av prov
70/100	Standardbitumen 70/100
BR	Bitumen extraherat ur returafalt från Skanska i Dalby
TS x	Temperatursänkande tillsatsmedel x
F x	Föryngringsmedel x
BTS x	Bitumen av 70/100 med TS x
ATS x	Asfaltbruk av BTS x och 36,3 vol% granitfiller från Dalby
BFR x	BR med F x
AR	Asfaltbruk av BR med extraherad fillermängd (< 0,063 mm) enligt sammansättningsanalys av returafalt
AFR x	Asfaltbruk av BFR x och extraherad filler i anpassad mängd efter typ av föryngringsmedel

6.1 VISKOSITET HOS BITUMEN OCH ASFALTBRUK

6.1.1 Inledande undersökning av asfaltbruk

Undersökningarna inleddes med att finna en lämplig sammansättning på asfaltbruket, som kunde anses representera en vanlig asfalttyp, i det här fallet ABS 11 med 70/100 som bindemedel. I en äldre utgåva av Trafikverkets anvisningar anges som vanliga värden bitumenhalten till 6,7 vikt% och fillerhalten till 11,5 vikt%. Viktandelen för filler i asfaltmassan måste reduceras med stenmaterialets andel av asfaltreceptet eftersom fillerhalten i en kornfördelning anges på mängden stenmaterial. Det ger en viktkvot mellan filler och bitumen (F/B-värdet) på:

$$11,5 \cdot (1 - 6,7/100) / 6,7 = 1,601 \text{ viktandelar.}$$

Viktkvoten motsvaras av vikthalten:

$$100 \cdot 1,601 / (1,601 + 1) = 61,6 \text{ vikt\%}$$

Densiteten för bitumensorten antogs till $0,974 \text{ g/cm}^3$ vid $100 \text{ }^\circ\text{C}$. En tidigare bestämning av kompktdensiteten hos fillern från Dalby gav värdet $2,742 \text{ g/cm}^3$. Det ger fillern en volymhalt i asfaltbruket vid $100 \text{ }^\circ\text{C}$ på:

$$100 \cdot 61,6 / (61,6 + 2,742 \cdot (100 - 61,6) / 0,974) = 36,3 \text{ vol\%}$$

För att mäta uppstyvningseffekten av Dalbyfillern blandades fyra olika volymhalter: 20, 30, 36,3 och 40 vol%. Mängden 40 vol% bedömdes vara den svåraste att homogenisera och ta ut ett representativt prov på. Därför upprepades det provet för att få en bild av repeterbarheten.

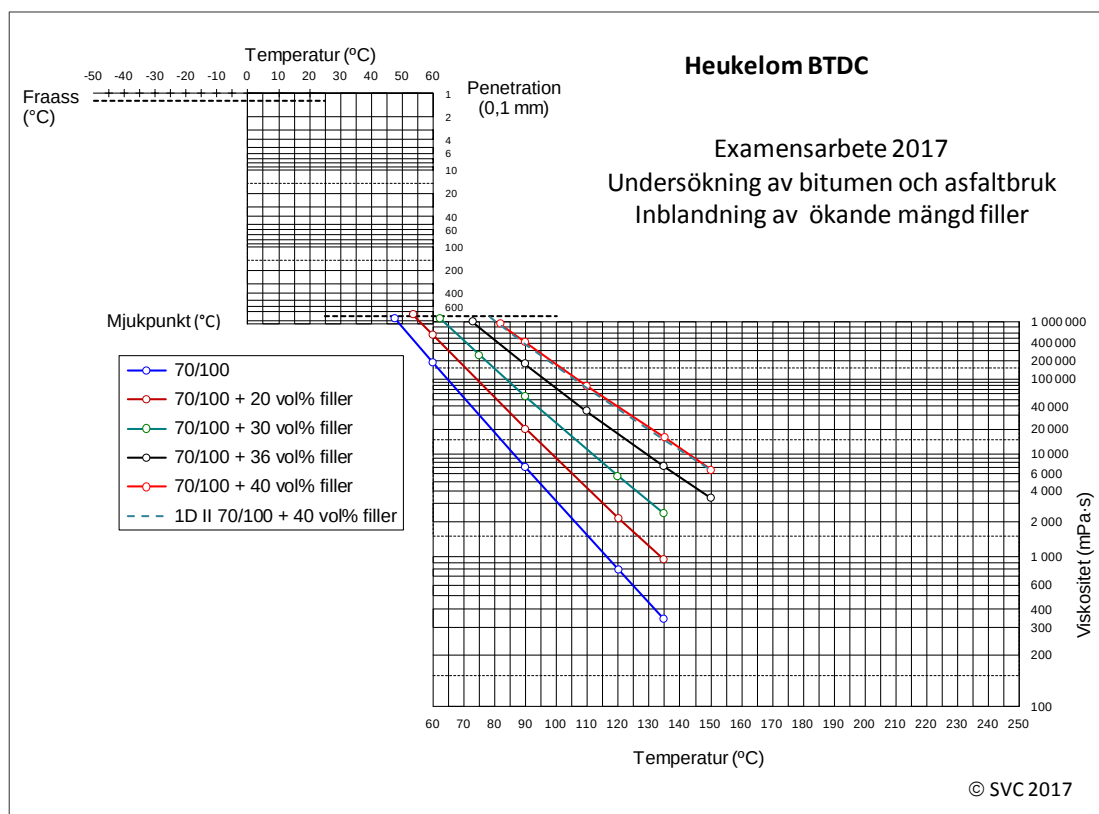
Resultat

Syftet med den inledande studien var att mäta effekten av olika mängder inblandad filler från Skanskas asfaltverk i Dalby. Det blev också en möjlighet att se närmare på metoden att mäta viskositet på asfaltbruk med rotationsviskosimeter, inklusive prepareringen av prover. Resultaten presenteras i grafiskt i Figur 3 och Figur 4 och numeriskt i tabellform i Tabell 3 och Tabell 4.

Granitfiller från Skanska i Dalby undersöktes enligt DIN 52096 för att fastställa Stabiliseringsindex (uppstyvningsförmåga).

Tabell 2. Förklaring av beteckningar i resultattabellerna för RVB.

Beteckning	Betydelse
F/B	Viktkvot mellan filler <0,063 mm och bitumen
MP-RVB	Mjukpunkt från viskositetstest med RVB
Δ MP-RVB	Förändring av mjukpunkt bestämd med RVB

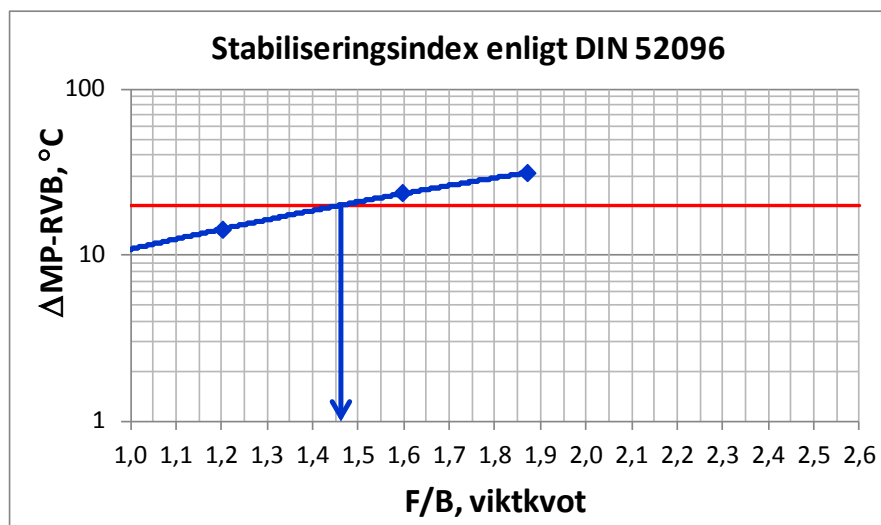


Figur 3. Inledande undersökning av asfaltbruk i ett viskositetsdiagram (BTDC) enligt Heukelom.

Tabell 3. Tabell över resultat från inledande undersökning av asfaltbruk.

Prov	Filler-halt vol%	MP-RVB ^{*)} °C	Viskositet vid 150 °C ^{*)} mPa·s	Temperatur vid 3380 mPa·s ^{*)} °C
70/100	0	47,1	175	100
70/100 + 20 vol %	20	54,1	454	113
70/100 + 30 vol %	30	61,5	1 130	127
70/100 + 36,3 vol %	36,3	70,6	3 380	150
70/100 + 40 vol %	40	78,5	6 770	165
70/100 + 40 vol % II	40 II ^{**)}	78,1	6 650	165

^{*)} Beräknade värden ur WLF-samband ^{**)} Upprepat prov



Figur 4. Diagram för bestämning av Stabiliseringsindex för filler i asfaltbruk.

Tabell 4. Tabell över resultat från bestämning av Stabiliseringsindex för filler i asfaltbruk.

Bitumen	Fillerhalt i asfaltbruk		Fillerkvot, F/B, i asfaltbruk med 70/100 viktkvot	MP-RVB °C	ΔMP-RVB °C
	vol%	vikt%			
70/100	0	0	0	47,1	0
	20	41,2	0,70	54,1	7,0
	30	54,6	1,20	61,5	14,4
	36,3	61,6	1,60	70,6	23,5
	40	65,2	1,87	78,5	31,4
Stabiliseringsindex:			1,46	←	20,0

Kommentarer

Med ökad fillermängd ökar mjukpunkten, samtidigt som lutningen på sambandet mellan viskositet och temperatur minskar (Figur 3). Behovet av värme i asfaltbruket accelererar alltså med ökad fillermängd, vilket framgår av siffernivåerna i Tabell 3. Som referensvärde bestämdes viskositeten vid 150 °C för 70/100 + 36,3 vol%, som är nytillverkat asfaltbruk. Övriga blandningars temperatur vid denna viskositet, 3380 mPa·s, utgör jämförelsetal vid blandning.

Figur 4. visar grafiskt definition av Stabiliseringsindex enligt DIN 52096. Stabiliseringsindex är F/B-värdet (viktkvot filler/bitumen) som resulterar i en ökning av mjukpunkten (ΔMP-RVB) med 20 °C. Metoden byggde ursprungligen på mätning med Kula & Ring-metoden men ersätts här av MP-RVB.

Sedimentering av filler i bruket skulle kunna påverka resultaten. Det innebär att fillerpartiklarna rör sig ner mot provets botten eftersom de är tyngre än bitumen. I den här undersökningen sågs inga tecken i resultaten på något sådant. Om sedimentering hade förekommit i betydande omfattning hade resultaten inte rangordnat sig som rena bitumenprover brukar göra. Innan provrören fylldes homogeniserades provet. Partikelvandringen nedåt måste vara mycket långsam eftersom fillerpartiklarna är små, vätskan är trög (200 – 1 300 000 mPa·s) och andelen partiklar är hög (20-44 vol%).

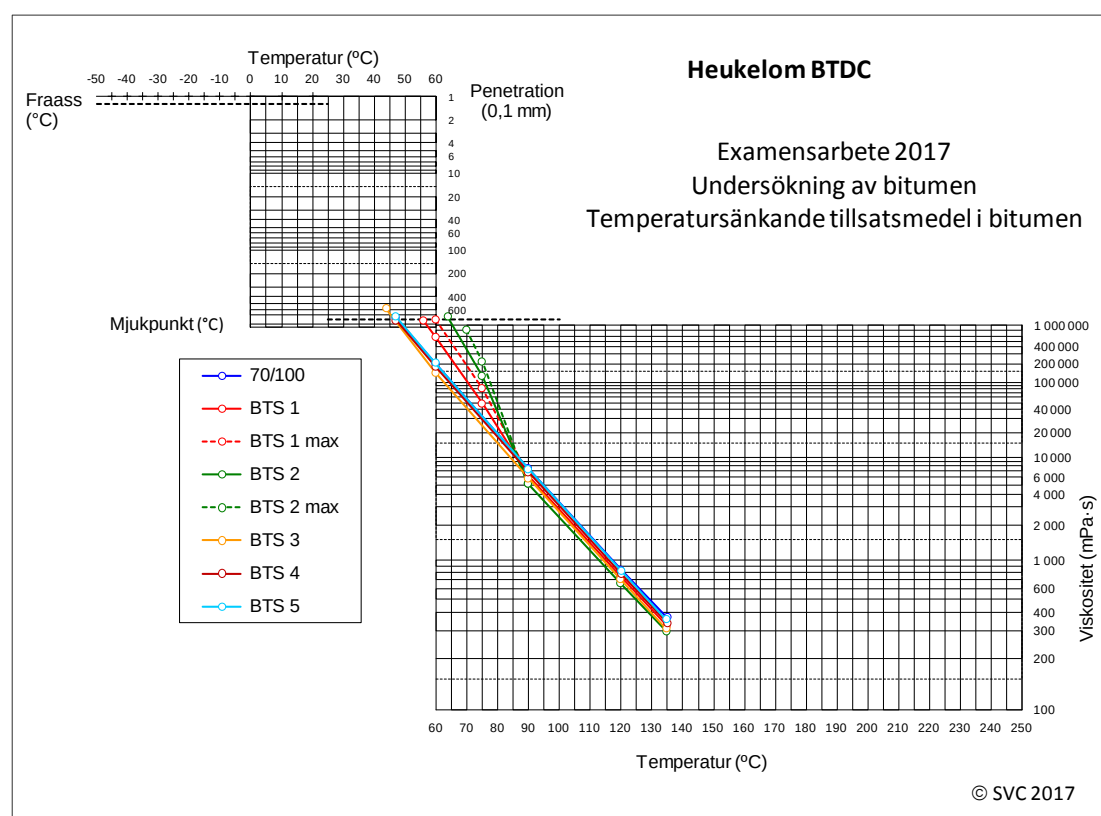
Separeringen förutsätter stillastående vätska. Under den inledande delen av mätningen, när sedimenteringen skulle kunna ske, är proverna under snabb rotation. Sedimentering förekommer men i så liten omfattning att det inte har någon praktisk betydelse i de här jämförande mätningarna, vilket resultaten indikerar. Den eventuella sedimenteringseffekten ingår i så fall som en metodeffekt, som alla mätmetoder är behäftade med. Invägningsfel och bristande homogenisering har förmodligen större betydelse för precision och repeterbarhet hos mätmetoden. Dalbyfillerns Stabiliseringsindex, 1,46, är ett vanligt värde för mineraliska fillersorter från krossning av stenmaterial till asfaltmassor.

Uttryckt i % av viskositetsvärdet ligger den upprepade mätningen vid 40 vol% ungefär 5 % under den första. Utmed temperaturskalan skiljer det i medeltal 0,4 °C mellan viskositetslinjerna. Det får betraktas som en liten avvikelse.

6.1.2 Undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel

Bitumen 70/100

Resultat



Figur 5. Heukelom BTDC-diagram över temperatursänkande tillsatsmedel i 70/100.

Tabell 5. Tabell över resultat från undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel till 70/100.

Bindemedel	Viskositet vid 150 °C *) mPa·s	Temperatur vid 181 mPa·s *) °C	Differens från 70/100 *) °C
70/100	181	150,0	0
BTS 1	156	146,8	-3,2
BTS 2	148	145,3	-4,7
BTS 3	152	146,0	-4,0
BTS 4	166	148,0	-2,0
BTS 5	170	148,9	-1,1

*) Beräknade värden ur WLF-samband

Kommentarer

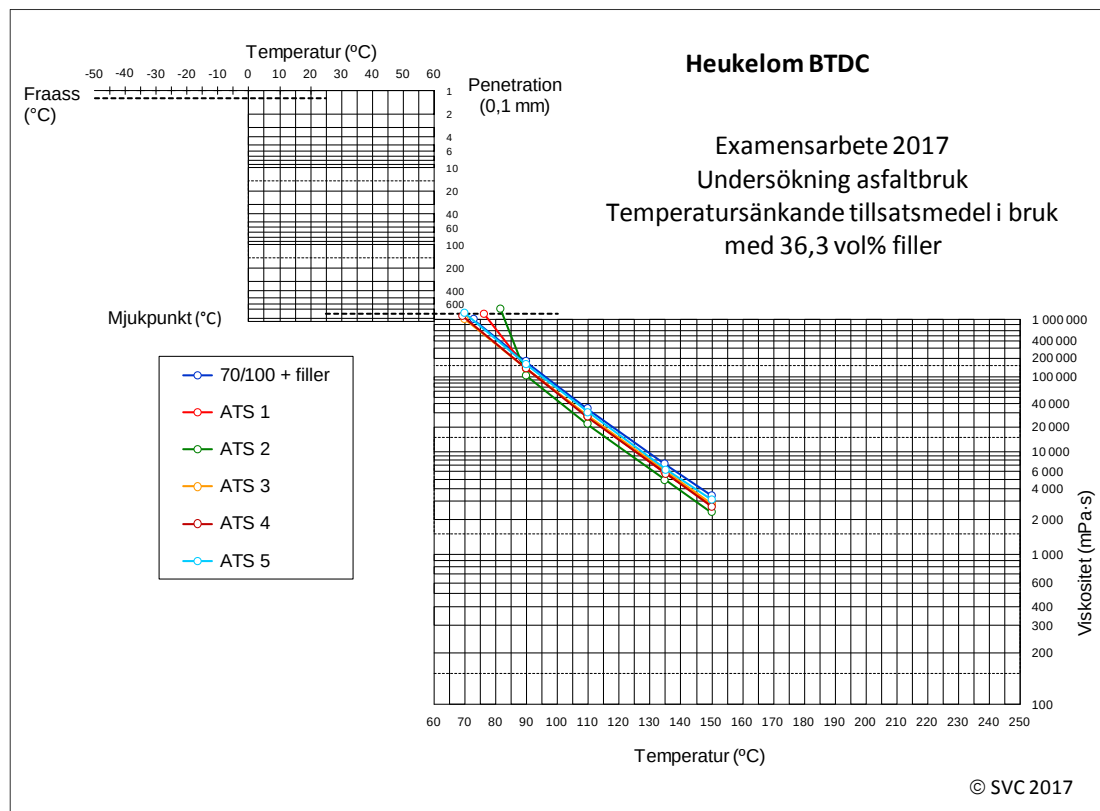
Figur 5 visar viskositeten i ett Heukelom BTDC-diagram för proverna som innehöll temperatursänkande tillsatsmedel jämfört med bitumen 70/100 utan tillsats. Effekten uttrycks i horisontell temperaturdifferens i Tabell 5 vid blandningstemperaturen 150 °C.

Noterbart är att viskositeten för varje prov är mindre än referensen, som i sin tur leder till en temperaturdifferens som syns i höger kolumn. Temperaturvinsten får betraktas som mycket liten och mest som en effekt av tillsatsmedlens upplösande verkan.

Blandningarna BTS 1 och BTS 2 visar kraftig stigning i viskositeten under 90 °C, vilket orsakas av kristallisering, dvs. ämnena stelnar. I det här stadiet får blandningen icke-newtonska egenskaper, som visar sig i att viskositeten inte är densamma vid olika skjuvhastigheter, vilket kännetecknar den här typen av vätskor. Blandning BTS 3 har liknande tendens men mycket svagare och visar sig först under 60°C.

Asfaltbruk med filler och 70/100

Resultat



Figur 6. Heukelom BTDC-diagram över temperatursänkande tillsatsmedel i asfaltbruk med 70/100.

Tabell 6. Tabell över resultat från undersökning av temperatursänkande tillsatsmedel till asfaltbruk med 70/100.

Asfaltbruk	Viskositet vid 150 °C *) mPa·s	Temperatur vid 3 380 mPa·s *) °C	Temperaturdifferens från nr 2B vid 150 °C °C
70/100 + 36,3 vol%	3 380	150,0	0
ATS 1	2 800	146,1	-3,9
ATS 2	2 360	142,2	-7,8
ATS 3	2 800	146,1	-3,9
ATS 4	2 670	145,1	-4,9
ATS 5	3 070	147,9	-2,1

*) Beräknade värden ur WLF-samband

Kommentarer

Effekterna i asfaltbruken är överlag något större jämfört med bitumen. Det kan förklaras med att F/B-talet minskar en aning förutom en liten uppmjukning av bituminet.

Stegringen av asfaltbrukets viskositet under 90 °C för blandningarna ATS 1 och ATS 2 har samma förklaring som i bitumenfallet. Den icke-newtonska karaktären provades inte i asfaltbruket.

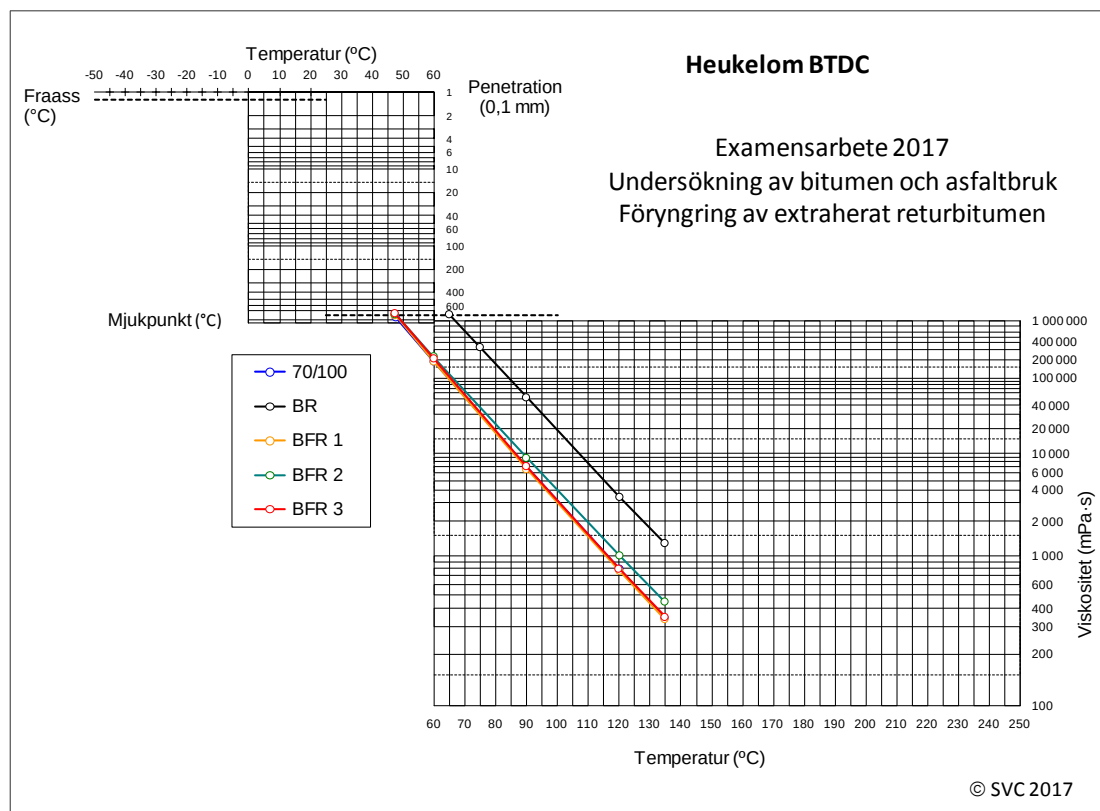
Sammantaget kan konstateras att effekterna för både bitumen och asfaltbruk inte förklarar de möjliga sänkningar på 20-30 °C som nämns i leverantörernas produktbeskrivningar.

6.1.3 Undersökning av föryngringsmedel

Föryngringsmedel har samma inverkan under tillverkningen som temperatursänkande tillsatser, det vill säga de minskar behovet av ökade temperaturer. Till det kommer att föryngrad återvunnen asfalt påminner om nytillverkad asfalt i läggbarhet (Tyllgren, (2010).

Effekter på rent bitumen och returbitumen

Resultat



Figur 7. Heukelom BTDC över föryngringsmedel till rent returbitumen.

Tabell 7. Tabell över resultat från undersökning av föryngringsmedel till rent returbitumen.

Bindemedel	Mjukpunkt MP-RVB *) °C	Viskositet vid 60 °C *) mPa·s	Viskositet vid 150 °C *) mPa·s	Temperaturdifferens från 70/100 vid 181 mPa·s *) °C
70/100	47,5	200 000	181	0
BR	65,3	3 130 000	525	22,0
BFR 1	47,4	185 000	165	-2,1
BFR 2	47,8	219 000	215	4,0
BFR 3	47,9	205 000	169	-1,6

*) Beräknade värden ur WLF-samband

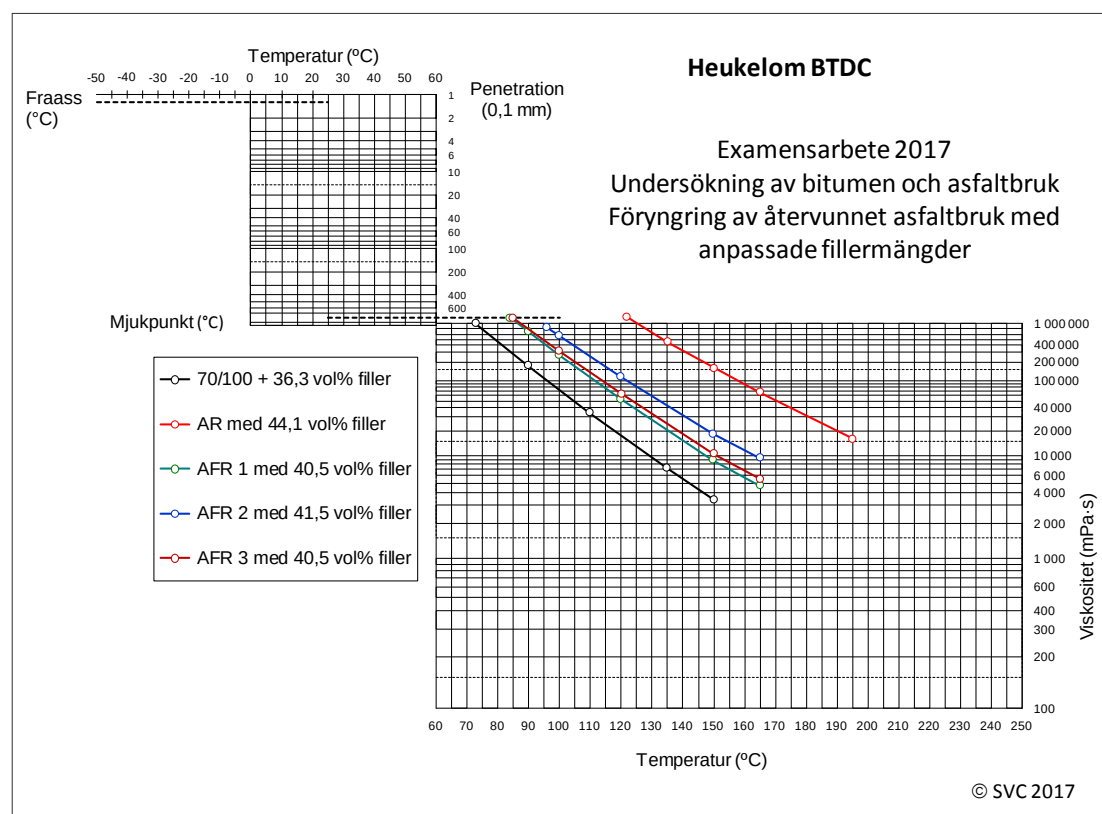
Kommentarer

Med hjälp av provblandningar och beräkningar valdes de mängder föryngringsmedel som resulterade i ungefär samma mjukpunkt som för 70/100, bestämd med RVB (MP-RVB). Returbituminet blandades med 9,4 vikt% till BFR 2 och 14,1 vikt% i BFR 1 och BFR 3. BFR 2 behöver 154 °C och BFR 1 och BFR 3 148 °C för att ha samma viskositet som 70/100 vid 150 °C. Det är ingen slump utan återspeglar föryngringsmedlens egna samband mellan viskositet och temperatur.

Effekter på asfaltbruk

Av praktiska skäl tillsattes föryngringsmedlen före fillern. För att efterlikna verkligheten borde det ha gjorts i omvänd ordning men i den här jämförande studien har det sannolikt liten betydelse.

Resultat



Figur 8. Heukelom BTDC över föryngringsmedel till återskapat returafaltbruk.

Tabell 8. Tabell över resultat från undersökning av föryngringsmedel till återskapat retur-asfaltbruk.

Asfaltbruk	Fillerhalt vol%	Mjukpunkt RVB ^{*)} °C	Viskositet vid 150 °C ^{*)} mPa·s	Temperaturdifferens från 70/100 + filler vid 3380 mPa·s ^{*)} °C
70/100 + filler	36,3	70,6	3 380	0
AR	44,1	122,3	159 000	90
AFR 1	40,5	83,9	9 180	23
AFR 2	41,5	91,7	18 700	42
AFR 3	40,5	84,9	10 900	27

^{*)} Beräknade värden ur WLF-samband

Kommentarer

Kvoten mellan filler och bitumen (F/B) har stor inverkan på asfaltbrukets viskositet enligt den inledande undersökningen. Föryngringsmedel tillsätts i så stor andel att det ändrar F/B-värdet och i sig påverkar viskositeten vid sidan av uppmjukningen av bituminet. Eftersom föryngringsmedlen tillsätts olika mycket varierar F/B-värdena därefter.

Returasfalt innehåller förhållandevis mycket filler och alltid mer än i recepten för nytillverkad asfalt. Den höga fillerhalten i retur-asfalt kommer från krossning och fräsning, kanske också från nedkrossning under trafiken, och från vägmiljön. Det är inte säkert att all filler har funnits inne i det gamla asfaltbruket men under uppvärmningen i en parallelltrumma eller tillsammans med hett stenmaterial kommer all filler till slut att knådas in i bruket.

Styvt bitumen tillsammans med hög fillerhalt bildar ett mycket segt bruk, som skulle kräva närmare 240 °C för att få samma smidighet som nytillverkat bruk. Retur-asfaltens viskositet vid 150 °C (i praktiken 110 – 140 °C) är samtidigt alldeles för hög, motsvarande ny asfalt vid 80-100 °C, för att blandning med nytt material ska lyckas. Det här är främsta skälet till att retur-asfalt måste föryngras om slutresultatet ska kunna jämföras med nytillverkad kvalitet.

6.2 VISKOELASTISKA EGENSKAPER HOS BITUMEN OCH ASFALTBRUK

Mätresultaten från de oscillerande svepmätningarna med DSR och MSCR redovisas i sin helhet i examensarbetenas bilagor. Nedanstående figurer och tabeller bygger på de resultaten.

Enligt Superpave ska proverna behandlas med åldringsmetoderna RTFOT och PAV. Så har inte gjorts i den här undersökningen av praktiska skäl och därmed kan resultaten inte användas för klassificering enligt Superpave. Syftet har istället varit att bedöma effekterna av tillsatsmedlen genom jämförelser sinsemellan och med nytillverkade referensprover.

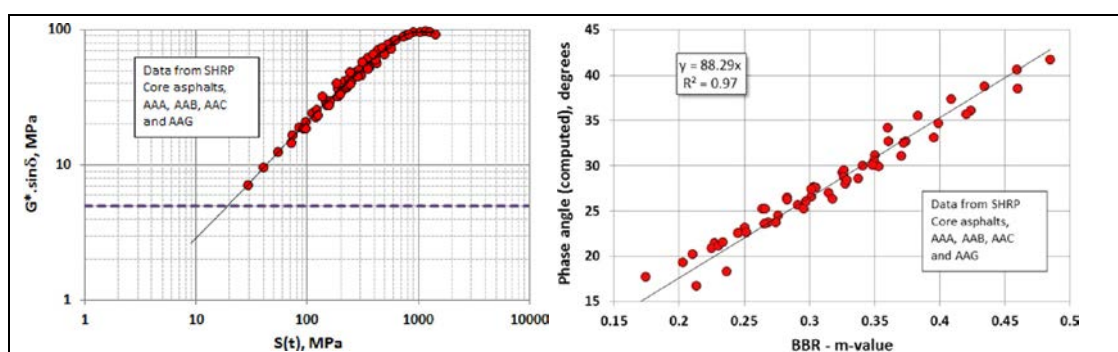
Tabellrubrikerna utgår från parametrarna i PG-klassificeringen (*Performance Grade*) enligt Superpave (Superpave, 2003) och andra parametrar för beskrivning av bindemedels egenskaper enligt följande:

Tabell 9. Förklaring av beteckningar i resultattabellerna.

Beteckning	Betydelse
t-låg-DSR	Klassificering av lågtemperaturregenskaper (lågtemperatursprickor) beräknat med masterkurvor från DSR-mätningar
t-medel	Klassificering av utmattningsregenskaper
t-hög	PG-klassificering av plastisk spårbildning enligt Superpave vid hög temperatur
MP-DSR	Mjukpunkt beräknad från oscillerande sveptest med DSR
MP-RVB	Mjukpunkt från viskositetstest med RVB
MSCR*	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> ; klassificering av plastisk spårbildning baserat på krypvärdet Jnr3200 bestämt med DSR; alternativ till t-hög

* Läs mer om MSCR i examensarbetet (Mouhsen/ Haxhibeqiri, (2017).

Nedanstående tabeller och diagram visar beräknade värden från sveptest med DSR och RVB. *t-medel*, *t-hög* och *t-låg* definieras i Superpave (Superpave, 2003) och i Tyllgren, 2010. *t-låg-DSR* är inte uppmätt med BBR utan är beräknad från oscillerande sveptest enligt presenterade samband (Rowe et al,2014).



Figur 9. Samband mellan oscillerande sveptest och BBR-parametrarna $S(t)$ och m -värde enligt Rowe et al.

Ur sambanden i Figur 9 kan motsvarande gränsvärden för de alternativa parametrarna i oscillerande sveptest avläsas.

Tabell 10. Parametrar och gränsvärden för bestämning av *t-låg* med BBR respektive DSR.

	Parameter	Gränsvärde för bestämning av <i>t-låg</i>
Styvhet	$S(t)^*$	300 MPa
	$G^* \cdot \sin\delta^{**}$	49,0 MPa
Gradient	m -värde*	0,300
	Fasvinkel δ^{**}	26,2 °

* BBR, ** DSR

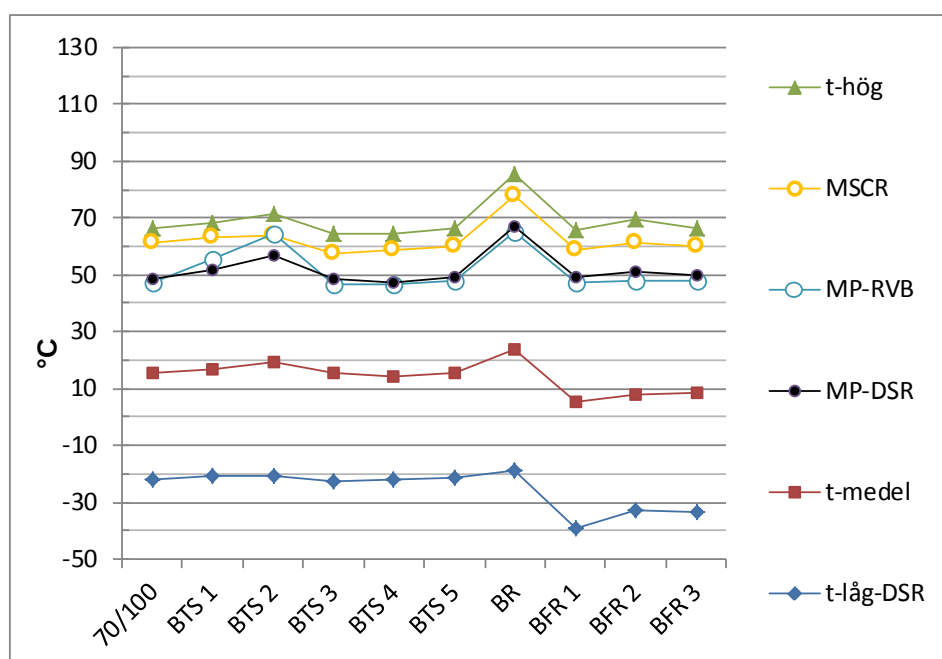
6.2.1 Bitumen

Resultat

Tabell 11. Sammanfattning och tolkning av resultaten från oscillerande sveptest på bitumenproverna.

Sammanställning av mätningar på bitumen						
Prov-beteckning	t-låg-DSR	t-medel	t-hög	MP-DSR	MP-RVB	MSCR
	°C vid $G^* \cdot \sin(\delta) = 49 \text{ MPa}^*)$	°C vid $G^* \cdot \sin(\delta) = 5 \text{ MPa}^{**})$	°C vid $G^* \cdot \sin(\delta) = 1 \text{ kPa}^{**})$	°C vid 130 kPa vid 0,1 rad/s	°C vid 1300 kPa·s	°C vid Jnr3200 = 4 kPa ⁻¹
70/100	-22,1	15,2	66,2	48,9	47,5	61,2
BTS 1	-20,7	16,8	68,5	51,5	55,8	63,3
BTS 2	-21,0	19,1	71,4	56,7	64,5	63,8
BTS 3	-22,8	15,2	64,4	48,8	46,7	57,8
BTS 4	-21,9	14,4	64,2	47,2	46,7	59,0
BTS 5	-21,3	15,4	66,5	49,4	47,8	60,1
BR	-18,8	23,9	85,4	67,0	65,3	77,7
BFR 1	-39,4	5,1	65,6	49,1	47,4	58,9
BFR 2	-33,1	8,0	69,4	51,4	47,8	61,3
BFR 3	-33,6	8,7	66,3	49,7	47,9	59,8

*) Gränsvärden från Rowe et al **) Gränsvärden från Superpave.



Figur 10. Grafisk redovisning av resultaten i Tabell 11 från oscillerande sveptest på bitumenproverna.

Kommentarer

70/100 är referens till proverna BTS 1 - BTS 5 och BFR 1 - BFR 3.

Prov BR avviker tydligt från övriga eftersom bituminet är extraherat från returafalt. Det illustrerar behovet av att behandla ett sådant material med förnyngsmedel innan det blandas med nya komponenter.

I gruppen temperatursänkande tillsatsmedel visar BTS 1 och BTS 2 högre värden än övriga, framförallt för *MP-RVB* och *t-hög* och *t-medel*. BTS 3, BTS 4 och BTS 5 liknar överlag referensen 70/100.

Mängden föryngringsmedel provades ut med hjälp av parametern *MP-RVB*. Därför ligger de värdena helt nära 70/100. Effekten på övriga parametrar varierar däremot. BFR1 har påtagligt lägre värden för *t-medel* och *t-låg-DSR*. BFR2 har något högre värden för *MP-DSR*, *MSCR* och *t-hög*.

6.2.2 Asfaltbruk

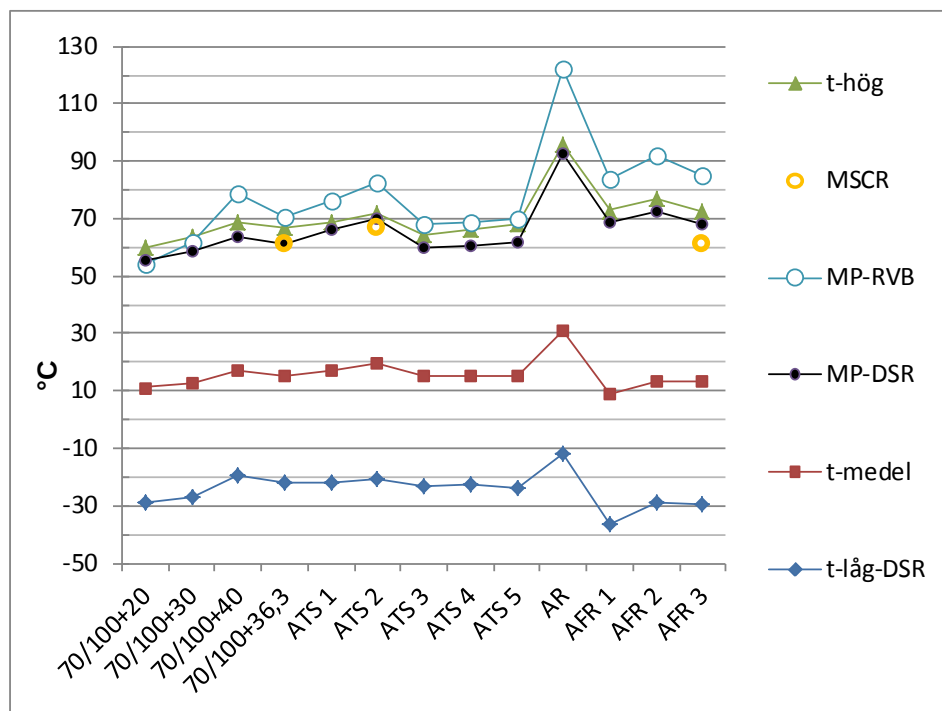
Resultat

Siffrorna i nedanstående tabell baseras på masterkurvor från sveptest med DSR och RVB. Gränsvärdena för *t-hög*, *t-medel* och *t-låg-DSR* har valts så att temperaturerna för 70/100 + 36,3 vol% ska överensstämja med värdena för 70/100. MSCR utfördes på försök med endast 3 provblandningar.

Tabell 12. Sammanfattning och tolkning av resultaten från oscillerande sveptest på asfaltbruk.

Sammanställning av mätningar på asfaltbruk						
Prov-beteckning	t-låg-DSR	t-medel	t-hög	MP-DSR	MP-RVB	MSCR
	°C vid $G^* \sin(\delta) = 190 \text{ MPa}^*)$	°C vid $G^* \sin(\delta) = 25 \text{ MPa}^*)$	°C vid $G^* \sin(\delta) = 6 \text{ kPa}^*)$	°C vid 130 kPa vid 0,1 rad/s	°C vid 1300 kPa·s	°C vid Jnr3200 = 0,31 kPa ⁻¹ *)
70/100+20 vol%	-28,9	11,1	59,7	55,2	54,1	
70/100+30 vol%	-26,9	12,9	63,9	58,9	61,5	
70/100+40 vol%	-19,5	17,1	68,4	63,5	78,5	
70/100+36,3 vol%	-22,1	15,3	66,6	61,4	70,6	61,2
ATS 1	-22,0	17,1	68,7	66,1	76,0	
ATS 2	-21,0	19,6	72,1	69,9	82,3	67,0
ATS 3	-23,5	15,4	64,3	59,8	67,9	
ATS 4	-22,7	15,2	66,1	60,7	68,5	
ATS 5	-23,9	15,2	67,9	61,9	70,2	
AR	-11,7	30,9	95,8	92,8	122,3	
AFR 1	-36,3	9,2	72,8	68,5	83,9	
AFR 2	-28,7	13,6	76,6	72,2	91,7	
AFR 3	-29,3	13,3	72,5	68,3	84,9	61,0

*) Beräknade gränsvärden ur masterkurvor, som resulterar i samma definierande temperaturer för asfaltbruk 70/100+36,3 vol% som för bitumen 70/100 i Tabell 11.



Figur 11. Grafisk redovisning av resultaten i Tabell 12 från oscillerande sveptest på asfaltbruk.

Kommentarer

Resultaten visar överlag samstämmighet mellan mätningar på bitumen respektive asfaltbruk för båda grupperna tillsatsmedel.

Ökad inblandning av granitfiller styvar upp asfaltbruket på ett sätt som påminner om ökad styvhet hos bitumen. Effekten växer försiktigt vid 20 och 30 vol% och tilltar kraftigt vid 36,3 och 40 vol% för alla parametrarna.

Föryngrat asfaltbruk (AFR1-AFR3) ligger högre än nytillverkat (ATS1-ATS5) för *t-hög*, *MP-RVB* och *MP-DSR*, eftersom de innehåller högre andel filler (högre F/B-tal). En annan orsak till de högre värdena kan vara att filler från gammal asfalt har större uppstyvande inverkan än ny granitfiller.

Gruppen AFR ligger däremot under gruppen ATS för *t-medel* (utmattning) och *t-låg-DSR* (lågtemperatursprickor). Förklaringen ses i Tabell 11 och Figur 10. Föryngringseffekten (sänkningen av temperaturen) är så kraftig att den kvarstår även efter den uppstyvande inblandningen av filler.

Skillnaden mellan *MP-RVB* och *MP-DSR* är större för asfaltbruk än i fallet med bitumen, där värdena överensstämmer ganska bra. Det illustrerar en skillnad i reologisk karaktär mellan bitumen och bruk. *MP-RVB* är ett tillstånd under kontinuerlig rörelse i en riktning (SSV, *Steady State Viscosity*) medan *MP-DSR* beräknas ur låg frekvens från oscillerande sveptest. Rent bitumen uppträder vanligen newtonskt och då har skillnader i mätförhållandena mindre betydelse. Om asfaltbruk kan beskrivas som icke-newtonskt, alltså reagerar olika beroende på omständigheterna kring mätningarna, återstår att undersökas.

6.2.3 Blackdiagram

En Blackkurva beskriver grafiskt sambandet mellan skjuvmodulen G^* och fasvinkeln δ . Uttolkningen av resultaten i Bilaga 1 bygger på okulära bedömningar. Det finns beräknade samband men det tjänar inget syfte att beskriva skillnader med abstrakta siffror, som är ganska tydliga visuellt och lätta att beskriva.

Ökande fillermängd

G^* ökar med ökande fillerhalt och δ minskar. Den krokliknande nedre kurvdelen, som blir mer markant med ökande fillerhalt, betyder att δ minskar vid minskande belastningsfrekvens, vilket skiljer sig från rent bitumen. Det illustrerar en av olikheterna mellan asfaltbruk och bitumen i reologiskt avseende.

Temperatursänkande tillsatsmedel

TS 1, TS 2 och TS 3 har liknande ursprung och Blackkurvorna är typiska för ämnen och kända från tidigare studier. Fasta kristaller som ännu inte uppnått sin smältpunkt sätter i ökande grad sin prägel på blandningen med allt mjukare bitumen, vilket ger blandningarna en icke-newtonsk karaktär. Detta förstärks av inblandad filler.

ATS 4 och ATS 5 överensstämmer med referensprovet 70/100 för både bitumen och asfaltbruk.

Föryngringsmedel

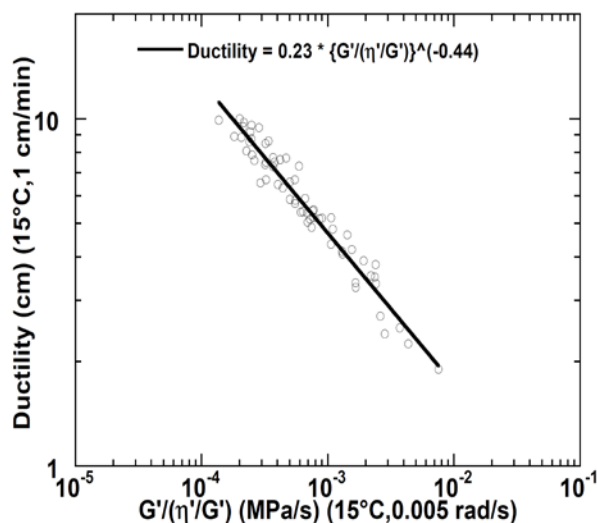
BR och AR (extraherat bitumen från returafalt och returbruk) har en brantare lutning jämfört med 70/100 och 70/100 + 36,3 vol% filler, som också har en mer parallellliknande form. Den brantare lutningen bibehålls efter föryngring, oavsett föryngringsmedel. Sambandet mellan G^* och δ återställs inte till 70/100, trots att mjukpunkten är densamma. Betydelsen av detta behöver undersökas närmare.

6.3 DUKTILITET

Ett materials förmåga att anpassa formen eller ge efter under belastning utan att brista kan beskrivas på olika sätt. Ett konstruktionsmaterial som ska bära och fördela last brukar undersökas med avseende på *krypning*. Den bör inte vara för stor för att konstruktionen ska behålla sin ursprungliga form och inte deformeras utöver givna toleranser. Ytmaterial som ska täcka eller hålla tätt bör kunna ge efter utan att spricka om underlaget rör sig eller temperaturen skiftar. Bärande vägmateriäl under vägytan bör inte deformeras medan slitlager på ytan gärna får ge efter, utan att deformeras plastiskt. I länder med kallt klimat som också tillåter dubbdäck kan det vara svårt att finna balansen mellan slitstyrka, stabilitet och eftergivlighet för olika asfaltslager. Optimala sammansättningar brukar hittas empiriskt så länge samma material används. Problem uppstår när okända material introduceras, till exempel när en ny bitumenleverantör etablerar sig på marknaden.

Krypningseffekter undersöktes i det ovanstående tillsammans med *elastisk återgång* med MSCR, som är ett test med korta upprepade belastningar med mellanliggande pauser. Kontinuerlig eftergivlighet brukar annars provas med särskilda *duktilitetstest*. Duktilitet kan definieras som förmågan att efter deformation fungera med den nya formen eller positionen som startpunkt med bibehållna egenskaper. Materialet saknar alltså minne av ursprungsformen och liknar på det viset en vätska. Den här förmågan är nyckeln till asfaltens användbarhet under de mest skiftande omständigheter och det är viktigt att den inte förstörs med olämpliga tillsatser eller oförsiktighet vid tillverkningen, till exempel för mycket absorberande filler eller oförsiktig uppvärmning.

Charles J. Glover och medförfattare vid Texas A&M, har redovisat ett samband mellan oscillerande svepmätningar med DSR och duktilitetstest för bitumen (Glover et al, 2005). En komponerad DSR-parameter bestående av skjuvmodul och fasvinkel visade ett linjärt samband med uppmätt duktilitet (Figur 12).



Figur 12. Samband mellan DSR-mätning och duktilitet.

En komponerad DSR-parameter bestående av skjuvmodul och fasvinkel visade ett linjärt samband med uppmätt duktilitet (Figur 12).

DSR-parametern $G'/(η'G')$ kan också beskrivas som

$$G^* \cdot (\cos(\delta))^2 / \sin(\delta) / \omega$$

där:

- G^* är komplex skjuvmodul i MPa
- δ är fasvinkel i °
- ω frekvens 0,005 radianer/s uppmätt vid 15 °C.

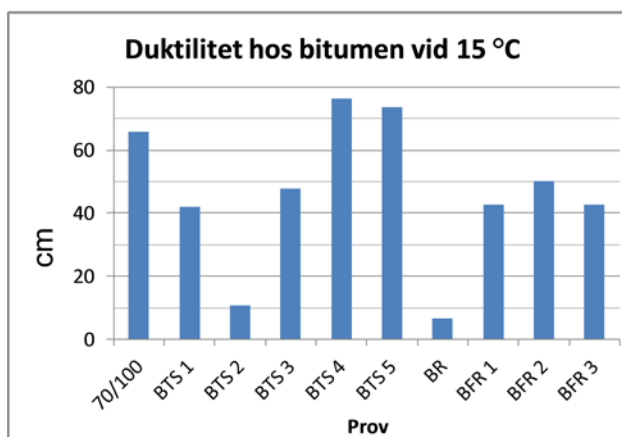
Parametervärdena utmed x-axeln är hämtade från masterkurvan från svepmätningarna med DSR.

Sambandet ändrar sig över duktilitetsvärdet 10 cm. DSR-parametern visar ändå en följsamhet med duktilitet och förmår skilja låga värden från höga. Samma värden på DSR-parametern över 10 cm kan antas motsvara samma duktilitet, även om nivåerna inte stämmer med normenligt uppmätt duktilitet.

6.3.1 Bitumen

Resultat

Duktilitet beräknad från sveptest med DSR med $0,005 \cdot G^* (\cos(\delta))^2 / \sin(\delta)$	
Prov nr	cm vid 15 °C
70/100	65,9
BTS 1	41,9
BTS 2	10,9
BTS 3	47,7
BTS 4	76,2
BTS 5	73,5
BR	6,8
BFR 1	42,6
BFR 2	50,1
BFR 3	42,7



Figur 13. Beräknad duktilitet i bitumen från sveptest med DSR.

Kommentarer

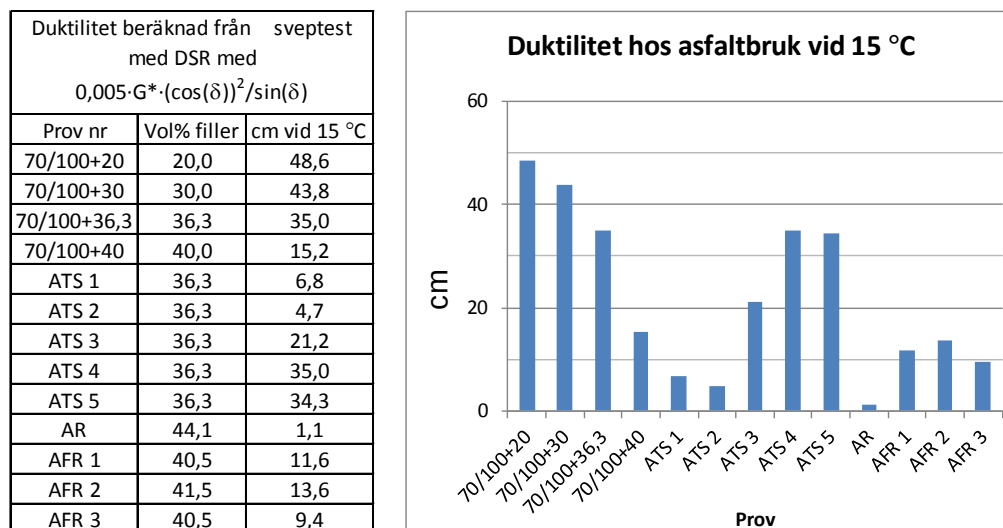
I gruppen med temperatursänkande tillsatser avviker BTS 1, BTS 2 och BTS 3 medan BTS 4 och BTS 5 är mindre påverkade.

BR är bitumen extraherat från returafalt. Resultatet stämmer med uppfattningen om hur duktilitet kan se ut i ett åldrat bitumen. Nivån anses kunna orsaka sprickor och materialsläpp från en asfaltyta. I gruppen föryngringsmedel BFR 1 – BFR 3 är resul-

taten jämförbara men befinner sig på en relativt låg nivå med tanke på att blandningarna ska efterlikna 70/100 och har alla snarlik mjukpunkt, *MP-RVB*.

6.3.2 Asfaltbruk

Resultat



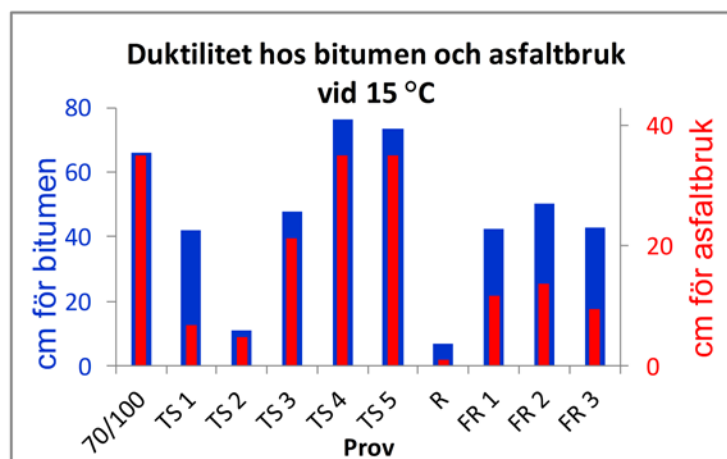
Figur 14. Beräknad duktilitet i asfaltbruk från sveptest med DSR.

Kommentarer

36,3 vol% motsvarar halten i ny tillverkad ABS 11 och 44,1 vol% är vanligt värde i retur-asfalt, betydligt över vad som sannolikt funnits från början. Det beror på nedkrossning av stenmaterialet under trafiken, vägs muts och nedkrossning under fräsning och krossning. De olika fillerhaltarna i AFR 1 – AFR 3 kommer av olika mängd tillfört föryngringsmedel, som adderar sig till bitumeninnehållet. Ökad fillerhalt har tydlig effekt på beräknad duktilitet, vilket också illustreras av 70/100+40. Vad som orsakar de låga värdena för ATS 1 och ATS 2, som innehåller samma fillermängd som övriga blandningar i gruppen, behöver undersökas närmare, eventuellt med ett verkligt duktilitetstest.

6.3.3 Jämförelse mellan bitumen och asfaltbruk

Resultat



Figur 15. Jämförelse mellan duktilitet i bitumen och asfaltbruk.

Kommentarer

Den vertikala skalan till höger för asfaltbruk i Figur 15 är vald så att stapelhöjderna blir desamma för referensproven 70/100 respektive 70/100 + 36,3 vol% filler. Resultaten för asfaltbruk går i stort i samma riktningar som för bitumen. De temperatursänkande tillsatsmedlen i TS 1, TS 2 och TS 3 visar samma tendens till lägre duktilitet i båda fallen, särskilt TS 2. Proverna TS 4 och TS 5 liknar referensprovet 70/100, även asfaltbruken. Föryngringsmedlen F 1, F 2 och F 3 ger lägre duktilitet än referenserna. Den ytterligare något lägre nivån för asfaltbruken kan förklaras med högre fillerhalt i föryngrat asfaltbruk.

Lägst duktilitet har oföryngrade prover, både bitumen och asfaltbruk. Det illustrerar behovet av att göra något åt returafaltens reologiska egenskaper, även om de redovisade föryngringsfallen inte når upp till nytillverkad kvalitet. Precis som i fallet med Blackkurvorna saknas något i försöket att helt återställa duktilitet till nytillverkad nivå men det är ändå kanske tillräckligt. Saken behöver utredas.

7. DISKUSSION

Examensarbetena har lagt grunden till fortsatta provningar i full skala. Tillsatsmedelens registrerade effekter gäller bara tillämpad mätteknik och ska inte ses slutliga utvärderingar. Även om metoderna försöker efterlikna verkligheten är det fråga om förenklingar och i det här fallet utan miljöpåverkan och åldring. I det senare avseendet finns laboratoriesimuleringar men de är i sin tur också försök till imitationer av verkligheten.

Effekten av tillsatserna har jämförts med en vanlig bitumenkvalitet och ett exempel på ett förekommande asfaltbruk med en naturfiller som används i verklig produktion.

Resultaten ändras efter åldring men förmodligen likartat för alla proverna och inte så mycket att inbördes rangordning omkastas. Det måste emellertid undersökas i fortsatta studier.

7.1 MATERIAL

Ett omtalat problem är risken för separation av filler i tillverkade bruksprover (Hesami, 2014). Det kan framförallt uppstå i provburkar som förvaras uppvärmda i flera timmar. Innan ett prov tas ut är det därför viktigt att röra om ordentligt men det krävs ingen särskild utrustning. Det räcker med en subjektiv bedömning av att all filler är homogent fördelat i hela provet. När provet sedan svalnar och förvaras kallt är risken för separation mycket liten men det måste homogeniseras igen om provet värms på nytt. Återuppvärmning ska helst undvikas och om det handlar om jämförelser måste alla prover genomgå samma uppvärmningsprocedur.

Partiklarna i fillern är mindre än 0,063 mm och vätskans viskositet omkring 100 mPa·s och uppåt vid inblandning och temperering. Vid DSR-mätningarna är temperaturen 100 °C och nedåt och bituminets viskositet från 3 000 mPa·s och uppåt till flera miljoner. Som jämförelse kan nämnas att vatten har viskositeten 1 mPa·s. De små partiklarna och bituminets tröghet gör att partikelvandringen går så långsamt att testen hinner avslutas innan någon avgörande förändring hinner inträffa. I viskositetstestet med RVB kan en viss separation ske under de första mätningarna vid hög temperatur. Ingenting tyder emellertid på att det i så fall har haft betydande inverkan på resultaten. Det är lätt att undersöka i kommande arbeten.

En intressant observation gällande föryngringsmedel är att ett effektivare medel, som kräver mindre tillsats för att mjuka upp returafaltens bitumen, samtidigt ger ett mindre tillskott till bitumeninnehållet. Det innebär att fillerhalten i bruket hamnar på en högre nivå (högre F/B-tal), vilket i sig har en förstyrkande verkan. Bruket behöver alltså i det fallet lite mer föryngringsmedel än vad själva bitumendelen behöver. Lösningen på detta är inte alldeles självklar. Ska brukets egenskaper prioriteras framför bituminets? Frågan behöver utredas.

Av Blackdiagrammen framgår att temperatursänkande tillsatsmedel inte påverkar förhållandet mellan komplex skjuvmodul och fasvinkel. Kurvan behåller sin parabelliknande form.

Blackkurvan för föryngrat returbitumen ligger lägre i diagrammet och har en brantare lutning. Formen kommer från retubituminets samband och återställs inte trots att föryngrat bitumen har samma mjukpunkt som nytillverkat bitumen. Orsaken och betydelsen är inte klarlagd. *t-hög* och MSCR ligger i alla fall på jämförbara nivåer med nytt bitumen. *t-medel* och *t-låg-DSR* ligger däremot lägre än referensen, mest beroende på höga fasvinklar, som kan tolkas positivt när det gäller resistens mot utmattningsbrott och krympsprickor vid låga temperaturer.

En skillnad som kan peka åt ett annat håll är *beräknad duktilitet*. Föryngrat bitumen och asfaltbruk återfår inte nytillverkade värden.

Tills vidare får de här observationerna markera skillnader mellan nytt och förnygrat bitumen som behöver utredas närmare.

7.2 MÄTMETODER

Mätning av viskositet och viskoelasticitet på asfaltbruk förekommer inte i specifikationer och anvisningar eftersom det tillför variabler som är unika för varje produktionsställe och leverans, nämligen typ och mängd av filler. Dessutom fungerar metoder framtagna för bitumen, till exempel Kula & Ring, inte särskilt bra med asfaltbruk. Ändå är egenskaperna i bruket som omger och sammanfogar stenmaterialet rimligtvis viktigare för att förutsäga asfaltens egenskaper än egenskaperna hos enbart bitumen (Hesami, 2014). RVB och DSR har visat god förmåga att fungera med både bitumen och med asfaltbruk men det fordras ytterligare utredningar för att ta fram metodik och gränsvärden.

RVB har väntat länge på ett genombrott i bitumensammanhang. Här finns både tillskyndare och tvivlare. De senare har, inte utan skäl, varit tveksamma till precisionen hos äldre instrument. De förra har uppskattat teknikens enkelhet och fördelar ur arbetsmiljösynpunkt. Instrumentet precision har förbättrats avsevärt, inte minst när det gäller temperaturen, som idag kan jämföras med vilken annan reologisk mätteknik som helst. Efter flera examensarbeten på LTH står det klart att RVB inte bara är tekniskt lika bra som konventionella, hittills använda bitumentester utan är *tekniskt bättre och ur arbetsmiljösynpunkt helt överlägsen* (Nilsgart/Grybb, 2014; Parhamifar/Tyllgren, 2016).

Asfalttekniker i framförallt USA knyter stora förhoppningar till användningen av DSR och har funnit samband mellan oscillerande dynamisk skjuvning och andra metoder som BBR (*Bending Beam Rheometer*) (Rowe et al, 2014) och duktilitet (töjbarhet) (Glover et al, 2005). Därmed hoppas man kunna beskriva alla grundegenskaperna i Superpave med endast ett instrument. Även om det inte skulle föreligga exakt likhet mellan DSR-mätningarna och de föreskrivna metoderna kan parametrarna omdefinieras och DSR göras till ett normbaserat instrument.

8. SLUTSATSER

Utredningens syfte var att undersöka de *viskösa* och de *viskoelastiska effekterna* och därmed inverkan på asfaltens egenskaper av olika tillsatsmedel för temperatursänkning respektive föryngring. Båda kategorierna avser att dämpa behovet av värme under tillverkning och utläggning och därmed undanröja risken för överhettning. Detta riskerar annars att förkorta asfaltbeläggningens funktionstid. Tillsatsmedlen får samtidigt inte försämra bituminets och asfaltens egenskaper i något annat avseende.

8.1 VISKOSITETSMÄTNING MED ROTATIONSVISKOSIMETER

8.1.1 Temperatursänkande tillsatsmedel

- Inverkan på rent bitumen är måttlig, 3-5 °C för BTS 1, BTS 2 och BTS 3 och 1-2 °C för BTS 4 och BTS 5. För asfaltbruken var effekten 4-8 °C respektive 2-5 °C. Detta styrker *inte* påståendena om möjliga sänkningar på 20-30 °C, som nämns i prospekt och undersökningar. Kanske inträffar något när stenmaterialet kommer med i bilden men det beror i så fall inte på asfaltbrukets viskositet utan på någon annan faktor. Det finns anledning att titta närmare på detta i nästa steg med fullskalig produktion.

8.1.2 Föryngringsmedel

- Föryngringsmedlen F1 och F3 har påtagliga likheter i uppmjukande förmåga. Returbitumen ändrades till mjukpunkten för 70/100 med 14 vikt%. Det räckte med 9 vikt% F 2, som dessutom ger ett mindre lutande samband mellan viskositet och temperatur för BFR 2. Provningarna bör upprepas med simulerad åldring.

8.1.3 Filler och asfaltbruk

- Mängden filler har stor inverkan på viskositeten i asfaltbruk. En förändring på $\pm 3,5$ vol% runt 36,3 vol% ändrar viskositeten motsvarande en temperaturförändring på 20-30 °C. Huruvida en minskad fillertillsats skulle sänka temperaturbehovet utan andra oönskade konsekvenser är inte klarlagt och behöver utredas.
- Typ av filler har betydelse för asfaltbrukets viskositet och behov av värme. Det är känt sedan tidigare. Återvunnen filler från returafalt hade något större uppstyvningseffekt än nytt granitfiller.
- Det räcker inte att beräkna behövlig mängd föryngringsmedel med utgångspunkt från extraherat returbitumens styvhet. Mängden filler uttryckt med F/B-talet måste också tas med i bilden. Hur det ska åtgärdas, med mer föryngringsmedel eller med mer bitumen eller på annat sätt, är tills vidare en öppen fråga.
- Asfaltbrukets reologiska karaktär, till exempel tendenser till icke-newtonsk beteende i viskös form, behöver undersökas närmare.

8.2 VISKOELASTISKA MÄTNINGAR MED DYNAMISK SKJUVREOMETER

8.2.1 Temperatursänkande tillsatsmedel

- I två fall, BTS/ATS 1 och BTS/ATS 2, ökade *t-hög* för både bitumen och asfaltbruk, vilket kan betyda förbättrad resistens mot spårbildning. Samtidigt ökade temperaturen för *t-medel* och *t-låg-DSR* något, vilket är en marginell försämring som brukar hänga ihop med det föregående. Förändringarna med TS 3, TS 4 och TS 5 var marginella.

8.2.2 Föryngringsmedel

- Mängden av de tre föryngringsmedlen bestämdes med mjukpunkten för 70/100 bestämd med RVB som riktpunkt. MP-RVB stämmer ganska väl med MP-DSR för alla bitumenblandningarna. Effekten är starkare vid de lägre temperaturerna *t-medel* och *t-låg-DSR*. Speciellt gäller det BFR 1 och AFR 1. Det skulle kunna betyda att föryngrad asfalt har bättre utmattningsförmåga och bättre lågtemperaturregenskaper än jungfruligt bitumen, vilket behöver styrkas med kompletterande studier, framförallt efter åldring.
- Av Blackdiagrammen och beräknad duktilitet framgår att nytt bitumen och föryngrad skiljer sig åt i reologiskt avseende, vilket också gäller för asfaltbruk. Betydelsen av detta behöver utredas tillsammans med möjligheten att helt återställa åldrat bitumen och asfaltbruk i reologiskt nyskick.

8.2.3 Filler och asfaltbruk

- Fillerhalten påverkar de viskoelastiska egenskaperna i asfaltbruket vid dimensionerande temperaturer, vilket också bör gälla egenskaperna i färdig asfaltläggning. Sannolikt har fillerkvaliteten motsvarande betydelse. Förekommande fillerkvaliteter bör undersökas och en metodik för att bestämma recept utarbetas.

9. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Studien är en förberedelse av fullskaliga försök med tillsatsmedel och andra åtgärder för att ersätta behovet av övertemperatur i asfalttillverkningen. Följande är förslag till utformning av fältförsök och uppslag till examensarbeten.

9.1 FÄLTFÖRSÖK

9.1.1 Förberedelser

- Blandningar av utvalda tillsatsmedel undersöks på motsvarande sätt som i den här undersökningen men efter åldrande värmebehandling
- Aktuell fillersort undersöks och dosering utprovas i en förberedande undersökning för optimerad sammansättning av asfaltrecept.

9.1.2 Genomförande

- Asfaltverk med parallelltrumma och kalldosering engageras
- Väghållare som tillhandahåller provytor knyts till projektet
- Utvalda tillsatsmedel tillhandahålls av leverantörer
- Vägavsnitt delas in i provytor för respektive tillsatsmedel
- Tillverkning förbereds, genomförs och följs upp
 - o Undersökning av returafalt
 - o Tillsats av föryngringsmedel och förvaring i upplag
 - o Sänkning av tillverkningstemperatur med 30 °C med hjälp av kalldoserat stenmaterial för provning av temperatursänkande tillsatsmedel
- Yrkesarbetarnas bedömning och mätningar på asfaltverket och på vägen av
 - o Hanterbarhet
 - o Rykighet
 - o Lukt
- Uttag av prover för analys och kompletterande laboratorieprovning
- Sammanställning och avrapportering.

9.2 EXAMENSARBETEN

- Återställning av åldrat bitumen och asfaltbruk till ny kvalitet i reologiskt avseende vid återvinning
- Undersökning av förekommande fillertyper och halter och deras inverkan på asfaltbrukets egenskaper
- Vidareutveckling av DSR-mätningar med oscillerande sveptest och MSCR på asfaltbruk
- Jämförelse mellan DSR-mätningar och BBR (*Bending Beam Rheometer*) för bitumen och asfaltbruk
- Jämförelse mellan beräknad duktilitet från DSR-mätningar och uppmätt för bitumen och asfaltbruk.

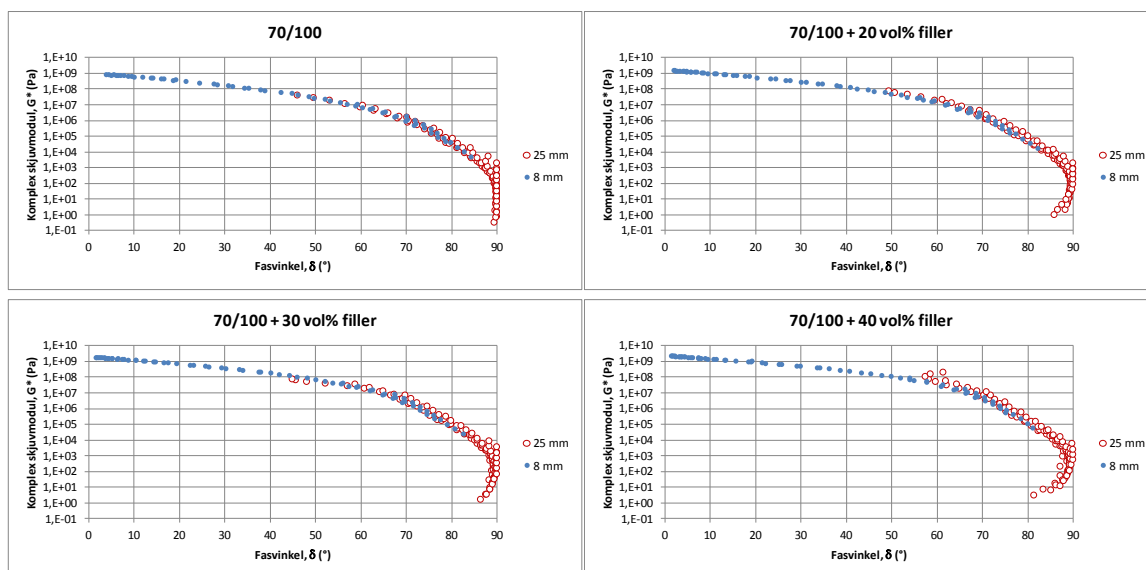
REFERENSER

1. Johansson C, Lindahl T. (2010). *Lågtempererad varmasfalt. Peab/SBUF*. Rapport 12127.
2. Tyllgren P. (2010). *Föryngring av returafalt med miljöanpassade tillsatsmedel. Skanska/SBUF*. Rapport 12230.
3. Tyllgren P. (2013). *Optimal temperatur vid varmblandad asfalttillverkning, OTA. Skanska/SBUF*. Rapport 11736.
4. Oscarsson E. (2014). *Tillsatser för temperatursänkning av asfalt med högpresterande bitumen. Skanska/SBUF*. Rapport 12761.
5. Gudmarsson A. (2015). *Utveckling av SBS-emulsioner med rejuvenatorer, Etapp 1. Peab/SBUF*, Rapport 12866.
6. Karlsson R. (2002). *Undersökning av bindemedelsföryngring med relevans vid asfaltåtervinning*. Resumé av doktorsavhandling på svenska. Vägteknik, KTH.
7. Hesami E. (2014). *Characterisation and Modelling of Asphalt Mastics and Their Effect on Workability*. PhD Thesis. KTH.
8. Nilsgart E., Grybb, T. (2014). *Rotationsviskosimeter, RVB. Ett alternativ till konventionella metoder för viskositetsmätning på bitumen*. Examensarbete, Ingenjörshögskolan, LTH.
9. Håkansson A., Härstedt M. (2015). *Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk. Inblandning av returafalt samt framtagande av mätmetod DSR*. Thesis 286. LTH.
10. Parhamifar E., Tyllgren P. (2016). *Assessment of asphalt binder viscosities with a new approach*. Eurasphalt & Eurobitume 2016, Prague.
11. Shukir A., Bakalov M. (2017). *Förbättring av asfaltens konsistens med tillsatsmedel. Mätningar med rotationsviskosimeter på bitumen och asfaltbruk*. Examensarbete, Ingenjörshögskolan, LTH.
12. Mouhsen M., Haxhibeqiri E. (2017). *Påverkan av asfaltens egenskaper efter förbättrad konsistens. Mätningar med dynamisk skjuvreometer, DSR, på bitumen och asfaltbruk*. Thesis 307. LTH.
13. *Shell Bitumen Handbook*. (2003). 5th edition.
14. Tyllgren P. (2007). *Bättre arbetsmiljö för asfaltarbete på väg*. Skanska/SBUF Rapport 11736.
15. *Superpave – Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*. (2003). Superpave series No. 1 (SP-1). Third edition. Asphalt Institute.
16. Rowe G. M., Gayle K. N., Anderson M. (2014). *The influence of binder rheology on the cracking of asphalt mixes on airport and highway projects*. Journal of testing and evaluation (JTE), ASTM, USA.
17. Glover C. J., Davidson R. R., Domke C. H., Ruan Y., Juristyarini P., Knorr D. B., Jung S. H., (2005). *Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation*. Report 0-1872-2, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas, USA

BILAGOR

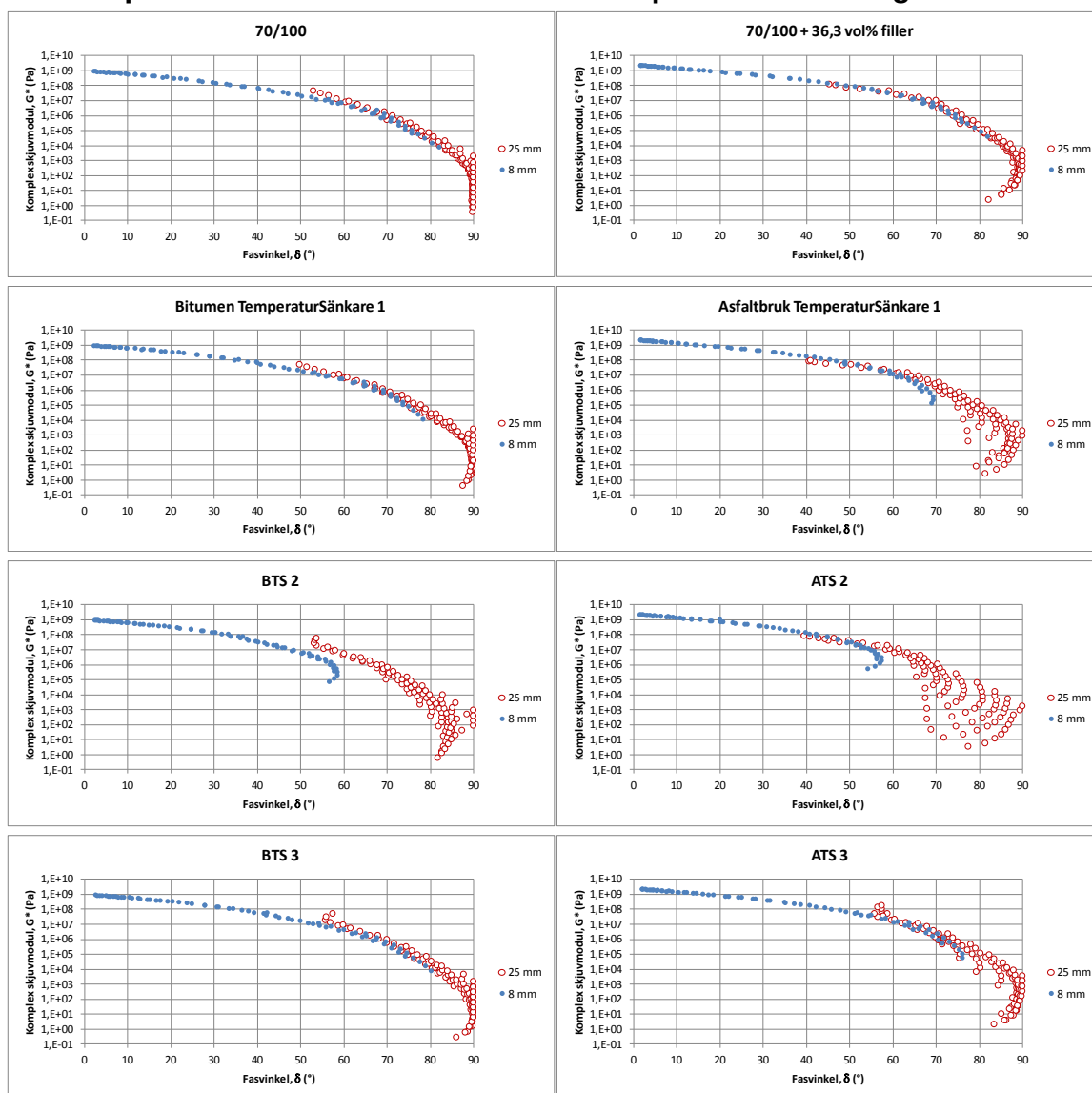
Bilaga 1. Blackdiagram

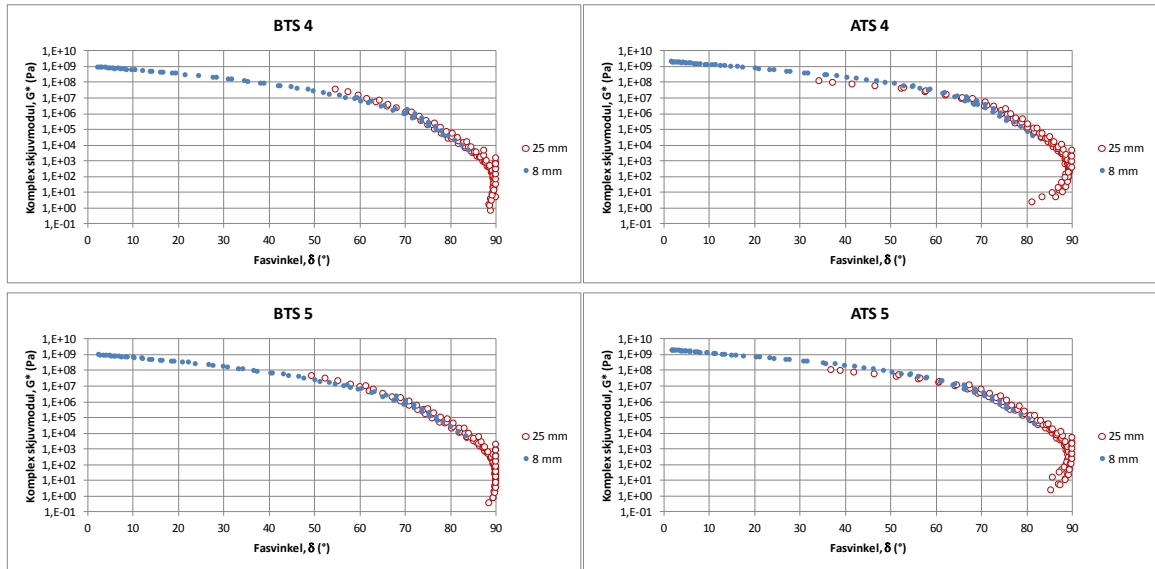
Inledande försök / Initial tests



Huvudförsök / Main investigation

Temperatursänkande tillsatsmedel / Temperature reducing additives





Förnyngsmedel / Rejuvenators

