

UNDERSÖKNING AV VISKOSITET HOS ASFALTBRUK

- Mätningar med rotationsviskosimeter på bruk med olika fillersorter och mängder



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Institutionen för Teknik och samhälle/ Trafik och väg

Examensarbete: Max Rosqvist

© Copyright Max Rosqvist

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2019

Ordlista

Asfaltbeläggning - Övre lager i en vägöverbyggnad för lastfördelning eller som slitlager

Asfaltbruk - Blandning av bitumen och filler

Asfaltmassa - Hanterbar blandning av bitumen och stenmaterial för utläggning och komprimering till en asfaltbeläggning på en väg eller yta

Bitumen - Tungt destillat av petroleumolja eller naturligt förekommande ämne med en rad olika användningsområden, bland annat bindemedel i asfaltmassa

Filler - Stenmaterial som helt passerar en siktning på 0,063 mm

Filler/Bitumen-kvot - (vikt filler)/(vikt bitumen) i ett asfaltbruk, förkortas F/B och uttrycks vanligtvis sortlöst men viktkvot i % kan förekomma som enhet; viktigt att undvika förväxling med begreppet vikthalt

Fillerhalt, bitumenhalt - Uttrycker förekomst av ämnena men måste preciseras med till exempel vikt% eller vol%

Halt - Andel av ett ämne i hela blandningen eller lösningen

Hanterbarhet - Hanterbarheten mäts med viskositet

Innehåll, mängd - Allmänt uttryck för förekomst av en komponent, som inte säger något om det inte preciseras med till exempel sorterna vikt% eller vol%

Konsistens - Allmänt uttryck för ett ämnes eller en produkts bearbetbarhet eller hanterbarhet för att uppnå ett önskat syfte; kan beskrivas genom mätning av viskositet

Kvot - Förhållandet mellan del komponenterna i en blandning.

Mjpk - Mjukpunkt för bitumen är temperaturen när den dynamiska viskositeten är 1 300 000 mPa·s; tillståndet har tidigare definierats av mätmetoden Kula & Ring

RVB - Rotationsviskosimeter av fabrikat Brookfield för bestämning av dynamisk viskositet

Stabiliseringsindex - F/B-värde som resulterar i ökning av MP = 20 °C

Vikthalt - Vikten av en komponent i en blandning dividerat med vikten av hela blandningen uttryckt som vikthalt i %; kan skrivas vikt% om risk för missförstånd inte föreligger

Viktkvot - Vikten av en komponent i en blandning dividerat med vikten av en annan komponent i blandningen och bör uttryckas som viktkvot i % för att undvika förväxling med begreppet vikthalt; exempel: fuktkvot = (vikt av fukt eller vatten)/(vikt av torrt material); kallas ibland oegentligt för "vattenhalt", även i tekniska sammanhang, av historiska skäl

Viktprocent - anger blandningsförhållande mellan olika ämnen i en blandning där de ingående ämnenas viktandel anges av blandningens totalvikt.

Viskositet - Trögflutenhet som kan mätas med en rad olika metoder och uttryckas med olika mått, till exempel för dynamisk viskositet, mPa·s (= cP, centipoise) eller kinematisk viskositet, mm²/s (= cStoke)

Viskositetslinje - Det grafiska sambandet mellan mätpunkterna i en mätserie i Heukeloms diagram. Beskrivs med hjälp av WLF samband.

Volymhalt - Volymen av en komponent i en blandning dividerat med volymen av hela blandningen uttryckt som volymhalt i %; kan skrivas vol%

WLF samband - Det matematiska sambandet som motsvarar viskositetslinjen. Består av 3 konstanter, C1, C2 och referenstemperatur (här: Mjukpunkt)

Sammanfattning

Bitumen och dess egenskaper har länge ansetts vara den viktigaste faktorn för en asfalts funktion. Egenskaperna som finns hos bitumen är relativt enkla att kontrollera. Eftersom egenskaperna är relativt lätta att kontrollera och mycket kunskap redan finns om bitumen har dess egenskaper ansetts vara det som är avgörande gällande hur en asfaltbeläggning kommer att agera då den brukas. Mätmetoderna, mjukpunkt och penetrationstal, som används för att kvantifiera egenskaperna hos bitumen är relativt lättanvända. Vid användning av mätmetoderna ges ett mätetal på bituminets beteende. Mätetalen som ges vid mätmetoderna har, under flera år av uppföljning och undersökning, kunnat kopplas till asfaltens egenskaper. Metoderna som används är accepterade inom branschen då de visat sig lättanvända och tydligt kopplade till verkligheten. Mjukpunkt och penetrationstal brister dock då bituminet blandas med tillsatser och nämnda metoder kan inte beskriva vad som händer med bituminet efter blandning då det saknas historisk kunskap.

Sedan några år tillbaka har det framkommit att det är asfaltbruket, det som uppstår vid blandning av bitumen och filler, som styr asfaltens eftergivlighet, stabilitet och i förlängningen hållbarhet och inte bituminet. En standard för utvärderingar och tester har dock aldrig gjorts på asfaltbruk i något omfattande arbete. Det bristande intresset för asfaltbruk beror förmodligen på svårigheterna som finns att mäta materialets egenskaper då materialet inte lämpar sig för de traditionella mätmetoder som finns. En annan anledning kan vara att fillerns egenskaper kan variera beroende på vilket asfaltverk fillern kommer från och ibland kan fillerns egenskaper variera över tid. Verkligheten beter sig som sådan men det komplicerar även utformningen av regelverk för tillverkning och kvalitetskontroller.

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur viskositeten hos asfaltbruk påverkas med filler från olika asfaltverk i en rotationsviskosimeter av typ Brookfield, RVB i ett laboratorium på LTH, Lund. Även olika halter av filler i asfaltbruket undersöks. Syftet är även att utveckla mätmetoden med RVB.

RVB har använts och utvecklats i en rad examensarbeten på LTH och har visat upp god precision för rent bitumen och bitumen med tillsatser som vax och polymerer. Trots möjliga problem med homogenisering och separation verkar metoden kunna fungera lika bra för fillerinblandat asfaltbruk.

Resultaten från RVB:n presenterades grafiskt i Heukelom BTCD-diagram i form av serier av mätpunkter sammanbundna till viskositetslinjer. BTDC-diagrammet visar hur viskositet och temperatur förhåller sig till varandra och

hur bitumen reagerar på olika filler samt olika fillerhalter vid samma temperaturer.

Alla mätvärden i en serie utgörs av enkelmätningar. Inga ommätningar har gjorts eller strykningar av extremvärden. Med hjälp av WLF-sambandet, som är viskositetsmätningarnas masterkurva, kan viskositeten beräknas vid valfri temperatur och omvänt, temperaturen kan beräknas vid valfri viskositet. Det senare används för att beräkna Mjukpunkt enligt RVB. Efter genomgång av resultaten valdes en viskositet som kan anses vara acceptabel under blandningsförloppet. Temperaturen vid denna viskositet är vid sidan av Mjukpunkt jämförelseparameter för de olika asfaltbruken och respektive fillersorter.

Från resultaten kan man se att filler från de studerade, vanligt förekommande bergmaterialen tycks inte skilja sig åt i förstyvning av asfaltbruket. Däremot har *mängden* filler stor betydelse och frågan är hur Filler/bitumen-kvoten verkligen ser ut på asfaltverken. Det kontrolleras lätt i sammansättningsanalysen av asfaltmassorna och i asfaltverkens doseringsrecept.

Utbyte av förekommande naturfiller är inte särskilt populärt av ekonomiska och praktiska skäl (man har kanske redan ett överskott) men filler från kalkberg har en gynnsam inverkan på asfaltbrukets smidighet. Det är ingen nyhet men nu finns det mätetal på effekten.

Cement har kraftigare förstyvande inverkan på asfaltbruk jämfört med övriga fillertyper. Eftersom det inte används som filler i Sverige utan bara som vidhäftningsmedel i små tillsatser har det ingen praktisk betydelse.

Ett högre Rigdenhållrum anses orsaka ökad förstyvning av asfaltbruk. Fallet med cement, som har relativt lågt Rigdenhållrum, visar att det måste finnas andra faktorer som betyder mer. Sådana faktorer kan vara kornfördelningen, som inte kunde bestämmas här, eller kemisk inverkan.

Nyckelord: Filler, bitumen, asfaltbruk, viskositet, rotationsviskosimeter

Abstract

Bitumen and its properties have long been considered the most important factor in the function of asphalt. The attributes that are present in bitumen are relatively easy to control. Since the attributes are relatively easy to control and a lot of knowledge already exists of bitumen its attributes are considered to be the decisive factor in how an asphalt coating will act when it is being used. The measurement methods, softening point and penetration numbers, which are used to quantify the attributes of bitumen are relatively easy to use. When using the measurement methods, a measurement number is given on the behavior of the bitumen. The measurement figures given in the measurement methods have, for several years of follow-up and examination, been able to be linked to the properties of the asphalt. The methods used are accepted in the industry as they have proved to be easy to use and clearly linked to reality. Softening point and penetration number, however, fail when the bitumen is mixed with additives and said methods cannot describe what happens to the bitumen after mixing since there is no historical knowledge.

For some years now, it has emerged that it is the asphalt mastics, that comes from mixing bitumen and filler, which controls the asphalt's resilience, stability and, in the long run, durability and not the bitumen. A standard for evaluations and tests, however, has never been made on asphalt plaster in any extensive work. The lack of interest in asphalt plaster is probably due to the difficulties that exist in measuring the properties of the material since the material is not suitable for the traditional measuring methods that exist. Another reason may be that the properties of the filler may vary depending on which asphalt plant the filler comes from and sometimes the properties of the filler may vary over time. Reality behaves as such, but it also complicates the design of regulations for manufacturing and quality controls.

In this thesis work, the viscosity of asphalt mastics is examined with filler from various asphalt plants in a rotary viscometer of type Brookfield, RVB in a laboratory at LTH, Lund. Different levels of filler in the asphalt mastics are also investigated.

RVB has been used and developed in a number of degree projects at LTH and has shown good precision for pure bitumen and bitumen with additives such as wax and polymers. Despite possible problems with homogenization and segregation, the method seems to work equally well for filler-mixed asphalt mastics.

The results from the RVB were graphically presented in Heukelom BTCD diagram in the form of series of measurement points linked to viscosity lines.

The BTDC diagram shows how the viscosity and temperature relate to each other and how bitumen reacts to different filler and different filler contents at the same temperatures.

All measurements in a series consist of single measurements. No reminders have been made or deletions of the extremes. Using the WLF connection, which is the master curve of the viscosity measurements, the viscosity can be calculated at any temperature and vice versa, the temperature can be calculated at any viscosity. The latter is used to calculate Soft Point according to RVB. After reviewing the results, a viscosity was chosen which can be considered acceptable during the mixing process. The temperature at this viscosity, in addition to the soft point, is the comparative parameter for the various asphalt uses and the respective types of fillers.

From the results it can be seen that filler from the studied, commonly occurring rock materials does not appear to differ in stiffening of the asphalt mastics. However, the *amount* of filler has great influence and the question is how the Fille/Bitumin value really looks like on the asphalt works. It is easily controlled in the compositional analysis of the asphalt mixes and in the asphalt plant dosing recipes.

Replacement of existing natural filler is not very popular for economic and practical reasons (one may already have a surplus) but lime rock filler has a beneficial effect on the flexibility of asphalt use. It is no news, but here are measurement numbers to illustrate the effect.

Cement has a stronger stiffening effect on asphalt mastics compared to other types of fillers. Since it is not used as filler in Sweden but only as an adhesive additive in small quantities, it is of no practical significance.

A higher Rigden porosity is considered to cause increased stiffening of asphalt use. The case of cement, which has relatively low Rigden porosity, shows that there must be other factors of greater importance. Such factors may be the grain size distribution, which could not be determined here, or chemical effects.

Keywords: Filler, bitumen, asphalt plaster, viscosity, rotational viscometer

Förord

Examensarbetet har skrivits som en slutgiltig examination i min högskoleingenjörsutbildning inom väg- och trafikteknik vid Lund Tekniska Högskola, Campus Helsingborg. Resultat och slutsatsdelen har skrivits tillsammans med min handledare Per Tyllgren. Laboratorieförsöken har utförts i Reologiska laboratoriet i V-Huset på Lunds Tekniska Högskola i Lund.

Jag vill rikta ett stort tack till Per Tyllgren för all hjälp och allt stöd under arbetets gång. Pers stora intresse för studien har verkligen varit till enorm hjälp.

Ett tack även till LTH och Ebrahim Parhamifar för att ha låtit mig använda deras RVB under studien.

Tack även till Skanska och deras personal som har hjälpt till att ta fram material till studien.

Helsingborg i maj 2019

Max Rosqvist

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Metodbeskrivning	3
2 Litteraturstudie	4
2.1 Asfalt	4
2.2 Bitumen	4
2.2.1 Penetrationstal	5
2.2.2 Mjukpunkt	5
2.2.3 Åldrande av bitumen	6
2.3 Filler	6
2.4 Asfaltbruk	6
2.4.1 Rigdenhållrum	7
2.4.2 Samverkan bitumen och filler	9
2.5 Reologi	10
2.5.1 Viskositet	11
2.5.2 Elasticitet	12
2.5.3 Viskoelasticitet	12
2.5.4 RVB	13
2.5.5 Heukeloms BTDC	14
2.5.6 Newtonsk och icke newtonsk vätska	15
3 Mätteknik och metod	16
3.1 Laboratorieutrustningar	16
3.1.1 Utrustning	17
3.1.2 Spindel	17
3.1.3 Provrör	18
3.2 Genomförande av test	19
3.3 Fillersorter	30
3.4 Provberedning	31
4 Resultat	32
4.1 Insamling och bearbetning av mätdata	33
4.2 Viskositet	34
4.2.1 Kommentarer och diskussion	35
4.3 Uppstyvning med olika mått	35
4.3.1 Kommentarer och diskussion	37
4.4 Repeterbarhet	37
4.4.1 Kommentarer och diskussion	38
5 Slutsatser	38

5.1 Mätmetod	38
5.2 Material	38
6 Förslag till fortsättning.....	39
7 Referenslista	39
BILAGOR	42
Bilaga 1. Sifvertabeller över viskositetsmätningar med RVB	43
Bilaga 2. Heukeloms BTDC-diagram över mätningar med RVB	46
Bilaga 3. Beräknade värden med WLF-samband och polynom.....	47
Bilaga 4. Sifvertabeller över upprepade mätningar med RVB.....	49

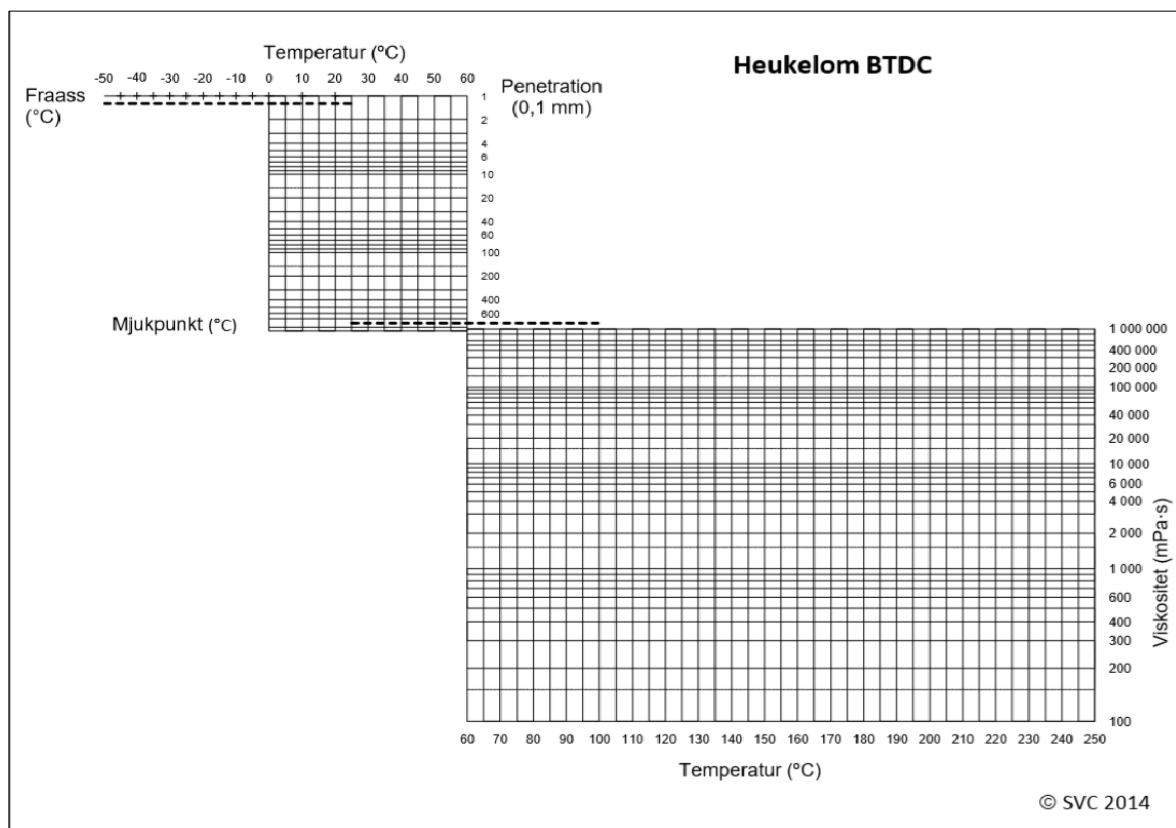
1 Inledning

1.1 Bakgrund

Mjukpunkt och penetrationstal har traditionellt varit tester som utförts på bitumen för att utvärdera dess egenskaper. Bituminets fysiska egenskaper har sedan kopplats till en asfaltkonstruktions prestation med hjälp av empiri. Testerna kan dock endast testa egenskaperna vid en given temperatur, tid och belastning. Testerna ger heller ingen möjlighet att ge en verklig utvärdering av de effekter som inblandningen av olika tillsatser i bitumen ger[1,2,3].

Bitumen sägs vara den enskilt viktigaste komponenten i asfalt och är relativt enkel att beskriva och undersöka med hjälp av mjukpunkt och penetrationstal. Historiskt har frågor om asfaltkvalitet haft mycket fokus på bitumen då det har varit bekvämt och effektivt. Asfaltens eftergivlighet, stabilitet och hållbarhet ges dock mest av asfaltbruket som bildas då bitumen blandas med filler. Anledningen till att brukets egenskaper inte beskrivs är för att det saknas mätmetoder som har en tillräcklig precision och repeterbarhet och kopplingar till erfarenheter från fältet[1,2,3,15].

För att mäta viskositeten, dvs. trögflutenheten i vätskor, och därmed också i bitumen används en rotationsviskosimeter av typ Brookfield. En RVB har en hög precision och resultaten presenteras i Heukelom - Bitumen Test Data Chart (BTDC) diagram, se figur 1. BTDC-diagrammet visar hur viskositet och temperatur förhåller sig till varandra och hur olika bitumen uppträder vid samma temperaturer. Vid blandning och utläggning av bitumen är det bra att känna till viskositeten vid en viss temperatur. Är temperaturen för låg eller för hög blir slutprodukten inte optimal [4]. I dagsläget används inte RVB flitigt i branschen. Mätmetoden med viskositetsmätningar med RVB används inte i branschen på grund av att det inte finns tillräckligt med kunskap kring tekniken, okunnighet kring mätmetoden samt tröghet i regelverken [4]. Detta är det 9:e arbetet som utförs med RVB på LTH.



Figur 1 Heukelom BTDC diagram

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att kontrollera hur viskositeten påverkas hos asfaltbruk med olika halter fyller samt fyller från olika bergtäkter. Syftet inkluderar även att utveckla mätmetoden med RVB.

Studien görs då det, enligt författaren, är asfaltbruk och inte bitumen som är av störst intresse för att förutspå en asfaltmassas egenskaper.

1.3 Avgränsningar

Studien är begränsad till 6 olika naturfyller från leverantörer till asfaltverk och två referensfyller: kalkbergsfyller och cement. Fyra mängder provas med samma volymhalt för varje fyller, de olika proven kommer rapporten att benämnas som 1,2,3 och 4. Endast en bitumensort används: penetrationsbitumen 70/100.

Utöver fyllrens påverkan av viskositet undersöktes kompakt densitet och Rigdenhållrum. Inga korngradering undersöktes eftersom utrustningen inte hade installerats.



Figur 2 Rotationsviskosimeter, RVB med tillhörande värmeelement, spindel, lock, tång samt provrör med provrörshållare

1.4 Metodbeskrivning

För att ge en bakgrund till reologiämnet gjordes en litteraturstudie på bitumen samt tillverkningsprocessen av asfalt.

Viskositeten mäts via laborieförsök där en rotationsviskosimeter har använts enligt LTH-metoden. Laborieförsöken har utförts på ett laboratorium på LTH i Lund. Det har utförts prover på asfaltbruk med filler från olika bergtäkter där viskositeten har bedömts.

Resultaten redovisas i Heukelom diagram, se figur 1.

Testerna utförs i en rotationsviskosimeter av typ Brookfield, DV-II + Pro EXTRA. För mätningarna användes samma spindel, SC4-27, för alla temperaturer och viskositeter, se figur 2.

2 Litteraturstudie

Litteraturstudien är utförd för att samla befintlig kunskap kring området, ge underlag för analys av resultat från tester, ge läsaren möjlighet att förstå och sätta sig in i resultaten och ge en grund för läsaren att sätta sig in i ämnet reologi och hur ämnet kopplar till asfaltmassors egenskaper.

2.1 Asfalt

Asfalt är väldigt populärt som slitlager på vägar i Sverige, detta visas då en stor del av vägnätet är belagt med asfalt. Det som gör asfalten så populär som slitlager är då den ger en flexibel överbyggnad som är vattentålig och har elastiska egenskaper som medger återhämtning efter deformationer[5].

Asfalt består till största delen av 3 materielgrupper: Bitumen, filler och stenmaterial. Stenmaterialet utgörs av antingen krossad sten eller natursten. Krossmaterial är det vanligaste då natursten anses vara en ändlig produkt, grusåsar anses viktiga för att rena och magasinera grundvatten. Kollar man en asfaltbeläggning är den ungefär 95% sten i viktprocent. Eftersom sten är det materialet som förekommer mest i en asfaltbeläggning är en asfalts egenskaper starkt knutna till de egenskaper som stenmaterialet har. Detta gäller framförallt hållfastheten hos asfalten[5].

Stenmaterial väljs med avseende på vilka trafiklaster som ska överföras till underlaget. I Norden måste hänsyn tas till dubbtrafik vid val av stenmaterial.

Vägens konstruktion beror mycket på vilka olika belastningar och yttre förhållanden som kommer påverka vägen. Förhållanden som gör att det kan variera är trafikmängd, trafiktyper, klimat och geologiska förutsättningar. När det kommer till uppbyggnaden av asfalten kan den ändras med: storlek på stenmaterial, bitumenhalt, bitumentyp och fillermängd[6].

2.2 Bitumen

Bitumen är det i en asfaltmassa som binder samman stenmaterialet. Det är ett mörkbrunt till svart, svårflyktigt, fast till halvfast material med bindande förmåga. Bitumen kan bildas i naturen i form av naturasfalt men framställs oftast genom raffinering av petroleum.

Bitumen består av tre huvuddelar, oljor, partiklar av kolföreningar som svävar i oljorna och lättflytande kolväten som omger partiklarna som ett

skyddsskikt[5].

I asfalt är det bitumen som är den viktigaste komponenten då det är den som ger materialet dess karaktär. Typ av bitumen måste väljas utifrån klimatförutsättningar och trafiklast[5].

De huvudsakliga uppgifterna för bitumen i en asfaltbeläggning är att fungera som kitt, skydda stenmaterialet från krossning, ge konstruktionen förbättrad lastfördelande egenskaper och elastiska och viskösa egenskaper. Bitumens elastiska egenskaper ger konstruktionen en möjlighet att återhämta sig efter deformationer. De viskösa egenskaperna ger konstruktionen förmågan att forma sig efter rörelser utan att gå till brott. Bitumen gör med andra ord beläggningen flexibel[5].

Asfaltmassa får resistens mot stensläpp, krackelering och spårbildning från bitumen. Både krackelering och spårbildning är kraftigt beroende av bitumens viskoelastiska egenskaper[7].

Bitumen är en termoplastisk, viskoelastisk vätska som beter sig som en elastisk solid vid låga temperaturer och/eller vid korta belastningar. Med vetskapen att bitumen är beroende av både temperatur och lasttid kan bitumens reologiska egenskaper beskrivas av spänning-, töjnings-, tids- och temperaturs respons[8].

2.2.1 Penetrationstal

Penetrationstal är ett sätt att definiera kvalitén på bitumen. Detta görs genom att mät penetrationen på bituminet vid 25°C. Mätmetoden fungerar på så vis att en nål med viss tyngd sjunker ner i ett prov med bitumen under en viss tid. Penetrationstalet anger sedan de tiondels millimeter som nålen penetrerat bituminet. Kvalitén i bindemedlet anges ofta som ett intervall, t.ex. 70/100 vilket då innebär att penetrationstalet är mellan 70 och 100. Detta är dock inte det enda som ska uppfyllas för att bindemedlet ska kallas 70/100, utan det finns andra krav också. De kraven kommer inte tas upp i denna rapport[5].

2.2.2 Mjukpunkt

Bitumens smältpunkt är inte definierad, däremot blir bitumen mjukare och mer lättflytande vid temperaturökning. Istället för en specifik smältpunkt hos bitumen pratar man om mjukpunkt, en punkt som markerar då bitumen övergår från att vara styvt till att bli mjukt[9]. Mjukpunkten för rent bitumen har historiskt bestämts med Kula & Ring-metoden. Kula & Ring-metoden fungerar enbart på rent bitumen utan föroreningar eller tillsatser. För andra bitumensorter än rent bitumen kan mjukpunkten bestämmas vid den temperatur då den dynamiska viskositeten är 1 300 00 mPa·s[9,10]. En fungerande metod som mäter mjukpunkten för alla typer av bitumen, vilket

visat sig vid flera examensarbeten vid LTH, är rotationsviskosimeter av modell Brookfield, RVB.

2.2.3 Åldrande av bitumen

Åldring av bitumen brukar delas in i två delar: kortsiktiga och långsiktiga, se figur. Den kortsiktiga åldringen sker vid anläggningen då bindemedlet utsätts för värme som ökar viskositeten och ändrar de reologiska och fysiokemiska egenskaperna. Egenskaper som ändras är t.ex. komplex skjuvmodul och vidhäftning. Den långsiktiga åldringen sker då vägen används och då genom att den successivt åldras och hårdnar genom olika mekanismer[11]. Direkt efter utläggning av den ny tillverkade asfalten börjar den oxidera då den kommer i kontakt med syre [12].

2.3 Filler

Filler är den finkorniga delen av stenmaterialet i en asfaltmassa och spelar tillsammans med bitumen en viktig roll. Vid produktion avskiljer man filler från resten av stenmaterialet vid uppvärmning av materialet, fillern understiger då oftast 0,125 mm. 0,125 mm används ofta som gräns vid undersökningar av materialet (SS-EN 13179–1). I den här studien definieras filler som material mindre än 0,063 mm, vilket ansluter till beskrivningen av test för asfaltbruk i andra sammanhang, bland annat DIN 52065 [29].

Fillerns huvudsakliga uppgift är att tillsammans med bindemedlet fylla de hålrum som skapas av de större stenfraktionerna i asfaltbeläggningen och binda samman de större stenfraktionerna. Fillern och bindemedlet ger då en asfaltbeläggning en god hållfasthet och beständighet. Då fillern blandas med bitumen ges en blandning med högre viskositet än bara rent bitumen. Filler kan även användas för att förbättra den färdiga beläggningens stabilitet [5].

2.4 Asfaltbruk

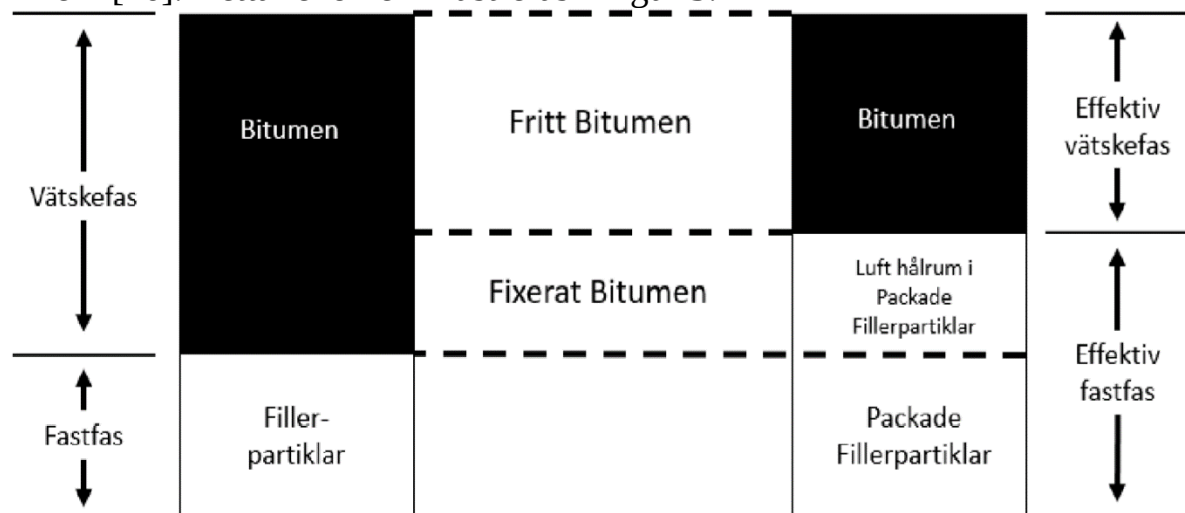
Asfaltbruk är det material som fås av att blanda bitumen, fillermaterial och eventuella tillsatsmedel, exempelvis polymerer och fibrer. Materialets egenskaper varierar mycket beroende på typ av bindemedel, typ av filler och kvoten filler/bitumen. Enligt Kavussi och Hicks [13] kan effekterna av kemiska reaktioner mellan de ingående materialen anses vara obefintliga eller försumbara. De anser att det framförallt är Rigdenhålrummet hos filler som bestämmer hur filler kommer att påverka bitumen. Högre Rigdenhålrum ger ett styvare asfaltbruk. Gällande den kemiska reaktionen mellan filler och bitumen menar Liao et. al. [2] att det finns belägg för att filler med mer

reaktiva komponenter har en stark påverkan. Effekterna av en mer reaktiv fyller är framförallt märkbar för de reologiska egenskaperna hos asfaltbruk vid höga temperaturer. De anger dock att detta gäller då ett reaktivt bitumen paras med den aktiva fillern.

Ett asfaltbruks egenskaper är starkt bundna till egenskaperna hos bindemedlet och fillern som använts. Vid låga volymer av fyller kan även asfaltbruk, likt bitumen, ses som en newtonsk vätska, men vid större andelar, då partiklarna i asfaltbruket ges möjligheten att interagera, kommer materialet att bete sig som en icke-newtonsk vätska [14]. Enligt Chen et. al. [15] påverkas asfaltbrukets egenskaper av hur bitumen binder till fillerns yta, ett finare fillermaterial har större area per gram för bindemedlet att interagera med.

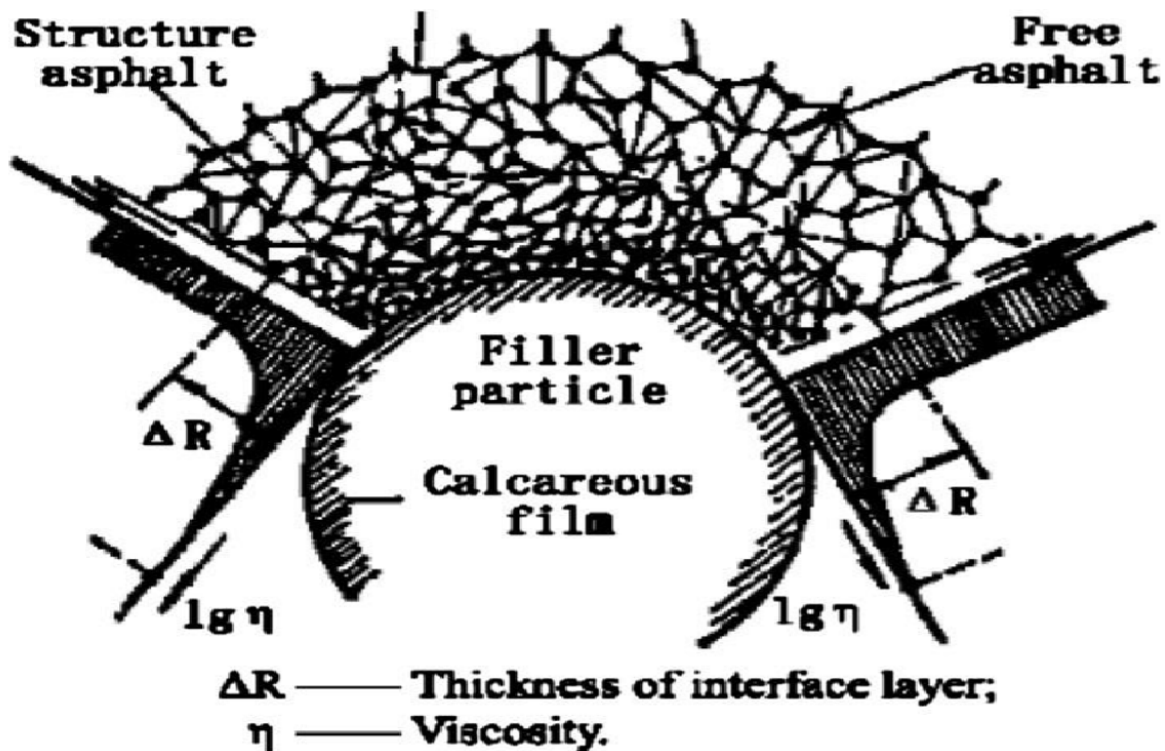
2.4.1 Rigdenhållrum

Rigdenhållrum är ett mått på volymen bitumen som direkt påverkas av fillern som tillsätts för att skapa ett asfaltbruk. Denna volym refereras vanligen till som Rigdenhållrum eller influerad volym. Denna volym kan bestämmas för en fyller, den ger ett mått på hur mycket av fillern är hållrum. Enligt Clopotel et. al. [16] menade Rigden att den mängd bitumen som fyller ett opackat fillers hållrum motsvarar volymen av det influerade bitumen. Genom detta antagande kan en då mäta mängden influerat bitumen genom att mäta hållrumshalten i fillern [16]. Detta fenomen illustreras i Figur 3.



Figur 3 Schematisk presentation av Rigden modellen [16]

Sen modellen togs fram har Rigdenhållrum använts för att kvantifiera en fillers inverkan på egenskaperna hos ett asfaltbruk [2,3,14,17,18]. Modellen har kompletterats av exempelvis Tunncliffe (1962) som lade fram teorin att inverkan av fillern vad avtagande med avståndet från partikeln, detta illustreras i Figur 4 [16].



Figur 4 Illustration över hur filler interagerar med bitumen [15]

Flera studier har utförts där de har undersökt rigdenhållrummet hos olika fillermaterial. Liao et. al. [2] har utfört en studie där de har mätt rigdenhållrummet för sandsten, kalk och cement. I deras studie redovisas värden för samma eller liknande fillertyper som undersökts i denna studie. Resultaten av denna studie redovisas i Tabell 1. Begreppet effektiv volym brukar användas som proxy-värde för att kvantifiera effekterna av en fillers påverkan på ett asfaltbruk. Effektiv volym är volymen filler och ett adsorberat lager bitumen kring partiklarna[2].

$$V_e = [100 \div (1 - \text{Rigdenhållrum})] * V_f$$

V_e = Effektiv volym

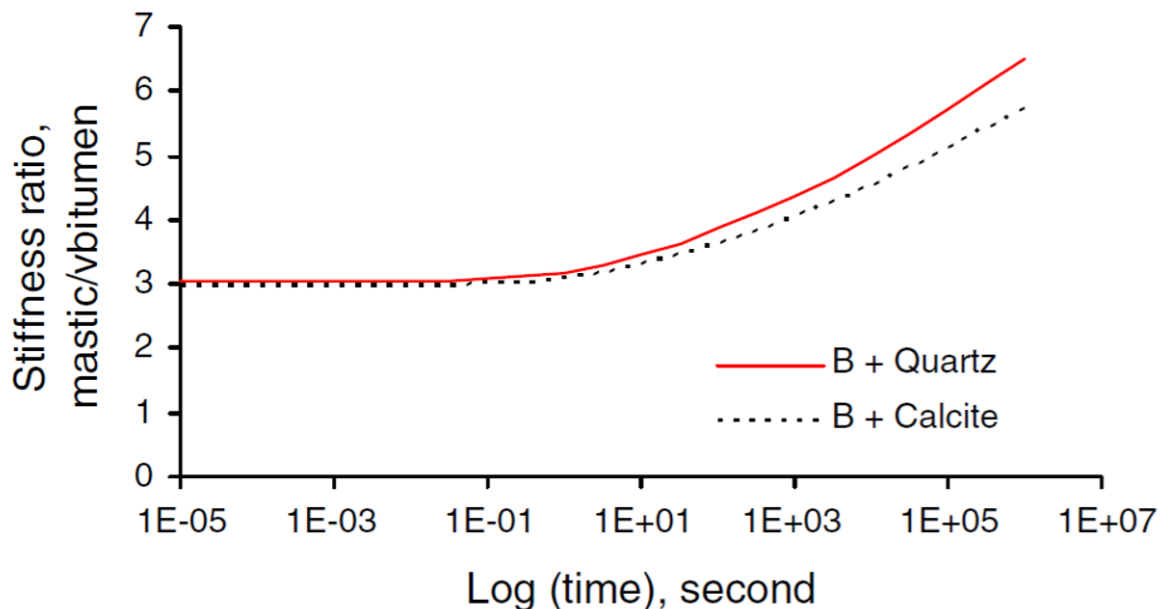
V_f = Volym filler

Tabell 1 Rigdenhållrum och effektiv volym

Table 1. Mineral filler concentration levels of bitumen-filler mastic						
Filler type	Specific gravity	Specific surface (m ² /g)	Rigden void (%)	Mass content (%)	V_f (%)	V_e (%)
Limestone	2.74	1.3	24.9	15	6.2	8.3
				35	16.7	22.2
				65	40.9	54.4
Cement	3.18	1.4	28.4	35	14.7	20.6
				65	37.3	52.1
Gritstone	2.65	6.0	32.9	35	17.2	25.6
				65	41.7	62.1

2.4.2 Samverkan bitumen och filler

Chen et. al. [15] har kunnat påvisa att fillers, vid normala inblandningshalter (ca 36 volymprocent), påverkan på asfaltbrukets styvhet är försumbar vid korta lasttider. Detta förklaras med att vid dessa korta lasttider är bitumen elastiskt dominant nog att det inte låter partiklarna interagera. Detta betyder att bitumen själv tar alla laster. Detta fenomen illustreras i figur 5.



Figur 5 Fillers påverkan av asfaltbruk beroende på lasttid [14]

I figur 5 ställs styvhetsration från fillern mot lasttid. Med grund i tid-temperatur superpositioneringsprincipen menar Chen et. al. [15] att detta fenomen kan tolkas om till temperatur. Detta betyder att en filler inte skulle påverka ett asfaltbruks egenskaper lika mycket vid låga temperaturer som vid höga. Anledningen till att effekten av filler blir större vid högre temperaturer är att bitumen övergår till ett mer visköst material medan fillern förblir opåverkad och fortsätter agera elastiskt [15].

Hesami et. al. [14] hypotiserar att fillers påverkan på asfaltbruks reologi delvis beror på att när fillern binder till bitumen förändrar fillern det kringliggande bitumens reologi. Detta betyder att det bitumen som befinner sig kring fillern kommer att få andra egenskaper vad gäller exempelvis viskositet och styvhet. De hävdar även att dessa förändrade egenskaper kan manipuleras genom att variera fillermaterialets utformning och storlek. Hesami et. al [14] menar att denna påverkan som fillern har på bitumen kommer att vara avtagande med avstånd från fillerpartiklen, detta illustreras i figur. Detta resonemang lades fram redan av Ridgen år 1947 och har sedan dess stått som den huvudsakliga förklaringen till hur filler påverkar ett asfaltbruk [16]. Enligt Clopotel et. al. [16] presenterar Ridgen i sin publikation från 1947 hypotesen om ett influenslager av bitumen som binder sig till fillern. Det är detta influenslager

som påverkar asfaltbrukets egenskaper. I samma studie presenterar Ridgen även en metod för att definiera den influerade volymen bitumen. Denna volym benäms som Ridgenhålrums och behandlas i kap 5.4.1 Ridgenhålrums.

Enligt hypotesen framlagd av Hesami et. al. [14] kommer de reologiska egenskaperna hos asfaltbruket att vara starkt bundna till hur fillermaterialets och bitumens kopplingar ser ut. Hur bitumen och fillerpartiklarna samverkar kan, enligt Hesami et. al. [14] delas upp i tre huvudgrupper: (1) Armering av bitumen till följd av fillerpartiklar, (2) den fysokemiska interaktionen mellan filler och bitumen och (3) partikel-partikelinteraktion. Fysokemisk förstärkning mellan bitumen och filler bildar ett adsorberat lager av bitumen och ett influerat bitumenlager kring fillerpartiklarna. Denna effekt är beroende på hur fillern interagerar med bitumen, detta betyder att en bör ta hänsyn till storleken av den influerade mängden bitumen, och inte bara storleken på fillern, vid framtagande av asfaltbruk.

Detta betyder att en mindre mängd filler med finare material, men en mer aktiv yta, kan ge samma effekt som ett större filler. Det är detta fenomen som Hesami et. al. [14] menar förklarar fenomenet som även Chen et. al. [15] observerar i sin studie, samma mängd av olika filler kan ge olika resultat. Chen et. al. [15] förklarar i sin studie fenomenet med att en mindre fillerpartikel ger bitumen en större totalyta att interagera med. Hesami et. al. [14] menar att finare fillerpartiklar kommer att ha en större inverkan då de kommer att medge en ökad interaktion mellan bitumen och filler, som Chen et. al [15] också hävdar. Hesami et. al. [14] går dock ett steg längre och tillskriver effekten till mängden adsorberat bitumen, som också ökar när partikelstorlek i fillern minskar.

Det influerade lagret har också en "rundande effekt" på fillern enligt Hesami et. al. [14]. Detta betyder att fillerpartiklarna lättare kan rotera i bitumen eftersom bitumen påverkar det influerade lagret lika mycket som det skulle påverka en fri partikel. Den rundande effekten skapas av den sfär som bitumen skapar kring partiklarna. Detta kommer leda till ett minskat motstånd mot flöde i asfaltbruket[14].

2.5 Reologi

Termen reologi, Rheology, uppfanns av professor Bingham vid Lafayette College Indiana. Uttrycket användes för att beskriva studien av deformation och flöde av material som uppvisar både elastiska och viskösa egenskaper. Den första gången definitionen erkändes var när den amerikanska gruppen The American society of Rheology grundades år 1929. De första studierna som

gjordes i ämnet var kring egenskaperna av material som bitumen, smörjmedel, färg, plast och gummi. (Barnes et. al., 1989) Reologi är läran om material som befinner sig mellan de två idealtillstånd som beskrivs av Hook's Law, för solider, och Newton's Law, för vätskor.

2.5.1 Viskositet

Viskositet är ett mått på en vätskas motstånd mot flöde. En vätska med låg viskositet kommer att uppvisa mindre motstånd mot att strömma, rinna, än en vätska med hög viskositet[8].

Viskositet definieras som ration mellan skjuvspänning och skjuvhastigheten. Viskositeten hos alla simpla-vätskor, inklusive bitumen, minskar med en ökad temperatur [8]. Ibland, till exempel med en rotationsviskosimeter typ RVB, används termen Dynamisk viskositet för att beskriva en vätskas viskositet, η . Det förekommer även tillfällen då denna term används för att beskriva den komplexa viskositeten, detta är den viskositet som fås av oscillerande tester, termen används även för att beskriva den reella delen av den komplexa viskositeten[19].

Vid viskositetsmätningar med oscillerande tester uttrycks viskositeten vanligtvis i termer av komplex viskositet [η^*], den komplexa viskositetens reella del [η'] och den imaginära komponenten av den komplexa viskositeten [$i\eta''$]

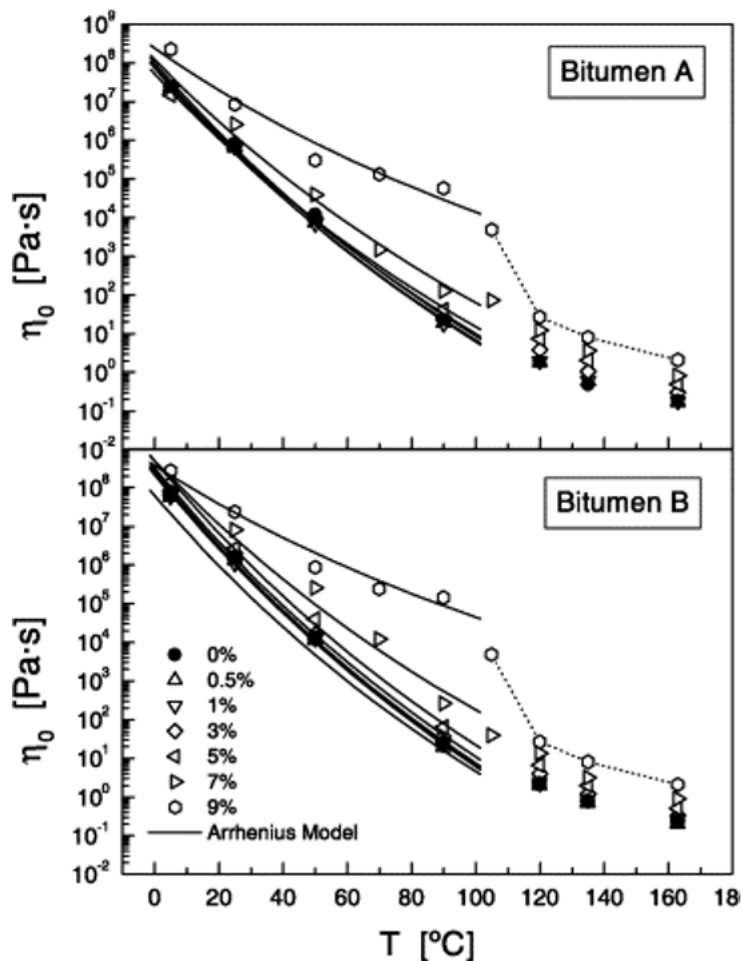
Absolute dynamisk viskositet är en annan term som används för att beskriva en vätskas viskositet, Denna term används vanligtvis för att referera till den reella delen av den komplexa viskositeten. Kinematisk viskositet är ett mått på en vätskas viskositet där materialets densitet tas i beaktning [19].

$$\nu = \eta/\rho \text{ [mm}^2\text{/s]}$$

ν = kinematisk viskositet

Apparent viskositet används då förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet varierar med skjuvbelastning. För att skilja detta värden från konstant viskositet anges vanligtvis detta mått på viskositet tillsammans med någon kompletterande information kring under vilka förhållanden resultatet mätts, exempelvis: $\eta(\tau = 500 \text{ Pa}) = 12,5 \text{ Pas}$ [19].

Hur förhållandet mellan temperatur och viskositet ter sig för bitumen kan ses i Figur 6.



Figur 6 Exempel på hur bitumens viskositet påverkas av temperatur [24]

Figuren visar viskositeten hos polymermodifierade bitumen, omodifierat bitumen anges som "0%".

2.5.2 Elasticitet

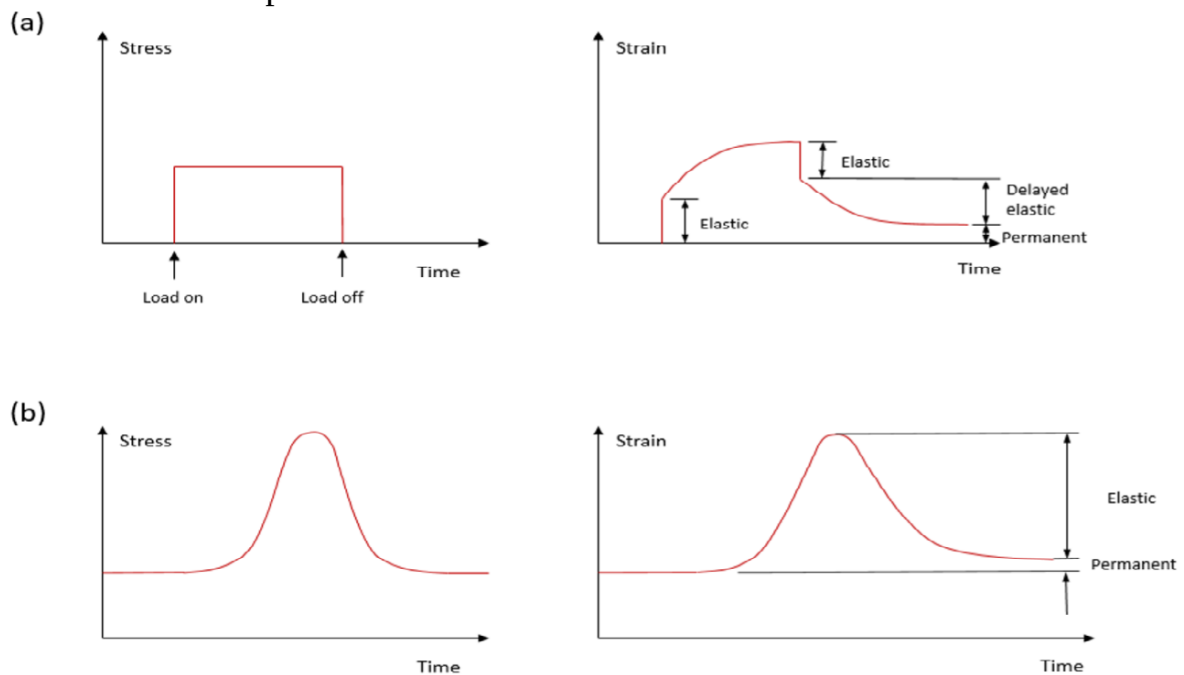
Möjligheten för ett material att under belastning deformeras och efter avlastning återgår till sin ursprungliga form kallas elasticitet. Material som uppvisar denna egenskap refereras till som elastiska. De flesta fasta material uppvisar denna egenskap, och reagerar på en relativt liten spänning med en direktproportionell töjning. Bitumen uppvisar dessa egenskaper vid lågtemperaturer[8]. För de flesta seiga material går det att lasta materialet med en spänning stor nog att förhållandet spänning-töjning inte längre kan anses vara proportionellt. Då detta sker kommer deformationen som uppstår inte längre återgå. Gränsen då töjningen inte längre återgår refereras till som elasticitetsgränsen[8].

2.5.3 Viskoelasticitet

Vid vila behåller både solider och vätskor sin form; när laster introduceras deformeras materialen, och när lasten tas bort kan deformationen antingen

återgå, elastisk, eller vara permanent, viskös. Mellan dessa två ideal kan material uppvisa en blandning av dessa två egenskaper. De material som hamnar emellan idealen refereras till som viskoelastiska material.

Viskoelastiska material uppvisar delvis elastiska- och delvis viskösa egenskaper[8]. Viskoelastiska material skiljer sig från plastiska i det att viskoelastiska material uppvisar en tidsberoende återhämtning när en last tas bort från materialet. Detta fenomen refereras ofta till som försenad elastisk återhämtning, Delayed elastic, detta fenomen uppvisas inte i plastiska material. Det som anges som permanent deformation i Figur 7 kan även refereras till som plastiskdeformation.



Figur 7 Viskoelastisk respons av bitumen från a) statisk last, b) dynamisk last [26]

Bitumen uppvisar en blandning av viskoelastiska och plastiska egenskaper, detta betyder att en del av deformationen från varje last inte återhämtas. Ackumuleringen av dessa deformationer är vad som sedan leder till spårbildningar i asfaltbeläggningar, genom att minska den permanenta deformationen från varje belastning kan då spårbildningen i asfaltbeläggningar minskas[8].

2.5.4 RVB

I mer än 80 år har Brookfield viskositetsmätare varit erkända som ledande inom många industrier och laboratorier. Det började med att Don Brookfield, medan han var i slutskedet av sina studier, bestämde sig att bygga sin egen viskosimeter. "I can build a better one" var motivet bakom beslutet och redan efter några år hade han sålt några enheter. Därefter startade han företaget Brookfield CO. tillsammans med sin far och bröder [20]. Företaget kunde

snabbt etablera sig och expanderade väldigt mycket. Det gjorde i sin tur att företaget kunde bredda ut sig mer till andra industrier som matproduktion, bläck, målarfärg, oljeprodukter, kosmetik osv[20]. Företaget har nyligen blivit uppköpt av AMETEK som är ett ledande globalt företag som bygger och säljer elektriska- och elektromekaniska instrument. Företaget, känt numera som AMETEK Brookfield, fortsätter med sin dagliga produktion av viskositetsmätare [20]. RVB är en maskin som används för att mäta reologiska egenskaper hos vätskor. RVB används för att mäta viskositeten hos en rad olika industriprodukter, bland annat på bitumen. Maskinen kan beskriva de reologiska egenskaperna på olika sätt. Här blir viskositeten den beskrivande faktorn. Dessutom ger instrumentet vetenskapliga grunddata, skjuvspänning och skjuvhastighet, enligt definitionen av viskositet i kapitel 5.5.1 Viskositet som används för senare undersökning och tolkning. En och samma spindeltyp med fast axel används för hela mätningförloppet. Mätningen sker i en programmerad mätserie vid fem temperaturer från hög temperatur ned till i närheten av Mjukpunkten. Mätresultaten sammanbinds med en linje, viskositetslinjen, som kan beskrivas med ett matematiskt samband enligt WLF-ekvationen (Williams- Landen-Ferry). Beräkningen sker enligt minstakvadratmetoden med hjälpmedel som finns tillgängligt i programvaran Excel [4]. I detta examensarbete är RVB den enda metoden som har använts för att ta fram viskositeten hos vätskorna.

WLF-formeln:

$$\log(a_T) = (-C_1 \cdot (T - T_{ref})) / (C_2 + (T - T_{ref})) \quad (\text{ekv.3})$$

där

C1 och C2 Konstanter

T Temperatur [°C]

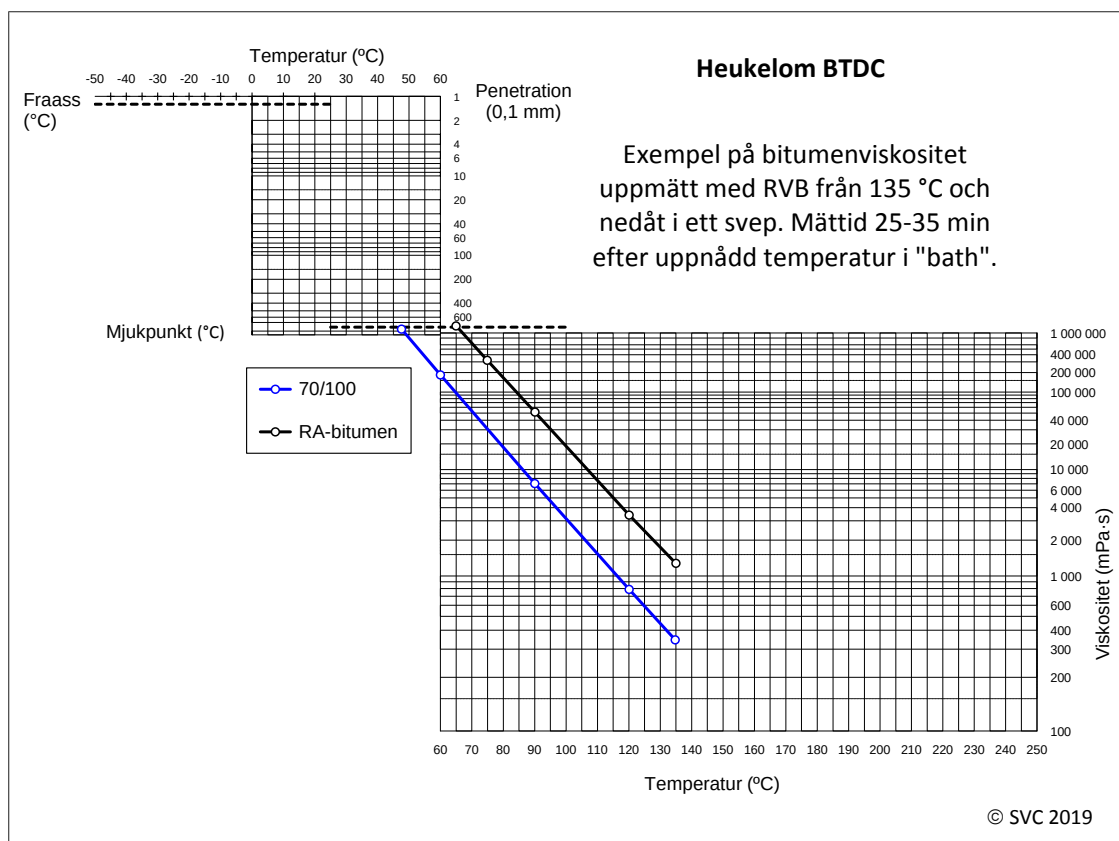
T_{ref} Referenstemperatur [°C]

a_T Skiftfaktor som för Newtonska polymera vätskor

(Erlandsson, 2012).

2.5.5 Heukeloms BTDC

År 1973 införde Willem Heukelom ett diagram som kunde beskriva viskositeten hos bitumen och hur den varierar beroende på temperatur. Diagrammet benämns Heukelom BTDC och innehåller flera olika uppmätta tester som viskositet, penetration, mjukpunkt m.m. [10, 21]. Diagrammet består av två innerdiagram, se figur 13. Det övre diagrammet är ett temperatur diagram med linjär skala medan det nedre diagrammet står för penetrationen och är logaritmisk. Viskositetslinjen som avbildas i diagrammen sammanfaller i båda diagrammen i en rät linje. Det finns möjlighet till extra- och interpolära viskositetslinjen vid behov. Med hjälp av Heukelom kan man läsa ut mjukpunkten för bitumen vid 1 300 000 mPa·s [21].

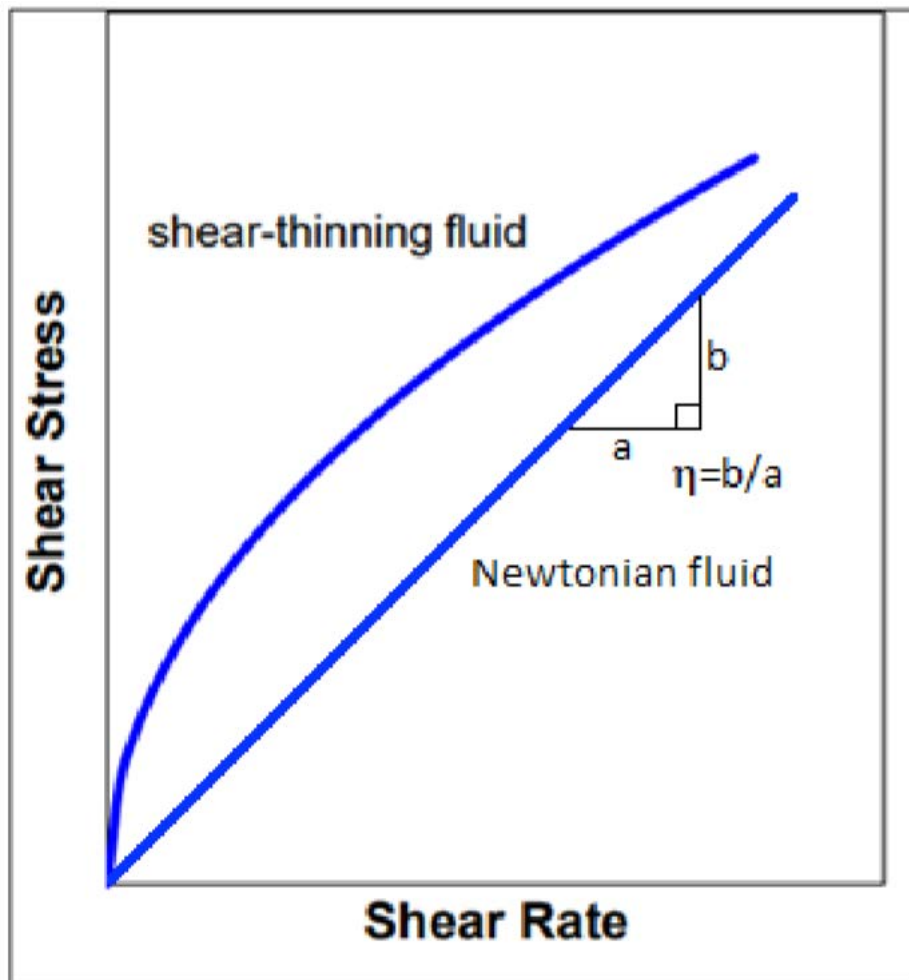


Figur 8. Heukelom BTDC med exempel.

2.5.6 Newtonsk och icke newtonsk vätska

Vätskor som vatten, etanol och bensen är alla newtonska. Detta betyder att om relationen mellan skjuvspänning och skjuvhastighet, vid en given temperatur, skulle plottas för dessa vätskor skulle förhållandet vara linjärt. Linjen skulle vara rak, med konstant lutning, och starta i origo. Att linjen startar i origo betyder att utan skjuvhastighet kommer det inte att uppstå någon skjuvspänning. Att linjen startar i origo betyder även att om en rörelse startar kommer ett motstånd registreras i vätskan i form av en skjuvspänning. För att ses som Newtonsk skall lutningen vara oberoende av skjuvhastigheten och sambandet beskrivas med en rät linje. Lutningen på linjen är vad som refereras till som vätskans viskositet[22]. Alla vätskor som inte uppfyller kraven för en Newtonskvätska kategoriseras som en icke newtonsk vätska. Ämnet Reologi ämnar studera egenskaperna hos dessa vätskor. Generellt kan det sägas att vätskor med hög molekyylvikt, exempelvis bitumen [23], är att anse som icke-Newtonska. För dessa vätskor är lutningen på linjen i en skjuvspänning-skjuvhastighetplott inte konstant när skjuvhastigheten förändras. När viskositeten minskar med en ökad skjuvhastighet klassas vätskan som skjuvförtunnande. I motsatt fall, då viskositeten ökar när vätskan utsätts för en ökande skjuvhastighet, klassas vätskan som skjuvningsförtjockande. Skjuvningsförtunnande beteende är det vanligast av de två[22].

Ett exempel på förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet hos en skjuvförtunnande icke-newtonsk- och en newtonskvätska illustreras i Figur 2.6–1.



Figur 9 Skjuvspänning och skjuvhastighet hos en skjuvförtunnande icke newtonsk vätska och en newtonsk vätska [22]

I figuren går det att observera hur lutningen på den skjuvförtunnande vätskan förändras med en förändring i skjuvhastighet. Detta visar hur viskositeten, η , förändras i vätskan.

3 Mätteknik och metod

3.1 Laboratorieutrustningar

I detta arbete har en rotationsviskosimeter av typen Brookfield Viscometer DV-II+ Pro EXTRA med stativ använts, se figur. Den består av en roterande spindel SC4-27, Thermosel värmeenhet, termisk styvhet och mjukvaran Rheocalc som styr dataprocessen via PC. Det finns tillgång till knappsats på instrumentet som man kan styra genom, men det var inget som användes under arbetets gång. Den mätningen som noterades viktigast var vid 1 300 000 mPa·s som även antogs vara mjukpunkten vid den viskositeten.

3.1.1 Utrustning

- Brookfield Viscometer DV-II+ Pro EXTRA med stativ
- Brookfield Thermosel värmeenhet med tillhörande styrenhet
- Dator med Rheocalc Programvara
- Våg med noggrannhet $\leq 0,1\text{g}$
- 10 ml engångsplastsprutor
- Provbehållare med stativ
- Tång för hantering av provbehållare
- Spindel med fast axel SC4-27 (#27)
- Lock vid provkörning
- Skyddsutrustning

3.1.2 Spindel

Under laboratoriemätningarna som utförts har en spindel av typen SC4-27 (#27) använts, se figur. Spindeltypen #27 är anpassad för att klara ett provrörs volym på 10,5 ml för att få ut bäst resultat. Spindeltypen #27 har mätområdet: 150–2 500 000 mPa·s. Spindeln som har använts i försöken har en lång axel som fästs i RVB och sedan förs ner i provrören. Fördelen med #27, jämfört med andra spindeltyper, är att den är självcentrerad när den är kopplad till viskosimetern. Nackdelen med den fasta axeln är att den kan bli sned då man rengör den eller vid installationen som medför instabilitet och den kan börja ”wobbla”. Skulle det inträffa kan det i sin tur göra att maskinen blir förvirrad och resultat kan misstolkas eller förstöras. Det vridmotstånd som #27 klarar av passar till våra mätningar och analyser[4, 20].



Figur 10 Spindel #27 [31]

3.1.3 Provrör

Provrören som använts rymmer 24 ml och är 8 cm långa. Mängden uppvägt bitumen och asfaltbruk varierade. Kravet som fanns var att varje prov skulle innehålla 10,5 ml eftersom det är denna volym som spindeln är skapad för. Utifrån volymen kunde mängden bitumen samt asfaltbruk bestämmas och vägas upp i provrören. Efter uppvägning sätts provrören in i kylan för att minska risken för sedimentering hos fillern tills den skulle sättas igång i maskinen, se figur 11 och 12.



Figur 11 Provrör i burk vid uppvägning på våg med noggrannhet 0,01 g samt tillhörande värmesked



Figur 12 Provrör i kyl

3.2 Genomförande av test

Processen för laboratieförsöken börjar med att filtrera fillern genom att skaka och pressa bort klumparna, se figur 13 och 14. Detta görs för att få fram en helt filtrerad massa utan klumpar, se figur 15. Fillern värms även upp för att få bort eventuell fukt som kan finnas.



Figur 13 Filler med klumpar på sikt 0,125 mm.



Figur 14 Delvis bearbetad filler



Figur 15 Bearbetad filler

Därefter värms bitumen upp i ugn, se figur 16 och 17, och vid rätt temperatur blandas de olika fillerna med bituminet med bestämd mängd.



Figur 16 Ugn för uppvärmning



Figur 17 Bitumen och filler i ugn för uppvärmning.

När fillern hällts i blandas bitumen och fillern tills det blir en homogen blandning, se figur 18–21.



Figur 18 Bitumen och filler innan blandning i färdiga mängder.



Figur 19 Filler matas in i omgångar i bitumen.



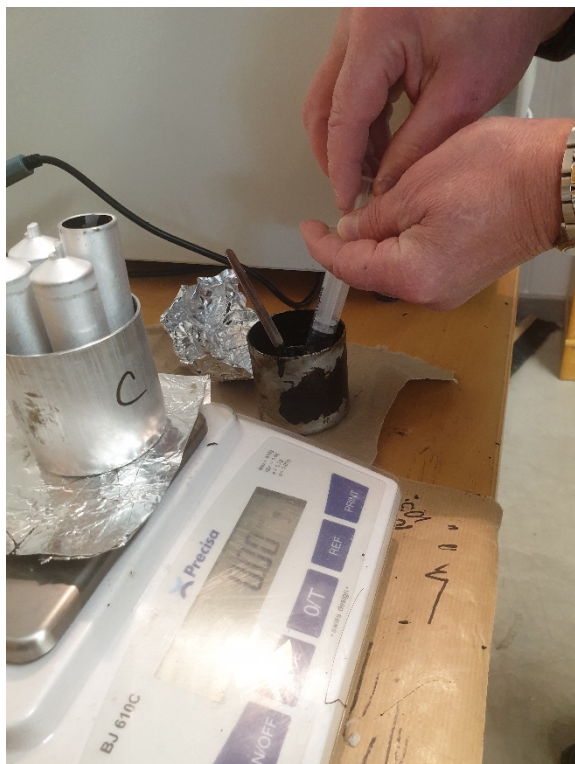
Figur 20 Filler och bitumen blandas till en homogen blandning



Figur 21 Homogen blandning av filler och bitumen

Sedan värms provet upp till önskad temperatur i ugn. När önskad temperatur nåtts tas provet ut och rörs om igen, sedan värmer man upp provet igen i ugnen. Uppvärmning och omrörning görs i tre omgångar för att minska sedimentationen i proven och för att få proven att vara homogena så att allt filler omsluts av bitumen.

Innan uppvägning i provrör ska provet röras om igen. Sedan sugas asfaltbruket upp med sprutan och sedan vägs det upp i provröret till 10,5 ml, se figur 22–24.



Figur 22 Spruta för uppsugning av asfaltbruk



Figur 23 Uppmätt mängd asfaltbruk i spruta



Figur 24 Asfaltbruket sprutas ner i provrören

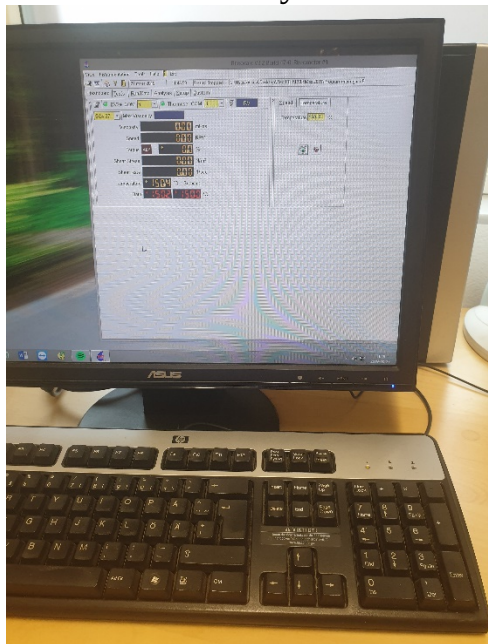


Figur 25 Värmesked för att uppnå rätt mängd

Då man antingen får för mycket eller för lite volym i provröret används en uppvärmd sked som man kan använda för att tillsätta eller ta bort den lilla

mängd som är för mycket eller för lite, se figur 25. Efter att provrören är uppvägda med asfaltbruket sätts de in i kylan. Vid den låga temperaturen som är i kylan är tanken att fillern står stilla och sedimenterar sig väldigt lite.

När det sedan är dags att köra provet i maskinen börjar man med att starta programmet Rheocalc V3.2 Build 47-0 som finns på datorn, se figur 26. Sedan tas provet ut ur kylan och sätts i det värmeelement som tillhör RVB:n och provet börjar tempereras till temperaturen som angivits i Rheocalc V3.2 Build 47-0 som styr värmeelementet se figur 27 och 28.



Figur 26 Bild på Rheocalc V3.2 Build 47-0 efter uppstart



Figur 27 Utrustning som används vid körning av prover



Figur 28 Temperaturkontroll

När provet är tillräckligt uppvärmt kan man fästa spindeln och sänka ner den i provet. Man sänker RVB:n genom att hålla in spaken som finns på baksidan av maskinen, se figur 29.



Figur 29 Spak för höjning och sänkning av spindel [31]

Se sedan till att värmeelementet med provet och RVB:n har rätt inställning enligt vattenpasset som finns på RVB:n, se figur 30.

Bubblan, placerad på RVB:n samt värmeelementet, skall ställas in i mitten för att undvika ojämnheter och obalans.



Figur 30 Vattenpass på RVB och värmeelement [31]

Sedan ska olika steg utföras för programmering av testet samt uttag av data då programmet är kört, de listas nedan i punktform:

- Klicka på fliken “Tests”
- Öppna “Load Program”
- Öppna det program som ska köras och klicka på “Open”
- Dubbelkolla så att programmet i Rheocalc stämmer med programmeringen.
- Dubbelklicka på sista siffrorna för RMR.
- Klicka på de tre prickarna “...” där det står “File name”.
- Skriv namnet på det prov som körs och klicka på “Save”, tryck sedan på “Apply”
- Testkör provet genom att klicka på “Speed” och skriv under “RPM” $\frac{1}{3}$ av den hastighet som ska uppnås.
- Klicka sedan på grön knapp.

- Då “Torque” kommer under ca 50 % kan hastigheten höjas successivt. Vid fullt varvtal för den lagda temperaturen ska viskositeten vara i närheten av den som finns i programmeringen. Först då kan man fortsätta. Om viskositeten inte sänks till programmeringen bör man ändra viskositeten i Excel samt ändra programmeringen i RheoCalc eftersom varvtalen vid de olika temperaturerna kan ändras.
- Efter testkörningen sänk varvtalet till 0 genom att klicka på röd knapp under “Speed”.
- Gå in under “Temperature” och höj temperaturen till 15 °C mer än första prov temperaturen och sedan grön knapp. OBS! Viktigt steg.
- Därefter kopplas spindeln bort och nollas genom att klicka på blixten under “Dashboard”. OBS! Viktigt steg.
- Om torquen på dashboarden inte ändras till 0 efter nollningen, bör man nolla igen för säkerhets skull.
- Efter nollningen kopplas spindeln på igen och okulära kontroller utförs igen, se figur 26.
- Lägg på locket över provet, se figur 27.
- Gå in under “Speed” och lägg “RPM” till första mätpunktens RPM och avvakta tills viskositeten blir till $\frac{2}{3}$ av antaget startvärde.
- Gå in under “Run/Data” och klicka på “play” knappen. Spara dokumentet med det provets namn. Därefter kommer det en förfrågning om att vilken spindeltyp maskinen ska använda. Se till att den överensstämmer med spindeln som provet utförs med. Därefter tryck ok och vänta tills provkörningen är klar.
- Efter att provet är klart ska data exporteras ut till ett Excel dokument. Klicka på export knappen (med röd pil) under “Run/Data”. Spara dokumentet med prov namnet + exp. på skrivbordet. OBS! Spara endast på skrivbordet!
- Öppna Excel dokumentet och markera all data genom att klicka på pilen som pekar åt sydöst (finns i vänstra hörnet längst upp mellan kolumn A och rad 1).
- Högerklicka någonstans på pappret och klicka på “Formatera Celler”. Gå in under fliken “Allmänt” och klicka sedan “OK”.

3.3 Fillersorter

Cement används sällan som fyller i asfaltbruk men ofta för att förbättra vidhäftningen mellan bitumen och stenmaterial. Kalkfiller används oftast i gjutasfalt och är känt för att ge ett smidigt bruk.

Naturfiller kommer som namnet antyder från täktens mineral, som till exempel kan vara granit, diabas eller kvartsit. Föreliggande studie handlar inte om att bedöma olika mineraler utan bara registrera effekterna av fillertyper som finns

hos större tillverkare av asfalt i södra Sverige och som funnits på marknaden i många år. Efter önskemål från tillverkarna littereras material bara med löpnummer.

Endast två egenskaper registrerades hos själva fillermaterialet. Kompaktdensiteten behövdes för att kunna ställa in volymhalten i asfaltbruken. Rigdenhållrummet anses förklara en del av uppstyvningseffekten. Vanligtvis bestäms också kornfördelningen men den utrustningen fanns inte tillgänglig under examensarbetet.

Tabell 2. Tabell över undersökta fillersorter och några karakteristiska parametervärden.

Filler	Kompaktdensitet g/cm ³	Rigdenhållrum vol%
1	2,686	32,1
2	2,659	28,3
3	2,756	-
4	2,665	-
5	2,736	-
6	2,805	31,0
Kalkberg	2,730	23,7
Cement	2,985	27,1

Rigdenhållrummet för fillerproven 3, 4 och 5 hanns inte med men tas fram senare och redovisas på annat sätt.

3.4 Provberedning

Mängden filler i ett asfaltbruk kan anges på tre sätt:

- Viktkvot, (vikt filler)/(vikt bitumen), F/B, sortlös
- Vikthalt, $100 \cdot (\text{vikt filler}) / (\text{vikt filler} + \text{vikt bitumen})$, vikt%
- Volymhalt, $100 \cdot (\text{volym filler}) / (\text{volym filler} + \text{volym bitumen})$, vol%.

Volymhalt måste kopplas till en given temperatur eftersom bitumen och stenmaterial har mycket olika volymutvidgningskoefficient. Här valdes en vanlig blandningstemperatur, 150 °C.

Kvoten F/B är ett praktiskt mått som kan överföras direkt till inställningen av recept i ett asfaltverk. Vikthalt har ingen praktisk tillämpning vid sidan av laboratorieprovning men har fördelen tillsammans med F/B att de är oberoende av temperaturen. Volymhalten används för att kunna jämföra filler

med olika kompaktdensitet. Då jämförs inverkan av fillerpartiklarnas form, packningsgrad och storleksfördelning och eventuell kemisk interaktion på uppstyvningen av asfaltbruket, oberoende av partiklarnas vikt.

Från resultaten av tidigare examensarbeten valdes fyra volymhalter: 25,0 (A), 34,0 (B), 39,2 (C) och 42,9 (D) vol%. Mängderna valdes så att de skulle öka mjukpunkten i steg av samma storleksordning.

Sättet att blanda in filler i bitumen följer i tillämpliga delar tyska DIN 52096 med några praktiska justeringar. Färdig mängd ska vara 100 ml inblandat i en penetrationsburk av aluminium av den större modellen (ca 140 ml). Detta åstadkoms genom att börja med en given mängd bitumen som motsvarar (100 minus vol% filler) ml vid 150 °C. Fillern ska vara torr och uppvärmd till 150 °C i avsedd volym. Inblandningen sker under omrörning med lämpligt don (t ex en kaffesked) som kan lämnas kvar i burken. Inblandningen sker i tre steg tills hela provet är inblandat. Omrörningen upprepas därefter två gånger med 15 minuters mellanliggande temperering.

Den lägre halten, 25 vol%, klarar homogenisering vid 150 °C medan de övriga kräver en ökning med 15 °C för varje ökande mängd, d.v.s. 195 °C vid den högsta. Efter den sista homogeniseringen ställs provet att svalna på värmehärdigt underlag i avvaktan på uttag av prov för mätning i viskosimeter.

Innan prov tas ut för mätning värms provet upp på nytt till tidigare använd temperatur för provmängden, maximalt under 30 minuter. Därefter upprepas homogeniseringen tre gånger med 15 minuters mellanrum vid samma temperaturer som tidigare. Detta görs för att lyfta upp och jämnt fördela separerad filler, som ligger på provburkens botten.

Efter sista homogeniseringen sugs 10,5 ml upp med en plasticspruta, som sedan töms i provröret. Mängden kontrolleras på en våg med noggrannhet 0,01 g. Vikten som krävs för denna volym bestäms med hjälp av beräknad densitet för den aktuella blandningen. Densiteten beräknas med hjälp av volymandelarna av komponenterna och deras kompaktdensitet vid 150 °C. Små avvikelser kan korrigeras med att fiska upp eller tillföra några droppar med en uppvärmd värmesked (se Figur 25).

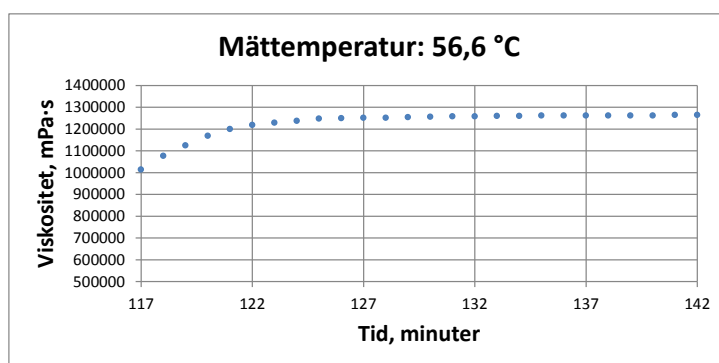
4 Resultat

Alla mätvärden i en serie utgörs av enkelmätningar. Inga ommätningar har gjorts eller strykningar av extremvärden. Med hjälp av WLF-sambandet, som är viskositetsmätningarnas masterkurva, kan viskositeten beräknas vid valfri temperatur och omvänt, temperaturen kan beräknas vid valfri viskositet. Det

senare används för att beräkna Mjukpunkt enligt RVB. Efter genomgång av resultaten valdes en viskositet som kan anses vara acceptabel under blandningsförloppet. Temperaturen vid denna viskositet är vid sidan av Mjukpunkt jämförelseparameter för de olika asfaltbruken och respektive fillersorter.

4.1 Insamling och bearbetning av mätdata

Varje mätpunkt studeras grafiskt för att säkra att ekvilibrium har uppnåtts. Efter en lång följd av mätningar vet man hur lång tid det tar. Det ligger på mellan 25 till 35 minuter från att temperaturen befinner sig 0,5 °C över inställt värde. Det förutsätter att mätningarna sker enligt LTH:s mättningsmodell med fallande temperaturer.



Figur 31. Avläsning av ekvilibrium.

Registrerade data samlas i tabeller, som visas i Bilaga 1 tillsammans med WLF-parametrar och beräknad Mjukpunkt vid 1 300 000 mPa·s.

Tabell 3 exempel på sammanställning av mätresultat och beräknad mjukpunkt vid viskositet 1 300 000 mPa·s.

Bruk: 3A 190307		Spindel: 27			
Viskositet	Temp	Torsion	Skjuvsp.	Skjuvhast.	Rotation
mPa·s	°C	%	Pa	1/s	rpm
636	150,0	51	43	68	200
1298	135,1	62	52	41	120
9842	102,6	62	53	5,4	15,8
217905	70,0	65	55	0,25	0,74
1264583	56,6	61	52	0,04	0,12
1300000:	56,4	C1:	7,33	C2:	113,6

WLF-parametrarna beräknas med passningsräkning i Excel enligt en uppställning framtagna på LTH. Tillvägagångssättet beskrivs i flera examensarbeten och i [28].

I DIN 52096 och gamla FAS-metoden 253–02 [29,30] beskrivs ett test för mätning av uppstyvning av filler, redovisat som ökning av Mjukpunkt. De ursprungliga mätningarna bygger på bestämning av Mjukpunkt med Kula&Ring-metoden, som här har ersatts med temperaturen vid 1 300 000 mPa·s.

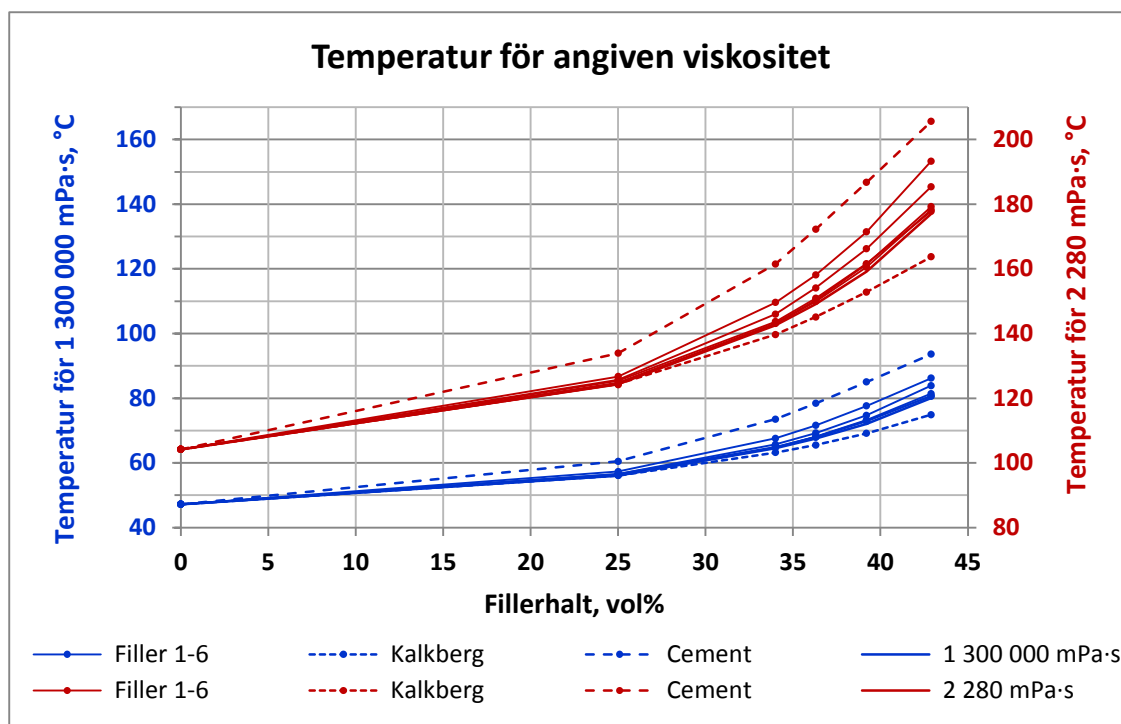
4.2 Viskositet

Mätresultaten redovisas i tabellform i Bilaga 1 och grafiskt i Bilaga 2. Två karakteristiska parametervärden är samlade i nedanstående tabell för jämförelse och värdering av effekterna från de olika fillersorterna och inblandade halter.

Tabell 4. Tabell över nyckelparametrar från viskositetsmätningar.

Prov	Viskositet mPa·s	Temperatur vid inblandad volymprocent filler					
		0	25,0	34,0	36,3 ^{*)}	39,2	42,9
70/100	1300000	47,2					
	2280	104,2					
1	1300000		56,6	65,0	68,0	72,8	80,7
	2280		125,4	143,7	150,9	161,6	177,8
2	1300000		56,1	64,6	67,5	72,1	80,1
	2280		124,4	142,6	149,1	159,2	177,0
3	1300000		56,4	64,8	68,1	73,2	81,4
	2280		124,8	143,2	150,3	161,4	179,2
4	1300000		56,1	64,7	68,0	73,0	80,6
	2280		124,2	143,1	149,9	160,5	178,3
5	1300000		56,6	65,7	69,2	74,7	83,9
	2280		125,7	146,0	154,1	166,2	185,4
6	1300000		57,3	67,6	71,6	77,6	86,2
	2280		126,7	149,6	158,1	171,4	193,3
Kalkberg	1300000		56,1	63,2	65,5	69,1	74,9
	2280		124,4	139,7	145,1	152,8	163,7
Cement	1300000		60,5	73,5	78,4	85,0	93,6
	2280		133,9	161,5	172,2	186,7	205,6

^{*)} Beräknat



Figur 32. Temperatur för Mjukpunkt och blandningsviskositet vid olika mängd filler.

4.2.1 Kommentarer och diskussion

Viskositeten 1 300 000 mPa·s representerar Mjukpunkt och används för att bedöma en fillers uppstyvningseffekt. 2 280 mPa·s motsvarar vanlig konsistens vid blandning av asfalt. Fillersorterna 5 och 6 har tydligt större uppstyvning och sticker ut från de övriga, som ligger mycket jämnt sinsemellan. Kalk är känt för att ge asfaltmassa och framförallt gjutasfalt en smidig konsistens, vilket illustreras av resultaten. Cement har kraftigt uppstyvande effekt.

Det beräknade Mjukpunktsvärdet vid 36,3 vol% kommer ur skattade samband med hjälp av tredjegradspolynom. Volymhalten filler är ett vanligt förhållande vid tillverkning av ABS-beläggningar och har använts i andra examensarbeten.

4.3 Uppstyvning med olika mått

DIN 52096 [29] lanserade ett begrepp som står för en fillers uppstyvande förmåga, Stabiliseringsindex (St). Det definieras av det F/B-värde som ökar Mjukpunkt med 20 °C.

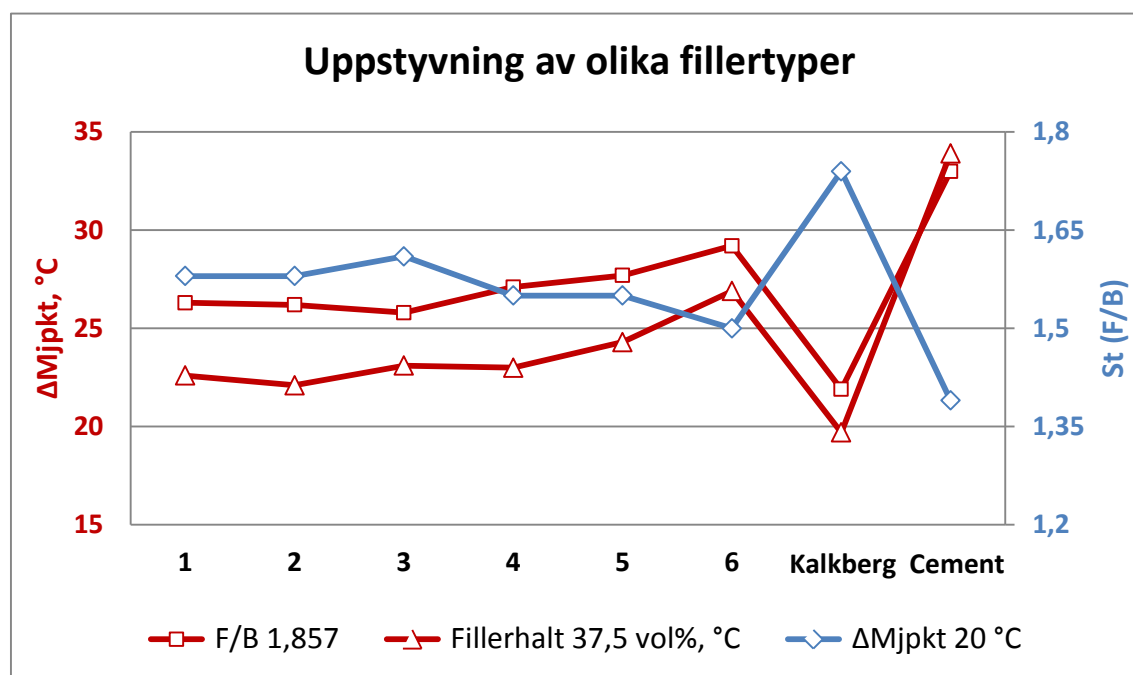
Begreppet beskrivs också i den numera nedlagda metodserien (uppdateras inte längre) FAS-metoder, nr 252–3 [30]. Det kompletteras där med ytterligare ett begrepp, "ΔK&R", som uttyds ökning av Mjukpunkt vid F/B 65/35 (1,857). Här översätts begreppet till ΔMjpk vid F/B 65/35.

DIN-metoden kompletteras av SS-EN 13179-1 2013 [31], som mäter uppstyvningen vid fillervolyymhalten 37,5 vol% vid 25 °C. Måttet är detsamma som i FAS-metoden och betecknas också här med ΔM_{jpkt} .

Ur WLF-sambanden i Bilaga 1 och med hjälp av polynom baserade på styvheter vid de fyra fillerhaltererna i Bilaga 3 visas två av uppstyvningsbegreppen för fillerblandningar i nedanstående tabell. Beräkningen av ΔM_{jpkt} vid 25 °C enligt [27] redovisas inte här men gjordes på i princip samma sätt som de båda andra.

Tabell 5. Tabell med tre uppstyvningsbegrepp för filler-bitumenbruk.

Prov	St (F/B) vid ΔM_{jpkt} 20 °C	ΔM_{jpkt} vid F/B 1,857, °C	ΔM_{jpkt} vid fillerhalt 37,5 vol%, °C
1	1,58	26,3	22,6
2	1,58	26,2	22,1
3	1,61	25,8	23,1
4	1,55	27,1	23,0
5	1,55	27,7	24,3
6	1,50	29,2	26,9
Kalkberg	1,74	21,9	19,7
Cement	1,39	33,0	33,9



Figur 33. Grafisk jämförelse mellan olika fillersorters uppstyvningseffekt med 3 olika mått.

4.3.1 Kommentarer och diskussion

Proverna 1 till 4 är liksom tidigare ganska lika. 5 och 6, i synnerhet 6, sticker ut mindre i det här viktbaserade sammanhanget. Eftersom stenmaterial och även filler vägs in kompenseras den större uppstyvningen av att det volymmässigt vägs in lite mindre än av övriga, lättare fillersorter. Med samma volymandelar framstår skillnaderna tydligare men det har mer akademisk betydelse eftersom doseringen aldrig sker per volym.

Kalkfiller och Cement avviker från de övriga på förväntat sätt. Cement används alltså inte som filler i Sverige men väl som vidhäftningsmedel. I länder med brist på filler händer det att cement och andra hydrauliska finmaterial kommer till användning i denna funktion.

4.4 Repeterbarhet

En förekommande invändning mot prepareringen av asfaltbruk inför provningar är risken för separation. Det har konstaterats att i asfaltbruk som lämnas uppvärmt i ugn några timmar sjunker de grövre fillerdelarna till botten av behållaren. Separationen är beroende av vätskans viskositet, halten partiklar och att vätskan befinner sig i vila. 25 till 43 vol% är i sammanhanget en fullmatad suspension och bitumen är i sin mest lättflytande form mer än 100 ggr mer trögflytande än t ex vatten och är under testet 1000 till en million ggr trögare. Till detta kommer att provet rörs om under testet. Efter homogeniseringen och påfyllningen av provrören placeras de omedelbart i en kyl. Då har bitumen en viskositet på i storleksordningen 100 000 000 000 mPa·s och någon separation är inte möjlig under rimlig tid. Men för att undersöka saken gjordes upprepade mätningar, 4 ggr med samma prov. En provomgång tar ca 3 timmar. Efter avslutad mätning värmdes provet upp på nytt och en ny mätomgång genomfördes. Samtidigt provades olika hastigheter för att utröna eventuella icke-newtonska effekter. Resultaten visas i tabeller och figur i Bilaga 4.

Tabell 6. Sammanställning av upprepade mätningar på samma prov.

Prov	Om- gång	Vridmo- ment %	Skjuv- spänning Pa	Skjuv- hastighet 1/s	Mjuk- punkt °C
5C	1	58	49	0,04	74,7
	2	31	26	0,02	76,2
	3	73	62	0,05	74,7
	4	62	53	0,04	75,4

4.4.1 Kommentarer och diskussion

Prov 5C innehåller 39,2 vol% fyller och är en fylld suspension på en nivå där ändringar i fyllerhalt genom fel i invägning, otillräcklig homogenisering eller separation kan märkas särskilt tydligt. Omgång 1 och 4 har likartade förutsättningar, sånär som på att omgång 4 föregåtts av tre mätserier under sammanlagt nio timmar. Skillnaden mellan dem är 0,7 °C i Mjukpunkt, vilket skulle innebära en höjning med 0,23 °C per omgång. Den minskade skjuvspänningen i omgång 2 skulle då orsaka en ökning med $(76,2-74,7-0,23)=1,27$ °C. Den ökade skjuvspänningen i omgång 3 skulle orsaka en minskning med $(74,7-74,7-2\cdot 0,23)=-0,46$ °C. Det finns alltså en icke-newtonsk effekt förorsakad av variation i skjuvspänningsnivå eller om man så vill i skjuvhastighet. Hela spannet på varierad skjuvspänning från 26 till 62 Pa (31 till 73 % i vridmotstånd) motsvarar ett fel på maximalt 1,63 °C.

Felet (ökningen) på 0,23 °C per mätomgång kan bero på förhårdning av bituminet. Mätningar på rent bitumen har i tidigare utredningar visat på en ökning av Mjukpunkt i storleksordningen 0,1 °C per mätomgång [31].

5 Slutsatser

Målet med examensarbetet var att undersöka hur viskositeten hos asfaltbruk med stigande fyllerhalter från olika bergtäkter ändras och jämföra deras förstyvande inverkan. Som i tidigare examensarbeten prövas samtidigt mätmetodens tillförlitlighet. Av tidsskäl hanns bara fem Rigdenmätningar med.

5.1 Mätmetod

- RVB har använts och utvecklats i en rad examensarbeten på LTH och har visat upp god precision för rent bitumen och bitumen med tillsatser som vax och polymerer. Trots möjliga problem med homogenisering och separation verkar metoden kunna fungera lika bra för fillerinblandat asfaltbruk.
- Bestämningen av Stabiliseringsindex, St, enligt DIN 5206 och tidigare FAS-metod 252–3 och ΔM_{jpkt} i SS-EN 13 179–1 har i och med detta fått en nystart med en tillförlitlig mätmetod.

5.2 Material

- Filler från de studerade, vanligt förekommande bergmaterialen tycks inte skilja sig åt i förstyvning av asfaltbruket. Däremot har *mängden* fyller stor betydelse och frågan är hur F/B-värdet verkligen ser ut på

asfaltverken. Det kontrolleras lätt i sammansättningsanalysen av asfaltmassorna och i asfaltverkens doseringsrecept.

- Utbyte av förekommande naturfiller är inte särskilt populärt av ekonomiska och praktiska skäl (man har kanske redan ett överskott) men filler från kalkberg har en gynnsam inverkan på asfaltbrukets smidighet. Det är ingen nyhet men nu finns det mätetal på effekten.
- Cement har kraftigare förstyvande inverkan på asfaltbruk jämfört med övriga fillertyper. Eftersom det inte används som filler i Sverige utan bara som vidhäftningsmedel i små tillsatser har det ingen praktisk betydelse.
- Ett högre Rigdenhållrum anses orsaka ökad förstyvning av asfaltbruk. Fallet med cement, som har relativt lågt Rigdenhållrum, visar att det måste finnas andra faktorer som betyder mer. Sådana faktorer kan vara kornfördelningen, som inte kunde bestämmas här, eller kemisk inverkan.

6 Förslag till fortsättning

- Det vore bra om grövre material upp till 1 mm kunde blandas in men då måste andra typer av spindlar provas. Det finns två smalare varianter, SC4-28 och -29, som har större utrymme mellan spindel och provrör. De och andra bör testas i kommande arbeten.
- Andra tillsatsmedel som ingår i asfaltbruk studeras var för sig på motsvarande sätt. Det handlar i första hand om polymerer och fibrer.
- Kombinationer av filler, polymerer och fibrer undersöks för att finna optimala blandningar, som sedan kan provas i full skala.

7 Referenslista

- [1] Soenen, H., & Teugels, W. (1999). *Rheological investigation on binder-filler interactions. In Eurobitume Workshop (Vol. 1999).*
- [2] Liao, M.C., Chen, J.S. & Airey, G. (2013a). *Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen Filler Mastics. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9, 2013.*
- [3] Liao, M. C., Airey, G., & Chen, J. S. (2013b). *Mechanical properties of filler-asphalt mastics. International Journal of Pavement Research and Technology, 6(5), 576–581.*
- [4] Tyllgren, P. (2019). *Intervjuer med Per Tyllgren under våren 2019.*
- [5] Agardh, S & Parhamifar, E. (2014) *Vägbyggnad*. Stockholm: Liber AB

- [6] Granhage, L. (2009) *Kompendium i vägbyggnad*. Göteborg.
- [7] VTI (2018) *Asphalt layer rutting performance prediction tools*. Rapport 968A.
- [8] Hunter, R.N., Self A. & Read, J. (2015) *The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition*. London: ICE Publishing.
- [9] Emanuelsson, A & Jansson, A (2013) *Dynamisk skjuvreometer för reologisk undersökning av bitumen - Utformning av manual för Lund Tekniska Högskola med mättekniska exempel*. Lunds universitet, Lund, Sverige.
- [10] Heukelom, W (1973) *An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties*. Kloninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam. Proc Assoc Asph Pav Tech, vol 42, pp 62-98, 1973. Association of Asphalt Paving Technologies, Seattle.
- [11] Al-Qadi, I & Elseifi, M & Carpenter, S (2007) *Reclaimed Asphalt Pavement- A Literature Review*. University of Illinois, Illinois Center for Transportation. Urbana, Champaign County, Illinois, United States of America.
- [12] Hamlet, G & Svensson, E (2013) *Undersökning av tillsatsmedel i returafalt*. Halmstad, Sverige.
- [13] Kavussi, A. and Hicks, R.G. (1997). *Properties of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 66, 153-186.
- [14] Hesami, E., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). *Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics*. Materials and structures, 47(8), 1325-1337.
- [15] Chen, J. S., Kuo, P. H., Lin, P. S., Huang, C. C., & Lin, K. Y. (2008). *Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler*. Materials and structures, 41(6), 1015-1024.
- [16] Clopotel, C., Velasquez, R., & Bahia, H. (2012). *Measuring physico-chemical interaction in mastics using glass transition*. Road Materials and Pavement Design, 13(sup1), 304-320.
- [17] Micaelo, R., Guerra, A., Quaresma, L., & Cidade, M. T. (2017). *Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing*. Construction and Building Materials, 155, 228-238.
- [18] Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). *Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction*. Road Materials and Pavement Design, 11(sup1), 281-303.
- [19] Mezger, T. G., 2014. *The Rheology Handbook, fourth edition*. Hanover: Vincentz Network
- [20] Brookfield
(2017A) <http://www.brookfieldengineering.com/company/company-history.asp>

- [21] Andersson, C & Sulejmani, P (2014) *Undersökning av bitumen från asfalt med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR - Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier*. Lunds universitet, Lund, Sverige.
- [22] Subramanian, R. S., (2002) *Non-Newtonian Flows*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University.
- [23] Badre, S., Goncalves, C. C., Norinaga, K., Gustavson, G., & Mullins, O. C. (2006). *Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen*. *Fuel*, 85(1), 1-11.
- [24] García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., & Muñoz, M. E. (2004). *Viscous properties and microstructure of recycled EVA-modified bitumen*. *Fuel*, 83(1), 31-38.
- [25] Read, J., & Whiteoak, D. (2003) *The Shell Bitumen Handbook, Fifth edition*. London: ICE Publishing
- [26] Bakalov, M & Shukir, A (2017) *Förbättring av asfaltens konsistens med tillsatsmedel, Mätningar med rotationsviskosimeter på bitumen och asfaltbruk*. Lunds universitet, Lund, Sverige
- [27] SS-EN 13179–1:2013. *Provning av filler för asfaltmassor – Del 1: Mjukpunktsprovning*.
- [28] Parhamifar, E., Tyllgren, P. (2016). *Assessment of asphalt binder viscosities with a new approach*. 6th Eurasphalt & Eurobitumen Congress, Prague
- [29] DIN 52096. (2016). *Testing of filler for road construction - Stiffening effect of filler on bitumen - Stabilization index*.
- [30] FAS-metod 253–2 (2006). *Bestämning av fillers förstyvande inverkan på bitumen*.
- [31] Nilsgart, E., Grybb, T. (2014). *Rotationsviskosimeter, RVB. Ett alternativ till konventionella metoder för viskositetsmätning på bitumen*. Examensarbete på LTH Ingenjörshögskolan, Campus Helsingborg.
- [32] Hesami, E. (2014). *Characterisation and Modelling of Asphalt Mastic and Their Effect on Workability*. KTH – Royal Institute of Technology, Sweden. TRITA-TSC-PHD; 14:005

BILAGOR

Bilaga 1. Sifvertabeller över viskositetsmätningar med RVB

Bitumen: 70/100 181003				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
351	134,9	28	24	68	200
806	120,1	62	52	68	200
7091	90,1	75	63	8,9	26,3
188358	60,0	77	65	0,35	1,02
1316667	47,1	79	67	0,05	0,15
1300000:	47,2	C1: 7,99	C2: 108,6		

Bruk: 1A 181004				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1360	134,9	72	61	45	132
3138	119,8	70	60	19	56
28893	90,0	71	60	2,1	6,1
811364	60,0	71	61	0,07	0,22
1233036	57,0	69	59	0,05	0,14
1300000:	56,6	C1: 7,33	C2: 114,2		

Bruk: 1B 181004				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1708	149,9	70	59	35	102
3505	135,2	71	61	17	51
16261	110,1	77	65	4,0	11,8
82200	90,0	82	70	0,85	2,50
1295000	65,0	73	62	0,05	0,14
1300000:	65,0	C1: 6,94	C2: 119,5		

Bruk: 1C 181009				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
3823	150,0	70	60	16	46
8095	135,2	68	58	7	21
27585	114,9	65	55	2,0	5,9
131798	95,1	60	51	0,39	1,14
1138393	73,9	64	54	0,05	0,14
1300000:	72,8	C1: 6,66	C2: 125,8		

Bruk: 1D 181011				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
7898	149,8	70	59	7	22
17500	135,1	70	60	3	10
63500	114,9	76	65	1,0	3,0
317857	95,1	80	68	0,21	0,63
1394643	80,1	78	66	0,05	0,14
1300000:	80,7	C1: 6,93	C2: 147,0		

Bruk: 2A 181012				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
628	149,8	50	43	68	200
1267	135,2	77	66	53	155
11596	100,1	82	70	6,0	17,7
210185	69,9	91	77	0,37	1,08
1666964	54,5	93	79	0,05	0,14
1300000:	56,1	C1: 7,32	C2: 113,1		

Bruk: 2C 181017				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
3467	150,0	68	58	17	49
7391	135,0	68	58	8	23
25294	115,0	69	58	2,3	6,8
121181	95,1	70	59	0,49	1,44
1214286	72,7	68	58	0,05	0,14
1300000:	72,1	C1: 6,80	C2: 127,8		

Bruk: 2B 181015				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1606	150,2	71	61	38	111
3354	134,9	71	60	18	53
15526	109,9	71	60	3,9	11,4
78439	89,9	72	61	0,78	2,29
1221429	65,1	68	58	0,05	0,14
1300000:	64,6	C1: 6,91	C2: 117,5		

Bruk: 2D 181017				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
7300	150,1	73	62	9	25
16205	135,2	71	61	4	11
58306	114,9	72	61	1,1	3,1
290079	95,0	73	62	0,21	0,63
1303571	80,1	73	62	0,05	0,14
1300000:	80,1	C1: 6,66	C2: 137,3		

Bitumen: 70/100 190307				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
176	149,8	14	12	68	200
350	135,2	27	23	68	200
3712	97,6	63	53	14,4	42,3
183146	60,0	65	55	0,30	0,89
1275000	47,1	66	56	0,04	0,13
1300000:	47,0	C1: 7,83	C2: 105,3		

Bruk: 3A 190307				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
636	150,0	51	43	68	200
1298	135,1	62	52	41	120
9842	102,6	62	53	5,4	15,8
217905	70,0	65	55	0,25	0,74
1264583	56,6	61	52	0,04	0,12
1300000:	56,4	C1: 7,33	C2: 113,6		

Bruk: 3B 190308				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1671	149,9	68	57	34	101
3480	134,8	68	57	17	49
19205	107,6	68	57	3,0	8,8
216772	80,0	69	58	0,27	0,79
1359375	64,5	65	55	0,04	0,12
1300000:	64,8	C1: 6,99	C2: 120,4		

Bruk: 3C 190311				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
3837	149,8	66	56	15	43
8213	135,2	66	56	7	20
33622	112,5	66	56	1,7	4,9
215032	90,1	68	58	0,27	0,79
1370833	72,8	66	56	0,04	0,12
1300000:	73,2	C1: 6,80	C2: 129,4		

Bruk: 3D 190312				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
8158	149,9	62	53	6	19
17941	135,1	61	52	3	9
65109	114,9	60	51	0,8	2,3
332778	95,1	60	51	0,15	0,45
1191667	82,2	57	49	0,04	0,12
1300000:	81,4	C1: 6,66	C2: 138,5		

Bruk: 4A 190313				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
620	149,8	50	42	68	200
1264	135,0	61	52	42	124
9617	102,4	63	53	5,5	16,3
208553	70,1	63	54	0,26	0,76
1266667	56,3	61	52	0,04	0,12
1300000:	56,1	C1: 7,35	C2: 113,5		

Bruk: 4C 190313				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
3727	149,8	64	54	15	43
8000	135,2	64	54	7	20
32969	112,4	63	54	1,6	4,8
211333	90,1	63	54	0,26	0,75
1266667	73,2	61	51	0,04	0,12
1300000:	73,0	C1: 6,88	C2: 131,0		

Bruk: 4B 190313				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1648	149,9	65	55	33	98
3431	135,1	64	55	16	47
18988	107,5	64	54	2,9	8,4
213487	79,9	65	55	0,26	0,76
1297917	64,7	62	53	0,04	0,12
1300000:	64,7	C1: 6,97	C2: 119,8		

Bruk: 4D 190313				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
8063	149,9	64	55	7	20
18250	135,0	65	55	3	9
67000	114,9	67	57	0,9	2,5
306378	95,1	60	51	0,17	0,49
1200000	81,4	56	48	0,04	0,12
1300000:	80,6	C1: 7,05	C2: 152,2		

Bruk: 5A 190320				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
678	149,8	54	46	68	200
1363	135,0	62	53	40	117
10298	102,5	62	53	5,1	15,1
223897	70,1	61	52	0,23	0,68
1187500	57,2	57	48	0,04	0,12
1300000:	56,6	C1: 7,27	C2: 113,1		

Bruk: 5C 190319				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
4687	149,9	63	54	11	34
9984	135,1	61	52	5	15
41284	112,4	61	52	1,3	3,7
260088	90,1	59	50	0,19	0,57
1200000	75,4	58	49	0,04	0,12
1300000:	74,7	C1: 6,72	C2: 131,6		

Bruk: 5B 190321				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1917	149,9	74	63	33	96
3924	135,1	72	61	16	46
21790	107,6	71	60	2,8	8,1
244444	79,9	70	60	0,24	0,72
1389583	65,2	67	57	0,04	0,12
1300000:	65,7	C1: 6,88	C2: 120,2		

Bruk: 5D 190320				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
10469	149,8	67	57	5	16
23456	135,2	64	54	2	7
84722	115,0	61	52	0,6	1,8
435227	95,0	57	49	0,11	0,33
1135417	85,2	55	46	0,04	0,12
1300000:	83,9	C1: 6,70	C2: 145,2		

Bruk: 6A 190321				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
706	149,8	57	48	68	200
1425	134,9	64	54	39	114
10616	102,5	62	53	5,0	14,6
231538	70,0	60	51	0,22	0,65
1164583	57,6	56	47	0,04	0,12
1300000:	56,9	C1:	7,19	C2:	111,7

Bruk: 6C 190322				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
5401	150,1	82	69	13	38
11779	135,1	80	68	6	17
48110	112,5	79	67	1,4	4,1
305738	90,1	75	63	0,21	0,61
1397917	75,4	67	57	0,04	0,12
1300000:	76,0	C1:	6,75	C2:	135,9

Bruk: 6B 190322				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
2166	149,8	77	66	30	89
4452	135,1	75	64	14	42
24628	107,6	73	62	2,5	7,4
275794	80,0	70	59	0,21	0,63
1325000	66,5	64	54	0,04	0,12
1300000:	66,6	C1:	6,87	C2:	122,4

Bruk: 6D 190321				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
11891	149,8	77	65	5	16
25000	135,2	69	58	2	7
91324	115,0	62	53	0,6	1,7
200321	104,9	63	53	0,27	0,78
1179167	86,0	57	48	0,04	0,12
1300000:	85,1	C1:	6,02	C2:	126,2

Bruk: 7A 181018				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
634	149,9	51	43	68	200
1270	135,0	74	63	50	147
11630	100,0	75	64	5,5	16,1
208242	70,0	76	64	0,31	0,91
1303571	56,1	73	62	0,05	0,14
1300000:	56,1	C1:	7,26	C2:	111,7

Bruk: 7C 181019				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
2588	150,0	63	54	21	61
5444	135,2	63	54	10	29
18438	114,9	62	53	2,9	8,4
86494	95,1	60	51	0,59	1,74
1091964	70,5	61	52	0,05	0,14
1300000:	69,1	C1:	6,88	C2:	125,2

Bruk: 7B 181018				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1410	149,9	66	56	40	117
2893	135,0	65	55	19	56
13340	109,9	65	55	4,1	12,2
66701	89,9	65	55	0,83	2,44
1094643	64,5	61	52	0,05	0,14
1300000:	63,2	C1:	6,98	C2:	117,2

Bruk: 7D 181019				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
4331	149,8	54	46	11	31
9400	135,2	56	48	5	15
33191	115,0	62	53	1,6	4,7
163864	95,1	72	61	0,37	1,10
1735417	72,5	83	71	0,04	0,12
1300000:	74,9	C1:	6,94	C2:	134,8

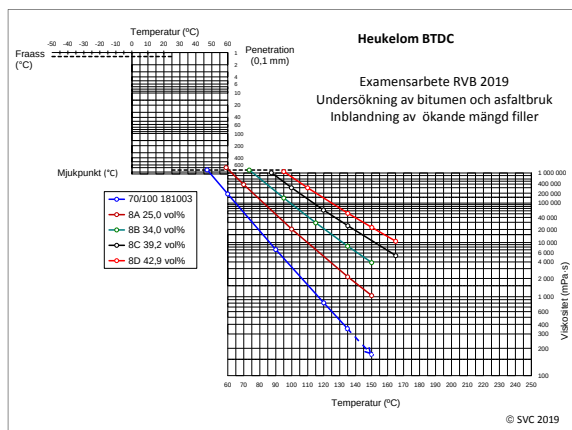
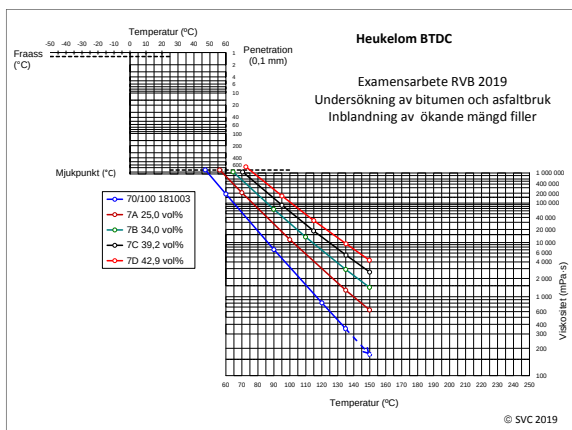
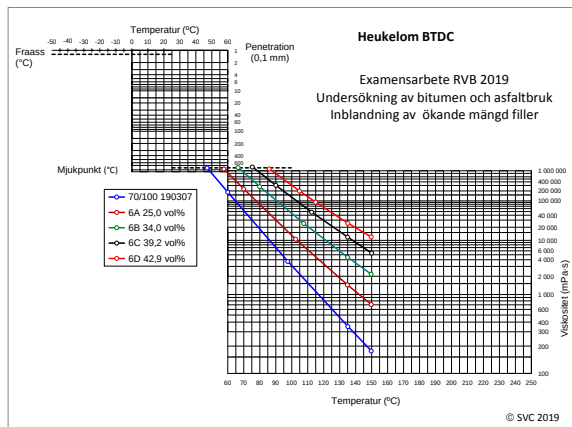
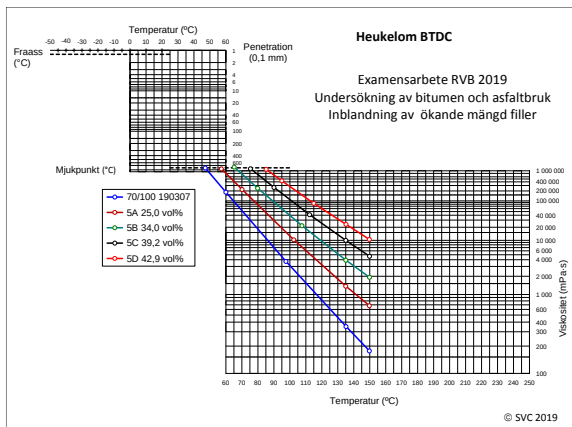
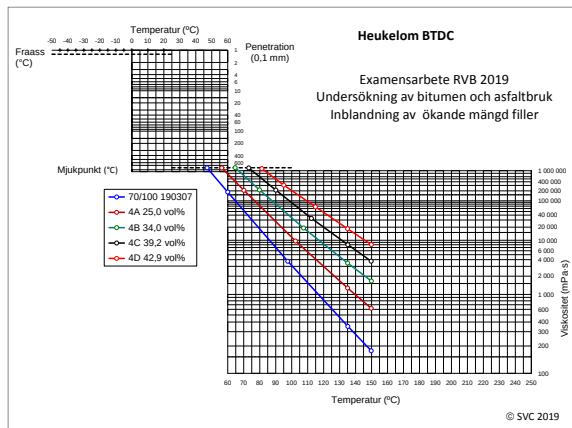
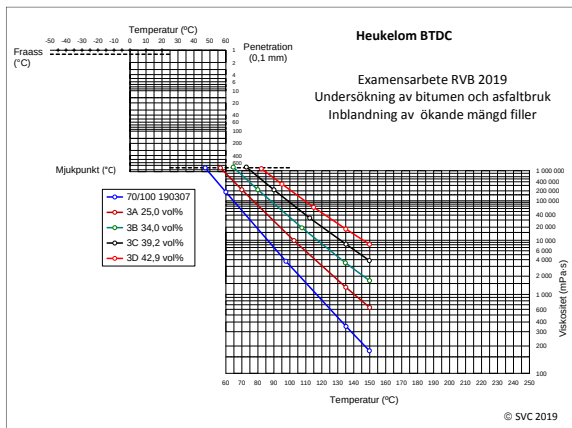
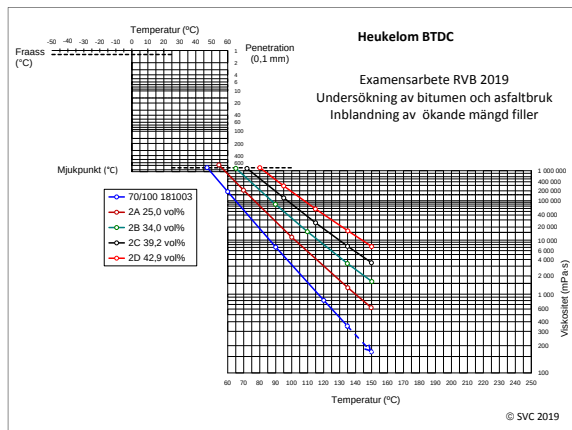
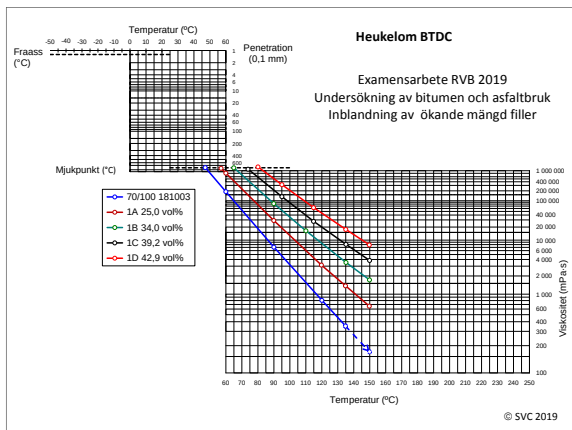
Bruk: 8A 181022				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
1040	150,1	60	51	49	143
2129	135,1	60	51	24	70
20313	100,0	65	55	2,7	8,0
384043	70,0	72	61	0,16	0,47
1612500	59,0	77	66	0,04	0,12
1300000:	60,5	C1:	7,11	C2:	116,0

Bruk: 8C 181025				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
5317	165,2	60	51	10	28
24518	135,2	56	48	2	6
63095	119,9	53	45	0,7	2,1
300915	99,9	49	42	0,14	0,41
1020833	87,3	49	42	0,04	0,12
1300000:	85,0	C1:	6,53	C2:	139,3

Bruk: 8B 181022				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
3891	149,8	61	52	13	39
8326	135,1	60	51	6	18
28990	115,1	60	51	1,8	5,2
140509	95,1	61	52	0,37	1,08
1293750	73,5	62	53	0,04	0,12
1300000:	73,5	C1:	6,92	C2:	133,0

Bruk: 8D 181025				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
10701	165,1	57	48	4	13
22302	150,2	56	48	2	6
51415	135,2	55	46	0,9	2,7
296944	110,0	53	45	0,15	0,45
1122917	95,1	54	46	0,04	0,12
1300000:	93,6	C1:	6,39	C2:	147,7

Bilaga 2. Heukeloms BTDC-diagram över mätningar med RVB



Bilaga 3. Beräknade värden med WLF-samband och polynom

Asfaltbruk 1											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,678	*) Beräknat			
Mjpkt, °C:	56,6	65,0	72,8	80,7		F/B, vikt:	0,94	1,46	1,61	1,82	2,13
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	48,5	59,3	61,7	64,6	68,0
70	220 891	684 272	1 843 118	4 549 579		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	73 691	218 759	566 764	1 403 141		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	28 527	81 894	205 532	503 039		1300000	56,6	65,0	68,0	72,8	80,7
115	4 303	11 661	27 607	63 513		100000	77,1	87,8	91,7	98,1	108,9
135	1 350	3 551	8 137	17 563		10000	102,9	117,3	122,7	131,3	145,2
150	655	1 696	3 812	7 828		2280	125,4	143,7	150,9	161,6	177,8

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 2												
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,651					
Mjpkt, °C:	56,1	64,6	72,1	80,1		F/B, vikt:	0,93	1,44	1,60	1,81	2,10	
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	48,3	59,1	61,5	64,4	67,8	
70	205 484	646 146	1 688 679	4 393 029		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9	
80	68 699	205 701	522 481	1 314 612		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C					
90	26 660	76 862	189 901	463 471			1300000	56,1	64,6	67,5	72,1	80,1
115	4 048	10 957	25 409	58 097			100000	76,4	87,2	91,0	97,1	107,7
135	1 276	3 350	7 431	16 277			10000	102,0	116,4	121,6	129,8	143,9
150	621	1 605	3 457	7 365			2280	124,4	142,6	149,1	159,2	177,0

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 3											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,748	*) Beräknat			
Mjpkt, °C:	56,4	64,8	73,2	81,4		F/B, vikt:	0,97	1,50	1,65	1,87	2,18
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	49,2	59,9	62,3	65,2	68,6
70	213 911	667 649	1 933 606	5 143 986		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	71 301	213 995	594 898	1 520 380		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	27 593	80 193	215 054	530 366		1300000	56,4	64,8	68,1	73,2	81,4
115	4 164	11 405	28 423	65 114		100000	76,8	87,6	91,9	98,6	109,2
135	1 307	3 463	8 242	18 016		10000	102,4	117,0	122,7	131,6	145,8
150	635	1 649	3 813	8 089		2280	124,8	143,2	150,3	161,4	179,2

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 4											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,657	Beräknat*)			
Mjpkt, °C:	56,9	66,6	76,0	85,1		F/B, vikt:	0,94	1,45	1,60	1,81	2,11
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	48,3	59,1	61,5	64,4	67,8
70	205 126	658 645	1 884 488	4 382 254		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	68 462	211 152	582 047	1 386 263		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	26 518	79 184	210 704	505 658		1300000	56,1	64,7	68,0	73,0	80,6
115	4 007	11 294	27 775	65 203		100000	76,4	87,5	91,7	98,3	109,2
135	1 258	3 439	8 013	18 097		10000	101,9	116,9	122,4	131,1	145,8
150	611	1 641	3 690	8 055		2280	124,2	143,1	149,9	160,5	178,3

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 5											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,728	Beräknat*)			
Mjpkt, °C:	56,6	65,7	74,7	83,9		F/B, vikt:	0,96	1,48	1,64	1,86	2,17
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	49,0	59,8	62,2	65,0	68,4
70	205 145	752 178	2 305 856	6 656 333		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	65 498	241 248	714 139	1 990 073		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	24 439	90 565	259 441	697 939		1300000	56,6	65,7	69,2	74,7	83,9
115	3 437	12 968	34 555	85 514		100000	76,1	88,9	93,6	100,8	112,9
135	1 035	3 962	10 054	23 433		10000	100,4	119,0	125,4	135,1	150,8
150	490	1 896	4 658	10 423		2280	121,3	146,0	154,1	166,2	185,4

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 6											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,797	Beräknat*)			
Mjpkt, °C:	57,3	67,6	77,6	86,8		F/B, vikt:	0,99	1,52	1,68	1,91	2,22
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	49,6	60,4	62,7	65,6	68,9
70	238 790	954 293	3 256 939	10 936 909		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	79 027	302 061	990 862	2 864 092		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	30 482	112 076	353 919	922 634		1300000	57,3	67,6	71,6	77,6	86,8
115	4 607	15 666	45 379	103 267		100000	77,7	91,2	96,7	104,4	115,4
135	1 455	4 714	12 863	28 148		10000	103,8	122,0	129,1	139,6	155,1
150	711	2 234	5 857	12 715		2280	126,7	149,6	158,1	171,4	193,3

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

*) Beräknat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 7											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,722	Beräknat*)			
Mjpkt, °C:	56,1	63,2	69,1	74,9		F/B, vikt:	0,96	1,48	1,64	1,85	2,16
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	48,9	59,7	62,1	65,0	68,4
70	204 403	538 479	1 161 019	2 375 359		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	68 288	173 316	365 542	726 020		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	26 522	65 296	134 816	259 927		1300000	56,1	63,2	65,5	69,1	74,9
115	4 050	9 430	18 548	33 326		100000	76,3	85,5	88,6	93,3	100,7
135	1 284	2 899	5 513	9 417		10000	102,0	114,1	118,4	124,6	133,9
150	628	1 393	2 590	4 274		2280	124,4	139,7	145,1	152,8	163,7

*) Beräkat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

*) Beräknat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Asfaltbruk 8											
Vol%:	25,0	34,0	39,2	42,9		Komp.d., g/cm3:	2,977	Beräknat*)			
Mjpkt, °C:	60,5	73,5	85,0	93,6		F/B, vikt:	1,05	1,62	1,79	2,03	2,36
Temp. °C	Viskositet, mPa·s *)					Vikt%:	51,2	61,8	64,2	67,0	70,3
70	376 475	1 999 725	7 979 143	21 336 573		Vol%:	25,0	34,0	36,3	39,2	42,9
80	123 235	618 737	2 275 390	5 780 921		Viskositet, mPa·s	Temperatur, °C				
90	47 032	223 974	772 109	1 877 511		1300000	60,5	73,5	78,4	85,0	93,6
115	6 938	29 391	90 537	201 964		100000	82,1	99,0	105,2	113,7	124,8
135	2 155	8 431	24 500	51 876		10000	109,6	132,0	140,3	151,7	166,6
150	1 041	3 864	10 873	22 293		2280	133,9	161,5	172,2	186,7	205,6
*) Beräkat ur WLF-samband					*) Interpolerat med polynom						

*) Beräknat ur WLF-samband

*) Interpolerat med polynom

Bilaga 4. Sifvertabeller över upprepad mätning med RVB

Bruk: 5C-60 190319				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
4687	149,9	63	54	11	34
9984	135,1	61	52	5	15
41284	112,4	61	52	1,3	3,7
260088	90,1	59	50	0,19	0,57
1200000	75,4	58	49	0,04	0,12
1300000:	74,7	C1:	6,72	C2:	131,6

Bruk: 5C-25 190319				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
5168	149,8	28	23	5	13
11270	135,2	28	24	2	6
48167	112,5	29	25	0,5	1,5
310417	90,1	30	25	0,08	0,24
1550000	74,7	31	26	0,02	0,05
1300000:	76,2	C1:	7,07	C2:	143,2

Bruk: 5C-60-II 190319				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
4776	150,0	64	54	11	34
10408	135,1	64	54	5	15
43311	112,6	64	55	1,3	3,7
276754	90,1	63	54	0,19	0,57
1289583	75,5	62	53	0,04	0,12
1300000:	75,4	C1:	6,83	C2:	134,8

Bruk: 5C-75 190319				Spindel: 27	
Viskositet mPa·s	Temp °C	Torsion %	Skjuvsp. Pa	Skjuvhast. 1/s	Rotation rpm
4609	149,9	75	63	14	40
9866	135,1	74	63	6	19
40543	112,5	75	63	1,6	4,6
259722	89,9	75	64	0,24	0,72
1305357	74,7	73	62	0,05	0,14
1300000:	74,7	C1:	6,69	C2:	130,3

