

Thesis 286

Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk

Inblandning av returafalt samt framtagande av mätmetod DSR

Axel Håkansson

Måns Härstedt

Trafik och Väg

Institutionen för Teknik och Samhälle

Lunds Tekniska Högskola

Lunds Universitet





Copyright © Axel Håkansson, Måns Härstedt

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5253)/1-124/2015
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2015

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5253)/1-124/2015

Thesis/Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 286

ISSN 1653-1922

Authors: Axel Håkansson
Måns Härstedt

Title: Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk – Inblandning av returafalt samt framtagande av mätmetod DSR

English title: Rheological Characteristics of Bitumen and Bitumen-Filler Mastics – Use of RAP and Method Development DSR

Language: Swedish

Year: 2015

Keywords: Dynamisk skjuvreometer, DSR; Rotationsviskosimeter, RVB; Bitumen; Filler; Returasfalt; Reologi

Citation: Axel Håkansson och Måns Härstedt, Reologiska egenskaper och jämförelser mellan bitumen och asfaltbruk – Inblandning av returafalt samt framtagande av mätmetod DSR. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2015. Thesis. 286

Abstract:

The Master Thesis was set to study the possibility to measure the rheological properties of bitumen-filler mastic with RVB (Rotational Viscometer type Brookfield) and DSR (Dynamic Shear Rheometer). This was carried out with an initial study, with promising results, from the RVB. It is known that filler has a stiffening effect when mixed with bitumen (FAS Method 253-02) and this was also confirmed when running the RVB-tests. A major part of the study, with the DSR, came to be about developing a method. The method covers all from the specimen preparation to programming the Amplitude (strain) and Frequency sweep. As a part of a research project within Skanska, a number of tests regarding RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) mixed into new asphalt concrete were conducted. This was achieved by testing both the bitumen and bitumen-filler mastics which were extracted from the asphalt concrete. The Master Thesis concludes that measuring on bitumen-filler mastics is possible with the RVB and DSR equipment, although further research is needed before these methods can be picked up and used on a “daily basis” by the asphalt industry.

Trafik och väg
Institutionen för Teknik och samhälle
Lunds Tekniska Högskola, LTH
Lunds Universitet
Box 118, 221 00 LUND

Transport and Roads
Department of Technology and Society
Faculty of Engineering, LTH
Lund University
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Förord

Detta examensarbete är den avslutande delen av Civilingenjörsutbildningen i Väg- och vattenbyggnad vid Lunds tekniska högskola för institutionen Teknik och samhälle, avdelningen Trafik och väg. Arbetet påbörjades i september och avslutades i december under 2015 och har utförts i samarbete med Svenskt VägCentrum och Skanska Vägtekniskt centrum Syd.

Vi vill främst tacka våra handledare, Per Tyllgren (SVC), Ebrahim Parhamifar (LTH) och Richard Nilsson (Skanska), för all den tid, handledning och stöd som vi fått under examensarbetets gång.

Vi vill också tacka vår examinator Sven Agardh (LTH) för den kontinuerliga dialogen kring arbetets omfattning och innehåll.

Vi vill även tacka Eva Tornberg (Professor vid Institutionen för Livsmedelsteknik, LTH) för hjälpen vid vidareutvecklandet av mätmetod för den DSR-utrustning som använts, Markus Linder (Service Manager, Anton Paar Nordic AB) för teknisk support före och under examensarbetet och Petri Uhlbäck (Bindemedelsspecialist, Nynas AB) för metodikinspiration.

Samtliga moment under examensarbetet har utförts gemensamt.

Axel Håkansson & Måns Härstedt
Lund, december 2015

Sammanfattning

Asfalt är den vanligaste vägbeläggningstypen i Sverige. Asfalt består av bitumen, filler, stenmaterial och eventuella tillsatser. Stenmaterial utgör huvuddelen av asfaltmassan och ska ta upp trafiklasterna. När bitumen blandas med filler bildar det ett asfaltbruk som binder samman stenmaterial till en beläggning. En väsentlig del för beläggningen är att den har rätt egenskaper för det avsedda klimatet. En asfaltbeläggning ska vara tillräckligt elastisk under vintern för att inte spricka och tillräckligt styv på sommaren för att hålla ihop. Bitumen är en produkt från råolja som har viskoelastiska egenskaper vilket innebär att materialet har både elastiska och viskösa egenskaper.

Egenskaperna för bitumen testas traditionellt med ett flertal metoder vilka har gemensamt att de ger en mätpunkt. Exempel på metoder är Kula och ring (mjukpunkten, °C), penetrationstal (styvheten vid 25 °C, dmm) och Fraass (brytpunkt, °C). Resultaten från dessa mätningar ger, tillsammans med hjälp av empiriska erfarenheter, en bild av bitumenets egenskaper. För att ta forskningen ett steg längre har två mer avancerade mätmetoder anammats av asfaltindustrin. Dessa är RVB (Rotationsviskosimeter modell Brookfield) och DSR (Dynamisk Skjuvreometer). RVB mäter viskositeten, alltså flödesmotståndet, och DSR mäter bland annat komplex skjuvmodul och fasvinkel. Metoderna har gemensamt att de ger flertalet mätpunkter över ett spann med temperaturer vilket gör att resultatet ger en mer detaljerad bild av bitumenet inom dess arbetsområde jämfört med de traditionella metoderna. Generellt ger RVB en bild av egenskaperna från blandning av asfaltmassan till utläggning och packning medan DSR ger en bild av egenskaperna för beläggningen när den belastas av trafiklast.

Användningen av RVB och DSR för att testa bitumens egenskaper blir vanligare i branschen på grund av att beläggningarna blir allt mer komplexa. Detta beror på att inblandning av retur-asfalt, tillsatsmedel samt optimering av recept förekommer mer frekvent. För att ta ett steg närmre verkligheten undersöks hur metoderna fungerar om testerna utförs på asfaltbruk istället för på rent bitumen. Det finns en testmetod (FAS 253-02) för Kula och ring som behandlar asfaltbruk. Examensarbetet utgår från denna metod och undersöker hur mätning på asfaltbruk fungerar med RVB och DSR. En förstudie med RVB bekräftade att mätning på asfaltbruk var möjlig.

Examensarbetet inleddes med en litteraturstudie av framförallt rapporter och tidigare examensarbeten där mätmetoderna använts för att undersöka bitumen. Därefter startade mätningarna på rent bitumen för att i ett senare skede kunna jämföra dessa mot mätningar på asfaltbruk innehållande samma bitumen. Det visade sig då att metoden för användning av RVB fungerade medan metoden för DSR hade en del utvecklingspotential. Det beslutades därför att en metod för användning av DSR (för vägbyggnad vid LTH) behövde utarbetas. Detta kom att förändra tidplanen för examensarbetet vilket ledde till att en del tester utgick för att ge utrymme för framtagandet av en metod. Detta var en förutsättning för att genomföra tester med DSR.

Framtagandet av en metod för DSR mynnade ut i en elevmanual för studier i vägbyggnadssyfte vid LTH. Manualen behandlar stegen från provkroppstillverkning till programmering av tillhörande programvara samt resultatpresentation. Provkroppar tillverkas numera med hjälp av en lödkolvsmonterad sked som ger användaren en högre precision och inte åldrar bindemedlet till

skillnad mot när en hel burk värms gång på gång i värmeskåp. Provkropparna gjuts i silikonformar på en våg och monteras efter avsvälning i utrustningen. DSR körs med två mätsystem (PP25 och PP08) med olika diameter på mätytan (25 och 8 mm). Mätresultaten styrs delvis av höjden på provkroppen och därför har den bestämts till en gemensam höjd (1 mm). Tidigare förekom olika provkroppstillverkningsmetoder och provkroppshöjder för mätsystemen men de har nu likställts för att ge en konsekvent metod. Metoden som framtagits beskrivs till största del även i examensarbetet under kapitlet Metod. Utöver manualen utarbetades mallar för resultatpresentation till både DSR och RVB för att underlätta, kontrollera och jämföra arbetet vid detta och kommande examensarbeten.

Som en del i ett större projekt vid Skanska Vägtekniskt centrum, som undersöker egenskaperna för asfaltbeläggningar med inblandning av returafalt, har bitumen och asfaltbruk undersökts med RVB och DSR i detta examensarbete. Projektet syftar till att förklara reologiska egenskaper och fokuserar framförallt på stabilitet i beläggningen. På grund av att det som undersökts är en del i ett större pågående projekt önskar Skanska i nuläget att inte sprida resultaten vidare.

Examensarbetet resulterade i ett material som visar effekterna vid inblandning av olika mängd filler och returafalt. På grund av komplikationer vid utvärderingen av amplitudsvep (då det inte gick att bestämma något linjärt viskoelastiskt område enligt det uppsatta kriteriet) utgick fortsatta studier på asfaltbruk med DSR. Resultaten från RVB gav dock en bra bild som visar den uppstyvnande effekten som filler har samt att egenskaperna för bruk liknar dem för rent bitumen vilket tyder på att resultaten är trovärdiga. Som tidigare nämnt kom en del av examensarbetet att handla om framtagandet av en manual som beskriver användandet av DSR i vägbyggnadssyfte vid LTH. Manualen skapar möjlighet för en repeterbar metod vilket leder till att resultat från olika mätningar kan jämföras med varandra samt att kommande studenter ges en grund att stå på.

Summary

Asphalt concrete is the most common type of pavement in Sweden. Asphalt concrete consists of bitumen, filler, aggregate and potential additives. The aggregate represents the main part of the asphalt concrete and takes up the traffic loads. Bitumen mixed with filler forms a mastic that binds the aggregate and forms a paving. An essential part of the paving is that it has the right properties for the intended environment. An asphalt concrete must be enough elastic during the winter not to crack and stiff enough in the summer to avoid deformation. Bitumen is a product of crude oil with viscoelastic properties, which means that the material has both elastic and viscous properties. In turn this means that the paving can stick together while being flexible.

The properties of the bitumen are conventionally tested by several methods which have in common that they provide only one measure point. Some examples of methods are Ball and Ring (softening point, °C) Penetration rate (stiffness at 25 °C, dmm) and Fraass (breaking point, °C). The results of these measurements provide, with the help of empirical experience, descriptions of characteristics of bitumen. In order to bring the research one step further, two more advanced measuring methods are being adopted by the asphalt industry. These are RVB (Rotational Viscometer type Brookfield) and DSR (Dynamic Shear Rheometer). RVB measures the viscosity, thus the resistance to flow, and DSR measures, among other things, complex modulus and phase angle. The methods have in common that they provide a range of measuring points at several temperatures. Therefore the result gives a more detailed picture of the bitumen characteristics in comparison to the conventional methods. Generally, RVB provides a picture of the behaviour during mixing of the asphalt concrete to the laying and compaction of the paving. Meanwhile the DSR provides a picture of the properties of the pavement during traffic loads.

The use of RVB and DSR to test the characteristics of bitumen have become more frequent in the asphalt industry due to the introduction of RAP, additives and optimized recipes. To take a step closer to the reality a study of methods used to measure pure bitumen has been applied on bitumen-filler mastics. There is a test method (FAS 253-02) for Ball and Ring examining the stiffening effect of filler mixed with bitumen. This Master Thesis is based on that method and examines how measurements on bitumen-filler mastics work with RVB- and DSR-equipment. A preliminary study with the RVB confirmed that the measurement of bitumen-filler mastic characteristics were possible.

The work began with a literature study, consisting of reports and previous Master Theses where the measurement methods were used to examine bitumen. The measurements started with pure bitumen to form a base for later comparison with bitumen-filler mastics. It turned out that the measuring method for RVB was functional but as for the DSR the method was in need of some improvement. It was therefore decided that the measuring method for the DSR (used by the Department of Road Construction at LTH) needed to be developed. This came to change the time schedule for the thesis and led to some tests being cancelled to give space for the development of a measuring method for DSR which were required to carry out tests.

The developed method for the DSR resulted in a manual for further studies within road construction at LTH. The manual covers the steps from specimen preparation to programming the related software and presentation of results. Test specimens are now made using a spoon,

mounted on a soldering iron that gives higher precision during preparation. Also the bitumen ages less when locally heated instead of repeatedly heated in oven. The liquid bitumen is poured into a silicone mold stationed on a scale and is let cool off before mounted to the equipment. The DSR runs with two measuring systems (PP25 and PP08) with different diameter of the measuring surface (25 and 8 mm). The results from the tests rely partly on the height of the specimen and therefore it has been set to one height (1 mm). Previously there were various preparation methods and specimen heights but they have now been equated to give a consistent method. The developed method is described under the chapter *Metod* in the Thesis. In addition to the manual templates for results presentation were created for both DSR and RVB to enable, control and compare this and future theses.

As part of a greater project within Skanska (Technical division), which examines the characteristics of asphalt concretes mixed with RAP (Reclaimed Asphalt Pavements), the bitumen and bitumen-filler mastics are studied with RVB and DSR. The project aims to explain the rheological properties and focuses mainly on the stability of the paving. Because of the study being a part of an ongoing project Skanska currently wishes not spread results.

The Master thesis resulted in a material that shows the effects of adding various amount of filler and RAP content. Due to complications in the evaluation process of amplitude sweeps (not being able to determine the established linear viscoelastic area) further studies on bitumen-filler mastics with DSR were cancelled. However the results from the RVB gave a good picture that shows the fillers stiffening effect. The properties are similar to those of pure bitumen which indicates that the findings are reliable. As earlier mentioned part of the thesis came to be about the development of a manual describing the operation process of the DSR in road construction purposes at LTH. The manual holds a consistent and repeatable method which leads to the results from various measurements being comparable and gives future students a good foundation.

Innehållsförteckning

Förord.....	III
Sammanfattning	IV
Summary	VI
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte & mål.....	2
1.3 Metodbeskrivning	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Asfalt	3
2.1.1 Bitumen	5
2.1.2 Filler	6
2.1.3 Stenmaterial.....	6
2.2 Polymermodifierad asfalt	7
2.3 Återvinning av asfalt	7
2.4 Spårbildning i asfalt.....	10
2.5 Reologi.....	10
2.5.1 Viskoelastiska egenskaper.....	12
2.5.2 Oscillation.....	12
2.6 Rotationsviskosimeter, RVB	13
2.6.1 BTDC-diagram	14
2.7 Dynamisk skjuvreometer, DSR	16
2.7.1 Amplitudsvep	16
2.7.2 Frekvenssvep	17
2.7.3 MSCR-Test.....	18
2.8 Masterkurva	19
2.8.1 WLF.....	20
2.8.2 Sigmoidal-modellen	21
2.9 Andra provningsmetoder	22
2.9.1 Mjukpunkt med kula & ring	22
2.9.2 Penetrationstal	22
2.9.3 Brytpunkt med Fraass-test.....	22

3	Metod.....	23
3.1	Provningsprogram	23
3.2	Blandning av bruk	23
3.3	Extrahering av bitumen & filler.....	24
3.4	Mätning med RVB.....	26
3.4.1	Förutsättningar vid mätningar	26
3.4.2	Provpreparering	27
3.4.3	Programmering av körning.....	27
3.5	Mätning med DSR	29
3.5.1	Förberedelser och allmänna förutsättningar	30
3.5.2	Provkroppsberedning.....	30
3.5.3	Applicering och trimtemperatur	30
3.5.4	Intervalluppbyggnad för amplitud- och frekvenssvep.....	31
3.5.5	Amplitudsvep och LVE.....	34
3.5.6	Frekvenssvep	35
3.5.7	MSCR.....	36
4	Resultat.....	37
4.1	RVB	37
4.2	DSR	39
4.2.1	Amplitudsvep	39
4.2.2	Frekvenssvep	40
4.2.3	MSCR.....	42
5	Diskussion och slutsatser.....	44
5.1	RVB	44
5.2	DSR	45
5.2.1	Framtagande av konsekvent och repeterbar mätmetod	45
5.2.2	Amplitudsvep	46
5.2.3	Frekvenssvep	47
5.2.4	MSCR.....	49
5.3	Bruksstudie	49
5.3.1	RVB.....	49
5.3.2	DSR	51
5.4	Avstämning mot syfte och mål.....	54

5.5	Rekommendationer.....	54
6	Referenser.....	55
7	Bilagor.....	58
7.1	Bilaga - RVB.....	59
7.2	Bilaga – Amplitudsvep.....	71
7.3	Bilaga – Frekvenssvep.....	82
7.4	Bilaga – Masterkruvor.....	92
7.5	Bilaga - MSCR.....	98
7.6	Bilaga – Undersökning av bruk i DSR.....	109

1 Inledning

Examensarbetet har genomförts i väglaboratoriet vid LTH under hösten 2015. Arbetet studerar reologiska egenskaper för bitumen med relevant mätutrustning.

1.1 Bakgrund

Asfalt är den vanligaste beläggningen på vägar i Sverige. Det är därför av intresse att veta hur asfalt fungerar från att den tillverkas till att den används, det vill säga belastas av trafik. Saknas tillräcklig kunskap om hur asfalten fungerar riskerar den att gå sönder i förtid med onödiga reparations- och underhållskostnader som följd.

Asfalt består av stenmaterial och bindemedel. Egenskaperna hos bindemedlet, bitumen, har avgörande betydelse för funktionen och hållbarheten hos vägbeläggningen. Rent bitumens egenskaper är väldokumenterat och det finns en god empirisk kunskap hur bitumens egenskaper förhåller sig till den färdiga asfaltmassan. För att ta ett steg närmare verkligheten kan bitumen blandas med filler (benämns asfaltbruk eller bruket). Bruket omsluter och håller samman stenmaterialet. Stenmaterialets sammansättning och egenskaper åstadkommer slitstyrka, ytstruktur och stabilitet i asfalten. Egenskaperna hos bruket betyder kanske mer för funktionen hos asfalten än kvaliteten på enbart bitumen. Om bindemedelstester istället utförs på bruket skulle resultatet av mätningarna potentiellt ligga närmre verkligheten än när endast bitumen testas. Om så är fallet skulle det kunna bli ett steg framåt för asfaltindustrin.

Provningsmetoderna, kula och ring (K&R), penetrationstest och Fraas är välbeprövade för bitumen och har länge använts inom branschen. De senaste åren har ett flertal examensarbeten på LTH genomförts med två ”nya” provningsmetoder som är vanligt förekommande inom andra branscher. Dessa är rotationsviskosimeter modell Brookfield (RVB) och dynamisk skjuvreometer (DSR). Vid de tidigare examensarbetena har det konstaterats att RVB skulle kunna ersätta de gamla metoderna, nämnda ovan, samtidigt som den tillför mer information om bindemedlets reologiska egenskaper. Detta ger en sammanhängande bild av de viskösa egenskaperna i temperaturområdet för blandning, utläggning och packning istället för flera testresultat från olika mätmetoder.

Mätningarna med DSR är inte fullt utvecklade ännu men utifrån tidigare resultat finns där mycket att hämta. I dagsläget finns det två standarder för provning med DSR, en amerikansk, ASTM D-7175-08 (ASTM International, 2008) och en svensk, SS-EN 14770:2012 (Swedish Standards Institute, 2012).

I Föreningen för asfaltbeläggningar i Sveriges metod FAS 253-02, som bygger på en DIN-metod, beskrivs ett test som undersöker uppstyvningsförmågan hos filler vid inblandning i bitumen. I testet används K&R-metoden för att mäta förändringen av mjukpunkt. I detta examensarbete används FAS 253-02 som grund för val av volymsandel filler vid tillverkning av asfaltbruk.

1.2 Syfte & mål

Examensarbetet ska utveckla hanteringen av DSR-utrustningen. Framförallt gäller det upprättandet av en standardiserad mall för provningsprogram, provberedning och presentation av resultat.

Examensarbetet ska även studera de reologiska effekterna vid inblandning av returafalt i nya massor. Mekaniska egenskaper undersöks med RVB och DSR. Fokus kommer ligga på att hitta indikationer för att kunna förklara materialets stabilitet.

Examensarbetet ska slutligen undersöka mätmetodernas (RVB och DSR) lämplighet för asfaltbruk och i sådana fall jämföra resultaten med rent bitumens. Detta görs för att undersöka om resultaten för bruket blir trovärdiga och därmed användbara för branschen.

Målet är ett underlag som kan förklara och förutsäga mekaniska egenskaper som stabilitet och utmattning hos asfaltbeläggningar.

1.3 Metodbeskrivning

För att utreda frågeställningarna i detta examensarbete används två utrustningar. Den ena är en rotationsviskosimeter modell Brookfield (RVB) med vilken viskositeten mäts vid ett flertal temperaturer. Den andra är en dynamisk skjuvreometer (DSR) med vilken oscillerande test utförs som amplitudsvep (för att utvärdera LVE-området), frekvenssvep (för att mäta komplex skjuvmodul (G^*) och fasvinkel (δ)). Med DSR studeras även krypning och elasticitet (MSCR). Provningsarna föregås av en litteraturstudie.

1.4 Avgränsningar

Arbetet ska beskriva bitumen och brukets viskoelastiska egenskaper som funktion av temperatur och frekvens. Mätningarna kommer att utföras med LTHs RVB- och DSR-utrustning.

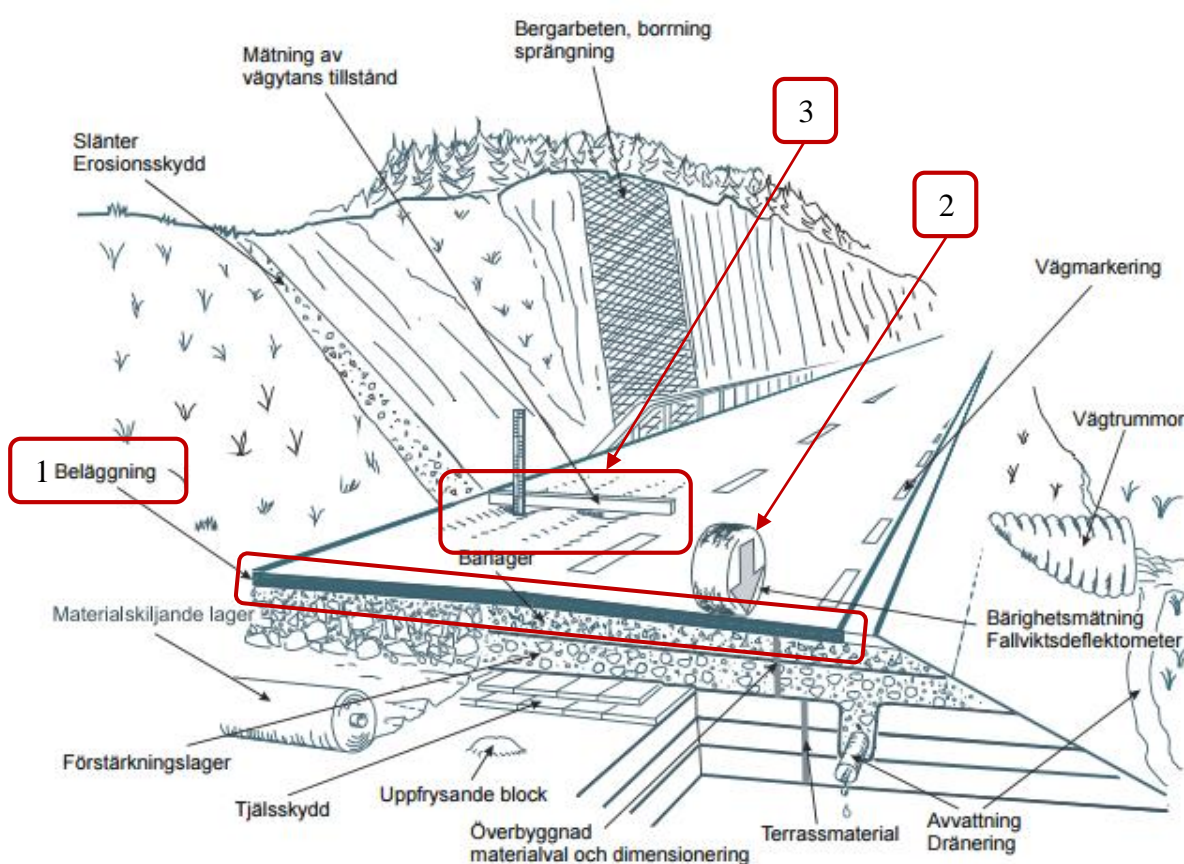
Resultaten från studien på inblandning av returafalt kommer inte att analyseras och redovisas i detalj då materialet är en del av ett större, ännu ej slutfört, externt projekt. Därför är proverna maskerade och resultatet härifrån kommer inte diskuteras eller analyseras i någon större omfattning i detta examensarbete. Resultaten verkar dock logiska och kan förhoppningsvis vara till hjälp i projektet.

2 Teori

I detta kapitel beskrivs huvudsakligen de bakomliggande teorierna samt mätmetoderna som examensarbetet grundar sig på.

2.1 Asfalt

Asfalt är en typ av beläggning som i huvudsak används i vägkonstruktioner, Figur 2.1. Beläggningens funktioner är flera. Den ska hålla vatten borta från vägytan och underliggande grusmaterial, klara trafikbelastningen och fördela ut krafterna till underliggande lager och samtidigt vara flexibel för att undvika sprickor i konstruktionen. Utöver detta ska ytan vara tillräckligt jämn för att framföra fordon på ett säkert och behagligt vis (Agardh & Parhamifar, 2014).



Figur 2.1 – Schematisk figur av en vägkonstruktion. Rapporten fokuserar på 1. beläggningen, 2. last på väggroppen samt 3. spårbildning i beläggningen (Trafikverket, 2011a)

Asfalt består av stenmaterial, filler och bindemedel som blandas vid 120-160 °C. Uppvärmningen krävs för att bindemedlet, bitumen (används hädanefter istället för bindemedel), ska vara lättflytande och kunna fördelas som ett tunt skikt runt varje enskild sten i grusmaterialet (Asphalt Institute, 2007). När asfaltmassan är färdigblandad är det viktigt att den omgäende transporteras till den plats där den skall läggas ut och att den förvaras i en försluten behållare (i Sverige vanligtvis ett rundat lastbilsflak övertäckt med presenning). Temperaturen är viktigt för att behålla en arbetbar asfaltmassa tills dess att asfalten har lagts ut på vägytan.

plats. Därefter vältas beläggningen för att tillgodose tillräcklig packning av materialet och efter avsvälning är vägen redo att användas (Agardh & Parhamifar, 2014).



Figur 2.2 – Asfaltläggare t.v. och vält t.h. (Västkustens mark och asfalt AB, 2015).

Fördelningen mellan olika kornfraktioner och bitumen är avgörande för att få en bra beläggning. Fördelningen av kornfraktionerna bestäms av vilken typ av asfaltmassa som eftersträvas. Det finns i stora drag två typer, tät och dränerande, där tät är den vanligast förekommande i Sverige. I en tät beläggning anpassas fördelningen av kornfraktionerna kontinuerligt. Det leder till en stabil beläggning som fördelar krafterna från trafiken samt förhindrar vatten att tränga ner i underliggande lager. En tät asfaltmassa kan användas i alla klimattyper som justerings-, bind-, bär- och slitlager eller tunnskikt. Dessutom har den relativt god nötningsbeständighet (framförallt vid användning av hårdare bitumenkvaliteter i kombination med slitstarkt stenmaterial) men på grund av den släta ytan kan den täta beläggningen vara reflekterande när den blir våt (Agardh & Parhamifar, 2014).

En dränerande asfaltbeläggning används ibland när andra funktioner eftersträvas än de som en tät beläggning erbjuder. En dränerande beläggning har mestadels grövre kornfraktioner och hög hålrums halt vilket leder till att vatten kan passera ner igenom beläggningen för att undvika kvarstannade vatten uppe på vägen. På grund av fördelningen av stenmaterialet blir ytan skrovlig vilket ger god friktion samt leder till att ljudvågor reflekteras sämre då ljudet absorberas (dämpas) i hålrummen till skillnad mot en tät där det mesta av ljudet reflekteras. En dränerande beläggning minskar på så sätt bullret från en väg vilket kan vara fördelaktigt i närheten av bebyggelse. Nackdelarna med en dränerande asfaltbeläggning är att den är svårare att lägga, slits och åldras snabbare samt att den lättare får stensläpp (Agardh & Parhamifar, 2014).

Oavsett vilken typ av massa som ska användas vid det aktuella projektet är valet av bitumen ett av de viktigaste besluten som tas vid dimensionering av asfaltbeläggningar.

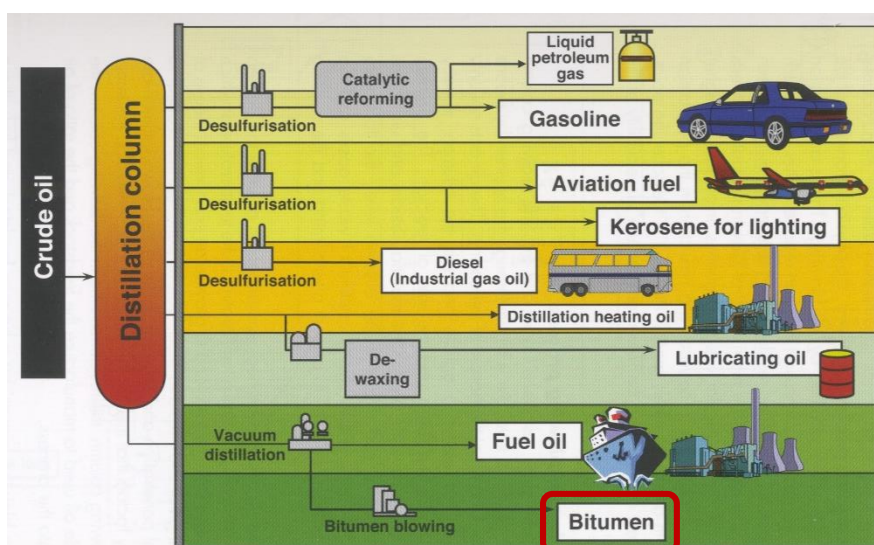
2.1.1 Bitumen

Bitumen räknas som ett av de första byggnadsmaterial som människan använde sig av. Det finns lämningar från 6000 f.Kr. från Sumer i dåtidens Mesopotamien där bitumen användes som tätningsmaterial vid båtbyggande. Sedan dess har bitumen använts som tätnings- och bindemedel för olika applikationer inom de flesta industrier (Roberts, et al., 1996).

Bitumen förekommer både naturligt och som konstgjord produkt. Det naturligt förekommande bitumen var det som först användes. Det förekommer på flertalet platser på jorden men den mest kända idag är vid Trinidad utanför Venezuelas kust. Hundratusentals ton bitumen har under åren tagits upp från källan men den fylls ständigt på med mer bitumen som trycker upp från jordens inre (Roberts, et al., 1996).

Sedan början av 1900-talet har människan använt mer och mer råolja som bränsle i form av bland annat bensin och diesel. Vid raffinering av råolja fås även bitumen och med den ökande mängden bränsle steg även mängden raffinerad (producerad) bitumen. Idag är användningen av raffinerat bitumen mycket vanligare än den naturligt förekommande. Då råolja redan transporterats till raffinaderierna och bitumen därmed finns närmre slutanvändaren har användningen av naturligt bitumen minskat kraftigt (Roberts, et al., 1996).

Raffinering av råolja går i korthet till på följande sätt. Råoljan hettas upp till ca 350 °C varpå den pumpas in i en fraktioneringskolonn. Råoljan är då uppdelad både som en gas och i flytande form. Fraktioneringskolonnen (ett högt cylinderformat torn) är uppdelad i flera nivåer som släpper igenom stigande gas. Desto högre gasen stiger desto lägre blir temperaturen. När en fraktion når sin kokpunkt kondenserar den och stannar på den nivån i fraktioneringskolonnen som fraktionen stigit till. På så sätt sorteras fraktionerna beroende på kokpunkt varefter petroleumprodukter för olika användningsområden tappas ut. En del fraktioner övergår aldrig till gas. Dessa tas ut i botten av fraktioneringskolonnen och pumpas vidare till en andra raffinering. Processen går till på liknande sätt som första raffineringen men trycket sänks avsevärt vilket gör att även kokpunkten sänks. Bitumen tillhör de fraktioner som genomgår en andra raffinering. För att få en översiktlig bild av vilka produkter som tas ut vid raffineringen och även en rangordning av hur flyktiga dessa produkter är se Figur 2.3 nedan.



Figur 2.3 - Schematisk figur av oljeraffinering (Petrauskas & Ullah, 2015)

Bitumen delas i sin tur in beroende på hårdhet och namnges med hjälp av exempelvis penetrationsstal (Petrauskas & Ullah, 2015). Vid dimensionering av asfaltbeläggningar väljs bitumen utefter bland annat trafikbelastning och klimat (Trafikverket, 2011b).

2.1.2 Filler

Filler definieras i detta examensarbete enligt en standard för Kula och ring- metoden till fraktioner mindre än 0,063 mm (FAS Service AB, 2002). Filler fås vid krossning av sten i ett stenbrott. Vanligtvis används filler från samma typ av mineral som det övriga stenmaterialet i beläggningen men det förekommer även att t.ex. cement används för att ge beläggningen andra eller ytterligare egenskaper (Liao, et al., 2013).

Fillerns funktion i beläggningen är huvudsakligen att fylla upp hålrummen mellan de grövre fraktionerna. Fillern gör även att kohesionen och stabiliteten i beläggningen ökar samt att packningen förbättras (Asphalt Institute, 2007).

2.1.3 Stenmaterial

Stenmaterialet utgör den betydande delen av en asfaltmassa och ligger normalt på 95 % av totalvikten. Materialet kommer i Sverige till största del från någon typ av bergtäkt (Agardh & Parhamifar, 2014). Vanligtvis fås stenmaterial genom att man borrar ner i berget, fyller på med sprängämnen och spränger loss sjok av berget. Efter att materialet sprängts loss krossas det till användbara fraktioner och siktas för att få det sorterat så att asfaltrecepten kan anpassas efter behov (t.ex. om det ska vara en dränerad eller tät beläggning) (Asphalt Institute, 2007). Kvaliteten på stenmaterialet är avgörande för beläggningens egenskaper men går inte att modifiera i efterhand vilket gör att endast stenmaterial med tillräcklig kvalitet får användas. I Sverige används sällan stenfraktioner större än 32 mm. Vid benämningen av en asfaltmassa anges bland annat största stenstorlek. Se exempel på benämning av asfaltmassa nedan (Agardh & Parhamifar, 2014):

92 ABT 11 160/220

92	Mängden massa per kvadratmeter som ska läggas (kg/m^2), (Kan även anges som höjd i mm)
AB	AsfaltBetong
T	Tät massa
11	Största stenstorlek i mm
160/220	Penetrationstal för bitumen

2.2 Polymermodifierad asfalt

I de flesta fall fungerar bitumen utmärkt som bindemedel i asfalt. Begränsningarna vid val av bitumen beror på de viskoelastiska egenskaperna (Se avsnitt 2.5.1) för det aktuella bitumenet. Det ska vara tillräckligt styvt vid den högsta förekommande temperaturen för att inte flyta och samtidigt vara tillräckligt mjukt vid de lägst förekommande temperaturen för att inte bli sprött (vilket i sin tur leder till sprickor i beläggningen). I takt med att utvecklingen har gått framåt har gränserna för vad ett standardbitumen klarar av uppnåtts. Detta beror framförallt på följande faktorer:

- Häftigare regn
- Större temperaturvariationer
- Ökade axel- och däcktryck samt totalvikter
- Användning av tunnare asfaltlager
- Ökat fokus på kostnadseffektiva lösningar som ger längre underhållsintervall, minimerar störningen av trafiken samt ökar livslängden

Det finns generellt två sätt att påverka bindemedlet i asfaltmassan. Antingen väljs bitumen av annan kvalitet (större eller mindre penetrationstal) för att anpassa egenskaperna till de lokala förutsättningarna. Detta gör dock att både de övre och undre temperaturgränserna flyttas samtidigt. När det inte räcker till modifieras bindemedlet genom tillsättning av till exempel polymerer. Polymeren gör att de elastiska egenskaperna för bindemedlet späs på och temperaturspannet inom vilket asfaltmassan fungerar utökas (Rodrigues & Hanumanthgari, 2015).

2.3 Återvinning av asfalt

Med tiden åldras bitumenet i asfalten, oxiderar, och blir således styvare samt krymper något. Detta snabbar på nedbrytningen av vägen eftersom det i en styvare asfalt lättare uppstår sprickor dessutom blir vidhäftningen sämre gentemot stenmaterialet vilket resulterar i stensläpp (Agardh & Parhamifar, 2014).

När vägen är i så dåligt skick att inte sedvanligt underhåll räcker till står man oftast inför två alternativ om vad som ska göras med de bundna lagren (asfalten) i vägen. Antingen river man upp asfalten, lägger materialet på deponi alternativt utfyllnad eller så återvinner man materialet i form av inbladning i nyproducerad massa. Den asfalt som samlas in för återvinning brukar benämnas retur-asfalt eller RA (Westergren, 2004).

För återvinning av asfalt finns ett antal olika metoder men ett gemensamt första steg för samtliga är att man måste plocka upp den gamla massan. Detta sker huvudsakligen med två tekniker, grävning eller fräsning. Vid grävning får man upp asfaltsjok som därefter transporteras till en kross där det mals ner till asfaltgranulat, se Figur 2.4. När fräsning används får man istället färdigt asfaltgranulat direkt vid upprivningen, se Figur 2.5. Därefter sker oftast någon typ av mellanlagring innan det används i någon av återvinningsprocesserna (Westergren, 2004).

De olika återvinningsmetoderna är:

- Varm återvinning
- Halvvarm återvinning
- Kall återvinning
- Återvinning till fyllnadsmassor

Dessa kan ske antingen på plats eller i asfaltverken (Westergren, 2004).



Figur 2.4 – Bild över asfaltsjok och när dessa lastas i en kross (Nordisk Vägforum, NVF, 2012)

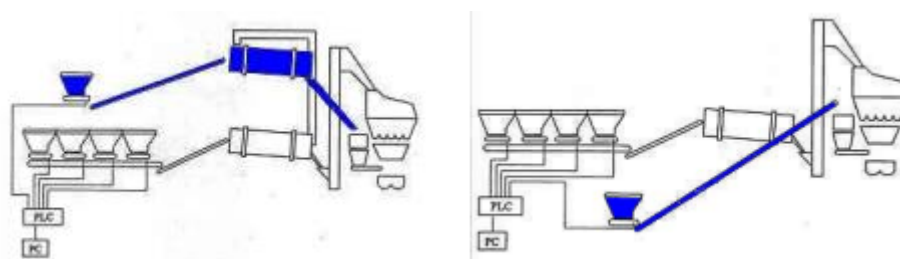


Figur 2.5 – Befintlig beläggning som fräses upp till asfaltgranulat med en fräs (Nordisk Vägforum, NVF, 2012).

Vid varm återvinning värmer man upp och blandar ihop asfaltgranulatet, det nya stenmaterialet och nytt bitumen till en ny asfaltmassa. Detta sker antingen på verket eller ute på plats (in-situ) med metoderna *Remixing* eller *Repaving*. Remixing sker med långa ”fordonståg” där de främre

delarna värmer upp beläggningen och fräser upp den till bakomvarande vilka i sin tur blandar ihop den med ny massa, lägger ut, jämnar av och välter den nya beläggningen (Nordisk Vägforum, NVF, 2012). Vid Remixing finns det möjlighet att tillsätta nytt bindemedel, mjukgörare eller tillsats i form av föryngringsmedel. Repaving sker på samma sätt som Remixing med skillnaden att den uppfrästa massan inte blandas med den nytillverkade asfaltmassan (Westergren, 2004).

Vid varm återvinning i verk finns olika förfaranden. Två vanligt förekommande metoder är blandning av allt material i samma uppvärmda trumma eller värms granulatet och det övriga materialet var för sig i varsin trumma (parallellt) innan de blandas samman. Fördelen med parallelltrumma är att högre andel returafalt kan blandas in samt att det nytillsatta bitumenet inte åldras (oxiderar) lika mycket eftersom stenmaterialet inte behöver överhettas i samma grad för att väga upp för granulatet (Westergren, 2004).



Figur 2.6 – Parallelltrumma t.v. och direkt inblandning t.h., markeringen visar returafalts väg (Westergren, 2004).

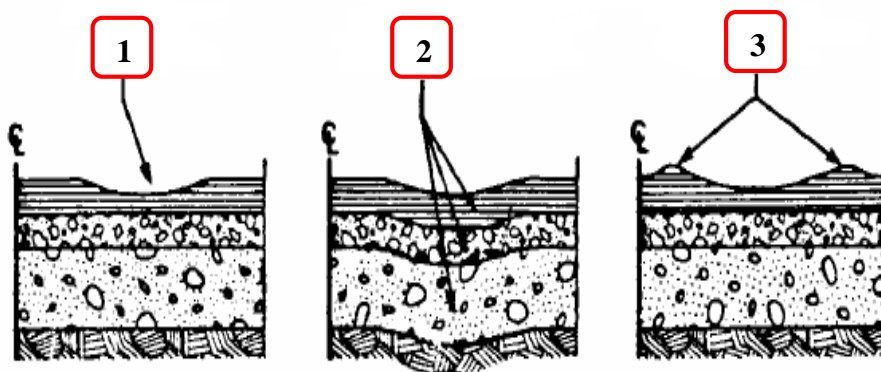
Halvvarm återvinning liknar förfarandet för varm återvinning men sker vid lägre temperaturer (ofta 50-80 °C med hjälp av ångvärmeaggregat) och är inte lika storskaligt. Verken är mobila och kan med fördel flytta med produktionen på bekostnad av att det blir mindre mängder som kan tillverkas. Det som tillsätts är mjukt bitumen vilket alltså lämpar sig för kallare klimat men klarar dock mindre trafikbelastningar (Westergren, 2004).

Vid kall återvinning tillsätts oftast 100 % returafalt och bara undantagsvis lite grus. Istället för att värma upp granulatet tillsätter man bitumenemulsioner och blandar om. De mobila verken har inte så stor kapacitet men är lätta att flytta. Denna typ av återvinning lämpar sig mest för vägar där trafikmängden sällan överstiger ÅDT på 1500 fordon (Westergren, 2004).

Utöver dessa har en gammal metod för återvinning av asfalt, föryngring, kommit tillbaka men med högre kvalitet på tillsatsmedel. Föryngring går ut på att återställa bitumenets egenskaper till sina ursprungliga och med andra ord mjuka upp det eftersom det har oxiderat med tiden (åldrats) och därmed blivit styvare. Detta gör man genom att tillsätta högraffinerad olja eller någon typ av naturoolja som löser upp det oxidera bitumenet och gör det mjukare med viss beständighet. Metoden är fortfarande i ett utrednings- och utvecklingsskede men har visat lovande resultat (Tyllgren, 2010).

2.4 Spårbildning i asfalt

Spårbildning är ett fenomen som uppstår på grund av strukturella problem i konstruktionen. Fenomenet uppkommer antingen på grund av slitage från framförallt personbilar (friktionen mellan (dubb)däck och vägyta) eller deformation, se Figur 2.7. Deformation av beläggning, obundna lager och terrass förekommer på alla vägar och beror framförallt på tunga fordon som ger upphov till en stor belastning. Långtidslaster (stillastående trafik) och låg hastighet ger upphov till spårbildning lokalt vid till exempel busshållplatser eller korsningar (Agardh & Parhamifar, 2014).



Figur 2.7 – 1. Nötning. 2. Deformation av underliggande lager. 3. Deformation av beläggningen.

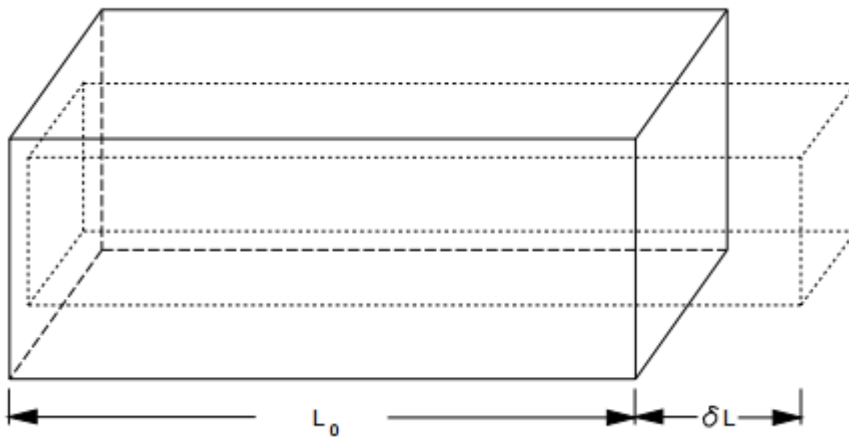
Spårbildning är av intresse då det kan ge upphov till en dålig trafiksäkerhet. Dels upplevs vägen som mer osäker när en trafikant kör på en väg med spårbildning då fordonet blir mer svårmanövrerat än på en jämn väg. Dessutom kan problem med avrinningen uppstå och göra att vatten blir kvar i spåren vilket skapar förutsättning för vattenplaning samt ökar nedbrytningen av vägen. Framförallt vad gäller slitage så blir förekomsten av slitagespår i större utsträckning mer påtaglig när vägbanan är fuktig. Utöver säkerheten så ger spårbildning upphov till större skador längre ner i väggroppen. Allt eftersom spåren växer och blir djupare passerar fler fordon på samma ställe och lasten fördelas på ett mindre område än vad som dimensionerats. Detta kan då ge effekten att ännu djupare spår bildas eller uppkomsten av sprickor visar sig i konstruktionen och vägen blir dyrare att underhålla (Agardh & Parhamifar, 2014).

2.5 Reologi

Ordet reologi myntades cirka 1928 av Eugene C. Bingham, under mottot ”allting flyter”. Reologi är läran för de material som uppvisar både elastiska och viskösa egenskaper, alltså beter sig som både en solid och en vätska samtidigt. För att utvärdera ett materials reologiska egenskaper undersöks hur det svarar på belastning. Belastningen ger en spänning i materialet vilket ger en töjning (Steffe, 1996). Ett material som är elastiskt (solid) svarar på en belastning genom att först töjas och sedan, efter avlastning, återgå till sin ursprungliga form. Är materialet visköst (vätskor) töjs det kontinuerligt under belastning och efter avlastning sker, till skillnad mot för

ett elastiskt material, ingen återgång. Helt elastiska eller plastiska material utgör ytterligheter för hur ett material beter sig. Utöver belastning så styrs materialegenskaper i huvudsak av temperatur och belastningstid. Framförallt gäller det för de viskösa egenskaperna (Taylor & Airey, 2015).

Töjning mäts i procent och uttrycker skillnaden mellan ursprungslängd (utan pålagd belastning) och längdförändring (på grund av en belastning), se Figur 2.8.



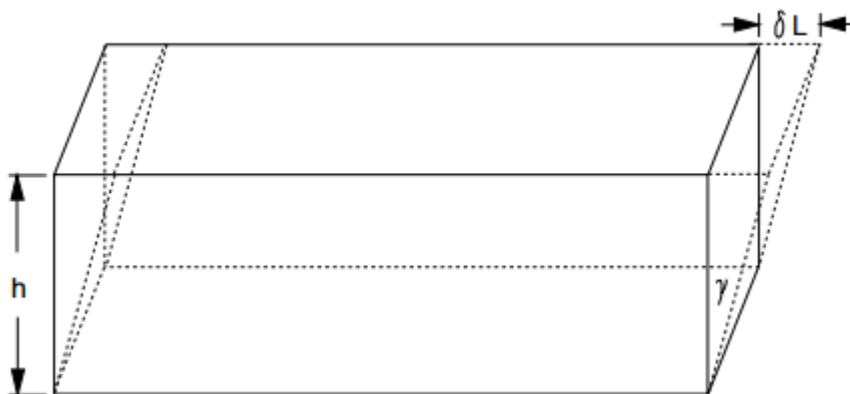
Figur 2.8 – Töjning (Steffe, 1996)

Ett annat sätt att mäta töjning är genom skjuvning. Enligt Figur 2.9 är det förflyttning av material i förhållande till provets storlek. Skjuvning kan räknas om till vinkeländring med Ekvation 2.1.

$$\tan \gamma = \frac{\delta L}{h}$$

Ekv. 2.1

- γ Skjuvvinkel
- δL Längdförskjutning
- h Provkroppens höjd



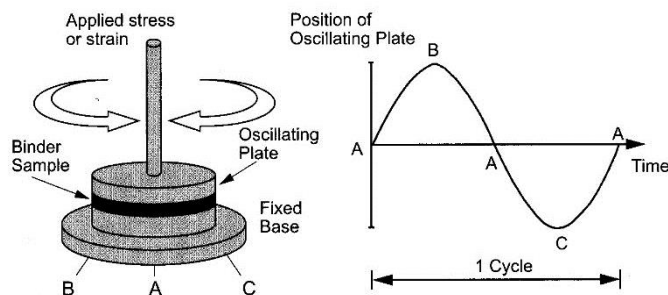
Figur 2.9 – Skjuvtöjning (Steffe, 1996)

2.5.1 Viskoelastiska egenskaper

Material som uppvisar både viskösa och elastiska egenskaper kallas för viskoelastiska. Bitumen är ett viskoelastiskt material som är dominerande elastiskt vid låga temperaturer och/eller korta belastningstider och dominerande visköst vid höga temperaturer och/eller låga belastningstider. För asfaltmassan innebär det att en del av deformationen från trafikbelastningen är återgående medan en del ackumuleras som permanenta deformationer (spårbildning) (Taylor & Airey, 2015).

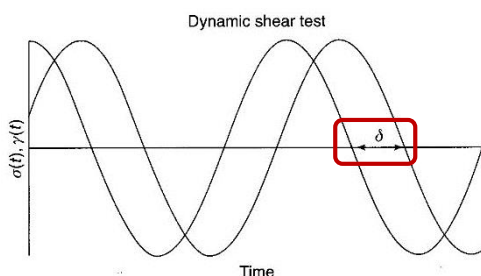
2.5.2 Oscillation

Oscillation är benämningen på roterande harmoniskt svängning. Det innebär att något roteras fram och tillbaka med konstant frekvens och vinkeländring. Rörelsen kan uttryckas som en sinusfunktion där vinkeländringen uttrycks som amplitud (Figur 2.10). Med en oscillerande rörelse kan således belastningstid och töjning av materialet kontrolleras och mätas flera gånger på samma prov (Asphalt Institute, 2007). För tester på bitumen är huvudsakligen två faktorer intressant komplex skjuvmodul (G^*) och fasvinkel (δ). Med dessa kan materialets egenskaper beskrivas inom hela spektrumet från helt elastiskt till helt visköst.



Figur 2.10 – Princip för oscillering (Asphalt Institute, 2007)

Vid undersökning av viskoelastiska material är det viktigt att veta om det är de elastiska eller de viskösa egenskaperna som dominerar. Med oscillerande mätmetoder mäts detta som en fasförskjutning mellan pålagd spänning och uppmätt töjning, se Figur 2.11. Fasvinkel 0° innebär att materialet är helt elastiskt och 90° innebär att materialet är helt visköst (Taylor & Airey, 2015).



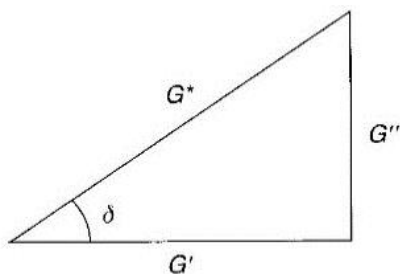
Figur 2.11 – Fasförskjutning (δ) mellan belastning t.v. och töjning t.h. (Taylor & Airey, 2015)

Komplex skjuvmodulen (G^*) är ett mått på det totala motståndet mot att deformeras under belastning med en oscillerande rörelse. G^* är som högst när fasvinkeln går mot 0° vilket sker när temperaturen sänks. G^* består egentligen av två parametrar elasticitetsmodul (G') respektive viskositetsmodul (G'') som uttrycker skjuvmodulen för respektive egenskap hos materialet. Följande ekvationer (2.2, 2.3) och Figur 2.12 uttrycker sambandet mellan δ , G^* , G' och G'' (Asphalt Institute, 2007).

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \text{ [Pa]} \quad \text{Ekv. 2.2}$$

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \text{ [Pa]} \quad \text{Ekv. 2.3}$$

G^*	Komplex skjuvmodul
G'	Elasticitetsmodul
G''	Viskositetsmodul
δ	Fasvinkel

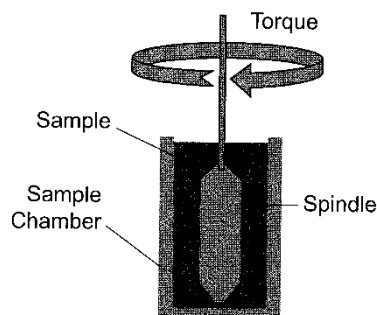


Figur 2.12 – G^* i förhållande till G' och G'' beroende på δ (Taylor & Airey, 2015)

2.6 Rotationsviskosimeter, RVB

Viskositet är ett mått på strömningsmotstånd i materialet och är i allmänhet viktig att känna till för att veta pumpbarheten i ett flödessystem. Viskositeten varierar med temperatur och minskar när temperaturen höjs. För bitumen specifikt används viskositeten för att bestämma optimal blandnings- och packningstemperatur. Utifrån dessa temperaturer styrs sedan produktionen så att varje gruskorn täcks med en bitumenfilm samt att tidsfönster för transport och utläggning regleras (Asphalt Institute, 2007).

En rotationsviskosimeter mäter motstånd från materialet (vridmoment) vid en förutbestämd temperatur och varvtal. Programvaran beräknar utifrån ovanstående parametrar och geometriska förutsättningar viskositeten i mätpunkten (Koenders, 2015). RVB utrustningen består av termostatstyrd värmecell där provet placeras. Provet mäts upp i särskilda mätrör, vanligtvis 8-11 gram beroende på spindel (Asphalt Institute, 2007). Ovanför värmecellen placeras mätutrustningen och i den fästes spindeln. Spindeln sänks ned i värmecellen och mätningarna kan påbörjas Figur 2.13 (Koenders, 2015).



Figur 2.13 – Tvärsnitt av spindel i mätrör (Asphalt Institute, 2007)

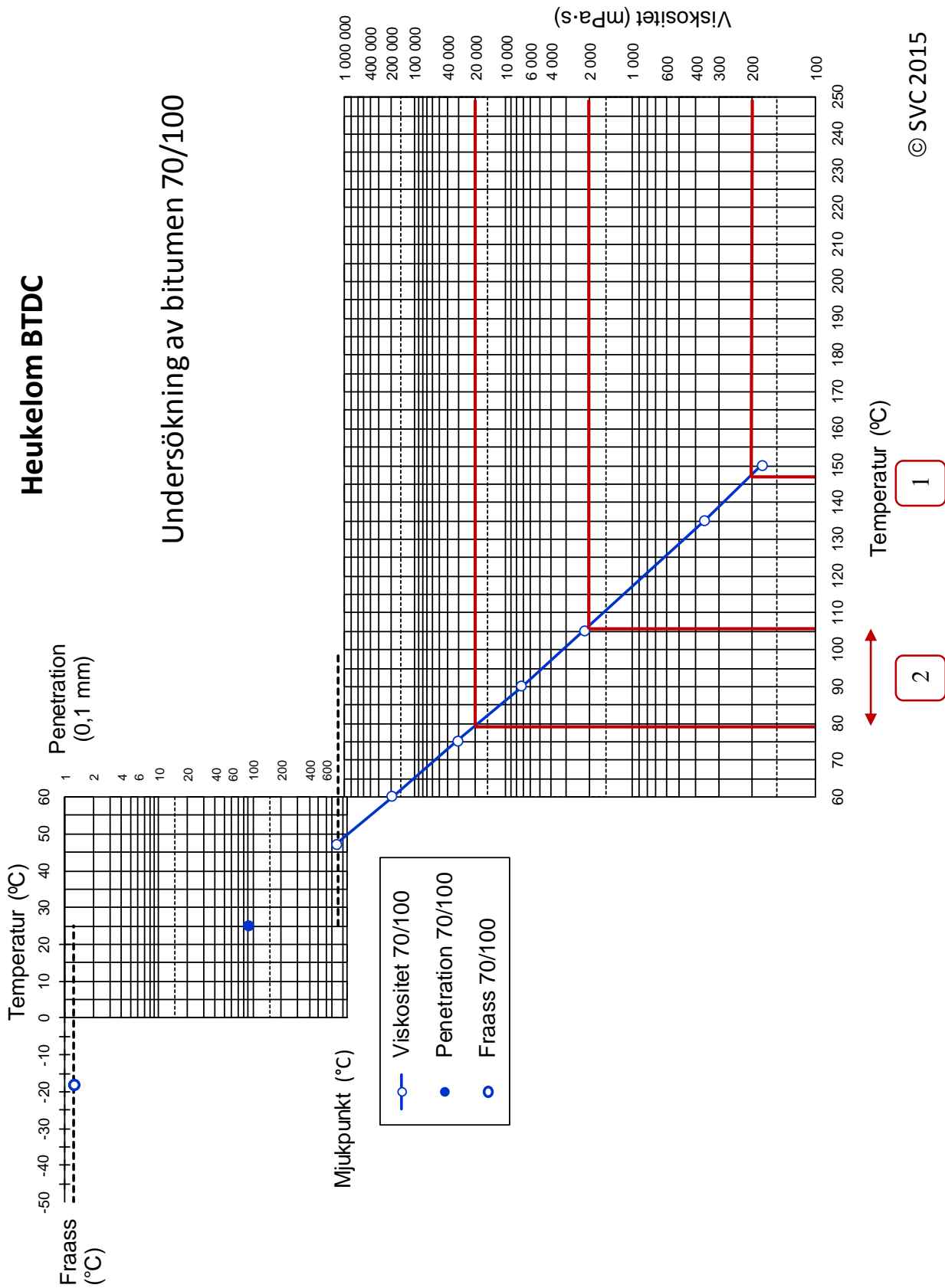
2.6.1 BTDC-diagram

Ett grafiskt sätt att presentera testresultat för bitumen är i ett BTDC-diagram. BTDC står för Bitumen Test Data Chart och togs fram av Willem Heukelom. Diagrammet utvecklades för att kunna presentera penetrationstal, mjukpunkt, brytpunkt enligt Fraass-metoden och viskositet som en funktion (Koenders, 2015). Med hjälp av BTDC-diagrammet kan alltså t.ex. mjukpunkten utläsas om viskositeten mäts. Mjukpunkten är definierad till 800 pen (penetrationstal) vilket motsvarar 1 300 000 mPa·s (Heukelom, 1973).

Ett BTDC-diagram visar hur bitumens viskositet beror på temperatur (Figur 2.14). Då tester görs vid flertalet temperaturer kan en matematisk linje anpassas och på så sätt kan sökta egenskaper utvärderas oberoende av temperatur. Blandning bör ske vid ca 200 mPa·s för att tillse att bitumen är flytande nog för att täcka gruskornen utan att rinna av under transporten till utläggningsplatsen. När asfaltmassan lagts ut bör viskositeten ligga mellan 2 000-20 000 mPa·s för att packningen ska bli bra. Är viskositeten lägre trycker välten materialet framför sig och är den högre blir massan svårbearbetad (Koenders, 2015).

Heukelom BTDC

Undersökning av bitumen 70/100

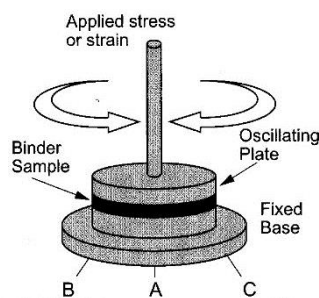


© SVC2015

Figur 2.14 – BTDC-diagram som visar viskositeten, penetrationstal och brytpunkt enligt Fraass. [1] motsvarar rekommenderad blandningstemperatur och [2] motsvarar rekommenderad temperatur vid packning av materialet.

2.7 Dynamisk skjuvreometer, DSR

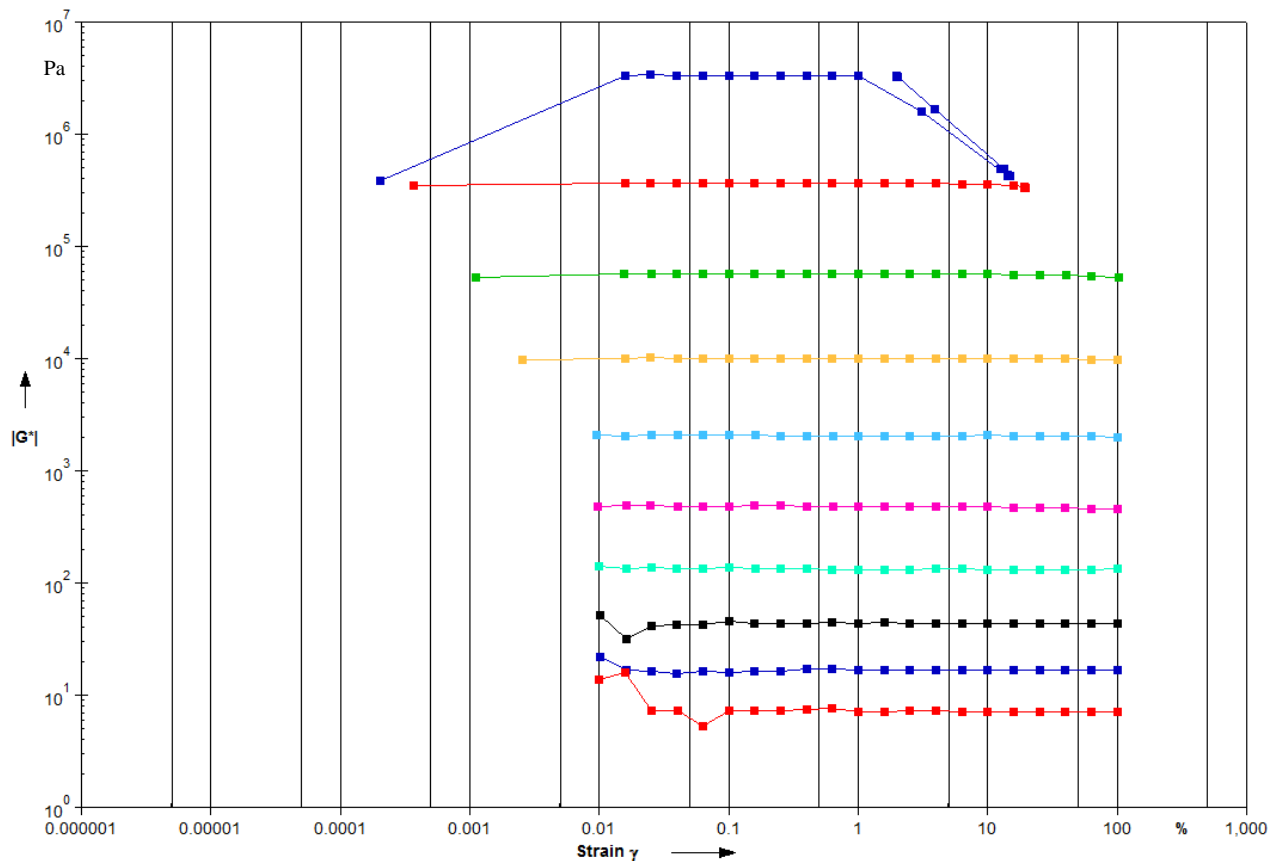
En dynamisk skjuvreometer, DSR, kan användas till att mäta ett materials reologiska egenskaper där elastiska, viskoelastiska och viskösa egenskaper ingår. Detta åstadkoms genom att komplex skjuvmodul (G^*) och fasvinkel (δ) registreras vid en given temperatur och frekvens (oscillation). När oscillation utförs med DSR, monteras en liten provkropp mellan två parallellplattor. Därefter vrids den ena plattan fram och tillbaka med en viss vinkelfrekvens (ω) medan den andra är fixerad och kan på så vis mäta en respons från materialet utifrån belastningens varaktighet, storlek och motstånd (Asphalt Institute, 2007).



Figur 2.15 – Illustrativ bild över hur oscillering fungerar i en DSR (Asphalt Institute, 2007)

2.7.1 Amplitudsvep

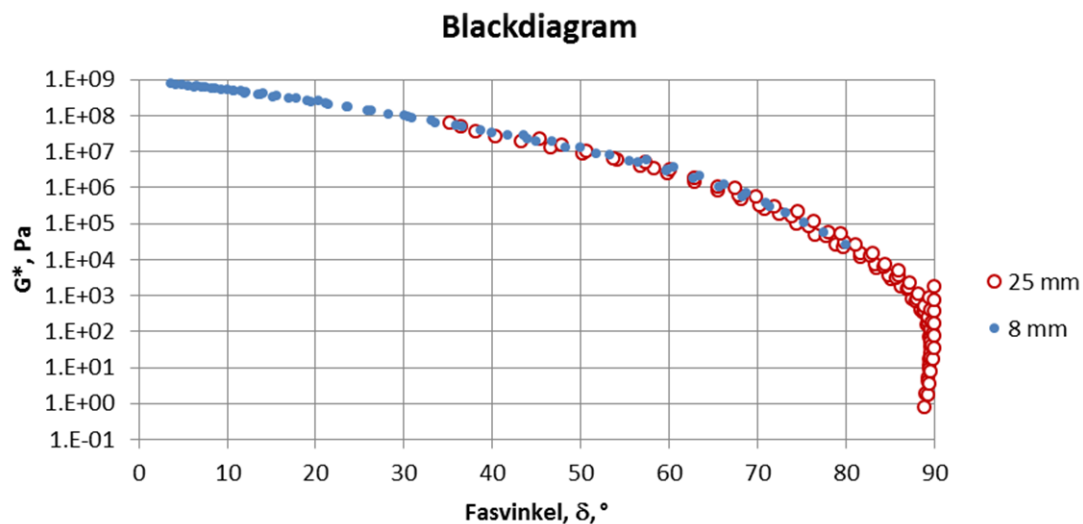
Det finns olika sätt att mäta med en DSR, ett av dem är att utföra ett amplitudsvep. När ett amplitudsvep utförs eftersöks materialets linjärt viskoelastiska område, LVE, för att se under vilka förutsättningar som materialet svarar likadant på ökande töjning. Ett amplitudsvep utförs vanligtvis vid den konstanta vinkelfrekvensen 10 rad/s (1,59 Hz) och mellan 0,01-100 % töjning (γ) vid en temperatur. DSR:en ökar successivt töjningen tills den når det angivna maximumet eller till dess att den komplexa skjuvmodulen avtar tillräckligt mycket. Materialets LVE-område sägs ligga mellan den lägsta och högsta töjningen varpå den komplexa skjuvmodulen håller sig konstant, alltså materialets styvhet är konstant (Anton Paar, 2015). Mer definierat så sträcker sig det Linjära viskoelastiska området till det att den komplexa skjuvmodulen sjunkit till 95 % av det initiala värdet (konstanta värdet) vilket kan ses i Figur 2.16. Resultatet från ett amplitudsvep ligger därefter till grund för efterkommande frekvenssvep (Liao , et al., 2015). Anledningen till att man kör amplitudsvepen vid frekvensen 10 rad/s är eftersom det är ekvivalent mot belastningstiden 0,1 sekunder. Detta motsvarar en belastning från ett lastbilsdäck med referenshastigheten 80 km/h (Taylor & Airey, 2015).



Figur 2.16 – Diagram över LVE-område utifrån ett amplitudsväp vid 10 rad/s från 0.01-100 % i töjning med temperaturerna 10-100 °C, där lägst temperatur är överst.

2.7.2 Frekvenssväp

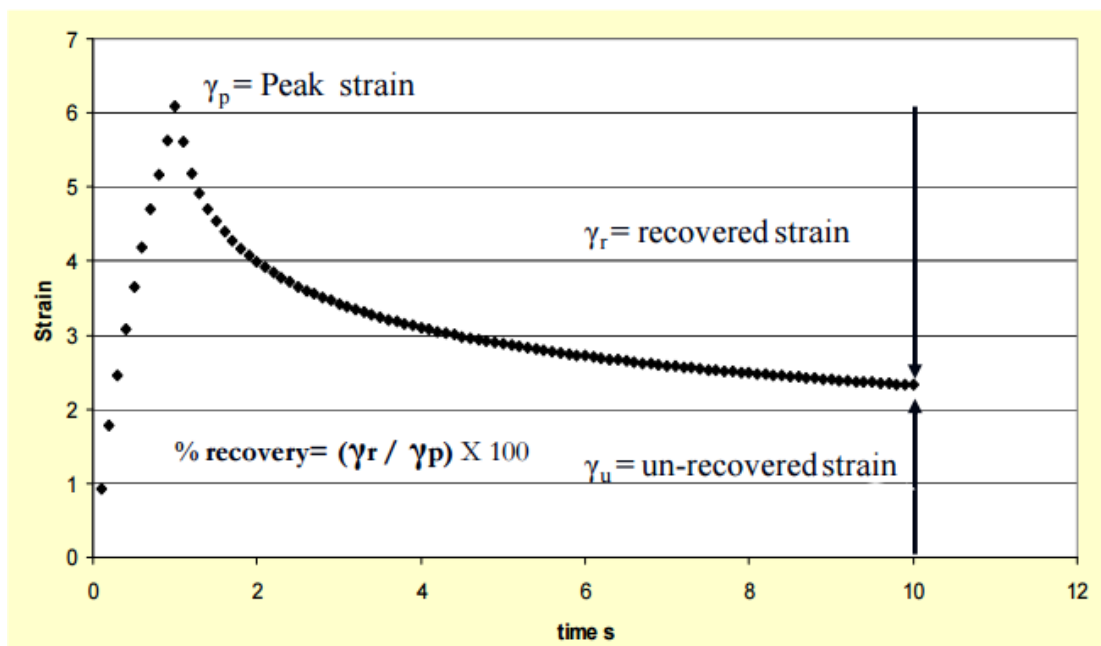
Ett frekvenssväp görs för att undersöka materialets egenskaper vid kort- och långtidsbelastningar, d.v.s. vid hög frekvens mäts belastning under kort tid och vid lägre frekvens under lång tid. Det utförs i frekvensområdet 100–0,1 rad/s och vid en konstant töjning, för respektive temperatur. Töjningen väljs ut ifrån materialets LVE-område vid den angivna temperaturen (Anton Paar, 2015). Resultatet från frekvenssväpet blir en fasvinkel (δ) vid en viss komplex skjuvmodul (G^*) vilket brukar redovisas i ett Blackdiagram där man på ett enkelt sätt kan tolka data utan att behöva använda Masterkurvor vilket kräver behandling av mätdata (Airey, 1997). I Figur 2.17 visas ett blackdiagram.



Figur 2.17 – Exempel på hur ett blackdiagram kan se ut för ett bitumen.

2.7.3 MSCR-Test

Multiple Stress Creep Recovery Test, MSCR är ett test som används för bitumen i amerikanska Superpave enligt en ASTM standard sedan 2008. När MSCR test körs utsätts först en provkropp för en konstant last (τ) under en sekund följt av en nio sekunders lång återhämtningsfas utan last vilket beskriver en cykel. Detta körs totalt i tio cykler vid 0,1 kPa belastning och därefter följer ytterligare tio cykler med samma förfarande vid 3,2 kPa. Under testet mäts deformationen (töjningen, γ) som en funktion av tiden för en temperatur och får på så sätt ett krypdiagram som Figur 2.18 visar (Xu, et al., 2015).



Figur 2.18 – Diagram över en MSCR cykel, där provkroppen belastas under 1 sekund varpå maximala töjningen fås och efter ytterligare 9 sekunder i avlastningsfasen där den permanenta töjningen fås (Office of Pavement Technology, April 2011).

Efter testet beräknas återgång (R) enligt Ekvation 2.4 (Office of Pavement Technology, April 2011), permanenta deformationen (γ_{nr}) för respektive laststorlek enligt Ekvation 2.5 och dividerar därefter med respektive last enligt Ekvation 2.6 för att få fram den kvarstående deformationen (J_{nr}). Det har visat sig att J_{nr} vid 3,2 kPa är ett bra mått på spårbildning för asfalt enligt den amerikanska myndigheten, Federal Highway Administration (FHWA). Genom försök har det också framkommit att en reducering till halva J_{nr} -värdet vid 3,2 kPa ger en direkt halvering av spårbildning vilket gör metoden intressant för utvärdering av bitumen (Xu, et al., 2015).

$$R = \frac{\gamma_r}{\gamma_p} \cdot 100 [\%] \quad \text{Ekv. 2.4}$$

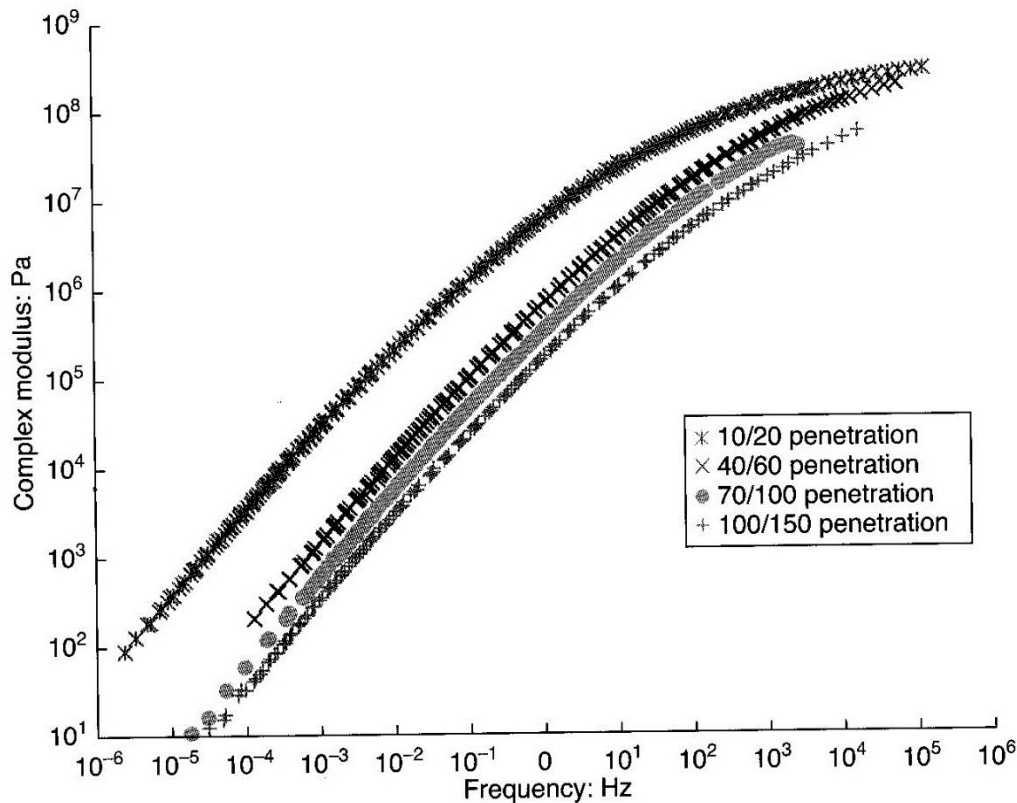
$$\gamma_{nr} = \gamma_p - \gamma_r [\%] \quad \text{Ekv. 2.5}$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{nr}}{\tau} [kPa^{-1}] \quad \text{Ekv. 2.6}$$

R	Återgång
γ_r	Elastisk töjning
γ_p	Maximal töjning
γ_{nr}	Plastisk töjning
J_{nr}	Kvarstående deformation
τ	Skjuvkraft

2.8 Masterkurva

När frekvenssvep görs med DSR kontrolleras töjningen så att den alltid ligger inom LVE-området. När mätning sker inom LVE-området svarar materialet linjärt på belastning vilket gör att mätningar vid olika temperaturer blir jämförbara. Med hjälp av en skiftfaktor kan mätdata vid olika temperaturer sammanfogas vid en referenstemperatur, vanligen 0-25 °C. Ett vanligt sätt att presentera detta är med en masterkurva. En masterkurva för ett antal standard bitumen kan ses i Figur 2.19 där komplex skjuvmodul G^* (Pa) kan utläsas mot reducerad frekvens (Hz). Skiftfaktorn justerar frekvenserna i frekvenssvepet mot referenstemperaturen (där av benämns det som reducerad frekvens). Detta gör att frekvensområdet för mätdata utökas. För bitumen gäller till exempel; för temperaturer över referenstemperaturen justeras frekvensen nedåt det vill säga för att motsvara längre belastningstider. Efter att frekvensen anpassats mot en referenstemperatur, förutsatt att de sker inom LVE-området, kan skiftfaktorn användas för att anpassa övriga viskoelastiska egenskaper mot samma referenstemperatur (Taylor & Airey, 2015).



Figur 2.19 – Masterkurvor för ett antal bitumen med olika penetrationstal, frekvensen för mätpunkterna har reducerats mot referenstemperaturen (Taylor & Airey, 2015)

2.8.1 WLF

För att beräkna skiftfaktorn behövs en matematisk formel. År 1955 publicerades en vetenskaplig artikel om just skiftfaktorn (a_T) baserat på relaxation för viskoelastiska polymerer. Där jämfördes mätningar mot skiftfaktorn och en ekvation togs fram. Ekvationen bygger på två konstanter som styr skiftfaktorn beroende på skillnaden mellan temperaturen och referenstemperaturen, Ekvation 2.7 (Williams, et al., 1955).

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_r)}{(T-T_r)+C_2} \quad \text{Ekv. 2.7}$$

a_T	Skiftfaktor
C_1 & C_2	Konstanter
T	Temperatur
T_r	Referenstemperatur

Flertalet senare undersökningar har visat att ekvationen, kallad WLF efter skaparna (Williams, Landel och Ferry), fungerar bra för beräkning bitumen egenskaper. För att ta fram skiftfaktorn kan även andra ekvationer användas däribland Arrhenius (Yusoff, et al., 2011).

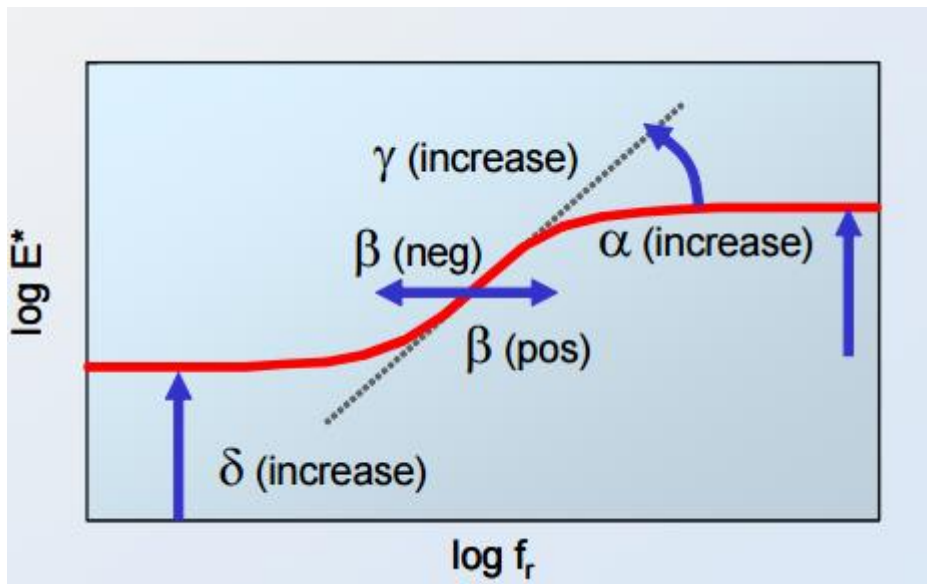
2.8.2 Sigmoidal-modellen

Vid framtagandet av en masterkurva kan till exempel en Sigmoidal-modell användas, för att beskriva masterkurvan matematiskt. Sigmoidal-modellen beskriver hur den komplexa skjuvmodulen (G^*) som funktion av reducerad frekvens (f_r). För presentation av resultat från frekvenssvep är den, trots sina begränsningar, väletablerad. Figur 2.20 visar hur Sigmoidal-modellen regleras (Yusoff, et al., 2011).

$$\log G^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(f_r))}} [Pa]$$

Ekv. 2.8

α	Skillnaden mellan höga och låga asymptoten
β	Reglerar läge i sida
γ	Reglerar lutning mellan asymptoterna
δ	Låga asymptoten
f_r	Reducerad frekvens



Figur 2.20 – Anpassning av Sigmoidal-modell (Partl, 2005)

2.9 Andra provningsmetoder

Det finns flertalet provningsmetoder som testar egenskaper för bitumen som inte har använts i detta examensarbete. Nedan följer kortfattade redogörelser för några då dessa har nämnts i rapporten.

2.9.1 Mjukpunkt med kula & ring

Kula och ring metoden används för att bestämma mjukpunkten för ett bitumen. Flytande bitumen hålls upp i ringar där det får stelna. Provet förvaras sedan i kyl för att tillse att provet håller ca 5 °C vid testets början. Vatten destilleras (genom kokning) och kyls även det ner till ca 5 °C. Två ringar med samma bitumen och två kulor (en ovanpå vardera ring) placeras i en ställning och sänks ner i en bägare med det destillerade vattnet. Två uppsättningar används för att få ett säkrare mätvärde. Vattnet värms sedan med hjälp av en värmekälla och temperaturen i vattnet registreras. Den temperatur då kulan faller igenom ringen och träffar en underliggande platta 25 mm nedanför ringen definieras som mjukpunkten. Då materialet har en mjukpunkt >80 °C används glycerol istället för vatten (Koenders, 2015).

2.9.2 Penetrationstal

Mätning av penetrationstal görs med en penetrometer. Penetrometern låter en nål penetrera (tryckas ner) i en behållare med bitumen och mäter avståndet i decimillimeter (dmm). Nålen är standardiserad och trycks vanligtvis ner av en vikt på 100 g under 5 sekunder. Då testresultaten varierar beroende på temperatur förvaras bitumenprovet först i ett vattenbad som vanligtvis håller 25 °C. Tre individuella mätningar utförs på samma provkropp och medelvärdet definieras som penetrationstalet. Vid klassificering av bitumen används intervall av penetrationstal för att namnge bitumen kvaliteten. Ju hårdare bitumenet är desto lägre penetrationstal har det (Koenders, 2015).

2.9.3 Brytpunkt med Fraass-test

Fraass-test görs för att definiera ett bitumens egenskaper vid låga temperaturer (ner mot -30 °C). I ett Fraass-test böjs ett metallbleck fram och tillbaka. Blecket har måtten 41x20x0,15 mm och penslas med ett tunt lager bitumen. Under testet sänks temperaturen med 1 °C per minut tills dess att bitumenfilmen bryts. Temperaturen, vid vilken provet bryts, definieras som brytpunkten. Det har visat sig att brytpunkten kan likställas med en komplex skjuvmodul av $2,1 \times 10^9$ Pa. En del länder med kallare klimat har valt att definierat maximala temperaturer för brytpunkten för olika bitumenkvaliteter (Koenders, 2015).

3 Metod

I detta kapitel beskrivs hur undersökningarna genomförts samt hur mätresultaten framtagits. Dessutom beskrivs de förberedande steg som gjorts inför mätningarna av materialegenskaper.

3.1 Provningsprogram

Det utfördes tester på åtta verksblandade asfaltmassor (hädanefter kallade REF och Nr. 1-7). Efter blandningen extraherades bitumen med tillhörande filler. En av massorna är referensprov och de övriga innehåller olika mängd returafalt och polymer. Utöver verksblandningarna utförs tester på ett vanligt 70/100 bitumen med fillerinblandning 20, 30 samt 40 volyms-%. För samtliga bitumen utförs alla tester, innefattande viskositetsmätning med RVB, Amplitud- och Frekvenssvep samt ett MSCR med DSR. I Tabell 3.1 visas hela provningsprogrammet.

Tabell 3.1 - Provningsprogram

	RVB				DSR svep				DSR MSCR	
	Inblandad mängd filler (vol-%)				Inblandad mängd filler (vol-%)				Inblandad mängd filler (vol-%)	
Bitumen	0	20	30	40	0	20	30	40	0	40
70/100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Utgick
Bitumen (Nr.)	0		Enligt recept		0		Enligt recept		0	Enligt recept
REF	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
1	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
2	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
3	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
4	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
5	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
6	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick
7	✓		✓		✓		Utgick		✓	Utgick

3.2 Blandning av bruk

Blandning av bruk har gjorts för hand, se Figur 3.1. En burk med bitumen har värmts i ugn (vanligtvis vid 160 °C). När bitumenet blivit varmt och lättflytande hålls förutbestämd mängd (enligt recept från Skanska) upp i en behållare som är placerad på en våg. Sedan fylls behållaren på med filler och placeras åter i ugnen. En totalvikt på 60 g gram har visat sig lagom för att få en arbetbar massa och räcker till två RVB-rör samt provkroppar för DSR:n. Efter ett par minuter tas blandningen ur ugnen och rörs om förhand tills den blir homogen. För vissa blandningar har mer än en omrörning krävts med mellanliggande uppvärmning. När massan ansetts homogen (extra viktigt att få med materialet i botten på behållaren då filler tenderar att sedimentera) har provkropparna tillverkats. För bruken med 70/100 bitumen redovisas vilka filler mängder som används. För REF och Nr. 1-7 har bruken blandats baserat på recept från asfaltverket.

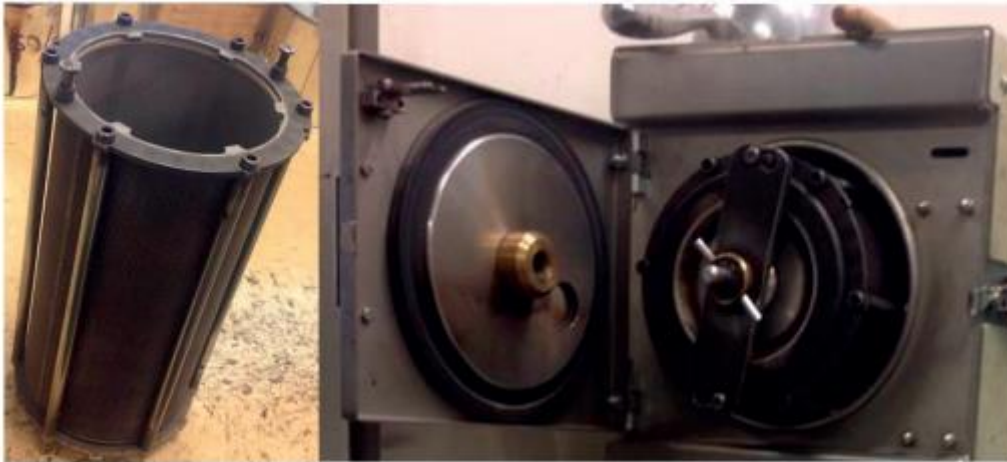


Figur 3.1 – Blandning av bruk.

3.3 Extrahering av bitumen & filler

All bitumen och filler som testats, förutom 70/100 och Dalby-fillret, har extraherats från verksblandade massor. Detta har utförts av Skanskas personal på Vägtekniskt centrum (VTC) Syd i Fosie.

För att extrahera bitumen och filler från en asfaltmassa krävs en process i flera steg. I det första steget tas massan och placeras i en cylinder klädd med ett masknät som kan liknas vid en sikt Figur 3.2. Storleken på hålen är 0,063 mm för att både bitumen och filler ska kunna skiljas från de större materialen i massan. Cylinder placeras därefter i en trumma där den kan rotera samtidigt som ett lösningsmedel (Metylenklorid) tillsätts. Under processen löses bitumenet upp och släpper från stenmaterialet och passerar, tillsammans med fillret, masknätet medan de större fraktionerna blir kvar i cylindern (Vägmateriäl, SIS/TK 202, 2013).



Figur 3.2 - Cylinder med masknät och trumma (Andersson & Sulejmani, 2014)

Nästa steg i processen är att separera bitumen (och lösningsmedlet) från filler. Detta görs genom att centrifugera blandningen så att fillret trycks ut mot kanterna och bitumenet med lösningsmedel rinner ut och tappas av till en behållare enligt Figur 3.2 (Vägmateriäl, SIS/TK 202, 2013).



Figur 3.2 – Centrifug vid punkt 1 och tappstation av bitumen och lösningsmedlet vid punkt 2 (Andersson & Sulejmani, 2014).

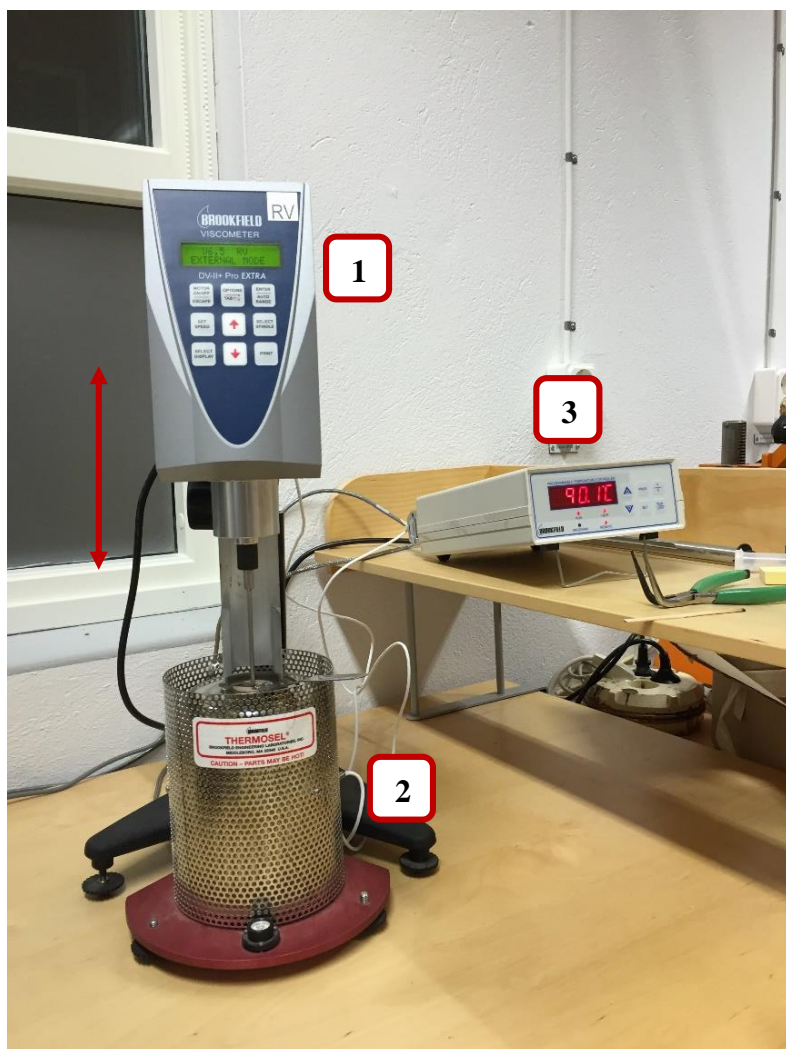


Figur 3.3 – Avskiljare för bitumen och lösningsmedel (Andersson & Sulejmani, 2014).

Sista steget är att skilja lösningsmedlet från bitumenet. Figur 3.3 visar utrustningen för separationen vilket kan ses som en destillationsprocess för lösningsmedlet. Vid punkt 1 suges blandningen upp till punkt 2. Vid punkt 2 värms blandningen upp till ca 150 °C varpå diklormetan förångas då det har en kokpunkt på 40 °C. Det förångade lösningsmedlet kyls därefter ner vid punkt tre av kylvatten tills lösningsmedlet kondenserar och rinner ner i behållaren vid punkt 4. Lösningsmedlet går därefter att återanvända till nästa extrahering och bitumenet är ensamt kvar i behållaren vid punkt 2 (Vägmateriäl, SIS/TK 202, 2013).

3.4 Mätning med RVB

Flertalet tidigare examensarbeten vid LTH har genomförts baserade på resultat från rotationsviskosimeter modell Brookfield, se Figur 3.3. Mätmetoden har utvecklats och utvärderats i flera steg vid LTH av bland annat Nilsgart & Grybb (2014) och Erlandsson (2012) och används inom bitumenbranschen sedan länge (Koenders, 2015).



Figur 3.3 – RVB-utrustning. 1. Mät huvud som lyfts/sänks före och efter mätning 2. ThermoSels som reglerar temperaturen 3. Temperaturdisplay

3.4.1 Förutsättningar vid mätningar

Vid samtliga mätningar i detta examensarbete har spindel #27 använts. Spindeln har ett mätområde mellan 125-2 500 000 mPa·s och en provmängd på 10,5 ml (Brookfield engineering, 2015). Mätområdet lämpar sig väl för bitumen då mätningar görs framförallt på viskösa egenskaperna och mjukpunkten är definierad till 1 300 000 mPa·s. Mätningarna är i huvudsak genomförda vid temperaturer från 165 °C till mjukpunkten med 15 °C mellan temperaturstegen (undantaget vissa bruksmätningar som startades vid 180 °C). Utgångspunkten är att mätningarna utförs vid en belastning (vridmoment) på 50 % av fjäderkapacitetens (Skjuvspänning på 43 Pa) för att säkerställa att maskinen ger ett trovärdigt resultat samt att inte riskera att hamna

utanför mätområdet. När mätområdet överskrids avbryter utrustningen själv mätningen och inget mätresultat erhålls. Detta görs för att inte riskera att fjädern deformeras. Fjädern är utrustningens svagaste men viktigaste komponent då det är via fjädern som vridmoment registreras och resultatet beräknas.

3.4.2 Provpreparering

Provprepareringen inleds med att en burk bitumen av vald kvalitet ställs i ugnen för att uppnå en temperatur då materialet är lättflytande (generellt 160 °C med vissa variationer beroende på uppnådd viskositet). Den angivna provmängden är 10,5 ml men för att underlätta uppmätningen används en våg så volymen beräknas om till vikt i gram. När bitumenet är lättflytande hålls det upp i speciella behållare som är anpassade för att passa i Thermoselen. I botten på behållaren finns en styrklack som ser till att den inte rör sig under mätningen (Figur 3.4). När provet är upphållt sänks det ner i Thermoselen och temperaturen sätts till 150 °C. Därefter sänks spindeln ner i provet och mätningen kan inledas.



Figur 3.4 – RVB-behållare med styrklack

3.4.3 Programmering av körning

För att underlätta hanteringen av utrustningen samt effektivisera mätningarna används programvaran Rheocalc. I programvaran anges temperatur, varvtal, tid samt intervall mellan mätpunkter. Det kan även regleras så att mätningen startar då en viss parameter är uppnådd. Avsvalningen mellan temperaturstegen registreras därför inte utan mätning startar först när temperaturen befinner sig en halv grad från varje temperatursteg. På så vis blir antalet mätpunkter färre och samma till antalet oavsett hur lång avsvalningen är. Detta underlättar även hanteringen av rådata när den förs in i en Excelfil. En skärmdump från Rheocalc visas i Figur 3.5.

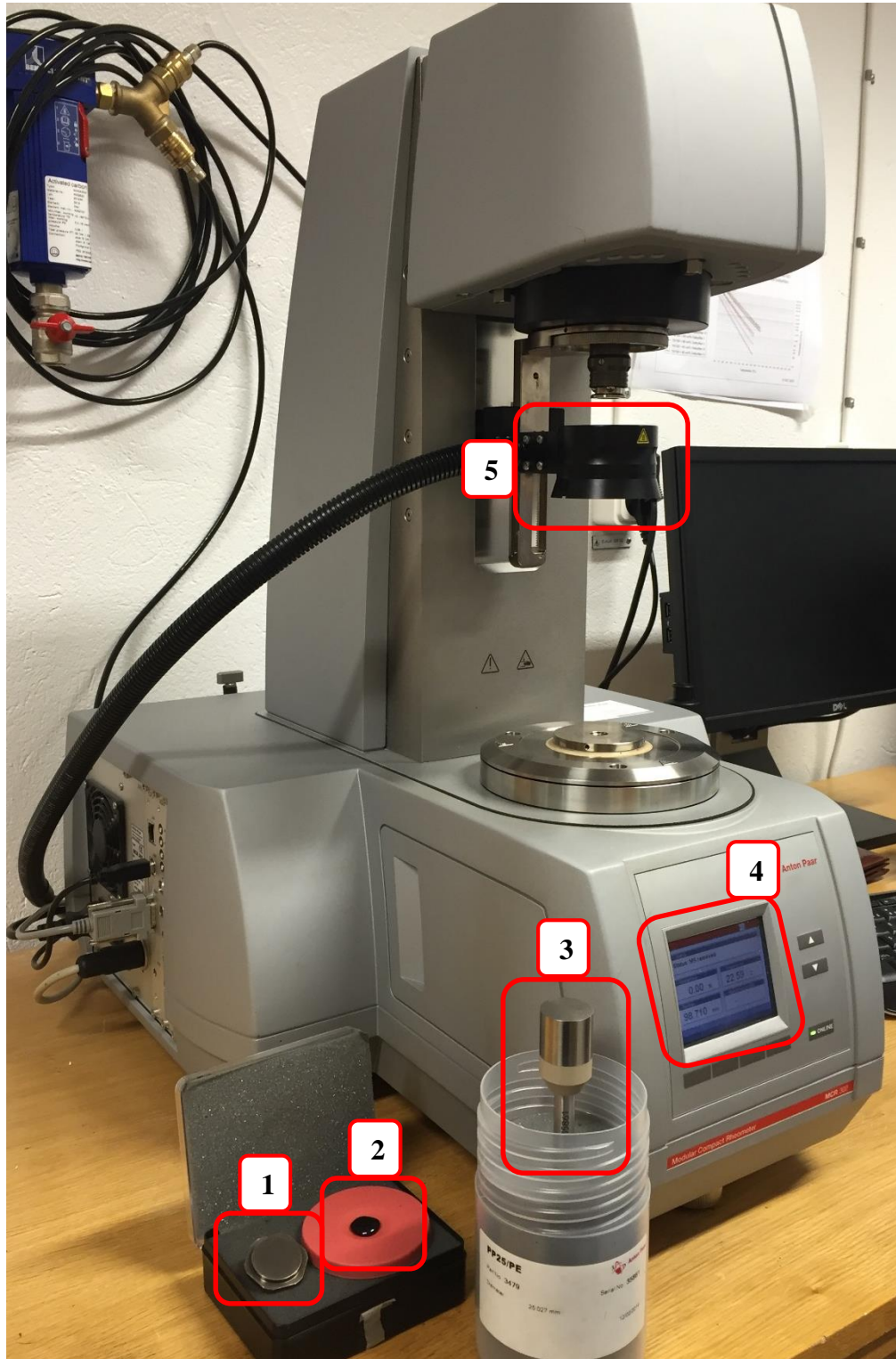
	#	Cmd	Parameter1	Parameter2
WTI Wait Time	1	SSP	SC4-27	
WPT Wait for %Torque	2	STM	180 ,0	
WTP Wait for Temperature	3	SSN	003,61	
WTS Wait for Set Point	4	WTS	0000,5	
WDP Wait for Data Points	5	DCI	01:00	
SSN Set Speed	6	WTI	00:40:00	
SSP Set Spindle	7	DSD		
STM Set Temperature	8	STM	165 ,0	
SSI Speed Increment (+/-)	9	SSN	001,85	
	10	WTS	0000,5	
	11	DCI	01:00	

Figur 3.5 – Skärmdump på programmering av programvaran Rheocalc

Programmeringen bygger på uppskattning av hastigheten vid de olika temperaturstegen samt mjukpunkten för provet. Uppskattningarna bygger på en provkörning, vid ett av temperaturstegen, där hastigheten justeras manuellt till 50 % vridmoment. Den uppmätta viskositeten används sedan tillsammans med WLF-ekvationen för uppskatta hastigheten vid övriga temperatursteg. Mjukpunkten används som referenstemperatur och C1 och C2 anges erfarenhetsmässigt (se avsnitt 2.9.1). Mätningarna föregås av en temperering på 15 °C över första temperatursteget för att säkerställa att provet och spindeln uppnått rätt temperatur då givarna sitter ute i Thermoselen.

3.5 Mätning med DSR

I examensarbetet har en DSR av fabrikat Anton Paar, modell MCR 302 (se Figur 3.6) med tillhörande programvara, RheoPlus V3.62, använts för att utföra mätningar. Därtill har en manual för denna utformats för avdelningen vägbyggnad vid LTH (Elevmanual för MCR302).



Figur 3.6 – MCR 302, 1. Bottenplatta PP25, 2. Silikonform med provkropp (25 mm), 3. Mätprob PP25, 4. MCR-display, 5. Huv för att temperera/isolera provkropp.

3.5.1 Förberedelser och allmänna förutsättningar

Vid mätning med DSR har två mätsystem bestående av prober/plattor använts, 8 mm (PP08) samt 25 mm (PP25). PP08 har använts för temperaturspannet 30-(-30) °C medan PP25 använts för 10-100 °C. För samtliga svep gäller att PP25 börjar vid 10 °C och PP08 vid 30 °C och går sedan i steg om 10 °C.

Provkropparnas storlek har bestämts till 1 mm i höjd. Dessa tillverkades, monterades och trimmades därför till 1 mm i höjd för båda PP08 och PP25. Provkroppsstorleken på 1 mm i kombination med de överlappande temperaturerna 30-10 °C gör det möjligt att sätta samman resultaten från respektive mätning i ett gemensamt resultat (Tornberg, 2015).

3.5.2 Provkropsberedning

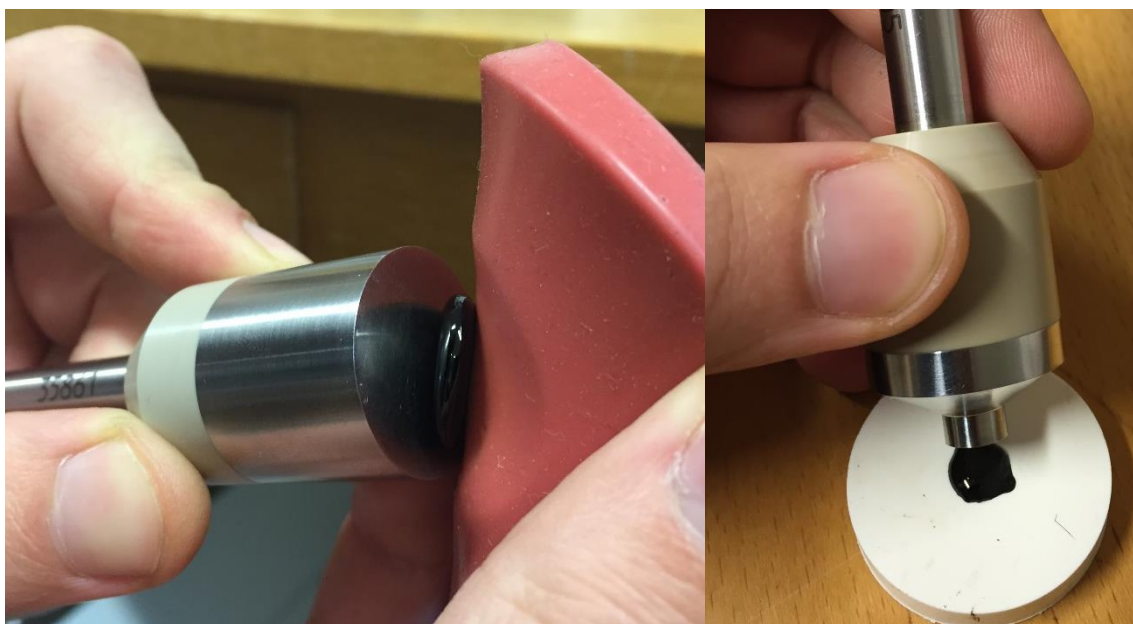
Bitumen värms upp med lödkolvsmonterad skopa och gjuts i tillhörande silikonform för 8 mm respektive 25 mm Figur 3.7. Minst två provkroppar av varje storlek och bitumensort kom att behövas för att utföra ett fulländat svep, två amplitudsvep och två frekvenssvep, (ett av vardera svep med PP08 resp. PP25). Provkroppen får sedan svalna av i rumstemperatur, minst tio minuter, innan den monteras.



Figur 3.7 – Från vänster; Lödkolv med skopa, gjutning med provkropp i 25 mm form, gjutning av provkropp i 8 mm form.

3.5.3 Applicering och trimtemperatur

När provkropparna har tillverkats och svalnat ska de monteras i DSR maskinen. Detta utförs efter att mätutrustningen har ”nollats” och en arbetsbok i Rheoplus öppnats. Provkroppen ligger kvar i formen fram till att appliceringen genomförs genom att PP25/08 proben demonteras och provkroppen centreras på denna enligt Figur 3.8. Därefter monteras mät huvudet tillbaka i DSR och man går vidare till ”trim” steget.



Figur 3.8 – Från vänster; Applicering av provkropp på PP25 och PP08 med respektive form.

Trimtemperaturen ställs in i programmet och väljs till provets mjukpunkt +10 °C. Därefter sänks mät huvudet i tre steg:

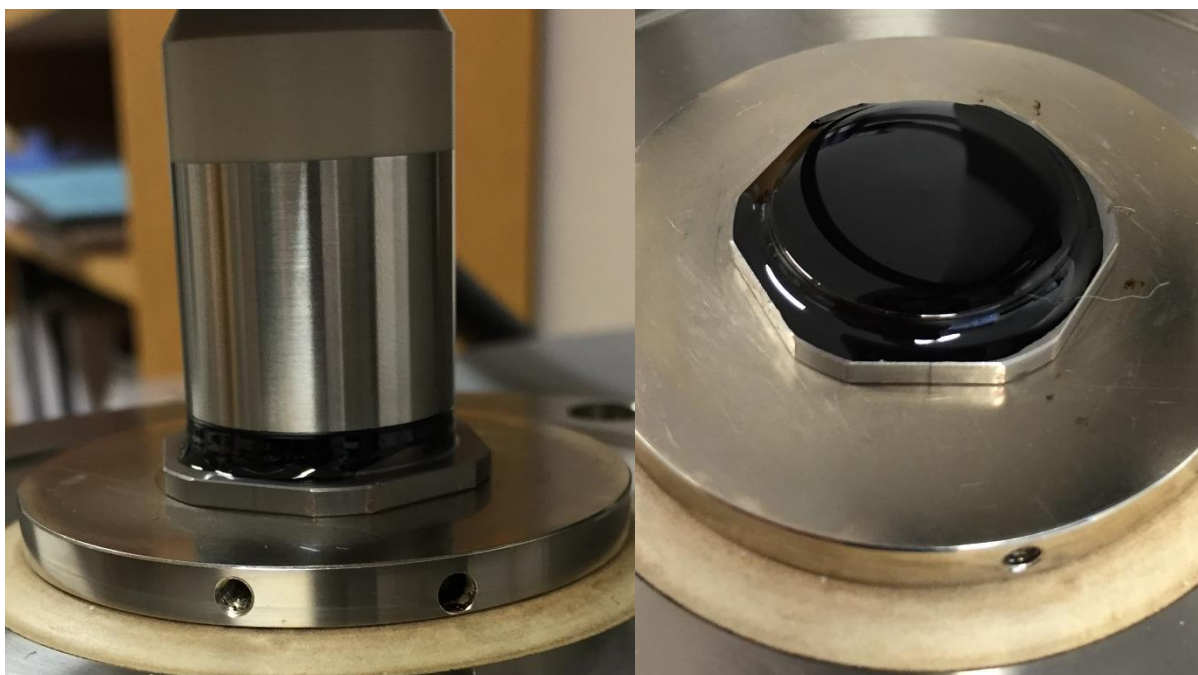
1. Första till höjden 2 mm så att provkroppen får kontakt med bottenplattan och kan börja tempereras.
2. När MCR-displayen visar att normalkraften är nära 0 håller inte provkroppen emot längre och höjden kan sänkas till 1,5 mm och fortsätta tempereras.
3. När normalkraften åter närmar sig 0 sänks höjden till mät höjden 1,0 mm. Provkroppen ska bilda en bula ut från mätplattorna för att garantera full anläggningsyta
4. Huvet sänks ned och testet startas.

3.5.4 Intervalluppbyggnad för amplitud- och frekvenssvep

Samtliga intervall för PP25 i Rheoplus mallarna för amplitud- och frekvenssveps är uppbyggda enligt följande:

1. En tempereringsfas för angiven temperatur med kraftutjämning där provkroppen får stabiliseras.
2. En svepfas för angiven temperatur där själva mätningen utförs. Här är höjden justerad och låst från föregående steg så att inte normalkraften påverkar mätresultatet.

I tempereringsfasen jämnar DSR:n samtidigt ut kraften genom att justera höjden på provkroppen vilket kompenserar för volymförändringen samt garanterar att det blir kontakt mellan provkropp och platta vilket minskar risken för s.k. slippage (plattan tappar greppet och slirar). Vid högre temperaturer (80-100 °C) blir provkroppen oftast så pass viskös att denna flyter ut och rinner av bottenplattan i maskinen Figur 3.9. Detta gör att man förlorar massa vilket kompenseras med Normalkraften genom att provhöjden blir lägre.



Figur 3.9 – Provkropp monterad i PP25. Här syns tydligt hur provet flyter ut och ner från plattan istället för att hålla sig kvar inom mätområdet, därav justering med normalkraft i tempereringsfas.

Det förekommer ett specialfall i intervalluppbyggnaden och det är steget från trimtemperaturen till starttemperaturen på 10 °C. Dels är det en stabiliseringstid (temperering) på totalt 10 min dels är tempereringsfasen uppdelad i två där det första är ren temperering med fast höjd på provkroppen och nästkommande intervall är kraftutjämning (och därefter svepfasen). Detta görs eftersom det har visat sig att vid större temperatursänkningar så expanderar provkroppen först i ungefär 3 minuter innan den börjar krympa.

	1 300 Pts. 1 s	2 300 Pts. 1 s	3 10 Pts.	4 300 Pts. 1 s	5 10 Pts.
Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ					
Rotation τ , M					
Oscillation ϕ , γ			γ 0.02 % ω 100..0.1 rad/s		γ 0.092 % ω 100..0.1 rad/s
Oscillation τ , M					
F_N		F_N 0 N		F_N 0 N	
d, v, \dot{d}/d					
Accessory1 T	T 10 °C	T 10 °C	T 10 °C	T 20 °C	T 20 °C

Figur 3.10 – Skärmdump av intervallprogrammeringen i Rheoplus för PP25. Intervall 1, 2 och 3 är specialfallet för sänkningen från trimtemperatur till 10 °C medan intervall 4 och 5 visar hur de övriga intervallen är uppbyggda.

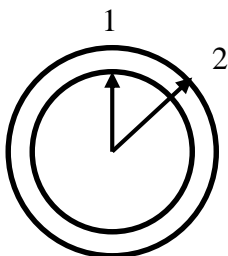
För amplitud- och frekvenssvop med PP08 påminner intervallen om specialfallet för PP25. Eftersom PP08 går från hög till låg temperatur förekommer endast den typen av intervalluppbyggnad. Precis som i mätning med PP25 så inleds mätningen med en stabiliseringsstad på 10 min. Intervallen ser ut enligt följande:

1. Tempereringsfas där temperaturen justeras, höjden är låst och provkroppen får stabiliseras.
2. Kraftutjämningsfas där krafterna jämnas ut och höjden justeras efter provkroppens storlek.
3. Svepfas där mätningen utförs och data registreras, där höjden är låst från föregående intervall.

	1 570 Pts. ⌚ 1 s	2 30 Pts. ⌚ 1 s	3 21 Pts.	4 270 Pts. ⌚ 1 s	5 30 Pts. ⌚ 1 s
Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ					
Rotation τ , M					
Oscillation ϕ , γ			γ 0.01..100 % ω 10 rad/s		
Oscillation τ , M					
F_N		F_N 0 N			F_N 0 N
d, v, d/d					
Accessory1 T	T 30 °C	T 30 °C	T 30 °C	T 20 °C	T 20 °C

Figur 3.11 - Skärmdump av intervallprogrammeringen i Rheoplus för PP08. Intervall 1, 2 och 3 är fallet för sänkningen från trimtemperatur till 30 °C medan intervall 4,5 och 6 visar hur de övriga intervallen är uppbyggda.

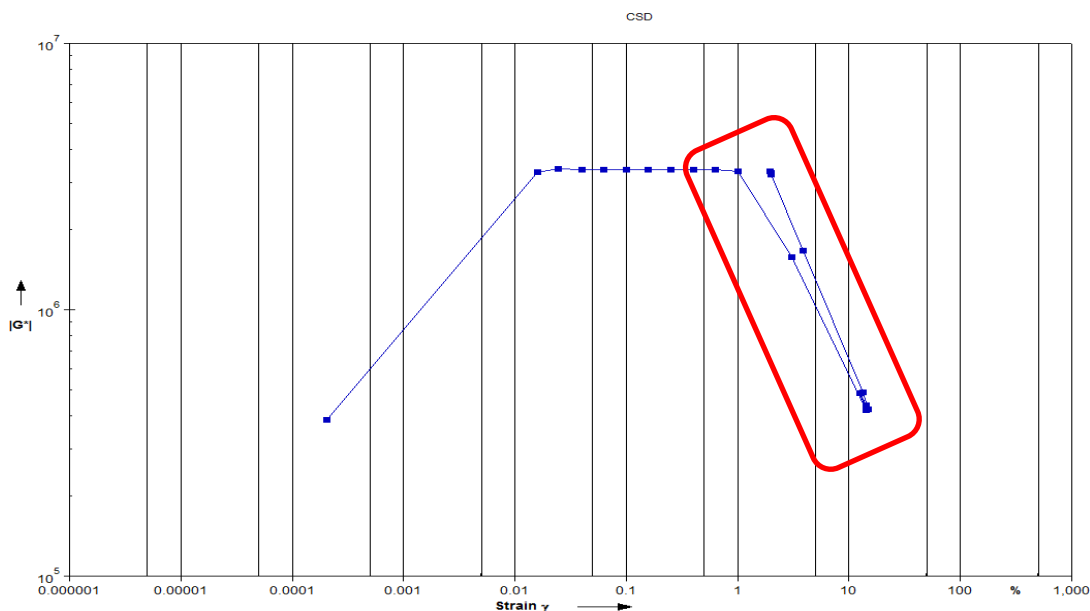
Det har visat sig under körningar med PP08 att en kortare kraftutjämnning precis innan mätningssfasen genomförs är mer optimalt än att kraftutjämna under hela tempereringsfasen (som i normalfallet för PP25). Detta eftersom provkroppen har en tendens att öka i höjd i centrum av provet. Det som då händer är att mät huvudet lyfter och höjden blir högre vilket i sin tur resulterar i en provkropp med mindre anläggningsyta. Då motsvarar inte provkroppen längre det som DSR:n mäter på med PP08 dvs. en ”tänkt” provkropp med 8 mm i diameter, se Figur 3.12.



Figur 3.12 – Illustration av mindre anläggningsyta mot mätplatta, 1. Provkroppens verkliga radie, 2. Radie som DSR mäter på.

3.5.5 Amplitudsvep och LVE

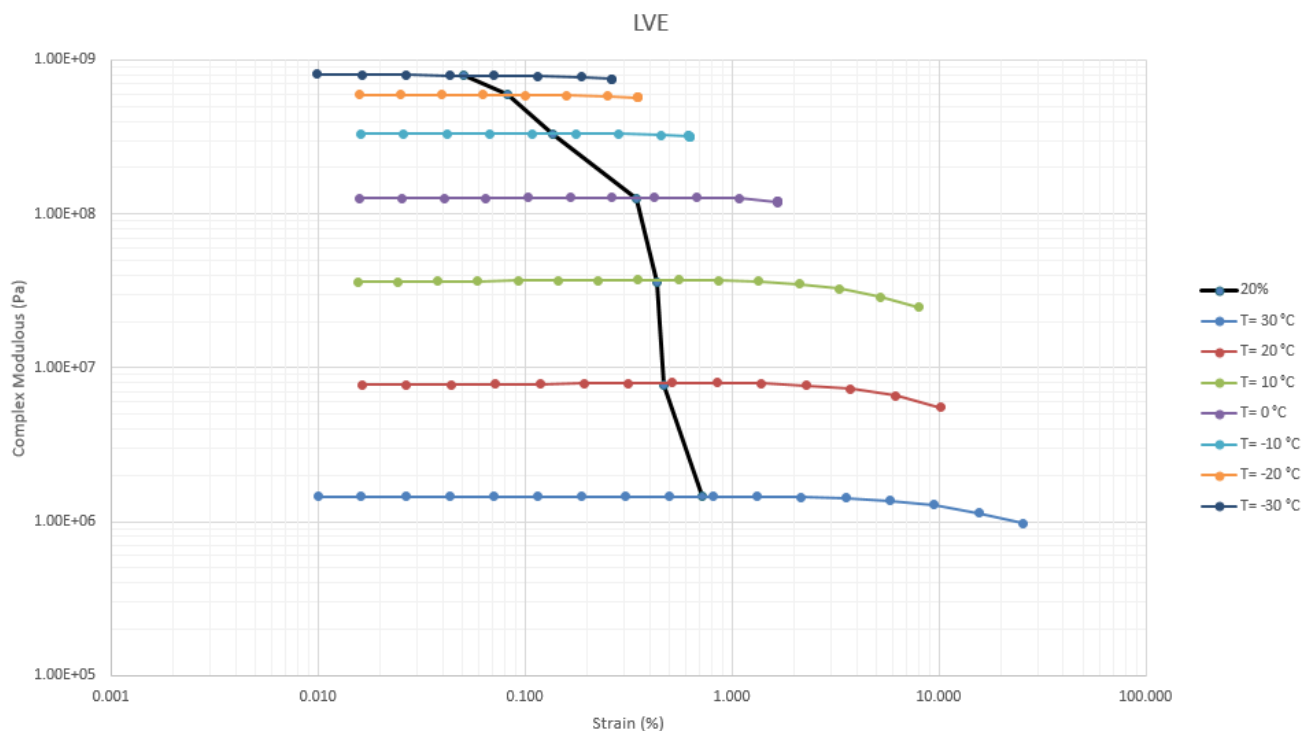
För att kunna utföra ett frekvenssvep behöver man veta att man befinner sig inom bitumenets LVE-område. Därför måste först ett amplitudsvep genomföras för att bestämma LVE-området och ta fram inparametrar till frekvenssvepet. Amplitudsvepet körs enligt framtagen mall i Anton Paars Rheoplus program (Elevmanual för MCR302). Det utförs två svep, ett med PP08 och ytterligare ett med PP25 för respektive temperaturintervall. Svepen utförs för samtliga temperaturer vid 10 rad/s från 0.01-100 % töjning och med samma provkropp. Töjningens gränsvärde justerades i de flesta fallen för temperaturerna, ≤ 20 °C. I Figur 3.13 kan man studera varför detta görs. Maskinen försöker fullfölja töjningen till 100 % vilket sker på bekostnad av den drar sönder provet vilket syns på den skarpa lutningen (markerad i figuren). Anledningen till att G^* åter höjs och töjningen sänks är troligen att maskinen mäter på någon annan typ av provkropp eftersom den initiala har dragits itu. Följden blir att sänka maxtöjningen till (i det här fallet) strax över 1 % för att inte riskera att provet går till brott eller att den inre strukturen förändrades alltför mycket inför nästkommande sveptemperatur då dessa körs i följd.



Figur 3.13 – Typexempel på ett resultat från ett amplitudsvep som inte bör användas OBS endast en temperatur.

Töjningens maxgräns får alltså anpassas efter varje bitumensort förutsatt att man kör amplitudsvepet för alla temperaturer i följd med samma provkropp. Detta förfarande är tidsbesparande och överensstämmer med metoden för frekvenssvep. Alternativet hade varit att låta provkroppen gå till brott för varje temperatur vilket betyder att man skulle få montera en ny provkropp för varje temperatur vilket skulle bli extremt tidskrävande.

När amplitudsvepet är slutfört kvarstår att välja ut töjningar för de olika temperaturerna i det kommande frekvenssvepet. Hur själva LVE-området definieras återfinns under avsnitt 2.7.1. Frekvenssvep skall genomföras med en konstant töjning som befinner sig inom LVE-området. Första mätpunkten har vid vissa mätningar visat konstiga eller orimliga värden varför mätpunkt två har använts som startpunkt för LVE-området. Efter att start- och slutpunkt plockats fram ur mätdata har ett värde 20 % in i intervallet definierats som den töjning vid vilken frekvenssvepet skall genomföras.



Figur 3.14 – Bild från resultat mall över utfört amplitudsvep (från 30(-30) °C) där utvärderingskriteriet har markerats som den svarta linjen (20 % in i intervallet).

I Figur 3.14 ses resultatet från ett amplitudsvep med 20 % gränsen i LVE-området. I det här fallet väljs då amplituderna till 0.723, 0.471, 0.345, 0.137, 0.083, 0.051 % som indata till det kommande frekvenssvepet med PP08 från 30(-30) °C. Motsvarande gäller för PP25 fast då i temperaturspannet 10-100 °C.

3.5.6 Frekvenssvep

Med resultatet från amplitudsvepet är nästa steg att utföra ett frekvenssvep. Även detta svep genomförs två gånger, ett med PP08 och ett med PP25, med framtagen mall i Anton Paars Rheoplus program. Frekvenssvepet utförs vid en given amplitud, specifik för varje temperatur (utdata från amplitudsvepet) och mellan frekvenserna 100–0.1 rad/s (motsvarande 15.9–0.0159 Hz). Svepen går från hög till låg frekvens samt från låg till hög temperatur vid svep med PP25 och från hög till låg temperatur med PP08 (Anton Paar, 2015).

3.5.7 MSCR

MSCR testet körs enbart med mätutrustning PP25 eftersom provningstemperaturerna ligger över 50 °C. MSCR körs vid temperaturerna 52, 64 och 76 °C. Temperaturerna körs i följd med ordningen låg till hög och en stabiliseringstid på knappt 5 minuter innan mätningen startar. I Rheoplus har mall upprättats specifikt för MSCR för att överensstämna med mätningförfarandet. Intervallen för MSCR-mallen ser ut som följande, där mätintervallet repeteras för varje belastning och avlastningsfas:

1. Stabiliseringsfas med kraftutjämning i ca 5 min.
2. Belastningsfas med 0,1 kPa i 1 sekund.
3. Avlastningsfas i 9 sekunder. Intervall 2-3 repeteras ytterligare nio gånger innan programmet går vidare till nästa intervall.
4. Belastningsfas med 3,2 kPa i 1 sekund.
5. Avlastningsfas i 9 sekunder. Intervall 4-5 repeteras ytterligare nio gånger.

Efter att intervallen ovan har genomförts vid 52 °C, utförs två omgångar till på temperaturerna 64 och 76 °C. Temperaturerna är satta gemensamt för alla bitumensorter som är med i examensarbetet. De är bestämda med 12 °C mellan stegen, en nivå under mjukpunkten, en så nära mjukpunkten som möjligt samt en över mjukpunkten.

4 Resultat

Den inledande studien i detta examensarbete genomfördes på ett standardbitumen (70/100) och filler från det lokala stenbrottet i Dalby. Den senare studien är en del i ett större återvinningsprojekt vid Skanska VTC. Det exakta innehållet för dessa blandningar har därför maskerats. Det som kan sägas är att referensen (kallad REF) är rent bitumen och att de övriga (Nr. 1-7) innehåller olika mängd returafalt och/eller polymer.

4.1 RVB

Resultaten från RVB-körningarna redovisas i BTDC-diagram. För att beskriva mätpunkternas matematiska samband har WLF-formeln använts. Detta gör även att mätresultaten kan extrapoleras utefter behov. Samtliga BTDC-diagram återfinns i Bilaga 7.1. I Tabell 4.1 finns samtliga körningar och nedan följer en redovisning av några för att illustrera hur de kan tolkas och hur olika körningar kan jämföras med varandra. Mjukpunkt, C1 och C2 har framtagits med *Problemlösaren* i Excel.

Tabell 4.1 - Resultaten av RVB-körningarna. * Konstanter anpassade för hand.

70/100	Mjukpunkt (°C)	C1	C2	Bland. Temp. 150 °C (mPa·s)
0% Filler	48,06	8,00	108,58	196,25
20 vol-% Filler	53,54	8,14	124,96	414,38
30 vol-% Filler	62,68	6,89	114,54	1230,73
40 vol-% Filler	78,46	8,01	168,29	5821,22
Bitumen (Nr.)	Mjukpunkt (°C)	C1	C2	Bland. Temp. 150 °C (mPa·s)
REF	56,71	8,42	119,66	315,33
1	57,96	8,29	117,81	340,45
2	53,34	7,81	108,90	287,69
3	57,79	7,79	108,61	325,38
4	54,76	7,69	107,79	302,76
5	61,35	7,15	93,53	407,04
6*	64,00	7,80	112,00	631,13
7	64,49	8,61	126,26	500,63
Bruk (Nr.)	Mjukpunkt (°C)	C1	C2	Bland. Temp. 150 °C (mPa·s)
REF	64,49	7,62	129,34	1683,99
1	75,51	6,96	124,84	3166,47
2	66,74	7,09	120,16	1572,22
3	75,98	6,93	123,64	3181,68
4	71,68	6,88	121,85	2474,01
5	79,48	7,14	127,00	3913,09
6	86,23	7,17	141,89	8647,13
7	120,11	5,67	143,24	134 638,55

Den inledande studien redovisas i sin helhet i Diagram 4.1. I BTDC-diagrammet syns tydligt hur inblandning av filler har en uppstyvnande effekt.

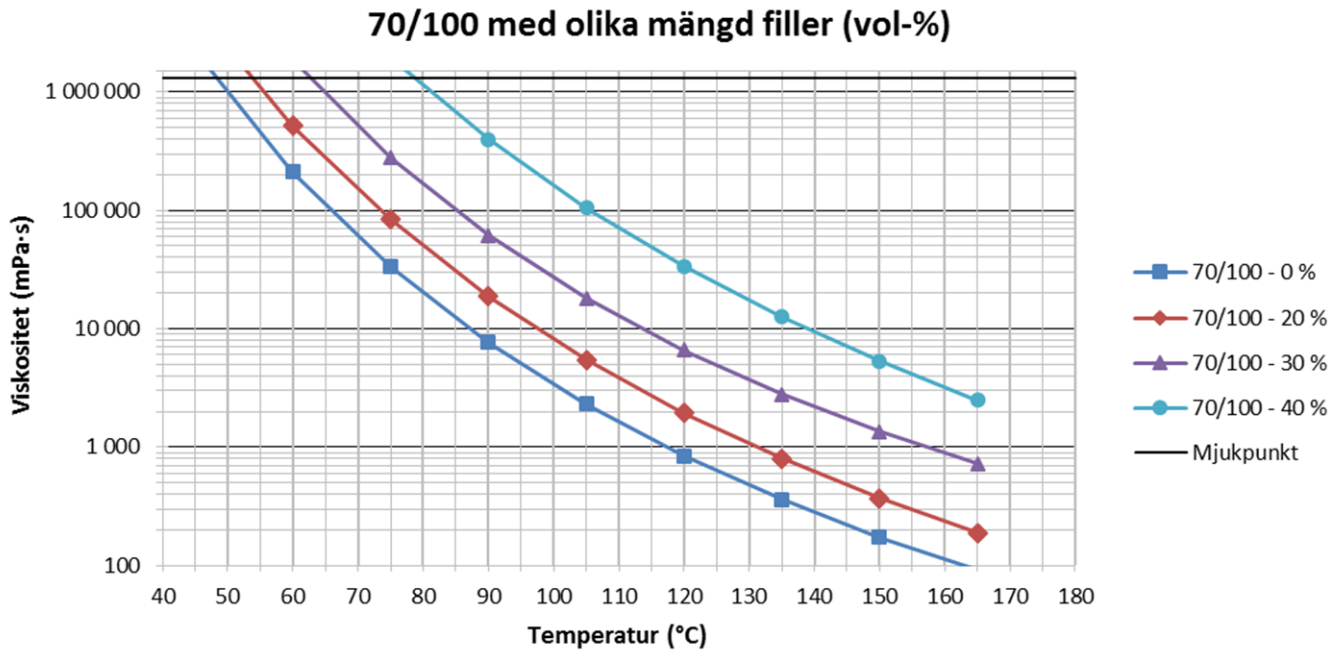


Diagram 4.1 – En jämförelse mellan olika mängd inblandad filler i ett standard 70/100 bitumen

I Diagram 4.2 har en jämförelse gjorts mellan referensen och nr. 3. Det är ingen större skillnad mellan de två när bara bitumen körs, däremot syns en tydlig skillnad när bruken körs.

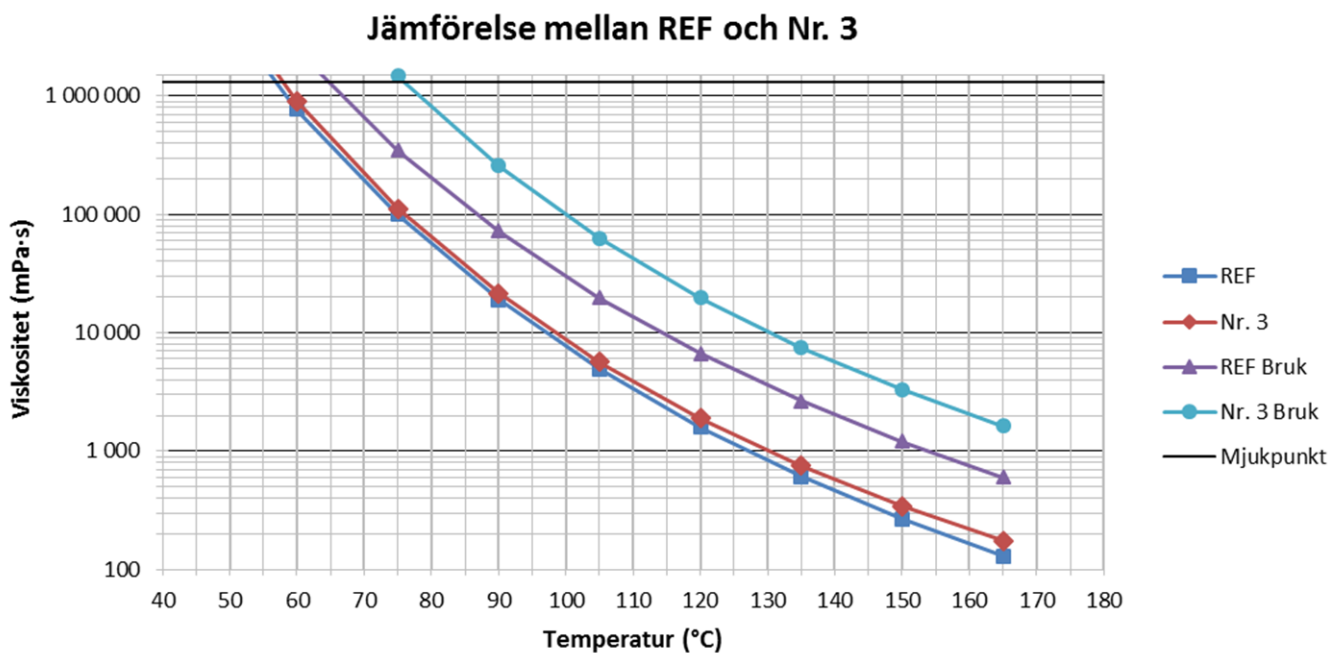


Diagram 4.2 – Jämförelse mellan REF och Nr. 3 med och utan filler.

4.2 DSR

Resultaten från amplituds-, frekvenssvep och MSCR med DSR redovisas i diagram och tabeller vilka återfinns i Bilagorna 7.2, 7.3, 7.4, 0 och 7.6. Nedan följer en kort redogörelse av hur resultaten presenteras från respektive körning.

4.2.1 Amplitudsvep

Resultaten från amplitudsvepen presenteras i diagram, ett för PP25 och ett för PP08. I Diagram 4.3 syns ett amplitudsvep med PP25. I samma diagram redovisas amplituden vid 20 % av LVE-området (se avsnitt 3.5.5) vilka används vid de efterkommande frekvenssvepen. Samtliga amplitudsvep återfinns i Bilaga 7.2. En sammanställning av samtliga valda amplituder redovisas i Tabell 4.2.

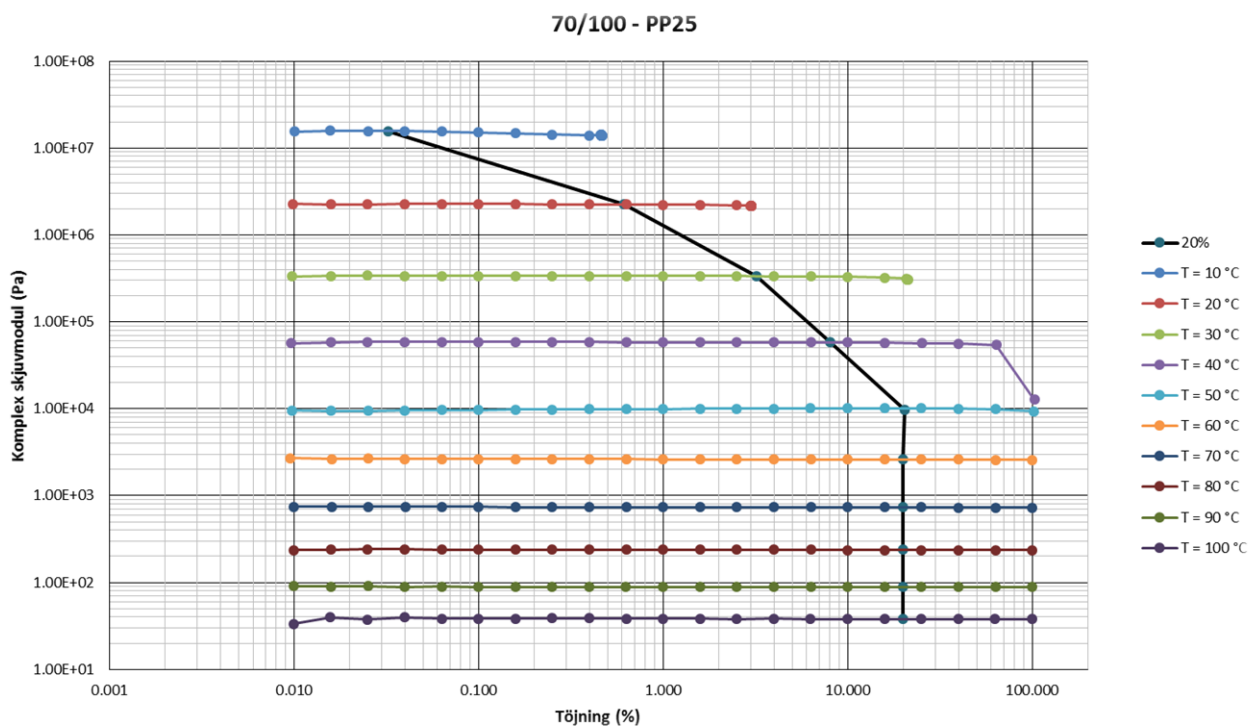


Diagram 4.3 – Ett amplitudsvep med vald amplitud inför frekvenssvep

Tabell 4.2 - Sammanställning av amplituder

Amplitud, γ (%) PP25									
Bitumen Temp (°C)	70/100	REF	1	2	3	4	5	6	7
10	0.033	0.021	0.020	0.026	0.021	0.021	0.020	0.021	0.021
20	0.613	0.124	0.208	0.319	0.213	0.213	0.092	0.241	0.139
30	3.193	0.664	0.896	1.281	0.896	0.895	0.812	0.813	0.568
40	8.013	2.013	2.033	3.193	2.013	3.193	1.281	2.032	2.033
50	20.000	5.060	5.060	12.700	5.053	8.013	3.193	3.192	3.193
60	20.000	12.713	7.993	12.700	7.993	12.673	3.192	5.053	8.013
70	20.000	12.713	20.000	20.000	20.000	20.000	12.653	7.973	12.673
80	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	12.653	12.633	20.000
90	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
100	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Amplitud, γ (%) PP08									
Bitumen Temp (°C)	70/100	REF	1	2	3	4	5	6	7
-30	0.050	0.051	0.051	0.030	0.074	0.051	0.029	0.051	0.045
-20	0.086	0.082	0.063	0.073	0.074	0.070	0.036	0.063	0.064
-10	0.145	0.137	0.104	0.161	0.157	0.137	0.051	0.119	0.099
0	0.315	0.345	0.229	0.331	0.213	0.245	0.119	0.157	0.227
10	0.669	0.434	0.434	0.442	0.319	0.497	0.251	0.399	0.331
20	0.913	0.471	0.608	0.664	0.387	0.684	0.519	0.442	0.377
30	3.197	0.723	0.896	1.285	0.723	1.378	0.896	0.929	0.779

4.2.2 Frekvenssvep

Resultaten från frekvenssvepen redovisas i fyra diagram. I samtliga diagram har resultaten från både PP25 och PP08 sammanfogats. Det första kallas Blackdiagram och presenterar komplex skjuvmodul mot fasvinkel, Diagram 4.4. I det andra presenteras komplex skjuvmodul mot vinkelfrekvens, Diagram 4.5. I det tredje presenteras fasvinkel mot vinkelfrekvens, Diagram 4.6. Dessa tre används för att utvärdera materialets viskoelastiska beteende samt utvärdera överlappet mellan de två mätsystemen PP25 och PP08. I de två senare diagrammen söks även en logisk trend i mätresultaten, markerad som en svart linje. I det fjärde diagrammet presenteras mätresultaten i en masterkurva som funktion av reducerad frekvens. Det kan ses i Diagram 4.7. En sammanställning av samtliga parametrar för masterkurvorna redovisas i Tabell 4.3. Resterande resultat från frekvenssvep kan ses i Bilaga 7.3 och 7.4.

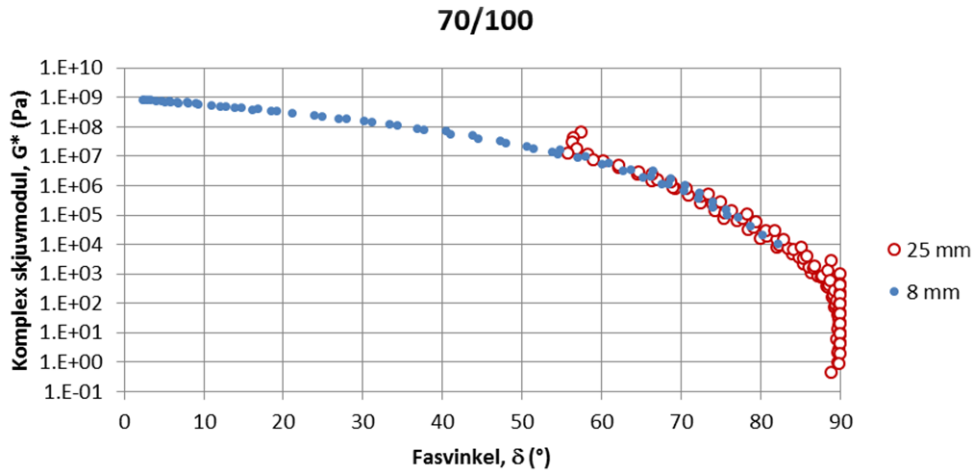


Diagram 4.4 - Sammansatt blackdiagram för PP25 och PP08, bitumen 70/100.

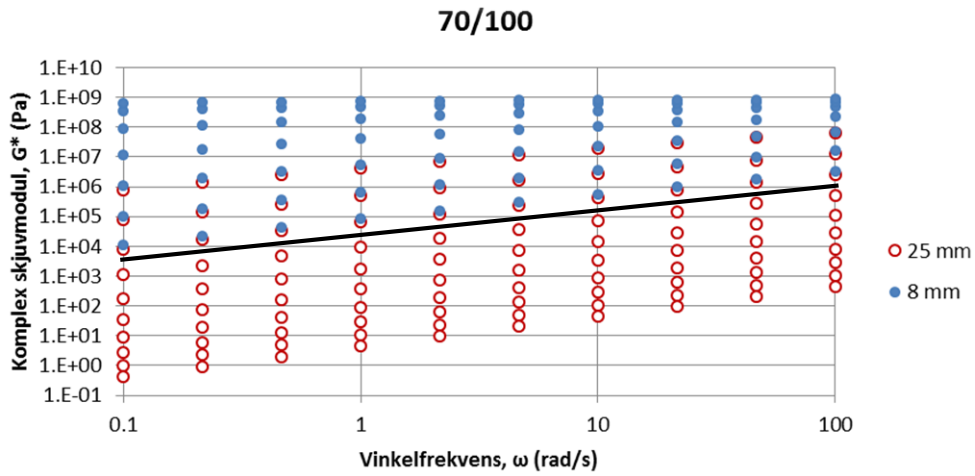


Diagram 4.5 - Jämförelse mellan G^* och ω för PP25 och PP08, bitumen 70/100. Linjen visar vilken trend man vill se bland resultatet.

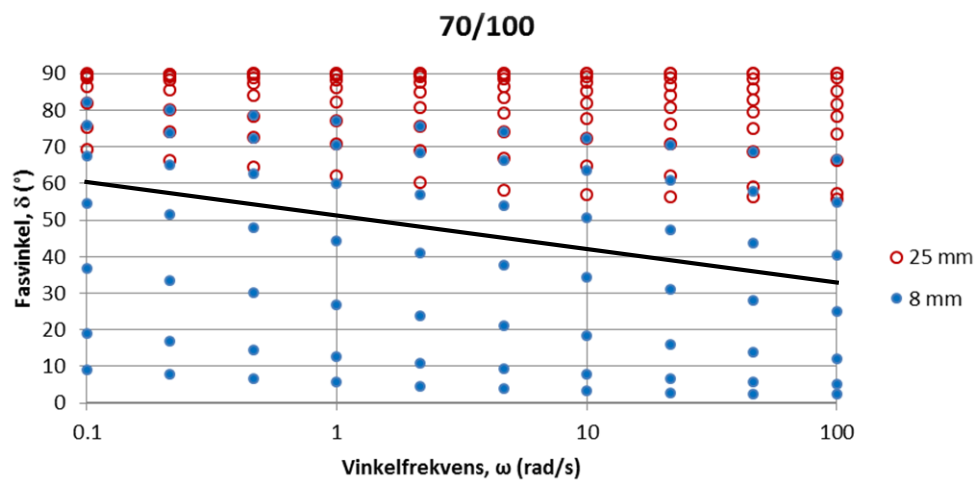


Diagram 4.6 - Jämförelse mellan δ och ω för PP25 och PP08, bitumen 70/100. Linjen visar vilken trend man vill se bland resultatet.

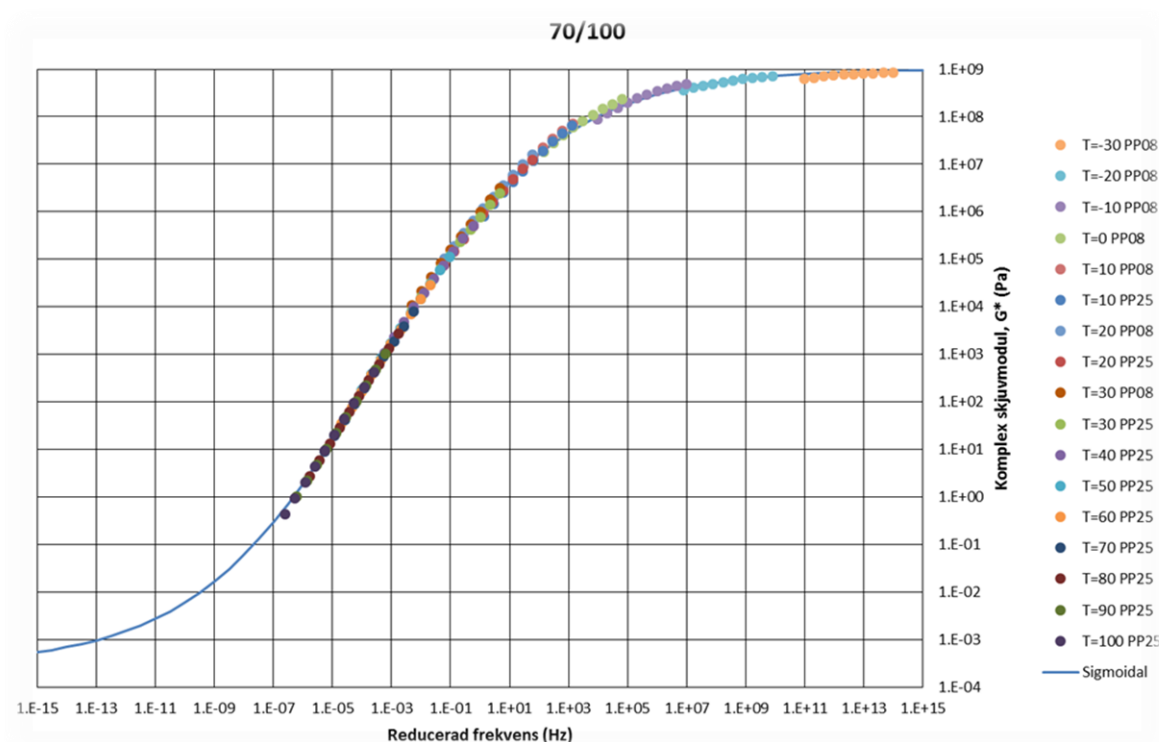


Diagram 4.7 – Masterkurva för bitumen 70/100.

Tabell 4.3 – Parametrar för masterkurvor.

Masterfunktionernas parametrar med $T_r=298$ K						
Bitumen (Nr.)	C1	C2	α	β	γ	δ
70/100	11.48	104.44	12.556	-1.137	0.327	-3.546
REF	13.01	105.77	13.138	-1.427	0.301	-4.252
1	13.38	110.95	13.122	-1.423	0.301	-4.189
2	12.24	107.13	12.674	-1.279	0.318	-3.766
3	13.34	110.67	13.218	-1.422	0.299	-4.263
4	12.60	108.76	12.935	-1.320	0.309	-4.009
5	13.56	112.19	13.597	-1.417	0.279	-4.630
6	14.51	123.33	14.060	-1.429	0.262	-5.021
7	14.85	122.25	13.557	-1.574	0.288	-4.547

4.2.3 MSCR

Resultaten från MSCR-körningarna presenteras i diagram. Varje diagram visar töjningen vid en viss temperatur för samtliga belastnings- och återgångsperioder. I Diagram 4.8 visas resultatet för 70/100 vid 52 °C. Diagram för samtliga körningar finns i Bilaga 7.5. En sammanställning av resultaten från MSCR i form av parametrarna R_{100} , R_{3200} , J_{nr100} och J_{nr3200} kan ses i Tabell 4.4.

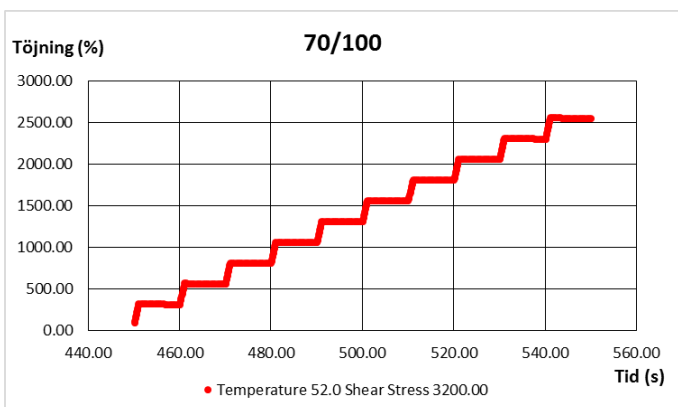
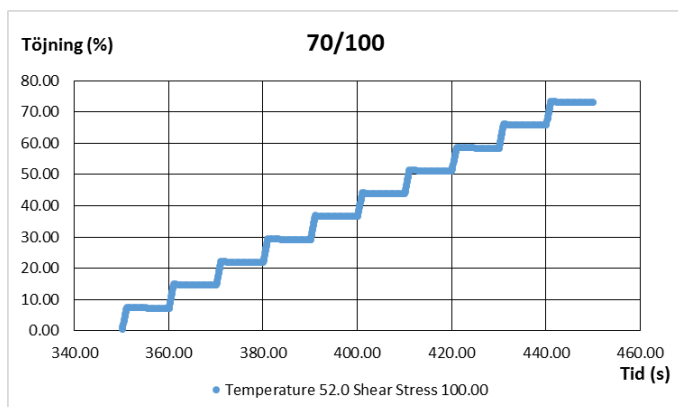


Diagram 4.8 – MSCR-körning vid 52 °C för bitumen 70/100. T.v. belastning 0,1 kPa T.h. belastning 3,2 kPa.

Tabell 4.4 – Sammanställning av resultat från MSCR.

Sammanställning av MSCR					
Bitumen (Nr.)	Temp (°C)	R 100 (%)	R 3200 (%)	$J_{nr\ 100}$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr\ 3200}$ (kPa ⁻¹)
70/100	52	4.150	1.920	0.731	0.774
	64	1.450	0.060	4.645	5.199
	76	0.740	0.005	21.381	23.768
REF	52	15.210	12.120	0.287	0.300
	64	3.120	0.410	1.928	2.176
	76	0.470	0.020	10.189	11.492
1	52	17.560	15.540	0.200	0.205
	64	4.320	0.790	1.410	1.578
	76	0.550	0.030	8.030	9.143
2	52	7.690	5.240	0.446	0.465
	64	1.770	0.190	2.774	3.115
	76	0.450	0.020	14.014	15.553
3	52	18.130	15.800	0.197	0.204
	64	4.940	0.820	1.410	1.591
	76	0.950	0.040	7.971	9.196
4	52	9.940	7.340	0.370	0.387
	64	2.120	0.270	2.415	2.724
	76	0.770	0.020	12.500	14.046
5	52	33.270	28.550	0.137	0.148
	64	16.900	3.710	0.979	1.272
	76	7.920	0.240	5.874	8.359
6	52	45.030	41.420	0.076	0.081
	64	28.460	14.190	0.509	0.665
	76	23.190	1.550	2.757	5.087
7	52	31.260	30.720	0.056	0.056
	64	12.360	8.600	0.448	0.479
	76	2.110	0.240	2.747	3.140

5 Diskussion och slutsatser

Den inledande studien i detta examensarbete genomfördes på ett standardbitumen (70/100) och filler från det lokala stenbrottet i Dalby. Studien hade två syften. Huvudsakligen undersöktes om mätmetoderna som tidigare använts för rent bitumen fungerar vid inblandning av filler samt vilken inverkan olika mängder av filler får. Den inledande studien gav även författarna en möjlighet att sätta sig in i handhavandet av mätutrustningen.

Under den inledande studien uppmärksammades brister i det mättingsförfarande som använts för DSR:n under tidigare arbeten. Därav flyttades tyngdpunkten från att enbart fokusera på en bruksstudie till att även omfatta framtagandet av en konsekvent och repeterbar mätmetodik.

Den efterföljande delen av examensarbetet är en del i ett större projekt som utreder inblandningen av returafalt vid nyproduktion av asfaltmassor. Resultaten verkar logiska och kan förhoppningsvis vara till hjälp i projektet. På grund av att det som undersökts är en del i ett större pågående projekt önskar Skanska i nuläget att inte sprida resultaten vidare. Därför är proverna maskerade och resultatet härifrån kommer inte diskuteras eller analyseras i någon större omfattning i detta examensarbete.

5.1 RVB

Mätmetoden har vid tidigare examensarbeten gett bra resultat och i samråd med handledaren, Per Tyllgren, anser vi att så är fallet även denna gång. Provberedningen och programvaran fungerar väl efter lite övning. För tolkning av mätdata har en befintlig Excelfil vidareutvecklats och vi anser att den på ett bra sätt hjälper till att illustrera resultatet. Även om varje mätning tar relativt lång tid (ca 6 timmar) tycker vi att resultatet är mödan värd. Tack vare presentationen i BTDC-diagram kan RVB dessutom täcka in flertalet mätmetoder i en.

Resultaten för 70/100 med olika mängd filler anser vi ge trovärdiga resultat då en ökad mängd filler har styvat upp materialet på ett logiskt sätt samt att det fortfarande går att anpassa till ett matematiskt samband på samma sätt som för rent bitumen.

Om studien på inblandning av returafalt kan vi inte gå in på detaljer på grund av ovan nämnda skäl. Vi vill dock poängtera att testerna på enbart bitumen visar på snarlik viskositet men att bruksstudien visar tydliga skillnader mellan blandningarna. Vår slutsats av detta är att mängden kvarvarande bitumen och med andra ord förhållandet mellan bitumen och filler är mer avgörande än åldringen av bitumenet i denna studie. För att ta hänsyn till förhållandet mellan bitumen och filler vid inblandning av returafalt verkar bruksmätningar med RVB vara en lämplig metod.

5.2 DSR

När mätningar med DSR inleddes visade det sig att det var svårt att utvärdera och repetera föregående examensarbetens resultat vid LTH. Informationen om hur man gått till väga vid DSR-körningar var knapphändig. Amplitudsvep hade i viss mån utförts men ingen data från dessa hade använts utan indata till frekvenssvep var förlitade på en allmän mall och byggde inte på det specifika materialet. Därav kom en del av examensarbetet att omfatta framtagandet av en konsekvent och standardiserad mätmetod för avdelningen inom vägbyggnadsteknik på LTH. Detta gjordes för att säkerställa en repeterbarhet och jämförelse mellan framtida försök och arbeten med DSR-utrustningen.

5.2.1 Framtagande av konsekvent och repeterbar mätmetod

Vår mätmetod är framtagen med hjälp av standarderna ASTM och SS-EN för undersökning av bitumen med DSR-utrustning. Utöver standarderna bygger metoden även på en guide från Anton Paar samt intervju med Professor Eva Tornberg och rapporter av erfarna forskare.

Det första steget var att ta fram en metod för tillverkning av provkroppar då det tidigare förekommit olika metoder däribland direkt upphällning från burk och användandet av en spruta. Båda dessa förkastades då de inte ansågs ha tillräcklig noggrannhet att mäta upp erforderlig mängd massa (< 0,6 g) i silikonformarna. Lägg därtill att dessa metoder bygger på att värma upp större materiemängder i ugn innan gjutning. Valet föll därför istället på en lödkolvsmonterad sked (med inspiration från Petri Uhlbäck, Nynas AB). Med denna värmer man inte upp mer material än nödvändigt och man får heller inte upp för mycket massa. Själva gjutningen i formarna blir också mycket lättare och säkrare då metoden visade sig lätthanterlig.

Amplitudsvep har, som nämnt tidigare, utförts men på olika sätt och utan att använda resultatet. En mall för hur amplitudsvep genomförs togs fram baserat på rekommendationer från tillverkaren av DSR-utrustningen. Därefter används definition av LVE-område (avsnitt 2.7.1) och egen utvärdering (avsnitt 3.5.5) om hur amplitud väljs till frekvenssvep. Att det blev 20 % av intervallet beror på följande resonemang: Mätningar bör utföras med marginal från slutpunkten för att undvika potentiella utmattningseffekter i provkroppen men inte på så små töjningar att maskinella effekter påverkar mätningen. Då metoden delvis baseras på egna antaganden finns det en eventuell felkälla i resultaten. Vidare undersökning av den egna utvärderingen är nödvändigt för att verifiera metoden.

För frekvenssvep ligger den stora förändringen på framtagandet av indata. Frekvenssvep har tidigare genomförts på varierande sätt och med förbestämda amplituder utan direkt hänsyn till det specifika bitumenet i fråga. Detta har nu ersatts med ett föregående amplitudsvep för att med högre säkerhet avgöra att vald amplitud ligger inom LVE-området för det aktuella bitumenet. En annan förändring är att provkroppens höjd har bestämts till 1 mm för båda mätsystemen (PP25 och PP08). Detta har gjorts för att få bättre överlapp av mätresultat vid samma temperatur. En ytterligare förändring är att justering av höjden på provkroppen med hänsyn till temperaturförändring har ändrats. Från att vara förinställd baserat på beräknad volymförändring justeras den istället med normalkraft. Vid användningen av normalkraft korrigerar utrustningen själv höjden i realtid beroende på vertikala kraft vilket minimerar risken för ”slippage”.

För MSCR har ett lite annorlunda tillvägagångssätt använts. Då det inte finns en europeisk-standard för mätningar har den amerikanska ASTM-standarderna använts som utgångspunkt. Mätningarna har utförts vid samma temperaturer för samtliga bitumen. Detta underlättar jämförelse av resultat med tidigare examensarbete som använt MSCR men det frångår den amerikanska standarden. Vi har inte haft tid att utvärdera mätmetod så detta bör göras längre fram. Resultaten ser logiska ut men vi vågar inte värdera dessa då ASTM-standarderna frångåtts. Därför kan bara resultaten jämföras sinsemellan.

I programvaran Rheoplus har mallar för Amplitud-, frekvenssvep och MSCR skapats. När en körning är slutförd i DSR:n är mallarna utformade så att mätdata kopieras (manuellt) och klistras in i tillhörande Excel-filer utan vidare behandling. På så sätt kan alla som gör körningar i DSR:n jämföra sina resultat med andra som är utförda med samma mall.

Den fullständiga metoden vi har använt och föreslår vid användning av DSR-utrustningen står delvis beskrivet i avsnitt 3.5 samt fullständigt i Elevmanual för MCR302. Därtill finns de Excel-filer som tagits fram för sammanställning och presentation av resultat från DSR-körningar till grund för framtida mätningar vid LTH.

5.2.2 Amplitudsvep

Amplitudsvepen som utförts för denna studie ser ut som i litteraturen och bitumenet uppvisar tidigare känt beteende. För samtliga bitumen har ett LVE-område identifierats och en 20 % amplitud plockats ut till frekvenssvepen för både PP08 och PP25. Det som är värt att nämna om amplitudsvepen är att från 60-80 °C (beroende på bitumen) är G^* konstant över hela töjningsintervallet (0,01-100 %) vilket kan ses på att amplituden blir 20 %. Alltså LVE-området för de högre temperaturerna innefattar hela töjningsintervallet. I Diagram 5.1 är resultatet för REF bitumenet (PP25). Här syns att G^* är konstant över hela intervallet för 80 °C och högre temperaturer. För PP08 svepen finns inga tydliga oklarheter utan dessa ser generellt sett bra ut. Det som varit utmaningen med PP08 är att anpassa töjningsintervallets maximum (beskrivet i avsnitt 3.5.5) för att undvika brott och förändrad inre struktur i provkroppen. Inträffar något av sistnämnda måste svepet göras om. Slutsatsen är att amplitudsvepen är fullt genomförbara och ger användbara resultat inför frekvenssvepet.

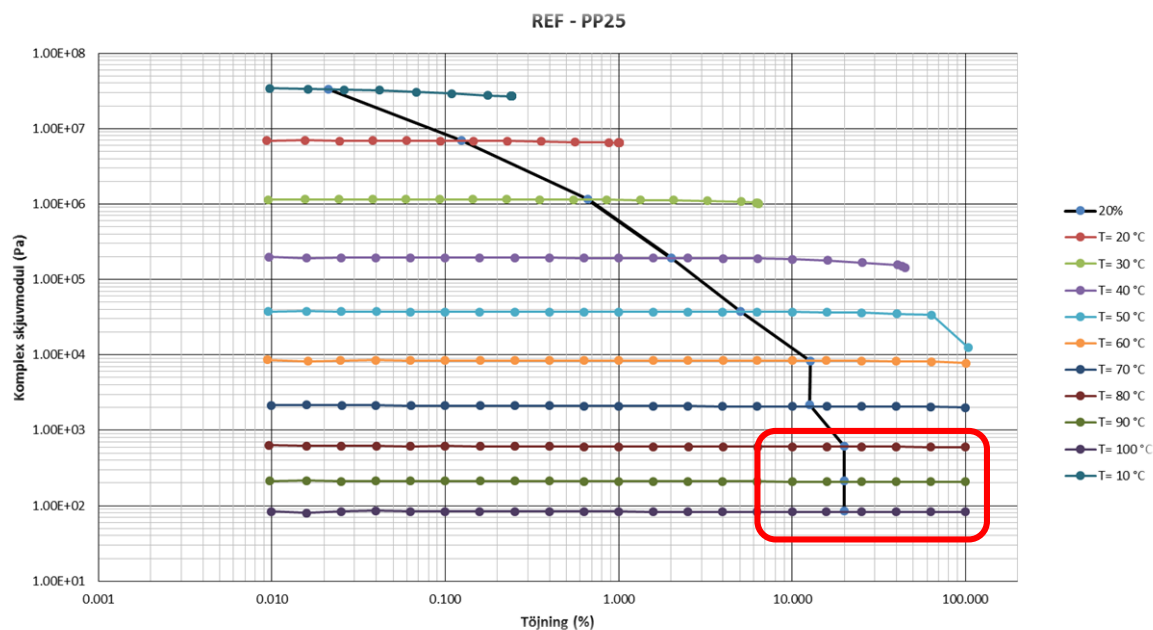


Diagram 5.1 – Amplitudsvop av REF med PP25. Markeringen visar vilka temperaturer som G^* är konstant varför vald amplitud blir 20 %.

5.2.3 Frekvenssvop

Med indata från amplitudsvop genomfördes frekvenssvop och resultaten från dessa är presenterade i Blackdiagram för att få en snabb överblick samt en masterkurva med mer tillämpbar information för bitumenet.

Utifrån Blackdiagrammen går det att se hur komplex skjuvmodul minskar vid ökad fasvinkel. Vid fasvinkel 90° beter sig materialet inte längre elastiskt utan endast visköst. Viskösa mätningar är inte lämpliga att mäta med oscillation utan bör utföras med rotation, t.ex. RVB. Mätpunkter vid fasvinkel 90° är kanske därför inte optimala.

Som kan studeras i Diagram 5.2, finns några udda mätpunkter från svepet vid 10°C . Detta kan tyda på att temperaturen inte är lämplig att använda med mätsystem PP25. I övrigt ser blackdiagrammen ut som förväntat, parabelformade kurvor vilka ser logiska ut.

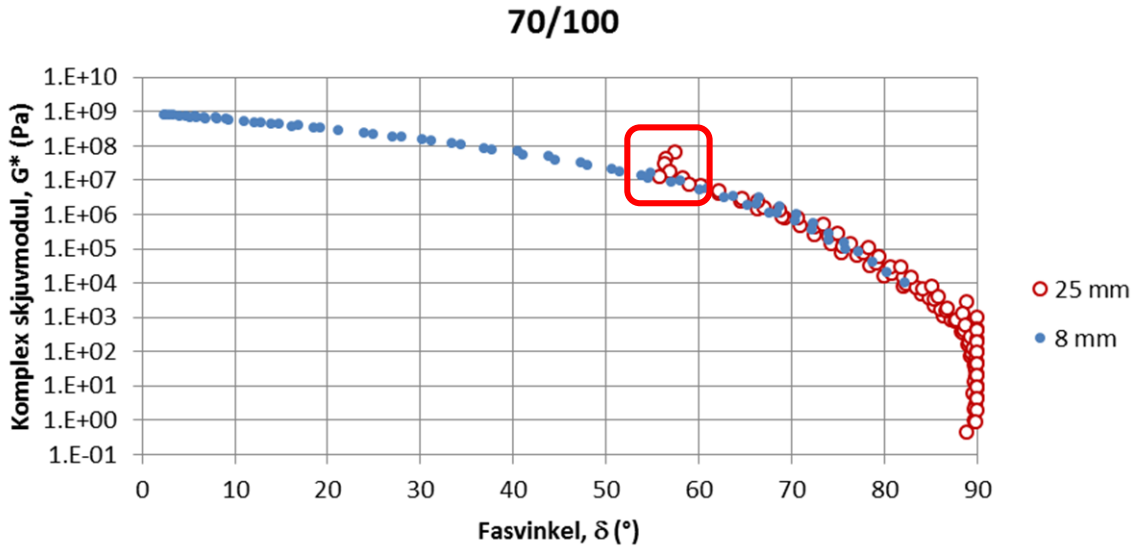


Diagram 5.2 – Blackdiagram från frekvenssvep med 70/100. Markering visar de udda mätpunkter som beskrivs i stycket ovan.

Vidare kontrolleras hur väl mätdata överensstämde (för de överlappande temperaturerna, 10-30 °C) mellan de båda mätsystemen. För detta studeras dels blackdiagrammen dels två andra diagram, G^* mot ω och δ mot ω . Det intressanta i diagrammen är att utläsa hur väl punkterna sammanfaller. Dessutom kan sambanden mellan mätpunkterna inom ett svep studeras, de bör vara linjära. I Diagram 5.3 och Diagram 5.4 kan detta ses för svepet med 70/100 bitumen. Markerat i dessa är de överlappande punkterna vilka i det ideala fallet skulle sammanfalla perfekt alltså den cirkeln från PP08 ligger centrerad i den motsvarande för PP25. För G^* mot ω är dessa överlapp rätt bra och likaså för δ mot ω med undantaget för 10 °C svepet. Här syns återigen att 10°C kanske inte lämpar sig vid mätning med PP25.

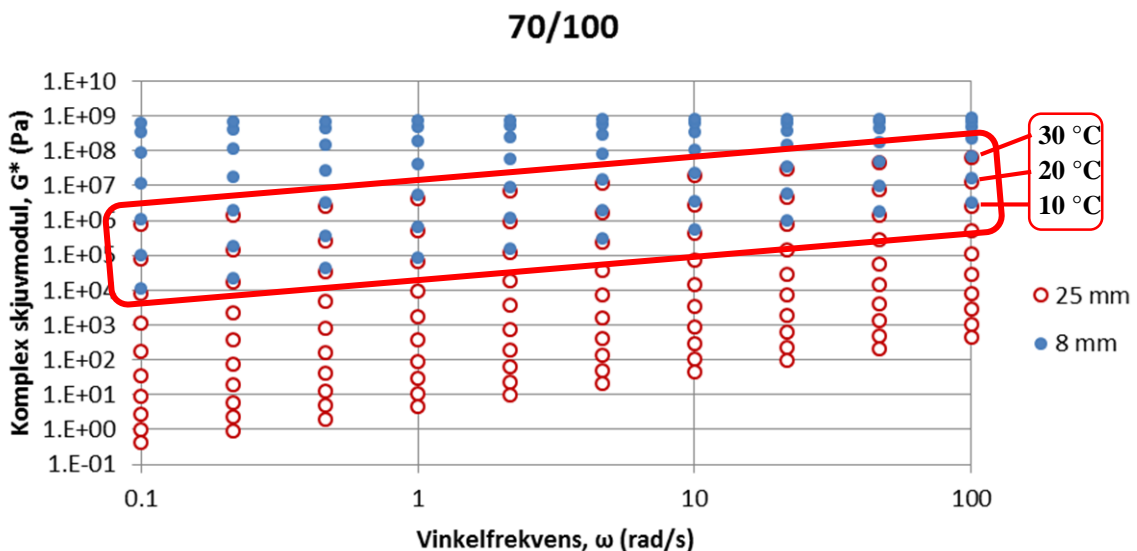


Diagram 5.3 - G^* mot ω för 70/100. Markeringen visar de överlappande mätpunkterna mellan systemen PP25 och PP08.

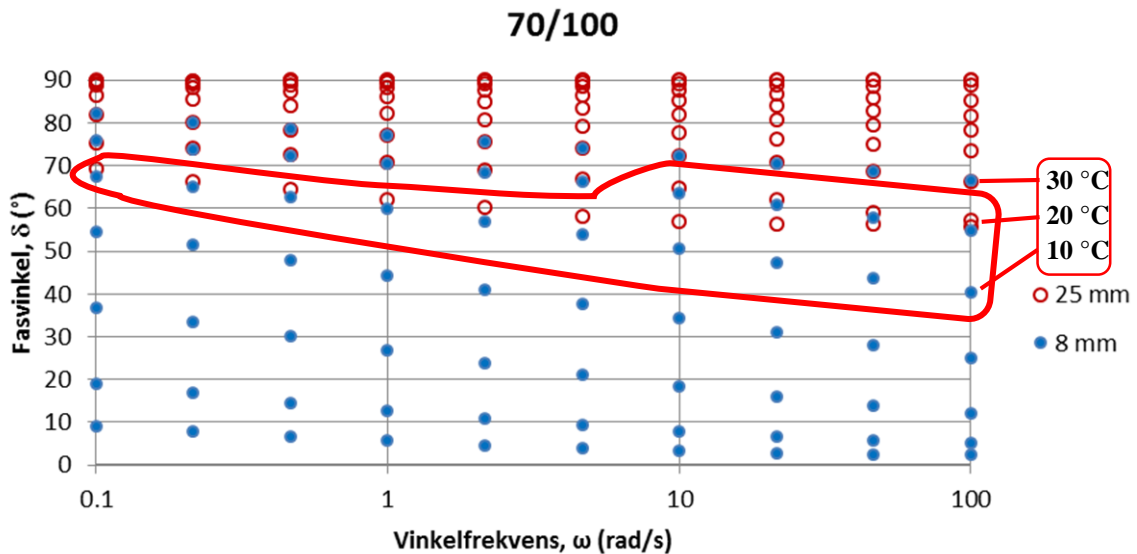


Diagram 5.4 - δ mot ω för 70/100. Markeringen visar de överlappande mätpunkterna mellan systemen PP25 och PP08.

5.2.4 MSCR

Av nämnda anledningar som framgår av inledningen till kapitel 5, analyseras inte MSCR resultatet. Däremot finns samtliga parametrar R100/3200, $J_{nr}100/3200$ och diagram i Bilaga 7.5.

5.3 Bruksstudie

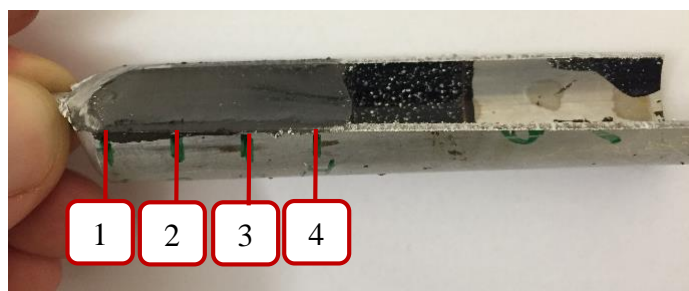
Ett av syftena med examensarbetet var att utvärdera möjligheterna att mäta på asfaltbruk med RVB och DSR. Då det inte har gjorts på LTH tidigare fanns det ingen färdig mall att följa. Därför gjordes ett inledande försök redan i maj 2015 för att kontrollera utifall det skulle ge något resultat. Försöket genomfördes på RVB:n tillsammans med Per Tyllgren. Mätresultaten verkade lovande så det beslutades att examensarbetet kunde byggas kring en studie om asfaltbruk.

5.3.1 RVB

De första undersökningarna för examensarbetet genomfördes på ett 70/100 bitumen med tre inblandningar av filler. Mätningarna inleddes med 40 vol-% inblandning. Under den första blandningen kändes bruket homogent och tre individuella provkroppar tillverkades och kördes i RVB. Mätresultaten varierade dock lite. Som en extra kontroll värmdes bruket upp igen och det visade sig vid omrörning att fillret hade sedimenterat en del. Detta skulle kunna förklara variationen i mätresultaten. Vid körning med 30 och 20 vol-% varierade resultaten dock mindre så det kan även bero på mängden filler. För att kontrollera om fillret sedimenterar i RVB-rören under mätningen togs två mätrör och placerades i frysen (ett med 20 och ett med 40 vol-%). Rören delades sedan med en bandsåg. En första okulär besiktning sa dock inte så mycket. Därför gjordes penetrationstest i de båda rören. Dessa gjordes på fyra punkter i vardera rör från botten till toppen, Figur 5.2. Resultaten visade en tydlig skillnad i 20 vol-% röret och en jämnt avtagande trend i 40 vol-% röret, Tabell 5.1. Efter två veckor var skillnaden i sedimentation dock tydligare rent okulärt, Figur 5.1.



Figur 5.1 – RVB-rör delade på mitten. Överst direkt efteråt och nedan efter två veckor. I 20 vol-% röret syns en tydlig sedimentation (markeringen) och bruket flyter ut väsentligt mer än 40 vol-% vilket delvis beror på sedimentationen.



Figur 5.2 – Visar var penetrationstesterna genomfördes

Tabell 5.1 – Resultat av penetrationstest

Penetrationstest för bruk			
Punkt	Djup (mm)		Notis
	20%	40%	
1	1,68	1,99	Botten av RVB-rör
2	3,92	2,12	
3	4,04	2,42	
4	4,85	2,56	Toppen av RVB-rör

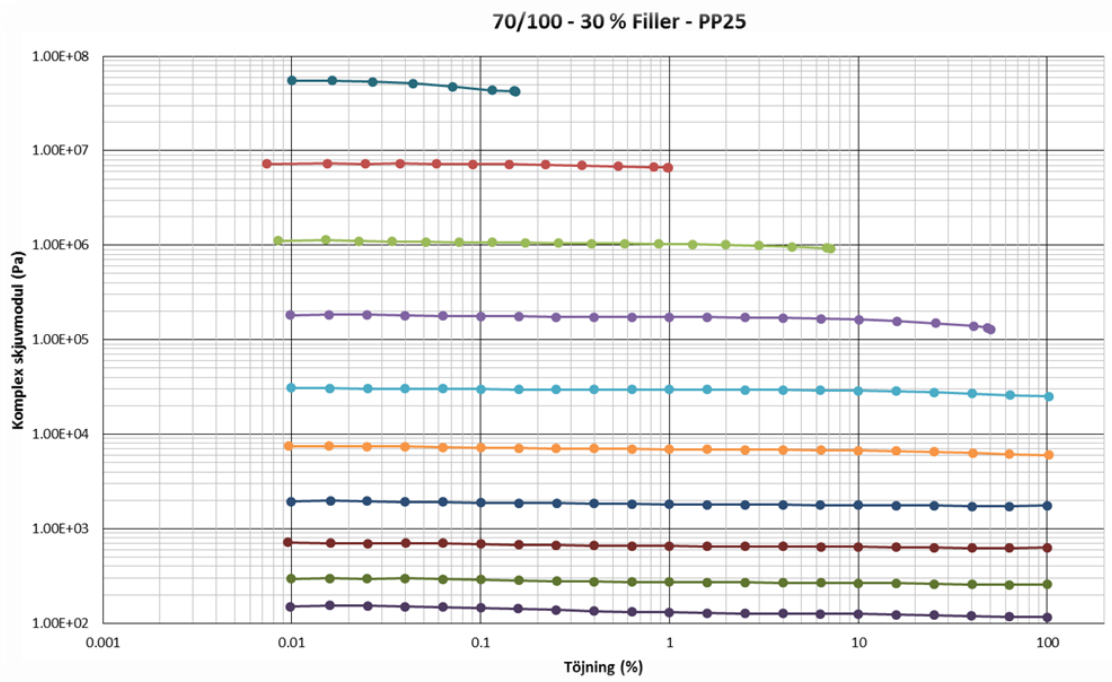
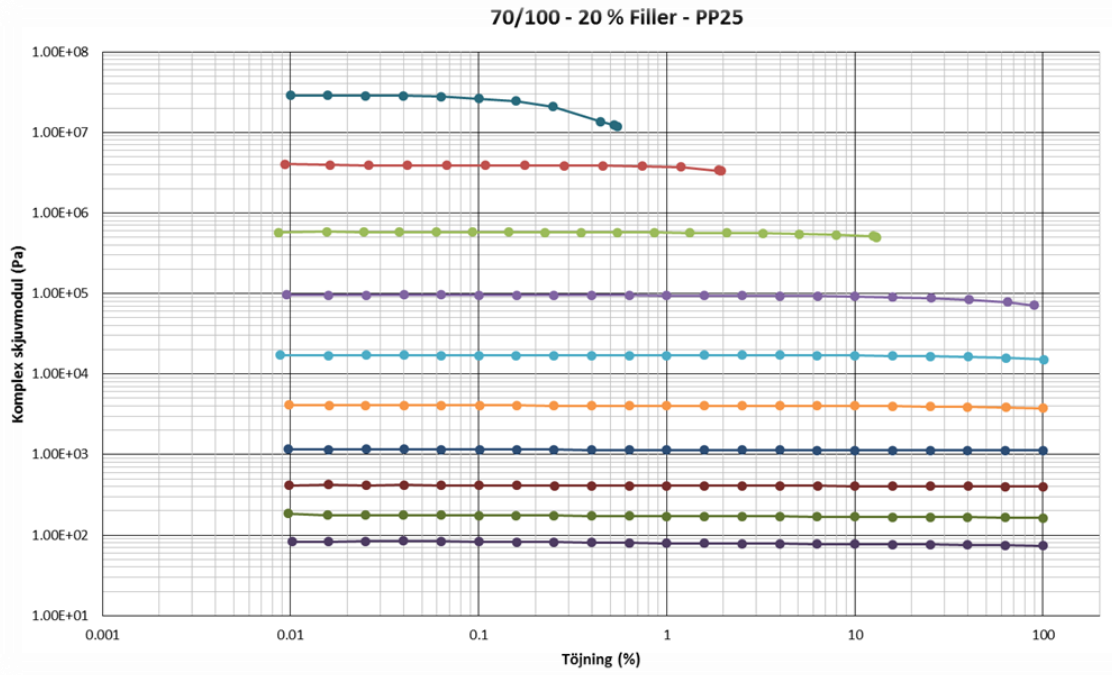
5.3.2 DSR

Som nämnts tidigare har ett av syftena i examensarbetet varit att utvärdera om mätningar på bruksblandningar i DSR skulle kunna utföras och om det i sådana fall gav något användbart resultat. Blandningen av bruk har gjorts enligt avsnitt 3.2 och sedan har provkroppar tillverkats enligt föreskriven metod i avsnitt 3.5.2. Därefter kördes amplitudsvep med samma brukssammansättningar som i RVB-körningarna, 20, 30 och 40 vol-% filler.

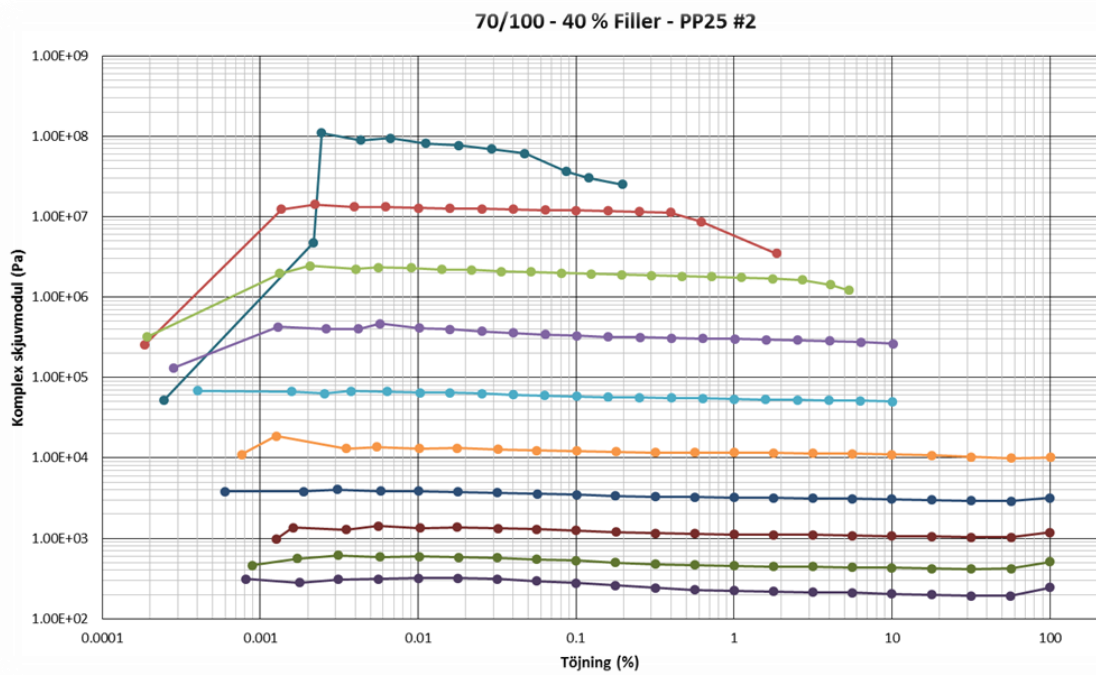
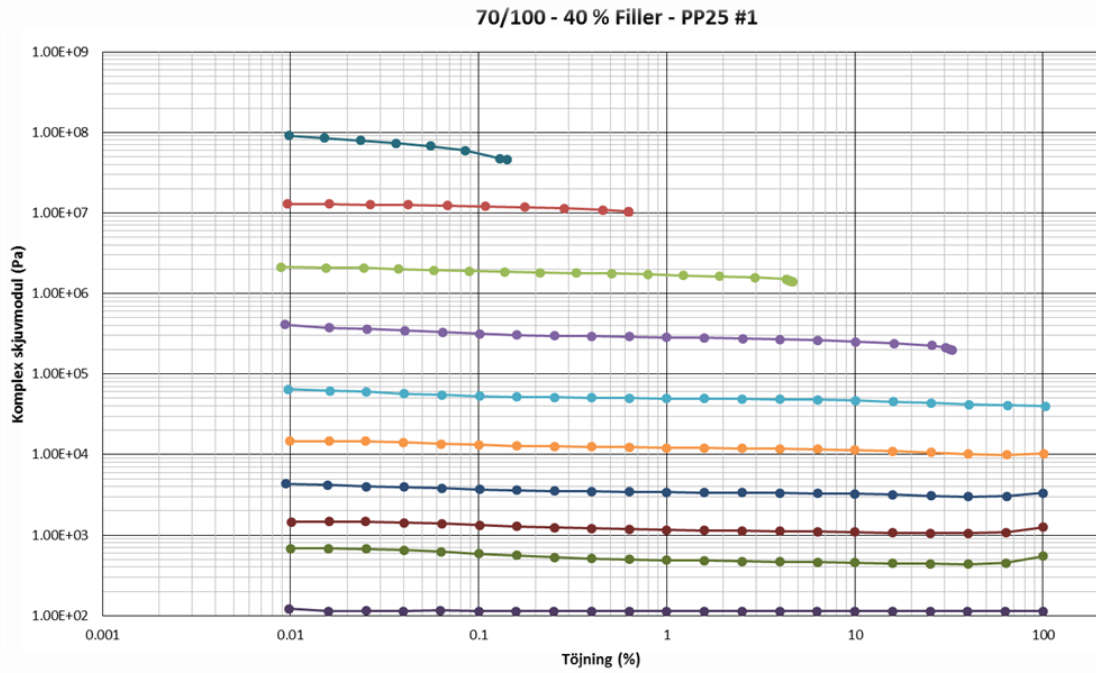
I Figur 5.3 och Figur 5.4 följer en jämförelse av utfallet från mätningarna med system PP25 då svårigheterna blir tydligast i dessa fallen. Vid en okulär bedömning av resultatet ser 20 och 30 % bra ut och påminner om resultaten för rent bitumen. När mätdata studeras närmare visar det sig dock att de inte uppfyller kravet för LVE-området som är definierat till 95 % av startpunkten. I själva verket är värdena svajiga och någon linjär del finns inte vilket blir tydligare när 40 % blandningen studeras. Även när mätsystem PP08 (kan ses i Bilaga 7.6) används ligger mätdata utanför definitionen trots att värdena är något stabilare än vid PP25 mätningar. Generellt ses en tendens att material blir styvare ju högre inblandningshalten är. Det visar sig i form av kortare töjningsintervall där G^* (till synes) verkar vara konstant och även högre G^* värden vid högre inblandning av filler.

Utifrån resultatet i ”70/100 - 40 % Filler – PP25 #1” tog vi beslutet att försöka hitta ett LVE-område vid ännu mindre töjningar än vid det fördefinierade 0,01-100 %. En körning gjordes därför istället från 0,001 % och syns i ”70/100 - 40 % Filler – PP25 #2” vilket inte resulterade i något bättre resultat. Detta kan ha berott på begräsningar i maskinen men vi har inte haft möjligheten att fastställa detta mer än att resultatet är anmärkningsvärt.

Slutsatsen är att det går att genomföra mätningar på bruk i DSR men resultaten är, för oss, oanvändbara då de inte uppfyller definitionen av LVE-område. Vi har därför valt att inte gå vidare med frekvensvep för bruk. Därav kvarstår frågan om det går att använda bruksmätningar istället för mätningar på rent bitumen. Djupare förståelse och utökade undersökningar krävs för att utveckla metodiken att mäta på bruk med hjälp av en DSR.



Figur 5.3 – Amplitudsvep för fillerblandningar, 20 och 30 vol-%.



Figur 5.4 - Amplitudsvep för fillerinblandning 40 vol-%. Körda med olika töjningsintervall.

5.4 Avstämning mot syfte och mål

”Examensarbetet ska utveckla hanteringen av DSR-utrustningen. Framför allt gäller det upp-rättandet av en standardiserad mall för provningsprogram, provberedning och presentation av resultat.”

Hälften av laborationstiden kom att fokusera på denna del. Vi anser att den metoden som fram-tagits ger hög repeterbarhet och ger kommande studenter en bra grund.

”Examensarbetet ska även studera de reologiska effekterna vid inblandning av returafalt i nya massor. Mekaniska egenskaper undersöks med RVB och DSR. Fokus kommer ligga på att hitta indikationer för att kunna förklara materialets stabilitet.”

Med RVB är studien fullt genomförd (både bitumen och bruk) och vi tror oss se ett användbart resultat. Med DSR har endast bitumen undersökts och resultaten är användbara. På grund av tidigare nämnda skäl har inte resultaten analyserats och redovisats mer i detalj.

”Examensarbetet ska slutligen undersöka mätmetodernas (RVB och DSR) lämplighet för as-faltbruk och i sådana fall jämföra resultaten med rent bitumens. Detta görs för att undersöka om resultaten för bruket blir trovärdiga och därmed användbara för branschen.”

För RVB ser resultaten logiska ut men vi rekommenderar vidare utredning. För DSR stannade studien vid amplitudsvep. Det beror framför allt på svårighet att utvärdera resultaten för bruk men även på grund av att utredningen av det första syftet drog ut på tiden. Rekommendationer för vidare studier återfinns under avsnitt 5.5.

”Målet är ett underlag som kan förklara och förutsäga mekaniska egenskaper som stabilitet och utmattning hos asfaltbeläggningar.”

Det saknas en jämförelse med Skanskas material eftersom studien ingår i ett större projekt. Vid samtal med handledarna verkar dock resultaten användbara.

5.5 Rekommendationer

Nedan följer en lista med uppslag för fortsatta studier:

- En undersökning av fillersedimentation vid bruksmätningar med RVB.
- Utvärdering av temperaturområdet för mätning med PP25. Föreslaget temperaturspann 30-80 °C.
- Utvärdering av temperaturområdet för mätning med PP08. Föreslaget temperaturspann 50-(-30) °C.
- Utvärdering av amplitudsvep för asfaltbruk bör undersökas.
- Utvärderingskriterie för val av amplitud inom LVE-område bör undersökas genom att köra amplitudsvep vid lägsta respektive högsta vinkelfrekvens. Då kan lämpligheten för ”20 % amplituden” kontrolleras och eventuellt fastslås för amplitudsvep (som genomförs vid 10 rad/s).
- Jämförelse av egenskaper hos bruksblandningar med olika fillertyper.
- Påverkan av asfaltbrukets egenskaper med tillsatsmedel.

6 Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E., 2014. *Vägbyggnad*. Första upplagan red. Stockholm, Sverige: Liber AB.
- Airey, G. D., 1997. *Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens*, Nottingham, GB: University of Nottingham.
- Andersson, C. & Sulejmani, P., 2014. *Undersökning av bitumen från asfalt med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR*, Lund: Institutionen för Teknik och samhälle, LTH.
- Anton Paar, 2015. *Tips and tricks from Joe Flow - Oscillatory measurements: Back and forth to the result*. [Online]
Available at: <http://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=25218&L=23>
- Asphalt Institute, 2007. *Asphalt Handbook MS-4 7th Edition*. USA: Asphalt Institute.
- ASTM International, 2008. *D7175-08*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Brookfield engineering, u.d. *Brookfield engineering - Thermosel System*. [Online]
Available at: <http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/thermosel.html>
[Använd 10 11 2015].
- Erlandsson, I., 2012. *Predikterad viskositet i blandningar av olika bitumensorter*, Lund: Institutionen för Teknik och samhälle, LTH.
- FAS Service AB, 2002. *FAS 253-02*, Sverige: FAS Service AB.
- Heukelom, W., 1973. *An improved Method of Characterizing Asphaltic Bitumens With the Aid of Their Mechanical Properties*, Minneapolis, MN, USA: University of Minnesota.
- Koenders, B., 2015. Routine testing and mechanical properties of bitumens. i: R. N. Hunter, A. Self & J. Read, red. *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth edition red. London, UK: ICE Publishing, pp. 87-118.
- Liao, M.-C., Chen, J.-S. & Airey, G., 2015. Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen-Filler Mastics. *Asian Transport Studies Volume 3*, pp. 312-327.
- Liao, M.-C., Airey, G. & Chen, J.-S., 2013. Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics. *International Journal of Pavement Research and Technology Volume 6*, pp. 576-581.
- Nilsgart, E. & Grybb, T., 2014. *Rotationsviskosimeter, RVB - Ett alternativ till konventionella metoder för viskositetsmätning på bitumen*, Lund: LTH, Institutionen för Teknik och samhälle.
- Nordisk Vägforum, NVF, 2012. *Grön asfalt, återvinning*, Borlänge: Nordiskt Vägforum, NVF.
- Office of Pavement Technology, April 2011. *The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure*, Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

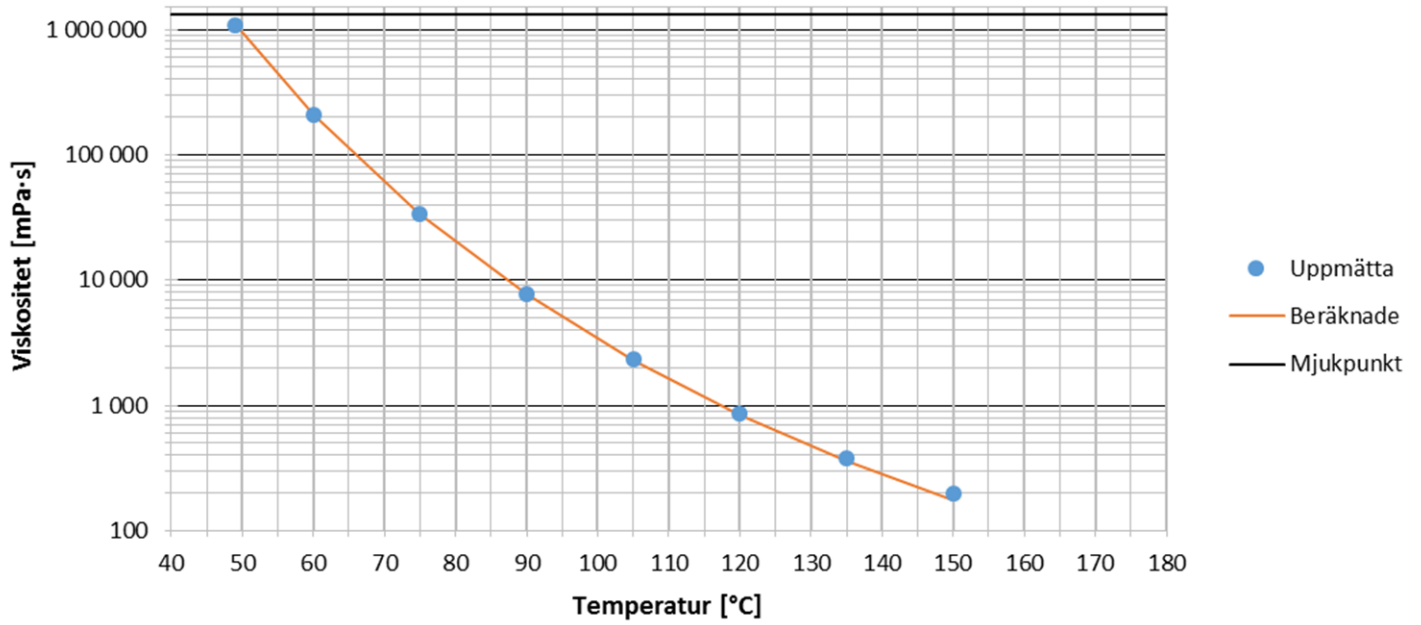
- Partl, M. N., 2005. *Isothermal and Non-Isothermal Behavior of Binders and mixes*, Dübendorf, Schweiz: EMPA.
- Petrauskas, D. & Ullah, S., 2015. Manufacture and storage of bitumens. i: R. N. Hunter, A. Self & J. Read, red. *The Shell Bitumen Handbook*. London, UK: ICE Publishing, pp. 15-28.
- Roberts, F. L. o.a., 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and construction*. Lanham, Maryland, USA: NAPA Research and Education Foundation.
- Rodrigues, C. & Hanumanthgari, R., 2015. Polymer modified bitumens and other modified binders. i: R. N. Hunter, A. Self & J. Read, red. *The Shell Bitumen Handbook*. London, UK: ICE Publishing, pp. 149-183.
- Steffe, J. F., 1996. *Rheological methods in food process engineering*. East Lansing, Michigan, USA: Freeman Press.
- Swedish Standards Institute, 2012. *SS-EN 14770:2012*. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- Taylor, R. & Airey, G., 2015. Rheology of bitumens. i: R. N. Hunter, A. Self & J. Read, red. *The Shell Bitumen Handbook*. London, UK: ICE Publishing, pp. 119-148.
- Tornberg, E., 2015. *Professor vid Institutionen för Livsmedelsteknik [Intervju] (29 September 2015)*.
- Trafikverket, 2011a. *TRVK Väg*, Borlänge, Sverige: Trafikverket.
- Trafikverket, 2011b. *TRVR Väg*, Borlänge: Trafikverket.
- Tyllgren, P., 2010. *Förnygrig av reutrasfalt med miljöanpassade tillsatsmedel*, Malmö, SE: Skanska.
- Tyllgren, P., 2015. *Civilingenjör vid Svenskt VägCentrum [Intervju] (Hösten 2015)*.
- Westergren, P., 2004. *Handbok för återvinning av asfalt*, Borlänge: Trafikverket.
- Williams, M. L., Landel, R. F. & Ferry, J. D., 1955. *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*, Wisconsin, USA: Department of Chemistry, University of Wisconsin.
- Vägmateriel, SIS/TK 202, 2013. *SS-EN 12697-3:2013 - Vägmateriel - Asfaltmassor - Provningsmetoder för asfaltmassa - Del 3: Återvinning av bindemedel: Rotationsindunstare*, Stockholm: Swedish Standards Institute.
- Väst kustens mark och asfalt AB, 2015. [Online]
Available at: <http://www.vmaab.se/>
[Använd 09 11 2015].
- Xu, S., Wang, K., Wayira, A. & Lu, J., 2015. Influence of binder properties on the performance of asphalt. i: R. N. Hunter, A. Self & J. Read, red. *The Shell Handbook*. London, UK: ICE Publishing, pp. 503-571.

Yusoff, N. I. M., Shaw, M. T. & Airey, G. D., 2011. Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders. i: M. C. Forde, red. *Construction and building materials*. 5 red. Nottingham, UK & Connecticut, USA: Elsevier, pp. 2171-2189.

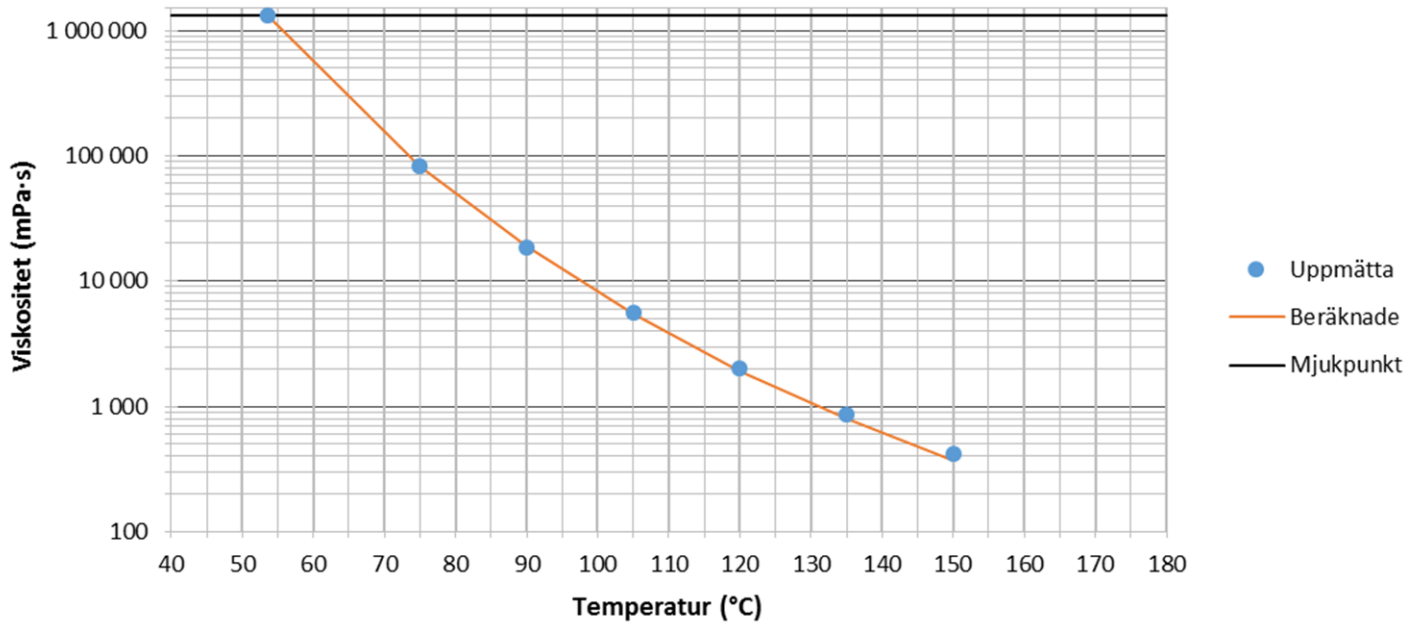
7 Bilagor

7.1 Bilaga - RVB

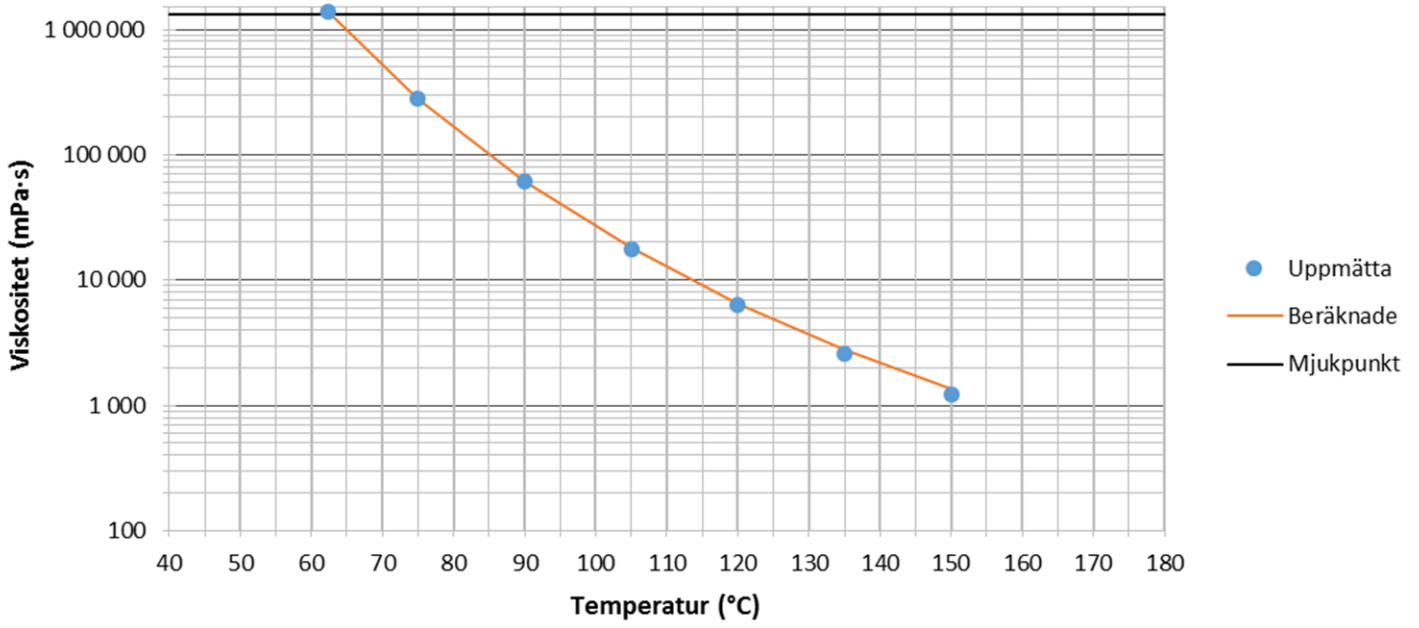
70/100



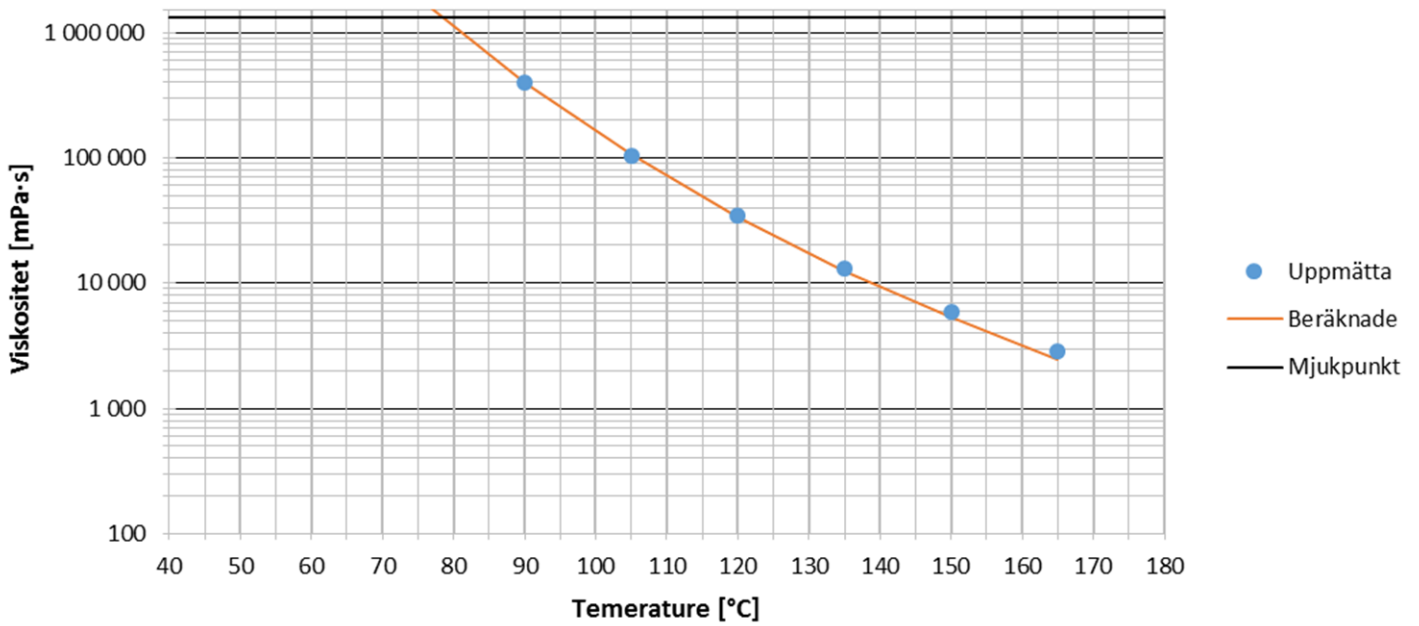
70/100 - 20 % Filler



70/100 - 30 % Filler

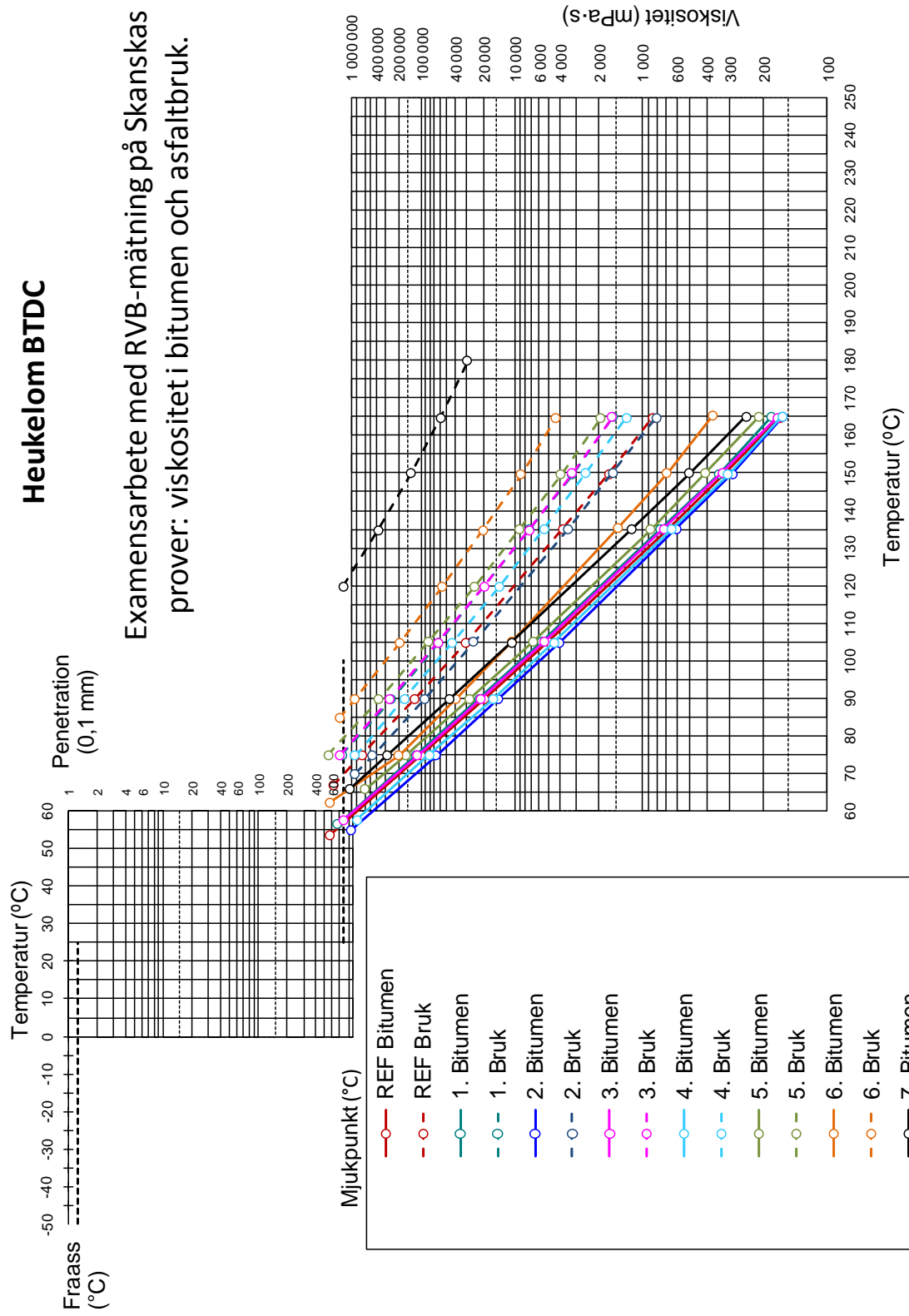


70/100 - 40 % Filler

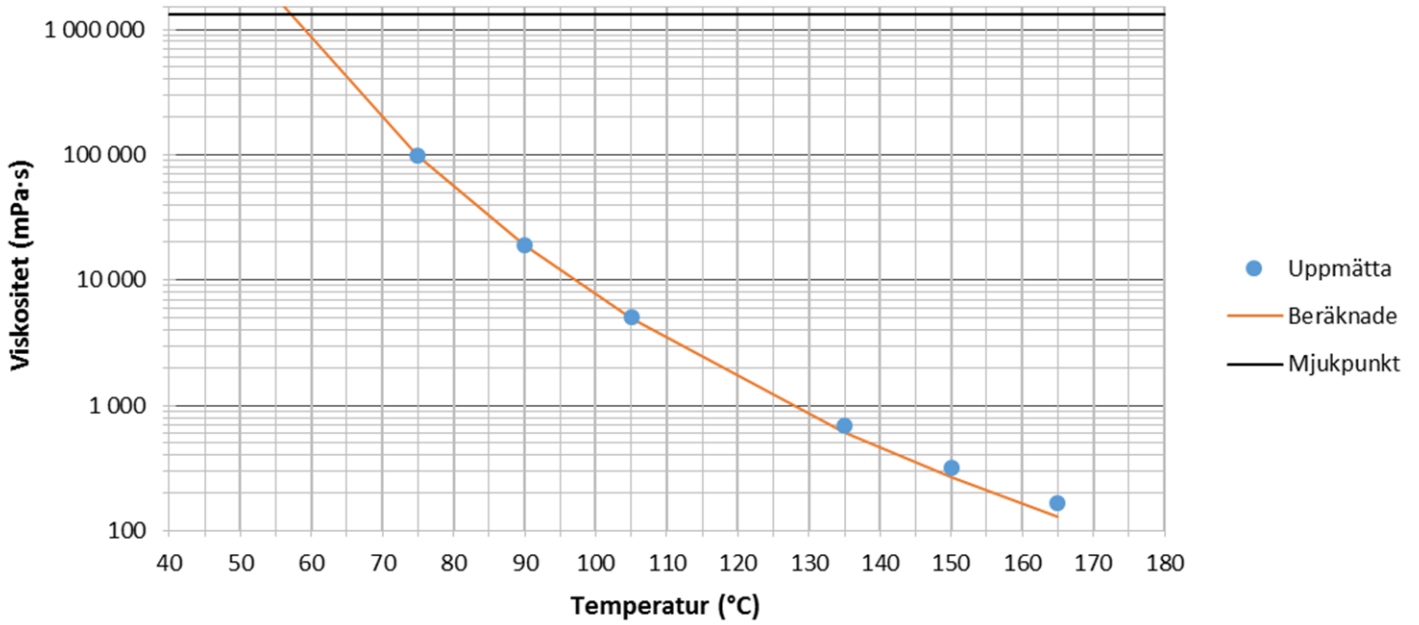


Heukelom BTDC

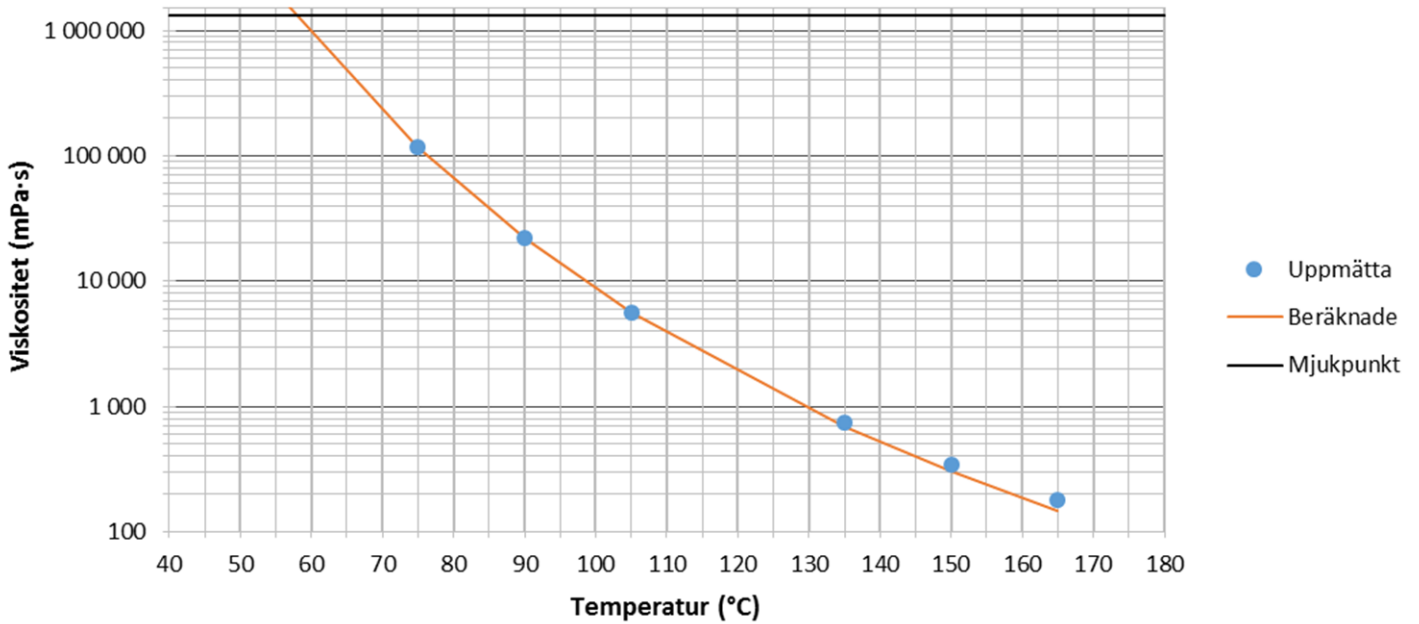
Examensarbete med RVB-mätning på Skanskas prover: viskositet i bitumen och asfaltbruk.



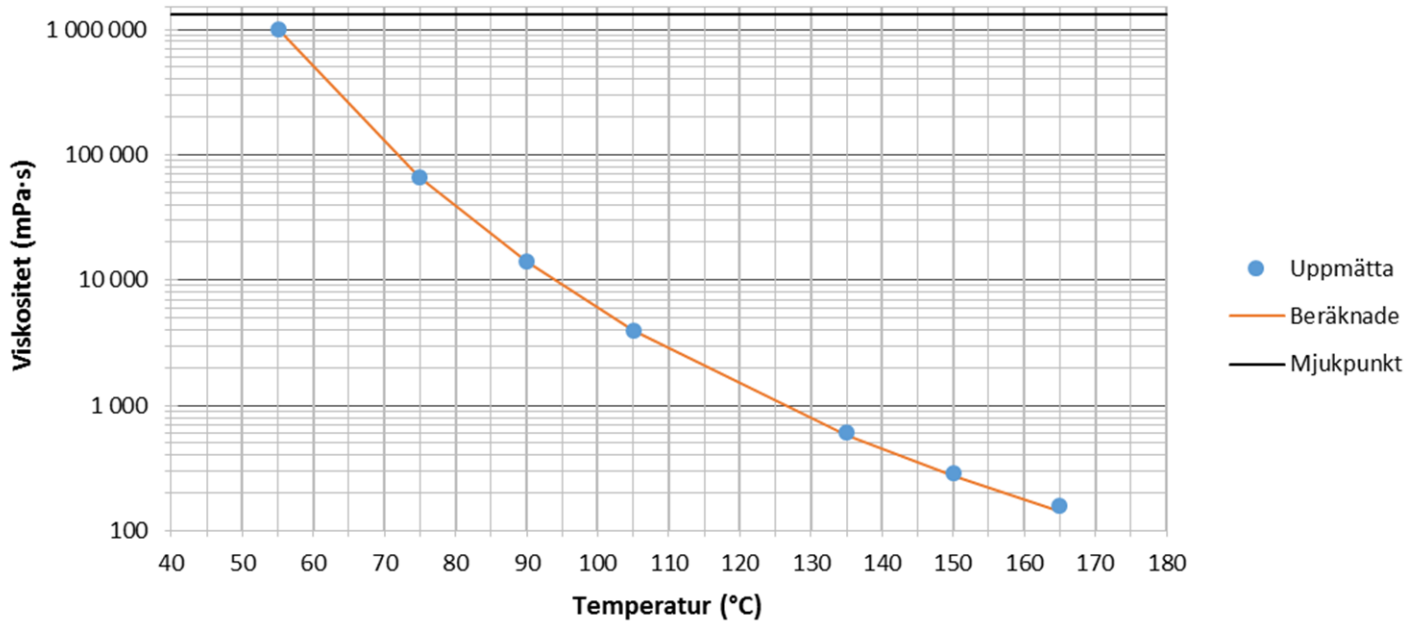
REF



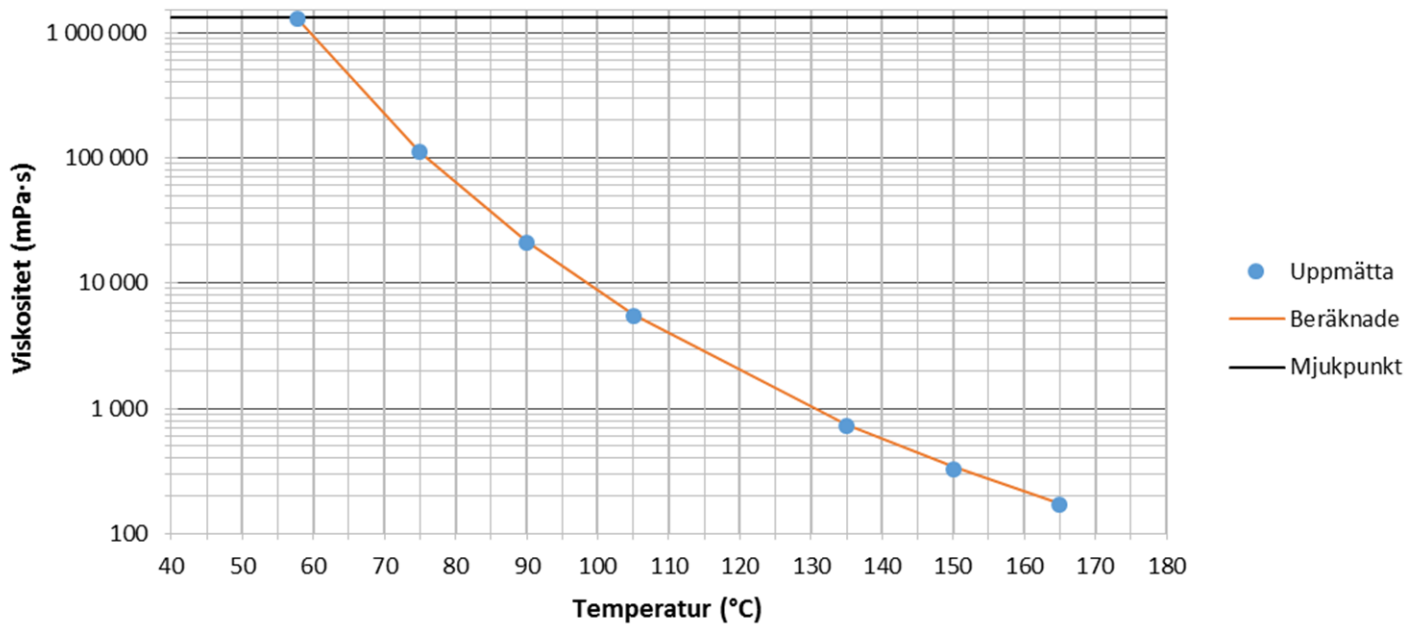
Nr. 1



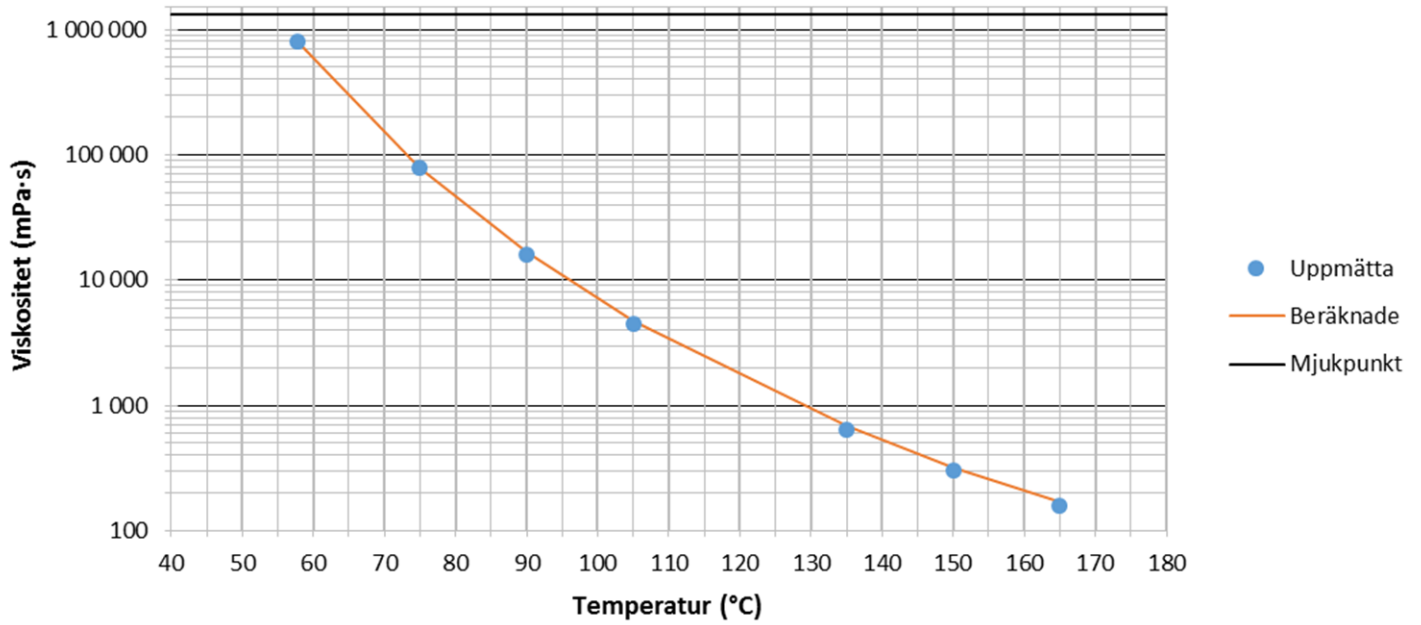
Nr. 2



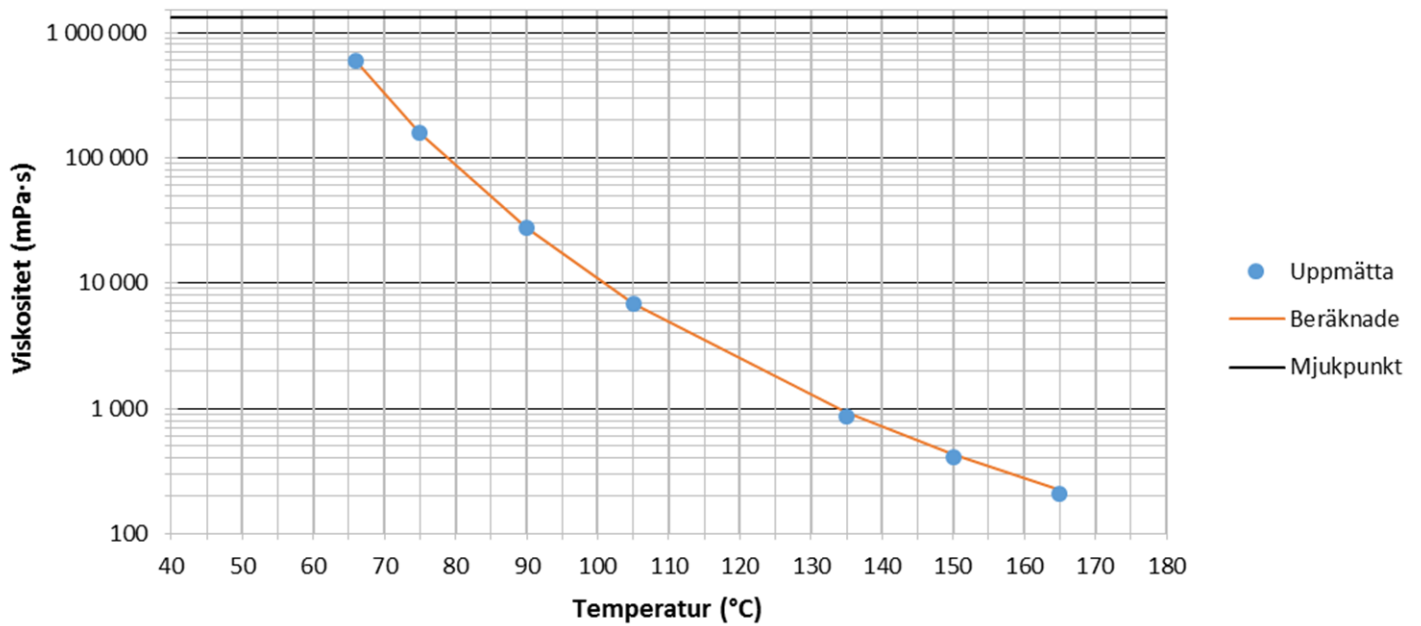
Nr. 3



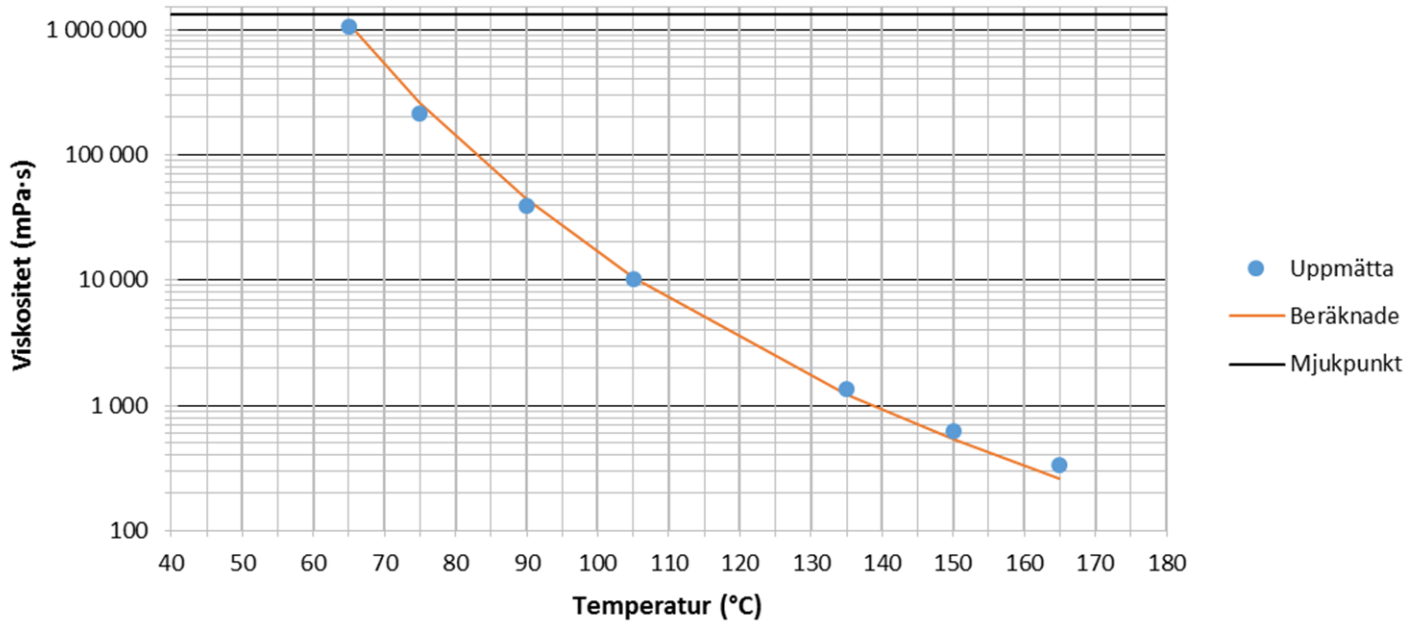
Nr. 4



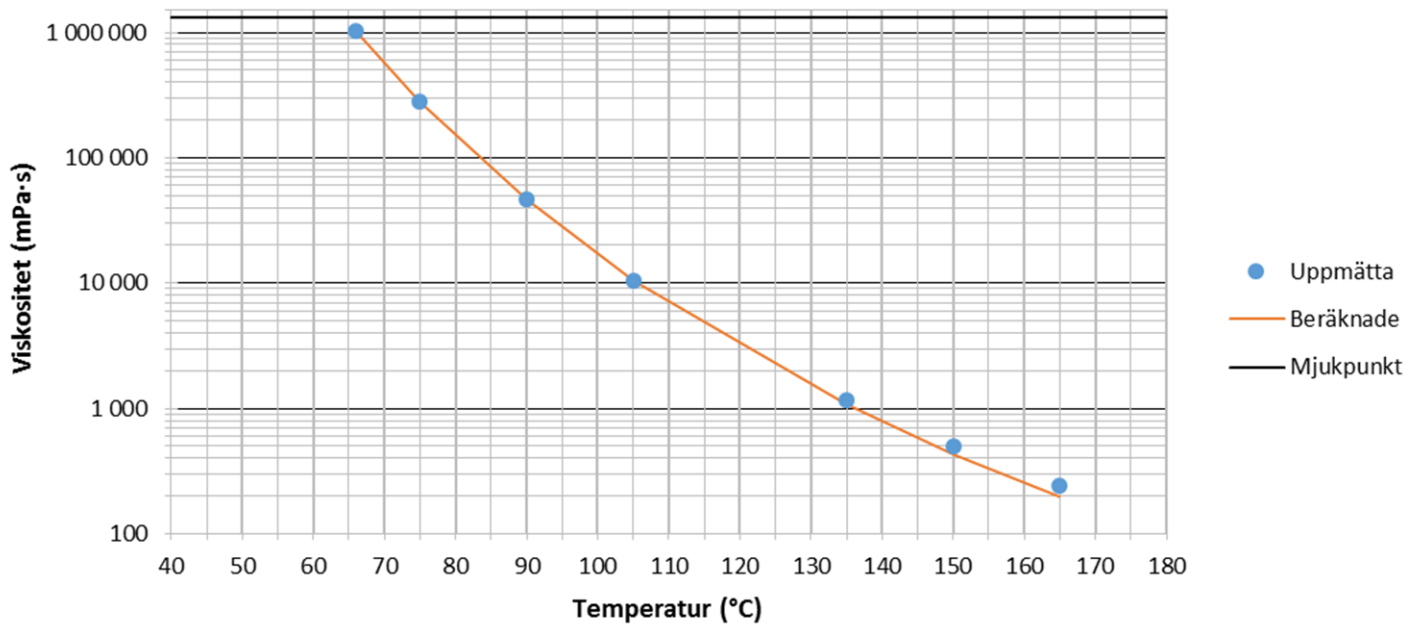
Nr. 5



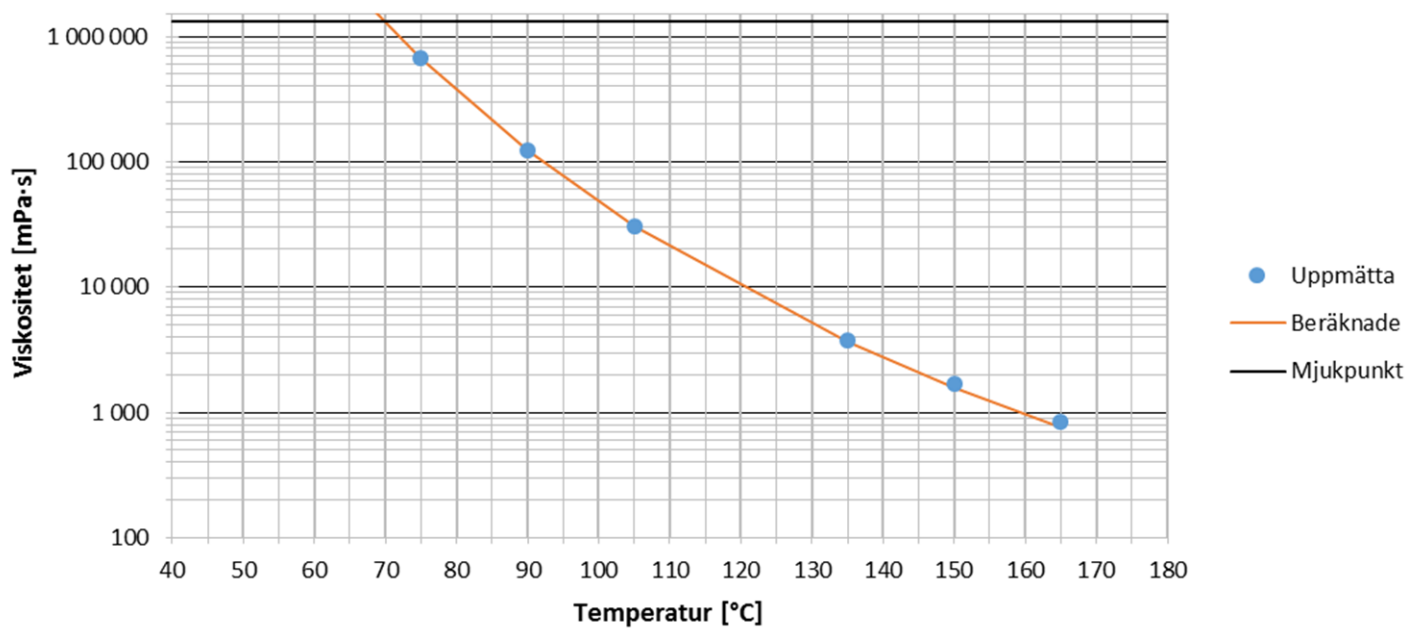
Nr. 6



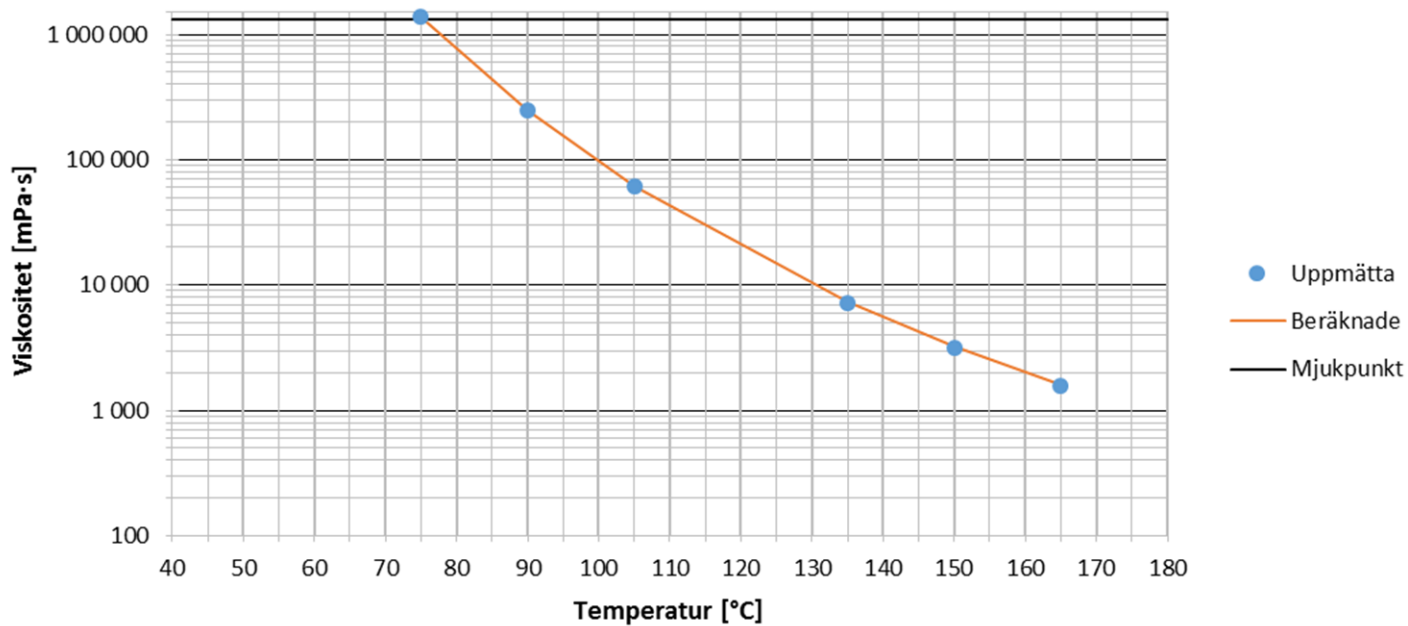
Nr. 7



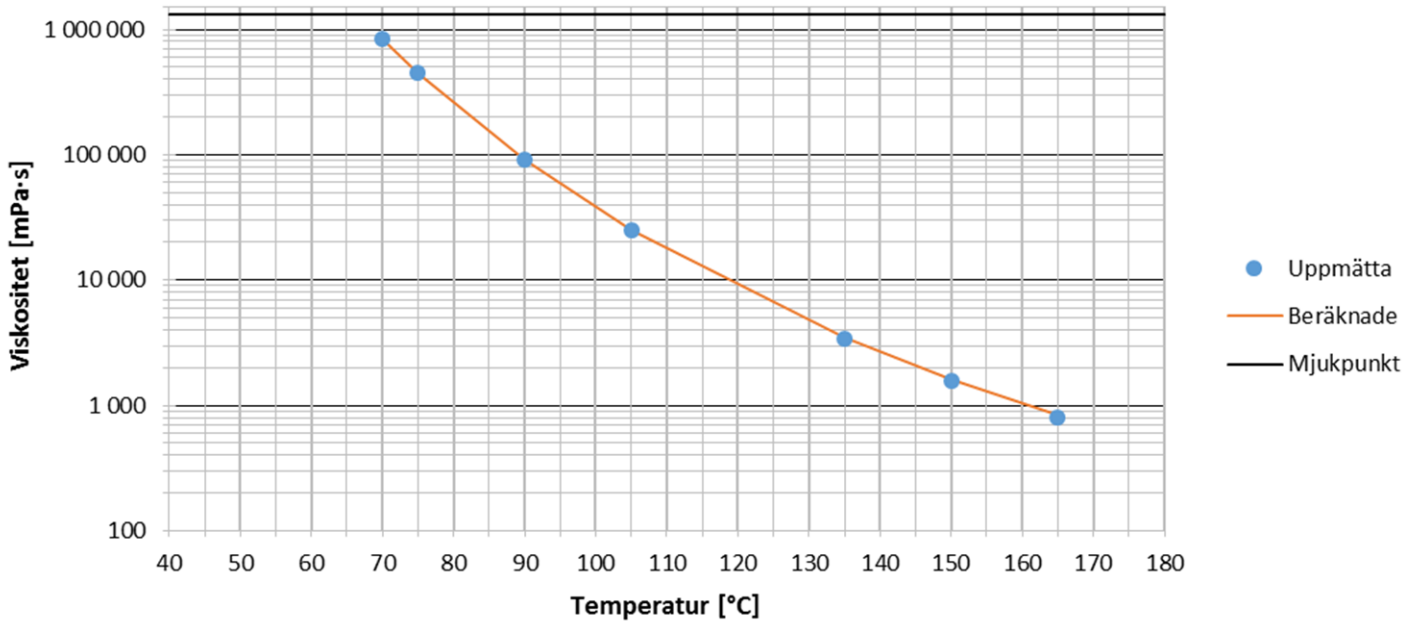
REF Bruk



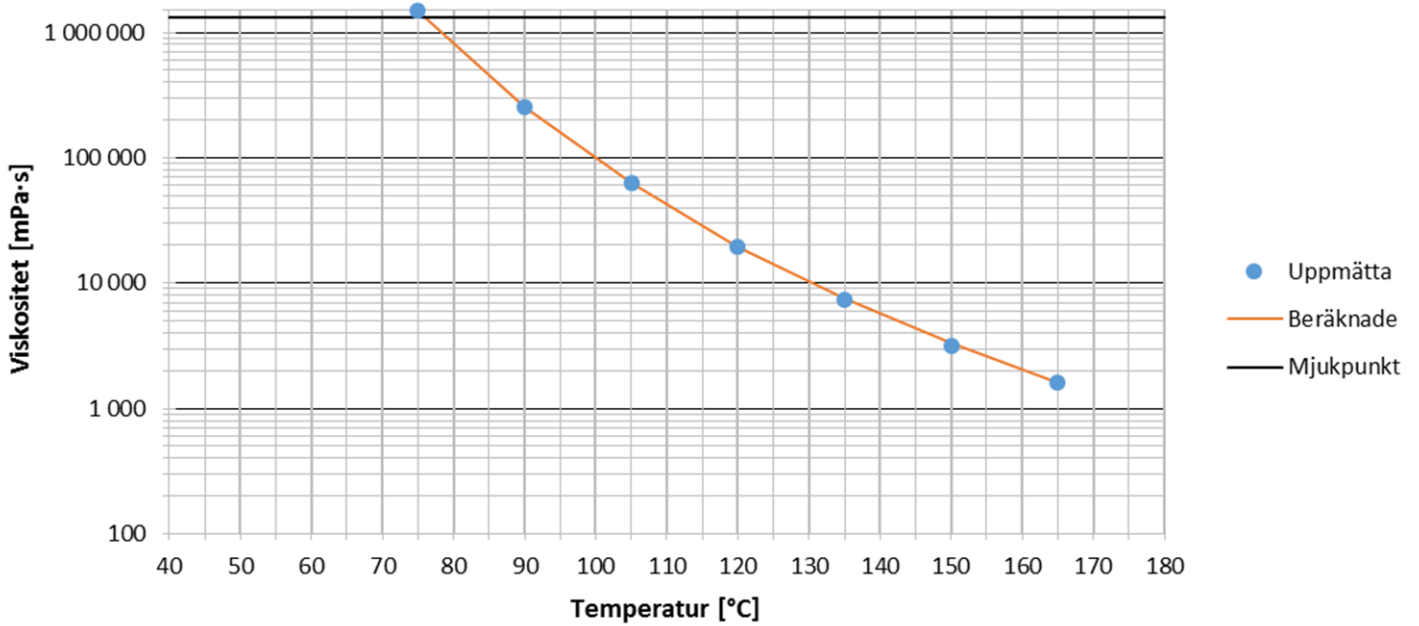
Nr. 1 Bruk



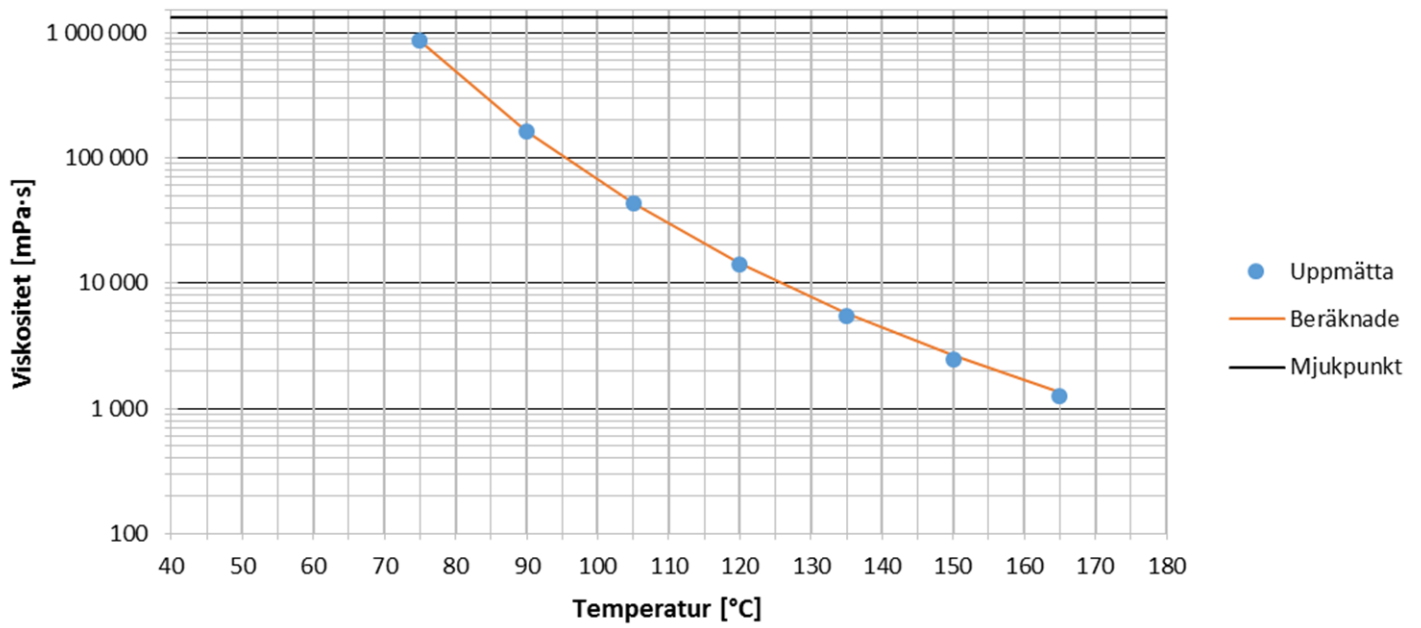
Nr. 2 Bruk



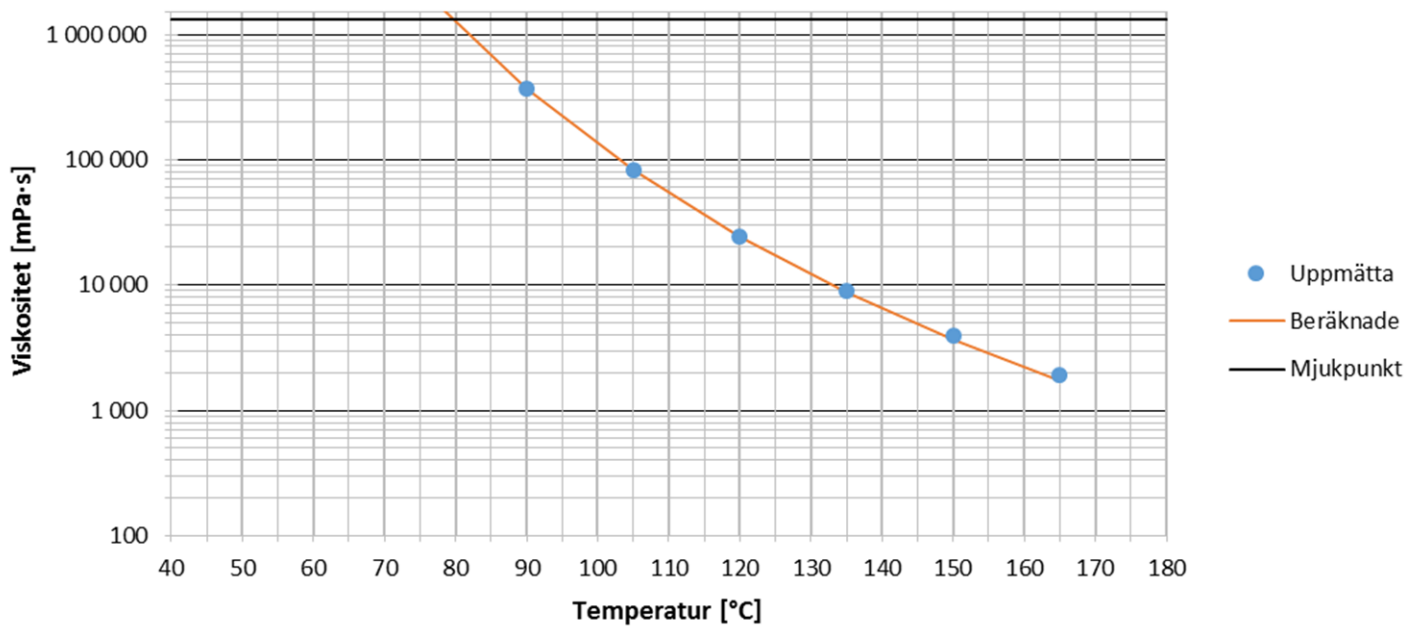
Nr. 3 Bruk



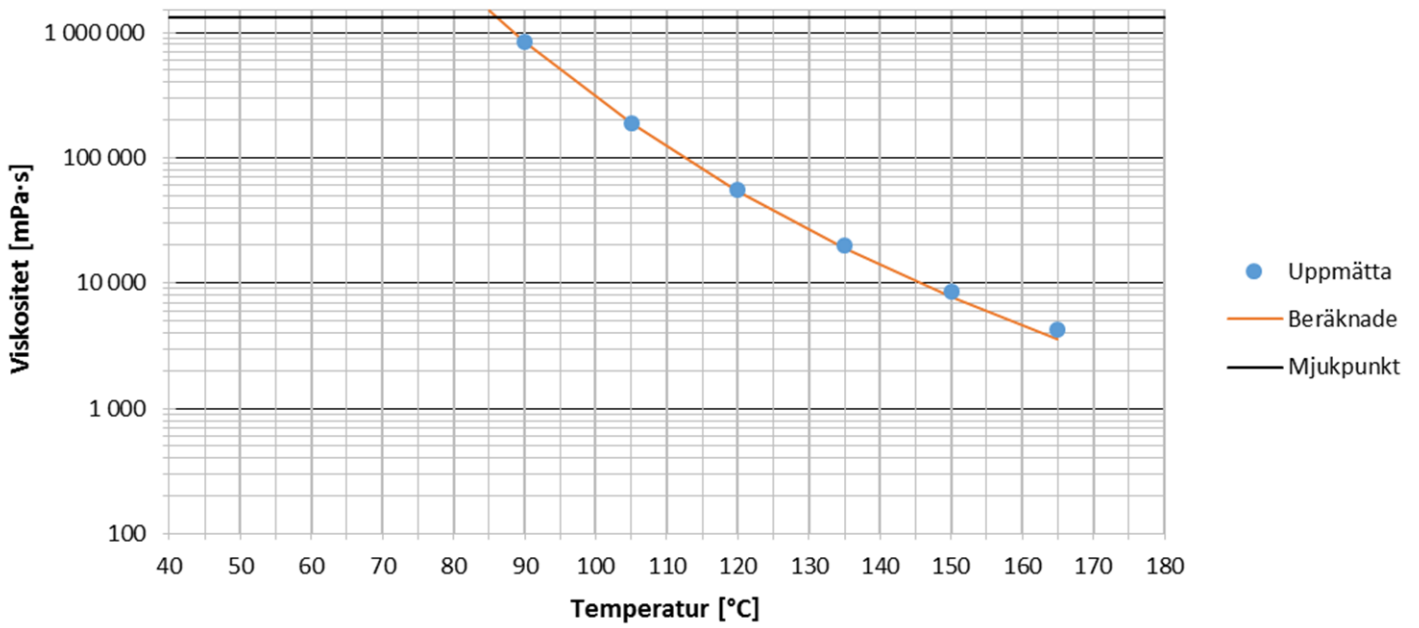
Nr. 4 Bruk



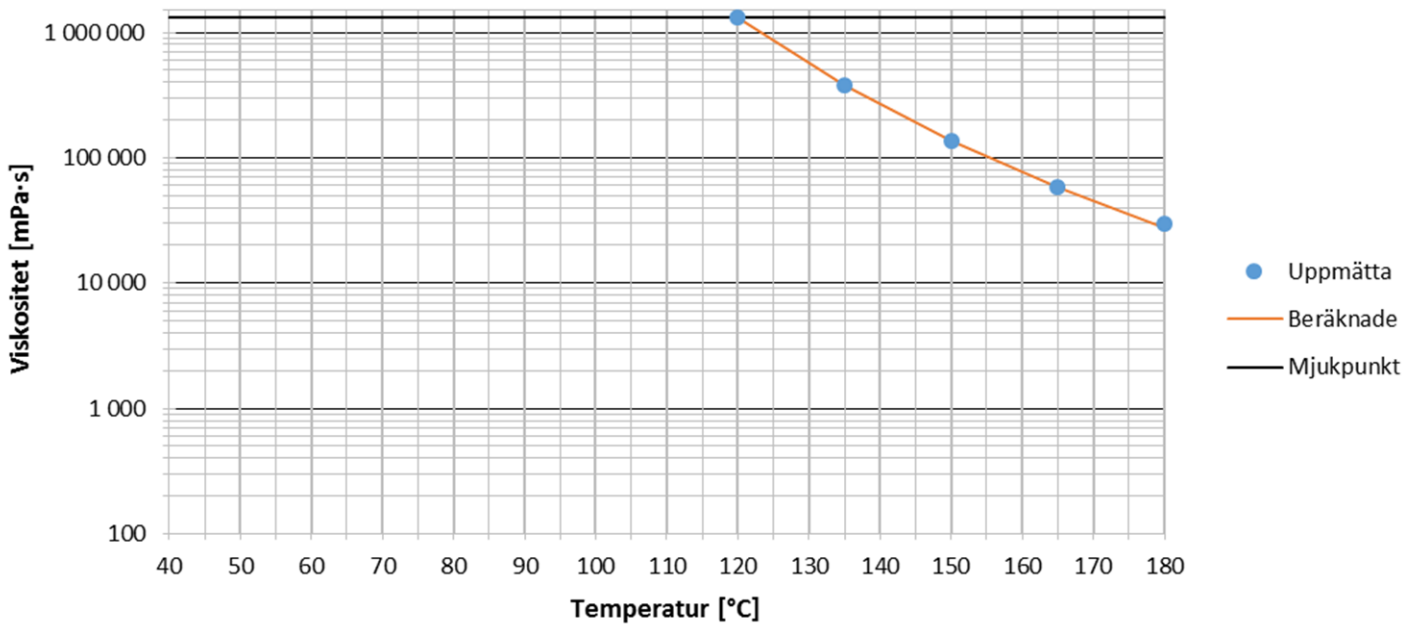
Nr. 5 Bruk



Nr. 6 Bruk



Nr. 7 Bruk

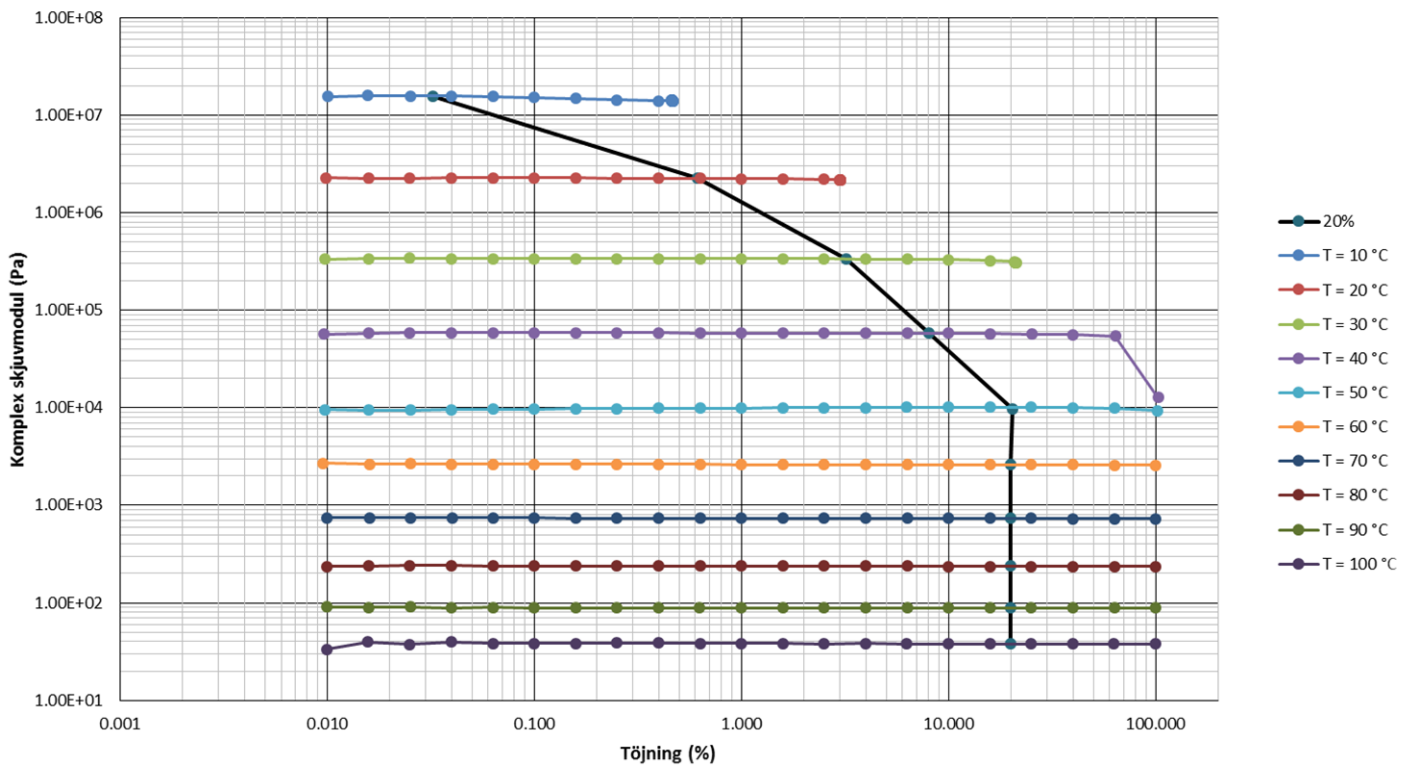


7.2 Bilaga – Amplitudsvep

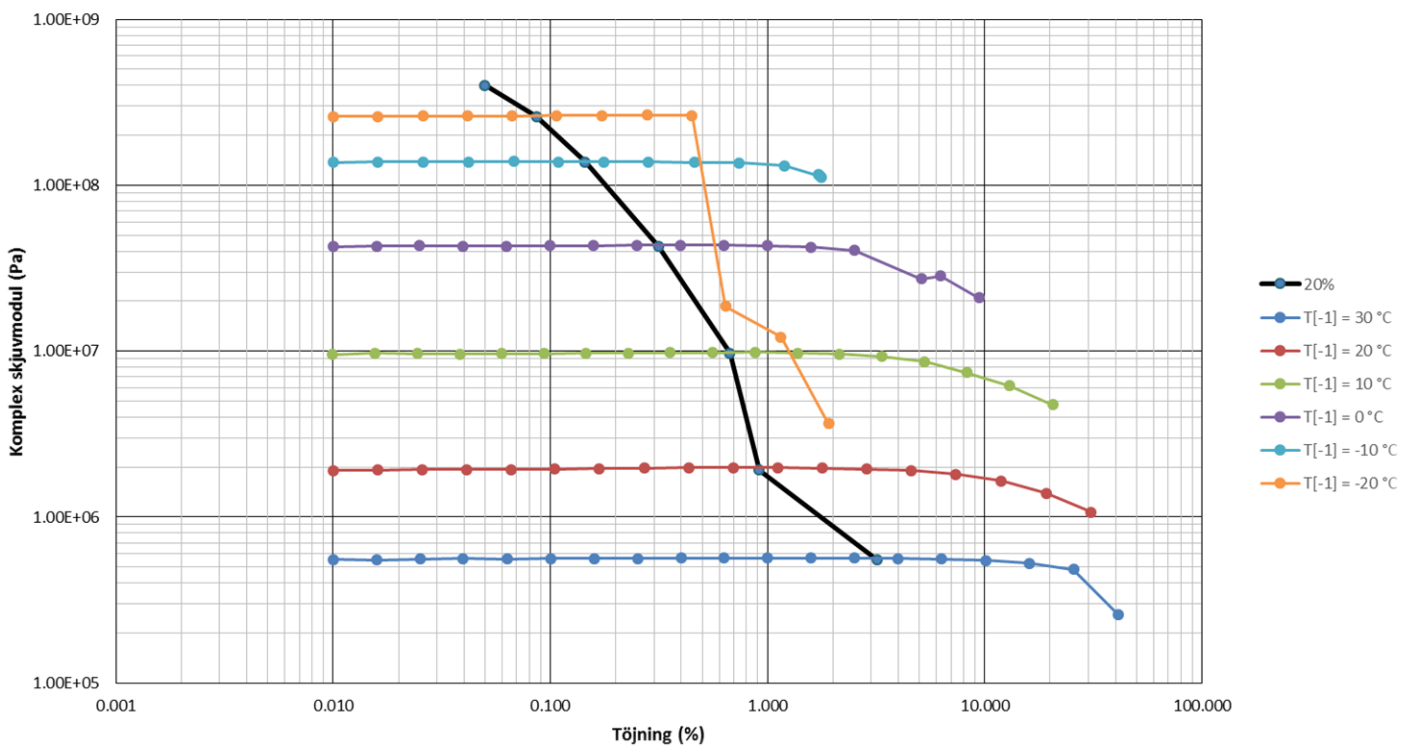
Amplitud, γ (%) PP25									
Bitumen Temp (°C)	70/100	REF	1	2	3	4	5	6	7
10	0.033	0.021	0.020	0.026	0.021	0.021	0.020	0.021	0.021
20	0.613	0.124	0.208	0.319	0.213	0.213	0.092	0.241	0.139
30	3.193	0.664	0.896	1.281	0.896	0.895	0.812	0.813	0.568
40	8.013	2.013	2.033	3.193	2.013	3.193	1.281	2.032	2.033
50	20.000	5.060	5.060	12.700	5.053	8.013	3.193	3.192	3.193
60	20.000	12.713	7.993	12.700	7.993	12.673	3.192	5.053	8.013
70	20.000	12.713	20.000	20.000	20.000	20.000	12.653	7.973	12.673
80	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	12.653	12.633	20.000
90	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
100	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000

Amplitud, γ (%) PP08									
Bitumen Temp (°C)	70/100	REF	1	2	3	4	5	6	7
-30	0.050	0.051	0.051	0.030	0.074	0.051	0.029	0.051	0.045
-20	0.086	0.082	0.063	0.073	0.074	0.070	0.036	0.063	0.064
-10	0.145	0.137	0.104	0.161	0.157	0.137	0.051	0.119	0.099
0	0.315	0.345	0.229	0.331	0.213	0.245	0.119	0.157	0.227
10	0.669	0.434	0.434	0.442	0.319	0.497	0.251	0.399	0.331
20	0.913	0.471	0.608	0.664	0.387	0.684	0.519	0.442	0.377
30	3.197	0.723	0.896	1.285	0.723	1.378	0.896	0.929	0.779

70/100 - PP25

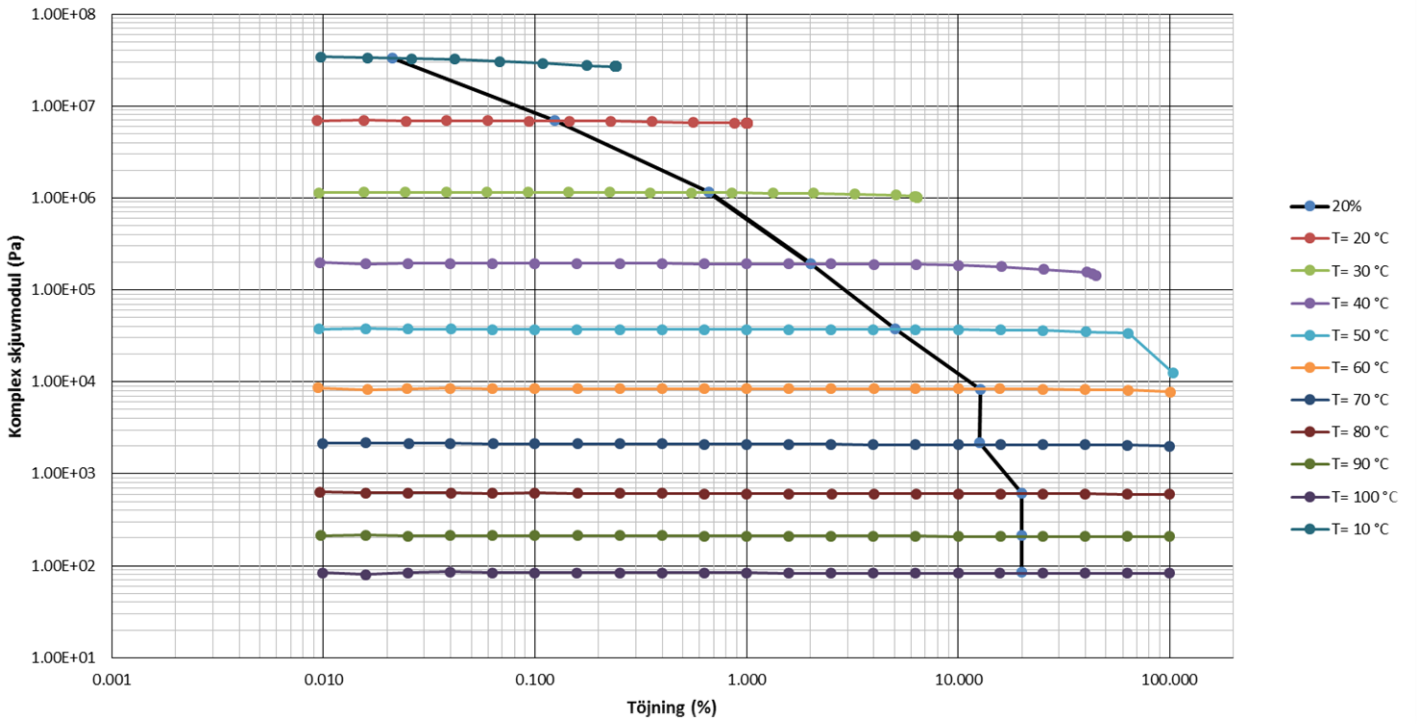


70/100 - PP08*

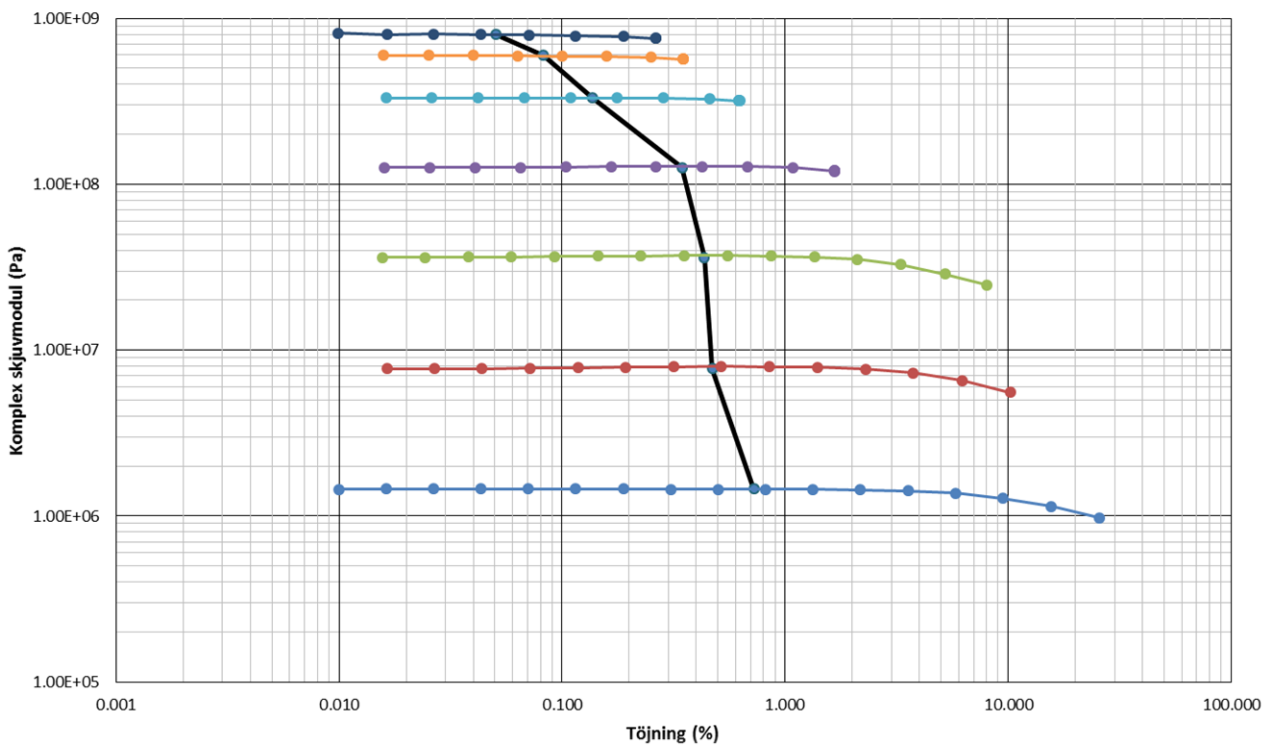


* Ej fullständig körning av amplitudsvep, -30 °C saknas då provkroppen gått till brott vid -20 °C. Värdet har extrapolerats till en töjning på 0,05 %.

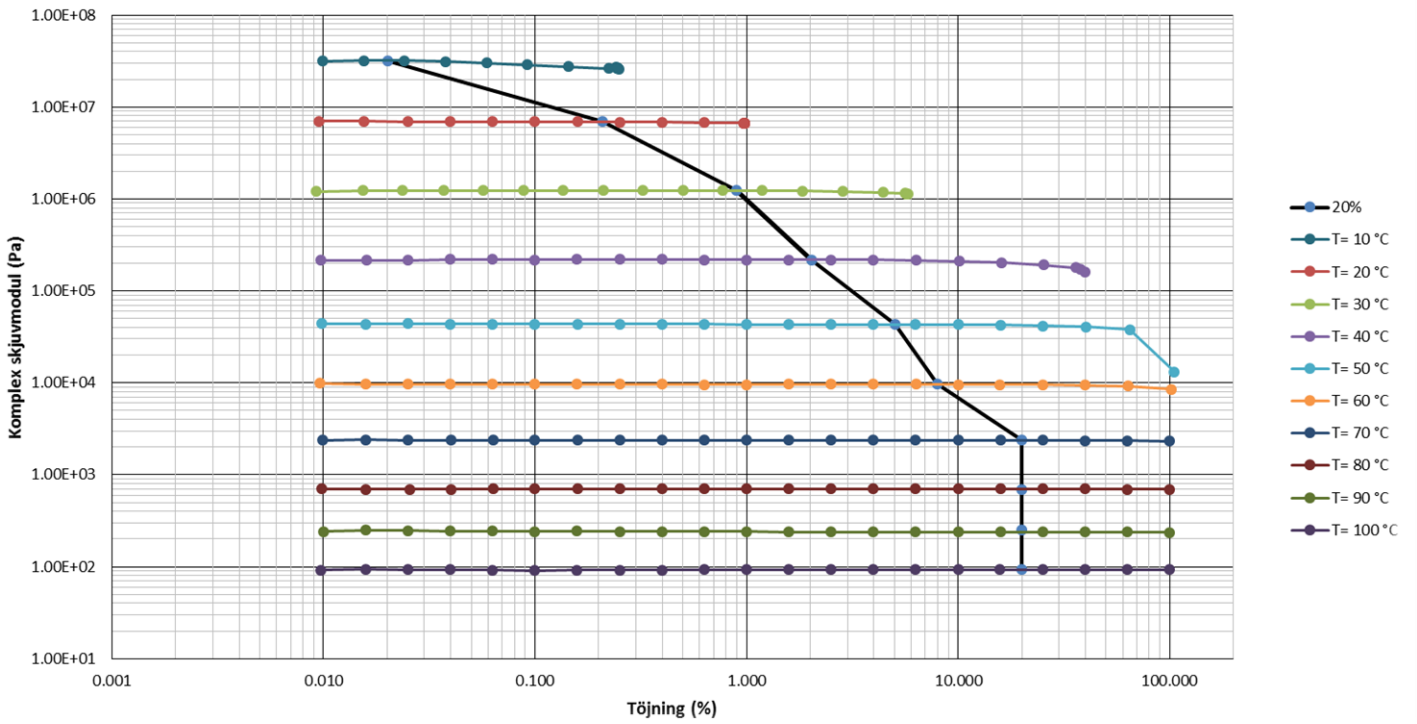
REF - PP25



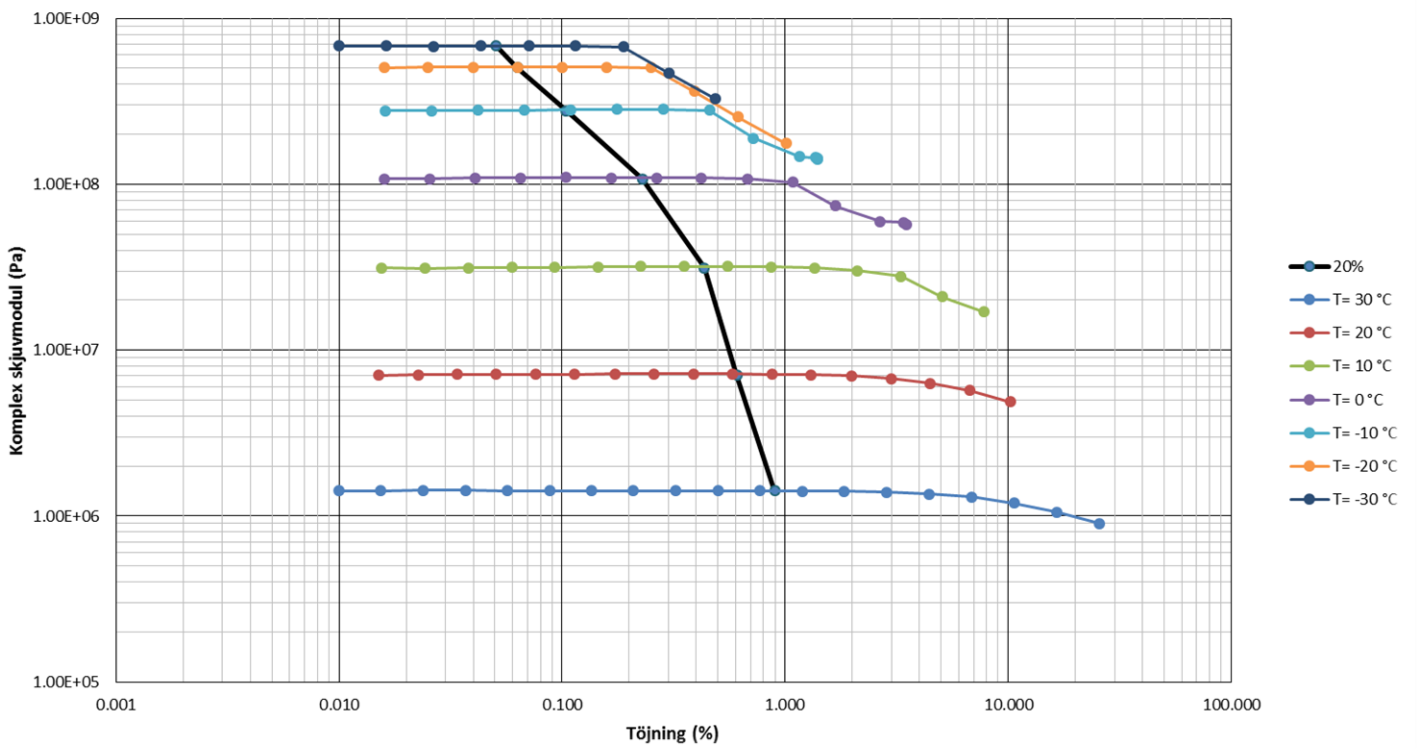
REF - PP08



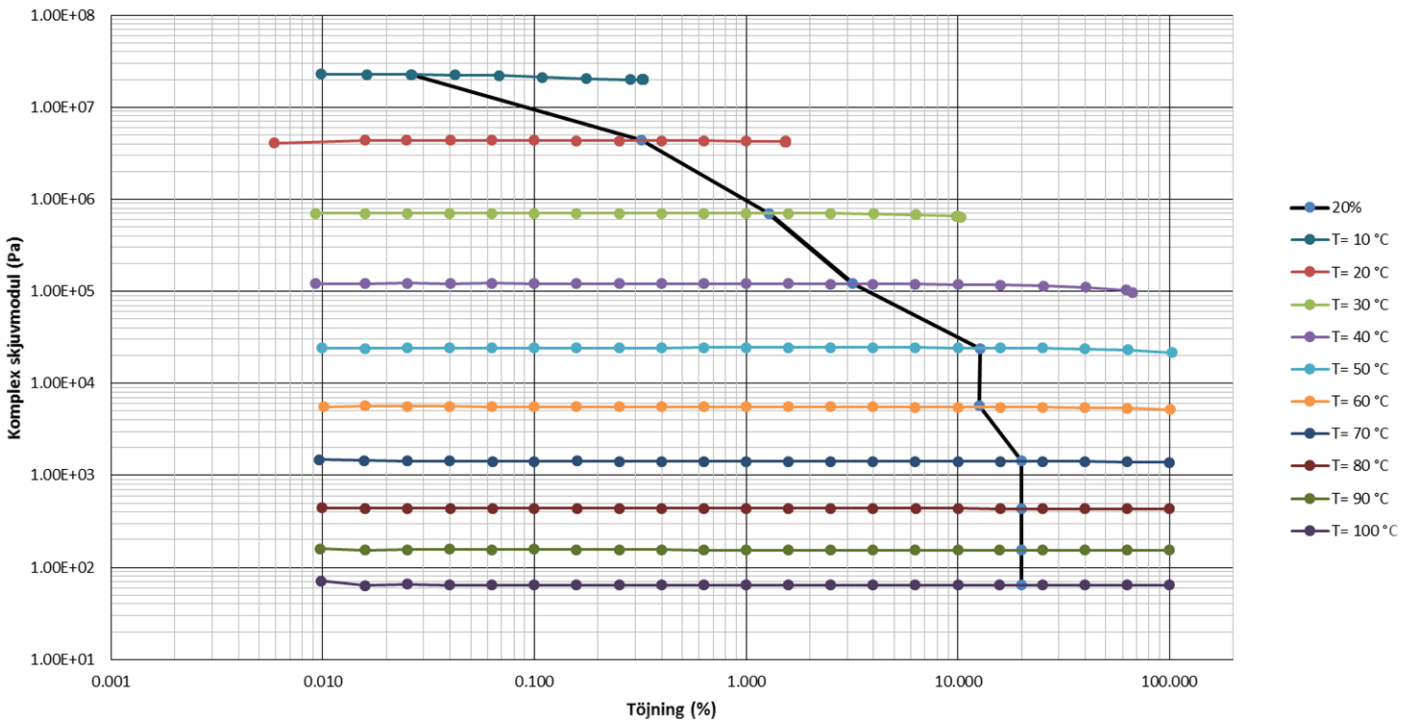
Nr. 1 - PP25



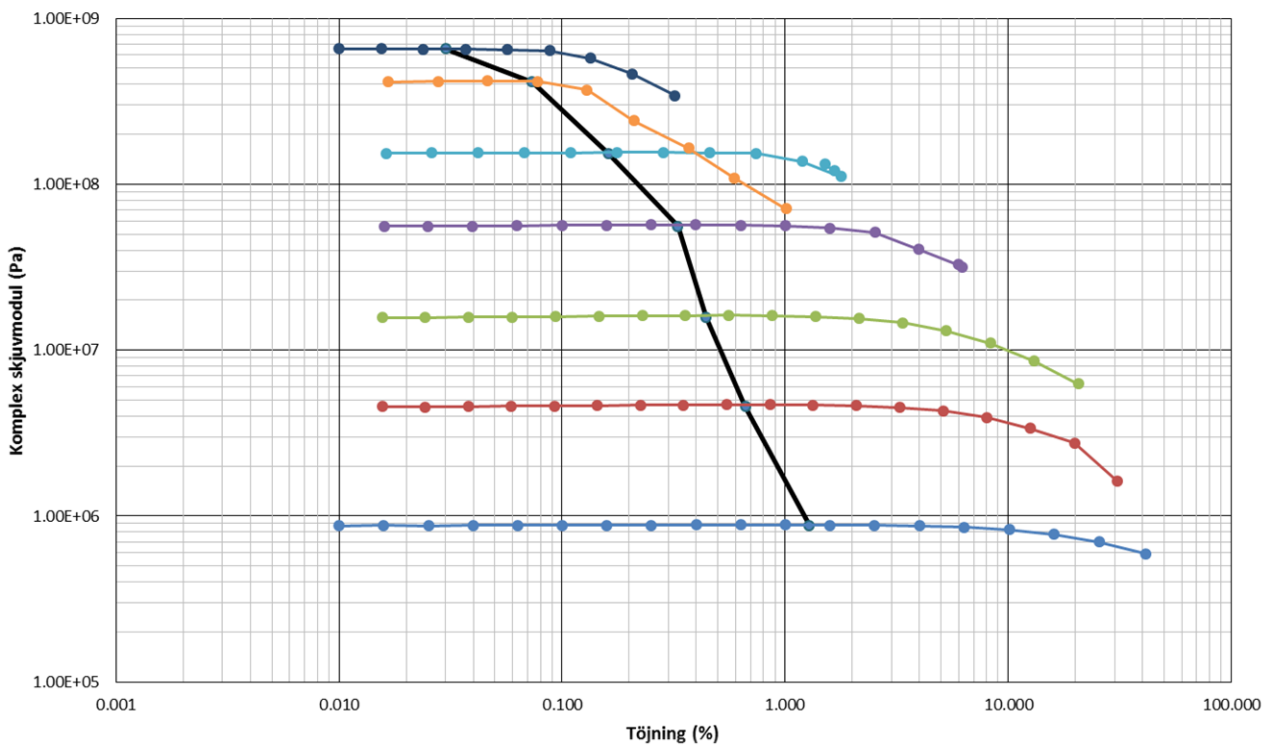
Nr. 1 - PP08



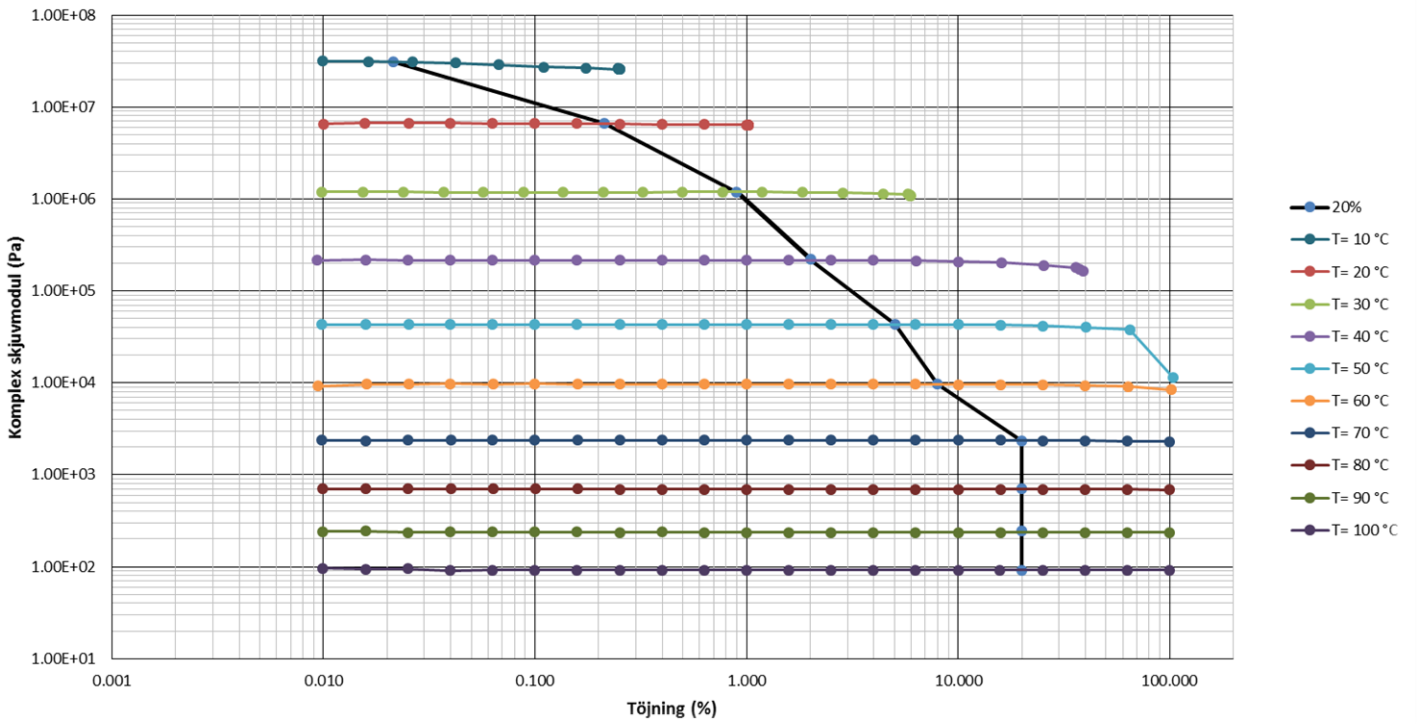
Nr. 2 - PP25



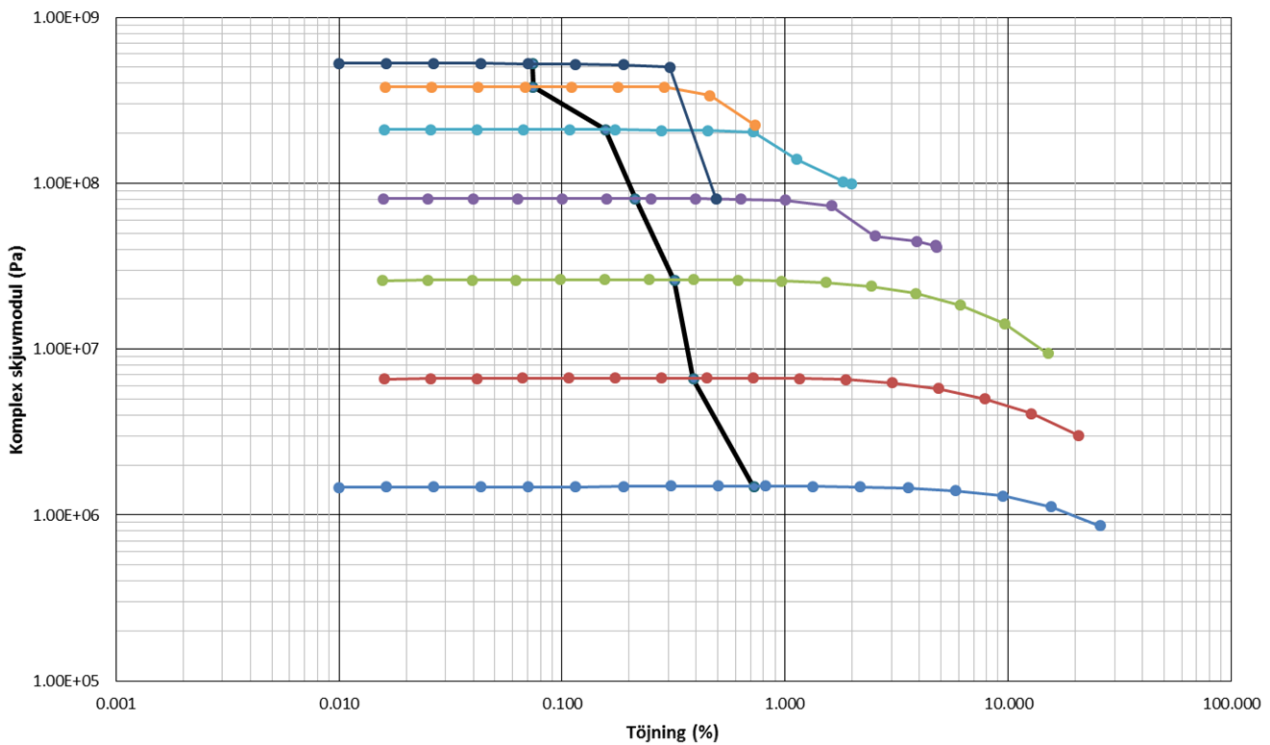
Nr. 2 - PP08



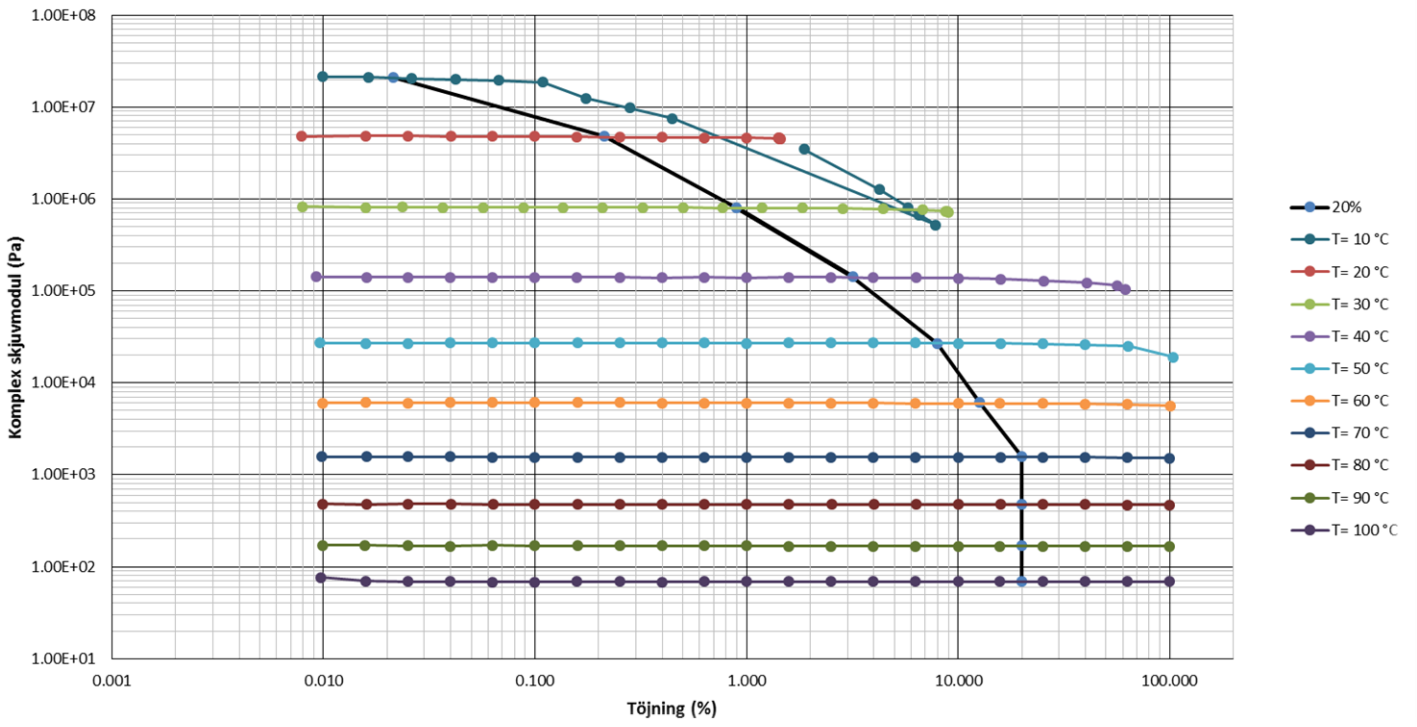
Nr. 3 - PP25



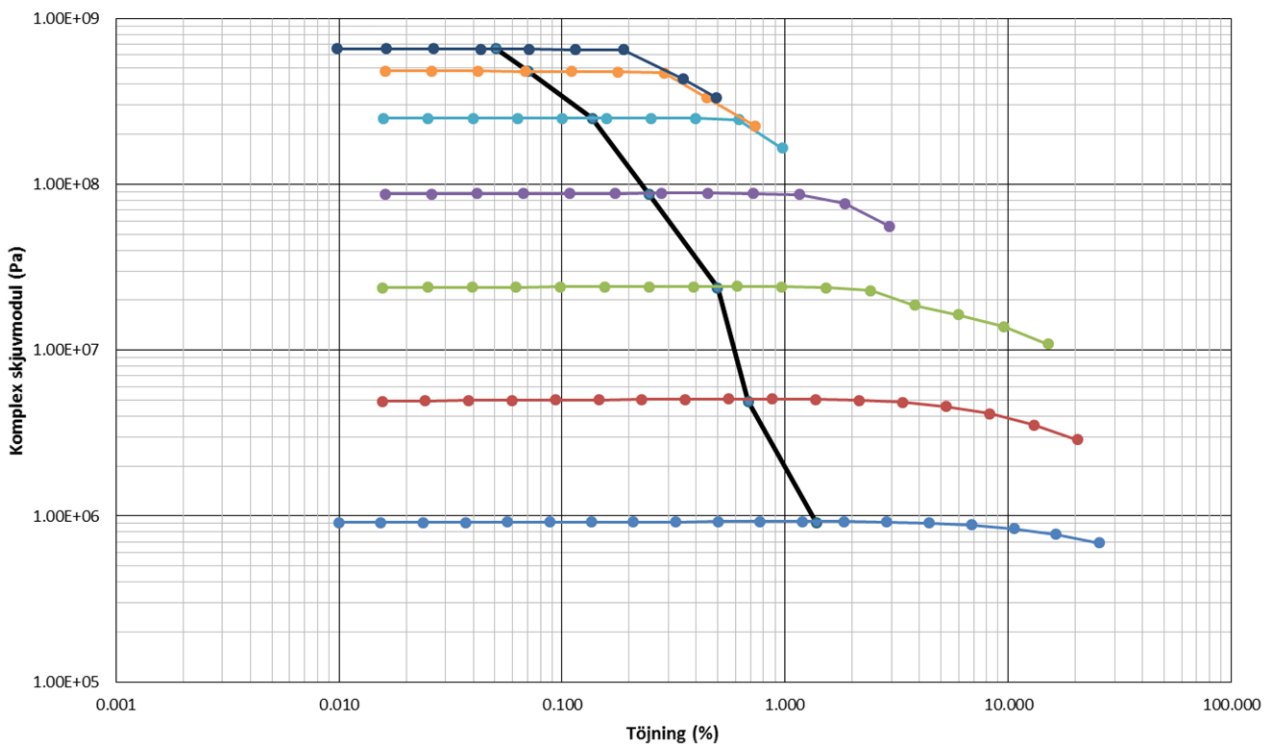
Nr. 3 - PP08



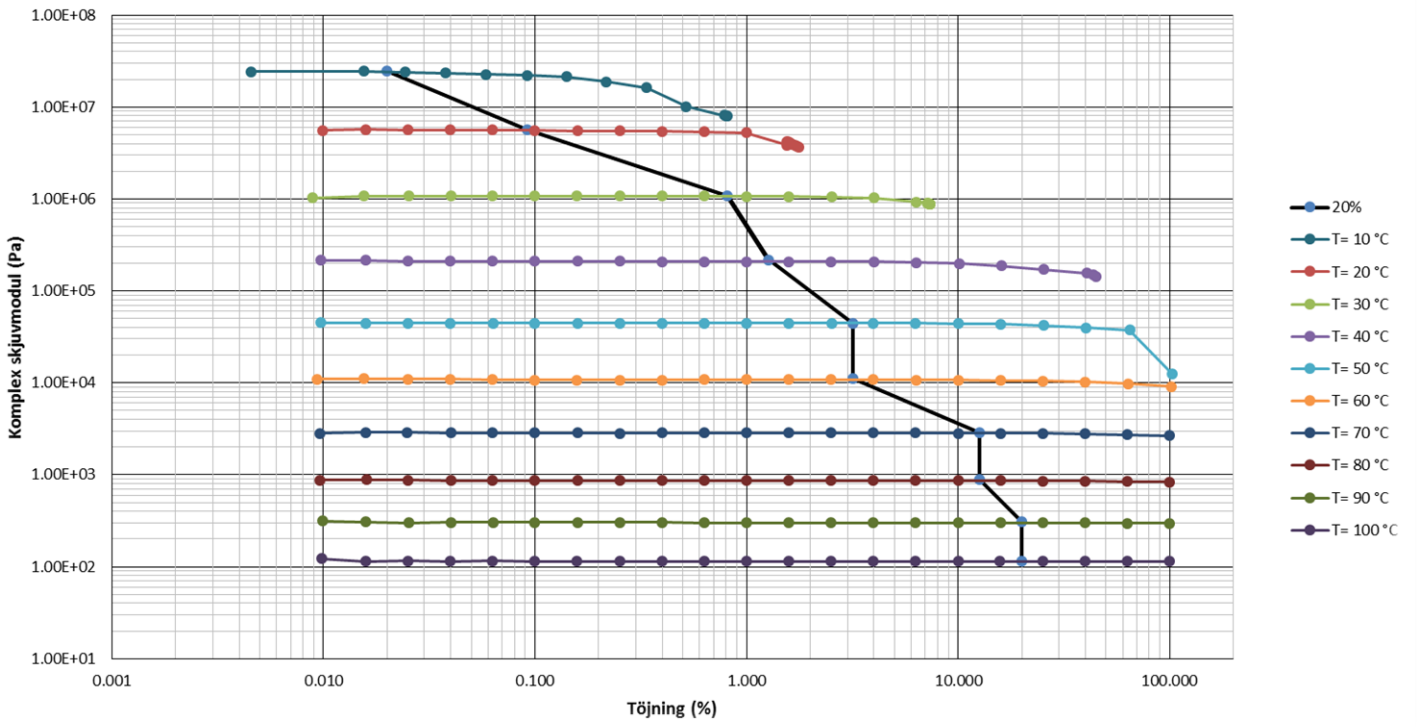
Nr. 4 - PP25



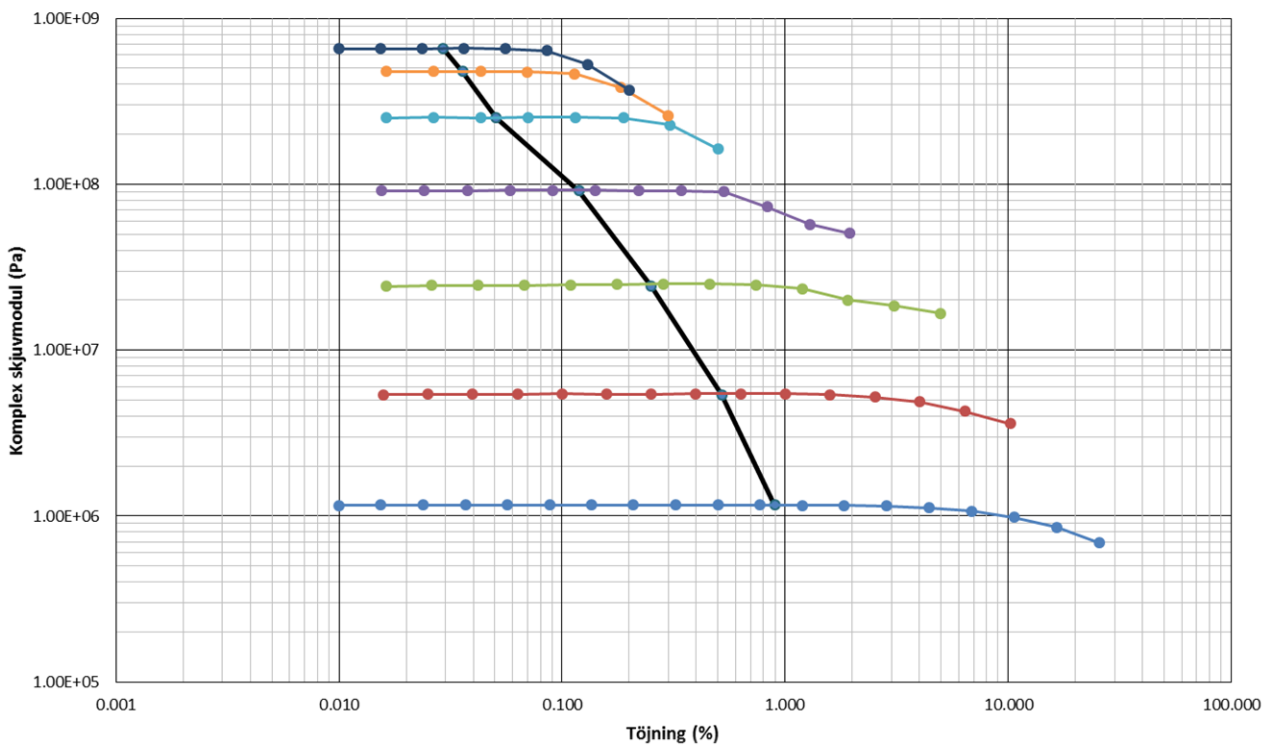
Nr. 4 - PP08



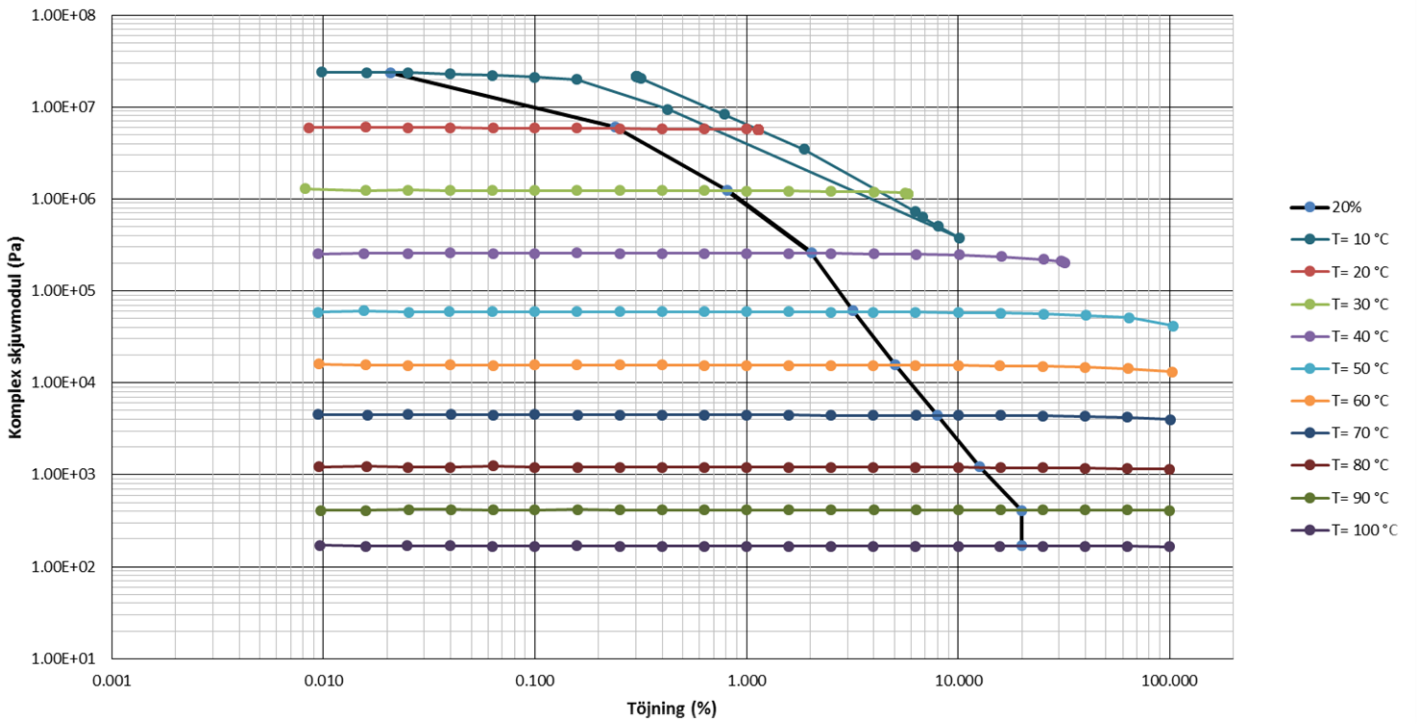
Nr. 5 - PP25



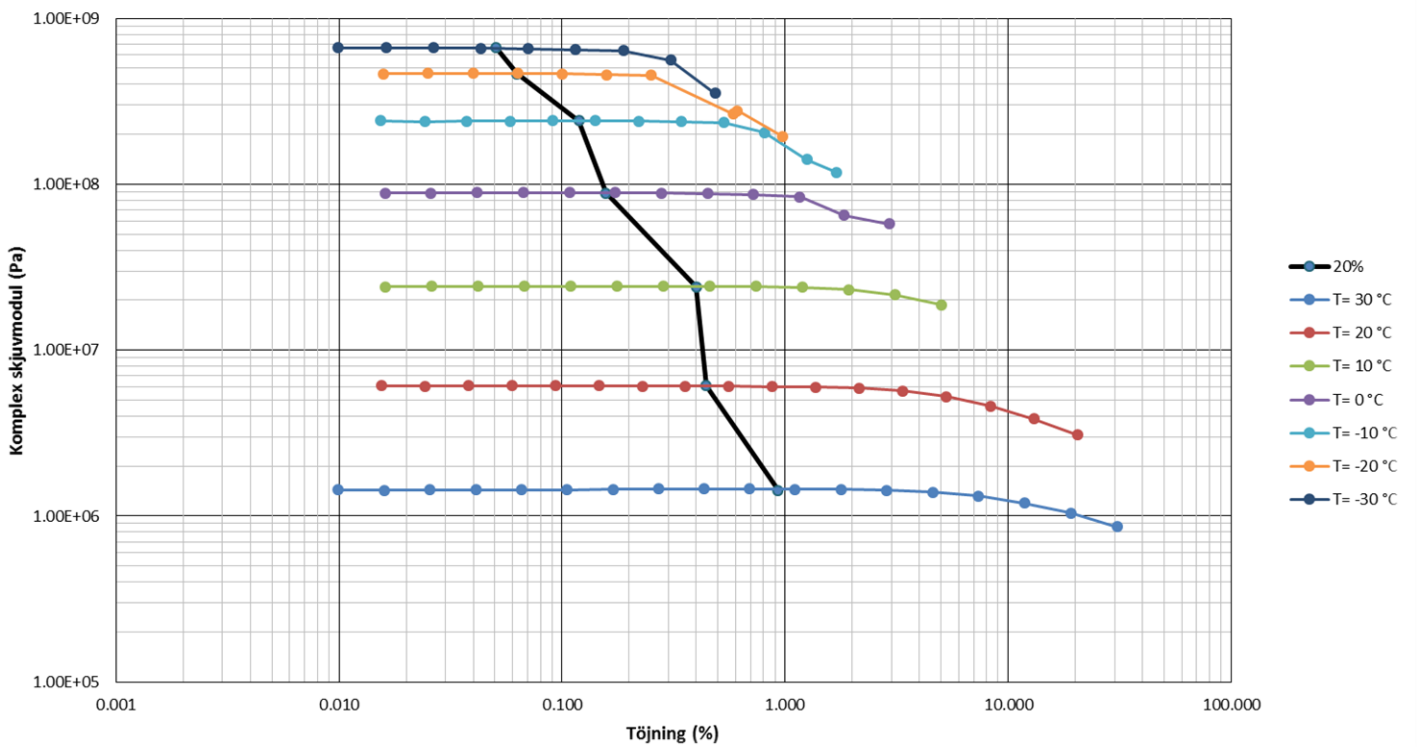
Nr. 5 - PP08



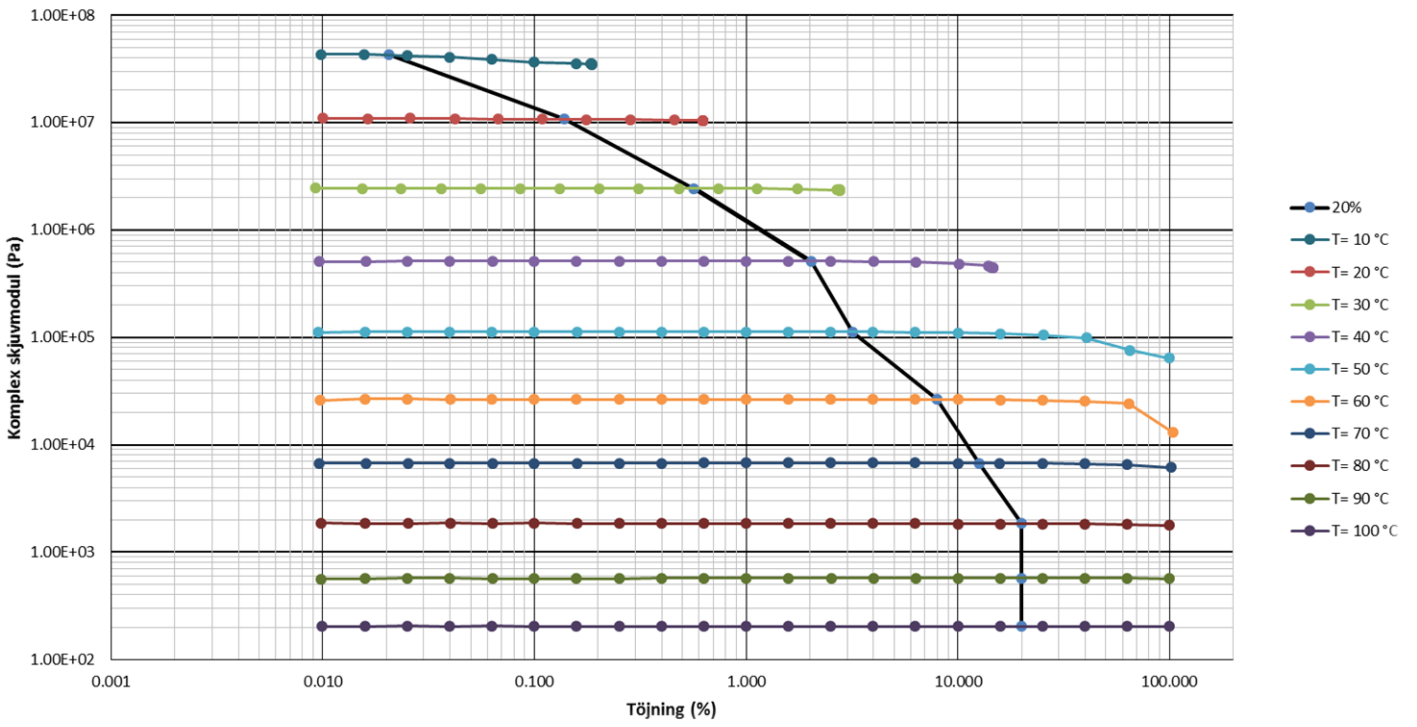
Nr. 6 - PP25



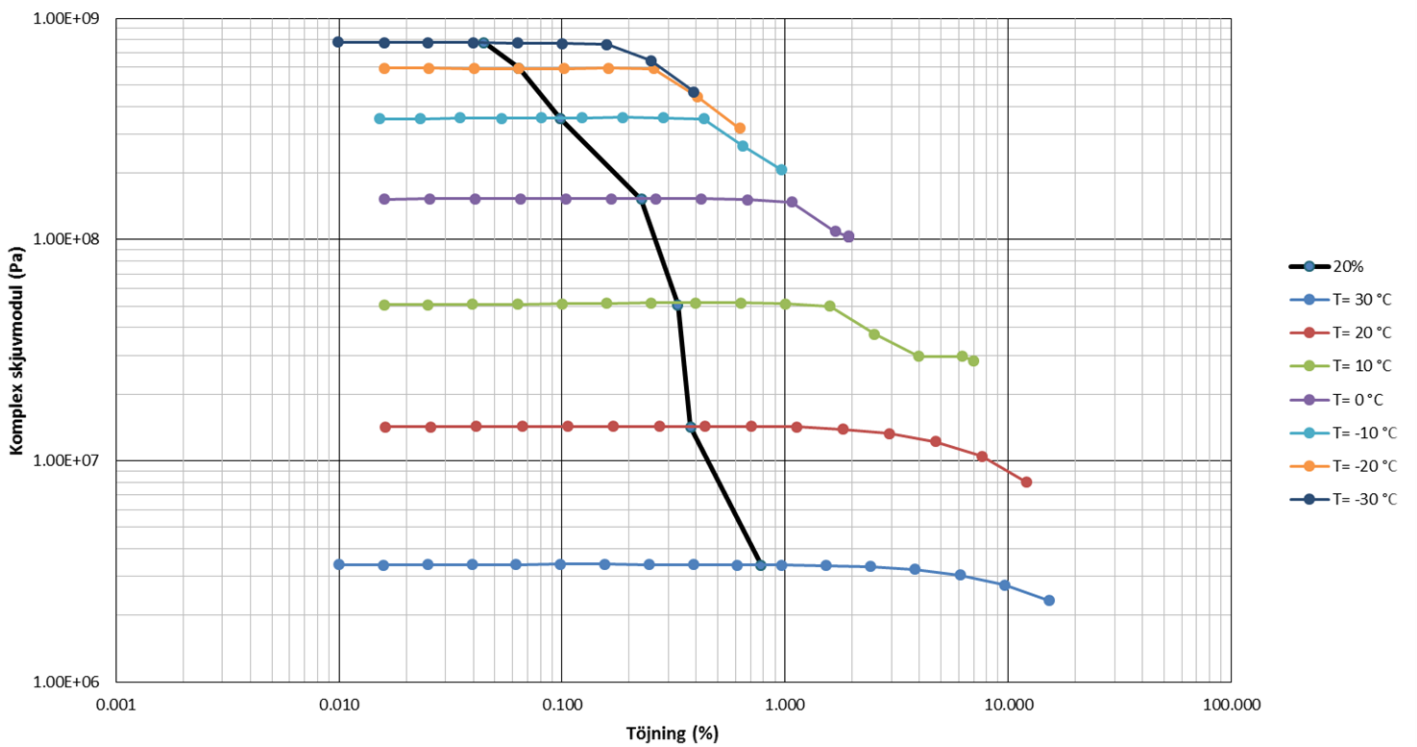
Nr. 6 - PP08



Nr. 7 - PP25

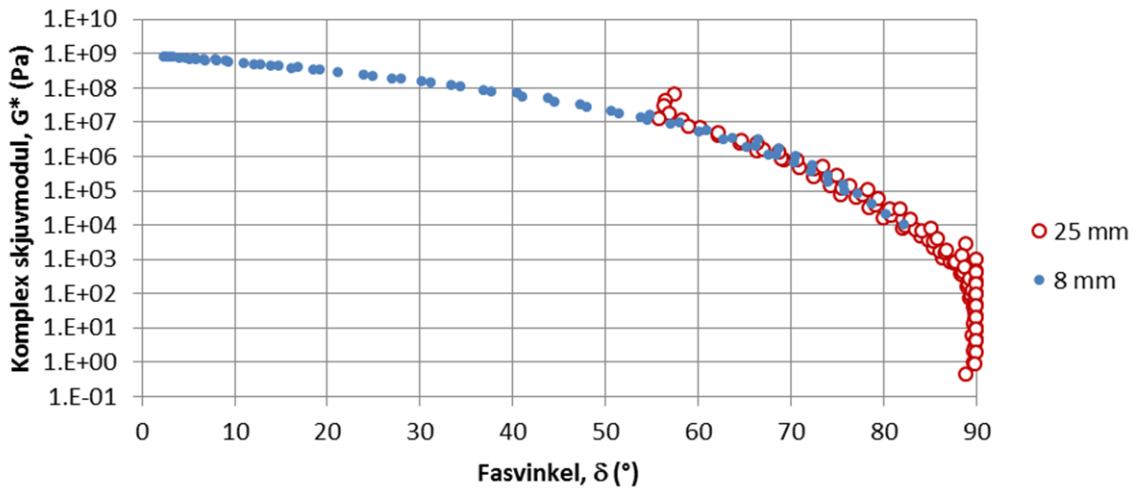


Nr. 7 - PP08

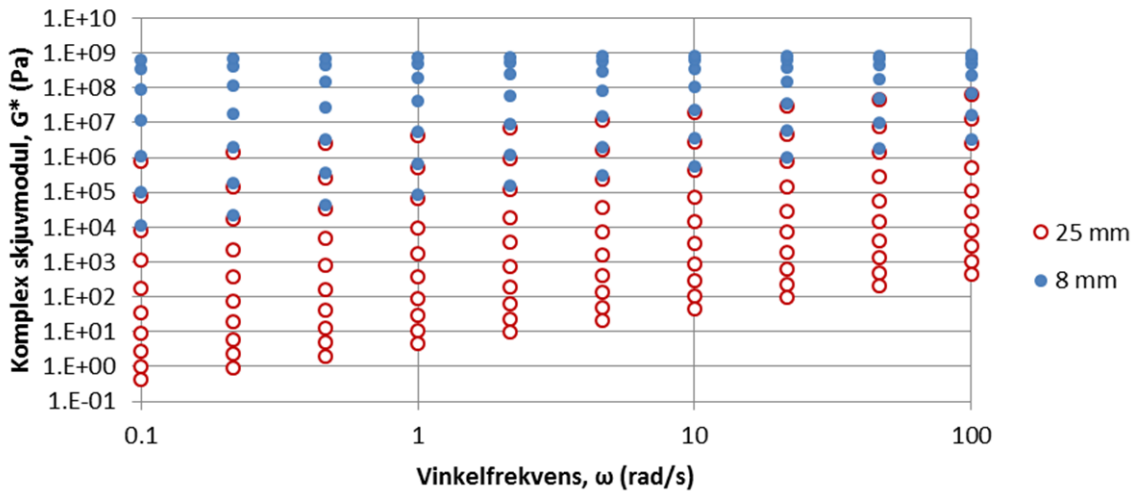


7.3 Bilaga – Frekvenssvep

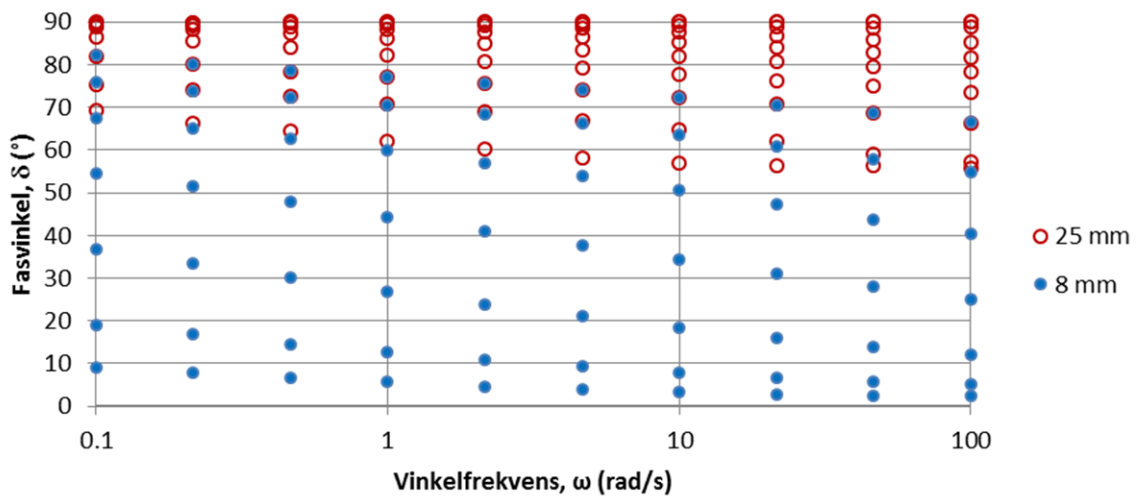
70/100

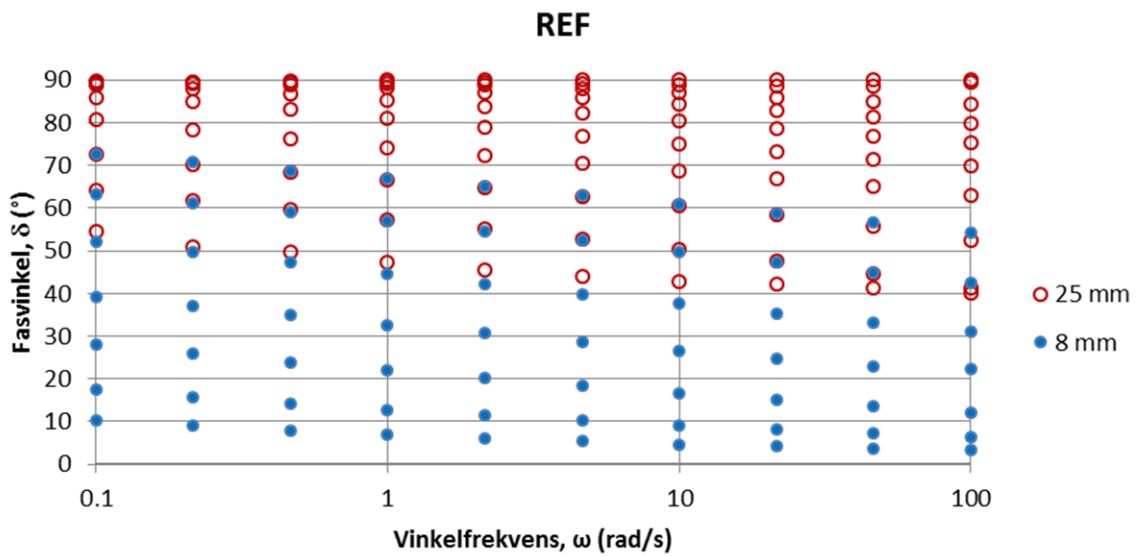
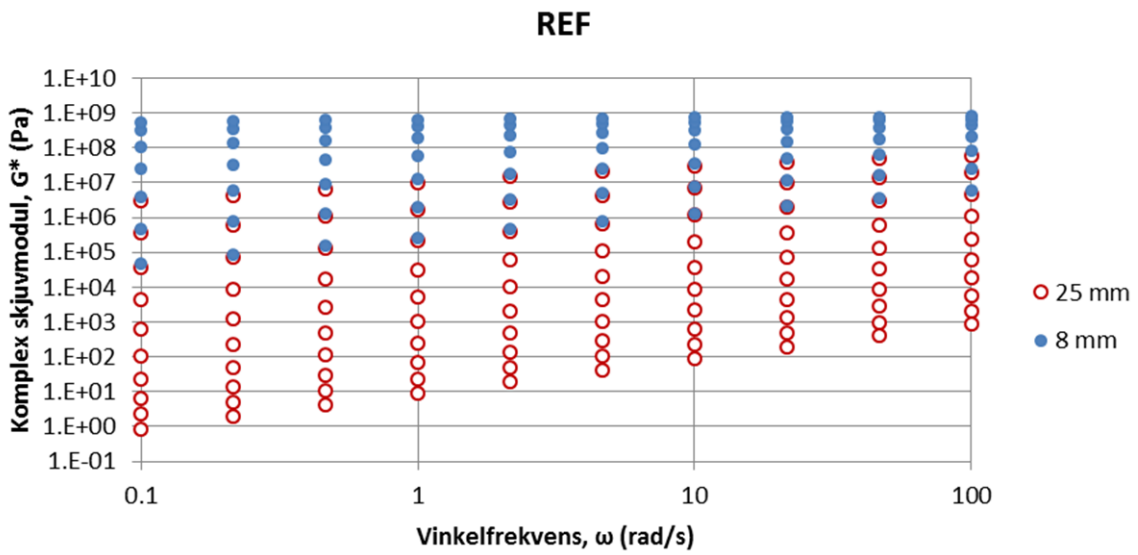
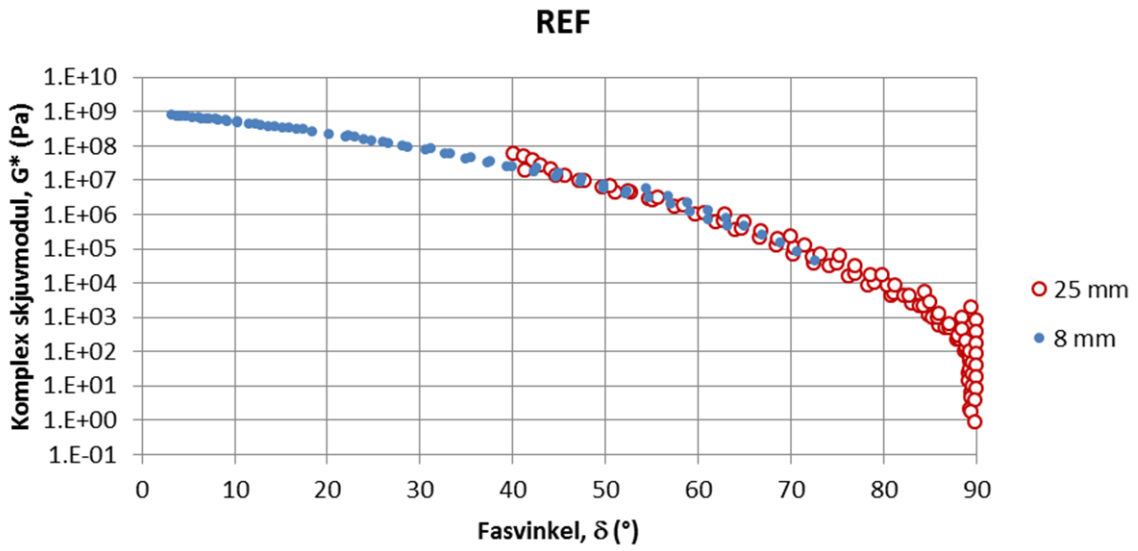


70/100

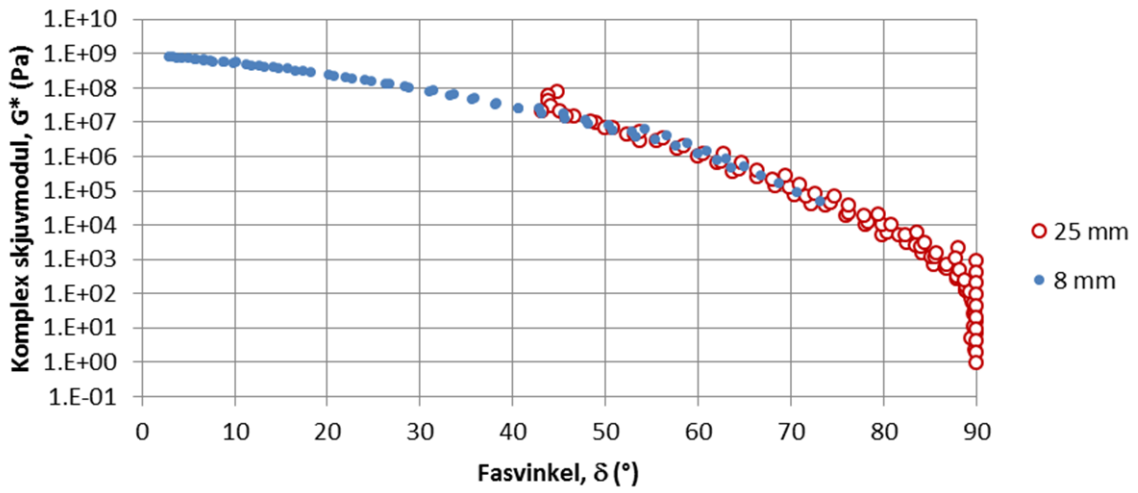


70/100

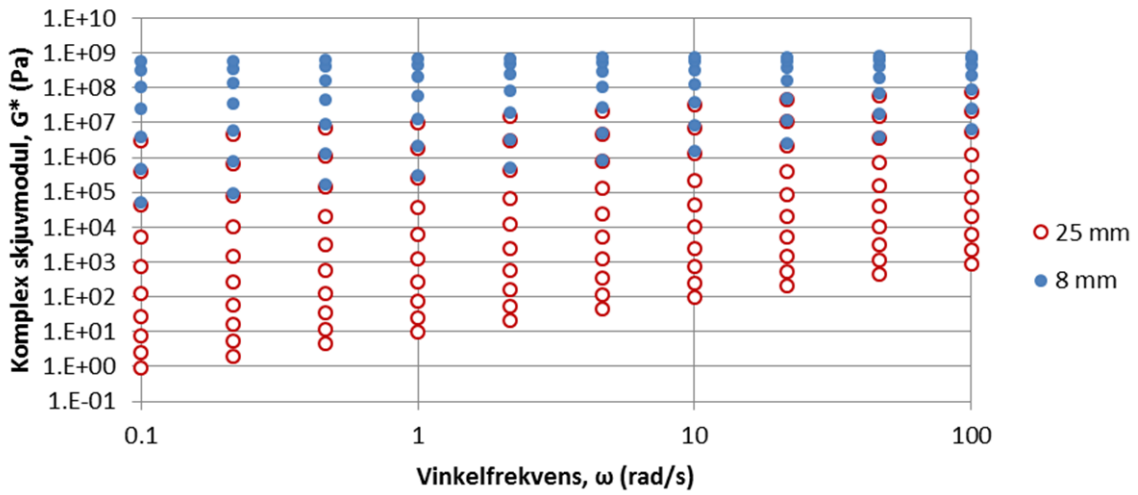




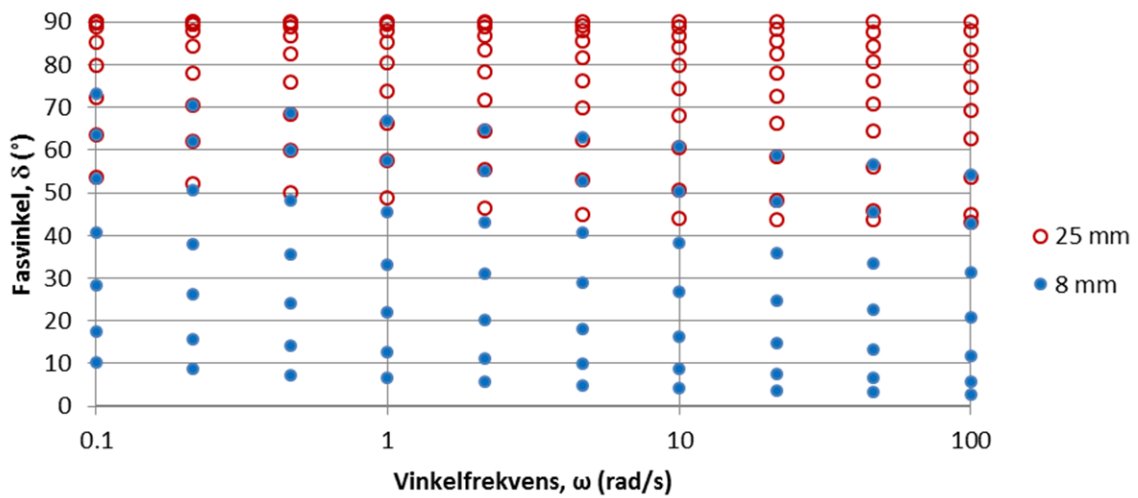
Nr. 1



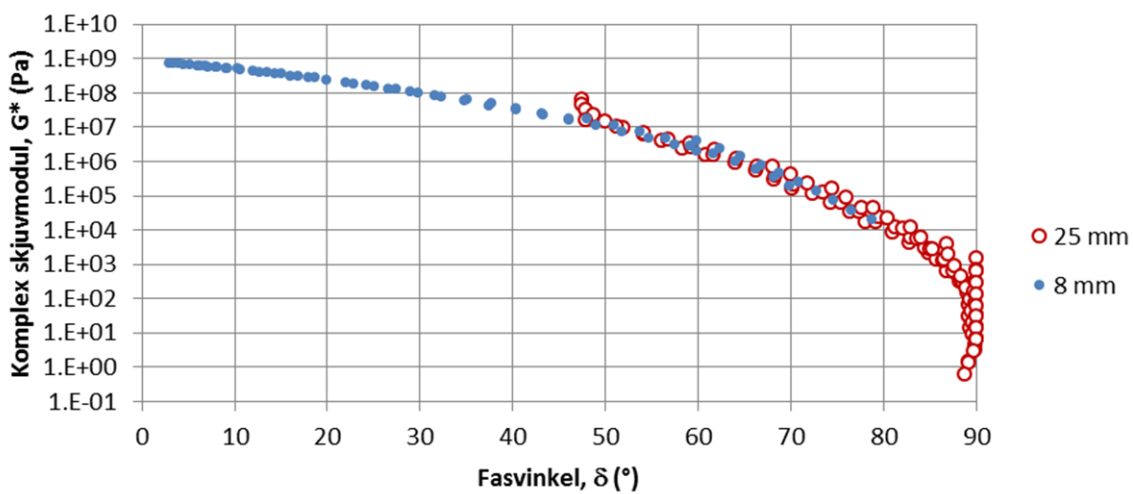
Nr. 1



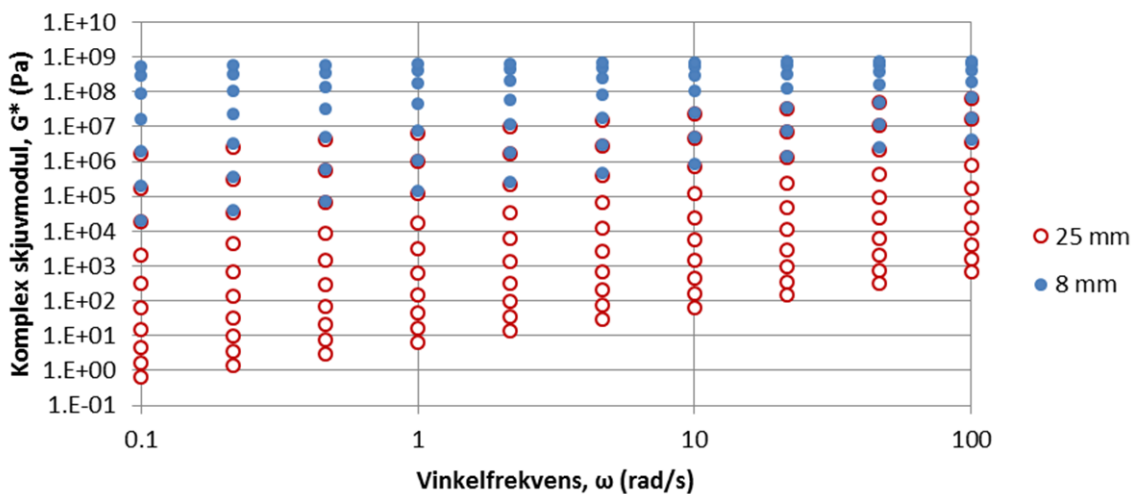
Nr. 1



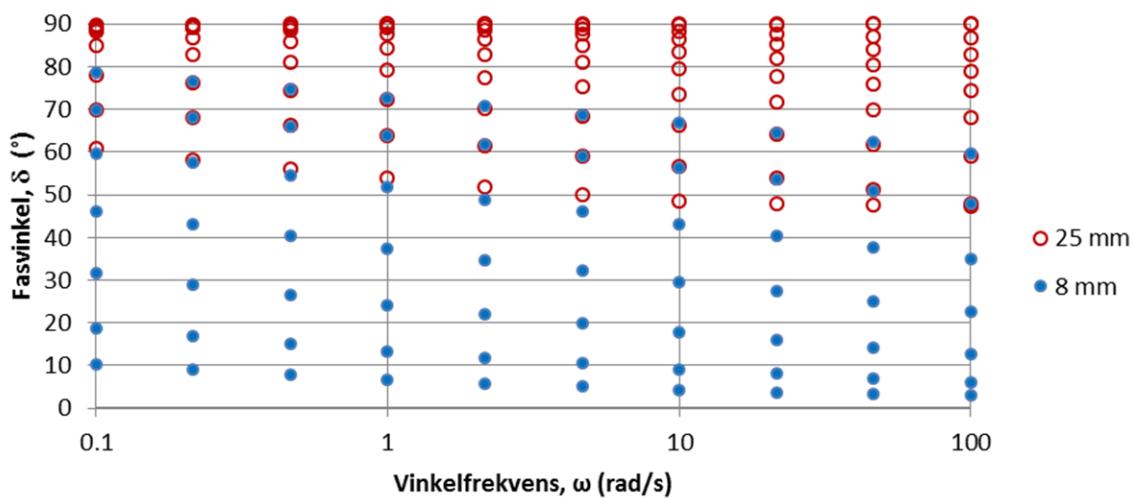
Nr. 2



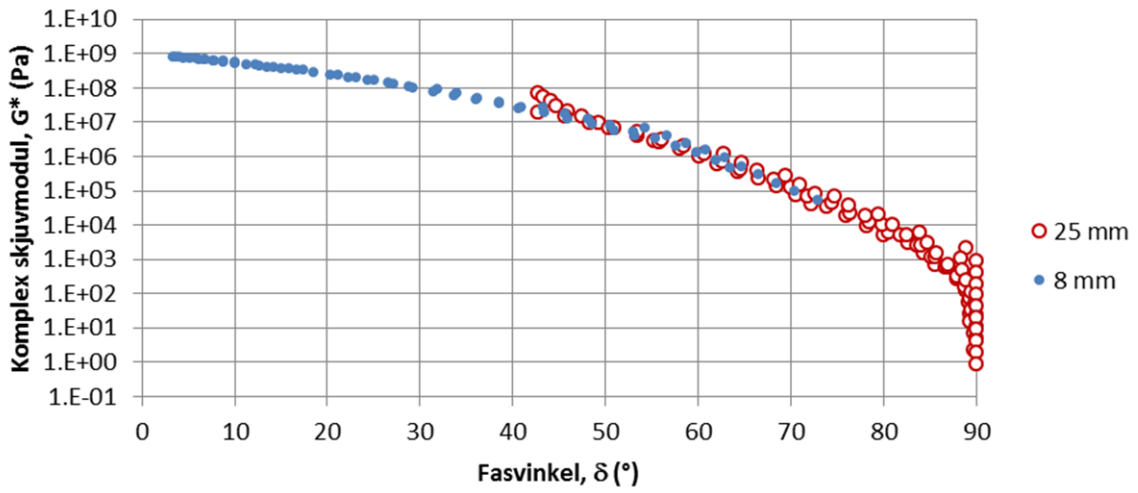
Nr. 2



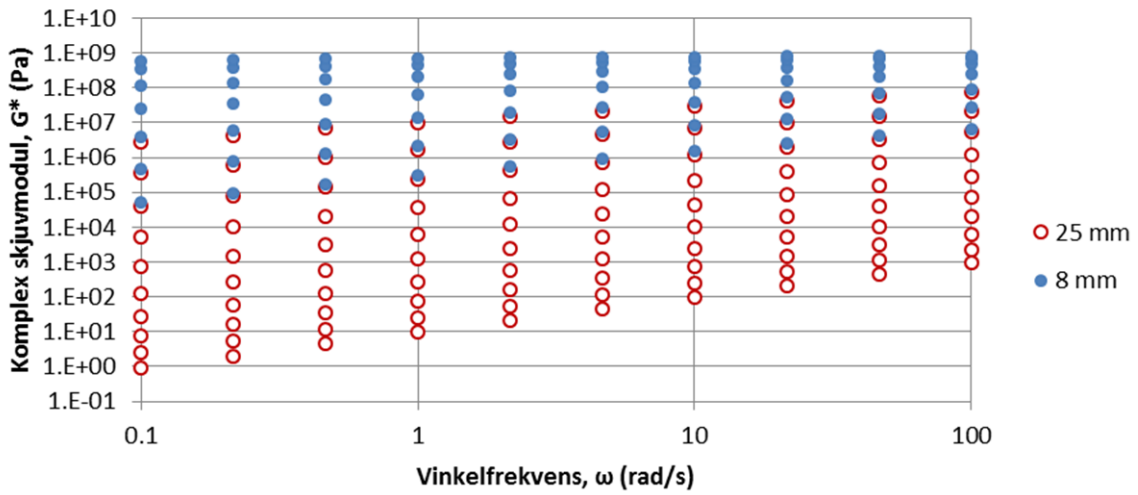
Nr. 2



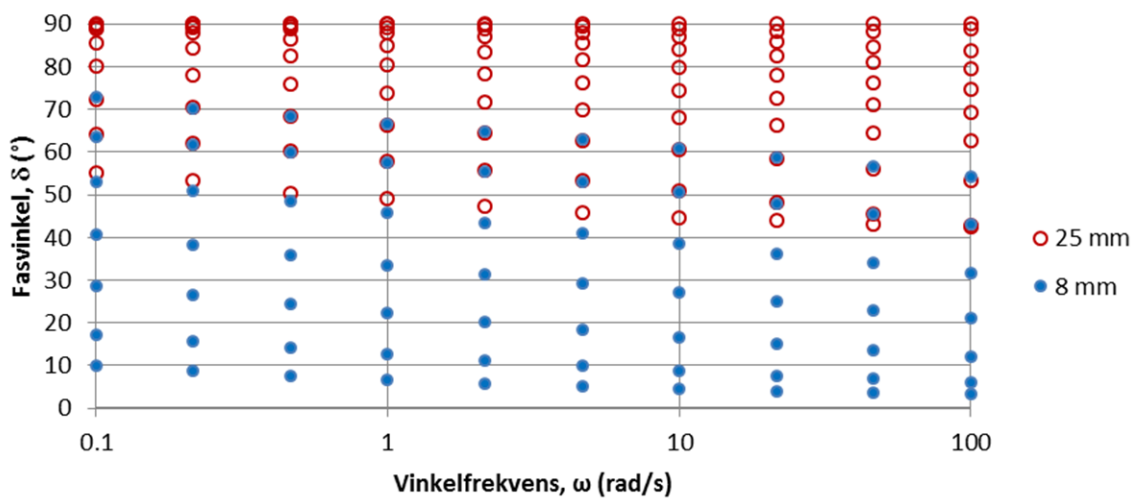
Nr. 3



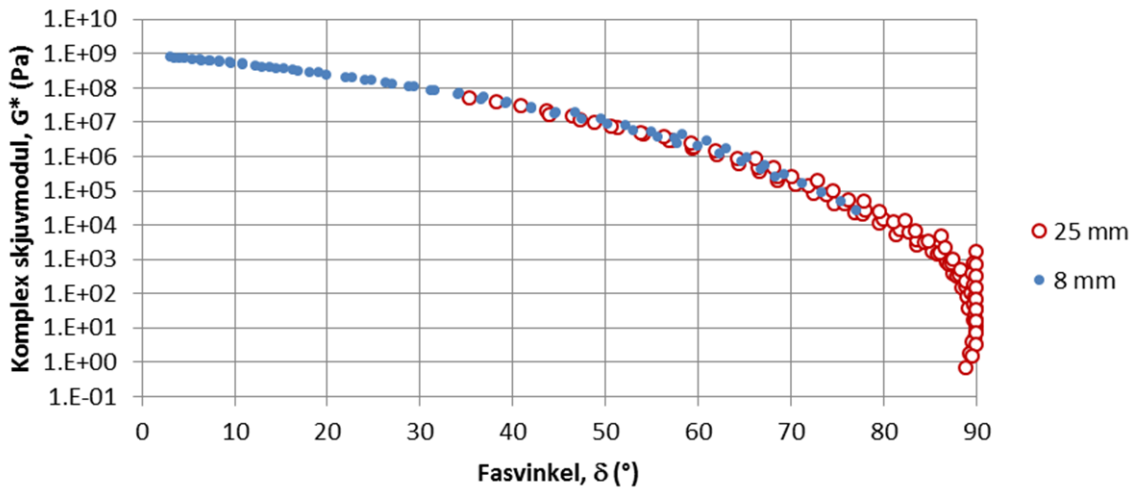
Nr. 3



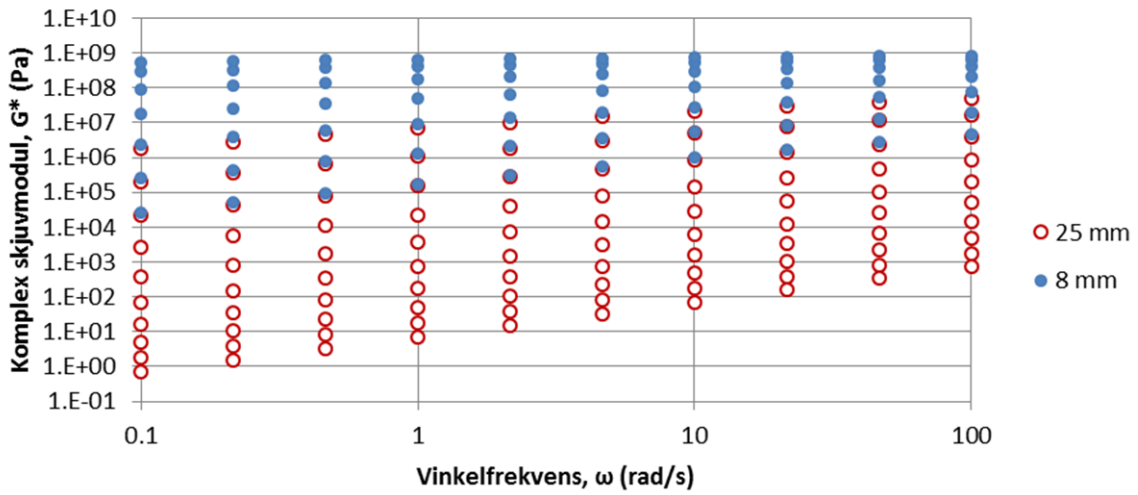
Nr. 3



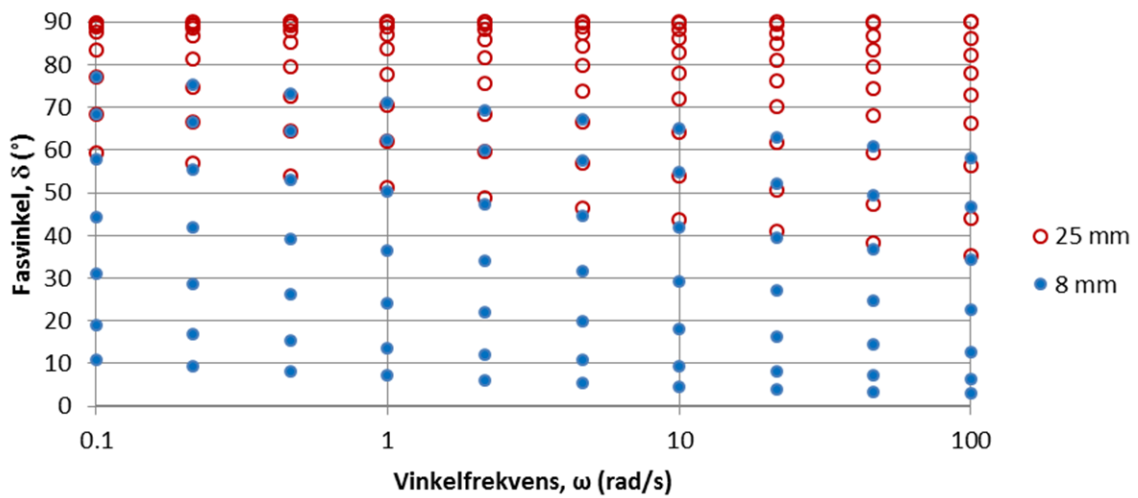
Nr. 4



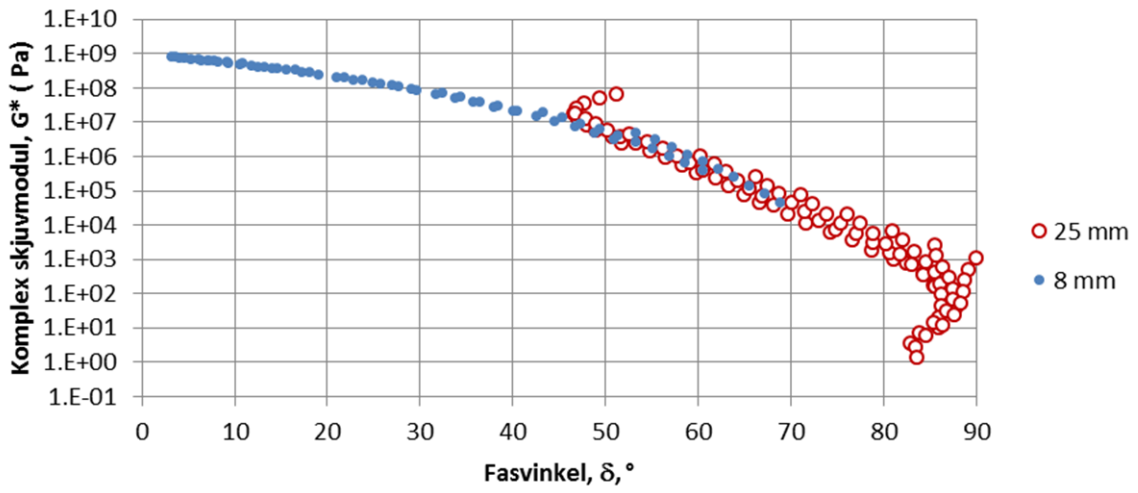
Nr. 4



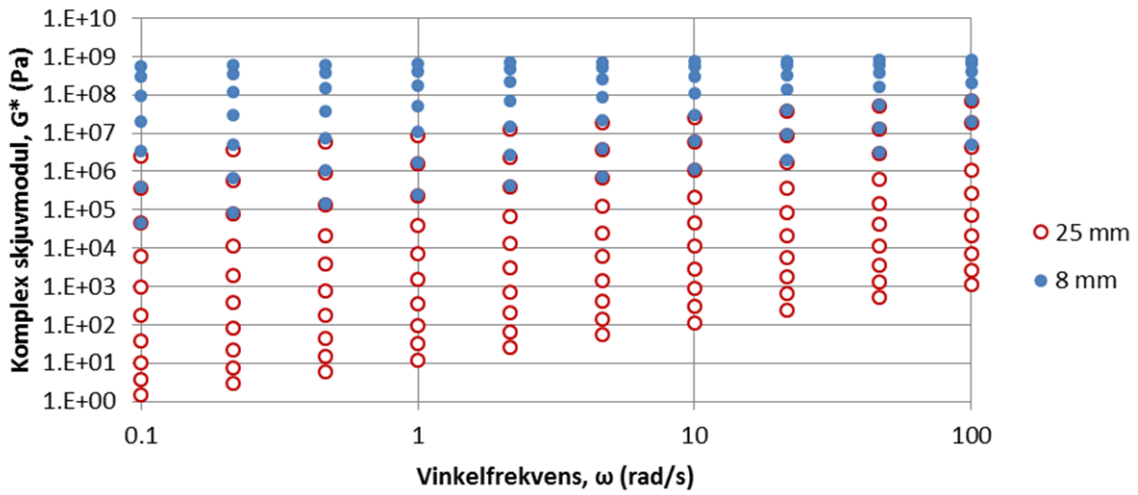
Nr. 4



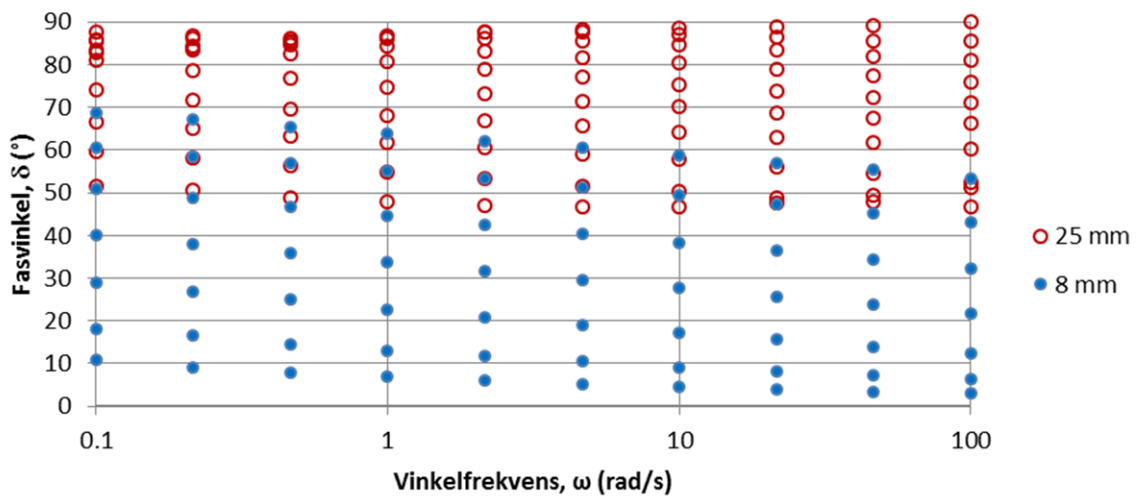
Nr. 5



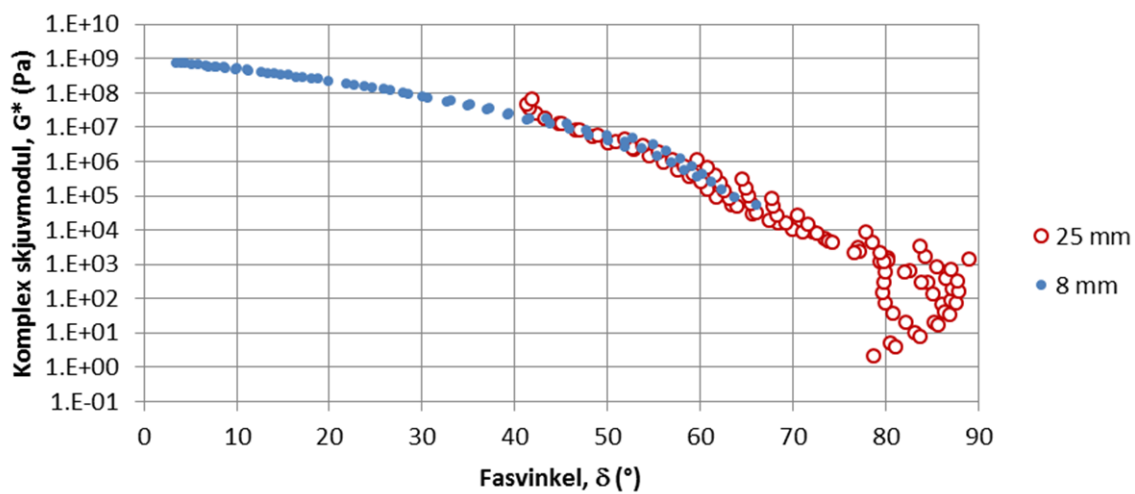
Nr. 5



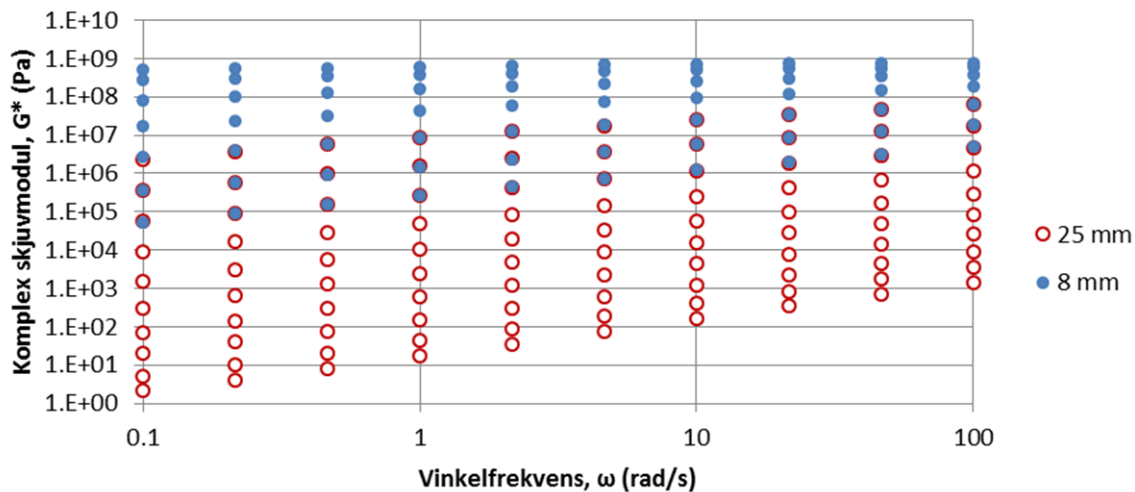
Nr. 5



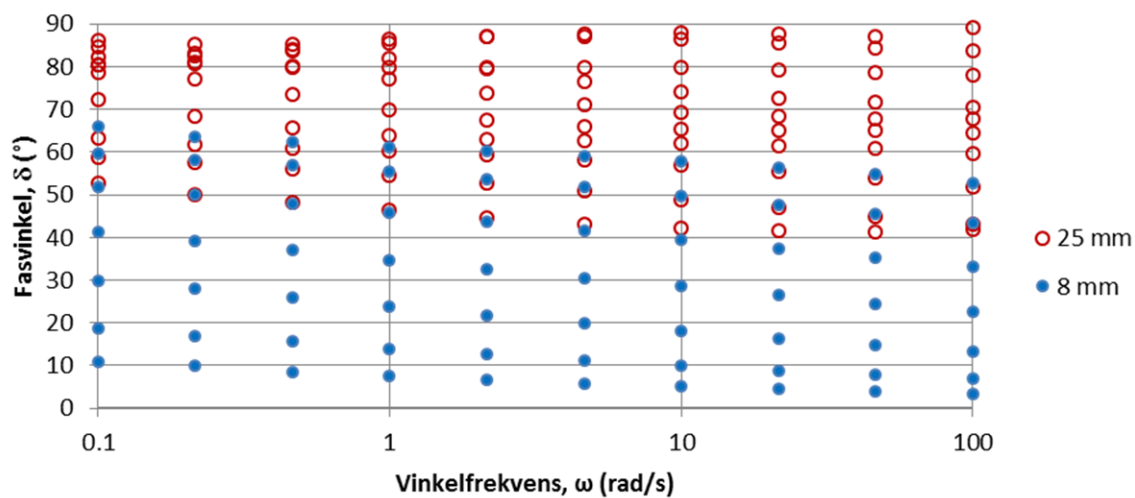
Nr. 6



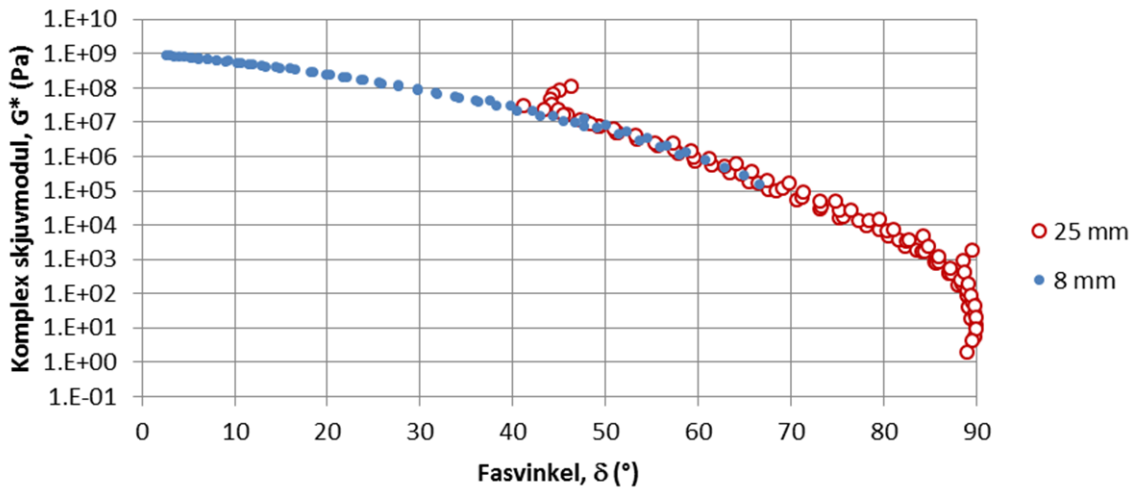
Nr. 6



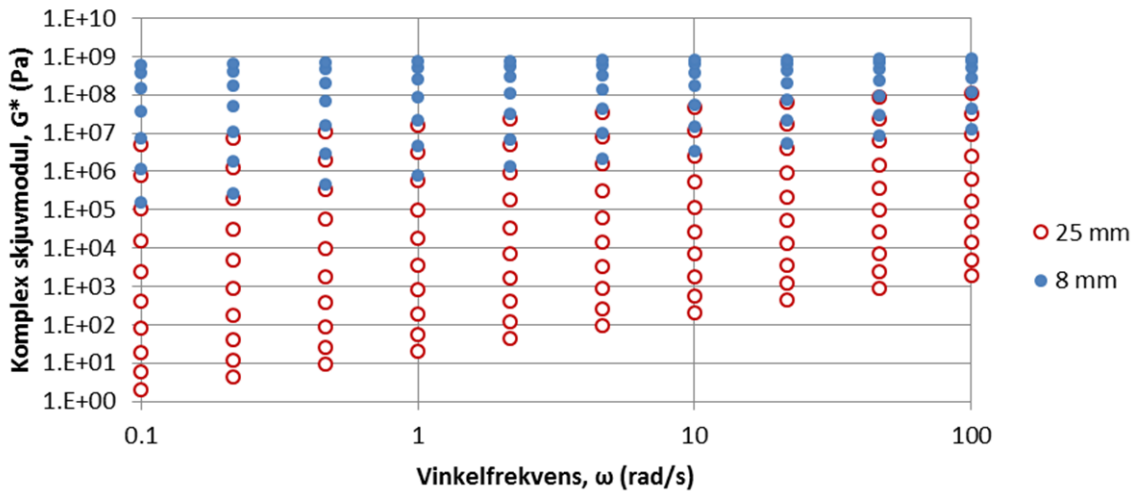
Nr. 6



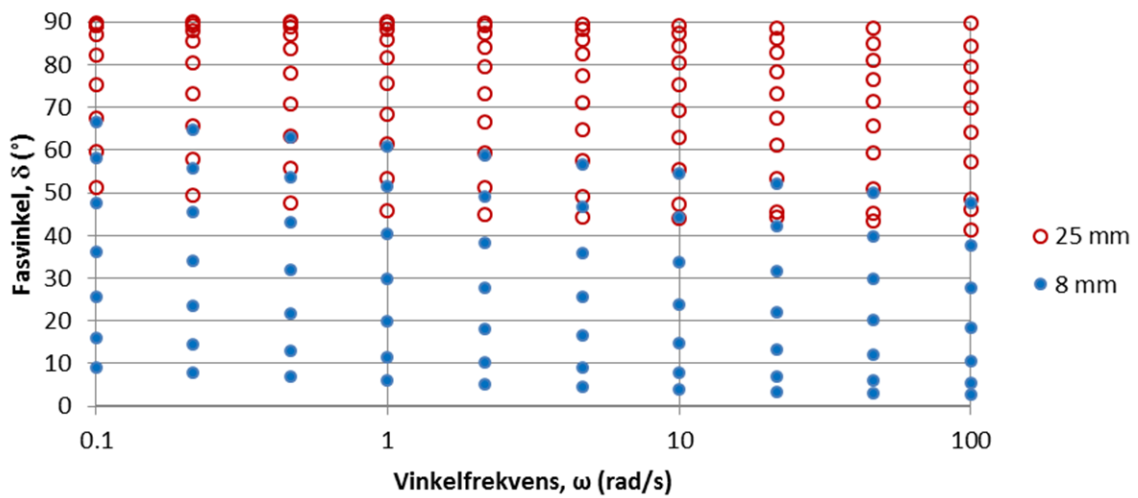
Nr. 7



Nr. 7

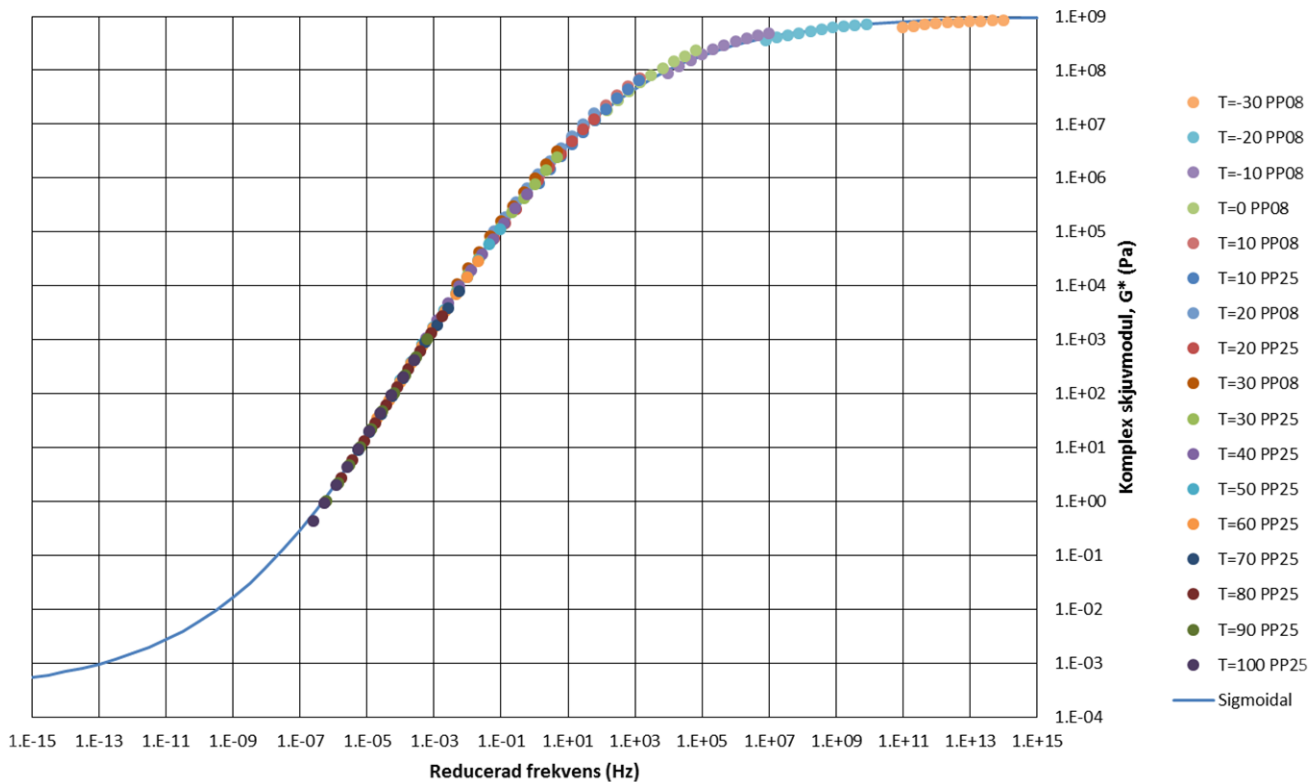


Nr. 7

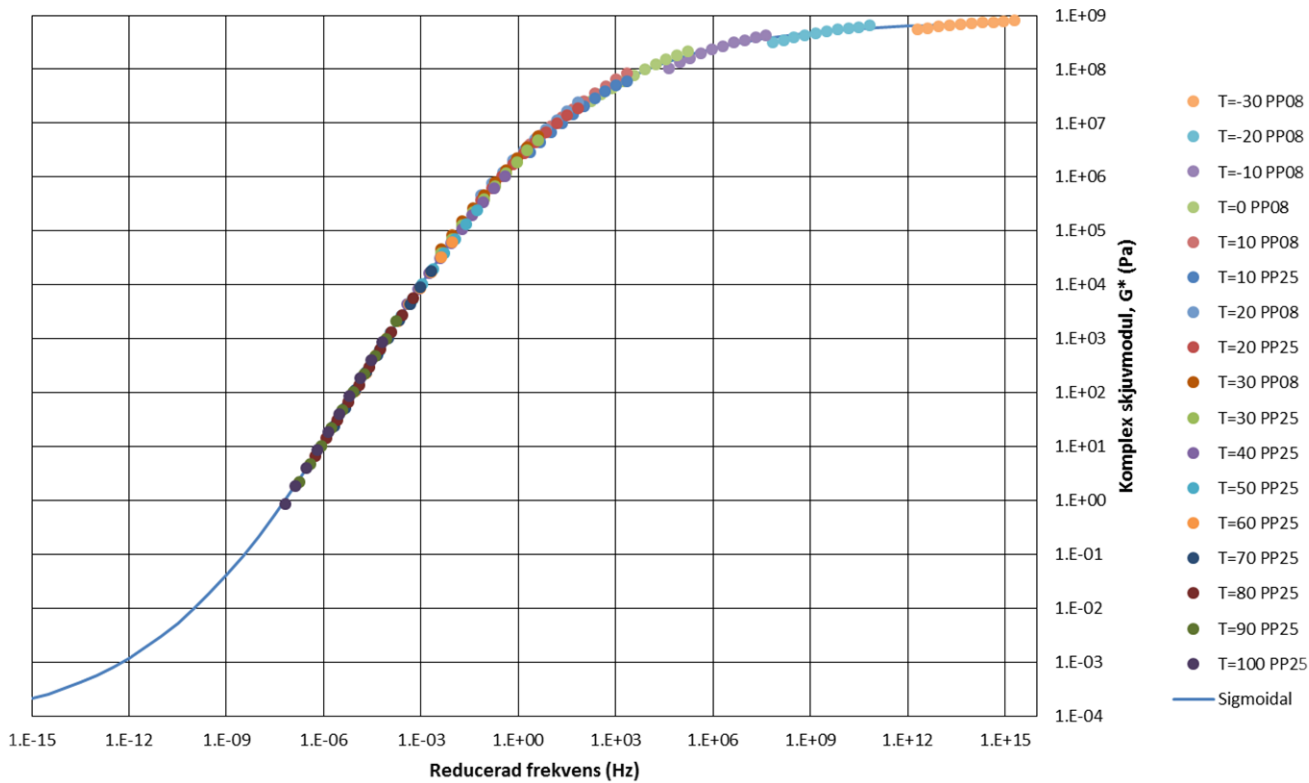


7.4 Bilaga – Masterkruvor

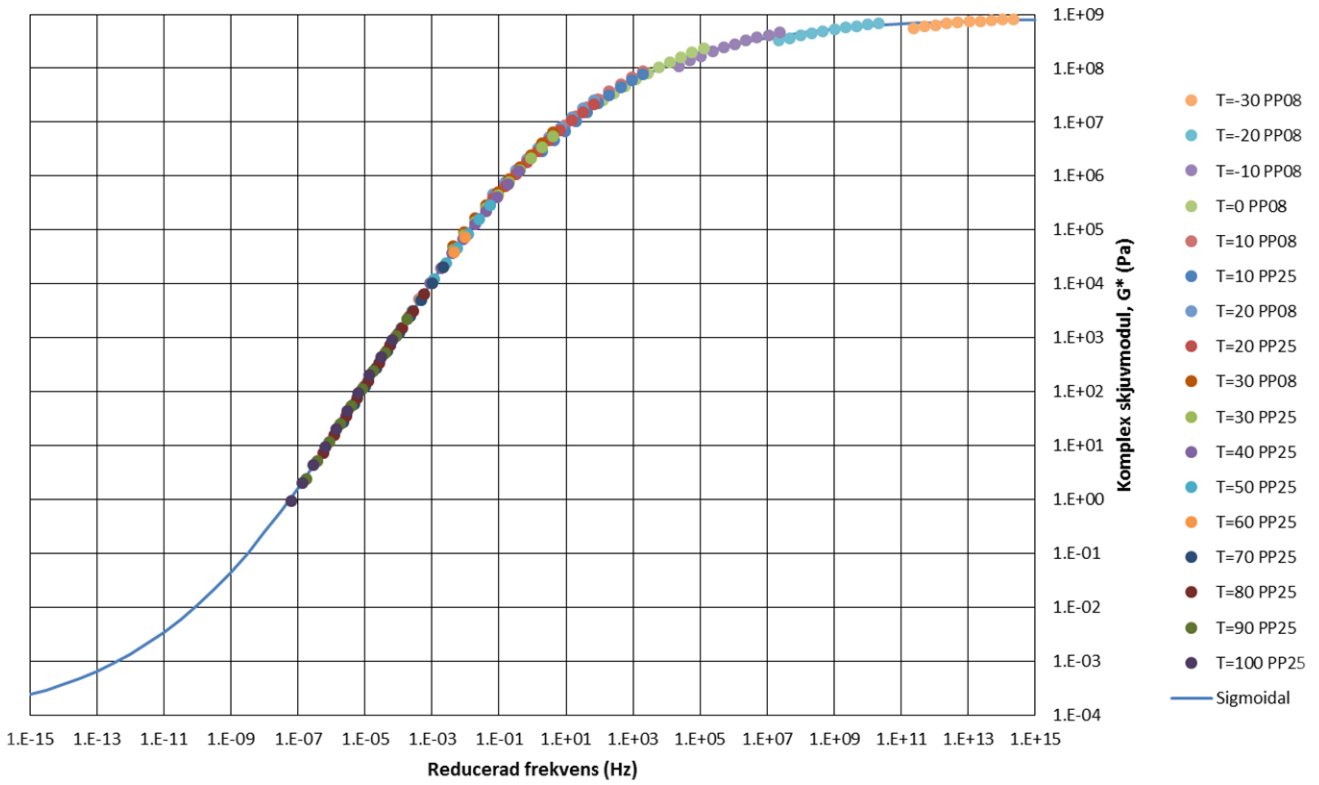
70/100



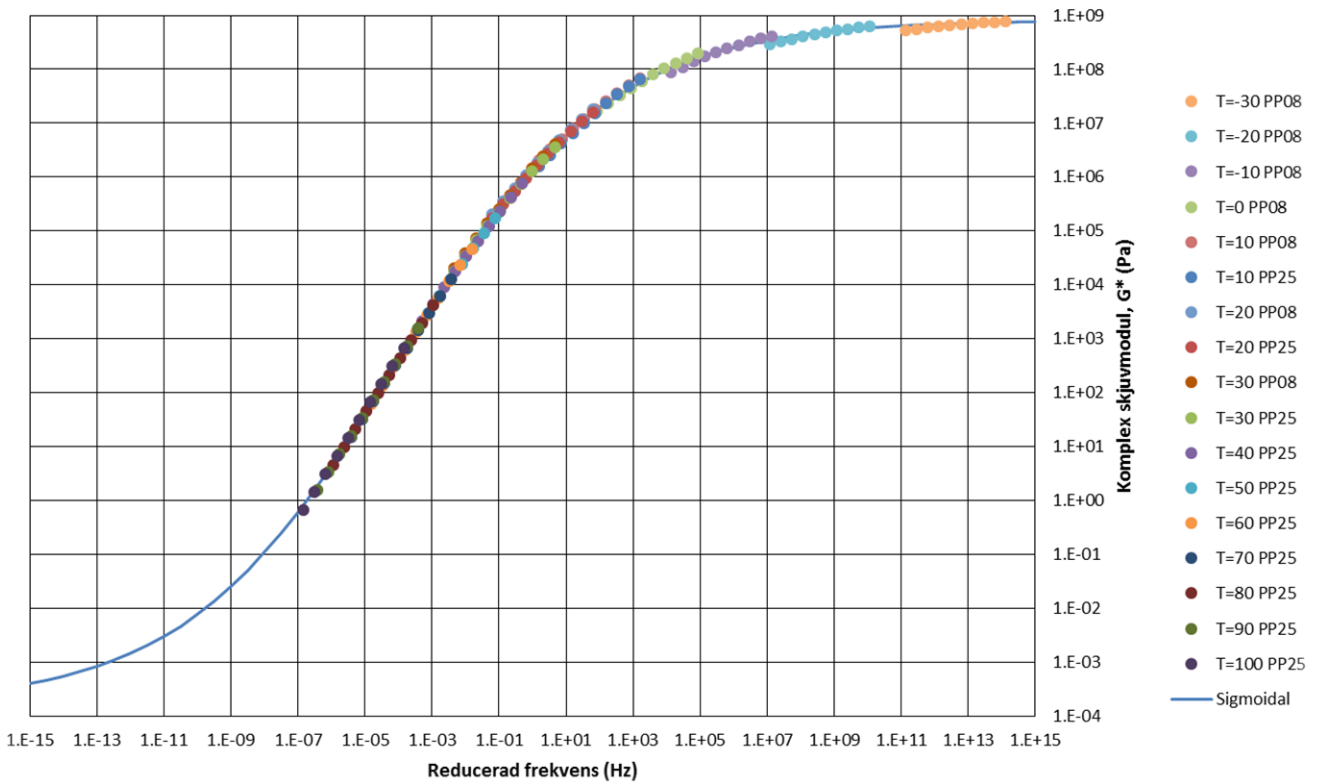
REF



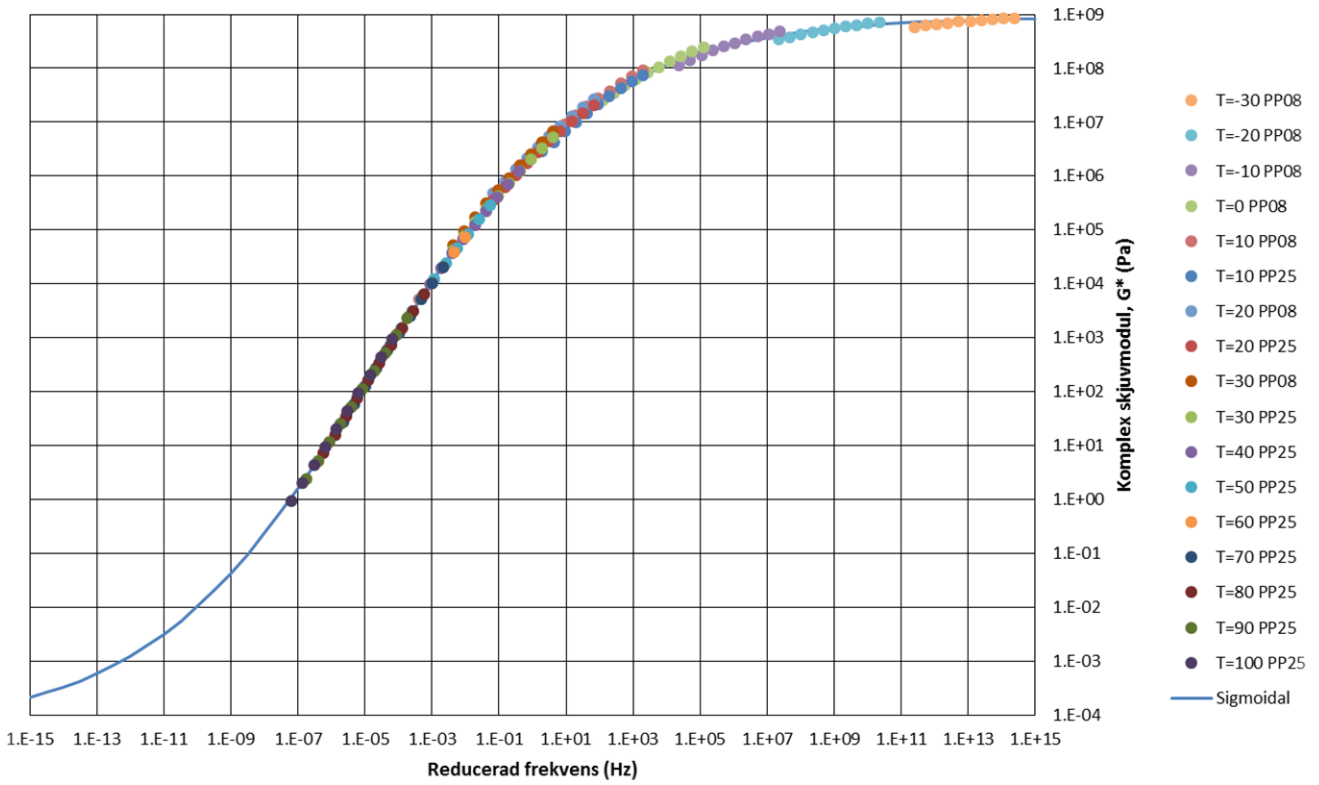
Nr. 1



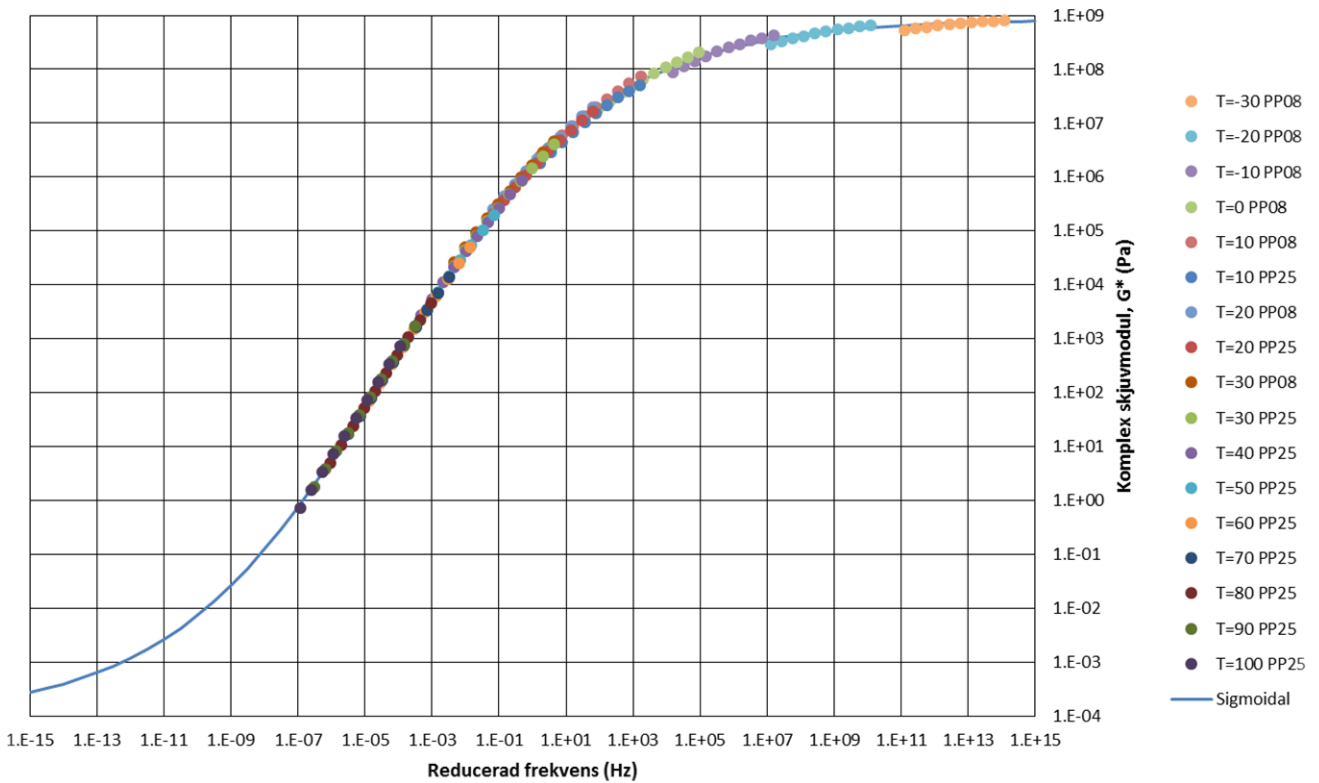
Nr. 2



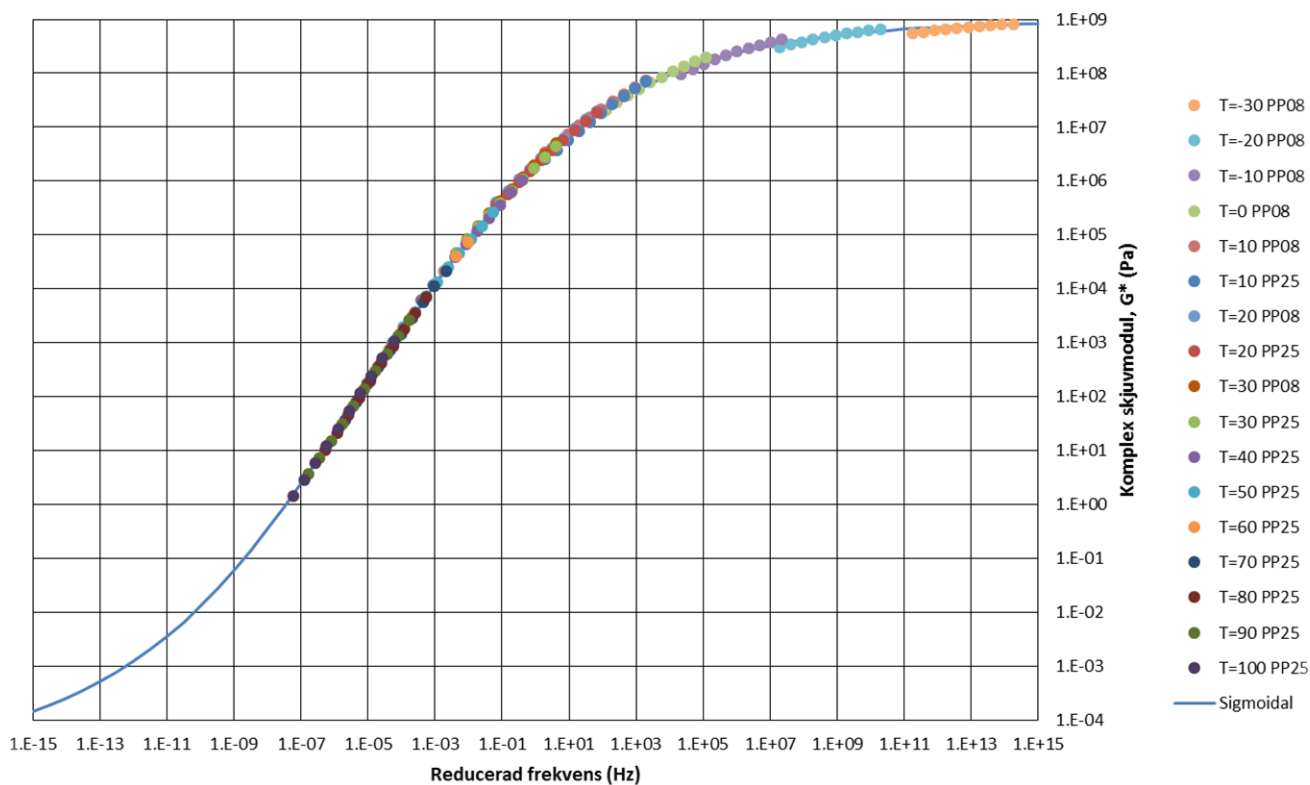
Nr. 3



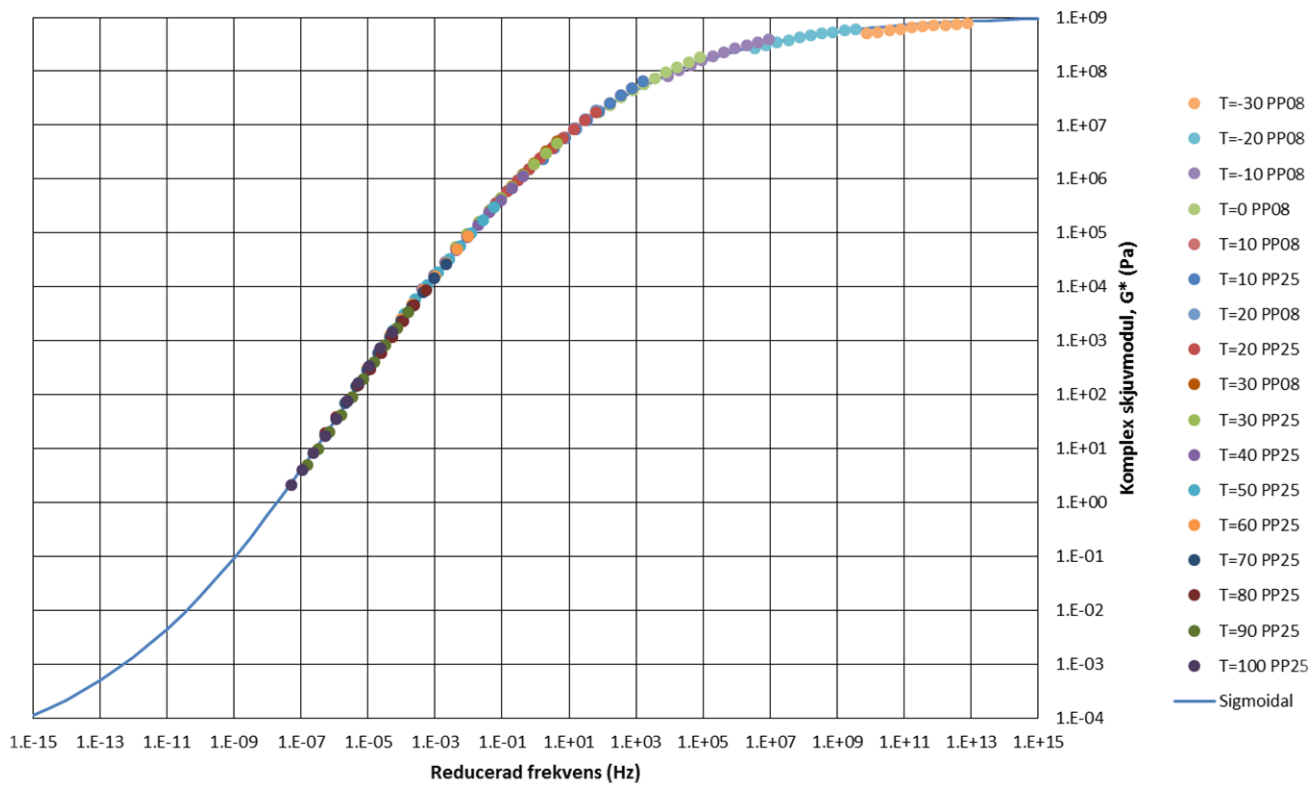
Nr. 4



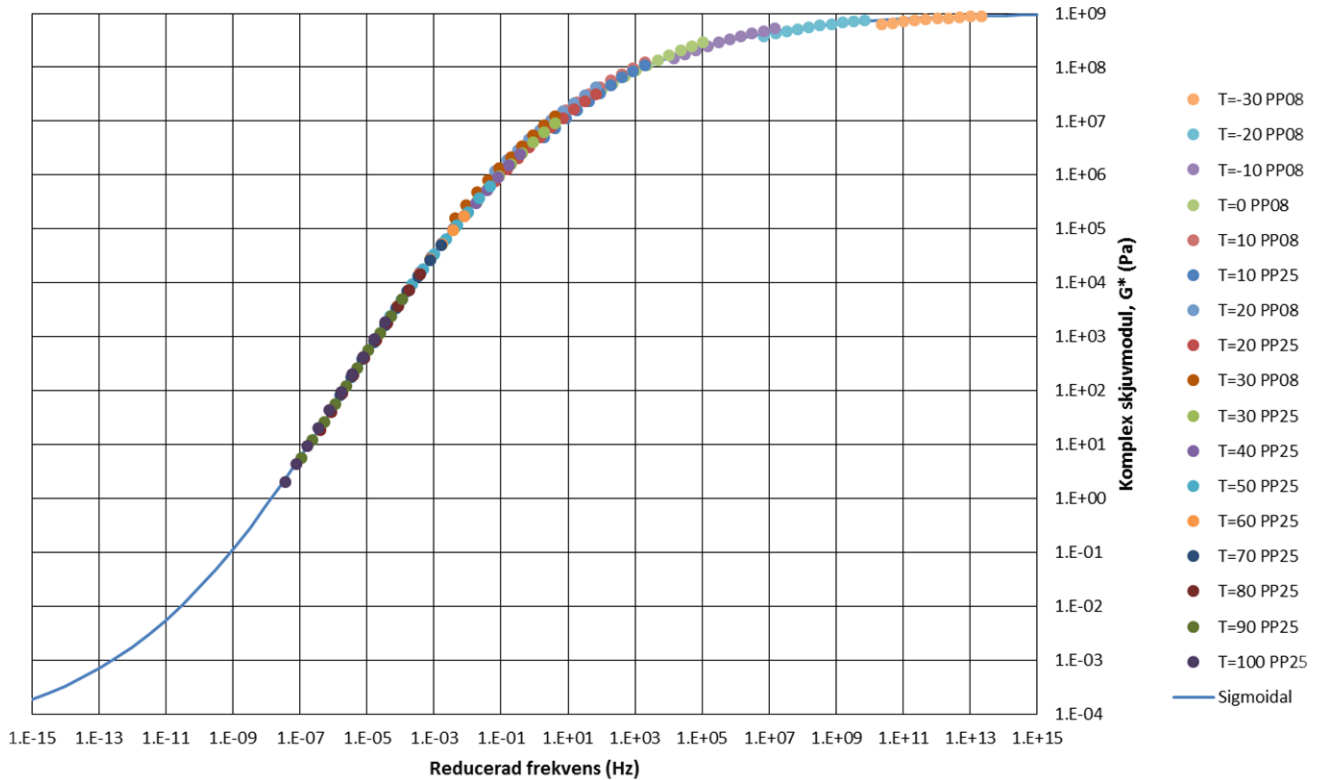
Nr. 5



Nr. 6



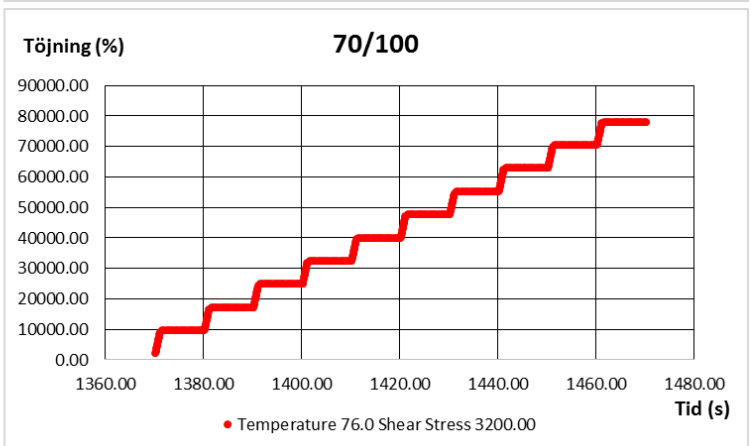
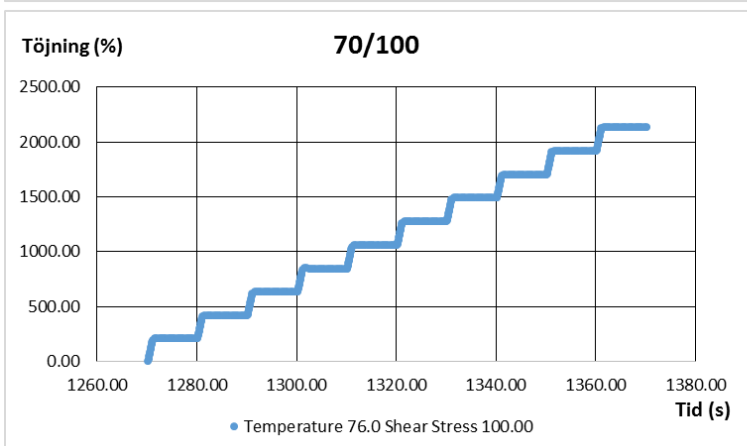
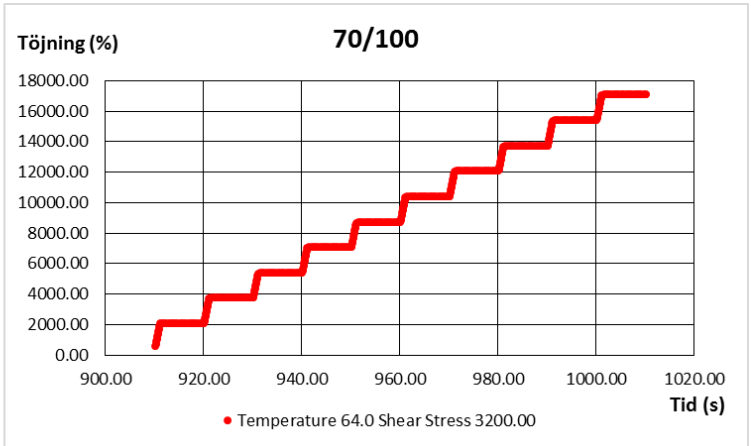
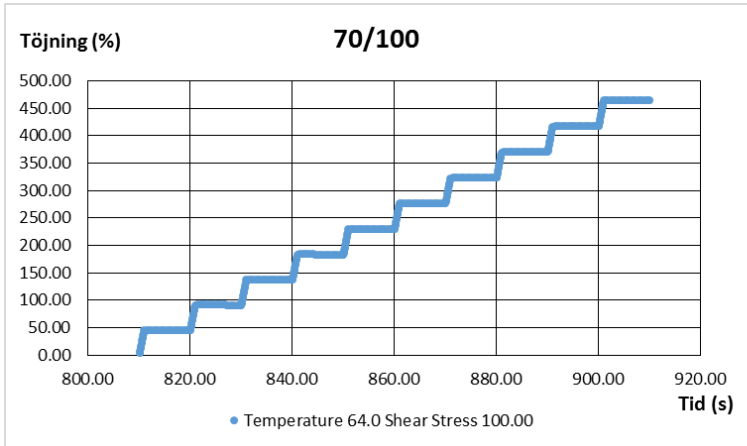
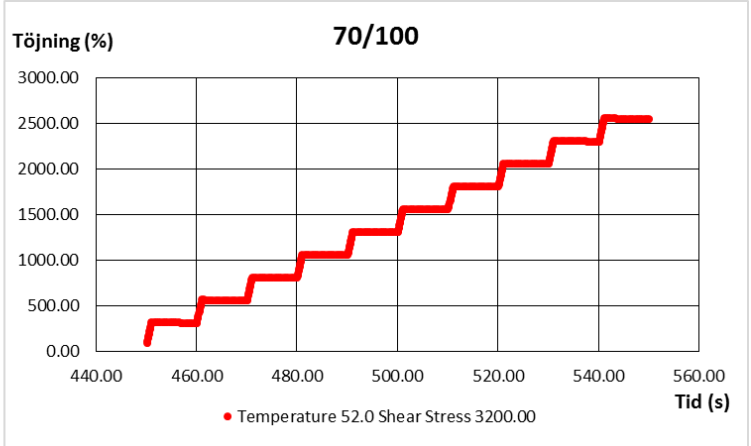
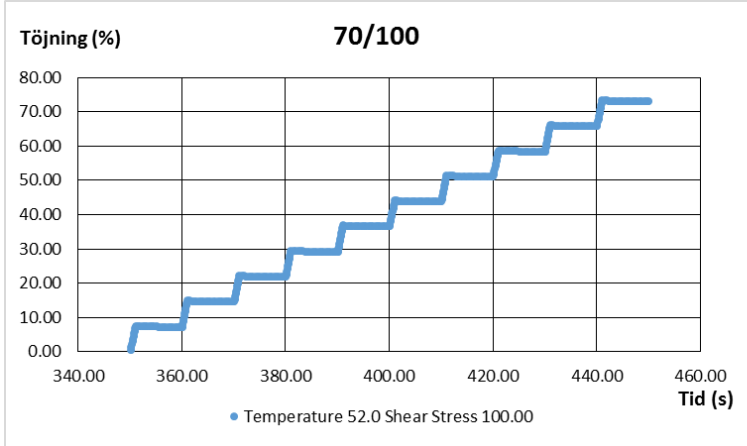
Nr. 7

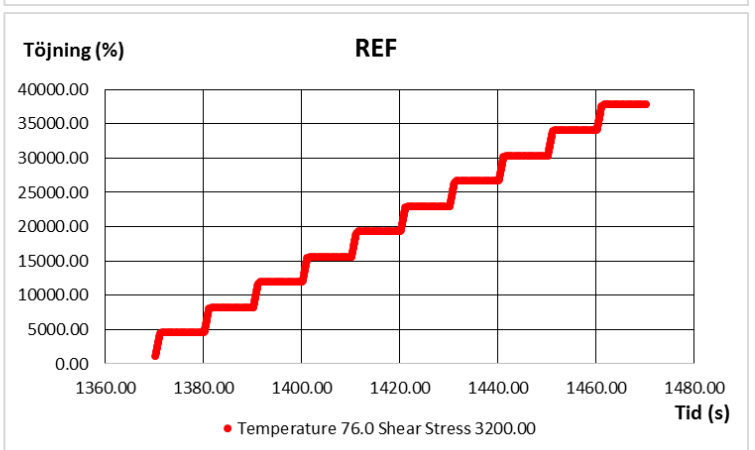
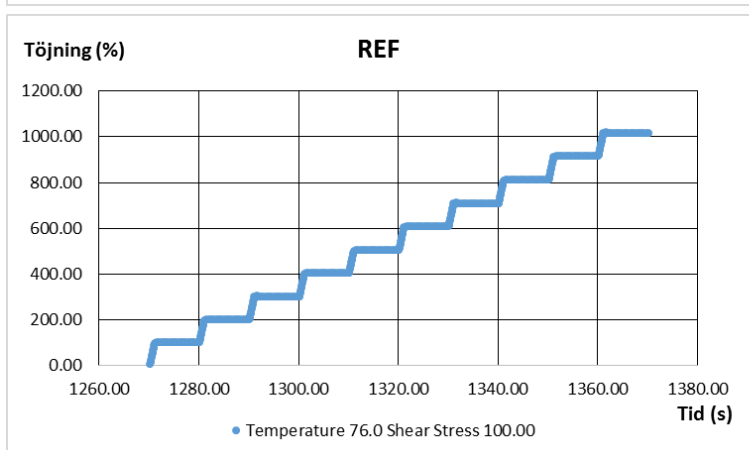
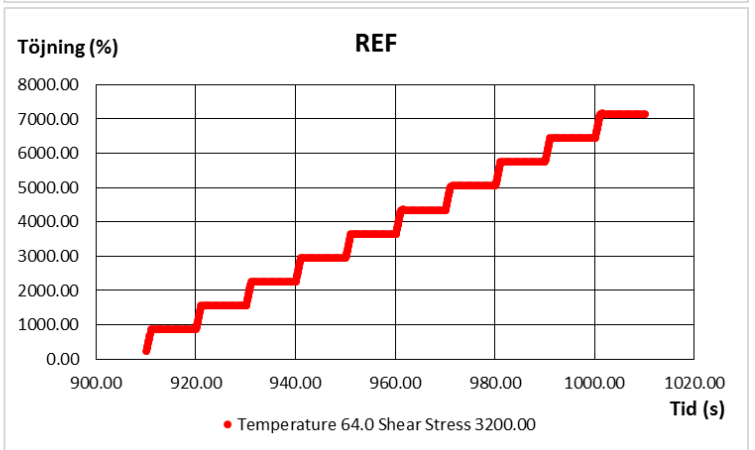
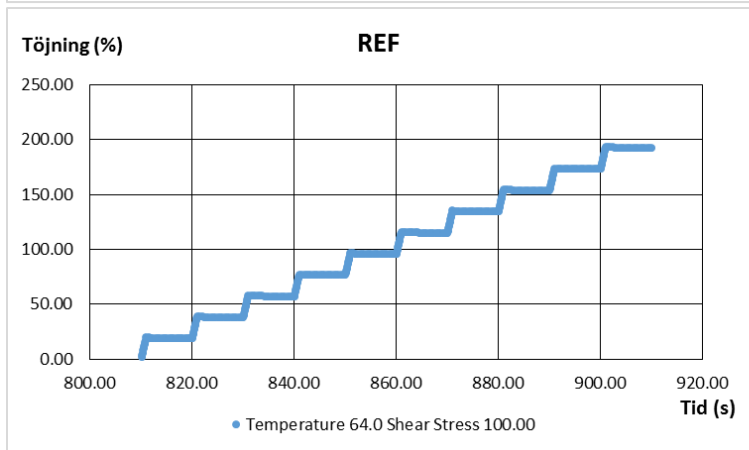
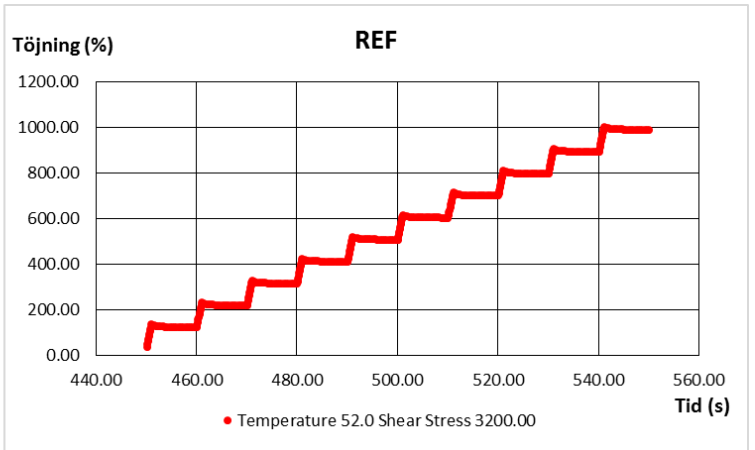
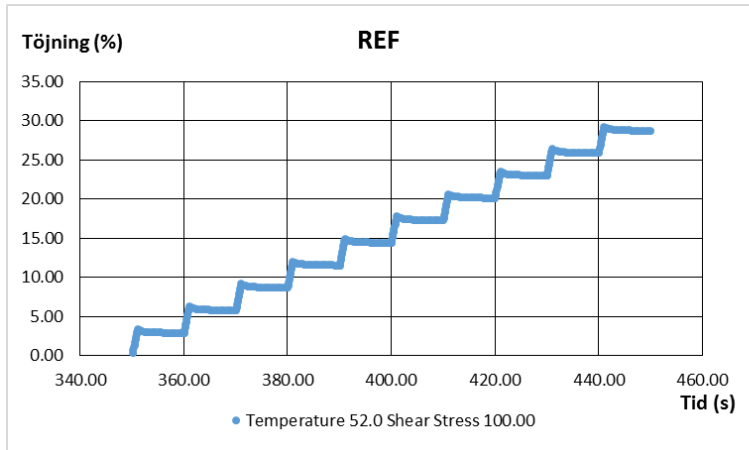


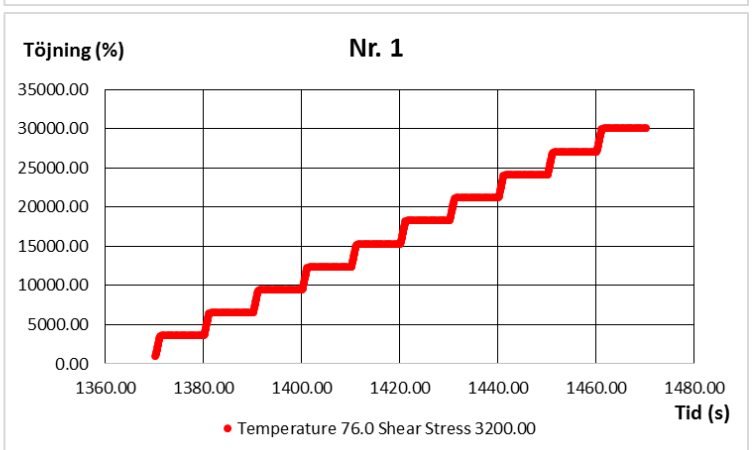
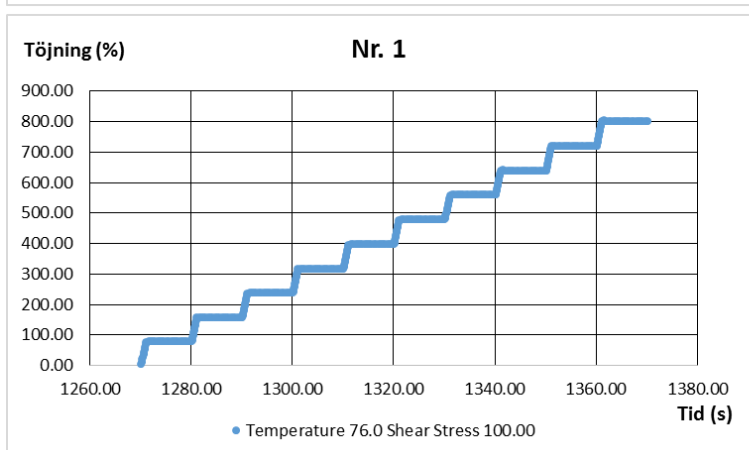
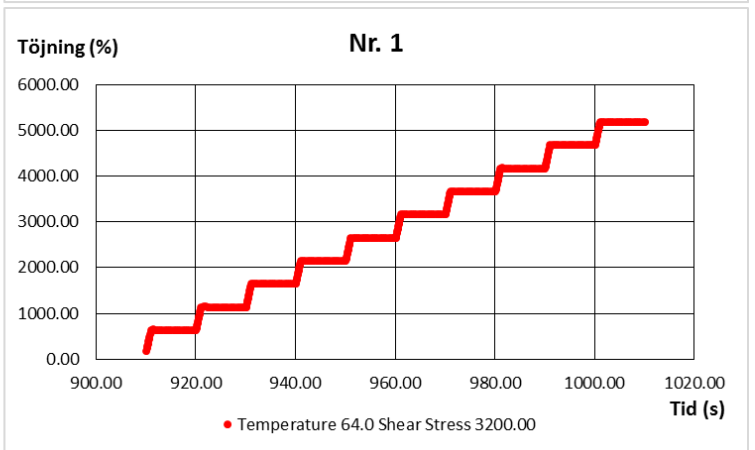
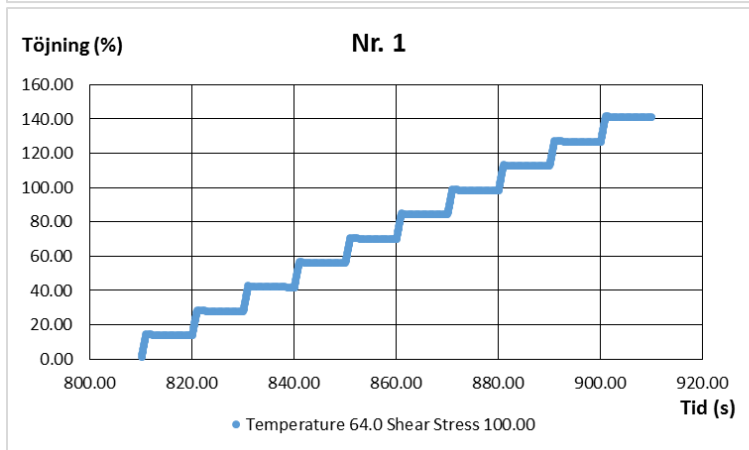
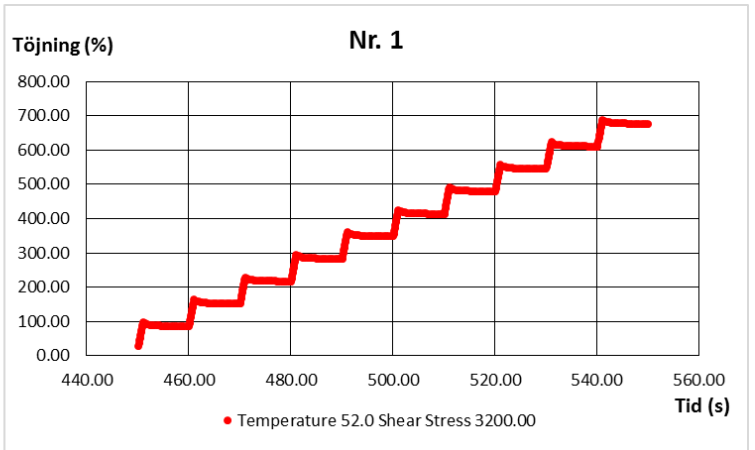
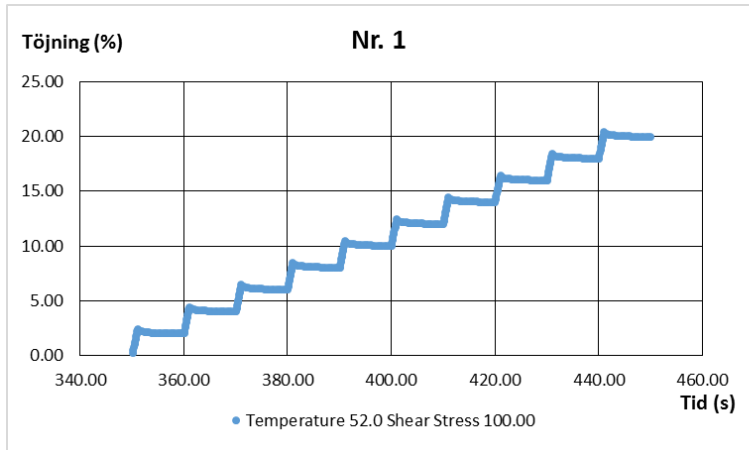
Masterfunktionernas parametrar med $T_r=298$ K						
Bitumen (Nr.)	C1	C2	α	β	γ	δ
70/100	11.48	104.44	12.556	-1.137	0.327	-3.546
REF	13.01	105.77	13.138	-1.427	0.301	-4.252
1	13.38	110.95	13.122	-1.423	0.301	-4.189
2	12.24	107.13	12.674	-1.279	0.318	-3.766
3	13.34	110.67	13.218	-1.422	0.299	-4.263
4	12.60	108.76	12.935	-1.320	0.309	-4.009
5	13.56	112.19	13.597	-1.417	0.279	-4.630
6	14.51	123.33	14.060	-1.429	0.262	-5.021
7	14.85	122.25	13.557	-1.574	0.288	-4.547

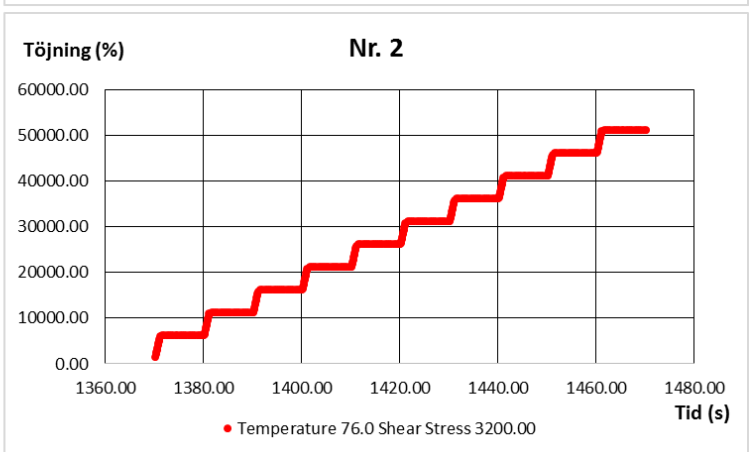
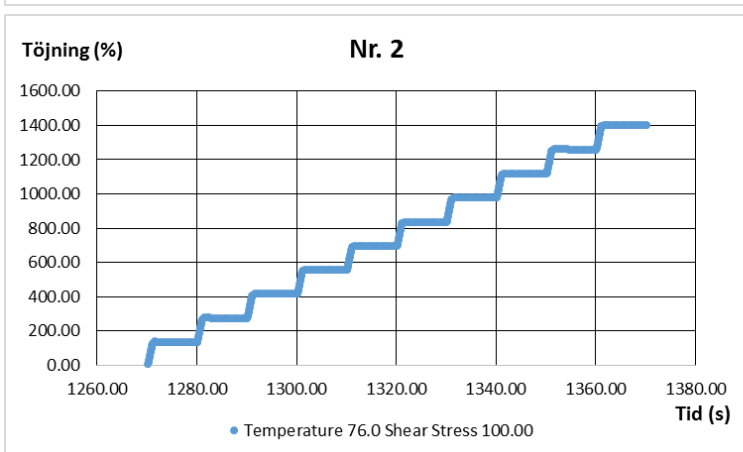
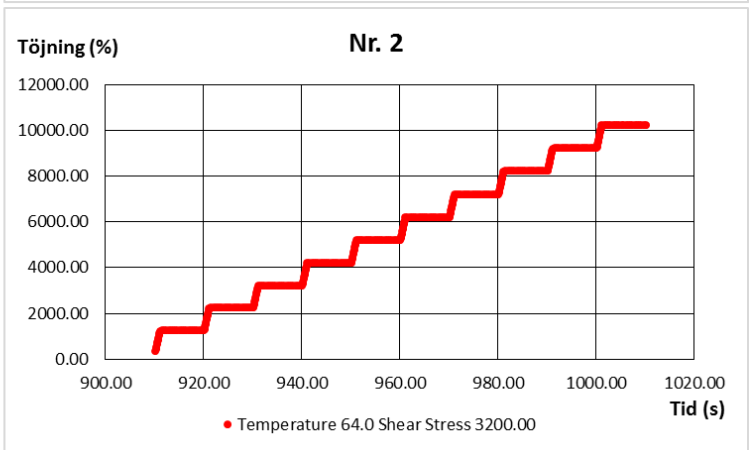
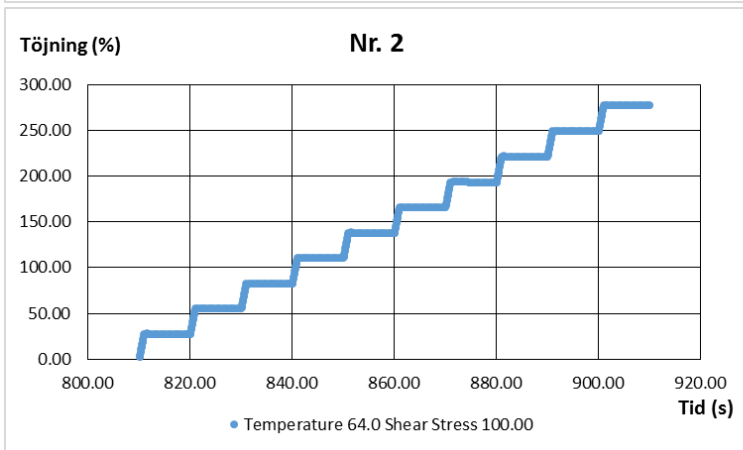
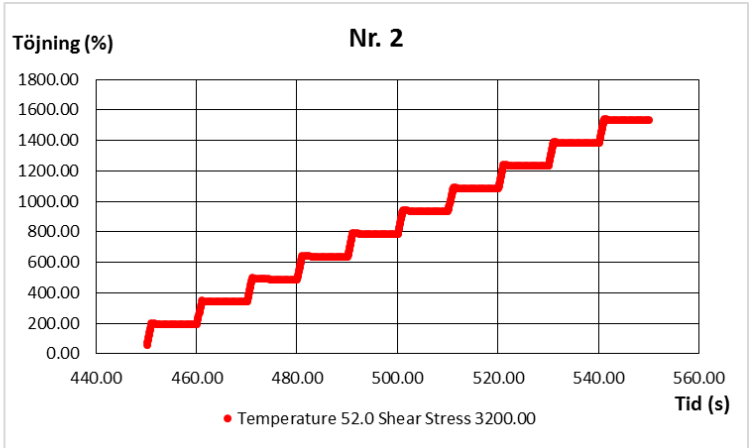
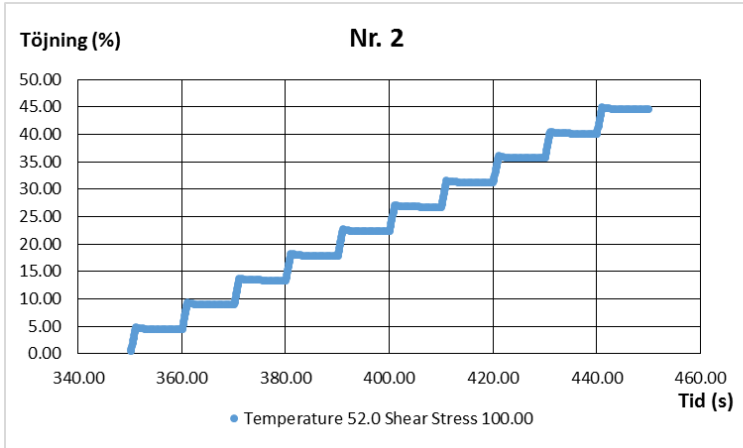
7.5 Bilaga - MSCR

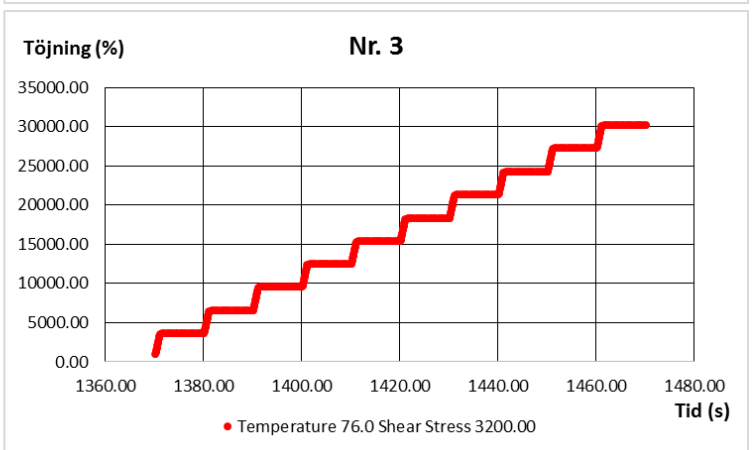
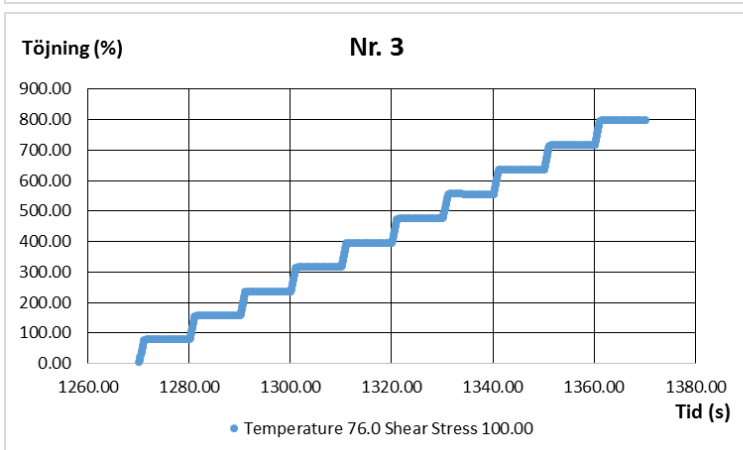
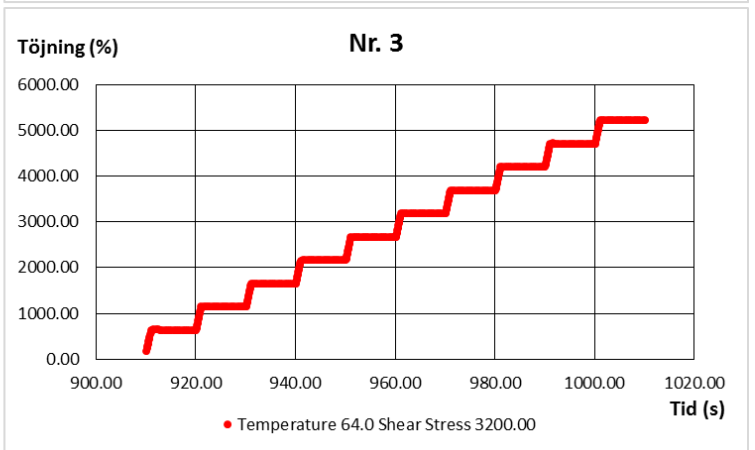
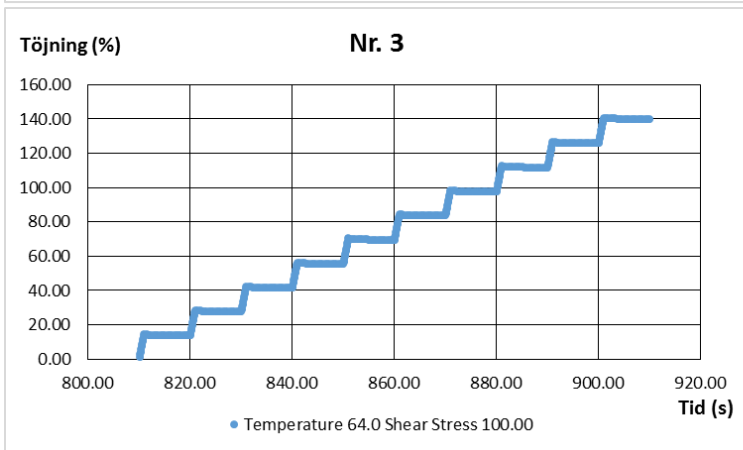
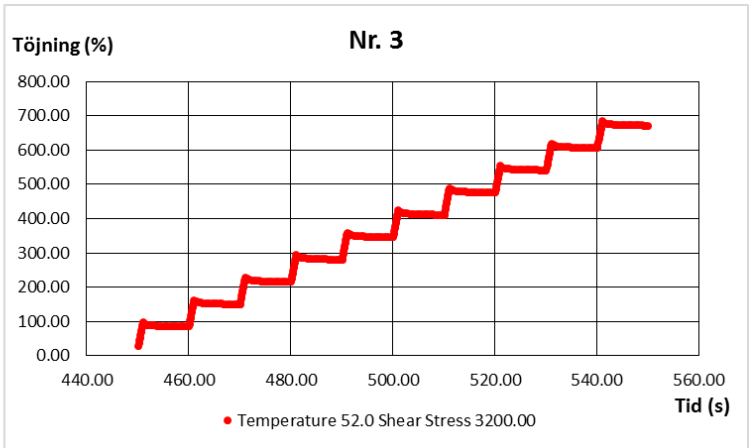
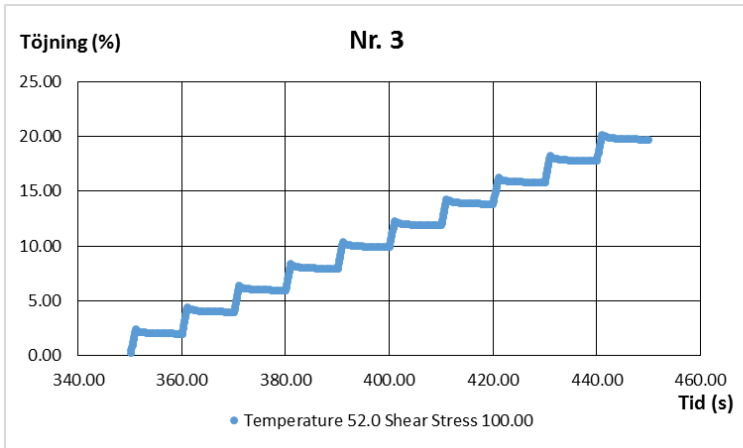
Sammanställning av MSCR					
Bitumen (Nr.)	Temp (°C)	R 100 (%)	R 3200 (%)	$J_{nr} 100$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr} 3200$ (kPa ⁻¹)
70/100	52	4.150	1.920	0.731	0.774
	64	1.450	0.060	4.645	5.199
	76	0.740	0.005	21.381	23.768
REF	52	15.210	12.120	0.287	0.300
	64	3.120	0.410	1.928	2.176
	76	0.470	0.020	10.189	11.492
1	52	17.560	15.540	0.200	0.205
	64	4.320	0.790	1.410	1.578
	76	0.550	0.030	8.030	9.143
2	52	7.690	5.240	0.446	0.465
	64	1.770	0.190	2.774	3.115
	76	0.450	0.020	14.014	15.553
3	52	18.130	15.800	0.197	0.204
	64	4.940	0.820	1.410	1.591
	76	0.950	0.040	7.971	9.196
4	52	9.940	7.340	0.370	0.387
	64	2.120	0.270	2.415	2.724
	76	0.770	0.020	12.500	14.046
5	52	33.270	28.550	0.137	0.148
	64	16.900	3.710	0.979	1.272
	76	7.920	0.240	5.874	8.359
6	52	45.030	41.420	0.076	0.081
	64	28.460	14.190	0.509	0.665
	76	23.190	1.550	2.757	5.087
7	52	31.260	30.720	0.056	0.056
	64	12.360	8.600	0.448	0.479
	76	2.110	0.240	2.747	3.140

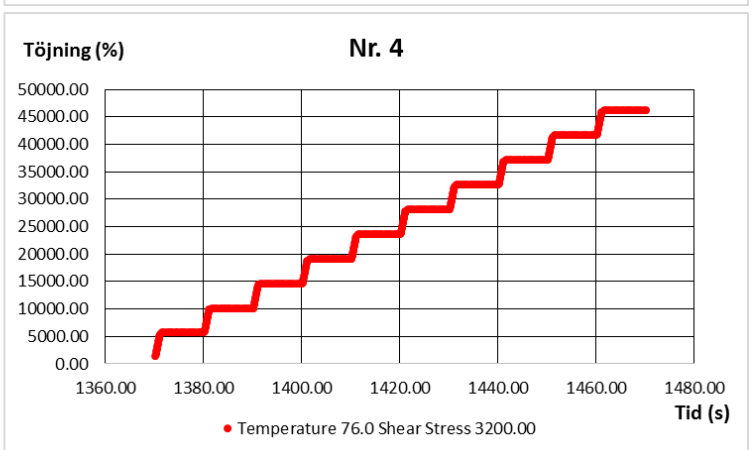
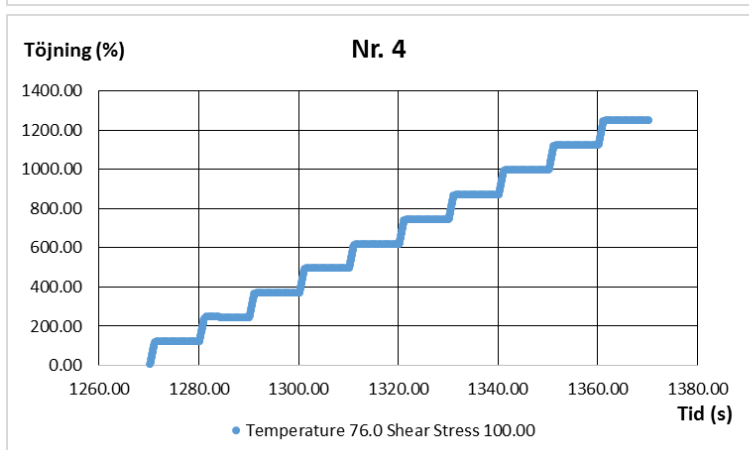
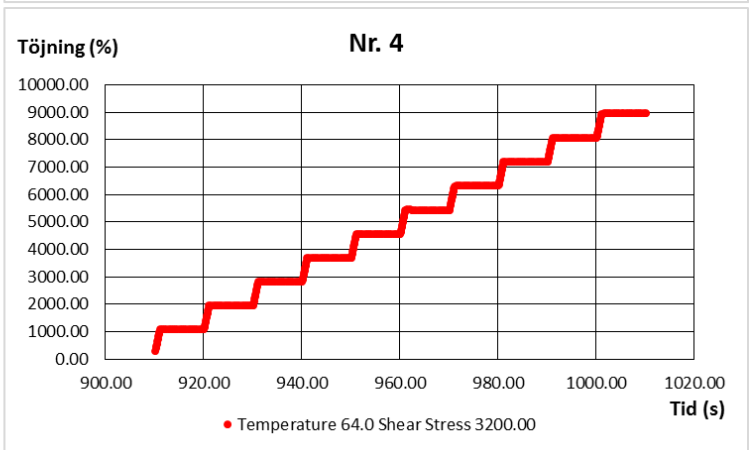
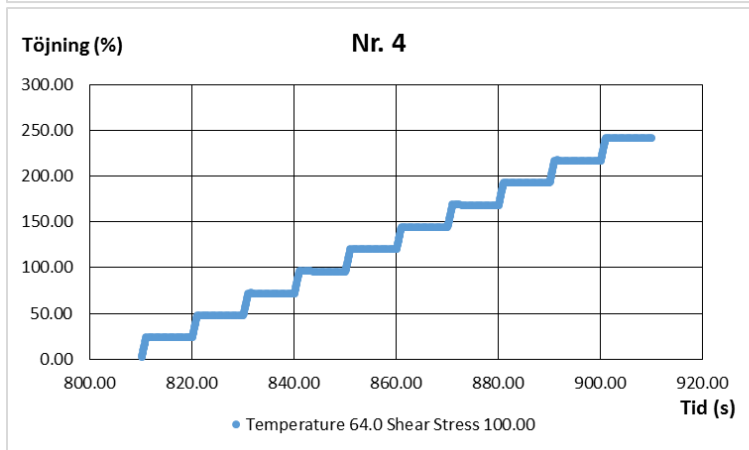
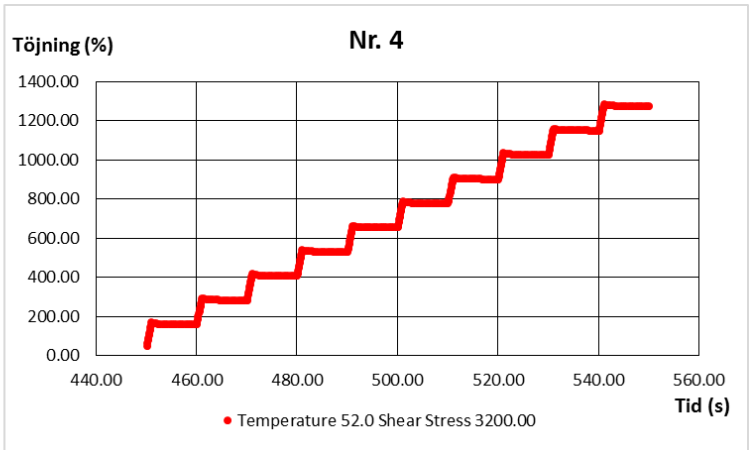
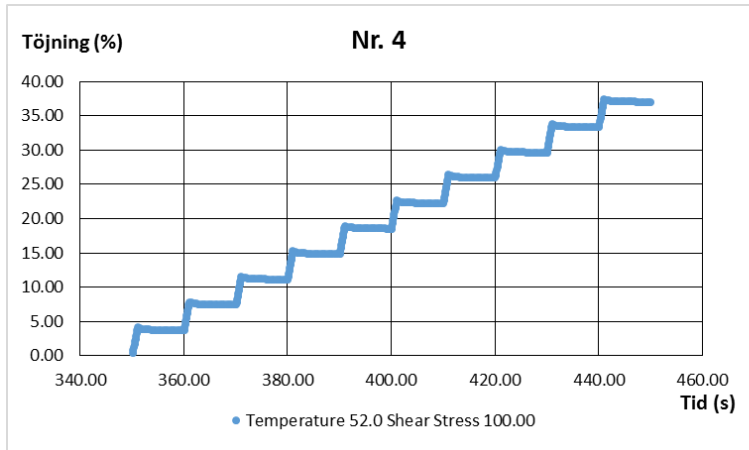


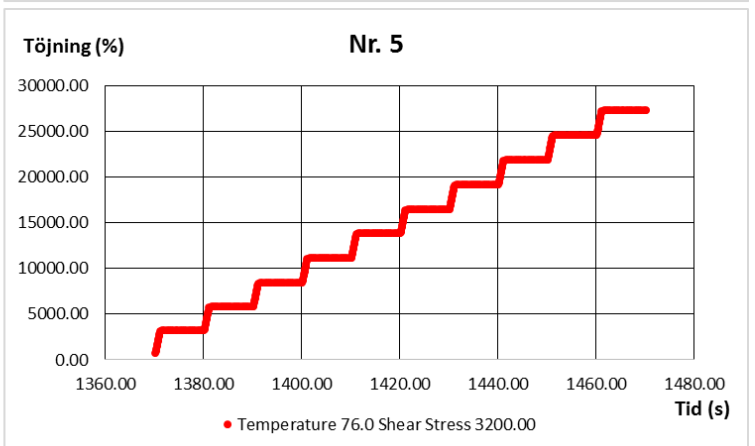
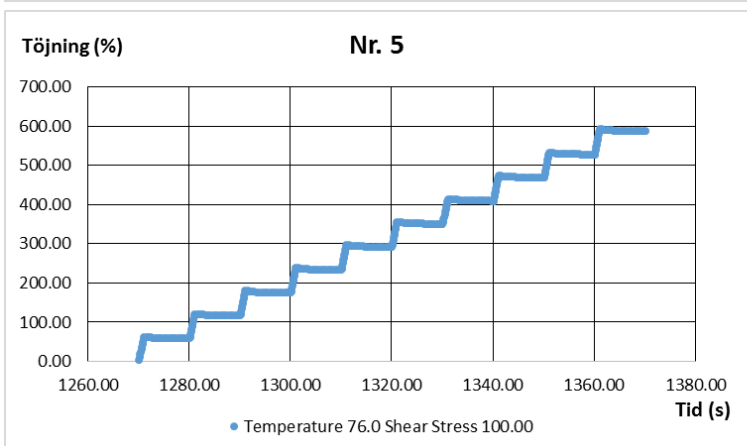
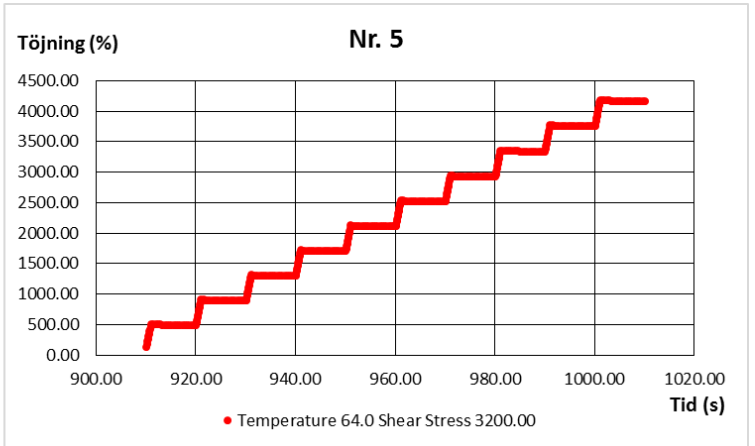
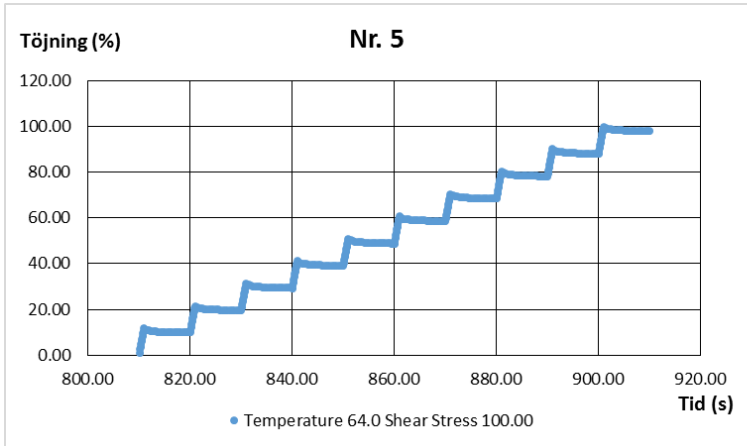
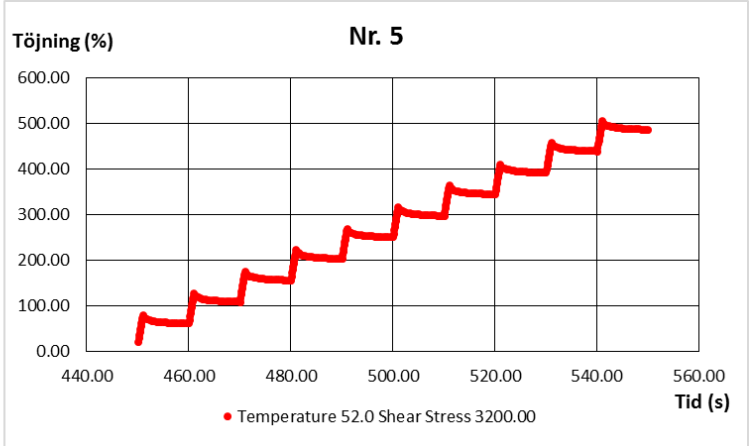
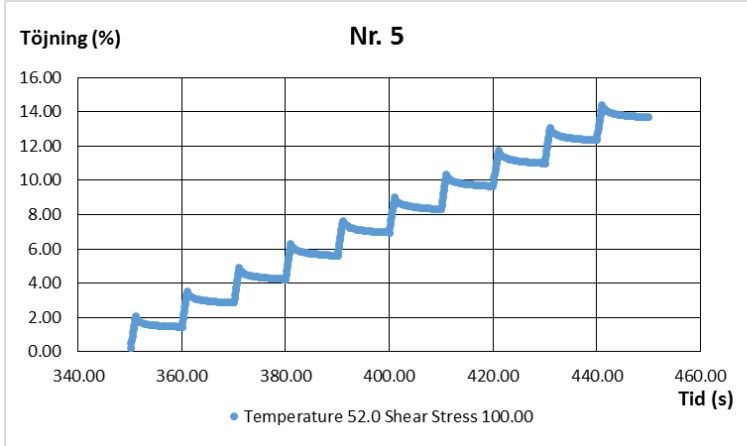


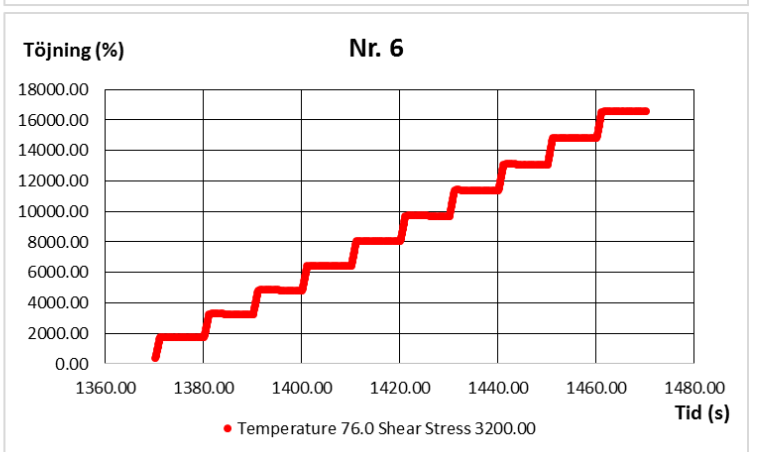
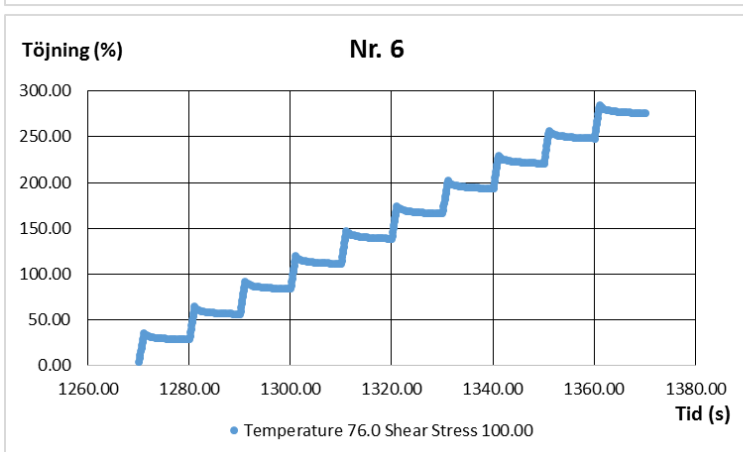
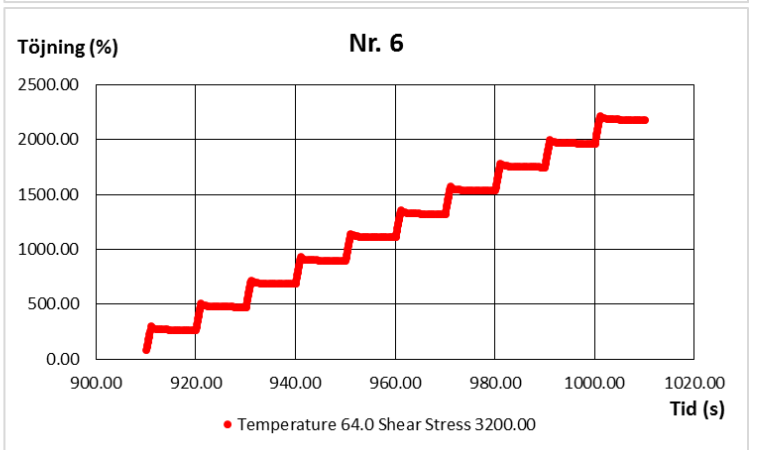
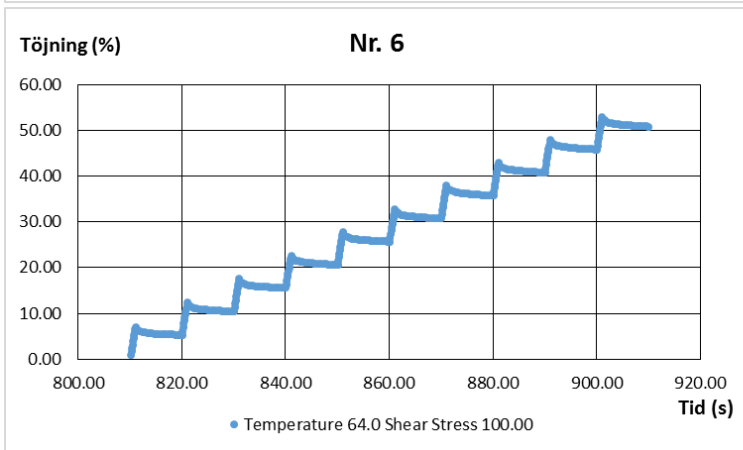
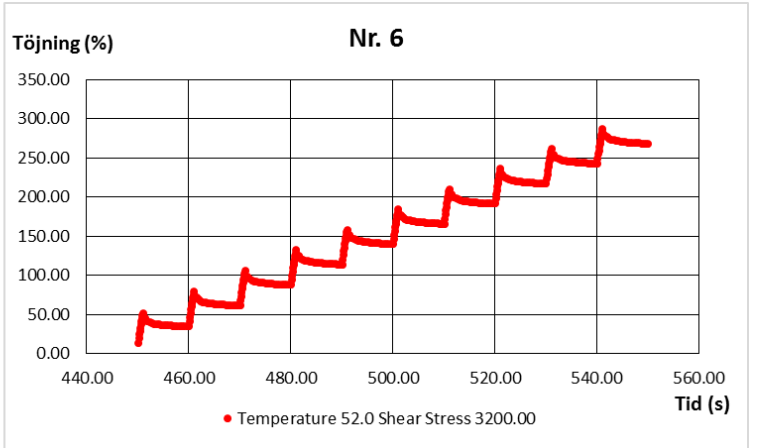
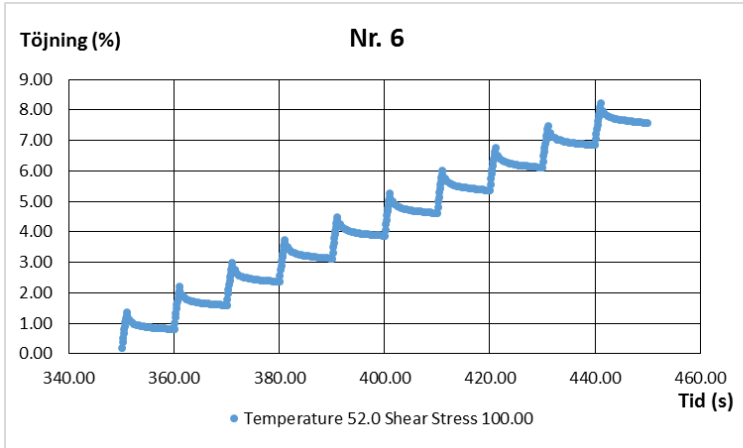


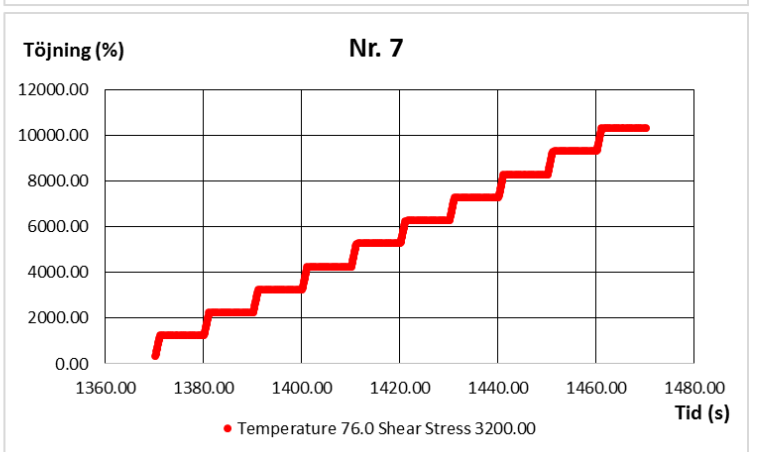
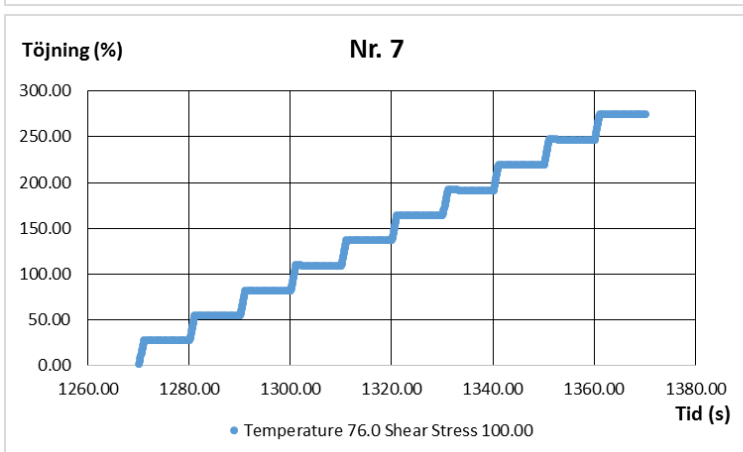
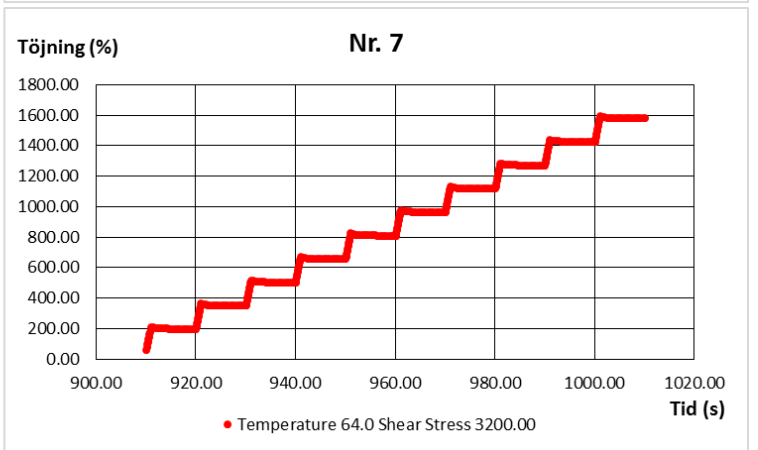
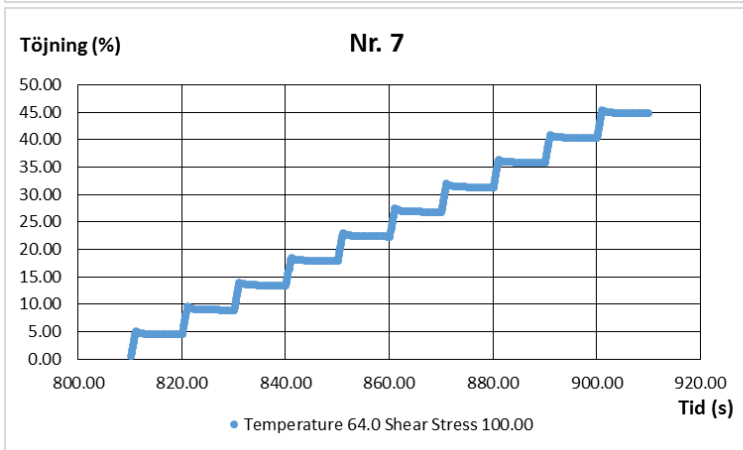
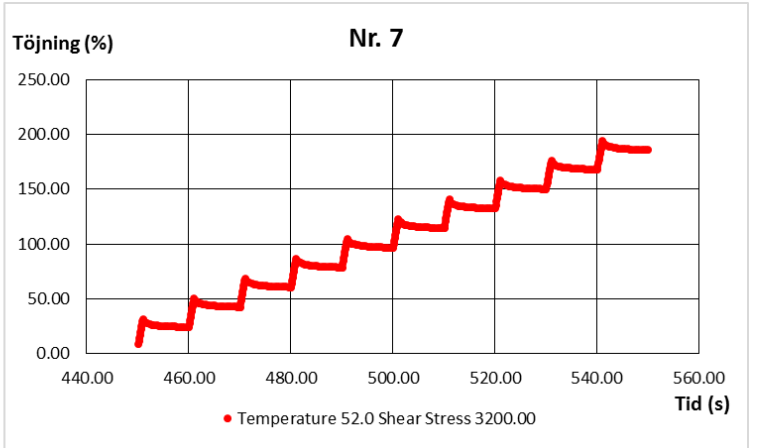
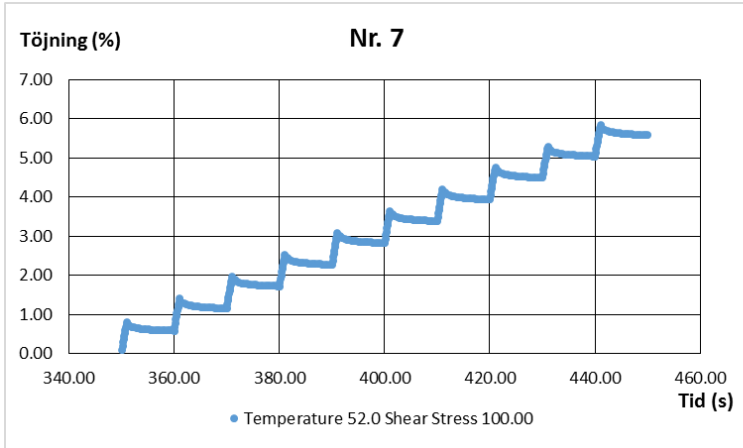






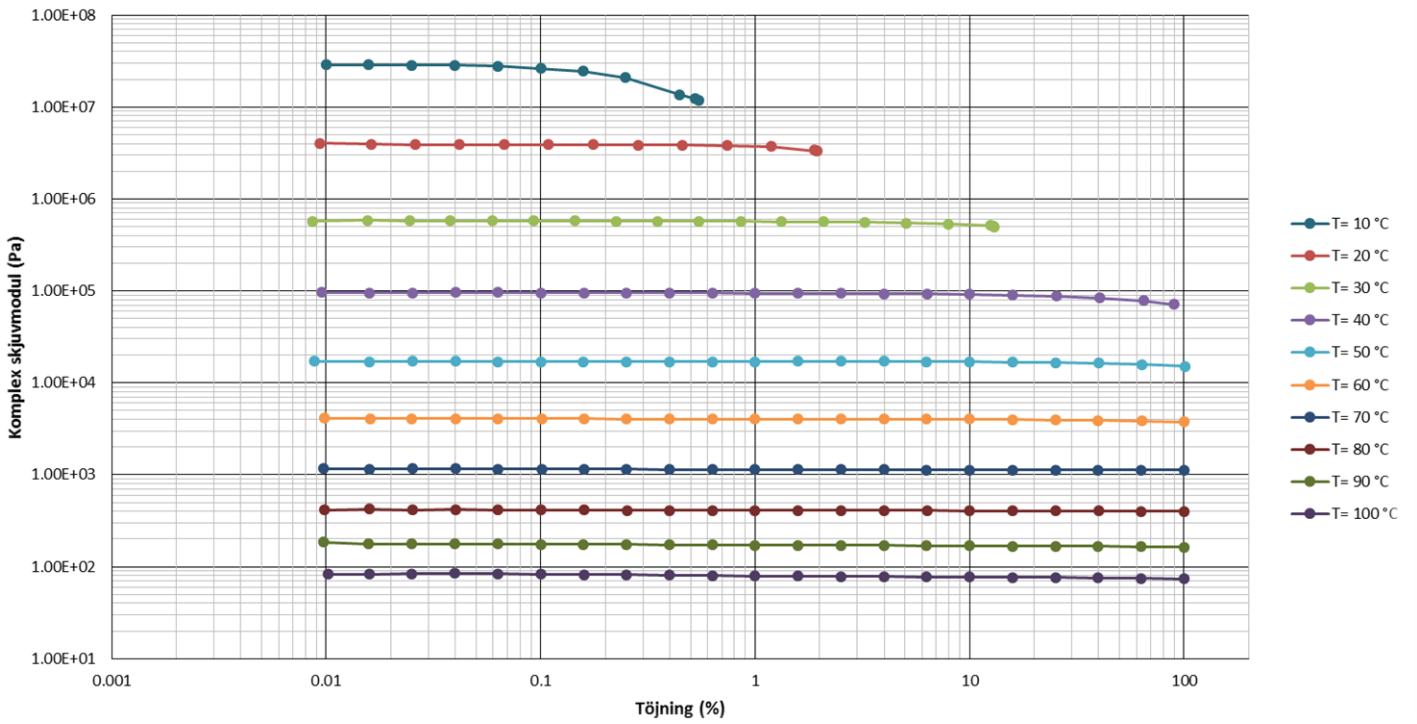




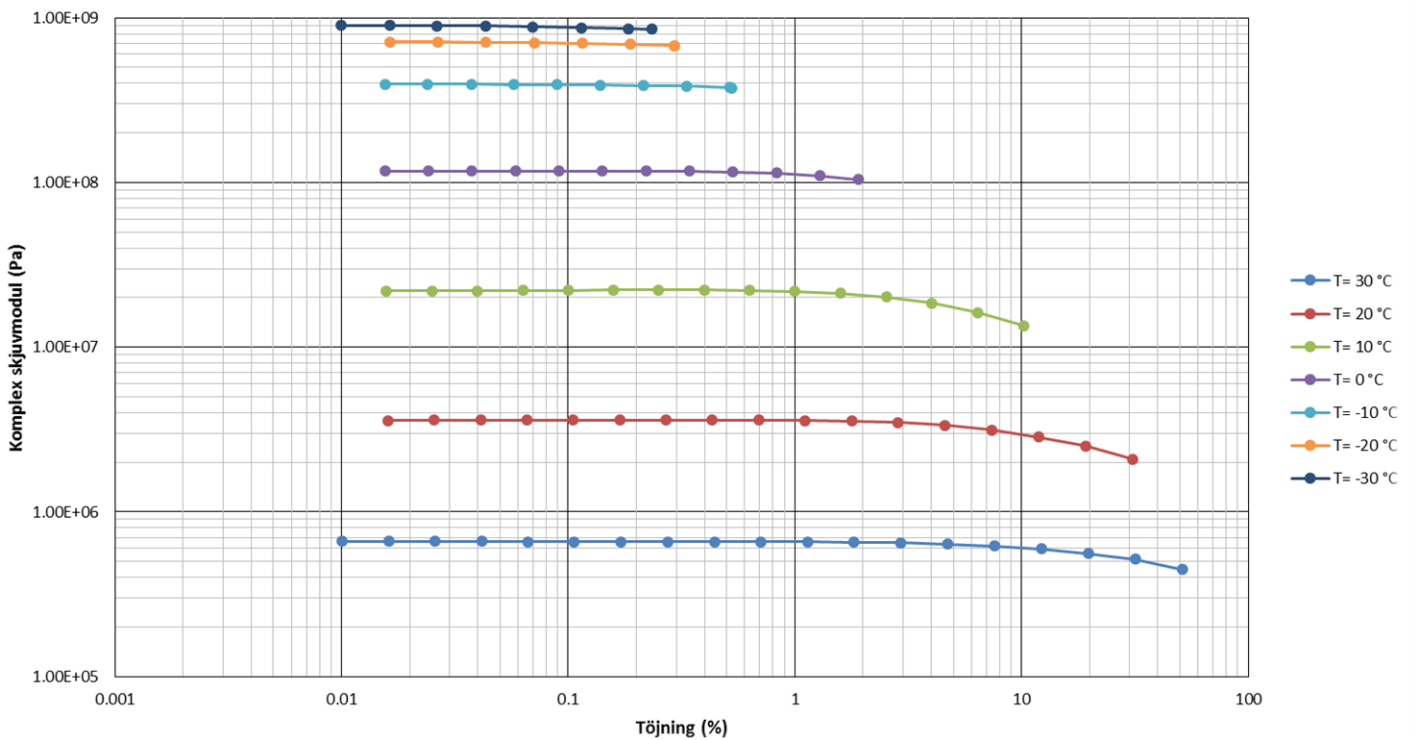


7.6 Bilaga – Undersökning av bruk i DSR

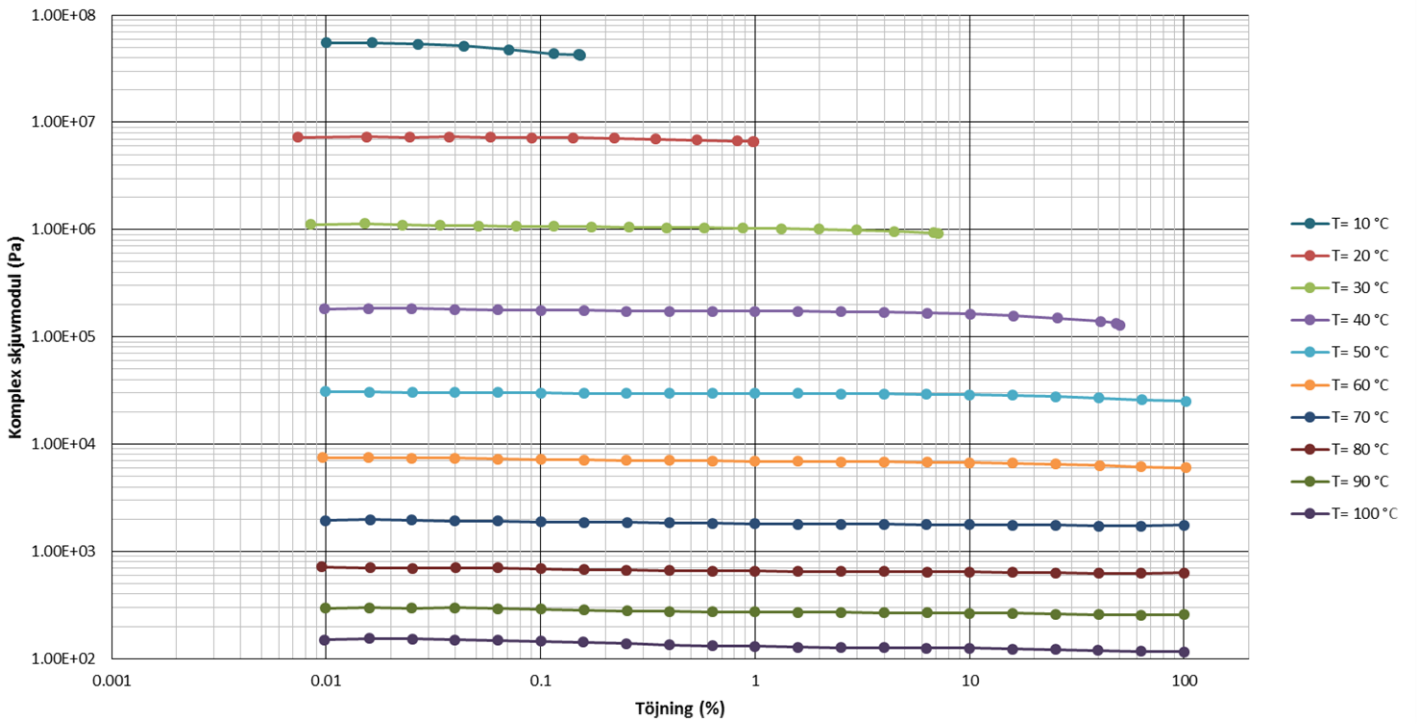
70/100 - 20 % Filler - PP25



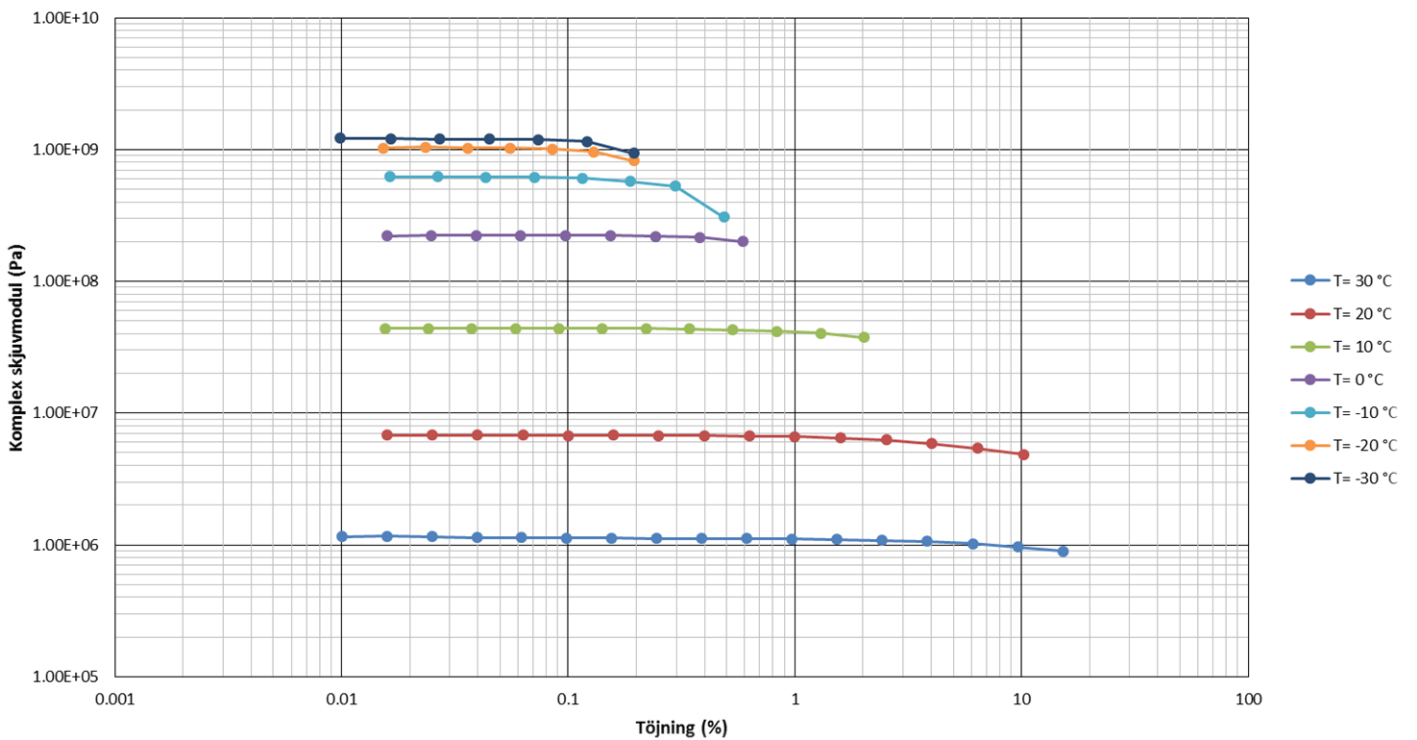
70/100 - 20 % Filler - PP08



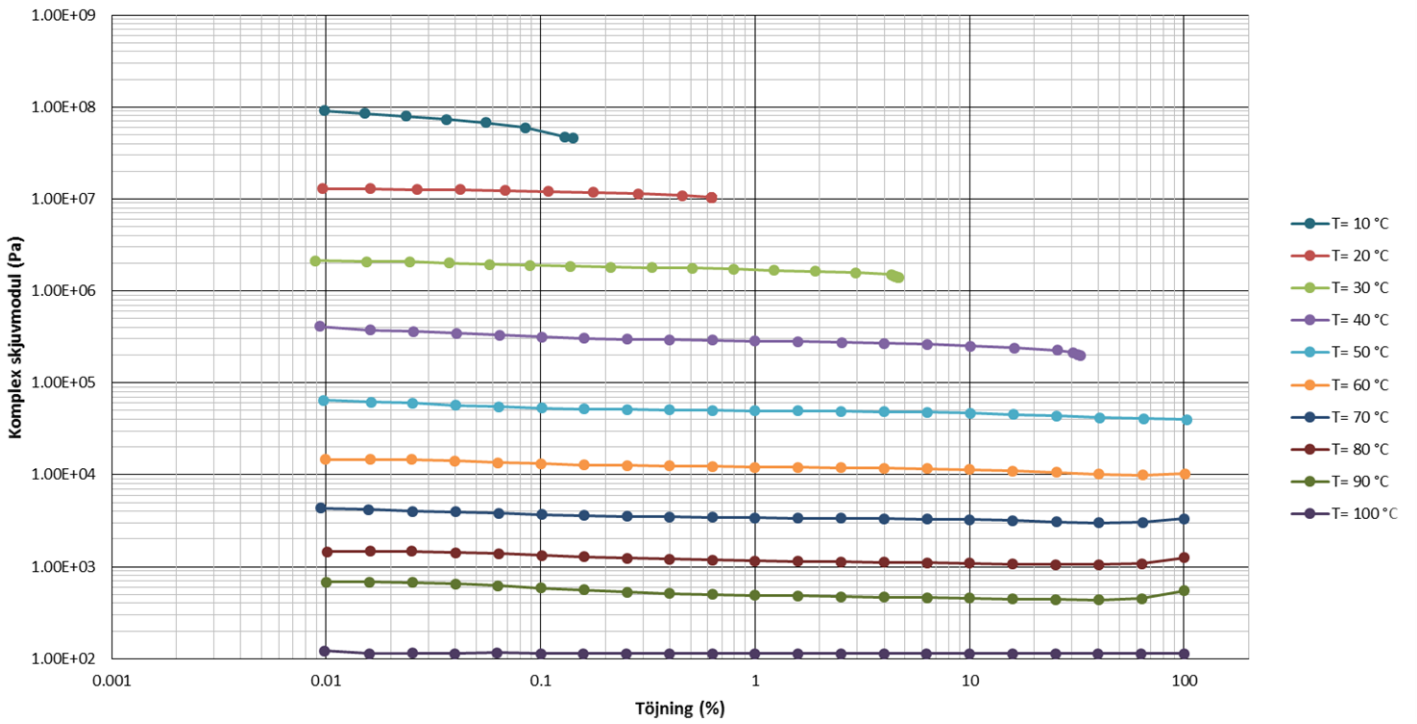
70/100 - 30 % Filler - PP25



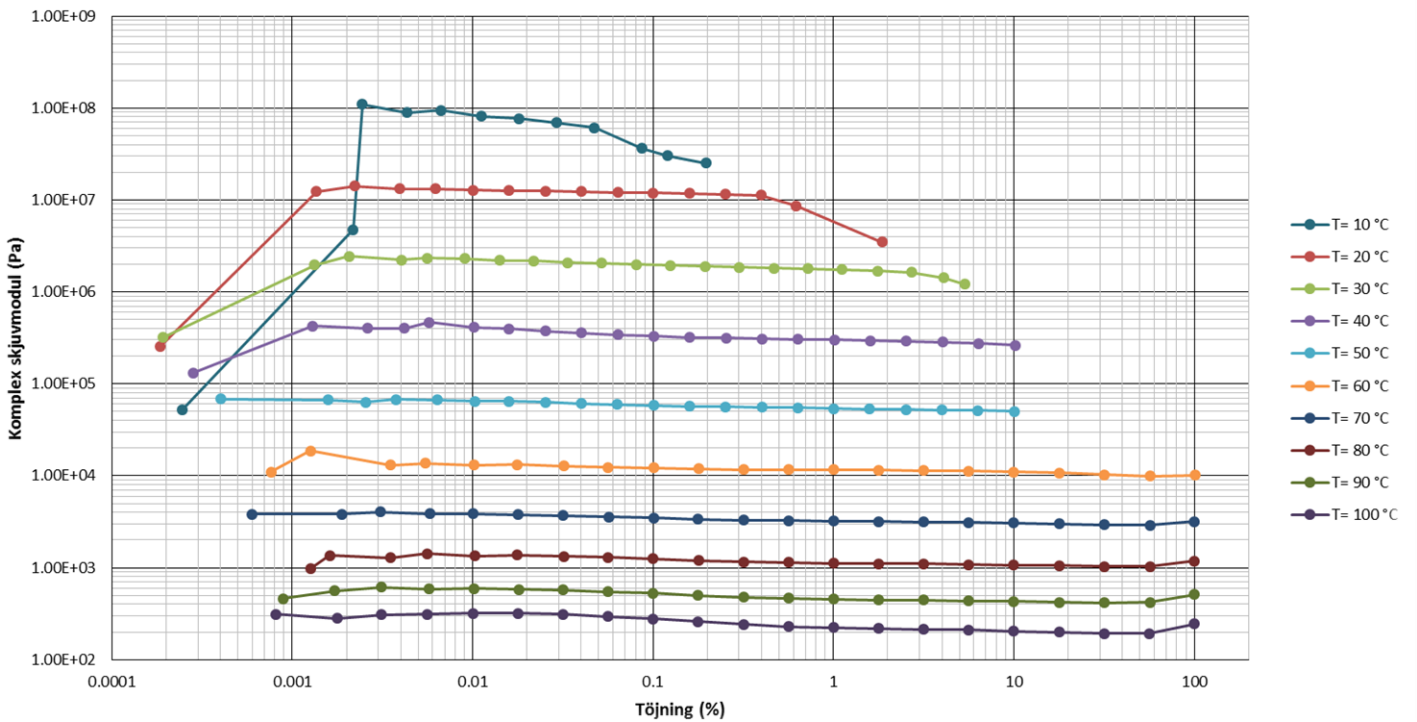
70/100 - 30 % Filler - PP08



70/100 - 40 % Filler - PP25 #1



70/100 - 40 % Filler - PP25 #2



70/100 - 40 % Filler - PP08 #1

