

Thesis 324

Undersökning av asfaltbruk med olika fillersorter

Reologiska egenskaper testade med DSR

Ola Aurell

Trafik och Väg
Institutionen för Teknik och Samhälle
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet



Copyright © Ola Aurell

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle
CODEN: LUTVDG/(TVTT-5291)/1-103/2019
ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet
Lund 2018

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5291)/1-103/2019

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 324

ISSN 1653-1922

Author: Ola Aurell
Title: Undersökning av asfaltbruk med olika fillersorter
English title: Examination of asphalt mastics with differing fillers
Language: Svenska
Year: 2018
Keywords: Bitumen; Filler; Asfaltsbruk; Reologi; DSR; dynamisk skjuvreometer
Citation: Ola Aurell, Undersökning av asfaltbruk med olika fillersorter. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2018. Thesis. 324

The properties of asphalt mastic, consisting of bitumen and filler, determine the asphalt's resilience and stability and ultimately durability. The reason to why asphalt mastics hasn't been more in focus is probably the lack of an established methodology for measurement. However, the development is steadily moving towards mechanistic methods, resulting in parameter values for direct use in paving material design models. An example of such a technology is the DSR, Dynamic Shear Rheometer, known from the American Superpave design concept.

The purpose of this thesis was to investigate the effects on the viscoelasticity of an asphalt mastic by four types of filler (two of granite, lime rock filler and cement), these fillers were added in four quantities (25, 34, 39.2 and 42.9 v/v %).

Other methods were simulated with the DSR. Such as a creep test (MSCR), to examine resistance to rutting, and ductility, to describe tensile properties. In addition, stiffness and relaxation were measured to reflect the risk of low temperature shrinkage cracks, resembling the Superpave test with the Bending Beam Rheometer.

Cement caused stronger increase of stiffness than the other types, lime rock filler had the lowest effect while the two granite fillers were relatively similar, somewhat higher than the lime filler. The step between 34 and 39.2 v/v %, which is a normal variation, corresponds to an increase in softening point by about 10 °C, measured with RVB, which could shorten the life span of the pavement significantly.

The next step will be to link the laboratory measurements to reality, while introducing these new methods for mix design and road construction.

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

Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	3
Summary	5
Begreppslista	7
Inledning	10
1.1. Bakgrund	10
1.2. Syfte	11
1.3. Avgränsning	11
1.4. Metod	12
1.5. Rapportens disposition	12
2. Litteraturstudie	14
2.1. Asfalt	14
2.2. Bitumen	14
2.2.1. Bitumensammansättning	15
2.3. Filler	15
2.4. Asfaltsbruk	16
2.4.1. Samverkan bitumen och filler	17
2.4.2. Rigdenhållrum	20
2.5. Superpave	21
2.6. Reologi	23
2.6.1. Newtonsk- och icke newtonsk vätska	23
2.6.2. Viskositet	24
2.6.3. Elasticitet	25
2.6.4. Viskoelasticitet	26
2.7. DSR	27
2.7.1. Mätteknik	30
2.7.2. DSR:s potential utöver Superpave	35
2.8. Metoder för Redovisning av resultat	39

2.8.1.	Masterkurva	39
2.8.2.	Blackdiagram	44
2.8.3.	Cole-Cole diagram	45
2.8.4.	Isokrona diagram	45
3.	Metod	46
3.1.	Tillvägagångsätt	46
3.1.1.	Provberedning	47
3.1.2.	Provblandning	47
3.1.3.	Applicering av prov	50
3.2.	Intervall för amplitudsvep	51
3.3.	MSCR	52
3.4.	Duktilitet	53
3.5.	Styvhet och m-värde	53
3.6.	Rigdenhållrum	53
4.	Resultat	54
4.1.	Masterkurva	54
4.2.	Blackdiagram	55
4.3.	Fillers förstyvande effekt på asfaltsbruk	55
4.4.	Performance Grade	57
4.5.	Duktilitet	59
4.6.	MSCR	60
4.7.	Rigdenhållrum	62
5.	Diskussion och slutsatser	63
5.1.	Resultatdiskussion	63
5.1.1.	Masterkurva	63
5.1.2.	Blackdiagram	64
5.1.3.	Fillers förstyvande effekt på asfaltsbruk	64
5.1.4.	Performance Grade	65
5.1.5.	Duktilitet	65
5.1.6.	MSCR	66
5.1.7.	Rigdenhållrum	66
5.2.	Metoddiskussion	67
5.2.1.	Preparering och lagring av provkroppar	67
5.2.2.	Masterkurva	67

5.2.3.	DSR	68
5.2.4.	MSCR	68
5.2.5.	Rigdenhållrum	69
5.2.6.	Duktilitet	69
5.2.7.	Resultatpresentation	69
5.3.	Slutsatser	70
5.3.1.	Praktisk tillämpning	70
5.3.2.	Rekommendationer från studien	70
5.4.	Rekommendationer för fortsatta studier	71
6.	Referenser	72
7.	Bilagor	76

Förord

Denna studie har varit en avslutning på en civilingenjörsutbildning i Väg- och trafikteknik vid LTH, HT -18. Ämnet valdes då det är något som nämnts vid flertalet kurser, men som vi aldrig givits möjligheten att fördjupa oss i. Det är författarens åsikt att kunskap om fillers inverkan på asfaltsbruk och potentialen av DSR är något som bör lyftas fram mer i branschen och utbildningar. Användning av DSR som ett verktyg för att kontrollera bitumens och asfaltsbruks egenskaper är något som enligt författaren bör bli mer vida spritt i branschen. Denna studie är ett försök att påvisa möjligheterna som finns med denna teknik.

Jag vill börja med att rikta ett stort tack till Per Tyllgren och Svenskt VägCentrum, SVC, för all hjälp och allt stöd under arbetets gång. Pers otroliga engagemang i studien har varit ovärderlig, och är en stor anledning till omfattningen och kvalitén på studien.

Jag vill även tacka LTH och Ebrahim Parhamifar för att de har låtit mig i studien använda deras DSR, och övrig utrustning som har behövts.

Ett stort tack skall även riktas till Sven Agardh och Pajtim Sulejmani som jag har haft som handledare från LTH. Pajtim Sulejmani har givit mycket bra feedback under arbetets gång.

Jag skulle även vilja passa på att tacka Skanska och deras personal som har hjälpt oss med att ta fram material till studien.

Det är min förhoppning att detta arbete ska kunna vara till nytta för fler än bara LTH när det kommer till att belysa den potential som finns i att använda sig av DSR istället för konventionella metoder för att bestämma bitumens och asfaltsbruks egenskaper.

Lund, December 2018

Sammanfattning

Egenskaperna hos bitumen är sedan länge erkända som den viktigaste faktorn för en asfalts funktion. Dessa egenskaper är även relativt enkla att kontrollera. Till följd av detta har länge bitumens egenskaper setts som avgörande när det kommer till att förutspå hur asfalten kommer att agera då den brukas. De mätmetoder som har utvecklats för att kvantifiera bitumens egenskaper är relativt lättanvända. Metoderna ger ett måttal på bitumens beteende. Dessa måttal har sedan, under flera år av uppföljning och undersökning, kunnat kopplas till asfaltens egenskaper. Den huvudsakliga styrkan med dessa metoder är att de är erkända i branschen, lätta att utföra och tydligt kopplade till verkligheten. Dock saknar dessa metoder möjligheten att beskriva bitumen då tillsatser introduceras. Metodernas, mjukpunkt och penetrationstal, brist ligger i att de inte klarar av att beskriva bitumen då tillsatser introduceras eftersom det då saknas historisk kunskap.

Det har sedan några år lagts fram att det faktiskt inte är bitumen som styr asfaltens eftergivlighet, stabilitet och i slutändan hållbarhet utan att det i självaverket är asfaltsbruket, bitumen blandat med filler. Dock har det aldrig gjorts något omfattande arbete med framtagning av en standard för testning och utvärdering av asfaltsbruk. Avsaknaden av intresse för asfaltsbruk ligger troligtvis i svårigheten att mäta materialets egenskaper då materialet inte lämpar sig för de traditionella testerna. En annan anledning kan vara att fillerns egenskaper varierar från plats till plats och ibland över tid. Fillermängden måste anpassas i varje enskilt fall. Det komplicerar utformningen av regelverk för tillverkning och kvalitetskontroll men det är samtidigt så verkligheten ser ut.

Utvecklingen av mätteknik har gått mot mekanistiska metoder, som resulterar i parametervärden för direkt användning i dimensioneringsmodeller för vägbeläggingsmaterial. För att ge en möjlighet till provning av bitumen med tillsatser, och för att ge en mer omfattande bild av materialets egenskaper, har det undersökts om det är möjligt att kvantifiera dessa effekter och egenskaper med en DSR. DSR:n introducerades för vägbyggnadsbranschen för ungefär 30 år sedan i samband med införandet av den amerikanska dimensioneringsstandarden Superpave. Det har i tidigare studier, både på LTH och utanför, bevisats att DSR är ett lämpligt verktyg för kvantifiering av egenskaperna hos ett asfaltsbruk.

Bitumen är ett komplext material med reologiska egenskaper som varierar både beroende på temperatur och belastning. När filler introduceras i bitumen, för att skapa asfaltsbruk, ges ett material med ännu mer komplexa egenskaper. För att kunna kartlägga och förstå dessa egenskaper, och fillerns effekter på asfaltsbruket, bör omfattande studier göras på materialet. I denna studie görs just det, med en DSR. Materialets egenskaper mäts från -30 till 80°C med varierande lastfrekvens. Resultatet av mätningarna är alltså inte ett enda värde i ett givet fall utan skapar ett samband eller en bild av materialets egenskaper, en så kallad masterkurva. Ur detta samband kan sedan egenskaperna beräknas för en rad olika belastningsfall under alla förekommande förhållanden.

Syftet med denna studie är att undersöka de viskoelastiska effekterna av fyra fillertyper (två granitfiller, kalkfiller och cement) inblandade med fyra olika mängder (25, 34, 39,2 och 42,9 vol%) i området för vanligt förekommande fillerhalter. Asfaltsbruket har blandats med ett 70/100 bitumen. Målet var att beskriva egenskaperna i fysikaliska termer för varje typ och halt av filler.

Vid sidan av så kallade sveptest med variation av *belastningstid* och *temperatur* simulerades med hjälp av DSR också andra mätmetoder, som *kryptest* (MSCR) för att prova resistens mot spårbildning och *duktilitet* för att beskriva töjbarhet. Härutöver mättes *styvhet* och *relaxation* för att återspegla risken för krympsprickor vid låg temperatur, motsvarande testet i Superpave med Bending Beam Rheometer.

Av resultatet i studien går det att se hur asfaltsbruksegenskaper kan beskrivas på samma eller liknande vis som bitumen, i varje fall vid de fillerkoncentrationer som har använts i studien (25, 34, 39,2 och 42,9 vol-%).

I studien påvisas hur mycket ett asfaltsbruk påverkas av val av fillertyp och val av mängd filler. I studien visas hur en asfaltsmassas motstånd mot spårbildning kan ökas med en högre halt filler, alternativt genom att byta filler typ. I studien påvisas även vikten av kontroll vid produktion. Om det inte tas hänsyn till filler mängd, typ och kornfördelning går det inte försäkra kvalitén på det material som produceras.

Det finns flera förklaringsfaktorer till varför fillersorterna skiljer sig åt men den här studien hade inte som syfte att utreda den saken. Utgångspunkten är att en filler från bergmaterial som använts i många år är i grunden användbar. Den avgörande frågan är lämplig inblandningsmängd för att undvika förkortad livslängd hos vägbeläggningen.

Nästa steg blir att knyta samman laboratiemätningarna med verkligheten och samtidigt modernisera mättekniken för proportionering av asfalt och dimensionering av väg-överbyggnader.

Förhoppningen med studien är att påvisa den enorma potential som finns i mätningar med DSR, och att uppvisa all den information som finns att utvinna ut denna metod.

Summary

The properties of bitumen have since long been recognized as the most important factor for predicting the performance of an asphalt pavement. These properties are also relatively easy to control. As a result bitumen's properties have for a long time been considered crucial when predicting how the asphalt pavement will act when in use. The testing methods developed to quantify the bitumen's properties are relatively easy to use. The methods give a good measurement of the behaviour of the bitumen. These measurements have been able to be linked to the characteristics of the asphalt pavement after several years of follow-up studies and investigations. The main strength of these methods is that they are well recognized in the industry, easy to conduct and clearly linked to the asphalt pavement. However, these methods lack the ability to describe bitumen when additives are introduced. The shortcomings of methods like softening point and penetration are that they are unable to describe the bitumen when additives are introduced because when additives are introduced the methods lack historical anchoring.

It has since a few years been known that it is not the bitumen but rather the asphalt mastic that controls the resilience, stability and endurance of the asphalt pavement. However, no extensive work has been done with the development of a standard for testing and evaluation of asphalt mastics. The lack of interest in asphalt mastics is probably due to the difficulty in measuring the properties of the material. This is due to the fact that the material is not suitable for the traditional tests. Another reason may be that the properties of the filler vary from quarry to quarry and sometimes depending on where in the quarry and that the amount of fill must be adjusted in each case. This complicates the design of manufacturing and quality control rules.

The development of measurement technologies has been steadily moving towards mechanistic methods, resulting in parameter values for direct use in pavement material design models. In order to provide an opportunity for testing bitumen with additives, and to provide a more comprehensive picture of the properties of these materials, it has been investigated whether it is possible to quantify the effects of the additives and the properties of the mix with a DSR. The DSR was introduced to the road construction industry about 30 years ago in conjunction with the introduction of the US Superpave dimensioning standard. In earlier studies, both at LTH and elsewhere, it has been shown that the DSR is an appropriate tool for quantifying the properties of an asphalt mastic.

Bitumen is a complex material with rheological properties that vary depending on temperature and time of loading. When filler is introduced into the bitumen, to create asphalt mastics, a material with even more complex properties is produced. In order to map and understand these properties, and the effects of the filler on the asphalt mastic, extensive studies needs be made on the material. In this study, this is done with a DSR. The material properties are measured from -30 to 80 °C with varying load rates. Thus, the result of the measurements is not a single value in a given case, but rather creates a relationship or image, a so-called master curve. From this relationship the properties can then be calculated for a variety of loading times and temperatures.

The purpose of this study was to investigate the viscoelastic effects of four types of fillers (two granite fillers, lime filler and cement). The fillers were mixed at four different concentrations (25, 34, 39.2 and 42.9 vol%). These volumes of fillers are all around the amount used in a common filler mastic. The aim was to describe the change of properties in the asphalt mastics in physical terms for each type and level of filler.

In addition to so-called sweep tests with varying loading times and temperatures, DSR also simulated other measurement methods, such as the creep test (MSCR), resistance to deformation, and ductility to describe extensibility. In addition, stiffness and relaxation were measured to reflect the risk of low temperature shrinkage cracks, these tests were carried out in a similar way to the Superpave test with the Bending Beam Rheometer.

The result of the study shows how asphalt mastics properties can be described in the same or similar way as bitumen, at least at the fill concentrations used in the study (25, 34, 39.2 and 42.9 vol%).

The study shows how much asphalt mastic is influenced by choice of fill type and choice of amount of filler. The study shows how an asphalt pavement's resistance to permanent deformation can be increased with a higher level of filler, alternatives by changing the type of filler. The results shows the importance of control in the production of asphalt. If one does not take into account the amount of filler, type and grain distribution, one cannot assure the quality of the product being produced.

There are several explanatory factors to why the different types of fillers differ, but this study was not intended to investigate the matter. The point is that a filler, made from rock material that have been used for many years is basically useful. The crucial issue is the appropriate amount, this to avoid shortened the service life of the asphalt pavement.

The next step will be to link the laboratory measurements to reality while modernizing the measurement technique for the proportion of asphalt and the design of road structures.

The aim of the study is to demonstrate the enormous potential of measurements made with the DSR, and to showcase all of the information that is available to extract from the result of tests with this method.

Begreppslista

δ	Fasvinkel, mäts med DSR. Beskriver förhållandet mellan G^* och G' och G'' .
DSR	En maskin som genom oscillerande tester kan användas för att utvärdera ett bitumens reologiska egenskaper.
Eftergivlighet	Begrepp som används för att beskriva ett materials "följsamhet" vid belastning.
Elasticitet	Möjligheten för ett material att under belastning deformeras och efter avlastning återgår till sin ursprungliga form kallas elasticitet.
G^*	Komplex skjuvmodul, mäts med DSR. Är vektorn av G' och G'' .
G'	Den elastiska modulen. En vektorkomposant av G^* .
G''	Den viskösa modulen. En vektorkomposant av G^* .
Icke newtonsk vätska	En vätska där skjuvkraft och spänning inte följer varandra linjärt.
Krackelering	En vanlig form av skada på asfaltsvägar. Skadan beror på dåliga egenskaper vid låga temperaturer.
LVE-område	Linjär viskoelastiskt område. Alla mätningar med DSR måste göras inom detta område för att superpositioneringsprincipen skall vara gällande.
MSCR	MSCR är en testmetod i Superpave. Metoden används för att mäta hur väl ett bitumen kan återhämta sig efter påförd last. Metoden ger ett mått på återhämtad deformation.
Newtonsk vätska	En vätska där skjuvkraft och spänning följer varandra linjärt.
Oscillerande tester	En form av mätmetod som introducerades till asfaltbranschen genom införandet av den amerikanska standarden Superpave. Exempelvis DSR.
PAV	En metod för att simulera åldringen av bitumen som sker under vägens livslängd.
Proxy-värde	Något som mäts och anges för sådana uppgifter som inte kan mätas direkt, via instrument.
Relaxationsegenskaper	Ett begrepp för att beskriva ett bitumens, eller asfaltsbruks, egenskaper vid lågatemperaturer. Beskriver hur mycket last ett bitumen tåler innan det når brott vid låga temperaturer.
Rigdgångrum	Ett mått på hålrummet i ett packat fillermaterial.
RTFOT	En metod för att simulera åldringen av bitumen som sked vid asfaltstillverkning på varmverk.
Spårbildning	En vanlig form av skada på asfaltsvägar. Skadan beror på dåliga egenskaper vid höga temperaturer.

Superpositioneringsprincipen	Ett samband som utnyttjas vid utvärdering av bitumen. Det utgår från att materialet kommer att bete sig likadant vid exempelvis låga temperaturer och höga frekvenser. s
t-hög	Gränsvärde som återfinns i den amerikanska standarden Superpave. Anger den övre temperaturen som är lämplig för ett bitumen för att minimera risken för spårbildning.
t-medel	Gränsvärde som återfinns i den amerikanska standarden Superpave. Ger ett mått på ett bitumens motståndskraft mot utmattningskador.
t-låg	Gränsvärde som återfinns i den amerikanska standarden Superpave. Anger den lägre temperaturen som är lämplig för ett bitumen för att minimera risken för krackelering.
Termoplastisk	Ett material med temperaturberoende egenskaper.
Viskoelastiskt	Ett material som uppvisar både viskösa och elastiska egenskaper.
Viskositet	Ett mått på en vätskas motstånd mot strömning.

Inledning

1.1. Bakgrund

Traditionellt har bitumens egenskaper utvärderats med hjälp av tester som: mjukpunkt och penetrationstal. Dessa fysiska egenskaper har sedan kopplats till en asfaltkonstruktions prestation med hjälp av empiri. Dock kan dessa tester endast kontrollera bitumens egenskaper vid en given temperatur, tid och belastning. Testerna saknar även möjligheten att ge en konkret utvärdering av de effekter som inblandningen av olika tillsatser i bitumen medför. För att ge en möjlighet till provning av dessa blandningar, och för att ge en mer omfattande bild av materialets egenskaper har det undersökts om det är möjligt att kvantifiera dessa effekter med en DSR. (Soenen & Teugels, 1999; Chen et. al., 2008; Liao et. al., 2013a; Liao et. al., 2013b)

Den enskilt viktigaste komponenten i asfalt är bitumen, som är med mjukpunkt och penetrationstal relativt enkelt att beskriva och undersöka. Därför har historiskt frågor om asfaltkvalitet haft mycket fokus på bitumen. Det har varit bekvämt och effektivt. Men egentligen är det egenskaperna hos bruket som bildas av bitumen och filler som avgör asfaltens eftergivlighet, stabilitet och hållbarhet (Soenen & Teugels, 1999; Chen et. al., 2008; Liao et. al., 2013a; Liao et. al., 2013b). Troligtvis är anledningen till att brukets egenskaper inte beskrivs i gällande regelverken eftersom det har saknats mätmetoder med tillräcklig precision och repeterbarhet och kopplingar till erfarenheter från fältet. Studien görs då det, enligt författaren, är asfaltsbruk inte bitumen som är av intresse för att förutspå en asfaltmassas egenskaper.

Superpave är ett klassificeringssystem för bitumen i USA, som utgår från klimatiska förutsättningar och trafikbelastningar. Med lanseringen av Superpave för 25 år sedan kom en vardaglig användning av ett mätinstrument för oscillerande mätning av viskoelastiska egenskaper hos bitumen, DSR, som hittills mest förekommit inom forskarvärlden och avancerad materialutveckling inom industrin (Mahboub, 2004). Europeiska forskare har undersökt asfaltbruk med hjälp av DSR. Två examensarbeten (Haxhibeqiri & Mouhsen, 2017; Håkansson & Härstedt, 2015) på LTH har studerat asfaltbruk på samma sätt som bitumen. Resultaten visar att asfaltbruk har reologiska egenskaper som kan liknas vid rent bitumen och att resultaten kan användas för bedömning av asfaltbruk på motsvarande sätt som bitumen i Superpave. Mängd och typ av filler är avgörande för asfaltbrukets egenskaper. Det saknas emellertid ett beskrivet förfarande för provning och utvärdering. Examensarbetena har gjort en hel del förarbete men mycket återstår innan undersökning av asfaltbruk kan komma till praktisk användning i proportionering av asfaltbeläggningar.

1.2. Syfte

Studien ämnar ge en sammanställd bild av den information som finns tillgänglig kring asfaltsbruk i form av en litteraturstudie.

Studien har som syfte att studera viskoelastiska- och deformationsegenskaper hos asfaltsbruk och bitumen, samt hur relevanta egenskaper skall redovisas. Arbetet ämnar även undersöka om samma LVE-gränser som används för DSR-tester på bitumen går att använda vid tester på asfaltsbruk. Detta kommer att ske med dynamiska sveptest och statisk krypprovning. Avsikten är att undersöka effekten av olika mängder och typ av bruksskapande tillsatser. Studien ämnar även att undersöka möjligheten till att använda sig av Masterkurvor byggnad med WLF och en modifierad Sigmoidal-modell för fasvinkel. Resultatet ska mynna ut i ett protokoll för viskoelastisk provning av asfaltsbruk.

Följande frågeställning ska besvaras:

- Går det att använda samma LVE-gränser för asfaltsbruk som för bitumen
- Hur påverkas asfaltsbruk av filler typ och mängd
 - Deformations egenskaper
 - Duktilitet
 - Gränsvärden enligt Superpave, omtolkade från bitumen till asfaltsbruk
- Går det att skapa masterkurvor, för G^* och fasvinkel, för asfaltsbruk
- Varför ger olika fillertyper olika egenskaper hos ett asfaltsbruk

1.3. Avgränsning

Studien är begränsad till fyra olika typer av bruksskapande tillsatser; två granitfiller, en kalkfiller och portlandcement. De mineralfiller som använts i studien har valts då de är dessa som är de vanligaste hos Skanska i regionen. Kalk och cement har också undersökts i studien då dessa är vanliga tillsatser vid blandning av asfaltsbruk. Arbetet kommer även att begränsas till fyra olika inblandningsmängder; 25%, 34%, 39,2% och 42,9%. Dessa mängder är grundade i tidigare examensarbeten utförda på LTH, varje inblandnings andel ämnar höja blandningens mjukpunkt med 10°C (Haxhibeqiri & Mouhsen, 2017; Håkansson & Härstedt, 2015). Anledningen till varför det i studien har använts intervallet 25 – 42,9% är att det är inom detta intervall ett vanligt asfaltsbruk ligger.

Studien kommer inte att behandla åldrade prover i någon utsträckning, varken återvunnet material eller material som har åldrats i labb.

1.4. Metod

För att ge läsaren en grund att stå på för att förstå resonemang och slutsatser dragna av och kring resultatet i studien inleds det med en omfattande litteraturstudie. Litteraturstudien är en genomgång och sammanfattning av tillgängliga publikationer på de ämnen som är relevanta för studien. I studien fattades beslutet att endast utgå från publicerade artiklar och doktorsavhandlingar.

I studien används en dynamisk skjuv rheometer (DSR). Alla tester som utförs i studien sker enligt Kap.3.

1.5. Rapportens disposition

Studien inleds med en litteraturstudie som ämnar att samla befintlig kunskap kring området och ge underlag för analys av resultat från tester. Den ämnar även ge läsaren möjlighet att förstå och sätta sig in i resultaten, och ge en grund för läsaren att sätta sig in i ämnet och hur ämnet kopplar till egenskaperna hos en asfaltsmassa. Sedan följer en omfattande genomgång av det testprotokoll som i denna och tidigare studier för provning med DSR har utvecklats på LTH. I detta testprotokoll ingår information om framtagning av provkroppar, dock saknas information om programmering av DSR:n. Detta har valts att inte redovisas då detta är unikt för varje utgåva av styrmjukvaran för DSR:n. Efter testprotokollet följer en redovisning av all data som har tagits fram i studien. Den information som redovisas i detta kapitel, Kap.4, är en sammanställning av de rådata som redovisas i bilaga 1-6. Studien avslutas med en diskussion av resultatet och de metoder som har använts i studien. Diskussionen är gjord med avstamp i den frågeställning som presenteras i studiens syfte. Diskussionen avslutas med en del rekommendationer för praktisk tillämpning och fortsatta studier. Rekommendationerna för praktisk tillämpning utgår från de resonemang som förs i både litteraturstudien och diskussionen.

2. Litteraturstudie

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

2.1. Asfalt

En stor del av Sveriges vägnät är belagt med asfalt. Asfalt är väldigt populärt som slitlager på vägar i Sverige då det medger en flexibel överbyggnad som är vattentålig och har elastiska egenskaper som medger återhämtning efter deformationer. (Agardh & Parhamifar, 2014)

Asfalt består till huvuddel av tre materielgrupper: Bitumen, Filler och Stenmaterial. Stenmaterialet utgörs av antingen krossad sten eller natursten. Krossmaterial är det vanligaste då natursten anses vara en ändlig produkt, grusåsar anses viktiga för att rena och förvara grundvatten. I viktprocent består en asfaltsbeläggning ungefär av 95% sten. Eftersom sten är det vanligast förekommande materialet, i en asfaltsmassa, är en asfalts egenskaper starkt bundna till de egenskaper som stenmaterialet har. Detta gäller framförallt hållfastheten hos asfalten (Agardh & Parhamifar, 2014). Stenmaterialets sammansättning och styrka väljs med avseende på de trafiklaster som ska överföras till underlaget. I Norden måste hänsyn tas till dubbtrafiken vid val av stenmaterial.

Vägens konstruktion beror mycket på vilka typer av belastningar och förhållanden som påverkar vägen. Dessa förhållanden varierar beroende på trafikmängd, trafiktyper, klimat och geologiska förutsättningar. Asfaltens uppbyggnad kan förändras med: storlek på stenmaterial, bitumen halt, bitumen typ och filler mängd. Det kan även förekomma tillsatser som vidhäftningsmedel eller färg. (Granhage, 2009)

2.2. Bitumen

Bitumen är det kitt i asfaltsmassan som binder samman stenaggregatet. Bitumen är ett mörkbrunt till svart fast till halvfast material. Bitumen raffinerar vanligtvis från petroleum och består huvudsakligen av korta kolvätekedjor. (Agardh & Parhamifar, 2014)

Den viktigaste komponenten i asfalt, som ger materialet dess karaktär, är bitumen. Typen av bitumen måste väljas med omsorg utifrån klimatförutsättningar och trafiklast.

Bitumens huvudsakliga uppgift i en asfaltsbeläggning är att fungera som kitt, skydda stenmaterialet från krossning, ge konstruktionen förbättrad lastfördelande egenskaper, och elastiska och viskösa egenskaper. Bitumens elastiska egenskaper ger konstruktionen en möjlighet att återhämta sig efter deformationer. De viskösa egenskaperna som bitumen ger konstruktionen ger beläggningen förmågan att forma sig efter rörelser utan att gå till brott. Med andra ord gör bitumen beläggningen flexibel. (Agardh & Parhamifar, 2014)

Bitumen ger asfaltmassan resistens mot stensläpp, krackelering och spårbildning. Både krackelering och spårbildningen är starkt beroende av bitumens viskoelastiska egenskaper. (VTI, 2018)

Bitumen är en termoplastiskt, viskoelastisk vätska som beter sig som en elastisk solid vid låga temperaturer och/eller vid korta belastningar, och som en viskös vätska vid höga temperaturer och/eller vid långsamma belastningar. Bitumen är alltså beroende av både temperatur och lasttid, med denna vetskap kan då bitumens reologiska egenskaper beskrivas av spänning-, töjnings-, tids- och temperaturs respons. (Hunter, et. al., 2015)

2.2.1. Bitumensammansättning

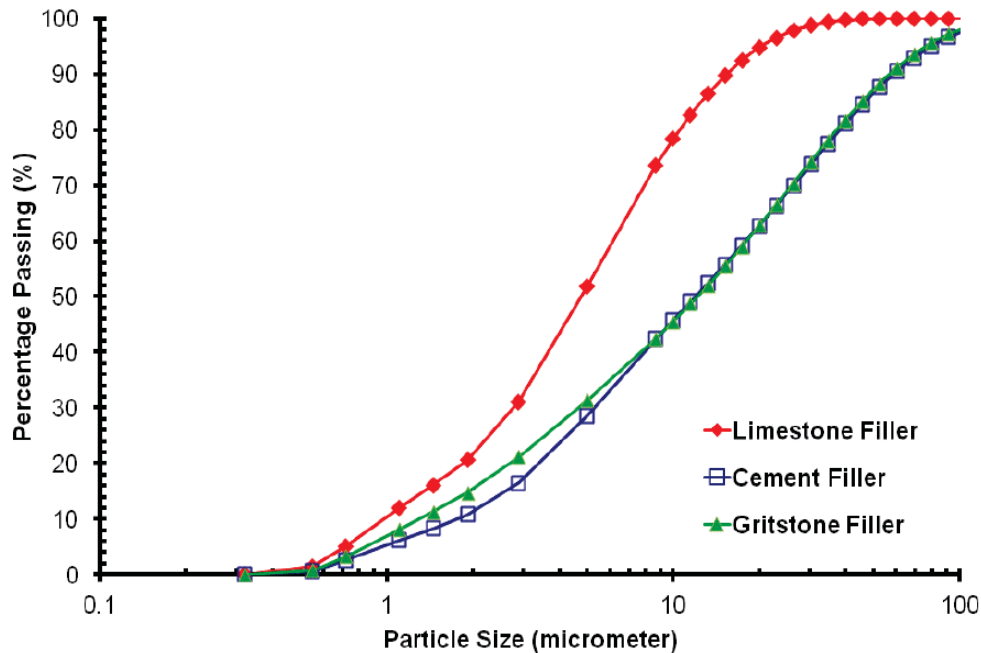
Bitumen utgörs till största del av korta kolvätekedjor. Kol och väte utgör ungefär 90-99 % av massprocenten i bitumen. Bitumen brukar även bestå av svavel, syre och kväve. Dessa ämnen kompletteras även vanligtvis med en del oorganiska salter och oxider, till exempel järn, magnesium, nickel och kalcium. (Read & Whiteoak, 2015)

Den precisa sammansättningen av bitumen varierar beroende på var råoljan kommer ifrån. Den kemiska sammansättningen är väldigt komplex, där av anses sällan en komplett kemiskanalys vara av intresse. Istället för kemiska analyser är det kutym att dela bitumen i två breda kemiska grupperingar. Något som är värt att anmärka är dock att dessa grupper inte väl definierade, och det förekommer en del överlapp mellan dem. De huvudsakliga grupperingarna är: *asphaltenes* och *maltenes*. *Maltenerna* kan sedan delas in i ytterligare tre under grupper, *Saturares*, *aromatics* och *resins*. Denna indelning görs för att förenkla ett annars väldigt komplext material, och för att kunna tilldela bitumens reologiska egenskaper till bredare kemiska grupperingar. (Hunter, et. al., 2015)

2.3. Filler

Filler utgör den finkorniga delen av stenmaterialet i en asfaltmassa och spelar tillsammans med bitumen en viktig roll. Vid produktion av asfalt avskiljs fillern från resterande stenmaterial under uppvärmningen av materialet, fillern understiger då oftast 0,125 mm. 0,125 mm används ofta som gräns vid undersökningar av materialet (SS-EN 13179-1). Av provtekniska skäl används i denna studie material mindre än 0,063 mm (Tyllgren, 2018). I Figur 2.3-1 redovisas ett exempel på kornfördelningskurvan för tre olika fillermaterial.

Fillerns huvudsakliga uppgift är att tillsammans med bindemedlet fylla de hålrum som skapas av de större stenfraktionerna i asfaltsbeläggningen och binda samman de större stenfraktionerna. Fillern och bindemedlet ger då asfaltsbeläggningen en god hållfasthet och beständighet. Då fillern blandas med bitumen ges en blandning med högre viskositet än bara bitumen. Filler kan även användas för att förbättra den färdiga beläggningens stabilitet. (Agardh & Parhamifar, 2014)



Figur 2.3-1 - Exempel på partikelstorlek för olika fillermaterial. (Liao et. al., 2013a)

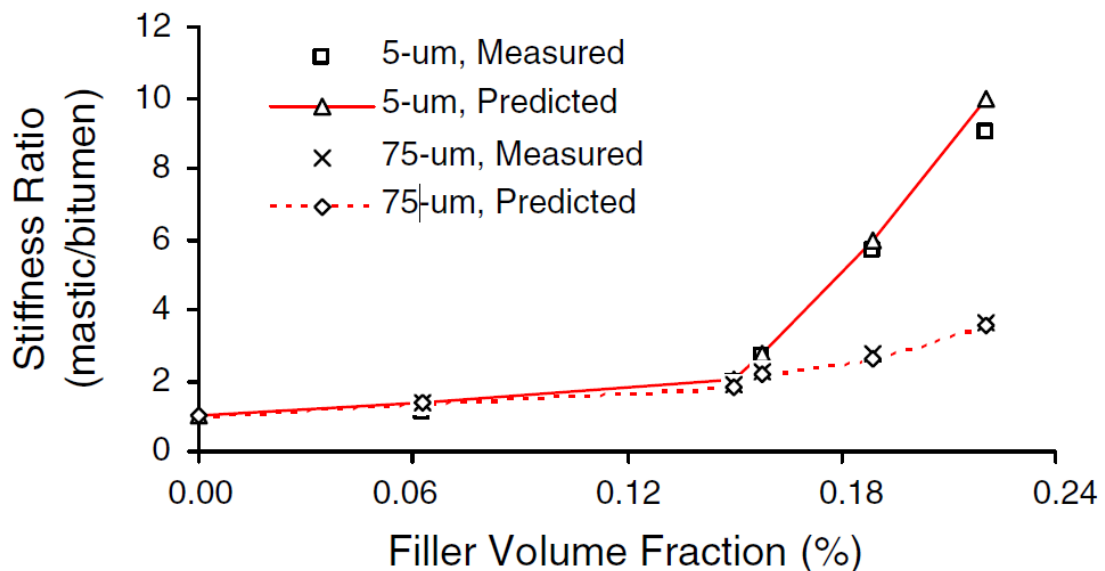
2.4. Asfaltsbruk

Asfaltsbruk är det material som fås av att blanda bitumen, fillermaterial och eventuella tillsatsmedel, exempelvis polymerer och fibrer. Materialets egenskaper varierar mycket beroende på typ av bindemedel, typ av filler och kvoten filler/bitumen. Enligt Kavussi och Hicks (1997) kan effekterna av kemiskareaktioner mellan de ingående materialen anses vara obefintliga eller försumbara. De anser att det framförallt är Rigidhållrummet hos fillern som bestämmer hur filler kommer att påverka bitumen. Högre Rigidhållrum ger ett styvare asfaltsbruk. Gällande den kemiska reaktionen mellan filler och bitumen menar Liao et. al. (2013a) att det finns belägg för att filler med mer reaktiva komponenter har en stark påverkan. Effekterna av en mer reaktiv filler är framförallt märkbar för de reologiska egenskaperna hos asfaltsbruk vid höga temperaturer. De anger dock att detta gäller då ett reaktivt bitumen paras med den aktiva fillern.

Ett asfaltsbruks egenskaper är starkt bundna till egenskaperna hos bindemedlet och fillern som använts. Vid låga volymer av filler kan även asfaltsbruk, likt bitumen, ses som en newtonsk vätska, men vid större andelar, då partiklarna i asfaltsbruket ges möjligheten interagera, kommer materialet att bete sig som en icke-newtonsk vätska (Hesami et. al., 2014). Enligt Chen et. al. (2008) påverkas asfaltsbrukets egenskaper av hur bitumen binder till fillerns yta, ett finare fillermaterial har större area per gram för bindemedlet att interagera med.

Vikten av fillerns och bindemedlets samverkan i asfaltsbruket är något som studerats ingående. Nästan alla egenskaperna hos den färdig asfaltsmassan är starkt påverkade av de tekniska egenskaperna av asfaltsbruket. Vid tillverkning fungerar asfaltsbruket som ett smörjmedel för det större stenmaterialet. Asfaltsbrukets egenskaper kan vid tillverkning påverka både asfaltsmaterialets stabilitet och hållrumshalt. Vid transport och utläggning av asfaltsmassorna måste asfaltsbruket vara styvt nog för att motverka separation av bindemedlet och det grövre stenmaterialet. Öppna beläggningar, exempelvis ABD-beläggningar, är extra känsliga för separation av bindemedlet om asfaltsbruket inte är styvt nog. I en färdig beläggning påverkar asfaltsbrukets styvhet asfaltens möjlighet att motstå spårbildning vid höga temperaturer, och dess utmattningsegenskaper vid mellanliggande temperaturer. (Chen et. al., 2008)

Om mängden fyller i ett asfaltsbruk hålls låg kan asfaltsbrukets viskösa och elastiska egenskaper liknas vid de hos bitumen. Enligt Liao et. al. (2013a) börjar partiklarna påverka varandra när andelen fyller i bruket börjar närma sig 65 vikt%, i Liao et. al. (2013a)s studie motsvarade detta cirka 40 volym%. Vid dessa inblandningshalter kan fillern ses som ett skelett för bitumen. Detta leder till att blandningens egenskaper inte längre liknar egenskaperna hos ett vanligt bitumen. Enligt Chen et. al. (2008) går det att observera ett liknande fenomen redan vid 15 volym% fyller. Detta fenomen illustreras i Figur 2.4-1. Chen et. al. (2008) menar att det troligtvis är vid denna andel fyller som partiklarna utgör en tillräckligt stor andel av materialet för att de ska börja interagera med varandra. Detta leder till att asfaltsbruket blir mycket mer fyllerberoende. Chen et. al. (2008) visar även på hur fillers påverkan på bitumen är starkt beroende av storleken på fillermaterialet. Detta fenomen illustreras även det i Figur 2.4-1. De mindre fyllerpartiklarna har en större kontaktarea än de större partiklarna, i deras fall $6.78 \text{ m}^2/\text{g}$ för partiklar med radie $5 \mu\text{m}$ jämfört med $0.69 \text{ m}^2/\text{g}$ för partiklar med radie $75 \mu\text{m}$.



Figur 2.4-1 - Fillermaterialets storleks påverkan på asfaltsbruk (Chen et. al., 2008)

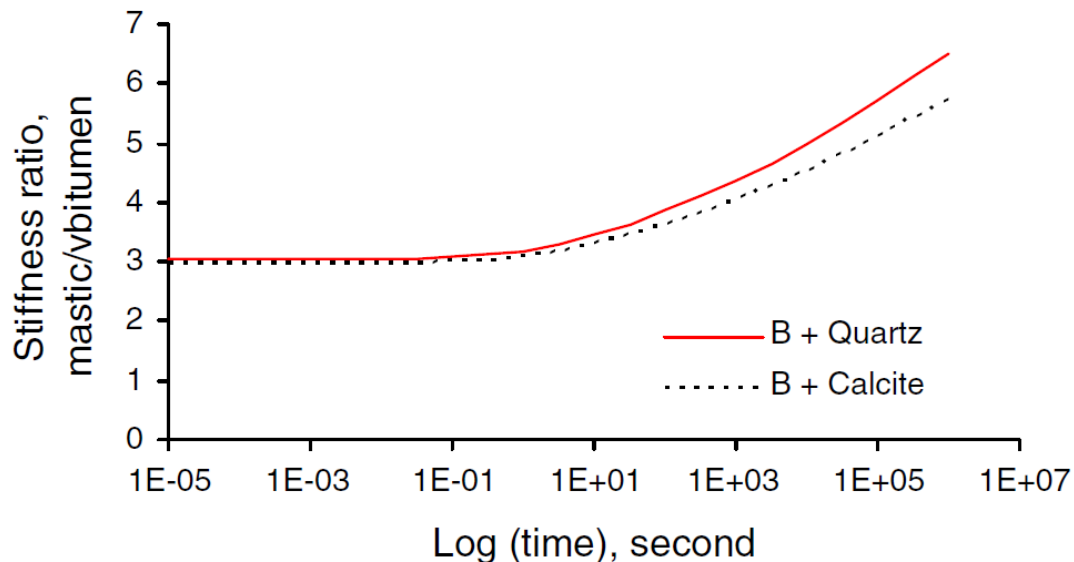
Vid blandning av asfaltsbruk för asfaltsmassor bör det här tas hänsyn till fillerns storlek, om en tillsätter samma mängd av fyller för partiklar med radie $5 \mu\text{m}$ som ett material med radie $75 \mu\text{m}$ kommer det leda till ett material som är mycket svårare att packa. (Chen et. al., 2008)

Det har länge varit känt att det är interaktionen mellan de grövre stenpartiklarna i asfaltsmassan som är vad som avgör materialets motstånd mot spårbildning. Vad som lätt överses vid detta antagande är att innan stenmaterialet kan interagera måste de passera genom det lager asfaltsbruk som binder de samman. Av denna anledning bör även asfaltsbrukets motstånd till deformation, och reologiska egenskaper beaktas. De studier som publicerats på ämnet, asfaltsbruksreologi, visar alla på att en högre koncentration fyller relativt till mängden bitumen skapar ett asfaltsbruk som kommer att vara mer spårbildningsresistent. (Chen et. al., 2008)

2.4.1. Samverkan bitumen och fyller

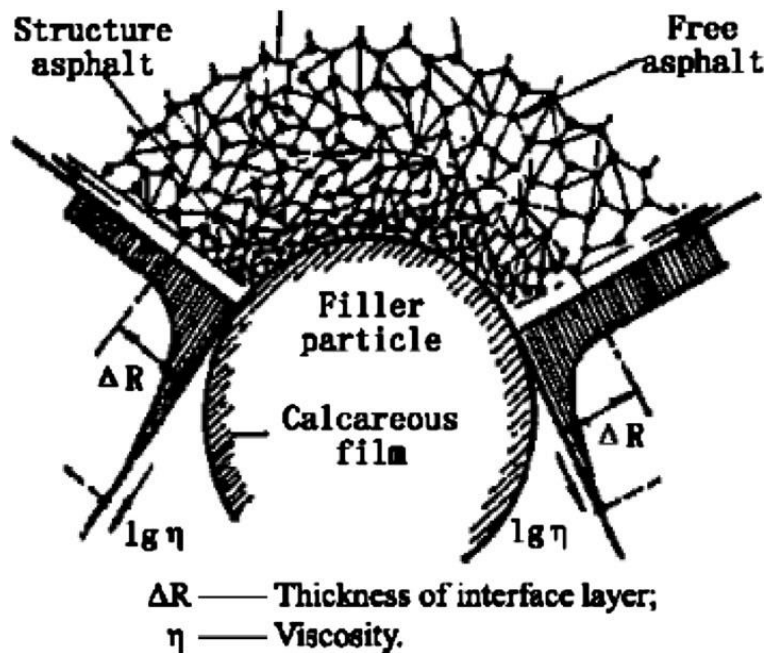
Chen et. al. (2008) har kunnat påvisa att fillers, vid normala inblandningshalter (ca 36 vol-%), påverkan på asfaltsbrukets styvhet är försumbar vid korta lasttider. Detta förklaras med att vid dessa korta lasttider är bitumen elastiskt dominant nog att det inte låter partiklarna interagera. Detta betyder att bitumen själv tar alla laster. Detta fenomen illustreras i Figur 2.4-2.

I Figur 2.4-2 ställs styvhetsration från fillern mot lasttid. Med grund i tid-temperatur superpositioneringsprincipen menar Chen et. al. (2008) att detta fenomen kan tolkas om till temperatur. Detta betyder att en filler inte skulle påverka ett asfaltsbruks egenskaper lika mycket vid låga temperaturer som vid höga. Anledningen till att effekten av filler blir större vid högre temperaturer är att bitumen övergår till ett mer visköst material medan fillern förblir opåverkad och fortsätter agera elastiskt (Chen et. al., 2008).



Figur 2.4-2 - Fillers påverkan av asfaltsbruk beroende på lasttid (Chen et. al., 2008)

Hesami et. al. (2014) hypotiserar att fillers påverkan på asfaltbruks reologi delvis beror på att när fillern binder till bitumen förändrar fillern det kringliggande bitumens reologi. Detta betyder att det bitumen som befinner sig kring fillern kommer att få andra egenskaper vad gäller exempelvis viskositet och styvhet. De hävdar även att dessa förändrade egenskaper kan manipuleras genom att variera fillermaterialets utformning och storlek. Hesami et. al. (2014) menar att denna påverkan som fillern har på bitumen kommer att vara avtagande med avstånd från fillerpartiklen, detta illustreras i Figur 2.4-3. Detta resonemang lades fram redan av Ridgen år 1947 och har sedan dess stått som den huvudsakliga förklaringen till hur filler påverkar ett asfaltsbruk (Clopotel et. al., 2012). Enligt Clopotel et. al. (2012) presenterar Ridgen i sin publikation från 1947 hypotesen om ett influenslager av bitumen som binder sig till fillern. Det är detta influenslager som påverkar asfaltsbrukets egenskaper. I samma studie presenterar Ridgen även en metod för att definiera den influerade volymen bitumen. Denna volym benämns vanligen som Rigdenhållrum och kommer i detta arbete att behandlas vidare i Kap.2.4.2.



Figur 2.4-3 - Illustration över hur filler interagerar med bitumen (Hesami et. al., 2014)

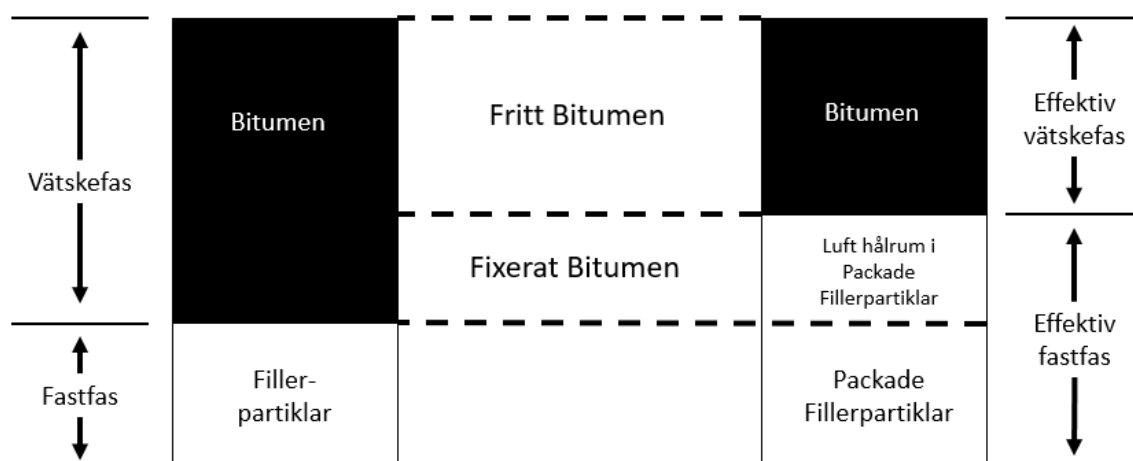
Enligt hypotesen framlagd av Hesami et. al. (2014) kommer de reologiska egenskaperna hos asfaltsbruket att vara starkt bundna till hur fillermaterialets och bitumens kopplingar ser ut. Hur bitumen och fillerpartiklarna samverkar kan, enligt Hesami et. al. (2014), delas upp i tre huvudgrupper: (1) Armering av bitumen till följd av fillerpartiklarna, (2) den fysokemiska interaktionen mellan filler och bitumen, och (3) partikel-partikelinteraktion. Fysiochemisk förstärkning mellan bitumen och filler bildar ett adsorberat lager av bitumen och ett influerat bitumenlager kring fillerpartiklarna. Denna effekt är beroende på hur fillern interagerar med bitumen, detta betyder att en bör ta hänsyn till storleken av den influerade mängden bitumen, och inte bara storleken på fillern, vid framtagande av asfaltsbruk.

Detta betyder att en mindre mängd av en filler med finare material, men en mer aktiv yta, kan ge samma effekt som en större filler. Det är detta fenomen som Hesami et. al. (2014) menar förklarar fenomenet som även Chen et. al. (2008) observerar i sin studie, samma mängd av olika filler kan ge olika resultat. Chen et. al. (2008) förklarar i sin studie fenomenet med att en mindre fillerpartikel ger bitumen en större totalyta att interagera med. Hesami et. al. (2014) menar att finare fillerpartiklar kommer att ha en större inverkan då de kommer att medge en ökad interaktion mellan bitumen och filler, som Chen et. al. (2008) också hävdar. Hesami et. al. (2014) går dock ett steg lägre och tillskriver effekten till mängden adsorberat bitumen, som också ökar när partikelstorlek i fillern minskar.

Det influerade lagret har också en "rundandeeffekt" på fillern enligt Hesami et. al. (2014). Detta betyder att fillerpartiklarna lättare kan rotera i bitumen eftersom bitumen inte påverkar det influerade lagret lika mycket som det skulle påverka en fri partikel. Den rundandeeffekten skapas av den sfär som bitumen skapar kring partiklarna. Detta kommer att leda till ett minskat motstånd mot flöde i asfaltsbruket. (Hesami et. al., 2014)

2.4.2. Rigdenhållrum

Rigdenhållrum är ett mått på volymen bitumen som direkt påverkas av fillern som tillsätts för att skapa ett asfaltsbruk. Denna volym refereras vanligen till som Rigdenhållrum eller influerad volym. Denna volym kan bestämmas för en filler, den ger ett mått på hur mycket av fillern är hållrum. Enligt Clopotel et. al. (2012) menade Rigden att den mängd bitumen som fyller ett opackat fillers hållrum motsvarar volymen av det influerade bitumen. Genom detta antagande kan en då mäta mängden influerat bitumen genom att mäta hållrumshalten i fillern. (Clopotel et. al., 2012). Detta fenomen illustreras i Figur 2.4-4.



Figur 2.4-4 - Schematisk representation av Rigden modellen (Clopotel et. al., 2012)

Sen modellen togs fram har Rigdenhållrum använts för att kvantifiera en fillers inverkan på egenskaperna hos ett asfaltsbruk (Liao et. al., 2013a; Liao et. al., 2013b; Micaelo et. al., 2017; Faheem & Bahia, 2010; Hesami et. al., 2014). Modellen har kompletterats av exempelvis Tunnicliff (1962) som lade fram teorin att inverkan av fillern vad avtagande med avståndet från partikeln, detta illustreras i Figur 2.4-3 (Clopotel et. al., 2012).

Flera studier har utförts där de har undersökt rigdenhållrummet hos olika fillermaterial. Liao et. al. (2013a) har utfört en studie där de har mätt rigdenhållrummet för sandsten, kalk och cement. I deras studie redovisas värden för samma eller liknande fillertyper som undersökts i denna studie. Resultaten av denna studie redovisas i Tabell 2.4-1.

Begreppet effektiv volym brukar användas som proxy-värde för att kvantifiera effekterna av en fillers påverkan på ett asfaltsbruk. Effektiv volym är volymen filler och ett adsorberat lager bitumen kring partiklarna. (Liao et. al., 2013a)

$$V_e = \left[\frac{100}{1 - \text{Rigdenhållrum}} \right] * V_f \quad (1)$$

$$V_e = \text{Effektiv volym}$$

$$V_f = \text{Volym filler}$$

Tabell 2.4-1 - Rigdenhållrum och Effektiv volym (Liao et. al, 2013a)

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

2.5. Superpave

Superpave är ett kategoriserings- och testningssystem framtaget av *Strategic Highway Research Program (SHRP)*. Kategoriseringen ämnas för varmtillverkad asfalt och grundar sig i de mekaniska egenskaperna hos asfaltsmassan och de ingående materialen. Superpave är en akronym för *Superior Performing Asphalt Pavements*. Det kanske mest framträdande med standarden är dess kategoriseringssystem för bitumen. Systemet togs fram för att beskriva beläggningens egenskaper vid bruk. Det anses av många att metodologin som används i Superpave är det förtillfället bästa sättet att kategorisera bitumen och asfalt. Dock bör det bemärkas att det är en metodologi som är i ständig utveckling vilket medför att det alltid finns nya metoder som utvärderas och, om de visar sig vara tillförlitliga, införs i standarden. (Mahboub, 2004)

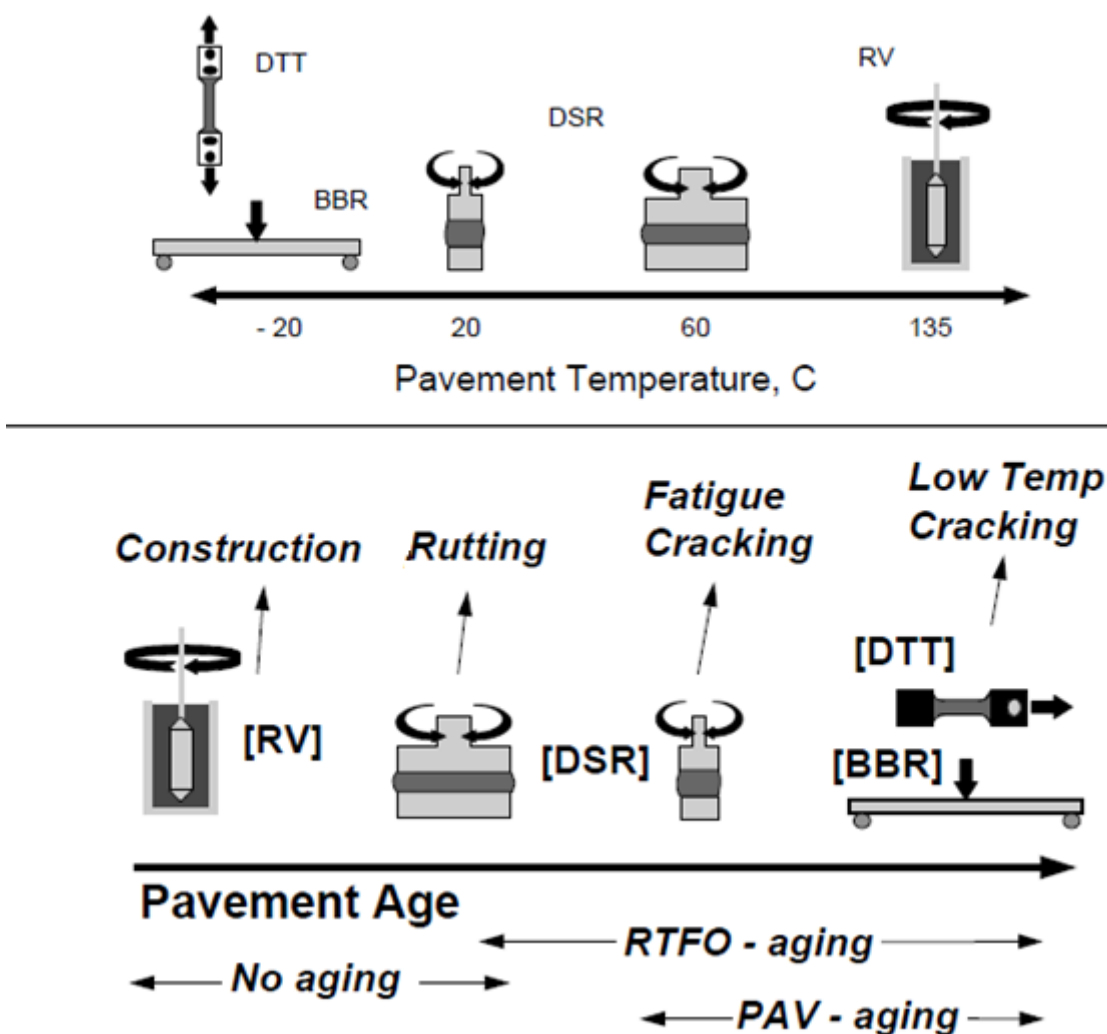
I Superpave används kategoriseringssystemet *Performance grading (PG)* för bitumen. Till skillnad från det gamla systemet med penetrationstal och mjukpunkt grundar sig detta system i tekniska parametrar. Det äldre systemet kategoriserar endast materialet efter dess egenskaper vid en given temperatur, och från denna antas det sedan hög-/lågtemperatursegenskaper. I Superpave kategoriseras bitumen istället efter dess egenskaper vid höga och låga temperaturer, och detta kompletteras sedan även med krav på deformation, motståndskraft och åldringsegenskaper. Testerna görs inom tre temperaturintervall: Hög-, mellanliggande- och lågtemperatur, temperaturintervallen är relativa till den tänkta vägens "brukstemperatur". (Ibid.)

De tester som återfinns i Superpave standarden ämnar framförallt kontrollera tre tekniska egenskaper hos ett bindemedel. Dessa egenskaper är: Spårbildning, Krackelering och utmattning. Bitumens bidrag till asfaltsmassans motståndskraft mot dessa typer av skador kategoriseras genom ett flertal reologiskatester, däribland tester utförda med DSR. Ett exempel av kategorisering av bitumen kan vara PG 64-28, detta bindemedel är passande för förhållanden där temperaturen i asfaltsmaterialet inte överstiger 64°C eller understiger -28°C. (Ibid.)

De tester som återfinns i Superpave standarden för kategorisering av bitumen redovisas i Tabell 2.5-1 och Figur 2.5-1.

Tabell 2.5-1 - Tester för att kategorisering av PG-bindemedel enligt Superpave (Federal Highway Administration, 1994)

Superpave Bindemedelstest	Syfte
Dynamic Shear Rheometer (DSR)	Mäta viskoelastiska egenskaperna vid höga temperaturer och mellanliggande temperaturer.
Rotational Viscometer (RV)	Kontroll av pumpbarhet.
Bending Beam Rheometer (BBR) Direct Tension Tester (DTT)	Mäta egenskaperna vid lågatemperaturer.
Rolling Thin Film Oven (RTFOT) Pressure Aging Vessel (PAV)	Simulera åldrings-egenskaperna hos bindemedlet, RTFOT – åldring vid produktion. PAV – åldring under livstid.



Figur 2.5-1 - Illustration av tester för att kategorisering av PG-bindemedel enligt Superpave (Federal Highway Administration, 1994)

Av dessa tester kan en sedan bestämma t-låg, t-mellan och t-hög. T-hög och t-låg är de temperaturer som anges i benämningen av bitumen enligt PG. Ett bitumen som kategoriseras som PG 64-28 är det bindemedel där T-hög nås vid 64°C och T-låg vid -28°C. T-låg används för att beskriva bitumens möjlighet att motstå temperaturberoende sprickbildning. T-mellan fås från svep med DSR och används för att ge ett mått på bitumens motståndskraft mot krackelering. t-hög testas även den med DSR och används för att kategorisera bindemedlets motstånd mot spårbildning vid höga temperaturer. (Mahboub, 2004)

Genom mätningar med en DSR kan en få både t-mellan och t-hög. t-låg undersöks med BBR. t-mellan definieras som den temperaturen, mellan t-hög och t-låg, var vid förhållandet $G^* \cdot \sin(\delta) \leq 5 \text{ MPa}$ uppfylls. T-hög för ett jungfruligt bitumen bestäms vid den temperaturen var vid $G^* / \sin(\delta) = 1 \text{ kPa}$ för och 2,2 kPa för ett bitumen åldrat med RTFOT. t-låg anger den temperatur då bitumen visar upp en styvhet på $S(t) = 300 \text{ MPa}$ eller $m = 0,300$ i BBR-test. (Hunter, et. al., 2015)

2.6. Reologi

Termen reologi, *Rheology*, uppfanns av professor Bingham vid Lafayette College Indiana. Uttrycket användes för att beskriva studien av deformation och flöde av material som uppvisar både elastiska och viskösa egenskaper. Den första gången definitionen erkändes var när den amerikanska gruppen *The American society of Rheology* grundades år 1929. De första studierna som gjordes i ämnet var kring egenskaperna av material som bitumen, smörjmedel, färg, plast och gummi. (Barnes et. al., 1989)

Reologi är läran om material som befinner sig mellan de två idealtillstånden som beskrivs av *Hook's Law*, för solider, och *Newton's Law*, för vätskor. (Ibid.)

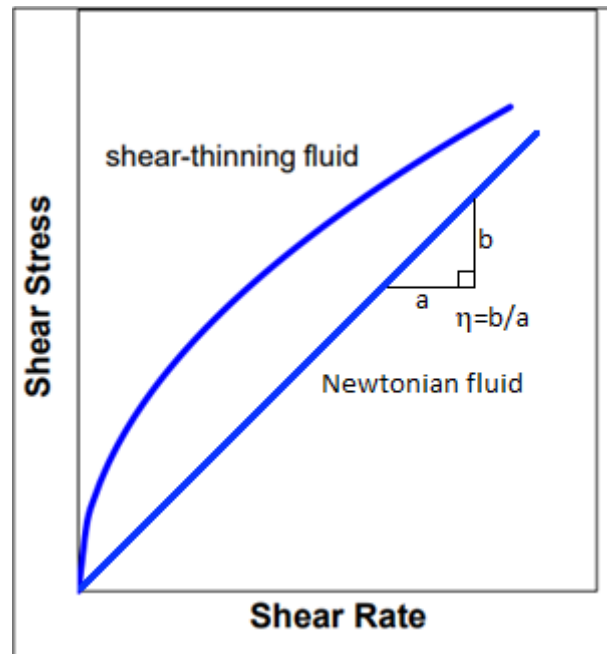
Reologiska egenskaper för bitumen kan mätas med exempelvis en dynamisk skjuvreometer, DSR. Dessa egenskaper kan sedan användas vid produktval och dimensionering av asfaltmassor. (VTI, 2018)

2.6.1. Newtonsk- och icke newtonsk vätska

Vätskor som vatten, etanol och bensen är alla newtonska. Detta betyder att om relationen mellan skjuvspänning och skjuvhastighet, vid en given temperatur, skulle plottas för dessa vätskor skulle förhållandet vara linjärt. Linjen skulle vara rak, med konstant lutning, och starta i origo. Att linjen startar i origo betyder att utan skjuvhastighet kommer det inte att uppstå någon skjuvspänning. Att linjen startar i origo betyder även att om en rörelse startar kommer ett motstånd registreras i vätskan i form av en skjuvspänning. För att ses som Newtonsk skall lutningen vara oberoende av skjuvhastigheten och sambandet beskrivas med en rät linje. Lutningen på linjen är vad som refereras till som vätskans viskositet. (Subramanian, 2002)

Alla vätskor som inte uppfyller kraven för en Newtonskvätska kategoriseras som en icke-newtonskvätska. Ämnet *Reologi* ämnar studera egenskaperna hos dessa vätskor. Generellt kan det sägas att vätskor med hög molekylvikt, exempelvis bitumen (Badre et. al., 2006), är att anse som icke-Newtonska. För dessa vätskor är lutningen på linjen i en skjuvspänning-skjuvhastighet-plott inte konstant när skjuvhastigheten förändras. När viskositeten minskar med en ökad skjuvhastighet klassas vätskan som skjuvförtunnande. I motsatt fall, då viskositeten ökar när vätskan utsätts för en ökande skjuvhastighet, klassas vätskan som skjuvningsförtjockande. Skjuvningsförtunnande beteende är det vanligast av de två. (Subramanian, 2002)

Ett exempel på förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet hos en skjuvförtunnande icke-newtonsk- och en newtonskvätska illustreras i Figur 2.6-1. I figuren går det att observera hur lutningen på den skjuvförtunnande vätskan förändras med en förändring i skjuvhastighet. Detta visar hur viskositeten, η , förändras i vätskan.



Figur 2.6-1 - skjuvspänning och skjuvhastighet hos en skjuvförtunnande icke-newtonsk vätska och en newtonsk vätska (Subramanian, 2002)

2.6.2. Viskositet

Viskositet är ett mått på en vätskas motstånd mot flöde. En vätska med låg viskositet kommer att uppvisa mindre motstånd mot att strömma, rinna, än en vätska med hög viskositet. (Hunter, et. al., 2015)

Viskositet definieras som ration mellan skjuvspänning och skjuvhastigheten. Viskositeten hos alla simpla-vätskor, inklusive bitumen, minskar med en ökad temperatur (Ibid.).

Ibland förekommer termen *Dynamisk viskositet* för att beskriva en vätskas viskositet, η . Det förekommer även tillfällen då denna term används för att beskriva den *komplexa viskositeten*, detta är den viskositet som fås av oscillerande tester, termen används även för att beskriva den reella delen av den komplexa viskositeten. (Mezger, 2014)

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

Absolute dynamisk viskositet är en annan term som används för att beskriva en vätskas viskositet, Denna term används vanligtvis för att referera till den reella delen av den komplexa viskositeten.

Kinematisk viskositet är ett mått på en vätskas viskositet där materialets densitet tas i beaktning (ibid).

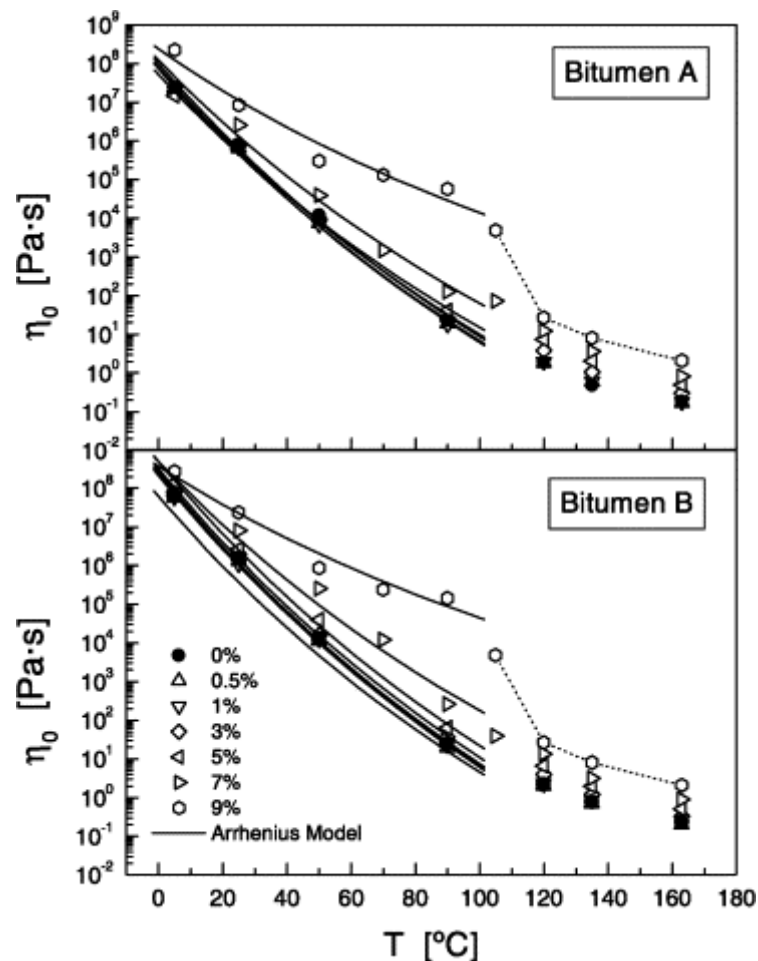
$$\nu = \eta / \rho \text{ [mm}^2\text{/s]}$$

(2)

ν = kinematisk viskositet

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

Hur förhållandet mellan temperatur och viskositet ter sig för bitumen kan ses i Figur 2.6-2. Figuren visar viskositeten hos polymermodifierade bitumen, omodifierat bitumen anges som "0%".



Figur 2.6-2 - Exempel på hur bitumens viskositet påverkas av temperatur (Garcia-Morales, et. al., 2004)

2.6.3. Elasticitet

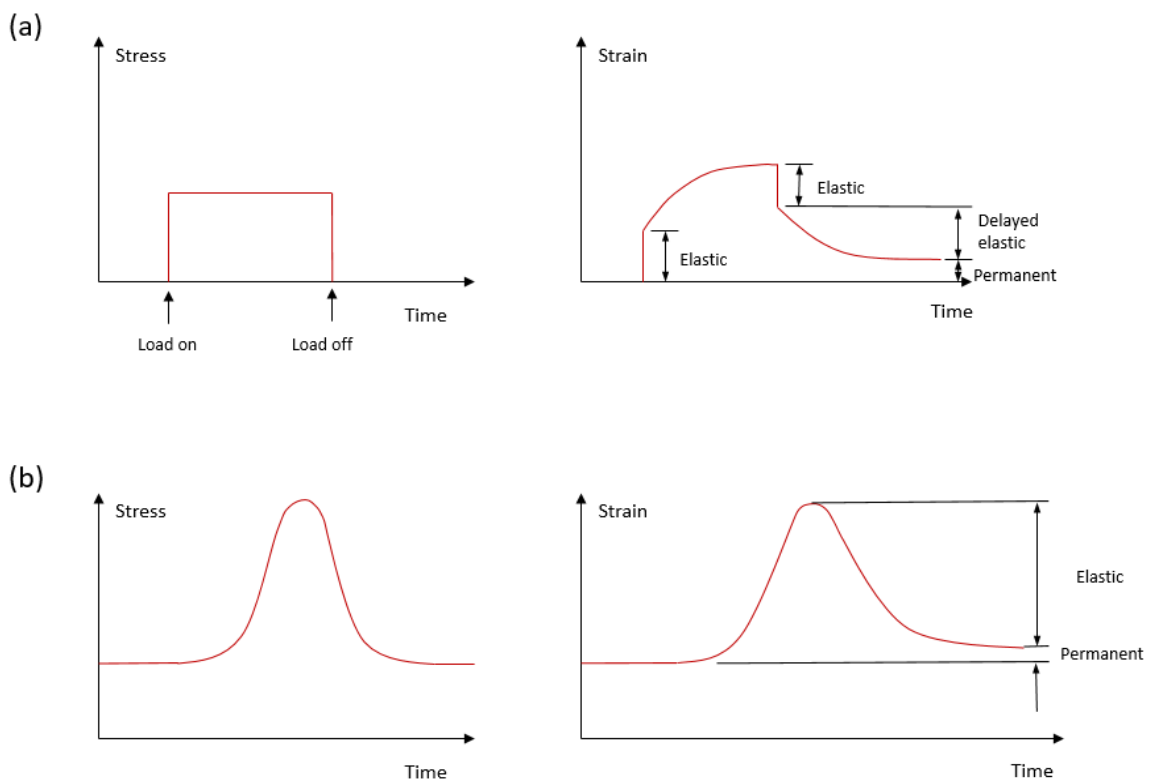
Möjligheten för ett material att under belastning deformeras och efter avlastning återgår till sin ursprungliga form kallas elasticitet. Material som uppvisar denna egenskap refereras till som elastiska. De flesta fasta material uppvisar denna egenskap, och reagerar på en relativt liten spänning med en direktproportionell töjning. Bitumen uppvisar dessa egenskaper vid lågtemperaturer. (Hunter, et. al., 2015)

För de flesta sega material går det att lasta materialet med en spänning stor nog att förhållandet spänning-töjning inte längre kan anses vara proportionellt. Då detta sker kommer deformationen som uppstår inte längre återgå. Gränsen då töjningen inte längre återgår refereras till som elasticitetsgränsen. (Ibid.)

2.6.4. Viskoelasticitet

Vid vila behåller både solider och vätskor sin form; när laster introduceras deformeras materialen, och när lasten tas bort kan deformationen antingen återgå, elastisk, eller vara permanent, viskös. Mellan dessa två ideal kan material uppvisa en blandning av dessa två egenskaper. De material som hamnar emellan idealen refereras till som viskoelastiska material. Viskoelastiska material uppvisar delvis elastiska- och delvis viskösa egenskaper. (Hunter, et. al., 2015)

Viskoelastiska material skiljer sig från plastiska i det att viskoelastiska material uppvisar en tidsberoende återhämtning när en last tas bort från materialet. Detta fenomen refereras ofta till som försenad elastisk återhämtning, *Delayed elastic*, detta fenomen uppvisas inte i plastiska material. Det som anges som permanent deformation i Figur 2.6-3 kan även refereras till som plastisk deformation. Bitumen uppvisar en blandning av viskoelastiska och plastiska egenskaper, detta betyder att en del av deformationen från varje last inte återhämtas. Ackumuleringen av dessa deformationer är vad som sedan leder till spårbildningar i asfaltsbeläggningar, genom att minska den permanenta deformationen från varje belastning kan då spårbildningen i asfaltsbeläggningar minskas. (Ibid.)



Figur 2.6-3 - Viskoelastisk respons av bitumen från a) statisk last, b) dynamisk last (Read & Whiteoak, 2003)

Omodifierat bitumens reologi förhållande kan delas in i tre huvudsakliga grupper:

- Låg temperatur – Linjärelastiska förhållanden
- Hög temperatur – Viskösa förhållanden
- Mellanliggande temperaturer – Viskoelastiska förhållanden

När bitumen utsätts för höga frekvenser, korta lasttider, vid låga temperaturer beter det sig linjärelastiskt, som en elastisk solid. Vid höga temperaturer, men då vid mycket låga frekvenser, långa lasttider, uppvisar bitumen nästan samma egenskaper som en ideal newtonsk vätska. (Hunter, et. al., 2015)

Vid lasttider och temperatur som bitumen utsätts för vid normalt bruk i asfaltsmassor beter det viskoelastiskt. Det är dessa temperaturer och lasttider som refereras till som mellanliggande, *t-mellan*, i Superpave. (Ibid.)

Lågtemperatur egenskaper hos bitumen mäts vanligtvis med en *bending beam rheometer* (BBR). Testet utförs genom att ett prov med bitumen utsätts för en konstant punktlast, motsvarande 100g. Testet ämnar mäta bitumens krypskaper och ämnets förmåga att relaxera spänningar som kommer av temperaturbetingad krympning vid lågtemperaturer.

De viskoelastiska egenskaperna hos bitumen uppvisas, som tidigare nämnt, vid "brukstemperatur". För att kvantifiera bitumens egenskaper vid denna temperatur är det brukligt att använda sig av penetrationstal och mjukpunkt. Dessa mått är dock empiriska och kan inte karakterisera de viskoelastiska egenskaperna hos bitumen, av denna anledning har på senare år DSR-tester börjat göras på bitumen för att kunna beskriva de viskoelastiska egenskaperna. (Ibid.)

2.7. DSR

Konventionella metoder som penetrationstal och mjukpunkt har länge använts för att karakterisera bitumens fysiska egenskaper. Dessa egenskaper har sedan använts för att förutspå den färdiga asfaltsbeläggningens egenskaper. Dock finns det brister i dessa metoder då de endast mäter bitumens egenskaper vid få givna temperaturer och laster.

På senare har det lyfts fram frågor kring egenskaperna hos bitumen-fillerblandningar. Det har då uppstått ett behov av att kunna mäta dessa blandningars egenskaper på ett pålitligt vis, det har visat sig att de traditionella metoderna inte lämpar sig för detta. Av denna anledning har grundläggande reologiska undersökningar av asfaltsbruket börjat utföras. Dessa tester utförs med en DSR. Anledningen till övergången till DSR är att den ger en bredare bild av materialets egenskaper än vad konventionella metoder gör. Detta ska sedan leda till att en på bättre sätt ska kunna fastställa asfaltsmassornas egenskaper. (Liao et. al., 2013a)

För tillfället är oscillations-typ test den vanligaste metoden för att testa bitumens reologiska egenskaper. Generellt utförs dessa tester i det linjära viskoelastiska området (LVE). Den vanligaste metoden för att utföra dessa tester är dynamisk skjuvreometer (DSR). DSR:n utför dessa test genom att påföra en oscillerande spänning eller töjning, amplitud, på en provkropp, exempelvis bitumen. Provkroppen, i puckform, placeras mellan två oscillerande plattor, lasterna appliceras med varierande frekvens och temperatur. Från dessa tester kan en sedan få fram värde för den komplexa skjuvmodulen, G^* , och fasvinkeln, δ . Dessa parametrar kan sedan användas för att beskriva materialets reologiska egenskaper. Den sinusformade lastvariationen kan uttryckas som följer: (Airey, 2002b)

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

Den resulterande töjningen kan beskrivas enligt:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (4)$$

$\gamma_0 = \text{max skjuvkraft}$

$\sigma_0 = \text{Max töjning [Pa]}$

$\omega = \text{vinkelfrekvens [rad/s]}$

$\delta = \text{fasvinkel [grader]}$

Den komplexa skjuvmodulen (G^*) definieras som:

$$G^* = \frac{\sigma^*}{\gamma^*} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e^{i\delta} \quad (5)$$

Ekvationen kan även skrivas som:

$$G^* = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \cos\delta + i \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \sin\delta = G' + iG'' \quad (6)$$

$G^* = \text{Komplex skjuvmodul [Pa]}$

$G' = \text{Elasticitetsmodul [Pa]}$

$G'' = \text{Viskositetsmodul [Pa]}$

Elasticitetsmodulen kan definieras enligt:

$$G' = G^* \cdot \cos\delta \quad (7)$$

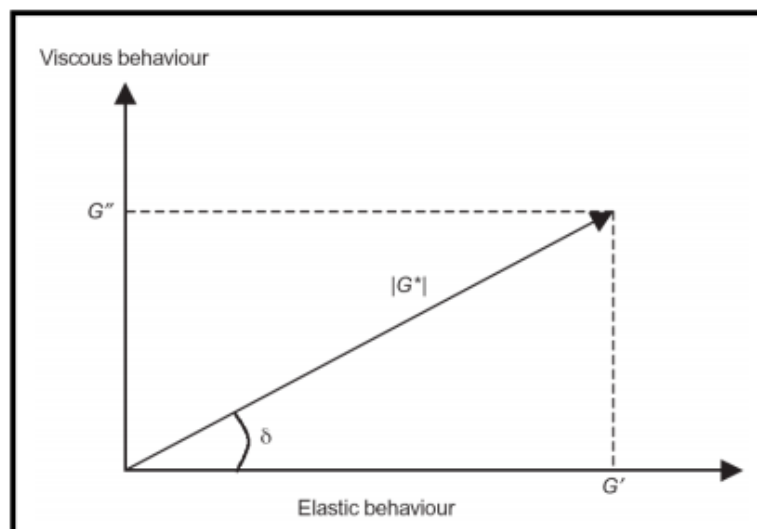
Viskositetsmodul kan definieras enligt:

$$G'' = G^* \cdot \sin\delta \quad (8)$$

De viskoelastiska egenskaperna som DSR mätningarna ger storleken på den komplexa skjuvmodulen ($|G^*|$) och fasvinkeln (δ). Den komplexa skjuvmodulen innehåller en elastisk och en viskös komponent, dessa komponenter är kopplade till den komplexa skjuvmodulen genom fasvinkeln (δ). Fasvinkeln kan beskrivas som fördröjningen mellan den pålagda skjuvkraften och töjningen. Den komplexa skjuvmodulen ger ett mått på det totalamotståndet mot deformation när bitumen utsätts för skjuvning. (Airey, 2002b)

Förhållandet mellan fasvinkel och moduler kan ses i Figur 2.7-1.

Fasvinkeln kan användas som ett mått på den viskoelastiska balansen i materialet. Om $\delta = 90^\circ$ kan materialet anses vara rent visköst, om $\delta = 0^\circ$ kan det anses vara rent elastiskt. Alla material som uppvisar fasvinklar mellan dessa två extremer anses vara viskoelastiska.



Figur 2.7-1 - Förhållandet mellan $|G^*|$, G' , G'' & δ (Airey and Hunter, 2003)

Den komplexa skjuvmodulen och fasvinkeln kan användas för att göra prediktioner gällande asfaltkroppens deformationsbeständighet och utmattningssegenskaper. Den komplexa skjuvmodulen ger ett mått på bitumens deformationsbeständighet, medan fasvinkeln anger det relativa bidraget från de elastiska och viskösa egenskaperna hos materialet. Dessa fundamentala parametrar har länge ansetts vara grundläggande för att förutse asfalts beständighet. Av Denna anledning har de valts att användas som mått på beständighet i det amerikanska styrsystemet *American Superpave binder specifikation*. I detta system har de valt att använda förhållandet $G^*/\sin \delta$ som ett mått på konstruktionens motståndskraft mot sårbildning. (VTI, 2018)

För omodifierat bitumen har förhållandet $G^*/\sin \delta$ kunnat styrkas mot *Hamburg Wheel Tracking* med en korrelationskoefficient på 0.99 som ett mått på motståndskraft mot spårbildning (Ibid.)

En konstruktion med ett högre $G^*/\sin \delta$ kommer att medge en mindre deformation av samma trafikmängd som en konstruktion med lägre $G^*/\sin \delta$ -förhållande. Det är alltså ur spårbildningssynpunkt fördelaktigt med en hög komplex skjuvmodul, G^* , och en lägre fasvinkel, δ . En lägre fasvinkel medges av en mer elastisk deformation. (Ibid.)

Utmattningssprickor är ett problem som generellt uppstår sent i vägkroppens liv, av denna anledning behövs det ett test för bitumen och hur det kommer att åldras. Utmattningsparametern, som valdes för att ge ett mått på mängden energi som konstruktionen kan avleda per last, anges som $G^* \cdot \sin(\delta)$. Båda dessa parametrar är något som kan mätas med DSR. Kravet som ställs idag i SHRP, Strategic Highway Research Program, är att vid en frekvens på 1,59Hz skall $G^* \cdot \sin(\delta) < 5,0 \text{ MPa}$. (Hunter, et. al., 2015)

Figur 2.7-2 visar ett exempel på hur en DSR kan se ut. Just denna är en SmartPave 102 från tillverkaren Anton paar.



Figur 2.7-2 - SmartPave 102, DSR (anton paar, 2017)

2.7.1. Mätteknik

DSR:n mäter bland annat bitumens reologiska egenskaper genom att utsätta materialet för en oscillerande skjuvkraft och töjning. Testet kan utföras genom att kontrollera skjuvkraft eller töjning. Skjuvkraftkontrollerat test är det vanligaste för tester av bitumens dynamiska reologiska egenskaper enligt Yusoff (2012).

Tester på bitumen sker i ett förutbestämt temperaturintervall, och frekvensintervall. Testerna kan utföras antingen mellan 4mm, 8mm eller 25mm plattor. Mätningarna görs från -30 till $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.7.1.1. MSCR

Det antas vara den ackumulerade töjningen i bitumen, från trafiken, som orsakar spårbildningen i asfalt. Det har gjorts flera försök för att ta fram metoder för att kvantifiera bitumens möjlighet att absorbera de ackumulerande lasterna, från trafiken, utan att deformeras. I Superpave:s klassificering av bitumen, PG, används parametern $|G^*|/\sin\delta$. Men det har på senare tid gjorts försök att ersätta denna metod med mer pålitliga mätningar, i ett försök att göra just detta utvecklades tester MSCR. (Wasage, et. al. 2011)

MSCR-testet använder sig av en sekunders laster som följs av nio sekunder av återhämtning. Detta görs först med en last på 0.1 kPa och sedan 3.2 kPa med tio cykler per last. Resultatet från testet används sedan för att beräkna den icke återhämtningsbara deformationen, denna uttrycks vanligen som J_{nr} . och andel återhämtad deformation, R , detta används sedan för att beskriva materialets spårbildningsbenägenhet. J_{nr} beräknas genom att dela den icke återhämtningsbara deformationen med skjuvspänningen. (Ali et. al., 2018)

Anledningen till varför två olika laster används är för att försöka karakterisera bindemedlets prestanda både inom det linjära området och utanför det. När bindemedlet belastas med $0,1\text{ kPa}$ antas det att bindemedlet kommer att befinna sig inom sitt linjära område. Vid laster på $3,2\text{ kPa}$ antas det vara vid den övregränsen av sitt linjära område. (Federal Highway Administration, 2015)

$$R = \gamma_r / \gamma_p * 100 \quad (9)$$

$$\gamma_u = \gamma_p - \gamma_r \quad (10)$$

$$J_{nr} = \gamma_u / \tau \quad (11)$$

$R = \text{Återgång} [\%]$

$\gamma_r = \text{Elastisk töjning}$

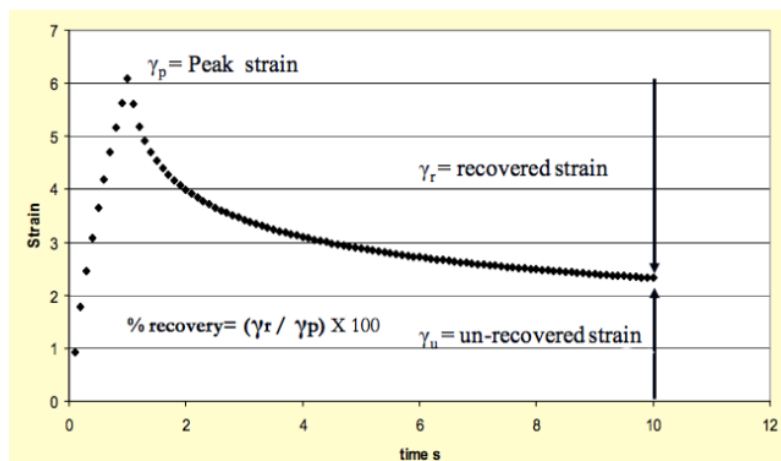
$\gamma_p = \text{Maximal töjning}$

$\gamma_u = \text{Plastisk töjning} [\%]$

$J_{nr} = \text{Kvarstående deformation} [\text{kPa}^{-1}]$

$\tau = \text{Skjuvkraft}$

I Figur 2.7-3 visas ett exempel på hur deformation och återhämtning kan se ut för ett modifierat bitumen.



Figur 2.7-3 - Förhållandet mellan töjning och tid vid last och avlastning (Federal Highway Administration, 2017)

Testet utförs vanligtvis vid den temperatur som överensstämmer med den övre PG gränsen, exempelvis på ett PG 64-22 bitumen skulle testerna göras kring 64°C. Testet utförs med hjälp av en DSR med 25mm plattor, PP25. (ASTM, 2015)

När J_{nr} är beräknat vid den undersökta temperaturen jämförs det värde som mot de gränsvärden som definieras av AASHTO TP 70(AASHOT, 2010). I denna standard ges PG-beteckningen för att bindemedel ett suffix. Detta suffix anger vilken typ av trafik som bitumen lämpar sig för. Fördelen med denna standard jämfört med PG är att det i denna tas hänsyn till trafiktyp, inte bara temperatur.

De suffix som ges kan vara exempelvis PG 64-22 S (AASHTO, 2010). I detta exempel är det ett bitumen som är lämpligt för Standardtrafik inom intervallet $-22^{\circ}\text{C} - 64^{\circ}\text{C}$. De standardsuffix som finns är S-Standard, H-High, V-Very high, E-Extremely High. Dessa är beroende av trafikens; Hastighet, vikt och volym.

För att en vid dimensionering ska välja en högre klass krävs det att ett av kraven, se Tabell 2.7-1, för den högre nivån uppfylls. Detta gäller för alla nivåerna utom den sista, E, för att få föreskriva den skall både kravet för hastighet och antal standardsaxlar uppfyllas.

Tabell 2.7-1 - Trafiktyper för MSCR-laster (AASHOT, 2010)

Trafiktyp	Suffix	Hastighet	Miljoner standardaxlar. (msa)	Krav på J_{nr} (MSCR-test)
Standard	S	> 70 km/h	<10	<4 kPa ⁻¹
High	H	20 – 70 km/h	10-30	<2 kPa ⁻¹
Very High	V	< 20 km/h (Stillastående trafik)	>30	<1 kPa ⁻¹
Extremely High	E	< 20 km/h (Stillastående trafik)	>30	<0,5 kPa ⁻¹

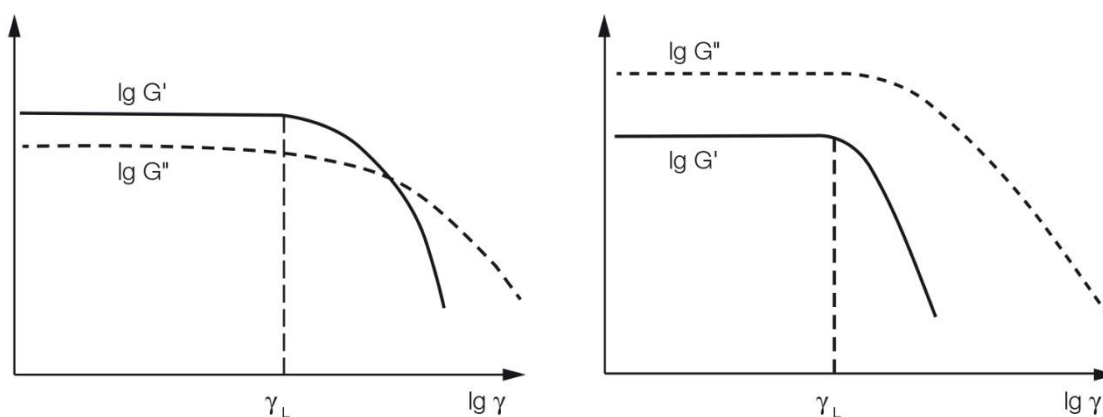
Även om metoden anses vara mer pålitlig än den äldre metoden i Superpave, $|G^*|/\sin\delta$, får den fortfarande kritik. Detta då deformationen från trafik kan anses vara mycket mer komplex än vara den deformation som sker då bitumen utsätts för skjuvspänningar. (Wasage, et. al. 2011)

2.7.1.2. Amplitudsvep

Amplitudsvep är ett oscillerande test. Testet utförs vid varierande amplitud, med konstant frekvens och temperatur. Testet utförs i DSR:n för att fastställa hur stora töjningar materialet tåler utan att testet påverkar provkroppens inre struktur.

Testet utförs vanligtvis för testning av bitumen enligt PG-standard. Det utförs då vid $\omega = 10 \text{ rad/s}$, $f = \omega/(2 * \pi) = 1,6 \text{ Hz}$. Detta antas motsvara frekvensen från ett lastbilsdäck som färdas i 80 km/h (Mezger, 2014). I PG-standardens SHRP, Strategic Highway Research Program, valt att hålla sig till en frekvens. Detta gjordes troligtvis för att hålla nere kostnaden på den utrustning som krävs för att utföra testerna.

Vid låga amplituder uppvisar material ett linjärt viskoelastiskt, LVE, område. Inom detta område uppträder $G'(\gamma)$ - och $G''(\gamma)$ kurvan konstant, nästan oberoende av skjuvspänningen. Detta beteende går att observera i Figur 2.7-4. LVE-området är alltså det område där $\log(G')$ - och $\log(G'')$ värdet är nästan oförändrat då det plottas mot $\log(\gamma)$. Gränsvärdet för LVE-området definieras vanligtvis som det sista värde då $\log(G') > 0,95 * \log(G'_0)$. När mätningar utförs inom detta område antas det att materialet ej kommer att påverkas av mätningarna som utförs, om mätningar görs utanför området finns det risk för att materialet skall ta skada. (Mezger, 2014)



Figur 2.7-4 - Resultat från amplitudsvep på ett GEL-typ material och en vätska (Anton Paar, 2018)

Amplitudsvep utförs oftast för att bestämma det begränsandevärdet av LVE-området. Om skjuvningsfrekvensen hålls lägre än gränsvärdet för LVE-området kommer kurvorna för G' och G'' hålla sig på ett konstant, plant, värde. Detta tolkas som att det inte uppstår någon signifikant förändring i provmaterialets inrestruktur vid dessa frekvenser. Vid mätningar inom LVE-området är det brukligt att tala om icke destruktiva tester. Vid arbete utanför området anses irreversibla skador och rent av brott uppstå på/i provkroppen. (Mezger, 2014)

Anledningen till varför det är av vikt att kontrollera LVE-området är att den gängse definitionen av elastiskt, visköst och viskoelastiskt beteende endast gäller vid linjärt förhållande; det betyder att deformationen vid någon given temperatur och tid är direkt proportionell mot den tillsatta lasten. Vid icke-linjära förhållanden, framförallt för viskösa material, är det extremt svårt att karakterisera materialets egenskaper i ett laboratorium. Icke-linjära förhållanden orsakar även problem när en försöker skapa relevanta och praktiska tekniska modeller för att beskriva materialet. Av denna anledning är modeller oftast begränsade till LVE-området, detta eftersom inom detta område påverkas inte relationen mellan stress, belastning och styvhet av magnituden av stress. (Yusoff, 2012)

Det finns ett flertal olika tekniker för att fastställa det begränsande värdet för LVE-området. Den vanligaste metoden för det är att utgå från G' -funktionen. Detta då det oftast är G' -kurvan som är den första att avvika från LVE-området. Bestämningen av gränsvärdet kan göras manuellt genom att plotta kurvorna och placera två horisontala linjer, en vid G'_0 och en vid $G' = G'_0 * 0,95$. Ett alternativ till detta är att i tabellform skriva ut alla mätvärden och dess korresponderande skjuvspänning. Ur denna tabell förkastas sedan alla värden mindre än $0,95 * G'_0$. Alternativt kan det göras automatiskt om DSR:en har tillgång till mjukvara som direkt kan avgöra dessa gränser. (Mezger, 2014)

Det är rekommenderat att LVE-området undersöks för alla material där LVE-området inte är känt sedan tidigare. Detta för att försäkra sig om att ingen irreversibel skada uppstår när materialet testas. En stor anledning till varför detta skall göras är också för att om mätningar sker utanför området kan inte Hooks law och Newtons law appliceras för att behandla mätdata. (Ibid.)

Det är av vikt att notera att ett gränsvärde för LVE-området som mäts endast är fullständigt pålitligt vid den frekvens det har mätts. Då en ämnar göra mätningar på sin provkropp vid fler frekvenser bör en utföra LVE-undersökningar även vid dessa frekvenser för att försäkra sig om att LVE-området inte har förflyttats till följd av förändringen i frekvens. (Ibid.)

När mätningar sker på en större mätserie är det inte praktiskt att mäta LVE-området på alla prover som ingår. Av denna anledning är det därför rekommenderat att se till äldre mätningar för att avgöra LVE-området. 1994 utfördes en omfattande studie av bitumens LVE-område av SHRP, Strategic Highways Research Program, i detta arbete testades 40 olika bitumens LVE-område (Petersen, 1994). I denna studie gick det att observera ett samband mellan skjuvspänning i procent $[\gamma]$ och den komplexa skjuvmodulen $[G^*]$ i kPa. (Petersen et. al., 1994)

Förhållandet som Petersen et. al. (1994) fann var:

$$\gamma = 12,0/G^{*0,29} \quad (12)$$

Av detta förhållande går det då att beräkna förväntat LVE-område, enligt Petersen et. al. (1994) bör mätningarna av LVE-gränsen hållas inom ett intervall på $\pm 20\%$ av γ -värdet.

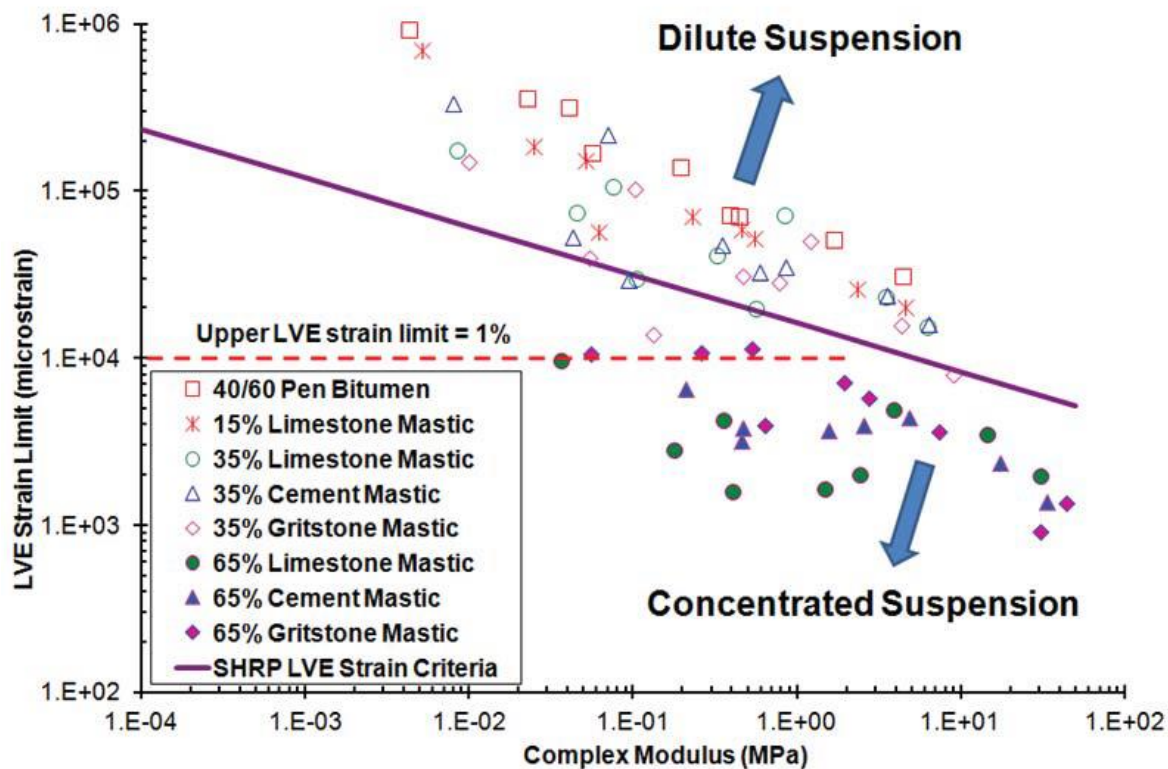
Resultatet från Petersen et. al. (1994) har vid senare tillfälle kontrollerats i andra studier, där ibland studier rörande asfaltsbruk av Liao et. al (2013a). I denna studie har det kontrollerats LVE-området för bitumen blandat med 15, 35 och 65 mass% filler. I studien visar de att ett asfaltsbruk med ungefär 40 volym% filler har en LVE-gräns som är en tiondel av den för ett asfaltsbruk med <20 volym%.

I studien utförd av Liao et. al. (2013a) testas asfaltsbruk blandat på: Kalk, Cement och mineralfiller. Dessa material blandades in enligt proportionerna i Tabell 2.7-2

Tabell 2.7-2 - Inblandningshalter för asfaltsbruk för undersökning av asfaltsbruks LVE-område (Liao et.al., 2013a)

Filler	Mass-%	Volym-%
Kalk	15	6,2
	35	16,7
	65	40,9
Cement	35	14,7
	65	37,3
Mineralfiller	35	17,2
	65	41,7

Resultatet från studien visar hur de lägre inblandningshalterna, 15 och 35 mass%, följer den antagna linjen framtagen av Petersen et. al. (2013a). De visa på hur inblandningshalten i asfaltsbruket påverkar LVE-området. Resultatet av studien redovisas i Figur 2.7-5. I Figuren går det att se hur LVE-gränsen minskar för de högre inblandningshalterna. Detta fenomen förklarar Liao et. al. (2013a) med att det här sker en interaktion mellan fillerpartiklarna som inte sker i samma utsträckning i vid de lägre halterna. I studien skiljer de på de olika asfaltsbruken efter detta fenomen. De asfaltsbruken med en inblandningshalt låg nog för att inte medge någon märkbara partikel-partikelinteraktion namnges som utspädda asfaltsbruk, de högre halterna refereras till som koncentrerat asfaltsbruk.



Figur 2.7-5 - LVE-områdesgräns för asfaltsbruk (Liao et. al., 2013a)

I Figur 2.7-5 kan en se att resultatet från LVE-gränsen minskar då G^* ökar för de utspädda asfaltsbruken. Dock stämmer inte antagandet att LVE-gränsen kommer att minska med ett ökat G^* generellt för de koncentrerade asfaltsbruken. Resultatet i Liao et. al. (2013a)s studie visar att det finns en övregräns för de koncentrerade asfaltsbruken vid 10 000 microstrain (1%) vid låga G^* . Detta tolkat Liao et. al. (2013a) som att det vid höga temperaturer blir en större skillnad mellan bitumens och fillerns skjuvmoduler. I studien fastställer de även att fillermängden har mindre inverkan på LVE-gränsen vid höga temperaturer.

Resultatet från Liao et. al. (2013a) kan tolkas som att den generella beräkningen av LVE-gräns ej är gällande vid hög filler mängd och att en bör undersöka LVE-gränsen för asfaltsbruk med inblandningshalter kring 40 volym%. I denna studie har samma amplituder använts för våra asfaltsbruk som har i tidigare studier använts för bitumen.

2.7.1.3. *Frekvenssvep*

Frekvenssvep är ett oscillerande test som utförs vid varierande frekvens och amplitud medan temperatur hålls konstant. Detta refereras ofta till som dynamisk oscillation. Frekvenssvep görs för att undersöka ett materials tidsberoende deformationsegenskaper. Vanligtvis utförs tester på bitumen med en konstant skjuvspänning och med en varierande vinkelfrekvens. Detta betyder att avböjningsvinkeln av mätplattan hålls konstant (amplitud), endast perioden för varje oscillationscykel ökar eller minskar löpandes. (Mezger, 2014)

Innan ett frekvenssvep utförs bör det först samlas information kring vilka skjuvningar som tillåts utan att skada materialet eller orsaka permanenta skador på materialet. Information kan inhämtas antingen genom att se till tidigare undersökningar på samma material, alternativt kan informationen kring maximal skjuvspänning inhämtas genom att göra ett amplitudsvep på materialet, se Kap 2.7.1.2. (Mezger, 2014)

Frekvenssvep utförs på bitumen med två mätplattor, PP08 och PP25. Testerna utförs vid temperatur intervallen $-30 - +30^{\circ}\text{C}$, PP08, och $10-100^{\circ}\text{C}$, PP25. Testerna utförs på ett logaritmiskt frekvensintervall från 0,1 rad/s till 100 rad/s. testerna utförs med olika mätplattor då den stora, PP25, har problem med att få pålitliga resultat vid lägre temperaturer.

2.7.2. DSR:s potential utöver Superpave

Det har sedan Superpave:s introduktion pågått arbete med DSR som har ämnat ersätta andra, mer omständliga, mättekniker med resultaten från ett frekvenssvep. Några av de metoder som har undersökts om de kan ersättas är: Duktilitet test och Bending beam rheometer. Från dessa studier har det framkommit ett samband mellan mätdata från frekvenssvep och resultatet från duktilitet-, styvhet- och m-värdemätningar. Dessa samband och dess ursprung redovisas nedan.

2.7.2.1. *Duktilitet*

En viktig uppgift för asfaltkonstruktionen är att hindra ytvatten från att tränga ner i underliggande obundna lager och försämra deras bärighet. Denne egenskap är starkt bunden till bindemedlets förmåga att hålla samman stenmaterialet samtidigt som de tillåter rörelser i underlaget utan att asfalten spricker. Bindemedlet skall, utöver att vara styvt nog för trafiklasterna, vara mjukt nog för att klara de kontraktioner som uppstår då temperaturen i vägkroppen sjunker.

Eftersom stenmaterialet i vägkroppen inte påverkas märkbart av temperaturförändringar, men bitumen gör det, skapas det spänningar i bitumen. Dessa spänningar kan bli stora nog att de passerar gränsen för vad bitumen tåler. Detta leder till brott i asfalten, bitumen kommer att släppa från stenmaterialet. Detta kan leda till krackelering av asfalten, längsgående sprickor och transversala sprickor i beläggningen. (Anderson et. al., 2011)

Det är enligt Anderson et. al. (2011) belagt att krackelering är ett fenomen som är oberoende av last. De anser att det istället är tid och nedkylning som är anledningen till fenomenet. De förklarar skadan med att bitumen har förlorat sin duktilitet som en följd av föråldring. De menar dock att duktilitet är ett surrogat till materialets relaxationsegenskaper. I Superpave kvantifieras relaxationen med fasvinkel, mätt med DSR, eller m-värde, mätt med BBR. De lågtemperaturmätningarna med BBR tyder på att relaxation egenskaper hos ett bitumen är viktigt för dess egenskaper vid låga temperaturer. Enligt Anderson et. al. (2011) är det dock en otillräcklig bild som en får av de två skilda parametrarna av dessa två tester. De framhåller att ett pålitligt mått på motståndskraft mot stress beroende krackelering måste innehålla både ett mått på bitumens styvhet och relaxation.

Duktilitet mäts vanligtvis genom att ett prov med bitumen gjuts i en speciell form. Detta prov placeras sedan i ett temperaturkontrollerat vattenbad. När provet har tempererats och vattnet har en stabil temperatur dras det isär med en hastighet på 1cm/min. Förändringen i provets längd, i cm, är sedan vad som anges som bitumens duktilitet (Hunter, et. al., 2015). Detta är en relativt omständlig metod, och maskinen som behövs är väldigt otymplig och tar mycket plats. Av denna anledning är det av intresse att kunna ersätta metoden med en metod som medger en mindre omfattande "maskinpark" i labben.

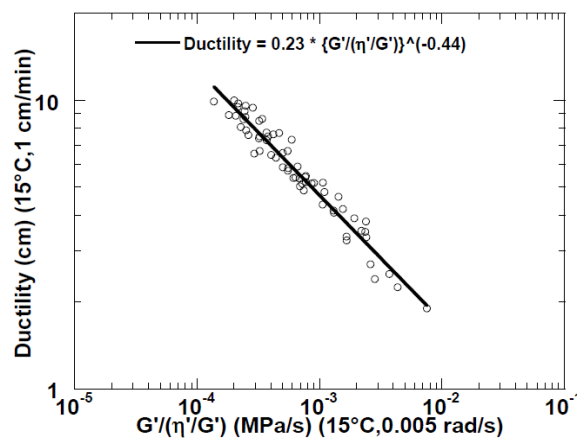
Glover et. al. (2005) utförde en studie där de försökte koppla krackelerings känslighet, duktilitet, hos bitumen till de egenskaper som kan mätas med en DSR. Detta gjordes i förhoppningen att kunna minska antalet tester som behöver göras för att kategorisera bitumen enligt Superpave.

Glover och hans medförfattare grundade sin studie på en tidigare studie utförd av Kandhal (1977) där Kandhal påvisade att en asfaltbeläggning började uppvisa tecken på krackelering då bindemedlets duktilitet vid 15°C var ≤5cm. Kandhal (1977) definierade även en gräns var vid asfaltmassan började uppvisa signifikanta skador. Denna gräns är då bitumens duktilitet sjunker under 3cm. Detta resultat tolkade Glover et. al. (2005) som att krackelering är beroende på bitumens dragspänningsbrott i lågtemperaturområdet. (Rowe, 2014)

Med grund i antagandet att krackelering beror på dragspänningsbrott tog Glover et. al. (2005) fram en formel som skulle beskriva detta förlopp, $G' / (\eta' / G')$. Formeln användes som surrogat för dragspänning vid brott. De ingående storheterna i formeln mäts i DSR vid 15°C och frekvens på 0,005 rad/s. Mätningar under dessa förhållanden har visat sig korrelera väl med duktilitetsmätningar (Rowe, 2014). Förhållandet har visat sig passa väl, framförallt för duktilitet på mindre än 10cm. Enligt Kandhal (1977) kan alla värden över 5cm anses vara godkänt.

Enligt Rowe (2014) kan förhållandet $G' / (\eta' / G')$ uttryckas på den lite mer lätt igenkännliga formen: $G^* \left(\frac{(\cos(\delta))^2}{\sin(\delta)} \right)$. Denna omskrivning görs för att uttrycka förhållandet på ett sätt som är mer likt de andra formlerna i Superpave, och för att passa de storheter som normalt tas fram vid DSR-körning. På denna form kan Kandhals gränsvärde, 5- och 3cm, uttryckas som $G^* \left(\frac{(\cos(\delta))^2}{\sin(\delta)} \right) = 180 \text{ kPa}$ och $G^* \left(\frac{(\cos(\delta))^2}{\sin(\delta)} \right) = 450 \text{ kPa}$.

Detta förhållande kan räknas om till duktilitet enligt Glover et. al. (2005):s formel: Duktilitet [cm] = $0,23 * [G' / (\eta' / G')]^{-0,44}$. Denna formel kan då sedan skrivas om på formen: Duktilitet [cm] = $0,23 * \left[G^* \left(\frac{(\cos(\delta))^2}{\sin(\delta)} \right) * 0,005 \right]^{-0,44}$. Hur denna formel kopplas till duktilitet visas i Figur 2.7-6.



Figur 2.7-6 - Förhållande mellan duktilitet och DSR parametrar (Glover et. al. 2005)

2.7.2.2. M-värde och styvhet

Som nämnt i Kap 2.5 anges t-låg som den temperatur vid vilken $S(t) \leq 300 \text{ MPa}$ och $m \geq 0,300 \frac{\text{MPa}}{^\circ\text{C}}$. Dessa värden mäts med en BBR, men detta är en relativt omständlig metod. För att undvika denna mätning har Rowe et. al. (2014) undersökt om det går att ta fram dessa värden från mätningar med DSR. Enligt Rowe et. al. (2014) kan t-låg beräknas från resultatet ur en DSR körning. Enligt författarna kan gränsen för t-låg sättas till $G^* = 111 \text{ MPa}$ ($S(t) = 300 \text{ MPa}$). $S(60)$ kan även, enligt Rowe et. al. (2014), uttryckas som $G^* \cdot \sin(\delta) = 46 \text{ MPa}$. Belägget för denna omräkning går att se i Figur 2.7-7. Detta antagande gäller då mätningarna i DSR:en är gjorda med en frekvens på 0,0167 rad/s.

Anderson et. al. (1994) har även de studerat sambandet mellan styvhet och komplex modul. Detta arbete gjorde de med förhoppning att hitta ett samband ur vilket en skulle kunna beräkna t-låg ur resultatet från ett svep med DSR. I studien fann de att $S(t)$ går att beräknas enligt förhållandet i ekv.12. (Anderson et. al., 1994)

$$S(t) = \frac{3G^*(\omega)}{[1+0,2*\sin(2*\delta)]} ; \text{där: } t = 1/\omega \quad (13)$$

$S(t)$ = Styvhet vid tid t , Pa

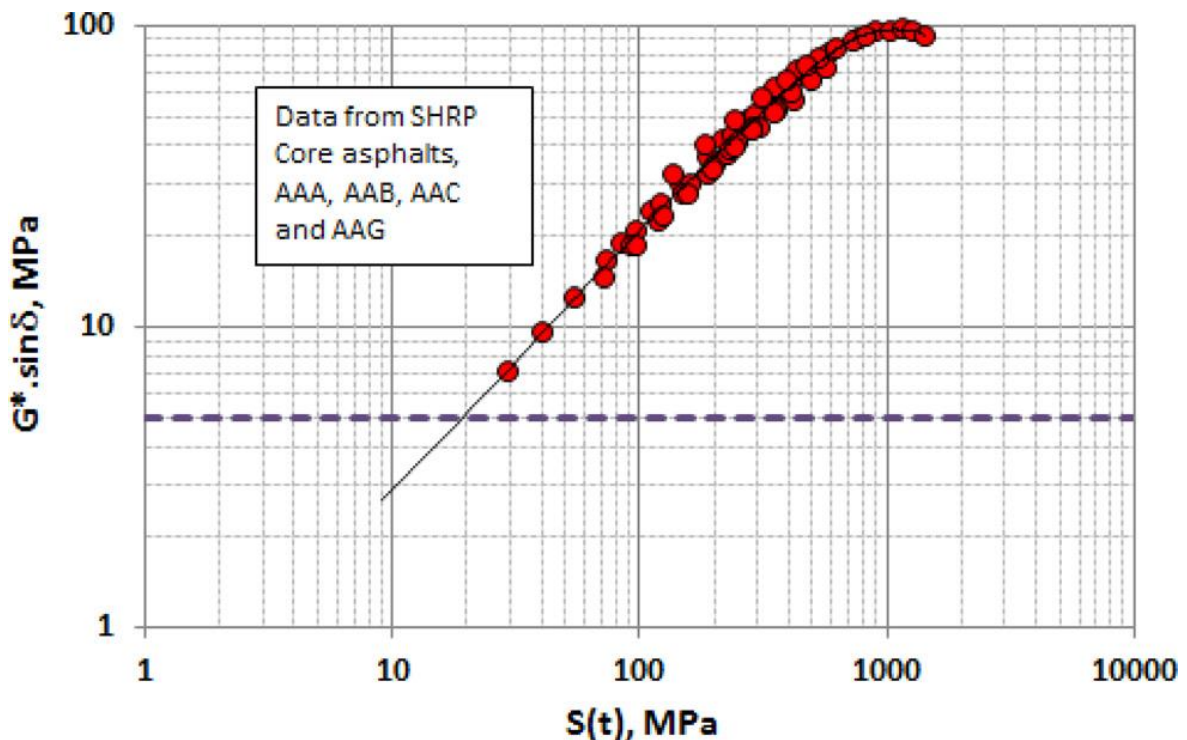
$G^*(\omega)$ = komplexmodul vid frekvens ω , Pa

δ = Fasvinkel vid frekvens ω , Grader

Då $S(t)$ vanligtvis mäts vid 60s belastning bör G^* och δ mätas vid $\omega = 0,0167 \text{ rad/s}$.

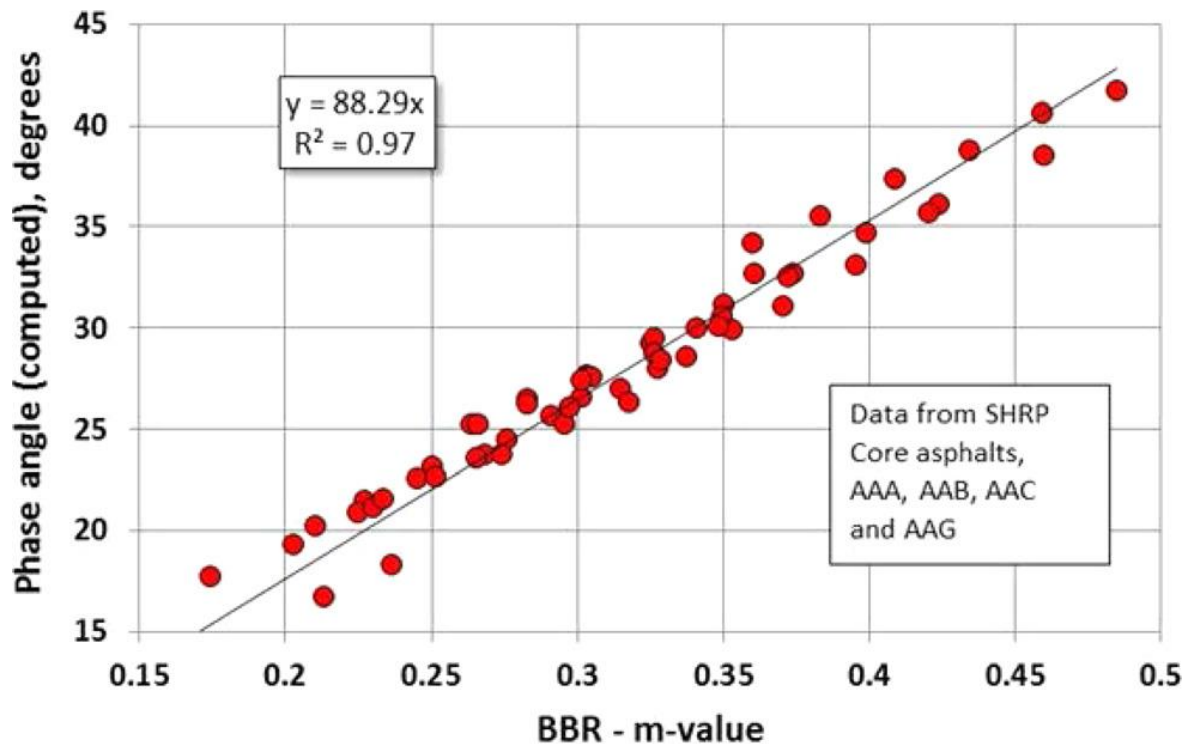
Värdet för $S(t)$, styvheten, för ett bitumen eller ett asfaltsbruk är av intresse framförallt vid låga temperaturer. Detta leder till att vid mätningar i DSR, vid låga temperaturer, kommer fasvinkeln att närma sig noll. Detta medger att ekvation 12 kan, vid låga temperaturer, förenklas till följande:

$$S(t) = \frac{3G^*(\omega)}{[1+0,2*\sin(2*\delta)]} ; 0,2 * \sin(2 * \delta) \approx 0 \rightarrow S(t) \approx 3 * G^*(\omega) \quad (14)$$



Figur 2.7-7 - Relation mellan $S(t)$ och $G^* \sin(\delta)$ (Rowe et. al., 2014)

För m-värdet kunde Rowe et. al. (2014) påvisa ett samband mellan det och fasvinkeln i DSR-testerna. Detta samband gäller vid mätningar med en frekvens på 0,1047 rad/s. Förhållandet uttrycks som: $\text{Fasvinkel} = 88,29 \cdot \text{m-värdet}$. Detta samband illustreras i Figur 2.7-8. I Superpave sätts gränsen för m-värde vid 0,3. Denna gräns kan då, med sambandet i Figur 2.7-8, tolkas om till en fasvinkel på 26,2°. I denna studie kommer detta gränsvärde att användas för att definiera m-värdet för proverna.



Figur 2.7-8 - Relation mellan Fasvinkel och m-värde (Rowe et. al., 2017)

2.8. Metoder för Redovisning av resultat

Den vanligaste formen av redovisning av resultat från DSR-tester på bitumen är masterkurva. Blackdiagram används även ofta då det kan ge en visuell redovisning av spridning av resterna, i ett blackdiagram kan en okulärt avgöra om något mätresultat avviker från vad som är förväntat.

2.8.1. Masterkurva

Framtagandet och användandet av masterkurvor är ett mycket kraftfullt verktyg när det kommer till att förstå och redovisa hur bitumentyp och kemiskuppbyggnad påverkar de viskoelastiska egenskaperna hos bitumen. Det är både svårt och opraktiskt att mäta dynamiskdata över ett önskvärt stort frekvensspann. För att inte behöva mäta allt för mycket kan en använda sig av masterkurvor. Dessa kurvor används för att komplettera mätdata. Masterkurvor medger möjligheten att interpolera värden för bitumens egenskaper vid ett större spann av frekvenser och i kombination med fler temperaturer inom det mätta området. Utöver detta används verktyget för att möjliggöra jämförande av resultat från två eller fler laboratorier med olika förutsättningar för sina tester, exempelvis frekvenser och temperaturer (Yusoff, 2012). Det har också enligt Garcias och Thompson (2007) bevisats att masterkurvor kan användas för att beskriva de reologiska egenskaperna hos asfaltsbruk.

Flera studier har kunnat påvisa ett samband mellan temperatur och frekvens. Sambandet som uppmärksammas är att bitumen beter sig likadant vid höga temperaturer som vid låga frekvenser. Av detta kan framtagandet av tid-temperatur-skiftfaktorn. Denna skiftfaktor användas för att ta mätdata från olika temperaturer och frekvenser och föra samman de till en kontinuerlig kurva vid en reducerad frekvens. (Yusoff, 2012)

Masterkurvor sammanställs genom att manuellt flytta moduler eller fasvinkel mot frekvensen vid olika temperaturer längs en logaritmiskfrekvens-axel. Förflyttningen görs för att ge en mjuk masterkurva. Tid- eller frekvensskalan som används i en masterkurva benämns vanligtvis som reducerad tid- eller -frekvensskala. Den reducerade frekvensskalan definieras som (Hunter, et. al., 2015):

$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a(t)) \quad (15)$$

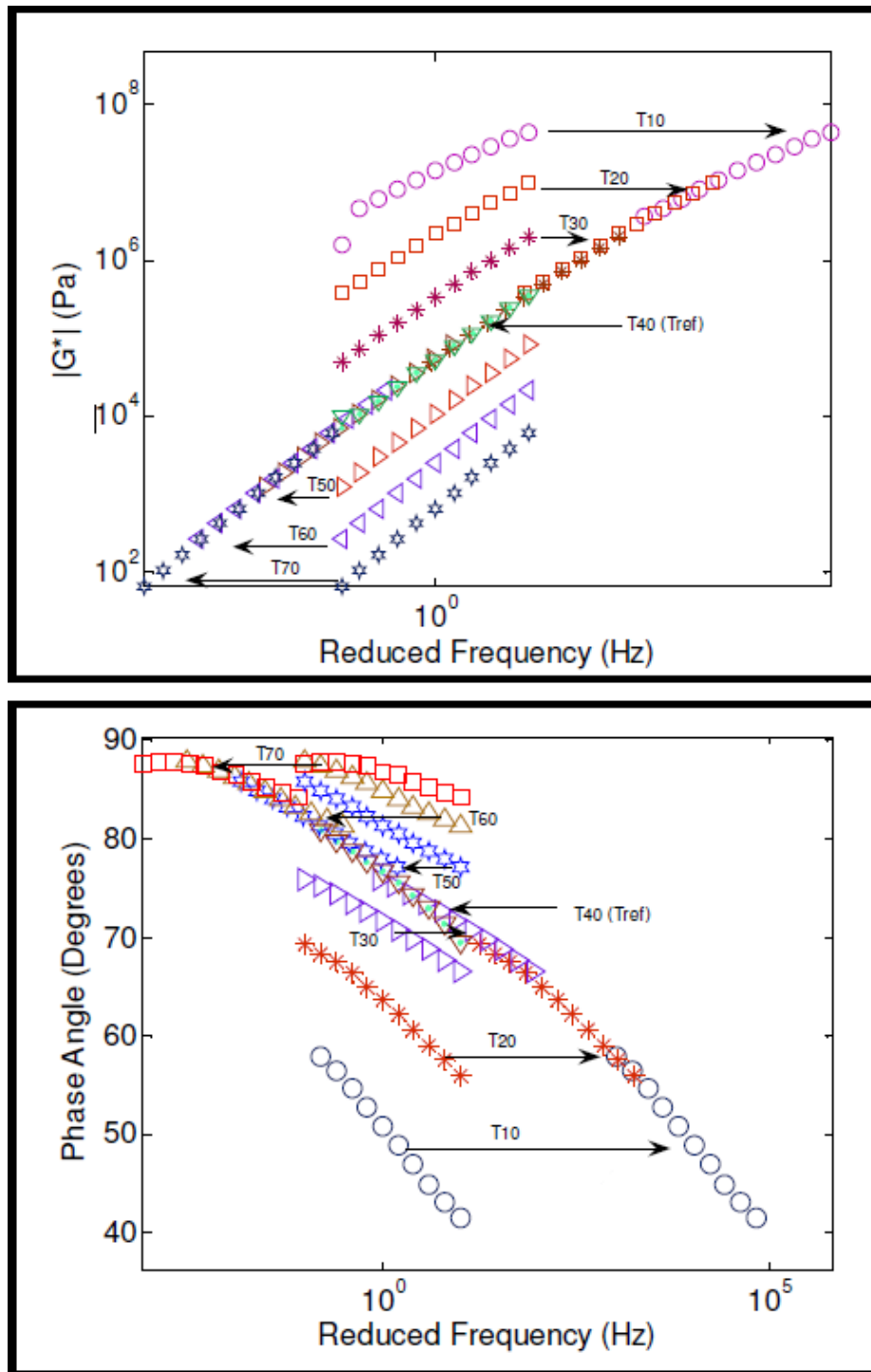
f_r = den reducerade frekvensen [Hz]

f = frekvens [Hz]

$a(t)$ = skiftfaktorn

I masterkurvor, precis som blackdiagram, går det att se om det uppstår brott i kurvan. Dessa brott kan tyda på att vald modell eller ekvation inte passar på det material och de frekvenser som mätts eller att det har skett något med materialets egenskaper vid en viss temperatur, exempelvis kan detta ske vid vax-modifierade bitumen. (Ibid.)

Det finns flera olika metoder för att beräkna skiftfaktorn, många av dessa finns väl dokumenterade och förklarade i Hunter, et. al. (2015) och Yusoff (2012).



Figur 2.8-1 - Exempel på $|G^*|$ och fasvinkel masterkurvor (Yusoff, 2012)

Förflyttningen kan göras med en rad olika tekniker, i denna studie används en kombination WLF-ekvation och Sigmoidal. Dessa förklaras mer ingående i Kap.2.8.1.1 och Kap.2.8.1.2.

WLF-Ekvationen har även visat sig vara lämpad för att skapa masterkurvor för fasvinkel (Jahromi & Khodaii, 2009). I detta arbete kommer en variation av Sigmoidal tillsammans med WLF-ekvation att utnyttjas i detta syfte.

Val av referenstemperatur kan göras med hänsyn till lite olika saker och beror en del på vilken modell som används för framtagandet av masterkurvan, detta förklaras mer ingående i Hunter, et. al. (2015) och Yusoff (2012).

Det är enligt Hunter, et. al. (2015) av vikt att nämna att en masterkurva endast är helt pålitligt vid den satta referenstemperaturen. Då tid-temperatur superpositioneringen tillämpas kan det medföra att de mätpunkter som flyttats inte är mer pålitliga än modellen, alternativt ekvationen, som användes för att göra förflyttningen. Superpositionering görs för att beräkna de reologiska egenskaperna vid andra temperaturer än de varvid värdena är mätta. Det bör ej bortses från att vid tolkning av masterkurvor måste en ta hänsyn till både tidsberoendet och temperaturberoendet av de reologiska egenskaperna av det viskoelastiska materialet.

Av just denna anledning anser Hunter, et. al. (2015) att isokrona diagram troligtvis är mer informativt och lättare att tolka när de reologiska egenskaperna hos bitumen ämnas kartläggas. (Hunter, et. al., 2015) Isokrona diagram förklaras vidare i Kap2.8.4. Nackdelen med Isokrona diagram är att de endast ger information om hur materialet beter sig vid en konstant frekvens. Då mätningar i denna studie görs över ett spann från 0,1 till 100 rad/s lämpar sig inte denna redovisningsform.

Precis som för blackdiagram indikerar ett brott i kurvan att de strukturella egenskaperna hos materialet har förändrats beroende på temperatur. Detta observeras vanligtvis i GEL-typ bitumen, vax-modifierade bitumen och polymermodifierade bitumen. (Ibid.)

Det är inte helt ovanligt att $\log(a(t))$ plottas mot temperatur med hänsyn till referenstemperatur. Kurvan tas vanligtvis fram i samband med en masterkurva. Dessa värden kan ses som förändringarna i viskositet med hänsyn till viskositeten vid referenstemperaturen. Detta kan användas för att de en möjlighet till okulär inspektion av hur de viskoelastiska egenskapernas förändring med temperatur. (Ibid.)

2.8.1.1. *Superpositionering*

Så kallade viskositet-temperaturekvationer används för att karakterisera temperaturberoendet hos bitumens, och därav för att bestämma skiftfaktorn som behövs för tid-temperatur superpositioneringsprincipen. Det är enligt Airey (2002a) av stor vikt att de datapunkter som skall manipuleras enligt superpositioneringsprincipen är mätta inom det linjära viskoelastiska området, LVE-området.

Tid-temperatur superpositioneringsprincipen kan enligt Hunter, et. al. (2015) uttryckas som:

$$G(\omega, T) = G(\omega a(T), T_r) \quad (16)$$

G = någon given modul (G' , G'' eller G^*).

$a(T)$ = Skiftfaktorn

ω = Lastfrekvensen

T = Temperatur

T_r = Referenstemperaturen

Williams, Landel och Ferry (WLF) ekvationen är den vanligaste ekvationen för att beskriva relationen mellan skiftfaktorerna och temperatur, och där igenom beräkna skiftfaktorn för bitumen. Ekvationen har enligt Yusoff (2012) vid flera tillfällen funnits vara applicerbar på både bitumen och asfaltsbruk. Ekvationen är teoretisk, och baseras på frivolyt teorin (Ferry, 1971) Ekvationen använder temperaturskillnader, vilket gör den lämplig för praktiskhantering. (Hunter, et. al., 2015)

WLF-ekvationen:

$$\text{Log}(a(T)) = \text{Log}\left(\frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_r)}\right) = -\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)} \quad (17)$$

$a(T)$ = Skiftfaktor vid temperatur T

$\eta_0(T)$ = Newtoniska viskositeten vid temperaturen T

$\eta_0(T_0)$ = Newtoniska viskositeten vid temperaturen T_r

C_1 & C_2 = Empiriska konstanter

För att använda WLF-ekvationen behöver först tre konstanter fastställas, C_1 , C_2 & T_r .

Temperaturberoendet av bitumen kan beskrivas av parametern, T_r , om universella konstanter för C_1 & C_2 används i ekvationen. Williams et. al. (1955) anser att om T_r väljs till ett passande värde för materialet, och konstanterna sätts till de universella värdena: $C_1 = 8,86$ och $C_2 = 101,6$. Om dessa värden används kan ekvationen användas oberoende av material. Dock har Brodnyan et. al. (1960) visat att för bitumen passar endast de universella värdena väl då $T - T_r > -20^\circ\text{C}$. Vid temperaturer mer än 20°C lägre än T_r passar in de universella konstanterna. (Hunter, et. al., 2015)

Anderson et. al. (1991) fann att för bitumen bör konstanterna sättas till $C_1 = 19$ & $C_2 = 92$ baserat på en definierad temperatur, T_d , vilken är bitumenspecifik. (Ibid.)

Enligt Yusoff (2012) kan konstanterna C_1 och C_2 beräknas med avseende på referenstemperaturen, T_{ref} , från lutningen av den linjära formen av WLF-ekvationen:

$$-\frac{T-T_{ref}}{\log a_T} = \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{C_1}(T - T_{ref}) \quad (18)$$

Yusoff (2012) hävdar även att inga universell konstant för bitumen går att använda, istället hävdar han att konstanterna skall beräknas för alla studier på bitumen som görs. I sin studie använder Yusoff (2012) $C_1=12$ och $C_2=107$ för ej åldrat asfaltsbruk.

En brist i denna ekvation är svårigheten att fastställa T_r . Enligt Bronyan et.al (1960) rekommenderas att T_r sätts till ett värde nära bitumens mjukpunkt. (Hunter, et. al., 2015)

I denna studie används $T_r = 25$, och konstanterna C_1 och C_2 beräknas för varje mätserie.

Ett alternativ till denna WLF-ekvationen är Arrhenius ekvation:

$$\text{Log}(a(T)) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = \frac{0,4347 E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (19)$$

$a(T)$ = Skiftfaktorn

C = Konstant (10920 alt. 13060 alt. 7680 enligt Yusoff (2012)) [K]

E_a = Aktiviserings energi $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$

E_a sätts vanligtvis 250 enl. Hunter, et. al. (2015) och 261 enl. Yusoff (2012)

R = Den universella gaskonstanten $\left(8,314 \left[\frac{\text{J}}{\text{K} * \text{mol}} \right] \right)$

T = Temperatur [K]

T_{ref} = Referens temperatur [K]

Den stora fördelen med Arrhenius funktion är att den bara kräver att en konstant fastställs, E_a .

Enligt Nielsen (1995) kan referenstemperaturen T_r i Arrhenius ekvation sättas godtyckligt. (Hunter, et. al., 2015)

2.8.1.2. Sigmoidal-modellen

Sigmoidal-modellen introducerades först i *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Modellen används för att beskriva frekvensberoendet hos en modul masterkurva. Modellen kan redovisas som följande:

$$\log(|G^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(\omega)}} \quad (20)$$

ω = reduceradfrekvens

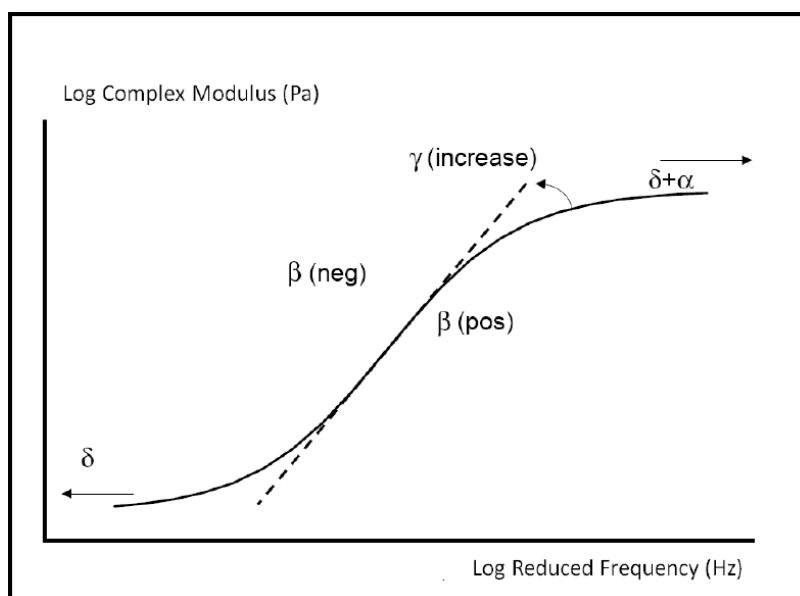
δ = lägre asymptoten

α = skillnaden mellan den övre och undre asymptoten

β & γ = anser läget för kurvans inflektionspunkt

G^* = Komplex skjuvmodul

β och γ är vad som definierar formen på asymptoten. De definierar även positionen av böjningspunkten. Böjningspunkten beräknas som $10^{\frac{\beta}{\gamma}}$. Definitionen av varje parameter illustreras i Figur 2.8-2



Figur 2.8-2 - Definitionen av Sigmoidal modell (Yusoff, 2012)

Modellen har länge använts av många forskare för att beskriva den komplexa modul masterkurvan för asfaltsmassor. Enligt Yusoff (2012) var det för detta ändamål som modellen utvecklades, men modellen har även visat sig vara applicerbar på rent bitumen. Det är till detta ändamål som modellen kommer att användas i detta arbete. Metoden kan även användas för att beskriva sambandet för ett modifierat bindemedel, men det är då endast applicerbart på ett mindre, utvalda, intervall.

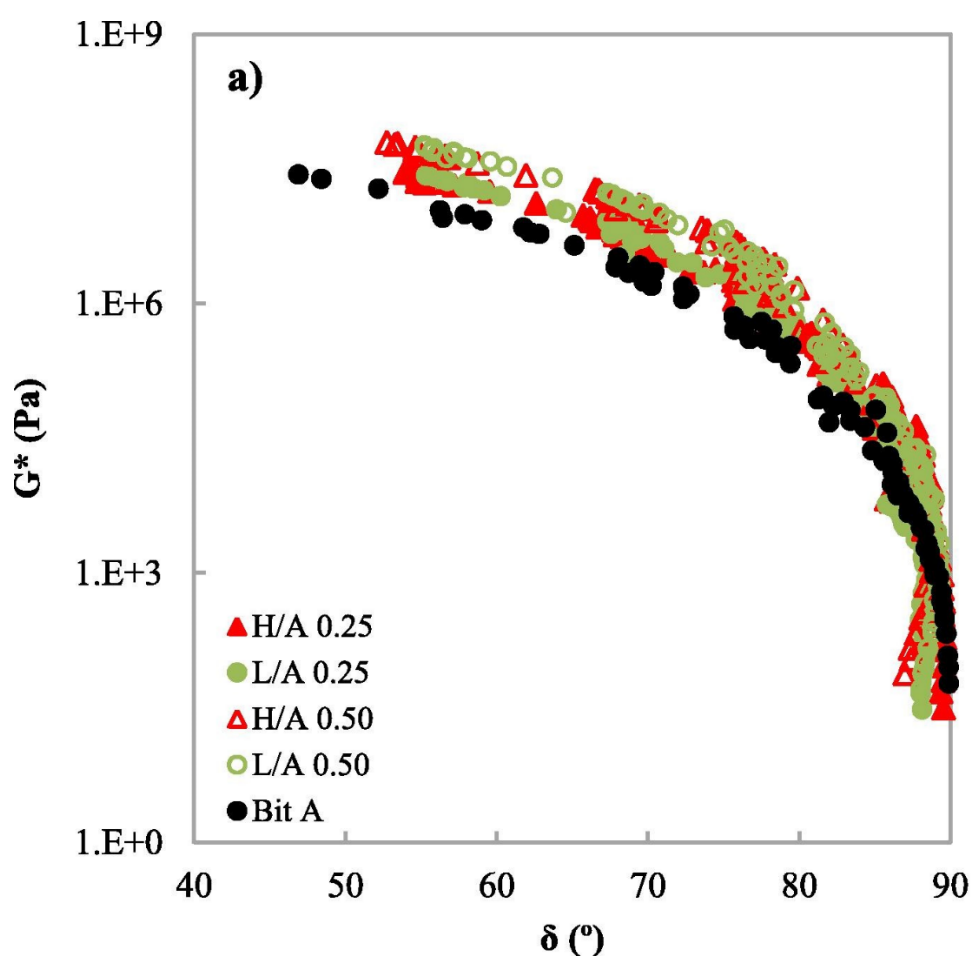
Vid arbete med denna modell görs först en ingenjörsmässig bedömning på vad variablerna, β , δ & γ , skulle kunna vara. Enligt Yusoff (2012) bör variablerna sättas till: $\beta = -1$, $\delta = 1$ & $\gamma = 1$. Dessa värden används om ingen tidigare mätning finns att åtgå, om det finns bör värdena därifrån användas som en första gissning. Efter det används MS Excelverktyget "problemlösaren" för att optimera kurvans passning till de uppmätta värdena från frekvenssvpet. Problemlösaren arbetar genom att iterera fram värden enligt minsta kvadratmetoden. Detta görs för att minimera avvikelsen mellan kurva som skapas, av dessa variabler, och de mätdata som finns tillgänglig.

Yusoff (2012) har funnit att Sigmoidal-modellen är bäst anpassat för temperaturer mellan 15-75°C.

2.8.2. Blackdiagram

I ett blackdiagram, graf, redovisas resultatet från DSR-tester. I ett blackdiagram plottas den komplexa skjuvmodulen ($|G^*|$) och fasvinkeln (δ). Frekvens och temperatur tas alltså ingen hänsyn till i diagrammet. Detta görs för att all data från testet skall kunna redovisas i ett och samma diagram utan att rådata först ska behöva redigeras med hjälp av en tid-temperatur superpositionering. En mjuk och följsam kurva i ett blackdiagram är en god indikator på tid-temperaturekvivalens. En kurva med brott i indikerar en avvikelse i skiffaktorn för sambandet mellan tid och temperatur. Detta kan bero på förekomst av ämnen med andra egenskaper än bitumen. (Hunter, et. al., 2015)

I Figur 2.8-3 går det att se hur ett bitumens blackdiagram förändras beroende på mängd filler. I diagrammet går det att se att när mängden filler i bitumen ökar gör även blandningens komplexa skjuvmodul det. I Figur 2.8-3 visas asfaltsbruksblandningar på 25% och 50%.

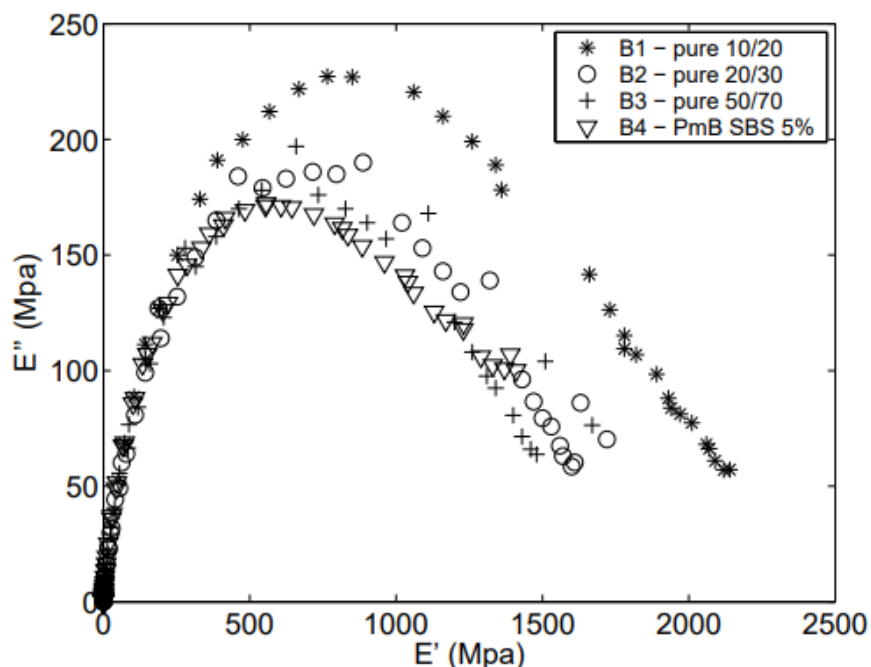


Figur 2.8-3 - Exempel på Blackdiagram (Micaelo, et. al., 2006)

Blackdiagrammet är även ett bra verktyg för att se hur de olika mätningarna går ihop. I detta arbete kommer blackdiagram att användas för att validera att mätningarna med PP08 och PP25 passar varandra. Detta görs för att kontrollera att det inte har skett något med materialet, och ger en indikation på om några mätningar bör exkluderas. Mätningarna som överlappar från PP08 och PP25 mätningarna bör ligga på samma position i blackdiagrammet.

2.8.3. Cole-Cole diagram

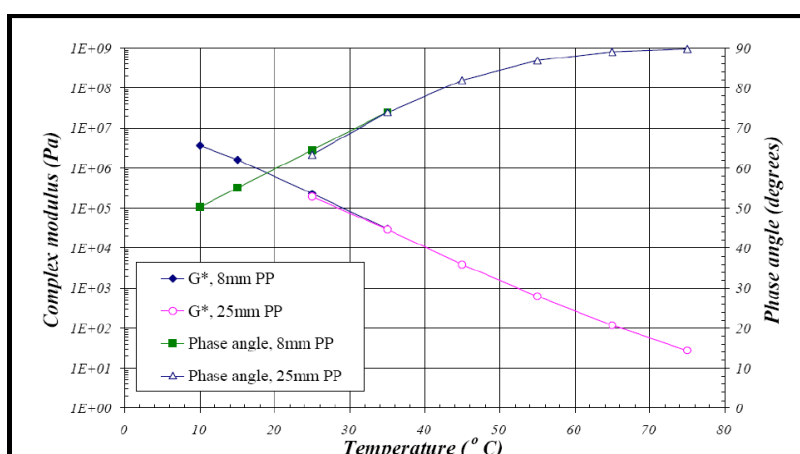
Cole-Cole diagram ger möjlighet att utan att behöva ta hänsyn till frekvens eller temperatur redovisa den viskoelastiska balansen av bitumen. Detta medges av att grafen redovisar den viskoelastiska modulen (G'') som en funktion av den elastiska modulen (G'). (Hunter, et. al., 2015)



Figur 2.8-4 - Exempel på Cole-Cole diagram (Chailleux, et. al., 2006)

2.8.4. Isokrona diagram

Ett isokront diagram definieras som en ekvation eller en kurva på en graf som representerar beteendet hos materialet vid konstant frekvens, lasttid. Kurvor som visar $|G^*|$, eller fasvinkel, redovisas som en funktion av temperatur vid konstant frekvens är isokroner. Ett exempel på ett isokront diagram för $|G^*|$ och δ visas i Figur 2.8-5. (Yusoff, 2012)



Figur 2.8-5 - Exempel på isokront diagram för $|G^*|$ och δ (Yusoff, 2012)

Fördelen med isokrona diagram är att de kan tydligt redovisa sambandet mellan G^* och fasvinkeln för ett material. Diagrammet kan då relativt enkelt visa hur de viskösa/elastiska egenskaperna förändras då provets temperatur ökar.

3. Metod

I detta kapitel följer en genomgång av hur materialet som undersökts har förberetts och vilka tester som genomförts.

3.1. Tillvägagångsätt

I detta kapitel beskrivs de tester som utförts, samt vilka olika blandningar av bitumen och filler som har testats i försöksserien. Alla asfaltsbruk som har producerats och testats i försöksserien är blandade på standard 70/100 bitumen. I försöksserien har tester på rent 70/100 också gjorts. Resultaten från 70/100-testerna kommer att användas som referens för att kunna kvantifiera effekterna av fillertyp och mängd. Typer och mängd av filler som använts i studien redovisas i Tabell 3.1-1.

Alla tester som utförs i denna studie utförs med PP08 och PP25 mätverktyg. Alla prover görs i en MCR 302 från Anton Paar av årsmodellen 2011, se Figur 3.1-1.



Figur 3.1-1 - LTH:s MCR 302 och PP08 spindel

3.1.1. Provberedning

I Tabell 3.1-1 anges mängd filler i volymprocent vid 150°C för hela provserien. De procentsatser som använts utgår från 25 volymprocent, de andra mängderna grundar sig i tidigare utförda examensarbete vid LTH (Bakalov & Shukir, 2017). Varje ökning av fillermängden ämnar höja mjukpunkten, mätt med RVB, i jämna steg, 10°C, till en nivå över vanligt förekommande halter.

Båda de mineralfiller som har använts är huvudsakligen granitfiller.

Tabell 3.1-1 – Namngivning av Provserie, fillertyp och volym%

Typ Volym%	Mineralfiller 1	Mineralfiller 2	Kalk, Nordkalk Ignaberga	Portlandcement från Cementa
[%] 25,0	Min1, 25	Min2, 25	Kalk, 25	Cem, 25
[%] 34,0	Min1, 34	Min2, 34	Kalk, 34	Cem, 34
[%] 39,2	Min1, 39,2	Min2, 39,2	Kalk, 39,2	Cem, 39,2
[%] 42,9	Min1, 42,9	Min2, 42,9	Kalk, 42,9	Cem, 42,9

Granitfillertyperna är extraherade från asfalt tillverkad på Skanskas asfaltverk i södra Sverige. Kalkfillern används vid Skanskas gjutasfalttillverkning i Halmstad. Cementen används som tillsatsmedel vid asfalttillverkning på Skanska. All data kring provernas sammansättning redovisas i samlade resultattabeller från mätningarna med LTH:s DSR.

3.1.2. Provblandning

Det första som gjordes i studien var att ta fram filler, detta är gjort av Skanska. Före blandning av asfaltsbruket tempereras både filler och bitumen i 1h vid sin respektive inblandningstemperatur. Temperaturerna redovisas i Tabell 3.1-2. De olika temperaturerna valdes för att medge ett arbetbart asfaltsbruk där fillern inte separerade. Blandningen av bitumen och filler skedde för hand. Blandningen gjordes omsorgsfullt till dess att det inte längre gick att se några större partiklar, klumpar med filler, i asfaltsbruket, se Figur 3.1-2. Under framtagandet av provkropparna lades det stor vikt vid att alla material skulle värmas tre gånger innan proverna togs ut och provkropparna tillverkades.



Figur 3.1-2 - Blandning av bruk och bitumen med uppvärmdsked

Vid inblandning blandades materialen först grovt, då temperaturen på asfaltsbruket snabbt sjunker fick blandningen göras i omgångar. När de först hade blandats grovt placerades de i ugnen igen i 15min, där efter togs de ut och blandades igen, detta upprepades tre gånger. Samma tillvägagångssätt har använts för alla provserier. Detta för att försöka minimera effekten av bitumens temperatur-historik på resultatet.

Tabell 3.1-2 - Inblandningstemperaturer för de olika asfaltsbruken

Volym% \ Typ	Mineralfiller 1	Mineralfiller 2	Kalk	Cement
[%] 25,0	155 °C	155 °C	155 °C	175 °C
[%] 34,0	155 °C	155 °C	155 °C	185 °C
[%] 39,2	165 °C	165 °C	165 °C	195 °C
[%] 42,9	175 °C	175 °C	175 °C	205 °C

Vid tillverkning av provkropparna användes vad som i studien kommer att referera till som silikonforms-metoden. Detta innebär att proverna gjöts i silikonformar. Hur gjutningen ser ut visas i Figur 3.1-3.



Figur 3.1-3 - Uppvägning av material för provkroppar, PP08 och PP25

Mängden asfaltsbruk som användes i varje provkropp redovisas i Tabell 3.1-3. Vid tillverkning av provkropparna värmdes bruken olika beroende på inblandningshalt och fillertyp, temperaturerna redovisas i Tabell 3.1-2.

Tabell 3.1-3 - Mängd asfaltsbruk i varje provkropp

Prov	Fillerhalt vid 150°C [vol%]	Fillerhalt [vikt%]	Fillerkvot [viktkvot]	Ø 25 * 1mm (PP25) [g]	Ø 8 * 2mm (PP08) [g]
70/100	-	-	-	0,53	0,11
Min1, 25 (1A)	25,00	48,5	0,943	0,75	0,15
Min2, 25 (2A)		48,3	0,934	0,75	0,15
Kalk, 25 (7A)		48,9	0,959	0,76	0,16
Cem, 25 (8A)		51,2	1,049	0,79	0,16
Min1, 34 (1B)	34,00	59,3	1,458	0,83	0,17
Min2, 34 (2B)		59,1	1,443	0,83	0,17
Kalk, 34 (7B)		59,7	1,482	0,84	0,17
Cem, 34 (8B)		61,8	1,620	0,89	0,18
Min1, 39,2 (1C)	39,20	64,6	1,824	0,88	0,18
Min2, 39,2 (2C)		64,4	1,806	0,87	0,18
Kalk, 39,2 (7C)		65,0	1,854	0,89	0,18
Cem, 39,2 (8C)		67,0	2,028	0,94	0,19
Min1, 42,9 (1D)	42,9	68,0	2,126	0,91	0,19
Min2, 42,9 (2D)		67,8	2,105	0,90	0,19
Kalk, 42,9 (7D)		68,4	2,161	0,92	0,19
Cem, 42,9 (8D)		70,3	2,363	0,98	0,20

Provkropparnas vikt mäts upp med våg med noggrannhet på 0,01g. Asfaltsbruket togs ur behållaren med en sked monterad på änden av en lödpenna, se Figur 3.1-3. Lödpennan håller en temperatur av 150°C. Lödpennan används för att inte tillåta materialet att svalna, om temperaturen sjunker för mycket kommer uppvärmningen av materialet att försvåras. Problemet kommer av att asfaltsbruket har betydligt högre viskositet än bitumen och det blir då svårare att hantera materialet i uppvärmningen. Lödpennan är helt nödvändig i det sammanhanget.

Efter att provkropparna hade tillverkats placerades de i en kyl, +5°C. Detta görs för att sänka temperaturen på asfaltsbruket. Temperaturen vill hållas låg för att öka bitumens viskositet, detta leder till att risken för separation i provkroppen blir mindre. Temperaturen bör inte sänkas allt för lågt då det kan påverka bitumens egenskaper, se Kap. 2.7.2.1. För att minimera eventuella effekter av nedkylning och uppvärmning har alla provkroppar behandlats likadant.

Det är enligt Anderson et. al. (1994) belagt att hastigheten på en temperatursänkning påverkar bitumens styvhet oberoende av vilken temperatur sänkningen görs till. För att ta hänsyn till detta har alla proverna kylts på samma sätt och i samma kyl.

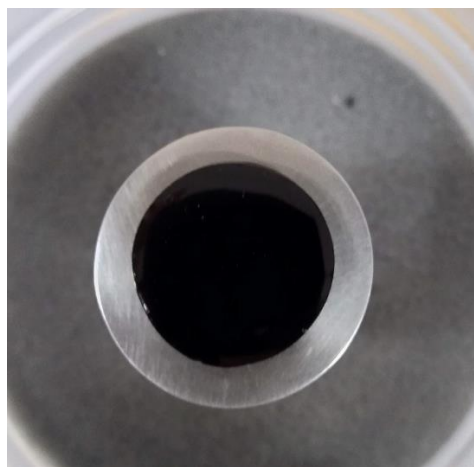
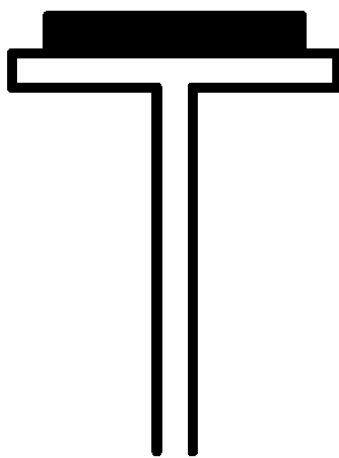
Provkropparna har i studien fått ligga i minst 2h i kylan, och max 3 dygn, innan tester utförs på materialet. Enligt SS-EN 14770–2012 skall provet ligga kylt, +8°C i form i max 30 min innan testerna körs, men i studien fattades beslutet att göra avsteg från detta. Avsteg gjordes av praktiska skäl. Om proverna inte tillåtits förvaras längre än 30min hade materialet behövt värmas i flera omgångar. Att inte värma provet mer än nödvändigt har i denna studie prioriterats på bekostnad av förvaringstid.

Värt att notera i SS-EN 14770-2012 är att de tillåter en förvaring på upp till 3 dygn i rumstemperatur, i studien valdes det att förvara proverna kylt då det ansågs finnas en större risk för separation än för temperatur påverkan vid 5°C

Från varje prov togs det ut 4 provkroppar, 2x $\varnothing$ 18mm och 2x $\varnothing$ 8mm. De två 18mm proverna användes för att utföra svep från 20-80°C och en MSCR mätning vid 44-52-60°C. Ett av de 8mm-prover som tagits fram användes för att utföra ett svep från 30-(-30)°C, i samma mätserie som svepen mäts även asfaltsbrukets duktilitet, vid 15°C. För mer information om duktilitetmätningen se Kap. 2.7.2.1. Den sista provkroppen sparades som extra om något skulle ske med den första PP08:an.

3.1.3. Applicering av prov

Inför provning appliceras provkroppen på den övre spindeln i maskinen, DSR. Vid applicering är det av stor vikt att kontaktytan mellan provkroppen och spindlarna blir bra. Innan appliceringen av provkroppen på den övrespindeln rekommenderar Nynas AB, och författaren, att spindeln värms till en temperatur på 10°C över mjukpunkten av asfaltsbruket. Mjukpunkten för asfaltsbruket mäts i studien med RVB och definieras som den temperatur då viskositeten mäts till 1'300'000 mPa*s (Heukelom, 1973). Mjukpunkten kan även uppskattas om informationen inte finns. Temperaturen mjukpunkt+10°C refereras till som trimtemperatur. Denna uppvärmning görs för att den del av provkroppen som ska fästas mot spindeln skall mjukna. Detta medger en bättre kontakt. Det är viktigt vid applicering att vara noggrann med att provkroppen placeras mitt på spindeln. Om provkroppen inte placeras mitt på spindeln kan resultatet påverkas. De gjutna proverna bör appliceras med det som varit undersidan i formen mot den övre spindeln. Vid appliceringen av provkroppen kan den övre spindeln kopplas loss ur maskinen, detta gör hela processen lättare.



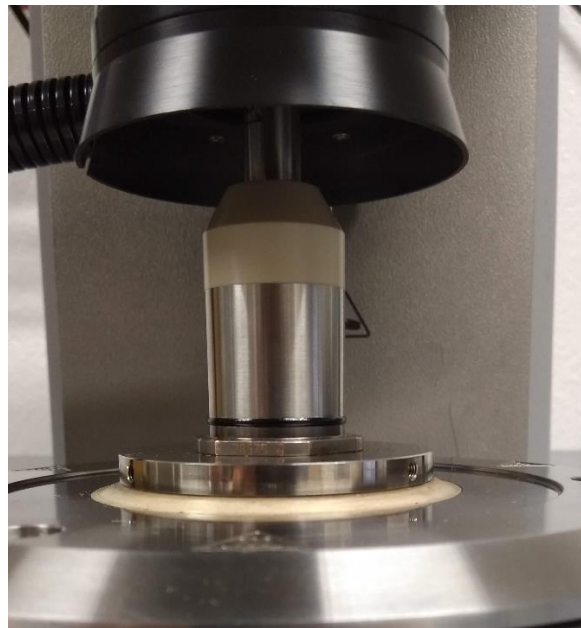
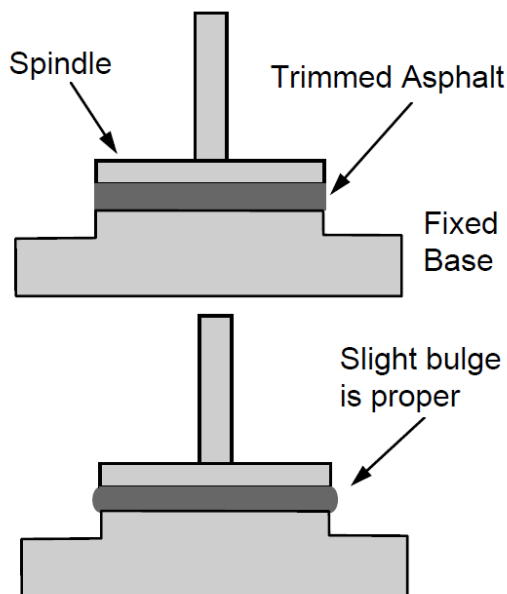
Figur 3.1-4 - Provkropp placerad på den övre spindeln (Baklokk et. al., 2002)

När provet har applicerats på den övre spindeln skall den övre spindeln sänkas ner till sin mätthöjd plus 0,05mm, PP25-mätningar görs vid 1mm och PP08-mätningar görs vid 2mm. I denna position bör provet lämnas i 10minuter, detta görs för att låta hela provkroppen tempereras till sin trimtemperatur. Om provkroppen har hamnat snett kan spindeln sänkas i fler steg för att då ge operatören en större möjlighet att kontrollera hur materialet sprider sig på spindeln.

Om, vid placering, provkroppen inte har hamnat centrerat på spindeln går det att lätt rotera spindeln när provet är varmt. Detta görs för att då förflytta delar av materialet dit det finns mindre material. Denna rotation görs för att ge en jämn fördelning av provkroppen.

Under provets tempereringstid ges även proven möjlighet att flyta ut och fylla det utrymme som ges. Denna utfyllnad gör att provkroppen kan antas ha full kontakt mot de anliggande ytorna, se Figur 3.1-5. När provkroppen är tempererad skall avståndet mellan plattorna i DSR-en minskas till 2mm för PP08 eller 1mm för PP25. Provkroppen skall komprimeras tills den ger form till en likformig utbuktning från mätplattorna. Detta görs för att en skall kunna försäkra sig om att det är full kontakt mellan provkropp och mätplattorna se Figur 3.1-5. Viktigt att observera är att med gjutmetoden görs det ingen trimning av materialet, detta steg ersätts av den noggranna uppvägningen av provkroppen.

När provkroppen är förberedd skall temperaturen sänkas från trimtemperaturen till starttemperaturen för mätningen, temperatursänkningen bör inte ske i steg större än 10°C. Provkropparna skall tempereras vid varje mellantemperatur i minst 5min. Den sista temperaturen, den vid vilken den första mätningen görs, skall provet tempererats i 10 min. När temperatursänkningen har gjorts och provkroppen är rätt tempererad kan mätningarna inledas.



Figur 3.1-5 - Provkropp "sandwichad" mellan mätplattorna i DSR-en Superpave (Federal Highway Administration, 1994)

3.2. Intervall för amplitudsvep

De tester som utförts i denna studie utgår från en pålagd töjning, amplitud, och av denna töjning registreras en spänning i provet.

När mätningar sker på en större mätserie är det inte praktiskt att mäta LVE-området vid varje frekvens på alla prover som ingår. Av denna anledning är det därför rekommenderat att se till äldre mätningar för att avgöra LVE-området. Ett alternativ till detta togs fram 1994 i en omfattande studie av bitumens LVE-område. Studien utfördes av SHRP, Strategic Highways Research Program, mer om den metoden går att finna under Kap 2.7.1.2.

Ett annat alternativ till att se till äldre mätningar är de matriser som Nynas har tagit fram. Materialet har tagits fram genom att Nynas har studerat flertal bitumen och kontrolleras deras LVE-område. Studien har kommit fram till att amplitudsvep för bitumen bör väljas enligt värden angivna i Tabell 3.2-1 och Tabell 3.2-2.

I denna studie har Nynas's matriser använts för bestämning av amplitud inför testerna.

Tabell 3.2-1 - Amplituder, % för DSR-mätning med PP25

Amplituder, % PP25										
Vinkelfrekvens	Temperatur, °C									
rad/s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,1	0,500	0,797	1,250	1,93	2,95	4,44	6,60	9,70	14,1	20,3
0,215	0,395	0,630	0,988	1,53	2,33	3,51	5,21	7,67	11,2	16,1
0,464	0,312	0,497	0,780	1,21	1,84	2,77	4,12	6,06	8,81	12,7
1	0,247	0,393	0,617	0,953	1,45	2,19	3,26	4,79	6,96	10,0
2,15	0,195	0,311	0,487	0,753	1,15	1,73	2,57	3,78	5,50	7,92
4,64	0,154	0,245	0,385	0,595	0,907	1,37	2,03	2,99	4,35	6,26
10	0,122	0,194	0,304	0,470	0,717	1,08	1,61	2,36	3,43	4,95
21,5	0,0961	0,153	0,240	0,371	0,567	0,853	1,27	1,87	2,71	3,91
46,4	0,0759	0,121	0,190	0,294	0,448	0,674	1,00	1,47	2,14	3,09
100	0,0600	0,0956	0,150	0,232	0,354	0,532	0,792	1,16	1,69	2,44

Tabell 3.2-2 - Amplituder, % för DSR-mätning med PP08

Amplituder, % PP08							
Vinkelfrekvens	Temperatur, °C						
rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
0,1	1,25	0,797	0,500	0,309	0,187	0,111	0,0647
0,215	0,988	0,630	0,395	0,244	0,148	0,0878	0,0511
0,464	0,780	0,497	0,312	0,193	0,117	0,0694	0,0404
1	0,617	0,393	0,247	0,152	0,0922	0,0548	0,0319
2,15	0,487	0,311	0,195	0,120	0,0729	0,0433	0,0252
4,64	0,385	0,245	0,154	0,0950	0,0576	0,0342	0,0199
10	0,304	0,194	0,122	0,0751	0,04550	0,0270	0,0157
21,5	0,240	0,153	0,0961	0,0593	0,0359	0,0214	0,0124
46,4	0,190	0,121	0,0759	0,0469	0,0284	0,0169	0,00983
100	0,150	0,0956	0,0600	0,0370	0,0224	0,0133	0,00776

3.3. MSCR

MSCR-test ger ett mått på hur deformationsresistent ett bitumen är vid hög temperatur. I vanliga fall skall mätningarna inledas kring mjukpunkten för bitumen, detta kommer inte att vara fallet i denna studie. I denna studie har det valts att göra alla mätningar för MSCR vid 44-52-60°C. Detta har gjorts då alla MSCR-gränser, för ett jungfruligt 70/100-bitumen, finns inom detta intervall. För gränser se Kap. 2.7.1.1. Vid de temperaturer varvid ett 70/100 når dessa gränser kommer att användas som referenser i rapporten. Detta val har gjorts för att kunna ge en fast referenspunkt för att kunna utvärdera effekten av filler på ett asfaltsbruk. Testerna görs på provkroppar av dimension $\varnothing 18\text{mm}$.

De tester som gjorts i studien har gjorts vid 44°C, 52°C och 60°C enligt:

1. Stabilisering av temperatur och normalkraft i 15 min.
2. Belastning med 100 Pa i 1 sekund.
3. Avlastning i 9 sekunder. Steg 2 och 3 repeteras ytterligare nio gånger innan programmet går vidare till nästa steg.
4. Ny belastning med 3200 Pa i 1 sekund.
5. Avlastningsfas i 9 sekunder. Steg 4 och 5 repeteras ytterligare nio gånger.
6. Ny temperatur och omstart av cykeln.

3.4. Duktilitet

Duktilitet är som nämnt i Kap. 2.7.2.1 ett mått på bitumens relaxationsegenskaper. Detta mått kan, enligt Glover et. al. (2005) tas fram från de mätningar som görs i DSR:en. I denna studie kommer detta mått att tas fram. Detta görs för att kunna jämföra hur fillermängd påverkar ett bitumens lågtemperatur egenskaper vad gäller relaxation. För att ge ett jämförbart resultat har alla mätningar skett vid 15°C och med en frekvens på 0,005 rad/s. Valet av frekvens och temperatur är gjorts med grund i det förhållande var vid Glover et. al. (2005) fann ett samband mellan konventionella mätningar av duktilitet och DSR-mätning. Amplituden som används vid mätningarna för duktilitet är beräknad via extrapolering av förhållandet för amplituder från mätningar vid 0,1-100rad/sec vid 15 °C ut Nynas's matriser.

3.5. Styvhet och m-värde

Styvhet och m-värde är mått som används för att definiera t-låg i Superpave. Enligt diagram och samband presenterade i Kap. 2.7.2.2 är det möjligt att ersätta BBR-mätningen med information ur DSR-mätningarna. I denna rapport kommer dessa värden att beräknas och presenteras. Detta görs för att ge en möjlighet att jämföra asfaltsbrukens lågtemperatur egenskaper. Detta görs för att kunna kvantifiera fillerns effekt på asfaltsbrukets lågtemperatur egenskaper.

3.6. Rigdenhållrum

Då Rigdenhållrum har mätts i arbetet har detta skett enligt det förfarande som föreskrivs i SS-EN 1097-4, Ballast – Mekaniska och fysiska egenskaper. I detta förfarande placeras materialet i en *Dropping block*, denna skall tillsammans med *Plunger* ha en total vikt på 875 ± 25 g.

Innan mätningen påbörjas vägs *Dropp blocket* utan *plunger* men med ett filterpapper, denna vikt antecknas.

Provet, $10 \pm 1,0$ g filler, torkas i ugn och placeras sedan i *Dropping blocket*, detta lyft sedan till en höjd på $102,0 \pm 1,0$ mm. Från denna höjd släpps sedan *Dropping blocket* ett i standarden angivet antal gånger, och med given frekvens. Efter detta vägs sedan *Dropping blocket* och filler, av detta kan då massan av den kompakterade fillern beräknas. Denna massa används sedan för att beräkna hållrumshalten av materialet. Beräkningen kräver att partikel densiteten av filler är känd sedan tidigare. (SIS, 2000)

Partikel densitet för de filler som är undersökta i denna studie har tagits fram av Skanska.



Figur 3.6-1 - Utrustning för mätning av Rigdenhållrum (MATEST, 2018)

4. Resultat

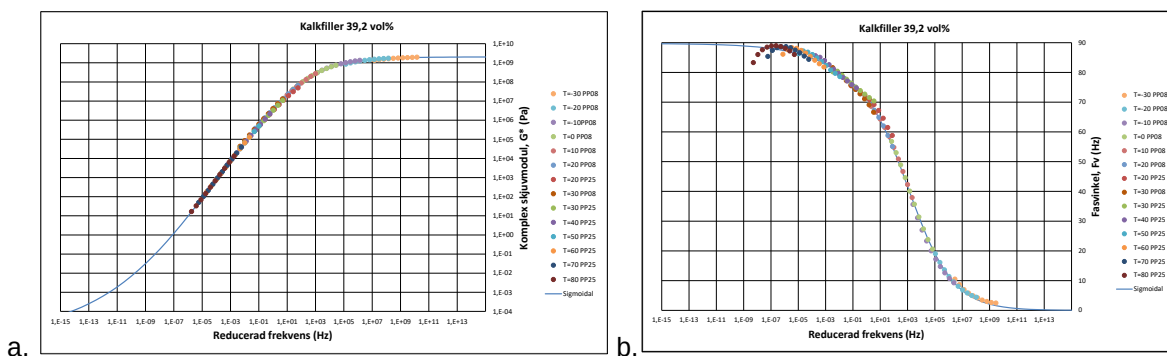
Målet med studien var att kvantifiera den effekt som val av filler, och mängd tillsatt filler har på ett asfaltsbruk. För att kunna kvantifiera denna effekt har det i studien valts att göra avstamp i Superpave. I studien har det valts att inte göra någon åldring av asfaltsbruket, trots detta har resultat från MSCR och t-hög redovisats. Detta har gjorts då studien endast ämnar jämföra effekterna av filler, MSCR och t-hög har tagits fram i ändamål att jämföra effekterna av fillermängd och typ.

Resultaten från Sveg- och MSCR-mätningarna redovisas i siffror och rådata i bifogade bilagor. Alla tabeller och diagram som följer under detta kapitel grundar sig i dessa.

4.1. Masterkurva

Många av egenskaperna som utvärderas från DSR-mätningarna baseras på parametrar sammansatta av den komplexa skjuvmodulen, G^* , och fasvinkeln, δ . Trots att mätningarna i det här fallet sker i ganska små steg måste önskade värden för utvärdering tas fram genom interpolering eller i något fall med extrapolering. Eftersom termoplastiska viskoelastiska material, som bitumen, påverkas kraftigt av ändringar i temperatur och lastfrekvens och ter sig olika över mätområdena måste ändringen mellan varje mätpunkt vara noga känd. Interpolering görs med sambandsmodeller. I studien användes WLF och Sigmoidalmodellen för G^* och WLF och en modifierad sigmoidalmodell för δ , för mer om Sigmoidalmodellen se 2.8.1.2.

Alla resultat i studien, förutom kryptestet MSCR och duktilitet, kommer från masterkurvor beräknade för varje provkörning som redovisas i Bilaga 6. Mer om masterkurvor, se kap.2.8.1.

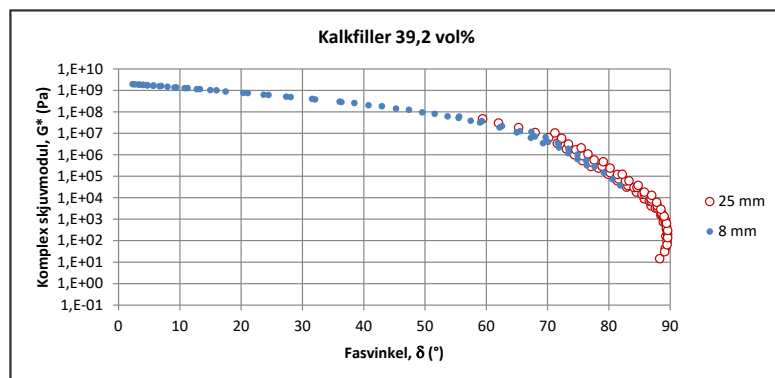


Figur 4.1-1 – Masterkurvor baserade på Sigmoidalsambandet för fasvinkel och komplex skjuvmodul för asfaltbruket Kalkfiller 39,2 vol%.

4.2. Blackdiagram

Blackdiagram som reologiskt verktyg förklaras i kap.2.8.2. Alla resultaten från studien redovisas i bilaga 3. Diagrammet används huvudsakligen för att se om det har uppstått något brott i provet under mätserien. Ett brott i provkroppen skulle framstå som ett brott i kurvan i diagrammet. Diagrammet kan även användas för att påvisa newtonskt/icke newtonskt beteende. Sambandet som redovisas i diagrammet kan ses som en illustration av ämnets viskoelastiska karaktär

Diagrammen i bilaga 3 visar överlag att de här sambanden gäller men att det finns en allt tydligare skillnad i kurvform mellan PP08 och PP25 vid de höga fillerhalterna. Detta framgår också i masterkurvorna. Bristen på överlappning vid de låga temperaturerna, med PP25, kan förklaras med att egenskaperna ligger utanför instrumentets mätformåga. Det gäller i första hand fasvinkeln. Många betraktar värdena som avvikande och stryker dem, i studien valdes det att visa alla värden som inte är uppenbart felaktigt framtagna. Dock är det viktigt att nämna att de utelämnats i de beräkningarna som gjorts.



Figur 4.2-1 – Sambandet mellan Komplex skjuvmodul, G^* , och fasvinkel, δ , i ett Blackdiagram.

4.3. Fillers förstyvande effekt på asfaltsbruk

I studien redovisas effekterna av filler vid 10rad/s. Denna frekvens valdes för att illustrera effekten då laster vid denna frekvens motsvarar den frekvens som asfaltsbeläggningar utsätts för vid passager av trafik som färdas vid 90 km/h.

Resultaten av mätningarna i studien redovisas i Tabell 4.3-1.

Enligt Liao et. al. (2013b) kan förstyvningen vid t-hög ses som ett proxy-värde för asfaltsbrukets ökade motståndskraft mot permanenta deformationer. Effekten av de fillertyper, vid t-hög, som har undersökts i studien illustreras i Figur 4.3-1a.

Enligt Liao et. al. (2013b) kan förstyvningen vid t-mellan ses som ett proxy-värde för asfaltsbrukets ökade motståndskraft mot utmattningskador. Effekten av de fillertyper, vid t-mellan, som har undersökts i studien illustreras i Figur 4.3-1b.

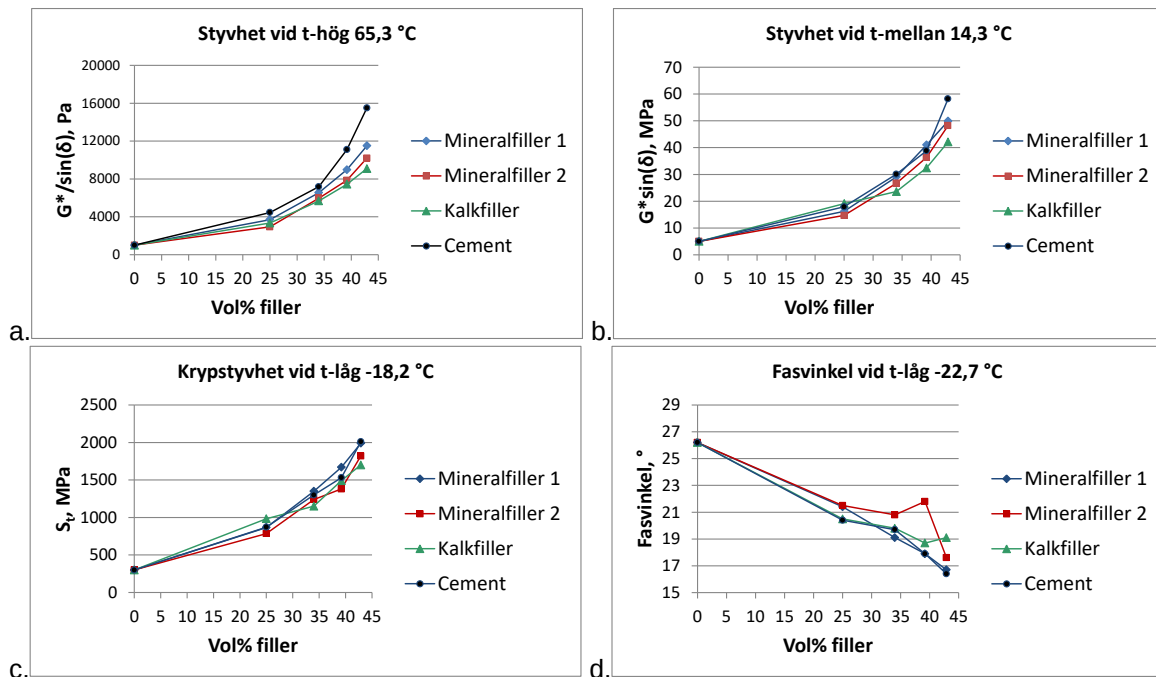
T-låg kan ses som ett proxy-värde för asfaltsbrukets relaxationsegenskaper. En ökning av t-låg kan ses som försämrade relaxationsegenskaper hos asfaltsbruket. Effekten av de fillertyper, vid t-låg, som har undersökts i studien illustreras i Figur 4.3-1c-d.

t-låg testar lågtemperateregenskaperna med G^* , $S(60)$ och fasvinkeln δ . T-låg undersöks normalt i Superpave med BBR och DTT, men i denna studie utnyttjas de redovisade samband mellan DSR-mätningar och BBR/DTT, se kap.2.7.2.2. G^* och $S(60)$ är två olika sätt att beskriva samma sak, nämligen krypstyvhet. Fasvinkeln beskriver förändringshastigheten av krypstyvheten, som kallas m-värdet. Den av de två, krypstyvheten respektive förändringen, som ger det minst gynnsamma utfallet avgör slutresultatet.

Värt att påpekas är att varken bitumen eller asfaltbruket har utsatts för åldring med RTFOT respektive PAV enligt Superpave. Det betyder bland annat att värdena för 70/100 inte ska jämföras med andra undersökningar som följer Superpave.

Tabell 4.3-1 - PG-värden för asfaltsbruk vid PG-temperaturer

PG-temperaturer för 70/100							
		t-hög		t-mellan		t-låg	
						S_t	m
		65,3	59,3	14,3	-17,8	-18,2	-22,7
Mätvärden vid PG-temperaturer							
		$G^*/\sin(\delta)$		$G^*\sin(\delta)$	G^*	$S(60)$	m
Prov		Pa		MPa			
70/100		1000	2200	5,0	111	300	26,2
Mineral. 1, vol%	25	3700	8060	16,2	319	866	21,4
	34	6550	14300	29,1	495	1350	19,1
	39,2	8980	19600	41,0	615	1670	17,9
	42,9	11500	25400	49,9	729	1990	16,7
	36,3	7540	16451	34,0	546	1486	18,6
Mineral. 2, vol%	25	2940	6460	14,7	289	785	21,5
	34	5970	13100	26,7	458	1240	20,8
	39,2	7850	17300	36,3	513	1380	21,8
	42,9	10200	22500	48,2	673	1820	17,6
	36,3	6760	14860	30,6	482	1300	21,3
Kalkfiller, vol%	25	3340	7350	19,1	361	983	20,5
	34	5680	12500	23,6	422	1150	19,8
	39,2	7440	16300	32,4	549	1490	18,7
	42,9	9090	19900	42,1	626	1700	19,1
	36,3	6415	14090	26,9	472	1283	19,3
Cement, vol%	25	4460	9760	17,9	320	871	20,4
	34	7180	15800	30,1	478	1300	19,7
	39,2	11100	24600	38,8	559	1530	17,9
	42,9	15500	33400	58,2	734	2010	16,4
	36,3	8684	19207	33,4	511	1393	19,0



Figur 4.3-1 - Fillers förstyvande effekt på asfaltsbruk

4.4. Performance Grade

I detta kapitel redovisas en sammanställning av resultaten från studien. De värden som redovisas nedan tar avstamp i de krav som ställs på bitumen i den amerikanska Superpave-standarden, för mer om Superpave-standarden se Kap.2.5. De gränsvärden som redovisas i Kap.2.5 har översatts till motsvarande gränsvärden för ett asfaltsbruk.

Omtolkningen av gränsvärdena har utgått från det resultat som tillhandahållits från de tester som utfördes på ett jungfruligt 70/100. De temperaturer varvid dessa sedan uppfyllde gränsvärdena i Superpave har använts som referens för asfaltsbruken. De värden varvid ett asfaltsbruk med 70/100 och en inblandningshalt på 36,3 vol% uppnår samma temperatur, som det rena 70/100 bitumen, har satts som gränser för våra asfaltsblandningar. Referensen som sattes är ett genomsnitt mellan resultaten från asfaltsbruken blandade med de två mineralfiller som testats.

I studien har masterkurvor framställts, ur dessa har interpoleringar gjorts för att beräkna de gränsvärden som satts i Superpave, se Kap.2.5

Det som används som en referenspunkt vid utvärdering av resultaten är den inblandning på 36,3 vol%. Anledningen till varför denna är vald är att det är den inblandning som är vanligast förekommande vid asfaltsproduktion. Denna inblandnings volym har inte mätts i arbetet utan har interpolerats från de mätningar som är gjorda i studien.

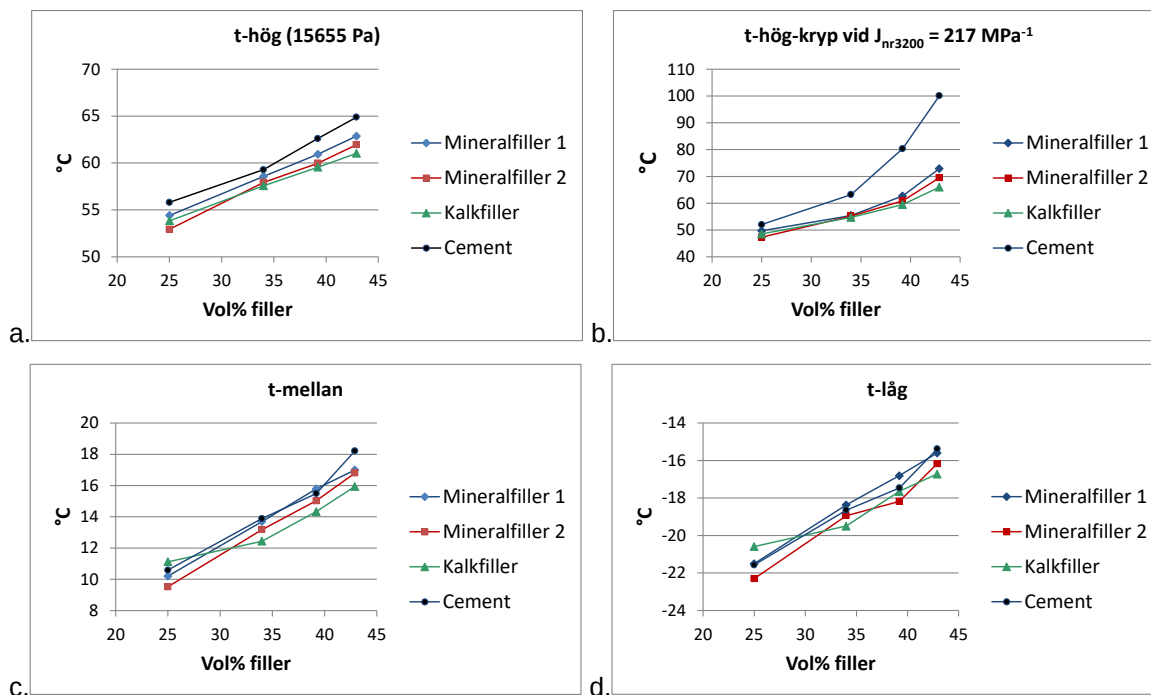
Värt att notera är att i studien har det inte gjorts någon åldring av bitumen eller asfaltsbruk. Trots detta har det valets att redovisa t-hög kryp, MSCR, och t-hög 2,2 kPa. MSCR och t-hög 2,2 kPa är båda metoder för att definiera egenskaperna hos ett åldrat bitumen. Då denna studie ämnar undersöka effekterna av filler, inte klassificera asfaltsbruk enligt Superpave kommer dessa värden ändå redovisas för att fungera som referenser för andra värden.

I studien redovisas både G^* och beräknat $S(60)$ som båda är proxy-värden för att definiera S_t . Hur sambandet fungerar redovisas vidare i Kap.2.7.2.2.

Figur 4.4-1 illustrerar effekterna av fillerinblandningen som redovisas i siffror i Tabell 4.4-1.

Tabell 4.4-1 - PG-gränser för asfaltsbruk

Performance grade temperaturer, °C								
		t-hög		t-mellan	t-låg		t-hög kryp	
		G*/sin(δ)		G* sin(δ)	St	S(60)	m	J _{nr3200}
70/100		1000 Pa	2200 Pa	5 MPa	111 MPa	300 MPa	26,2 °	4 kPa ⁻¹
		65,3	59,3	14,3	-17,8	-18,2	-22,7	57,6
36,3 vol%:		7150 Pa	15655 Pa	32,3 MPa	514 MPa	1393 MPa	19,9 °	217 MPa ⁻¹
Mineralfiller 1, vol%	25	60,2	54,4	10,2	-21,2	-21,5	-23,5	49,7
	34	64,6	58,6	13,7	-18,0	-18,4	-22,2	55,4
	39,2	67,1	60,9	15,8	-16,4	-16,8	-21,5	62,7
	42,9	69,1	62,9	17,0	-15,2	-15,6	-20,9	72,9
	36,3	65,7	59,6	14,6	-17,3	-17,7	-21,9	58,2
Mineralfiller 2, vol%	25	58,5	52,9	9,5	-22,1	-22,3	-23,7	47,3
	34	63,8	57,9	13,2	-18,6	-18,9	-23,2	55,2
	39,2	66,0	60,0	15,0	-17,8	-18,2	-23,9	60,9
	42,9	68,1	61,9	16,8	-15,7	-16,2	-22,5	69,5
	36,3	64,8	58,9	14,0	-18,2	-18,6	-23,5	57,5
Kalkfyller, vol%	25	59,5	53,8	11,1	-20,3	-20,6	-23,0	48,5
	34	63,5	57,6	12,4	-19,2	-19,5	-22,6	54,7
	39,2	65,6	59,5	14,3	-17,3	-17,6	-22,0	59,5
	42,9	67,2	61,0	15,9	-16,3	-16,7	-22,2	66,0
	36,3	64,4	58,5	13,2	-18,4	-18,8	-22,3	56,6
Cement, vol%	25	61,6	55,8	10,6	-21,3	-21,6	-23,0	52,0
	34	65,3	59,3	13,9	-18,3	-18,6	-22,6	63,2
	39,2	68,8	62,6	15,5	-17,1	-17,5	-21,5	80,4
	42,9	71,1	64,9	18,2	-15,0	-15,4	-20,5	100,1
	36,3	66,7	60,7	14,6	-17,8	-18,1	-22,2	69,7



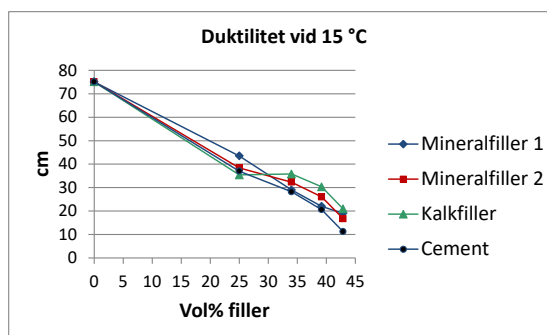
Figur 4.4-1 - Fillers inverkan PG-temperaturer

4.5. Duktilitet

Duktiliteten är mätt enligt vad som definieras i Kap.2.7.2.1. I Tabell 4.5-1 redovisas ett direkt uppmätt värde enligt Kap.2.7.2.1 och ett värde som är beräknat från sveptestets masterkurva. Värt att notera är att alla värdena är högre än den övre gräns som definieras i Kap.2.7.2.1. I den refererade studien hävdas att omräkningen av DSR-mätningen till duktilitet endast är pålitlig upp till en duktilitet på 10cm. Dock anses värdena fortfarande ha ett värde då de kan används för att rangordna asfaltsbruken för att kunna jämföra resultaten. Av resultatet framgår hur filler försämrar asfaltsbruks relaxationsegenskaper vid låga temperaturer. Fillersorterna uppvisar vissa skillnader men mätningarna behöver upprepas innan de kan betraktas som signifikanta.

Tabell 4.5-1 - Duktilitet hos asfaltsbruk

		Duktilitet	
		Uppmätt	Beräknad
Prov		cm	
70/100		79,6	75,1
Mineral. 1, vol%	25	44,9	43,5
	34	29,1	29,0
	39,2	21,5	22,0
	42,9	18,7	19,0
	36,3	25,5	25,7
Mineral. 2, vol%	25	37,9	38,4
	34	33,5	32,3
	39,2	26,8	26,0
	42,9	16,5	16,7
	36,3	31,0	29,9
Kalkfiller, vol%	25	35,5	35,4
	34	36,3	35,8
	39,2	30,5	30,3
	42,9	20,4	20,9
	36,3	34,4	34,0
Cement, vol%	25	37,4	37,0
	34	27,7	28,2
	39,2	19,3	20,6
	42,9	11,4	11,2
	36,3	24,3	25,2



Figur 4.5-1 - Fillers inverkan på duktilitet

Skillnaden mellan uppmätta och beräknade värden är i medeltal 0,08 cm med en standardavvikelse på 0,71. Metoderna kan inte skiljas åt på någon signifikant nivå. De beräknade värdena bygger visserligen de också på uppmätta värden, men är extrapolerade från masterkurvorna.

4.6. MSCR

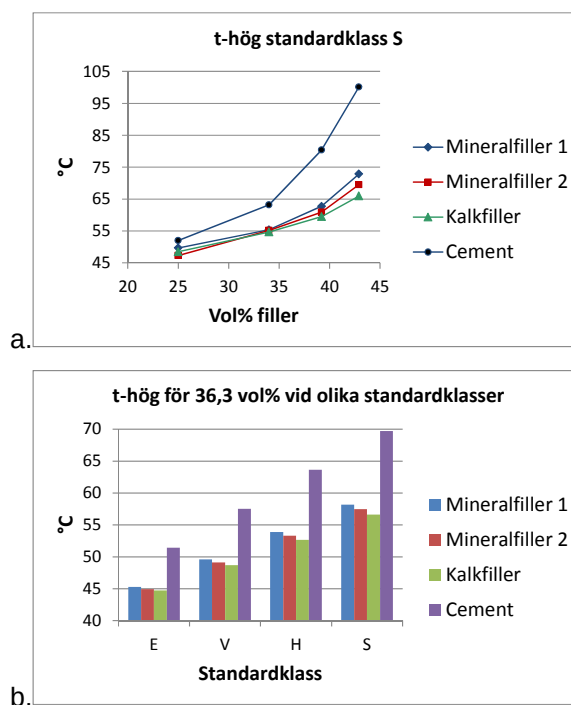
I studien utfördes MSCR-mätningar. Detta gjordes för att kunna kvantifiera de effekter som filler har på asfaltsbrukets motstånd mot spårbildning. Enligt förslag till Superpave sätts 4 olika gränsvärden för *t-hög*, mätta med MSCR. För att se definitionen av dessa värden se Kap. 2.7.1.1.

Riktvärdena i Tabell 4.6-1 beräknades på samma sätt som i fallet med Superpaves olika PG-temperaturer. Först bestämdes temperaturnivåerna för bitumen 70/100 olika klasser, som sedan används för att bestämma riktvärdena för asfaltbruken med 36,3 vol% filler. Resultaten från de två mineralfillerna användes liksom tidigare som referens. De karaktäriserande temperaturerna för de olika blandningarna ska ses som *t-hög* för ett asfaltbruk med angiven sammansättning. *t-hög* är som angivits tidigare den högsta dimensionerande temperaturen vid vilken asfaltbeläggningen klarar att motstå plastiska deformationer.

Rådata för framtagande av MSCR-värdena för varje asfaltsbruk redovisas i bilaga 4.

Tabell 4.6-1 - MSCR resultat enligt Superpave gränsvärden

MÄTNINGAR AV Jnr3200 PÅ ASFALTBRUK					
Temperaturer vid Superpaves standardklasser					
Standardklass:	E	V	H	S	
Jnr3200	kPa ⁻¹				
för 70/100	0,5	1	2	4	
Klassgränser	Temperatur, °C				
för 70/100	45	49	54	57,9	
Jnr3200	MPa ⁻¹				
för asfaltbruk	38	68	122	217	
Violyt% filler	Temperatur, °C				
Mineralfiller 1	25	38,6	42,3	46	49,7
	34	42,8	47,0	51,2	55,4
	39,2	49,0	53,6	58,2	62,7
	42,9	52,0	59,0	65,9	72,9
	36,3	45,3	49,6	53,9	58,2
Mineralfiller 2	25	36,6	40,2	43,7	47,3
	34	43,2	47,2	51,2	55,2
	39,2	47,3	51,8	56,4	60,9
	42,9	52,6	58,3	63,9	69,5
	36,3	44,9	49,1	53,3	57,5
Kalkbergsfiller	25	37,7	41,3	44,9	48,5
	34	43,2	47,0	50,9	54,7
	39,2	46,7	51,0	55,2	59,5
	42,9	49,7	55,2	60,6	66,0
	36,3	44,7	48,7	52,6	56,6
Cement	25	40,5	44,4	48,2	52,0
	34	46,5	52,1	57,6	63,2
	39,2	59,4	66,4	73,4	80,4
	42,9	71,6	81,1	90,6	100
	36,3	51,4	57,5	63,6	69,7



Figur 4.6-1 - Fillers inverkan på krypeffekten

4.7. Rigdenhålrum

Rigdenhålrum har som nämnt i kap.2.4.2 en stark inverkan på hur en fyller påverkar egenskaperna hos ett asfaltsbruk. I Tabell 4.7-1 redovisas de rigdenhålrum och förstärkningsfaktorn som har uppmätts i studien. Rigdenhålrummet multiplicerat med förstärkningsfaktorn ger ett tal, effektiva volymandelen, som ska beskriva fyllermaterialets verkliga påverkan. Dessa värden kan jämföras med de värden som togs fram i studien utförd av Liao, et. al. (2013a), dessa värden redovisas i denna rapport under kap.2.4.2. Av Liao et. al. (2013a)s resultat att döma är de värden som tagit fram i denna studie pålitliga.

Resultatet från mätningarna redovisas i bilaga 5

Tabell 4.7-1 - Rigdenhålrum och Effektiv volymandel fyller

Prov	Rigden- hålrum [vol%]	Förstärk- nings- faktor	Volymandel fyller [vol%]	
			Metrisk	Effektiv
Mineralfyller 1	32,1	1,47	36,3	53,5
Mineralfyller 2	28,3	1,40	36,3	50,6
Kalkfyller	23,7	1,31	36,3	47,6
Cement	27,1	1,37	36,3	49,8

5. Diskussion och slutsatser

I detta kapitel följer diskussion kring resultaten i förhållande till syftet och befintlig kunskap, kritisk granskning av resultat och metod följt av slutsatser och rekommendationer för framtida studier.

Studien avser att kontrollera möjligheten att använda LVE-gränser framtagna för bitumen för undersökning av asfaltsbruk med DSR. Avsikten med studien är även att undersöka effekten av val av filler och mängd filler. I studien undersöktes även möjligheten att skapa masterkurvor för fasvinkel. I Kap.3 redovisas ett protokoll för testning av asfaltsbruk med DSR. Det är detta protokoll som har arbetats fram och använts i denna studie.

5.1. Resultatdiskussion

5.1.1. Masterkurva

I studien har masterkurvorna byggts med en kombination av WLF-formel och Sigmoidal. WLF-formeln har använts för att beräkna konstanterna C_1 och C_2 . Konstanterna är beräknade för att superpositioneringen av mätserierna ska hamna så nära Sigmoidal-modellen som möjligt. De ingående konstanterna i Sigmoidal modellen är även de beräknade för att ge en liten differens mellan mätdata och modellen. Alla beräkningarna är gjorda med problemlösaren i Excel.

I studien gjordes en separering för Sigmoidal-modellen mellan PP08 och PP25. Detta gjordes för att ge en bättre passning av mätdata. Då denna uppdelning gjorde passningen bättre tyder det på att mätningarna som har gjorts har påverkats av den geometriska skillnaden mellan PP08 och PP25.

Vad gäller masterkurvor för fasvinkel så går de att bygga med WLF-formeln och Sigmoidal-modell, men som det går att se i många av masterkurvorna blir superpositioneringen inte perfekt för all mätdata. De brott som går att se i masterkurvan skulle kunna bero på att de under mätningarna har hänt något med provet. Det skulle kunna vara att mätningarna har gjorts utanför LVE-området. Brotten kan enligt Liao et. al. (2013a) bero på att de reologiska egenskaperna hos asfaltsbruket blir mer komplexa vid höga halter filler. Denna förändring i beteendet kan då tros bero på interaktionen mellan filler partiklarna i asfaltsbruket. Dock borde detta fenomen då inte uppdagas vid de lägre inblandningshalterna, 25 vol-% eller 34 vol-%.

I studien används en ombyggd Sigmoidal med linjära mätvärden för fasvinkeln istället för logaritmerade. I studien delas masterkurvan, en del för PP08 och en för PP25. Med en uppdelning i PP25 och PP08 blir passningen mellan masterkurva och mätvärden tillräckligt bra för sitt syfte. Medelvärde skiljer runt 0.1 °C och standardavvikelsen för enskilda värden ligger på 0,8 °C. R-värdet ligger mestadels på 0,99; utan strykning av outliers. En uppdelning som denna behövs inte göras för ett rent bitumen, detta beror troligtvis på bitumens mindre komplexa reologi. Behovet av uppdelningen ligger troligtvis i hur de olika provkropparna beter sig under belastning. Denna skillnad kan nog tillskrivas de två helt olika geometrier proverna har.

I bilaga 6 går det att se hur för varje ökning som görs i volym-% filler ökar asfaltsbrukets styvhet. Detta fenomen är återkommande för alla mätserier, dock är det lite oklart i den serie som gjordes på bruket gjort av mineralfiller 1. Anledningen till detta är troligtvis att det här har skett något mättekniskt misstag. Detta antagande stödjer sig på faktumet att de andra serierna faller rätt i vad som är att förvänta. Vad som är tydligt i tidigare studier, (Soenen & Teugels, 1999; Chen et. al., 2008; Liao et. al., 2013a; Liao et. al., 2013b), och i denna studie är att vid inblandning av filler sker en förskjutning uppåt av masterkurvan på G^* -axeln. En ökande inblandningshalt ger en ökande förskjutning.

Sigmoidal-modellerna som togs fram i samband med framtagandet av masterkurvorna kan ses som ett stöd när mätningarna faller in där de bör, som det gjort för G^* och fasvinklar, eller när data som inte är mätt söks. Där superpositioneringen inte faller in som är att förvänta kan modellen användas som ett verktyg för att ange hur resultaten borde ha fallit in. Modellen kan då användas för att beräkna/interpolera värden som söks vid intervall där mätvärden inte är pålitliga. Detta betyder att den valda modellen framförallt kan användas för att ersätta de mätdata som ej är pålitliga. Problem med pålitlighet kan vara till följd av mätfel/handhavandefel eller till följd av begränsningar hos instrumentet.

De masterkurvor som tagits fram i studien har framför allt använts som grund för beräkningar av duktilitet och PG-gränsvärden. Alla masterkurvor finns bilaga 6. I alla masterkurvor har 25°C använts som referenstemperatur.

5.1.2. Blackdiagram

I blackdiagrammet för prov *kalk 42,9 vol%* går det att observera en uppåtgående svans för den andra mätserien i 25mm. Detta kan vara ett tecken på att mätningen har skett utanför det linjärviskoelastiska området, alternativt kan det vara en följd av begränsningar i mätinstrumentet.

I övrigt följer mätningarna en relativt mjuk kurva. Mätningarna med de olika spindlarna, 25mm och 8mm, möter varandra väl. Detta tyder på att resultatet och mätningarna är pålitliga.

I blackdiagrammen uppvisas en återgående "svans". Detta kan ses som en indikator på att ett prov skulle vara en icke newtonsk vätska. Detta fenomen går att observera i alla provkroppar av asfaltsbruk. Det går också att se att med en ökande mängd filler blir detta fenomen tydligare. Detta betyder att ett asfaltsbruk med mer filler beter sig mindre och mindre som en newtonsk vätska. Värt att anmärka är att bitumen är en newtonsk vätska, detta betyder att tillsatsen av filler i asfaltsbruk förändrar reologin hos blandningen. Den återgående svansen kan även vara ett tecken på en ökning av de elastiska egenskaperna hos asfaltsbruket vid låga frekvenser. Den praktiska betydelsen av detta behöver undersökas närmare

5.1.3. Fillers förstyvande effekt på asfaltsbruk

I Kap.4.3 går det att se hur t -hög, t -mellan och t -låg påverkas av de olika inblandningshalterna av filler. Värt att notera i Tabell 2.4-1 och Figur 4.3-1, framför allt Figur 4.3-1 a-c, är hur påverkan av filler i ett asfaltsbruk avtar med temperatur. Det förs resonemang kring detta fenomen i Kap.2.4. I takt med ökande styvhet, och elasticitet, vid lägre temperatur kommer bitumens egenskaper dominera blandningen med filler. Fillerens tillskott till förstyvningen blir därför relativt sett mindre vid låg temperatur. Detta illustreras av att en blandning med 36,3 vol% visar vid t -hög, t -mellan och t -låg en ökning av styvheten på asfaltsbruket med en faktor 7,4, 6,3 respektive 4,6 jämfört med rent bitumen

5.1.4. Performance Grade

Det går att se i resultatet från PG-sammanställningen att en högre mängd fyller förskjuter PG-skalan uppåt, både t-hög och t-låg ökar. Till detta går det också att observera att mängden fyller påverkar asfaltsbrukets egenskaper mer vid höga temperaturer än vid låga. Detta fenomen diskuteras vidare i kap.2.4.1 där det påvisas hur fyllers påverkan på ett asfaltsbruks egenskaper ökar vid högre temperaturer alternativt längre lasttider. Detta sker till följd av bitumens viskoelastiska egenskaper.

Ett fenomen som går att observera i studien, oberoende av fyllertyp, är att gradienten för definieringen av t-hög enligt kryp, MSCR, är mycket brantare än den för t-hög 2200 Pa. Detta kan då tolkas som att metoden MSCR är känsligare för ökad styvhet genom tillsats av fyller än annan typ av förstuvning, men det återstår att undersökas.

Det förs resonemang i kap.2.7.1.1 kring att hur MSCR är en mer verklighetstrogen och pålitlig metod för definieringen av bitumens egenskaper, det är då inte helt långsökt att anta att det samma gäller för asfaltsbruk. Detta kan då tolkas som att metoden där t-hög definieras som 2,2 kPa (15655 Pa för asfaltsbruk) är en metod som underskattar effekten av hur mycket en fyller påverkar ett asfaltsbruk ur styvhetssynpunkt. Detta behöver emellertid kompletteras med utmattningsstudier innan någon slutsats kan dras om MSCR-metodens fördel framför ursprunglig PG-metod för t-hög.

I Tabell 4.4-1 går det att observera hur asfaltsbrukets t-hög ökar med en ökad inblandning av fyller, och sjunker med en mindre mängd fyller. Detta skulle kunna betyda att asfaltens motstånd mot spårbildning kan påverkas direkt i blandningsmomentet.

Som nämnts i Kap.2.5 används t-medel temperaturen som ett mått på bitumens motståndskraft mot krackelering. Med detta i tanke går det att observera i Tabell 4.4-1 hur både mängd av fyller och typ av fyller påverkar denna egenskap hos asfaltsbruket. Vi kan i resultatet se hur en asfaltsmassa med mer fyller blir mer känslig för krackelering. T-medel kan ses som ett mått på asfaltsbrukets viskositet och som flera studier, inklusive denna, har påvisat ökar viskositeten med en ökad ängd fyller.

t-låg har i denna studie undersökt med hjälp av DSR istället för, som rekommenderas i kap.2.5, BBR. Detta har kunnat göras med hjälp av de förhållanden som observerats och redovisats i Kap.2.7.2.2. Det enda som i denna studie kan nämnas om riktigheten i dessa värden är att de faller in där de förväntats hamna, och värdena är liknande eller desamma som värden uppmätta i liknande studier. Då dessa värden är i rätt storleksordning och följer tidigare studier anses de vara pålitliga. Med detta antagande går det att i Tabell 4.4-1 se hur mängden fyller förskjuter t-låg värdet mot högre temperaturer. Detta betyder då att ett asfaltsbruks relaxationsegenskaper är starkt bundna till mängden fyller som används vid tillverkningen av bruket. I Tabell 4.4-1 går också att se hur mängden fyller verkar ha större inverkan på t-hög än t-låg. Detta fenomen är förväntat och beror på att vid de lägre temperaturerna blir bitumens elastiska egenskaper mer dominanta i asfaltsbruket än vid de höga. Detta fenomen förklaras mer ingående i kap.2.4.1.

5.1.5. Duktilitet

I Tabell 4.5-1 går det att se hur det beräknade värdet håller sig väldigt nära det uppmätta. Detta kan utnyttjas vid mätningar i fortsatta studier där det inte behöver göras en unik mätning för duktilitet. Beräkningarna är gjorda enligt superpositioneringsprincipen, vinsten som går att göra med detta är att mätningarna av duktilitet görs vid en mycket låg frekvens. Eftersom vi kan se att det beräknade värdet hamnar väldigt nära det mätta värdet anses det vara överflödigt att göra en separat mätning vid 0,005 rad/s.

Av Tabell 4.5-1 framgår att duktiliteten i asfaltsbruket minskar med en ökad mängd filler. Detta kan tolkas som, och styrks av föreliggande mätningar, att viskositeten hos asfaltsbruket ökar med en ökad fillermängd. Det innebär asfaltsbrukets viskoelastiska egenskaper är starkt knutna till mängd och typ av filler som används vid tillverkningen.

Ett asfaltbruk med alltför mycket filler eller en fillertyp med hög uppstyvningsförmåga kan leda till en asfaltmassa med sämre relaxationsförmåga och mer benäget att krackelera av utmattning i förtid eller vid låga temperaturer. Gränsvärden bör tas fram.

5.1.6. MSCR

Av resultaten i Tabell 4.6-1, MSCR-mätningarna, framgår hur känsligt asfaltsbrukets krypförmåga är för mängden filler och fillersorten. Angivna värden står för temperaturen för en definierad egenskap. Ju högre temperatur desto större motståndsförmåga mot krypning och därmed permanent spårbildning. Ett annat sätt att uttrycka samma sak är att ökad andel filler ökar asfaltsbrukets möjlighet att återhämta påförda deformationer. Varje ökning av fillermängden i den här studien motsvarar ungefär ett helt kvalitetssteg på bitumensskalan, till exempel från 70/100 till 50/70.

Resultaten från MSCR-mätningarna följer de övriga resultaten från studien men effekterna är tydligare markerat i det här fallet.

5.1.7. Rigdenhållrum

Effektiv volym definieras som volymen av fillerkornen och hållrummet mellan partiklarna i komprimerat stadium. En filler med stort hållrum kräver mer bitumen innan asfaltbruket blir flytande. Omvänt blir asfaltbruket trögare vid ett givet blandningsförhållande. Därför används ofta begreppet effektiv volym för att bättre kunna förutspå ett asfaltsbruks egenskaper och i jämförelser mellan olika fillersorter.

Av Tabell 4.7-1 och Figur 4.3-1 framgår rigdenhållrummet som en stark förklaringsfaktor. Undantaget är cement. Effektiva volymen för cement är mindre än den för de undersökta granitfillerna, ändå är effekten av cement betydligt kraftigare. Detta tolkar författaren som att det finns andra förklaringsfaktorer, till exempel en fysokemisk interaktion mellan cement och bitumen.

En annan förklaring till cementets kraftigare inverkan skulle kunna vara kornfördelningen, till exempel extremt fina partiklar. Eftersom kornstorleksbestämning för fillermaterialen inte har utförts, i den här studien, kan det inte uteslutas som en möjlig förklaring. Bestämning av liknande material i andra undersökningar påvisar emellertid inga märkbara skillnader mellan mineralfiller och cement, se Figur 2.3-1.

I flera publikationer tas cementfrågan upp (Hesami et. al. (2014), Kavussi och Hicks (1997), Liao et. al. (2013a) utan att någon säker förklaring har presenterats. Fillers påverkan på bitumen kan placeras i tre huvudkategorier: 1. partiklarnas förmåga att skapa ett armerat gitter, 2. fysikemisk reaktion mellan filler och bitumen, och 3. interaktion mellan partiklarna.

Det är värt att anmärka att enligt Kavussi och Hicks (1997) är den kemiska reaktionen mellan cement och bitumen försumbart liten. Å andra sidan menar Liao et. al. (2013a) att den kemiska effekten är märkbar och det bör därför tas hänsyn till den.

Enligt författaren bör det tas hänsyn till den kemiska reaktionen för cement, givet att antagandet om siktkurva är riktigt.

5.2. Metoddiskussion

Nedan följer en granskning av och kommentarer kring de metoder som valts i studien för att undersöka materialen, hanteringen av materialet och de metoder som valts för att redovisa dessa resultat.

5.2.1. Preparering och lagring av provkroppar

Tillverkningen av asfaltbruk är en fråga om noggrannhet i uppvärmningen och omrörning i omgångar vid rätt temperatur för att provet ska bli homogent. Det kräver en del handlag och övning. Om det inte hade fungerat tillräckligt bra skulle det ha synts i resultaten, som överlag har formerats sig i logisk ordning. Då materialet har hamnat logiskt antas blandningarna vara riktiga.

I studien har de olika asfaltsbruken värmts till olika temperatur för att kunna blandas. Detta kan leda till en divergens i bitumens påverkan av värmningen detta kan medföra en påverkan på resultatet. Dock har detta setts som enda alternativt i studien. Om alla prover skulle värmas till samma temperatur skulle det medföra problem med blandningen av proverna. Under studien uppmärksammades att både övertemporering och undertemporering medför problem vid homogenisering av asfaltsbruket. I studien antas att den påverkan som kommer av de olika temperaturerna är relativt liten, men de bör ej helt ignoreras. Anledningen till att den inte ses som ett stort problem är att vid blandningen är det relativt stora mängder bitumen som värms, detta leder till att påverkan av temperatur blir mindre. Den tid som värmningen gjordes hölls kort för att, i största möjliga utsträckning, minimera den påverkan som ändå sker.

Som tidigare nämnts i studien, kap.2.7.2.1, kan bitumens egenskaper förändras efter att ha påverkats av låga temperaturer. I studien har beslutet fattats att risken för separation är av större vikt än risken för förändring till följd av låga temperaturer. De temperaturer som provkropparna lagras vid är fortfarande över fryspunkt. I en studie utförd av Anderson et. al. (1994) presenteras hur hastigheten på temperatursänkningen påverkar bitumen styvhet, dock är denna studie gjord på bitumen som sänks till -15°C . Provkropparna framtagna i denna studie har inte lagrats i temperaturer lägre än 5°C .

Vad som är värt att anmärka är att enligt Anderson et. al. (1994) är förstyvningen endast märkbar för mätningar under -5°C . Detta tolkas i denna studie som att om det skulle vara en förändring av bitumens egenskaper till följd av lagringen skulle dessa ses vid de låga temperaturerna. I studien antas lagringen inte ha påverkat bitumens egenskaper då de lågtemporerade temperaturerna faller in efter vad som är att förväntas, se masterkurvor i bilaga 6.

5.2.2. Masterkurva

Att bilda masterkurvor är något som, enligt författaren, är av största vikt vid utvärdering av viskoelastiska egenskaper hos bitumen. Att kunna skapa en masterkurva grundar sig i superpositioneringsprincipen. Om det inte går att skapa en masterkurva för mätningarna är det ett tecken på att mätningarna har brister i någon form eller att materialen inte har polymera egenskaper som kan beskrivas med skiffaktorer för sambandet mellan tid och temperatur. Detta kan även bero på att superpositioneringsprincipen inte längre gällande. Detta sker då mätningarna är gjorda utanför LVE-området.

Vid framtagande av masterkurvor för de mätserier som tagits fram har det i studien beslutats om att göra en masterkurva för alla mätningar med PP08, och en för PP25. Detta gjordes för att ge en bättre passning för masterkurvorna vid de höga/låga temperaturerna. Anledningen till varför detta behövs tros ligga i de olika geometrierna på provkropparna som använts vid de olika mätningarna. Vid mätningar på rent bitumen uppvisar sig inte detta problem lika tydligt. Att det blir mer tydligt i asfaltsbruk beror troligtvis på asfaltsbrukets mer komplexa reologi.

I studien användes en ombyggd Sigmoidal med linjära mätvärden för fasvinkeln i stället för logaritmerade. Med en uppdelning i PP25 och PP08 blev passningen mellan masterkurva och mätvärden tillräckligt bra för sitt syfte. Medelvärdet skiljer runt 0.1 °C och standardavvikelsen för enskilda värden ligger på 0,8 °C. R-värdet ligger mestadels på 0,99.

Sigmoidal är en av flera olika metoder för att modellera de viskoelastiska egenskaperna hos bitumen i en masterkurva. I denna studie valdes denna metod då den i tidigare arbete på LTH har visat sig passa för asfaltsbruk, och är relativt lätt att använda. Dock är det viktigt att notera att det finns flera alternativ till denna metod, dessa har inte undersökts eller utvärderats i denna studie. För mer information kring de olika metoderna och deras för och nackdelar rekommenderar författaren att intresserade fördjupar sig i *Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders* av Nur Izz Md. Yusoff.

5.2.3. DSR

Den valda metoden, DSR, är en metod som i andra publikationer beskrivs som en känslig metod vad gäller appliceringen av provkropparna. Även om appliceringen sker korrekt kan resultatet vara missvisande, detta kan bero på om mätningarna är gjorda utanför LVE-området. I denna studie, liksom i fyra tidigare studier, användes fasta amplituder från mätningar på bitumen. Amplituderna är förhållandevis korta även för asfaltbruk. Särskilda mätningar av LVE, som är ganska tidsödande, har gjorts för tidigare studier utan att det har tillfört mätningarna något i form av mer trovärdiga resultat eller förbättrad precision. Det har i studien antagits att mätningarna är gjorda inom LVE-området då mätvärdena följde vad som var att förvänta, se blackdiagram i bilaga 3 och amplitudtabellerna i bilaga 2. Amplituderna bygger på formler för beräkning av lämpliga värden som tillämpas i branschen.

I studien har repeterbart och kontroll av resultat från DSR-mätningen inte gjorts, detta beslut har fattats då det inte har funnits tid för det i studien.

5.2.4. MSCR

I studien fattades beslutet att göra alla mätningar av MSCR vid samma temperaturintervall. Detta gjordes för att minimera antalet variabler i studien. Fördelen med den valda metoden är att av studien går det att se hur J_{hr} påverkas av fillertyp och mängd. Dock medför den valda metoden att de temperaturer varvid gränsvärdena enligt Superpave uppnås måste extrapoleras från de mätningar som är gjorda. Extrapoleringen gjordes med hjälp av trendlinjer som togs fram för alla förhållanden, förhållandena utgick från ett andraordnings polynom.

Enligt standarden ska tester utföras kring materialets mjukpunkt. Detta betyder att en del av effekten av den ökade deformationsåterhämtningen troligtvis ligger i att mätningarna är gjorda vid långt lägre temperaturer än mjukpunkten. Detta leder då till att materialets elasticitet ökar, detta bör ha en inverkan på resultatet.

5.2.5. Rigdenhållrum

Värdena som är uppmätta i studien är väldigt lika de värden som har mätts upp av andra studier som undersökt liknande material. Av denna anledning anses det att resultaten från studien är att lita på. Det finns ingen annan, för författaren, känd metod för att mäta denna egenskap hos fillern än den metod som valdes i studien. Rigdenhållrum har i många studier påvisats vara starkt kopplad till hur en filler påverkar de reologiska egenskaperna hos ett bitumen.

5.2.6. Duktilitet

Resultatet från duktilitetsmätningarna faller inte helt som är förväntat, i Tabell 4.5-1 går det att se att duktiliteten som mättes vid 25 vol-% för mineralfiller 1 och kalkfiller är lägre än vad som är att förvänta jämför med de resultaten som redovisats för de andra fillertyperna. Troligtvis är detta en följd av ofullständig kontakt mellan materialet och mätplattorna. Under studien uppmärksammades det svårigheter med appliceringen av 8mm provkropparna. Alternativ kan de vara en följd av problem med homogenisering vid provtillverkning. Det fanns problem med homogeniseringen vid den låga fillerhalten, som inte visade sig vid de högre halterna

I studien har det inte gjorts någon kontroll av beräkningarna av duktilitet från DSR-mätningarna. Detta är något som borde gjorts, men tyvärr har den utrustning som krävs för detta inte varit tillgänglig för studien. I stället har studien lutat sig mot de mätningar och slutsatser som gjorts av Glover et. al., 2005 och Rowe, 2014.

5.2.7. Resultatpresentation

I studien har det valts att redovisa rådata i form av sifvertabell, Blackdiagram och Masterkurvor, bilaga 3 och 6. I studien valdes det att inte använda cole-cole- eller isokrondiagram. Detta gjordes då dessa redovisningsmetoder inte klarar av att redovisa resultat vid olika frekvenser. Metoderna lämpar sig bättre för mätningar gjorda vid en vald frekvens, exempelvis mätningar enligt Superpave vid 10 rad/s.

Resultaten som presenteras i Kap.4.4 och Kap.4.6 har valts att redovisas uttryckta i °C. Omräkningen sker antingen i enlighet med Superpave, PG, eller har värden räknats fram med PG som grund. Hur detta sker presenteras mer ingående i Kap.4. I studien fattades beslutet att redovisa materialet på denna form för att göra resultatet med intuitivt och lättförståeligt.

I Kap.4.4 provades först det rena bitumen, 70/100, och från masterkurvan beräknades de karaktäriserande temperaturerna (PG-temperaturerna) för parametrarna i Tabell 4.3-1 (se tabellens övre del). Vid de här temperaturerna beräknades motsvarande parametervärden för samtliga asfaltbruksprover. Ur de resultaten, baserat på de fasta inblandade volymhalterna 25, 34, 39,2 och 42,9 vol%, beräknades, med ett skattat andragradspolynom, resultaten för mängden 36,3 vol%, som är ett vanligt värde för vanlig asfalt. Därmed skapades underlag för PG-riktvärden för asfaltbruk.

5.3. Slutsatser

I denna undersökning användes DSR-oscillerande- och krypningstest för att bestämma de mekaniska egenskaperna hos ett asfaltsbruk vid servicetemperatur. Det bör nämnas att resultaten i denna studie endast är tillämpliga på 70/100 penetrationskvalitet bitumen och med de filler som testats i den här studien. Följande slutsatser kan göras från data presenteras i studien.

5.3.1. Praktisk tillämpning

De två mineraliska fillersorterna från granitberg var relativt lika varandra, mineral 1 något mer förstyvande. Kalkfiller hade som tidigare var känt den minsta förstyvande förmågan, något mindre än mineralfiller 2. Förstyvning och funktionsstyrande egenskaper ändras påtagligt vid varierad mängd filler i områden som normalt förekommer i asfaltrecept. Det innebär att valet av fillermängd inte kan överlåtas till slumpen eller yttre faktorer som brist eller överskott.

Studien påvisar hur cement skiljer sig från andra fillermaterial. Detta beror troligtvis på en kemisk interaktion mellan cementet och bitumen som inte sker för de andra fillermaterialen. Av denna anledning bör extra hänsyn tas vid användning av cement som filler. Det är i studien tydligt hur cementen skiljer sig från mer vanligt förekommande mineralfillers. Av denna anledning bör inte cement användas som en ersättare till vanliga mineral filler, utan som ett komplement i massor där det uppstått problem med asfaltsbrukets reologi.

Sveptesterna som gjorts i studien visar hur ett asfaltsbruk med cement, vid samma inblandade vol-% som en vanlig mineralfiller, skulle ge bättre motståndskraft mot spårbildning i asfalten. Detta är en effekt som troligtvis kan tillskrivas den kemiska förstärkningen som sker i asfaltsbruket då cement används som filler.

Resultatet visar att om produktionen skulle av någon anledning behöva byta fillermängd eller fillertyp måste produkten kontrolleras innan den läggs ut. Detta då det i studien har kunnat påvisas hur starkt bundna asfaltsbrukets egenskaper är till typ av och mängd filler.

Om det inte tas hänsyn till mängd filler och fillertyp vid produktion kan det leda till problem med spårbildning, krackelering och temperaturberoende sprickbildning för den färdiga asfaltbeläggningen.

5.3.2. Rekommendationer från studien

Resultaten från studien skulle kunna ligga till grund för design av asfaltsbruk. Detta skulle kunna ge entreprenören, redan vid planeringsskedet, en möjlighet att skraddarsy ett asfaltsbruks filler mängd efter vad som krävs av beläggningen under rådande trafik- och klimatförhållande. Detta då med grund i hur mängden filler påverkar asfaltsbrukets egenskaper.

I Tabell 4.6-1 går att se hur ett asfaltsbruk med högre andel filler generellt passar bättre för en asfaltsmassa som kommer utsättas för tyngder och mer stillastående laster. Detta är ett samband som skulle kunna utnyttjas vid design av asfaltsmassor för olika ändamål.

Ett vanligt problem med PMB är problem med utläggning och övertemporering. Detta skulle kunna motverkas med en sänkning av fillermängden i asfaltsbruket. Detta skulle vara möjligt om sänkningen av fillermängd inte skulle medföra risker för separation eller spårbildning.

Om ett asfaltsbruk har för hög viskositet kommer detta att leda till problem med krackelering, av denna anledning är det av vikt att i produktion ha kontroll på mängd filler, och hur det påverkar asfaltsbrukets reologiska egenskaper.

5.4. Rekommendationer för fortsatta studier

Studien har gett svar på många ställda frågor men har också orsakat fler. Följande bör undersökas i kommande examensarbeten eller doktorandprojekt:

1. Utmattningsundersökningar av asfaltbruk med DSR enligt tillämpad utmattningsteori
2. Undersökning av precisionen i DSR-mätningarna
3. Optimering av mätprotokoll för DSR-mätningar
4. Jämförelse mellan mätning med varierande amplituder och skjuvspänningar för ämnen med icke-newtonskt karaktär. Mätningar vid konstant viskositet
5. Mätningar utförda med DSR på asfaltsbruk vid konstant viskositet för att undvika effekter av icke-newtonska egenskaper hos materialet.
6. Undersökning av LVE-gränserna för asfaltbruk
7. Anpassning av asfaltbrukets egenskaper för olika bitumensorter, polymermodifierat bitumen och bitumen innehållande vax, fiber och andra egenskapsbefrämjande tillsatsmedel.

6. Referenser

Ali, A.W., Kim, H.H., Mazumder, M., Lee, M.S., & Lee, S.J. (2018). Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) characterization of polymer modified asphalt binder containing wax additives. *International Journal of Pavement Research and Technology*.

Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D I., & Blankenship, P. B. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 80

Anderson, D.A., Christensen, D.W., & Bahia, H. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 60, 437-532.

Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-369*.

Anton Paar, 2018. Amplitude sweeps [Online] tillgänglig: <https://wiki.anton-paar.com/en/amplitude-sweeps/> (2018-09-20)

Airey, G.D. (2002a) Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data, *Road Materials and Pavement Design*, 3:4, 403-424

Airey, G.D. (2002b) Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, 16, 473–487.

Airey, G.D. och Hunter, E. (2003) Dynamic Mechanical Testing of Bitumen: Sample Preparation Methods. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: *Transport* 156, 2, 85–92

Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014) Vägbyggnad. Stockholm: Liber AB

ASTM D7405-15 (2015) Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Badre, S., Goncalves, C. C., Norinaga, K., Gustavson, G., & Mullins, O. C. (2006). Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen. *Fuel*, 85(1), 1-11.

Bakalov, M., Shukir, A.(2017) Förbättring av asfaltens konsistens med tillsatsmedel. Mätningar med rotationsviskosimeter på bitumen och asfaltbruk. Examensarbete. Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.

Baklokk, L., Skoglund, R., Kalman, B., & Peltonene, P. (2002). Superpave test methods for asphalt–procedure for DSR Testing. NORDTEST Report, Report, (538).

Brodnyan, J. G., Gaskins, F. H., Philippoff, W., & Thelen, E. (1960). The rheology of asphalt. III. Dynamic mechanical properties of asphalt. *Transactions of the Society of Rheology*, 4(1), 279-296.

Clopotel, C., Velasquez, R., & Bahia, H. (2012). Measuring physico-chemical interaction in mastics using glass transition. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 304-320.

-
- Chailleux, E., Ramond, G., Such, C. och Roche, C.D.L. (2006) A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 7:sup1, 75-92.
- Chen, J. S., Kuo, P. H., Lin, P. S., Huang, C. C., & Lin, K. Y. (2008). Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler. *Materials and structures*, 41(6), 1015-1024.
- Dynamic Shear Rheometers for Asphalt (2017). Anton paar GmbH
- Federal Highway Administration (2015) Highway Materials Engineering Course – Asphalt binders PG Test. U.S.Department of Transportation.
- Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction. *Road Materials and Pavement Design*, 11(sup1), 281-303.
- Ferry, J.D (1971) visco-elastic Properties of Polymers. Wiley, New York, NY, USA.
- Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., & Muñoz, M. E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31-38.
- Glover, C.J., Davison, R.R., Domke, C.H., Ruan, Y., Juristyarini, P., Knorr, D.B., & Jung, S.H. (2005). Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation. Texas Dept Transport, 1872.
- Granhage, L. (2009) Kompendium i vägbyggnad. Göteborg
- Haxhibeqiri, E., & Mouhsen, M. (2017) Påverkan av asfaltens egenskaper efter förbättrad konsistens - Mätningar med dynamisk skjuvreometer, DSR, på bitumen och asfaltbruk. M.Sc-Thesis. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Hesami, E., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics. *Materials and structures*, 47(8), 1325-1337.
- Heuckelom, W. (1973). AN IMPROVED METHOD OF CHARACTERIZING ASPHALTIC BITUMENS WITH THE AIR OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 42).
- Hunter, R.N., Self A. & Read, J. (2015) The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition. London: ICE Publishing
- Håkansson, A. & Härstedt, M. (2015) Reologiska egenskaper för bitumen och asfaltbruk - Inblandning av retur-asfalt samt framtagande av mätmetod DSR. M.Sc-Thesis. Lunds tekniska högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2009). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2894-2904.
- Kandhal, P. S. (1977) Low-temperature Properties of Bituminous Materials and Compacted Bituminous Paving Mixtures, ASTM STP 628, C. R. Marek, Ed., ASTM International, Philadelphia, PA.
- Kavussi, A. and Hicks, R.G. (1997). Properties of Bituminous Mixtures Containing different Fillers. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66, 153-186.
- Liao, M.C., Chen, J.S. & Airey, G. (2013a). Characterization of Viscoelastic Properties of Bitumen-Filler Mastics. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9, 2013*
- Liao, M. C., Airey, G., & Chen, J. S. (2013b). Mechanical properties of filler-asphalt mastics. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(5), 576-581.

-
- Mahboud, K.C. (2004) An Introduction to Superpave, Huang, Y.H (red), *Pavement Analysis and Design*, second editio, 682-692. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- MATEST (2019) Nycander AB - produktblad, Täby.
- Mezger, T. G., 2014. The Rheology Handbook, fourth edition. Hanover: Vincentz Network
- Micaelo, R., Guerra, A., Quaresma, L., & Cidade, M. T. (2017). Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing. *Construction and Building Materials*, 155, 228-238.
- Petersen, J. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., Harnsberger, P. M., Duvall, J. J., & Kim, S. (1994). Binder characterisation, volume 4: test methods. *Strategic Highways Research Program, Rep. No. SHRP-A-370*, National Research Council, Washington, DC.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003) The Shell Bitumen Handbook, Fifth edition. London: ICE Publishing
- Rowe, G.M., King, G. & Anderson, M. (2014) The Influence of Binder Rheology in the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects, *Journal of Testing and Evaluation*, 42(5), 1063-1072.
- Soenen, H., & Teugels, W. (1999). Rheological investigation on binder-filler interactions. In Eurobitume Workshop (Vol. 1999).
- Subramanian, R. S., (2002) Non-Newtonian Flows. Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University.
- SIS (2000), SS-EN 1097-4, Ballast – Mekansiska och fysikaliska egenskaper – Del 4: Bestämning av hållrumshalt hos torrt packat filler (Rigden), 20000-03-31:1
- Tyllgren, P. (2018). Tillsatsmedel mot övertemperatur vid asfalttillverkning – Laboratorieförsök. SBUF/Svevia. Malmö.
- VTI (2018) Asphalt layer rutting performance prediction tools. Rapport 968A
- Wasage, T. L.J., Stastna, J. & Zanzotto, L. (2011) Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test, *International Journal of Pavement Engineering*, 12:6, 561-568.
- Williams, M.L, et. al. (1955) The temperature-dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Jurnal of the American Chemical Society* 77:3701-3706.
- Yusoff, N. I. M. (2012). Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders: University of Nottingham.

7. Bilagor

Innehållsförteckning

Bilaga 1 Resultat från oscillerande mätning med DSR	77
Bilaga 2 Amplituder för sveptest med DSR	86
Bilaga 3 Blackdiagram för oscillerande DSR-mätningar	87
Bilaga 4 Mätdata från MSCR-test.....	89
Bilaga 5 Data från Rigdenmätning	90
Bilaga 6 Masterkurvor	91

Bilaga 1 Resultat från oscillerande mätning med DSR

PP25 70/100							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	3,60E+04	3,97E+03	5,41E+02	9,38E+01	2,07E+01	5,57E+00	1,87E+00
0,215	6,98E+04	8,08E+03	1,14E+03	2,01E+02	4,44E+01	1,20E+01	4,01E+00
0,464	1,34E+05	1,62E+04	2,38E+03	4,30E+02	9,55E+01	2,57E+01	8,61E+00
1	2,53E+05	3,20E+04	4,90E+03	9,10E+02	2,05E+02	5,54E+01	1,85E+01
2,15	4,73E+05	6,25E+04	9,98E+03	1,91E+03	4,38E+02	1,19E+02	3,98E+01
4,64	8,71E+05	1,21E+05	2,00E+04	3,96E+03	9,31E+02	2,56E+02	8,57E+01
10	1,58E+06	2,31E+05	3,98E+04	8,13E+03	1,96E+03	5,47E+02	1,84E+02
21,5	2,79E+06	4,37E+05	7,82E+04	1,65E+04	4,08E+03	1,16E+03	3,96E+02
46,4	4,85E+06	8,14E+05	1,52E+05	3,31E+04	8,40E+03	2,44E+03	8,39E+02
100	8,19E+06	1,49E+06	2,93E+05	6,58E+04	1,71E+04	5,04E+03	1,75E+03
Fasvinkel, δ, °							
0,1	78,4	84,1	87,8	89,5	89,7	89,6	89,1
0,215	76,8	82,5	86,7	89,0	89,7	89,7	89,5
0,464	75,3	80,9	85,5	88,3	89,5	89,7	89,6
1	73,9	79,3	84,1	87,3	89,1	89,7	89,7
2,15	72,2	77,9	82,6	86,2	88,5	89,5	89,8
4,64	70,4	76,6	81,2	85,0	87,6	89,1	89,7
10	68,3	75,2	79,9	83,6	86,5	88,4	89,4
21,5	66,1	73,6	78,6	82,4	85,4	87,6	89,0
46,4	63,8	72,0	77,3	81,2	84,3	86,8	88,6
100	61,5	70,2	76,0	80,0	83,2	86,1	88,1

PP08 70/100							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	4,84E+03	4,42E+04	4,86E+05	5,69E+06	5,29E+07	2,46E+08	4,81E+08
0,215	9,75E+03	8,46E+04	8,79E+05	9,31E+06	7,44E+07	2,97E+08	5,33E+08
0,464	1,94E+04	1,60E+05	1,56E+06	1,48E+07	1,01E+08	3,49E+08	5,75E+08
1	3,80E+04	3,00E+05	2,72E+06	2,28E+07	1,33E+08	4,00E+08	6,17E+08
2,15	7,37E+04	5,53E+05	4,64E+06	3,41E+07	1,71E+08	4,50E+08	6,51E+08
4,64	1,41E+05	1,01E+06	7,70E+06	4,94E+07	2,13E+08	4,96E+08	6,85E+08
10	2,68E+05	1,80E+06	1,24E+07	6,96E+07	2,59E+08	5,39E+08	7,10E+08
21,5	5,02E+05	3,16E+06	1,95E+07	9,52E+07	3,07E+08	5,79E+08	7,37E+08
46,4	9,27E+05	5,41E+06	2,98E+07	1,26E+08	3,56E+08	6,14E+08	7,55E+08
100	1,68E+06	9,04E+06	4,42E+07	1,63E+08	4,04E+08	6,46E+08	7,73E+08
Fasvinkel, δ, °							
0,1	83,0	77,1	70,0	58,9	41,5	23,6	13,2
0,215	81,4	75,5	68,1	55,6	37,8	20,4	10,9
0,464	79,8	74,1	65,9	52,3	34,3	17,8	9,1
1	78,3	72,5	63,4	48,9	30,9	15,2	7,7
2,15	76,9	70,8	60,6	45,4	27,7	13,0	6,4
4,64	75,5	68,9	57,7	42,0	24,6	11,1	5,3
10	74,1	66,7	54,5	38,6	21,7	9,4	4,5
21,5	72,6	64,2	51,2	35,1	19,0	7,9	3,7
46,4	70,8	61,4	47,8	31,8	16,5	6,8	3,2
100	68,8	58,4	44,3	28,6	14,3	5,8	2,9

pp25 Mineralfiller 1, 34 vol%								
Vinkelfrekvens rad/s	Temperatur, °C							
	20	30	40	50	60	70	80	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	2,44E+05	2,74E+04	3,71E+03	6,37E+02	1,39E+02	3,79E+01	1,26E+01	
0,215	4,62E+05	5,45E+04	7,73E+03	1,36E+03	2,97E+02	8,09E+01	2,67E+01	
0,464	8,65E+05	1,07E+05	1,59E+04	2,87E+03	6,37E+02	1,74E+02	5,70E+01	
1	1,60E+06	2,09E+05	3,24E+04	6,03E+03	1,36E+03	3,73E+02	1,23E+02	
2,15	2,92E+06	4,01E+05	6,51E+04	1,25E+04	2,89E+03	7,99E+02	2,63E+02	
4,64	5,23E+06	7,61E+05	1,29E+05	2,57E+04	6,08E+03	1,71E+03	5,55E+02	
10	9,17E+06	1,43E+06	2,51E+05	5,21E+04	1,27E+04	3,62E+03	1,21E+03	
21,5	1,57E+07	2,64E+06	4,84E+05	1,04E+05	2,61E+04	7,62E+03	2,58E+03	
46,4	2,60E+07	4,81E+06	9,27E+05	2,06E+05	5,29E+04	1,58E+04	5,44E+03	
100	4,15E+07	8,61E+06	1,75E+06	4,02E+05	1,06E+05	3,24E+04	1,13E+04	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	76,2	82,3	86,6	88,8	89,3	89,2	88,4	
0,215	74,7	80,7	85,4	88,3	89,4	89,5	89,2	
0,464	73,3	79,0	84,0	87,4	89,0	89,5	89,5	
1	71,9	77,5	82,5	86,2	88,5	89,4	89,6	
2,15	70,5	76,1	80,9	84,9	87,6	89,0	89,5	
4,64	68,9	74,7	79,4	83,5	86,5	88,4	89,3	
10	67,0	73,4	78,0	82,1	85,3	87,6	88,9	
21,5	65,1	72,2	76,8	80,7	84,0	86,6	88,3	
46,4	63,2	70,9	75,6	79,5	82,8	85,4	87,4	
100	62,1	69,6	74,5	78,4	81,6	84,3	86,3	
PP08 Mineralfiller 1, 34 vol%								
Vinkelfrekvens rad/s	Temperatur, °C							
	30	20	10	0	-10	-20	-30	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	3,54E+04	3,12E+05	3,29E+06	3,47E+07	2,66E+08	9,06E+08	1,47E+09	
0,215	7,02E+04	5,87E+05	5,79E+06	5,50E+07	3,53E+08	1,03E+09	1,56E+09	
0,464	1,38E+05	1,09E+06	1,01E+07	8,46E+07	4,53E+08	1,15E+09	1,63E+09	
1	2,66E+05	2,01E+06	1,71E+07	1,26E+08	5,63E+08	1,26E+09	1,70E+09	
2,15	5,07E+05	3,64E+06	2,84E+07	1,81E+08	6,80E+08	1,36E+09	1,75E+09	
4,64	9,57E+05	6,50E+06	4,58E+07	2,50E+08	8,01E+08	1,45E+09	1,80E+09	
10	1,79E+06	1,14E+07	7,17E+07	3,35E+08	9,72E+08	1,53E+09	1,84E+09	
21,5	3,29E+06	1,95E+07	1,09E+08	4,33E+08	1,04E+09	1,60E+09	1,88E+09	
46,4	5,97E+06	3,27E+07	1,59E+08	5,43E+08	1,15E+09	1,66E+09	1,92E+09	
100	1,06E+07	5,31E+07	2,25E+08	6,60E+08	1,26E+09	1,72E+09	1,95E+09	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	81,7	75,6	68,1	56,2	35,9	16,7	7,7	
0,215	80,2	74,0	66,0	52,5	31,7	14,0	6,1	
0,464	78,5	72,4	63,6	48,6	27,8	11,8	5,2	
1	76,9	70,8	60,9	44,6	24,2	10,0	4,3	
2,15	75,4	68,9	57,8	40,5	21,0	8,5	3,6	
4,64	73,9	66,8	54,4	36,3	18,1	7,2	3,1	
10	72,4	64,3	50,7	32,4	15,6	6,1	2,5	
21,5	70,6	61,5	46,7	28,5	13,3	5,2	2,2	
46,4	68,6	58,3	42,6	25,0	11,4	4,4	1,9	
100	66,3	54,8	38,4	21,7	9,7	3,7	1,7	

PP25 Mineralfiller 1, 25 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	1,33E+05	1,47E+04	2,01E+03	3,51E+02	7,78E+01	2,17E+01	7,19E+00	
0,215	2,54E+05	2,96E+04	4,21E+03	7,50E+02	1,67E+02	4,62E+01	1,51E+01	
0,464	4,83E+05	5,88E+04	8,72E+03	1,59E+03	3,58E+02	9,89E+01	3,23E+01	
1	9,04E+05	1,15E+05	1,78E+04	3,36E+03	7,67E+02	2,12E+02	6,92E+01	
2,15	1,67E+06	2,22E+05	3,61E+04	7,00E+03	1,63E+03	4,54E+02	1,48E+02	
4,64	3,05E+06	4,27E+05	7,19E+04	1,44E+04	3,44E+03	9,73E+02	3,19E+02	
10	5,43E+06	8,09E+05	1,42E+05	2,93E+04	7,19E+03	2,07E+03	6,84E+02	
21,5	9,48E+06	1,52E+06	2,77E+05	5,89E+04	1,48E+04	4,36E+03	1,46E+03	
46,4	1,61E+07	2,80E+06	5,31E+05	1,17E+05	3,03E+04	9,11E+03	3,09E+03	
100	2,66E+07	5,08E+06	1,01E+06	2,30E+05	6,11E+04	1,88E+04	6,46E+03	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	77,3	83,3	87,2	89,1	89,4	88,9	88,5	
0,215	75,8	81,6	86,1	88,6	89,4	89,2	89,0	
0,464	74,3	80,0	84,7	87,8	89,2	89,3	89,4	
1	72,9	78,4	83,3	86,7	88,7	89,3	89,5	
2,15	71,3	77,0	81,8	85,5	88,0	89,1	89,5	
4,64	69,6	75,6	80,3	84,2	87,0	88,6	89,4	
10	67,9	74,2	78,9	82,9	85,8	87,9	89,1	
21,5	66,0	72,7	77,6	81,5	84,6	87,0	88,5	
46,4	64,0	71,2	76,3	80,2	83,4	86,0	87,8	
100	62,7	69,5	75,0	79,0	82,1	85,1	86,8	
PP08 Mineralfiller 1, 25 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	1,70E+04	1,53E+05	1,68E+06	1,89E+07	1,60E+08	6,26E+08	1,09E+09	
0,215	3,42E+04	2,92E+05	3,01E+06	3,05E+07	2,18E+08	7,26E+08	1,16E+09	
0,464	6,78E+04	5,51E+05	5,31E+06	4,78E+07	2,86E+08	8,19E+08	1,23E+09	
1	1,33E+05	1,03E+06	9,16E+06	7,23E+07	3,64E+08	9,08E+08	1,29E+09	
2,15	2,56E+05	1,89E+06	1,54E+07	1,06E+08	4,49E+08	9,92E+08	1,33E+09	
4,64	4,88E+05	3,41E+06	2,52E+07	1,50E+08	5,39E+08	1,07E+09	1,38E+09	
10	9,20E+05	6,06E+06	4,02E+07	2,04E+08	6,31E+08	1,14E+09	1,41E+09	
21,5	1,71E+06	1,05E+07	6,20E+07	2,70E+08	7,25E+08	1,20E+09	1,45E+09	
46,4	3,14E+06	1,78E+07	9,24E+07	3,46E+08	8,15E+08	1,25E+09	1,48E+09	
100	5,65E+06	2,92E+07	1,33E+08	4,31E+08	9,02E+08	1,30E+09	1,50E+09	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	82,9	76,8	69,5	57,8	38,3	19,0	9,0	
0,215	81,2	75,2	67,4	54,2	34,2	16,1	7,4	
0,464	79,6	73,6	65,0	50,5	30,4	13,7	6,1	
1	78,0	72,0	62,4	46,6	26,8	11,7	5,1	
2,15	76,5	70,2	59,4	42,7	23,5	9,9	4,3	
4,64	75,1	68,2	56,1	38,8	20,5	8,3	3,6	
10	73,5	65,8	52,6	34,9	17,7	7,0	3,0	
21,5	71,9	63,1	48,8	31,2	15,2	5,9	2,4	
46,4	69,9	60,0	45,0	27,6	13,1	5,0	2,1	
100	67,7	56,6	41,0	24,3	11,2	4,3	2,0	

PP25 Mineralfiller 1, 42,9 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80	
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	4,57E+05	5,10E+04	6,90E+03	1,17E+03	2,53E+02	6,83E+01	2,25E+01	
0,215	8,45E+05	1,00E+05	1,42E+04	2,47E+03	5,38E+02	1,45E+02	4,71E+01	
0,464	1,56E+06	1,95E+05	2,90E+04	5,21E+03	1,15E+03	3,10E+02	1,00E+02	
1	2,82E+06	3,76E+05	5,86E+04	1,09E+04	2,45E+03	6,63E+02	2,15E+02	
2,15	5,06E+06	7,14E+05	1,17E+05	2,24E+04	5,17E+03	1,42E+03	4,61E+02	
4,64	8,90E+06	1,33E+06	2,28E+05	4,56E+04	1,08E+04	3,02E+03	9,87E+02	
10	1,51E+07	2,47E+06	4,41E+05	9,15E+04	2,24E+04	6,39E+03	2,11E+03	
21,5	2,42E+07	4,50E+06	8,45E+05	1,81E+05	4,59E+04	1,34E+04	4,48E+03	
46,4	3,45E+07	8,05E+06	1,60E+06	3,55E+05	9,27E+04	2,77E+04	9,41E+03	
100	4,66E+07	1,40E+07	2,98E+06	6,88E+05	1,85E+05	5,64E+04	1,95E+04	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	74,7	81,4	86,0	88,4	89,0	88,8	87,5	
0,215	73,5	79,9	84,9	87,9	89,2	89,4	88,9	
0,464	72,1	78,2	83,4	86,9	88,8	89,4	89,3	
1	70,4	76,7	81,9	85,7	88,2	89,2	89,4	
2,15	68,3	75,3	80,3	84,4	87,2	88,8	89,4	
4,64	65,6	73,8	78,8	83,0	86,1	88,2	89,1	
10	62,1	72,2	77,3	81,5	84,8	87,2	88,7	
21,5	57,6	70,3	76,0	80,1	83,5	86,1	88,0	
46,4	52,6	67,9	74,7	78,8	82,2	85,0	87,1	
100	47,9	64,8	73,2	77,5	81,0	83,9	86,0	
PP08 Mineralfiller 1, 42,9 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30	
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	7,41E+04	6,25E+05	6,17E+06	6,05E+07	4,17E+08	1,24E+09	1,87E+09	
0,215	1,43E+05	1,15E+06	1,06E+07	9,40E+07	5,41E+08	1,38E+09	1,96E+09	
0,464	2,75E+05	2,11E+06	1,82E+07	1,42E+08	6,77E+08	1,51E+09	2,04E+09	
1	5,22E+05	3,81E+06	3,05E+07	2,07E+08	8,20E+08	1,63E+09	2,10E+09	
2,15	9,82E+05	6,81E+06	4,99E+07	2,92E+08	9,68E+08	1,74E+09	2,14E+09	
4,64	1,83E+06	1,20E+07	7,94E+07	3,95E+08	1,11E+09	1,83E+09	2,20E+09	
10	3,37E+06	2,06E+07	1,22E+08	5,17E+08	1,26E+09	1,92E+09	2,24E+09	
21,5	6,10E+06	3,48E+07	1,81E+08	6,52E+08	1,39E+09	1,99E+09	2,27E+09	
46,4	1,09E+07	5,73E+07	2,60E+08	7,97E+08	1,52E+09	2,06E+09	2,31E+09	
100	1,91E+07	9,16E+07	3,58E+08	9,47E+08	1,64E+09	2,13E+09	2,34E+09	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	79,6	73,9	66,7	54,8	33,3	14,1	6,2	
0,215	78,6	72,5	64,7	51,0	28,9	11,8	5,0	
0,464	77,1	71,0	62,3	46,9	24,9	9,9	4,2	
1	75,6	69,4	59,5	42,5	21,4	8,4	3,5	
2,15	74,1	67,5	56,3	38,0	18,3	7,1	3,0	
4,64	72,6	65,4	52,7	33,7	15,6	5,9	2,5	
10	71,1	62,9	48,7	29,5	13,4	5,1	2,1	
21,5	69,3	59,9	44,5	25,7	11,4	4,4	1,9	
46,4	67,2	56,6	40,0	22,2	9,6	3,7	1,6	
100	64,8	52,8	35,6	19,1	8,2	3,2	1,5	

PP25 Mineralfiller 1, 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	3,46E+05	3,84E+04	5,20E+03	8,91E+02	1,94E+02	5,29E+01	1,74E+01
0,215	6,46E+05	7,61E+04	1,08E+04	1,89E+03	4,14E+02	1,12E+02	3,66E+01
0,464	1,20E+06	1,49E+05	2,21E+04	4,00E+03	8,85E+02	2,41E+02	7,82E+01
1	2,20E+06	2,87E+05	4,48E+04	8,37E+03	1,89E+03	5,15E+02	1,68E+02
2,15	4,00E+06	5,48E+05	8,94E+04	1,73E+04	4,00E+03	1,10E+03	3,60E+02
4,64	7,16E+06	1,03E+06	1,76E+05	3,54E+04	8,40E+03	2,35E+03	7,72E+02
10	1,25E+07	1,93E+06	3,41E+05	7,12E+04	1,74E+04	4,98E+03	1,65E+03
21,5	2,12E+07	3,56E+06	6,55E+05	1,42E+05	3,57E+04	1,05E+04	3,51E+03
46,4	3,45E+07	6,48E+06	1,24E+06	2,78E+05	7,22E+04	2,17E+04	7,39E+03
100	5,44E+07	1,16E+07	2,34E+06	5,41E+05	1,44E+05	4,43E+04	1,54E+04
Fasvinkel, δ, °							
0,1	75,4	81,8	86,4	88,6	89,1	88,7	88,0
0,215	74,1	80,3	85,2	88,1	89,2	89,4	89,1
0,464	72,9	78,6	83,7	87,1	88,9	89,4	89,5
1	71,7	77,1	82,2	86,0	88,3	89,3	89,4
2,15	70,5	75,7	80,6	84,6	87,4	88,9	89,4
4,64	69,4	74,3	79,1	83,2	86,3	88,3	89,2
10	68,4	73,1	77,7	81,8	85,0	87,4	88,8
21,5	67,3	71,9	76,4	80,4	83,8	86,3	88,1
46,4	66,3	70,9	75,2	79,1	82,5	85,2	87,2
100	66,3	70,2	74,1	77,9	81,2	84,1	86,2
PP08 Mineralfiller 1, 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	5,65E+04	4,85E+05	4,93E+06	4,94E+07	3,50E+08	1,06E+09	1,65E+09
0,215	1,10E+05	9,01E+05	8,57E+06	7,71E+07	4,57E+08	1,20E+09	1,75E+09
0,464	2,14E+05	1,66E+06	1,47E+07	1,17E+08	5,75E+08	1,32E+09	1,82E+09
1	4,09E+05	3,02E+06	2,47E+07	1,71E+08	7,01E+08	1,43E+09	1,88E+09
2,15	7,72E+05	5,42E+06	4,07E+07	2,42E+08	8,31E+08	1,53E+09	1,94E+09
4,64	1,44E+06	9,58E+06	6,52E+07	3,29E+08	9,60E+08	1,62E+09	1,99E+09
10	2,67E+06	1,66E+07	1,01E+08	4,33E+08	1,09E+09	1,70E+09	2,03E+09
21,5	4,87E+06	2,82E+07	1,51E+08	5,49E+08	1,21E+09	1,77E+09	2,06E+09
46,4	8,76E+06	4,67E+07	2,19E+08	6,75E+08	1,32E+09	1,83E+09	2,10E+09
100	1,54E+07	7,50E+07	3,04E+08	8,07E+08	1,43E+09	1,88E+09	2,12E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	80,5	74,5	67,0	55,1	34,1	15,8	7,3
0,215	79,2	73,0	65,0	51,3	29,7	12,9	5,7
0,464	77,6	71,4	62,6	47,3	25,9	10,9	4,6
1	76,0	69,8	59,8	43,1	22,3	9,1	3,8
2,15	74,5	67,9	56,6	38,8	19,1	7,6	3,3
4,64	73,0	65,7	53,1	34,5	16,4	6,4	2,7
10	71,4	63,2	49,3	30,4	14,0	5,4	2,3
21,5	69,6	60,3	45,2	26,6	12,0	4,6	2,1
46,4	67,6	57,1	40,9	23,1	10,2	3,9	1,7
100	65,2	53,4	36,6	19,9	8,6	3,3	1,6

PP25 Mineralfiller 2, 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	2,21E+05	2,52E+04	3,43E+03	5,96E+02	1,30E+02	3,56E+01	1,21E+01
0,215	4,19E+05	5,02E+04	7,12E+03	1,26E+03	2,74E+02	7,48E+01	2,46E+01
0,464	7,87E+05	9,88E+04	1,47E+04	2,65E+03	5,85E+02	1,59E+02	5,19E+01
1	1,47E+06	1,92E+05	2,98E+04	5,57E+03	1,25E+03	3,40E+02	1,11E+02
2,15	2,68E+06	3,68E+05	5,99E+04	1,16E+04	2,65E+03	7,28E+02	2,37E+02
4,64	4,83E+06	6,98E+05	1,18E+05	2,38E+04	5,59E+03	1,55E+03	5,06E+02
10	8,51E+06	1,31E+06	2,31E+05	4,80E+04	1,17E+04	3,30E+03	1,08E+03
21,5	1,46E+07	2,44E+06	4,46E+05	9,60E+04	2,40E+04	6,95E+03	2,31E+03
46,4	2,40E+07	4,46E+06	8,53E+05	1,90E+05	4,89E+04	1,45E+04	4,90E+03
100	3,77E+07	8,02E+06	1,61E+06	3,71E+05	9,85E+04	2,97E+04	1,02E+04
Fasvinkel, δ, °							
0,1	76,6	82,3	86,4	88,2	88,7	87,6	85,8
0,215	75,2	80,9	85,5	88,1	89,1	88,5	87,5
0,464	73,7	79,3	84,2	87,3	88,9	89,0	88,5
1	72,3	77,8	82,7	86,3	88,4	89,1	89,0
2,15	70,8	76,4	81,2	85,1	87,6	88,9	89,2
4,64	69,0	75,0	79,7	83,7	86,6	88,4	89,1
10	66,8	73,7	78,4	82,3	85,5	87,6	88,8
21,5	64,2	72,3	77,1	81,0	84,2	86,7	88,3
46,4	61,1	70,6	75,9	79,8	83,0	85,6	87,6
100	58,1	68,8	74,6	78,6	81,9	84,6	87,1
PP08 Mineralfiller 2, 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	2,92E+04	2,60E+05	2,81E+06	3,09E+07	2,49E+08	8,30E+08	1,37E+09
0,215	5,84E+04	4,93E+05	5,01E+06	4,96E+07	3,33E+08	9,63E+08	1,47E+09
0,464	1,15E+05	9,25E+05	8,80E+06	7,70E+07	4,29E+08	1,08E+09	1,56E+09
1	2,24E+05	1,71E+06	1,51E+07	1,16E+08	5,35E+08	1,19E+09	1,63E+09
2,15	4,29E+05	3,14E+06	2,54E+07	1,68E+08	6,49E+08	1,30E+09	1,68E+09
4,64	8,15E+05	5,66E+06	4,15E+07	2,34E+08	7,66E+08	1,39E+09	1,74E+09
10	1,53E+06	1,00E+07	6,56E+07	3,16E+08	8,84E+08	1,47E+09	1,78E+09
21,5	2,84E+06	1,74E+07	1,00E+08	4,12E+08	9,98E+08	1,54E+09	1,81E+09
46,4	5,19E+06	2,93E+07	1,49E+08	5,18E+08	1,11E+09	1,60E+09	1,85E+09
100	9,33E+06	4,82E+07	2,12E+08	6,33E+08	1,21E+09	1,65E+09	1,87E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	82,3	76,3	69,1	57,4	36,8	18,9	9,2
0,215	80,7	74,7	67,1	53,7	32,3	15,2	7,1
0,464	79,1	73,2	64,7	49,8	28,3	12,7	5,7
1	77,5	71,7	62,0	45,7	24,6	10,5	4,6
2,15	76,1	69,9	59,0	41,4	21,4	8,9	3,9
4,64	74,7	67,8	55,6	37,3	18,4	7,5	3,2
10	73,2	65,4	51,8	33,1	15,9	6,3	2,6
21,5	71,5	62,7	47,9	29,2	13,6	5,3	2,3
46,4	69,6	59,6	43,7	25,5	11,6	4,4	2,1
100	67,4	56,0	39,4	22,2	9,8	3,8	1,8

PP25 Mineralfiller 2, 25 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	1,07E+05	1,20E+04	1,65E+03	2,84E+02	6,23E+01	1,68E+01	5,51E+00	
0,215	2,05E+05	2,42E+04	3,45E+03	6,06E+02	1,33E+02	3,58E+01	1,18E+01	
0,464	3,88E+05	4,81E+04	7,15E+03	1,29E+03	2,86E+02	7,66E+01	2,53E+01	
1	7,25E+05	9,44E+04	1,46E+04	2,72E+03	6,11E+02	1,64E+02	5,43E+01	
2,15	1,34E+06	1,83E+05	2,95E+04	5,67E+03	1,30E+03	3,53E+02	1,17E+02	
4,64	2,44E+06	3,49E+05	5,87E+04	1,17E+04	2,75E+03	7,54E+02	2,51E+02	
10	4,36E+06	6,60E+05	1,15E+05	2,38E+04	5,74E+03	1,61E+03	5,37E+02	
21,5	7,63E+06	1,23E+06	2,24E+05	4,80E+04	1,19E+04	3,39E+03	1,15E+03	
46,4	1,29E+07	2,27E+06	4,32E+05	9,55E+04	2,43E+04	7,06E+03	2,44E+03	
100	2,12E+07	4,12E+06	8,23E+05	1,88E+05	4,90E+04	1,45E+04	5,09E+03	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	77,3	83,1	87,1	89,1	89,5	89,3	89,3	
0,215	75,7	81,5	86,0	88,6	89,4	89,5	89,5	
0,464	74,3	79,9	84,6	87,7	89,2	89,5	89,6	
1	72,8	78,4	83,2	86,7	88,7	89,4	89,6	
2,15	71,3	76,9	81,7	85,5	87,9	89,2	89,6	
4,64	69,5	75,6	80,2	84,1	86,9	88,6	89,4	
10	67,6	74,2	78,9	82,8	85,8	87,9	89,0	
21,5	65,6	72,8	77,6	81,5	84,6	86,9	88,5	
46,4	63,2	71,2	76,4	80,2	83,4	85,8	87,9	
100	61,1	69,5	75,1	79,1	82,2	84,5	87,3	
PP08 Mineralfiller 2, 25 vol%								
Temperatur, °C								
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30	
Komplex skjvmodul, G*, Pa								
0,1	1,68E+04	1,50E+05	1,58E+06	1,73E+07	1,46E+08	5,74E+08	9,96E+08	
0,215	3,34E+04	2,81E+05	2,81E+06	2,78E+07	1,98E+08	6,65E+08	1,07E+09	
0,464	6,54E+04	5,24E+05	4,91E+06	4,34E+07	2,60E+08	7,51E+08	1,13E+09	
1	1,26E+05	9,65E+05	8,41E+06	6,55E+07	3,31E+08	8,35E+08	1,18E+09	
2,15	2,42E+05	1,75E+06	1,41E+07	9,55E+07	4,09E+08	9,10E+08	1,22E+09	
4,64	4,56E+05	3,14E+06	2,31E+07	1,35E+08	4,92E+08	9,79E+08	1,27E+09	
10	8,53E+05	5,54E+06	3,67E+07	1,85E+08	5,77E+08	1,04E+09	1,30E+09	
21,5	1,58E+06	9,59E+06	5,67E+07	2,45E+08	6,62E+08	1,10E+09	1,34E+09	
46,4	2,87E+06	1,62E+07	8,47E+07	3,14E+08	7,45E+08	1,15E+09	1,36E+09	
100	5,15E+06	2,67E+07	1,23E+08	3,91E+08	8,23E+08	1,19E+09	1,38E+09	
Fasvinkel, δ, °								
0,1	81,4	75,2	68,0	57,0	38,4	19,2	9,3	
0,215	79,8	73,7	66,2	53,6	34,3	16,4	7,5	
0,464	78,2	72,2	64,0	50,1	30,5	13,9	6,3	
1	76,7	70,8	61,6	46,4	27,0	11,8	5,1	
2,15	75,3	69,1	58,8	42,7	23,6	9,9	4,3	
4,64	74,0	67,2	55,7	38,9	20,7	8,4	3,5	
10	72,6	65,0	52,4	35,1	17,9	6,9	3,1	
21,5	71,0	62,5	48,8	31,4	15,3	5,9	2,5	
46,4	69,2	59,7	45,1	27,9	13,1	5,0	2,3	
100	67,2	56,5	41,2	24,5	11,2	4,3	2,0	

PP25 Mineralfiller 2, 42,9 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	20	30	40	50	60	70	80
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	4,05E+05	5,63E+04	6,07E+03	1,05E+03	2,27E+02	6,19E+01	2,01E+01
0,215	7,47E+05	8,86E+04	1,24E+04	2,19E+03	4,76E+02	1,29E+02	4,17E+01
0,464	1,38E+06	1,73E+05	2,55E+04	4,61E+03	1,01E+03	2,76E+02	8,86E+01
1	2,52E+06	3,33E+05	5,16E+04	9,65E+03	2,16E+03	5,89E+02	1,89E+02
2,15	4,56E+06	6,36E+05	1,03E+05	2,00E+04	4,57E+03	1,26E+03	4,06E+02
4,64	8,08E+06	1,20E+06	2,03E+05	4,08E+04	9,60E+03	2,68E+03	8,69E+02
10	1,40E+07	2,24E+06	3,94E+05	8,22E+04	1,99E+04	5,67E+03	1,86E+03
21,5	2,34E+07	4,13E+06	7,58E+05	1,63E+05	4,08E+04	1,19E+04	3,95E+03
46,4	3,72E+07	7,49E+06	1,44E+06	3,21E+05	8,26E+04	2,46E+04	8,30E+03
100	5,60E+07	1,33E+07	2,71E+06	6,25E+05	1,65E+05	5,02E+04	1,72E+04
Fasvinkel, δ, °							
0,1	74,8	78,6	85,6	87,4	87,7	87,4	86,7
0,215	74,0	80,0	84,9	87,7	88,8	88,9	88,6
0,464	72,9	78,6	83,6	86,9	88,7	89,1	89,2
1	71,8	77,2	82,1	85,8	88,1	89,1	89,3
2,15	70,4	75,8	80,6	84,6	87,3	88,8	89,3
4,64	68,6	74,6	79,1	83,2	86,2	88,2	89,1
10	66,2	73,4	77,8	81,8	85,0	87,3	88,7
21,5	63,1	72,1	76,6	80,4	83,7	86,3	88,1
46,4	59,6	70,8	75,4	79,2	82,5	85,1	87,2
100	56,6	69,4	74,3	78,1	81,3	84,1	86,3
PP08 Mineralfiller 2, 42,9 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	7,60E+04	6,38E+05	6,15E+06	5,87E+07	4,00E+08	1,09E+09	1,73E+09
0,215	1,46E+05	1,16E+06	1,05E+07	9,11E+07	5,17E+08	1,26E+09	1,84E+09
0,464	2,78E+05	2,10E+06	1,78E+07	1,37E+08	6,47E+08	1,41E+09	1,92E+09
1	5,24E+05	3,76E+06	2,95E+07	2,00E+08	7,85E+08	1,54E+09	1,99E+09
2,15	9,76E+05	6,66E+06	4,81E+07	2,81E+08	9,26E+08	1,65E+09	2,04E+09
4,64	1,80E+06	1,16E+07	7,61E+07	3,82E+08	1,07E+09	1,74E+09	2,10E+09
10	3,28E+06	1,99E+07	1,17E+08	4,99E+08	1,20E+09	1,83E+09	2,14E+09
21,5	5,90E+06	3,35E+07	1,74E+08	6,30E+08	1,33E+09	1,90E+09	2,17E+09
46,4	1,05E+07	5,50E+07	2,49E+08	7,70E+08	1,46E+09	1,96E+09	2,21E+09
100	1,83E+07	8,78E+07	3,42E+08	9,14E+08	1,57E+09	2,02E+09	2,24E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	78,7	72,6	65,5	54,3	33,4	19,6	8,2
0,215	77,4	71,2	63,7	50,7	29,1	14,5	6,4
0,464	75,9	69,8	61,5	46,7	25,1	11,2	4,8
1	74,4	68,3	58,9	42,5	21,7	9,2	4,0
2,15	73,0	66,6	55,9	38,1	18,6	7,6	3,2
4,64	71,6	64,6	52,5	33,8	16,0	6,3	2,8
10	70,2	62,3	48,7	29,7	13,6	5,3	2,3
21,5	68,6	59,6	44,5	25,8	11,6	4,5	1,9
46,4	66,7	56,4	40,1	22,3	9,9	3,8	1,8
100	64,4	52,9	35,8	19,3	8,5	3,5	1,8

PP25 Mineralfiller 2, 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	3,10E+05	3,69E+04	4,62E+03	8,35E+02	1,86E+02	4,99E+01	1,68E+01
0,215	5,77E+05	6,81E+04	9,44E+03	1,70E+03	3,77E+02	1,01E+02	3,31E+01
0,464	1,07E+06	1,33E+05	1,94E+04	3,56E+03	7,92E+02	2,13E+02	6,86E+01
1	1,97E+06	2,58E+05	3,94E+04	7,42E+03	1,68E+03	4,52E+02	1,45E+02
2,15	3,59E+06	4,96E+05	7,91E+04	1,54E+04	3,54E+03	9,63E+02	3,09E+02
4,64	6,44E+06	9,41E+05	1,57E+05	3,16E+04	7,45E+03	2,05E+03	6,60E+02
10	1,12E+07	1,77E+06	3,07E+05	6,41E+04	1,55E+04	4,35E+03	1,41E+03
21,5	1,91E+07	3,28E+06	5,94E+05	1,27E+05	3,18E+04	9,14E+03	3,00E+03
46,4	3,11E+07	6,00E+06	1,14E+06	2,53E+05	6,46E+04	1,89E+04	6,33E+03
100	4,85E+07	1,08E+07	2,15E+06	4,94E+05	1,30E+05	3,88E+04	1,32E+04
Fasvinkel, δ, °							
0,1	75,5	80,2	85,6	86,3	86,1	85,4	83,3
0,215	74,5	80,4	85,1	87,2	87,7	87,4	86,0
0,464	73,4	79,1	84,0	86,8	88,3	88,3	87,6
1	72,2	77,7	82,6	86,0	88,1	88,6	88,5
2,15	70,9	76,4	81,1	84,9	87,4	88,7	88,9
4,64	69,2	75,1	79,7	83,6	86,5	88,3	89,0
10	67,2	73,9	78,3	82,3	85,4	87,5	88,7
21,5	64,6	72,7	77,1	80,8	84,1	86,6	88,1
46,4	61,5	71,5	75,9	79,7	82,9	85,5	87,2
100	58,8	70,4	74,8	78,6	81,8	84,4	86,0
PP08 Mineralfiller 2, 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
Komplex skjvmodul, G*, Pa							
0,1	4,30E+04	3,76E+05	3,96E+06	4,21E+07	3,10E+08	8,54E+08	1,35E+09
0,215	8,50E+04	7,07E+05	6,98E+06	6,68E+07	4,09E+08	9,85E+08	1,46E+09
0,464	1,66E+05	1,32E+06	1,22E+07	1,02E+08	5,20E+08	1,11E+09	1,55E+09
1	3,21E+05	2,43E+06	2,07E+07	1,52E+08	6,40E+08	1,23E+09	1,63E+09
2,15	6,14E+05	4,41E+06	3,44E+07	2,17E+08	7,63E+08	1,34E+09	1,71E+09
4,64	1,16E+06	7,88E+06	5,57E+07	2,98E+08	8,87E+08	1,43E+09	1,76E+09
10	2,16E+06	1,38E+07	8,76E+07	3,95E+08	1,01E+09	1,52E+09	1,82E+09
21,5	3,98E+06	2,38E+07	1,33E+08	5,04E+08	1,12E+09	1,60E+09	1,87E+09
46,4	7,22E+06	3,98E+07	1,94E+08	6,22E+08	1,24E+09	1,67E+09	1,91E+09
100	1,29E+07	6,48E+07	2,73E+08	7,46E+08	1,34E+09	1,73E+09	1,95E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	81,6	75,8	68,6	56,8	35,6	19,0	10,5
0,215	80,2	74,3	66,6	53,0	31,1	16,1	8,7
0,464	78,7	72,8	64,3	48,9	27,0	13,6	7,0
1	77,2	71,2	61,5	44,6	23,3	11,4	5,8
2,15	75,7	69,4	58,4	40,1	20,0	9,6	4,9
4,64	74,3	67,3	54,8	35,7	17,2	8,1	4,2
10	72,8	64,9	50,9	31,4	14,7	6,8	3,5
21,5	71,1	62,0	46,7	27,4	12,6	5,8	3,0
46,4	69,1	58,8	42,3	23,8	10,7	5,0	2,6
100	66,6	55,1	37,9	20,6	9,2	4,4	2,5

PP25 Kalkfiller 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
Komplex skjivmodul, G*, Pa							
0,1	2,10E+05	2,31E+04	3,16E+03	5,45E+02	1,20E+02	3,29E+01	1,08E+01
0,215	4,02E+05	4,66E+04	6,60E+03	1,16E+03	2,57E+02	7,02E+01	2,29E+01
0,464	7,58E+05	9,26E+04	1,37E+04	2,47E+03	5,51E+02	1,50E+02	4,90E+01
1	1,42E+06	1,81E+05	2,80E+04	5,20E+03	1,18E+03	3,23E+02	1,05E+02
2,15	2,61E+06	3,51E+05	5,65E+04	1,09E+04	2,51E+03	6,93E+02	2,26E+02
4,64	4,72E+06	6,73E+05	1,13E+05	2,24E+04	5,31E+03	1,48E+03	4,85E+02
10	8,35E+06	1,27E+06	2,22E+05	4,56E+04	1,11E+04	3,15E+03	1,04E+03
21,5	1,44E+07	2,39E+06	4,32E+05	9,17E+04	2,30E+04	6,64E+03	2,22E+03
46,4	2,36E+07	4,40E+06	8,34E+05	1,83E+05	4,69E+04	1,38E+04	4,70E+03
100	3,73E+07	7,95E+06	1,59E+06	3,60E+05	9,45E+04	2,85E+04	9,83E+03
Fasvinkel, δ, °							
0,1	77,2	83,1	87,1	89,0	89,5	89,3	88,8
0,215	75,7	81,5	86,0	88,5	89,5	89,6	89,3
0,464	74,3	79,9	84,6	87,7	89,2	89,6	89,6
1	72,9	78,4	83,2	86,7	88,7	89,5	89,6
2,15	71,2	77,0	81,7	85,4	87,9	89,2	89,6
4,64	69,2	75,7	80,2	84,1	86,9	88,7	89,4
10	66,7	74,4	78,9	82,8	85,8	87,9	89,1
21,5	63,8	72,9	77,7	81,5	84,6	86,9	88,5
46,4	60,5	71,4	76,5	80,3	83,4	85,8	87,8
100	57,5	69,8	75,3	79,2	82,3	84,6	87,1
PP25 Kalkfiller 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
Komplex skjivmodul, G*, Pa							
0,1	2,58E+04	2,30E+05	2,48E+06	2,75E+07	2,23E+08	7,95E+08	1,32E+09
0,215	5,16E+04	4,38E+05	4,43E+06	4,41E+07	2,98E+08	9,07E+08	1,40E+09
0,464	1,02E+05	8,23E+05	7,79E+06	6,86E+07	3,85E+08	1,01E+09	1,47E+09
1	1,99E+05	1,53E+06	1,34E+07	1,03E+08	4,81E+08	1,11E+09	1,53E+09
2,15	3,82E+05	2,81E+06	2,25E+07	1,49E+08	5,83E+08	1,20E+09	1,58E+09
4,64	7,28E+05	5,07E+06	3,68E+07	2,08E+08	6,89E+08	1,28E+09	1,63E+09
10	1,37E+06	8,99E+06	5,84E+07	2,80E+08	7,95E+08	1,35E+09	1,66E+09
21,5	2,55E+06	1,56E+07	8,97E+07	3,64E+08	9,00E+08	1,42E+09	1,70E+09
46,4	4,66E+06	2,63E+07	1,33E+08	4,59E+08	9,98E+08	1,48E+09	1,73E+09
100	8,39E+06	4,32E+07	1,90E+08	5,61E+08	1,09E+09	1,53E+09	1,76E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	82,4	76,6	69,4	57,5	37,0	17,3	7,7
0,215	80,9	75,1	67,4	53,8	32,7	14,5	6,4
0,464	79,3	73,5	65,0	49,9	28,7	12,3	5,3
1	77,8	71,9	62,2	45,8	25,0	10,4	4,4
2,15	76,4	70,1	59,1	41,6	21,7	8,8	3,7
4,64	75,0	68,0	55,7	37,4	18,8	7,5	3,2
10	73,5	65,6	52,0	33,3	16,1	6,3	2,6
21,5	71,7	62,7	48,0	29,4	13,8	5,3	2,1
46,4	69,8	59,6	43,8	25,8	11,9	4,6	2,0
100	67,5	56,1	39,7	22,6	10,2	4,0	1,9

PP25 Kalkfiller 25 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
	Komplex skjivmodul, G*, Pa						
0,1	1,25E+05	1,36E+04	1,86E+03	3,21E+02	7,09E+01	1,94E+01	6,16E+00
0,215	2,40E+05	2,76E+04	3,90E+03	6,86E+02	1,52E+02	4,10E+01	1,32E+01
0,464	4,58E+05	5,49E+04	8,11E+03	1,46E+03	3,25E+02	8,76E+01	2,83E+01
1	8,58E+05	1,08E+05	1,66E+04	3,09E+03	6,96E+02	1,88E+02	6,07E+01
2,15	1,60E+06	2,10E+05	3,37E+04	6,45E+03	1,48E+03	4,03E+02	1,31E+02
4,64	2,92E+06	4,04E+05	6,74E+04	1,33E+04	3,13E+03	8,63E+02	2,81E+02
10	5,25E+06	7,69E+05	1,33E+05	2,72E+04	6,55E+03	1,84E+03	6,03E+02
21,5	9,27E+06	1,45E+06	2,61E+05	5,48E+04	1,36E+04	3,89E+03	1,29E+03
46,4	1,59E+07	2,69E+06	5,03E+05	1,09E+05	2,79E+04	8,14E+03	2,73E+03
100	2,66E+07	4,91E+06	9,65E+05	2,16E+05	5,66E+04	1,68E+04	5,73E+03
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	77,7	83,5	87,5	89,2	89,4	89,1	89,3
0,215	76,2	81,9	86,3	88,8	89,4	89,4	89,6
0,464	74,8	80,3	85,0	88,0	89,3	89,5	89,7
1	73,4	78,8	83,6	87,0	88,9	89,5	89,8
2,15	71,9	77,4	82,1	85,8	88,2	89,3	89,7
4,64	70,3	76,0	80,7	84,5	87,2	88,8	89,6
10	68,8	74,7	79,3	83,2	86,1	88,1	89,3
21,5	67,3	73,3	78,1	81,8	84,9	87,2	88,8
46,4	66,0	71,8	76,8	80,6	83,7	86,3	88,1
100	65,5	70,4	75,5	79,5	82,6	85,4	87,0
	PP08 Kalkfiller 25 vol%						
	Temperatur, °C						
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
	Komplex skjivmodul, G*, Pa						
0,1	2,20E+04	1,96E+05	2,08E+06	2,26E+07	1,84E+08	7,07E+08	1,21E+09
0,215	4,37E+04	3,70E+05	3,69E+06	3,62E+07	2,49E+08	8,14E+08	1,29E+09
0,464	8,58E+04	6,91E+05	6,44E+06	5,61E+07	3,25E+08	9,16E+08	1,36E+09
1	1,66E+05	1,28E+06	1,10E+07	8,42E+07	4,10E+08	1,01E+09	1,42E+09
2,15	3,18E+05	2,32E+06	1,84E+07	1,23E+08	5,05E+08	1,10E+09	1,47E+09
4,64	6,01E+05	4,16E+06	2,99E+07	1,72E+08	6,04E+08	1,18E+09	1,53E+09
10	1,13E+06	7,32E+06	4,73E+07	2,34E+08	7,05E+08	1,26E+09	1,56E+09
21,5	2,08E+06	1,26E+07	7,26E+07	3,08E+08	8,05E+08	1,32E+09	1,59E+09
46,4	3,79E+06	2,12E+07	1,08E+08	3,94E+08	9,03E+08	1,38E+09	1,62E+09
100	6,77E+06	3,47E+07	1,55E+08	4,87E+08	9,95E+08	1,43E+09	1,65E+09
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	81,6	75,6	68,3	56,7	37,6	18,3	8,5
0,215	80,0	74,0	66,3	53,2	33,5	15,5	7,0
0,464	78,5	72,5	63,9	49,6	29,7	13,2	5,8
1	77,0	70,9	61,3	45,8	26,2	11,1	4,8
2,15	75,5	69,1	58,4	42,0	22,9	9,5	4,0
4,64	74,1	67,1	55,2	38,1	19,9	8,0	3,4
10	72,6	64,8	51,8	34,3	17,3	6,8	2,9
21,5	70,9	62,1	48,1	30,6	14,9	5,7	2,5
46,4	69,0	59,1	44,3	27,1	12,8	4,8	2,2
100	66,8	55,8	40,5	23,9	11,0	4,3	2,1

PP25 Kalkfiller 42,9 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
	Komplex skjivmodul, G*, Pa						
0,1	3,53E+05	3,85E+04	5,21E+03	8,90E+02	1,96E+02	5,36E+01	1,80E+01
0,215	6,65E+05	7,66E+04	1,08E+04	1,89E+03	4,17E+02	1,14E+02	3,76E+01
0,464	1,24E+06	1,51E+05	2,22E+04	4,00E+03	8,92E+02	2,43E+02	7,98E+01
1	2,31E+06	2,96E+05	4,51E+04	8,39E+03	1,91E+03	5,20E+02	1,70E+02
2,15	4,24E+06	5,71E+05	9,08E+04	1,74E+04	4,04E+03	1,11E+03	3,65E+02
4,64	7,64E+06	1,09E+06	1,81E+05	3,58E+04	8,49E+03	2,38E+03	7,83E+02
10	1,34E+07	2,06E+06	3,55E+05	7,28E+04	1,77E+04	5,05E+03	1,67E+03
21,5	2,26E+07	3,83E+06	6,88E+05	1,46E+05	3,64E+04	1,06E+04	3,56E+03
46,4	3,68E+07	7,04E+06	1,32E+06	2,90E+05	7,43E+04	2,21E+04	7,52E+03
100	5,69E+07	1,27E+07	2,51E+06	5,68E+05	1,50E+05	4,52E+04	1,56E+04
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	76,4	82,4	86,7	88,8	89,2	89,0	87,6
0,215	75,3	81,0	85,6	88,3	89,3	89,4	88,7
0,464	74,2	79,5	84,3	87,5	89,0	89,5	89,2
1	73,0	78,1	82,9	86,4	88,5	89,3	89,4
2,15	71,9	76,8	81,4	85,2	87,7	89,1	89,4
4,64	70,7	75,6	80,0	83,8	86,7	88,5	89,3
10	69,1	74,6	78,7	82,5	85,5	87,7	88,9
21,5	67,0	73,5	77,5	81,2	84,3	86,7	88,3
46,4	64,8	72,8	76,5	80,1	83,1	85,6	87,4
100	63,7	72,5	75,6	79,0	82,0	84,5	86,4

PP08 Kalkfiller 42,9 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
Komplex skjivmodul, G*, Pa							
0,1	5,86E+04	4,94E+05	4,93E+06	5,00E+07	3,62E+08	1,06E+09	1,66E+09
0,215	1,12E+05	9,09E+05	8,55E+06	7,85E+07	4,71E+08	1,21E+09	1,77E+09
0,464	2,15E+05	1,67E+06	1,47E+07	1,20E+08	5,94E+08	1,35E+09	1,86E+09
1	4,11E+05	3,04E+06	2,49E+07	1,76E+08	7,25E+08	1,47E+09	1,92E+09
2,15	7,75E+05	5,46E+06	4,12E+07	2,51E+08	8,61E+08	1,58E+09	1,99E+09
4,64	1,45E+06	9,67E+06	6,61E+07	3,44E+08	9,97E+08	1,67E+09	2,03E+09
10	2,68E+06	1,68E+07	1,03E+08	4,53E+08	1,13E+09	1,75E+09	2,07E+09
21,5	4,90E+06	2,87E+07	1,54E+08	5,76E+08	1,26E+09	1,83E+09	2,11E+09
46,4	8,83E+06	4,77E+07	2,23E+08	7,10E+08	1,38E+09	1,89E+09	2,14E+09
100	1,56E+07	7,68E+07	3,09E+08	8,48E+08	1,49E+09	1,95E+09	2,17E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	79,2	74,2	67,3	55,8	34,2	17,6	7,9
0,215	78,6	72,9	65,5	52,0	29,7	13,5	6,1
0,464	77,3	71,5	63,2	48,0	25,7	11,1	4,9
1	75,9	70,0	60,5	43,6	22,2	9,1	3,9
2,15	74,6	68,2	57,3	39,1	19,0	7,6	3,2
4,64	73,2	66,2	53,8	34,7	16,3	6,4	2,6
10	71,7	63,7	49,8	30,4	14,0	5,4	2,2
21,5	70,0	60,9	45,5	26,5	11,8	4,5	1,8
46,4	68,1	57,6	41,1	22,9	10,1	3,8	1,7
100	65,8	53,9	36,6	19,7	8,5	3,3	1,6

PP25 Kalkfiller 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
Komplex skjivmodul, G*, Pa							
0,1	2,79E+05	3,06E+04	4,17E+03	7,23E+02	1,59E+02	4,34E+01	1,44E+01
0,215	5,30E+05	6,15E+04	8,69E+03	1,54E+03	3,39E+02	9,22E+01	3,03E+01
0,464	9,98E+05	1,22E+05	1,80E+04	3,26E+03	7,25E+02	1,97E+02	6,45E+01
1	1,86E+06	2,39E+05	3,67E+04	6,86E+03	1,55E+03	4,23E+02	1,38E+02
2,15	3,42E+06	4,61E+05	7,40E+04	1,43E+04	3,30E+03	9,06E+02	2,96E+02
4,64	6,17E+06	8,82E+05	1,47E+05	2,94E+04	6,95E+03	1,94E+03	1,36E+02
10	1,09E+07	1,67E+06	2,90E+05	5,98E+04	1,45E+04	4,12E+03	1,36E+03
21,5	1,85E+07	3,13E+06	5,64E+05	1,20E+05	3,00E+04	8,68E+03	2,90E+03
46,4	3,02E+07	5,77E+06	1,09E+06	2,39E+05	6,12E+04	1,81E+04	6,15E+03
100	4,68E+07	1,04E+07	2,07E+06	4,70E+05	1,23E+05	3,72E+04	1,28E+04
Fasvinkel, δ, °							
0,1	77,1	82,9	86,9	88,9	89,3	89,2	88,3
0,215	75,7	81,4	85,8	88,5	89,4	89,5	89,1
0,464	74,4	79,9	84,5	87,6	89,2	89,6	89,5
1	73,1	78,3	83,1	86,6	88,7	89,4	89,6
2,15	71,6	77,0	81,6	85,4	87,9	88,2	89,6
4,64	70,2	75,8	80,2	84,1	86,9	88,6	89,4
10	68,0	74,6	78,9	82,7	85,8	87,9	89,0
21,5	65,3	73,4	77,6	81,4	84,6	86,9	88,5
46,4	62,0	72,3	76,6	80,2	83,3	85,8	87,8
100	59,4	71,2	75,5	79,1	82,2	84,8	87,0

PP08 Kalkfiller 39,2 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
Komplex skjivmodul, G*, Pa							
0,1	3,65E+04	3,22E+05	3,44E+06	3,76E+07	2,95E+08	9,90E+08	1,58E+09
0,215	7,22E+04	6,08E+05	6,11E+06	6,01E+07	3,92E+08	1,12E+09	1,65E+09
0,464	1,42E+05	1,14E+06	1,07E+07	9,31E+07	5,02E+08	1,23E+09	1,73E+09
1	2,76E+05	2,11E+06	1,84E+07	1,39E+08	6,21E+08	1,35E+09	1,78E+09
2,15	5,29E+05	3,87E+06	3,09E+07	2,01E+08	7,45E+08	1,44E+09	1,83E+09
4,64	1,01E+06	6,98E+06	5,04E+07	2,79E+08	8,71E+08	1,53E+09	1,88E+09
10	1,89E+06	1,23E+07	7,97E+07	3,73E+08	9,96E+08	1,61E+09	1,91E+09
21,5	3,51E+06	2,13E+07	1,22E+08	4,81E+08	1,12E+09	1,68E+09	1,94E+09
46,4	6,42E+06	3,59E+07	1,79E+08	5,99E+08	1,23E+09	1,73E+09	1,98E+09
100	1,15E+07	5,87E+07	2,54E+08	7,24E+08	1,34E+09	1,79E+09	2,00E+09
Fasvinkel, δ, °							
0,1	81,9	76,4	69,3	57,5	36,1	16,0	7,0
0,215	80,6	74,9	67,3	53,7	31,6	13,3	5,8
0,464	79,2	73,4	65,0	49,6	27,4	11,3	4,7
1	77,7	71,9	62,2	45,3	23,7	9,5	4,0
2,15	76,3	70,1	59,0	40,8	20,4	8,0	3,3
4,64	74,9	68,0	55,5	36,4	17,5	6,7	2,7
10	73,4	65,5	51,6	32,1	15,0	5,7	2,3
21,5	71,7	62,6	47,4	28,1	12,8	4,8	2,0
46,4	69,7	59,3	43,0	24,5	10,8	4,0	1,8
100	67,4	55,6	38,5	21,1	9,2	3,4	1,6

PP25 Cement 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	2,83E+05	3,03E+04	4,08E+03	6,95E+02	1,51E+02	4,12E+01	1,36E+01
0,215	5,31E+05	6,04E+04	8,49E+03	1,48E+03	3,24E+02	8,83E+01	2,88E+01
0,464	9,89E+05	1,20E+05	1,75E+04	3,15E+03	6,96E+02	1,90E+02	6,19E+01
1	1,83E+06	2,32E+05	3,56E+04	6,61E+03	1,49E+03	4,08E+02	1,33E+02
2,15	3,33E+06	4,48E+05	7,17E+04	1,37E+04	3,17E+03	8,76E+02	2,86E+02
4,64	5,97E+06	8,56E+05	1,43E+05	2,82E+04	6,67E+03	1,87E+03	6,15E+02
10	1,05E+07	1,61E+06	2,81E+05	5,76E+04	1,39E+04	3,98E+03	1,32E+03
21,5	1,77E+07	2,98E+06	5,44E+05	1,16E+05	2,87E+04	8,37E+03	2,81E+03
46,4	2,79E+07	5,44E+06	1,04E+06	2,29E+05	5,85E+04	1,74E+04	5,95E+03
100	4,16E+07	9,76E+06	1,97E+06	4,49E+05	1,18E+05	3,59E+04	1,24E+04
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	75,8	82,5	86,8	89,0	89,5	89,3	88,6
0,215	74,6	80,9	85,6	88,4	89,5	89,7	89,4
0,464	73,2	79,3	84,3	87,5	89,2	89,7	89,6
1	71,8	77,7	82,8	86,4	88,6	89,5	89,7
2,15	70,4	76,3	81,3	85,1	87,8	89,2	89,6
4,64	68,9	74,8	79,8	83,8	86,7	88,6	89,4
10	67,3	73,4	78,3	82,4	85,5	87,7	89,0
21,5	65,7	72,0	77,0	81,1	84,3	86,7	88,4
46,4	63,8	70,6	75,7	79,8	83,1	85,6	87,5
100	62,3	69,5	74,3	78,5	81,9	84,6	86,4
PP08 Cement 34 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30
	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	3,86E+04	3,40E+05	3,53E+06	3,62E+07	2,63E+08	8,49E+08	1,38E+09
0,215	7,62E+04	6,39E+05	6,18E+06	5,67E+07	3,47E+08	9,75E+08	1,47E+09
0,464	1,49E+05	1,19E+06	1,07E+07	8,64E+07	4,42E+08	1,09E+09	1,55E+09
1	2,89E+05	2,18E+06	1,81E+07	1,27E+08	5,47E+08	1,19E+09	1,61E+09
2,15	5,51E+05	3,94E+06	2,97E+07	1,81E+08	6,58E+08	1,28E+09	1,66E+09
4,64	1,04E+06	7,00E+06	4,75E+07	2,49E+08	7,73E+08	1,37E+09	1,70E+09
10	1,94E+06	1,22E+07	7,36E+07	3,31E+08	8,88E+08	1,44E+09	1,74E+09
21,5	3,56E+06	2,07E+07	1,10E+08	4,26E+08	1,00E+09	1,51E+09	1,77E+09
46,4	6,42E+06	3,42E+07	1,59E+08	5,32E+08	1,11E+09	1,56E+09	1,80E+09
100	1,14E+07	5,50E+07	2,23E+08	6,45E+08	1,21E+09	1,61E+09	1,82E+09
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	81,4	75,5	67,8	55,3	35,1	18,2	8,6
0,215	80,2	74,0	65,6	51,6	31,0	14,5	6,7
0,464	78,7	72,4	63,0	47,7	27,2	12,2	5,4
1	77,1	70,6	60,2	43,6	23,8	10,2	4,5
2,15	75,5	68,5	57,0	39,5	20,7	8,5	3,7
4,64	73,9	66,2	53,4	35,5	17,9	7,2	3,1
10	72,2	63,6	49,6	31,6	15,5	6,1	2,6
21,5	70,2	60,6	45,7	27,9	13,2	5,1	2,1
46,4	68,0	57,3	41,6	24,5	11,4	4,4	1,9
100	65,6	53,7	37,5	21,4	9,7	3,8	1,8

PP25 Cement 25 vol%							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80
	Komplex skjvmodul, G*, Pa						
0,1	1,64E+05	1,81E+04	2,45E+03	4,23E+02	9,32E+01	2,54E+01	8,47E+00
0,215	3,12E+05	3,64E+04	5,13E+03	9,05E+02	2,00E+02	5,44E+01	1,80E+01
0,464	5,85E+05	7,24E+04	1,06E+04	1,93E+03	4,29E+02	1,17E+02	3,84E+01
1	1,09E+06	1,42E+05	2,18E+04	4,06E+03	9,20E+02	2,51E+02	8,26E+01
2,15	1,99E+06	2,75E+05	4,40E+04	8,47E+03	1,96E+03	5,40E+02	1,77E+02
4,64	3,57E+06	5,22E+05	8,74E+04	1,75E+04	4,15E+03	1,16E+03	3,81E+02
10	6,29E+06	9,85E+05	1,72E+05	3,56E+04	8,68E+03	2,46E+03	8,18E+02
21,5	1,07E+07	1,83E+06	3,34E+05	7,18E+04	1,80E+04	5,20E+03	1,75E+03
46,4	1,78E+07	3,34E+06	6,42E+05	1,43E+05	3,68E+04	1,08E+04	3,72E+03
100	2,86E+07	6,01E+06	1,22E+06	2,80E+05	7,43E+04	2,23E+04	7,79E+03
	Fasvinkel, δ, °						
0,1	76,8	83,0	87,1	89,1	89,6	89,5	88,4
0,215	75,3	81,4	85,9	88,6	89,6	89,6	89,0
0,464	73,6	79,7	84,6	87,8	89,3	89,7	89,4
1	72,0	78,1	83,1	86,7	88,8	89,6	89,6
2,15	70,2	76,6	81,6	85,4	88,0	89,3	89,6
4,64	68,4	75,1	80,1	84,1	86,9	88,7	89,5
10	66,4	73,5	78,6	82,7	85,8	87,9	89,1
21,5	64,0	72,0	77,2	81,3	84,6	87,0	88,6
46,4	61,9	70,5	75,8	80,0	83,4	85,9	88,1
100	59,9	69,0	74,4	78,7	82,2	84,8	87,8

PP25 Cement 42,9 vol%										
Temperatur, °C										
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80			
Komplex skjvmodul, G*, Pa										
0,1	6,73E+05	7,76E+04	9,90E+03	1,61E+03	3,34E+02	8,71E+01	2,75E+01			
0,215	1,21E+06	1,43E+05	1,99E+04	3,37E+03	7,10E+02	1,85E+02	5,84E+01			
0,464	2,16E+06	2,75E+05	4,04E+04	7,08E+03	1,52E+03	3,97E+02	1,25E+02			
1	3,83E+06	5,21E+05	8,05E+04	1,47E+04	3,23E+03	8,51E+02	2,68E+02			
2,15	6,73E+06	9,79E+05	1,58E+05	3,01E+04	6,80E+03	1,82E+03	5,76E+02			
4,64	1,15E+07	1,82E+06	3,07E+05	6,10E+04	1,42E+04	3,88E+03	1,24E+03			
10	1,92E+07	3,34E+06	5,87E+05	1,22E+05	2,93E+04	8,18E+03	2,64E+03			
21,5	3,02E+07	6,03E+06	1,11E+06	2,39E+05	5,96E+04	1,71E+04	5,60E+03			
46,4	4,36E+07	1,06E+07	2,08E+06	4,65E+05	1,20E+05	3,53E+04	1,18E+04			
100	5,95E+07	1,83E+07	3,85E+06	8,93E+05	2,37E+05	7,19E+04	2,44E+04			
Fasvinkel, δ, °										
0,1	71,6	79,2	84,8	87,9	88,9	89,1	88,5			
0,215	70,9	78,2	84,1	87,5	89,2	89,6	89,3			
0,464	70,2	77,0	82,6	86,5	88,7	89,5	89,6			
1	69,1	75,6	81,0	85,2	87,9	89,2	89,6			
2,15	67,4	74,2	79,4	83,8	86,9	88,7	89,4			
4,64	65,2	72,9	77,8	82,3	85,7	87,9	89,1			
10	61,9	71,7	76,4	80,8	84,3	86,9	88,6			
21,5	58,2	70,4	75,0	79,3	83,0	85,8	87,7			
46,4	54,3	68,8	73,8	78,0	81,6	84,6	86,8			
100	52,7	67,1	72,7	76,8	80,4	83,4	85,7			
PP08 Cement 42,9 vol%										
Temperatur, °C										
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30			
Komplex skjvmodul, G*, Pa										
0,1	1,43E+05	1,07E+06	8,89E+06	7,47E+07	4,44E+08	1,22E+09	1,81E+09			
0,215	2,51E+05	1,85E+06	1,47E+07	1,12E+08	5,65E+08	1,36E+09	1,89E+09			
0,464	4,61E+05	3,25E+06	2,42E+07	1,64E+08	6,96E+08	1,48E+09	1,97E+09			
1	8,43E+05	5,64E+06	3,91E+07	2,33E+08	8,32E+08	1,60E+09	2,03E+09			
2,15	1,53E+06	9,69E+06	6,17E+07	3,19E+08	9,71E+08	1,70E+09	2,10E+09			
4,64	2,74E+06	1,65E+07	9,48E+07	4,22E+08	1,11E+09	1,80E+09	2,14E+09			
10	4,88E+06	2,74E+07	1,41E+08	5,40E+08	1,24E+09	1,88E+09	2,18E+09			
21,5	8,56E+06	4,47E+07	2,04E+08	6,70E+08	1,37E+09	1,96E+09	2,21E+09			
46,4	1,48E+07	7,10E+07	2,83E+08	8,07E+08	1,49E+09	2,02E+09	2,25E+09			
100	2,51E+07	1,10E+08	3,80E+08	9,48E+08	1,60E+09	2,08E+09	2,28E+09			
Fasvinkel, δ, °										
0,1	72,8	69,0	62,7	51,0	31,0	13,8	6,4			
0,215	74,1	68,2	60,7	47,4	26,9	11,5	5,2			
0,464	73,2	66,9	58,4	43,5	23,2	9,6	4,3			
1	71,8	65,3	55,7	39,4	20,1	8,2	3,5			
2,15	70,4	63,5	52,6	35,3	17,3	6,9	3,1			
4,64	68,9	61,3	49,1	31,3	14,9	5,9	2,6			
10	67,3	58,8	45,3	27,4	12,8	5,0	2,2			
21,5	65,5	55,9	41,3	23,9	10,8	4,4	1,7			
46,4	63,4	52,7	37,1	20,7	9,3	3,6	1,6			
100	61,0	49,1	33,0	17,9	8,0	3,2	1,5			

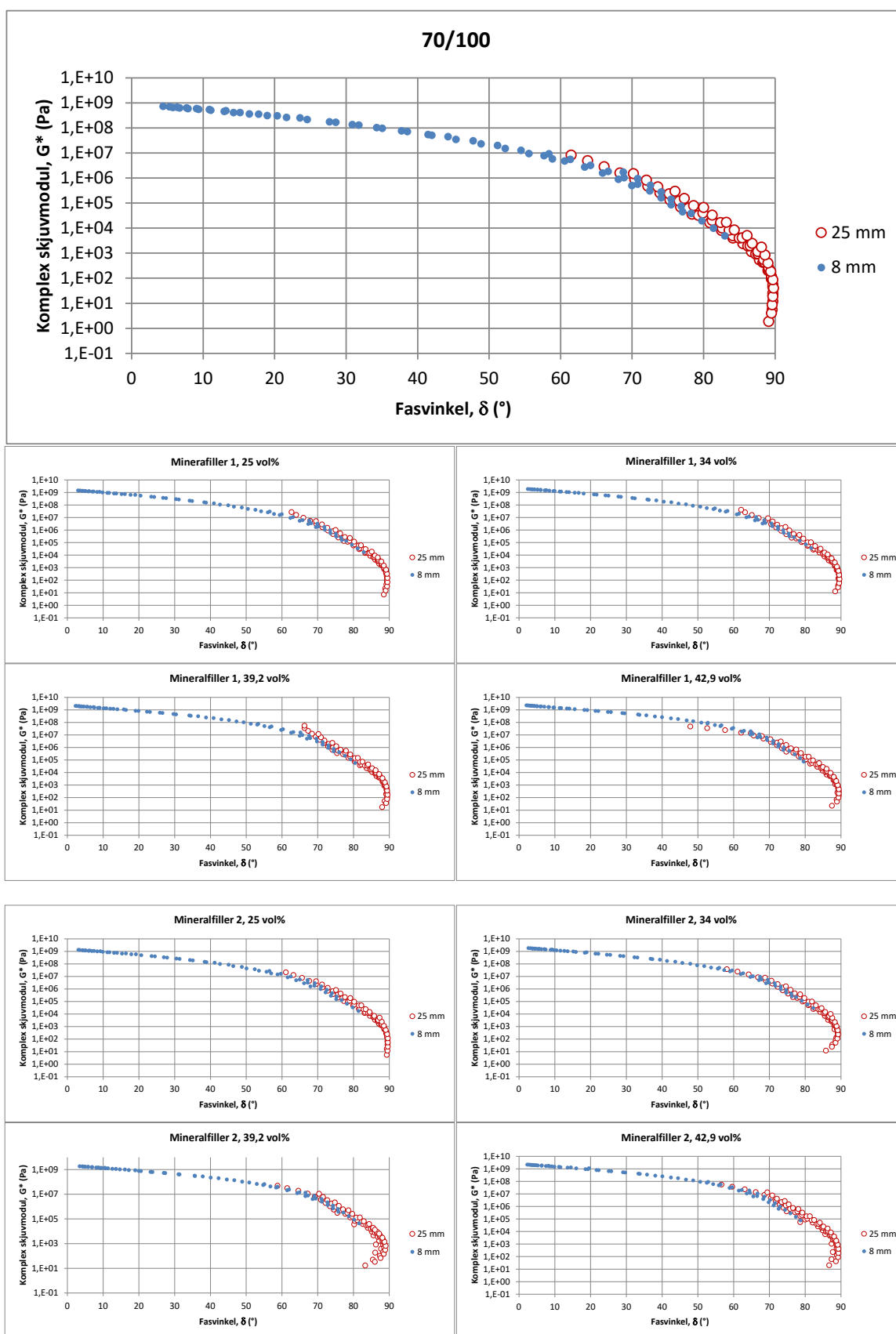
PP25 Cement 39.2 vol%										
Temperatur, °C										
Vinkelfrekvens rad/s	20	30	40	50	60	70	80			
Komplex skjvmodul, G*, Pa										
0.1	4,60E+05	5,12E+04	6,77E+03	1,13E+03	2,42E+02	6,52E+01	2,14E+01			
0.215	8,48E+05	9,96E+04	1,39E+04	2,40E+03	5,16E+02	1,38E+02	4,46E+01			
0.464	1,56E+06	1,94E+05	2,85E+04	5,07E+03	1,10E+03	2,96E+02	9,50E+01			
1	2,82E+06	3,72E+05	5,77E+04	1,06E+04	2,35E+03	6,34E+02	2,03E+02			
2.15	5,05E+06	7,07E+05	1,15E+05	2,19E+04	4,99E+03	1,36E+03	4,36E+02			
4.64	8,82E+06	1,33E+06	2,25E+05	4,47E+04	1,05E+04	2,90E+03	9,37E+02			
10	1,50E+07	2,46E+06	4,35E+05	8,99E+04	2,18E+04	6,15E+03	2,01E+03			
21.5	2,43E+07	4,49E+06	8,32E+05	1,79E+05	4,46E+04	1,29E+04	4,27E+03			
46.4	3,75E+07	8,03E+06	1,57E+06	3,50E+05	9,03E+04	2,68E+04	8,98E+03			
100	5,48E+07	1,40E+07	2,94E+06	6,79E+05	1,81E+05	5,48E+04	1,87E+04			
Fasvinkel, δ, °										
0.1	74.1	81.1	86.0	88.4	89.1	88.6	86.6			
0.215	73.1	79.9	84.9	88.0	89.3	89.4	88.3			
0.464	72.0	78.3	83.5	87.1	89.0	89.5	89.0			
1	70.6	76.7	82.0	85.9	88.3	89.3	89.3			
2.15	69.0	75.2	80.4	84.5	87.4	88.9	89.4			
4.64	66.7	73.8	78.8	83.1	86.2	88.3	89.2			
10	63.8	72.4	77.4	81.6	85.0	87.4	88.8			
21.5	60.3	70.9	76.0	80.2	83.7	86.3	88.1			
46.4	56.6	69.3	74.6	78.9	82.4	85.2	87.1			
100	54.1	67.3	73.3	77.6	81.1	84.1	86.0			
PP08 Cement 39.2 vol%										
Temperatur, °C										
Vinkelfrekvens rad/s	30	20	10	0	-10	-20	-30			
Komplex skjvmodul, G*, Pa										
0.1	6,07E+04	5,13E+05	5,02E+06	4,77E+07	3,20E+08	9,81E+08	1,54E+09			
0.215	1,16E+05	9,39E+05	8,61E+06	7,37E+07	4,16E+08	1,11E+09	1,63E+09			
0.464	2,24E+05	1,71E+06	1,46E+07	1,10E+08	5,23E+08	1,23E+09	1,71E+09			
1	4,25E+05	3,09E+06	2,43E+07	1,60E+08	6,39E+08	1,34E+09	1,77E+09			
2.15	8,00E+05	5,50E+06	3,94E+07	2,25E+08	7,60E+08	1,43E+09	1,83E+09			
4.64	1,49E+06	9,64E+06	6,21E+07	3,05E+08	8,82E+08	1,53E+09	1,87E+09			
10	2,73E+06	1,65E+07	9,49E+07	3,99E+08	1,00E+09	1,61E+09	1,92E+09			
21.5	4,95E+06	2,77E+07	1,40E+08	5,05E+08	1,12E+09	1,68E+09	1,96E+09			
46.4	8,81E+06	4,52E+07	2,00E+08	6,20E+08	1,23E+09	1,74E+09	1,99E+09			
100	1,53E+07	7,16E+07	2,75E+08	7,42E+08	1,33E+09	1,79E+09	2,02E+09			
Fasvinkel, δ, °										
0.1	79.1	73.5	66.0	53.7	33.4	15.6	7.2			
0.215	78.6	72.2	63.9	50.0	29.2	13.1	5.9			
0.464	77.1	70.7	61.4	46.1	25.5	11.0	4.8			
1	75.6	68.9	58.6	42.0	22.2	9.4	4.2			
2.15	74.0	67.0	55.3	37.8	19.3	8.0	3.4			
4.64	72.4	64.6	51.8	33.7	16.6	6.7	2.9			
10	70.7	62.0	48.0	29.9	14.3	5.7	2.4			
21.5	68.7	59.0	43.9	26.3	12.3	4.8	2.1			
46.4	66.5	55.7	39.8	23.0	10.7	4.2	2.0			
100	64.0	52.1	35.7	20.0	9.2	3.7	1.8			

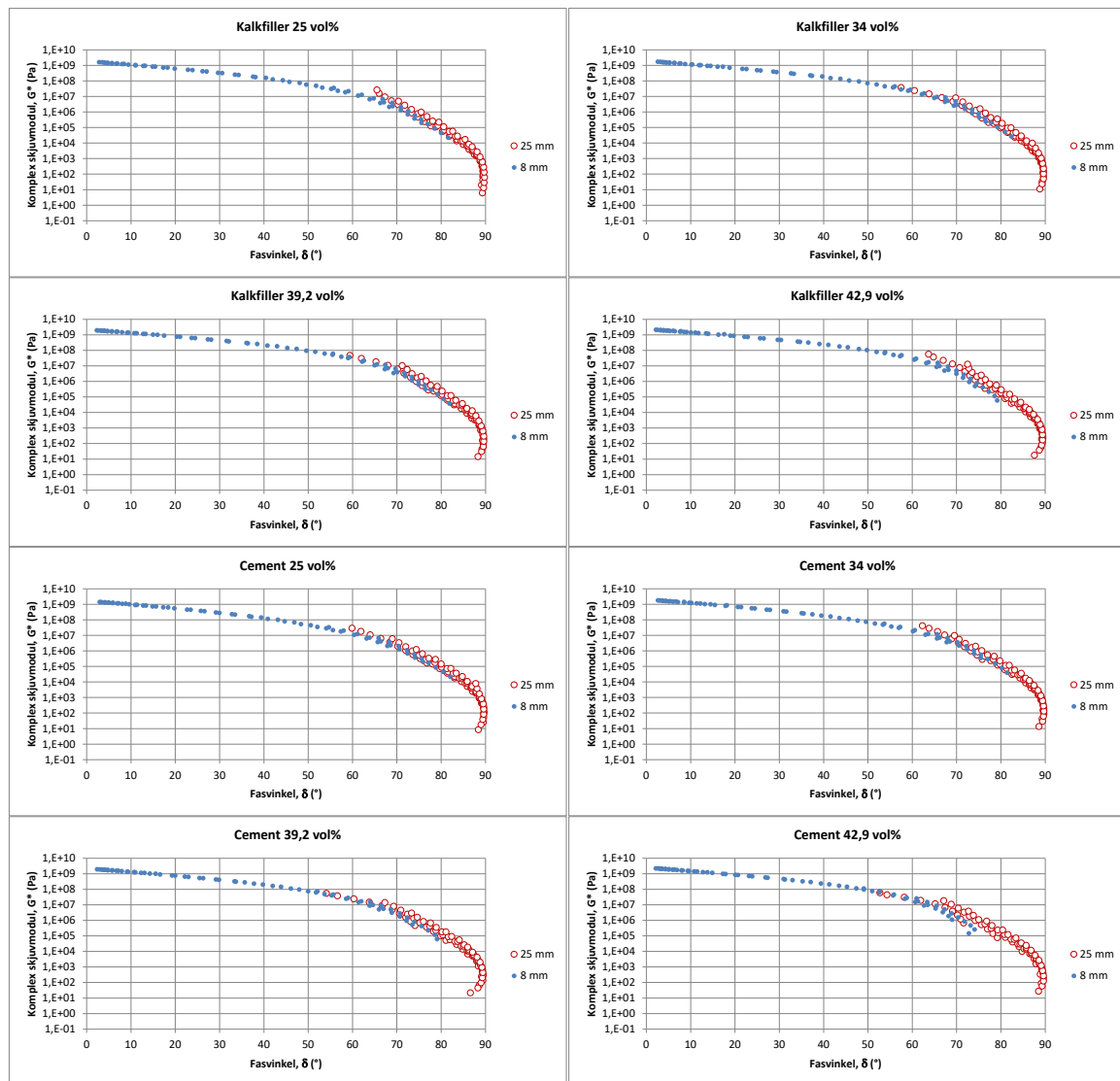
Bilaga 2 Amplituder för sveptest med DSR

PP25 Amplituder, %										
Vinkelfrekvens rad/s	Temperatur, °C									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,1	0,500	0,797	1,250	1,93	2,95	4,44	6,60	9,70	14,1	20,3
0,215	0,395	0,630	0,988	1,53	2,33	3,51	5,21	7,67	11,2	16,1
0,464	0,312	0,497	0,780	1,21	1,84	2,77	4,12	6,06	8,81	12,7
1	0,247	0,393	0,617	0,953	1,45	2,19	3,26	4,79	6,96	10,0
2,15	0,195	0,311	0,487	0,753	1,15	1,73	2,57	3,78	5,50	7,92
4,64	0,154	0,245	0,385	0,595	0,907	1,37	2,03	2,99	4,35	6,26
10	0,122	0,194	0,304	0,470	0,717	1,08	1,61	2,36	3,43	4,95
21,5	0,0961	0,153	0,240	0,371	0,567	0,853	1,27	1,87	2,71	3,91
46,4	0,0759	0,121	0,190	0,294	0,448	0,674	1,00	1,47	2,14	3,09
100	0,0600	0,0956	0,150	0,232	0,354	0,532	0,792	1,16	1,69	2,44

PP08 Amplituder, %							
Vinkelfrekvens rad/s	Temperatur, °C						
	30	20	10	0	-10	-20	-30
0,1	1,25	0,797	0,500	0,309	0,187	0,111	0,0647
0,215	0,988	0,630	0,395	0,244	0,148	0,0878	0,0511
0,464	0,780	0,497	0,312	0,193	0,117	0,0694	0,0404
1	0,617	0,393	0,247	0,152	0,0922	0,0548	0,0319
2,15	0,487	0,311	0,195	0,120	0,0729	0,0433	0,0252
4,64	0,385	0,245	0,154	0,0950	0,0576	0,0342	0,0199
10	0,304	0,194	0,122	0,0751	0,04550	0,0270	0,0157
21,5	0,240	0,153	0,0961	0,0593	0,0359	0,0214	0,0124
46,4	0,190	0,121	0,0759	0,0469	0,0284	0,0169	0,00983
100	0,150	0,0956	0,0600	0,0370	0,0224	0,0133	0,00776

Bilaga 3 Blackdiagram för oscillerande DSR-mätningar





Bilaga 4 Mätdata från MSCR-test

J _{nr3200} vid valda temperaturer				
Temperatur, °C:		44	52	60
Prov		J _{nr3200} , kPa ⁻¹ :		
70/100		0,406	1,630	5,404
Filler	Vol%	J _{nr3200} asfaltbruk, MPa ⁻¹		
Mineralfiller 1	25	88	325	1064
	34	45	137	407
	39,2	21	53	157
	42,9	21	34	79
Mineralfiller 2	25	124	485	1648
	34	43	137	435
	39,2	26	67	198
	42,9	16	33	85
Kalkfiller	25	103	397	1321
	34	43	145	483
	39,2	27	75	238
	42,9	22	45	119
Cement	25	64	220	720
	34	30	64	160
	39,2	11	18	43
	42,9	7	11	19

Bilaga 5 Data från Rigdenmätning

Prov	Vikter [g]			Höjdmätning [mm]			Diameter [mm]	Volym [cm ³]	Skrym- densitet [g/cm ³]	Kompakt- densitet [g/cm ³]	Rigdenhålrum [vol%]	
	Tara	Tara+prov	Prov	Tom	Packad	Provhöjd						
Mineralfiller 1 A	522,79	532,70	9,91	0,7	11,8	11,1	25,05	5,471	1,812	2,686	32,6	32,1
B	522,79	532,73	9,94		11,6	10,9		5,372	1,850		31,1	
C	522,79	532,78	9,99		11,9	11,2		5,520	1,810		32,6	
Mineralfiller 2 A	522,79	532,75	9,96		11,3	10,6		5,224	1,907	2,659	29,0	28,3
B	522,79	532,68	9,89		11,1	10,4		5,126	1,930		28,2	
C	522,79	532,73	9,94		11,1	10,4		5,126	1,939		27,8	
Kalkfiller A	522,79	532,75	9,96		10,5	9,8		4,830	2,062	2,730	23,2	23,7
B	522,75	532,44	9,69		10,3	9,6		4,731	2,048		23,7	
C	522,77	532,42	9,65		10,3	9,6		4,731	2,040		24,1	
Cement A	522,77	532,50	9,73	0,7	10,7	10,0	25,05	4,928	1,974	2,985	26,5	27,1
B	522,76	532,28	9,52		10,6	9,9		4,879	1,951		27,4	
C	522,78	532,21	9,43		10,5	9,8		4,830	1,952		27,3	

Bilaga 6 Masterkurvor

