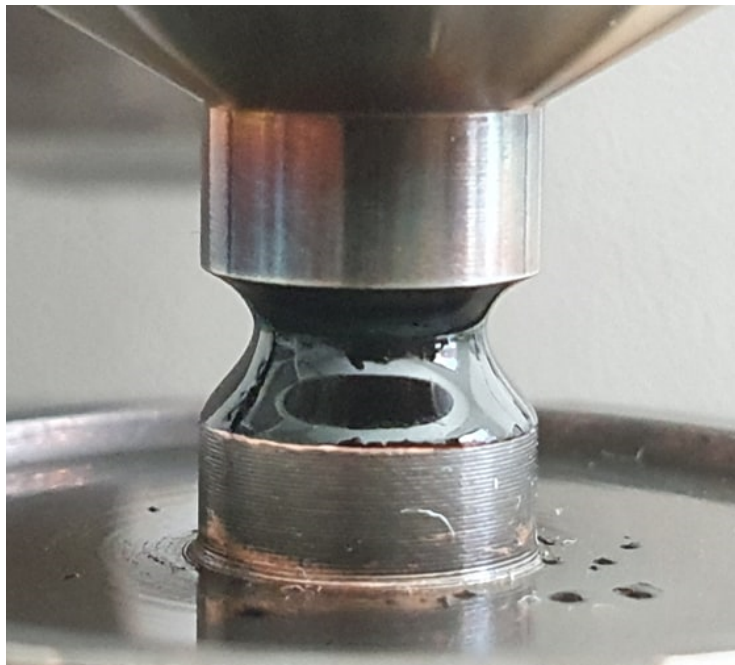


Thesis 351

Metodik för utmattning av asfaltbruk

Mätmetod för bedömning av utmattningsegenskaper med
Dynamisk Skjuvreometer (DSR)



Adi Hadzikadunic

Hussein Amer Rashid Al-Sultani

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

Thesis 351 Copyright © Adi Hadzikadunic, Hussein Al-Sultani

LTH, Institutionen för Teknik och samhälle

CODEN: LUTVDG/(TVTT-5318)/1-98/2020 ISSN 1653-1922

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet

Lund 2020

Examensarbete

CODEN: LUTVDG/
(TVTT-5318)/1-98/2020

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

ISSN 1653-1922

Author: Adi Hadzikadunic & Hussein Amer Rashid Al-Sultani
Title: Metodik för utmattning av asfaltbruk
English title: Method for interpretation of fatigue performance on asphalt mastics
Language: Swedish
Year: 2019
Keywords: Asphalt; Bitumen; Filler; Mastics; Rheology; Fatigue; Dynamic Shear Rheometer
Citation: Adi Hadzikadunic och Hussein Amer Rashid Al-Sultani, Metodik för utmattning av asfaltbruk. Lund, Lunds universitet, LTH, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2020. Thesis. 351

The durability of asphalt can be investigated with fatigue tests, which unfortunately are very laborious and costly. Therefore, they are not used as often as they should. At LTH in Lund, an alternative method is utilized using a dynamic shear rheometer, DSR, on asphalt's mastic for fatigue properties testing. The properties of asphalt mastic are crucial for the asphalt pavements ability to withstand repeated loads. Fatigue fracture is a well-known phenomenon and affects all types of materials. The method, using DSR for fatigue testing is new and needs to be evaluated. A crucial impetus came from TUW, Technische Universität Wien, who launched a version that is now being further developed at LTH.

DSR is usually used to investigate pure bitumen, but several theses at LTH have been investigating mastics in a similar way, inspired by the American asphalt concept Superpave. Commonly rutting and low temperature properties are investigated with DSR on asphalt mastics. Fatigue testing with DSR may complement these tests. After developing a first operating scheme, various asphalt compositions with both standard bitumen and polymer modified bitumen were tested. The results showed that the test might order the fatigue properties in a logical order. Unfortunately, a considerable time was spent on preparing the operating schedule, meaning that only single and few measurements could be carried out. Nevertheless, surprisingly only a few results fell outside the expected outcome. Further studies should focus on to streamline the process, investigate precision data and finally conduct parallel studies with the conventional fatigue test methods to examine the validity of the test.

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

Sammanfattning

Summary

Begrepp och storheter

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	2
1.3 Metodbeskrivning	2
1.4 Avgränsning	3
1.5 Rapportens disposition	3
2 Litteraturstudie	5
2.1 Vägkonstruktionens uppbyggnad	5
2.2 Asfalt	6
2.2.1 Stenmaterial	6
2.2.2 Filler	6
2.2.3 Bitumen	6
2.2.4 Asfaltbruk	8
2.3 Nedbrytningsmekanismer	9
2.3.1 Inverkan av tung trafik	9
2.4 Dimensionering	10
2.4.1 Kritiska påkänningar	10
2.5 Utmattning	11
2.5.1 Utmattningstest i laboratorium	11
2.5.2 Testparametrar och geometri	13
2.5.3 Frekvensens inverkan	14
2.5.4 Åtgärder mot utmattningsprickor	14
2.6 Klassificering av bitumen	15
2.6.1 Europeisk klassificering	15
2.6.2 Superpave	15
2.7 Reologi	17
2.7.1 Elasticitet	17

2.7.2	Plasticitet	17
2.7.3	Viskositet	17
2.7.4	Viskoelasticitet	18
2.7.5	Newtonsk- och icke newtonsk vätska	18
2.8	Dynamisk Skjuvreometer (DSR)	22
2.8.1	Rotationstest	23
2.8.2	Oscillationstest	23
2.8.3	Komplex skjuvmodul	27
2.8.4	Amplitudsvep	29
2.8.5	Frekvenssvep	30
2.8.6	Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR)	31
2.9	Metoder för resultatredovisning	34
2.9.1	Masterkurva	34
2.9.2	Williams-Land-Ferry ekvationer	36
2.9.3	Sigmoidal-modellen	37
2.9.4	Blackdiagram	38
2.9.5	Wöhler diagram (<i>S-N</i> kurva)	39
3	Metod	42
3.1	Provserier	42
3.1.1	Provblandning	42
3.2	Tillvägagångsätt	43
3.2.1	Förberedelse	44
3.2.2	Provtillverkning PP08/PP25	45
3.2.3	Applicering av prov	46
3.3	Utförande av tester	48
3.3.1	Utmattningstest	48
3.3.2	Sveptest PP08	51
3.3.3	Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	52
4	Resultat och Analys	55
4.1	MSCR-mätningar	55
4.2	Svepmätningar	57
4.3	Utmattningstest	58
4.4	Sammanställning av resultat	61
5	Diskussion, slutsatser och fortsättning	63

5.1	Metod	63
5.2	Resultatdiskussion	64
5.3	Slutsatser	64
5.4	Förslag till fortsatta studier	64
	Referenser	66
	Bilagor	70

Förord

Studien har genomförts som en avslutning på Civilingenjörsprogrammet i Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet är skrivet av Adi Hadzikadunic samt Hussein Al-Sultani och utfördes på avdelningen för Teknik och väg under vårterminen 2020.

Tack till

Först och främst vill vi rikta ett stort tack till vår experthandledare, Per Tyllgren för sitt enorma engagemang under hela arbetsgången. Dem dagliga konversationerna och instruktionerna om hur proverna skulle köras uppskattades samtidigt som det resulterade i ett arbete av hög kvalitet. Därutöver vill vi tacka vår handlare Pajtim Sulejmani som veckovis lagt ner tid för att ge oss ovärderlig feedback, både skriftligt och muntligt. Vi vill samtidigt tacka Ola Aurell som assisterade med DSR-maskinen vid uppstarten Ebrahim Parhamifar som startade upp examensarbetet samt examinatorn Sven Agardh. Slutligen vill vi tacka våra familjer och vänner för allt stöd under dessa fantastiska samt lärorika år på Lunds Tekniska Högskola.

Lund, juni 2020

Sammanfattning

Omfattande studier på Lunds Tekniska Högskola (LTH) har under de senaste åren inriktats på hur egenskaperna i asfaltbruk kan optimeras eftersom de har avgörande betydelse för asfaltens funktion. Förutom naturligt förekommande fyller i asfaltmassa har tillsatser såsom vaxer, fibrer och polymerer blivit allt vanligare. Hur dessa tillsatser påverkar asfaltbrukets egenskaper är viktigt att utreda för att kunna erhålla en asfaltmassa med bästa möjliga hållbarhet. Asfaltens utmattningsegenskaper beskriver hur väl en asfaltbeläggning kan motstå upprepade trafikbelastningar. Dessutom är asfaltens utmattningsegenskaper ett av kriterierna vid dimensionering av nya vägar.

Vanligt förekommande utmattningstester, SS-EN 12697-24 (2018) på asfalt är mycket arbetskrävande och därmed kostsamma, vilket medför att dessa tester används i mindre utsträckning än vad som behövs. Technische Universität Wien (TWU) 2018, har lanserat en metod som använder dynamisk skjuvreometer (DSR) för att testa utmattningsegenskaper på asfaltbruk. I korthet innebär metoden att små provkroppar av asfaltbruk utsätts för upprepade belastningar tills de går sönder. Förloppet har stora likheter med etablerad provning för asfaltprover. Eftersom LTH under flera år utvecklat undersökningsmetoder på asfaltbruk med DSR föll det sig naturligt att se närmare på metoden.

I denna studie har en första version av utmattningstester med DSR vidareutvecklats och provats. Syftet är att i förlängningen ta fram en metod som testar utmattningsegenskaper på asfaltbruk med DSR och som kan ersätta de konventionella utmattningstesterna som utförs på en asfaltprovkropp. Utmattningsegenskaperna hos asfaltbruk med både standardbitumen och polymermodifierat bitumen samt med olika andel fyller har undersökts i den här studien. Utmattningstesterna genomfördes med DSR i Reologilaboratoriet på LTH med kompletterande tester av spårstabilitet (MSCR-test) och andra kvalitetsbedömningar med så kallade sveptest.

Utmattningsmetoden är tidigare obeprövad i Sverige. Arbetet började därför med att prova ut körscheman som bryter ner provet tills brott uppstår. Det är viktigt att brottet sker i materialet och inte i infästningspunkterna. Det kan säkras genom att bland annat åstadkomma en svag zon, en midja, i provet. Efter applicering av prov utsätts provkroppen för en konstant skjuvspänning. Den konstanta skjuvspänningen skall vara tillräckligt hög så att ett brott inträffar mellan 50 000 och en miljon belastningar. För att kunna beräkna den maximala töjningen vid en miljon belastningar (Y_6) krävs det att minst tre mätpunkter är välfördelade inom intervallet. Den maximala töjningen (Y_6) kan sedan användas som parameter i ett dimensioneringsprogram för vägöverbyggnader.

Resultaten från studien visar att det är möjligt att beskriva ett sönderfallsförlopp i asfaltbruk med en DSR. Denna process påminner om motsvarande processer i tillämpade laboriemetoder. Utmattningstestets syfte är att förstöra provkroppen med hjälp av upprepande belastning och det förmår DSR när en distinkt midja återskapas i provet. Trots ett minimum av mätpunkter rangordnas resultat sinsemellan i en logisk ordning med överraskande tydlighet. Med ökad andel fyller ökar exempelvis spårresistensen (t -höj) och med tillräckligt mycket fyller kan asfaltbruket till och med innehålla ett standardbitumen för den högsta trafikklassen (E). Tillsats av polymerer har ytterligare en gynnsam effekt på stabilitet och resistens mot utmattning. Men andelen och kvaliteten på tillsatserna måste avvägas så inte förbättringarna sker på bekostnad av andra egenskaper. Nästa steg blir att trimma processen, undersöka precisionsdata och genomföra parallella undersökningar med andra laborier som använder konventionella metoder för utmattningstester.

Summary

Studies at the Faculty of Engineering in Lund (LTH) have the last decade been focusing on how the properties of asphalt mastics can be optimized due to its large influence on the function of asphalt mixtures. In addition to naturally fillers, other materials such as waxes, fibers and polymers are more frequent used as additives in asphalt mixtures. It is important to investigate the effects of these additives on the properties of asphalt mastic in order to obtain an asphalt mixture that is durable. Fatigue properties of asphalt mixtures describe pavements ability to withstand repeated traffic loads. Also, the fatigue property of asphalt mixture is a criterion that is used when pavements are designed.

Common fatigue tests for asphalt mixtures, SS-EN 12697-24 (2018), are time consuming and expensive, therefore are these tests used less frequent than needed. The Technical University of Vienna (TUW) has developed an alternative method for fatigue testing on asphalt mastic using a dynamic shear rheometer (DSR). In short, the method entails that small specimen of asphalt mastic are subjected to repeated stress until they fracture. The process shows great similarities with the established fatigue test methods on asphalt. Since LTH has developed research methods for several years on asphalt mastic using DSR, it seemed naturally to further investigate the fatigue test method.

A first version of the method on fatigue testing has been tested and further developed in this study. The aim of this study was to find a test method for fatigue testing on asphalt mastic with DSR that can eventually substitute the existing tests that are performed on asphalt concrete. Fatigue properties of asphalt mastic using both standard bitumen (70/100) and polymer modified bitumen (PMB) with various proportions of filler have been assessed in this study. All fatigue tests were conducted with a dynamic shear rheometer in the Rheology laboratory at LTH. Complementary test of track stability (MSCR-test) and other quality assessments test, namely sweep tests were also conducted.

The fatigue test has not been investigated in Sweden earlier. The first part of this study was to produce operating schemes that break down the sample until fractures occur. It is important that the fracture takes place *within* the material and not at any of the attachment points. To ensure that this does not occur, a weak zone, a waistline is created in the sample. After applying the sample into the DSR, the specimens were exposed to a constant shear stress. The magnitude of the constant shear stress must be large enough so that fractures occur between 50 000 and one million loads. In order to calculate the maximum strain at one million loads (γ_6), at least three well-distributed measurement points must be achieved within the interval. The maximum shear strain at one million loads (γ_6) can then be used as a parameter in a pavement design program.

The results showed that it is possible to describe the degradation process in asphalt mastic with a DSR. This process is similar to the conventional fatigue test methods. The aim of the fatigue test is to fracture the test sample by repetitive loading, which is possible with DSR provided that a waist is created. Surprisingly, despite a small number of measurement points the results were ranked among themselves in a logical order. The track resistance (*t-high*) increases when the amount of fillers increases. Right amount of filler combined with standard bitumen and the asphalt mastic may reach a high level of fatigue properties (Class E). Addition of polymers has further beneficial effect on stability and fatigue resistance. The amount and quality of the additives must be considered so that other properties do not impaired. Further studies should focus on to streamline the process, investigate precision data and finally conduct parallel studies with the conventional fatigue test methods to examine the validity of the test.

Begrepp och storheter

Begrepp

<i>Asfaltbruk</i>	Blandning av bitumen, filler och eventuella tillsatser.
<i>Bitumen</i>	Bindemedel i asfalt som har stor betydelse för dess egenskaper.
<i>DSR</i>	Dynamisk skjuvreometer, instrument som mäter ett materials reologiska egenskaper.
<i>Elasticitet</i>	Förmågan hos ett material att återgå till sin ursprungliga form efter belastning.
<i>Filler</i>	Stenmaterial som är mindre än 0,063 millimeter.
<i>Icke newtonk vätska</i>	En vätska som inte uppvisar linjärt samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet.
<i>LVE-område</i>	Linjär viskoelasticitet, området där töjningen är proportionell mot spänningen och Hookes lag är tillämpbar.
<i>MSCR</i>	Multiple Stress Creep Recovery, är en testmetod som mäter återhämtningsförmåga hos ett material efter upprepade belastningar.
<i>Mjukpunkt</i>	Den temperaturen vid vilken bitumen börjar bli flytande, anges i grader (°C).
<i>Newtonsk vätska</i>	En vätska som uppvisar linjärt samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet.
<i>Penetrationstal</i>	Talet som anger hårdheten/mjukheten hos bitumen och anges i tiondels millimeter (mm^{-1}).
<i>Sveptest</i>	Oscillerande test där frekvens och amplitud kan varieras för att mäta reologiska egenskaper hos material.
<i>Superpave</i>	<u>S</u> uperior <u>P</u> erforming Asphalt <u>P</u> avements, är amerikansk klassificeringssystem för bitumen.
<i>Termoplastisk</i>	Innebär att materialet får olika fysikaliska former vid olika temperaturer.
<i>Utmattning</i>	Försvagning av ett material då materialet utsätts för upprepande belastningar som vid ett tillräckligt antal belastningsväxlingar leder till strukturellt sönderfall.
<i>Viskositet</i>	Mått som beskriver flödesmotståndet hos en vätska ($Pa \cdot s$).
<i>Viskoelastisk</i>	Ett material som uppvisar både elastiska och viskösa egenskaper.

Storheter

η	Viskositet
η^*	Komplex viskositet
τ	Skjuvspänning
τ_{ini}	Initial skjuvspänning i brottzon vid utmattningstest
τ_6	Maximal skjuvspänning för att klara en miljon belastningar
γ	Skjuvtöjning
γ_{ini}	Initial skjuvtöjning i brottzon vid utmattningstest
γ_6	Maximal skjuvtöjning för att klara en miljon belastningar
$\dot{\gamma}$	Skjuvhastighet
d	Diameter (med midja)
G^*	Komplex skjuvmodul
G'	Lagringsmodul (elastisk del)
G''	Förlustmodul (viskös del)
ω	Vinkelfrekvens
δ	Fasvinkel
N_f	Antal belastningar till brott
R	Återgång
γ_r	Elastisk töjning
γ_p	Maximal töjning
J_{nr}	Kvarstående deformation
γ_{nr}	Plastisk töjning
f_r	Reducerad frekvens
f	Frekvens
a_T	Skiftfaktor
t	Temperatur °C
$t\text{-hög}$	Parameter för spårbildning i asfaltbruk
$t\text{-mellan}$	Parameter för utmattningsmotstånd i asfaltbruk
$t\text{-låg}$	Parameter för lågtemperaturregenskaper
T	Absolut temperatur, °K

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Samhällsstrukturen har utvecklats från ett primitivt jordbrukssamhälle som dominerades av korta transporter med långa fördröjningsvägar till ett civiliserat industrisamhälle där allt högre krav ställs på vägarnas kvalitet och hållbarhet. Under 1600-talet försökte man standardisera vägnätet men det var först under 1800-talet som ett modernt vägsystem började utvecklas. Under tidigt 1900-tal tillträdde bilismens framfart vilket resulterade i att nya och höga krav efterlystes på det statliga vägnätet. Idag utgör vägkonstruktioner en väsentlig roll för Sveriges och världens transportsystem. Potucek och Granlund (2015) menar att färdmedlet som dominerar korta och relativt långa färdsträckor i dagsläget är personbilen och att vägtransporten står för cirka 87 % av alla persontransporter i Sverige.

Eftersom vägnätet anses ligga till grund för vårt moderna samhälle ställs allt högre krav på dess funktion och hållbarhet. Detta görs genom att redan i ett tidigt skede beakta ingångskomponenterna i asfalt och anpassa dessa så att den mest fördelaktiga asfaltbeläggningen kan erhållas. En väg är en dyr konstruktion och en vägkonstruktör bör betrakta byggkostnaden, underhållhållskostnaden och konstruktionens livslängd under vägens tänkta funktionstid. För att åstadkomma en lönsam samhällsekonomisk effekt bör produktionstillverkning och arbetsrecept alltid väljas som resulterar i en längsta möjliga hållbarhet för vägkonstruktionen. (Trafikverket, 2016).

Asfaltens hållbarhet har under en lång tid varit ett centralt begrepp inom vägteknik. Forskare har å andra sidan varit begränsade och haft svårigheter att i förväg undersöka och bedöma hållbarheten hos asfalt. Nyutvecklad mätteknik har under senare år skapat nya förutsättningar och ökat möjligheterna att studera och förbättra egenskaperna hos asfalt. Lunds Tekniska Högskola (LTH) har under dem senaste åren utvecklat mätteknik och genomfört fördjupade studier som behandlat asfaltens egenskaper.

De senaste undersökningarna har bland annat varit inriktade på asfaltbruk där olika komponenter har analyserats. Sveptest, MSCR-test och duktilitetsmätningar är exempel på utredningar som gjorts (Haxhibeqiri & Mouhsen 2017; Aurell 2018; Zia & Eriksson, 2019). På senare år har internationella forskare och universitet studerat utmattningsegenskaper hos asfaltbruk (Hopspodka et al, 2018). Detta ämne har ännu inte analyserats i föregående examensarbeten och eftersom LTH:s avsikt alltid är att ligga i framkant vad gäller forskning och utveckling ska en fördjupande studie genomföras med avseende på utmattningsegenskaper hos asfaltbruk. Utmattning är ett viktigt begrepp vilket medför att grundläggande kunskap om utmattning är avgörande för att uppnå bästa möjliga hållbarhet hos asfalt.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka och jämföra utmattningsförlopp för olika asfaltbruk, med hjälp av dynamisk skjuvreometer (DSR). Mätningar på asfaltbruk med olika bindemedel och med en varierad fillerhalt kommer att utföras för att undersöka hur sammansättningen påverkar hållbarheten utan att andra egenskaper försämras nämnvärt. Avsikten med studien är också att utveckla en metodik för utmattningsförsök som skall återspegla hållbarheten hos asfaltbruk.

Följande frågeställningar och mål ska försöka uppnås i studien:

- Utveckling av en mätmetodik för utmattningsundersökning av asfaltbruk med avseende på hållbarhet
- Är det möjligt att använda DSR för att studera utmattning?
- Hur varierar asfaltbrukets utmattningsegenskaper med varierad fillerhalt?
- Hur påverkas utmattningsegenskaper hos asfaltbruk när temperaturen och frekvensen varierar?
- Hur påverkas utmattningsegenskaperna av polymermodifierat bitumen?

1.3 Metodbeskrivning

En omfattande litteraturstudie genomfördes som ett första steg att bekanta läsaren med aktuella kunskapsläget om ämnet. Litteraturstudien är en sammanfattning av ingående begrepp och metoder som behandlas i studien, nämligen asfaltbruk, utmattning samt mätinstrumentet DSR.

Mätningarna i studien är genomförda med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR som finns tillgänglig i reologilaboratoriet på Lunds Tekniska Högskola. Mätinstrumentet har använts i tidigare examensarbeten och precisionen i mätningarna har ständigt förbättrats under senare år. Förutom sveptest och MSCR-test har ett nytt utmattningstest genomförts i ett första steg. Mallar till provkörningarna för utmattningstest är framtagna med hjälp av internationella studier (Hopspodka et al, 2018) och Tyllgren (2020). En midja tillverkas för att skapa en försvagad zon i provkropparna där syftet är att provet ska gå till brott i den försvagade punkten. Testerna görs i syfte med att undersöka hur utmattningsegenskaperna hos asfaltbruk ändras när sammansättningen varierar.

Resultaten från studien utgör en viktig roll och alla slutsatser samt diskussioner grundar sig på erhållna mätningar. Alla resultat finns redovisade i Bilagor.

1.4 Avgränsning

I studien har ett antal avgränsningar gjorts för att hinna genomföra mätningar inom lämplig tidsgräns. Bindemedel som användes i studien är standardiserat bitumen med styvheten 70/100 och polymermodifierat bitumen (PMB). Bituminet tillhandahölls av tillverkaren TOTAL och polymererna som blandades in var av typen styrene-butadiene-styrene (SBS). Proverna blandades med en varierad mängd naturfiller av granit. För standard bitumen (70/100) undersöktes tre olika volymprocent filler medan polymermodifierat bitumen endast bestod av en fillerhalt, se tabell 1.1 nedan.

Utmattningstest genomfördes med två olika frekvenser (20 Hz och 30 Hz) och för två temperaturer (10 °C och 15 °C). Sveptest gjordes för varje provblandning i temperaturintervallet -30°C till 30°C. MSCR-test genomfördes för standardiserat bitumen vid tre lägre temperaturer (48, 56, 64 °C) och för PMB vid högre temperaturer (58, 66, 74 °C). Från sveptesten tas masterkurvor fram och det görs genom användning av Williams-Land-Ferry ekvationen och Sigmoidal funktionen. Resultaten från utmattningstesten framställs i ett lämpligt Wöhler-diagram.

Tabell 1.1: Beskrivning av analyserade provsammansättningar

Prov	Bindemedel	Fillerhalt [Volym %]
1A	Standard (70/100)	Låg (26,4)
1B	Standard (70/100)	Medel (32,6)
1C	Standard (70/100)	Hög (37,5)
2C	PMB	Hög (37,5)

1.5 Rapportens disposition

Rapportens disposition består av fyra huvuddelar för att underlätta läsningen. Första delen består av en litteraturstudie där väsentliga teorier och begrepp behandlas. Nästa huvuddel beskriver själva metodiken och vilka undersökningar som genomförts i studien. Därefter följer en presentation av resultaten och studien avslutas med en diskussion om resultaten och metodiken som använts. I slutet av diskussionen finns även en del rekommendationer för fortsatta studier.

2 Litteraturstudie

I litteraturavsnittet nedan beskrivs väsentliga teorier och begrepp. Kapitlet avslutas med en kort beskrivning på valda metoder för redovisning av resultat.

2.1 Vägkonstruktionens uppbyggnad

En vägkropp är uppbyggd av två delar, en överbyggnad och en underbyggnad. Den sistnämnda utgörs av en terrass medan den förstnämnda består av olika lager med specifika funktioner. De olika lagren i överbyggnaden samverkar för att åstadkomma en säker, beständig och bärig väg under vägens dimensionerade livslängd. Överbyggnaden består vanligen av slitlager, bundet bärlager, obundet bärlager och förstärkningslager. Eventuellt tillkommer också ett skyddslager vid behov, se figur 2.1 (Wiman, 1999).



Figur 2.1: Principiell uppbyggnad av en vägöverbyggnad (Trafikverket, 2011).

Slitlager är det översta lagret i en vägkonstruktion och det består oftast av asfalt och benämns av den orsaken asfaltbeläggning. Slitlagrets uppgift är att erbjuda en jämn och säker körbana samt att ta upp lasten från trafiken och fördelar den nedåt i konstruktionen. Bärlagret utgör en viktig roll när det kommer till bärighet eftersom det har som uppgift att fördela trafikens belastning så att stora spänningar och deformationer inte uppstår i underliggande lager. Förstärkningslagrets avsikt är att i sin tur fördela lasten vidare till underbyggnaden samtidigt som det ska fungera som ett dränerande lager som leder bort vattnen från vägkonstruktionen. Lagret ska även förstärka underbyggnaden under byggtiden så att tillräcklig bärighet erhålls för byggtrafiken. När underbyggnaden består av ett finkornigt material brukar ett skyddslager användas, detta för att förhindra finkorniga materialet från att tränga upp i förstärkningslagret. Skyddslager används dessutom i områden med en tjälfarlig underbyggnad för att undvika ojämna tjällyftningar (Wiman, 1999).

2.2 Asfalt

Materialet som bygger upp slitlagret och som används på dagens mest trafikerade vägar är asfalt. Asfalt består i huvudsakligen av tre huvudkomponenter: stenmaterial, filler och bitumen. Genom att anpassa asfaltens sammansättning kan olika egenskaper hos asfaltmassan erhållas. Detta kan uppnås med olika typer och mängder av filler samt olika typer och halter av bitumen. Eventuellt används olika typer av tillsatsmedel för att uppnå en viss konsistens hos asfalten. Exempel på tillsatsmedel är polymerer och vidhäftningsmedel (Granhage, 2009).

2.2.1 Stenmaterial

En asfaltmassa består till 93-96 % av stenmaterial. Vilken typ av stenmaterial som används i tillverkning av asfaltmassa påverkar slutproduktens egenskaper (Höbeda, 1999).

Kvalitén på stenmaterialet är av stor betydelse vid tillverkning av en asfaltmassa. Det är svårt att erhålla ett tillräckligt bra stenmaterial för att uppnå önskvärda egenskaper hos en asfaltbeläggning om råvaran har dålig kvalitet. Ju högre krav som efterfrågas på stenmaterialets kvalitet desto högre blir kostnaden vid förädlingsprocessen. Kostnaden ökar exempelvis för krossning av stenmaterialet, siktning och sandavskiljning. Transportkostnaden stiger också beroende på vilka kvalitetskrav som efterfrågas, detta då materialet måste transporteras längre sträckor från sin ursprungskälla (Agardh & Parhamifar, 2014).

2.2.2 Filler

Höbeda (1999) definierar filler som det finkorniga stenmaterial som fullständigt har passerat 0,063 mm maskvidd. En asfaltmassa som saknar filler anses vara instabil och har följaktligen dålig beständighet.

Fillers huvuduppgift är att tillsammans med bitumen fylla hålrummet mellan grövre stenmaterial. Det resulterar i en tät och beständig asfaltmassa. En annan uppgift är att filler styr upp bindemedlet. Ett styvare bindemedel leder till ökad mjukpunkt som i sin tur minskar risken för avrinning vid tillverkning och utläggning av asfaltmassan (Agardh & Parhamifar, 2014).

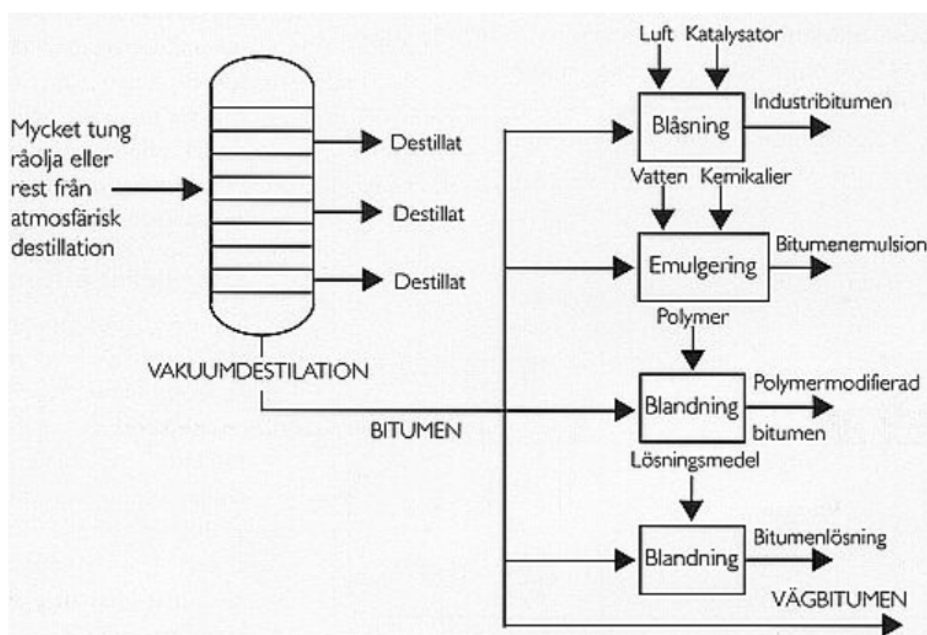
2.2.3 Bitumen

Bitumen är materialet i asfaltmassan som sammanhåller stenaggregatet. Bitumen förekommer i naturen som naturasfalt men produceras vanligtvis genom raffinering av petroleum. Färgen på bitumen varierar från mörkbrun till svart. Agardh och Parhamifar (2014) skriver att bitumen består i huvudsakligen av tre delkomponenter: oljor, partiklar av kolföreningar och flytande kolväten. Vidare menar Redelius (1999) att bitumen ytterligare består av komplicerade och mångfaldiga kemiska ämnen, Detta innebär svårigheter med att precisera ämnet i vetenskapliga och kemiska termer.

Huvuduppgift hos bitumen är att verka som smörjmedel vid höga temperaturer så att asfaltmassan kan blandas, läggas ut och packas till rätt nivå. Utöver det gör bitumen att asfaltmassan blir tät och stabil samtidigt som det fungerar som ett skydd för stenmaterialet mot omgivningen och hastiga klimatförändringar. Med hjälp av bitumen tilldelas asfaltmassan en formbar konsistens så att brott inte uppstår vid temperaturförändringar. Dessutom ger bitumen asfaltbeläggningen sin lastfördelande funktion (Agardh & Parhamifar, 2014).

Bitumen är ett hydrofobt och termoelastiskt material. Att materialet är hydrofobt innebär att materialet är vattenavvisande och löser sig således inte i vatten. Bitumen har termoelastiska egenskaper vilket innebär att materialet tar olika fysikaliska former vid olika temperaturer. Vid temperatur mellan 100 °C och 200 °C agerar bitumen som en flyttande vätska och kan på så sätt blandas med andra material och formas efter behov. Om bitumen kyls ner stelnar ämnet till en fast massa och vid riktigt låga temperaturer blir bitumen sprött (Self, 2015).

Vid framställning av bitumen raffinerar petroleum. Detta sker via en destillationsprocess där petroleum hettas upp i en ung till temperaturer mellan 300 °C och 350 °C. Upphettat petroleum är både i vätskeform och i gasform när det leds in till ett destillationstorn. Destillationens främsta uppgift är att separera gasen och vätskan. Separationen sker genom att gasen stiger uppåt i tornet samtidigt som vätskan sjunker. Vid separeringen erhålls på så vis en rad olika biprodukter. Denna process sker under atmosfärstryck och benämns atmosfärisk destillation. För att åstadkomma ett användbart bitumen destilleras erhållna biprodukter ytterligare. Nu genomförs destillation med undertryck istället, detta för att minska kokpunkten hos biprodukterna. Detta görs eftersom produkterna i vanliga fall har väldigt hög kokpunkt och skulle förstöras och förfalla vid uppvärmning i atmosfärstryck. Den sista delprocessen benämns vakuumdestillation, se figur 2.2. I denna process destilleras kvarstående biprodukter i vakuum för att så småningom modifieras och bearbetas till olika bitumensorter. Beroende på rådande tryck och temperatur under framställningsprocessen kan olika varianter och kvalitet på bitumen erhållas, detta för att uppnå önskvärde egenskaper hos bituminet (Redelius, 1999).



Figur 2.2: Framställning av bitumen (Redelius, 1999).

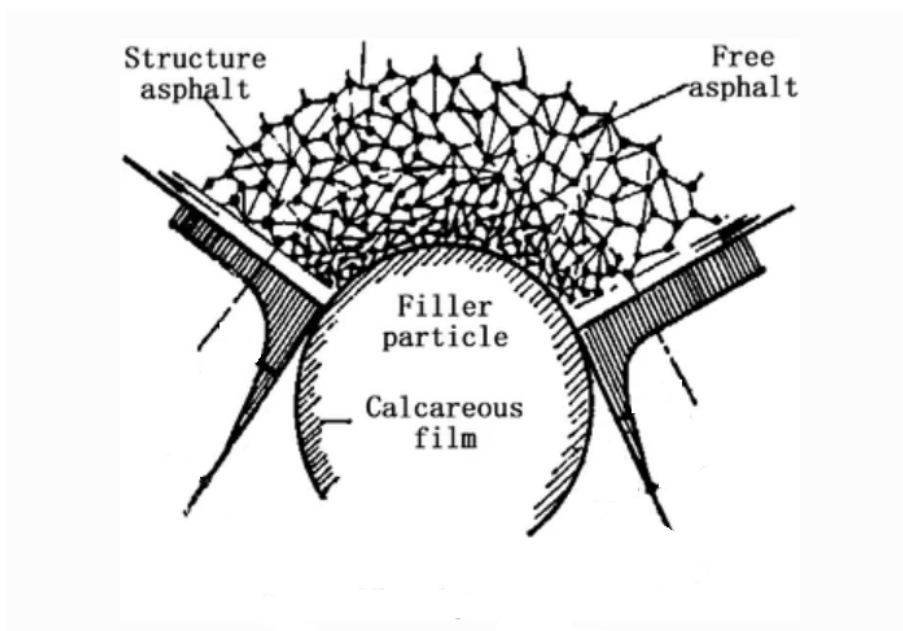
2.2.4 Asfaltbruk

Asfaltbruk benämns en blandning av bindemedel, filler och eventuella tillsatsmedel. Vilka egenskaper asfaltbruk förväntas ha påverkas främst av typen och mängden filler samt halten och typen av bindemedel. Det är reologiska egenskaper som är av stor betydelse i detta sammanhang som exempelvis styvhet, viskositet och mjukpunkt. Med dessa egenskaper kan man förklara hur mängden och/eller typen av filler samt bindemedel utgör en viktig roll för asfaltbelägningens slutgiltiga egenskaper (Liao m.fl., 2012). I Erikssons och Zias (2019) studie har man dessutom bevisat att fillermängden påverkar arbetsbarheten hos asfaltbruk vid blandning och utläggning.

En annan faktor som anses påverka asfaltmassans slutgiltiga egenskaper är kvoten mellan mängd bitumen och filler. Vid låga halter av filler anses asfaltbruk, såväl som bitumen vara en newtonsk vätska. Med ökad halt av filler beter sig asfaltbruk som en icke-newtonsk vätska (Hesami m.fl., 2014). Till skillnad från en icke-newtonsk vätska har en newtonsk vätska samma egenskaper oavsett omständighet, detta beskrivs utförligare i kapitel 2.7 om Reologi.

Egenskaperna hos asfaltbruk kan modifieras genom tillägg av olika tillsatsmedel. Enligt Lundström (2001) är polymerer den mest förekommande tillsatsen som används när det kommer till asfaltbruk. Erikssons och Zias (2019) har i sin studie utrett att polymermodifierat asfaltbruk har starkare spårresistens än vanligt bitumen.

Enligt Tan och Guo (2014) består ett asfaltbruksaggregat av tre faser: fillerpartiklar, fritt bitumen samt produkter av stelningsfasen, se figur 2.3. Enligt Liao m.fl (2012) uppstår spricktillväxt, som orsakas av utmattning i bituminet och inte i produkten av stelningsfasen, i interaktionen mellan fillerpartiklar och bitumen.



Figur 2.3: Illustration av ett asfaltbruksaggregat (Tan och Luo, 2014).

2.3 Nedbrytningsmekanismer

Nedbrytning av vägkonstruktioner är en naturlig process som inträffar i samma stund en väg börjar användas. Tillståndet på en väg förändras med tiden samtidigt som den bryts ned väldigt långsamt. Det förekommer ett antal olika processer som påverkar nedbrytningen av vägkonstruktioner. De vanligaste nedbrytningsprocesserna är trafik- och miljörelaterade. Ytligt slitage, strukturella förändringar och ingrepp i vägkonstruktioner är processer som på olika sätt opererar nedbrytande på vägkonstruktioner. Ytligt slitage inträffar vanligtvis på högtrafikerade vägar och skadorna är ett vanligt resultat av nöting från dubbdäck. På mindre och lågtrafikerade vägar orsakas ytligt slitage främst av en åldrande beläggningssyta. Strukturella förändringar av vägkonstruktionen är en nedbrytningsprocess som beror på klimatet och på varierande trafikbelastning. Trafikens påverkan på väggroppens struktur beror på andelen tung trafik medan klimatets påverkan vanligtvis resulterar i termiska sprickor och tjälskador. Olika typer av ingrepp i väggroppen förkortar dessutom konstruktionens livslängd. Trots att ingreppen genomförs och återställs grundligt reduceras livslängden och underhållet av vägen behöver ske i ett tidigare skede. Egenskaper hos en vägkonstruktion ändras successivt och det orsakar exempelvis ojämnheter på vägytan, spårbildning och sprickbildning (Wågberg, 2003).

2.3.1 Inverkan av tung trafik

Andel passerande tung trafik är avgörande för en vägs bärighetsmotstånd. Det är främst trafikbelastning i form av lastbilar, bussar och tunga maskinfordon som orsakar bärighetsnedbrytningen. Detta resulterar i skador på beläggningen som exempelvis spår- och sprickbildning. Bärighetssprickor uppstår i första hand som små sprickor som med tiden växer och utvidgas. Sprickorna uppstår när vägens bärförmåga överskrids och efter en tid bildas sammanhängande sprickor i hjulspår, krackelering (Agardh & Parhamifar, 2014).

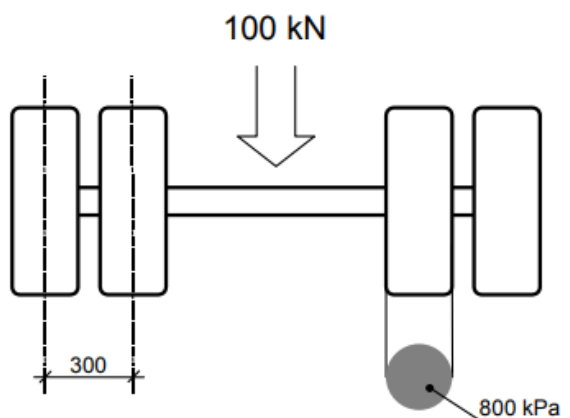
Instabilitet, även kallat plastisk deformation i olika beläggningsslager är en av dem vanligaste orsakerna till spårbildning. Ett tecken på att en vägkonstruktion utvecklat deformationsskador är att det bildas dubbelspår från den tunga trafikens bogghjul. Deformationsspår utvecklas generellt på platser där tunga fordon stannar och startar. Detta sker exempelvis främst vid trafiksignaler, stoppmarkeringar och busshållplatser (Wågberg, 2003).

Tung trafik orsakar dessutom deformationer på vägens obundna lager och detta fenomen inträffar särskilt på vägkonstruktioner bestående av tunna asfaltlager. Sprickbildning är ett resultat av asfaltlagrets nedpressning på grund av påkänning från den tunga trafikbelastningen. Asfaltlagret utmattas oavbrutet och nedpressningen av lagret orsakar en dragtöjning i asfaltens underkant. Sprickorna uppstår först i asfaltlagrets underkant och med tiden expanderar sprickorna genom vägkonstruktionens olika lager för att slutligen visa sig synliga på vägytan (Wågberg, 2003).

2.4 Dimensionering

Vid dimensionering av en vägöverbyggnad är det nödvändigt att beakta en rad olika faktorer. För det första är det viktigt att välja lämpligt asfaltmaterial till överbyggnaden och bestämma de ingående lagrens tjocklek. Dimensioneringen bör dessutom göras utifrån ett ekonomiskt perspektiv. En underdimensionerad väg medför exempelvis ökade underhållskostnader medan en överdimensionerad väg leder till att mer resurser behöver utnyttjas vilket ökar den totala byggkostnaden (Wiman, 1999).

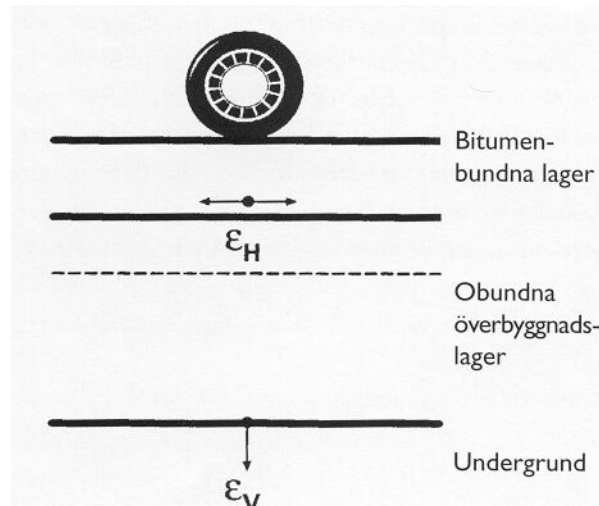
Dimensionering av vägöverbyggnad skall göras enligt Trafikverkets dimensioneringsmetodik som anges i TRVK Väg. Metodiken inkluderar datorprogrammet PMS Objekt. I programmet kan olika förutsättningar avseende klimat och hastighet simuleras för att beräkna den tillåtna trafikbelastningen uttryckt i antal ekvivalenta standardaxlar (Trafikverket, 2011). En standardaxel definieras som en fiktiv axel med parmonterade hjul. Axellasten är 100 kN och fördelas jämnt mellan hjul där kontaktytan är cirkulär. Trycket mellan däck och väg är konstant 800 kPa, se figur 2.4 nedan (Trafikverket, 2004).



Figur 2.4: Standardaxel med axellasten 100 kN (Trafikverket, 2004).

2.4.1 Kritiska påkänningar

I en vägkonstruktion förekommer det två påkänningar som anses kritiska för bärigheten. Dessa påkänningar är den horisontella dragtöjningen (ϵ_H) i underkant av det bitumenbundna lagret och den vertikala trycktöjningen (ϵ_V) i ovankant på terrassen, se figur 2.5. Om dragtöjningen blir för stor i underkanten av det bitumenbundna lagret kan det leda till utmattning vilket resulterar i sprickor. Utvecklingen av sprickor startar i underkanten av bitumenlagret och växer genom ovanliggande beläggningar upp till vägytan. Om den vertikala trycktöjningen på undergrunden är för stor kan det leda till permanenta deformationer som i sin tur kan resultera i spårutveckling på vägytan. Antalet belastningar under vägens dimensionerade livslängd är avgörande för vilka värden som tillåts för de kritiska töjningarna (Wiman, 1999).



Figur 2.5: Kritiska påkänningar i en vägkonstruktion (Wiman, 1999).

2.5 Utmattning

Enligt Nationalencyklopedin (2020a) definieras begreppet utmattning som “försvagning av ett material då materialet utsätts för upprepande belastningar som vid ett tillräckligt antal belastningsväxlingar leder till sprickbildning”. Utmattning är en process som bryter ner vägkonstruktioner vilket leder till en förlust av hållfastheten i materialet. Under utmattningsprocessen är dragspänningen mindre än materialets draghållfasthet. Detta medför att beläggningens bärighet försämras över tid samtidigt som sprickbildning initieras i olika beläggningsskikt i vägkonstruktionen.

I laboratorium tillämpas en annan definition vid utmattningsförsök än den ovan beskrivna. Här gäller att utmattning uppstår i det stadium där provkroppens styvhet halverats. Brott Kriteriet lämpar sig inte i fält eftersom asfaltens styvhet ökar med tiden från att beläggningssmassan packats tills att konstruktionen åldrats. I fält beskrivs och definieras utmattning med hänsyn på sprickstadiet i asfalten. Denna definition är ofullständig eftersom processen fram till sprickbildningen också behöver uppmärksammas. Däremot minskar styvheten i fält så småningom när mikrosprickor börjar uppstå i materialet. Utmattning är sålunda ett svårdefinierat begrepp eftersom det saknas en tydlig gräns mellan utmattning och materialets hållfasthetsegenskaper när sprickbildning ska bedömas (Djärf, 1996).

2.5.1 Utmattningstest i laboratorium

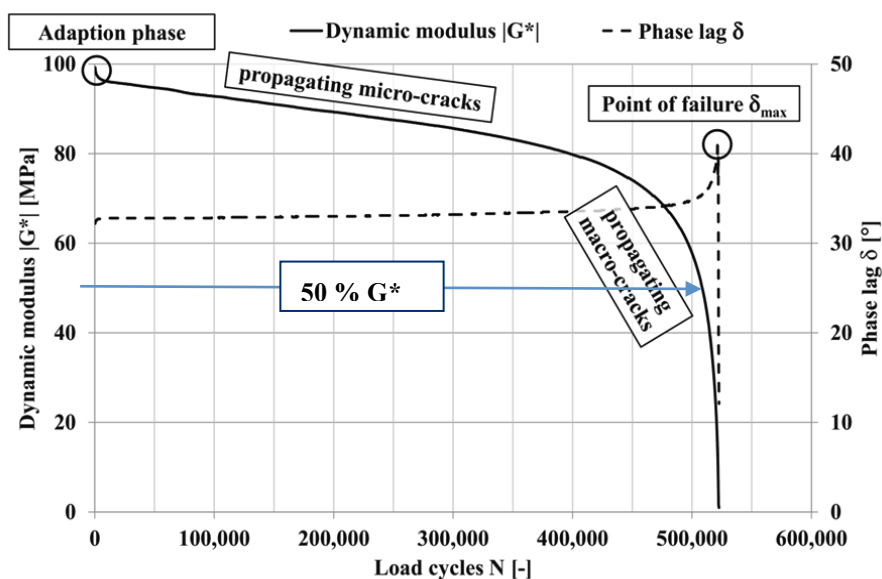
Utmattningsprovning visar hur många lastpulser en provkropp tål innan den börjar spricka. Forskning har påvisat att en beläggning som utsätts för trafik tolererar avsevärt fler passager av tunga fordon uttryckt i standardaxlar än vad laboratorieresultat indikerar. Kravet som ska uppfyllas är den minsta tillåtna dragtöjningen uttryckt i μ -strain när provkroppen utsätts för en miljon belastningar. Ju högre spänning och töjning en provkropp tolererar innan sprickbildning uppstår desto bättre ur utmattningssynpunkt (Trafikverket, 2011).

Utmattningsförsök på provkroppar i laboratorium efterliknar inte klimatet och påkänningarna som asfaltbeläggningar utsätts för i verkligheten. Vid laboratorieförsök belastas provkropparna med en konstant spänning eller töjning under en konstant temperatur och med en förinställd frekvens.

Utmattningsförsök kan genomföras på en rad olika sätt där skiftande aspekter utreds. Testen kan exempelvis utföras i ett enda försök där provkroppen inte får någon möjlighet att återhämta sig. Å andra sidan kan varierande vilopausar läggas in för att efterlikna och simulera den verkliga trafiksituationen. En motorväg belastas exempelvis olika mycket beroende på tidssituation under dygnet. Majoriteten av all trafik färdas som bekant på morgonen (07.00 - 08.00) och under sen eftermiddag (16.00 - 17.00). Mellan dessa tider sker betydligt mindre belastning på en vägkonstruktion. Återhämtningseffekterna på asfaltbruk är välkända och beror bland annat på bindemedel, temperatur och applicerad spänning och töjning (Hospodka, m.fl 2018).

4-Point Bending Test (4PB) är ett standardiserat utmattningstest på en balk av asfalt, som är väldigt vanligt idag. I testet belastas en balk som är upplagd på fyra stöd tills en definierad deformation uppstår. Kraften som krävs för att uppnå den förinställda töjningen mäts kontinuerligt samtidigt som den komplexa modulen beräknas. När antalet belastningar ökar försvagas balken och den komplexa modulen minskar. Enligt SS-EN 12697-24 (2018) är utmattningskriteriet uppnått när den komplexa skjuvmodulen når hälften av sitt initiala värde. Antalet belastningar som motsvarar det halverade initialvärdet kan avläsas på x-axeln.

I fallet med skjuvning i DSR beskrivs utmattningsförloppet i ett diagram där den komplexa skjuvmodulen (G^*) och fasvinkeln (δ) avsätts på y-axlarna med antalet belastningar på x-axeln. Ett förekommande kriterium för utbildat brott är när värdet på den initiala komplexa skjuvmodulen har halverats. Om det är möjligt drivs testet tills provet går sönder, se figur 2.6. (Hospodka, m.fl 2018).

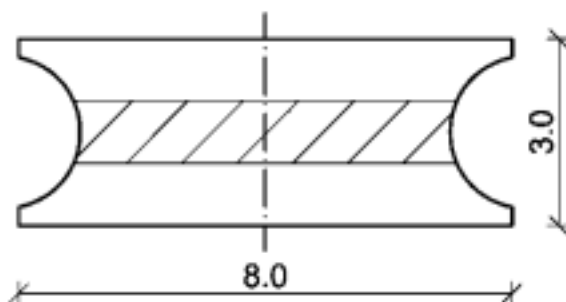


Figur 2.6: Illustration över ett utmattningsförsök där brott skett efter ungefär 520 000 belastningar (Hospodka, m.fl 2018).

2.5.2 Testparametrar och geometri

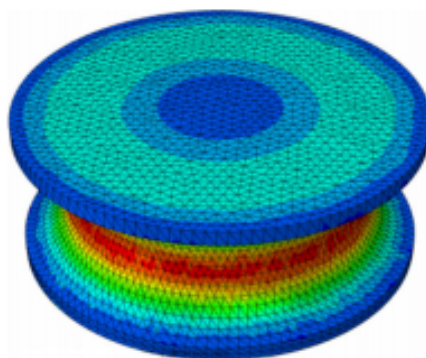
Utmattningstest genomförs med en förinställd konstant temperatur som väljs beroende på styvheten hos provkroppen. Ju högre styvhet provkroppen uppvisar desto högre temperatur kan väljas vid genomförandet av testet. Det är å andra sidan viktigt att provkroppen behåller en viss styvhet vid vald testtemperaturen för att undvika krypdeformation (Hospodka, m.fl 2018).

Det förekommer två olika geometrier när test ska utföras med en dynamisk skjuvreometer. Provkropparna tillverkas cylinderformade och benämns PP08 och PP25 där siffrorna beskriver provkroppens diameter i millimeter. PP25 provkroppar har en höjd på 1 millimeter medan PP08 tillverkas med höjden 2 millimeter. PP25 används för det högre temperaturintervallet i Superpave medan PP08 appliceras för det lägre temperaturintervallet. För utmattningstest används PP08 eftersom bitumen är ett väldigt temperaturberoende material samtidigt som en DSR-maskin är begränsad vid dess applicering av vridmoment. Vid utmattningstest omformas geometrin hos ett PP08 prov. Syftet är att återskapa en försvagning, en midja hos provkroppen och följaktligen tvinga provet att gå till brott i provkroppen och inte i någon anslutande kontaktyta. Detta görs mest lämpligt genom att öka provkroppens höjd till ungefär 3 millimeter varvid en inbuktning av provet sker i mitten av provet, se figur 2.7 (Hospodka, m.fl 2018).



Figur 2.7: Principskiss för PP08 med tillverkad midja, hyperboloid (Hospodka, m.fl 2018).

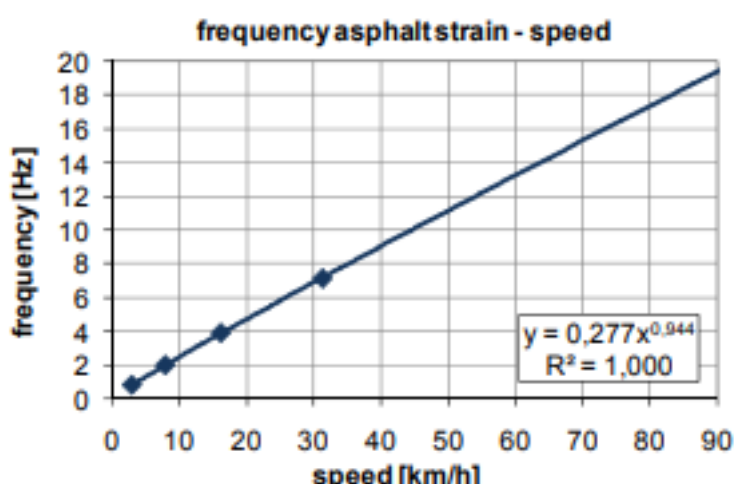
Figur 2.8 nedan illustrerar spänningsfördelningen i en hyperboloid. Den röda färgen indikerar att spänningen är som störst i den punkten. Spänningen avtar längre ut mot kanterna, vilket illustreras av den blåa färgen. Provkroppen är som svagast i mittpartiet och en midja har skapats för att styra var brottet ska ske i provkroppen.



Figur 2.8: Finita element modell (FEM) av en hyperboloid formad provkropp (Hospodka, m.fl 2018).

2.5.3 Frekvensens inverkan

Frekvens simulerar antalet svängningar en provkropp utsätts för varje sekund. Vid utmattningstest krävs ofta ett stort antal belastningscykler innan provkroppen utmattas och går till brott. Forskning har visat att ett tungt fordon med hastigheten 80 km/h motsvarar en frekvens som varierar mellan 16 och 20 Hz, se figur 2.9 (Mollenhauer & Wistuba, 2009). Å andra sidan genomförs många utmattningstester med högre frekvenser som exempelvis 30 Hz. Med den högre frekvensen kan 108 000 belastningscykler genereras på en timme. I denna studie kommer i första hand frekvenserna 20 Hz och 30 Hz att användas med syfte att efterlikna pågående utmattningsförsök som görs av Wiens universitet. Det går även att välja högre frekvensvärden om en lämplig DRS-maskin används. Men det anses inte motiverat eftersom lägre värden simulerar verkliga trafiksituationer på ett bättre sätt.



Figur 2.9: Hastighets-frekvens diagram som har extrapolerats (Mollenhauer & Wistuba, 2009).

2.5.4 Åtgärder mot utmattningssprickor

I verkligheten utsätts asfaltbeläggningarna för annorlunda förhållanden. Trafikmängderna varierar samtidigt som klimatets variation under året spelar en avgörande roll. För att kunna bedöma och överföra resultat från laborieförsök till verkliga fältförhållanden införs en skiftfaktor. Skiftfaktorn bör bestämmas empiriskt eftersom den beror på ett stort antal variabler som exempelvis sprickväxt, trafikfördelning i tvärläng och belastningsform (Said & Huhtala, 1996).

För att förebygga uppkomsten av sprickbildning i vägkonstruktioner måste väsentliga åtgärder beaktas, planeras och genomföras i tid. Risken för utmattningssprickor kan minimeras genom att öka tjockleken på asfaltbeläggningen, särskilt i dem mest kritiska delarna av vägkonstruktionen. En ytterligare åtgärd för att öka utmattningsbeständigheten hos beläggningen är att exempelvis välja en asfalt med högre bindemedelshalt (Noss, 1996).

2.6 Klassificering av bitumen

2.6.1 Europeisk klassificering

Europiska metoder som används i klassificering av bitumen anges av Europiska Kommittén för Standardisering. Metoderna som godkänns av kommittén ges ut som standard och förkortas EN standard (European Standard). Dessa standarder kan sedan godkännas och ges ut som svenska standarder med förkortning SS-EN vilket antyder att standarden är fastställd som svensk standard (Redelius, 1999). Några exempel på metoder som används i klassificering av bitumen och som angetts som SS-EN standard är:

- SS-EN 1427, mjukpunkt
- SS-EN 1426, penetration
- SS-EN 12593, Fraas brytpunkt
- SS-EN 12595, viskositet

Bitumen saknar smältpunkt men det finns behov av att bestämma en temperatur när ämnet börjar flyta. För det syftet bestäms den så kallade mjukpunkten, sedan länge definierad av Kula och Ring-metoden. Ett bättre och mer korrekt bestämnings sätt är med en dynamisk viskosimeter, som mäter temperaturen vid 1 300 000 mPa·s (cPoise) (Tyllgren, 2018). Penetration är en annan metod som används vid klassificering av bitumen och den anges som penetrationstalet där hårdheten/mjukheten hos bitumen vid 25 °C fastställs. Fraas brytpunkt är ett mått som beskriver temperaturen vid vilken ett tunt skikt av bitumen deformeras vid givna belastningar. Viskositetstestet med kapillärviskosimeter användes förr för att bestämma flytbarhet under tillverkning och utläggning hos bitumen (Redelius, 1999). Även här används med fördel dynamisk viskositetsmätare (Tyllgren, 2018).

Metoderna nämnda ovan bygger på empiriska erfarenheter och anses därför vara mindre användbara när det kommer till nya bitumensorter, där materialets egenskaper skiljer sig från egenskaperna för historiskt förekommande bitumen (Tyllgren, 2018).

2.6.2 Superpave

Superpave är en metod som utvecklades i USA mellan åren 1987- 1993 av American Strategic Highway Research Program (SHRP). SHRP hade till uppgift att utveckla ett nytt system för att specificera, testa samt utforma asfaltmaterial. Superpave står för **Superior Performing Asphalt Pavements**. Den mest betydande delen i Superpave är specificering och klassificering av bitumen (McGennis m.fl., 1995).

Till skillnad från traditionella metoder som används i Europa och som bygger på empiriska beräkningar utgår Superpave från konstruktionens temperatur samt klimatförhållande som förväntas råda i det aktuella området där bitumen ska användas. Dem europeiska metoderna fungerar utmärkt för historiskt kända bitumensorter men när

de gäller modifierat bitumen är de mindre användbara. Detta eftersom modifierat bitumen ställer högre krav på objektiva och vetenskapliga mätmetoder då de tekniska egenskaperna hos bitumen ändras med tillägg av tillsatser (Nordtest, 2002).

För att klassificera bitumen använder Superpave så kallad PG-gradering (Performance Grade) som exempelvis benämns PG 64-22. Första siffran, 64 är det högsta temperaturen, *t-hög*, som bitumen räknas klara av innan dess fysikaliska egenskaper börjar förändras. Parametern *t-hög* beskriver alltså hur stor resistans asfaltbruk har mot spårbildning. Medan -22 är det lägsta temperaturen, *t-låg*, i vilken bitumens fysikaliska egenskaper förväntas vara densamma innan någon förändring börjar inträffa. Parametern *t-låg* beskriver hur resistent asfaltbruk är mot temperatursprickor (McGennis m.fl., 1995). Mellan dessa temperaturer förekommer en tredje parameter, *t-mellan* som är ett mått på utmattningsresistans.

För att studera bitumens fysikaliska egenskaper utförs några testar i Superpave. Dessa tester genomförs med hjälp av olika mätmetoder som senare resulterar i framtagning av PG-gradering. Enligt McGennis m.fl (1995) används följande mätmetoder i Superpave:

- DSR (Dynamic Shear Rheometer), vars uppgift är att mäta viskoelastiska egenskaper hos bitumen.
- RTV (Rotational Viscometer), som mäter bitumens flytbarhet vid höga temperaturer.
- BBR (Bending Beam Rheometer), vilken mäter bitumens styvhet vid låga temperaturer (*t-låg*).
- DTT (Direct Tension Test), som mäter bitumens draghållfasthet vid låga temperaturer (*t-låg*).
- RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), som testar bitumens uppstyvning (korttidsåldring) vid blandning och utläggning.
- PAVT (Pressure Aging Vessel Test), vilken testar bitumens åldring efter lång tid.

Notera att i Superpave använder man en belastningsfrekvens på 10 rad/s vilket motsvarar 1,59 Hz, som anses motsvara hastigheter på 70 km/tim. Detta handlar framför allt om DSR-mätningar då viskoelastiska egenskaper hos bitumen skall tas fram.

2.7 Reologi

Reologi är vetenskapen om vätskors och fasta materials deformationsegenskaper. Begreppet reologi har sitt ursprung från grekiskans “rhein” vilket betyder “att strömma”. Reologi används för att beskriva spännings- och töjningsförhållanden för olika material som uppvisar elastiska och viskösa egenskaper. (Mezger, 2014).

När ett material påverkas av en kraft kommer materialet att deformeras beroende på kraftens storlek. Materialets reaktion av kraftpåverkan beror på följande faktorer (Paar, 2020b):

- Inre struktur hos materialet
- Yttre krafter som verkar på materialet
- Omgivningens förhållanden, där temperaturen är väsentlig

2.7.1 Elasticitet

Ett material som uppvisar elastiska egenskaper kommer att återgå till sin ursprungliga form och struktur efter att belastning på materialet upphört. Majoriteten av alla fasta material uppvisar elastiska egenskaper (Taylor & Airey, 2015). Hookes lag beskriver sambandet mellan spänning och töjning. Det innebär att den kraft som appliceras på ett material är direkt proportionell mot förskjutningen eller töjningen som kraften ger upphov till (Nationalencyklopedin, 2020b).

Om ett material deformeras succesivt kommer materialets elastiska egenskaper att upphöra gradvis. Vid tillräckligt hög spänning kommer materialet deformeras plastiskt och slutligen gå till brott (Nationalencyklopedin, 2020b).

2.7.2 Plasticitet

Begreppet plasticitet är motsatsen till elasticitet vilket betyder att materialet inte kommer att återgå till in ursprungliga form efter belastning. Vid plastisk deformation gäller inte sambandet i Hookes lag längre vilket medför att töjning inte längre är proportionell mot spänningen. Material med plastiska egenskaper är irreversibla och kommer att genomgå en permanent förändring vid belastning (Taylor & Airey, 2015).

2.7.3 Viskositet

Viskositet är en fysikalisk egenskap hos en vätska som beskriver dess flödesmotstånd. Alla vätskor i rörelse påverkas av en viss inre friktion hos vätskan. Olja är exempelvis mer trögflytande än vatten vilket innebär att olja har en högre inre friktion och av den anledningen en högre viskositet. Definitionen av viskositet anger förhållandet mellan applicerad skjuvspänning och skjuvhastighet (Koenders, 2015). Förhållandet beskrivs i ekvation 2.1 nedan.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Där:

η = Viskositet [$Pa \cdot s$]

τ = Skjuvspänning [Pa]

$\dot{\gamma}$ = Skjuvhastighet [s^{-1}]

Begreppet dynamisk viskositet kan emellanåt förekomma i vissa böcker och studier för att beskriva en vätskas viskositet. Samma term används för att beskriva den komplexa viskositeten vilket är den erhållna viskositeten från oscillationstester (Mezger, 2014).

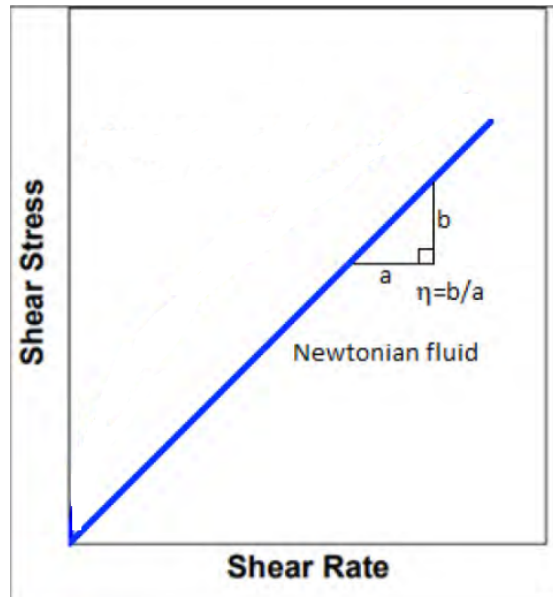
2.7.4 Viskoelasticitet

Viskoelastiska material påvisar både elastiska och viskösa egenskaper. Beroende på temperatur och belastningstid beter sig ett viskoelastiskt material både som ett fast elastiskt material och som en viskös vätska (Taylor & Airey, 2015).

Plastiska material återhämtar sig inte till sin ursprungliga form efter att dem utsatts för belastning utan materialet erhåller en ny och permanent förändring. Material med viskoelastiska egenskaper skiljer sig från rent plastiska material. Viskoelastiska material uppvisar en tidsberoende återhämtning efter avlastning. Fenomenet refereras till *delayed elastic response*, försenad elastisk återhämtning. Asfalt och bitumen är material som karakteriseras av att dem under belastning uppvisar en kombination av viskoelastiska och plastiska deformationer (Taylor & Airey, 2015).

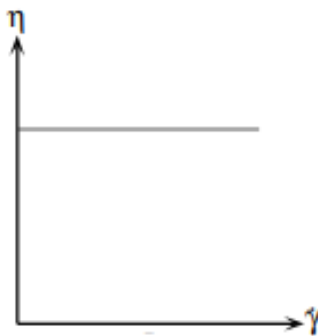
2.7.5 Newtonsk- och icke newtonsk vätska

Vatten, etanol och bensin är alla newtonska vätskor. En newtonsk vätska definieras som en vätska utan elasticitet där den applicerade skjuvspänningen är proportionell mot skjuvhastigheten vid en given temperatur. Om dessa vätskor skulle ritas upp i ett diagram med skjuvspänning på y-axeln och skjuvhastighet på x-axeln skulle förhållandet vara en rät linje med startat i origo, se figur 2.10 nedan. Att linjen startar i origo innebär att skjuvhastigheten är noll när skjuvspänningen är noll i den aktuella punkten. Linjens lutning refereras till en vätskas viskositet (Subramanian, 2002).



Figur 2.10: Samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en newtonisk vätska (Subramanian, 2002).

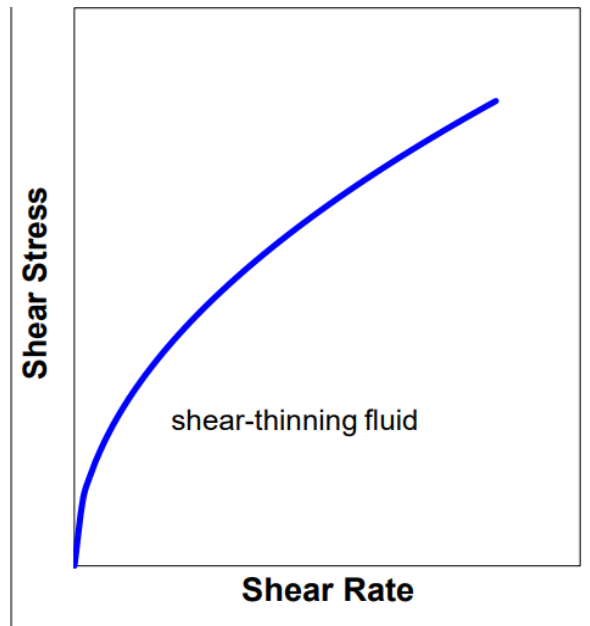
Vid konstant temperatur och tryck kommer en newtonsk vätska uppvisa en konstant viskositet oavsett hur mycket skjuvhastigheten varierar (Brookfield, u.å.). Fenomenet illustreras i figur 2.11 nedan.



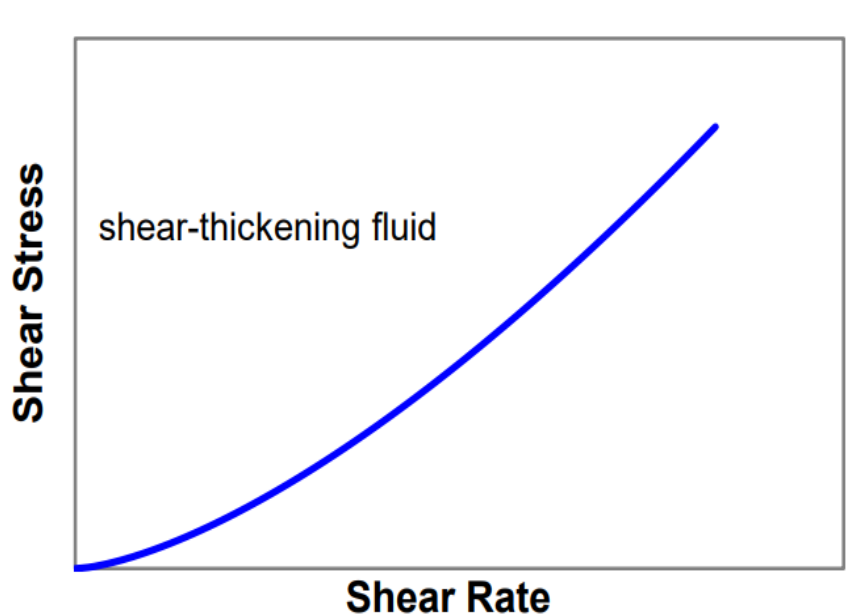
Figur 2.11: Newtonsk vätska med konstant viskositet (Brookfield, u.å.)

Samtliga vätskor som inte uppfyller ovan nämnda krav för en newtonsk vätska benämns icke-newtonska vätskor. Exempel på vanliga icke-newtonska vätskor är vätskor med hög molekylvikt vilket främst omfattar polymerlösningar. Inom ämnet reologi studeras egenskaperna hos icke-newtonska vätskor. Det förekommer en tydlig skillnad mellan newtonska och icke-newtonska vätskors skjuvspännings-skjuvhastighets diagram. För icke-newtonska vätskor är skjuvspänningen inte längre proportionell mot skjuvhastigheten (Subramanian, 2002). Linjen startar som för newtonska vätskor i origo men kröks när skjuvhastigheten ändras. Förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en icke-newtonsk vätska illustreras i figur 2.12 nedan. Observera skillnaden i lutning mellan de båda vätskorna när skjuvhastigheten förändras.

Beroende på om viskositeten ökar eller minskar kan en vätska uppvisa skjuvningsförtjockande eller skjuvningsförtunnande egenskaper när vätskan utsätts för en ökning av skjuvhastigheten (Subramanian, 2002). Skjuvningsförtunning är det vanligaste beteendet och båda fenomenen illustreras i figur 2.12 respektive figur 2.13.

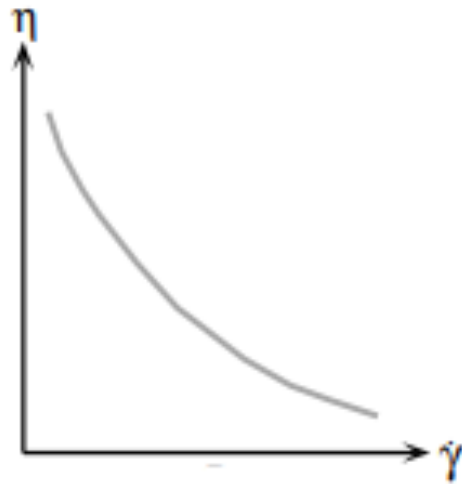


Figur 2.12: Samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en skjuvförtunnande icke-newtonsk vätska (Subramanian, 2002).



Figur 2.13: Samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för en skjuvförtjockande icke-newtonskvätska (Subramanian, 2002).

Vid en bestämd temperatur och tryck kommer viskositeten för en icke-newtonsk vätska varieras när skjuvhastigheten ändras, se figur 2.14 nedan. Icke-newtonska vätskor uppvisar flera värden för viskositeten till skillnad från newtonska vätskor som endast uppvisar ett konstant värde för en given temperatur och ett givet tryck.



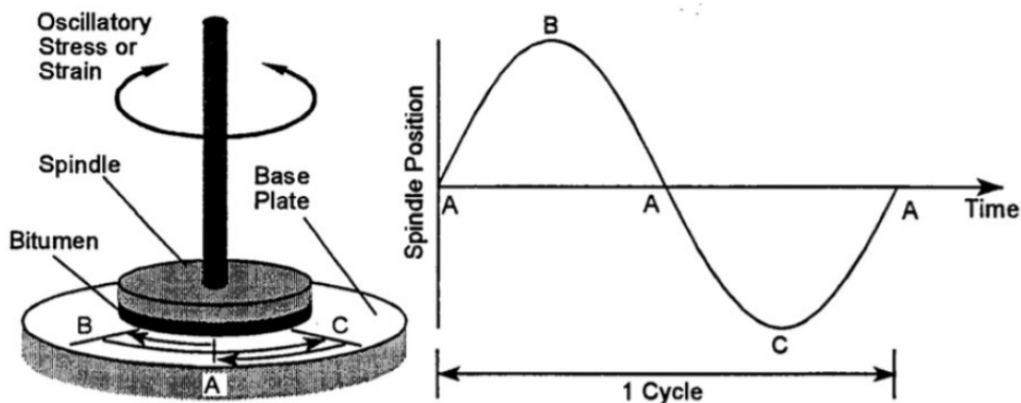
Figur 2.14: Icke-newtonsk vätska med varierande värden på viskositet (Brookfield, u.å.).

2.8 Dynamisk Skjuvreometer (DSR)

Reologiska egenskaper hos material mäts med dynamisk skjuvreometer (DSR). Mätinstrumentet har förbättrats och utvecklats de senaste åren och kan idag användas för att undersöka både vätskor och fasta material. Dynamisk skjuvreometer utsätter provkroppar för en rotationsrörelse eller en oscillerande påkänning. Temperatur, frekvens och spänning är exempel på ingående parametrar som kan varieras succesivt under provets utförande (Redelius, 1999). I delkapitlen nedan beskrivs rotationstest, oscillations test och olika typer av testsvep mer utförligt.

Mätningar med dynamisk skjuvreometer kan principiellt utföras på två olika sätt. Antingen görs mätningen med en kontrollerad och *förinställd skjuvspänning* eller med en kontrollerad och *förinställd skjuvtöjning*. Om mätningen utförs med inställningen för kontrollerad skjuvspänning appliceras ett vridmoment på bitumenprovet och storleken på den resulterade rotationen bestäms. Utifrån värdet på den resulterade rotationen kan skjuvtöjningen följaktligen beräknas. Om mätningen å andra sidan utförs med inställningen för kontrollerad skjuvtöjning mäts vridmomentet som krävs för att uppnå den förinställda rotationen. Utifrån det uppmätta vridmomentet kan skjuvspänningen beräknas (Yusoff, 2012).

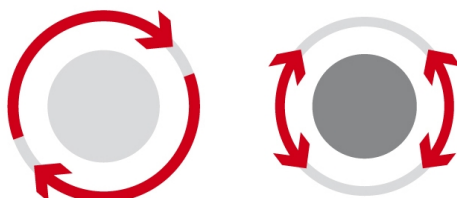
Principen bakom hur en dynamisk skjuvreometer (DSR) fungerar illustreras i figur 2.15. Den nedersta plattan är fixerad samtidigt som ett vridmoment appliceras på den översta plattan. Vridmomentet medför att plattan börjar oscillera fram och tillbaka. En fullständig cykel erhålls när den översta plattan rört sig från punkt A till punkt B, tillbaka förbi punkt A till punkt C och slutligen tillbaka till utgångsläget, punkt A (Yusoff, 2012).



Figur 2.15: Principiell uppsättning av dynamisk skjuvreometer vid ett oscillationstest (Airey, 1997).

2.8.1 Rotationstest

En skjuvreometer kan både användas för att genomföra skjuvnings- och vridningstester och rotationstester. Det senare görs för att undersöka vätskor trögflutenhet, det vill säga viskositet. Vid ett rotationstest roterar reometern provet kontinuerligt till skillnad från ett oscillationstest, där endast små vridrörelser sker runt en axel, se figur 2.16 nedan (Paar, 2020b).



Figur 2.16: Princip för ett typiskt rotationstest (vänster) med kontinuerlig rotation och ett oscillationstest (höger) (Paar, 2020b).

2.8.2 Oscillationstest

Oscillationstest är en typ av test som vanligtvis används för att undersöka material med elastiska, viskösa och viskoelastiska egenskaper. Denna typ av tester genomförs överlag i det linjära viskoelastiska området (LVE-området). Mätinstrumentet som används för utförandet av testerna är en dynamisk skjuvreometer (DSR). Instrumentet applicerar en oscillerande skjuvspänning och en töjning på provkroppar av bitumen placerade mellan två plattor, varav den översta oscillerar. Temperaturen och belastningsfrekvensen kan varieras kontinuerligt under genomförandet (Airey, 2002).

Oscillationstest beskrivs generellt med hjälp av två-platt modellen. Enligt Mezger (2014) karakteriseras modellen av två plattor som är placerade på ett avstånd h , parallellt mellan varandra. Den nedersta plattan är stationär samtidigt som den översta plattan utsätts för en kraft, F . Plattan överst kommer att förskjutas i sidled, se figur 2.17.



Figur 2.17: Två-platt modellen (Paar, 2020a).

Den överst liggande plattan med skjuvarean A (i figur 2.17) kommer att förskjutas fram och tillbaka som ett resultat av den applicerade kraften, F . Rörelsen av plattan medför att en skjuvtöjning kommer att uppkomma i provkroppen. Vinkeländringen som erhålls av skjuvtöjningen benämns skjuvvinkel. Mezger (2014) menar att provkroppen måste uppvisa vidhäftning mot båda plattorna samtidigt som provet deformeras homogent för att mätningen av dem reologiska egenskaperna ska kunna genomföras utifrån ett oscillationstest.

Skjuvspänningen som genereras i plattan kan beräknas genom att dividera den applicerade kraften F med den översta plattans area, se ekvation 2.2.

$$\tau = F/A \quad (2.2)$$

Där:

τ = Skjuvspänning [Pa]

F = Kraft [N]

A = Area [m^2]

Skjuvhastigheten benämns även som hastighetsgradient och kan beräknas genom att dividera hastigheten som erhålls av den framkallade kraften med avståndet mellan plattorna (Mezger 2014). Förhållandet redovisas i ekvation 2.3 nedan.

$$\dot{\gamma} = v/h \quad (2.3)$$

Där:

$\dot{\gamma}$ = Skjuvhastighet [s^{-1}]

v = Hatsighet [m/s]

h = Höjd mellan plattorna [m]

Idealelastiskt beteende

Beroende på vilka egenskaper material uppvisar tillämpas olika lagar då ett oscillationstest genomförs. För idealelastiska material gäller Hookes lag och ekvation 2.4 beskriver sambandet mellan skjuvspänning och skjuvtöjning.

$$\tau(t) = G^* \cdot \gamma(t) \quad (2.4)$$

Där:

$\tau(t)$ = Skjuvspänning [Pa]

G^* = Komplex skjuvmodul [Pa]

$\gamma(t)$ = Skjuvtöjning [%]

Skjuvspänningen och skjuvtöjningen är enligt ekvationen ovan tidsberoende och kan ritas upp i ett diagram, se figur 2.18 nedan. För ett idealelastiskt material kan man observera att $\tau(t)$ -kurvan alltid är i fas med $\gamma(t)$ - kurvan. Båda kurvorna inträffar samtidigt, har samma frekvens och ingen fasförskjutning i förhållande till varandra (Mezger 2014). Den sinusformade deformationsfunktionen redovisas följaktligen i ekvation 2.5.

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.5)$$

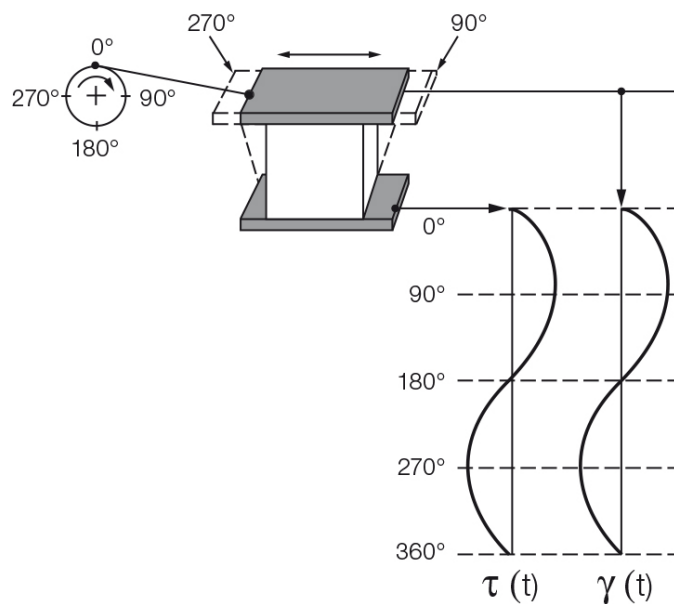
Där:

$\gamma(t)$ = Sinusformad deformationsfunktion

γ_A = Skjuvtöjning [%]

ω = Vinkelfrekvens [rad/s]

Vid oscillationstest kan oscillationsfrekvensen uttryckas som vinkelfrekvens, ω i [rad/s] enligt ovan eller som frekvens, f i [Hz]. Det är en fördel att använda vinkelfrekvens eftersom enheten [rad/s] är SI-enhet till skillnad från Hertz, [Hz]. Dem matematiska beräkningarna underlättas vid användandet av SI-enheter.



Figur 2.18: Idealelastiskt material med tidsberoende funktionerna $\tau(t)$ och $\gamma(t)$ utritade (Paar, 2020b).

Idealvisköst beteende

I fall ett oscillationstest ska genomföras på idealviskösa material gäller Newton's lag vilket definieras i ekvation 2.6. Ekvationen nedan beskriver sambandet mellan komplex viskositet och skjuvtöjning.

$$\tau(t) = \eta^* \cdot \dot{\gamma}(t) \quad (2.6)$$

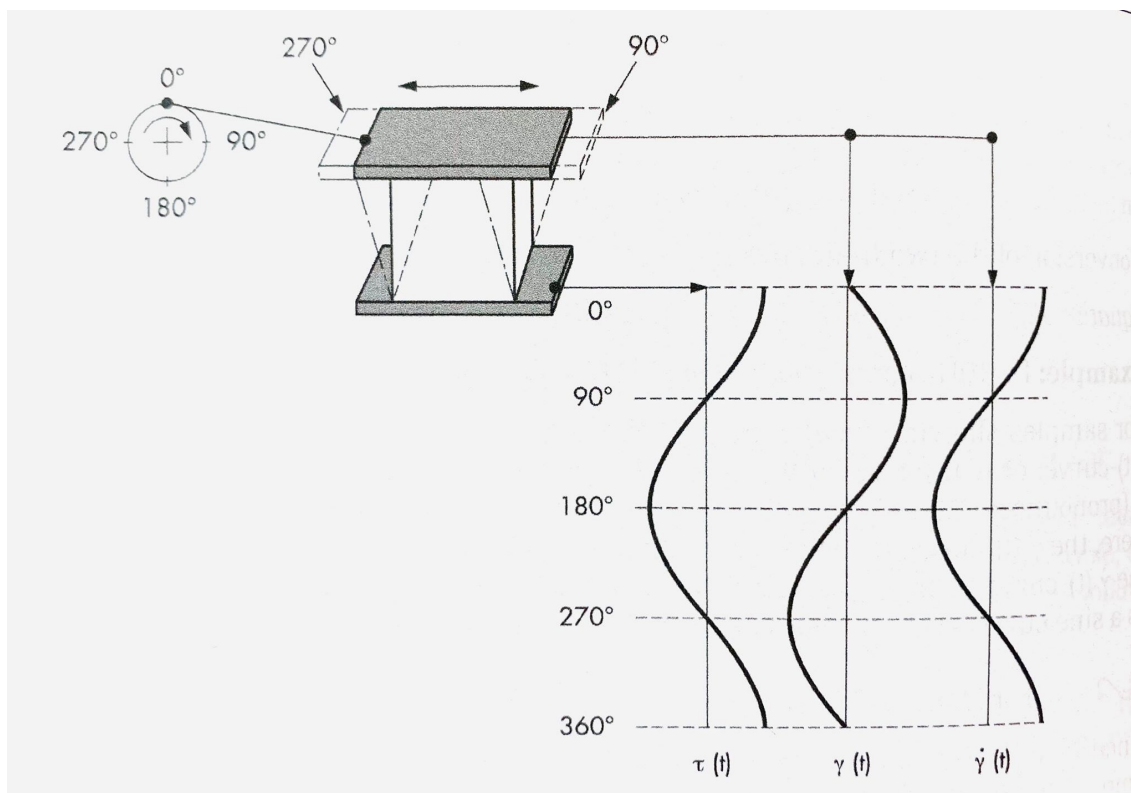
Där:

$\tau(t)$ = Skjuvspänning [Pa]

η^* = Komplex viskositet [Pa · s]

$\dot{\gamma}(t)$ = Skjuvtöjning [%]

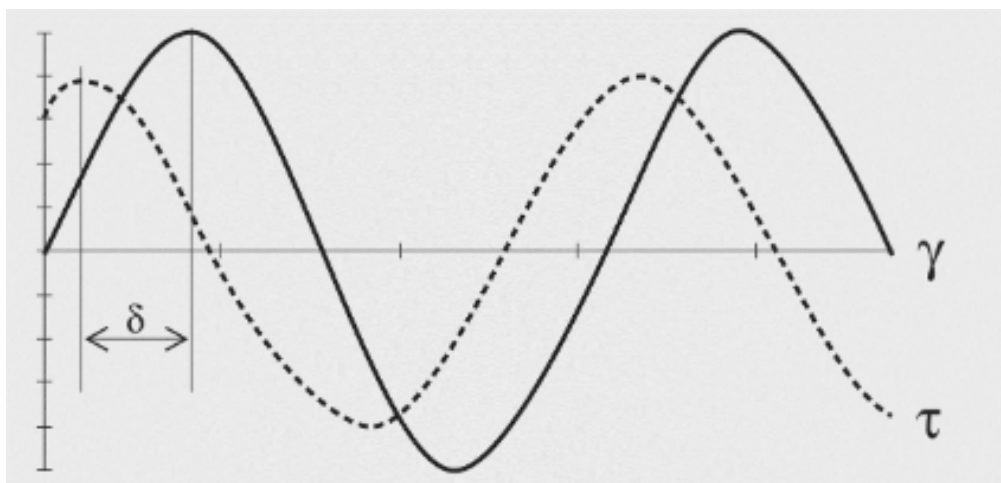
Om de tidsberoende parametrarna skjuvspänning och skjuvtöjning ritas upp som för ett idealelastiskt material kan ett antal observationer iaktas. För idealviskösa prover förekommer en fasförskjutning mellan $\tau(t)$ -kurvan och $\dot{\gamma}(t)$ - kurvan, se figur 2.19. Skillnaden mellan ett ideal elastiskt och ett idealvisköst material är att skjuvspännings- och skjuvtöjningskurvan är förskjutet med fasvinkeln $\delta = 90^\circ$, eller $\delta = \frac{\pi}{2}$ uttryckt i radianer (Mezger 2014).



Figur 2.19: Idealvisköst material med tidsberoende funktionerna $\tau(t)$ och $\dot{\gamma}(t)$ fasförskjutna (Mezger 2014).

Viskoelastiskt beteende

Vid oscillationstester på ett viskoelastiskt material kommer sinuskurvorna att uppvisa en förskjutning i förhållande till startinställningen, se figur 2.15. Dem tidsberoende funktionerna $\tau(t)$ och $\gamma(t)$ illustrerar ungefär liknande frekvens men i detta fall uppkommer en förskjutning av fasvinkeln (δ) mellan kurvorna. Den heldragna linjen i figur 2.20 är den kontrollerade töjningen medan den streckade linjen illustrerar den uppmätta spänningen. Storleken på förskjutningen mellan kurvorna är beroende av hur elastiskt eller visköst materialet är (Mezger 2014).



Figur 2.20: Viskoelastiskt beteende med en förskjutning av fasvinkeln mellan kurvorna (Mezger 2014).

Den fasförskjutna sinusfunktionen vid ett oscillationstest definieras enligt ekvation 2.7

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad \text{för } 0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ \quad (2.7)$$

2.8.3 Komplex skjuvmodul

Komplex skjuvmodul, G^* definieras som det totala motståndet mot deformation när ett material utsätts för belastning. Den komplexa skjuvmodulen kan bestämmas genom att beräkna förhållandet mellan skjuvspänning och skjuvtöjning enligt ekvation 2.8 nedan.

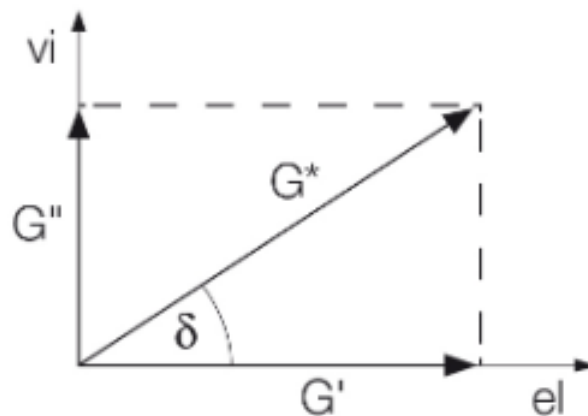
$$G^* = \tau(t) / \gamma(t) \quad (2.8)$$

Den komplexa skjuvmodulen består av en elastisk och en viskös komponent. Dessa komponenter benämns lagringsmodul (G') och förlustmodul (G''). Komponenterna är relaterade till den komplexa skjuvmodulen genom fasvinkeln, δ . Fasvinkeln är fördröjningen mellan den applicerade skjuvspänningen och skjuvtöjningen vid ett oscillationstest (Airey, 2002). För ett idealelastiskt material är fasvinkeln 0° och för ett helt visköst material är vinkeln 90° . Fasvinkeln för viskoelastiska material varierar mellan 0° och 90° .

Lagringsmodulen, G' representerar den elastiska delen av ett materials viskoelastiska beteende. Modulen är ett mått på mängden energi som lagras under skjuvprocessen. När belastningen som orsakat deformationen tas bort är energin den drivande faktorn för att materialet ska återfå sin ursprungliga form. Material som lagrar hela deformationsenergin uppvisar ett fullständigt reversibelt beteende d.v.s. elastiskt (Mezger 2014).

Förlustmodulen, G'' karakteriserar den viskösa delen av ett materials viskoelastiska beteende. Till skillnad från lagringsmodulen är förlustmodulen ett mått på mängden energi som åtgår när ett material deformeras under belastning. Energin används för att förändra materialets struktur och dessa material uppvisar ett irreversibelt deformationsbeteende (Mezger 2014).

Sambandet mellan komplex skjuvmodul, lagrings- och förlustmodul kan illustreras i ett vektordiagram, se figur 2.21. I figuren är den elastiska delen av materialets viskoelastiska beteende presenterad på x-axeln och den viskösa delen är presenterad på y-axeln. Fasvinkeln är också markerad i figuren och storleken på vinkeln avgör hur viskoelastiskt materialet är (Paar, 2020b). Fasvinkeln kan beräknas med trigonometri och redovisas i ekvation 2.9 nedan.



Figur 2.21: Vektordiagram som visar förhållandet mellan komplex skjuvmodul, lagringsmodul, förlustmodul och fasvinkel (Paar, 2020b).

$$\tan \delta = G''/G' \quad (2.9)$$

Där:

δ = Fasvinkel [°]

G' = Lagringsmodul [Pa]

G'' = Förlustmodul [Pa]

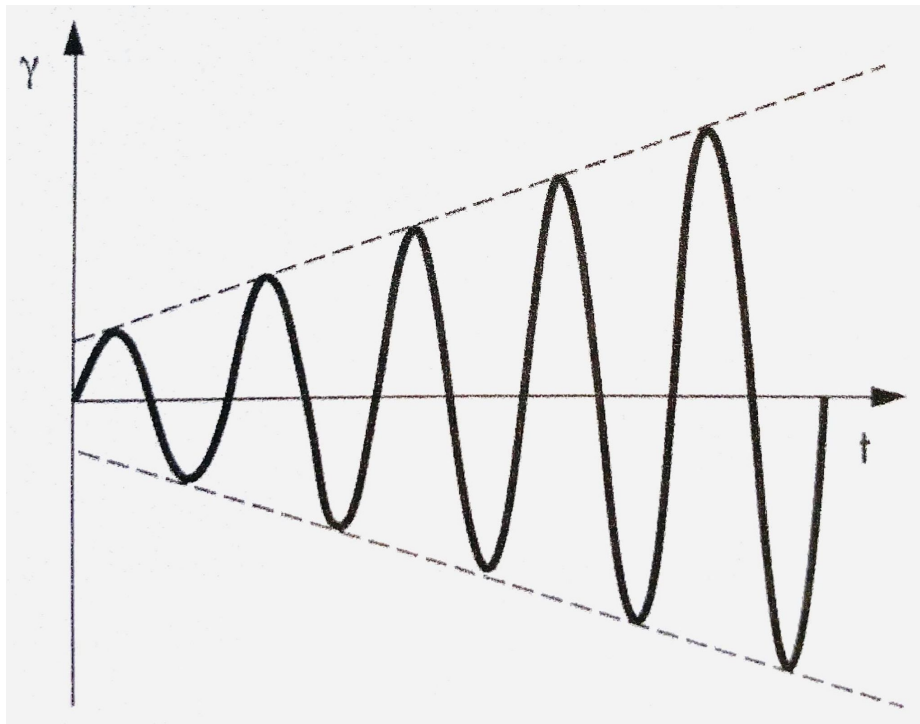
I fall att fasvinkeln understiger 45° ($\delta < 45^\circ$) är materialet mer elastiskt än visköst och lagringsmodulen dominerar över förlustmodulen. Om fasvinkeln å andra sidan överstiger 45° ($\delta > 45^\circ$) dominerar förlustmodulen och materialet besitter mer viskösa egenskaper. Om fasvinkeln är 45° ($\delta = 45^\circ$) är materialets elastiska och viskösa egenskaper balanserade och lagrings- och förlustmodulen är lika stora ($G' = G''$) (Mezger, 2014)

Storleken på den komplexa skjuvmodulen enligt figuren ovan kan beräknas med hjälp av Pythagoras sats och redovisas i ekvation 2.10.

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (2.10)$$

2.8.4 Amplitudsvep

Amplitudsvep är ett oscillationsstest där amplituden varierar samtidigt som frekvensen och temperaturen är konstant. Testet utförs ofta med den förinställda vinkelfrekvensen $\omega = 10$ rad/s vilket motsvarar frekvensen 1.6 Hz. Den inställda frekvensen vid amplitudsvep görs för bitumen enligt superpaves PG standard (Mezger, 2014). Ett vanligt amplitudsvep illustreras i figur 2.22 där töjningens amplitud succesivt ökar med tiden.

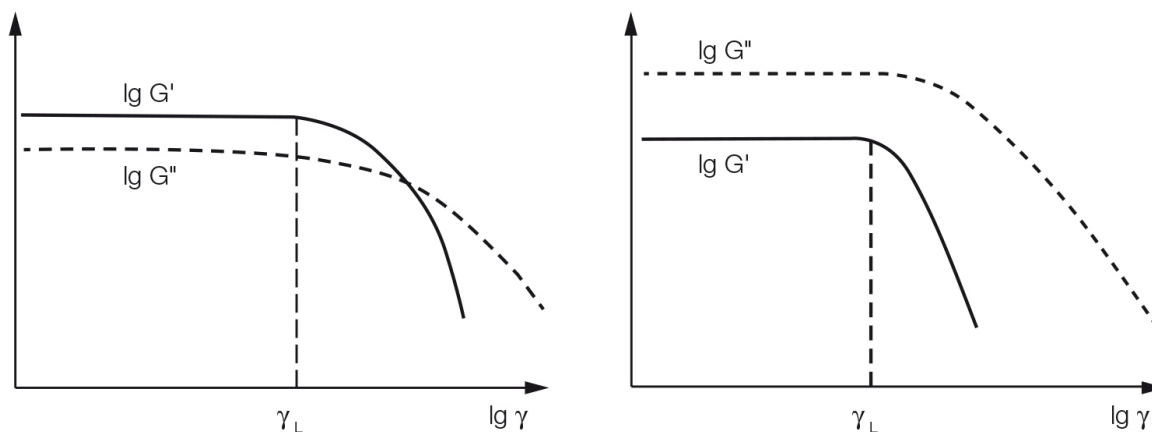


Figur 2.22: Amplitudsvep med ökande töjning (Mezger, 2014).

Resultat från amplitudsvep presenteras vanligtvis i diagram med töjning utritad på x-axeln och lagringsmodulen respektive förlustmodulen utritad på y-axeln där båda axlarna är i logaritmisk skala. Som ett första steg ska gränsen för det linjär viskoelastiska området (LVE-området) bestämmas. LVE-området definieras som det intervall amplitudtestet kan genomföras under utan att det uppstår några utmärkande förändringar av materialet och dess inre struktur. Detta område omfattar låga värden på töjningen och illustreras till vänster i figurerna nedan. Om mätningar å andra sidan skulle utföras utanför det linjär viskoelastiska området förekommer det en stor risk att irreversibla skador som exempelvis brott uppkommer (Paar, 2020c).

För utvärdering av LVE-området används vanligtvis funktionskurvan för lagringsmodul. Den används främst eftersom G' -kurvan har en tendens att lämna LVE-området först.

Gränsvärdet för LVE-området definieras som det värde som uppfyller kravet $\log(G') > 0.95 \cdot \log(G_0'')$. I vissa fall används en skillnad på 10 procent men ISO 6721-10 rekommenderar en gräns på 5 % skillnad vid ett test av bitumenprov (Mezger, 2014)



Figur 2.23: Resultat av två olika amplitudsvep, funktionerna G' och G'' uppvisar konstanta värden inom LVE-området. Vänster figur illustrerar ett elastiskt material där lagringsmodulen dominerar över förlustmodulen. Höger figur illustrerar ett visköst material där förlustmodulen dominerar.

I det linjär viskoelastiska området (LVE- området) d.v.s. vid låga amplitudvärden, är både lagringsmodulen (G') och förlustmodulen (G'') konstanta. Detta resulterar i en horisontell linje på olika nivåer och illustreras i figur 2.23. Inom LVE-området är modulerna $G'(\gamma)$ och $G''(\gamma)$ konstanta när de ritas mot $\log(\gamma)$ (Mezger, 2014).

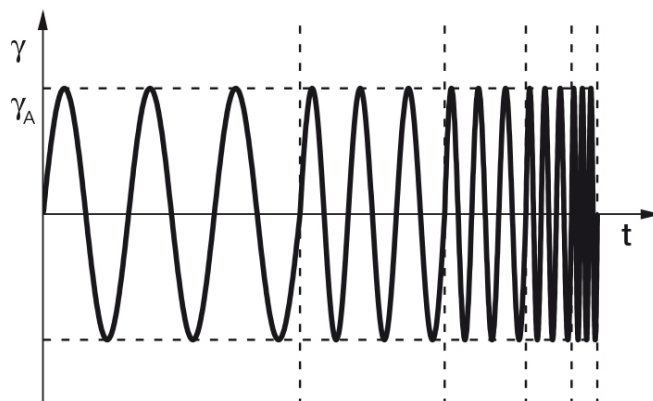
Om lagringsmodulen (G') är större än förlustmodulen (G'') karakteriserar det ett linjärelastiskt fast material, se vänster del av figur 2.23. Om förlustmodulen (G'') dominerar och är större än lagringsmodulen (G') utmärker det ett visköst material, se högre del av figur 2.23 (Paar, 2020c).

2.8.5 Frekvenssvep

Frekvenssvep är ett oscillationstest som utförs med varierande frekvens samtidigt som amplituden och temperaturen är konstant, se figur 2.24. Frekvenssvep genomförs vanligtvis för att undersöka de tidsberoende deformationsegenskaperna hos material utan att förstöra materialet. Frekvensen varierar i syfte med att simulera olika typer av trafik under olika tidsintervall. Höga frekvenser används för att simulera snabb trafik under kort tidsperioder samtidigt som låga frekvenser används för att simulera långsammare trafik under längre tidsperioder (Paar, 2020d).

En förutsättning för att kunna genomföra ett frekvenssvep är att den valda skjuvtöjningen eller skjuvspänningens amplitud befinner sig inom LVE-området. Detta innebär att gränsen för LVE-området måste bestämmas genom att först utföra ett amplitudsvep. Det

är nödvändigt att ett frekvenssväp utförs inom det linjär viskoelastiska området för att undvika permanenta skador på materialets inre struktur (Paar, 2020d).

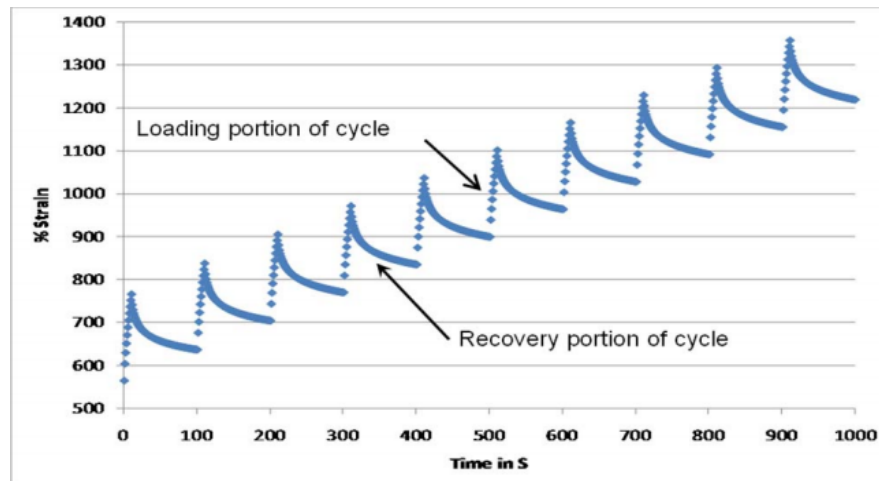


Figur 2.24: Frekvenssväp med kontrollerad skjuvtöjning samtidigt som frekvensen varierar (Paar, 2020).

2.8.6 Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR)

Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test är den senaste uppgraderingen till Superpaves graderingssystem av bitumen. MSCR-test används för att bedöma asfaltens potentiella återhämtningsförmåga efter belastning. Fördelen med MSCR är att testet eliminerar behovet av att utföra enskilda tester som exempelvis seghet, duktilitet, hållfasthet och elastisk återhämtning. Med ett enskilt MSCR-test erhålls all nödvändig information om prestanda hos ett bindemedel. Testet ger exempelvis indikationer på asfaltens förmåga att motstå permanent deformation och en perception av asfaltens spårbildningsegenskaper (Federal Highway Administration, 2011).

MSCR-test utförs med en DSR där provkroppen utsätts för konstant skjuvspänning under en sekund. Efter en sekund avlägsnas lasten och provkroppen får återhämta sig i nio sekunder. Cykeln körs upprepande 10 gånger med initialspänningen 0.1 kPa för tre förbestämda temperaturer. Efter de inledande 10 cyklerna har avslutats ökas spänningen till 3.2 kPa där testet körs i ytterligare 10 cykler. Testet mäter töjningsdeformationen med avseende på tiden och detta illustreras i figur 2.25 nedan (Federal Highway Administration, 2011).



Figur 2.25: MSCR test med exempel på återhämtningsrespons för ett bitumen vid återkommande belastning (Federal Highway Administration, 2011).

Resultat från ett MSCR-test analyseras genom att beräkna provets återgång, R (*Recovery*) uttryckt i procent enligt ekvation 2.11. Därefter kan den plastiska töjningen, γ_{nr} beräknas (*nr* betecknar *non recovery*) med ekvation 2.12. Den kvarstående deformationen, J_{nr} kan slutligen beräknas genom att dividera den erhållna plastiska töjningen med applicerad skjuvkraft, se ekvation 2.13 nedan (Federal Highway Administration, 2011).

$$R = \gamma_r / \gamma_p \cdot 100 \quad (2.11)$$

Där:

R = Återgång [%]

γ_r = Elastisk töjning [%]

γ_p = Maximal töjning [%]

Plastisk töjning kan beräknas genom att subtrahera den maximala töjningen med den elastiska töjningen enligt ekvation 2.10.

$$\gamma_{nr} = \gamma_p - \gamma_r \quad (2.12)$$

Den kvarstående deformationen, J_{nr} beräknas genom att kombinera ekvation 2.11 och 2.12 ovan enligt:

$$J_{nr} = \gamma_{nr} / \tau \quad (2.13)$$

Där:

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

γ_{nr} = Plastisk töjning [%]

τ = Skjuvkraft [kPa]

MSCR-testets specifika parameter, kvarstående deformation (J_{nr}) har utvärderats omfattande och forskare har påvisat att den stämmer väl överens med hur spårbildningen utvecklas på asfaltvägar, parameter *t-hög* i Superpave. Federal Highway Administration (FHWA) och Accelerated Loading Facility (ALF) har genomfört fullskaliga försök på olika bindemedel. Testen har visat att MSCR-test är en effektivare och bättre mätmetod samt graderingssystem än Superpaves ursprungliga PG-standard. Den största skillnaden mellan testen är att MSCR-test kan applicera högre spänning och töjning på bindemedlet vilket ger en mer precis representation av verkliga förhållanden i asfaltkroppen (Federal Highway Administration, 2011).

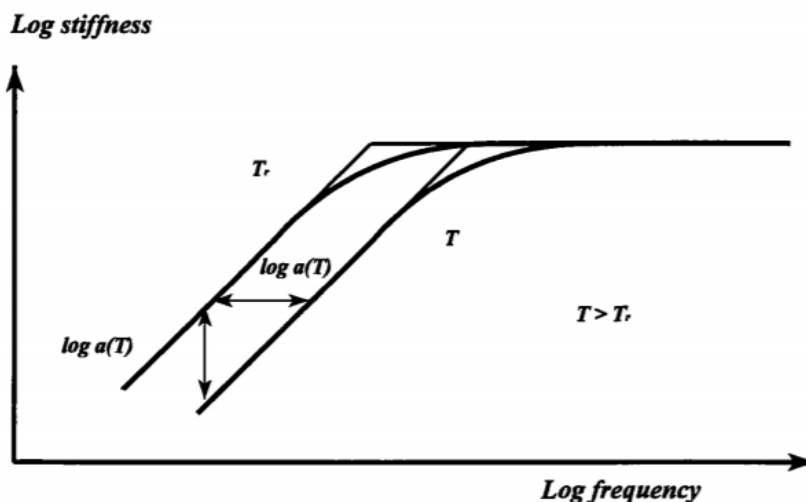
2.9 Metoder för resultatredovisning

Redovisning av DSR-mätningar sker oftast med en så kallad masterkurva, vilken underlättar illustration och analys av mätningarna. Blackdiagram används ytterligare som en komplettering till masterkurva. I Blackdiagram redovisas spridning av resterna som senare enkelt kan analyseras. Nedan följer en beskrivning av nämnda metoder.

2.9.1 Masterkurva

För att erhåll en bra förståelse för mätdata illustreras dessa i en masterkurva. Masterkurvan är alltså ett mycket användbart verktyg som beskriver bindemedlets viskoelastiska egenskaper utifrån vilken typ samt vilken kemisk sammanställning som det analyserade bindemedlet består av. I masterkurvan approximeras mätdata till en funktion och på så sätt kan mätserier minimeras (Yusoff, 2012).

Eftersom bitumen är ett viskoelastiskt material innebär det att egenskaperna är beroende av temperaturen och belastningstiden. Bitumen kan påvisa samma egenskaper vid olika förutsättningar. Exempelvis kan bitumen som belastas under en kort period och vid hög temperatur ha samma egenskaper som ett bindemedel som belastas under längre tid och vid lägre temperatur, se figur 2.26. Fenomenet är vanlig förekommande för bitumen och benämns *tid-temperatur superpositionsprincipen* (TTSP) och masterkurvan bygger på följande princip (Yusoff, 2012).



Figur 2.26: Tid-temperatur superpositionsprincipen (TTSP). (Yusoff, 2012).

Mezger (2014) skriver att en masterkurva skapas först efter många frekvenssvep som görs med olika temperaturer. Resultaten från testerna blir den komplexa skjuvmodulen, G^* och fasvinkeln, δ vid en viss temperatur och *viss reducerad frekvens*. Dessa resultat framställs sedan i ett funktionssystem med reducerad frekvens på X-axeln och komplexa skjuvmodul på Y-axeln. När masterkurvan skapas utgår man från en referenstemperatur

och för att skapa en sammanhängande funktion förflyttas mätdata antingen till höger eller vänster om den valda referenstemperaturen.

Tillskillnad från lastfrekvens är reducerad frekvens en sammanvägning av temperatur och frekvens med en tillkommande faktor som benämns *skiftfaktor*. Skiftfaktor är förhållandet mellan frekvens och temperatur och har likadan påverkan på skjuvmodul och fasvinkel. Skiftfaktor kan beräknas med följande ekvation:

$$\log f_r = \log f + \log a_T \quad (2.14)$$

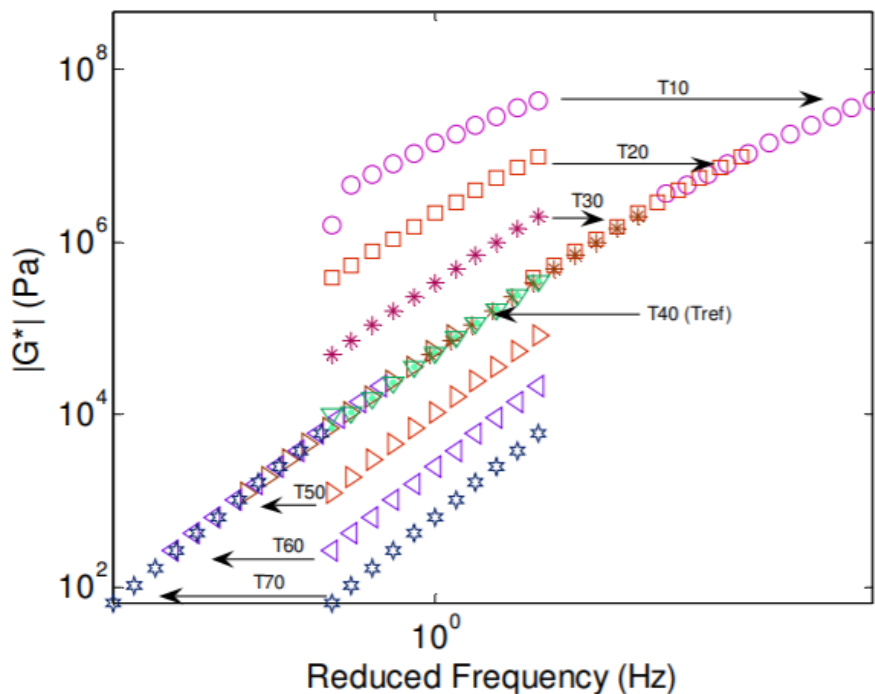
Där:

f_r = Reducerad frekvens [Hz]

f = Frekvens [Hz]

a_T = Skiftfaktor

Figur 2.27 nedan visar ett exempel på en masterkurva från mätningar som är gjorda med olika temperaturer och frekvenser. En godtycklig temperatur från mätningarna har valts ut, vilken är 40 °C och utgör referenstemperaturen. Därefter får man förflytta sig antingen till höger om referenstemperaturen om $T_i < T_{40}$ eller vänster om $T_i > T_{40}$ för att skapa en kontinuerlig kurva. Notera att skiftfaktor vid referenstemperaturen (T_{40}) är lika med 1 (noll i logaritmisk skala) (Yusoff, 2012).



Figur 2.27: Exempel på masterkurva med referenstemperatur på 40 °C (Yusoff, 2012).

Skiftfaktor kan räknas fram med hjälp av olika matematiska modeller såsom Williams-Land-Ferry ekvationer och Sigmoidal-modellen. Nedan beskrivs modellerna mer ingående.

2.9.2 Williams-Land-Ferry ekvationer

För att avgöra hur mycket kurvorna ska flyttas i horisontalled används skiftfaktor, a_T . Skiftfaktor kan tas fram med hjälp av WFE-ekvation vilken är framtagen av Williams, Land och Ferry. Ekvationen innehåller tre konstanter: T_{ref} , C_1 och C_2 , där C_1 och C_2 varierar beroende på skillnaden mellan temperaturen och den valda referenstemperaturen (T_{ref}), se ekvation 2.15.

$$\text{Log } a_t = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (2.15)$$

Där:

a_t = Skiftfaktor

C_1 och C_2 = Konstanter

T = Temperatur [°C]

T_{ref} =Referenstemperatur [°C]

Enligt Williams m.fl. (1955) ska konstanterna C_1 och C_2 ha värdena 8,86 respektive 101,6. Det visade sig senare att dessa värden endast kan användas för vissa förhållanden. Yusoff (2012) skriver att konstanterna kan bestämmas med en enkel omskrivning av ekvation 2.15 då referenstemperaturen är vald.

Med hjälp av skiftfaktor kan kurvorna från mätdata justeras för att skapa en kontinuerlig kurva. Som nämnts tidigare kan värdena förflyttas till höger eller till vänster beroende på om de är lägre eller högre än referenstemperaturen (T_{ref}) och om det är den komplexa skjuvmodulen eller fasvinkel som skrivs ut på y-axeln.

2.9.3 Sigmoidal-modellen

För att beskriva relationen mellan reducerad frekvens och den komplexa skjuvmodul används Sigmoidal- modellen. Modellen redovisas i ekvation 2.16 nedan.

$$\log|G^*| = \delta + \frac{\alpha}{(1+e^{(\beta+\gamma(\log(\omega)))})} \quad (2.16)$$

Där:

G^* = Komplexa skjuvmodul [MPa]

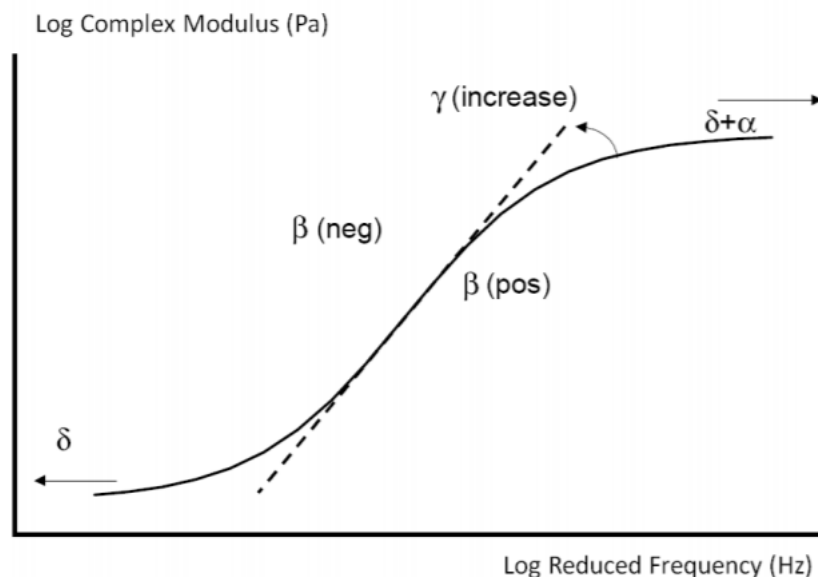
δ = Lägre asymptoten

α = Skillnaden mellan övre och undre asymptot

ω = Reducerad frekvens

β & γ = Anger läget för kurvans inflektionspunkt

Modellen består av fyra konstanter δ , α , β och γ vilka kallas för anpassningsparametrar. γ utgör den undre asymptoten medan α beskriver skillnaden mellan den övre och den undre asymptoten. β och γ beskriver relationen mellan asymptoten och placeringen på inflexionspunkten, se figur 2.28 (Yusoff, 2012).

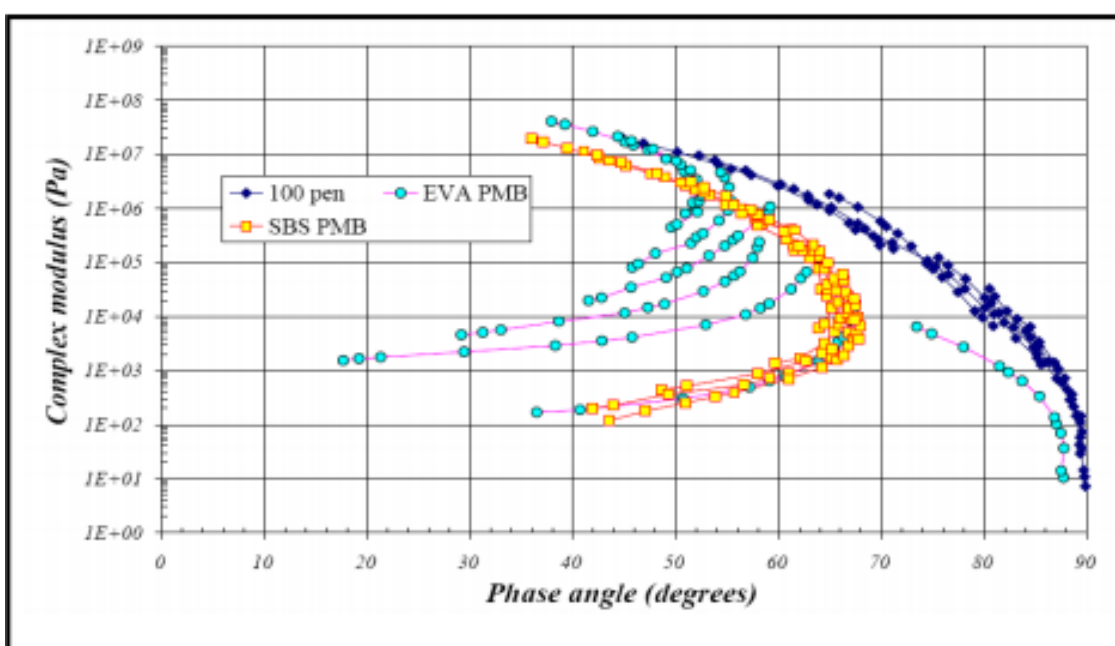


Figur 2.28: Illustration av Sigmoidal-modellen (Yusoff, 2012).

Inflexionspunkten kan beräknas med $10^{\frac{\beta}{\gamma}}$. Konstanterna ovan beräknas med hjälp av MS Excellens egen funktion *problemlösaren* vilka används i framställning av masterkurva.

2.9.4 Blackdiagram

Resultat från en DSR-mätning redovisas lämpligen i ett blackdiagram. Ett blackdiagram beskriver sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen (G^*) och fasvinkeln (δ), se figur 2.29 nedan. I diagrammet tas ingen hänsyn till temperatur och frekvens. Detta innebär att rådata inte behöver bearbetas och kan presenteras utan att tid-temperatur superpositionsprincipen behöver utnyttjas. Kurvans utseende och form kan ge indikationer om bindemedlets egenskaper. En kurva som är jämn och följsam i blackdiagrammet indikerar på en god tid- och temperaturekvivalens. Å andra sidan är en diskontinuerlig och knackig kurva en indikator på att material med skilda egenskaper från bitumen är förekommande. Ett vanligt exempel är polymermodifierat bitumen (Taylor & Airey, 2015).



Figur 2.29: Illustration av ett blackdiagram (Yusoff, 2012).

I figuren ovan är den komplexa skjuvmodulen presenterad på y-axeln och fasvinkeln på x-axeln. För rent bitumen minskar den komplexa skjuvmodulen med ökande fasvinkel (blå färg i figur 2.29). När kurvan når fasvinkeln 90° avtar den plötsligt vertikalt, detta beteende är kännetecknande för ett rent bitumen. För polymermodifierat bitumen får kurvan en parabelliknande form i blackdiagrammet (gul färg i figur 2.29).

2.9.5 Wöhler diagram (S-N kurva)

Omräkning av spänning och töjning i utmattningstest

För att bestämma vilken spänning och töjning som verkar i brottytan behöver en del omräkning göras. Skjuvspänningen som verkar i brottytan, τ_{ini} beräknas genom att dividera den applicerade skjuvspänningen med ett förhållande mellan provkroppens olika diametrar. Då trimningshöjden ökas med 50 % erhåller provkroppen en midja. Provkroppens geometri förändras och efterliknar en hyperboloid. Genom att mäta provets diameter med midja respektive provets diameter med raka sidor (8 millimeter) kan skjuvspänningen i brottyta beräknas enligt ekvation 2.17 nedan.

$$\tau_{ini} = \frac{\tau}{(d/8)^2} \quad (2.17)$$

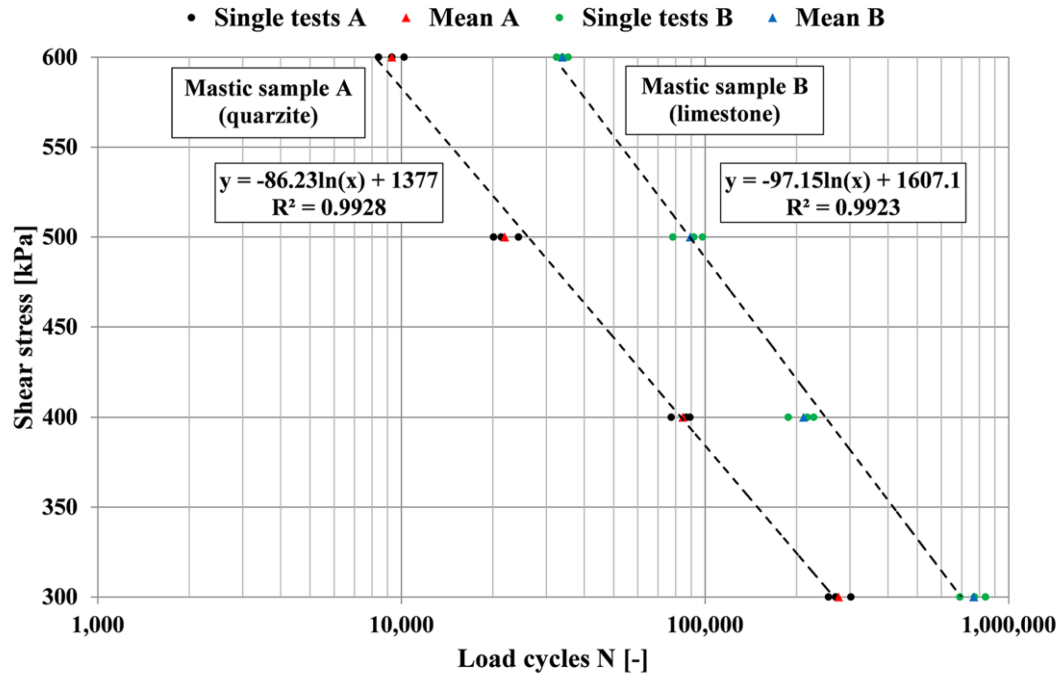
Töjningen som verkar i brottyta, ϵ_{ini} beräknas med hjälp av Hookes lag enligt ekvation 2.18.

$$\gamma_{ini} = \frac{\tau_{ini}}{G_{2-mm UTM}^*} \quad (2.18)$$

Där:

$G_{2-mm UTM}^*$ = Komplex skjuvmodul för provkropp med raka sidor (2 mm) [MPa]

Skjuvspänningen och skjuvtöjningen som verkar på provkroppens brottyta är större än spänningen och töjningen som verkar på den cylinderformade provkroppen. Resultat från utmattningsförsök redovisas lämpligast i ett Wöhler diagram, även känd som S-N kurva. Denna modell används nästan uteslutande för karakterisering av utmattning i asfalt och provkroppar av olika slag kan illustreras och jämföras i samma diagram (Lundström, 2001). De framräknade värdena på skjuvspänning och skjuvtöjning ritas in på y-axlarna med antalet belastningar, N_f på x-axeln i logaritmisk skala. Genom att variera inställningen på skjuvspänning i utmattningstesten kan beräknade värden ritas in i diagrammet och linjära samband kan erhållas. För att sammanbinda punkterna mellan varandra utnyttjas lämpligast en potensekvation. Vid behov kan sambanden extrapoleras till en miljon svängningar för att kunna jämföra med tidigare nämnda kriterier. Figur 2.30 nedan illustrerar ett Wöhler diagram där två olika provkroppar har testats med fyra olika skjuvspänningar. Provernas linjära samband har bestämts och R-värdena är höga (Hospodka, m.fl 2018).



Figur 2.30: Spännings-Belastningskurva (S-N kurva) för två olika provblandningar (Hospodka, m.fl 2018).

3 Metod

Följande kapitel behandlar material, förberedelse, tillverkning och genomförande av tester som ingår i studien.

3.1 Provserier

I undersökningen har fyra provblandningar med olika egenskaper och sammansättning använts, se tabell 3.1. Prov 1A är en blandning av standard bitumen med penetrationstalet 70/100 och 26.4 volymprocent filler. Prov B är en blandning av likadant bitumen men med 32.6 volymprocent filler. Prov C består också av bitumen, med fillerhalten 37.5 volymprocent. Provblandning D består å andra sidan av polymodifierat bitumen (PMB) och 37.5 volymprocent filler. Samtliga provers mjukpunkter samt egenskaper är hämtade från Zia och Erikssons (2019) examensarbete.

Tabell 3.1: Sammansättning av provserier som testats i studien

Prov	Bindemedel	Fillerhalt [Volym %]	Densitet [kg/m ³]	Mjukpunkt [°C]
1A	Standard (70/100)	Låg (26,4)	1461	56,4
1B	Standard (70/100)	Medel (32,6)	1564	61,3
1C	Standard (70/100)	Hög (37,5)	1646	67,2
2C	PMB	Hög (37,5)	1646	84,5

3.1.1 Provblandning

Fyra provblandningar av bitumen och filler ska analyseras. Proverna blandades enligt följande steg:

1. Aluminiumburkar med bindemedel (70/100 och PMB) värms i en ugn i cirka 60 minuter så bindemedlet blir flytande.
2. Bitumen mäts upp så provblandningen blir 100 ml.
3. Filler tillsätts enligt bestämd mängd och blandas till en homogen massa.

3.2 Tillvägagångsätt

I studien används två olika geometrier av provkroppar, PP08 och PP25. Provkropparna tillverkas med åtta millimeter i diameter samt 25 millimeter i diameter, se avsnitt 4.2.3 om provtillverkning. Olika provkroppar används beroende på vilket test som är tänkt att utföras. För utmattningstest används exempelvis PP08 provkroppen eftersom den har en högre tendens att gå till brott då provkroppen har en högre provhöjd jämfört med PP25. All provning sker i en dynamisk skjuvreometer av typen MCR 302 från Anton Paar, se figur 3.1 nedan.



Figur 3.1: Dynamisk skjuvreometer (MCR 302) av Anton Paar i Reologilaboratoriet på Lunds Tekniska Högskola.

Följande undersökningar har genomförts med DSR-maskinen för respektive prov:

- Sveptest med PP08
- MSCR-test med PP25
- Utmattningstest med PP08

3.2.1 Förberedelse

Följande material och materiel krävs för att kunna genomföra testerna som är relevanta för studien.

- Dynamisk skjuvreometer av typen MCR 302
- Spindel och mätplatta för respektive provkropp (PP08 och PP25), se figur 3.2.
- Provformar i silikon för PP08 ($\varnothing = 8 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$) och PP25 ($\varnothing = 25 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$)
- Bitumen med penetrationstal 70/100, PMB och filler
- Aluminiumbägare (150 ml) för varje provblandning
- Lödkolv som klarar temperaturer mellan 100 – 450 °C, se figur 3.3 nedan.
- Våg med precisionen 0.01 gram
- Värmelampa



Figur 3.2: Spindel och mätplatta till PP08 och PP25.



Figur 3.3: Använd lödkolv från Dibotech.

3.2.2 Provtillverkning PP08/PP25

Tillverkningen av PP08 och PP25 sker efter att provblandningarna blandats färdigt till en homogen massa. Blandningarna placeras i vitfärgade silikonformar så att provkropparna erhåller en jämn form med en bestämd volym. Provtillverkningen sker enligt följande steg:

1. Provblandning (med filler) värms i 30 minuter. Bindemedel 70/100 värms i 150 °C och för PMB sker uppvärmningen i 165 °C. PMB behöver värmas upp i högre temperatur eftersom materialet innehåller polymerer som är styvare än rent bitumen.
2. Vågen nollställs och silikonformerna för respektive prov (PP08/PP25) placeras på vågen.
3. Lödkolvens värmeskopa används för att väga upp rätt mängd och för att placera blandningen i silikonformen. Med känd volym på silikonformarna och blandningarnas densitet kan mängden PP08 eller PP25 beräknas. Uppmätta mängder finns redovisade i tabell 3.2 nedan. Blandningarna kan stelna till under processen och bli trögflytande. Genom att placera aluminiumbägarna i ugnen under några minuter värms proverna upp och bindemedlet blir mer lättarbetat.
4. När mängden provblandning är bestämd placeras det i silikonformerna. Därefter ställs proverna under en värmelampa vars uppgift är att värma proverna tills det fördelas jämnt i formen.
5. Då provblandningen täcker hela botten och är fint fördelad i formen ska formerna ställas i en kyl. Provkropparna förvaras svalt i minst 2 timmar innan de är redo att testas. Figur 3.4 illustrerar färdiga provkroppar av PP08 och PP25.



Figur 3.4: Färdiga provkroppar (PP08 och PP25).

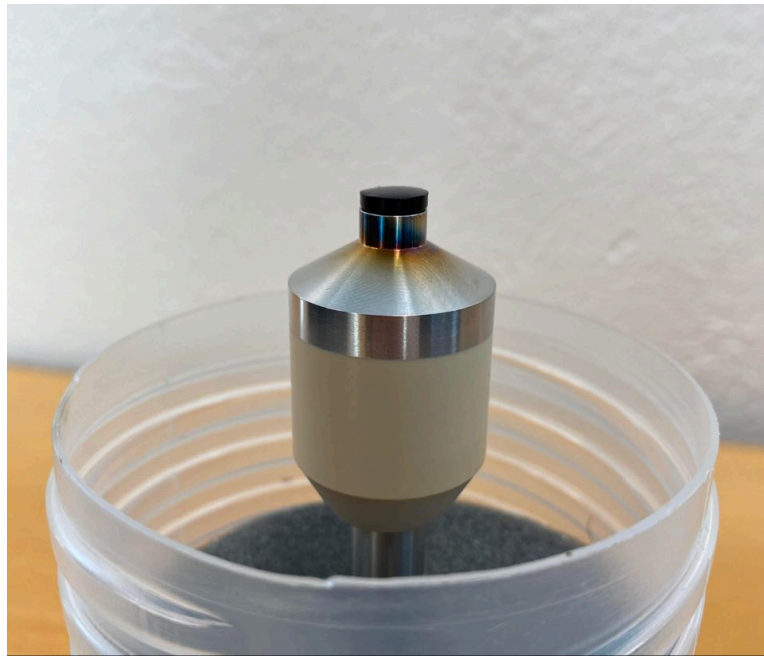
Tabell 3.2 Beräknade mängder för olika provkroppar

Prov	Volym, PP08 (m^3)	Densitet (kg/m^3)	Massa (g)
1A (70/100)	$1,005 \cdot 10^{-7}$	1461	0,147
1B (70/100)	$1,005 \cdot 10^{-7}$	1564	0,157
1C (70/100)	$1,005 \cdot 10^{-7}$	1646	0,165
2C (PMB)	$1,005 \cdot 10^{-7}$	1646	0,165

3.2.3 Applicering av prov

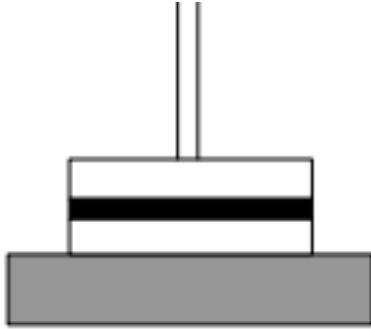
Innan provningen kan starta är det viktigt att den tillverkade provkroppen appliceras på rätt sätt. Provkroppen ska vid rätt applicering ha full kontakt med spindeln och mätplattans underliggande yta. Om provet inte har full kontakt med mätutrustningen kan resultaten påverkas eftersom DSR-maskinens beräkningar utgår från en känd volym på provkroppen. Följande steg nedan har repeterats vid applicering av provkroppar.

1. DSR-maskinen startas upp enligt tillgänglig elevmanual (Håkansson & Härstedt 2015). Knappen *Initialize* ansluter datorn till MCR maskinen.
2. För att maskinen ska kunna definiera nollpunkten klickar man på knappen *Set Zero Gap*. Spindeln lyfts upp till ursprungsläget genom att klicka på *Lift Position* (100 mm).
3. Nu är spindeln redo att lossas från maskinen och provkroppen kan appliceras.
4. Appliceringen av provkroppen (PP08 eller PP25) ska ske vid rumstemperatur. Om spindeln är tempererad till trimningstemperaturen fäster provkroppen snabbt vilket försvårar en korrekt placering av provet.
5. Provkroppen ska placeras centralt på spindelns mätplatta, se figur 3.5. Tryck försiktigt på provets sidor så att den fäster på spindeln. Låt provkroppen stå i ungefär fem minuter för att provet ska erhålla bättre kontakt med spindelns yta.



Figur 3.5: Applicering av PP08 på tillhörande spindel.

6. Efter att provet är applicerat ska spindeln monteras tillbaka på DSR-maskinen. Spindel ska därefter sänkas ner till provhöjden + 0,5 millimeter. PP08 har höjden 2 millimeter vilket medför att provet ska sänkas till 2,5 millimeter. PP25 har provhöjden 1 millimeter vilket innebär att provet ska sänkas till 1,5 millimeter. Små justeringar av höjden kan göras i syfte med att provkroppen på spindeln ska uppnå kontakt med den underliggande mätplattan.
7. Därefter dras värmekåpan ner för att värma provet i ungefär tio minuter. Temperaturen ska vara inställd på provkroppens mjukpunkt. En högre temperatur kan leda till att provet blir mjukt och att det ”rinner av” på mätplattan. Uppvärmningen av provet görs för att förenkla trimningsprocessen.
8. En varningsruta kommer upp på skärmen när provkroppen nått sin trimningsposition.
9. Provkroppen trimmas i samma temperatur som dess mjukpunkt. Spindeln sänks tills provkropp med spindel har full kontakt med den underliggande mätplattan. Provkroppen ska ha raka sidor efter komplett trimning, se figur 3.6. Undvik att det uppstår inbuktning eller utbuktning av provet, se figur 3.7 nedan.



Figur 3.6: Provkropp med raka sidor efter trimning (Baklökk m.fl. 2002).



Figur 3.7: Illustration av felaktigt trimmade provkroppar (Baklökk m.fl. 2002).

3.3 Utförande av tester

Maskinen som används under utförandet är en DSR av typen MCR 302. Maskinen startas upp enligt elevmanualen som finns tillgänglig (Håkansson & Härstedt 2015). En första kalibrering görs innan mätningarna påbörjas för att undvika felaktiga mätresultat.

3.3.1 Utmattningstest

Wiens universitet har studerat utmattningsegenskaper och försökt utveckla ett utmattningstest för asfaltbruk. Syftet är att erhålla resultat som hädanefter kan jämföras med den standardiserade 4PBB metoden, SS-EN 12697-24. Metodiken för utmattningstestet i denna studie ämnar efterlikna och vidareutveckla österrikarnas försök.

Syftet med utmattningstestet är att ta reda på hur många belastningar en provkropp med olika egenskaper tolererar när parametrar som exempelvis frekvens, temperatur och skjuvspänning varieras. I testet har två olika temperaturer (10 °C och 15 °C) och två frekvenser (20 Hz och 30 Hz) applicerats. Skjuvspänningen har dessutom varierats i tre steg beroende på vald temperatur och frekvens. Totalt har 12 mätningar genomförts för varje provblandning med olika skjuvspänning, frekvens och temperatur.

Utmattningstesterna görs med PP08 provkroppar utifrån framtagna körmallar. Mallarna bygger på studier från internationell forskning (Wiens Tekniska Universitet, TUW) och handledarexpertis (Tyllgren, 2020). Ingående processer i utmattningsmallen är exempelvis temperering av provkropp (kolumn 1-4), framställning av en midja (kolumn 5) och applikation av förutbestämd skjuvspänning, enligt CSS-metoden (kolumn 10). Exempel på mallar från utmattningstesten illustreras i figur 3.8 och 3.9 nedan.

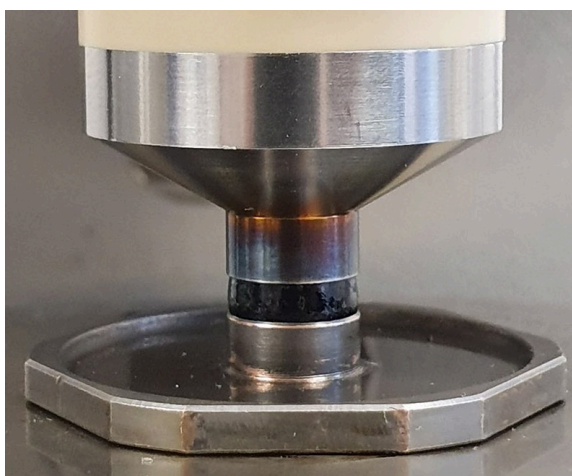
MCR302 PP08/PE-SN29105		1 600 Pts. 1 s	2 1 Pts. 20 s	3 1 Pts. 20 s	4 600 Pts. 1 s	5 10 Pts. 1 s	6 1 020 Pts. 1 s	7 1 Pts. 20 s	
	Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ								
	Rotation τ , M								
	Oscillation ϕ , γ		γ 0,08 % ω 100 rad/s					γ 0,08 % ω 100 rad/s	
	Oscillation τ , M			τ 79 kPa ω 100 rad/s					
	F_N								
	d, v, \dot{d}/d	d 2,123 mm					d 3,185 mm		
P-PTD200+H-PTD120-SNI	Accessory1 T	T 10 °C	T 10 °C	T 10 °C	T 61 °C	T 61 °C	T 10 °C	T 10 °C	

Figur 3.8: Mall för utmattningstest, kolumn 1-7 (Rheoplus 2020).

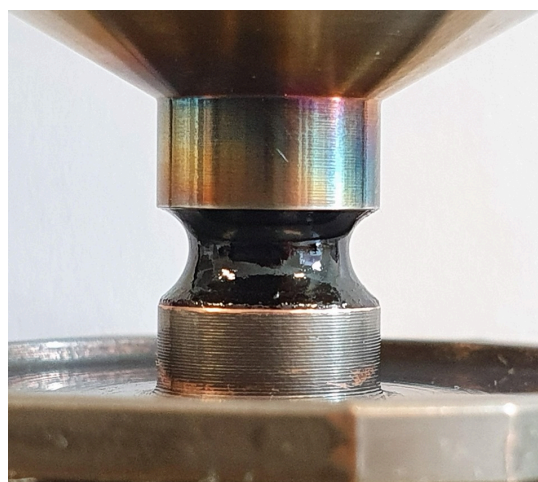
MCR302 PP08/PE-SN29105		6 1 020 Pts. 1 s	7 1 Pts. 20 s	8 1 Pts. 20 s	9 1 Pts. 10 s	10 1 440 Pts. 1 min	11 1 Pts.	
	Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ							
	Rotation τ , M							
	Oscillation ϕ , γ		γ 0,08 % ω 100 rad/s					
	Oscillation τ , M			τ 79 kPa ω 100 rad/s	τ 380 kPa f 30 Hz	τ 380 kPa f 30 Hz	τ 380 kPa f 30 Hz	
	F_N							
	d, v, \dot{d}/d							
P-PTD200+H-PTD120-SNI	Accessory1 T	T 10 °C	T 10 °C	T 10 °C	T 10 °C	T 10 °C	T 22 °C	

Figur 3.9: Mall för utmattningstest, kolumn 6-11 (Rheoplus 2020).

Figur 3.10 illustrerar en provkropp med raka sidor vid tempereringsfasen. I kolumn fem enligt mallen ovan bildas en midja i provkroppen genom att trimningshöjden ökas med 50 % av den ursprungliga höjden. Provkroppen försvagas för att påtvinga att brottet uppstår i den försvagade zonen och inte i någon anslutande kontaktyta enligt utmattningsavsnittet 3.5. Figur 3.11 illustrerar samma provkropp med tillverkad midja och utmattningstestet är redo att fullföljas.

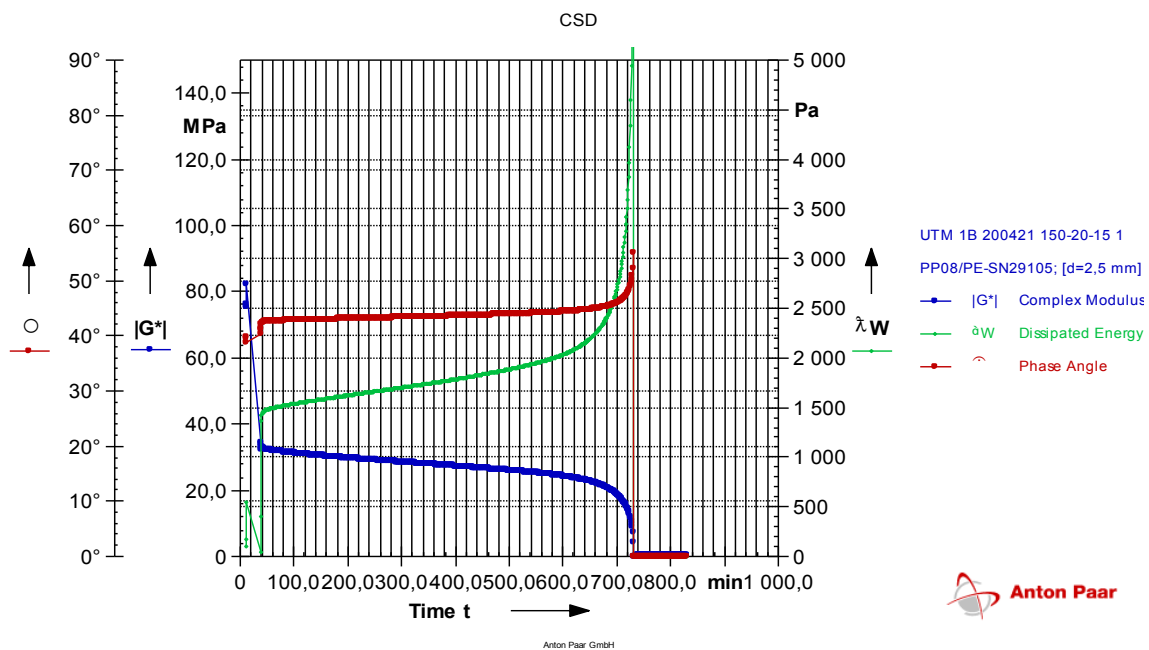


Figur 3.10: Provkropp med raka sidor.



Figur 3.11: Provkropp med tillverkad midja.

I programmet Rheoplus kan man välja vilka parametrar som ska ritas ut på olika axlar och därmed bevaka utmattningsprocessen under genomförandet, se figur 3.12 nedan. Den röda linjen i diagrammet illustrerar fasvinkelns förändring med tiden. Lutningen på linjen stiger långsamt under förloppet för att hastigt öka precis innan provkroppen går till brott. Den blåa linjen illustrerar provkroppens komplexa skjuvmodul. Enligt Hospodka (2018) är ett brottkriterium uppfyllt när den initiala komplexa skjuvmodulen halverats eller gått till fullständigt sönderfall. Värdena på den komplexa skjuvmodulen avtar med tiden och linjens lutning ökar innan provkroppen går till brott och den komplexa skjuvmodulen erhåller värdet 0 MPa. Eftersom både fasvinkeln och den komplexa skjuvmodulens respektive linjer inte ändras särskilt mycket under utmattningsförloppet med undantag för i slutet, har en parameter ytterligare ritats ut. *Dissipated energy*, ΔW (grön linje i diagrammet) beskriver energin som förvandlas. Lutningen för denna linje förändras mer kontinuerligt och man får en tidigare samt tydligare indikation på att provkroppen går mot brott, speciellt för provkörningar vid låga frekvenser. Genom att rita ut tiden på x-axeln kan antalet belastningar vid brottskedet beräknas när frekvensen är känd.



Figur.3.12: Illustration över en typisk utmattningskörning (Rheoplus 2020).

3.3.2 Sveptest PP08

Ett sveptest har utförts i det linjärviskoelastiska området (LVE-området). Testet genomförs med amplitudsvep där man väljer en töjning som resulterar i en spänning i provet som registreras. För att fastställa att mätningen ligger i LVE-området används Nynas AB:s matriser. Matriserna ger förslag på töjningar som ligger i LVE-området för olika typer av bitumen. Andersson och Sulejmani (2014) har exempelvis påvisat i sin studie att Nynas AB:s matriser stämmer och matriserna har använts som underlag i tidigare examensarbeten.

Mallarna som används för sveptesten, se figur 3.13, bygger på mallar som är framtagna i tidigare examensarbete på LTH (Aurell, 2018). Mallen för sveptest består av ett antal intervaller. I intervallerna framgår information om pågående oscillationstest, intervallets tidsåtgång, temperaturer samt trimhöjder som appliceras på provet vid olika temperaturer (se kolumn 5). Innan intervallet för ett oscillationstest startas, adderas ett intervall som justerar temperaturen och trimhöjden för nästkommande oscillationstest (se kolumn 6). Samma procedur upprepas för varje temperaturminskning ner till $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Notera att temperaturen minskar med $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ inför varje oscillationsintervall.

		1 300 Pts. 1 s	2 300 Pts. 1 s	3 600 Pts. 1 s	4 600 Pts. 1 s	5 10 Pts. 1 s	6 600 Pts. 1 s	7 10 Pts. 1 s
MCR302 PP08/PE-SN29105	Rotation $\dot{\gamma}, n, \phi, \gamma$							
	Rotation τ, M							
	Oscillation ϕ, γ					γ 1,25-0,15 % ϕ 0,1-100 / rad/s		γ ***.*** % ϕ 0,1-100 / rad/s
	Oscillation τ, M							
	F_N							
	d, v, d/d	d 2,036 mm	d 2,03 mm	d 2,024 mm	d 2,018 mm		d 2,013 mm	
P-PTD200-H-PTD120-SW	Accessory1 T	T 67 °C	T 55 °C	T 43 °C	T 30 °C	T 30 °C	T 20 °C	T 20 °C

Figur 3.13: Exmpel på mall av ett sveptest för PP08.

3.3.3 Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

Testerna för MSCR utförs med PP25 och med hjälp av metodik som är framtagen av Aurell (2018). Två olika MSCR-mallar används i Rheoplus, en för 70/100 bitumen och en för PMB, se figur 3.14.-3.16. Notera att temperaturerna för PMB är högre än de för 70/100 då PMB är styvare. Temperaturintervallen för 70/100 är 48-56-64 respektive 58-66-74 för PMB enligt Eriksson och Zia (2019). När provkroppen är redo för körning utför DSR-maskinen följande steg under testet:

- De första 25 minuterna i mallen representerar stabilisering av temperaturerna och normalkraften, se kolumn 1-4 i figur 4.11.
- Provkroppen utsätts sedan för konstant skjuvspänning ($\tau=100$ Pa) under en sekund.
- Efter en sekund avlägsnas lasten och provkroppen får återhämta sig i nio sekunder, se kolumn 6 i figur 3.14.
- Efter att dem inledande stegen har avslutats ökas spänningen till 3200 Pa där testet körs i ytterligare 10 cykler.
- Vidare upprepas nämnda steg med resterande temperaturer i intervallet, se figur 3.15 och figur 3.16.

MCR302 PP25/PE-SN35861		1 300 Pts. 1 s	2 300 Pts. 1 s	3 900 Pts. 1 s	4 1 Pts. 1 s	5 10 Pts. 0,1 s	6 20 Pts. 0,45 s	7 10 Pts. 0,1 s
Rotation $\dot{\gamma}, n, \phi, \gamma$								
Rotation τ, M						τ 100 Pa	τ 0 Pa	τ 3200 Pa
Oscillation ϕ, γ								
Oscillation τ, M								
F_N								
d, v, d/d	d 1,071 mm	d 1,068 mm	d 1,066 mm					
P-PTD200+H-PTD120-SNI	Accessory1 T	T 65 °C	T 55 °C	T 48 °C	T 48 °C	T 48 °C	T 48 °C	T 48 °C

Figur 3.14: Mall för MSCR-test intervall 48-56-64 kolumn 1-7.

MCR302 PP25/PE-SN35861		8 20 Pts. 0,45 s	9 900 Pts. 1 s	10 1 Pts. 1 s	11 10 Pts. 0,1 s	12 20 Pts. 0,45 s	13 10 Pts. 0,1 s	14 20 Pts. 0,45 s
Rotation $\dot{\gamma}, n, \phi, \gamma$								
Rotation τ, M		τ 0 Pa			τ 100 Pa	τ 0 Pa	τ 3200 Pa	τ 0 Pa
Oscillation ϕ, γ								
Oscillation τ, M								
F_N								
d, v, d/d			d 1,069 mm					
P-PTD200+H-PTD120-SNI	Accessory1 T	T 48 °C	T 56 °C	T 56 °C	T 56 °C	T 56 °C	T 56 °C	T 56 °C

Figur 3.15: Mall för MSCR-test intervall 48-56-64 kolumn 8-14.

MCR302 PP25/PE-SN35961	15 100 Pts 1 s	16 1 Pts 1 s	17 10 Pts 0,1 s	18 20 Pts 0,45 s	19 10 Pts 0,1 s	20 20 Pts 0,45 s	21 1 Pts 1 s
Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ							
Rotation τ , M			τ 100 Pa	τ 0 Pa	τ 3200 Pa	τ 0 Pa	
Oscillation ϕ , γ							
Oscillation τ , M							
F_N							
d, v, d/d	d 1,071 mm						
P-PTD200+H-PTD120-SN	Accessory1 T	T 64 °C	T 64 °C	T 64 °C	T 64 °C	T 64 °C	T 22 °C

Figur 3.16: Mall för MSCR-test intervall 48-56-64 kolumn 15-21.

För PMB används å andra sidan det högre temperaturintervallet (58-66-74) och stegen ovan upprepas.

4 Resultat och Analys

I kapitlet nedan redovisas och analyseras erhållna resultat från mätningarna med DSR. Underlagen till samtliga resultat finns i Bilagor.

Syftet med studien var i första hand att utforma en undersökningsmetod för utmattning i asfaltbruk med hjälp av en DSR. Detta gjordes genom att välja olika inställningar på belastningsfrekvensen och temperaturen. Olika sammansättningar från en tidigare studie undersöktes. Totalt analyseras fyra provserier i studien där tre av proverna består av standard bitumen 70/100 med olika inblandningshalter av filler. Den sista provserien består av bitumen med tillsatser av polymerer (PMB) och endast en fillerhalt.

Provningsen inleddes med MSCR-mätningar och svepundersökningar för att beskriva asfaltbrukens allmänna karaktär som bakgrund till utmattningsundersökningen och utvärdering av metoden. Sammansättningen av undersökta asfaltbruk illustreras i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Sammansättning av undersökta asfaltbruk

	Tolk för beteckningar			
	70/100			PMB
Prov:	1A	1B	1C	2C
Vol% filler:	26,4	32,6	37,5	37,5

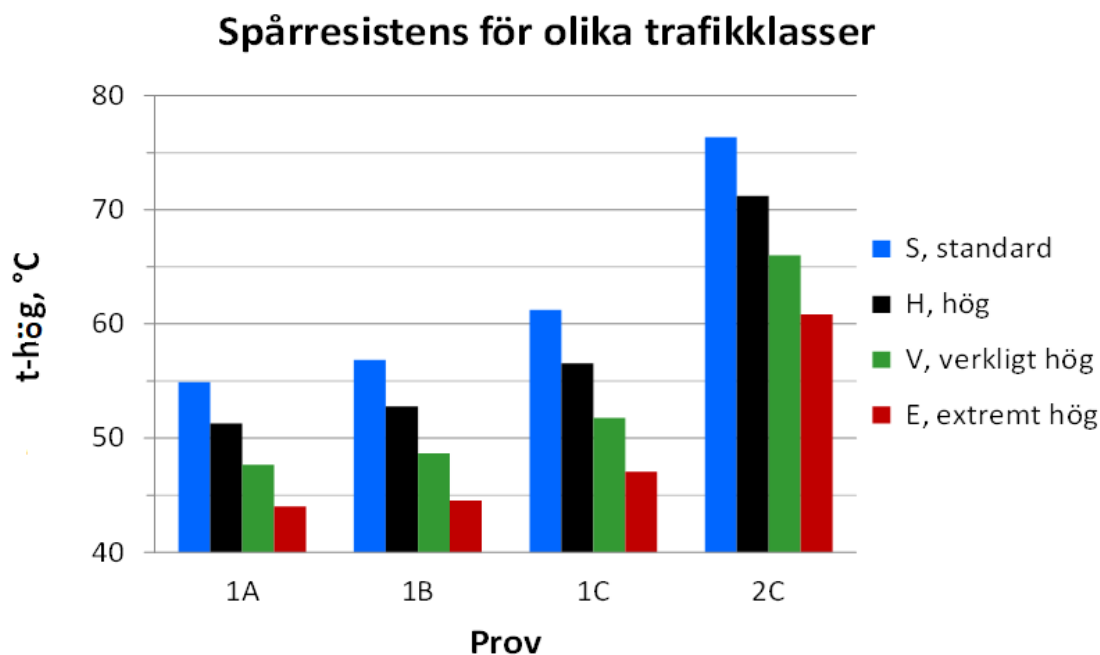
4.1 MSCR-mätningar

Multiple Stress Creep Recovery, MSCR, är ett kryptest som påvisar ett asfaltbruks förmåga att motstå spårbildning. Det definieras i Superpave med parametern *t*-hög. Ju högre värdet är på *t*-hög desto bättre spårresistens har asfaltbeläggningen. Ursprungligen provades egenskapen med ett dynamiskt viskoelastiskt test men ersattes för några år sedan med MSCR, som har visat bättre överensstämmelse med direkta spårtest på laboratorium. Resultaten från MSCR-testen redovisas i tabell 4.2 och i figur 4.1 nedan. Figur 4.1 illustrerar spårresistensen (*t*-hög) för olika trafikklasser där prov 2C med PMB sticker ut och påvisar högst spårresistens för varje trafikklass.

Tabell 4.2 Resultat från MSCR-test.

Gränsvärden		Provbeteckning			
		1A	1B	1C	2C
Trafikklass *	$J_{nr3200}, \text{kPa}^{-1}$	Karaktäristisk temperatur för spårbildning, <i>t</i> -hög, °C			
S (Standard)	0,336	54,9	56,9	61,2	76,3
H (Hög trafik)	0,179	51,3	52,8	56,5	71,2
V (Verkligt hög)	0,0950	47,7	48,7	51,8	66,0
E (Extremt hög)	0,0505	44,0	44,6	47,1	60,8

* Enligt Superpave



Figur 4.1: Spårresistensens påverkan för olika trafikklasser och prov

Analys och kommentarer

Trafikklasserna S, H, V och E är en amerikansk indelning av trafikpåkänningar och har inga direkta motsvarigheter i Sverige. Här används årsdygnstrafik, ÅDT, för liknande syften. Trafikklassen S motsvarar mindre än 10 miljoner standardaxlar och trafikklass H motsvarar mer än 10 miljoner standardaxlar. Dessutom motsvarar trafikklass V mindre än 30 miljoner standardaxlar och E motsvarar mer än 30 miljoner standardaxlar samt uppställda tunga fordon.

Resistensen mot spårbildning ökar med ökande fillerhalt. För mycket filler leder emellertid till försämrade egenskaper i andra avseenden, till exempel hållbarhet, vilket tas upp i nedanstående avsnitt.

En tydlig ökning av motståndet mot spårbildning åstadkoms med polymermodifiering av bitumen till PMB. För trafikklass E ökar exempelvis motståndet mot spårbildning med 3,1°C, motsvarande ett halvt kvalitetssteg för bitumen enligt Superpave, om andelen filler ökar från 26,4 volymprocent till 37,5 volymprocent. Ett kvalitetssteg enligt Superpave motsvarar 6 °C för parametern *t-hög*. Om polymerer tillsätts ökar motståndet mot spårbildning med ungefär 13,7 °C för samma trafikklass, vilket motsvarar mer än två kvalitetssteg för rent bitumen. Risken är att andra egenskaper samtidigt försämras, vilket avhandlas nedan.

4.2 Svepmätningar

I bilagorna visas i tabellform alla mätvärden från svepmätningarna. Dessutom visas resultaten plottade i Blackdiagram, som visar materialens viskoelastiska karaktär i form av sambandet mellan den komplexa skjuvmodulen G^* och fasvinkeln δ .

I svepmätningarna varierar den oscillerande belastningshastigheten, frekvensen, och temperaturen från 0,1 - 100 rad/s (0,016 – 15,6 Hz) och i steg om 10 °C från +30 °C till -30 °C. DSR registrerar i varje punkt den komplexa skjuvmodul, G^* och fasvinkeln, δ . Punkterna knyts sedan samma i en masterkurva, en matematisk funktion, ur vilken resultatet av valfria parameterkombinationer kan beräknas, även sådana som inte är direkt uppmätta. Superpaves parametrar för uthållighet, *t-mellan*, och lågtemperaturegenskaper, *t-låg*, har härletts ur masterkurvan. Duktilitet är en experimentell egenskap, som inte finns normerad någonstans för asfaltbruk men som också kan hämtats ur masterkurvan. Resultat från svepmätningarna redovisas i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Prestandaparametrar för uthållighet och lågtemperatur.

Prestandaparametrar			
Prov	t-mellan [°C]	t-låg [°C]	Duktilitet [cm]
1A	10,6	-20,2	13,7
1B	12,6	-20,9	14,1
1C	14,8	-19,7	12,0
2C	15,2	-18,4	7,2

Analys och kommentarer

Kurvorna i Blackdiagrammen (se bilaga 4) uppvisar normalt utseende och påminner om motsvarande för rent bitumen. En svag förskjutning uppåt och till vänster kommer av ökad fillerhalt. En avslutande böj till höger nertill är typisk för polymerbitumen och visar sig också här i asfaltbruket.

Parametern *t-mellan* anges som temperaturen när $G^* \cdot \sin\delta \geq 28,8$ MPa. Med ökande fillermängd och polymerinblandning ökar värmehovet, vilket ska tolkas som att utmattningmotståndet försämras. Parametern *t-låg* är den högre av temperaturerna för $G^* \leq 1,35$ GPa eller fasvinkeln $\delta \geq 20,8$ °. Ökad fillermängd och polymerinblandning försämrar enligt sveptestet lågtemperaturegenskaperna. Duktiliteten har inga gränsvärden utan ska jämföras med referensmaterial. Även här försämras egenskaperna, som ska återspegla materialets förmåga att tänjas ut innan brott uppstår. För prov 1A med lägst fillerhalt är *t-mellan* 4.6 °C lägre än exempelvis prov 2C med PMB. För parametern *t-*

mellan anses längre värden vara bättre till skillnad från parametern t -hög för spårresistens. Se även sammanställningstabell 4.5 nedan.

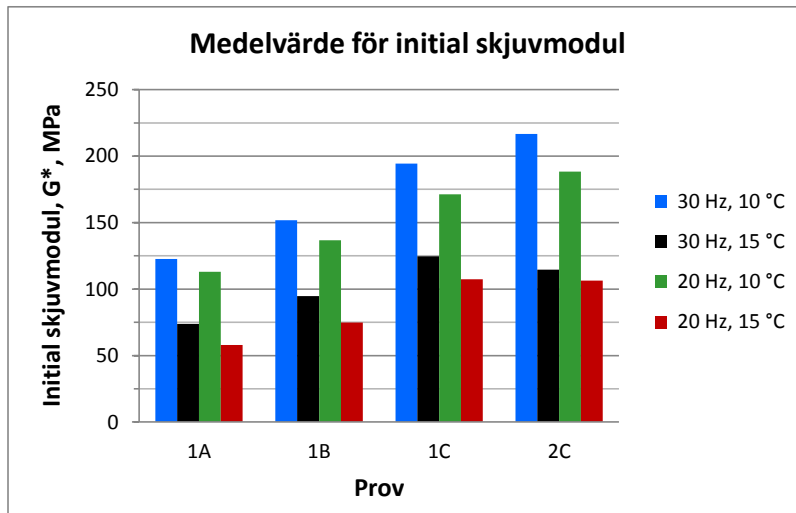
Sammantaget försämras enligt sveptestet hållbarheten med ökande fillerinnehåll och inblandning av polymerer. Det gäller alltså att hitta en medelväg för spårresistens enligt MSCR och hållbarhet och reglera valet av mängden filler och tillsats av polymerer.

4.3 Utmattningstest

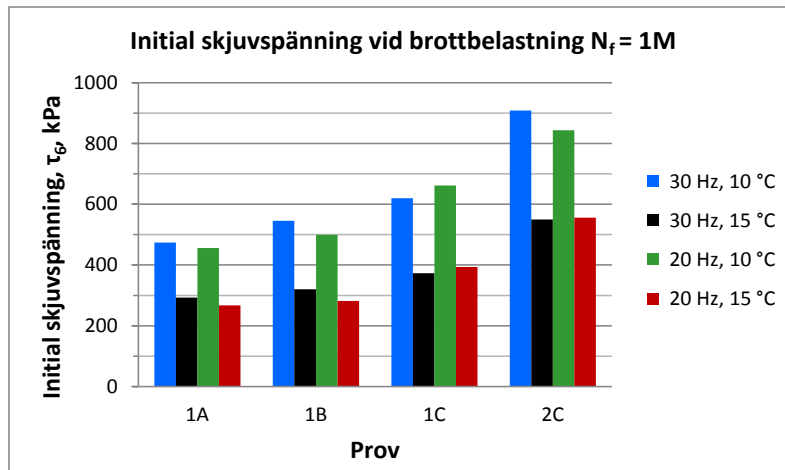
Utmattningstestet med DSR, som är huvudnumret i examensarbetet, beskriver olika asfaltbruks förmåga att motstå upprepade belastningar. Gränsvärdena enligt Superpave är empiriskt framtagna från amerikanska vägar. Utmattningstestet med DSR ger mätetal som kan användas direkt i valfritt dimensioneringsprogram. G^* är en materialspecifik skjuvstyvhet vid given frekvens och temperatur. τ_6 är maximalt tillåten skjuvspänning vid en miljon belastningar medan γ_6 är den största tillåtna töjningen. För båda parametrarna gäller att ju högre värde desto bättre uthållighet, men båda måste vara godkända. Gränsvärdena tas fram i dimensioneringen av överbyggnaden. Utmattningsparametrarna som uppmätts i studien redovisas i tabell 4.4. Medelvärdet för initial komplex skjuvmodul, initial skjuvspänning och initial skjuvtöjning vid en miljon belastningar redovisas i figur 4.2, 4.3 samt 4.4 nedan. I figur 4.2 kan man exempelvis avläsa att prov 2C uppvisar störst initial skjuvmodul och att skjuvmodulen ökar med ökande andel filler.

Tabell 4.4: Undersökning av utmattningsparametrar vid olika förutsättningar med DSR.

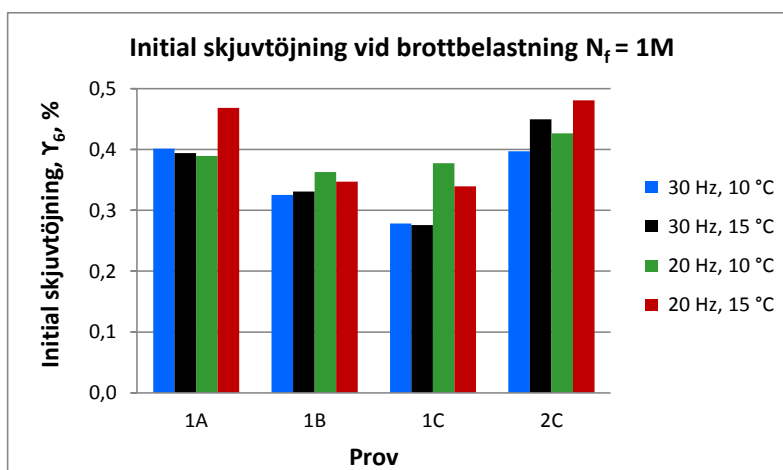
Initiala skjuvmoduler, skjuvspänningar och töjningar vid en miljon belastningar													
		Prov											
		1A			1B			1C			2C		
Frekvens Hz	Temperatur °C	G^* MPa	τ_6 kPa	γ_6 %	G^* MPa	τ_6 kPa	γ_6 %	G^* MPa	τ_6 kPa	γ_6 %	G^* MPa	τ_6 kPa	γ_6 %
30	10	123	474	0,401	152	545	0,325	194	620	0,278	217	909	0,397
	15	73,9	293	0,394	94,7	320	0,331	125	373	0,276	115	550	0,450
20	10	113	456	0,389	137	500	0,363	171	662	0,377	188	843	0,427
	15	57,9	267	0,468	74,9	282	0,347	107	394	0,339	106	556	0,481



Figur 4.2: Initial komplex skjuvmodul, G^* , i undersökta material i utmattningstestet.



Figur 4.3: Initial skjuvspänning för att klara en miljon belastningar för respektive material i utmattningstestet.



Figur 4.4: Initial skjuvtöjning för att klara en miljon belastningar för respektive material i utmattningstestet.

Analys och kommentarer

G^* ökar logiskt med ökande fillerhalt och polymertillsats utom vid 20 Hz och 15 °C för PMB. Det finns ingen omedelbar förklaring till det. En omständighet som kan ha orsakat detta är att töjningarna ligger långt in i eller utanför det linjärviskoelastiska området, LVE, vilket kan leda till ett tidigt sönderfall av provet och därmed ett lägre G^* -värde.

Den initiala skjuvspänningen som leder till sönderfall vid en miljon belastningar ökar med ökande fillerhalt och polymertillsats. Detsamma gäller för initial skjuvtöjning, med undantag av prov 1C vid 20 Hz och 10 °C. Ju mer filler och polymerer som tillsätts desto styvare blir blandningen. Det medför att spänningar kan tillåtas i asfaltbruket men samtidigt lägre töjningar, förutom i fallet med PMB.

De få avvikelser som kan observeras i resultatens rangordning ska ses i ljuset av att varje observation av tidsskäl baseras på endast 3 enkelmätningar. Vanligtvis görs 12-15 mätningar med konventionella utmattningsmetoder.

Sammantaget motsäger de här resultaten utfallet med *t-mellan* från sveptestet ovan.

4.4 Sammanställning av resultat

Ovanstående resultat ger var för sig upplysningar om materialens egenskaper och om utmattningsmetodens tillförlitlighet och användbarhet. För att både bekräftelser och motsägelser ska framgå lite tydligare samlas jämförbara och karakteriserande parametrar i nedanstående tabell med tydlig inspiration av Superpave, se tabell 4.5. I tabellen redovisas erhållna värden där underkända parametervärden är röd markerade.

Tabell 4.5: Sammanställning för jämförelse av olika prestandaparametrar.

			Prestandavärden för asfaltbruk, °C				Gränsvärden
			Rent standardbitumen			PMB	
Fillerinnehåll:			Lågt	Medel	Högt	Högt	
t-hög	MSCR	S	55	57	61	76	≥ 46 *
		H	51	53	57	71	
		V	48	49	52	66	
		E	44 ***	45	47	61	
t-mellan			11	13	15	15	≤ 11 **
Utm.- försök	τ ₆ , kPa		475	540	649	927	≥ 600 ****
	γ ₆ , %		0,401	0,323	0,282	0,400	≥ 0,300 ****
t-låg+10			-20	-21	-20	-18	≤ -18 **
Duktilitet, cm			13,7	14,1	12,0	7,2	

* Justerat för ej utfört RTFOT ** Justerat för ej utfört RTFOT+PAV

*** Underkänt parametervärde

**** Tentativa riktvärden

Analys och kommentarer

t-hög visar att spårresistensen ökar med ökande fillertillsats. Med tillräckligt mycket kan bruket till och med innehålla ett standardbitumen för den högsta trafikklassen. Polymertillsatsen ger till detta en rejäl ökning, nästan opåkallat stor. Parametern *t-hög* för den högsta trafikklassen (*t-hög* = 61 °C) överstiger gränsvärdet (46 °C) med stor marginal. Risken är att det försämrar andra egenskaper, som uthållighet och lågtemperaturegenskaper. Effekten på *t-mellan* blev som väntat. Mycket filler och polymertillsats knuffar värdena över gränsen, det vill säga blandningarna är för styva, de kräver högre temperatur än vad som gäller i den klimatbetingade specifikationen. *t-låg* klarar gränserna men det är med nöd för PMB-bruket. Det illustrera att effekten av polymertillsatsen kanske är i kraftigaste laget. Det kan i så fall kompenseras med en reducerad tillsats eller val av en annan polymer.

Utfallet av *t-mellan* motsägs av τ₆ och γ₆ när det gäller PMB. Särskilt γ₆ ligger på samma nivå som ett fillerfattigt asfaltbruk. Mycket filler tillsammans med standardbitumen *kan* ge problem med γ₆ men det återstår att undersöka närmare.

5 Diskussion, slutsatser och fortsättning

I detta kapitel diskuteras resultat och slutsatser från studien. Kapitlet avslutas med förslag till fortsatta studier inom ämnet.

5.1 Metod

Utgångspunkten för LTHs undersökningspaket med DSR har varit Superpave, som när det lanserades för över tjugo år sedan av amerikanska SHARP-programmet representerade ett nytt synsätt på valet av bitumen. Man utgick från klimatdata och tre skadetyper: plastiska spår, utmattning och lågtemperatursprickor. Dessutom lanserades DSR som provningsinstrument, som provar bitumen på ett vetenskapligt sätt istället för tidigare förekommande empiriska metoder med abstrakta mätetal.

Konceptet har därefter stegvis förbättrats på flera punkter. MSCR ersätter svepmätning för spårbildning och lågtemperaturegenskaper kan numera provas med DSR istället för med en särskild utrustning, Bending Beam Rheometer (BBR). Ett stort och avgörande steg togs när LTH gick över till att prova asfaltbruk, som har stora reologiska likheter med bitumen.

Nu har turen kommit till utmattning, som många har upplevt inte bedöms korrekt med parametern $G^* \cdot \sin(\delta)$ i Superpave (*t-mellan*). Det finns en rad metoder för utmattningstest av asfalt men de är mycket arbetskrävande och därmed kostsamma. 2018 lanserade Technische Universität Wien (TUW), en idé med utmattningsprovning på asfaltbruk i en DSR. LTH tog upp idén och började utveckla en metodik baserad på egna förutsättningar och erfarenheter från många examensarbeten inom det reologiska området.

Minskad arbetsinsats och därmed stora kostnadsminskningar tillsammans med stora variationsmöjligheter är de tydligaste vinsterna. Metoden kräver ingen avancerad kringutrustning eller stora lokaler och högutbildad personal. Ur arbetsmiljösynpunkt är metoden en god förebild och kan hanteras av alla efter kort inskolning.

Temperaturändringen från 10 °C till 15 °C visar tydlig effekt på maximalt tillåten skjuvspänning, τ_6 . Frekvensförändringen har däremot ingen tydlig effekt. Ingen av variationerna tycks entydigt påverka maximalt tillåten skjuvtöjning, γ_6 . Antalet mätpunkter har inte varit tillräckliga för att påvisa några skillnader i de fallen. Av utförda tester tycks 30 Hz och 10 °C ge de tydligaste resultaten.

Det återstår många undersökningar av precision, trimning av hanteringen och provningsmallar och jämförelser med andra laboratorier och metoder.

5.2 Resultatdiskussion

Trots att stora delar av undersökningen fick ägnas åt utformning av programmallar och utvärdering av resultat lyckades det att åstadkomma en del jämförande studier med olika recept för asfaltbruk, som verkar trovärdiga. Trots att tidsbristen tvingade fram enkelprovning i varje mätpunkt kan tydliga mönster skönjas.

Ökad fillertillsats tillåter högre skjuvspänningar, vilket rimmar med ökad spårresistens i MSCR. Samtidigt minskar maximalt tillåten skjuvtöjning, vilket kan leda till utmattningsbrott i ett senare skede. I fallet med konventionella bitumensorter gäller det att finna en balanserad avvägning mellan behoven. Den aktuella polymersorten i PMB tycks klara ökade skjuvspänningar och samtidigt tillåta ökade töjningar. Det styrks inte av Superpaves bedömning men det finns anledning att tro att den är alltför ensidigt baserad på styvhet och inte på eftergivlighet.

5.3 Slutsatser

- LTHs första version av TUWs utmattningsmetod med DSR visar lovande resultat och ser ut att kunna motsvara förväntningarna på en kostnadseffektiv mätmetod med stora utvecklingsmöjligheter.
- Med hjälp av MSCR-mätningar och utmattningsegenskaperna kan fillerinnehållet balanseras så att spårstabilitet och uthållighet uppnås samtidigt.
- Tillsats av polymer till bitumen har gynnsam effekt på stabilitet och resistens mot utmattning. Tillsatsen måste avvägas med avseende på mängd och kvalitet så att förbättringar i något avseende inte sker på bekostnad av något annat, inte minst av kostnadsskäl.

5.4 Förslag till fortsatta studier

LTHs metod för utmattningsmätningar är än så länge i inledningsfasen. Trots en del behov av utveckling har metoden visat duglighet. Därför finns det goda skäl att gå vidare med följande arbeten:

- Förbättra provtillverkningen och appliceringen i DSR
- Utveckla programmallarna och rutinerna i DSR
- Jämförande studier tillsammans med etablerade aktörer som utför utmattningstest
- Undersökning av olika frekvenser och cykler för belastningar, temperaturer, varierad utformning av provkroppar och behovet av upprepad provning för behövlig precision.

Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014) *Vägbyggnad*. Stockholm: Liber AB
- Airey, G.D. (1997) "Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens" University of Nottingham
- Airey, G.D. (2002) "Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens" *Construction and Building Materials*, 16 (8) s. 473-487.
- Andersson, C. & Sulejmani, P. (2014) "Undersökning av bitumen från asfalt med hjälp av dynamisk skjuvreometer, DSR – Utveckling av mätteknik och jämförande bitumenstudier" Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Aurell, O (2018). "Undersökning av asfaltbruk med olika fillersorter". Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Baklöök, L, Skoglund, R, Kalman, B & Peltonen, P. (2002). "Superpave test methods for asphalt - Procedure for DSR testing". *Nordtest report* TR 538.
- Brookfield (u.å.). "More solutions to sticky problems". Brookfield Viscometer. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://qa.ff.up.pt/fa2019/pdf/fa-tl4-m2.pdf>>
- Djurf, L (1996). "Utmattningskriterier för asfaltbeläggningar". Nr 259, Utskott 34. Väg- och transportforskningsinstitutet, VTI särtryck. Del 2 "Utmattnings som skademekanism på vägnätet-definition, omfattning och betydelse". (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:672953/FULLTEXT01.pdf>>
- Eriksson, E & Zia, D (2019). "Undersökning av asfaltbruk modifierat med polymerer och fibrer". Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Federal Highway Administration (2011). "The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure". (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf>>
- Granhage, L (2009). *Kompendium i vägbyggnad*. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- Hesami, E., Birgisson, B., Kringos, N. (2014). "Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics". *Materials and structures*. 1325:1337. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0237-8>>
- Haxhibeqiri, E & Mouhsen, M (2017). "Påverkan av asfaltens egenskaper efter förbättrad konsistens". Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola. Lund: LTH, avd. Trafik och väg. Institutionen för Teknik och Samhälle.
- Hospodka, M., Hofko, B., Blab, R. (2018). "Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing". *Materials and structures* 51:46. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://link.springer.com/article/10.1617%2Fs11527-018-1171-6>>
- Håkansson & Härstedt (2015). "Elevmanual MCR 302" Lunds tekniska högskola
- Höbeda, P. (1999) "Stenmaterial". *Asfaltboken*. Asfaltskolan. Tillgänglig: <<http://www.asfaltboken.se/stenmaterial/>>
- Koenders, B (2015). "Routine testing and mechanical properties of bitumens". *The Shell Bitumen Handbook, sixth edition*. London: ICE Publishing. s. 87-118.

- Liao, M. C., Chen, J. C., Tsou, K. W. (2012). *Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures*. American Society of Civil Engineers. 24(7): 916-923.
(Elektronisk) Tillgänglig: <<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000450>>
- Lundström, R (2001). *Utmattning av asfalt*. Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm. ISSN 1104-7437.
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W., Solaimanian, M. (1995). *Background of Superpave Asphalt Mixture Design & Analysis*.
- Malcolm, L. Williams, R. F. Land & Johan D. Ferry (1955) "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass-forming Liquids". University of Wisconsin-Madison. USA. 77. 14. S.3701-3707.
- Mezger, T. G. (2014). *The Rheology Handbook, fourth edition*. Hanover: Vincentz Network
- Mollenhauer, K & Wistuba, M., Rabe, R. (2009). "Loading Frequency and Fatigue: In situ conditions & Impact on Test Results". 2nd Workshop on Four Point Bending. University of Minho.
- Nationalencyklopedin (2020a). "Utmattning" (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/utmattning>>
- Nationalencyklopedin (2020b). "Elasticitet" (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/elasticitet>>
- Noss, P (1996). "Utmattningskriterier för asfaltbeläggningar". Nr 259, Utskott 34. Väg- och transportforskningsinstitutet, VTI särtryck. Del 1 "Orsaker till sprickbildning". (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:672953/FULLTEXT01.pdf>>
- Paar, A. (2020a). "Viscosity and Viscometry". (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://wiki.anton-paar.com/no-en/basic-of-viscometry/>>
- Paar, A. (2020b). "Basics of rheology". (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://wiki.anton-paar.com/no-en/basics-of-rheology/>>
- Paar, A. (2020c). "Amplitude sweeps". (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://wiki.anton-paar.com/en/amplitude-sweeps/>>
- Paar, A. (2020d). "Frequency sweeps". (Elektronisk) Tillgänglig: <https://wiki.anton-paar.com/no-en/frequency-sweeps/>
- Potucek, J & Granlund, J (2015). "Vägarnas roll i samhället". *Asfaltboken*. Asfaltskolan (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.asfaltboken.se/vagarnas-roll-i-samhallet/>>
- Redelius, P (1999). "Asfaltboken: Bindemedel". *Asfaltskolan* (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.asfaltboken.se/bindemedel/>>
- Said, S & Huhtala, M (1996). "Utmattningskriterier för asfaltbeläggningar". Nr 259, Utskott 34. Väg- och transportforskningsinstitutet, VTI särtryck. Del 5 "Skiftfaktor lab/fält". (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:672953/FULLTEXT01.pdf>>
- Self, A (2015). "Introduction". *The shell bitumen handbook, sixth edition*. London: ICE Publishing. S. 1-13.
- SS-EN 12697-24 (2018). "Vägmateriäl - Asfaltmassor - Provningsmetoder – Del 24: Utmattningsmotstånd". Svensk standard, edition 3. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://www.sis.se/api/document/preview/80004873/>>

- Subramanian, R. S (2002). "Non-Newtonian Flows". Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University. S. 1
- Tan, Y & Guo, M. (2014) "Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers". *Mater Struct.* 47, 605–614. (Elektronisk) Tillgänglig: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0083-8?shared-article-renderer#citeas>>
- Taylor, R. & Airey, T. (2015). "Rheology of bitumens". *The Shell Bitumen Handbook*, sixth edition. London: ICE Publishing. s. 119–145.
- Trafikverket (2016) "Vägar och gators utformning – Utformningsprocess". VGU-guide, Sveriges kommuner och landsting. . (Elektronisk) Tillgänglig: <https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/14431/RelatedFiles/2016_082_vagar_och_gators_utformning_utformningsprocess.pdf>
- Trafikverket (2011) "TRVR Väg" Trafikverkets tekniska råd Vägkonstruktion. TRV 2011:073 Anläggningsstyrning. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10751/RelatedFiles/2011_073_TRVR_vag_3.pdf>
- Trafikverket (2004) "Dimensionering" ABT Väg 2004. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/contentassets/2915be64b14848a6b97e24c5a7a8a71b/kapitel_c_dimensionering.pdf>
- Tyllgren, P (2018). "Tillsatsmedel mot övertemperatur vid asfaltstillverkning". Svenskt Vägcentrum.
- Tyllgren, P (2020). Experthandlere. Muntlig källa (referens) under hela arbetsprocessen.
- Yusoff, N. I. (2012). "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders". PhD thesis, University of Nottingham.
- Wiman, G, L (1999). "Vägens uppbyggnad". *Asfaltboken*. Asfaltskolan. (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.asfaltboken.se/vagens-uppbyggnad/>>
- Wågberg, L (2003). "Bära eller brista". Handbok i tillståndsbedömning av belagda gator och vägar – ny omarbetad upplaga. Svenska Kommunförbundet, VTI och Vägverket. ISBN: 91-7289-172-6. (Elektronisk) Tillgänglig: <https://asfaltskolan.se/wp-content/uploads/Dokument/Bara_eller_Brista-1.pdf>

Bilagor

Bilaga 1 Resultat från MSCR-mätningar

Bilaga 2 Amplituder för sveptest med DSR

Bilaga 3 Tabeller över oscillerande svepmätningar med DSR

Bilaga 4 Blackdiagram

Bilaga 5 Prestandagradering från masterkurvor

Bilaga 6 Rådatatabeller från utmattningstester

Bilaga 7 Diagram över utmattningstester

Bilaga 1 Resultat från MSCR-mätningar

MSCR prov 1A								
Temp: 40 °C			Temp: 48 °C			Temp: 56 °C		
<i>R</i> 100	30,09	%	<i>R</i> 100	18,42	%	<i>R</i> 100	9,07	%
<i>R</i> 3200	26,24	%	<i>R</i> 3200	11,46	%	<i>R</i> 3200	2,18	%
<i>J_{nr}</i> 100	0,025	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,102	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,361	kPa ⁻¹
<i>J_{nr}</i> 3200	0,025	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,104	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,402	kPa ⁻¹

MSCR prov 1B								
Temp: 44 °C			Temp: 52 °C			Temp: 60 °C		
<i>R</i> 100	20,87	%	<i>R</i> 100	12,91	%	<i>R</i> 100	6,23	%
<i>R</i> 3200	11,46	%	<i>R</i> 3200	3,15	%	<i>R</i> 3200	0,84	%
<i>J_{nr}</i> 100	0,059	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,176	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,498	kPa ⁻¹
<i>J_{nr}</i> 3200	0,051	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,173	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,571	kPa ⁻¹

MSCR prov 1C								
Temp: 48 °C			Temp: 56 °C			Temp: 64 °C		
<i>R</i> 100	16,33	%	<i>R</i> 100	14,16	%	<i>R</i> 100	9,51	%
<i>R</i> 3200	10,04	%	<i>R</i> 3200	3,26	%	<i>R</i> 3200	1,25	%
<i>J_{nr}</i> 100	0,078	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,177	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,440	kPa ⁻¹
<i>J_{nr}</i> 3200	0,058	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,162	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,494	kPa ⁻¹

MSCR prov 2C								
Temp: 48 °C			Temp: 56 °C			Temp: 64 °C		
<i>R</i> 100	55,52	%	<i>R</i> 100	49,17	%	<i>R</i> 100	37,58	%
<i>R</i> 3200	50,30	%	<i>R</i> 3200	37,96	%	<i>R</i> 3200	21,59	%
<i>J_{nr}</i> 100	0,039	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,113	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 100	0,265	kPa ⁻¹
<i>J_{nr}</i> 3200	0,036	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,093	kPa ⁻¹	<i>J_{nr}</i> 3200	0,256	kPa ⁻¹

Bilaga 2 Amplituder för sveptest med DSR

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 Tabeller över oscillerande svepmätningar med DSR

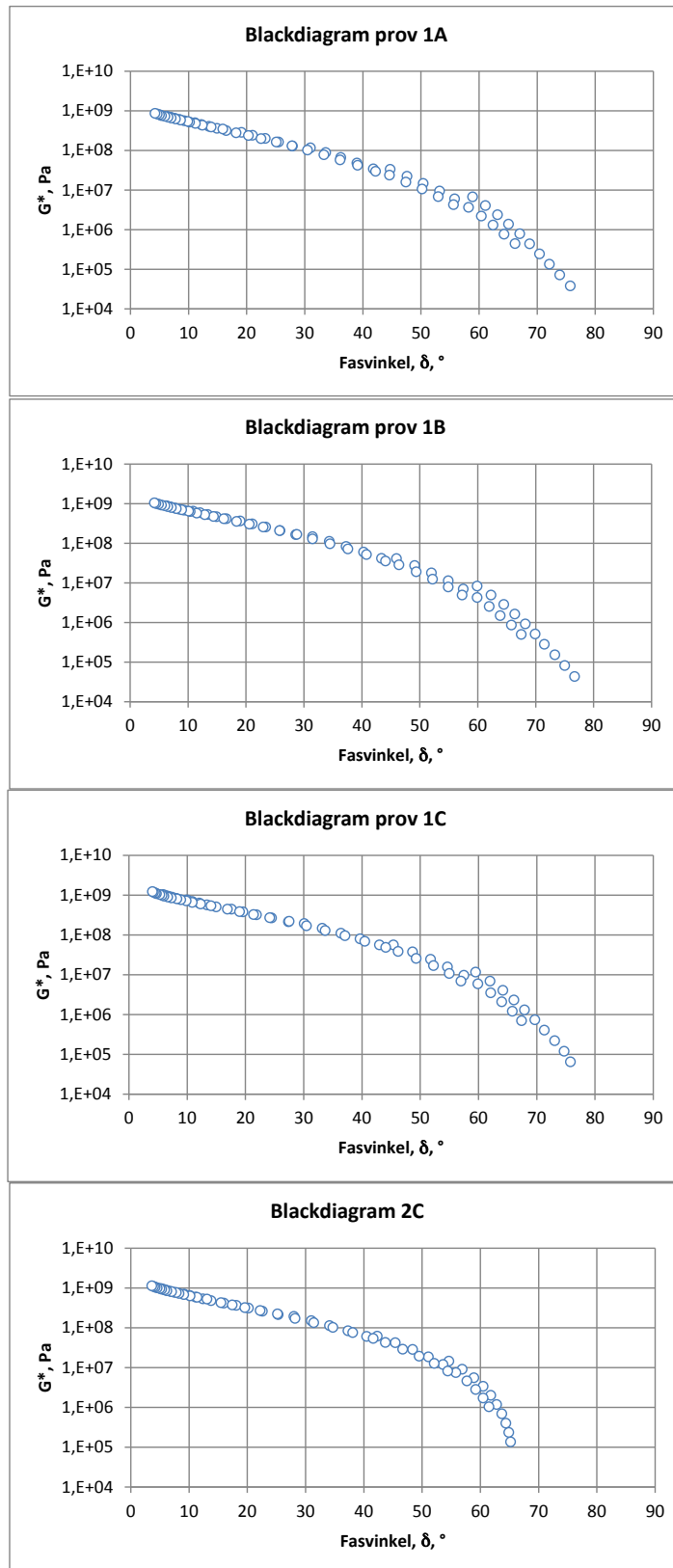
Svepmätning prov 1A							
Temperatur, C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	3,80E+04	4,41E+05	4,25E+06	2,96E+07	1,30E+08	3,46E+08	5,38E+08
0,215	7,17E+04	7,63E+05	6,77E+06	4,19E+07	1,62E+08	3,90E+08	5,78E+08
0,464	1,33E+05	1,30E+06	1,05E+07	5,76E+07	1,97E+08	4,32E+08	6,16E+08
1	2,43E+05	2,19E+06	1,59E+07	7,71E+07	2,35E+08	4,75E+08	6,52E+08
2,15	4,38E+05	3,63E+06	2,35E+07	1,01E+08	2,75E+08	5,18E+08	6,88E+08
4,64	7,78E+05	5,92E+06	3,39E+07	1,29E+08	3,16E+08	5,59E+08	7,21E+08
10	1,37E+06	9,45E+06	4,78E+07	1,62E+08	3,60E+08	6,00E+08	7,54E+08
21,5	2,37E+06	1,47E+07	6,58E+07	1,99E+08	4,04E+08	6,42E+08	7,91E+08
46,4	4,03E+06	2,23E+07	8,85E+07	2,39E+08	4,50E+08	6,83E+08	8,24E+08
100	6,71E+06	3,31E+07	1,16E+08	2,83E+08	4,97E+08	7,24E+08	8,60E+08
Fasvinkel, δ , °							
0,1	75,7	66,2	55,6	42,2	27,8	15,9	9,9
0,215	73,9	64,3	53,0	39,1	25,1	13,9	8,6
0,464	72,1	62,4	50,2	36,1	22,5	12,4	7,8
1	70,4	60,4	47,4	33,3	20,3	11,2	7,0
2,15	68,7	58,2	44,6	30,5	18,2	10,2	6,5
4,64	67,0	55,8	41,8	27,9	16,5	9,3	5,9
10	65,1	53,2	39,0	25,5	14,9	8,4	5,4
21,5	63,2	50,4	36,2	23,2	13,5	7,6	5,0
46,4	61,1	47,6	33,6	21,0	12,2	6,9	4,6
100	58,9	44,7	31,0	19,1	11,1	6,3	4,2

Svepmätning prov 1B							
Temperatur, C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	4,30E+04	4,95E+05	4,87E+06	3,56E+07	1,66E+08	4,15E+08	6,47E+08
0,215	8,16E+04	8,62E+05	7,83E+06	5,13E+07	2,08E+08	4,71E+08	6,98E+08
0,464	1,52E+05	1,49E+06	1,23E+07	7,14E+07	2,54E+08	5,22E+08	7,44E+08
1	2,81E+05	2,54E+06	1,89E+07	9,69E+07	3,04E+08	5,74E+08	7,89E+08
2,15	5,11E+05	4,26E+06	2,84E+07	1,28E+08	3,56E+08	6,25E+08	8,33E+08
4,64	9,19E+05	7,00E+06	4,16E+07	1,65E+08	4,11E+08	6,74E+08	8,74E+08
10	1,63E+06	1,13E+07	5,92E+07	2,07E+08	4,68E+08	7,25E+08	9,15E+08
21,5	2,84E+06	1,78E+07	8,21E+07	2,55E+08	5,27E+08	7,73E+08	9,59E+08
46,4	4,87E+06	2,73E+07	1,11E+08	3,07E+08	5,85E+08	8,25E+08	1,00E+09
100	8,20E+06	4,10E+07	1,46E+08	3,63E+08	6,45E+08	8,74E+08	1,04E+09
Fasvinkel, δ , °							
0,1	76,7	67,5	57,3	44,1	28,8	16,2	10,1
0,215	75,0	65,8	54,9	40,8	25,8	14,4	8,9
0,464	73,3	63,9	52,2	37,6	23,0	12,9	8,0
1	71,5	62,0	49,4	34,5	20,6	11,5	7,2
2,15	69,9	59,9	46,4	31,5	18,4	10,4	6,5
4,64	68,2	57,5	43,4	28,6	16,6	9,3	6,0
10	66,4	54,9	40,3	25,9	14,9	8,4	5,5
21,5	64,5	52,0	37,3	23,4	13,4	7,7	4,9
46,4	62,3	49,1	34,4	21,1	12,1	7,0	4,5
100	59,9	46,0	31,5	19,0	10,9	6,3	4,2

Svepmätning prov 1C							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	6,43E+04	6,96E+05	6,83E+06	4,82E+07	2,18E+08	5,38E+08	7,99E+08
0,215	1,19E+05	1,20E+06	1,07E+07	6,90E+07	2,69E+08	5,96E+08	8,47E+08
0,464	2,20E+05	2,07E+06	1,68E+07	9,57E+07	3,24E+08	6,53E+08	8,95E+08
1	4,03E+05	3,51E+06	2,57E+07	1,29E+08	3,82E+08	7,10E+08	9,41E+08
2,15	7,29E+05	5,86E+06	3,85E+07	1,68E+08	4,41E+08	7,65E+08	9,85E+08
4,64	1,30E+06	9,62E+06	5,60E+07	2,14E+08	5,02E+08	8,19E+08	1,03E+09
10	2,30E+06	1,55E+07	7,94E+07	2,65E+08	5,63E+08	8,74E+08	1,08E+09
21,5	4,01E+06	2,43E+07	1,10E+08	3,20E+08	6,25E+08	9,27E+08	1,12E+09
46,4	6,85E+06	3,72E+07	1,47E+08	3,79E+08	6,89E+08	9,82E+08	1,17E+09
100	1,15E+07	5,55E+07	1,92E+08	4,41E+08	7,50E+08	1,03E+09	1,22E+09
Fasvinkel, °							
0,1	75,8	67,4	57,0	44,1	27,5	14,1	8,3
0,215	74,7	65,8	55,0	40,5	24,2	12,3	7,3
0,464	73,1	64,0	52,3	37,1	21,4	10,9	6,7
1	71,3	62,1	49,3	33,7	19,0	9,9	6,0
2,15	69,7	59,9	46,2	30,5	16,9	8,9	5,7
4,64	67,9	57,5	43,0	27,4	15,0	8,1	5,3
10	66,1	54,7	39,7	24,5	13,4	7,4	4,8
21,5	64,2	51,8	36,4	21,9	12,1	6,9	4,6
46,4	62,0	48,7	33,2	19,6	10,9	6,3	4,2
100	59,5	45,4	30,1	17,6	10,0	5,9	4,1

Svepmätning prov 2C							
Temperatur, °C							
Vinkelfrekvens	30	20	10	0	-10	-20	-30
rad/s	Komplex skjuvmodul, G*, Pa						
0,1	1,35E+05	1,03E+06	8,12E+06	5,36E+07	2,22E+08	5,25E+08	7,62E+08
0,215	2,33E+05	1,70E+06	1,26E+07	7,48E+07	2,70E+08	5,78E+08	8,08E+08
0,464	4,00E+05	2,81E+06	1,93E+07	1,01E+08	3,19E+08	6,29E+08	8,48E+08
1	6,85E+05	4,58E+06	2,89E+07	1,33E+08	3,71E+08	6,77E+08	8,88E+08
2,15	1,17E+06	7,41E+06	4,23E+07	1,70E+08	4,24E+08	7,25E+08	9,27E+08
4,64	1,99E+06	1,18E+07	6,03E+07	2,12E+08	4,78E+08	7,71E+08	9,65E+08
10	3,34E+06	1,85E+07	8,38E+07	2,59E+08	5,31E+08	8,16E+08	1,00E+09
21,5	5,54E+06	2,82E+07	1,13E+08	3,09E+08	5,86E+08	8,62E+08	1,04E+09
46,4	9,05E+06	4,20E+07	1,49E+08	3,62E+08	6,40E+08	9,07E+08	1,08E+09
100	1,45E+07	6,09E+07	1,91E+08	4,16E+08	6,95E+08	9,53E+08	1,12E+09
Fasvinkel, °							
0,1	65,2	61,5	54,4	41,6	25,2	13,1	7,8
0,215	64,9	60,5	52,1	38,1	22,2	11,4	7,0
0,464	64,4	59,2	49,5	34,7	19,6	10,2	6,2
1	63,7	57,7	46,7	31,4	17,4	9,1	5,8
2,15	62,8	55,8	43,7	28,2	15,5	8,3	5,3
4,64	61,8	53,6	40,5	25,3	13,8	7,5	5,0
10	60,5	51,1	37,3	22,6	12,4	6,8	4,5
21,5	58,9	48,4	34,1	20,2	11,1	6,3	4,2
46,4	56,9	45,4	31,0	18,1	10,1	5,8	3,9
100	54,6	42,3	28,0	16,0	9,2	5,3	3,6

Bilaga 4 Blackdiagram



Bilaga 5 Underlag för prestandagradering från masterkurvor

Prestandagradering av prov 1A				
°C				cm
t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet
$G^*(\sin(\delta))$	S(60)	m (Fv)	J_{nr3200}	
Pa	°		MPa^{-1}	
2,88E+07	1,35E+09	20,8	336	
10,6	-30,0	-20,2	54,9	13,7

Prestandagradering av prov 1B				
°C				cm
t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet
$G^*(\sin(\delta))$	S(60)	m (Fv)	J_{nr3200}	
Pa	°		MPa^{-1}	
2,88E+07	1,35E+09	20,8	336	
12,6	-26,6	-20,9	56,9	14,1

Prestandagradering av prov 1C				
°C				cm
t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet
$G^*(\sin(\delta))$	S(60)	m (Fv)	J_{nr3200}	
Pa	°		MPa^{-1}	
2,88E+07	1,35E+09	20,8	336	
14,8	-23,2	-19,7	61,2	12,0

Prestandagradering av prov 2C				
°C				cm
t-mellan	t-låg		t-hög MSCR	Duktilitet
$G^*(\sin(\delta))$	S(60)	m (Fv)	J_{nr3200}	
Pa	°		MPa^{-1}	
2,88E+07	1,35E+09	20,8	336	
15,2	-23,0	-18,4	76,3	7,2

Bilaga 6 Rådatatabeller från utmattningstester

1A														
Prov:	30 Hz	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	30 Hz	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	400	107	129	44,7	52,3	5,67	796	0,617	8,10E+04	340	103	47	5,71	667
15	260	61,3	73,9	24,2	26,4	5,74	505	0,683	7,02E+04	211	59	73,5	29	5,78
Frekvens: 20 Hz														
	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	470	113	109	46,2	40,0	5,81	891	0,818	2,40E+04	310	111	113	44,9	5,8
15	235	54,5	55,9	21,5	19	5,55	488	0,873	4,32E+04	208	60,5	63,3	25,2	5,81
1B														
Prov:	30 Hz	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	30 Hz	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	500	135,0	140,4	58,0	60,3	5,65	1002	0,714	3,06E+04	380	136,0	153,0	66,2	5,7
15	350	86,4	94,5	35,1	38,4	5,94	635	0,672	4,68E+04	250	77,9	91,7	31,6	37,2
Frekvens: 20 Hz														
	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	450	150	138,0	59,8	55,0	5,80	856	0,621	51,600	340	137,0	133,7	58,2	56,8
15	340	79,4	69,4	31,1	27	5,73	663	0,954	16800	225	75,9	75,2	30,8	30,5
1C														
Prov:	30 Hz	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	30 Hz	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	600	187,0	187,0	87,0	87,0	5,87	1114	0,596	3,96E+04	500	182,0	182,0	78,4	78,4
15	500	116	116,0	43,5	43,5	5,79	955	0,823	9,00E+03	400	125	125,0	40,1	40,1
Frekvens: 20 Hz														
	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	600	167	167,0	71,5	71,5	5,76	1157	0,693	21600	500	175,0	175,0	69,9	69,9
15	375	106	106,0	33,2	33,2	5,64	754	0,712	14400	325	102	102,0	42,6	42,6
1D														
Prov:	30 Hz	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	30 Hz	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	650	208,0	201,0	89,6	86,6	5,70	1280	0,637	3,42E+04	540	226,0	234,0	97,5	101,0
15	460	115	113,0	51,3	50,4	5,70	906	0,802	4,86E+04	360	98,3	103,0	46,7	48,9
Frekvens: 20 Hz														
	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	650	217	184,0	93,7	79,5	5,70	1280	0,696	3,96E+04	520	192,0	178,0	92,5	85,8
15	450	110	91,9	48	40,1	5,70	886	0,965	2,76E+04	320	119	112,0	52,2	49,0
1E														
Prov:	30 Hz	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	30 Hz	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	650	208,0	201,0	89,6	86,6	5,70	1280	0,637	3,42E+04	540	226,0	234,0	97,5	101,0
15	460	115	113,0	51,3	50,4	5,70	906	0,802	4,86E+04	360	98,3	103,0	46,7	48,9
Frekvens: 20 Hz														
	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	LVE	UTM	Resultat	Resultat	UTM	Resultat
Temp. °C	τ (kPa)	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	G*2 mm	G*3mm	τ (kPa)	N _r	Y-ini	ε-ini	N _r
10	650	217	184,0	93,7	79,5	5,70	1280	0,696	3,96E+04	520	192,0	178,0	92,5	85,8
15	450	110	91,9	48	40,1	5,70	886	0,965	2,76E+04	320	119	112,0	52,2	49,0

Bilaga 7 Diagram över utmattningstester

