

Asfalts egenskaper beroende av packningsförfarande – en analys

Martin Holmqvist
Anders Gudmarsson

2009



Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Teknik och samhälle
Trafik och väg

Asfalts egenskaper beroende av packningsförfarande – en analys

Martin Holmqvist
Anders Gudmarsson

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,
Institutionen för Teknik och samhälle,
Trafik och väg, 182

Martin Holmqvist
Anders Gudmarsson

Asfalts egenskaper beroende av packningsförfarande – En analys

2009

Ämnesord:

Dynamisk styvhetsmodul, indirekt pressdragprovning, resonansfrekvensmätningar, packning

Referat:

För att undersöka och jämföra resultaten från Marshallpackade provkroppar med en ny packningsmetod i Peab Asfalts laboratorier. Studien syftar till att utvärdera styvhetsmodulen hos provkroppar med samma massa packade genom olika metoder i laboratorium till samma skrymdensitet och hålrum för att fastställa om Marshallpackad asfaltmassa ger en annan styvhet än massa packad med vält. Resultaten visar att Marshallpackade provkroppar har en högre styvhet än de som packas enligt metoden för platttillverkning

English title:

Analysis of asphalt properties depending on compaction methods

Citeringsanvisning:

Martin Holmqvist och Anders Gudmarsson, Asfalts egenskaper beroende av packningsförfarande – En analys. Lund, Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2009. Thesis. 182

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

Department of Technology and Society
Lund Institute of Technology
Traffic and Road
Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Förord

Denna rapport är ett resultat av ett examensarbete som utförts vid Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Peab Asfalt AB. Under arbetets gång har vi stött på en rad problem som hade kunnat göra examensarbetet till ett oändligt stort projekt. Att istället avgränsa en rapport är en svår uppgift, eftersom man alltid kan göra jobbet mer fullständigt. Tiden är naturligtvis det stora hindret och med förutsättningarna som man har inför ett sådant här projekt är vi mycket nöjda. Det är dock många som har del i vår rapport, mer eller mindre, och alla har varit till stor nytta. Av denna anledning vill vi framförallt tacka våra handledare Nils Rydén och Cathrine Johansson, men även alla övriga inblandade från Peab Asfalt AB.

Vi vill även tacka Uffe Mortensen på Pankas AS för tipsen och för att vi fick göra ett givande studiebesök på deras laboratorium. Även Christer Nilsson från Skanska har gett värdefulla tips.

Lund 2009-01-23

Anders Gudmarsson

Martin Holmqvist

Fotograf till samtliga foton är Martin Holmqvist.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	8
Abstract	10
1 Inledning	12
1.1 Bakgrund	12
1.2 Syfte	12
1.3 Arbetsbeskrivning av examensarbete	13
1.4 Avgränsningar	13
2 Litteraturstudie	14
2.1 Penetrationsbitumen	14
2.2 Polymermodifierat bitumen	14
2.3 Viskositet	14
2.4 Poisson's tal	14
2.5 Dynamisk styvhetsmodul	15
2.6 Indirekt pressdragprovning	16
2.7 Seismik (resonansfrekvensmätningar)	16
2.8 Använda metoder	17
2.8.1 Provtagning vid kvalitetskontroll av asfaltmassa (FAS Metod 417-97)	17
2.8.2 Framställning av provkroppar enligt Marshall (FAS Metod 414-01)	17
2.8.3 Skrymdensitet hos provkropp med lågt hålrum (FAS Metod 427-98)	18
2.8.4 Bestämning av skrymdensitet och hålrumshalt hos dränerande asfaltbetong (FAS Metod 448-98)	19
2.8.5 Bestämning av kompaktensitet med pyknometer och vatten (FAS metod 425-00) ..	19
2.8.6 Beräkning av hålrumshalt (FAS Metod 413-97)	20
2.8.7 Bindmedelshalt enligt ultraljudsmetoden (FAS Metod 480-02)	20
2.8.8 Kornstorleksfördelning (FAS Metod 221-02)	20
2.8.9 Test applying indirect tension to cylindrical specimens (SS-EN 12697-26:2004 Annex C)	21
3 Metod och genomförande	23
3.1 Förstudie – provpackning av asfaltplattor	23
3.1.1 Utförande	24
3.1.2 Utvärdering	25
3.1.3 Åtgärder	26
3.1.4 Resultat	27
3.2 Packning av plattor för fortsatt studie	28
3.2.1 Provberedning	28
3.2.2 Utrustning	28
3.2.3 Provmängd	30
3.2.4 Åtgärder inför packning	30

3.2.5 Temperatur vid packning	31
3.2.6 Utförande av packning	32
3.2.7 Sammanställning av genomförda packningar	32
3.2.8 Val av provkroppar för fortsatt provning	34
3.3 Försök med seismik och indirekt pressdragprovning.....	35
3.3.1 Indirekt pressdragprovning i Universal Testing Machine – 25kN enligt SS-EN12697-26:2004 Annex C.....	35
3.3.2 Seismik.....	36
4 Resultat.....	37
4.1 Skrymdensiteter på valda provkroppar	37
4.2 Hålrumsalter	38
4.3 Hålrumsskillnader i provkropparna.....	40
4.4 Styvhetsmoduler framtagna med Universal Testing Machine-25kN	41
4.4.1 Styvhetsmoduler för ABT 11 70/100.....	41
4.4.2 Styvhetsmoduler för ABT11 Swebit 50.....	43
4.4.3 Jämförelse mellan Swebit 50 och 70/100.....	44
4.5 Styvhetsmoduler framtagna med resonansfrekvensmätningar	45
4.6 Arbetsförfarandebeskrivning för tillverkning av asfaltplattor.....	46
4.6.1 Förberedelser	46
4.6.2 Utrustning.....	46
4.6.3 Provberedning	46
4.6.4 Vålthastighet under packning.....	47
4.6.5 Utförande av packning	47
5 Diskussion.....	48
6 Slutsats och rekommendationer	52
7 Referenser	53
7.1 Skriftliga källor	53
7.2 URL – källor	54
7.3 Muntliga källor.....	54
Appendix 1 – Densitet och dimensioner	
Appendix 2 – Resultat från indirekt pressdragprovning	
Appendix 3 – Resultat från resonansfrekvensmätningar	

Sammanfattning

Packning av asfalt är ett av de viktigaste arbetsmomenten för att få rätt egenskaper och kvalitet på en asfaltbeläggning. För att veta hur mycket en asfaltbeläggning ska packas används förhållandet mellan asfaltens vikt och volym, det vill säga skrymdensiteten. Den erhållna skrymdensiteten på packad beläggning i fält jämförs med skrymdensiteten hos en laborierpackad asfaltmassa av samma typ för att kontrollera att packningsgraden är tillfredställande.

På Peab Asfalts laboratorier packas för närvarande asfaltmassa enligt Marshallmetoden. Denna packningsmetod ger dock inte samma packningsarbete som erhålls vid packning av asfaltmassa med hjälp av vält i fält. Av denna anledning gjordes en studie på packning av asfaltplattor med vält i ett laboratorium. Poängen med att tillverka en platta är att den kan användas till många olika analyser och att den efterliknar fältpackad asfalt. I detta projekt användes plattan till att göra hålrumsanalyser, resonansfrekvensmätningar och indirekt pressdragprovningförsök på borrhålor som borrades ur plattan.

De provkroppar som borrats ur plattorna och där sedan toppen och botten sågats av visar tydliga resultat på ett tätare mittparti av provkroppen. Vidare kontroll av dessa toppar från provkropparna visar att det misstänka högre hålrummet i toppen av plattan stämmer väl. Detta fenomen visar sig delvis bero på att asfaltmassan svalnar av i toppen. När asfalten svalnar av blir den svårare att packa och hålrummet blir således högre. En annan anledning kan vara att en asfaltmassa som packas i fält kan modelleras med fria randvillkor, vilket tillåter en inre rörelse i massan under packningen. Denna rörelse gör att det blir lättare att packa massan men samtidigt blir det svårare att packa den homogent, vilket kan leda till öppnare beläggning i toppen. Vid packning enligt Marshall får inte massan dessa fria randvillkor eftersom kanterna på formen motverkar rörelse i massan. Massan blir då svårare att packa men den blir även mer homogen. Detta är troligtvis en anledning till varför de Marshallpackade provkropparna har jämnare hålrum i kroppen än de platttillverkade.

Vidare gjordes resonansfrekvensmätningar och indirekt pressdragprovningförsök i Universal Testing Machine-25 för att jämföra skillnader i styvhet mellan de två packningsmetoderna, Marshallpackning och platttillverkning med vält. Analyserna gjordes även för att jämföra två massor med olika typer av bindemedel. Den ena massan var av typen ABT 11 70/100 och den andra var ABT 11 Swebit 50 som är ett 50/70 bitumen som modifierats med polymerer.

Skillnaden i provkropparnas styvhet mellan de två olika packningsmetoderna är tydlig för 70/100 bitumenet. Att de Marshallpackade provkropparna får en högre styvhet kan bero på att en Marshallpackad provkropp blir inspänd i sin form på ett annat sätt än en platttillverkad provkropp. Detta tillsammans med att kontrollen på packningstemperaturen på Marshallprovkroppar gör att dess styvhet blir högre än asfalt packad i fält eller platttillverkade provkroppar.

När det gäller Swebit 50 ligger styvhetsmodulen för Marshallpackade samt platttillverkade provkroppar däremot mycket nära varandra. Marshallprovkropparna har högre hålrum än de platttillverkade, så vid samma hålrum skulle styvheten troligtvis varit lite större hos de Marshallpackade, men detsamma gäller även för 70/100 bitumenet och där är ändå Marshallprovkropparna styvare. Det skulle kunna tyda på att det polymermodifierade bitumenet klarar av att göra massan styvare i fält trots de fria randvillkoren och den ojämna hålrumsfördelningen. Om bitumenet är polymermodifierat blir kanske styvheten i fält mer lik den styvhet som Marshallpackade provkroppar får, än vi samma jämförelse med konventionellt bitumen.

Dessutom kan en tydlig skillnad ses mellan massorna med de två olika typerna av bindemedel. Massan med 70/100 bitumenet ligger klart lägre i styvhetsmodul för såväl plattpackade provkroppar som Marshallpackade gentemot Swebit 50 provkropparna. Eftersom Swebit 50 har det hårdare 50/70 bitumenet som basbitumen blir det dock inte en rättvis jämförelse, men det ger ändå en fingervisning på vad polymermodifiering kan göra för en massas styvhet.

Resultaten från analyserna kan tolkas som att Marshalltillverkning av provkroppar inte är en bra metod när syftet är att göra en provkropp så fältliknande som möjligt. Istället borde kanske branschen använda en mer utvecklad plattmetod som ett komplement till Marshallmetoden vilket i sin tur skulle ge laboratorierna en möjlighet att få mer verklighetslik provning.

Abstract

Compaction of asphalt is one of the most important tasks in order to get good properties and quality on a pavement. In order to know how much a pavement should be compacted, the relationship between the average asphalt's weight and volume is used. The received density on a pavement in the field is compared with the density at a laboratory compacted asphalt mass of the same type in order to check that the air voids is satisfying.

At Peab Asphalt's laboratories asphalt are currently compacted according to the Marshall method. This compaction method however doesn't give the same compaction work that is received from compaction in the fields with a roller. For this reason a study was done on compaction of asphalt plates with a roller in a laboratory. The purpose of producing an asphalt plate is that it can be used for many different tests and that it imitates field compacted asphalt. In this project, the asphalt plate was used to determine the air void content in the specimens, impact resonance tests and indirect tension tests on cores that were drilled from the asphalt plate.

The specimens drilled from the asphalt plates, where the top later where sawn off, shows clear results of fewer air voids in the middle of the specimens. Further analysis of those tops from the specimen shows that the suspected high cavity from the top of the plate agrees well. This phenomenon shows itself partial to depend on that the asphalt mass cools off in the top during compaction. When the asphalt cools off it becomes more difficult to compact and the cavities becomes higher.

Another reason can be that the asphalt mass during compaction in the field don't get the same horizontal support as Marshall compacted asphalt. This allows an inner movement in the asphalt mass compacted in the field. This movement makes it easier to get the asphalt mass compacted but it gets harder to compact it homogeneous which can lead to that the pavement gets more open in the top.

During compaction with the Marshall method the asphalt mass instead get this horizontal support from the edges of the form. This makes the mass more difficult to compact but it also makes it more homogeneous. This is probably one reason why the Marshall compacted specimens gets a more even air void than the ones compacted with a roller.

Impact resonance tests and indirect tension tests were performed in order to compare the dynamic modulus between the two compaction methods, compaction with the Marshall method and roller compaction in the laboratory. The analyses were also done in order to compare two masses with different types of bitumen. The types of the mixtures were ABT 11 70/100 and ABT 11 Swebit 50 that is 50/70 bitumen that has been modified with polymers.

The difference in dynamic modulus between the specimens with two different types of compaction methods is obvious for 70/100 bitumen. Why the Marshall compacted specimens gets a higher dynamic modulus might depend on that the Marshall compacted specimen can't move in the x-direction during compaction unlike the plate produced specimen. This along with that the control on the temperature during compaction of Marshall specimens is much higher than out in the field.

The dynamic modulus results for Swebit 50 compacted with the Marshall method and the dynamic modulus for Swebit 50 compacted with the roller are very close to each other. The Marshall compacted specimens have a higher cavity than the specimens compacted with a roller. At the same cavity the dynamic modulus in the Marshall specimens probably would have been higher than the roller compacted specimens, but the relationship also applies for 70/100 bitumen and still the Marshall specimens have a lot higher dynamic modulus than the roller compacted specimens. That could be a hint of that the roller compacted polymer modified

bitumen manage to obtain a closer dynamic modulus to the Marshall specimens than the 70/100 bitumen.

A clear difference can be seen between the asphalt masses with different types of bitumen. The mass with 70/100 bitumen has clearly a lower dynamic modulus for both of the different compacted specimens than the polymer modified bitumen.

Since Swebit 50 has the harder 50/70 bitumen the comparison really can't be made, but it nevertheless gives a hint on what polymer modification can do for a mass's dynamic modulus.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Packning av asfalt är ett av de viktigaste arbetsmomenten för att få rätt egenskaper och kvalitet på en asfaltbeläggning. Detta på grund av att packningen av asfalt påverkar nästan alla egenskaper som gör en beläggning hållbar.

Ju bättre packningsgrad på en asfaltbeläggning desto bättre motståndskraft mot nötning, åldrande, utmattning, plastisk deformation och inverkan av vatten får beläggningen. (FAS Asfaltbok, 1995)

Vid packning av en asfaltmassa minskar dess volym genom att asfalten trycks ihop, det vill säga att tjockleken på massan minskar, medan massans längd, bredd och vikt hålls konstanta. För att veta hur mycket en asfaltbeläggning ska packas används därför förhållandet mellan dess vikt och volym, det vill säga skrymdensiteten.

Den erhållna skrymdensiteten på packad beläggning jämförs med skrymdensiteten hos en laboratoriepackad asfaltmassa enligt Marshall av samma typ för att kontrollera att packningsgraden är tillfredställande. Där begreppet packningsgrad definieras av kvoten mellan skrymdensiteten hos en packad beläggning på väg och skrymdensiteten hos en Marshallpackad provkropp. Det är alltså önskvärt att den packade beläggningen får samma skrymdensitet som den Marshallpackade vilket då innebär en packningsgrad på 100 %.

Den lägsta tillåtna packningsgraden får variera mellan 97 – 99 % för olika arbeten. (FAS Asfaltbok, 1995)

Vid 100 % packningsgrad får alltså den vältpackade asfalten samma egenskaper som den Marshallpackade asfalten vad gäller skrymdensitet och förhoppningsvis även hållrum. Det misstänks dock att styvheten i massorna blir olika beroende på vilket packningsförfarande som används. Detta trots att de två olika packade massorna har samma skrymdensitet och hållrum. Det misstänks vidare att massan packad enligt Marshallmetodiken erhåller en större styvhet än asfalt packad med vält. (Lars Jansson, 2008-05-29)

På Peab Asfalts laboratorier packas för närvarande asfaltmassa enligt Marshallmetoden. För att kunna packa en mer fältliknande asfaltprovkropp på laboratorium bör Marshallmetoden kompletteras med en ny metod. Denna nya metod skall sedan jämföras med Marshallmetoden för att utvärdera skillnaderna mellan dem.

1.2 Syfte

Att utvärdera styvhetsmodulen hos provkroppar som packas enligt två olika metoder. Provkropparna skall bestå av samma massa och packas till samma hållrum för att fastställa om Marshallpackad asfaltmassa ger en annan styvhet än massa packad med vält.

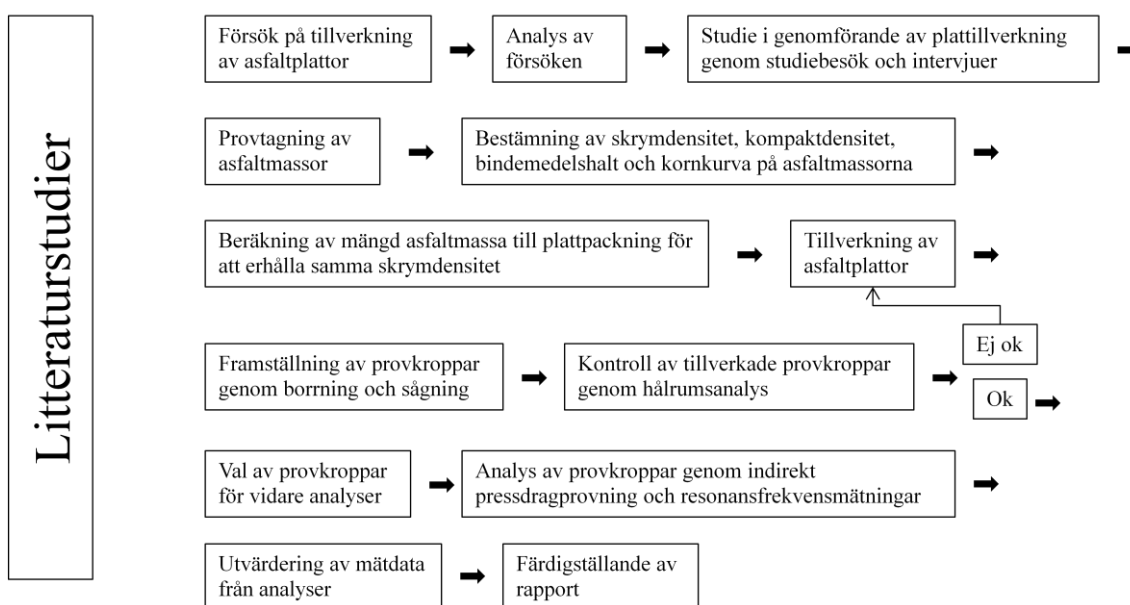
Att ta fram en beskrivning av arbetsförfarandet för tillverkning av asfaltplattor i laboratorium som kan ge mer fältliknade resultat, där svårigheten är att få massan jämnt fördelad med jämn och rätt packningsgrad.

1.3 Arbetsbeskrivning av examensarbete

Tillverkat provkroppar med hjälp av Marshallstamp samt plattor med hjälp av en två ton tung vält i laboratorium till samma skrymdensitet och hålrum.

Provkroppar borrades ut från plattorna och skrymdensitet, hålrumshalt och styvhetsmodul bestämdes på respektive provkropp. Styvhetsmodulen för provkropparna beräknades utifrån resonansfrekvensmätningar och genom indirekt pressdragprovning. För att få kunskap till dessa beräkningar gjordes en litteraturstudie där tidigare försök av samma slag analyserades. Dessa resultat jämfördes med resultat från de Marshallpackade provkropparna. Två olika massor användes vilket innebar att resultaten från de två olika packningsförfarandena utvärderades i två fall. Dessutom gjordes en jämförelse mellan de två massorna eftersom den ena massan innehöll polymermodifierat bitumen och den andra massan innehöll vanligt penetrationsbitumen. Genom att studera, undersöka och prova att packa plattor som gav bra resultat sammanställdes slutligen en arbetsförfarandebeskrivning för tillverkning av asfaltplattor i laboratorium.

Flödesschema över examensarbetet



Figur 1.1 Arbetsgång under examensarbetet.

1.4 Avgränsningar

Under detta examensarbete har vissa avgränsningar varit nödvändiga att göra beroende på att ett examensarbete utförs under en begränsad tid. Följande avgränsningar har gjorts:

- Asfaltmassan till analyserna blandades på ett asfaltverk istället för egen tillverkning
- Jämförelser gjordes av två massor med olika basbitumen istället för två massor med samma basbitumen.
- Packningsmetod var redan vald av Peab Asfalt inför examensarbetet.
- Platttillverkad massa kunde inte jämföras med ett referensobjekt.
- Vid försöken med UTM-25 mättes endast en diagonal istället för två, som metoden önskar.

2 Litteraturstudie

2.1 Penetrationsbitumen

Bitumen är en högmolekylär kolvätesblandning vars tillverkning sker genom destillation som är en del i raffineringprocessen. Destillation innebär att ämnen med olika kokpunkter skiljs från varandra.

Bitumenet är ett så kallat termoplastiskt material vilket innebär att det blir mjukare vid högre temperatur och hårdare vid lägre temperatur och denna egenskap är upprepningsbar.

Bitumenet delas upp i grupper som namnges efter dess penetrationsvärde vid 25 °C, exempel på sådana grupper är 160/220- samt 70/100- bitumen. Penetration är ett konsistensmått och penetrationstalet bestäms genom att en nål sänks ner i ett bitumenprov. Att det är ett 70/100 bitumen betyder då att penetrationen ligger mellan 70 och 100 tiondels mm. Ett högre penetrationsvärde betyder att bitumenet är mjukare och ett lägre värde betyder ett hårdare bitumen.

Bitumenet blandas med varmt och torrt stenmaterial under en kort tid som ligger runt 60 sekunder \pm 30 sekunder. Om bitumenet blir för kallt vid blandningen så blir viskositeten för hög i bitumenet och stenarnas täckningsgrad blir lägre. (FAS Asfaltbok, 1995)

2.2 Polymermodifierat bitumen

Ett vanligt bitumen blir ett så kallat polymermodifierat bitumen efter inblandning av polymerer. När detta sker kommer polymerens egenskaper att tas efter av bitumenet. Detta innebär att det modifierade bitumenet får egenskaper som en polymer och erhåller då en ökad hållbarhet och styrka. (The Asphalt Handbook, 2007)

Bindemedlet erhåller dessutom egenskaper som gör att det blir hårdare än ett konventionellt bitumen vid högre temperaturer och att det inte spricker vid lägre temperaturer, det vill säga är mjukare vid låga temperaturer. (FAS Asfaltbok, 1995)

Vid ytterligare jämförelse mellan ett traditionellt bitumen och ett polymermodifierat kan det konstateras att risken för kemikalierelaterade skador minskar på den modifierade massan. Ett polymermodifierat bitumen har dessutom en högre elastisk återgång än ett vanligt bitumen. Återgången på ett bitumen är ett mått på dess elasticitet och detta mäts genom att ett bitumenprov töjs, kapas och återgången mäts. Ett konventionellt 70/100 bitumen har en återgång på ca 5 % som är att jämföra med ett minimikrav på 50 % för ett polymerbitumen. (Nordiskt vägforum, 2009)

Det finns många olika typer av polymerer och alla har sina unika egenskaper. Olika polymerer kan därför väljas för att ge bitumenet olika egenskaper. (Oscarsson, 2007)

2.3 Viskositet

Viskositeten hos ett material är ett mått på dess motstånd att rinna, det vill säga den inre friktionen i materialet. Dess definition är förhållandet mellan skjuvpåkänning och skjuvhastighet. Vilken enhet som används för viskositet beror helt och hållet på vilken utrustning som använts vid undersökningen. Då bitumen är ett material som blir mer lättflytande vid högre temperatur, alltså får lägre viskositet, används en utrustning vid högre temperaturer och en annan vid lägre temperaturer. Resultatet blir två olika enheter på materialets viskositet. Ett lättflytande materials kinematiska viskositet benämns ofta med mm^2/s eller cSt (centistoke) medan ett mer trögflytande mäts i Pa·s (pascalsekunder) eller P (poise). (FAS Asfaltbok, 1995)

2.4 Poisson's tal

Poisson's tal som även kallas tvärkontraktionstalet definieras som kvoten mellan förändringen i tjocklek och förändringen i längdled hos en kropp. Om ett antal kroppar av olika material utsätts för samma tryck- eller dragkrafter kommer deras dimensioner att ändras olika mycket. Detta

beror på att de har olika Poisson's tal. Poisson's tal är alltså en materialkonstant som beskriver hur ett material reagerar på tryck- och dragkrafter. (www.lth.se, 2008-11-25)

Vad gäller asfalt blir Poisson's tal olika beroende på vilken temperatur och frekvens asfalten utsätts för. (Rydén och Johansson, 2008) Detta beror på att asfalt får olika materialegenskaper vid olika temperatur och frekvens. (Momen, 2004)

2.5 Dynamisk styvhetsmodul

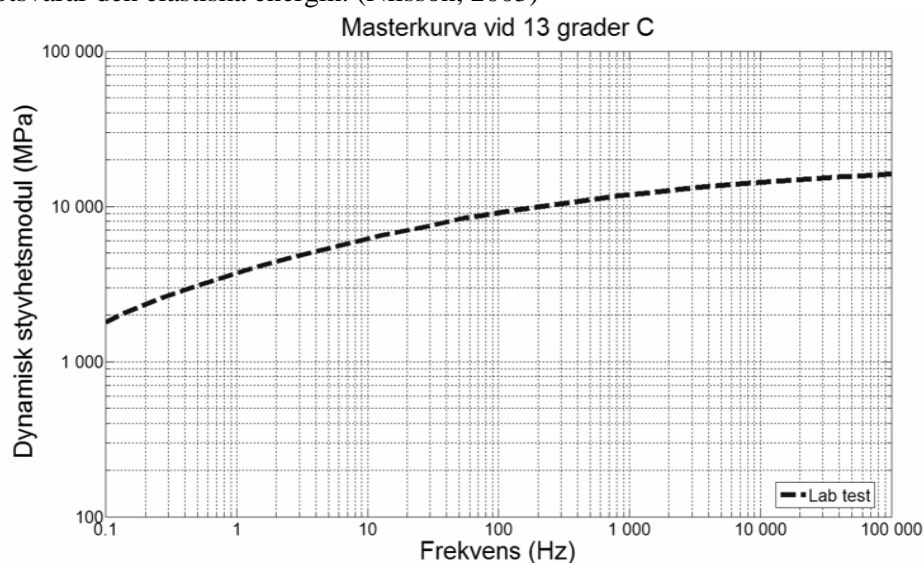
Den dynamiska styvhetsmodulen, $|E^*|$ är en av de viktigaste parametrarna i undersökandet av asfaltens förmåga att stå emot deformationer och utmattningssprickor.

Detta på grund av den dynamiska styvhetsmodulens förmåga att representera asfaltens spännings – töjningsbeteende som funktion av temperatur och belastningsfrekvens (Kim och Kweon, 2006).

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, där E = elasticitetsmodul [Pa], σ = spänning [kN/m^2] och ε = töjning [%].

Asfalt är ett viskoelastiskt material vilket innebär att den viskösa dämpningen och dynamiska styvhetsmodulen är beroende av belastningsfrekvensen och temperaturen. Ju lägre temperatur och ju högre belastningsfrekvens desto större dynamisk styvhetsmodul och desto mindre blir den viskösa dämpningen. (Rydén och Johansson, 2008)

En komplex styvhetsmodul används för att ta hänsyn till både styvhet och dämpning i en och samma parameter där den imaginära delen motsvarar den viskösa energin och realdelen motsvarar den elastiska energin. (Nilsson, 2003)



Figur 2.1 Exempel på den dynamiska styvhetsmodulens frekvensberoende för asfalt. (Rydén, 2006)

2.6 Indirekt pressdragprovning

Indirekt pressdragprovning är en av de vanligaste metoderna för att bestämma den dynamiska styvhetsmodulen hos asfalt.

Metoden är en oförstörande metod som går ut på att ge en provkropp lastpulser som motsvarar verklig trafiklast. (Whitmoyer och Kim 1994)

En vertikal last belastar provet och den horisontala deformationen mäts på varsin sida av provet genom två LVDT (Linear Variable Differential Transformer) givare. Genom att hålla den horisontella deformationen styrd kan storleken på de vertikala lastimpulserna regleras så att provkroppen inte förstörs. Den högsta uppmätta vertikala lasten och det uppmätta värdet på den horisontala deformationen används därefter tillsammans med provkroppens tjocklek och Poisson's tal till att bestämma provkroppens styvhetsmodul. (SS-EN 12697-26:2004 Annex C)

Fördelen med att använda indirekt pressdragprovningmetoden är att man kan använda provkroppar från vägar och laboratorium. I andra metoder kan det vara svårt att använda provkroppar från vägar då vissa metoder, som till exempel direkt tryck- och dragtest, ställer krav på provkroppens geometri som inte går att uppfylla med prover tagna från väg. Dessutom är spänningstillståndet i mitten av en provkropp mycket likt det spänningstillstånd som råder i underkant av asfaltlagren, där spänningstillståndet verkar i längsriktningen och i tvärled vid ett vertikalt tryck. (Momen 2004)

2.7 Seismik (resonansfrekvensmätningar)

Metoden går ut på att ljudvågor skickas genom ett material och hastigheten på ljudvågorna mäts. Med hjälp av hastigheten så kan styvhetsmodulen för asfalten, vid olika frekvenser och temperaturer, tas fram. Dessa resonansfrekvensmätningar kan användas i laboratorium för att ta fram den dynamiska styvhetsmodulen i asfaltprovkroppar med en symmetrisk geometri. (Rydén, 2006) En provkropp har ett oändligt antal olika svängningsmoder och vid varje svängningsmod kan en styvhetsmodul som representerar just den resonansfrekvensen tas fram. (Rydén och Johansson, 2008)

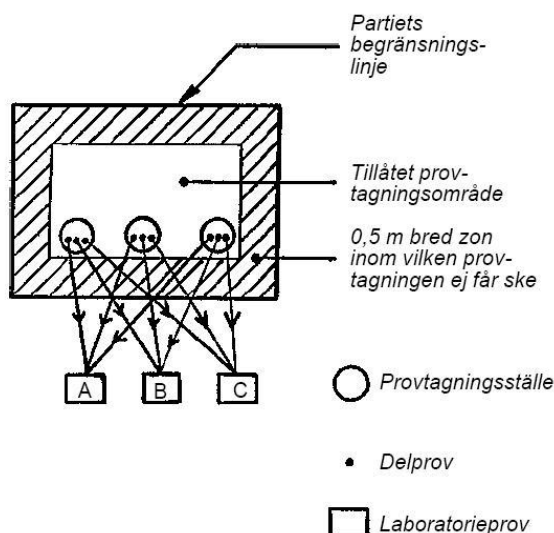
Denna metod är helt oförstörande och resultaten har en hög repeterbarhet. (Kim och Kweon, 2006)

2.8 Använda metoder

För att genomföra försöken som krävs för att ta fram skrymdensitet, hålrum och styvhetsmoduler för de olika packade massorna på ett korrekt sätt har FAS Metoder och SS-EN metoder använts. Nedan följer en beskrivning av respektive metod som har varit nödvändig för arbetet.

2.8.1 Provtagning vid kvalitetskontroll av asfaltmassa (FAS Metod 417-97)

Med hjälp av ett provtagningsrör tas ett laborierprov ut från tre provtagningspunkter från provtagningsområdet, se figur 2.2.



Figur 2.2 Provtagningsområde med de tre laborierproven A, B och C. (FAS Metod 417-97)

Provtagningsröret trycks in horisontellt och så långt att hela röret fylls med asfaltmassa. Massan töms i ett emballage som rymmer minst 7,5 liter och där öppningen är så stor att provröret kan tömmas utan att det blir spill. För att fylla emballaget genomförs denna procedur alltså från tre olika provtagningsställen inom provtagningsområdet. (FAS Metod 417-97)

2.8.2 Framställning av provkroppar enligt Marshall (FAS Metod 414-01)

Enligt FAS 414-01 kan massa med största kornstorlek mindre än 17 mm packas i en instampningsform med en diameter på 101,6 mm. Övrig massa skall packas i en form med diameter 150 mm. I formen ska det tillsättas den mängd asfalt som ger en färdigpackad provkropp en höjd på $63,5 \pm 5$ mm. Asfaltmassan packas genom en fallhammare som faller på en stampfot. Dessa ska ha en specifik vikt beroende på instampningsformens diameter. Fallhöjden för hammaren är bestämd till 460 ± 3 mm oberoende instampningsformens diameter.



Figur 2.3 Marshallstamp.

Massan ska packas med ett visst antal slag, normalt 50 stycken på var sida. Dessa 50 slag skall utföras inom en tidsram på 50 – 70 sekunder. Packningen ska utföras vid den temperaturen då bindemedlet i massan har en viskositet på $200\text{mm}^2/\text{s}$.

Med hjälp av en Marshallprovkropp kan skrymdensiteten i en packad asfaltmassa bestämmas genom FAS Metod 427. (FAS Metod 414-01)

2.8.3 Skrymdensitet hos provkropp med lågt hålrum (FAS Metod 427-98)

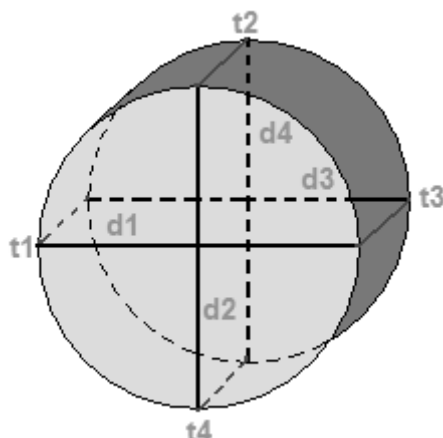
Skrymdensiteten, γ hos en provkropp bestäms genom att multiplicera provets torra vikt, m_1 med vattnets densitet, ρ och sedan dividera detta med skillnaden av det vattenlagrade provets vikt i luft, m_2 och det vattenlagrade provets vikt i vatten, m_3 .

$$\gamma = \frac{m_1 \times \rho}{m_2 - m_3}$$

Provkroppens och vattnets temperatur ska vara mellan 20 – 25 °C vid genomförandet.

Provkroppen vägs först torr, därefter sänks den ner i vatten där den ska lagras i 3 – 5 minuter innan kroppen vägs i vattnet. När vikten är registrerad tas kroppen ur vattnet och vägs avtorkad i luft. (FAS Metod 427-98)

2.8.4 Bestämning av skrymdensitet och hålrumsinhalt hos dränerande asfaltbetong (FAS Metod 448-98)



Figur 2.4 Diametrar och tjocklekar på en provkropp.

Metoden går ut på att volymen, för en Marshalltillverkad, FAS Metod 414, eller en uppborrad provkropp, fås genom mätning av provkroppen med skjutmått. Vanligtvis används denna metod för bestämning av skrymdensiteten hos en dränerande asfaltbetong.

Alla diametrar, d1, d2, d3 samt d4 mäts och medelvärdet beräknas. Samma sak görs med tjocklekarna t1, t2, t3 och t4.

För att erhålla den sista parametern som behövs för beräkning av skrymdensiteten måste provkroppen vägas torr.

Sedan beräknas skrymdensiteten med hjälp av följande formel:

$$\gamma = \frac{4000m}{(\pi t_m d_m^2)}$$

Där

m = provets torrsvikt

t_m = provets medelvärde av tjockleken

d_m = provets medelvärde av diametern

(FAS Metod 448-98)

2.8.5 Bestämning av kompaktdensitet med pyknometer och vatten (FAS metod 425-00)

Kompaktdensiteten är oftast endast en del i ledet att bestämma hålrumsinhalt i en asfaltmassa. Den definieras som förhållandet mellan provets vikt och provets kompaktvolymer.

Utförandet går till genom att ett sönderdelat prov, som till exempel en provkropp eller en färdig massa, vägs i en pyknometer. Denna pyknometer fylls sedan med avjoniserat vatten som sedan vakuumugs under skakning för att avlägsna luftblåsor.

Denna vattenlösning tempereras i pyknometern till 25 °C och allt vägs tillsammans.

Slutligen beräknas kompaktdensiteten med hjälp av följande formel:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}}$$

Där

ρ_w = Vattnets densitet vid 25 °C

V_p = Pyknometerens volym

m_1 = Pyknometerens vikt

m_2 = Pyknometern och provets vikt

m_3 = Pyknometer + lösning + provets totala vikt

(FAS Metod 425-00)

2.8.6 Beräkning av hålrums halt (FAS Metod 413-97)

För att bestämma hålrummet hos en provkropp eller en asfaltmassa måste först skrymdensiteten samt kompaktdensiteten beräknas, enligt FAS Metod 427 eller 448 respektive 425. Med dessa parametrar givna beräknas hålrummet genom följande formel:

$$H_b = 100 \left(\frac{\rho_b - \gamma_b}{\rho_b} \right)$$

Där

ρ_b = kompaktdensiteten

γ_b = skrymdensiteten

(FAS metod 413-97)

2.8.7 Bindmedelshalt enligt ultraljudsmetoden (FAS Metod 480-02)

Bindemedelshalten i en asfaltmassa kan bestämmas genom att tvätta bort allt bindemedel från provet. Detta görs genom att tillsätta lösningsmedel och samtidigt tvätta provet med hjälp av ultraljud i en så kallade extraktionsapparat. Skillnaden mellan provets ursprungliga vikt och stenmaterialet efter tvättning blir bindemedlets vikt. (FAS Metod 480-02)

2.8.8 Kornstorleksfördelning (FAS Metod 221-02)

Kornstorleksfördelningen ser olika ut i olika typer av beläggning. Det som bestämmer hur den skall se ut är vilken önskad funktion man vill ha på den färdiga asfaltmassan. Att bestämma en asfaltmassas kornkurva är en av de vanligaste men också en av de viktigaste analyserna som görs på laboratorium. (FAS Asfaltbok, 1995)

Metoden går ut på att ett stenmaterial siktas på en rad olika storlekar av siktar i en skakapparat. En serie siktar består av siktar med kvadratiska öppningar som är stansade från 4 mm och uppåt. Från 2 mm ner till 0,063 mm används trådsiktar, se exakt gradering på x-axel i figur 2.5. Allt material som stannar på respektive sikt vägs och noteras. Kornkurvan beräknas sedan ur följande formel:

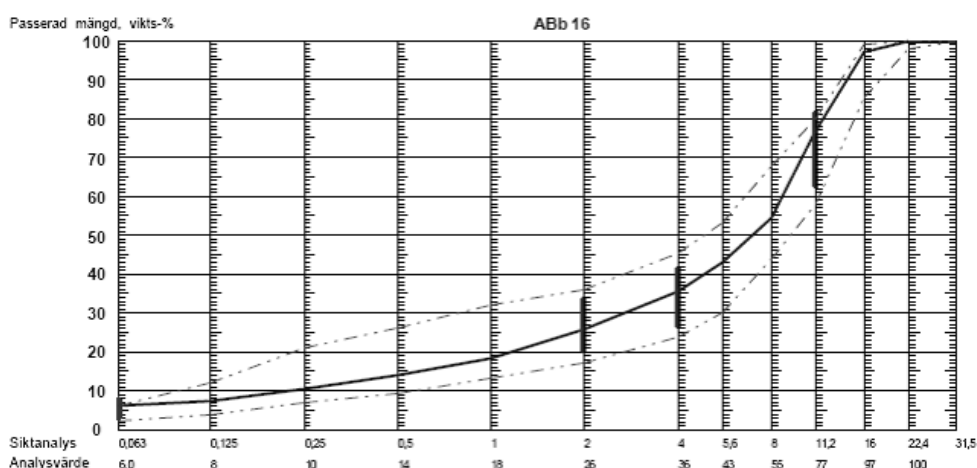
$$f_j = 100 \left(\frac{m_j}{M} \right)$$

M = Provets totala vikt

m_j = Total passerad mängd material vid respektive sikt

Det ger slutligen en kurva där den största sikten i siktserien kommer att hamna på 100 % det vill säga att allt material har passerat.

(FAS Metod 221-02)



Figur 2.5 Exempel på en kornkurva av en ABb16 massa.

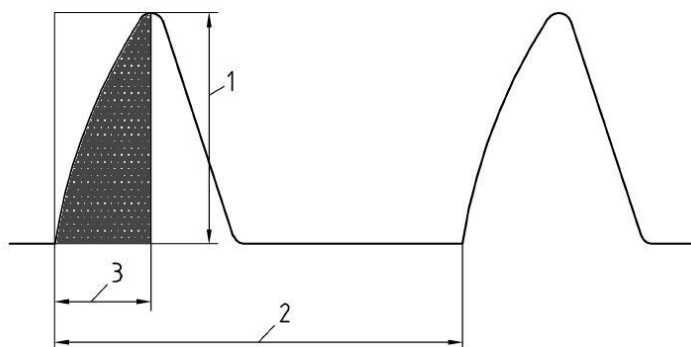
2.8.9 Test applying indirect tension to cylindrical specimens (SS-EN 12697-26:2004 Annex C)

Provkroppar som är avsedda för denna metod skall vara cylindriska med en höjd så nära den aktuella lagertjockleken som möjligt, dock ej mindre än 30 mm eller högre än 75 mm. Provets diameter får vara antingen 80, 100, 120, 150 eller 200 mm med ett spann på ± 5 mm för alla diametrar. Dimensionerna ska väljas med hänsyn till största stenstorlek i asfaltmassan.

För att provkroppen ska hålla korrekt temperatur vid provningen ska provkroppen tempereras i en temperaturkontrollerad miljö, där temperaturgivare är fästa i kärnan och på ytan av en dummyprovkropp. Denna kropp skall vara av samma asfalttyp och ha liknande dimensioner som provkroppen, som skall testas. Provkroppen har rätt temperatur när det inte skiljer mer 0,4 °C mellan ytan och kärnan, samt att testtemperaturen ligger inom $\pm 0,5$ °C av måltemperaturen. Medelvärdet mellan yt- och kärntemperaturen bestäms och registreras som provets verkliga temperatur.

Vid montering av provkroppen är det viktigt att ta hänsyn till kroppens diameter så att LVDT-givarna mäter den horisontella deformationen precis i mitten av kroppen.

Målet är att varje lastpuls ska ha en vågform ungefär enligt figur 2.6, där formen på lastpulsen påverkas av provkroppens storlek och styvhetsmodul. Om detta uppfylls kommer lastareafaktorn att bli nära kravet $0,6 \pm 0,1$. Där lastareafaktorn är förhållandet mellan den markerade delen av figur 2.6 och produkten av stigtiden och lastens topp. När denna lastareafaktor avviker från 0,6 måste styvhetsmodulen justeras enligt nedan.



Key

- 1 Peak load
- 2 Pulse repetition period
- 3 Rise-time

Figur 2.6 Form från lastpuls som visar stigtiden och lastens topp. (SS-EN 12697-26:2004 Annex C)

Styvhetsmodulen beräknas enligt följande formel:

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0,27)}{(z \times h)}$$

Där

- S_m = Den beräknade styvhetsmodulen, [MPa]
- F = Största värdet på lasten, [N]
- z = Amplituden av den horisontella deformationen, [mm]
- h = Medelvärdet av tjockleken på provkroppen, [mm]
- ν = Poisson's tal

Den beräknade styvhetsmodulen justeras till "lastareafaktorn" 0,6 genom följande formel:

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k))$$

Där

- S'_m = Styvhetsmodulen justerad till lastareafaktorn 0,6, [MPa]
- k = den uppmätta lastareafaktorn

Provkroppen skall testas på två diametrar och medelvärdet av dessa försök räknas som provkroppens styvhetsmodul om inte det andra testet skiljer mer än +10 % eller -20 % från det första. Om skillnaden skulle bli för stor så är resultatet inte godtagbart. Efter ett avslutat försök får inga ytterligare tester genom indirekt pressdragprovning utföras inom 24 timmar på den aktuella provkroppen. (SS-EN 12697-26:2004 Annex C)

3 Metod och genomförande

3.1 Förstudie – provpackning av asfaltplattor

För att kontrollera den befintliga utrustningen som sedan tidigare införskaffats till bland annat detta examensarbete utfördes provblandningar och provpackningar på tre stycken asfaltplattor. Dessa provpackningar fungerade även som en förstudie och undersökning av hur plattor packas, för att därefter komma fram till hur plattor kan packas med tillfredställande resultat. Alltså kunna packa plattor med rätt packningsgrad och med rätt fördelning av massan, det vill säga undvika separation.

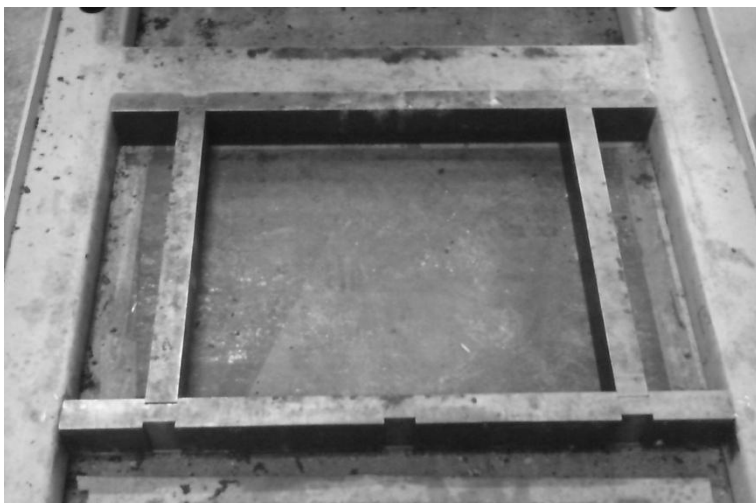
Den befintliga utrustningen bestod av en asfaltblandare, vält på ca 2 ton, stålform/packningsform som välden körde på samt en stålform till asfaltplattan.



Figur 3.1 Asfaltblandare.



Figur 3.2 Packningsform.



Figur 3.3 Stålförm till asfaltplatta.

3.1.1 Utförande

De tre massorna som blandades och packades i förstudien var ABT 16 70/100, ABS 16 70/100 och ABb 22 70/100.

Stenmaterialet som användes i provblandningarna hämtades från asfaltverket i Bjärsgård. För dessa stenmaterial hade kornkurvan för olika fraktioner analyserats tidigare och dessa resultat användes för att göra arbetsreceptet till kommande provblandningar. Utifrån arbetsrecepten vägdes respektive fraktion upp och tempererades. Fraktionerna valdes i intervallen: filler, 0-2, 2-4, 4-8, 8-11, 11-16 och 16-25.

Blandningens totalvikt bestämdes genom att använda den specifika massans skrymdensitet vid hålrumshalten enligt arbetsreceptet och multiplicera denna med asfaltformens volym.

Stenmaterialet blandades med bindemedlet i en blandare vid en temperatur på 150 °C då detta är en rekommenderad packningstemperatur för 70/100 bitumen. I blandaren tillsattes endast den exakta mängd massa som fyllde formen. När materialet var blandat tömdes all massa från blandaren i en behållare som sedan tömdes i formen genom att hälla ut all massa på en och

samma gång. Massan trycktes sedan ut i kanterna och packades lätt med en jungfru innan välten gjorde sin första överfart.

Vid vältens första överfart användes en platta ovanför massan för att massan inte skulle skjutas framför välten. När massan väl packats kant i kant med formen kunde plattan tas bort och ett ytterligare antal överfarter gjordes. I detta fall till dess att välten inte längre utförde något packningsarbete på massan.

Fem provkroppar borrades efter avsvältnade ur varje platta för att sedan användas till att bestämma hålrum i plattan.

3.1.2 Utvärdering

Vid provblandningarna visade det sig att blandaren inte fungerade korrekt då den inte kunde blanda den mängd massa som den enligt tillverkaren skulle klara av. Detta innebar att massan inte blev tillräckligt blandad. För att komma till rätta med problemen med blandaren skickades den iväg för reparation.

Målet var att packa massorna till samma viskositet som Marshallmetoden kräver. På grund av den felaktiga blandaren tillsammans med för låg utgångstemperatur blev det stora problem med att hålla tillräcklig temperatur på massan under blandningsförfarandet. Det gjorde att när själva provpackningarna genomfördes låg temperaturen på ca 110 °C vilket är för lågt för samtliga massor.

Det visade sig även att formen för asfaltplattan inte var helt optimal då det blev för mycket spill under både utfördelningen av massan och under packningsförfarandet. Med för mycket spill vid packningarna skulle det vara omöjligt att räkna ut den mängd massa som skulle ge rätt skrymdensitet.

Det insågs också att plattan fick olika mycket stöd från sidorna över plattans höjd. Den nedre delen av plattan fick stöd från stålformen medan den övre delen av plattan låg ovanför stålformen innan packningarna började och således inte fick något stöd alls i sidled under de tidiga överfarterna. Detta skulle kunna inverka på hålrummets jämnhet genom den färdiga plattan och detta var också anledningen till varför det blev för mycket spill under förfarandet.

För att göra rätt åtgärder åt den ursprungliga utrustningen genomfördes studiebesök hos danska Pankas AS där de har erfarenhet av att packa asfaltplattor.

Efter att ha observerat ett packningsförfarande konstaterades att deras metod och utrustning är mer utvecklad och enklare att genomföra än den som användes till förstudien. Pankas packar dock mindre asfaltplattor vilket förenklar hanteringen avsevärt, men det innebär också att deras plattor inte har lika många användningsområden.

Vid packningen fylldes först stålformen som syns i figur 3.4 med asfaltmassa. Därefter fördelades asfalten ut så att den blev jämn över hela formen. Ett bestämt antal stålskivor som precis fyllde hela formen ställdes därefter på asfalten. Dessa stålskivor sköt, efter utplaceringen, upp en bit över stålformen.

Ett hjul rullade därefter automatiskt över stålskivorna i en bestämd konstant hastighet under hela förloppet. Hjulet sänktes successivt under packningsförfarandet tills det att plattan fick avsedd höjd som var när stålskivorna slutligen kom ner i fas med stålformen. För att reglera höjden på asfaltplattorna kunde botten i stålformen höjas eller sänkas.



Figur 3.4 Pankas packningsutrustning med stålform och packningshjul.



Figur 3.5 Stålskivor som placeras på asfalten.

Fördelar med Pankas metod är att det inte blir något spill av massan tack vare utformningen av formen med höga kanter. Det vill säga att kanterna på formen är högre än den slutliga plattans höjd vilket innebär att allt spill undviks. De högre kanterna förenklar även utfördelningen av massan så att separationer kan undvikas och kanterna ger dessutom stöd för hela massan i sidled även vid de tidiga överfarterna.

3.1.3 Åtgärder

Då tid inte fanns för att vänta in den ombyggda blandaren bestämdes istället att färdigblandad asfaltmassa från asfaltverket i Bjärsgård skulle användas till övriga packningar i examensarbetet. Tack vare detta kan moment i tillverkningsprocessen av plattor strykas. Detta gör att packningstemperaturen kommer att kunna styras mycket enklare och problemet med att packningarna sker vid för låga temperaturer kommer inte vara aktuellt.

För att åtgärda de olika problem som fanns vid packningarna kompletteras utrustningen med en inre form där dess kanter ger stöd åt all massa innan packningarna börjar och sedan även under hela förfarandet. Den inre formen läggs först på asfalten och kommer allteftersom sjunka ner med asfalten innanför den vanliga formen när välten kör över. Detta innebär att den inre formen kommer att sticka upp ca 2–3 cm vid de första överfarterna och för att kompensera detta läggs träplankor på stålskenorna där välten kör. Denna kompensation som gör att välten kommer upp i höjd är nödvändig för att inte förflytta eller skada den inre formen. Träplankorna kommer under packningens förlopp att bytas ut mot tunnare träplankor och så småningom tas bort helt.

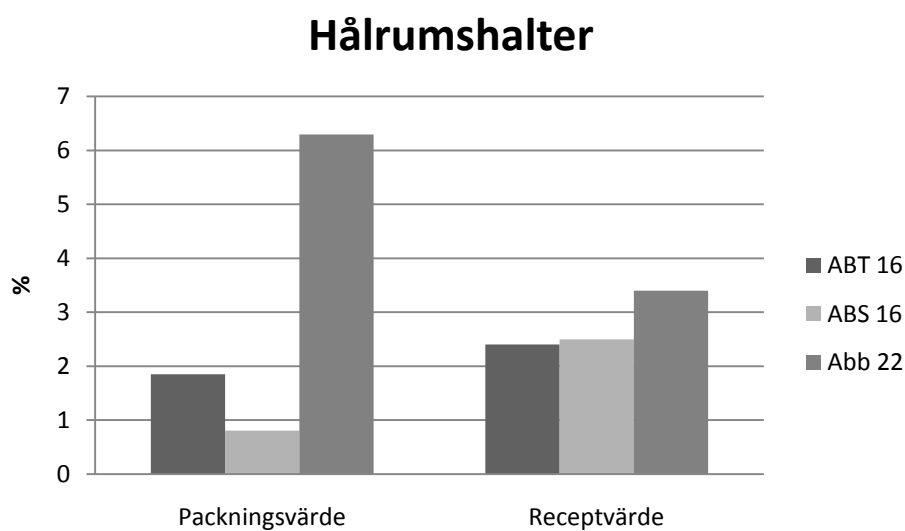
På så sätt kommer välten att successivt sänkas under packningsförfarandet enligt samma princip som används av Pankas. Genom dessa åtgärder får hela plattan alltid tryck från alla sidor och spillet kan minska avsevärt.



Figur 3.6 Yttre form med innerform.

3.1.4 Resultat

Resultatet av förstudien visas endast för att visa bristerna i nuvarande utrustning. Därför bifogas hålrumshalterna från de tre plattorna. Vid packning av ABb 22 användes dock för lite massa vilket ger ett högre hålrum.



Figur 3.7 Hålrumshalter från förstudien.

3.2 Packning av plattor för fortsatt studie

De två massorna som användes vid de fortsatta studierna var ABT 11 70/100 och ABT 11 Swebit 50. Där ABT 11 70/100 består av ett vanligt 70/100 penetrationsbitumen och där ABT 11 Swebit 50 består av ett 50/70 penetrationsbitumen som är polymermodifierat. Att dessa massor valdes berodde på att dessa fanns att tillgå på asfaltverket i Bjärsgård. Dessutom passade de bra till dessa försök då de är lättarbetade massor.

3.2.1 Provberedning

De båda asfaltmassorna togs ut enligt FAS Metod 417-97 vid asfaltverket i Bjärsgård. Bindemedelshalt och kornkurva, FAS Metod 480-02, kördes därefter på massorna för att se om de var korrekt provtagna och tillverkade samt om kornkurvorna stämde överens med den ABT 11 massa som valts vilket de gjorde. Massornas skrymdensiteter bestämdes genom att först Marshallpacka provkroppar enligt FAS Metod 414-01 och därefter bestämma skrymdensiteten på dem genom FAS Metod 427-98. Utifrån fyra Marshallpackade provkroppar togs medelvärdet på skrymdensiteten fram från respektive massa och detta medelvärde användes för att beräkna den mängd massa som användes vid respektive vältpackning. Totalt packades sedan nio Marshallprovkroppar in av respektive massasort för att ha lika många provkroppar som genererades från vältpackningen vid jämförelse efter sågning. Vid stampningen av ABT 11 70/100 uppstod dock problem med Marshallstampen vilket ledde till att endast sex provkroppar användes.

3.2.2 Utrustning

Efter den utförda förstudien bestämdes slutligen att följande utrustning krävdes:

- Packningsform enligt figur 3.2.
- Vält ca 2 ton.



Figur 3.8 Välten.

- Ytterform med de inre måtten 500 x 560 mm och med höjd på 80 mm, se figur 3.8.



Figur 3.9 Ytterform.

- Innerform med horisontella mått på 547 x 488 mm och med en höjd på 50 mm. Denna är knivformad samt endast svetsad i tre av 4 hörn, se figur 3.10.



Figur 3.10 Inre form.

- Träplankor med två olika tjocklekar 21 mm samt 28 mm.
- Termometer med noggrannheten ± 2 °C samt avläsbarhet 1 °C och med mätområde upp till 200 °C.
- Arbetshandskar som klarar att skydda även vid höga temperaturer.
- Masonitskiva behandlad med släppmedel
- Värmeskåp som klarar av minst 200 °C.

3.2.3 Provmängd

För att veta den exakta mängd asfalt som behövdes tillsättas för att få ett korrekt hålrum i den packade massan utfördes följande beräkning:

Innerformens volym benämns till V_{IF} och ytterformens innervolym till V_{YF} .
Notera att V_{IF} är själva innerformens volym och V_{YF} är volymen innanför ytterformen.

$$A_{IF,tv\ddot{a}rsnitt} = \left(\frac{4 \times 50}{2} \right) + (1,87 \times 50) = 193,5 \text{ mm}^2$$

$$V_{IF} = A_{IF,tv\ddot{a}rsnitt} \times (2B + 2L) = 193,5 \times (2 \times 547 + 488 \times 2) = 400,835 \text{ mm}^3$$

$$V_{YF} = B \times L \times H = 560 \times 500 \times 80 = 22400 \text{ mm}^3$$

Den totala volymen i formen ges då av:

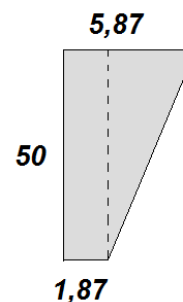
$$V_{tot} = V_{YF} - V_{IF} = 22400 - 400,835 = 21,999 \text{ dm}^3$$

För att sedan bestämma provmängden som behövs till en platta krävs följande uträkning:

$M_{platta} = V_{tot} \times \gamma_{skrym}$, där γ_{skrym} står för asfaltens skrymdensitet.

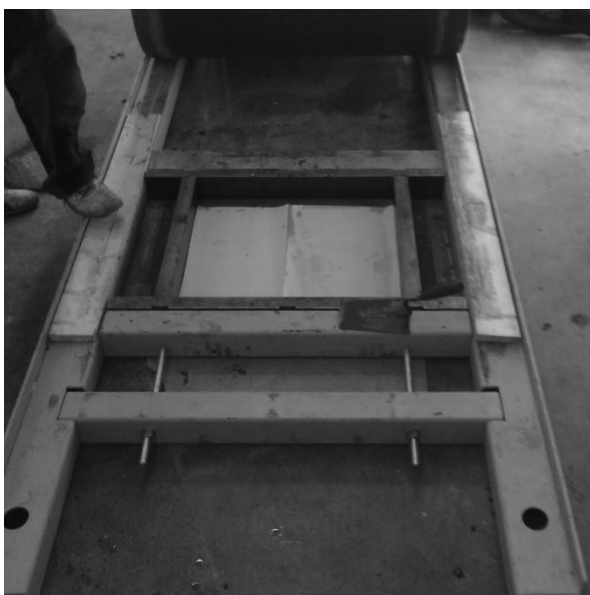
$$M_{Swebit\ 50} = 21,999 \times 2,3659 = 52,047 \text{ kg}$$

$$M_{70/100} = 21,999 \times 2,3530 = 51,764 \text{ kg}$$



3.2.4 Åtgärder inför packning

En masonitskiva behandlad med släppmedel lades i formen med den blanka och behandlade sidan uppåt för att underlätta förflyttning av den färdigpackade asfaltplattan. Därefter monterades den yttre formen på plats ovanpå masonitskivan enligt figur 3.11.



Figur 3.11 Yttre form monterad.

Den inre formen lades in i ugnen tillsammans med den uppvägda asfaltmassan för att värmas upp till samma temperatur. Detta för att undvika temperaturförluster i asfalten under packningsförfarandet. I asfaltmassan placerades en termometer som larmade när massan nått en temperatur som var 5 °C högre än den aktuella packningstemperaturen för att ta hänsyn till avsvälning av massan mellan det att den togs ut till att packningarna påbörjades. Termometern satt kvar i massan under utfördelningen av massan i formen och togs först bort precis innan packningen påbörjades. På detta sätt säkerställdes det att massan alltid packades vid avsedd temperatur.

Innan packningen påbörjades lades de tjockare av de två varianterna av träplankor på längs skenorna där välten kör. Se figur 3.11

3.2.5 Temperatur vid packning

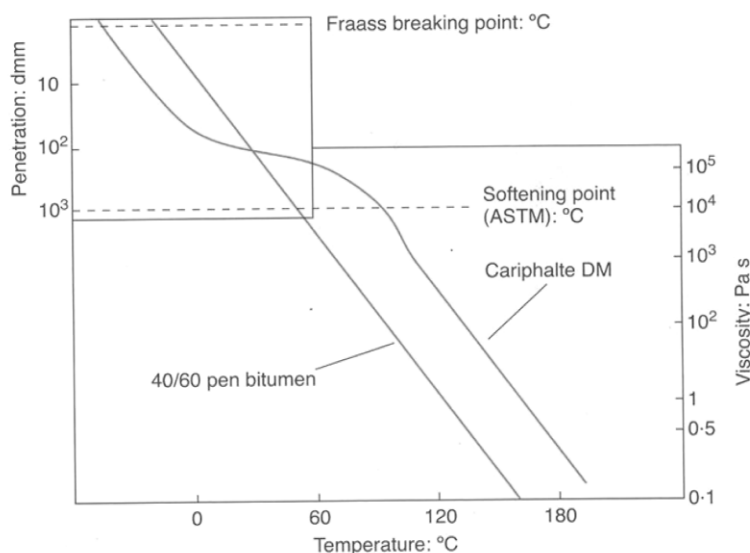
För att packa massorna vid rätt temperatur, det vill säga den temperatur som ger bindemedlet en viskositet av ca 200 mm²/s användes tabell 3.1 som är hämtad från FAS Metod 414-01.

Tabellen beskriver lämpliga packningstemperaturer för olika bitumensorter för att massorna ska packas vid rätt viskositet. Samma tabeller användes även vid Marshallpackningarna.

Noterbart är att det polymermodifierade bindemedlet inte är med i denna tabell utan istället är hämtade från The Shell Bitumen Handbook, se figur 3.12.

Tabell 3.1 Vanliga packningstemperaturer för massor utan polymermodifiering (Fas Metod 414-01).

Bitumensort	Packningstemperatur (°C)
160/220	135-145
100/150	140-150
70/100	145-155
50/70	150-160



Figur 3.12 Relation mellan temperatur och viskositet för polymermodifierad bitumen (The Shell Bitumen Handbook, 2003).

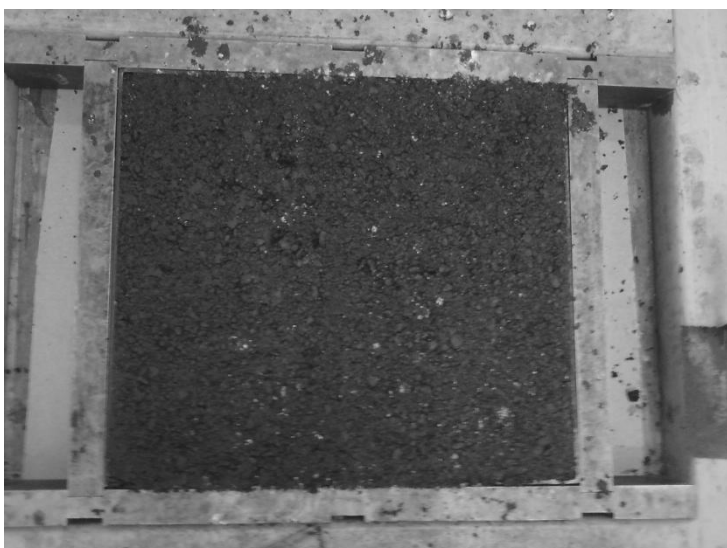
Från figuren 3.12 avläses temperaturen 170 °C för ett polymermodifierat bitumen med basbitumen 50/70, för att bitumenet skall få en viskositet på 200 mm²/s. Där 200 mm²/s är lika med 0,2 Pa's.

3.2.6 Utförande av packning

När massan nått måltemperaturen, alltså 150 °C för 70/100 bitumenet och 170 °C för Swebit 50, togs den ur värmeskåpet, hölls ner och fördelades jämnt i formen för att undvika separation. När cirka 75 % av den totala massan var i formen placerades innerformen innanför den yttre formen och på massan innan resten av massan fördelades ut. På detta sätt stack den inre formen upp 2 - 3 cm ovanför den yttre formen och all massa kunde fördelas ut jämnt över hela plattan. Så fort massan var fördelad och temperaturen kontrollerad påbörjades packningen.

Vid de första överfarterna lades en skiva mellan välten och asfalten för att undvika att asfalt fastnade i valsen.

När den inre formen tryckts ner i fas med de 28 mm träplankorna byttes dessa ut mot 21 mm träplankorna. När inre formen kom i fas med dessa togs samtliga träplankor bort och massan packades tills den kom i fas med den yttre formen. Asfaltmassan packades alltså med ett obestämt antal överfarter tills dess att välten inte längre överförde någon packningsenergi till asfaltplattan. På detta sätt säkerställdes att rätt packningsgrad nåddes vid packningarna. Efter packningens avslutande fick plattan svalna ett dygn innan provkroppar borrades ur den.

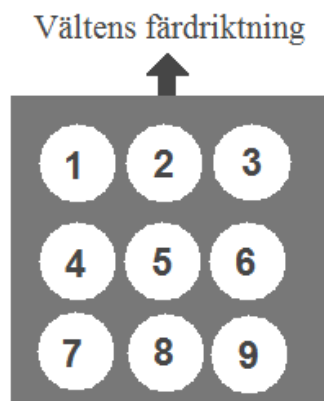


Figur 3.13 Ytterform, innerform och asfaltplatta i fas.

3.2.7 Sammanställning av genomförda packningar

Totalt packades sex stycken plattor där fyra av dessa plattor var av typen ABT 11 70/100 och två stycken av typen ABT 11 Swebit 50. Samtliga plattor packades vid rätt temperatur och därmed med rätt viskositet på bitumenet. Det vill säga ABT 11 70/100 packades i 150 - 155°C och ABT 11 Swebit 50 i 170-175°C.

Ur dessa plattor borrades nio stycken 100 mm provkroppar ut enligt figur 3.14. Ingen borrkärna borrades närmre än ca 4 cm från kanterna eftersom 2 - 3 cm av kanterna på en packad platta i en form troligtvis blir sämre än övriga plattan.



Figur 3.14 märkning av provkroppar på platta

Det krävdes tre provplattor med 70/100 bitumenet och en provplatta med Swebit 50 bitumenet innan önskat resultat erhöles. Med önskat resultat menas att skrymdensiteten stämde tillräckligt bra överens med skrymdensiteterna från de Marshallpackade provkropparna för att kunna användas till att jämföra styvhetsmodulerna för samtliga provkroppar. Anledningen till att det krävdes fler packningar med ABT 11 70/100 var att det var den första massan som packades med den modifierade utrustningen. Två av dessa plattor fungerade mer eller mindre som försöksplattor. Den tredje packades korrekt, men borrades inte tillräckligt bra för att kunna användas till indirekt pressdragprovningens försöken. Detsamma gällde den första packningen av Swebit 50. Det kan tilläggas att skrymdensiteterna för dessa två plattor ändå var tillfredställande.

Efter borring tvättades och torkades provkropparna för att inte påverka skrymdensiteterna som togs fram enligt FAS metod 427-98.

De 18 provkroppar som kom från de två sista plattpackningarna samt alla Marshallprovkroppar sågades på båda sidor till en tjocklek på 50 mm för att kunna användas till provning i Universal Testing Machine-25. Skrymdensiteten på dessa sågade provkroppar togs fram igen, denna gång efter tvättning och torkning. Eftersom skrymdensiteten blev högre efter sågningen, se kapitel Resultat, så gjordes även en hålrumsanalys på de avsågade topparna av de plattillverkade provkropparna. Denna hålrumsanalys följde dock inte FAS Metod 427-98 eftersom topparna inte uppfyllde minsta tillåtna höjd. Analysen utfördes ändå för att ge en fingervisning om hålrummet i topparna. Medelvärdet för alla avsågade toppar från de båda massorna jämfördes både med medelvärdet som provkropparna hade innan de sågades och efter de sågades.

Varför medelvärdet togs berodde helt enkelt på att det inte var tänkt att göra denna analys från första början utan det framkom då skillnaderna i hålrum uppenbarades efter sågningen. Av denna anledning var topparna redan blandade vilket senare gjorde det omöjligt att skilja de två olika bindemedelstyperna från varandra.

3.2.8 Val av provkroppar för fortsatt provning

Av de 18 plattillverkade provkroppar och lika många Marshalltillverkade valdes det totalt ut 12 provkroppar för fortsatt provning. 6 provkroppar innehållande 70/100 bitumen och 6 innehållande Swebit 50. Av dessa 6 provkroppar med respektive bitumen var tre kroppar Marshalltillverkade och tre plattillverkade. De tre provkroppar som hade närmst skrymdensitet valdes inom respektive grupp.

Nedan följer de utvalda provkropparna där differensen mellan största och minsta värde visas:

70/100 - Platta

Märkning	1	2	6	Differens	Krav
Skrymdensitet [g/cm ³]	2,3744	2,3747	2,3745	0,0003	0,015

70/100 - Marshall

Märkning	C	E	H	Differens	Krav
Skrymdensitet [g/cm ³]	2,3473	2,3527	2,3478	0,0054	0,015

Swebit 50 - Platta

Märkning	3	4	5	Differens	Krav
Skrymdensitet [g/cm ³]	2,3957	2,3950	2,3958	0,0008	0,015

Swebit 50 - Marshall

Märkning	A	E	G	Differens	Krav
Skrymdensitet [g/cm ³]	2,3793	2,3790	2,3788	0,0005	0,015

Tabell 3.2

3.3 Försök med seismik och indirekt pressdragprovning

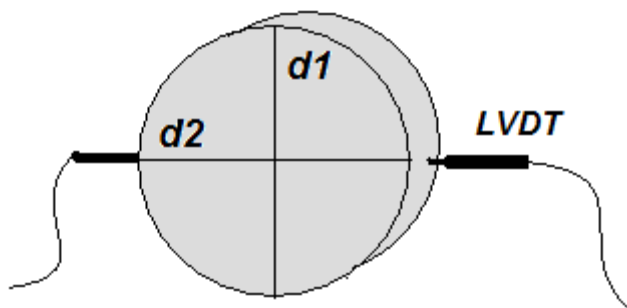
För resonansfrekvensförsöken och indirekt pressdragprovningförsöken i Universal Testing Machine – 25 krävdes, enligt överenskommelse med handledare, tre cylinderformade provkroppar av varje asfalttyp. De fyra olika typerna som användes till försöken var ABT 11 70/100 samt ABT 11 Swebit 50 packad enligt Marshallmetoden och ABT 11 70/100 samt ABT 11 Swebit 50 packad enligt vältmetoden. Det totala antalet provkroppar som testades var därmed 12 stycken. Dessutom användes ytterligare två provkroppar som fick verka som temperaturprovkroppar. Samtliga provkroppar tempererades i ett klimatskåp med temperaturgivare fästa både i kärnan och på ytan av temperaturprovkropparna. Diameter samt tjocklek på provkropparna uppmättes enligt FAS Metod 448, detta på såväl Marshalltillverkade prover som vältpackade.

3.3.1 Indirekt pressdragprovningförsök i Universal Testing Machine – 25kN enligt SS-EN12697-26:2004 Annex C

Samtliga provkroppar testades i Universal Testing Machine – 25 vid tre olika temperaturer där provkropparna tempererades i minst 24 timmar till först 2 °C sedan 10 °C och till sist till 20 °C. Poisson's tal för provkropparna med bitumentyp Swebit 50 hämtades från SBUF Rapport 12017 och för provkropparna med penetrationsbitumen från Design Guide 2002. För 70/100 bitumenet användes Poisson's tal 0,20 för provningar vid 2 °C och 0,25 vid 10 °C och 20 °C.

För Swebit 50 användes 0,23 vid 2 °C, 0,24 vid 10 °C och 0,25 vid 20 °C.

Det aktuella provet monterades i sin ställning i det tempererade skåpet och för varje provkropp justerades ställningen utifrån provkroppens diameter. Vid monteringen lades stor ansträngning till att få provkroppen att stå stabilt i ställningen för att undvika rörelse av provkroppen under belastning. Rörelse skulle kunna innebära att mätningarna inte registreras korrekt vilket skulle ge fel resultat. Innan provkroppen utsattes för några krafter monterades LVDT - givarna på varje sida om provkroppen enligt figur 3.15. Om provkroppens temperatur ändrades för mycket från måltemperaturen under montering av provkroppen startades inte försöket förrän provkroppen nått rätt temperatur igen.



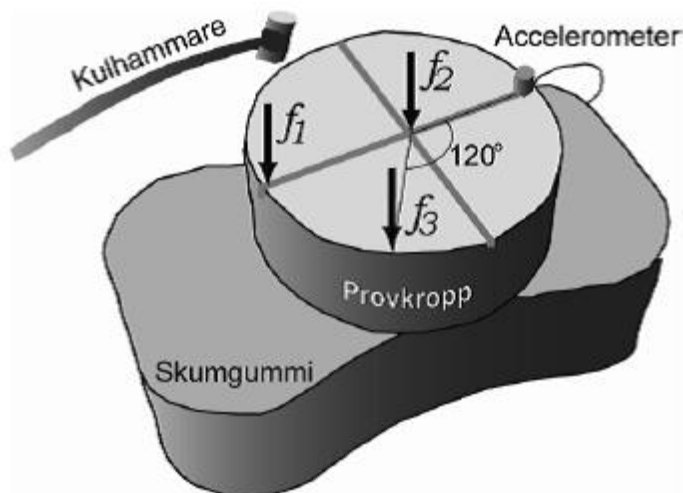
Figur 3.15 Provkropp med LVDT – givare.

Totalt utsattes provkroppen för 15 pulser varav de första 10 verkade som konditioneringspulser för att ställa in rätt vertikal kraft. Vid för hög kraft kan en provkropp ta skada av försöken och därför används konditioneringspulser. Från de fem sista pulserna användes sedan data till att räkna ut provkroppens styvhetsmodul. Denna procedur upprepades två gånger per provkropp på de två exakta diametrarna som uppmättes och ritades på provkroppen.

Efter halva mängden provkroppar var testade insågs dock att provningarna tog för lång tid och en avgränsning var tvungen att göras. Detta innebar att resterande mängd provkroppar enbart testades på en diameter. En av provkropparna fick även utgå från provningarna då den skadades vid provberedningen.

3.3.2 Seismik

Vid resonansfrekvensmätningarna utfördes tester på provkropparna vid 7 olika temperaturer, 2 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C och 60 °C. Efter temperering förflyttades den aktuella provkroppen från det tempererade skåpet till en skumgummisvamp. Där monterades en accelerometer på provkroppen med hjälp av vax, där accelerometerns läge definierades som vinkel 0°, se figur 3.16.



Figur 3.16 Försöksuppställning vid resonansfrekvensmätningar. (Rydén, Johansson 2008)

Därefter slogs 30 slag med kulhammaren på provkroppen, detta jämnt fördelat med 10 slag vid vinkel 180° , 120° samt i mitten av provkroppen. Varje signal lagrades sedan i datorns speciella lagringskort för fortsatta analyser.

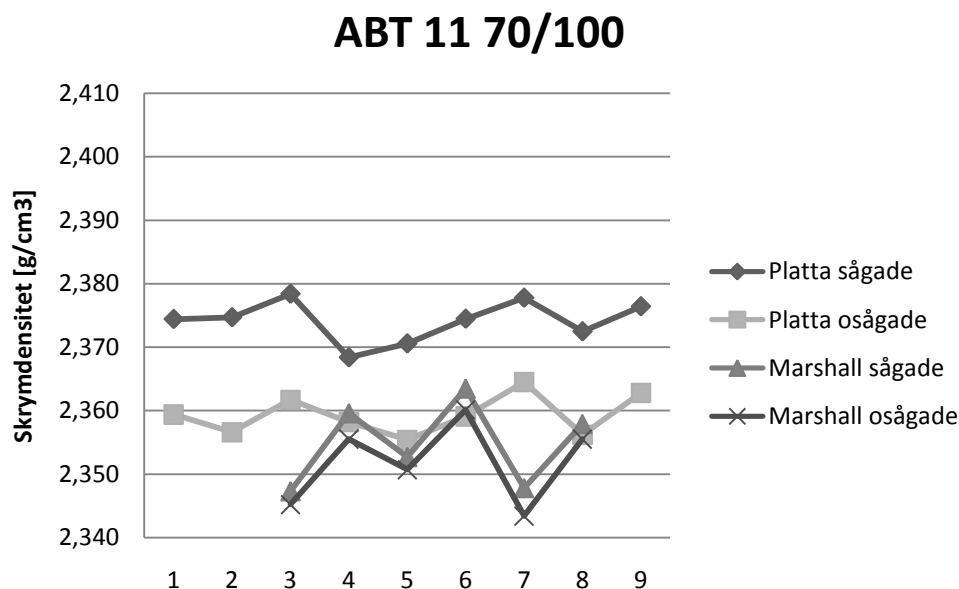
Efter utvärdering av data från resonansfrekvensmätningarna visade det sig att mätningarna från 50 och 60 °C gav för stor dämpning och orimliga värden för att kunna användas vidare.

Dessutom kunde bara två av moderna användas, den i mitten och den vid 180° alltså mod f_1 och f_2 . Detta innebär att masterkurvorna bara är någorlunda säkra från 6000 – 30000 MPa i styvhetsmodul. Dessa masterkurvor, som finns i resultatkapitlet, är alltså baserade på mätningar vid 2, 10, 20, 30, 40 gardar och de två moderna f_1 och f_2 .

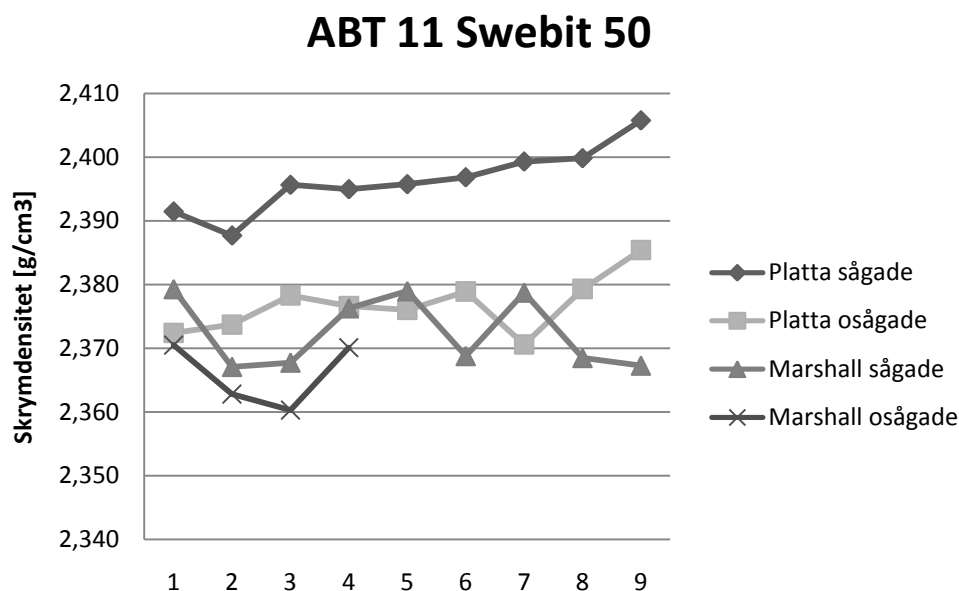
4 Resultat

4.1 Skrymdensiteter på valda provkroppar

På båda massorna syns det att skrymdensiteterna för de plattillverkade provkropparna blir högre efter sågning. Skrymdensiteten för de Marshallpackade provkropparna blir även de högre efter sågning, men där är skillnaden inte alls lika stor som hos de plattillverkade provkropparna.



Figur 4.1 Skrymdensiteter på 70/100 provkroppar.

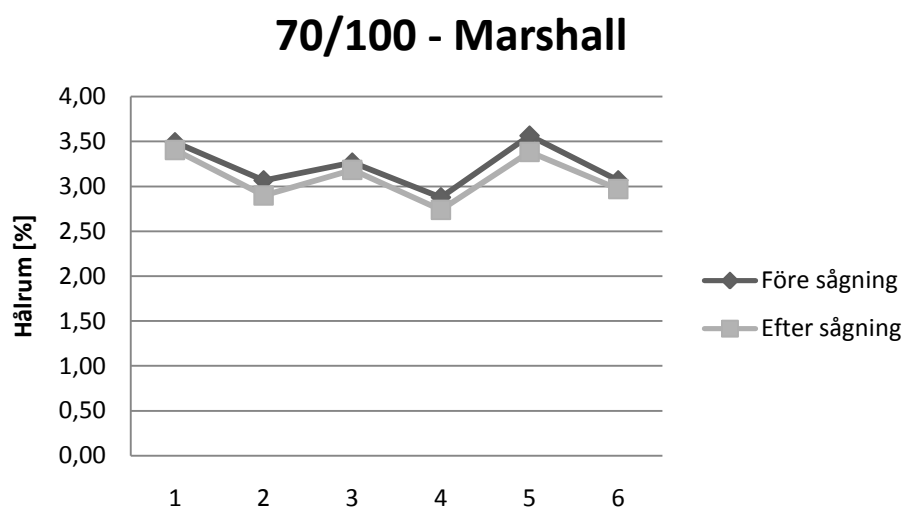


Figur 4.2 Skrymdensiteter på Swebit 50 provkroppar.

4.2 Hålrumsalter

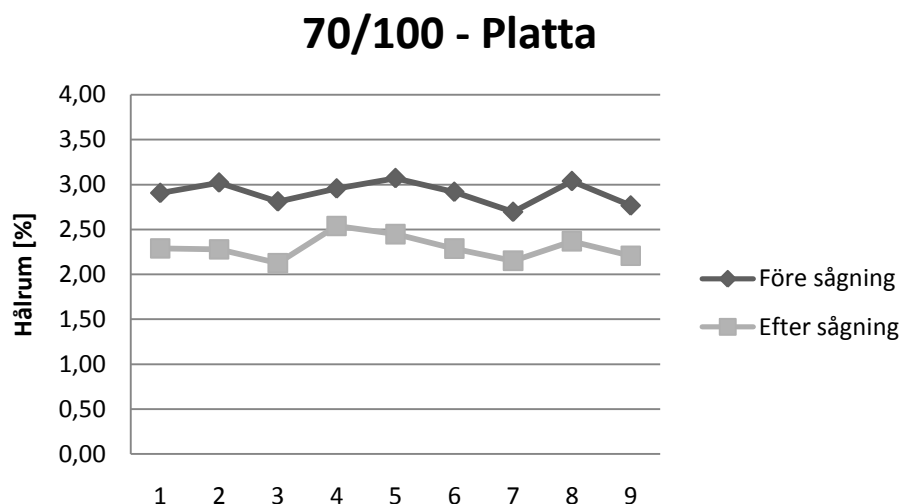
Vid hålrumsanalys av ABT 11 Swebit 50 samt ABT 11 70/100, där massorna packades enligt Marshall, fann vi skillnader. Hålrummet i asfaltmassan med 70/100 bitumen blev aningen högre än hålrummet i Swebit 50 massan, jämför figur 4.3 med figur 4.5. Skillnaderna i densitet, mellan dessa två massatyper, bibehölls därför till plattillverkningen, eftersom skrymdensiteten från Marshallpackningarna utgjorde grunden för mängden massa till plattorna.

När plattorna sedan var färdigtillverkade och provkropparna urborrade kunde vi konstatera att hålrumshalten låg aningen lägre för de plattillverkade än för de Marshalltillverkade provkropparna. Skillnaden som fanns var dock så liten att största skillnaden låg runt en halv procentenhet i hålrums halt.



Figur 4.3 Marshallstampade 70/100 provkroppar.

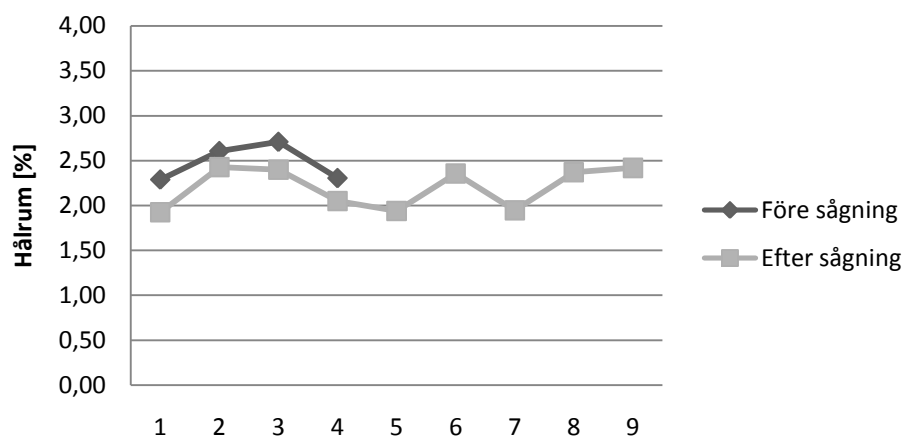
När dessa plattillverkade provkroppar sågades sjönk hålrummet ytterligare, jämför figur 4.4 och figur 4.6



Figur 4.4 Plattpackade 70/100 provkroppar.

Noterbart är också att de Marshallpackade provkropparnas hålrum sjunkit en aning efter sågning. Dock ej lika mycket som de plattillverkade provkropparna.

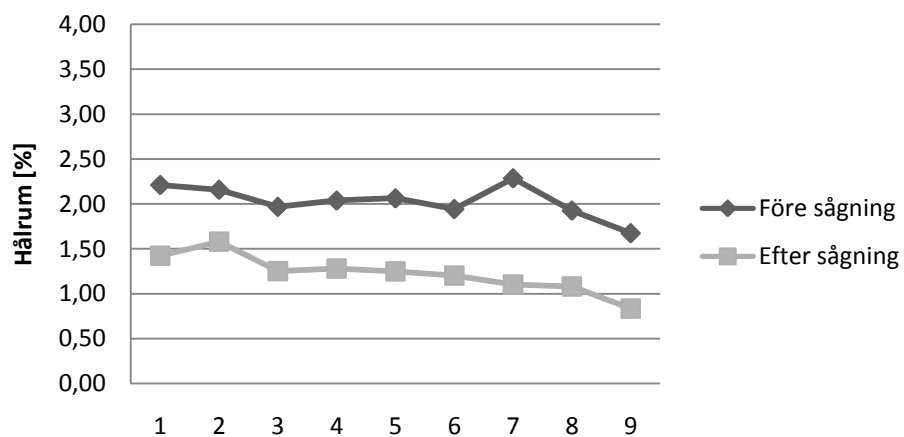
Swebit - Marshall



Figur 4.5 Marshallstampade Swebit 50 provkroppar.

Även denna figur visar på en tydlig skillnad i hålrums på hela provkroppen gentemot provkroppen efter sågning.

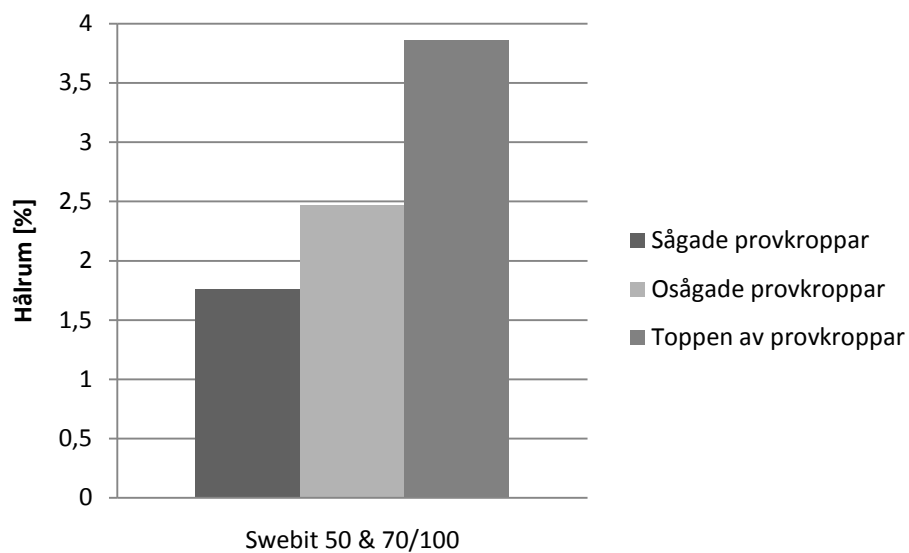
Swebit - Platta



Figur 4.6 Plattpackade Swebit 50 provkroppar.

4.3 Hålrums skillnader i provkropparna

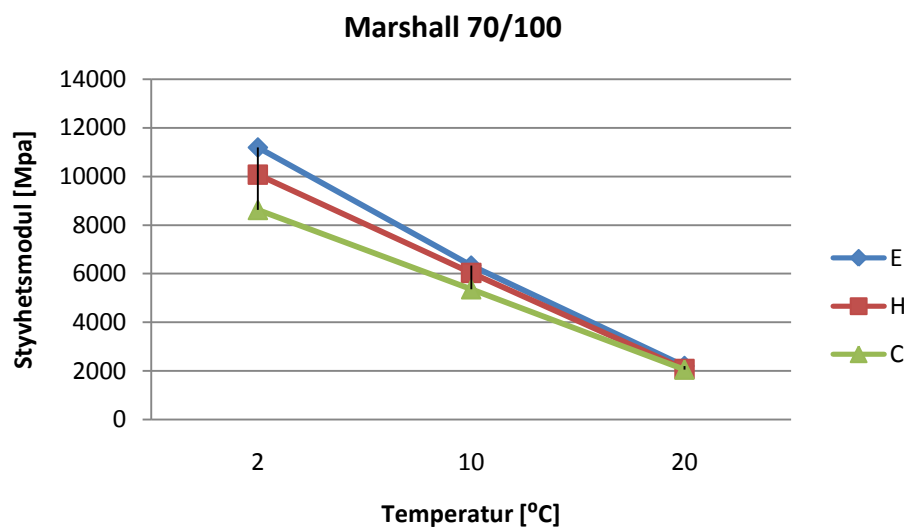
Figur 4.7 visar tydligt att hålrummet i toppen av plattorna är högre än såväl sågade som osågade provkroppar.



Figur 4.7 Hålrumshalten för provkroppar uttagna med olika tekniker.

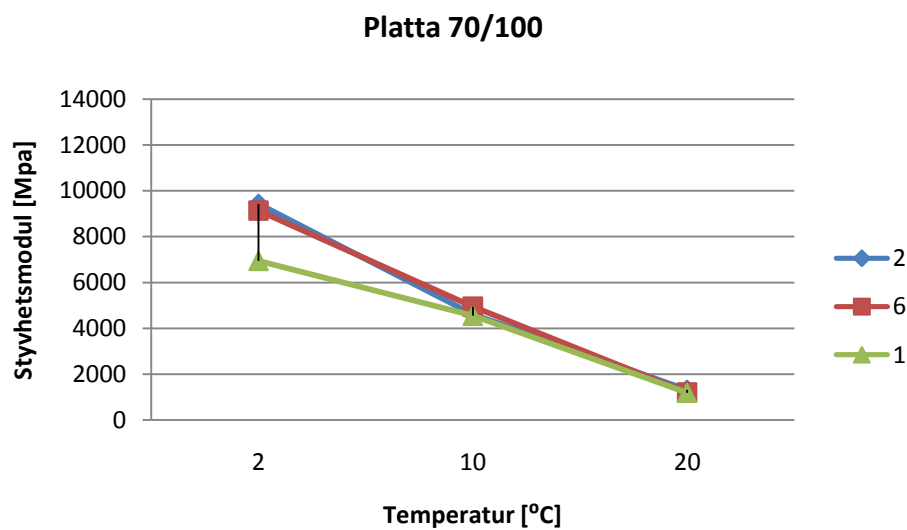
4.4 Styvhetsmoduler framtagna med Universal Testing Machine-25kN

4.4.1 Styvhetsmoduler för ABT 11 70/100



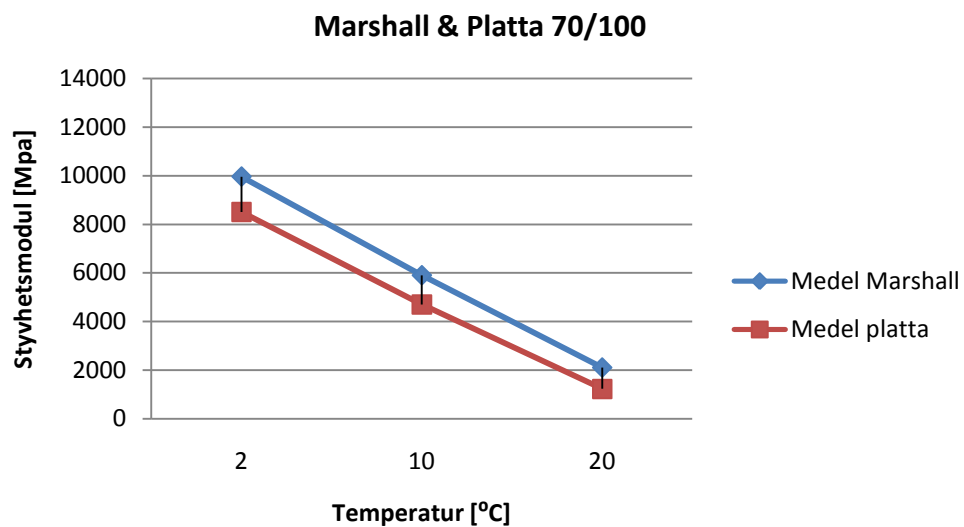
Figur 4.8 Marshallstampade 70/100 provkroppar.

Att notera ur figur 4.9 är att provkropp 1 avviker från övriga vid temperaturen 2 °C.



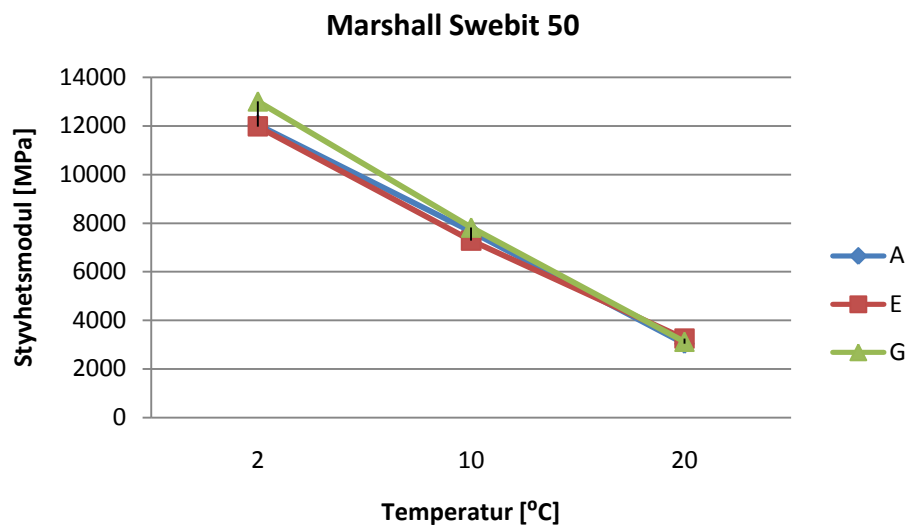
Figur 4.9 Plattpackade 70/100 provkroppar.

Medelstyvhetsmodulen för asfalten med 70/100 bitumen, som är framtagen genom pressdragprovning i Universal Testing Machine-25, är högre för Marshallpackade provkroppar än för plattillverkade. Skillnaden mellan Marshallpackade och plattillverkade är ca 16 % vid 2 °C, ca 20 % vid 10 °C och ca 42 % vid 20° C, se figur 4.10 nedan.

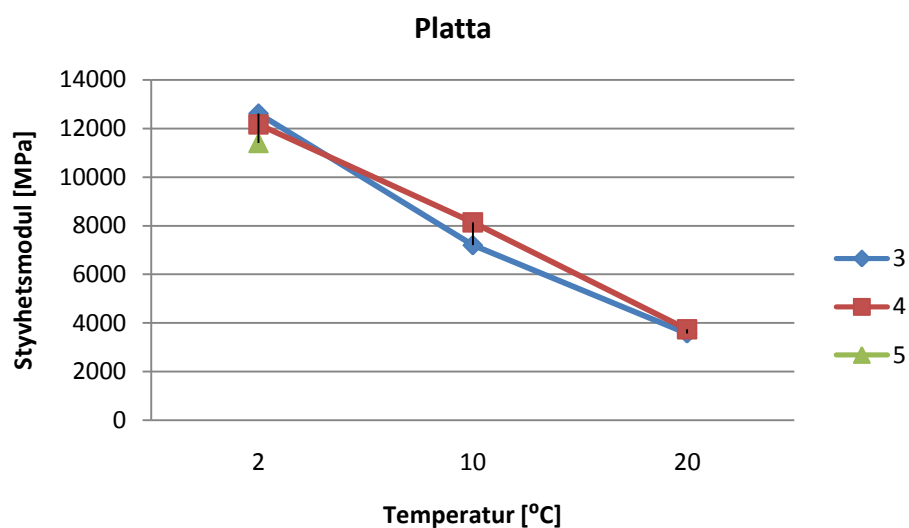


Figur 4.10 Jämförelse mellan Marshallstampade och plattpackade 70/100 provkroppar.

4.4.2 Styvhetsmoduler för ABT11 Swebit 50

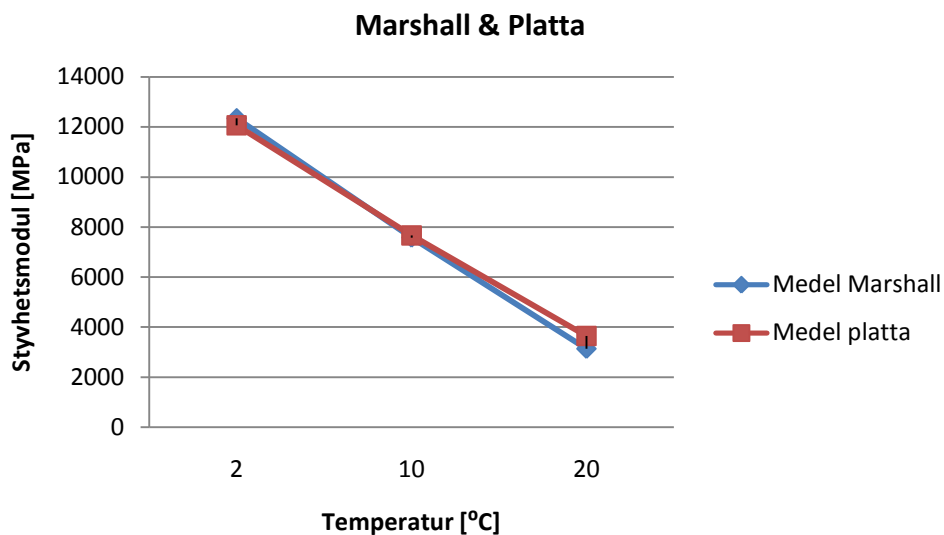


Figur 4.11 Marshallstampade Swebit 50 provkroppar.



Figur 4.12 Plattpackade Swebit 50 provkroppar.

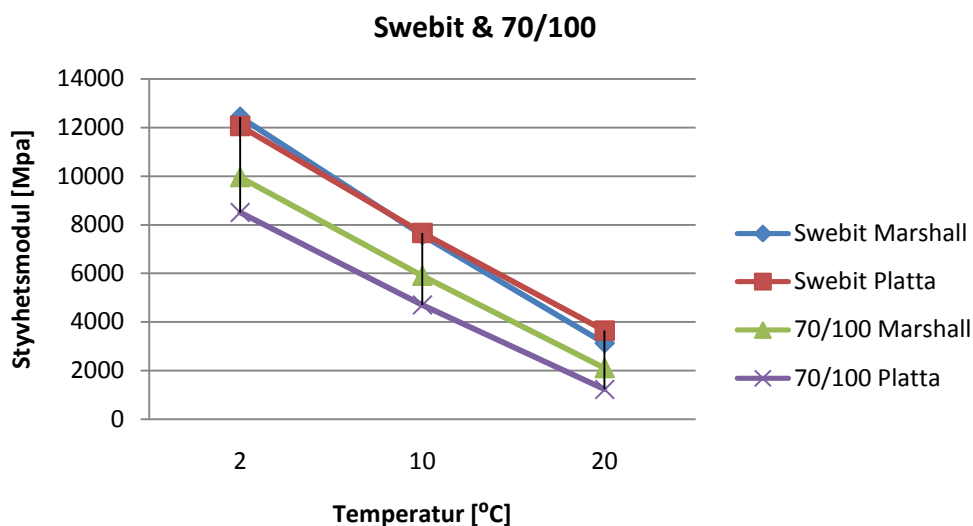
Styvheten för Marshallpackade Swebit 50 provkroppar och plattillverkade visas i figur 4.13 och skillnaden är mindre än för 70/100 provkropparna. Vid 2 °C har de Marshalltillverkade provkropparna ca 2 % högre styvhet än de plattpackade. Vid 10 °C har de plattpackade provkropparna ca 1 % större styvhetsmodul och vid 20 °C har de ca 14 % större styvhetsmodul.



Figur 4.13 Jämförelse mellan Marshallstampade och plattpackade Swebit 50 provkroppar.

4.4.3 Jämförelse mellan Swebit 50 och 70/100

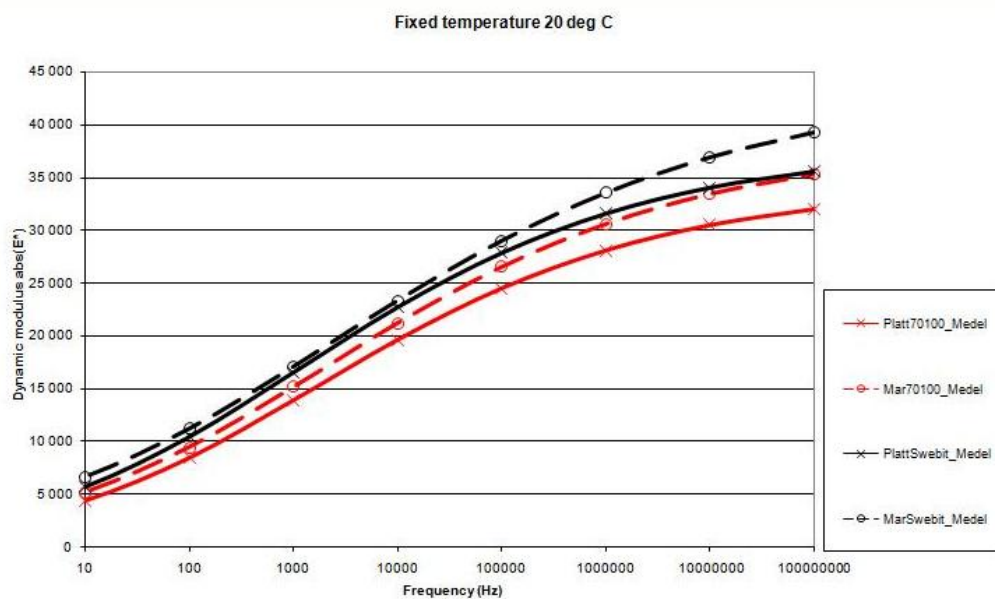
En tydlig skillnad kan ses mellan massorna med de två olika typerna av bindemedel. Massan med 70/100 bitumenet har klart lägre styvhetsmodul för såväl plattpackade provkroppar som Marshallpackade gentemot Swebit 50 provkropparna.



Figur 4.14 Jämförelse i styvhetsmodul mellan Swebit 50 och 70/100 massa.

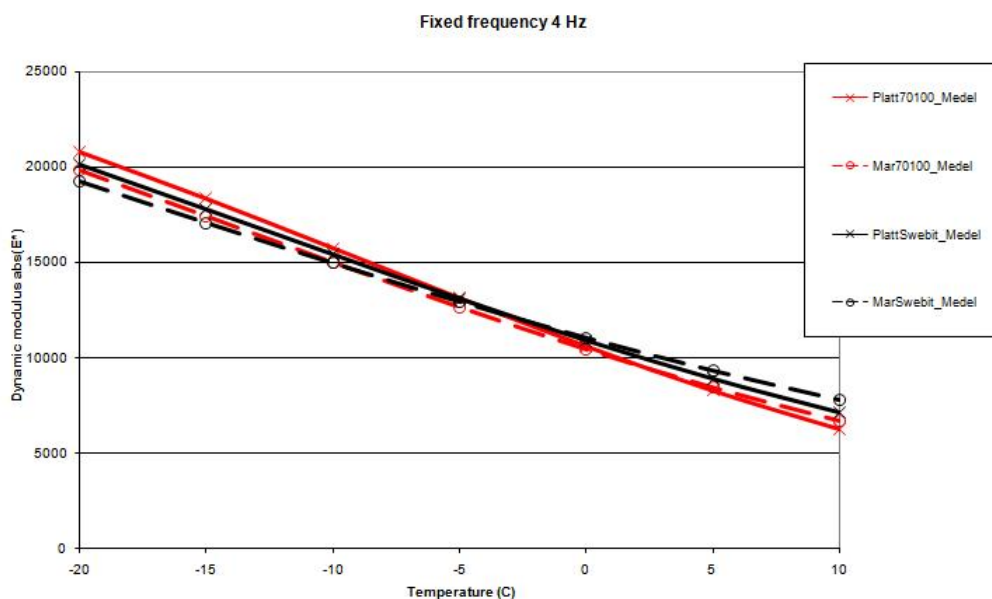
4.5 Styvhetsmoduler framtagna med resonansfrekvensmätningar

Vid en direkt jämförelse med styvhetsmodulerna framtagna med indirekt pressdragprovning försöken vid 20 °C syns det att de olika metoderna ger olika resultat på vilka av de packade provkropparna som får den högsta styvhetsmodulen. För 70/100 provkropparna stämmer resultatet bra med indirekt pressdragprovning försöken, men för Swebit 50 provkropparna är förhållandet omvänt. Här har de Marshallpackade Swebit 50 provkropparna högre styvhetsmodul än de plattpackade även om skillnaden är liten i området 6000 – 30 000 MPa.



Figur 4.15 Masterkurva vid 20 °C.

Även vid frekvensen 4 Hz så får de Marshallpackade Swebit 50 provkropparna den högsta styvhetsmodulen inom det temperaturintervall som använts vid indirekt pressdragprovning försöken. I övrigt stämmer de båda metoderna ganska bra överens.



Figur 4.16 Masterkurva vid 4 Hz.

4.6 Arbetsförfarandebeskrivning för tillverkning av asfaltplattor

4.6.1 Förberedelser

Det första som bör göras när en ny utrustning, för packning av asfalt med hjälp av en vält i laboratorium, upprättas är att trimma in den valda utrustningen.

Detta kan göras genom att börja packa en platta med exempelvis två överfarter och kontrollera hålrummet i den packade plattan. Därefter packa med fyra överfarter och undersöka hålrummet för den plattan och så vidare. Med hjälp av detta stegvis ökande antal överfarter kan antalet överfarter som ger önskat hålrum för den specifika massan bestämmas. Denna intrimning skall utföras för varje massatyp eftersom varje massa kräver olika mycket packningsenergi.

Viktigt är också att hålrummet undersöks i olika skikt i plattan för att säkerställa att ett så jämnt hålrum som möjligt erhålls över plattans höjd. Vid denna undersökning kan också slutsatser dras om eventuell separation i massan har uppstått under utfördelningen av massan i formen.

4.6.2 Utrustning

Vid val av packningsutrustning är det viktigt att beakta vältens tyngd kontra önskad tjocklek på färdigpackad platta för att ha en jämn packningsenergi genom hela plattan. Intrimningen kan visa om rätt höjd–tyngd förhållande används. Övrig utrustning skall vara enkel att arbeta med och ge så få arbetsmoment för personal som möjligt för att kunna utföra packning vid rätt temperatur.

Nedan följer exempel på utrustning som kan användas:

- Vält som framförs av personal eller en vals/hjul som kan rulla över plattan med ett bestämt tryck med hjälp av till exempel hydraulisk utrustning.
- Form eller skenor som en vält kan framföras på. Denna skall vara av sådan karaktär att den klarar stora belastningar utan att deformeras. Kan även fungera som botten för asfaltplattan.
- Form för själva asfaltplattan där dess dimensioner väljs efter önskad plattstorlek. Plattans storlek kan vara efter egna önskemål, men inte mindre än de krav som ställs för de metoder som plattan skall användas till.
- En inre form som kan sjunka ner tillsammans med asfalten innanför den ursprungliga formen under packningsförfarandet rekommenderas. Detta för att ta hänsyn till asfaltmassans olika höjd före och efter packning.
- Ett system för att underlätta förflyttning av den färdigpackade plattan skall beaktas. Detta kan till exempel vara en masonitskiva som läggs under asfalten innan packningen. Fördelen med material av trä under asfaltplattan är att avsvälningen undertill blir mindre. Dessutom kan plattan avlägsnas från underlaget utan risk för sprickor eller andra skador på asfaltplattan.

4.6.3 Provberedning

Vid uttagning eller blandning av en massa måste först ett analysprov tas för att kontrollera massans skrymdensitet, vilken sedan kommer att bestämma vilken total mängd asfaltmassa som skall användas till plattan beroende på vilken packningsgrad som önskas. Utifrån vald skrymdensitet bestäms mängden massa genom att multiplicera asfaltformens volym med skrymdensiteten. Även bindemedelshalt och kornkurva bör bestämmas på massan.

Den exakta mängd asfalt som ska användas till plattan ska värmas upp till den teoretiska packningstemperaturen för den bitumensort som används. Där den teoretiska packningstemperaturen innebär att asfalten skall packas vid en viskositet på ca 200 mm²/s enligt FAS Metod 414-01. För att ta hänsyn till att massan svalnar efter uttagning från värmeskåp eller asfaltblandare kan massan med fördel värmas upp till 5 °C över packningstemperaturen. Även de material som kommer i kontakt med asfalten under packningsförfarandet ska värmas upp till samma temperatur om det är möjligt.

Tabell 4.1 Exempel på vanliga packningstemperaturer (FAS metod 414-01).

Bitumensort	Packningstemperatur (°C)
160/220	135-145
100/150	140-150
70/100	145-155
50/70	150-160

4.6.4 Vålthastighet under packning

Viktigt är att inte en för snabb vålthastighet används, eftersom ju kortare tid massan utsätts för våltens tryck desto sämre hopprensning av massan blir det. För att hopprensning ska kunna ske måste asfaltmassan utsättas för ett visst tryck under en viss tid. Vålthastigheten bör heller inte vara för låg med tanke på risk för avsvälning i toppen av plattan. Enligt FAS Asfaltbok 1995, ligger den optimala vålthastigheten på omkring 6 km/h. Detta avser då våltning utanför laboratoriemiljö. Under de första två överfarterna kan dock vålthastigheten behöva sänkas en del för att minska risken för att tvärgående ytsprickor ska uppkomma.

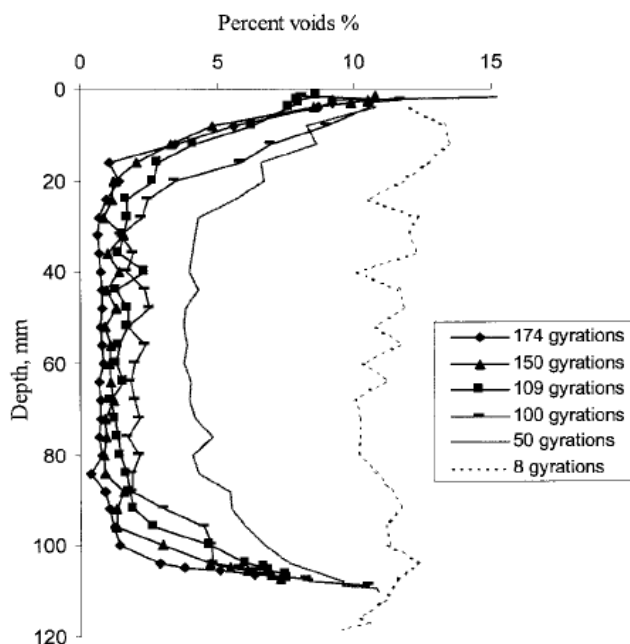
4.6.5 Utförande av packning

För att undvika separationer i massan skall all massa hällas i formen och fördelas ut. Om en inre form används, vilket rekommenderas, hålls ca 75 % av massan ner i formen innan den inre formen placeras på massan, så att inre formen sticker upp en bit ovanför den yttre formen. Därefter hålls resten av massan i och fördelas ut jämnt över hela ytan. För att säkerställa att temperaturen är rätt när packningen påbörjas kan en termometer följa med massan från ugnen till det att massan är utfördelad. På detta sätt kan packningen påbörjas så fort massan är utfördelad med full kontroll över massans temperatur.

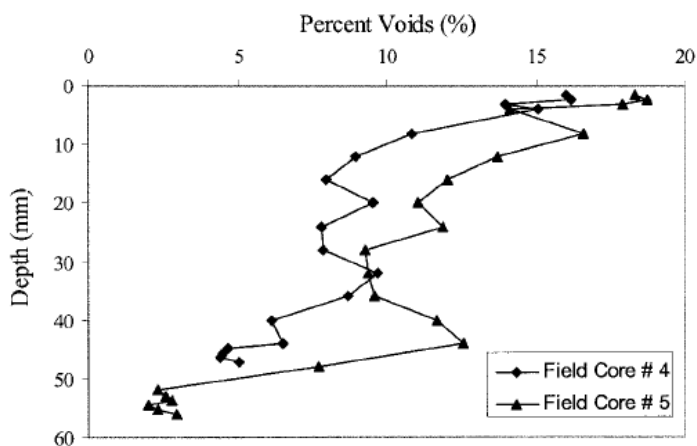
Packningen skall därefter utföras med de antal överfarter som gäller för den specifika massan för att uppnå önskad skrymdensitet. Detta ska ha bestämts med hjälp av intrimningen av utrustningen. Om alla förberedelser har gått rätt till ska det också innebära att det specifika antalet överfarter är precis så många överfarter som gör att asfalten kommer i fas med den ursprungliga formen.

Efter utförd packning bör plattan svalna i ca ett dygn innan några analyser utförs på den. Om flera plattor ska packas under samma dag kan de packade plattorna förflyttas till formar när plattorna svalnat av tillräckligt för att flyttas.

som provkroppar packade med över 50 gyrationer. Detta visar att samma problem även finns i andra packningsmetoder än vältpackning i fält när asfalt ska packas till ett relativt lågt hålrums. Det ger kanske också en möjlighet till att skillnaden i hålrums skulle kunna minska om en tyngre vält användes som möjliggjorde ett mindre antal överfarter. Dock så är det ju samma totala packningsenergi som krävs för att packa massan oavsett tyngden på välten.

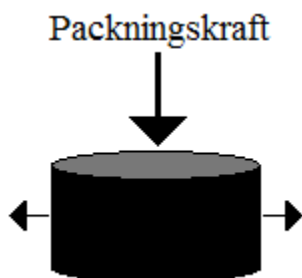


Figur 5.2 Hålrumsfördelning över höjden hos provkroppar packade med gyrationerisk packningsmetod. (Masad et al. 1999)



Figur 5.3 Hålrumsfördelning över höjden hos provkroppar packade i fält. (Masad et al. 1999)

Som resultatet visar är det stor en stor skillnad mellan styvhetsmodulerna för de Marshallpackade 70/100 provkropparna jämfört med de plattillverkade. De Marshallpackade provkropparna har en högre styvhetsmodul även om de har en högre hålrumshalt. Detta kan bero på att de Marshallpackade provkropparna blir inspända i Marshallformen på ett annat sätt än de som är plattillverkade. Massan vill, vid packning jobba sig utåt bort ifrån provkroppens kärna vilket är i princip omöjligt i en Marshallform men möjliggörs mer i en stor plattform, Se figur 5.4.



Figur 5.4 Krafter vid packad provkropp.

Något som gör detta konstaterande än mer intressant är att en klarare tendens till separering av massan visar sig i en Marshallpackad provkropp jämfört med provkroppar uttagna från plattor. Detta beror på tillvägagångssättet i Marshallmetoden eftersom massan hålls från en påse ned i formen. Detta innebär då att Marshallprovkropparna inte får den ultimata kornstorleksfördelning i hela provkroppen vilket i sin tur bör leda till sämre resultat på styvhetsmodulen. Det har dock inte kunnat avgöras om detta har lett till lägre styvhetsmodul i detta fall.

Ett annat alternativ som kan göra att Marshallprovkropparna får bättre styvhetsmodul kan vara packningstemperaturen. Den temperaturen kontrolleras mycket enklare vid Marshalltillverkning då även hela formen håller rätt temperatur och packningsförfarandet varar under en mycket kortare tid och i bättre miljö med närhet till ugnar med mera. Dessutom vänds Marshallprovkroppen efter halva packningsförfarandet vilket gör att kroppen får en jämnare packning än en asfaltplatta.

När det gäller Swebit 50 ligger styvhetsmodulen för Marshallpackade samt plattillverkade provkroppar ytterst nära varandra fram till 20 °C.

Marshallprovkropparna har högre hålrum än de plattillverkade, så vid samma hålrum skulle styvheten säkerligen varit lite större hos de Marshallpackade, men detsamma gäller även för 70/100 bitumenet och där är ändå Marshallprovkropparna styvare. Det skulle kunna tyda på att det polymermodifierade bitumenet klarar av att göra massan styvare i fält trots de fria randvillkoren och den ojämna hålrumsfördelningen. Om bitumenet är polymermodifierat blir kanske styvheten i fält mer lik den styvhet som Marshallpackade provkroppar får än vi samma jämförelse med konventionellt bitumen.

En tydlig skillnad går att se mellan de två olika typerna av bindemedel. Massan med bindemedlet av typen Swebit 50 är klart styvare än massan med 70/100 bitumenet vid alla temperaturer. Eftersom Swebit 50 har det hårdare 50/70 bitumenet som basbitumen blir det dock inte en rättvis jämförelse, men det visar ändå vad polymermodifiering av ett bitumen kan göra för en massas styvhet.

Styvhetsmodulerna från resonansfrekvensmätningarna stämmer ganska bra överens med styvhetsmodulerna från indirekt pressdragprovning försöken. En direkt jämförelse är dock svår att göra eftersom belastningsfrekvensen inte är väldefinierad vid indirekt pressdragprovning försöken. Det bör dock poängteras att endast kurvorna mellan 6000 och 30 000 MPa är någorlunda säkra och att kurvorna utanför detta intervall är osäkra, eftersom resultaten endast är baserade på mätningar upp till 40 °C.

Dessa masterkurvor är överhuvudtaget ganska osäkra eftersom det endast är baserade på tio mätningar/prov och det är ganska lite data för att uppskatta de sex okända parametrarna i masterkurvan.

6 Slutsats och rekommendationer

I ett tidigt skede misstänktes det att Marshallpackade provkroppar skulle få en högre styvhet än de provkroppar som blivit uttagna från packade plattor. Denna misstanke stärktes avsevärt med testerna och analyserna som gjorts i detta examensarbete. Resultatet visar på att Marshalltillverkning av provkroppar inte är en bra metod när syftet är att göra en provkropp så fältliknande som möjligt.

Av denna anledning kan det tänkas vara lämpligt att branschen, i framtiden använder en mer utvecklad plattmetod än den som finns i dagsläget och detta då som ett komplement till Marshallmetoden. På detta sätt ges en möjlighet till att få en mer verklighetslik provning på laboratorium.

Något annat som vore intressant är att göra ytterligare analyser på polymermodifierade massor för att se varför skillnaden i styvhet mellan Marshalltillverkade provkroppar och platttillverkade provkroppar är mindre än vid samma jämförelse med konventionellt 70/100 bitumen.

Den utvecklade arbetsförfarandebeskrivningen av platttillverkning bör jämföras med packning i fält för att kontrollera om samma resultat erhålls.

7 Referenser

7.1 Skriftliga källor

The Asphalt Handbook, 2007, Asphalt Institute Inc, ISBN 978-1-934154-27-4, sjunde upplagan, s.11-13

FAS Asfaltbok, 1995, Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige, Bromma-TRYCK AB, ISBN 91-971916-2-0.

FAS Metoder, 2002, Föreningen för Asfaltbeläggningar i Sverige, FAS Service AB

SS-EN 12697-26:2004, Vägmaterial – Asfaltmassor – Provningsmetoder för varmblandad asfalt – Del 26: Styvhets, Test Applying Indirect tension to cylindrical specimens, Annex C, Utgåva 1.

Nordiskt vägforum, 2009, Utskott 33 – beläggningar, Rekommendationer för användning av polymermodifierat bitumen, Utgåva nr.1.

The Shell Bitumen Handbook, 2003, Shell UK Oil Products Limited, ISBN 0 7277 3220 X, fifth edition, s.73.

Momen, M., 2004, Complex Modulus Determination of Asphalt Concrete Using Indirect Tension Test, Master of Science thesis, North Carolina State University.

Oscarsson, E., 2007, Prediction of Permanent Deformations in Asphalt Concrete using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Licentiate thesis, Lunds Universitet, s.15.

Nilsson, R., 2003, Fatigue of Asphalt Mixes – Theory of Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics Applied to Uniaxial Fatigue Data from Laboratory Tests, Doctoral thesis, Lunds Universitet, s.34 – 36.

Kweon, G., and Kim, R., 2006, Determination of the Complex Modulus of Asphalt Concrete using the Impact Resonance Test, Journal of the Transportation Research Board.

Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T., 1999, Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete using Image Analysis, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 13, pp 88 – 95.

Whitmoyer, L., Kim, R., 1994, Determining Asphalt Concrete Properties via the Impact Resonant Method, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 22, No. 2, pp 139 – 148.

Rydén, N. och Malmqvist, E., 2006, Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar, delrapport etapp 1, SBUF Rapport 11782.

Rydén, N. och Johansson, C., 2008, Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar, delrapport etapp 2, test av mätmetod på asfaltprover, SBUF Rapport 12017.

Roadside Design Guide, 2002, third edition, ISBN 156051132X.

7.2 URL – källor

http://www.elmat.lth.se/fileadmin/user_upload/Sensorer/Lab4_Impedanslab.pdf, 2008-11-25.

7.3 Muntliga källor

Jansson, L., 2008-05-29, Laboratorieförst, Peab Asfalt AB, 0733 – 84 85 70.

Appendix 1: Densiteter och dimensioner

ABT 11 Swebit 50, platta

Puck	Densitet	Dimensioner	d1	d2	d3	d4	Medel,d [mm]	t1	t2	t3	t4	Medel,t [mm]	Vikt [g]
3	2,3957		99,75	99,76	99,77	99,71	99,75	49,12	49,00	49,02	49,01	49,04	915,4
4	2,3950		99,72	99,75	99,76	99,78	99,75	49,13	48,93	49,07	49,05	49,05	917,3
5	2,3958		99,81	99,77	99,78	99,77	99,78	49,13	49,11	48,91	49,15	49,08	916,4

ABT 11 Swebit 50, Marshall

Puck	Densitet	Dimensioner	d1	d2	d3	d4	Medel,d [mm]	t1	t2	t3	t4	Medel,t [mm]	Vikt [g]
A	2,3793		101,88	101,87	101,82	101,85	101,86	49,20	49,27	49,23	49,20	49,23	946,6
E	2,3790		101,91	101,94	101,89	101,84	101,90	49,22	49,23	49,03	49,09	49,14	944,1
G	2,3788		101,89	101,74	101,80	101,67	101,78	49,61	49,46	49,38	49,70	49,54	946,4

ABT 11 70/100, platta

Puck	Densitet	Dimensioner	d1	d2	d3	d4	Medel,d [mm]	t1	t2	t3	t4	Medel,t [mm]	Vikt [g]
1	2,3744		99,78	99,56	99,68	99,80	99,71	48,92	48,85	48,92	48,92	48,90	904,9
2	2,3747		99,70	99,58	99,76	99,60	99,66	48,96	48,80	48,99	49,08	48,96	906,2
6	2,3745		99,72	99,73	99,61	99,77	99,71	48,90	48,98	49,08	48,99	48,99	907,3

ABT 11 70/100, Marshall

Puck	Densitet	Dimensioner	d1	d2	d3	d4	Medel,d [mm]	t1	t2	t3	t4	Medel,t [mm]	Vikt [g]
C	2,3473		101,72	101,78	101,70	101,78	101,75	48,97	49,14	49,01	48,97	49,02	930,1
E	2,3527		101,69	101,70	101,88	101,89	101,79	48,92	48,97	49,02	48,95	48,97	931,8
H	2,3478		101,64	101,52	101,53	101,63	101,58	49,02	49,10	48,93	49,13	49,05	927,5

Appendix 2: Resultat från indirekt pressdragprovningförsök

Provkropparnas styvhetmoduler

2 C

Massa	Provkropp	Diameter	Justerad styvhetsmodul [MPa]	Standardavvikelse [MPa]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	8651	234,10	2,71
70/100 Marshall	C	d2	8581	218,74	2,55
70/100 Marshall	E	d1	11336	229,97	2,03
70/100 Marshall	E	d2	11031	145,37	1,32
70/100 Marshall	H	d1	10770	273,21	2,54
70/100 Marshall	H	d2	9375	208,98	2,23
70/100 Platta	1	d1	6939	221,83	3,20
70/100 Platta	1	d2	7576	254,45	3,36
70/100 Platta	2	d1	9426	260,07	2,76
70/100 Platta	2	d2	8859	260,73	2,94
70/100 Platta	6	d1	9128	198,89	2,18
70/100 Platta	6	d2	8058	293,81	3,65
Swebit 50 Marshall	A	d1	12163	201,59	1,66
Swebit 50 Marshall	A	d2	11928	147,40	1,24
Swebit 50 Marshall	E	d1	12223	228,78	1,87
Swebit 50 Marshall	E	d2	11723	257,57	2,20
Swebit 50 Marshall	G	d1	13165	329,07	2,50
Swebit 50 Marshall	G	d2	12850	267,67	2,08
Swebit 50 Platta	3	d1	13114	123,23	0,94
Swebit 50 Platta	3	d2	12112	221,20	1,83
Swebit 50 Platta	4	d1	12448	188,44	1,51
Swebit 50 Platta	4	d2	11880	290,35	2,44
Swebit 50 Platta	5	d1	11128	209,09	1,88
Swebit 50 Platta	5	d2	11677	176,44	1,51

Vertikal last på provkropparna

2 C

Massa	Provkropp	Diameter	Största last [N]	Standardavvikelse [N]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	4770	4.5	0.1
70/100 Marshall	C	d2	4761	2.2	0.0
70/100 Marshall	E	d1	4853	1.5	0.0
70/100 Marshall	E	d2	4853	1.5	0.0
70/100 Marshall	H	d1	4853	3.4	0.1
70/100 Marshall	H	d2	4855	1.6	0.0
70/100 Platta	1	d1	3774	5.0	0.1
70/100 Platta	1	d2	4143	1.3	0.0
70/100 Platta	2	d1	4840	3.2	0.1
70/100 Platta	2	d2	4768	2.5	0.1
70/100 Platta	6	d1	4846	2.5	0.1
70/100 Platta	6	d2	4452	5.5	0.1
Swebit 50 Marshall	A	d1	4847	1.9	0.0
Swebit 50 Marshall	A	d2	4854	4.7	0.1
Swebit 50 Marshall	E	d1	4852	6.3	0.1
Swebit 50 Marshall	E	d2	4851	7.0	0.1
Swebit 50 Marshall	G	d1	4847	4.7	0.1
Swebit 50 Marshall	G	d2	4855	2.8	0.1
Swebit 50 Platta	3	d1	4855	4.7	0.1
Swebit 50 Platta	3	d2	4842	3.1	0.1
Swebit 50 Platta	4	d1	4856	2.2	0.0
Swebit 50 Platta	4	d2	4848	5.4	0.1
Swebit 50 Platta	5	d1	4855	1.4	0.0
Swebit 50 Platta	5	d2	4860	2.0	0.0

Provkropparnas horisontella deformation

2 C

Massa	Provkropp	Diameter	Horisontell deformation [μm]	Standardavvikelse [μm]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	5.17	0.14	2.68
70/100 Marshall	C	d2	5.19	0.14	2.78
70/100 Marshall	E	d1	4.08	0.08	1.95
70/100 Marshall	E	d2	4.14	0.05	1.20
70/100 Marshall	H	d1	4.25	0.10	2.42
70/100 Marshall	H	d2	4.86	0.11	2.27
70/100 Platta	1	d1	5.15	0.15	2.99
70/100 Platta	1	d2	5.19	0.17	3.27
70/100 Platta	2	d1	4.81	0.13	2.75
70/100 Platta	2	d2	5.09	0.13	2.64
70/100 Platta	6	d1	5.01	0.13	2.65
70/100 Platta	6	d2	5.21	0.20	3.91
Swebit 50 Marshall	A	d1	3.97	0.08	1.93
Swebit 50 Marshall	A	d2	4.07	0.06	1.55
Swebit 50 Marshall	E	d1	3.96	0.07	1.82
Swebit 50 Marshall	E	d2	4.16	0.08	1.83
Swebit 50 Marshall	G	d1	3.65	0.09	2.49
Swebit 50 Marshall	G	d2	3.73	0.07	1.79
Swebit 50 Platta	3	d1	3.68	0.04	1.14
Swebit 50 Platta	3	d2	4.00	0.08	1.88
Swebit 50 Platta	4	d1	3.90	0.05	1.24
Swebit 50 Platta	4	d2	4.07	0.09	2.25
Swebit 50 Platta	5	d1	4.32	0.07	1.73
Swebit 50 Platta	5	d2	4.15	0.06	1.40

Provkropparnas styvhetmoduler

10 C

Massa	Provkropp	Diameter	Justerad styvhetsmodul [MPa]	Standardavvikelse [MPa]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	5352	380.42	7.11
70/100 Marshall	E	d1	6326	299.21	4.73
70/100 Marshall	H	d1	6025	369.53	6.13
70/100 Platta	1	d1	4543	395.32	8.70
70/100 Platta	2	d1	4605	257.64	5.59
70/100 Platta	6	d1	4939	384.04	7.78
Swebit 50 Marshall	A	d1	7785	132.75	1.71
Swebit 50 Marshall	A	d2	7495	234.21	3.12
Swebit 50 Marshall	E	d1	7316	254.94	3.48
Swebit 50 Marshall	E	d2	7231	274.72	3.80
Swebit 50 Marshall	G	d1	8178	296.50	3.63
Swebit 50 Marshall	G	d2	7449	237.66	3.19
Swebit 50 Platta	3	d1	7522	257.22	3.42
Swebit 50 Platta	3	d2	6864	223.64	3.26
Swebit 50 Platta	4	d1	8339	298.62	3.58
Swebit 50 Platta	4	d2	7925	235.15	2.97
Swebit 50 Platta	5	d1	-		
Swebit 50 Platta	5	d2	-		

Vertikal last på provkropparna

10 C

Massa	Provkropp	Diameter	Största last [N]	Standardavvikelse [N]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	2784	1.7	0.1
70/100 Marshall	E	d1	3224	3.4	0.1
70/100 Marshall	H	d1	3060	3.0	0.1
70/100 Platta	1	d1	2417	1.6	0.1
70/100 Platta	2	d1	2409	0.6	0.0
70/100 Platta	6	d1	2570	3.2	0.1
Swebit 50 Marshall	A	d1	3916	1.6	0.0
Swebit 50 Marshall	A	d2	3887	1.2	0.0
Swebit 50 Marshall	E	d1	3808	6.6	0.2
Swebit 50 Marshall	E	d2	3733	5.2	0.1
Swebit 50 Marshall	G	d1	4227	0.9	0.0
Swebit 50 Marshall	G	d2	3866	5.9	0.2
Swebit 50 Platta	3	d1	3760	1.6	0.0
Swebit 50 Platta	3	d2	3557	3.6	0.1
Swebit 50 Platta	4	d1	4316	1.9	0.0
Swebit 50 Platta	4	d2	3990	2.4	0.1
Swebit 50 Platta	5	d1	-		
Swebit 50 Platta	5	d2	-		

Provkropparnas horisontella deformation

10 C

Massa	Provkropp	Diameter	Horisontell deformation [μm]	Standardavvikelse [μm]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	5.48	0.37	6.71
70/100 Marshall	E	d1	5.33	0.26	4.82
70/100 Marshall	H	d1	5.30	0.31	5.84
70/100 Platta	1	d1	5.57	0.46	8.29
70/100 Platta	2	d1	5.44	0.29	5.37
70/100 Platta	6	d1	5.47	0.40	7.31
Swebit 50 Marshall	A	d1	5.11	0.08	1.65
Swebit 50 Marshall	A	d2	5.28	0.16	3.06
Swebit 50 Marshall	E	d1	5.33	0.18	3.35
Swebit 50 Marshall	E	d2	5.25	0.19	3.55
Swebit 50 Marshall	G	d1	5.23	0.18	3.50
Swebit 50 Marshall	G	d2	5.29	0.16	3.04
Swebit 50 Platta	3	d1	5.13	0.18	3.52
Swebit 50 Platta	3	d2	5.25	0.16	3.12
Swebit 50 Platta	4	d1	5.29	0.19	3.68
Swebit 50 Platta	4	d2	5.13	0.14	2.65
Swebit 50 Platta	5	d1	-		
Swebit 50 Platta	5	d2	-		

Provkropparnas styvhetmoduler

20 C

Massa	Provkropp	Diameter	Justerad styvhetsmodul [MPa]	Standardavvikelse [MPa]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	2046	287.85	14.07
70/100 Marshall	E	d1	2200	367.56	16.70
70/100 Marshall	H	d1	2078	278.43	13.40
70/100 Platta	1	d1	1180	260.77	22.10
70/100 Platta	2	d1	1305	210.28	16.11
70/100 Platta	6	d1	1200	186.71	15.56
Swebit 50 Marshall	A	d1	3033	243.73	8.04
Swebit 50 Marshall	E	d1	3246	213.39	6.57
Swebit 50 Marshall	G	d1	3112	231.69	7.44
Swebit 50 Platta	3	d1	3563	161.09	4.52
Swebit 50 Platta	4	d1	3733	136.28	3.65
Swebit 50 Platta	5	d1	-		

Vertikal last på provkropparna

20 C

Massa	Provkropp	Diameter	Största last [N]	Standardavvikelse [N]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	1173	3.2	0.3
70/100 Marshall	E	d1	1316	2.0	0.2
70/100 Marshall	H	d1	1184	3.0	0.3
70/100 Platta	1	d1	794	3.3	0.4
70/100 Platta	2	d1	762	5.9	0.8
70/100 Platta	6	d1	706	1.5	0.2
Swebit 50 Marshall	A	d1	1636	5.2	0.3
Swebit 50 Marshall	E	d1	1701	1.0	0.1
Swebit 50 Marshall	G	d1	1649	3.8	0.2
Swebit 50 Platta	3	d1	1760	2.1	0.1
Swebit 50 Platta	4	d1	1837	0.6	0.0
Swebit 50 Platta	5	d1	-		

Provkropparnas horisontella deformation

20 C

Massa	Provkropp	Diameter	Horisontell deformation [μm]	Standardavvikelse [μm]	Varians [%]
70/100 Marshall	C	d1	6.10	0.77	12.68
70/100 Marshall	E	d1	6.45	1.01	15.72
70/100 Marshall	H	d1	6.09	0.74	12.21
70/100 Platta	1	d1	7.35	1.46	19.84
70/100 Platta	2	d1	6.31	0.88	14.01
70/100 Platta	6	d1	6.34	0.92	14.42
Swebit 50 Marshall	A	d1	5.65	0.41	7.30
Swebit 50 Marshall	E	d1	5.48	0.35	6.44
Swebit 50 Marshall	G	d1	5.54	0.41	7.36
Swebit 50 Platta	3	d1	5.26	0.24	4.63
Swebit 50 Platta	4	d1	5.13	0.18	3.46
Swebit 50 Platta	5	d1	-		

Appendix 3: Resultat från resonansfrekvensmetoden

Ny mätning 081202						
Prov	Data File	t (ms)	L (mm)	D (mm)	Vol (cm3)	Weight (g)
1	Platt70100_prov1_2grader.mat	6	48,90	99,71	381,82	904,90
	Platt70100_prov1_10grader.mat	3	48,90	99,71	381,82	904,90
	Platt70100_prov1_20grader.mat	3	48,90	99,71	381,82	904,90
	Platt70100_prov1_30grader.mat	1,5	48,90	99,71	381,82	904,90
	Platt70100_prov1_40grader.mat	1,5	48,90	99,71	381,82	904,90
kass	Platt70100_prov1_50grader.mat	1,5	48,90	99,71	381,82	904,90
kass	Platt70100_prov1_60grader.mat	1,5	48,90	99,71	381,82	904,90
2	Platt70100_prov2_2grader.mat	6	48,96	99,66	381,90	906,20
	Platt70100_prov2_10grader.mat	3	48,96	99,66	381,90	906,20
	Platt70100_prov2_20grader.mat	3	48,96	99,66	381,90	906,20
	Platt70100_prov2_30grader.mat	1,5	48,96	99,66	381,90	906,20
	Platt70100_prov2_40grader.mat	1,5	48,96	99,66	381,90	906,20
kass	Platt70100_prov2_50grader.mat	1,5	48,96	99,66	381,90	906,20
kass	Platt70100_prov2_60grader.mat	1,5	48,96	99,66	381,90	906,20
3	Platt70100_prov6_2grader.mat	6	48,99	99,71	382,50	907,30
	Platt70100_prov6_10grader.mat	3	48,99	99,71	382,50	907,30
	Platt70100_prov6_20grader.mat	3	48,99	99,71	382,50	907,30
	Platt70100_prov6_30grader.mat	1,5	48,99	99,71	382,50	907,30
	Platt70100_prov6_40grader.mat	1,5	48,99	99,71	382,50	907,30
kass	Platt70100_prov6_50grader.mat	1,5	48,99	99,71	382,50	907,30
kass	Platt70100_prov6_60grader.mat	1,5	48,99	99,71	382,50	907,30
4	marshall70100_provC_2grader.mat	6	49,02	101,75	398,58	930,10
	marshall70100_provC_10grader.mat	3	49,02	101,75	398,58	930,10
	marshall70100_provC_20grader.mat	3	49,02	101,75	398,58	930,10
	marshall70100_provC_30grader.mat	1,5	49,02	101,75	398,58	930,10
	marshall70100_provC_40grader.mat	1,5	49,02	101,75	398,58	930,10
kass	marshall70100_provC_50grader.mat	1,5	49,02	101,75	398,58	930,10
kass	marshall70100_provC_60grader.mat	1,5	49,02	101,75	398,58	930,10
5	marshall70100_provE_2grader.mat	6	48,97	101,79	398,46	931,80
	marshall70100_provE_10grader.mat	3	48,97	101,79	398,46	931,80
	marshall70100_provE_20grader.mat	3	48,97	101,79	398,46	931,80
	marshall70100_provE_30grader.mat	1,5	48,97	101,79	398,46	931,80
	marshall70100_provE_40grader.mat	1,5	48,97	101,79	398,46	931,80
kass	marshall70100_provE_50grader.mat	1,5	48,97	101,79	398,46	931,80
kass	marshall70100_provE_60grader.mat	1,5	48,97	101,79	398,46	931,80
6	marshall70100_provH_2grader.mat	6	49,05	101,58	397,47	927,50
	marshall70100_provH_10grader.mat	3	49,05	101,58	397,47	927,50
	marshall70100_provH_20grader.mat	3	49,05	101,58	397,47	927,50
	marshall70100_provH_30grader.mat	1,5	49,05	101,58	397,47	927,50
	marshall70100_provH_40grader.mat	1,5	49,05	101,58	397,47	927,50
kass	marshall70100_provH_50grader.mat	1,5	49,05	101,58	397,47	927,50
kass	marshall70100_provH_60grader.mat	1,5	49,05	101,58	397,47	927,50
7	marshallswebit_provA_2grader.mat	6	49,23	101,86	401,09	946,60
	marshallswebit_provA_10grader.mat	3	49,23	101,86	401,09	946,60
	marshallswebit_provA_20grader.mat	3	49,23	101,86	401,09	946,60
	marshallswebit_provA_30grader.mat	1,5	49,23	101,86	401,09	946,60
	marshallswebit_provA_40grader.mat	1,5	49,23	101,86	401,09	946,60
kass	marshallswebit_provA_50grader.mat	1,5	49,23	101,86	401,09	946,60
kass	marshallswebit_provA_60grader.mat	1,5	49,23	101,86	401,09	946,60
8	marshallswebit_provE_2grader.mat	6	49,14	101,90	400,73	944,10
	marshallswebit_provE_10grader.mat	3	49,14	101,90	400,73	944,10
	marshallswebit_provE_20grader.mat	3	49,14	101,90	400,73	944,10
	marshallswebit_provE_30grader.mat	1,5	49,14	101,90	400,73	944,10

	marshallswebit_provE_40grader.mat	1,5	49,14	101,90	400,73	944,10
kass	marshallswebit_provE_50grader.mat	1,5	49,14	101,90	400,73	944,10
kass	marshallswebit_provE_60grader.mat	1,5	49,14	101,90	400,73	944,10
9	marshallswebit_provG_2grader.mat	6	49,54	101,78	403,00	946,40
	marshallswebit_provG_10grader.mat	3	49,54	101,78	403,00	946,40
	marshallswebit_provG_20grader.mat	3	49,54	101,78	403,00	946,40
	marshallswebit_provG_30grader.mat	1,5	49,54	101,78	403,00	946,40
	marshallswebit_provG_40grader.mat	1,5	49,54	101,78	403,00	946,40
kass	marshallswebit_provG_50grader.mat	1,5	49,54	101,78	403,00	946,40
kass	marshallswebit_provG_60grader.mat	1,5	49,54	101,78	403,00	946,40
10	plattaswebit_prov3_2grader.mat	6	49,04	99,75	383,20	915,40
	plattaswebit_prov3_10grader.mat	3	49,04	99,75	383,20	915,40
	plattaswebit_prov3_20grader.mat	3	49,04	99,75	383,20	915,40
	plattaswebit_prov3_30grader.mat	1,5	49,04	99,75	383,20	915,40
	plattaswebit_prov3_40grader.mat	1,5	49,04	99,75	383,20	915,40
kass	plattaswebit_prov3_50grader.mat	1,5	49,04	99,75	383,20	915,40
kass	plattaswebit_prov3_60grader.mat	1,5	49,04	99,75	383,20	915,40
11	plattaswebit_prov4_2grader.mat	6	49,05	99,75	383,29	917,30
	plattaswebit_prov4_10grader.mat	3	49,05	99,75	383,29	917,30
	plattaswebit_prov4_20grader.mat	3	49,05	99,75	383,29	917,30
	plattaswebit_prov4_30grader.mat	1,5	49,05	99,75	383,29	917,30
	plattaswebit_prov4_40grader.mat	1,5	49,05	99,75	383,29	917,30
kass	plattaswebit_prov4_50grader.mat	1,5	49,05	99,75	383,29	917,30
kass	plattaswebit_prov4_60grader.mat	1,5	49,05	99,75	383,29	917,30
12	plattaswebit_prov5_2grader.mat		49,08	99,78	383,76	916,40
	plattaswebit_prov5_10grader.mat		49,08	99,78	383,76	916,40

Dens (kg/m3)	Temp °C	Measured			Measured		
		Damped natural frequency (fr)			Damping ratio (D)		
		f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	D1	D2	D3
2369,99	2,00	10714	15647		0,031	0,026	
2369,99	10,00	9946	14682		0,055	0,046	
2369,99	20,00	8923	13314		0,102	0,080	
2369,99	30,00	7377	11401		0,150	0,150	
2369,99	40,00	5362	8692		0,200	0,200	
2369,99	50,00	4365	4438		0,250	0,250	
2369,99	60,00	2744	4900		0,300	0,300	
2372,87	2,00	10751	15683		0,031	0,026	
2372,87	10,00	10036	14769		0,053	0,044	
2372,87	20,00	8901	13366		0,104	0,084	
2372,87	30,00	7521	11395		0,150	0,150	
2372,87	40,00	5386	8792		0,200	0,200	
2372,87	50,00	3584	4641		0,250	0,250	
2372,87	60,00	2411	2590		0,300	0,300	
2372,03	2,00	10861	15808		0,030	0,027	
2372,03	10,00	10180	14927		0,052	0,043	
2372,03	20,00	8962	13494		0,100	0,090	
2372,03	30,00	7409	11158		0,150	0,150	
2372,03	40,00	5318	8742		0,200	0,200	
2372,03	50,00	3036	4540		0,250	0,250	
2372,03	60,00	2294	2560		0,300	0,300	
2333,56	2,00	10817	15788		0,028	0,023	
2333,56	10,00	10094	14876		0,051	0,041	
2333,56	20,00	9276	13761		0,083	0,068	
2333,56	30,00	7752	11500		0,150	0,150	
2333,56	40,00	5838	9848		0,200	0,200	
2333,56	50,00	4377	5195		0,250	0,250	
2333,56	60,00	2163	3225		0,300	0,300	
2338,50	2,00	10850	15850		0,027	0,023	
2338,50	10,00	10161	14969		0,047	0,038	
2338,50	20,00	9292	13839		0,081	0,070	
2338,50	30,00	7918	11528		0,150	0,150	
2338,50	40,00	6068	10020		0,200	0,200	
2338,50	50,00	4768	7131		0,250	0,250	
2338,50	60,00	2542	3237		0,300	0,300	
2333,53	2,00	10908	15870		0,025	0,022	
2333,53	10,00	10204	15004		0,046	0,039	
2333,53	20,00	9292	13785		0,079	0,066	
2333,53	30,00	7809	11375		0,150	0,150	
2333,53	40,00	5980	9966		0,200	0,200	
2333,53	50,00	4922	5293		0,250	0,250	
2333,53	60,00	3137	3192		0,300	0,300	
2360,08	2,00	11126	16274		0,025	0,021	
2360,08	10,00	10572	15546		0,041	0,034	
2360,08	20,00	9601	14313		0,074	0,063	
2360,08	30,00	8389	13016		0,150	0,150	
2360,08	40,00	6848	11226		0,200	0,200	
2360,08	50,00	5729	7884		0,250	0,250	
2360,08	60,00	4171	5366		0,300	0,300	
2355,94	2,00	11088	16223		0,025	0,021	
2355,94	10,00	10472	15442		0,043	0,035	
2355,94	20,00	9578	14292		0,074	0,060	
2355,94	30,00	8365	11952		0,150	0,150	

2355,94	40,00	7058	10790		0,200	0,200	
2355,94	50,00	5100	8506		0,250	0,250	
2355,94	60,00	3928	7312		0,300	0,300	
2348,38	2,00	11188	16300		0,026	0,020	
2348,38	10,00	10676	15650		0,039	0,032	
2348,38	20,00	9712	14432		0,073	0,064	
2348,38	30,00	8541	12979		0,150	0,150	
2348,38	40,00	6906	10958		0,200	0,200	
2348,38	50,00	5611	9080		0,250	0,250	
2348,38	60,00	3967	5236		0,300	0,300	
2388,85	2,00	11194	16339		0,028	0,024	
2388,85	10,00	10614	15611		0,044	0,037	
2388,85	20,00	9673	14437		0,076	0,066	
2388,85	30,00	8293	12835		0,150	0,150	
2388,85	40,00	6588	10768		0,200	0,200	
2388,85	50,00	4978	10580		0,250	0,250	
2388,85	60,00	3850	5219		0,300	0,300	
2393,20	2,00	11195	16321		0,027	0,024	
2393,20	10,00	10594	15554		0,045	0,037	
2393,20	20,00	9674	14403		0,077	0,061	
2393,20	30,00	8392	12767		0,150	0,150	
2393,20	40,00	6620	10712		0,200	0,200	
2393,20	50,00	5101	6674		0,250	0,250	
2393,20	60,00	4132	9092		0,300	0,300	
2387,95	2,00	11152	16241		0,027	0,023	
2387,95	10,00	10525	15403		0,046	0,038	

Corrected from damping

 $E^* = E' / \cos(\text{Phase})$

Natural frequency (fn)			Real part dynamic modulus			Absolute dynamic modulus		
f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	E1' (MPa)	E2' (MPa)	E3' (MPa)	E1* (MPa)	E2* (MPa)	E3* (MPa)
10719	15652	0	26667	27 556		26 718	27 594	
9961	14697	0	23198	24 132		23 337	24 234	
8969	13357	0	19020	19 707		19 409	19 957	
7461	11531	0	13442	14 410		14 034	15 045	
5473	8871	0	7498	8 214		8 076	8 847	
4508	4584	0	5195	2 030		5 808	2 269	
2876	5137	0	2192	2 574		2 556	3 002	
10756	15688	0	26815	27 663		26 865	27 700	
10050	14784	0	23571	24 409		23 704	24 505	
8949	13413	0	18922	19 866		19 326	20 141	
7607	11525	0	13927	14 381		14 540	15 014	
5497	8973	0	7554	8 411		8 136	9 059	
3702	4793	0	3562	2 226		3 983	2 489	
2527	2715	0	1702	692		1 985	807	
10866	15814	0	27352	28 145		27 403	28 186	
10194	14941	0	24225	24 973		24 357	25 064	
9007	13549	0	19162	20 307		19 542	20 636	
7494	11286	0	13545	13 756		14 142	14 362	
5428	8922	0	7379	8 313		7 947	8 953	
3136	4689	0	2589	2 127		2 895	2 379	
2405	2684	0	1545	676		1 802	789	
10821	15792	0	28215	29 242		28 259	29 274	
10107	14889	0	24777	25 831		24 903	25 920	
9308	13793	0	21194	21 977		21 484	22 179	
7841	11632	0	15327	15 292		16 002	15 966	
5958	10051	0	9142	11 185		9 846	12 047	
4521	5365	0	5426	2 933		6 066	3 279	
2267	3381	0	1434,584	1 125		1 673	1 312	
10854	15854	0	28496,7	29 615		28 538	29 646	
10172	14980	0	25187,87	26 283		25 301	26 360	
9323	13873	0	21346,03	22 346		21 626	22 561	
8009	11660	0	16018,03	15 441		16 723	16 121	
6193	10227	0	9871,996	11 661		10 632	12 559	
4924	7365	0	6407	5 768		7 163	6 448	
2665	3393	0	1974,395	1 139		2 303	1 328	
10912	15874	0	28527	29 409		28 563	29 437	
10215	15016	0	25161	26 163		25 269	26 243	
9321	13815	0	21150	21 938		21 414	22 126	
7898	11505	0	15467	14 862		16 148	15 517	
6103	10172	0	9519	11 416		10 253	12 295	
5083	5467	0	6743	3 036		7 539	3 394	
3288	3346	0	2939	1 097		3 428	1 279	
11129	16278	0	30075	31 525		30 112	31 553	
10581	15555	0	27312	28 658		27 402	28 723	
9627	14341	0	22825	24 149		23 073	24 339	
8485	13165	0	17973	20 145		18 764	21 032	
6989	11457	0	12470	14 985		13 431	16 139	
5917	8143	0	9115	7 205		10 191	8 055	
4372	5625	0	5146	3 279		6 001	3 824	
11091	16227	0	29904	31 339		29 941	31 367	
10482	15452	0	26848	28 278		26 946	28 349	
9604	14318	0	22739	24 082		22 983	24 255	
8461	12089	0	17889	16 813		18 677	17 554	

7204	11012	0	13210	13 777		14 227	14 838	
5267	8785	0	7326	8 485		8 191	9 486	
4118	7665	0	4594	6 334		5 358	7 386	
11192	16303	0	30033	31 233		30 075	31 259	
10684	15658	0	27489	28 695		27 574	28 755	
9738	14462	0	23047	24 271		23 288	24 471	
8639	13128	0	18372	19 772		19 181	20 643	
7048	11184	0	12520	14 051		13 485	15 134	
5795	9378	0	8661	9 633		9 683	10 770	
4159	5489	0	4622	3 076		5 390	3 588	
11198	16344	0	29171	30 398		29 215	30 432	
10624	15622	0	26389	27 645		26 490	27 720	
9701	14469	0	22205	23 518		22 456	23 722	
8388	12982	0	16867	18 690		17 610	19 513	
6724	10990	0	11122	13 100		11 979	14 109	
5141	10927	0	6707	12 940		7 499	14 467	
4036	5471	0	4235	2 960		4 939	3 452	
11199	16326	0	29227	30 386		29 270	30 420	
10605	15565	0	26343	27 488		26 448	27 564	
9703	14430	0	22253	23 433		22 516	23 609	
8488	12913	0	17279	18 516		18 040	19 332	
6757	10933	0	11243	12 981		12 109	13 980	
5268	6893	0	7036	4 835		7 866	5 406	
4332	9531	0	4854	9 673		5 661	11 280	
11156	16245	0	28962	30 016		29 005	30 049	
10536	15414	0	25975	26 879		26 085	26 957	

Poi Used		
f1	f2	
0,241	0,239	
0,251	0,248	
0,266	0,263	
0,294	0,288	
0,344	0,336	
0,375	0,437	
0,433	0,424	
0,241	0,239	
0,250	0,247	
0,266	0,262	
0,291	0,288	
0,344	0,334	
0,403	0,432	
0,446	0,476	
0,240	0,238	
0,248	0,246	
0,265	0,261	
0,293	0,292	
0,346	0,335	
0,424	0,435	
0,450	0,476	
0,238	0,235	
0,246	0,243	
0,258	0,255	
0,283	0,283	
0,327	0,310	
0,371	0,416	
0,453	0,462	
0,237	0,234	
0,245	0,242	
0,257	0,254	
0,279	0,282	
0,320	0,306	
0,358	0,366	
0,439	0,462	
0,237	0,235	
0,245	0,243	
0,258	0,255	
0,282	0,285	
0,324	0,308	
0,353	0,414	
0,416	0,463	
0,233	0,230	
0,240	0,237	
0,252	0,248	
0,270	0,261	
0,300	0,285	
0,327	0,348	
0,376	0,409	
0,234	0,231	
0,241	0,237	
0,252	0,248	
0,270	0,275	

0,295	0,292	
0,346	0,334	
0,384	0,359	
0,234	0,231	
0,239	0,236	
0,251	0,248	
0,268	0,263	
0,300	0,290	
0,332	0,322	
0,384	0,413	
0,235	0,233	
0,242	0,239	
0,254	0,250	
0,275	0,267	
0,310	0,296	
0,354	0,297	
0,391	0,416	
0,235	0,233	
0,242	0,239	
0,254	0,250	
0,273	0,268	
0,309	0,297	
0,350	0,381	
0,380	0,322	
0,236	0,234	
0,243	0,241	

