

SBUF Rapport 12017

Författare
Nils Rydén/
Cathrine Johansson

Datum
2008-11-06

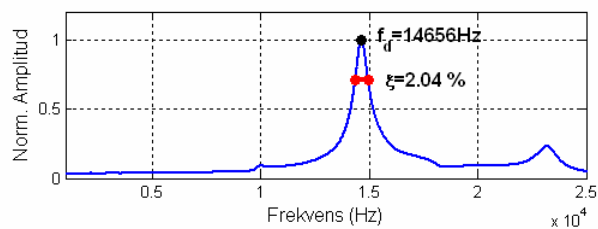
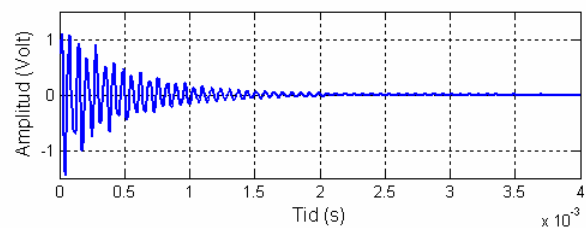
Telefon
042-152562

Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar

Delrapport Etapp 2: Test av mätmetod på asfaltprover



f_2 Prov 1A 0 deg C



Förord

Resultaten från SBUF-projekt ”Seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar, etapp 2” indikerar att det är möjligt att mäta upp den dynamiska styvhetsmodulen på asfaltprovkroppar genom resonansfrekvens (f_r) mätningar. Den föreslagna f_r metoden är snabbare, enklare, och mer repeterbar jämfört med traditionella metoder för att bestämma styvhetsmodulen på asfaltprover.

Projektet har genomförts med stöd av SBUF och Vägverket. I styr och referensgrupperna har det funnits representanter från Peab Sverige AB, Peab Asphalt AB, Skanska Sverige AB, Lunds Tekniska Högskola, Vägverket, och VTI. Författarna vill rikta ett stort tack till finansiärernas ekonomiska stöd samt stödet från referensgruppen.

Helsingborg 2008-11-06

Innehållsförteckning

Sammanfattning Etapp 1	2
Sammanfattning Etapp 2	3
1. Inledning.....	4
1.1 Syfte	5
1.2 Genomförande	5
1.3 Förväntade resultat	6
2. Etapp 2: Test av mätmetod på asfaltprover	7
2.1 Bakgrund – asfaltens dynamiska styvhetsmodul	7
2.2 Bakgrund – teori för f_r mätningar	9
2.3 Metodbeskrivning f_r mätningar asfaltprover.....	11
2.4 Test av repeterbarheten i f_r mätningar på asfaltprover	13
2.5 Resultat från f_r mätningar på asfaltprover 1A-1C.....	16
2.6 Jämförelse med indirekt pressdragprovning	21
2.7 Jämförelse med Witczaks ekvation	23
3. Diskussion av resultat.....	25
4. Slutsatser	26
5. Referenser.....	27
Appendix A	A

Sammanfattning Etapp 1

Projektet syftar till att utveckla en enkel och snabb metod baserad på resonansfrekvens (f_r) mätningar för att kunna mäta upp styvhetsmodulen på cirkulär cylindriska asfaltprover i laboratorium. Alla fasta kroppar har sin egen specifika resonansfrekvens vilken är beroende av styvheten i materialet och geometrin på objektet. För ett material med känd geometri går det därför att bestämma materialets styvhet indirekt genom att mäta upp resonansfrekvensen. Tekniken ger därmed en direkt koppling mellan styvhetsmodul och frekvens vilket är viktigt vid mätning på viskolelastiska material som asfalt.

I denna första etapp har möjligheten att genomföra f_r mätningar på provkroppar med varierande geometri undersökts. En litteraturstudie har visat att det är relativt komplicerat att beräkna egenfrekvensen för cirkulär cylindriska provkroppar med ett godtyckligt geometriskt förhållande mellan tjocklek och diameter. I nuläget har därför den geometriska korrektionsfaktorn uppskattats med hjälp av presenterade referenstabeller från litteraturstudien. En betongcylinder med känd dynamisk styvhetsmodul har sågats upp i diskar med varierande tjocklekar för att testa tekniken på provkroppar med varierande geometri. Medelvärdet av styvhetsmodulen i diskarna blev 34.07 GPa vilket är mycket nära referensvärdet från den ursprungliga cylindern på 34.16 GPa. Detta ger en indikation på att metodiken fungerar för olika geometrier. Resultaten visar också att repeterbarheten i f_r mätningarna på betong är mycket god. Variationskoefficienten för 50 individuella mätningar understiger 1 promille. Noggrannheten i den uppmätta geometrin och densitet är dock också mycket viktig vid beräkningen av styvhetsmodulen.

I etapp 2 kommer mätmetoden att anpassas till styvhetsmodulmätning på asfalt med en koppling till asfaltens frekvens och temperaturberoende styvhet. Ett datorprogram för att beräkna den exakta geometriska korrektionsfaktorn för olika geometrier kommer också att utvecklas.

Sammanfattning Etapp 2

I detta projekt har en ny metod för mätning av styvhetsmodul på asfaltprovkroppar utvecklats. Metoden bygger på resonansfrekvens (f_r) mätningar på cylindriska asfaltprovkroppar. Genom att mäta upp flera olika svängningsmoder vid flera olika temperaturer kan en masterkurva konstrueras på konventionellt sätt.

Masterkurvor från f_r mätningar har jämförts med masterkurvor predikterade med Witzzaks ekvation och visar på god överensstämmelse vid höga frekvenser (>100 Hz). Skillnaderna vid lägre frekvenser kan möjligen förklaras av att Witzzaks ekvation inte tar hänsyn till ett polymermodifierat bitumen, vilket har för avsikt att öka modulen vid lägre frekvenser (eller högre temperaturer). Det bör dock påpekas att den lägre asymptoten i de utvärderade masterkurvorna är osäkrare än den högre på grund av att alla resultat från f_r metoden ligger inom ett relativt högt frekvensområde.

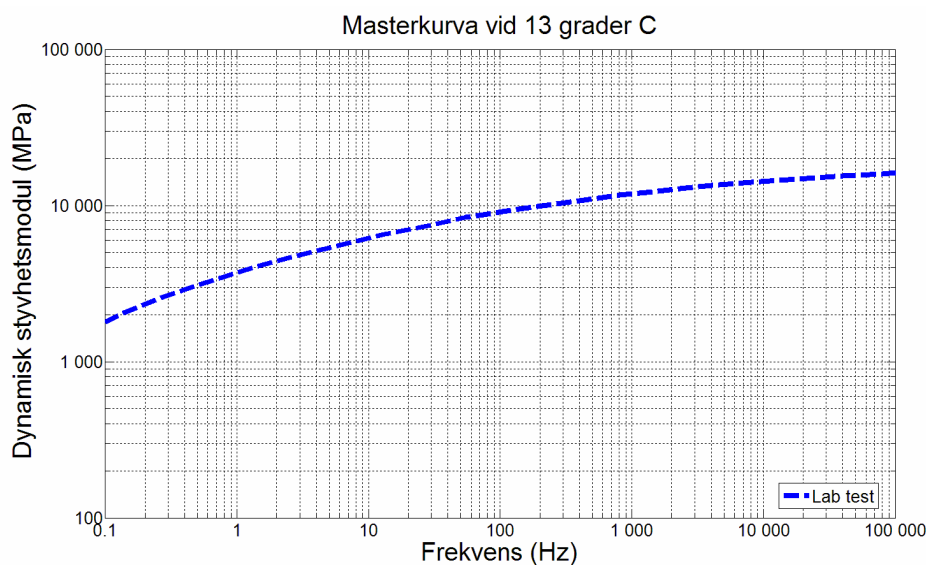
Resultaten från f_r mätningar har också jämförts med styvhetsmoduler från pulserande indirekt pressdragprovning. Det är svårt att uppskatta en representativ frekvens från pressdragprovningen och därför svårt att göra en direkt jämförelse med masterkurvor. Styvhetsmoduler från pulserande indirekt pressdragprovning vid de lägsta temperaturerna (-10 och 0° C) visar dock på en viss överensstämmelse med masterkurvorna från f_r mätningarna.

Fördelarna med den föreslagna f_r metoden kan sammanfattas som:

- Metoden är snabb, enkel, och helt oförstörande.
- Olika geometrier kan testas vilket gör metoden praktisk för både uppborrade och laboratorieinpackade provkroppar.
- Repeterbarheten i f_r mätningar är mycket god. Variationskoefficienten från 50 upprepade mätningar på samma provkropp vid 20° C blev 0.1 % i uppmätt frekvens och 0.2 % i beräknad styvhetsmodul. Dessa varianser är cirka 10 gånger lägre än motsvarande varianser från indirekt pressdragprovning.

1. Inledning

Framtidens analytiska och mekanistiska dimensioneringsmetoder för vägar kräver metoder som kan mäta upp fundamentala materialegenskaper i både fält och laboratorium. Funktionsupphandlingar av vägar genererar redan idag ett ökat behov av effektiva, enkla och framförallt oförstörande mätmetoder för att bestämma kvalitetsparametrar för asfaltbeläggningar. Ljudvågsmätningar (seismik) ger en möjlighet att mäta upp asfaltens styvhetsmodul i både laboratorium och fält. Detta ger en möjlighet att etablera den viktiga länken mellan dimensionering och mätning/kontroll. Beläggningsens tjocklek dimensioneras främst av två avgörande parametrar, trafikmängd och styvhetsmodul på asfaltlagren. Asfaltens styvhetsmodul är beroende av aktuell temperatur och belastningens frekvens, se exempel i Figur 1.



Figur 1. Asfaltens dynamiska styvhetsmodul kan beskrivas med en masterkurva som visar modulens variation med frekvens för en referenstemperatur.

Det finns ett stort behov av att kunna mäta upp masterkurvan på asfaltprovkroppar med en enkel, billig, och oförstörande metod (Witczak 2000). Masterkurvan ger en fullständig karakterisering av asfaltmassans viskoelastiska egenskaper och används redan idag för mekanistisk dimensionering av vägar (AASHTO 2002, Ekdahl et al. 2004). Mycket forskning har lagts på att kunna prediktera hela masterkurvan utifrån ett givet recept på asfaltmassan, till exempel Witczaks ekvation (Witczak 2000; Garcia and Thompson, 2007). Men för noggrann design eller utveckling av nya recept krävs fortfarande mätmetoder som kan mäta upp masterkurvan på asfaltprovkroppar i laboratorium.

Traditionella metoder för att mäta upp styvhetsmodulen på asfaltprovkroppar bygger på enaxliga dynamiska tryckförsök. I dessa försök utsätts provet för en lastpuls som ska efterlikna belastningen från en verklig trafikbelastning. Provets dynamiska styvhetsmodul beräknas sedan från pålagd spänning och återgående (elastisk) deformation. Idag finns det tre standardmetoder för denna typ av försök (SS-EN 12697-26:2004, FAS Metod 454-98 samt BS DD 213-1993). Stor spridning i resultaten (Brown and Foo 1991) och problem att bestämma en representativ frekvens gör dock dessa metoder mindre lämpliga för att bestämma masterkurvan. Istället används idag cykliska frekvenssvop för att bestämma den komplexa

styvhetsmodulen (Kim et al. 2004). Denna metod är relativt dyr och tidskrävande och har också visat på en viss spridning i resultat (Momen 2004). Spridningen i resultat från enaxliga tryckförsök (eller indirekt pulserande pressdragprovning) anses bero på att resultatet påverkas av hur provkropp och givare monteras i varje försök samt på grund av plastiska deformationer runt belastningspunkten (Daniel et al. 2004).

Resonansfrekvens (f_r) mätningar används inom många olika områden för att bestämma den dynamiska styvhetsmodulen på provkroppar med en symmetrisk geometri (Leming et al. 1998; Silva and Maia 1999). Det finns en standard för betongcylindrar (ASTM C 215) som även testats på asfaltcylindrar av Whitmoyer och Kim (1994). Standarden bygger på f_r mätningar på stora cylindrar där längden måste vara minst dubbelt så lång som diametern. Kweon och Kim (2006) jämförde mätningar med denna standard på cylindrar av asfalt och fann god överensstämmelse med styvhetsmodulen från cykliska enaxliga tryckförsök. Tyvärr har asfaltprover från borrhärdor eller laboratorietillverkning normalt inte den geometri som krävs för f_r mätningar enligt standarden för stora cylindrar (ASTM C 215). Standarden för betongcylindrar är dessutom endast baserad på en svängningsmod. För att kunna bestämma en masterkurva krävs att styvhetsmodulen kan mätas upp vid flera frekvenser (svängningsmoder) vid varje temperatur. Idag används borrhärdor samt laboratoriepackade (marshall) provkroppar med en diameter av 100 mm. Tjockleken kan variera beroende på hur tjocka lager som lagts ut på vägen. Därav kommer geometrin att förändras från provkropp till provkropp och från objekt till objekt.

Detta projekt syftar till att vidareutveckla f_r metoden för mätning på provkroppar med godtycklig geometri. Genom att dessutom kunna mäta upp flera svängningsmoder vid varje temperatur kan styvhetsmodulens frekvensberoende karakteriseras. Detta skulle kunna leda till en enkel och billig metod att bestämma masterkurvan på asfaltprovkroppar med godtycklig geometri. Metoden är totalt oförstörande vilket lämpar sig väl för att studera olika faktorer som påverkar styvhetsmodulen såsom vattenkvot, hållrumshalt, åldring mm. Metoden har också möjlighet för en direkt jämförelse med oförstörande provning i fält med hjälp av seismiska mätningar (Ryden and Park, 2006).

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka möjligheten att genomföra f_r mätningar på viskoelastiska material (asfalt) och provkroppar med varierande geometri. Detta innebär ett första steg i implementering av seismiska mätningar för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar. Provningsmetoden ger möjlighet att mäta styvhetsmodulen enklare och mer tillförlitligt både i fält och i laboriemiljö. Projektet kommer att ligga till grund för vidare undersökningar av olika typer av asfaltkonstruktioner. Metoden kommer att komma till nytta inom både asfalt och betongbranschen.

1.2 Genomförande

Projektet har delats in i olika etapper där etapp 1 har undersökt anpassningen av mätmetoden (f_r mätning) till geometrin på borrhärdor (SBUF rapport 11782). Etapp 1 visade att metoden fungerar på betong med geometrier lämpliga för asfaltprover (puckar). I etapp 2 kommer mätmetoden (f_r mätning) att anpassas till styvhetsmodulmätning på asfalt. Asfaltens viskoelastiska egenskaper (frekvens och temperaturberoende styvhet och dämpning) påverkar mätmetoden och behöver studeras innan metoden kan tillämpas praktiskt på asfaltpuckar.

1.3 Förväntade resultat

Projektet förväntas leda till en enklare och snabbare metod att bestämma styvhetsmodulen på cirkulär cylindriska asfaltprover i laboratorium. Metoden bygger på mätningar och analys i frekvensdomän och kopplingen mellan styvhetsmodul och frekvens är därför given. Eftersom det finns flera olika resonansfrekvenser vid en given temperatur förväntas styvhetsmodulens frekvensberoende kunna mätas upp med den föreslagna metoden. Mätningar på samma provkropp vid olika temperaturer kan då läggas samman till en så kallad masterkurva (Figur 1) som beskriver styvhetsmodulens frekvensberoende för en given referenstemperatur. Vi avser att jämföra masterkurvor utvärderade på detta nya enklare sätt med uppmätta masterkurvor från traditionella laboratorieförsök med UTM-25 (Universal Testing Machine-25 kN) och Witzzaks ekvation i Design Guide 2002.

Projektet drivs som ett samarbete mellan PEAB och LTH finansierat av SBUF, Vägverket, och Peab.

2. Etapp 2: Test av mätmetod på asfaltprover

2.1 Bakgrund – asfaltens dynamiska styvhetsmodul

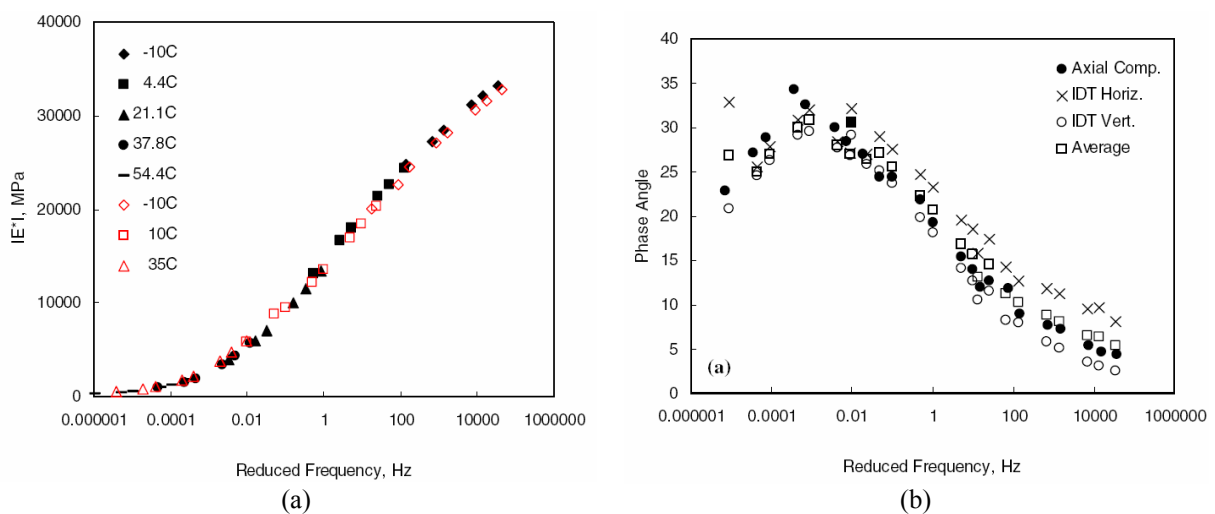
Den dynamiska styvhetsmodulen $|E^*|$ anses vara den viktigaste materialegenskapen vid dimensionering för utmattning och permanenta deformationer i bundna asfaltlager (Garcia and Thompson, 2007). E definieras som axiell spänning (σ_l) genom axiell töjning (ε_l) och beskriver alltså hur materialet deformeras vid en given belastning. För ett viskoelastiskt material som asfalt är styvhetsmodulen och den viskösa dämpning beroende av aktuell temperatur (T) och belastningens frekvens (f), se exempel i Figur 1. För att ta hänsyn till både styvhet och dämpning i en och samma parameter används ofta en komplex styvhet (E^*):

$$E^* = E' + iE'' = |E^*|e^{i\phi} \quad (1)$$

där real delen (E') representerar elastisk energi och den imaginära delen (E'') representerar viskösa energi. Fasvinkeln (ϕ) i det komplexa planet beskriver förhållandet mellan E' och E'' och kan relateras till den viskoelastiska dämpningsfaktorn (ξ) som:

$$\xi = \tan(\phi) / 2 = \frac{E''}{2E'} \quad (2)$$

Figur 2 visar typiska resultat på $|E^*|$ och ϕ som funktion av frekvens, masterkurva. Masterkurvan i Figur 2 har tagits fram genom mätningar vid olika temperaturer (-10° till 54.4° C) och olika frekvenser (0.01-25 Hz) (Kim et al. 2004). Genom att anta ett termoreologiskt enkelt viskoelastiskt material kan mätpunkterna förskjutas längs frekvensaxeln så att alla mätvärden från olika temperaturer sammanfaller i en och samma kurva (tid-temperatur superpositioneringsprincipen). Efter att mätpunkterna förskjutits längs frekvensaxeln används en reducerad frekvens (f_{red}) istället för den ursprungliga uppmätta frekvensen.



Figur 2. Exempel på masterkurva vid 10° C från laboriemätningar av både $|E^*|$ och ϕ från Kim et al. 2003.

Den reducerade frekvensen gäller för en referenstemperatur (T_{ref}) (10° C i Figur 2) och relateras till den ursprungliga frekvensen med en skiftfaktor (a_T), Ekvation 3.

$$f_{red} = a_T f \quad (3)$$

a_T beskrivs ofta med den så kallade WLF (Williams, Landel, Ferry) ekvationen:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (4)$$

där C_1 och C_2 är konstanter som är beroende av T_{ref} . För att beskriva masterkurvan matematiskt används en så kallad sigmoidal funktion (Sayegh, 1967). Med hjälp av sigmoidalekvationen och skiftfaktorn kan styvhetsmodulen uppskattas för en godtycklig frekvens och temperatur. Masterkurvan och skiftfaktorn är därför mycket användbar vid avancerad dimensionering där det är nödvändigt att ta hänsyn till olika belastningsfrekvenser och temperaturer (AASHTO 2002). Dessutom är masterkurvan till stor hjälp vid utveckling av nya asfaltrecept eftersom den ger en fullständig karakterisering av massans viskoelastiska egenskaper över ett brett tid-temperatur område. Från masterkurvan för E^* är det dessutom möjligt att beräkna både relaxationsmodulen och krypmodulen (Nilsson 2005) vilket gör den komplexa styvhetsmodulen till en mycket kritisk parameter vid dimensionering. Sigmoidal funktionen beskriver styvhetsmodulens frekvensberoende för en referenstemperatur med hjälp av konstanterna a_1 till a_4 enligt:

$$\log|E^*| = a_1 + \frac{a_2}{1 + e^{(a_3 - a_4 \log f_{red})}} \quad (5)$$

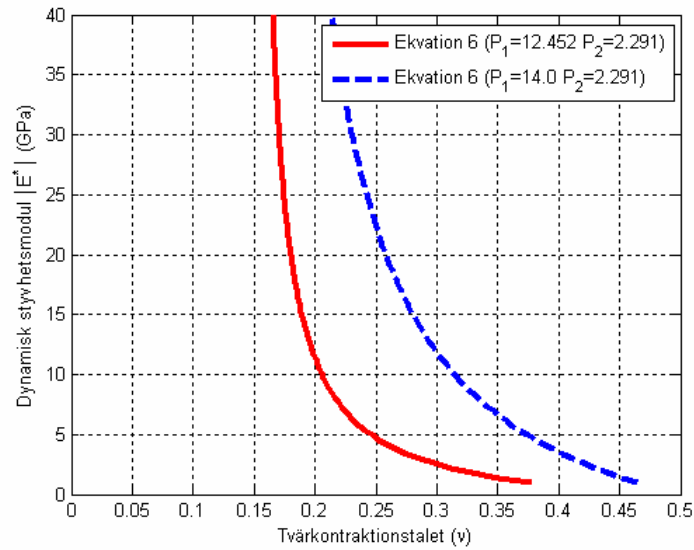
Koefficienterna a_1 till a_4 utvärderas genom att anpassa ekvationen till uppmätta datapunkter. Koefficienterna som använts i Figur 2 har angetts i Momen 2004 som (ger E^* i MPa) :

$$a_1=1.50592, a_2=3.09336, a_3=-1.93971, a_4=0.43362$$

Tvärkontraktionstalet (eller Poisson's tal) (ν) för asfalt är också beroende av temperatur och frekvens. Flera olika approximativa samband och rekommendationer för storleken på ν har presenterats (Sayegh, 1967, Aouad 1993, AASHTO 2002). I den amerikanska standarden ME-PDG (AASHTO 2002) anges ν som en funktion av $|E^*|$:

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(P_1 + (P_2 * \log(E)))}} \quad (6)$$

där P_1 och P_2 är konstanter. $P_1=-12.452$ och $P_2=2.291$ rekommenderas för en tät massa med relativt grov ballast (AASHTO 2002). För massan som provats i denna studie användes $P_1=-14.0$ och $P_2=2.291$ vilket ger ett något högre ν i överensstämmelse med Aouad (1993), se Figur 3.



Figur 3. Föreslagna samband på relationen mellan $|E^*|$ och ν

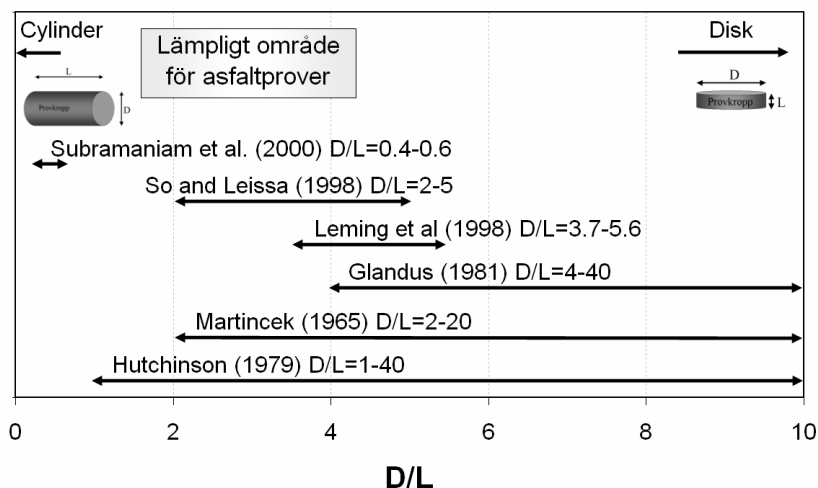
2.2 Bakgrund – teori för fr mätningar

I etapp 1 av detta projekt gavs en utförlig beskrivning av den bakomliggande teorin för fr mätningar på elastiska material (Ryden och Malmqvist 2006). Detta avsnitt sammanfattar de viktigaste delarna i teorin och utökar teorin till att innefatta resonansfrekvenser i viskoelastiska material med frekvensberoende dämpning och styvhet.

Principen att mäta upp resonansfrekvenser (f_{ni}) för att bestämma strukturella egenskaper används inom många olika tillämpningar (Silva and Maia 1999). En elastisk cylinder har flera olika svängningsmoder (i) med specifika resonansfrekvenser (f_{ni}) vilka är beroende av E-modulen (E), tvärkontraktionstalet (ν), längden (L), diametern (D), samt densiteten (ρ) på cylindern. För en homogen elastisk cylinder med känd geometri och vikt går det därför att bestämma materialets styvhetsmodul indirekt genom att mäta upp en eller flera resonansfrekvenser. En förutsättning för att kunna använda metoden i praktiken är att det teoretiskt går att prediktera resonansfrekvenser utifrån givna materialegenskaper och geometri med hjälp av en funktion på följande form:

$$E_i = f(f_{ni}, L, D, \rho, \nu) \quad (7)$$

Det finns idag ingen exakt analytisk lösning av funktionen ovan för en godtycklig geometri. Detta är den främsta anledningen till att fr metoden generellt varit begränsad till enkla geometrier där f_n kan uppskattas med förenklade samband eller via uppslagstabeller. Tillexempel finns det en amerikansk standard som gäller för cylindrar med diameter/längd (D/L) mindre än 0.5 (ASTM C 215). Det finns också en ASTM standarden för tunna diskar där D/L måste vara större än 4 (ASTM 1876-99), se Figur 4. Asfaltprovkroppar har ett typiskt D/L förhållande på 2-3 och för denna geometri finns idag ingen standard. Ett flertal approximativa numeriska metoder har dock tagits fram (Martincek 1965; Hutchinson, 1979; Glandus, 1981; Leming et al., 1998; So och Leissa 1998; Subramaniam et al., 2000). Figur 5 visar en översikt över de teoretiska approximativa modeller som studerats i detta projekt.



Figur 4. Schematisk översikt över teoretiska approximativa modeller för att beräkna resonansfrekvenser för tredimensionella provkroppar.

I etapp 1 användes Martinec's metod (Martinec 1965) som approximation till Ekvation 8. Martinec's metod bygger på tabeller där f_1 och f_2 relateras till E . Förhållandet D/L och storleken på ν ger olika konstanter i Martinec's tabeller och på sätt kan resonansfrekvenserna för en asfaltprovkropp beräknas approximativt. I etapp 2 har en noggrannare numerisk metod (Rayleigh-Ritz metoden) använts för att lösa de partiella differentialekvationer som kan användas för att prediktera dynamiska svängningar i en godtycklig 3-dimensionell provkropp (So and Leissa 1998). Fördelen med denna metod är att den är noggrannare än uppslagstabeller och kan användas för godtyckliga geometrier (vilket D/L förhållande som helst) samt hur många svängningsmoder som helst.

Viskoelastiska materialegenskaper har inte studerats i någon av de teoretiska studier som presenteras i Figur 4. Martinec (1994) har presenterat en del inledande teoretiska modeller för f_r mätningar i viskoelastiska asfaltprovkroppar. Martinec har dragit slutsatsen att metoden inte är tillämpbar på asfalt på grund av för hög dämpning i materialet. Resultat från Aouad (1993) motsäger delvis Martinec's teori och visar att det går att göra f_r mätningar på asfaltprovkroppar ($D/L=0.5$) upp till 50° C. Whitmoyer och Kim (1994) presenterade mätningar upp till 43° C men poängterade svårigheten med att mäta upp resonansfrekvenser i stora asfaltcylindrar vid temperaturer över 30° C. I en senare studie på stora asfaltcylindrar använde Kweon och Kim (2006) 30° C som högsta temperatur. Kweon och Kim (2006) visade på god överensstämmelse med konventionella enaxliga tryckförsök (frekvenssvep) och rekommenderade att metoden bör vidareutvecklas för att kunna användas vid högre temperaturer.

Svårigheten att mäta resonansfrekvenser vid höga temperaturer härstammar från den viskoelastiska dämpningen i material. Eftersom metoden bygger på att mäta upp resonansfrekvensen, är det nödvändigt att provkroppen "hinner" vibrera tillräckligt länge för att resonansfrekvensen ska registreras. En lösning på detta problem är att använda mindre provkroppar med kortare längd (L). Provkroppar med ett större D/L förhållande är dessutom vanligare för asfaltprovkroppar i laboratorium och därmed mer praktiskt tillämpbart för asfaltprover.

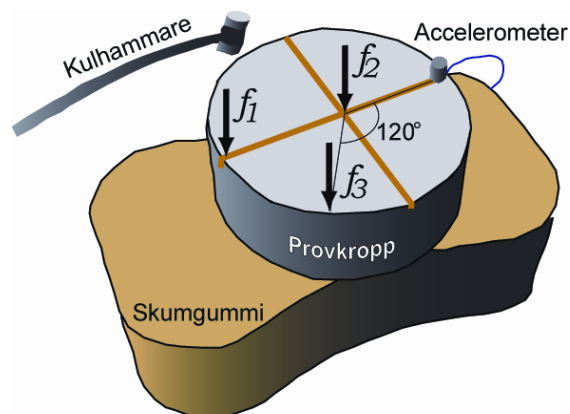
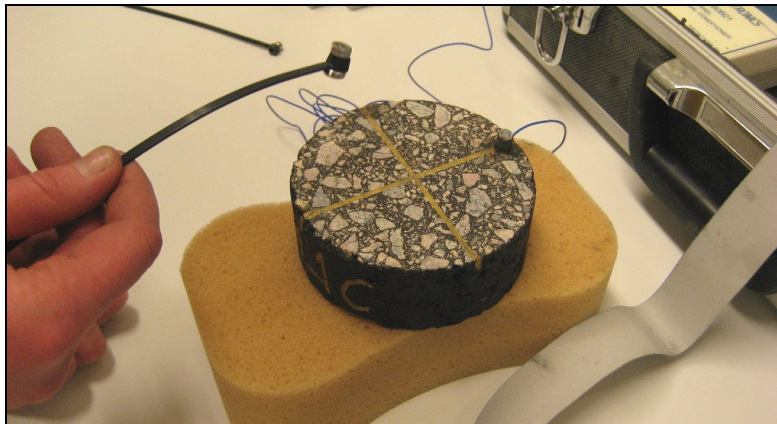
Resonansfrekvenser i viskoelastiska material skiljer sig något från resonansfrekvenser i ett rent elastiskt material. Dämpningsfaktorn (ξ) i materialet reducerar egenfrekvensen (f_n) till en dämpad resonansfrekvens (f_d) enligt följande samband:

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (8)$$

Vid låga temperaturer är ξ väldigt låg (~ 0.020) och Ekvation 9 har liten praktisk betydelse. Men vid låga frekvenser eller höga temperaturer ökar ξ till upp mot ~ 0.300 (motsvarar fasvinkel $\phi=31^\circ$) och ger därmed en betydande inverkan på f_n vilket måste beaktas. Detta innebär att ξ också måste mätas upp för respektive dämpade resonansfrekvens.

2.3 Metodbeskrivning fr mätningar asfaltprover

Figur 5 visar mätupställningen som använts vid mätningar på asfaltprovkroppar i detta projekt. Efter temperering till aktuell temperatur läggs provkroppen på en bit skumgummi för att efterlikna ”fria” randvillkor. En liten accelerometer (här PCB modell 352B10) sätts fast nära kanten av provkroppen med hjälp av lite vax, se Figur 5. Accelerometerns läge definieras som 0° grader utmed diametern på provkroppen och 10 vertikala slag med den lilla kulhammaren (~ 10 g) appliceras i varje slagpunkt enligt Figur 5. Varje enskild signal (10 ms lång) sparas i datorn för transformation till frekvensdomän. I denna studie har ett datainsamlingskort från *Measurement Computing* (PC-CARD DAS 16/16-AO) använts för datainsamling med en samplingsfrekvens på 200 kHz och 16-bitars dynamik.



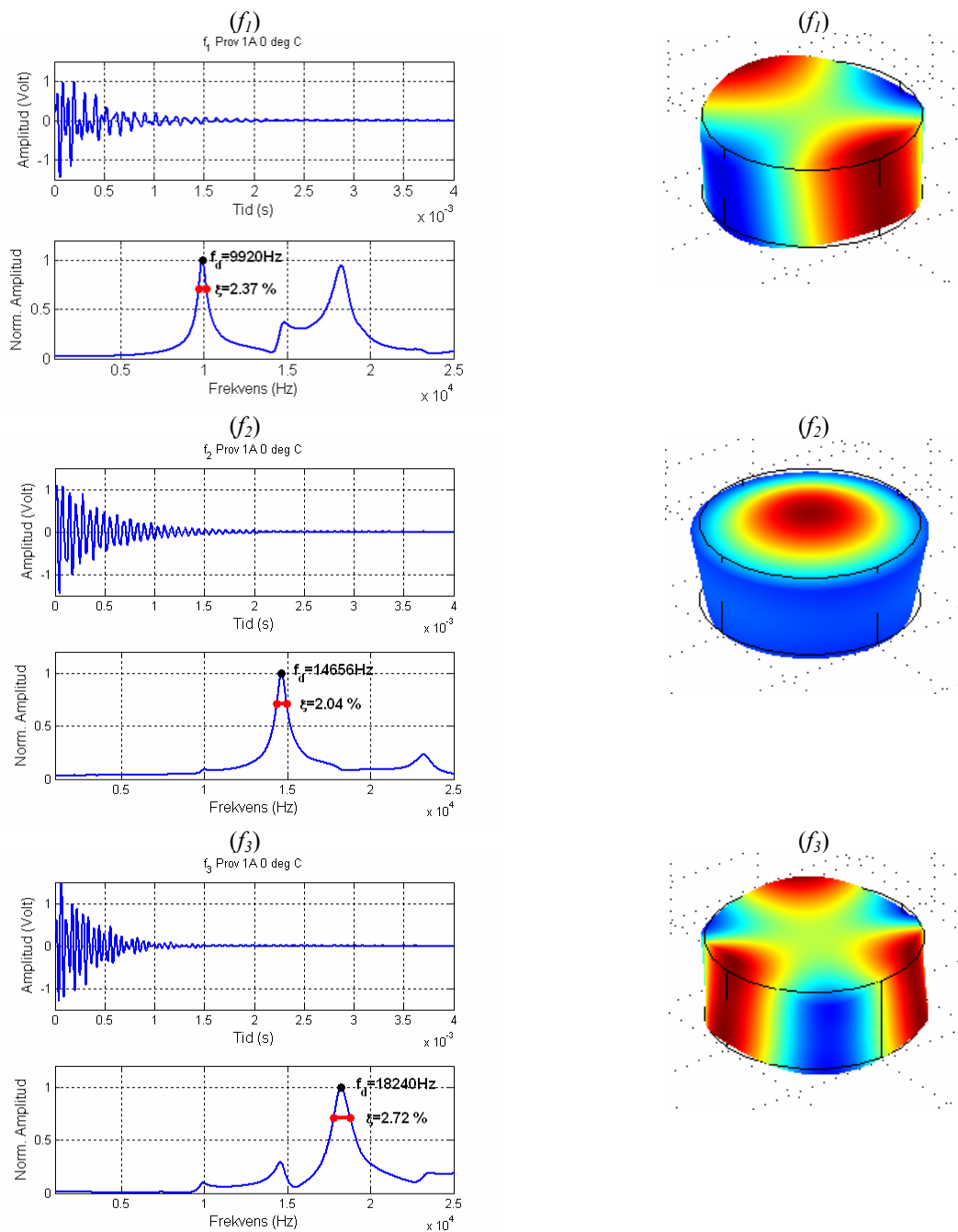
Figur 5. Mätuppställning för f_r mätningar på asfaltpuckar. Läget för generering av de tre första moderna (f_1 , f_2 , och f_3) är markerade med pilar.

Slagpunkterna markerade som f_1 , f_2 , och f_3 är valda för att excitera olika svängningsmoder i provkroppen. Den högra delen av Figur 6 visar svängningsmönstret för respektive mod. Dessa svängningsmoder valdes ut som potentiella moder för f_r metoden eftersom de visade sig vara lätta att generera med mätuppställningen i Figur 5. Det bör dock påpekas att det teoretiskt finns ett oändligt antal svängningsmoder för varje provkropp. Varje svängningsmod ger en styvhetsmodul representativ för den aktuella resonansfrekvensen. Fler moder ger alltså fler punkter som masterkurvan (Figur 1 och Figur 2) kan konstrueras utifrån. Men fler moder gör också metoden mer komplex eftersom det gäller att hålla rätt på vilken mod som är vilken när styvhetsmodulen beräknas med Ekvation 7.

Med en automatisk trigger och automatisk lagring av data tar det ungefär 1 min att utföra mätningen ovan för en provkropp och en temperatur. Figur 6 visar exempel på uppmätta signaler och amplitudspektrum från provkropp 1A (0° C). f_d och ξ utvärderas automatiskt via maxvärdet respektive bandbredden (Δf) vid 0.707 av maxvärdet för varje resonansfrekvens. Ekvation 9 används för att beräkna ξ :

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_d} \quad (9)$$

Ekvation 7 och 8 används sedan för att beräkna den komplexa styvhetsmodulen från varje resonansfrekvens.



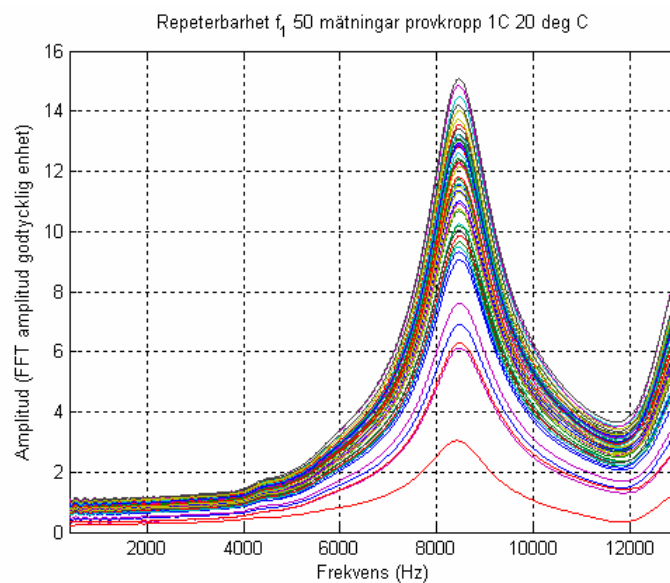
Figur 6. (vänster) Exempel på uppmätta signaler från provkropp 1A vid 0° C . (höger) illustration av respektive svängningsmod.

2.4 Test av repeterbarheten i f_r mätningar på asfaltprover

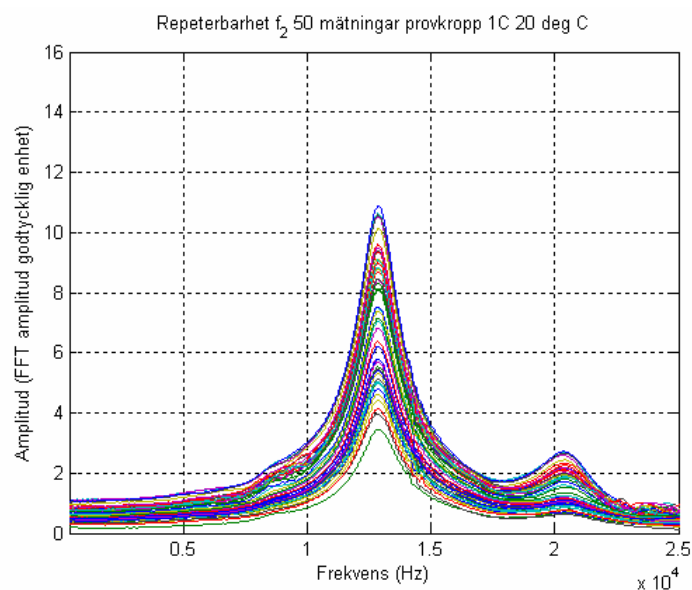
God repeterbarhet är ett fundamentalt krav för alla oförstörande mätmetoder. I etapp 1 av detta projekt (Ryden och Malmqvist 2006) undersöktes repeterbarheten för resonansfrekvensen på betongprovkroppar med olika D/L förhållanden. Variationskoefficienten (standard avvikelse/medelvärde) för f_d i dessa tester understeg 0.06% vilket får anses mycket bra. I viskoelastiska material dämpas resonansfrekvenserna ut

betydligt fortare vilket bör leda till en något sämre repeterbarhet. Det är därför motiverat att upprepa repeterbarhetstestet på asfaltprovkroppar.

För att undersöka repeterbarheten i asfaltprovkroppar utfördes 50 individuella mätningar i kanten (för f_1) och 50 individuella mätningar i mitten (för f_2) på provkropp 1C vid 20° C. Temperaturen 20° C valdes för att minimera en eventuell avkylning eller uppvärmning under själva försökets gång vilket utfördes i rumstemperatur (~23° C). Alla uppmätta amplitudspektrum från dessa mätningar har plottats i Figur 7 och Figur 8. I dessa figurer har amplituden inte normaliserats och variationen i amplitud mellan individuella mätningar är tydlig. Variationen i amplitud beror på att provkropparna exciteras manuellt med en liten kulhammare. Alla uppmätta amplituder antas dock ligga inom det linjära viskoelastiska området och antas därför inte påverka resonansfrekvensens storlek.

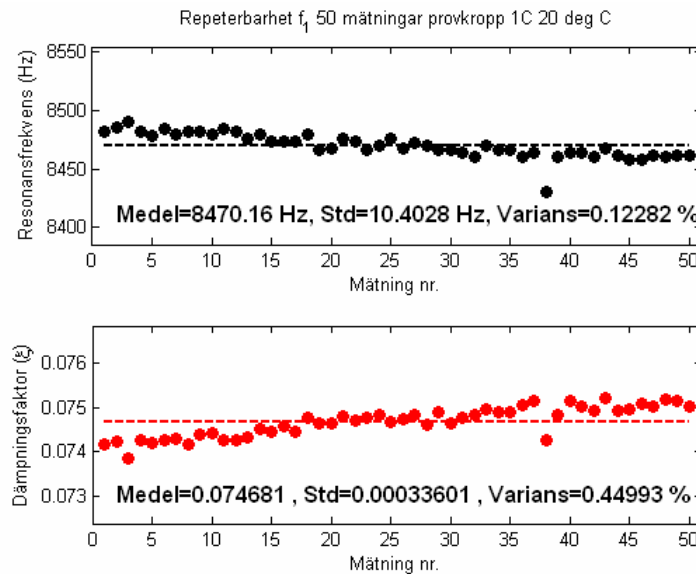


Figur 7. Amplitud spektrum från 50 upprepade mätningar med excitering i kanten (180 grader från accelerometern) för mätning av f_1 .

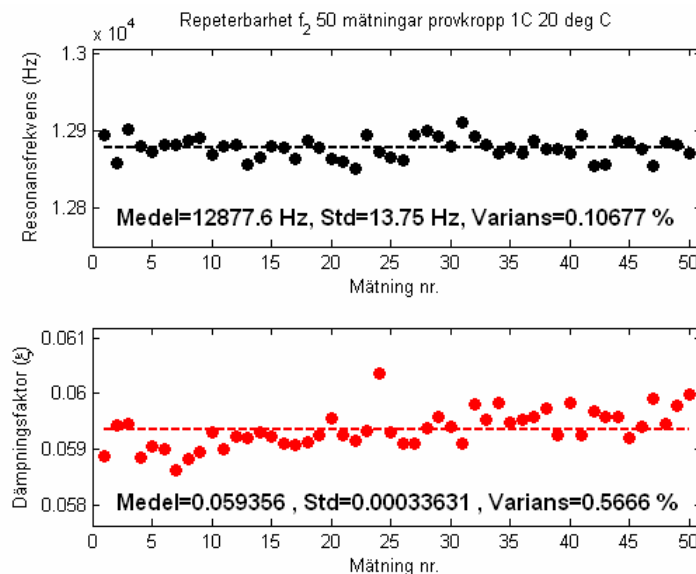


Figur 8. Amplitud spektrum från 50 upprepade mätningar med excitering i mitten på provkroppen för mätning av f_2 .

Figur 9 och Figur 10 visar extraherade f_d och ξ från de uppmätta spektrumen i Figur 7 och Figur 8. Variansen på f_d har beräknats till 0.123% respektive 0.107% för f_1 och f_2 . Variationen i ξ ligger något högre 0.450% respektive 0.567% för de båda resonansfrekvenserna. Resultaten i Figur 9 påvisar en synbar trend där f_d minskar och ξ ökar för varje mätning. Denna trend antyder att provet värms upp under själva försöket med 50 individuella mätningar. En eventuell uppvärmning av provet skulle kunna förklaras av den något högre rumstemperaturen ($\sim 23^\circ \text{C}$) och/eller den tillförda värmeenergin som frigörs via dämpningen i materialet. En annan förklaring skulle kunna vara utmattning i provkroppen trots de små töjningsnivåerna som används vid f_r mätningar (Daniel and Kim 2001). Trenden i Figur 9 är dock inte lika tydlig i Figur 10.

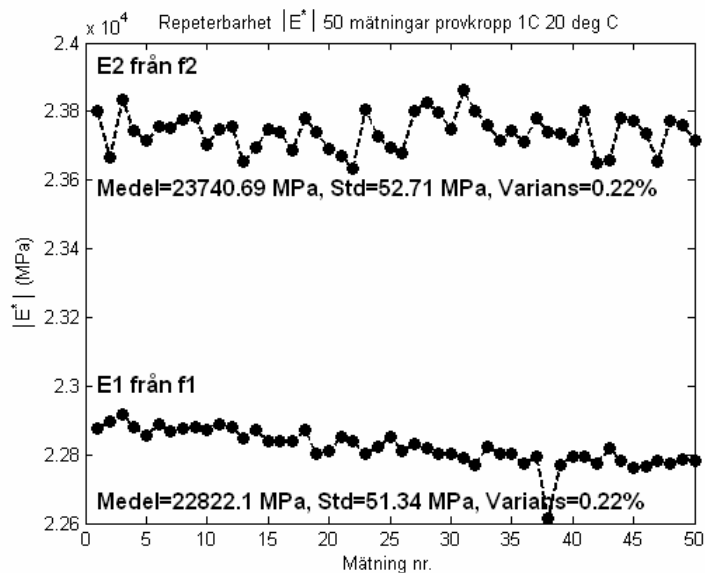


Figur 9. Resonansfrekvens (övre figuren) respektive dämpningsfaktor (nedre figuren) för alla 50 mätningar av f_1 . Medelvärdet från alla mätningar är markerat med en streckad linje.



Figur 10. Resonansfrekvens (övre figuren) respektive dämpningsfaktor (nedre figuren) för alla 50 mätningar av f_2 . Medelvärdet från alla mätningar är markerat med en streckad linje.

Den dynamiska styvhetsmodulen $|E^*|$ beräknas från både f_d och ξ (se Ekvation 8 och 9) samt geometrin och vikten på provkroppen. Figur 11 visar $|E1^*|$ och $|E2^*|$ beräknade från de två första resonansfrekvenserna som funktion av mättningsnummer i repeterbarhetsförsöken för respektive svängningsmod. Det bör observeras att de båda resonansfrekvenserna uppmättes med 50 separata mätningar per svängningsmod och det går därför inte att jämföra eventuella trender mellan $|E1^*|$ och $|E2^*|$ i Figur 11.



Figur 11. Beräknade dynamiska styvhetsmoduler $|E^*|$ från 50 upprepade f_r mätningar på provkropp 1C, 20° C.

Resultaten ovan visar att metoden är repeterbar även på provkroppar av asfalt. Detta är i och för sig inte oväntat för en oförstörande metod men i försöken ovan har variationskoefficienten för $|E^*|$ kunnat kvantifieras till 0.22% vid 20° C. Variationen i ξ är något högre än variationen i f_d vilket är gynnsamt eftersom f_d har betydligt större påverkan i beräkningen av $|E^*|$. Variationskoefficienten förväntas minska med minskande temperaturer och öka med ökande temperatur på grund av den ökande dämpningen vid högre temperaturer.

2.5 Resultat från f_r mätningar på asfaltprover 1A-1C

I denna studie har tre provkroppar (1A, 1B och 1C) tillverkats genom marshallpackad laborietillverkad asfaltmassa av typen ABT 11 med ett polymermodifierat bitumen, se Tabell 1. Provkropparna tillverkades av laborieblandad massa och varje provkropp packades in vid samma temperatur. Ändytorna sågades parallella till önskad tjocklek. Provkropparnas densitet bestämdes genom vägning samt mätning av diameter och tjocklek enligt EN 12627-29.

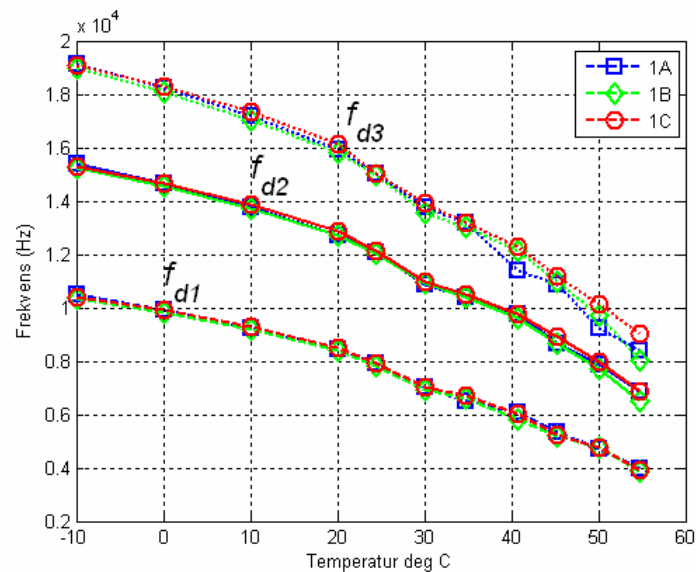
Efter mätning av resonansfrekvenser och indirekt pressdragprovning analyserades hålrums halt samt bindemedelshalt och kornstorleksfördelning på provkropparna, se Tabell 1.

Tabell 1. Data för provkropp 1A till 1C

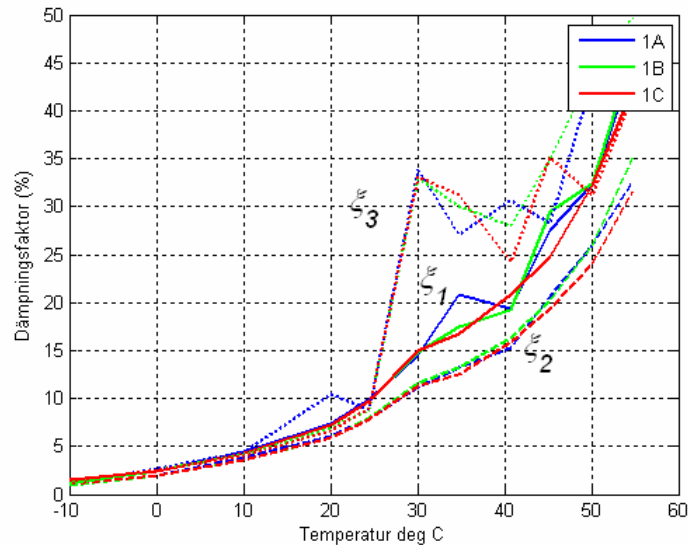
	1A	1B	1C
Diameter (D)	101.63 mm	101.84 mm	101.85 mm
Längd (L)	38.82 mm	38.89 mm	38.84 mm
Skrymdensitet (ρ)	2.371 g/cm ³	2.365 g/cm ³	2.380 g/cm ³
Hålrums halt (V_a)	1.9 %	2.4 %	1.9 %
Effektivt bitumen innehåll (V_{beff})	14.758 volym %	14.793 volym %	14.929 volym %

Resonansfrekvensmätningar har utförts vid 11 olika temperaturer mellan -10° C och 55° C. Alla mätningar har utförts enligt metodbeskrivningen i kap 2.3 med målet att mäta upp tre resonansfrekvenser vid respektive temperatur. Alla mätresultat samt dimensioner och vikt på provkropparna finns redovisade i Appendix A.

Figur 12 och Figur 13 visar uppmätta f_d och ξ för respektive temperatur och provkropp. Som väntat minskar f_d med ökande temperatur på grund av att styvhetsmodulen minskar. ξ följer också en förväntad trend där ξ ökar med ökande temperatur på grund av att den viskösa dämpningen. Dämpningen ska däremot minska med ökande frekvens vilket inte stämmer för ξ_3 i Figur 13. Denna avvikande trend är förmodligen ett resultat av att relativt höga dämpningsfaktorer inte går att mäta upp med den så kallade bandbreddsmetoden (illustrerad i Figur 6) och/eller att amplitudspektrumet påverkas av andra närliggande svängningsmoder. f_{d3} visar också på en större osäkerhet (högre standardavvikelse se Appendix A) jämfört med f_{d1} och f_{d2} .

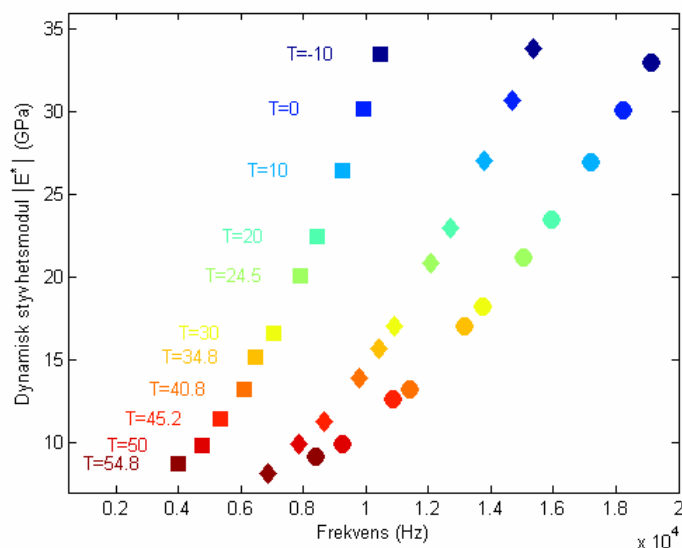


Figur 12. Uppmätta dämpade resonansfrekvenser vid olika temperaturer.



Figur 13. Uppmätt dämpningsfaktor (ξ) för respektive svängningsmod och temperatur.

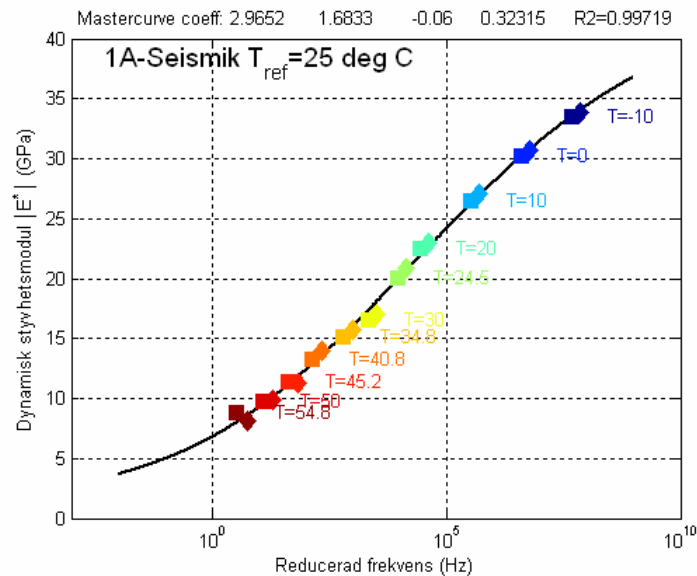
I Figur 14 har styvhetsmodulen för respektive svängningsmod och temperatur beräknats och plottats. f_1 , f_2 , och f_3 har markerats med *kvadrat*, *diamant*, och *cirkel* och varje punkt är färgad med hänsyn till respektive temperatur. Dämpningen har en relativt liten påverkan på $|E^*|$ men eftersom ξ_3 från Figur 13 är orimligt hög har ξ_3 approximerats med ξ_2 vi beräkningen av $|E_3^*|$. De första två svängningsmoderna f_1 och f_2 följer det förväntade mönstret där $|E^*|$ ökar med ökande frekvens och minskande temperatur. Trots att ξ_3 minskats till en rimligare nivå passar den tredje svängningsmoden inte in i mönstret från f_1 och f_2 . $|E_3^*|$ är vid flera temperaturer lägre än $|E_2^*|$ vilket inte är rimligt. De oväntat låga värdena på $|E_3^*|$ har ännu inte kunnat förklaras.



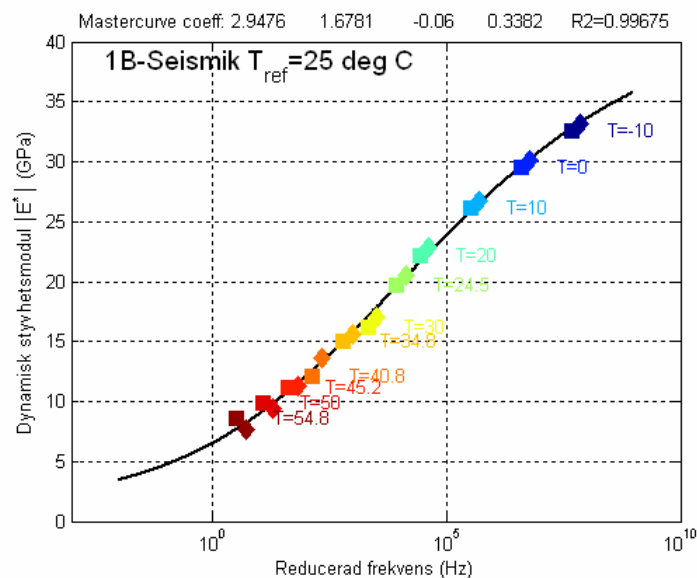
Figur 14. Beräknade styvhetsmoduler vid respektive frekvens och temperatur, f_1 =kvadrat, f_2 =diamant, f_3 =cirkel.

Från punkterna i Figur 14 kan en masterkurva konstrueras på konventionellt sätt (se kapitel 2.1). Genom att ansätta en referenstemperatur kan koefficienterna som definierar skiftfaktorn

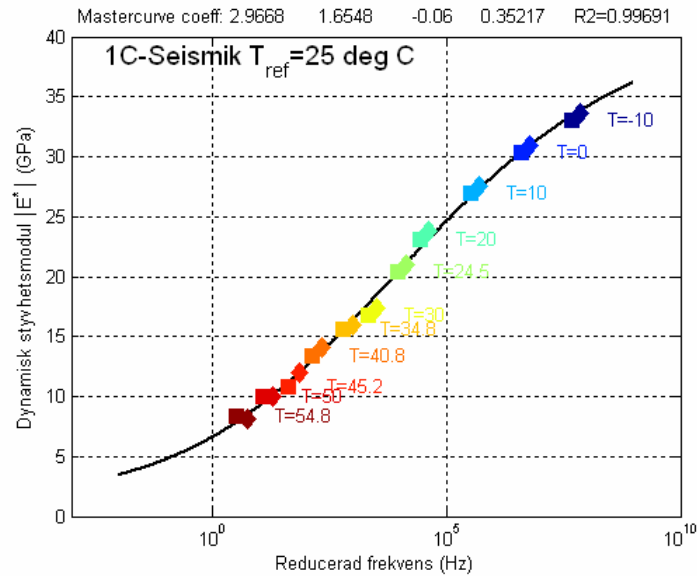
(Ekvation 4) och masterkurvan (Ekvation 5) med bästa möjliga passning till uppmätta värden utvärderas. Figur 15 till Figur 17 visar utvärderade masterkurvor från f_r mätningarna på respektive provkropp. På grund av osäkerheterna i f_{d3} och ξ_3 har denna svängningsmod utslutits i den fortsatta analysen av masterkurvan för respektive provkropp.



Figur 15. Masterkurva från f_1 och f_2 prov 1A vid 25° C från f_r mätningar (seismik).

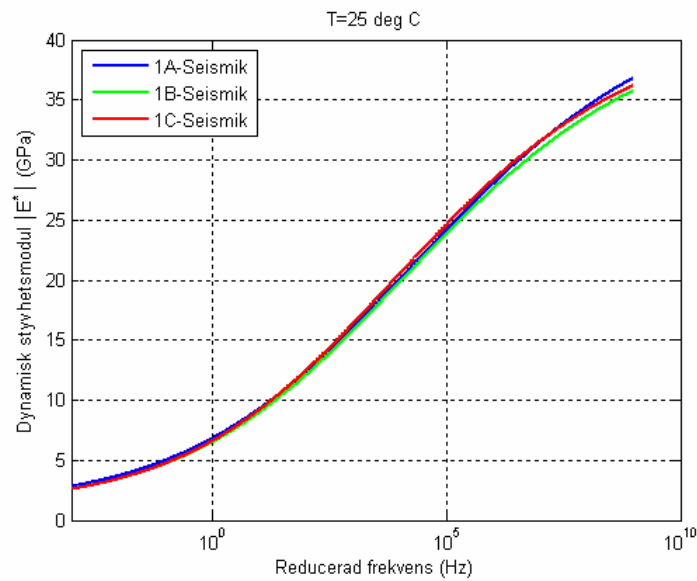


Figur 16. Masterkurva från f_1 och f_2 prov 1B vid 25° C från f_r mätningar (seismik).

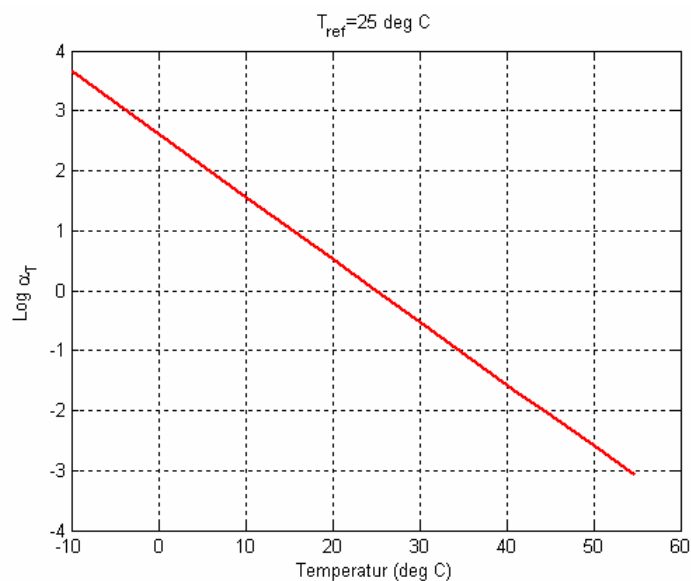


Figur 17. Masterkurva från f_1 och f_2 prov 1C vid 25° C från f_r mätningar (seismik).

Figur 18 visare en jämförelse av alla tre masterkurvorna utvärderade från f_r mätningarna ovan. Prov 1B visar på en något lägre styvhetsmodul vilket skulle kunna förklaras från den något högre hålrumsalten i denna provkropp (se Tabell 1). Skiftfaktorn α_T som också utvärderats genom utvärderingen av masterkurvorna redovisas i Figur 19 ($C_1=624$ och $C_2=6000$ för alla tre proverna).



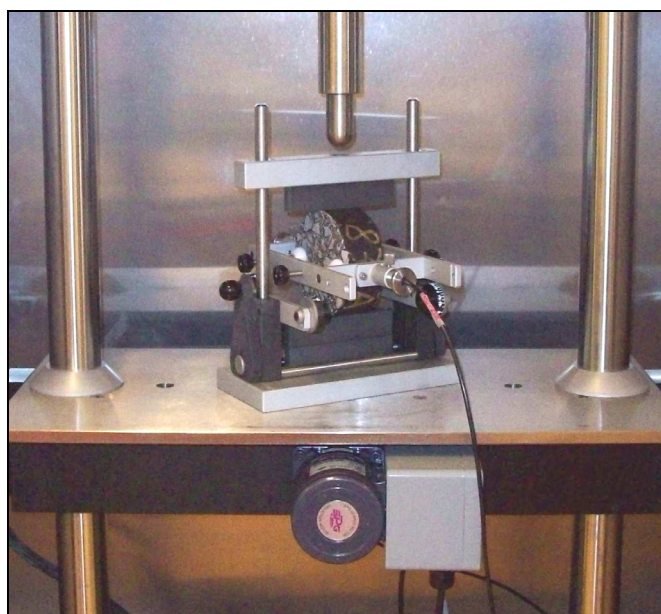
Figur 18. Masterkurvor från f_r mätningar (seismik) på alla tre provkropparna (25° C).



Figur 19. Skiftfaktor (a_T) som funktion av temperatur (Ekvation 4) från passning av masterkurvorna i Figur 18.

2.6 Jämförelse med indirekt pressdragprovning

För att jämföra uppmätta styvhetsmoduler från *fr* metoden har styvhetsmodulen också bestämts genom indirekt pressdragprovning (SS-EN 12697-26:2004 Annex C). Till dessa försök användes en servohydraulisk utrustning, UTM-25 (Universal Testing Machine-25kN), bestående av klimatkammare, kontroll- och datainsamlingsystem, hydraulisk oljepump och lastcell, Figur 20.

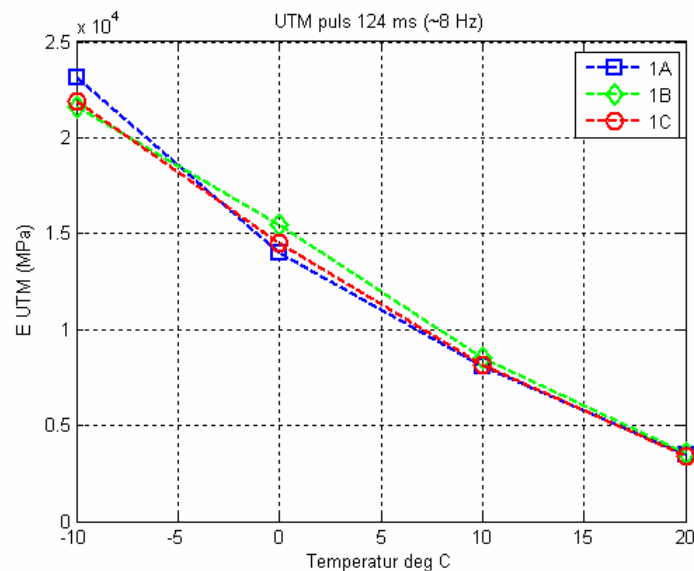


Figur 20. UTM-25 samt provuppställning för pulserande indirekt pressdragprovning på asfaltpuckar.

Efter att provkropparna vägts och dimensionerna (D och L) bestämts enligt EN 12697-29 placerades dessa i klimatskåpet för temperering till önskad testtemperatur. Mätningar utfördes vid temperaturerna -10 , 0 , 10 , samt 20°C med start vid lägst temperatur.

Under testet appliceras en last på den vertikala diametern av provet och den resulterande totala diametrala deformationen på horisontalaxeln mäts med två LVDT givare (Linear Variable Differential Transformer) monterad på var sin sida om provkroppen. Testmetoden är deformationsstyrd och förlitar sig på att uppnå en specificerad deformation av provet genom att den automatiskt justerar magnituden på den applicerade kraften.

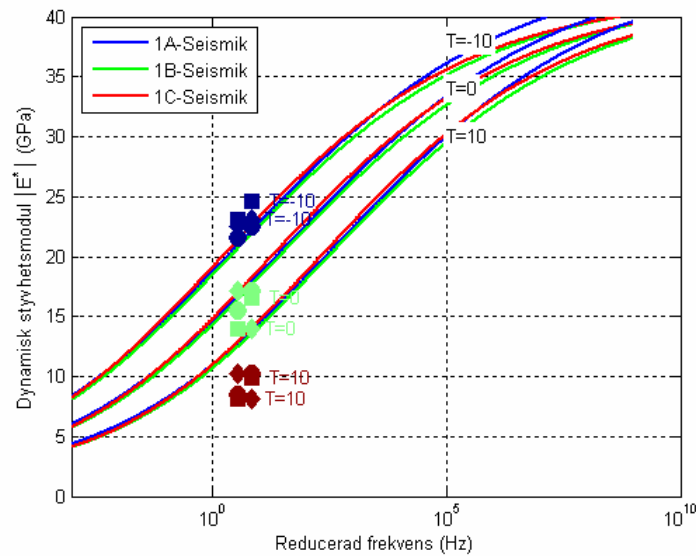
Testsystemet tillåter operatören att kontrollera stigtiden hos belastningspulserna och repetitionstiden mellan kraftpulser. Tvärkontraktionstalet (ν) måste uppskattas och matas in av operatören. Testsekvensen börjar med ett valt antal konditioneringscykler (här användes 10 stycken), följt av fem lastpulser från vilka slutliga data är beräknade och tabulerade, se Appendix A. För varje temperatur och provkropp användes två olika belastningspulser (62 ms respektive 124 ms stigtid). Utifrån medelvärdet från de 5 applicerade lastpulserna beräknas uppmätt styvhetsmodul för respektive lastpuls och temperatur.



Figur 21. Styvhetsmodul från pressdragprovning (SS-EN 12697-26:2004) vid olika temperaturer.

Vid indirekt pressdragprovning appliceras en kraftpuls med väldefinierad längd. Pålastningen av provet följer i stort denna kraftpuls. Avlastningen blir dock längre på grund av asfaltens viskoelastiska egenskaper. Styvhetsmodulen beräknas från avlastningskurvan och det är därför svårt att uppskatta en representativ frekvens på mätningarna från de indirekta pressdragförsöken. Vid låga temperaturer är dock responsen nästan elastisk vilket gör att pålastning och avlastning blir lika och en representativ frekvens kan uppskattas som $(1/\text{pulslängden})$. Figur 22 visar en jämförelse mellan styvhetsmodulen från pressdragprovningen och FR mätningarna. Masterkurvorna från Figur 18 har "skiftats" till lägre temperatur (-10°C , 0°C , och 10°C) med hjälp av skiftfaktorn (Figur 19) för att kunna jämföras med styvhetsmodulerna från pressdragförsöken. Vid -10°C är modulerna jämförbara men ju högre temperaturen blir desto sämre blir överensstämmelsen mellan de båda metoderna. Styvhetsmodulen vid 20°C har inte tagits med i jämförelsen i Figur 22 eftersom

den ligger långt ifrån den uppskattade masterkurvan vid 20° C. Som nämnts ovan bör det dock påpekas att frekvensen är okänd och olika vid olika temperaturer för pressdragförsöken.



Figur 22. Styvhetsmodul från pressdragprovning (punkter) jämfört med styvhetsmodul predikerad utifrån masterkurvorna från f_r mätningarna.

2.7 Jämförelse med Witzzaks ekvation

Witzzaks ekvation har tagits fram för att kunna prediktera masterkurvan utifrån asfaltmassans sammansättning och egenskaper (Witzzak 2000). Ekvationen är ursprungligen baserad på mätning av styvhetsmodulen på 2750 asfaltprovkroppar från 205 olika recept (Witzzak 2004). Flertalet recept kommer från täta massor utan polymermodifiering, och ekvationen är därför mest lämpad för denna typ av massa. Witzzaks ekvation kan uttryckas på samma form som sigmoidalfunktionen i Ekvation 5 men ger då $|E^*|$ i psi (1 psi=6.894757 kPa). I Witzzaks ekvation uttrycks konstanterna a_1 - a_4 som:

$$a_1 = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - (0.002841\rho_4) - (0.058097V_a) - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right)$$

$$a_2 = 3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}$$

$$a_3 = -0.603313 - 0.393532 \log(\eta)$$

$$a_4 = 0.313351$$

där

η = viskositet på bitumen vid aktuell temperatur (10^6 Poise)

V_a = hålrumshalt (%)

V_{beff} = effektivt bitumeninnehåll (volym %)

ρ_{34} = ackumulerad kvarstående mängd på 19.0 mm sikten (%)

ρ_{38} = ackumulerad kvarstående mängd på 9.5 mm sikten (%)

ρ_4 = ackumulerad kvarstående mängd på 4.76 mm sikten (%)

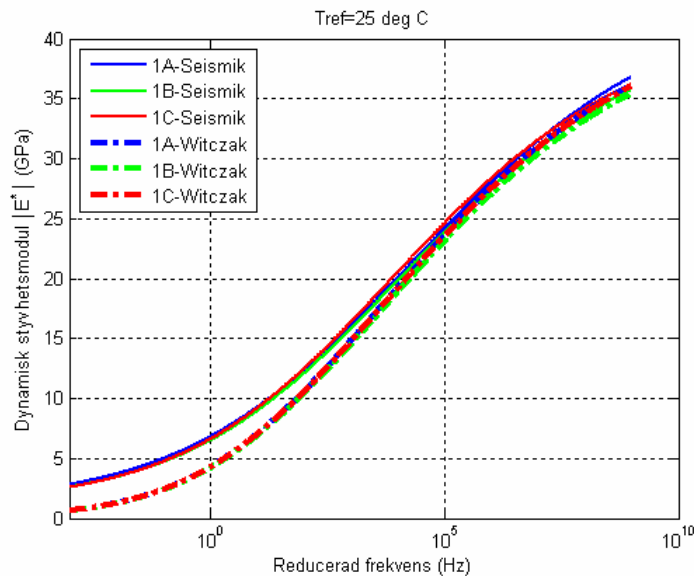
ρ_{200} = passerande mängd på 0.075 mm sikten (%)

En karakterisering av kornfördelningskurva och bitumen (efter alla mätningar av styvhetsmodul) från de undersökta asfaltproverna (Tabell 1) gav följande indata till Witczaks ekvation:

$\eta = 12.3210 \cdot 10^6$ Poise vid 25° C (A = 10.5254, VTS = -3.5047)

$\rho_{34} = 0.0$ %, $\rho_{38} = 10.0$ %, $\rho_4 = 31.5$ %, $\rho_{200} = 6.5$ %

Tillsammans med de uppmätta hålrumsalterna och effektiva bitumeninnehållet i Tabell 1 har en masterkurva från varje provkropp kunnat predikteras med hjälp av Witczaks ekvation. Figur 23 visar de tre predikterade masterkurvorna vid 25° C tillsammans med masterkurvorna från *fr* metoden. Kurvorna från Witczaks ekvation visar liten variation mellan de olika provkropparna med en något lägre modul vid höga frekvenser för provkropp 1B. Denna skillnad härstammar från en något högre hålrums halt (2.4 %) i provkropp 1B jämfört med 1A och 1C (1.9 %).



Figur 23. Masterkurvor från *fr* metoden (heldragna linjer) jämfört med predikterade masterkurvor med hjälp av Witczaks ekvation (streckade linjer) (25° C).

För höga styvhetsmoduler (>15 GPa) ligger masterkurvorna från Witczaks ekvation mycket nära de uppmätta masterkurvor från *fr* mätningarna. Provernas inbördes ordning (1A högst modul och 1B lägst modul för en given frekvens) stämmer också väl överens mellan de båda metoderna. Vid lägre styvhetsmoduler (högre temperatur eller lägre frekvens) skiljer sig kurvorna åt. Skillnaden vid dessa låga styvheter kan troligen förklaras från det polymermodifierade bitumen som använts i denna studie, vilket har för avsikt att öka modulen vid lägre frekvenser (eller högre temperaturer).

Bari och Witczak (2006) har presenterat en ny version av Witczaks ekvation där viskositeten på bitumen beskrivs med en skjuvmodul (G^*) masterkurva istället för η som i versionen ovan. Denna nya ekvation kan ta hänsyn till ett polymermodifierat bitumen men kräver en mätning eller uppskattning av G^* för respektive bindemedel.

3. Diskussion av resultat

Den föreslagna metoden och utrustningen är mycket enkel och billig vilket gör metoden praktiskt tillämpbar. I denna studie har ett datainsamlingskort använts för att spara uppmätta signaler. Troligtvis går det också att använda det inbyggda ljudkortet i en vanlig PC vilket gör utrustningen ännu enklare och billigare.

Det bör påpekas att potentiella fel i D , L , och ρ inte är försumbara vid beräkningen av styvhetsmodulen. I funktion 8 är $|E^*|$ proportionell mot D^2 och ett litet fel i den uppmätta diametern kan alltså ge ett relativt stort fel i den beräknade styvhetsmodulen.

Metoden är helt oförstörande och mycket repeterbar vilket troligtvis gör det möjligt att använda metoden för att studera effekten av små skillnader i vattenkvot, hållrumshalt, åldring, utmatning, läkning osv i framtiden.

Utvärderingen av koefficienterna som beskriver masterkurvan bygger på att styvhetsmodulen kan mätas upp vid flera olika frekvenser för varje temperatur. I denna studie var målet att mäta upp tre olika svängningsmoder (frekvenser). Av hittills okänd anledning gick det tyvärr inte att använda styvhetsmodulen beräknad från f_3 och ξ_3 eftersom den gav en lägre modul jämfört med $|E_2^*|$ vid flera temperaturer. Masterkurvan kunde ändå uppskattas utifrån $|E_1^*|$ och $|E_2^*|$ tack vare att många (11) olika temperaturer användes. För att minska antalet temperaturer eller öka säkerheten i utvärderingen av masterkurvan vore det dock bra att kunna förklara problemen med $|E_3^*|$ och därmed vidareutveckla metoden för fler svängningsmoder.

Masterkurvorna från f_r mätningarna (Figur 18) har utvärderats på konventionellt sätt genom att söka bästa möjliga passning till uppmätta data (Witczak 2000). Det bör dock påpekas att frekvenserna från f_r mätningar (4-14 kHz) är betydligt högre jämfört med traditionella enaxliga tryckförsök med frekvenssvop (0.01-25 Hz). Masterkurvor kan generellt bara anses vara väldefinierade inom det område där modulerna verkligen har mätts upp, i detta fall 8-33 GPa. Lägre moduler (representativa för högre temperaturer eller lägre frekvenser) kan uppskattas från de utvärderade masterkurvorna men det potentiella felet i denna uppskattning bör undersökas närmare i framtida projekt.

4. Slutsatser

I detta projekt har en ny metod för mätning av styvhetsmodul på asfaltprovkroppar utvecklats. Metoden bygger på att mäta upp dämpade resonansfrekvenser i cylindriska asfaltprovkroppar. Genom att mäta upp flera olika svängningsmoder vid flera olika temperaturer kan en masterkurva konstrueras på konventionellt sätt.

Masterkurvor från f_r mätningar har jämförts med masterkurvor predikterade med Witczaks ekvation och visar på god överensstämmelse vid höga frekvenser (>100 Hz). Skillnaderna vid lägre frekvenser kan troligtvis förklaras av att Witczaks ekvation inte tar hänsyn till ett polymermodifierat bitumen, vilket har för avsikt att öka modulen vid lägre frekvenser (eller högre temperaturer). Det bör dock påpekas att den lägre asymptoten i de utvärderade masterkurvorna är osäkrare än den högre på grund av att alla resultat från f_r metoden ligger inom ett relativt högt frekvensområde.

Resultaten från f_r mätningar har också jämförts med styvhetsmoduler från pulserande indirekt pressdragprovning. Det är svårt att uppskatta en representativ frekvens från pressdragprovningen och därför svårt att göra en direkt jämförelse med masterkurvor. Styvhetsmoduler från pulserande indirekt pressdragprovning vid de lägsta temperaturerna (-10 och 0° C) visar dock på en viss överensstämmelse med masterkurvorna från f_r mätningarna.

Fördelarna med den föreslagna f_r metoden kan sammanfattas som:

- Metoden är snabb, enkel, och helt oförstörande.
- Olika geometrier kan testas vilket gör metoden praktisk för både urborrade och laboratorieinpackade provkroppar.
- Repeterbarheten i f_r mätningar är mycket god. Variationskoefficienten från 50 upprepade mätningar på samma provkropp vid 20° C blev 0.1 % i uppmätt frekvens och 0.2 % i beräknad styvhetsmodul. Dessa varianser är cirka 10 gånger lägre än motsvarande varianser från indirekt pressdragprovning.

5. Referenser

Aouad, M.F., 1993, Evaluation of Flexible Pavements and Subgrades Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method, PhD thesis, Univ. of Texas at Austin, Texas.

ASTM E 1876-99, Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 215, Standard test method for fundamental transverse longitudinal and torsional resonant frequencies of concrete specimens, American Society for Testing and Materials (ASTM).

Bari, J., and Witczak, M.W., 2006, Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, pp. 381-423.

Brown, E.R., and Foo, K.Y., 1991, Evaluation of variability in resilient modulus test results (ASTM D 4123), *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-13.

Daniel, J.S., Chehab, G.R., and Kim, Y.R., 2004, Issues affecting measurement of the complex modulus of asphalt concrete, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 16, Nr. 6, pp. 469-476.

Daniel, J.S., and Kim, Y.R., 2001, Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 13, Nr. 6, pp. 434-440.

Ekdahl, U., Bengtsson, P.E., and Ryden, N., 2004, A new framework for analytical pavement design based on systematic control during construction work: Proceedings of the 14th Nordic Geotechnical Meeting (NGM 2004), Ystad, Sweden, May 19-21.

Garcia, G., and Thompson, M., 2007, HMA dynamic modulus – temperature relations, Research Report FHWA-ICT-07-006, Illinois Center for Transportation. www.ict.uiuc.edu/Publications/report%20files/FHWA-ICT-07-006.pdf

Glandus, J. C., 1981, Rupture fragile et résistance aux chocs thermiques de céramiques a usage mécaniques, Thesis, University of Limoges, France.

Hutchinson, J. R., 1979, Axisymmetric flexural vibrations of a thick free circular plate, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 46, pp. 139-144.

Kim, Y.R., Y. Seo, M. King, and M. Momen, (2004), "Dynamic Modulus Testing of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode," *Journal of Transportation Research Board*, No. 1891, National Research Council, Washington, D.C., pp. 163-173.

Kweon, G., and Kim, Y.R., 2006, Determination of asphalt concrete complex modulus with impact resonance test, *Transportation Research Record* Vol. 1970, pp. 151-160.

Leming, M. L., Nau, J. M., and Fukuda, J., 1998, Nondestructive determination of the dynamic modulus of concrete disks, *ACI Materials Journal*, Vol. Jan-Feb, No. 95-M6, pp 50-57.

Martincek, G., 1994, Dynamics of pavement structures, E & FN Spon and Ister Science Press, Slovak Republic.

Martincek, G., 1965, The determination of poisson's ratio and the dynamic modulus of elasticity from the frequencies of natural vibration in thick circular plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 2, Nr. 2, pp. 116-127.

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

Nilsson, R., 2005, Applicering av en viskoelastoplastisk materialmodell på svenska beläggningstyper, SBUF rapport 11485.

Ryden, N., and Park, C.B., 2006, Fast Simulated Annealing Inversion of Surface Waves on Pavements using Phase Velocity Spectra, *Geophysics*, Vol. 71, No. 4, pp R49-R58.

Ryden, N., and Malmqvist, E., 2006, Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar: Delrapport Etapp 1, SBUF rapport 11782.

Sayegh, G., 1967, Viscoelastic properties of bituminous mixtures, Proceedings of the 2nd international conference on the structural design of asphalt pavements, University of Michigan, USA.

Silva, J.M.M., and Maia, N.M.M., 1999, Modal analysis and testing, NATO science series, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-5894-5.

So, J., and Leissa, A.W., 1998, Three-dimensional vibrations of thick circular and annular plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 209, No. 1, pp 15-41.

Subramaniam, K.V., Popovics, J.S., and Shah, S.P., 2000, Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders, *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, Vol. 22, No. 2, pp. 81-89.

Whitmoyer, S., and Kim, Y. R. 1994, Determining asphalt concrete properties via the impact resonant method, *J. Testing and Evaluation*, 22(2), 139-148.

Witczak, M.W., 2004, Development of a mastercurve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures, Arizona State University, Department of Civil and Environmental Engineering. www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf

Witczak, M.W., 2000, Simple Performance Test: Test Results and Recommendations. NCHRP 9-19 Interim Task C Report, Privileged Document by Transportation Research Board, 2000.

Appendix A

A1: fr mätningar rådata

Prov ID	Temp °C	Damped natural frequency (fd)			Natural frequency (fn)			Damped natural frequency (fd)			Damping ratio (D)		
		f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	std f1 (Hz)	std f2 (Hz)	std f3 (Hz)	std D1	std D2	std D3
1A	-10,00	10474	15372	19133	10475	15373	19134	2.49	1.38	5.10	0.00056	0.000050	0.000043
1B	-10,00	10362	15241	18975	10363	15242	18976	1.41	3.01	7.21	0.000506	0.000089	0.000082
1C	-10,00	10375	15284	19063	10376	15285	19065	6.06	4.52	11.66	0.000149	0.000070	0.000108
1A	0,00	9915	14655	18236	9918	14658	18243	5.10	3.39	2.49	0.000038	0.000050	0.000280
1B	0,00	9625	14563	18100	9628	14566	18106	3.13	4.53	4.22	0.000133	0.000121	0.000131
1C	0,00	9906	14660	18286	9909	14663	18292	2.83	2.27	2.83	0.000089	0.000077	0.000135
1A	10,00	9236	13779	17193	9245	13789	17210	2.79	7.60	5.55	0.000150	0.000145	0.000256
1B	10,00	9188	13732	17042	9197	13741	17057	3.46	3.19	10.46	0.000112	0.000100	0.000534
1C	10,00	9303	13874	17334	9312	13883	17348	3.91	7.30	4.37	0.000085	0.000088	0.000298
1A	20,00	8433	12707	15923	8456	12731	16010	2.71	12.08	6.20	0.000192	0.000506	0.004447
1B	20,00	8392	12708	15833	8414	12730	15872	6.70	8.26	16.47	0.000220	0.000193	0.001169
1C	20,00	8525	12875	16125	8547	12898	16160	3.16	12.51	11.08	0.000134	0.000219	0.000328
1A	21,50	7896	12087	15018	7934	12125	15078	12.44	17.39	40.50	0.000216	0.000075	0.001467
1B	21,50	7842	12022	14965	7880	12060	15025	3.75	5.80	14.15	0.000209	0.000182	0.000942
1C	21,50	7930	12113	15041	7967	12150	15101	7.24	16.16	32.36	0.000188	0.000358	0.001180
1A	30,00	7018	10892	13745	7093	10961	14607	11.41	81.64	16.25	0.000401	0.000138	0.002576
1B	30,00	6944	10896	13668	7022	10971	14373	3.46	34.86	37.62	0.001109	0.001553	0.048476
1C	30,00	7031	10949	13933	7111	11019	14769	10.21	24.98	27.54	0.001186	0.000914	0.005714
1A	34,80	6475	10418	13161	6620	10511	13676	10.30	101.24	43.53	0.000597	0.0001893	0.038667
1B	34,80	6590	10393	13030	6682	10495	13659	9.91	34.68	62.12	0.001791	0.0002539	0.047292
1C	34,80	6696	10493	13174	6791	10576	13869	32.22	35.64	106.21	0.003313	0.000772	0.038083
1A	40,80	6081	9770	11414	6198	9885	11969	20.74	86.65	60.57	0.005132	0.001857	0.017131
1B	40,80	5827	9628	11223	5937	9759	12629	16.25	67.46	39.53	0.004999	0.001281	0.018680
1C	40,80	6036	9754	12291	6172	9880	12669	26.22	21.83	26.20	0.003970	0.000188	0.010690
1A	45,20	5326	8634	10854	5540	8826	11314	13.65	56.50	74.22	0.000779	0.000504	0.007487
1B	45,20	5194	8646	10893	5434	8828	11738	13.13	61.14	32.28	0.002859	0.001729	0.001920
1C	45,20	5263	8896	11167	5432	9068	11931	35.25	18.60	88.69	0.004119	0.001644	0.007340
1A	50,00	4729	7851	9218	4998	8130	10218	49.55	27.65	151.46	0.000594	0.002185	0.006594
1B	50,00	4756	7885	9244	5027	7958	10823	8.58	134.05	127.94	0.002785	0.004452	0.003663
1C	50,00	4775	7989	10121	5045	8230	10655	6.93	41.70	103.52	0.003468	0.005330	0.008122
1A	54,80	3960	6846	8974	4428	7242	9274	11.45	62.31	43.98	0.006957	0.006279	0.009212
1B	54,70	3891	6526	8044	4376	6970	9249	19.92	86.65	89.78	0.011324	0.013573	0.011434
1C	54,70	3934	6880	9024	4342	7254	9922	24.73	26.12	71.46	0.011135	0.007925	0.003655

A2: fr mätningar beräknade styvhetsmoduler

Prov ID	Temp °C	Real part dynamic modulus			Absolute dynamic modulus			Poisson's ratio from Equatio 6		
		E* (MPa)	E' (MPa)	E'' (MPa)	E* (MPa)	E' (MPa)	E'' (MPa)			
1A	-10,00	33481	33862	32976	33491	33869	32983	0,227	0,226	0,228
1B	-10,00	32608	33120	32327	32618	33126	32335	0,228	0,227	0,229
1C	-10,00	33073	33667	32924	33090	33675	32936	0,228	0,227	0,228
1A	0,00	30156	30659	30097	30190	30694	30141	0,233	0,232	0,233
1B	0,00	29518	30126	29550	29552	30151	29590	0,235	0,233	0,235
1C	0,00	30280	30870	30417	30315	30895	30457	0,233	0,232	0,233
1A	10,00	26372	26975	26926	26480	27053	27032	0,242	0,241	0,241
1B	10,00	26006	26661	26366	26104	26731	26458	0,243	0,241	0,242
1C	10,00	26890	27531	27487	26990	27602	27577	0,241	0,239	0,239
1A	20,00	22253	22805	23460	22498	22975	23965	0,254	0,252	0,250
1B	20,00	21957	22703	22984	22190	22861	23207	0,255	0,252	0,252
1C	20,00	22842	23594	24009	23078	23749	24216	0,252	0,250	0,249
1A	24,50	19716	20575	20929	20093	20834	21257	0,263	0,260	0,258
1B	24,50	19383	20254	20708	19751	20507	21033	0,264	0,261	0,259
1C	24,50	19969	20794	21106	20360	21048	21440	0,262	0,259	0,258
1A	30,00	15945	16611	19706	16806	17021	23795	0,280	0,276	0,263
1B	30,00	15581	16572	19037	16252	17017	22809	0,282	0,277	0,266
1C	30,00	16112	16906	20230	16815	17331	24276	0,279	0,275	0,261
1A	34,80	13991	15191	17388	15158	15717	19791	0,290	0,284	0,273
1B	34,80	14184	15045	17282	15020	15560	20154	0,289	0,284	0,273
1C	34,80	14768	15491	17954	15667	15969	21174	0,286	0,282	0,270
1A	40,80	12353	13328	13553	13245	13931	15888	0,301	0,295	0,293
1B	40,80	11346	12914	14897	12151	13687	17075	0,308	0,297	0,285
1C	40,80	12326	13399	15126	13354	14062	16809	0,301	0,294	0,284
1A	45,20	9995	10460	12147	11412	11324	13948	0,319	0,315	0,302
1B	45,20	9601	10421	12972	11140	11240	15843	0,323	0,316	0,297
1C	45,20	9687	11155	13503	10810	11963	16514	0,322	0,310	0,293
1A	50,00	8227	8773	10022	9799	9887	13238	0,336	0,331	0,319
1B	50,00	8288	8342	11128	9876	9400	14809	0,336	0,335	0,310
1C	50,00	8425	9062	10905	10030	10052	12861	0,334	0,328	0,312
1A	54,80	6543	6845	8302	8780	8174	10891	0,356	0,352	0,335
1B	54,70	6375	6278	8312	8643	7671	11726	0,358	0,359	0,335
1C	54,70	6343	6913	9530	8310	8185	12393	0,358	0,351	0,323

A3: Data från pulserande indirekt pressdragprovning

ID	Dimensioner (mm)								L mean	D mean	Vikt (g)	Mål Temp °C	Mattemp °C	Poissons ratio	Loading pulse width (ms)	Just. E (MPa)
	L 1	L 2	L 3	L 4	D 1	D 2	D 3	D 4								
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.7	101.6	101.6	38.815	101.625	743.9	-10	-9.5	0.20	62	24616
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.7	101.6	101.6	38.815	101.625	743.9	-10	-9.5	0.20	124	23155
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	-10	-9.5	0.20	62	22534
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	-10	-9.5	0.20	124	21571
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.8	-10	-9.9	0.20	62	23199
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.8	-10	-9.9	0.20	124	21913
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.9	0	-0.2	0.20	62	16541
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.9	0	-0.2	0.20	124	13964
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	0	-0.8	0.20	62	17144
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	0	-0.8	0.20	124	15459
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.8	0	-0.9	0.20	62	15422
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.8	0	-0.9	0.20	124	14486
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.7	10	10.3	0.25	62	9849
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.7	10	10.0	0.25	124	8107
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	10	9.4	0.25	62	10207
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	10	9.2	0.25	124	8521
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.7	10	9.1	0.25	62	9425
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.7	10	9.1	0.25	124	8129
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.7	20	18.7	0.25	62	4457
1A	38.75	38.90	38.79	38.82	101.6	101.65	101.6	101.6	38.815	101.625	743.7	20	18.6	0.25	124	3498
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	20	18.7	0.25	62	4419
1B	39.04	38.88	38.79	38.86	101.8	101.75	101.9	101.9	38.8925	101.843	742.2	20	18.7	0.25	124	3557
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.6	20	18.7	0.25	62	4320
1C	38.83	38.89	38.98	38.67	101.80	101.74	101.8	102.1	38.8425	101.845	747.6	20	18.8	0.25	124	3427