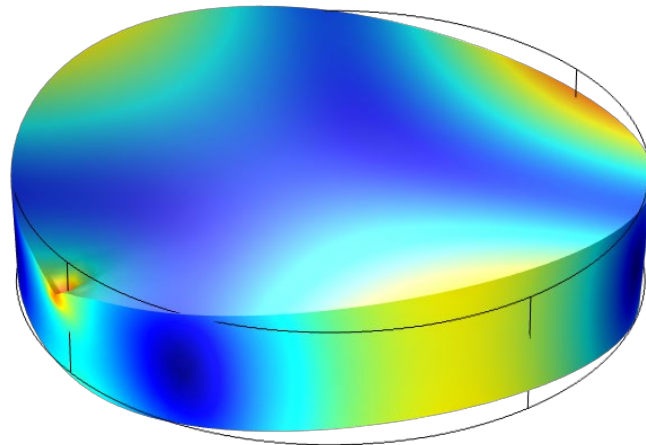


UTVÄRDERING AV PRECISION FÖR STYVHETSBESTÄMNING AV ASFALT GENOM MODALANALYS



Anders Gudmarsson

2019-02-15

FÖRORD

Stort tack till SBUF och Trafikverket för den huvudsakliga finansieringen av detta projekt.

Tack till samtliga deltagare i arbetsgruppen och referensgruppen:

Peab - Lars Jansson, Anders Gudmarsson, Mats Wendel

LTH – Nils Rydén

VTI - Abubeker Ahmed

Trafikverket - Kenneth Lind

Skanska - Richard Nilsson

NCC - Jonas Ekblad, Bernardita Lira

ENTPE - Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, Jean-Claude Carret

Eiffage - Simon Pouget, Silvana Torres, Laio Guimares-Oliveira



Möte 18-10-02. Från vänster: Anders Gudmarsson, Bernardita Lira, Lars Jansson, Simon Pouget, Hervé Di Benedetto, Jean-Claude Carret, Cédric Sauzéat, Abubeker Ahmed, Richard Nilsson, Kenneth Lind och Mats Wendel.

Anders Gudmarsson

Stockholm, 2019-02-10

SAMMANFATTNING

Styvhet av asfalt kan mätas genom flera olika testmetoder i laboratorium och genom oförstörande fältmätningar. Eftersom asfalt är ett viskoelastiskt material så beror den komplexa styvhetsmodulen på belastningsfrekvens och temperatur. Dessutom är asfaltens styvhet till en viss grad beroende på spänningsnivån. Detta gör att olika testmetoder ofta resulterar i skilda styvhetsmoduler eftersom provningen av olika anledningar utförs under mer eller mindre varierade förutsättningar.

Det finns av nämnda anledningar ett behov av robusta metoder som kan mäta styvhet av asfalt under samma förutsättningar. Att kunna relatera styvheten från fält- och laboratoriemätningar ger många fördelar i synnerhet på grund av asfaltens temperatur- och frekvensberoende egenskaper. En karakterisering av beläggningsars temperatur- och frekvensberoende materialegenskaper kan endast göras i laboratorium under kontrollerade temperaturförhållanden. En sådan karakterisering är nödvändig för att kunna förstå och relatera styvheten som mäts i fält vid okontrollerade klimatförhållanden till olika beläggningstypers egenskaper. Detta blir ännu viktigare i takt med att användningen av beläggnings med modifierade bitumenegenskaper ökar.

Modalanalys och ytvågsseismik är i beläggningssammanhang moderna metoder som möjliggör just denna koppling mellan fält och laboratoriemätningar. För att möjliggöra en bredare spridning och acceptans av laboratorieprovningen har precisionen av modalanalys som utförts av fem olika projektparter utvärderats i detta projekt. Asfaltprovkroppar av olika geometrier och dimensioner har i tur och ordning testats av varje laboratorium.

Resultaten visar att modalanalys generellt ger en bra precision och att metoden är särskilt lämplig för högre belastningsfrekvenser och lägre temperaturer. Styvhetsmodulerna från balkar och cylindrar resulterade i bättre precision i jämförelse mot diskar. Mätningarna visar att frekvensresponsfunktionernas (FRFer) amplituder generellt är den bidragande faktorn till att precision avtar med ökande temperaturer.

Projektet påvisade att störningar kan uppstå i mätningarna på grund av utrustningen och ihopkopplandet av komponenterna. Resultaten visade att systemet bör kopplas ihop och startas innan mätningar utförs för att undvika felaktiga resultat.

En jämförelse av komplex styvhetmodul som bestämts genom modalanalys och konventionell drag-tryck provning visade på en god överensstämmelse mellan metoderna vid provning av cylindriska provkroppar.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	4
1.1 BAKGRUND.....	4
2. SYFTE OCH MÅL	5
3. METODIK	5
3.1 PROJEKTPLAN	7
3.1.1 <i>Provkroppar</i>	7
3.1.2 <i>Provning</i>	8
3.1.3 <i>Analys</i>	12
4. RESULTAT	14
4.1 STÖRNINGAR I MÅTSYSTEM	14
4.2 STÖRNINGAR I ENSKILDA FRF MÄTNINGAR	16
4.3 KOMPLEX STYVHETSMODUL	17
4.4 JÄMFÖRELSE AV KOMPLEX STYVHETSMODUL	18
4.4.1 <i>Balkar</i>	18
4.4.2 <i>Cylindrar</i>	21
4.4.3 <i>Diskar (ABS)</i>	23
4.4.4 <i>Diskar (GB5)</i>	26
4.5 STYVHETSFRÖÄNDRING ÖVER TID.....	30
4.6 JÄMFÖRELSE AV STYVHET FRÅN MODALANALYS OCH DRAG-TRYCK PROVNING.....	30
5. SUMMERING	33
REFERENSER	35

1. INLEDNING

Modalanalys är en ekonomisk och effektiv laboratoriemetod för att karakterisera styvheten av asfaltprovkroppar. I detta projekt utvärderas precisionen av modalanalys för att bestämma styvhet av asfaltprovkroppar.

Styvhet är en nyckelparameter i tjockleksdimensionering av beläggningslager i en vägkonstruktion. I dagens dimensionering predikteras en vägs förväntade livslängd utifrån tøjningsnivåerna i konstruktionen som uppskattas från styvhet och tjocklek. Styvhet används även till att bedöma befintliga vägkonstruktioners tillstånd och tillsammans med information om belastning samt trafikmängd uppskattas bärigheten av en konstruktion. Utvecklingen och nyttjandet av effektiva metoder för att mäta styvhet av beläggningar och beläggningskonstruktioner är därför mycket viktig för att möjliggöra en förbättrad kontroll och kunskap av egenskaperna i befintliga samt nya vägkonstruktioner.

Nuvarande metodstandarder för att bestämma styvhet av asfalt innebär att mätningar utförs under skilda förutsättningar i laboratorium och i fält. Skillnader i provningsförfarande mellan laboratorie- och fältmetoder är en starkt bidragande orsak till svårigheten att implementera oförstörande styvhetsbaserade kvalitetskontroller av vägar. Det finns därför ett behov av en laboratoriemetod som kan utföras under liknande förutsättningar och enligt samma princip som styvhetsmätningar i fält. Ytvågsseismik (Ryden 2004, Bjurström et al. 2016) och modalanalys (Gudmarsson 2014) är fält och laboratoriemetoder som mäter styvheten under liknande förutsättningar med avseende på frekvensområde, temperaturer och tøjningsnivåer.

1.1 Bakgrund

Fallvikt är ett exempel på en metod som kan användas för att bedöma vägars styvhetsegenskaper. Genom att mäta deflektioner i flera punkter genererade från en belastning kan styvhetsmoduler och tøjningar i asfaltbeläggnings uppbyggas. Via fallviktsmätningar kan en klassning av en vägkonstruktions bärförmåga utvärderas utifrån tøjningarna och aktuell trafikmängd (TRVMB 112, TRV 2012:050; TRVMB 114, TRV 2012:051). Det är dock inte möjligt att relatera den bedömda styvheten utifrån fallviktsmätningar till laboratoriebestämda styvheter på grund av att mätningarna utförs under skilda förutsättningar. Fallviktsbelastningar ger tøjningsnivåer ($> 100 \mu\text{m/m}$) där asfalt har ett olinjärt förhållande mellan spänningar och tøjningar medan laboratorieprovning av styvhet utförs vid lägre tøjningsnivåer (ca $50 \mu\text{m/m}$). Detta leder till skilda styvhetsmoduler.

Det har även påvisats att asfalt är olinjärt redan vid de låga tøjningsnivåer ($\sim 50 \mu\text{m/m}$) som används vid styvhetsmätningar i laboratorium med konventionella cykliska belastningar (Mangiafico et al. 2018). Tøjningsnivåerna där asfalt närmar sig ett linjärt beteende beror på frekvens och temperatur där ju högre temperaturer och ju lägre frekvenser kräver desto lägre tøjningsnivåer för att ett linjärt förhållande ska gälla.

Vågbaserade mätmetoder som modalanalys och ytvågsseismik bidrar med en stor fördel genom att mätningarna utförs vid mycket låga tøjningsnivåer ($\sim 0.1 \mu\text{m/m}$). Vid dessa tøjningsnivåer kan det fortfarande antas att asfalt är linjärt eftersom cykliska mätningar har påvisat gränser för det olinjära området vid tøjningsnivåer som är ca 100 gånger större ($10 \mu\text{m/m}$) (Mangiafico et al.

2018). Detta innebär att ytvågsseismik och modalanalys har unika förutsättningar för att möjliggöra en koppling mellan beläggningsegenskaper i fält och asfaltprovkroppars egenskaper i laboratorium. Det skall betonas att provning i laboratorium är nödvändigt för att kunna karakterisera beläggningars temperatur- och frekvensberoende materialegenskaper. Detta är i sin tur nödvändigt för att kunna relatera styvheten som mäts i fält under varierande klimatförhållanden till ett referensvärde. För att stärka möjligheterna till att dessa metoder kan nyttjas av flera aktörer krävs en systematisk utvärdering och spridning av tekniken. Detta projekt fokuserar därför på att utvärdera variationen i styvhet som bestäms genom modalanalys på flera laboratorier och av flera personer.

2. SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta projekt är att utvärdera precisionen av modalanalys för bestämning av asfaltprovkroppars styvhet. Provingen utförs på flera olika laboratorier av ett flertal personer.

Eftersom existerande metodstandarder för bestämning av styvhet baseras på dyr utrustning samt komplicerad och tidskrävande provning finns en stor nytta med en metodbeskrivning som beskriver en enklare, mer ekonomisk och noggrannare metod. För att möjliggöra en framtida implementering av modalanalys till en standardiserad metod krävs en bredare acceptans och spridning av metodiken. En accepterad metodbeskrivning som beskriver modalanalys är också ett nödvändigt steg närmare oförstörande styvhetsbaserade kvalitetskontroller av beläggningar. Detta är viktigt eftersom ytvågsseismik i kombination med modalanalys kan bidra till att reducera provtagning genom borrning i beläggningar. Att kunna reducera borrning är mycket angeläget inte minst ur arbetsmiljösynpunkt.

3. METODIK

Modalanalys är en vedertagen metodik inom många teknikområden för att karakterisera dynamiska egenskaper i kroppar eller system. Metodiken att bestämma asfaltprovkroppars styvhet genom modalanalys utvecklades på Peab och KTH i ett industridoktorandprojekt (SBUF projekt 12803) finansierat av SBUF och Trafikverket. Repeterbarheten av vågbaserade mätningar har redan i ett flertal tillämpningar på asfalt visat sig vara mycket god (Whitmoyer och Kim 1994, Kweon och Kim 2006, Rydén och Johansson 2008; Carret et al. 2018). Det har även demonstrerats via mätningar på riksväg 40 i Ulricehamn (SBUF projekt 13107) att oförstörande styvhetsbaserade kvalitetskontroller av beläggningar kan utföras genom att kombinera modalanalys och ytvågsseismik (Gudmarsson 2016; Bjurström et al. 2016).

Provingen som utvecklats för tillämpning på asfalt utförs genom att knacka lätt med en instrumenterad hammare på en asfaltprovkropp och mäta den tillförda kraften. Provkroppens respons på hammarslagen mäts med hjälp av en accelerometer. Figur 1 visar ett exempel på mätupställning för en diskformad provkropp med en accelerometer och instrumenterad hammare. Den uppmätta accelerationen i provkroppen och kraften används till att beräkna frekvensresponsfunktioner (FRFer). FRFer är ett direkt resultat av provkroppens viskoelastiska egenskaper där resonansfrekvenserna är starkt kopplade till den elastiska styvheten och amplituden till den viskösa dämpningen. Uppmätta FRFer utgör därför grunden i bestämningen

av den komplexa styvhetsmodulen som utförs genom att passa in finita element beräknade FRFer till mätningarna. Med hjälp av finita element metoden (FEM) kan FRFer beräknas numeriskt utifrån en modell med ett initialt antagande om den frekvens- och temperaturberoende komplexa styvhetsmodulen (E^*) och komplexa Poisson's tal (ν^*). En optimering av det initiala antagandet resulterar i styvhetsmoduler (E^* och ν^*) där beräknade FRFer i modellen överensstämmer med uppmätta FRFer.



Figur 1. Hammare och accelerometer för att utföra provning genom modalanalys på en asfaltprovkropp (Gudmarsson 2014)

Den komplexa styvhetsmodulen definieras enligt Ekvation 1, där E' benämns som lagringsmodulen (realdelen), E'' benämns som förlustmodulen (imaginära delen), $|E^*|$ är den dynamiska styvhetsmodulen och Φ är fasvinkeln (se Ekvation 2). Lagringsmodulen representerar materialets elastiska egenskaper vilket är den del av spänningen som är i fas med töjningen (dvs. $\Phi = 0^\circ$). Förlustmodulen representerar materialets viskösa egenskaper, den del av spänningen som är 90° ur fas i förhållande till töjningen (dvs. $\Phi = 90^\circ$).

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

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E''}{E'}\right), \quad (2)$$

Resultaten från respektive projektpart jämförs i detta projekt genom den dynamiska styvhetsmodulen, fasvinkeln, samt förlustmodulen och lagringsmodulen.

3.1 Projektplan

Samtliga projektdeltagare nyttjade en likvärdig mätuppställning och princip för att beräkna styvheten i asfaltprovkropparna. Dock så utfördes provningen på de olika laboratorierna både genom ett manuellt förfarande samt genom att nyttja automatiserade system för att applicera hammarslagen (Gudmarsson och Jakobsson 2016; Carret et al. 2018). Innan provningen startade i projektet samlades samtliga deltagare för att under en dag utföra mätningar och diskutera provningsmetodiken.

Eftersom modalanalys är en oförstörande mätmetod nyttjades detta genom att samma provkroppar i projektet testades av samtliga projektdeltagare. För att reducera variationer i resultaten som inte beror på mätmetoden märktes provkropparna så att sensorerna (hammare och accelerometer) applicerades och placerades på samma position vid varje mätning. Via detta förfarande reduceras de variationer som kan uppstå på grund av den grad av inhomogenitet som finns i asfaltprovkroppar.

Som komplement till modalanalys utfördes även konventionell drag-tryck provning på de cylindriska provkropparna efter att samtliga projektparter utfört modalanalys mätningarna. Den komplexa styvhetsmodulen kan bestämmas från drag-tryck provning genom att mäta spänningar och töjningar i asfaltprovkroppar som utsätts för cykliska belastningar (Carret et al. 2018). Provnings utförs liksom modalanalys vid flera temperaturer och belastningsfrekvenser.

Följande projektparter genomförde provning och analys av styvhet i detta projekt:

- Peab Asfalt (Stockholm)
- VTI (Linköping)
- Skanska VTC (Malmö)
- ENTPE, Lyons Universitet (Lyon, Frankrike)
- Eiffage (Corbas, Frankrike)

3.1.1 Provkroppar

En typisk svensk (ABS 16 70/100) och fransk (EB 14 PMB med produktnamn GB 5) asfaltmassa användes för att tillverka provkroppar (Olard och Pouget 2015). Den franska asfaltmassan (EB 14 PMB) användes även till att utvärdera om provkropparnas form och geometri påverkar den uppmätta styvhetsmodulen. För detta syfte tillverkades provkroppar med form av balkar, cylindrar och diskar av samma massatyp. Provkropparna som tillverkades av Peab Asfalt (ABS 16) och Eiffage (GB 5), skickades efter provning vidare till övriga laboratorier. Tabell 1 presenterar specifikationerna för respektive provkropp.

Tabell 1. Specifikationer för provkroppar

Id	Geometri	Massatyp	Diameter (mm)	Längd (mm)	Bredd (mm)	Höjd (mm)	Densitet (kg/m³)	Tillv. datum
GB5-B2	Balk	EB 14 PMB		299.8	50.3	50.2	2399	17-07-17
GB5-B4	Balk	EB 14 PMB		300.0	50.4	49.8	2409	17-07-17
GB5-C1	Cylinder	EB 14 PMB	64.2	162.4			2403	17-07-17
GB5-C2	Cylinder	EB 14 PMB	64.3	157.8			2366	17-07-17
ABS-D9	Disk	ABS 16 70/100	150.0			40.6	2450	17-06-16
ABS-D10	Disk	ABS 16 70/100	150.0			40.4	2444	17-06-16
GB5-D1	Disk	EB 14 PMB	99.7			32.0	2422	17-07-17
GB5-D3	Disk	EB 14 PMB	99.8			31.4	2439	17-07-17

3.1.2 Provning

Figur 2 visar bilder från mätuppställningar från VTI och ENTPE för de cylindriska provkropparna. Hammare och accelerometer positionerades för att excitera och mäta responzen av den longitudinella moden. Även för balkarna mättes den longitudinella moden vilket innebär att sensorerna placerades i mitten på varsin kortsida i likhet med placeringen för de cylindriska provkropparna. Vid mätningarna av diskarna exciterades böjmoden genom att placera hammare och accelerometer enligt positionerna som visas i Figur 1. Varje provkropp märktes för att visa var hammarslagen skulle appliceras och därmed säkerställa att slagen från samtliga projektparter alltid träffade en sten i asfaltprovkroppen. Detta möjliggör en kortare kontakttid mellan hammare och provkropp vilket resulterar i att provkroppen exciteras över ett bredare och högre frekvensområde.



a) Uppställning VTI



b) Uppställning ENTPE

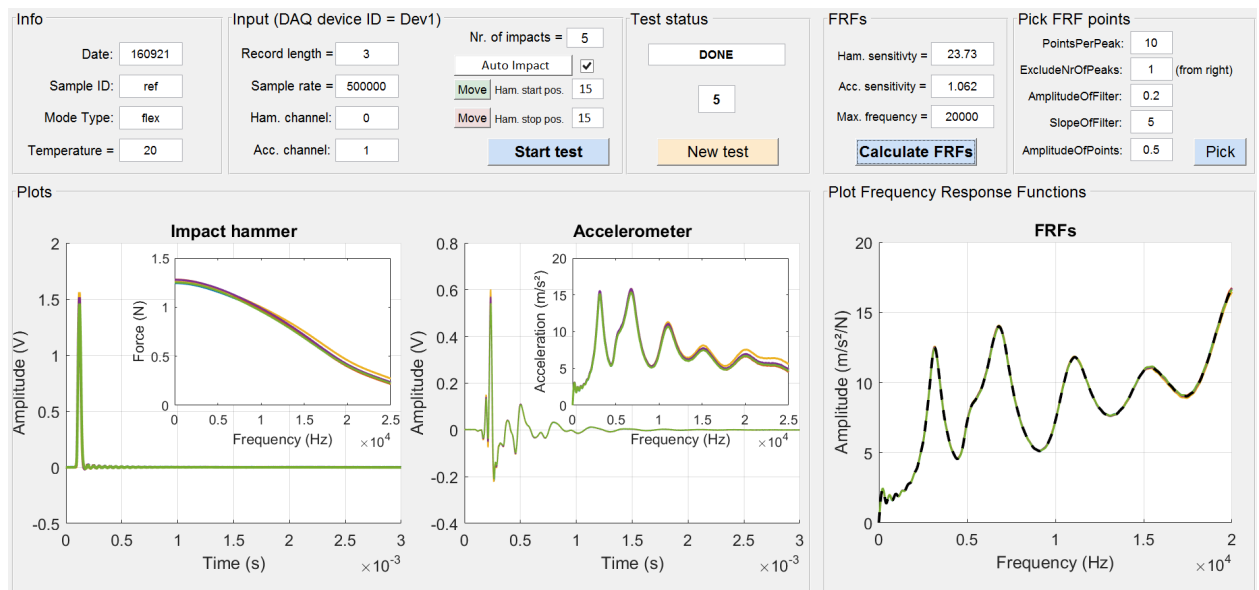
Figur 2. Exempel på mätuppställning för mätning av den longitudinella moden av en cylindrisk provkropp.

Tabell 2 presenterar utrustningen som användes av samtliga projektparter för att utföra mätningarna. I tabellen framgår det att olika modelltyper av de ingående komponenterna har använts.

Tabell 2. Modellbeteckning av utrustning som användes av respektive projektpart

Komponent	Peab	Skanska	VTI	ENTPE	Eiffage
Hammare	PCB model 086E80	PCB model 086E80	PCB model 086E80	PCB model 086E80	PCB model 086E80
Accelerometer	PCB model 352B10	PCB model 352B10	PCB model 352B10	PCB model 353B15	PCB model 352B10
Signalkonditionering	PCB model 480B21	PCB model 480B21	PCB model 480B21	PCB model 482C15	PCB model 480B21
Datainsamlingsenhet (DAQ)	NI USB-6251 M series	NI USB-4432	NI USB-4432	NI USB-6356 X series	NI USB-6251 M series

Utöver komponenterna i Tabell 2 krävs även en dator med mjukvara för datainsamling och signalbearbetning för att utföra mätningarna. Samtliga projektparter använde samma mjukvara för datainsamling, signalbehandling och för att beräkna FRFer utifrån uppmätt acceleration och kraft. Figur 3 visar mjukvaruapplikationen som utvecklats i MATLAB. Samplingshastighet samt hammarens och accelerometers känslighet beror på utrustningen. DAQ:arna som användes i projektet möjliggjorde samplingshastigheter mellan 0.10 MS/s till 1.25 MS/s. Kompletterande indata som krävs för att genomföra mätningarna beror på temperatur vid mätning samt provkroppen.



Figur 3. Mjukvaruapplikation för att mäta acceleration, kraft och beräkna FRFer

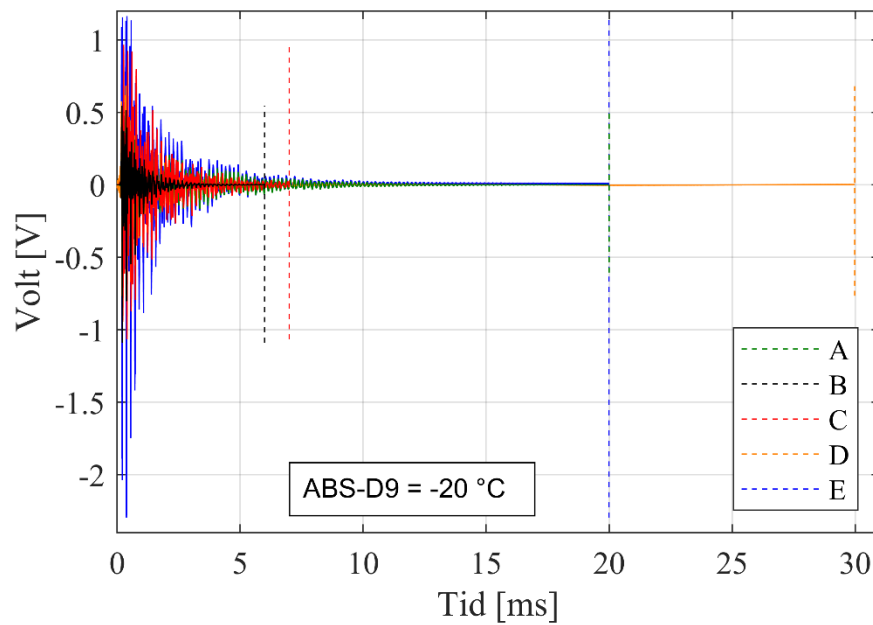
Temperaturen av provkropparna mättes av samtliga projektparter genom att givare placerades på ytan eller/och i kärnan av en provkropp placerad i temperaturskåpet. Måltemperaturer som mätningarna avsågs utföras vid var: -20, 0, 15, 35, 50 °C för GB5 massan samt: -20, 0, 15, 30 och 40 °C för ABS 16 massa. Faktiska temperaturer vid mätningarna berodde på respektive temperaturskåp som användes och skillnaden i temperatur mellan mätningarna togs i beaktande vid beräkning av styvheten. Den franska massatypen hade ett styvare bitumen än den svenska vilket innebär att mätningarna utfördes vid högre temperaturer upp till 50 °C i jämförelse mot 40 °C för den svenska asfaltmassan.

Inspelningstiden (Record Length) styrs av provkroppens materialegenskaper där en lägre mättemperatur (t.ex. -20 °C) kräver en längre inspelningstid (t.ex. ca 20 ms). Detta beror på att asfalten har en högre elastisk styvhet vid låga temperaturer i jämförelse mot egenskaperna vid högre temperaturer. Inspelningstiden beror också på kraften i hammarslagen då en större kraft genererar vibrationer över en längre tid. Viktigt vid val av inspelningstid är att samla in data över en tillräcklig tid så att vibrationerna i provkroppen dämpas ut helt innan insamlingen avslutas. Det är även viktigt att spela in hela lastpulsens från hammarslagen. I Figur 3 framgår det av amplituden i tidsdomän att inspelningstiden startar vid en definierad tid innan hammaren träffar provkroppen (0.1 ms) för att säkerställa att en komplett lastpuls spelas in.

Varje projektpart bedömde nödvändig inspelningstid för de olika asfaltprovkropparna och temperaturerna. Tabell 3 redovisar projektparternas inspelningstider för en provkropp av respektive form för de olika temperaturerna. Tabell 3 visar att det funnits skillnader i inspelningstid mellan projektparterna och Figur 4 illustrerar ett exempel på skillnaden mellan projektparterna för provkroppen ABS-D9 vid -20 °C. De streckade linjerna i figuren är placerade där inspelningen avslutats och höjden av de streckade linjerna motsvarar responsens maximala amplitud. I Figur 4 framgår det att vibrationerna i provkroppen dämpas ut vid olika tid beroende på den tillförda kraften. I en av mätningarna (projektpart C) har en något kort inspelningstid använts (7 ms) i relation till responsen vilket kan riskera att leda till avvikelser mot övriga mätningar. En inspelningstid mycket längre än tiden för vibrationerna bör inte påverka analysen signifikant, men det innebär att en större mängd data som inte innehåller någon information bearbetas.

Tabell 3. Inspelningstider för respektive projektpart (A-E) och temperatur. (*) se även Figur 4.

Id	Temperatur (°C)	A (ms)	B (ms)	C (ms)	D (ms)	E (ms)
GB5-C1	-20	15	8	8	20	20
	0	5	5	6	10	10
	15	5	3	5	6	5
	35	3	1.5	5	4	3
	50	3	1	5	6	3
GB5-B4	-20	15	12	8	30	20
	0	10	8	6	20	20
	15	5	3	5	20	5
	35	3	1.5	5	8	3
	50	3	1	5	6	3
ABS-D9	-20(*)	20	6	7	30	20
	0	15	3	5	30	10
	15	4	3	5	30	10
	30	2	1.5	7	10	3
	40	2	2	7	10	3

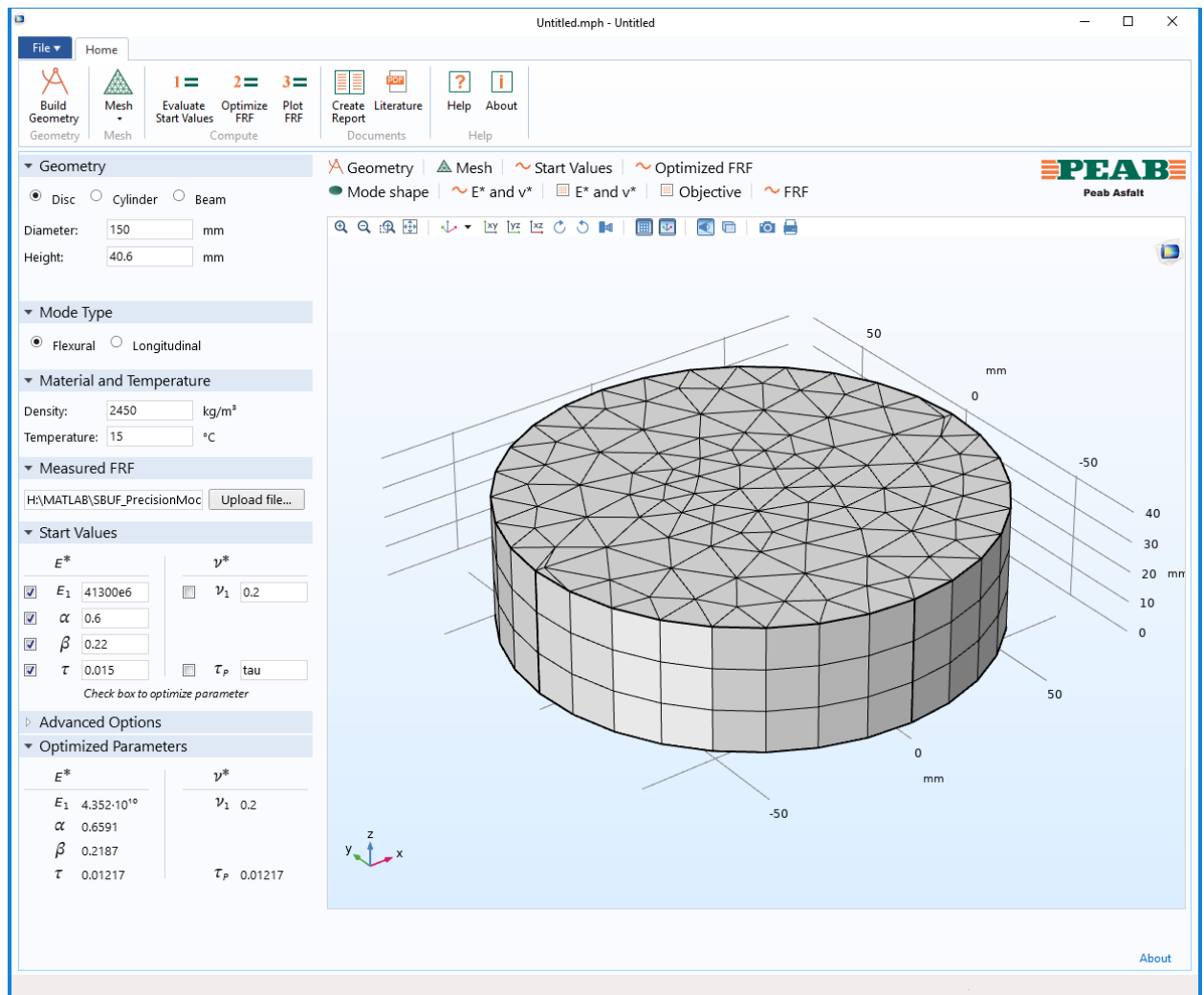


Figur 4. Respons (-) och inspelningstider (--) för provkropp ABS-D9 vid -20 °C

3.1.3 Analys

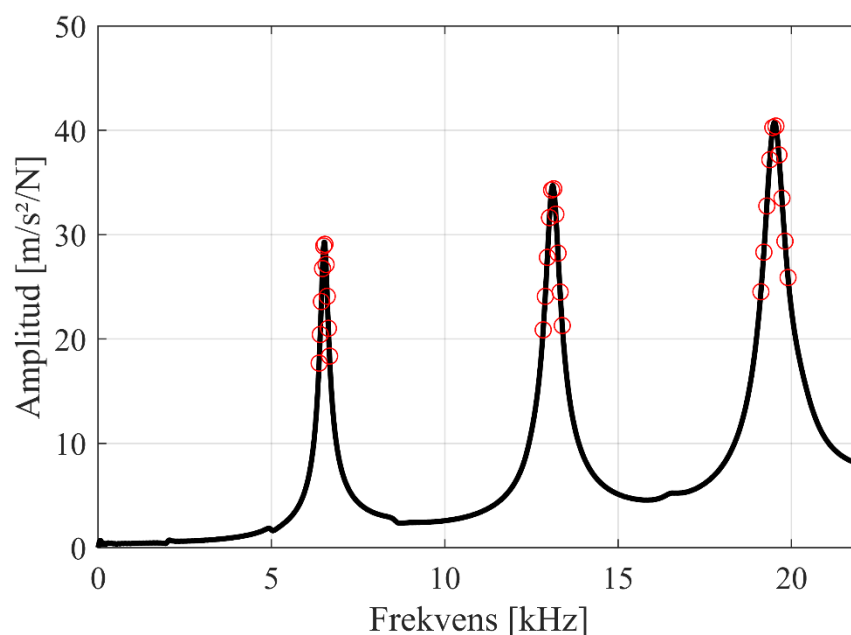
Beräkning av styvhetsmoduler utfördes på ett likvärdigt sätt genom att en FEM applikation (utvecklad i COMSOL Multiphysics Application Builder) distribuerades ut till samtliga deltagare (se Figur 5). I appen beräknas FRFer numeriskt genom FEM och optimeras mot uppmätta FRFer för att karakterisera den komplexa styvhetsmodulen (E^*) och komplexa Poisson's tal (ν^*). En projektpart nyttjade inte appen utan optimerade istället FEM beräknade FRFer med hjälp av MATLAB (Gudmarsson et al. 2012; Carret et al. 2018). FEM beräkningar av FRFerna utfördes dock även i detta fall med hjälp av COMSOL Multiphysics.

Genom att iterativt passa de numeriskt beräknade FRFerna mot mätningarna kan den frekvensberoende E^* och ν^* utvärderas. Det finns flera modeller som uttrycker E^* och ν^* som funktion av frekvens. I detta projekt användes HN och 2S2P1D modellen för att vid respektive temperatur karakterisera E^* och ν^* som funktion av frekvens (Havriliak och Negami 1967; Olard och Di Benedetto 2003).



Figur 5. FEM app för att bestämma styvhet i asfaltprovkroppar genom att beräkna och optimera FRFer mot uppmätta FRFer.

Respektive projektpart valde ett begränsat antal punkter från de uppmätta FRFerna som indata till FEM beräkningarna. Dessa punkter ger de frekvenser som amplituden beräknas för i FEM applikationen. Genom att välja ut ett begränsat antal punkter (frekvenser) istället för att använda hela frekvensområdet i FRFen kan beräkningstiden kortas avsevärt. Dessa punkter väljs utifrån resonansfrekvenserna och fördelas ut så att amplitud och bredd av respektive pik även kan karakteriseras i FEM beräkningarna. Valet av punkter samt framförallt antal resonansfrekvenser som inkluderas till analysen kan påverka den karakteriserade styvheten. I samtliga fall valdes 10 punkter per resonansfrekvens där antalet resonansfrekvenser beror på provkropparnas geometri och temperatur. Figur 6 visar ett exempel på punkter som valts ut för att beräkna FRFer i FEM appen.



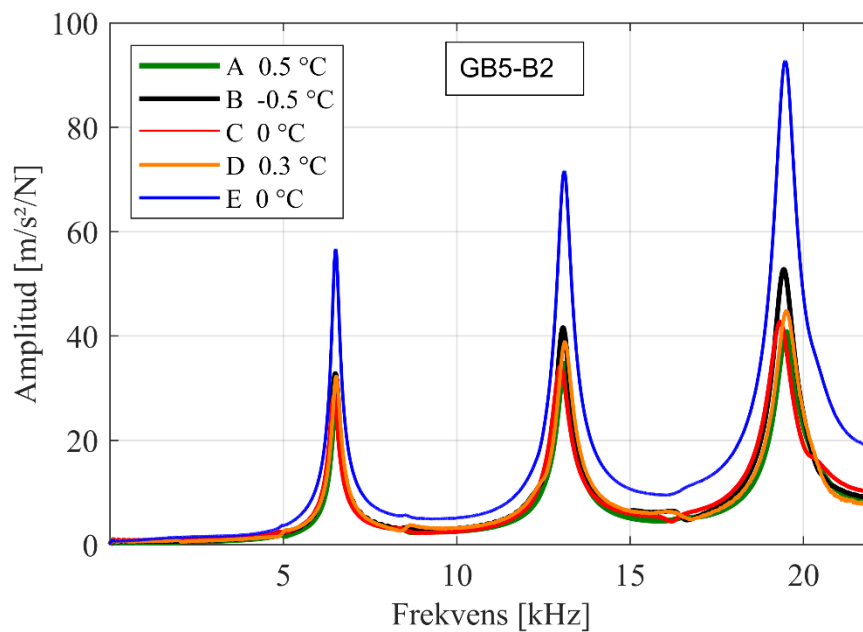
Figur 6. Exempel på punkter från uppmätt FRF som används som indata till FEM beräkningen

Varje projektpart bestämde styvheten för varje provkropp och för varje temperatur. Masterkurvor av den komplexa styvhetsmodulen bestämdes dock av en projektpart för att inte proceduren att skifta styvhetsmoduler skulle bidra med avvikelser som inte är relaterade till modalanalys. Masterkurvor kan bestämmas utifrån resultat från flera olika provmetoder (t.ex. drag-tryck provning) där mätningar utförs vid flera temperaturer och frekvenser. Genom att bestämma masterkurvor av den komplexa styvhetsmodulen kan precisionen utvärderas vid en godtycklig temperatur och frekvens.

4. RESULTAT

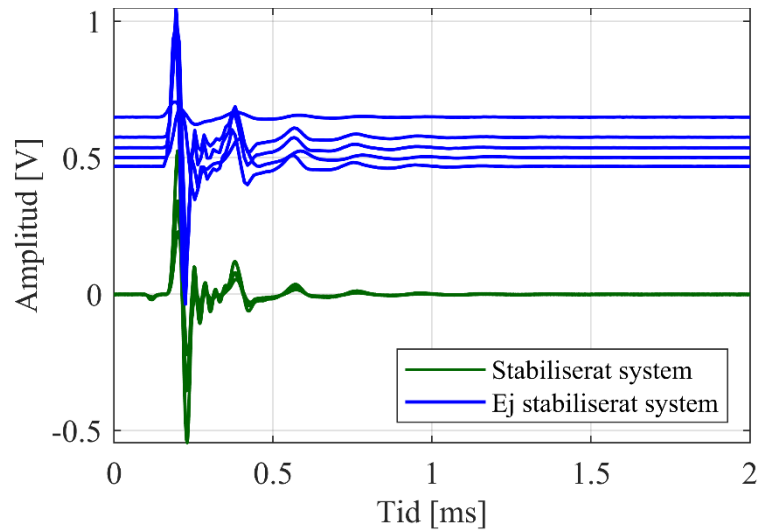
4.1 Störningar i mätsystem

Utvärderingen av uppmätta FRFer visade att mätningar från projektpart E skiljde sig tydligt mot övriga mätningar. Mätningar vid flera olika temperaturer och provkroppar gav konsekvent högre amplituder av FRFerna i jämförelse mot mätningar från övriga projektparter. Figur 7 visar denna skillnad för provkropp GB5-B2 vid 0 °C där amplituden (men inte resonansfrekvenserna) är tydligt högre för E i jämförelse mot övriga mätningar.



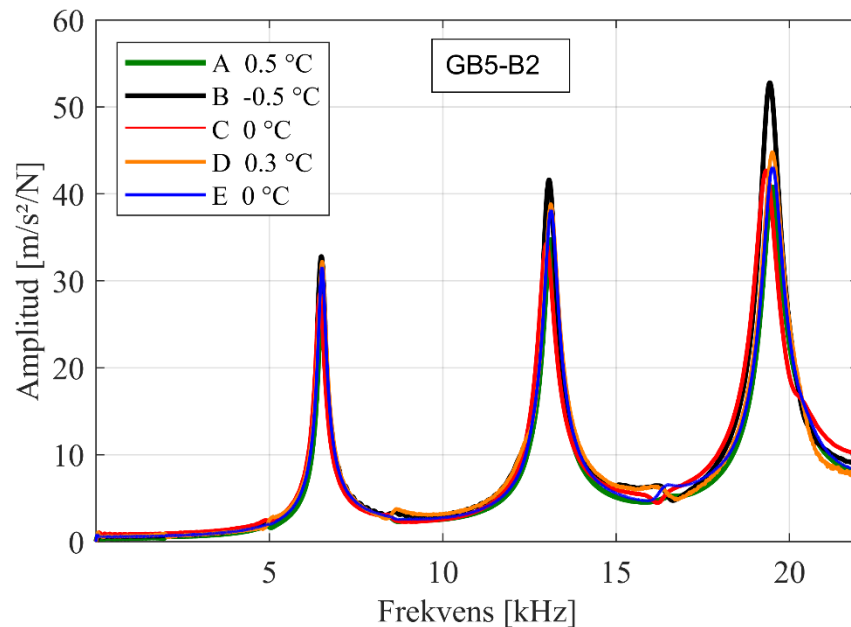
Figur 7. Uppmätta FRFer där mätningar från projektpart E gav avvikande amplitud

Orsaken till de avvikande resultaten visade sig komma från störningar i mätsystemet som kan uppstå om mätningar utförs innan systemet fått tid att stabilisera sig efter uppstart och ihopkopplande av accelerometer och hammare. I detta fall kopplades accelerometern till signalkonditioneringen i direkt anslutning till att mätningarna utfördes på grund av att provkroppen med en fastlimmad accelerometer förflyttades från temperaturskåpet till en annan placering. Detta förfarande innebar att accelerometersignalen inte stabiliserade sig innan mätningen utfördes och detta resulterade då i avvikande amplituder. Effekten visas i Figur 8 där accelerometersignalerna från ett stabiliserat och icke stabiliserat system visas i tidsdomän. De fem mätningarna som utfördes när systemet inte hade stabiliserats visar att responsen startar (tid = 0 s) från en godtycklig amplitud och inte från noll samt ändras från mätning till mätning. Detta är i motsats till ett stabiliserat system där amplituden av responsen i samtliga fem mätningar utgår från noll. Notera att inspelningstiden startar innan hammarslagen har utförts och alltså innan några vibrationer har uppstått i provkroppen. Den amplitud av responsen som inte utgår från noll vid tiden 0 s är därför ett resultat av någon slags störning i systemet.



Figur 8. Resultat av fem mätningar med respektive system.

Mätningarna av balkarna (B2 och B4) återupprepades efter att denna orsak hade identifierats. Samma förfarande utfördes med skillnad att mätningarna genomfördes 10-30 sekunder efter att accelerometern kopplats till systemet. Figur 9 visar de uppdaterade mätningarna av provkropp GB5-B2 vid 0 °C. Tack vare att systemet stabiliserats resulterade FRFerna i liknande amplituder som för övriga projektparter. Uppdaterade mätningar genomfördes endast på balkarna vilket innebär att resultaten från projektpart E för cylindrar och diskar är avvikande och kommer inte tas med i beräkningen av precisionen för dessa geometrier. Figurer som visar effekten av störningarna i mätningarna på den beräknade styvhetsmodulen presenteras dock i kommande kapitel.

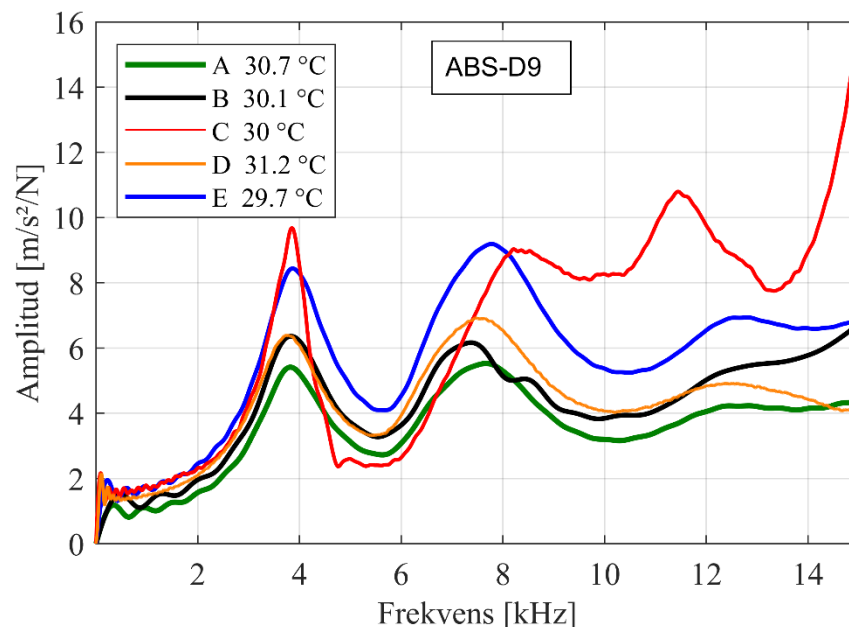


Figur 9. FRFer med uppdaterade mätningar från projektpart E

4.2 Störningar i enskilda FRF mätningar

Vid jämförelsen av uppmätta FRFer från de olika projektparterna identifierades enstaka FRFer som avvек tydligt mot övriga mätningar. De avvекande mätningarna är kontaminerade med kraftigt brus som orsakar avvекelser från förväntade (rimliga) resonansfrekvenser och amplituder. Figur 10 visar ett sådant exempel för ABS-D9 vid 30 °C där FRFen från projektpart C avvек från övriga mätningar. Orsakerna till dessa avvекelser i mätningarna är till största sannolikhet beroende på antingen hur hammarslaget har applicerats eller hur accelerometern fästs i provkroppen. Effekten av en accelerometer som inte placerats plant på ytan eller sitter löst har tidigare visat sig bidra med stora avvекelser (Gudmarsson 2014). Ett ”missat” hammarslag kan också leda till att frekvenser inom ett relevant område inte exciteras vilket istället kan leda till brus i FRFen inom det intressanta frekvensområdet. Analysen av hammarslagen indikerade dock att dessa inte var orsaken till avvекelserna i detta fall. Då samtliga mätningar från projektpart C på provkropp ABS-D9 uppvisade störningar är placeringen (limningen) av accelerometern den troligaste orsaken till avvекelserna. En för kort inspelningsstid som nämnts tidigare kan också vara en faktor till störningar i FRFer.

I de fall då tydligt avvекande FRFer inte har möjliggjort en rimlig utvärdering av styvheten så har dessa mätningar exkluderats från utvärderingen av precisionen av metoden. I Tabell 4 listas de mätningar som har utgått från vidare utvärdering av styvhet.



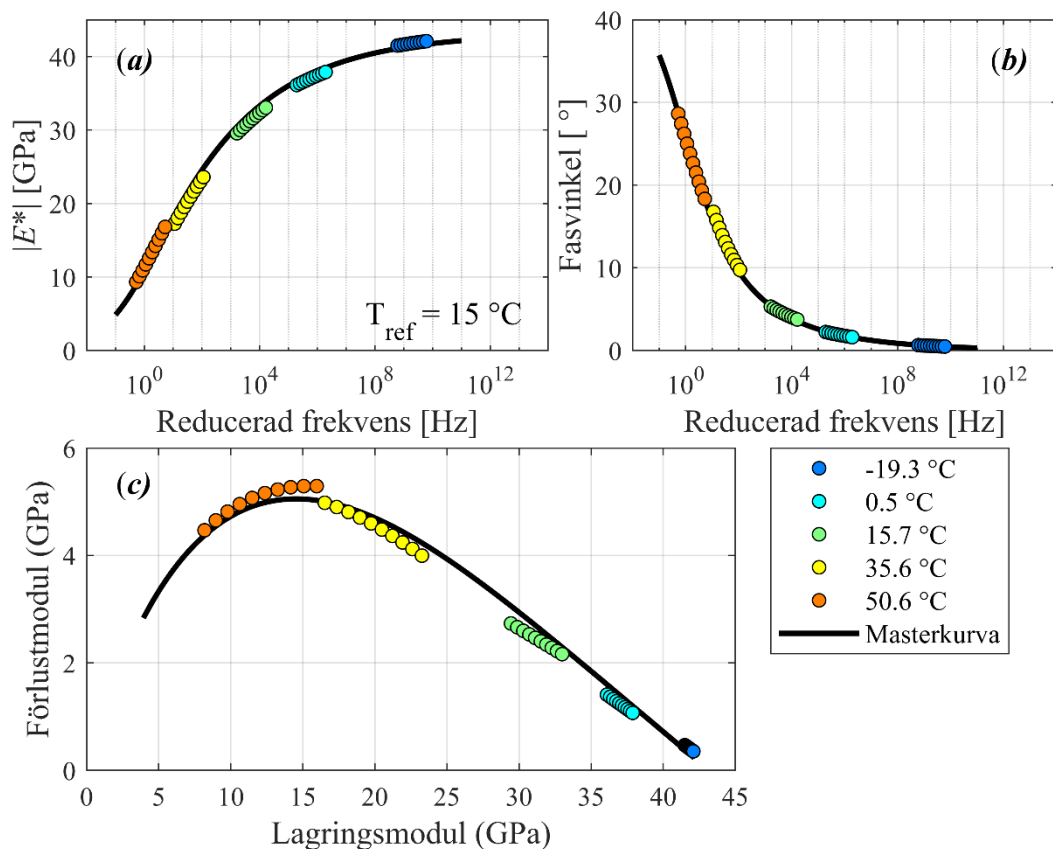
Figur 10. FRFer för provkropp ABS-D9 vid ca 30 °C

Tabell 4. FRF mätningar som utgått från styvhetsutvärdering

ID	Temperatur (°C)	Projektpart	Orsak
ABS-D9	15	C	Avvikande FRF
	30	C	
	40	C	
ABS-D10	40	D	Ingen mätning
GB5-D3	50	D	Avvikande FRF

4.3 Komplex styvhetsmodul

Figur 11 visar den komplexa modulen för provkropp GB5-B2 som utvärderats från en av projektparternas FRF mätningarna. Figuren presenterar den komplexa modulen i tre delfigurer: a) den dynamiska styvhetsmodulen, b) fasvinkeln och c) lagrings- och förlustmodulen. I Figur 11a och 11b visas den dynamiska modulen och fasvinkeln som funktion av referenstemperatur och reducerad frekvens. Detta innebär att styvhetsmodulerna från varje temperatur har skiftats till en reducerad frekvens som ger en ekvivalent modul vid referenstemperaturen (15 °C). Modulerna från varje temperatur som presenteras i Figur 11c är oberoende av skiftningsförfarandet vilket innebär att noggrannheten för masterkurvan som bygger på skiftade moduler kan uppskattas. När masterkurvan följer modulerna för respektive temperatur i Figur 11c så är masterkurvans noggrannhet mot den dynamiska styvhetsmodulen och fasvinkeln god. Masterkurvan möjliggör att precisionen av komplexa styvhetsmodulen från respektive projektpart beräknas vid samma temperatur och frekvens även om mätningarna utförts i något olika temperaturer. Masterkurvorna bidrar dock också i en viss grad till en variation i precisionsutvärderingen eftersom de är en approximation till uppmätt styvhetsmodul.



Figur 11. Komplex styvhetsmodul för provkropp GB5-B2

4.4 Jämförelse av komplex styvhetsmodul

Masterkurvorna som presenteras för varje provkropp möjliggör alltså att standardavvikelsen (SD) och variationskoefficienten (CV) kan utvärderas för varje frekvens vid en specifik referenstemperatur.

Variationskoefficienten av dynamiska styvhetsmodulen för balkarna och cylindrarna bestämdes till mellan 0.3 och 15.2 % över ett brett frekvensområde (10^{-1} till 10^{11} Hz). Som jämförelse mot konventionella standardiserade mätmetoder bestämdes 95 % reproducerbarhetsgränser vid 10 Hz och 15 °C till 7.5 och 4.7 % av medlet för provkropp C1 och C2. Den 95 % reproducerbarhetsgränsen av den dynamiska styvhetsmodulen vid 10 Hz och 15 °C för 2-punkt böjningsprovning rapporteras till 18 % i SS-EN 12697-26 standarden (SS-EN 12697-26:2012). Notera att precisionen endast redovisas för en specifik temperatur (15 °C) och belastningsfrekvens (10 Hz) i SS-EN 12697-26 standarden.

4.4.1 Balkar

Komplexa styvhetsmodulen för balkarna visar en god precision (se Tabell 5). För frekvenser från 10 Hz och uppåt gav mätningarna från de olika projektparterna en mycket bra precision av den dynamiska styvhetsmodulen (CV mellan 0.7 till 3.9 %). Att avvikelserna i modulen ökar (CV mellan 3.3 till 15.2 %) med lägre frekvenser (< 10 Hz) beror på att skillnader i amplituderna av de uppmätta FRFerna ger ett större bidrag till modulen med ökande temperaturer (lägre styvhetsmoduler). Vid lägre temperaturer och högre frekvenser styrs den komplexa styvhetsmodulen till större del av resonansfrekvenserna vilket gör styvheten något mindre känslig mot amplitudavvikelser (förlustmodulen är mindre i relation till lagringsmodulen).

Tabell 5. Variationskoefficienten av dynamisk styvhetsmodul samt standardavvikelsen av fasvinkeln vid $T_{ref} = 15$ °C

Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)	Max SD (°)	Min SD (°)
GB5-B2	0.1 - 10	15.2	3.9	3.3	1.4
	10 - 10^{11}	3.9	0.7	1.4	0.06
GB5-B4	0.1 - 10	14.6	3.3	3.6	1.2
	10 - 10^{11}	3.3	1.2	1.2	0.07

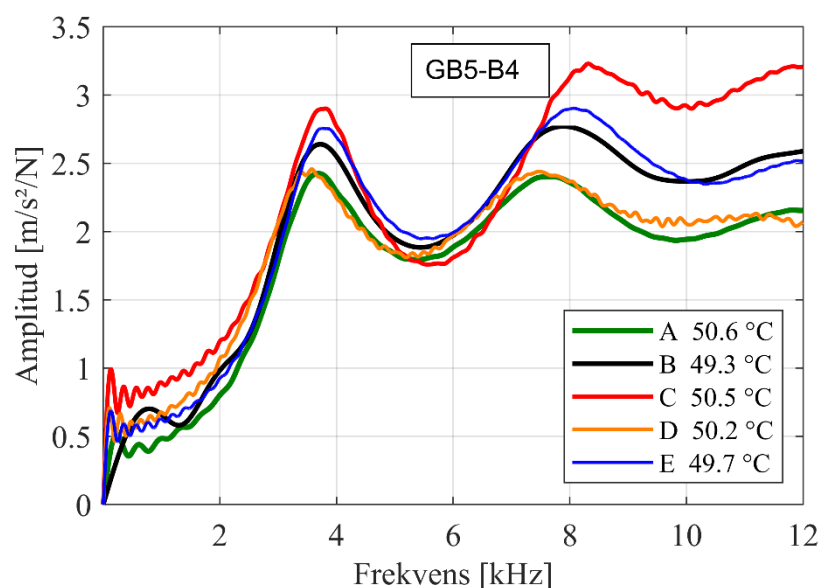
I Tabell 6 redovisas CV för första och andra resonansfrekvensen samt dess amplitud. Dessa värden ger bara en indikation av noggrannheten av FRFerna eftersom mätningarna inte är utförda vid exakt samma temperatur. I tabellen framgår det att noggrannheten försämras vid 50 °C. Detta beror antagligen på att resonansfrekvensen påverkas till en större grad av temperaturskillnader mellan projektparternas mätningar samt att frekvenserna är lägre vid dessa temperaturer. Den

högre dämpningen och lägre styvheten leder också till att färre antal resonansfrekvenser kan mätas och att provkroppen vibrerar med en lägre amplitud.

Tabell 6. Variationskoefficienten av resonansfrekvens och amplitud för den första och andra longitudinella moden

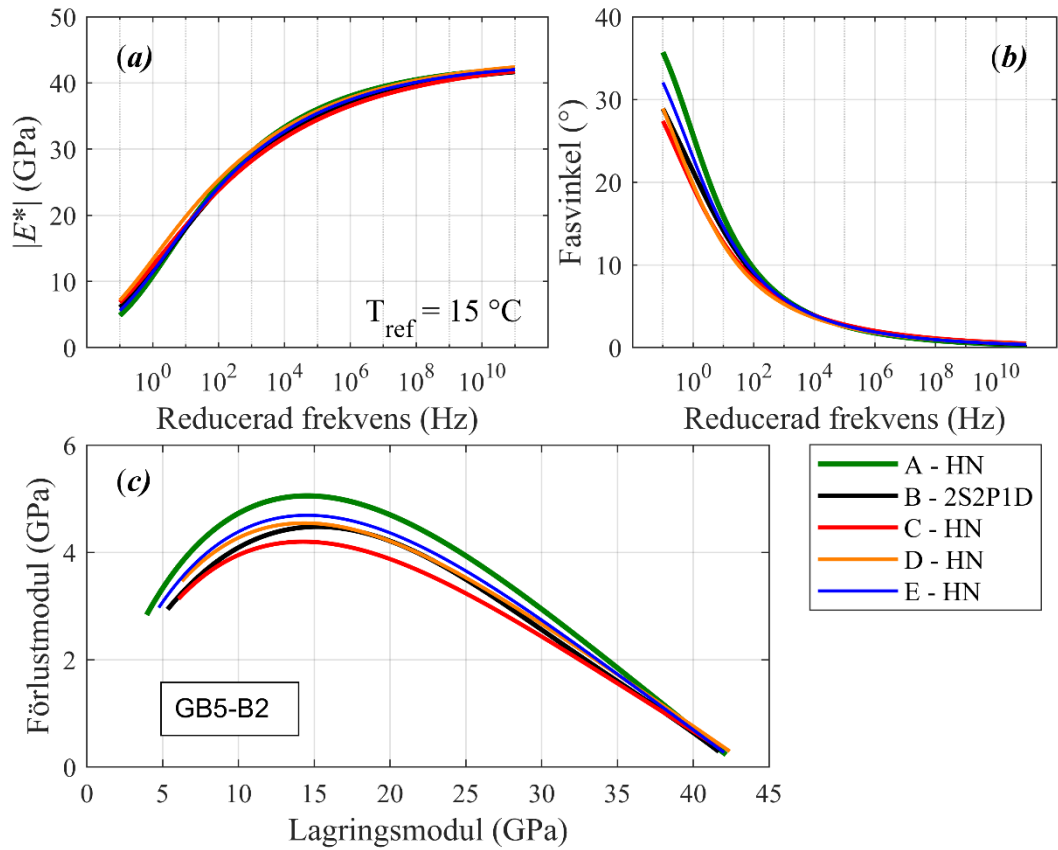
ID	Resonansfrekvens 1, CV (%)					Amplitud 1, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	35	50	-20	0	15	35	50
GB5-B2	0.46	0.43	0.76	1.23	2.24	13.0	6.1	6.8	9.9	8.3
GB5-B4	0.54	0.93	0.60	0.68	2.32	11.8	10.2	5.2	4.8	7.6
ID	Resonansfrekvens 2, CV (%)					Amplitud 2, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	35	50	-20	0	15	35	50
GB5-B2	0.46	0.43	0.66	0.53	3.06	6.3	8.1	6.2	9.6	11.3
GB5-B4	0.51	0.84	0.57	0.56	4.13	7.5	9.2	5.2	7.7	12.5

Figur 12 visar uppmätta FRFer vid ca 50 °C för balk GB5-B4 där resonansfrekvenserna har en större relativ skillnad i jämförelse mot FRFerna vid lägre temperaturer (se även Figur 9).

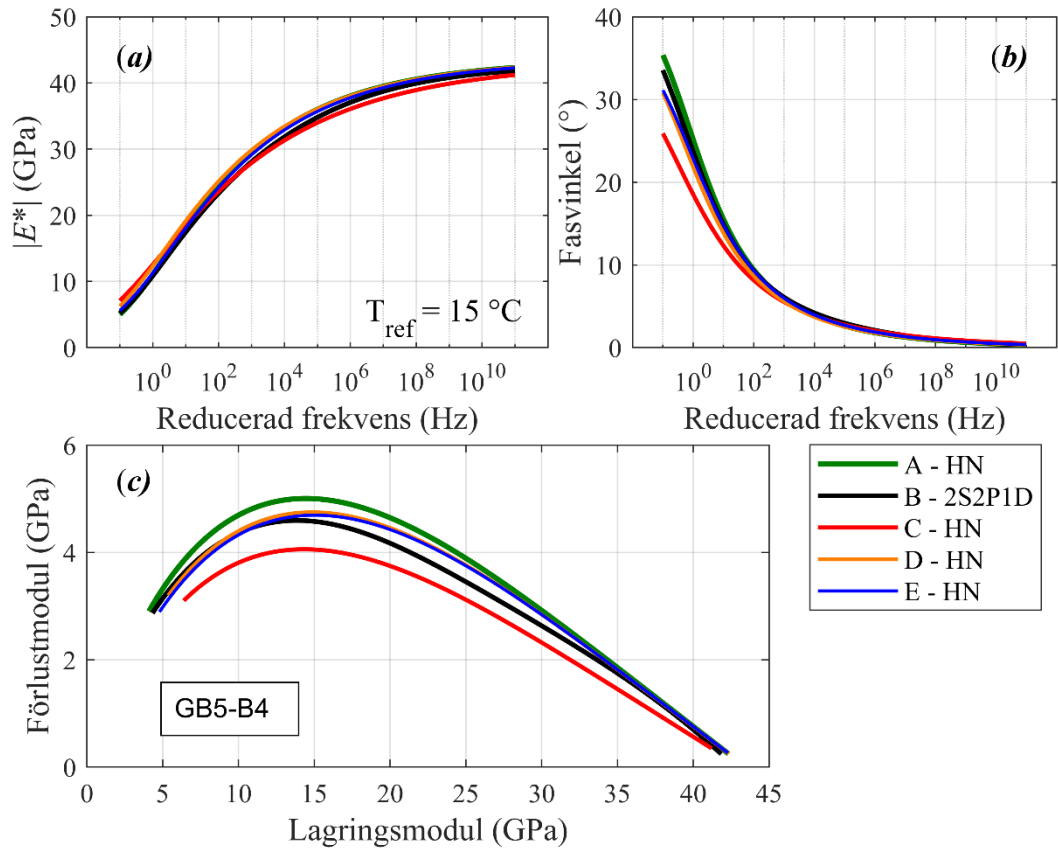


Figur 12. FRFer för provkropp GB5-B4 vid ca 50 °C

Figur 13 och 14 visar dynamiska styvhetsmodulen, fasvinkeln samt förlust- och lagringsmodulen för balkarna (GB5-B2 och GB5-B4). Figur 13c och 14c visar på skillnader i förlustmodulen som är ett direkt resultat av skillnaderna i amplituderna av FRFerna. Förlustmodulen får ett större bidrag till den dynamiska styvhetsmodulen ju lägre lagringsmodulen blir med ökande temperaturer och lägre belastningsfrekvenser.



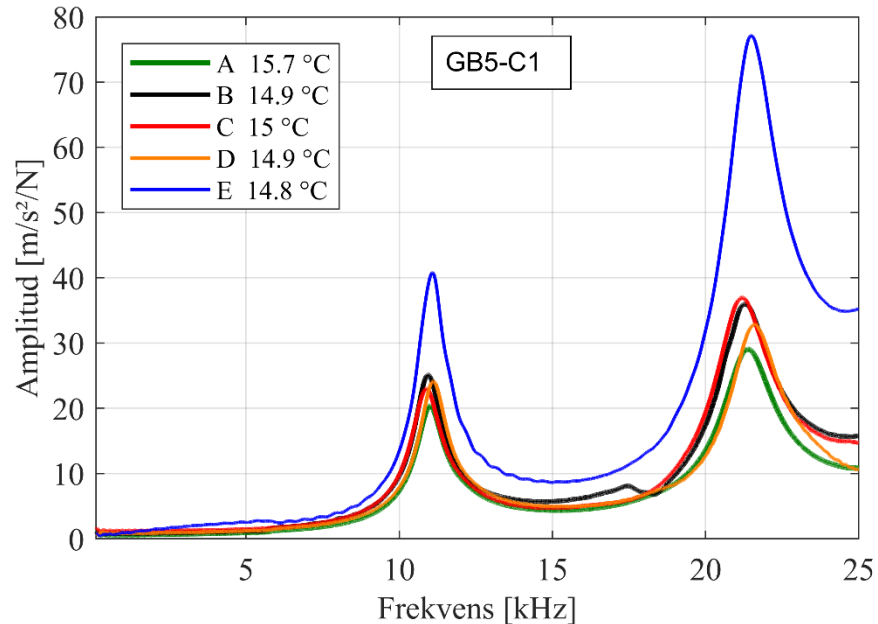
Figur 13. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-B2



Figur 14. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-B4

4.4.2 Cylindrar

På grund av den uppenbara störningen i mätsystemet som redovisades i kapitel 4.1 så exkluderas mätningarna från projektpart E i utvärderingen av precision för resterande provkroppar. Figur 15 visar amplitudskillnaden i FRFen från projektpart E mot övriga mätningar för den cylindriska provkroppen GB5-C1 vid ca 15 °C.

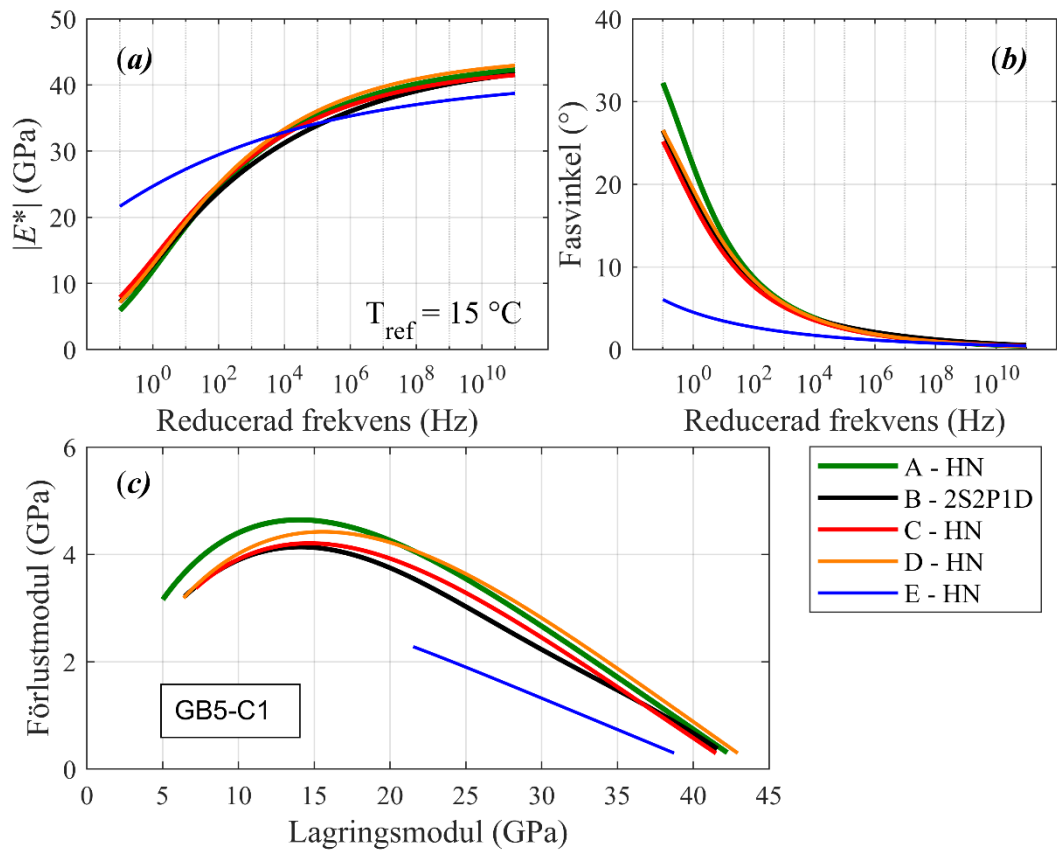


Figur 15. Uppmätta FRFer där mätningar från projektpart E gav avvikande amplitud för GB5-C1

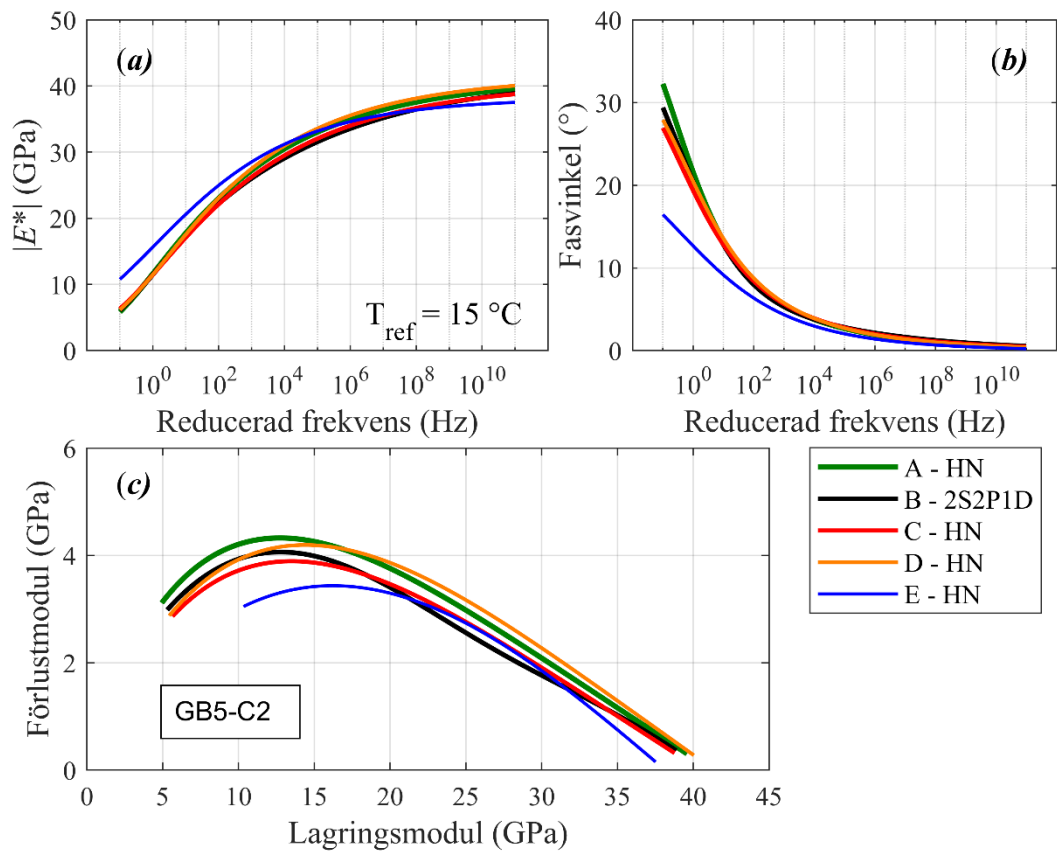
Figur 16 visar hur amplitudskillnaden i FRFen påverkar bestämningen av den komplexa styvhetsmodulen som avviker tydligt mot övriga projektparter. Övriga fyra resultat av den komplexa styvhetsmodulen visar på en mycket god överensstämmelse för de cylindriska provkropparna (se även Figur 17). Tabell 7 presenterar CV och SD för de cylindriska provkropparna som alltså i detta fall bestämts för resultaten från fyra projektparter.

Tabell 7. Variationskoefficienten av dynamisk styvhetsmodul samt standardavvikelsen av fasvinkeln vid $T_{ref} = 15 \text{ °C}$

Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)	Max SD (°)	Min SD (°)
GB5-C1	0.1 to 10	11.8	2.7	3.2	1
	10 to 10^{11}	2.7	1.6	1	0.06
GB5-C2	0.1 to 10	3.3	0.3	2.3	0.4
	10 to 10^{11}	2.9	1.5	0.4	0.05



Figur 16. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-C1



Figur 17. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-C2

I tabell 8 redovisas CV för första och andra resonansfrekvenserna och dess amplituder. Noterbart är att CV av amplituderna för den andra resonansfrekvensen är betydligt högre än den första vilket skiljer sig mot resultaten från balkarna. Detta kan bero på att den andra resonansfrekvensen för de cylindriska provkropparna ligger högre i frekvens (14 till 25 kHz) än vad den gör för balkarna (7 till 14 kHz). Höga frekvenser ger högre avvikelser i amplitud men samtidigt minskar amplitudens påverkan på den komplexa styvhetsmodulen med ökande frekvenser (förlustmodulen blir mindre i relation till lagringsmodulen).

Tabell 8. Variationskoefficienten av resonansfrekvens och amplitud för den första och andra longitudinella moden

ID	Resonansfrekvens 1, CV (%)					Amplitud 1, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	35	50	-20	0	15	35	50
GB5-C1	0.54	0.76	0.87	0.48	1.23	6.3	11.3	8.9	8.5	9.6
GB5-C2	0.57	1.09	1.66	0.75	1.13	7.0	6.9	10.7	6.3	7.7
	Resonansfrekvens 2, CV (%)					Amplitud 2, CV (%)				
GB5-C1	0.57	0.60	0.84	2.26	3.36	24.2	20.0	10.5	10.3	16.2
GB5-C2	0.56	0.57	0.83	1.22	3.16	29.3	13.0	20.7	11.7	9.8

4.4.3 Diskar (ABS)

FRF mätningarna av diskarna visade sig generellt resultera i något större amplitudskillnader i jämförelse mot balkarnas och cylindrarnas FRFer (se Tabell 9).

Tabell 9. Variationskoefficienten av resonansfrekvens och amplitud för den första och andra böjmoden

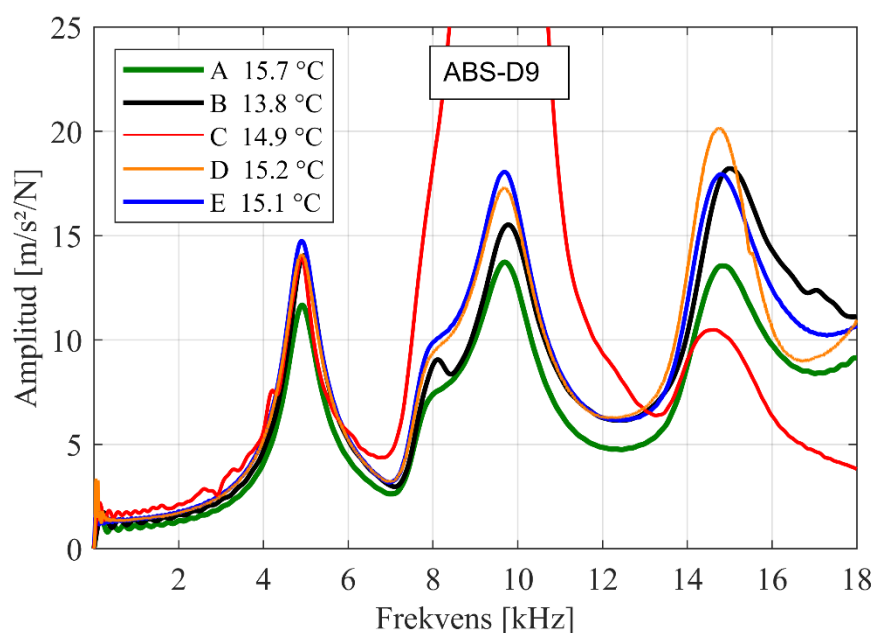
ID	Resonansfrekvens 1, CV (%)					Amplitud 1, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	30	40	-20	0	15	30	40
ABS-D9	0.88	0.78	0.53	1.26	1.74	43.1	9.0	10.5	9.2	12.3
ABS-D10	0.73	0.64	1.62	1.91	4.40	12.8	12.8	15.7	10.2	12.2
	Resonansfrekvens 2, CV (%)					Amplitud 2, CV (%)				
ABS-D9	0.73	0.64	0.56	2.02	0.62	37.2	15.4	11.5	11.3	10.6
ABS-D10	0.83	0.60	0.71	2.72	8.19	23.8	21.5	19.1	16.0	18.9

De något större amplitudskillnaderna framförallt vid de högre temperaturerna (lägre frekvenserna) återspeglas i den utvärderade precisionen som reduceras något för denna provkroppsgeometri i jämförelse mot balkarna och cylindrarna. Tabell 10 visar värden på CV och SD där det även framgår att precisionen inte utvärderats för frekvenser lägre än 10 Hz. Detta beror framförallt på att ett mjukare bitumen (70/100) användes i dessa provkroppar (i jämförelse mot GB 5 massan). Högsta mättemperatur var därför 40 °C istället för 50 °C som nämnts tidigare. Det är värt att lyfta fram att precision mellan 100 till 10¹¹ Hz fortfarande är bra i relation till konventionella mätmetoder.

Tabell 10. Variationskoefficienten av dynamisk styvhetsmodul samt standardavvikelsen av fasvinkeln vid $T_{ref} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

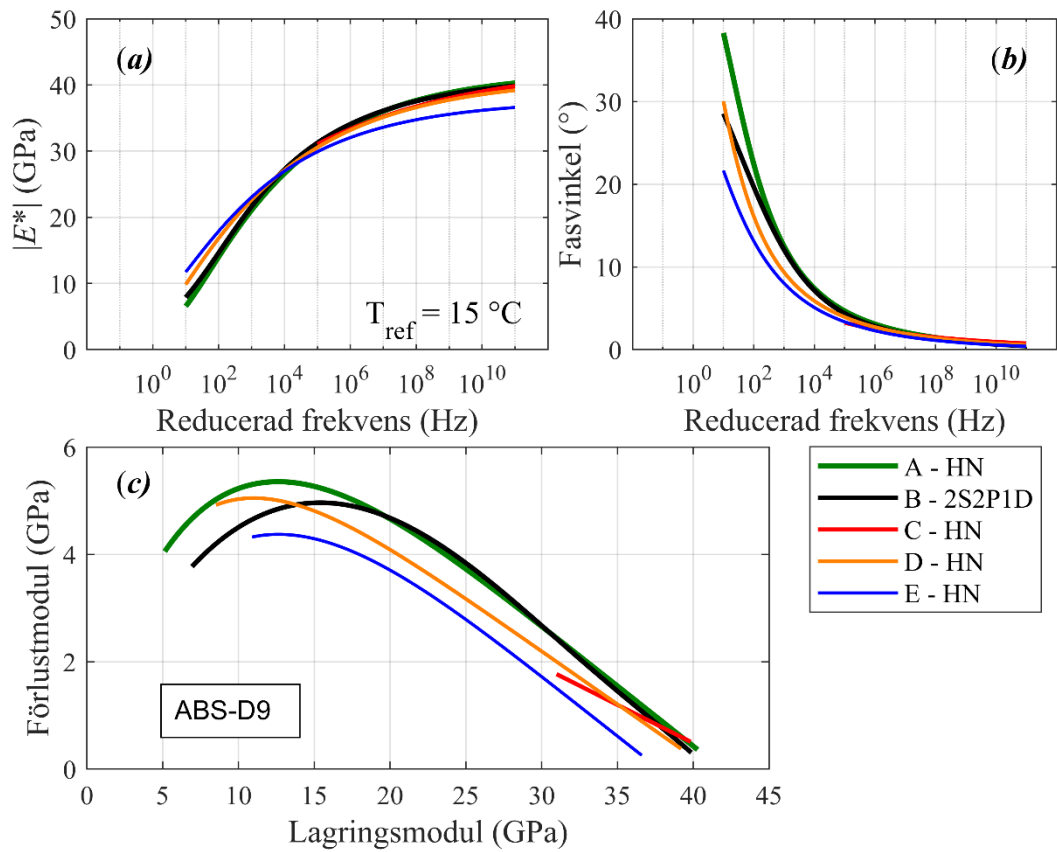
Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)	Max SD (°)	Min SD (°)
ABS-D9	10 - 100	20.5	9.7	5.3	3.2
	100 - 10^{11}	9.7	1.0	3.2	0.06
ABS-D10	10 - 100	30.0	13.5	8.5	4.8
	100 - 10^{11}	13.5	1.6	4.8	0.1

Utöver amplitudskillnaderna förekom även störningar i FRF mätningarna oftare än vad det gjorde för balkarna och cylindrarna. Figur 18 visar ett typexempel på FRFernas variation i amplitud för diskarna samt ett exempel på en störning där den andra resonansfrekvensens amplitud avviker kraftigt för mätningen från projektpart C (se kapitel 4.2).

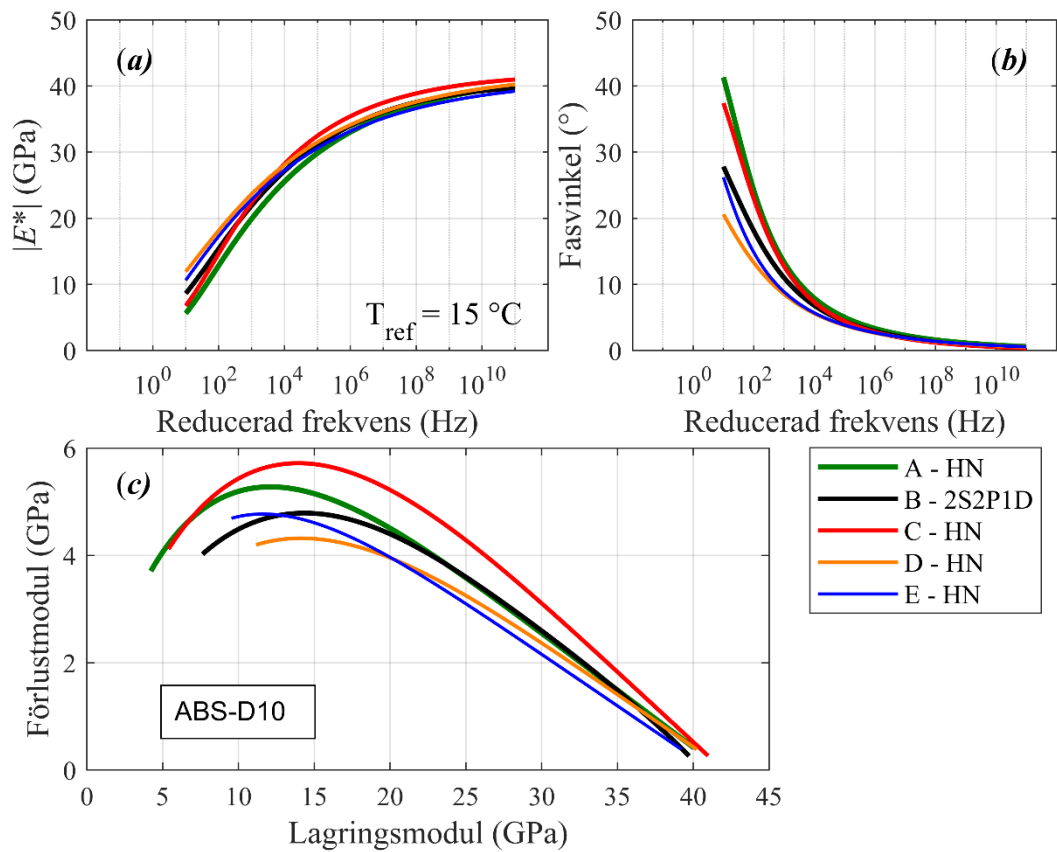


Figur 18. FRFer för provkropp ABS-D9 vid $15 \text{ }^\circ\text{C}$

Eftersom det fanns störningar i mätningarna av provkropp ABD-D9 så har utvärderingen av precisionen inte inkluderat komplexa modulen från projektpart C. I Figur 19 visas ändå den del av masterkurvan som kunde bestämmas utifrån mätningarna av projektpart C där styvheten har utvärderats från FRFer vid -20 och $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Figur 20 visar komplexa styvhetsmodulerna för ABS-D10. Värt att nämna för denna provkropp är att accelerometers position behövdes bytas efter de två första projektparternas mätningar (pga. skada). Detta har troligen bidragit till amplitudskillnader som påverkat precisionen.



Figur 19. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp ABS-D9



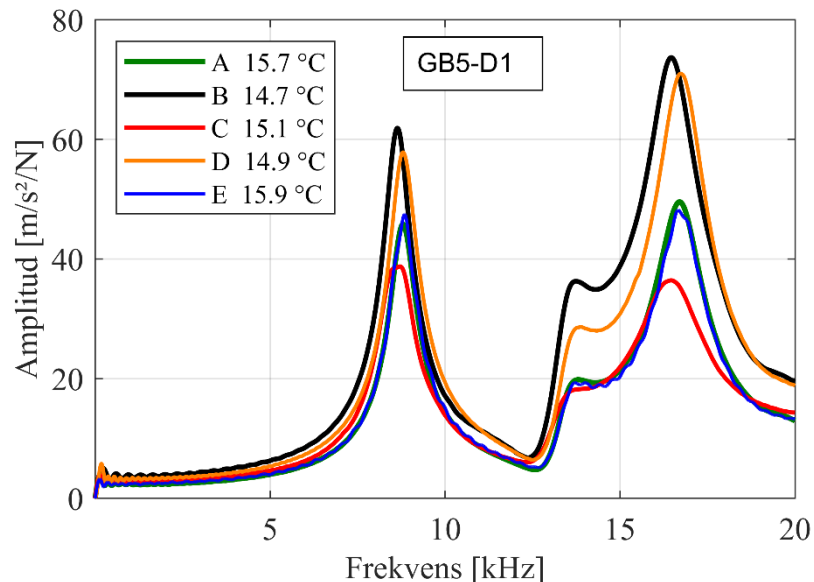
Figur 20. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp ABS-D10

4.4.4 Diskar (GB5)

Även för de mindre diskarna ($d=100$ mm, $h=30$ mm) så påvisades tydligare amplitudskillnader i projektparternas uppmätta FRFer (se Tabell 11). Figur 21 visar FRFer vid ca 15 °C för provkropp GB5-D1 där mätningarnas amplitudskillnader framgår tydligt.

Tabell 11. Variationskoefficienten av resonansfrekvens och amplitud för den första och andra longitudinella moden

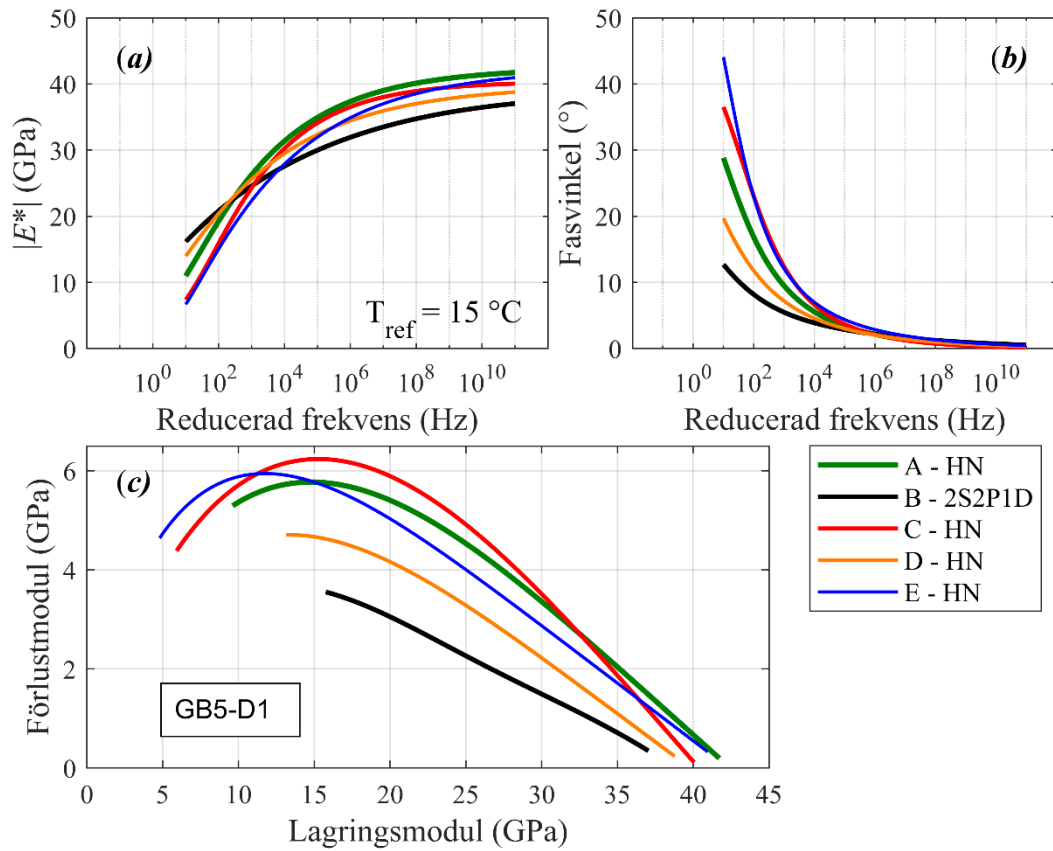
ID	Resonansfrekvens 1, CV (%)					Amplitud 1, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	35	50	-20	0	15	35	50
GB5-D1	1.32	1.07	0.94	1.07	2.38	27.2	18.4	18.6	16.2	22.8
GB5-D3	0.71	1.16	1.07	0.73	0.96	53.8	21.7	17.9	9.9	9.0
ID	Resonansfrekvens 2, CV (%)					Amplitud 2, CV (%)				
	Cirka temperatur (°)									
	-20	0	15	35	50	-20	0	15	35	50
GB5-D1	0.72	0.38	0.80	1.06	6.74	33.1	21.1	28.7	25.9	20.1
GB5-D3	0.63	1.66	1.32	1.97	4.66	44.2	32.8	34.1	16.8	17.7



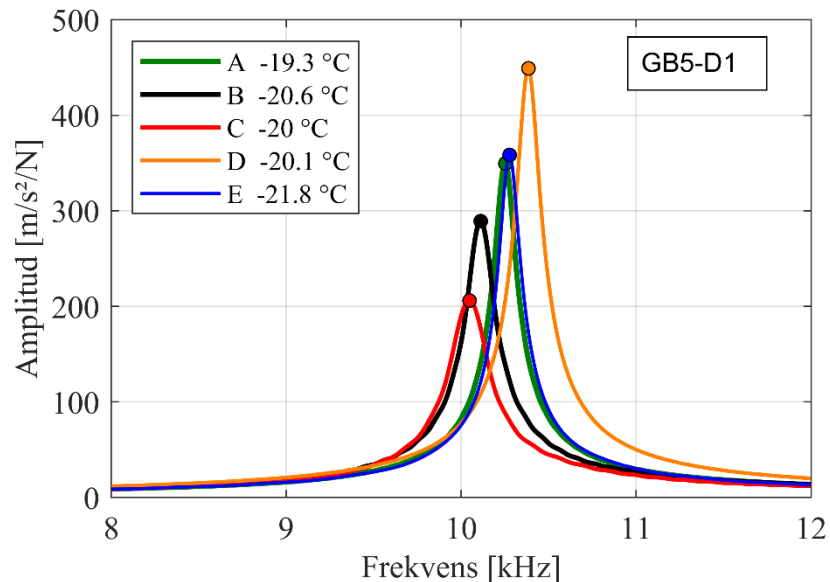
Figur 21. FRFer för provkropp GB5-D1 vid 15 °C

Dessa amplitudskillnader resulterade även i detta fall i skillnader för förlustmodulen vilket bidrog till sämre precision för dessa provkroppar i jämförelse mot balkarna och cylindrarna. Figur 22 visar masterkurvorna av den komplexa styvhetsmodulen för GB5-D1. Masterkurvorna sprider tydligt i de tre delfigurerna vilket indikerar att det kan vara flera orsaker till spridningen. En trolig ytterligare anledning är skillnader i första resonansfrekvensen vid -20 °C som presenteras i Figur 23 och som även framgår i Tabell 11. För övriga provkroppar har den fundamentala resonansfrekvensen vid -20 °C uppvisat en god överensstämmelse mellan projektparternas mätningar. Avvikelser i denna resonansfrekvens och temperatur får större påverkan på den komplexa styvhetsmodulen då mätningarna vid den lägsta temperaturen avgör masterkurvans maximala styvhetsmodul. I kombination med större amplitudavvikelser vid de

högre temperaturerna har detta resulterat i masterkurvor med större skillnader över hela frekvensområdet (se Figur 22).



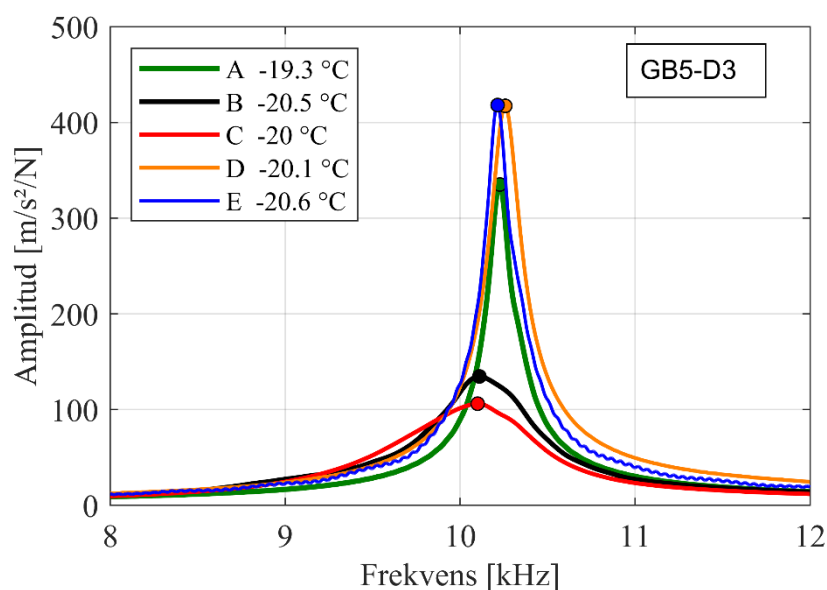
Figur 22. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-D1



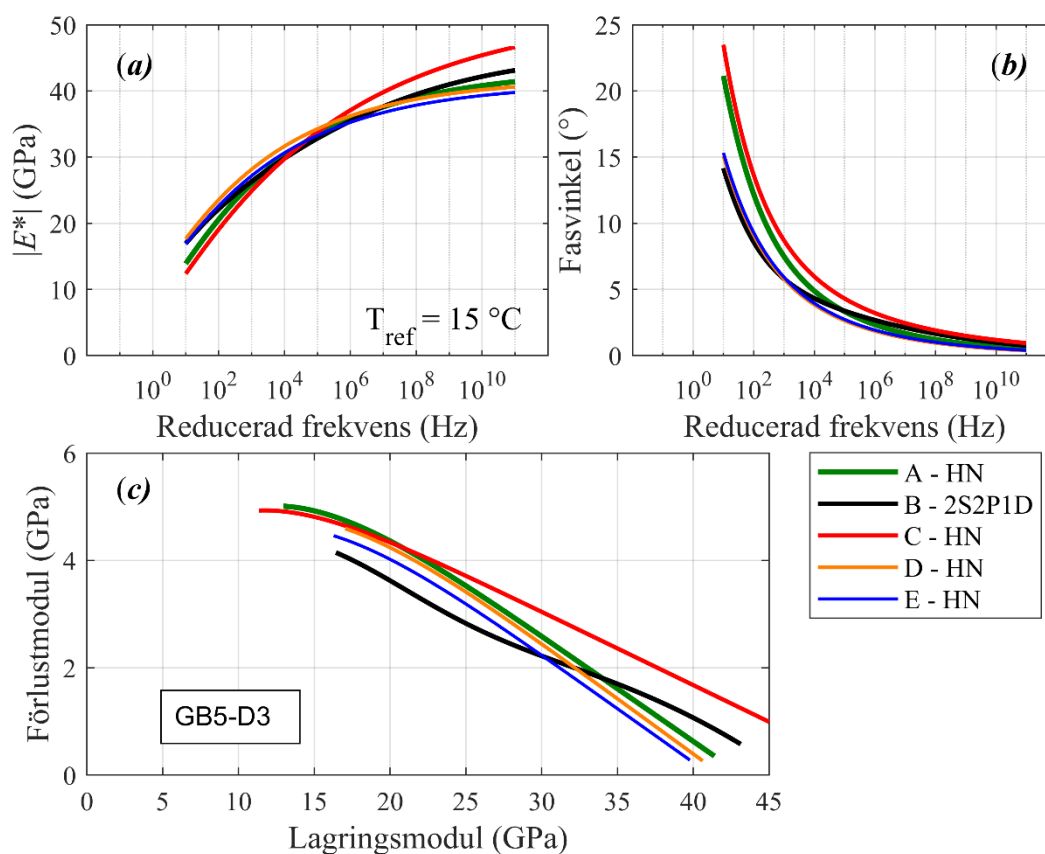
Figur 23. FRFer för provkropp GB5-D1 vid -20 °C

Även mätningarna av GB5-D3 vid -20 °C visade på tydliga skillnaderna i FRFerna. I detta fall avvek framförallt FRFerna från projektparter B och C medan övriga mätningar resulterade i

liknande resultat. Figur 24 visar skillnaderna i FRFer där först och främst amplituden avviker kraftigt, men även resonansfrekvensen avviker något. Även vid 0 °C uppstod avvikelser i FRF mätningarna av B och C.



Figur 24. FRFer för provkropp GB5-D3 vid -20 °C



Figur 25. Komplexa styvhetsmoduler av provkropp GB5-D3

Masterkurvorna av komplexa styvhetsmodulen i Figur 25 visar att modulen från projektpart B och C tydligt påverkats av de avvikande FRFerna vid -20 och 0 °C.

Utmärkande för mätningarna på de mindre diskarna är att GB5-D3 i jämförelse mot GB5-D1 resulterade i bättre precisionsvärden för styvheten (se Tabell 12). Detta kan bero på att mindre avvikelser i amplitud vid högre temperaturer samt mindre avvikelser i resonansfrekvens vid -20 °C (se Tabell 11).

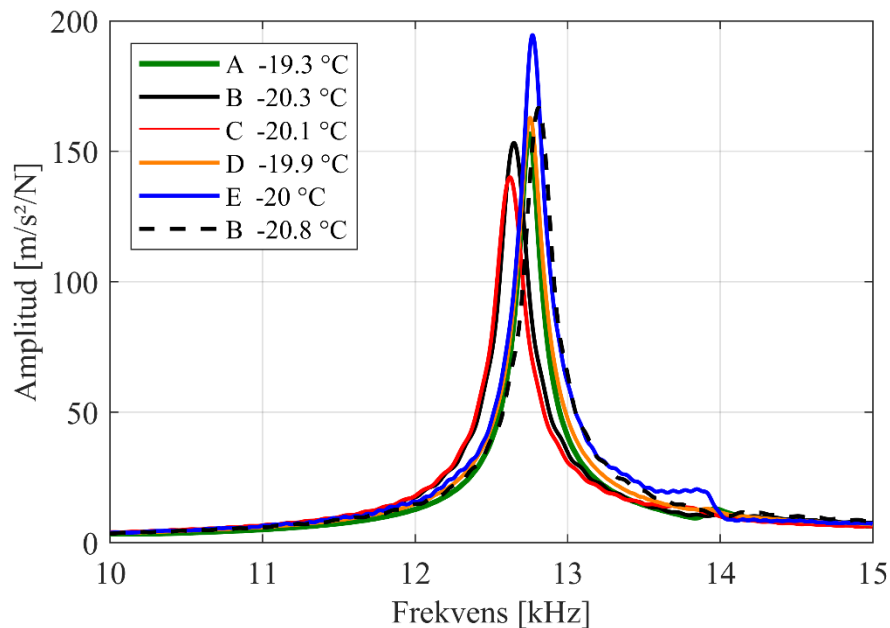
Precisionen mellan 100 till 10¹¹ Hz som redovisas i Tabell 12 visar högre värden för GB5-D1 i jämförelse mot resultaten från övriga provkroppar. Noggrannheten är även tydligt sämre för de lägre frekvenserna (lägre styvheter) i jämförelse mot övriga resultat och framförallt mot balkarna och cylindrarna. Detta gör att frekvensområdet har begränsats till över 10 Hz vilket kan jämföras mot balkarna och cylindrarna där en god noggrannhet uppnåddes ända ner till 0.1 Hz.

Tabell 12. Variationskoefficienten av dynamisk styvhetsmodul samt standardavvikelsen av fasvinkeln vid T_{ref} = 15 °C

Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)	Max SD (°)	Min SD (°)
GB5-D1	10 - 100	37.2	14	12.6	6.6
	100 - 10 ¹¹	14	4.7	6.6	0.15
GB5-D3	10 - 100	14.7	8.2	4.2	2.2
	100 - 10 ¹¹	8.2	1.6	2.2	0.25

4.5 Styvhetsförändring över tid

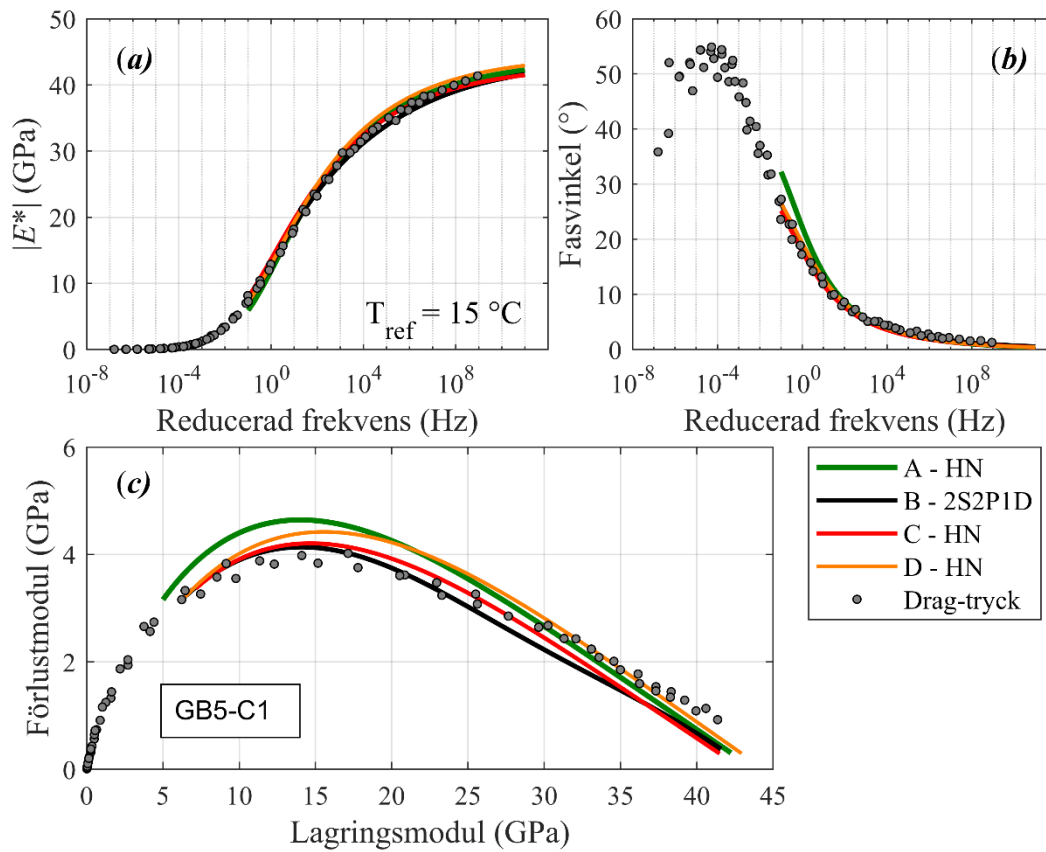
Vid upprepade mätningar (ca 1 år efter första mätning) av projektpart B som utförde första provningen på de cylindriska provkropparna påvisades förändringar i de uppmätta FRFerna. Figur 26 visar att den fundamentala longitudinella resonansfrekvensen har ökat tillsammans med amplituden för GB5-C1. Detta innebär att styvheten i provkroppen har ökat från första mätningen vilket troligen beror på den åldring som sker i asfalt. Det är även intressant att projektpart B och C utförde de första mätningarna och A, D och E utförde mätningarna 1 till månader efter de första mätningarna. Upprepade mätningar på ytterligare provkroppar visade samma effekter. Denna typ av förändring studeras med större noggrannhet i ett pågående SBUF projekt (13530).



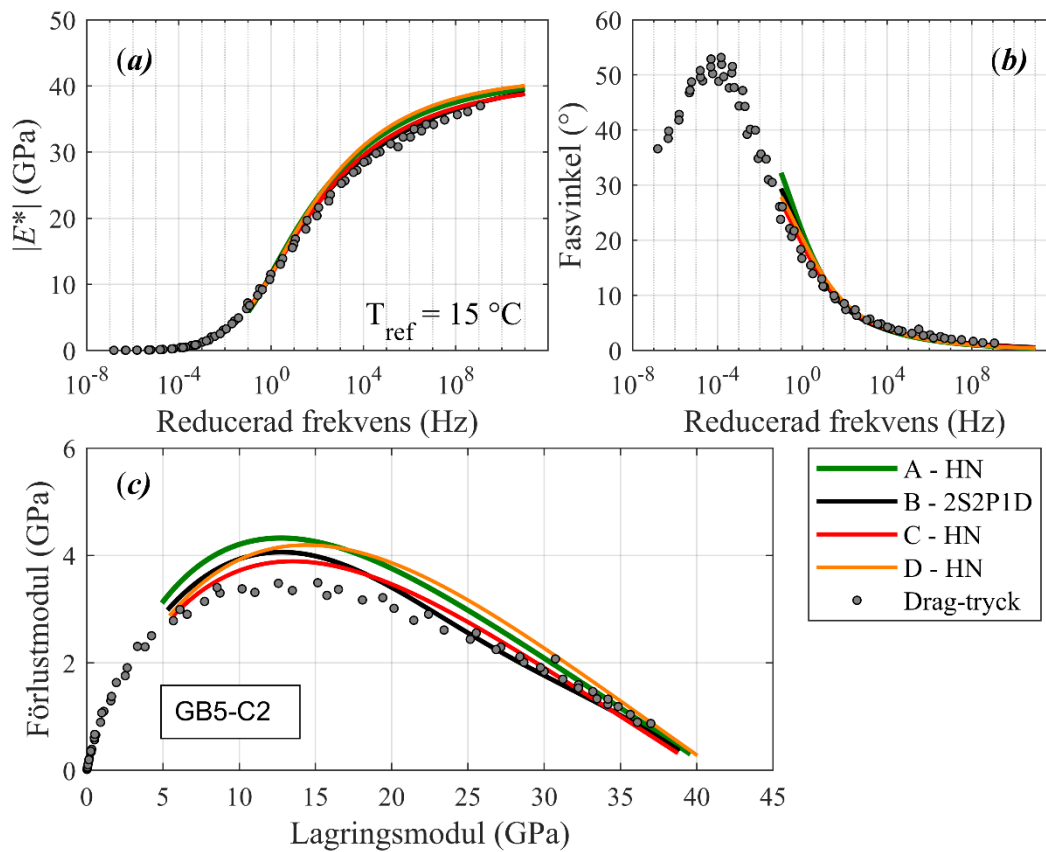
Figur 26. FRFer av GB5-C1 där projektpart B upprepat mätningarna (--) ca 1 år efter första mätningen

4.6 Jämförelse av styvhet från modalanalys och drag-tryck provning

Drag-tryck provningen utfördes på de cylindriska provkropparna GB5-C1 och GB5-C2 och resultaten jämfördes mot modalanalys provningen på samma provkroppar. Figur 27 (GB5-C1) och 28 (GB5-C2) visar masterkurvorna från modalanalys för fyra projektparter och den komplexa modulen som bestämts genom drag-tryck provningen. Medelvärdena av de fyra masterkurvorna från modalanalys har använts för att jämföra styvheten mot den drag-tryck bestämda styvheten. Tabell 13 presenterar CV för masterkurvorna från modalanalys och tryck-drag. Jämförelsen visar att skillnaderna mellan provmetoderna är i ungefär samma nivå som för cylindrarnas CV från modalanalysen för det lägre frekvensområdet mellan 0.1 till 10 Hz. Från 10 Hz och upp till 10^9 Hz så är största värdet på CV något högre (9 %) i jämförelse mot resultaten från modalanalys (2.9 %). Att drag-tryck provningen utfördes på samma provkroppar är sannolikt en bidragande orsak till den goda överensstämmelsen mellan metoderna.



Figur 27. Komplex styvhetsmodul från modalanalys och drag-tryck för provkropp GB5-C1



Figur 28. Komplex styvhetsmodul från modalanalys och drag-tryck för provkropp GB5-C2

Tabell 13. Variationskoefficienten av dynamisk styvhetsmodul samt standardavvikelsen av fasvinkeln vid $T_{ref} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ bestämd från modalanalys och drag-tryck provning

Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)	Max SD (°)	Min SD (°)
GB5-C1	0.1 to 10	7.1	5.6	0.9	0.1
	10 to 10^9	7.1	0.1	0.7	0.07
GB5-C2	0.1 to 10	8.8	3.8	1.0	0.2
	10 to 10^9	9.0	1.7	0.7	0.04

5. SUMMERING

Provning genom modalanalys på provkroppar med olika geometrier och former visar att balkar och cylindrar resulterade i mer konsekventa mätningar med mindre avvikelser mellan projektparternas FRFer. Generellt är precisionsvärdena för dessa geometrier bra över hela frekvensområdet och vid jämförbara frekvenser och temperaturer bättre än rapporterade värden i metodstandarderna för 2-punkts böjningsprovning. Mätningarna på balkarna och cylindrarna resulterade i mycket bra precision för frekvenser från 10 Hz och uppåt.

För diskarna uppstod oftare mätningar som uppvisade någon form av störning i FRFerna. Fortsatta studier krävs för att reda ut varför det var mer utmanande att genomföra upprepade mätningar på diskar vid flera laboratorier utan att störningar i enskilda mätningar uppstod. Kompaktare provkroppar (t.ex. $d=100$ mm och $h = 30$ mm) har i detta projekt visat sig resultera i större amplitudskillnader i FRFerna vilket leder till sämre precision i bestämningen av komplexa styvhetsmodulen i jämförelse mot de större balkarna och cylindrarna. Storleken på provkropparna, framförallt höjden i förhållandet till diametern, kan vara en möjlig faktor till större känslighet för variationer i amplituder. Även i detta fall krävs dock fortsatta studier för att utvärdera orsakerna till de större amplitudavvikelserna för diskar. Det bör till exempel utredas om mätningar av böjmoden bidrar till större amplitudskillnader i FRFerna än den longitudinella moden, som mättes för balkarna och cylindrarna.

Generellt visade samtliga mätningar på större skillnader i amplituder av FRFerna i jämförelse mot resonansfrekvenserna. Detta innebär att precisionen av modalanalys reduceras när bidraget från FRFernas amplituder på styvhetsmodulen ökar, det vill säga med ökande temperaturer.

Resultaten av detta projekt indikerar att diskar med dimensioner enligt $d=100$ mm och $h=30$ mm är mindre lämpliga för precisa mätningar. Dessutom rekommenderas diskar med $d=150$ mm och $h=30$ mm istället för $d=150$ mm och $h=40$ mm utifrån dessa resultat. Det är fördelaktigt med dimensioner som bidrar till ett större antal resonansfrekvenser upp till 20-25 kHz. Smalare, tunnare, längre eller slankare provkroppar bidrar till fler resonansfrekvenser.

Störningar i mätresultaten som kan orsakas av mätuppställningen identifierades i detta projekt. Upprepade mätningar belyste att förfarandet för att koppla samman utrustningen kan påverka mätningarna genom framförallt amplituden av FRFerna. Samtlig mätutrustning bör därför kopplas ihop innan systemet och mätningarna startas för att undvika brus som uppstår i systemet vid uppstart/ihopkopplande.

Medelvärden av den komplexa styvhetsmodulen som bestämts via modalanalys gav en god och likvärdig överensstämmelse med konventionell drag-tryck provning över hela frekvensområdet (0.1 till 10^9 Hz).

Avslutningsvis så framgår det att precisionen av modalanalys är bra och att metoden är särskilt lämplig för högre belastningsfrekvenser och lägre temperaturer. Provningen på balkar, cylindrar och diskar visar även att valet av provkropsgeometri kan påverka bredden på det frekvens- och temperaturområde som precisa resultat kan uppnås för. En sammanställning av samtliga provkroppars precisionsvärden som bestämdes från modalanalys presenteras i Tabell 14.

Tabell 14. Sammanställning av variationskoefficienterna av dynamisk styvhetsmodul vid $T_{ref} = 15\text{ °C}$ bestämd från modalanalys

Provkropp	Frekvensområde (Hz)	Max CV (%)	Min CV (%)
GB5-B2	0.1 - 10	15.2	3.9
	10 - 10^{11}	3.9	0.7
GB5-B4	0.1 - 10	14.6	3.3
	10 - 10^{11}	3.3	1.2
GB5-C1	0.1 to 10	11.8	2.7
	10 to 10^{11}	2.7	1.6
GB5-C2	0.1 to 10	3.3	0.3
	10 to 10^{11}	2.9	1.5
ABS-D9	10 - 100	20.5	9.7
	100 - 10^{11}	9.7	1.0
ABS-D10	10 - 100	30.0	13.5
	100 - 10^{11}	13.5	1.6
GB5-D1	10 - 100	37	14
	100 - 10^{11}	14	4.7
GB5-D3	10 - 100	14.7	8.2
	100 - 10^{11}	8.2	1.6

REFERENSER

- Bjurström, H., Gudmarsson, A., Ryden, N., Starkhammar, J. (2016). Field and laboratory stress-wave measurements of asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 508-516.
- Carret, J.-C., Pedraza, A., Di Benedetto, H., Sauzéat, C. (2018). Comparison of the 3-dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 174, pp. 529-536
- Gudmarsson, A., Ryden, N., Birgisson, B. (2012). Characterizing the low strain complex modulus of asphalt concrete specimens through optimization of frequency response functions, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 132, Issue 4, pp. 2304-2312.
- Gudmarsson, A. (2014) *Resonance Testing of Asphalt Concrete*, PhD Thesis, ISBN 978-91-87353-50-5, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm
- Gudmarsson, A. (2016). Reducerad beläggningstjocklek med alternativa bindemedel, Utveckling av alternativa beläggningsskonstruktioner – *Etapp 1b, material- och konstruktionsprovning*, SBUF Rapport 13107
- Gudmarsson, A., Jakobsson, M. (2016). Automatiserad mätning av asfaltprovkroppars resonansfrekvenser. SBUF Rapport 13226
- Gudmarsson, A. (2019). Initial styvhetsförändring i asfaltmassor. Pågående SBUF projekt 13530.
- Havriliak, S., and Negami, S. (1966). A complex plane analysis of α -dispersions in some polymer systems, *J. Polym. Sci. C*, Vol. 14, 99–117.
- Kweon, G., and Kim, Y. R. (2006). Determination of the complex modulus of asphalt concrete using the impact resonance test, *J. Transp. Res. Board* 1970, 151–160.
- Mangiafico, S., Babadopulos, L.F.A.L., Sauzéat, C., Di Benedetto, H. (2018). Nonlinearity of bituminous mixtures, *Mech Time-Depend Mater*, Vol. 22, pp. 29-49
- Olard, F., Di Benedetto, H. (2003). General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, *Road Mater. Pavement*, Vol. 4, No. 2, pp. 185-224.
- Olard, F. and Pouget, S. (2015). A new approach for aggregate grading optimization for mixtures. *Advances in Asphalt Materials*, pp. 427-457
- Ryden, N. (2004). *Surface Wave Testing of Pavements*, Doctoral Thesis, Department of Engineering Geology Lund Institute of Technology, Lund University, ISBN 91-973406-4-2.

Rydén, N. Johansson, C. (2008). Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar, Delrapport Etapp 2: Test av mätmetod på asfaltprover. SBUF Rapport 122017

TRVMB 112, Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat, TRV 2012:050, Trafikverket, Borlänge

TRVMB 114, Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat, TRV 2012:051, Trafikverket, Borlänge

Whitmoyer, S. L., and Kim, Y. R. (1994). Determining asphalt concrete properties via the impact resonant method”, J. Test. Eval. 22(2), pp. 139–148