

# AUTOMATISERAD MÄTNING AV ASFALTPROVKROPPARS RESONANSFREKVENSER



**Anders Gudmarsson & Mattias Jakobsson**

**2016-12-22**

# FÖRORD

Tack till Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Trafikverket för den huvudsakliga finansieringen av detta projekt.

Tack till samtliga medlemmar i referensgruppen:

- Lars Jansson, Peab
- Richard Nilsson, Skanska
- Bernardita Lira, NCC
- Abubeker Ahmed, VTI
- Nils Rydén, KTH/LTH
- Torbjörn Jacobson, Trafikverket
- Kenneth Lind, Trafikverket

Ett stort tack till Mattias Jakobsson på Peab Asfalt som utvecklat och tillverkat mätuppställningen för de automatiserade mätningarna.

Anders Gudmarsson

Stockholm, december 2016

# SAMMANFATTNING

Konventionella laboratoriemetoders kostsamma utrustning och tidskrävande förfarande för styvhetsbestämning av asfalt har motiverat utvecklingen av enklare och mer ekonomiska tillvägagångssätt som prediktiva ekvationer eller resonansbaserade mätmetoder. Modalanalys är en enkel och ekonomisk mätmetod baserad på resonansfrekvensmätningar, som bidrar med förbättrad precision samt en länk till styvhetsmätningar i fält för oförstörande kvalitetskontroller av beläggningar.

Detta projekt syftar till att automatisera resonansfrekvensmätningarna av asfaltprovkroppar för att ytterligare reducera potentiella operatör- och temperaturrelaterade störningar i provningen. En mätuppställning där flera provkroppar kan mätas vid samma temperatur i ett stängt klimatskåp har utvecklats. Systemet består av en motor för att applicera hammarslag på provkropparna samt en motor för att mata fram en ny provkropp efter respektive mätning. En mjukvaruapplikation som kan användas till att styra motorerna samt samla in data har utvecklats och paketerats till ett användarvänligt format.

De automatiserade mätningarna av frekvensresponsfunktioner bidrar till en mycket god repeterbarhet och reproducerbarhet. Dessutom krävs endast en marginell extra utrustningskostnad för att möjliggöra den automatiserade exciteringen av asfaltprovkropparna. Det automatiserade systemet och mjukvaruapplikation bidrar till en enkel mätuppställning som med stor potential kan förenkla styvhetsbestämningen av asfalt. Systemet möjliggör även mätningar av flera provkroppar i samma mätuppställning vilket inte är möjligt med konventionella styvhetsmätningar.

# INNEHÅLL

<b>INLEDNING</b> .....	<b>4</b>
<b>SYFTE</b> .....	<b>4</b>
<b>METODIK</b> .....	<b>5</b>
SYSTEM FÖR AUTOMATISERAD EXCITERING.....	6
KOPPLING OCH PROGRAMMERING AV MOTORER .....	9
<b>RESULTAT</b> .....	<b>10</b>
PROGRAM FÖR AUTOMATISERAD MÄTNING.....	10
<b>SLUTSATS</b> .....	<b>13</b>
<b>LITTERATURFÖRTECKNING</b> .....	<b>14</b>

## INLEDNING

Den dynamiska styvhetsmodulen används vid tjockleksdimensionering av vägar och är en nyckelparameter för att prediktera asfaltbelägningars bärförmåga. Genom att mäta styvheten vid olika temperaturer och belastningshastigheter kan asfaltbelägningars starka tid- och temperaturberoende bestämmas. Standardiserade laboratoriemetoder för att mäta styvhet av asfalt är ofta mycket kostsamma, komplicerade att utföra och har en relativt dålig repeterbarhet (Daniel et al. 2004).

En ny enkel, ekonomisk och noggrann metod för att mäta styvhetsmodulen av asfaltprovkroppar har utvecklats i ett industridoktorandprojekt (KTH och Peab) finansierat av SBUF (projekt 12803) och Trafikverket. Metoden (modalanalys) går ut på att bestämma styvhetsmodulen av asfaltprovkroppar från uppmätta resonansfrekvenser som exciteras genom att manuellt applicera ett lätt hammarslag på provkroppen (Gudmarsson 2014). Metodiken har visat på en god överensstämmelse mot traditionella styvhetsmodulmätningar som baseras på cykliska belastningar (Gudmarsson et al. 2015). En viktig skillnad är dock att modalanalys är helt oförstörande tack vare att varken själva testet eller mätupställningen påverkar provkroppen. Detta är annars ofta ett problem vid konventionella laboratoriemetoder för att mäta styvhet och provkropparna måste i regel kasseras efter utfört test.

Eftersom asfaltens styvhet är starkt beroende av temperaturen, så konditioneras provkropparna i ett temperaturskåp vid ett flertal olika temperaturer i samband med resonansfrekvensmätningarna. För att manuellt applicera hammarslaget krävs det att skåpsluckan öppnas under mätningens genomförande (ca 10-20 s). Detta kan påverka provkroppens temperatur och är därför en onödig osäkerhetskälla som kan elimineras genom att istället excitera provkroppen med hjälp av ett automatiserat system för att applicera hammarslaget. Ett automatiserat system skulle innebära att skåpsluckan inte behöver öppnas under testet. Övriga fördelar med ett automatiserat system är att mätningen av resonansfrekvenser blir oberoende av operatör och att hammarslagen upprepas på samma punkt på provkroppen vid varje mätning och temperatur, vilket sammantaget är mycket fördelaktigt för en god repeterbarhet och reproducerbarhet.

En annan viktig fördel med resonansfrekvensmätningar i jämförelse mot konventionella testmetoder är kopplingen till oförstörande seismiska fältmätningar för att bestämma styvhet. Denna koppling är möjlig tack vare att laboratoriemetoden kan utföras på provkroppar med godtyckliga dimensioner samt vid samma frekvenser och töjningsnivå som fältmätningar genom ytvågsseismik (Rydén 2004). Nya resultat från en teststräcka på Riksväg 40 öster om Ulricehamn har visat en mycket god överensstämmelse mellan laboratorie- och fältmätningar av olika belägningars styvhet (Bjurström et al. 2016, Gudmarsson 2016). Detta är en aspekt som visar på vikten av att dessa typer av metoder kan nyttjas av flera olika aktörer inom vägbyggnadsbranschen. Ett automatiserat system kan förenkla implementeringen av metoden inom branschen.

## SYFTE

Syftet med detta projekt är att underlätta den praktiska tillämpningen av en nyutvecklade resonansfrekvensbaserad mätmetod för bestämning av styvhet. Ett automatiserat system för att utföra mätningar minimerar variationer i provningen som kan uppstå på grund av den mänskliga faktorn och på grund av eventuella temperaturvariationer. Förhoppningen är personal med liten

erfarenhet av dessa typer av mätningar ska kunna utföra en noggrann mätning utan betydande träning. Projektet syftar även till att upprätta en metodbeskrivning för mätningar av frekvensresponsfunktioner. Frekvensresponsfunktioner utgör basen för att kunna bestämma styvheten av asfaltprovkroppar genom denna metodik.

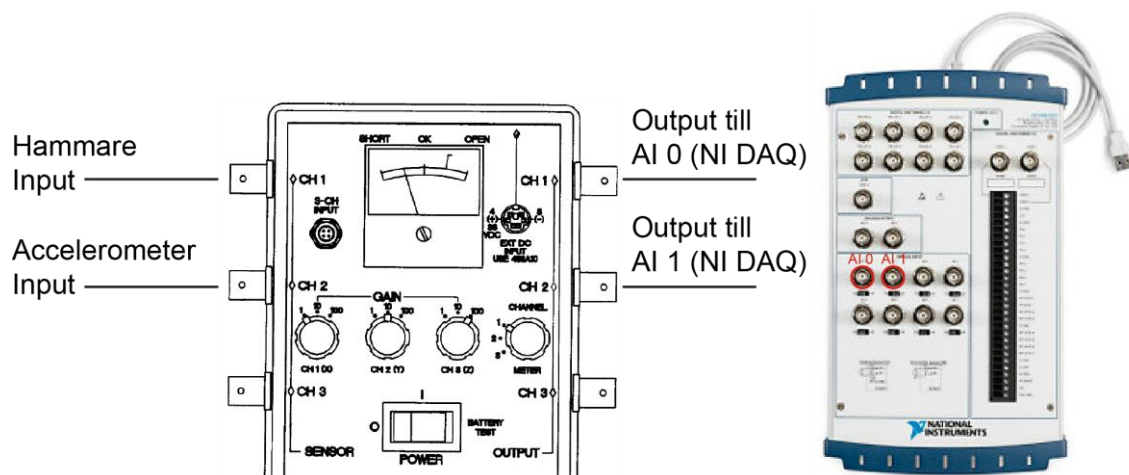
## METODIK

I denna applikation av modalanalys används en hammare för att knacka lätt på en provkropp. Kraften från hammarslagen som applicerats på provkroppen mäts över en definierad inspelningstid. Hammarslagen genererar vibrationer och resonanser i provkroppen som mäts via en accelerometer som fästs direkt på provkroppen. Frekvensresponsfunktioner bestäms utifrån uppmätt kraft (N) och acceleration ( $m/s^2$ ). Denna provning utförs på en provkropp med fria randvillkor i en kontrollerad och känd temperatur. Mätningarna kan utföras på provkroppar med godtyckliga geometrier och dimensioner. Det finns dock former och geometrier (balkar, diskar etc.) som är lämpligare genom att flera resonansfrekvenser uppstår i ett frekvensområde lägre än 20 kHz.

Metodiken för att excitera en provkropp och spela in applicerad kraft och respons nyttjar samma utrustning för signalbehandling oavsett exciteringsmetod. Följande utrustning har använts för insamling av data (både vid manuell och automatiserad excitering):

- Hammare - PCB model 086E80
- Accelerometer - PCB model 35B10
- Signalkonditionering/förstärkare - PCB model 480B21
- Datainsamling (DAQ) - NI USB-6251 M Series

Figur 1 visar kopplingsschemat där hammaren och accelerometern kopplas till signalkonditioneringen/förstärkarens kanal 1 respektive kanal 2. Förstärkaren ansluts till NI DAQ:ens analoga ingångar (AI 0 samt AI 1). Valfria analoga ingångar kan användas. DAQ:en kopplas till en dator med en USB-kabel. För att datorn skall kunna ta emot DAQ:ens digitala signaler krävs det att dess drivrutiner är installerade och anslutningen mellan datorn och DAQ:en inte begränsas av en eventuell brandvägg eller administratörsrättigheter.



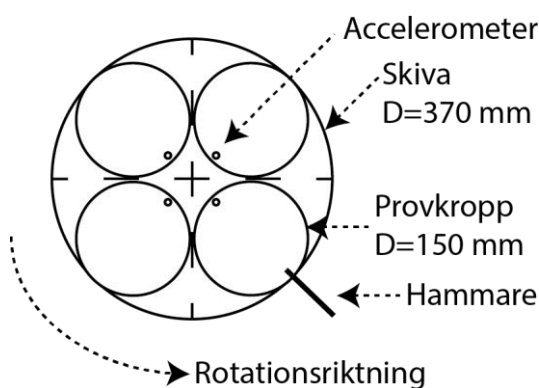
Figur 1. Koppling av hammare och accelerometer till DAQ:en (NI USB-6251 M series) via signalkonditionering (PCB model 420B21)

Genomförandet av detta projekt med syfte att automatisera mätningarna har bestått av två huvudsakliga moment:

- Utveckling och tillverkning av en mätuppställning för att möjliggöra en automatiserad excitering av flera provkroppar.
- Programmering av mätuppställningens ingående stegmotorer samt utveckling av ett användarvänligt mjukvaruprogram.

### System för automatiserad excitering

Principen för den utvecklade automatiserade mätuppställningen bygger på att en hammare exciterar flera provkroppar (en åt gången) med hjälp av en roterande skiva. Hammaren har monterats vid sidan om den roterande skivan som matar fram en ny provkropp efter varje genomförd mätning. Hammarens slag och skivans rotering styrs med hjälp av varsin stegmotor. Figur 2 illustrerar principen för mätuppställningen med fyra provkroppar placerade på en skiva samt en hammare som exciterar respektive provkropp vid en bestämd position.

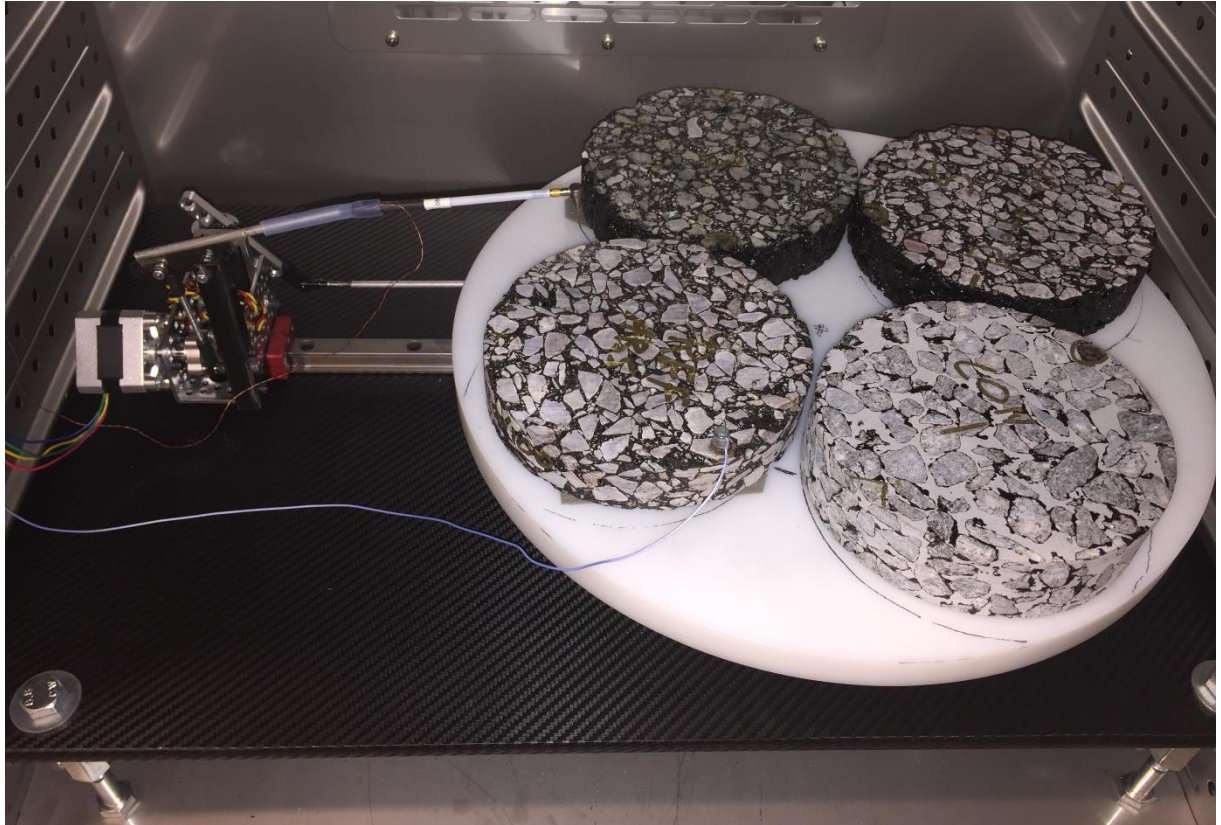


**Figur 2. Illustration av mätuppställning för automatiserad excitering av asfaltprovkroppar**

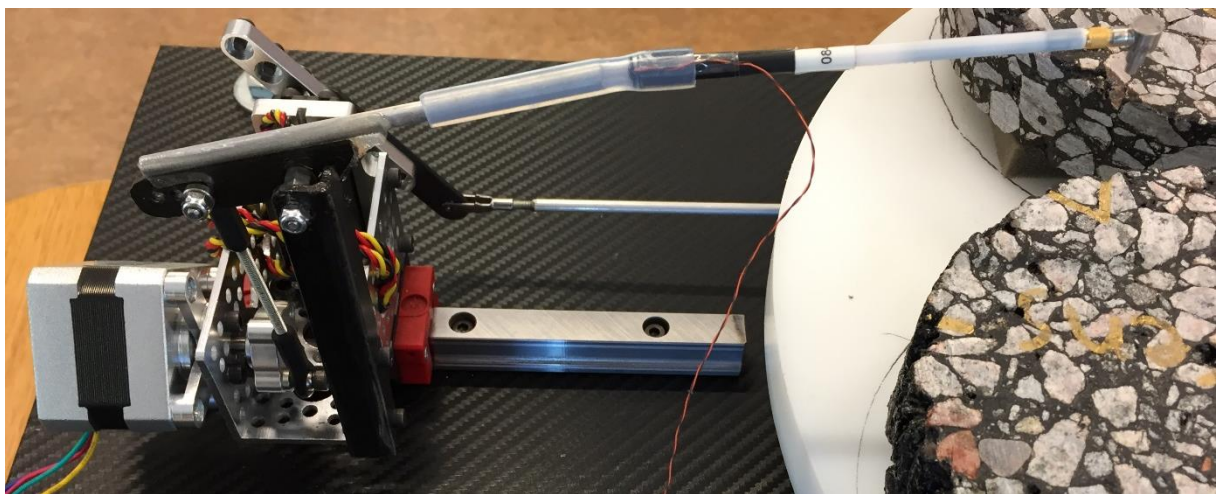
Följande komponenter används för att utföra de automatiserade momenten i mätuppställningen:

- Stegmotor (Mercury Motor SM-42BYG011-25)
- Stegmotor (Wantai 42BYGHW811)
- Transistorer för drivning av stegmotorerna (2 st. Texas Instruments L293DNE)
- Snäckväxel
- Kopplingsplatta

En rektangulär skiva som måttanpassats efter ett temperaturskåps innermått utgör basen för mätuppställningen. På denna skiva har motorerna och den cirkulära roterbara skivan monterats. Figur 3 visar uppbyggnaden av mätuppställningen med den roterande skivan och stegmotorn som styr hammarslagen monterade på ovansidan. Notera att skum är placerat mellan provkropparna och skivan för att bidra till fria randvillkor. I Figur 4 visas en detalj av hammarens infästning i ett silikonrör som i sin tur har fästs på en arm kopplad till stegmotorn. Silikonröret gör att hammaren får en mjukare (fjädrande) svängningsrörelse vilket är viktigt för att åstadkomma en precis impuls till provkroppen. Genom att använda en relativt lång arm krävs också enbart en liten motorrörelse för att erhålla en lämplig hammarrörelse.



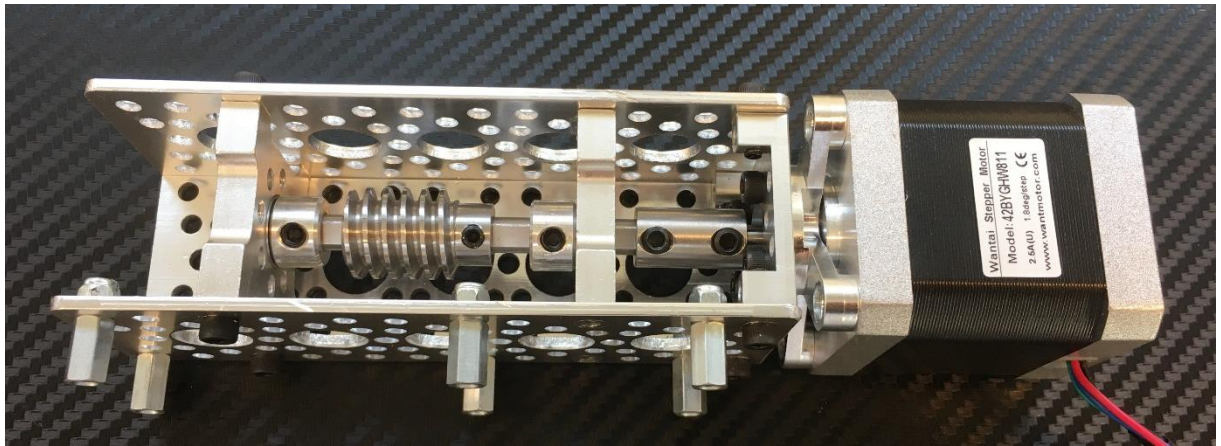
**Figur 3. Utrustning för automatiserad excitering av flera asfaltprovkroppar**



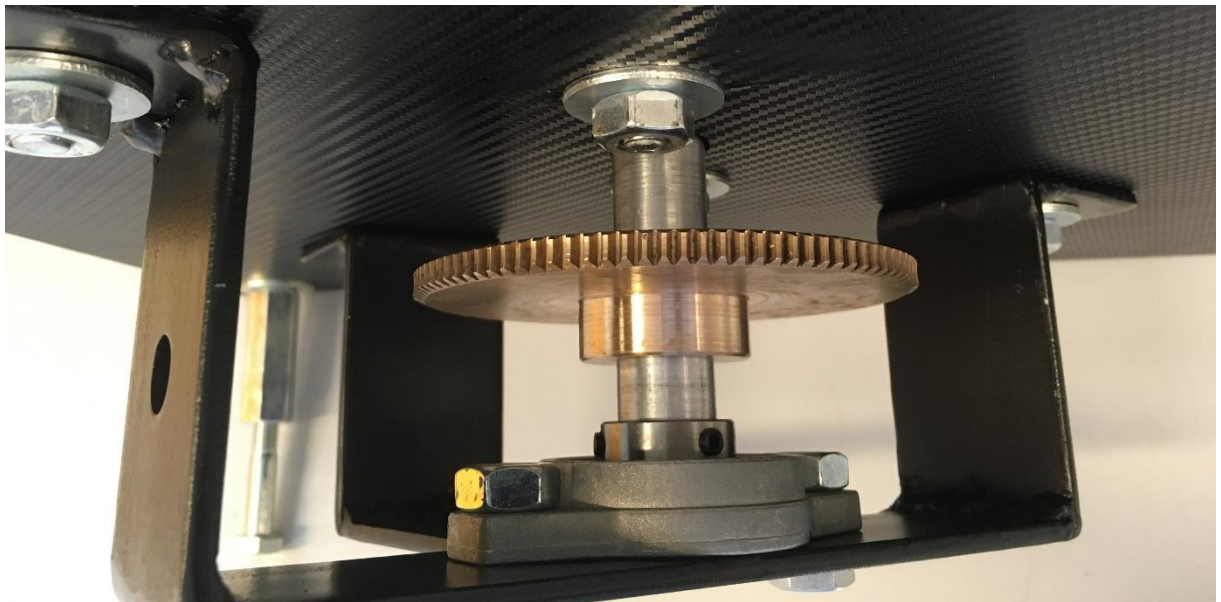
**Figur 4. Hammarens infästning och montering till stegmotorn**

En snäckväxel som används tillsammans med stegmotorn för att rotera den cirkulära skivan är monterad på undersidan av den rektangulära skivan. Figur 5 visar snäckskruvens infästning med stegmotorn och Figur 6 visar snäckhjulet monterat under skivan. Figur 7 visar en detalj av både snäckskruven och snäckhjulet.

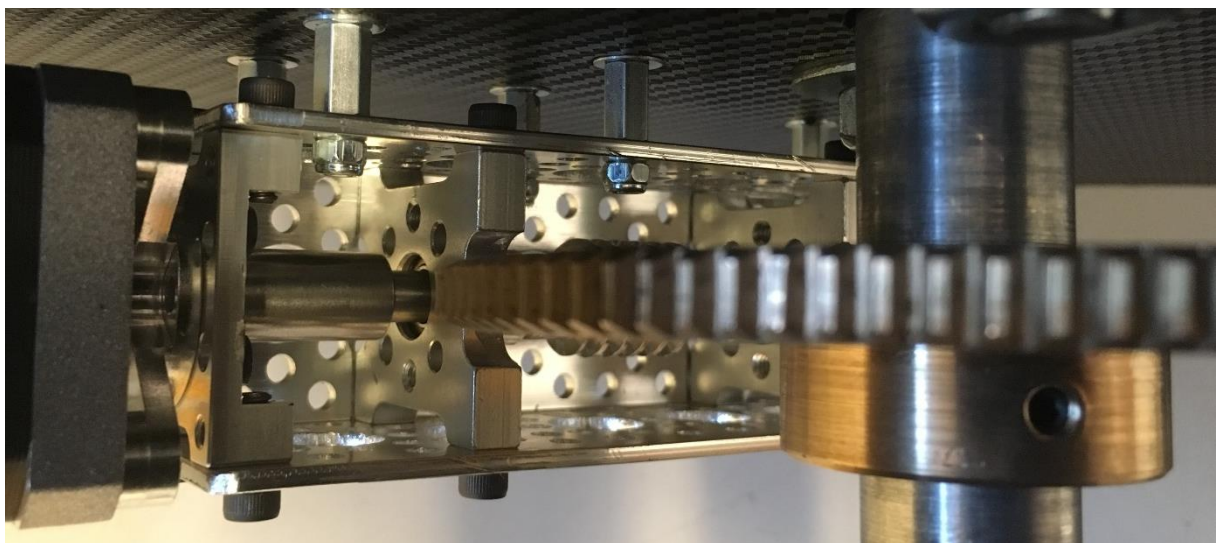




**Figur 5. Stegmotor (Wantai) som driver en snäckskruv för rotering av skiva (monterad på undersidan av skivan)**



**Figur 6. Undersidan av skivan med snäckhjulets montering**

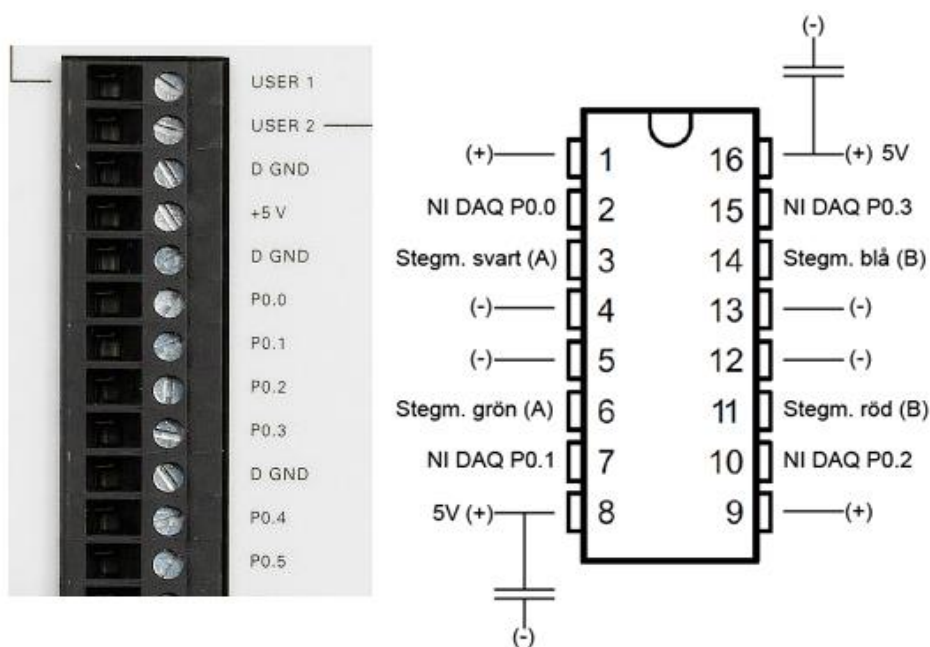


**Figur 7. Undersidan av skivan med snäckhjulet som drivs av snäckskraven**

Tack vare användandet av en stegmotor och en snäckväxel roterar skivan ett kvarts varv med mycket god noggrannhet. Detta är viktigt då provningen repeteras vid flera olika temperaturer och där hammarslaget bör appliceras vid samma punkt för respektive provkropp vid varje temperatur.

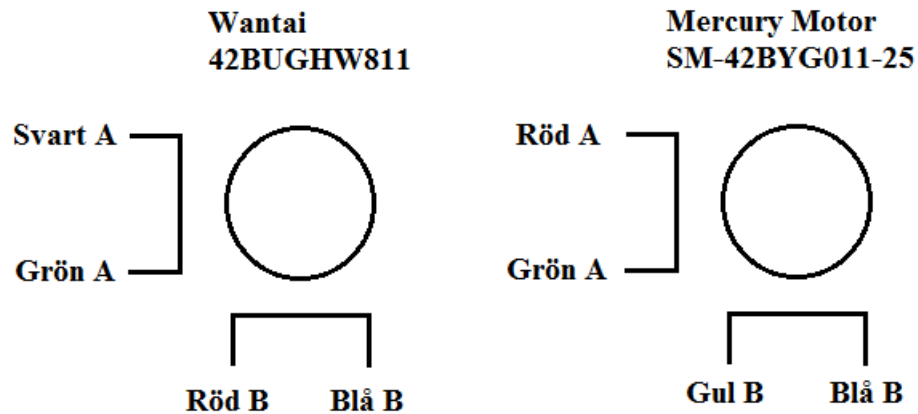
## Koppling och programmering av motorer

För att styra och driva motorerna används DAQ:en, som förutom att samla in data även kan användas till att skicka signaler till externa enheter som exempelvis en motor. DAQ:en är i detta system därför en nyckelkomponent för att kunna utföra de automatiserade mätningarna. Stegmotorn som styr roteringen av skivan är kopplad till NI DAQ:ens digitala utgångar (P0.0 till P0.3) via en transistor. Figur 6 visar stegmotorns och DAQ:ens koppling till transistorn där även kondensatorer är kopplade till strömförsörjningen (5V) vid läge 8 och 16 för en stabilare drivning av stegmotorn. En kopplingsplatta (breadboard) har använts för att underlätta kopplingen till transistorn.



**Figur 6. Koppling av Wantai stegmotor till NI DAQ:en via en transistor**

Motsvarande kopplingsschema har utförts för stegmotorn som styr hammarslagen. Denna stegmotor har kopplats till DAQ:ens digitala utgångar P0.4 till P0.7. Stegmotorn för hammarslagen drivs av 12 V (läge 8) istället för 5V som i fallet för stegmotorn som används till att rotera skivan. Skillnaderna i spänning beror endast på motorernas skilda specifikationer. De båda stegmotorernas kopplingsdiagram visas i Figur 7.



Figur 7. Kopplingsdiagram av stegmotorerna

Styrningen av stegmotorerna, liksom all övrig nödvändig programmering för att utföra mätningarna, har programmerats i MATLAB. Programmeringen av stegmotorerna har utförts genom att följa exemplet "Control Stepper Motor using Digital Outputs" från MathWorks support sida (MathWorks 2016). Med hjälp av nyttjandet av MATLAB har en applikation utvecklats som kan utföra samtliga moment som ingår i mätningarna. Dessa är:

- Repeterande automatiserad excitering av provkropp med en hammare
- Inspelning av tillförd kraft från hammaren
- Inspelning av acceleration i provkroppen genererad från hammarslaget
- Roterig av skiva för att möjliggöra mätning av ytterligare provkroppar
- Transformerig av inspelad kraft och acceleration från tid- till frekvensdomän
- Beräkning av frekvensresponsfunktioner (FRFer)
- Val av data från en medelvärdesbildad FRF för vidare utvärdering av provkroppens styvhet

Mjukvaruapplikationen som kan nyttjas för att utföra de automatiserade mätningarna har paketerats via MATLAB Compiler. Detta innebär att applikationen kan installeras och användas på valfri dator utan behov av ytterligare mjukvara.

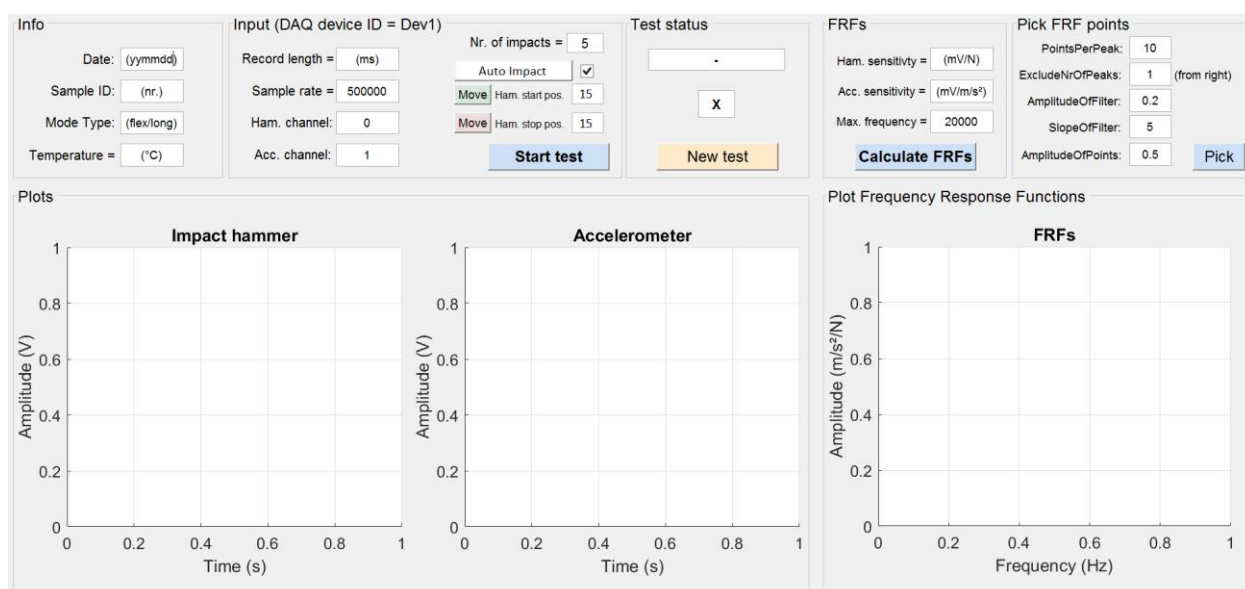
## RESULTAT

Mjukvaruprogrammet/appen som utvecklats för att genomföra mätningarna kan användas både vid manuella mätningar och vid nyttjande av det ovan beskrivna automatiserade systemet.

### Program för automatiserad mätning

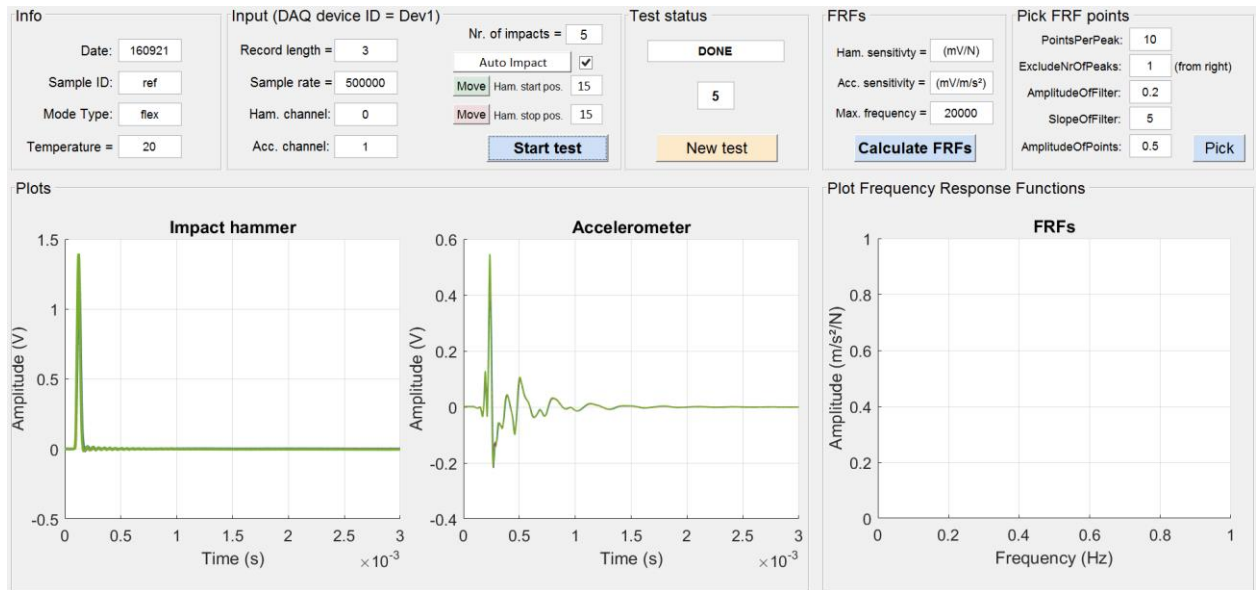
Figur 8 visar appen som utvecklats för att kunna utföra mätningar av asfaltprovkroppars frekvensresponsfunktioner. Samma indata krävs oavsett om mätningarna utförs manuellt eller med ett automatiserat system. Information om datum, provkroppens ID, typ av svängningsmod (mode type) och temperatur används för att spara rådata från mätningarna i en fil som kan processas vidare i eller utanför appen. Inspelningstiden (record length) är helt beroende av provkroppens dämpningsegenskaper och skall därför justeras för respektive temperatur så att kroppens fullständiga vibrationer spelas in. Samplingshastigheten (sample rate) och kanalerna som hammaren och accelerometern är kopplade till beror på datainsamlingssystemets (DAQ:ens)

egenskaper. Antal hammarslag (nr. of impacts) styr hur många repeterande mätningar som skall ligga till grund för beräkningen av en medelvärdesbildad frekvensresponsfunktion. Via knappen ”Auto Impact” bestäms det om mätningarna skall utföras manuellt eller med det automatiserade systemet. Genom att trycka på denna knapp möjliggörs nyttjandet av stegmotorerna. En ruta till höger om knappen indikerar att mätningarna utförs via det automatiserade systemet. Hammaren som styrs av en av stegmotorerna kan därefter styras till lämpliga start- och slutpositioner genom ”Move” knapparna. Genom ”Start test” utförs de automatiserade hammarslagen som efterföljs av att skivan som provkropparna är placerade på roterat ett kvarts varv. Sekvensen av hammarslagen och ett kvarts varv rotation repeteras genom att trycka på ”Start test” knappen. Genom att inte trycka på ”Auto Impact” eller genom att bocka av rutan till höger om denna knapp så kan mätningarna utföras genom att applicera hammarslagen manuellt efter ”Start test”. I detta läge sker heller ingen rotation av skivan. Komponenterna som listats för att möjliggöra automatiserade mätningar är inte nödvändiga att ansluta för att appen skall kunna användas till att utföra manuella mätningar.



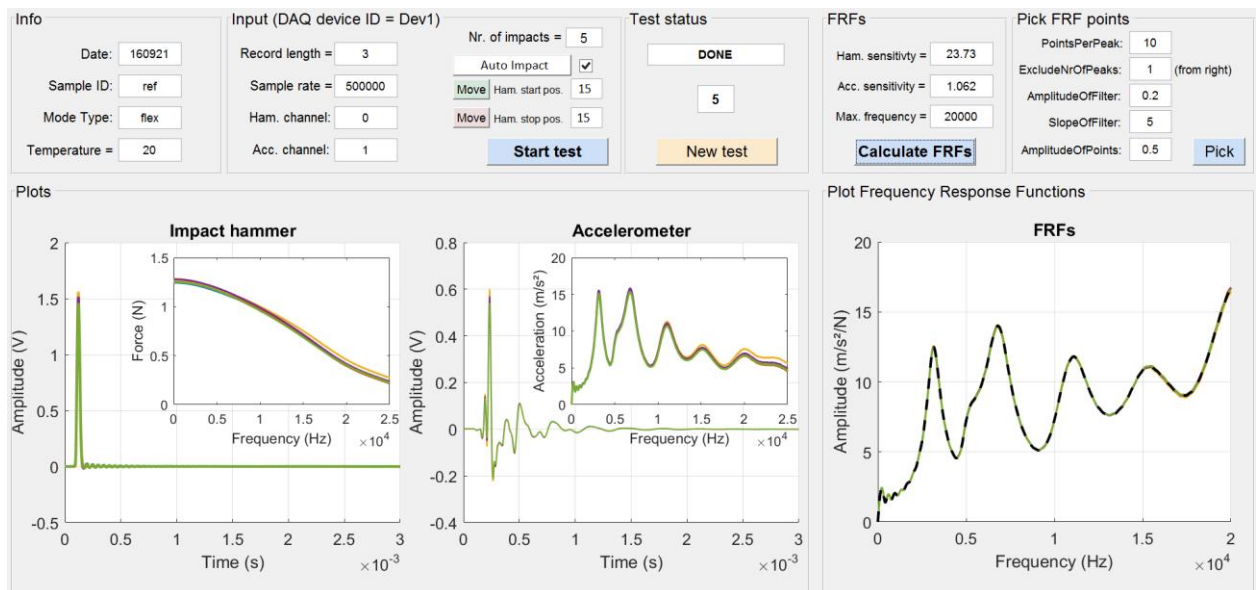
**Figur 8. App för mätning av frekvensresponsfunktioner genom manuell eller automatiserad excitering**

Figur 9 visar lastpulsens och acceleration i provkroppen från fem stycken hammarslag. Inspelningstiden valdes till 3 ms vid 20°C för att spela in provkroppens vibrationer över ett lämpligt tidsintervall. En för lång inspelningstid kan leda till onödigt brus i mätningarna och en för kort tid avbryter inspelningen medan provkroppen fortfarande vibrerar.



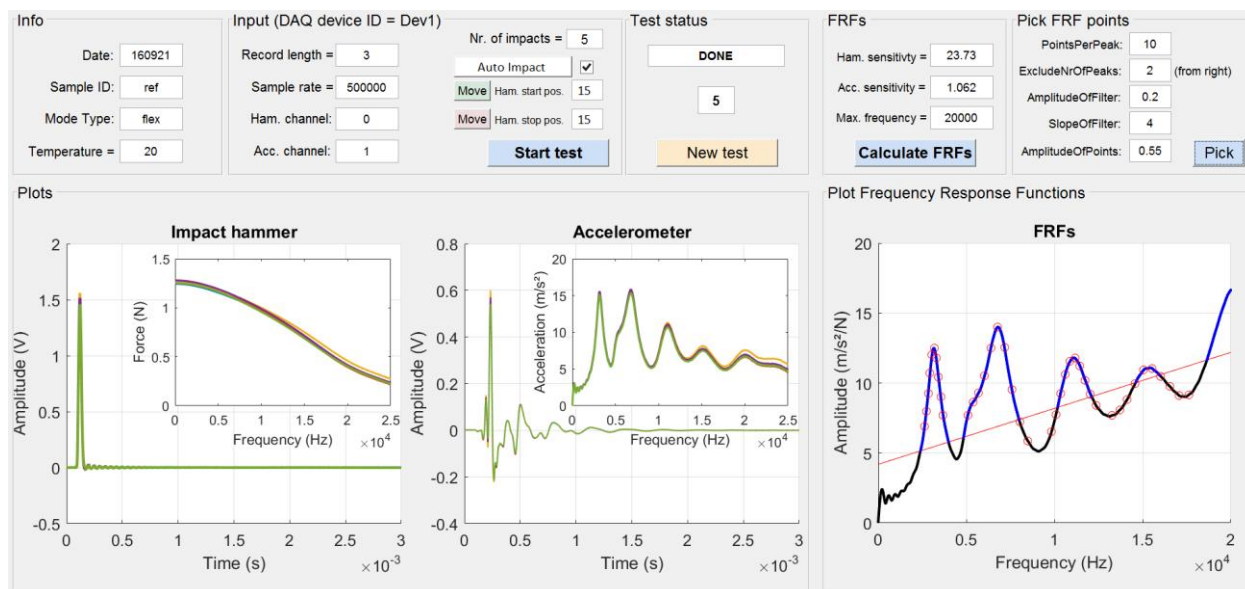
**Figur 9. Inspelad kraft (V) och acceleration (V) under 3 millisekunder vid 20 °C**

Figur 10 visar kraften (N) och accelerationen ( $\text{m/s}^2$ ) i frekvensdomän samt beräknad frekvensresponsfunktion. Transformerings från tid till frekvensdomän samt beräkning och plottning av frekvensresponsfunktionerna utförs genom "Calculate FRFs". Denna beräkning kräver information om hammarens ( $\text{mV/N}$ ) och accelerometers ( $\text{mV/m/s}^2$ ) känslighet. Den svartstreckade linjen är en medelvärdesbildad frekvensresponsfunktion från fem upprepade mätningar. I samtliga plottar i Figur 10 framgår det att de automatiserade hammarslagen bidrar till en mycket god repeterbarhet. Kraften i frekvensdomän visar att de fem slagen har mycket liknande frekvensinnehåll vilket även ger en konsekvent respons som visas genom accelerationen i frekvensdomän. Detta ger i stort sett fem stycken identiska frekvensresponsfunktioner som ligger bakom det svartstreckade medlet.



**Figur 10. Kraft (N) och acceleration ( $\text{m/s}^2$ ) i frekvensdomän samt beräknade frekvensresponsfunktioner**

I Figur 11 visas punkter längs frekvensresponsfunktionen. Dessa punkter utgår från respektive pik (resonansfrekvens) där operatören kan styra antalet och distributionen av punkterna. Genom ”Pick” väljs och plottas punkterna samtidigt som de sparas till en textfil (.txt) som kan användas till att utvärdera den komplexa styvhetsmodulen genom optimering av finita element beräknade frekvensresponsfunktioner (Gudmarsson et al. 2015).



**Figur 11. Valda punkter från frekvensresponsfunktionen för utvärdering av asfaltprovkroppens styvhet**

## SLUTSATS

Automatiserade mätningar av frekvensresponsfunktioner bidrar till en mycket god repeterbarhet och reproducerbarhet. Dessutom krävs endast en marginell extra kostnad för övrig utrustning för att utföra automatiserade mätningar på asfaltprovkroppar. Det automatiserade systemet och mjukvaruapplikation bidrar till en enkel mätuppställning som med stor potential kan förenkla styvhetsbestämningen av asfalt. Detta system möjliggör även mätningar av flera provkroppar i samma mätuppställning vilket inte är möjligt med konventionella styvhetsmätningar.

## LITTERATURFÖRTECKNING

- Bjurström, H., Gudmarsson, A., Ryden, N. and Starkhammar, J. (2016). "Field and laboratory stress-wave measurements of asphalt concrete", *Construction and Building Materials*
- Daniel, J., Chehab, G., Kim, Y. R. (2004). "Issues Affecting Measurement of the Complex Modulus of Asphalt Concrete." *J. Mater. Civ. Eng.* 16, Special Issue: Strengthening of Concrete Structures with Advanced Composite Materials-Prospects and Problems, 469–476.
- Gudmarsson, A. (2014). "Resonance Testing of Asphalt Concrete", PhD Thesis, ISBN 978-91-87353-50-5, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm
- Gudmarsson, A., Ryden, N., Di Benedetto, H., Sauzéat, C. (2015). "Complex modulus and complex Poisson's ratio from cyclic and dynamic modal testing of asphalt concrete", *Construction and Building Materials* 80, 20-31
- Gudmarsson, A. (2016). "Reducerad beläggningstjocklek med alternativa bindemedel, Utveckling av alternativa beläggningskonstruktioner – *Etapp 1b, material- och konstruktionsprovning*", SBUF projekt 13107
- MathWorks. (2016). *Data Acquisition Toolbox: User's Guide (R2016b)*. Hämtad 16-11-28 från <https://se.mathworks.com/help/daq/examples/control-stepper-motor-using-digital-outputs.html>
- Ryden, N. (2004). *Surface Wave Testing of Pavements*, PhD Thesis, ISBN 91-973406-4-2, Lund Institute of Technology, Lund