



Lyden av tre

Forfattere:

Knut Wold og Magnar Eikerol

NTNU Gjøvik's Rapportserie

ISSN: 1890-520X(Elektronisk)

ISBN: 978-82-8340-064-9 (Elektronisk)

2016

Lyden av tre

Knut Wold og Magnar Eikerol

Seksjon for elektro og maskin
Avdeling for teknologi, økonomi og ledelse
NTNU, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet
Gjøvik, Norge

7. mars 2017

Sammendrag

Tradisjonelt har gitarer ofte vært produsert med bruk av tropiske treslag. Husemoens gitarmakeri lager gitarer basert utelukkende på norske treslag, og i dette arbeidet undersøkes lydbildene for et utvalg av norske treslag. Det ble utført et eksperiment hvor lyden fra sammenstøtet mellom en kule og treklosser av ulike treslag ble tatt opp, analysert og visualisert. Eksperimentet viste at lyden varierer avhengig av både treslaget og hvordan treklossen var skåret. Det viser seg at mange av de norske treslagene i testen har egenskaper som er gunstige for bruk i lyd-kasser og dermed er egnet til bruk i gitarer.

1 Introduksjon

Husemoens gitarmakeri er et enkeltmannsforetak lokalisert i Lillehammer og ble etablert i 2003. Husemoens Gitarmakeri lager i dag både el-gitarer, akustiske gitarer og bassgitarer. Blant kundene har bedriften Sting, Mark Knopfler, Steven Van Zandt, Øystein Sunde og Jarle Bernhoft. Bedriften er den eneste med godkjent regnskogmerke på produktene sine da det ikke brukes materialer fra regnskogen, men utelukkende norske treslag. Serien bedriften lager heter Norwegian Wood [1].

Husemoens gitarmakeri ønsker å ha en systematisk visualisering av lydbildene for forskjellige norske treslag. Lydbildene oppfattes ulikt fra person til person og gjenkjenning gjøres i dag basert på erfaring. Derfor er det behov for lydopptak av forskjellige treslag og presentere et visuelt bilde av frekvensområdene. Gitarverden er veldig konservativ og det er stort behov for sammenligning av lydbildene av musikkinstrumenter som er laget av lokale materialer med de som er laget av treslag fra regnskogen.

Med bruk av alternative materialer basert på lokale ressurser kan man hindre at regnskogen ødelegges. Gjennom visualisering av lydbildene av de forskjellige treslagene sammenlignet med regnskogmaterialer kan man finne gode alternative og bærekraftige løsninger.

For skognæringen betyr dette bedre økonomiske betingelser da dette øker kundegrunnlaget. Her finnes mulighet for å etablere en høy kompetanse og større virksomhet basert på norske trematerialer.

Den største fordel ved bruk av heltre, er at dette gir bedre resonans og således bedre lyd enn en laminert gitar. I tillegg vil egenskapene til heltre forbedre seg over tid når treet tørker ut og gi enda bedre resonans. Imidlertid er heltre langt vanskeligere å jobbe med, noe som gjør disse gitarene dyrere å produsere. Limtre er relativt billig og enklere å jobbe med, og dette er dermed et fornuftig alternativ for å holde kostnadene nede. Men mens kassegitarer av heltre ofte får bedre tonal kvalitet over tid, vil laminerte gitarer etter hvert svekkes. Vanligvis gir konstruksjon av gitarer basert på heltre et bedre resultat.

I dette prosjektet har det blitt utført et eksperiment med opptak av lyd fra treklosser av et utvalg av norske treslag. Treklossene hadde lik størrelse og var tørket over lang tid. Eksperimentet ble utført ved at en trekloss ble plassert i en testjigg hvor en metallkule ble slått inn i treklossen. Lyden av sammenstøtet mellom kule og trekloss ble tatt opp og digitalisert, og deretter analysert ved hjelp av matematikkprogrammet Matlab.

Prosjektet er støttet økonomisk av VRI 3 Innlandet bioøkonomi-programmet. Meglere i VRI 3 har vært Hans Pedersveen og Iver Eugen Jensen.

Oppbygningen av rapporten er slik at kapittel 2 omhandler ulike mekaniske egenskaper for tre, kapittel 3 beskriver de valgte treslagene, kapittel 4 presenterer metode og oppsettet for det praktiske eksperimentet, kapittel 5 beskriver utførelsen av målingene, kapittel 6 presenterer resultatene og kapittel 7 er konklusjonen.

2 Mekaniske egenskaper ved tre

I [2] og [3] er det beskrevet ulike egenskaper eller parametere som beskriver oppførselen til tre. Tre kan betraktes som et materiale som har unike og uavhengige mekaniske egenskaper i tre ulike akser: L - langsgående (parallell med fibre i treet's lengde), R - radiell (vinkelrett på årringene og fiberretningen) og T - tangentiell (tangente til årringene og vinkelrett på fiberretningen).

De viktigste mekaniske egenskapene er massetetthet, ρ [kg/m^3], og elastisitet representert ved Young-modulen, E [GPa]. Begge disse egenskapene

varierer med fuktighet og temperatur. Elastisiteten vil også variere avhengig av hvilken akse (L, R eller T) man ser på. I dette arbeidet er det benyttet tall for elastisiteten for langsgående akse - L.

Ut fra massetettheten og elastisiteten kan flere akustiske egenskaper bestemmes, [3]:

- Hastigheten til lyden i tre: $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[\frac{m}{s} \right]$
- Lydutstrålingskoeffisient: $R = \frac{c}{\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \left[M \frac{kg}{m \cdot s} \right]$
Lydutstrålingskoeffisienten beskriver hvor mye vibrasjoner i et materiale dempes på grunn av lydutråling. For lydkasser brukt i gitarer og fioliner er det ønskelig med en høy verdi på R for å oppnå en kraftig lyd [3].
- Karakteristisk impedans i tre: $z = c \cdot \rho = \sqrt{E \cdot \rho} \left[\frac{m^4}{kg \cdot s} \right]$
Dette er en viktig parameter når energi fra vibrasjoner skal overføres fra et materiale til et annet. Hvis den karakteristiske impedansen mellom de to materialene er svært ulike, vil det overføres lite energi. Den totale karakteristiske impedansen til lydkassen er i tillegg til impedansen til trematerialet også avhengig av tykkelsen på materialet i lydkassen. For å overføre mest mulig energi fra vibrasjonene, er det en fordel at materialet er så tynt som mulig, men samtidig må materialet være sterkt nok slik at det ikke deformeres og ødelegges.

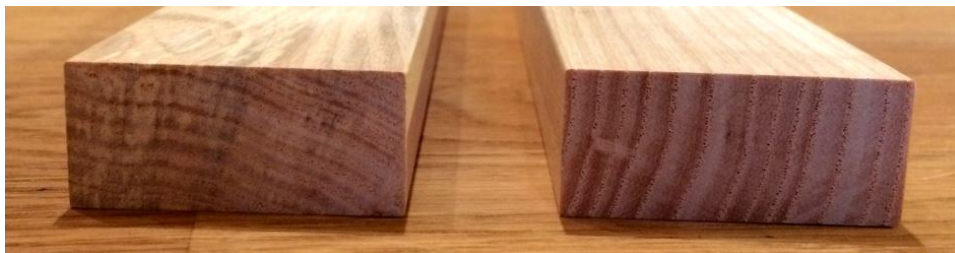
3 Valg av treslag

Hensikten med prosjektet er å finne de forskjellige lydbildene på en del norske treslag sammenlignet med treslag fra regnskogen. I dag brukes ti forskjellige treslag som produksjonsmaterialer ved Husemoens gitarmakeri. Disse er lønn, gran, hassel, osp, gråor, svartor, lind, kirsebær, bjørk, ask og alm. Det savnes i dag lydbilder av disse treslagene sammenlignet med materialer basert på de tradisjonelle treslag fra regnskogen. I tillegg ønsker man å gjøre opptak av lydbildene av følgende materialer: furu, rogn, selje, hegg, morell, bøk og eik. De fleste norske treslag er med i denne undersøkelsen og til sammen ble 15 ulike treslag undersøkt. Figur 1 viser treklossene i undersøkelsen bortsett fra rogn som er i test. For alle treslagene ble det laget treklosser av lik størrelse med lengde 350 mm, bredde 45 mm og høyde 20 mm. Dette er tilsvarende størrelse som benyttet i [4]. Samtlige treklosser har ligget til tørking på samme sted over en tidsperiode på 3-4 måneder før eksperimentet ble gjennomført. Det antas dermed at samtlige klosser hadde tilnærmet lik fuktighet og at de kunne betraktes som tørre.

Bortsett fra rogn og hegg, samt en kloss fra furu synketømmer, så ble alle



Figur 1: Treklosser brukt i eksperimentet (rogn var i test da bildet ble tatt.



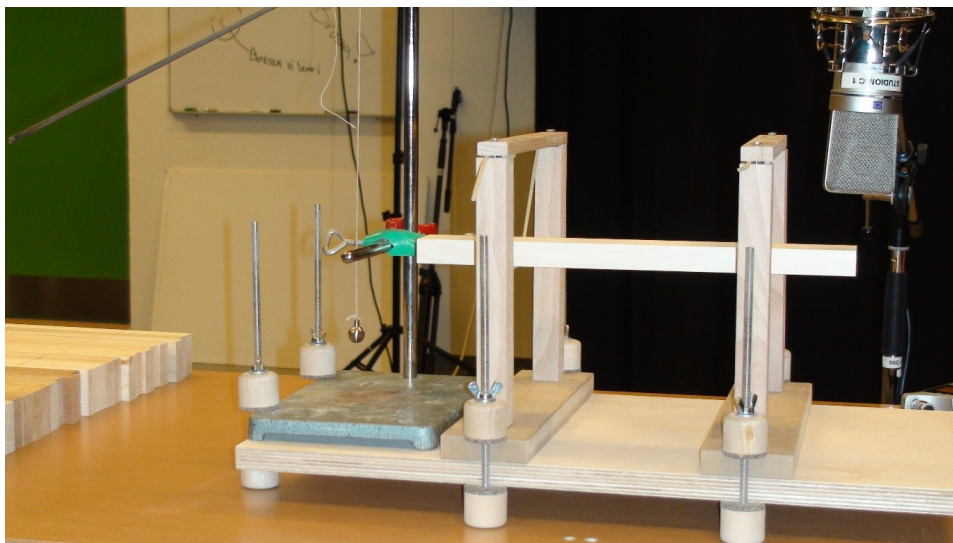
Figur 2: Flask-saget til venstre, kvart-saget til høyre.

andre treslag oppkappet som både flask-saget og kvart-saget, se Figur 2. I forbindelse med lydopptakene gjøres det oppmerksom på at når kula treffer treklossen, så kalles treffet eller retningen radiell på flask-saget trekloss (lyden forplanter seg tangentielt og longitudinelt), mens treffet eller retningen kalles tangentiell på kvart-saget trekloss (lyden forplanter seg radielt og longitudinelt).

Oversikt over de valgte treslagene sammen med de mekaniske egenskapene (massetetthet og elastisitet) er vist i tabell 1. Massetettheten er beregnet ut fra måling av vekten til treklossene, mens tallene for elastisiteten er funnet i [5].

Treslag	Latinsk navn	Retning	Massetetthet ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	Elastisitet E [GPa]
Alm	Ulmus Glabra	Radiell	664	11,0
		Tangentiell	594	
Ask	Fraxinus Excelsior	Radiell	658	13,4
		Tangentiell	717	
Bjørk	Betula Pendula	Radiell	708	14,9
		Tangentiell	755	
Bøk	Fagus Sylvatica	Radiell	668	10,0
		Tangentiell	682	
Eik	Quercus spp	Radiell	730	11,7
		Tangentiell	860	
Furu	Pinus Sylvestris	Radiell	471	12,0
		Tangentell	482	
		Radiell	390	
Gran	Picea Abies	Radiell	362	11,0
		Tangentiell	349	
Hegg	Prunus Padus	Tangentiell	630	10,0
Lind	Tilia Cordata	Radiell	525	7,4
		Tangentiell	518	
Lønn	Acer Platanoides	Radiell	637	11,3
		Tangentiell	717	
Mahogny	Khaya Ivorensis	Radiell	689	10,0
		Tangentiell	606	
Morell	Prunus Avium	Radiell	530	10,0
		Tangentiell	529	
Osp	Populus Tremula	Radiell	348	10,4
		Tangentiell	364	
Rogn	Sorbus Aucuparia	Tangentiell	576	12,4
Selje	Salix Caprea	Radiell	506	7,2
		Tangentiell	493	
Svartor	Alnus Glutinosa	Radiell	528	10,6
		Tangentiell	524	

Tabell 1: Treslag som inngår i undersøkelsen med beregnet massetetthet, ρ , og funnet tall for elastisiteten (Young-modul), E , i L-retning. Retning angir om det er flask-saget (radiell) eller kvart-saget (tangentiell) trekloss.



Figur 3: Testjigg med oppheng av trekloss, metallkule og mikrofon.

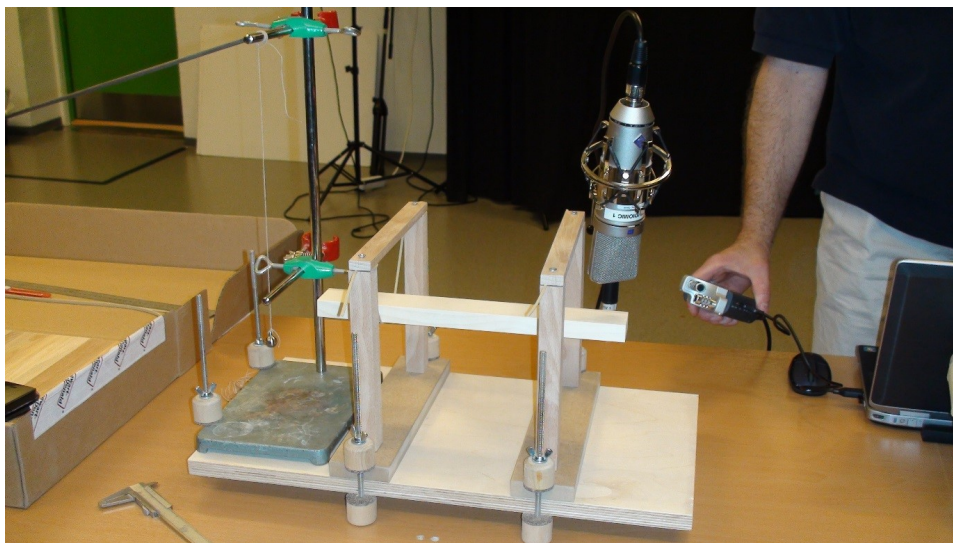
4 Metode

Det er valgt å benytte et tilsvarende testoppsett som beskrevet i [4] hvor det er gjort en sammenligning av tropiske treslag som kan bli eller er benyttet som xylofonklosser. Vårt eksperiment fokuserer på norske treslag, men det er i tillegg tatt med klosser av mahogny som en referanse.

Metoden går i sin enkelhet ut på å benytte en testjigg hvor en kule slippes og slår oppunder treklossen slik at en lyd frembringes, se Figur 3. Testjiggen har en ramme hvor det er festet to gummistrikker som treklossen skal plasseres på. Under eksperimentet ble treklossene alltid lagt på plass slik at avstanden fra hver av endene på treklossen til strikkene er $2/9$ -deler av den totale lengden på treklossen, se Figur 3.

En metallkule er hengt opp i en 30 cm lang tråd. Kulen veier 12,0 g og ble fremstilt i en CNC-fres av Protomek AS [6] på Lena. Kulen svinges ut til en forhåndsjustert stang for å sørge for at eksperimentet kan repeteres. Når kulen slippes, vil den svinge under den nederste stangen og slå oppunder klossen omtrent 1 cm inn på treklossen fra enden. En mikrofon er montert i et stativ slik at den fanger opp lyden på oversiden av klossen, se Figur 4.

Det ble benyttet en mikrofon av type Neumann U 87 AI [7]. Den ble montert i et støydempende stativ og plassert rett over trebiten i enden lengst fra der kulen treffer treklossen. For å spille inn lyden ble det benyttet en lydopptaker av type H4n Handy recorder fra Zoom [8]. Mikrofonen ble tilkoblet lydopptakeren til kanal 1, det vil si at de innebygde mikrofonene på lydopptakeren ikke ble benyttet. Videre ble lydopptakeren koblet til en PC



Figur 4: Testoppkobling med lydopptaker.

over USB (Universal Serial Bus) for overføring og lagring av lydfile.

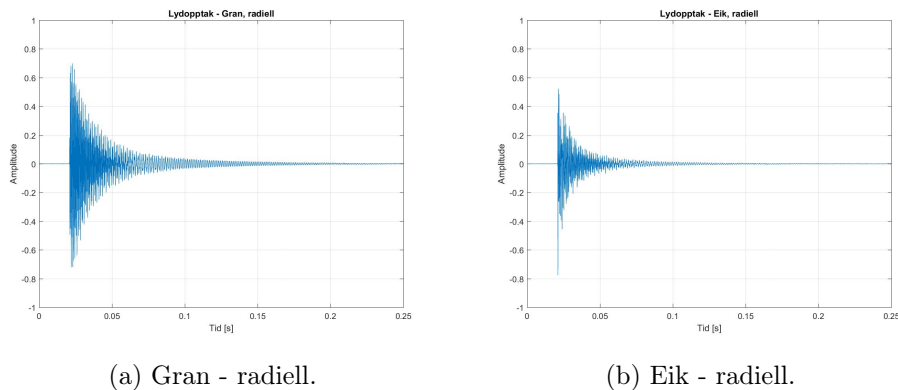
Mikrofonen er avhengig av en +48 V fantomspenning og lydopptakeren settes opp til å gi dette. Videre er det ikke lagt til ekstra filtrering eller demping av lydsignalet verken i mikrofonen eller i lydopptakeren.

Opptaksformatet på lydfile i lydopptakeren ble valgt til WAV. Dette filformatet benytter ikke komprimering og er valgt for å gi høy kvalitet på opptaket. Det analoge lydsignalet fra mikrofonen konverteres til digitale verdier i lydopptakeren med en samplingsfrekvens på 48 kHz og med en oppløsning på 24 bit. Lydopptakeren tar opp stereolyd, men fordi bare kanal 1 er tilkoblet er det kun monolyd som er tilgjengelig i opptaket.

5 Målinger

Eksperimentet ble utført i et lydstudio på campus NTNU i Gjøvik. Dette rommet var ikke ekkofritt, men en gardin ble trukket for veggene for å redusere ekko mest mulig.

De ulike treklossene ble testet en etter en. Før selve opptaket ble det utført tester for å justere lydnivået på lydopptakerens mikrofoninngang slik at det ikke skulle oppstå klipping av signalet i lydopptakeren, men samtidig sørge for at det dynamiske området blir utnyttet best mulig. Denne justeringen medfører at det ikke vil være mulig å sammenligne absoluttnivåene til amplitudene for lydsignalene.



Figur 5: Eksempler på tidsresponsen.

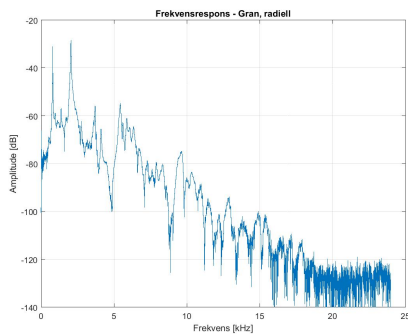
Testprosedyren var at lydopptakeren startes manuelt ved trykk på play-knappen, kule slippes og opptaket avsluttes manuelt ved trykk på stoppknappen. Det ble gjort mellom fem og ti opptak av hver enkelt trekloss. Etter opptakene ble lydfilene overført via USB-grensesnittet til en bærbar PC. Lydopptakene fra eksperimentet finnes i [9].

Ut fra alle forsøkene ble det plukket ut en lydfil for hver trekloss. Disse opptakene ble deretter klippet og nye lydfiler generert slik at opptaket kun inneholder lyden fra sammenstøtet mellom kule og trekloss og til lyden har dødd ut. Dette medfører en varighet for lydopptaket på 250 ms eller 12000 digitale amplitudeverdier. Data fra disse lydfilene ble videre analysert ved hjelp av matematikkprogrammet Matlab. I tillegg til tidsforløpet ble frekvensspektret og spektrogrammet beregnet for samtlige treklosser, se [9].

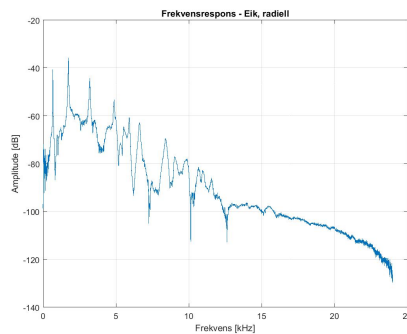
6 Resultater

Figurene 5-7 viser henholdsvis tidsresponsen, frekvensresponsen og spektrogrammet for gran og eik, begge i radiell retning. Figur 8 viser frekvensresponsen for osp i radiell og tangentiell retning.

Tidsresponsen, eller impulsresponsen, viser lyden som funksjon av tiden etter at kule treffer treklossen. Amplituden (nivået på y-akse) er avhengig av mikrofonnivået satt under eksperimentet, slik at en direkte sammenligning av amplituden mellom ulike treslag ikke vil bli helt korrekt. Frekvensresponsen viser energien lyden har ved forskjellige frekvenser. Med en samplingsfrekvens på 48 kHz vil frekvensområdet som vises i frekvensresponsen være fra 0 - 24 kHz. Spikrene i frekvensresponsen vil indikere hvor de overharmoniske frekvensene ligger og energien til disse. Plasseringen og styrken på disse frekvenskomponentene bestemmer hvordan klangen til lyden vil være.

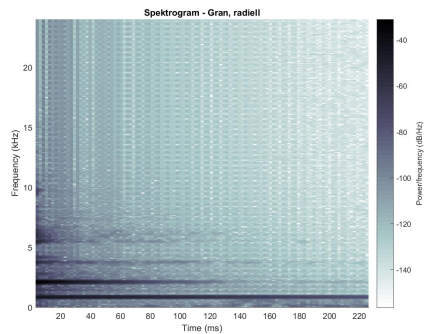


(a) Gran - radiell.

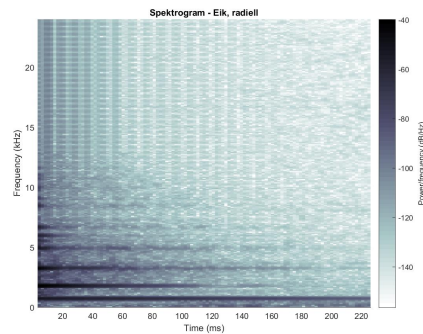


(b) Eik - radiell.

Figur 6: Eksempler på frekvensresponser.



(a) Gran - radiell.



(b) Eik - radiell.

Figur 7: Eksempler på spektrogram.

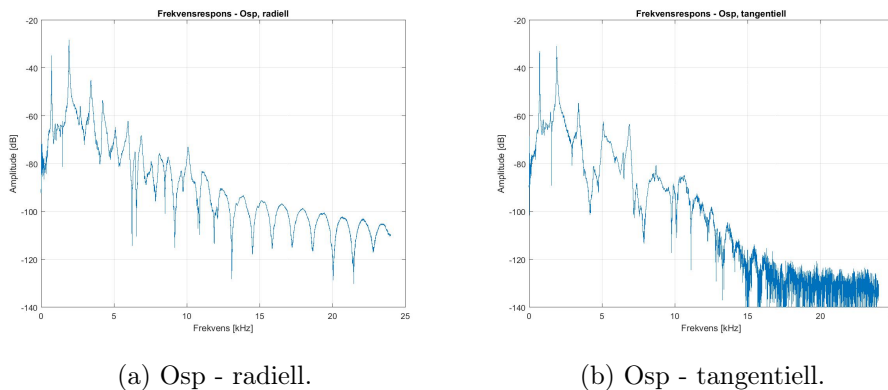
Spektrogrammet viser en kombinasjon av tid og frekvens, hvor en blant annet kan observere at høye frekvenskomponenter dempes mye raskere enn lave frekvenskomponenter.

Beregning av de akustiske parametere nevnt i kapittel 2 er vist i tabell 2 for treklossene. En ser at egenskapene er forskjellig avhengig av om treklossen er skåret i radiell eller tangentiell retning. Dette var også hørbart under eksperimentet hvor lyden fra treklosser fra samme treslag varierte avhengig av måten treklossene var saget på (kvar-saget eller flask-saget). Dette skyldes at massetettheten varierer mellom treklossene av samme treslag, men i tillegg er det rimlig å anta at også elastisiteten vil være forskjellig.

Lydutstrålingskoeffisienten har en stor variasjon og det er typisk noen treslag som skiller seg ut med høye verdier. Dette gjelder gran og osp og til dels furu. En legger merke til at prøven av furu synketømmer har en høyere verdi enn klossene av furu. Variasjonen i lydutstrålingskoeffisientene stemmer også overens med den subjektive oppfatningen av lydene under eksperimentet. For

Treslag	Retn.	Lydhast. $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ [$\frac{m}{s}$]	Kar. imp. $z = \sqrt{E \cdot \rho}$ [$M \frac{kg}{m \cdot s}$]	Lydutstrål. koeff. $R = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$ [$\frac{m^4}{kg \cdot s}$]
Alm	R	4071	2,70	6,1
	T	4302	2,56	7,2
Ask	R	4513	2,97	6,9
	T	4324	3,10	6,0
Bjørk	R	4588	3,25	6,5
	T	4444	3,35	5,9
Bøk	R	3870	2,58	5,8
	T	3830	2,61	5,6
Eik	R	4004	2,92	5,5
	T	3690	3,17	4,3
Furu (Synketømmer)	R	5047	2,38	10,7
	T	4993	2,40	10,4
	R	5552	2,16	14,3
Gran	R	5513	2,00	15,2
	T	5551	1,96	16,1
Hegg	T	3985	2,51	6,3
Lind	R	3755	1,97	7,2
	T	3782	1,96	7,3
Lønn	R	4211	2,68	6,6
	T	3971	2,85	5,5
Mahogny	R	3810	2,62	5,5
	T	4062	2,46	6,7
Morell	R	4343	2,30	8,2
	T	4350	2,30	8,2
Osp	R	5468	1,90	15,7
	T	5345	1,95	14,7
Rogn	T	4639	2,67	8,1
Selje	R	3771	1,91	7,4
	T	3820	1,88	7,7
Svartor	R	4482	2,36	8,5
	T	4497	2,36	8,6

Tabell 2: Beregnede akustiske egenskaper ved treklossene: Lydhastighet (c), karakteristisk impedans (z) og lydutstrålingskoeffisient (R).



Figur 8: Eksempel på frekvensrespons for samme treslag med ulik oppsaging.

eksempel var lyden fra eik, som har den laveste lydutstrålingskoeffisienten, tam og platt sammenlignet med gran og osp som hadde en bedre og lengre klang.

I tabell 1 ser en at massetettheten, ρ , varierer mellom ca. 350 kg/m^3 for gran og osp som de letteste til ca. $700\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ for eik og bjørk som de tyngste. Elastisiteten, E , varierer fra 7,2 GPa for selje til 14,9 GPa for bjørk. I [3] er det oppgitt hvilke verdier for massetetthet og elastisitet som er gunstige for trematerialer brukt i lydtkasser. Her er det anbefalt at massetettheten ligger i intervallet ca. $300 \text{ kg/m}^3 - 550 \text{ kg/m}^3$ og elastisiteten i intervallet 6 GPa - 20 GPa. Ved sammenligning mot de norske treslagene i denne undersøkelsen, ser en at mange av disse faller innenfor disse intervallene. Dette gjelder furu, gran, lind, morell, osp, selje og svartor. De andre treslagene har en noe for høy massetetthet, inklusive mahogny, til å være ideelle for bruk i lydtkasser.

7 Konklusjon

Husemoens gitarmakeri lager gitarer basert utelukkende på norske treslag. I den forbindelse ønsker man å lage en systematisk visualisering av lydbildene for et utvalg av norske treslag. Det ble gjennomført et eksperiment hvor tørre treklosser med samme størrelse plasseres i en testjigg hvor en metallkule blir slått kontrollert og repeterbart inn i treklossen. Lyden fra sammenstøtet mellom kule og treklossen ble tatt opp via en mikrofon, og lydopptaket ble lagret og behandlet på en PC. Lydbildene presenteres i form av tids- og frekvensrespons samt spektrogram. Ulike akustiske parametere ble også beregnet basert på massetettheten til treklossene og elastisiteten til treslagene.

Eksperimentet viste at lyden varierer avhengig av treslaget, men også om treklossen var flask-skåret eller kvart-skåret (orientering av årringene i enden

av treklossene). Egenskaper som massetetthet og elastisitet, til flere av de norske treslagene er i samsvar med anbefalt intervall for trematerialer til bruk i lydtkasser til for eksempel gitarer og fioliner. Det betyr at flere av de norske treslagene vil egne seg godt til bruk i produksjon av gitarer.

Videre arbeid vil være å undersøke ulike treslag mot vibrasjoner i strenger for å simulere gitarer. Dette vil kreve en annen og mer komplisert testjigg.

Referanser

- [1] Øystein Husemoen, “Norwegian wood series,” www.norwegianwoodseries.com.
- [2] *The Encyclopedia of Wood*. U.S. Department of Agriculture, 2007.
- [3] U. G. K. Wegst, “Wood for Sound,” *American Journal of Botany*, vol. 93, no. 10, pp. 1439–1448, 2006.
- [4] M. Aramaki, H. Baillères, L. Brancheriau, R. Kronland-Martinet, and S. Ystad, “Sound Quality Assessment of Wood for Xylophone Bars,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, no. 4, pp. 2407–2420, April 2007.
- [5] B. Kucera and R. M. Næss, *Tre - naturens vakreste råstoff*. Landbruksforlaget, Oslo, 1999, iSBN 82-529-2167-1.
- [6] Protomek AS, www.protomek.org.
- [7] “Neumann u 87 ai,” www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=u87_description.
- [8] “H4n handy recorder,” www.zoom-na.com/products/field-video-recording/field-recording/zoom-h4n-handly-recorder.
- [9] M. Eikerol, “Lydopptak av metallkule som treffer klosser av ulike treslag,” folk.ntnu.no/eikerol/Eksperiment.