



<http://www.diva-portal.org>

This is the published version of a chapter published in *Fäbodlandskap och vallmusik*.

Citation for the original published chapter:

Tiderman-Österberg, J., Stomberg, I. (2019)

Naturakustik

In: Erik Thorell & Jennie Tiderman-Österberg (ed.), *Fäbodlandskap och vallmusik* (pp. 245-271). Dalarnas museum: Dalarnas museum

N.B. When citing this work, cite the original published chapter.

Permanent link to this version:

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:oru:diva-86519>

Citering: Efternamn, förnamn (2019). "Artikelns titel". I Thorell, E. & Tiderman-Österberg, J. (red.) *Fäbodlandskap och vallmusik*. Falun: Dalarnas Fornminnes- och Hembygdsförbund & Dalarnas museum.

<https://www.hembygd.se/dalarna>

<https://dalarnasmuseum.se/>

NATURAKUSTIK

Isak Stomberg och Jennie Tiderman-Österberg

Kanske har du någon gång tänkt på att det kan bli ett eko eller en efterklang när du använder din röst ute i naturen? Kanske tycker du att tonen inte alls bär ut, utan tystnar och dämpas? Vid ett annat tillfälle, kanske på en annan plats, kan man uppleva det motsatta; tonen bär och sträcker ut sig i landskapet.

Sannolikt har du upplevt en vacker vinterdag, då det snöar stora lätta flingor i sådan utsträckning att det är svårt att se mer än några tiotal meter. I så fall har du troligen också noterat hur akustiskt död omgivningen är då. Ingen bil hörs och heller inte några människor som talar. Till och med dina egna ljud verkar försvinna och dö bort så snabbt att de nästan inte uppfattas. Låter denna beskrivning bekant har du upplevt ett tillfälle då den *akustiska absorptionen* varit exceptionellt hög jämfört med normala atmosfäriska förhållanden. Anledningen till detta är att snöflingorna påverkas av ljudet och börjar vibrera. Men dessa vibrationer bidrar inte till ljudets fortplantning, utan det absorberas av snöflingan och övergår i värme; energin i ljudet har gått förlorad till snöflingan.

Naturakustik handlar om hur ljud breder ut sig i naturens eget klangrum. I den här artikeln presenteras hur kulerskor och hornblåsare *själva* upplever ljudutbredningen och vad dessa upplevelser kan bero på. Därmed har vi här medvetet valt bort att presentera hur långt ljudet når och hur en mottagare upplever rop och hornlåtar.

Att ljudupplevelser utomhus varierar beroende på de externa omständigheterna har nog de flesta av oss upplevt. Varför fick jag ena dagen så fint eko när jag ropade efter mina kor på min fåbodvall, medan jag dagen efter inte fick ett enda svar? Varför upplever jag att ljudet blåser bort? Varför är det så ljuvligt att kula över en dimmig, stilla sjö? Varför upplever jag sådana svårigheter att nå ut en het julidag på slätterängen?

Ovanstående frågor är bland dem som vi måste besvara och förstå för att bemöta de akustiska fenomen som vi har upplevt ute i fält. Men innan vi försöker förklara dessa fenomen, det vill säga *hur* och *varför* vallmusiker upplever variationer i hur deras rop och musik bär och färdas genom naturen, behöver vi bekanta oss med grundläggande egenskaper hos ljud; vad det är och hur det fortplantar sig utomhus.

Vad är ljud?

När en partikel i luften kolliderar med en annan överförs energin hos den första partikeln helt, eller delvis, till den andra. Den partikel som nu satts i rörelse kolliderar i sin tur med en annan och ger således upphov till en kedjeverkan. Vi ser här hur energin genom kollisioner transporteras från partikel till partikel och genom deras rörelse färdas vidare genom luften. Nu föreställer vi oss att vi befinner

oss i någon naturlig miljö, till exempel vid en sjö. Om en störning av molekylernas normala rörelsemönster uppstår på grund av tryckvariationer, ger samma typ av kollisioner upphov till ett flöde av energi genom rummet. Det är så ljudet uppstår och färdas. Notera att varje enskild molekyl endast färdas en kort sträcka innan den överför sin energi till nästa. Ur detta förstår vi att ljud inte är ett flöde av partiklar, utan ett flöde av energi.

Eftersom ljudet fortplantar sig genom kollisioner mellan partiklar, beror ljudets hastighet på hur fort dessa partiklar rör sig. Hur fort de rör sig beror i sin tur på luftens temperatur; högre temperatur medför en högre ljudhastighet.

Period, våglängd, frekvens och intensitet

Vi förstår nu att ljud är tryckvariationer i luften som fortplantar sig med ljudets hastighet. Är dessa tryckvariationer periodiska i tiden, det vill säga att de når en lyssnarens öron med jämna tidsintervall, uppfattar vi ljudet som en ton. Vi kan därför tillskriva ljudet en frekvens som anger hur många tryckvariationer som når örat per sekund. Om tryckvariationerna når örat var 0,001:e sekund, kommer totalt 1000 tryckvariationer inträffa per sekund. Vi säger då att ljudet har frekvensen 1000 Hz (Hertz).

Det rumsliga avståndet mellan två identiska tryckvariationer kallas för ljudets *våglängd*. Denna får vi genom att multiplicera ljudets *period* med dess *hastighet*. Vid 15 plusgrader Celsius är ljudets hastighet under normala atmosfäriska förhållanden omkring 1224 kilometer i timmen, eller 340 meter per sekund. Ljud med en *period* på 0,001 sekunder har alltså våglängden $0,001 \text{ sekunder} \times 340 \text{ meter per sekund} = 0,34 \text{ meter}$. Sammantaget har vi ljudets hastighet = ljudets våglängd \times ljudets frekvens.

Vi behöver också ha ett mått på ljudets intensitet, det vill säga hur starkt eller svagt vi uppfattar det. Ljudets styrka anges ofta i decibel (dB), vilket är ett mått för ljudets *energi*.

Geometrisk spridning

En ljudvåg från en punktkälla i ett perfekt stilla och homogent medium, till exempel stilla luft högt över marken där egenskapen hos denna överallt är desamma och tidsinvarianta, utbreder sig *sfäriskt* tills dess att något hinder kommer i vägen. Om vi summerar den energi som på grund av att ljudet färdas ut genom en sfärisk yta centrerad vid punktkällan, kommer vi fram till att energimängden är densamma oberoende av hur stor vi gör sfären. Detta om vi bortser från förluster i energin på grund av atmosfärisk absorption.

Ljudets *intensitet* får vi genom att dividera det totala energiflödet med sfärens yta. Eftersom sfärens area ökar med dess radie i kvadrat, avtar ljudets intensitet med sfärens radie i kvadrat. Detta betyder att om vi går dubbla avståndet från en ljudkälla, avtar intensiteten till en fjärdedel av vad den var innan. Ljudets intensitet har alltså halverats två gånger, vilket ger en decibelminskning med 6 dB per fördubbling av avståndet vid sfärisk utbredning.

Tillämpar vi samma resonemang på en ljudkälla som är *linjeformad*, till exempel en blytt, blir slutsatsen att ljudet inte avtar med radien i kvadrat utan bara radien.

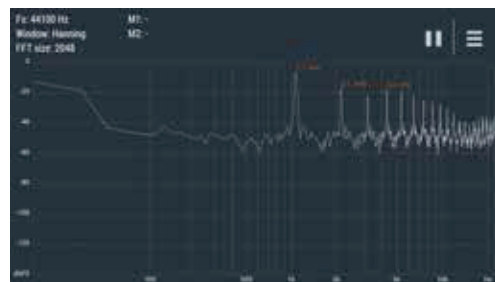
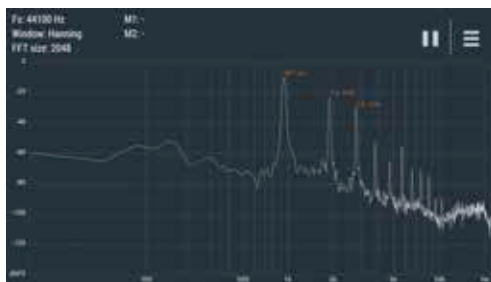
Går vi dubbla avståndet från en linjär ljudkälla har alltså intensiteten endast avtagit till hälften av det initiala, vilket ger en minskning med 3 dB. Linjekällor hörs därför på mycket längre avstånd än punktkällor.

I vårt fall behandlas upplevelsen av vallmusikers rop och läten. Vi behöver därför förstå hur ljudet sprids från kulerskans mun och naturhornets mynning. Vi börjar med att konstatera att på avstånd längre än några meter, det vill säga alla avstånd relevanta för denna studie, betraktas munnen som ljudkälla approximativt som en *punktkälla*. Således förväntas ljudutbredningen vara huvudsakligen *sfärisk*.

Människorösten som ljudalstrare

Vår röst är ljud som alstras av våra stämband. Lufttrycket underifrån, från våra lungor, gör att stämbanden vibrerar. Vibrationerna färdas genom luften och når våra trumhinnor som i sin tur också vibrerar. Detta är det vi uppfattar som ljud. En sinuston är ett ljud som består av en enda frekvens. En ton från den mänskliga strupen, eller från ett instrument, är inte en sinuston. Tönen från dessa ljudkällor är istället ett sammansatt ljud av flera frekvenser – ett *spektrum* av samtidigt ljudande sinustoner, så kallade *deltoner*. De olika deltonernas frekvenser utgör tillsammans en komplex ljudtryckskurva. Deltonerna är med och bidrar till klangfärgen. Därför kan man i en röst höra basfrekvenser, mellanfrekvenser och övertoner som tillsammans bildar en människas unika tonspektrum. För varje delton/överton dubbleras frekvensen relativt grundtonen. Komplexiteten i en människas tonspektrum, kan ge olika typer av respons i naturen. Exempel på detta påvisas längre fram i artikeln.

När vi nu har tittat på vad ljud är och hur det fortplantar sig, samt den mänskliga röstens tonspektrum, ska vi beskriva vilka faktorer som påverkar ljudutbredning utomhus. Vi har delat in dessa i tre underkategorier: Terränglandskap, ljudlandskap och den kanske mest betydelsefulla – luftlandskap.



T.v. Agneta Stolpes tonspektrum med grundton 947 Hz. Därefter övertonsserie med den första på oktaven 1,9 kHz.

T.h. Jennie Tideman-Österbergs tonspektrum med grundtonen 1,1 kHz, därefter övertonsserie med den första på oktaven 2,2 kHz. Skärmdumpar, Advanced Spectrum Analyzer PRO, Vuche Labs.

Terränglandskap

Med *terränglandskap* avses allt i naturen som inte är en del av atmosfären. Terränglandskapet påverkar den akustiska utbredningen; Markmaterial, terrängens utseende och höjdvariation, samt bark och löv är alla faktorer som har inverkan på

ljudet. Landskapet påverkar den akustiska utbredningen genom att ljudvågorna interagerar med allt som finns där. Primärt förekommer tre typer av interaktioner mellan ljudvågor och landskap; reflektion, absorption och diffraktion.

Ett eko är ett ljuds *reflektion*. Att vi upplever ekot som ett helt nytt ljud, bortkopplat från det primära ljud som vi alstrar med exempelvis våra stämband, har att göra med hur lång tid det tar för ljudet att resa till reflektionsytan och tillbaka till våra öron. Normalt krävs en ljudmässig resa på en tiondels sekund för att örat ska uppfatta det som ett separat ljud, vilket betyder att reflektionsytan befinner sig på 17-18 meters avstånd vid normal ljudhastighet. Är denna yta närmare, blir ljudets resa kortare och vi kommer att uppleva reflektionen som något som hör samman med det primära ljudet. Vi upplever då att ljudet har en efterklang, eller *reverbisering*.



Terränglandskap kan vara berg, skogar, lövkronor och vattendrag. Foto: Leif Öster.

Reflektion är alltså sättet en ljudvåg avspeglas när den vid en yta, till exempel vatten, bergvägg eller skogskant, abrupt byter riktning. En reflektion är mer eller mindre diffus. Mot en perfekt plan yta som är stor i förhållande till ljudets våglängd, inträffar icke diffus reflektion – spegling. Mot en ojämn yta inträffar diffus reflektion, det vill säga en spridning vid vilken den inkommande vågen reflekteras och sprids i olika riktningar. För ljudvågor gäller följande; om ljudets våglängd är större än den ojämna ytans grovlek, sprids vågen uniformt och speglingsartat. I de fall våglängden är jämförbar eller mindre än ytans grovlek, sprids vågen diffus.

När ljud reflekteras sker alltid viss *absorption* och *transmission* av energin. Energin i det reflekterade ljudet är därför alltid mindre än energin i det infallande

ljudet. Transmission innebär att delar av ljudet färdas genom gränsytan och vidare i det nya mediet.

Absorption inträffar när ljudvågor infaller mot en gränsyta och delar av energin absorberas av denna yta. Detta är särskilt påtagligt om mediet är mjukt och poröst. Mot en hård stenvägg eller spegelblank sjö sker nästan ingen absorption alls av ljudets energi. Infaller ljudet däremot mot mjuk mossa eller gräs vid en våtmark är absorptionen inte längre försumbar och präglar därför den akustiska responsen i landskapet. Absorptionen av ljudet är ofta frekvensberoende. Detta kan vara särskilt tydligt vid ljudutbredning i skogen. Delar av ljudets energi kan också överföras till lövverk i träd och gräs på en äng. Den övergår då i värmeenergi, vilket får ljudstyrkan att avta snabbare än om lövkronorna inte vore där. Ljudets avtagande blir då snabbare än vid "vanliga" förhållanden.

Diffraction kallas det när vågor böjs av runt föremål, till exempel runt ett träd eller vägg. Ljudets benägenhet att böjas av runt föremål och kanter beror i stor utsträckning på ljudets våglängd i förhållande till föremålets storlek. Är våglängden större än föremålets storlek böjs ljudet av så effektivt att den sammanlagda diffraktionseffekten innebär att föremålet är "osynligt" för ljudet. Är våglängden däremot jämförbar med, eller mindre än, föremålet blir vågens avböjning mindre och ljudets intensitet bakom föremålet blir reducerad.

Ljud som utbreder sig parallellt med marken kommer att både reflekteras, absorberas och undergå diffraction när det utbreder sig i luftlagren precis ovan marken. Dessutom introducerar diffraktionen och reflektionerna fasfel, vilket ger upphov till konstruktiv och destruktiv interferens. Resultatet är en komplex interaktion mellan marken och ljudet som både kan förstärka och försvaga det. Graden av dämpning på grund av marken beror huvudsakligen på markens egenskaper, ljudets frekvens, samt höjden över marken.

Vi börjar med att betrakta reflektion och absorption och konstaterar först att två extremfall förekommer. Ett där allt ljud reflekteras och ett där allt ljud absorberas. Om allt ljud absorberas blir ljudutbredningen *halvsfärisk*. Allt ljud som når marken absorberas vilket lämnar endast den övre halvan av den sfäriska utbredningen. Om däremot allt ljud reflekteras speglingsartat, upplever en lyssnare *två* ljudkällor, ljudkällan själv och dess spegelbild i marken. Detta leder till, om vi bortser från interferensfenomen, en dubblering av ljudintensiteten och således en decibelökning om 3 dB. I realiteten inträffar nästan alltid en kombination av absorption och reflektion. Utan att ta hänsyn till interferens-, reflektions-, eller refraktionseffekter, förstärks alltså ljudets intensitet med 0-3 dB på grund av marken. Finns hinder, till exempel små träd, buskar och stenar, undergår ljudet refraction, absorption och reflektion från dessa hinder. Detta kan lokalt medföra både en förstärkning eller försvagning av ljudet. På längre avstånd är dock den allmänna effekten en försvagning av ljudet på grund av ökad absorption, destruktiv interferens och ljud som reflekteras bort.

Väldigt nära marken är dämpningen mer påtaglig och där kan små hinder leda till lokal ljudskugga. I detta gränsland leder därför markskiktet till att ljudet dämpas mycket mer än vid normal utbredning. Höjden över marken hos både ljudkällan och lyssnaren är därför viktiga att betrakta när man vill förstå hur markskiktet

påverkar upplevelsen av ljudet. Ur detta förstår vi att vallmusikern bör placera sig högt över marken, exempelvis på en större sten eller stubbe, för att minimera markens inverkan på ljudets intensitet.

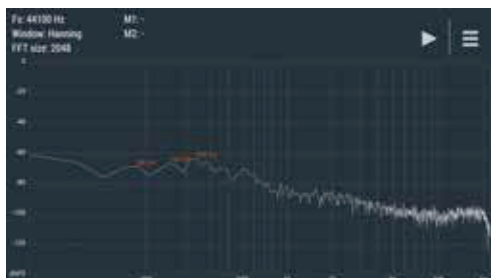
Ljudlandskap

Ljudlandskap är det samlade ljudet vid en plats som kan delas in i tre kategorier:

- Biologiskt ljud (djur, levande varelser)
- Geofysiskt ljud (naturljud, vatten, vind etc.)
- Mänskligt producerat ljud (röster, maskiner etc.)

Detta innebär alltså ekologiskt karaktäristiska ljud på en plats: akustiska karaktärsdrag på en plats som speglar naturliga processer. Alla ljud blir därför platsens egna *ljudlandskap*; Väven av ljud från djur, människa och natur som påverkar ljudutbredningen.

De flesta av oss har nog upplevt att ljudet låter starkare framför munnen hos någon som ropar än bakom. Vi kan då tala om en riktning i vilket ljudet är starkast.



Ovan: Isak Stomberg och Jennie Tideman-Österberg noterar decibel på ljudlandskapet vid Dalagård, Avesta, våren 2018. Foto: Leif Öster.

T.v. Registrering av ljudlandskap, Östra Grunnsberg, Orsa. Skärmdump Advanced Spectrum Analyzer PRO, Vuche Labs.

I allmänhet sprids ljud av högre frekvens mindre än ljud av lägre frekvens. I luften framför kulerskan kan vi därför tänka oss en linje som identifierar de punkter i vilka ljudets intensitet är störst. En sådan linje kallar vi *ljudstråle*, vilken är användbar eftersom att vi med hjälp av en sådan kan beskriva hur ljudet färdas genom atmosfären.

En *vågfront* är en yta längs vilken ljudvågorna har samma fas, till exempel den initiala tryckvåg som fortplantas från en trumma. Den riktning som pekar rakt ut från vågfronten, det vill säga den riktning varje ljudstråle färdas i, kallas för vågfrontens *normalriktning*, eller kortare för vågfrontens *normal*. När ljud från två ljudkällor blandas kan det sammantagna ljudet vara både starkare och svagare än ljudet från de individuella källorna. Ger källorna ifrån sig ljud av olika karaktär och av olika frekvens, kan vi approximativt säga att den sammanlagda intensiteten helt enkelt är summan av de två individuella ljuden. Ger ljudkällorna ifrån sig ljud av samma frekvens är situationen mer komplicerad. Beroende på om vågorna är i eller ur fas, interfererar ljuden destruktivt, konstruktivt eller något däremellan.

Exempel på en situation där interferens kan bli påtagligt är när ljudet speglas i en blank sjö. Spegelbilden av ljudkällan, alltså ekot, agerar ännu en ljudkälla. Detta kan ge upphov till interferenseffekter hos en lyssnare. Interferenseffekter är påtagliga också när kraftig turbulens råder i atmosfären. Detta får ljudstrålarna att böjas av i olika riktningar. Om dessa strålar åter sammanfaller kommer ljudvågorna, som färdats olika långa vägar, inte längre vara i fas. Därför interfererar de mer eller mindre destruktivt och därför leder till att ljudets intensitet avtar snabbare än vid normal sfärisk utbredning.

Luftlandskap

Vid hornblåsning och rop i naturen färdas ljudet långa vägar. Hur de atmosfäriska förhållandena påverkar ljudet är hörbart. Därför är det extra viktigt att vi utvecklar en förståelse för hur luftlandskapet påverkar ljudet.

Refraktion innebär ljud som inte färdas i raka linjer. Allmänt kan refraktion sägas vara förändringen av utbredningsriktningen för en vågfront, vilken orsakas av en egenskapsförändring i mediet där vågen färdas som i sin tur påverkar vågens utbredningshastighet.

Att det under normala omständigheter blåser mer på högre höjd, har de flesta upplevt. Allmänt kan man säga att vindhastigheten ökar kontinuerligt om man startar vid markytan och rör sig uppåt. Vi säger att *vindgradienten* är positiv i höjdlid, vilket betyder just att vindhastigheten ökar med höjden. Denna ökning i vindhastighet beror på viskösa krafter i atmosfären och friktionskrafter i det vinden blåser igenom, till exempel träd och mark.

Hur påverkar då refraktion på grund av vindgradients ljudutbredningen? För att förstå dess påverkan tänker vi oss först en punktmässig ljudkälla placerad på marken under vindstilla förhållanden. Om vi genererar ett snabbt plötsligt ljud sprider det sig i en halvsfär runt ljudkällan, homogent i alla riktningar och precis som vi väntar oss. Tänker vi oss exakt samma sak, men med skillnaden att det blåser med samma vindhastighet på alla höjder, fortplantar sig ljudet exakt sfäriskt med skillnaden att centrum av denna sfär färdas med vinden i samma hastighet



Luftlandskap. Foto: Leif Öster.

som den. Då utbredningen fortfarande är perfekt sfärisk kan inte närvaron av vind enbart förklara intensitetsvariationer, som exempelvis upplevelsen av att ljudet “blåser bort”.

Det som faktiskt ligger bakom upplevelsen att ljud “blåser bort” är hur vindens hastighet förändras i höjdlid. En vågfront som rör sig rakt *uppåt*, böjs av med vinden i vindens riktning eftersom det blåser mer och mer. En vågfront som rör sig *mot* vinden, böjs av från marken uppåt. En vågfront som rör sig *med* vinden kommer böjas ner mot marken. I uppvind bildas därför ett område med minskad intensitet, en så kallad *skuggzon*. Medvind skapar i motsats ett område med ökad intensitet.

Vi har nu förstått att ljudets hastighet beror på luftens temperatur. Finns det naturliga temperaturvariationer undergår därför ljudet refraktion på grund av dessa. Längs en förhållandevis platt markyta kan vi betrakta det som rimligt att temperaturen inte beror så mycket på var på marken vi står. Vi kan därför anta att den enda riktningen i vilken temperaturen förändras nämnvärt, är i höjdlid. Under normala, atmosfäriskt stabila förhållanden, sjunker temperaturen om vi mäter den i riktning uppåt. Denna temperaturminskning har uppmätts till cirka 9.8 grader Celsius per tusen meter. Vi säger att en atmosfär i vilken temperaturen minskar i höjdlid har en *negativ temperaturgradient*.

Ibland är dock förhållandena sådana att temperaturen istället ökar i höjdlid. Området i atmosfären i vilket detta sker kallas för ett *inversionslager*. Detta in-

träffar ofta under kalla och klara nätter när marken på grund av värmestrålning förlorar sin energi till rymden utanför jordens atmosfär. Denna energi går förlorad på grund av att atmosfären själv varken skickar ut eller absorberar strålning av dessa våglängder. Därför färdas värmestrålningen från marken hela vägen ut i rymden. Genom värmestrålning kommer därför marken sträva efter att nå termisk jämvikt med rymden, vars temperatur är uppmätt till omkring 270 minusgrader Celsius. Den kalla marken sänker nu temperaturen på luften närmast marken genom *konduktiv avkylning*. Då denna luft är kallare än luften direkt ovanför, har ett *inversionlager* uppstått. I detta lager säger vi att atmosfären har en *positiv temperaturgradient*.

Under normala förhållanden blir det kallare ju högre upp man kommer. Ljudets hastighet är då störst vid markytan. Tänker vi oss en vågfront som rör sig parallellt med marken rör sig de delar av vågfronten som är högre upp långsammare än de delar som är närmare marken. Effekten blir att vågfrontens *normal* böjs av uppåt, vilket skapar ett område med ljudskugga. Vid *inversion* böjs istället ljudet av nedåt. Ljudet vid marken intensifieras och utbredningen i höjddled begränsas. Inversionlager agerar därför naturliga förstärkare för ljud i utomhusmiljöer.

Vi har nu behandlat refraktion på grund av vindgradienter och temperaturgradienter separat. I verkligheten är det mycket sällan det ena utesluter det andra och



Under kalla och klara nätter förlorar marken sin energi till rymden utanför jordens atmosfär.
Foto: Leif Öster.

vi måste istället betrakta den kombinerade effekten, vilken vi får fram genom att addera de två. En uppåtriktad böjning av ljudet på grund av en negativ temperaturgradient, motverkas av en positiv vindgradient betraktat från en position i nedvind. Beroende på de gradienternas relativa styrkor blir resultatet en uppåtböjd, nedåtböjd, rak eller mer komplicerad ljudutbredning. För en position i uppvind gör effekten av ljud- och vindgradienterna att de *förstärker* varandra. Här förstärks skuggzonen ytterligare och ett område med signifikant lägre ljusintensitet uppstår. Detta skulle kunna sägas vara den minst gynnsamma situationen för att akustiskt nå en lyssnare.

Vi bortser här ifrån situationen där *negativ* vindgradient råder eftersom det sällan inträffar. Kvar har vi endast situationen då både vind- och temperaturgradienten är *positiv*. I nedvind upplever en lyssnare ett kraftigt förstärkt ljud eftersom att vind- och temperaturgradienternas nedböjning av ljudet samverkar och förstärker ljudet ytterligare. Detta skulle kunna sägas vara den mest gynnsamma situationen att akustisk nå en lyssnare. I uppvind beror en lyssnares upplevelse igen på gradienternas relativa styrkor. Är *vindgradienten* dominant kommer temperaturgradientens nedböjning av ljudet inte att vara tillräcklig för att motverka uppkomsten av en skuggzon. Är dock *temperaturgradienten* dominant kommer ljudet att färdas rakt eller böjas mot marken. I en sådan situation kommer lyssnaren inte att uppleva någon ljudskugga.

I den nedersta delen av atmosfären, upp till omkring tio meter till två kilometers höjd, är vinden och luftflödet oftast turbulent. Det betyder att luftmassorna inte rör sig kontrollerat och uniformt utan slumpmässigt. Man kan säga att luften rör sig i virvlar i tre dimensioner. Dessa virvlar kan, på grund av friktionskrafter och viskösa krafter i luften, skapas när vinden blåser genom skog eller områden med ojämn terräng.

Oavsett orsak till turbulensen, innebär den att ljudets hastighet varierar. Ibland är effekten av turbulensen en temporär och lokal förstärkning av ljudet, ibland en försvagning. På större avstånd jämnas effekterna ut. Turbulensen kommer introducera *fasfel* hos vågfronterna. Ljudfronter som färdats olika långa sträckor (eller källor med liknade frekvens) som sedan sammanfaller kommer därför interferera mer eller mindre destruktivt. Detta resulterar i en försvagning av ljudets intensitet. Vid turbulens kommer vi därför förvänta oss en snabbare avtagande ljudintensitet jämfört med förhållanden utan turbulens. Effekten av turbulens är märkbar framförallt i områden som annars skulle befinna sig i ljudskugga. Turbulensens spridning av ljudet förhindrar nämligen att sådana zoner uppstår. I varmt väder eller uppvind förstärker turbulensen ljud i områden med ljudskugga.

När ljud sprids är inte ljudets intensitetsminskning primärt ett resultat av energiförluster hos ljudet, utan endast ett resultat av att ytan, som vågfronten upptar, blir större på grund av den sfäriska utbredningen. Faktiska energiförluster inträffar ändå när ljudet färdas genom atmosfären. Under normala förhållanden är dock absorptionen mycket mindre.

Absorptionen sker genom viskösa *energiförluster* på grund av friktion när luftmolekyler kolliderar, samt genom att ljudet får luftmolekylerna att vibrera och rotera, varvid energi upptas. Mängden atmosfärisk absorption varierar kraftigt, främst

beroende på ljudets frekvens, luftens relativa fuktighet och dess temperatur. Kraftigast absorption inträffar vid torr och varm väderlek. Minsta absorption inträffar vid kallt och fuktigt väder och absorptionen är högre för högre frekvenser.



Trädkronor släpper igenom låga frekvenser och reflekterar höga. Foto: Leif Öster.

Ljudutbredning i skog

Nu när vi förstår hur ljudet, landskapet och atmosfären samverkar fokuserar vi på ljudutbredning i skog. Detta är ett mycket komplicerat samspel och beror på många faktorer. På grund av träden och vegetationen är vindprofilen i skogen annorlunda än den i ett öppet landskap. Allmänt är vindhastigheten mycket lägre på grund av motstånd i trädkronor och lägre vegetation. Upp till trädkronorna är vinden relativt konstant i höjdlid, med ett minimum vid marken. Ovanför trädkronorna ökar vinden på grund av det minskade motståndet. På grund av detta kan vi förvänta oss kraftiga refraktionseffekter i höjd med trädkronorna, vilket i medvind leder till ett förstärkt ljud och i motvind till ett försvagat ljud och ljudskugga.

I tät skog ligger stora delar av marken i skugga av trädkronorna, vilka värms upp av solen. Av detta kan vi dra slutsatsen att temperaturen upp till trädkronorna bör vara ungefär konstant, medan den snabbt ökar i höjd med trädkronorna som värmts upp av solen och som i sin tur värmer upp luften omkring dem. Vi känner detta tillstånd som ett *inversionslager*, vilket konstaterar en nedåtböjning av ljudet.

Effekten av skogen begränsar i viss mån den vertikala ljudutbredningen, vilket kan leda till förstärkta ljudnivåer jämfört med sfärisk utbredning över ett öppet fält. I allmänhet kommer dock skogens markskikt och vegetation att störa ljud-

utbredningen mer än ovan nämnda effekter gynnar den. Därför leder skogen till ökad absorption jämfört med utbredning över öppet fält. Åtminstone på avstånd större än några tiotal meter.

I skogen sprids ljudet bland annat av trädstammarna, som på grund av deras cylindriska form och utsträckning i höjddled sprider ljudet huvudsakligen i horisontella riktningar. Resultatet av trädens stammar är därför en *diffusering* av ljudbilden i horisontalplanet och en försvagning av ljudet på längre avstånd. I vissa fall har effekten av skog dock påvisats *förstärka* ljudet, vilket föreslagits vara resultatet av att ljudvågorna i någon mening fastnar som reflektioner mellan trädstammarna. Dessa effekter är märkbara huvudsakligen för våglängder jämförbara med trädstammarnas grovlek och på relativt korta avstånd från ljudkällan, mindre än 100 meter. Trädstammar med 0,2-0,5 meter grovlek påverkar därför ljud av frekvenser mellan 680-1700 Hz.

Skogens efterklang är resultatet av att ljud sprids och reflekteras så att en del av det igen når vallmusikerns öron. Som beskrivet tidigare, förväntar vi oss därför en maximal efterklang för frekvenser vars reflektion och spridning är stor och vars absorption i skogen är liten. Denna efterklang bör därför vara stor i mellanregistret och speciellt någonstans inom intervallet 680-1700 Hz.

Vertikal spridning sker främst på grund av reflektioner i trädkronorna och från marken. Reflektionerna från trädkronorna skiljer sig egenskapsmässigt från reflektionerna från trädstammarna genom att trädkronorna endast reflekterar och sprider *högre* frekvenser. Alla ljud med våglängder som är *längre* än en typisk dimension för trädkronorna passerar. Löv, barr och grenar kan sammantaget sägas ha en typisk dimension om cirka 0,1 meter. Ljud vars våglängd är 0,1 meter har en frekvens på 3400 Hz. Från detta drar vi slutsatsen att trädkronor agerar *låg-pass filter* för ljudet, det vill säga att de släpper igenom låga frekvenser men reflekterar och sprider höga. Således kommer spridning av ljudet nedåt från trädkronorna att vara främst högfrekvent. Reflektioner från marken beror mycket på markmaterialet och markens struktur. Porös eller mjuk terräng kommer att vara högabsorberande medan kompakt mark kommer att reflektera stora delar av det infallande ljudet.

Förklaring av naturakustiska fenomen

I vårt arbete med naturakustik har vi mött många vallmusiker. Vi har då upptäckt att vissa påståenden om naturens respons återkommer. Här kopplar vi samman dessa påståenden med teoriavsnittet för att på så sätt ge en möjlig förklaring.

"Det blir alltid så vackert eko när det är dimma på en sjö."

På grund av dimman, som vi antar vara av typen *strålningsdimma*, även kallad "älvdans", kan vi ur påståendet konstatera att det är nära vindstilla och relativt kallt. Vidare medför detta troligen lugn sjö med endast försumbara vågor. Dimman medför också hög luftfuktighet vilket vi vet innebär låg atmosfärisk absorption. Avsaknaden av vind och vågor tillåter ett tyst ljudlandskap utan lövbrus eller vågskvalp. För att uppleva ett eko måste vi också anta att på andra sidan sjön finns en tydlig reflektionsyta.

Ljud- och terränglandskapsmässigt har vi nu ideala omständigheter för att

uppleva ett alldeles särskilt tydligt eko. Minsta mängd buller och oväsen råder och ljudutbredningsmässigt har vi en nästan perfekt icke absorberande sjö, över vilken ljudet kan färdas ostört och därefter reflekteras mot skogskanten eller bergväggen och färdas ostört tillbaka. På grund av den nästan perfekta vattenytan reflekteras ljudet också speglingsartat utan mer än försumbara absorptions- och transmissionsförluster i vattenytan. Både ljudkällan och ekot reflekteras i sjön vilket i bästa fall ger oss dubbla ljudintensiteten. Vidare reflekteras både kulerskans primära ljud och spegelbilden av vattnet i reflektorn, vilket bidrar till ekot. Ekot själv blir också fullständigt reflekterat i sjön. Kulerskan kommer därför att uppleva ekot från fyra ljudkällor: sig själv och sin spegelbild, men också spegelbilderna av dessa två. Totalt har alltså ljudintensiteten *fyrubblats*, vilket motsvarar en intensitetsökning med 6 dB. Vi kan alltså redan nu förvänta oss ett mycket bra eko. En förklaring till varför vi under förhållanden med dimma ibland upplever ett exceptionellt eko, får vi genom att förstå luftlandskapet. Att det är vindstilla torde innebära en uniform atmosfär nära marken utan betydande vindgradienter och turbulens från vind. Utan vidare analys kan vi därmed anta en nära idealisk sfärisk ljudutbredning. Men dimman vittnar också om ett *inversionlager*, vilket har uppstått genom konduktiv avkyllning av luften. Ett skikt nära markytan har alltså uppstått inom vilket ljudet fokuserats genom refraktion. Med reducerad spridning i höjdlid är också intensitetsminskningen av ljudet mindre än vid ren sfärisk spridning.

”Det blir bättre respons efter ett sommarregn.”

Vi antar att med sommarregn avses en relativt kort, men intensiv, regnkur som inträffar en varm och solig sommardag. Att det är varmt och soligt torde, som visats



Dimma över Dammsjön, Fors, Avesta. Foto: Leif Öster.



De atmosfäriska förutsättningarna för ljudutbredning utomhus är som mest gynnsamma under hösten. Foto: Leif Öster.

i teoriavsnittet, innebära starka negativa temperaturgradienter, vilket vi vet orsakar en uppåtböjning av ljudet och att områden med ljudskugga längs marken uppstår inte speciellt långt bort från ljudkällan. Att det är varmt tolkar vi också i det svenska klimatet som att den relativa luftfuktigheten inte är speciellt hög. Vi vet nu att detta medför en förhållandevis hög atmosfärisk absorption av ljudet. Den av solen uppvärmda marken leder till *termik*, det vill säga strömmar av varm luft som på grund av låg densitet vill stiga. Vi har en turbulent atmosfär som sprider ljudet slumpartat. När vi sammantaget ser till hur de atmosfäriska förutsättningarna var *innan* regnskuren förstår vi snabbt att de är mycket ogynnsamma för den akustiska upplevelsen och att en varm sommardag därför upplevs som akustiskt död.

Varje förändring av dessa förutsättningar medför därför en förbättring av den akustiska upplevelsen, men hur kan regn påverka?

Den negativa temperaturgradienten medför lägre temperaturer på högre höjd. Regn, som faller högt från ovan har en lägre temperatur än den omgivande luften och kyler således av den. Att regnet dessutom utgörs av många små droppar med en sammantaget stor yta, medför att regnet kyler av luften mycket effektivt.

När regnet faller genom atmosfären uppstår *friktionskrafter* på grund av luftens viskositet. Kraftigt regn drar därför med sig luft när det faller och orsakar en nedåtriktad ström av kallare luft. Denna ström förstärks av regnets kylande effekt eftersom kallare luft har högre densitet, vilket naturligt medför att luften kan sjunka snabbare.

När vatten går från flytande tillstånd till att vara en gas, krävs energi. Den energi som går åt hämtas från den omgivande luften, vilket får den att kylas av. Denna

process förstärks av luftströmmen som omringar varje droppe, vilket får energiutbytet mellan luften och droppen att ske effektivare. Detta förstärker den kylande effekten ytterligare.

Men avdunstningen slutar inte när regnet fallit till marken. I själva verket avdunstar vattnet på markytan också, vilket koler både luften ovanför och marken själv. Efter regnfallet, om atmosfären är stabil, skulle ett potentiellt inversionslager kunna uppstå närmast markytan. Men även om ett inversionslager *inte* uppstår, är luften temperaturmässigt mer homogen direkt efter regnfallet på grund av den blandning av luftmassor som skett under själva regnfallet. Detta leder till en nära sfärisk utbredning utan områden med ljudskugga.

Vi förstår nu att ett kraftigt regnfall dramatiskt förändrar de atmosfäriska förhållandena. Primärt har följande skett:

- Det har gått från att vara varmt till att vara kallt.
- Det har gått från att vara låg relativ luftfuktighet till att vara hög relativ luftfuktighet.
- Turbulensen på grund av termik är eliminerad
- Atmosfärens temperatur har homogeniserats på grund av blandning av luftmassor.
- Ett potentiellt inversionlager nära markytan har uppstått.

De senare förutsättningarna är, som vi förstår från teorin, mycket gynnsamma för ljudutbredningen och den akustiska upplevelsen.

”Det blir bättre eko när man kular mot ett berg, än mot en skog.”

Det här påståendet kan vi förklara oberoende av förutsättningar i luft- och ljudlandskap. Med ett ”bättre eko” avses ett mer *distinkt* eko som låter starkare. Vi behöver anta ett utseende på reflektorn. Låt oss därför anta att både skogskanten och bergväggen är någorlunda raka och att de breder ut sig till höger och vänster om platsen från vilken vi kular eller spelar horn.

Enligt teorin genomgår ljudet reflektion, diffraktion och absorption vid interaktionen med naturen. I fallet bergvägg kommer absorptionen vara försumbar. Allt ljud reflekteras och om väggen är någorlunda slät och rak, har vi till och med en nästan speglingsartad reflektion. Detta betyder att kulerskan upplever ett väldigt distinkt eko, utan mer än en försumbar efterklang. I fallet skogskant kan vi inte längre försumma absorption och diffraktion. Mycket av ljudet fortsätter genom skogskanten eftersom det böjs runt träden vidare in i skogen. Vi vet att trädkronorna ger upphov till ett någorlunda distinkt eko för höga frekvenser och att trädstammarna ger upphov till en efterklang för de lägre. I dessa processer har redan en stor del av ljudets energi gått förlorad.

Ser vi till reflektionen inser vi att den inte är speglingsartad utan istället diffus, eftersom att trädens ojämnhet är väsentligen större än ljudets våglängd. Detta innebär att ekot upplevs komma inte bara från den punkt hos skogen som är närmast kulerskan, utan från alla punkter längs skogskanten. Detta eftersom ljudet sprids i alla riktningar, från alla delar av skogen. Det ger upphov till ett eko

som är följt av en lång efterklang, även i de högre frekvenserna. Energin i ekot är därför spritt över en längre tidsperiod än vid ett distinkt eko, vilket tillsammans med absorptions- och diffraktionssförluster ger upphov till ett mindre tydligt och väldefinierat eko än det mot en bergvägg.

”Ljudet blåser bort när det är kastvindar.”

Kastvindar innebär en turbulent atmosfär i vilken vindgradienten växlar kaotiskt och slumpartat. Vindens hastighet och riktning i luften beror därför kraftigt på både tidpunkt och position. Detta ger upphov till utpräglade refraktionseffekter som på vissa platser, vid vissa tidpunkter, fokuserar ljudet och på andra platser gör det svagare. Fasel och interferens kommer också lokalt att bidra till en förstärkning eller försvagning av ljudet. Upplevelsen av ljudet på en plats är därför tidsberoende. På stora avstånd blir den sammantagna effekten en minskning av ljudintensiteten jämfört med vanlig geometrisk utbredning.

Om vi till exempel kular på en plats där vi upplever ett tydligt eko, kan en kastvind orsaka en böjning av ljudet som är så stor att ljudet inte ens träffar reflektorn som tidigare gav oss ekot, vilket gör att svaret uteblir. Vidare kan en kastvind temporärt försätta kulerskan eller en lyssnare i ljudskugga, vilket också ger upplevelsen av att ljudet blåser bort. Utöver refraktionseffekter ger kastvindar också upphov till ett ljudlandskap med fler störande ljud; lövbrus och vågskvalp blir intensivare och turbulens i hörselgången uppstår. Även om det inte sker någon intensitetsminskning av ljudet från ett eko på grund av en kastvind, kommer den subjektiva upplevelsen av ljudstyrkan påverkas. Ekot blir i ljudlandskapet relativt svagare, vilket kan leda till att vi felaktigt bedömer den akustiska responsen som sämre.

”Det är enklare att kula på hösten när luften känns tunnare och högre.”

På hösten står solen lägre. Mer av solens energi har absorberats av atmosfären innan den når marken. Solens uppvärmning av marken är därför reducerad jämfört med en sommardag, vilket gör temperaturens avtagande i höjdled mindre. Att solen står lägre och har svårare att värma upp marken betyder också att dimma och inversionlager tar längre tid på sig att lösas upp. Vissa dagar upplöses inte dimman och inversionlaget helt utan varar hela dygnet. I allmänhet medför detta att ljudets refraktion är mindre uppåt och att skuggzoner inte är lika utpräglade som under sommaren.

Om ett inversionlager med dimma ligger kvar hela dagen elimineras i själva verket skuggzonerna helt. Ljudet fokuseras mot marken, vilket leder till en tydligt förstärkt akustisk respons. Turbulensen orsakad av stigande varm luft har också minskat, vilket minskar refraktion på grund av termisk turbulens. Vidare medför höst i allmänhet lägre utomhustemperaturer. Dimma och regn är vanligare förekommande på hösten än på sommaren. Det är därför rimligt att anta att den relativa luftfuktigheten är högre på hösten. Vi vet att lägre temperatur och högre relativ luftfuktighet ger mindre atmosfärisk absorption av ljudet. Nu förstår vi att de atmosfäriska förhållandena under hösten i allmänhet är mer gynnsamma för den akustiska responsen eftersom att ljudet fortsätter färdas nära marken längre.

”Om vinden låg rätt, kunde de höra oss nästan sex kilometer när vi kulade uppe vid buan.”

Betydelsen av “om vinden låg rätt” måste här vara att lyssnaren befann sig rakt i medvind. I ett sådant fall kommer refraktionen på grund av den positiva vindgradienten i höjddled att leda till att ljudet fokuseras mot marken i vindens riktning. Ljudet färdas därför mycket längre i den riktningen än vid normal sfärisk utbredning, vilket bidrar till att ljudet hörs på så stora avstånd. Men om till exempel ett skogsområde separerar kulerskan från lyssnaren, kan nedåtböjningen resultera i att ljudet snabbt böjs ned i skogen, i vilken absorptionen är förhållandevis stor och speciellt mycket större än absorptionen i luften. Ljudet skulle då avta snabbare och inte alls höras på sex kilometers avstånd.

Förhållandena måste därför vara sådana att antingen är kulerskan och lyssnaren separerade av en sjö där inget ljud absorberas, eller så måste vindgradienten vara sådan att ljudets krökning sker så långsamt att tillräckligt mycket ljud når mottagaren utan ha reflekterats i, och därmed delvis absorberats av, marken eller skogen. Med detta resonemang räcker det alltså inte med att vinden ligger rätt. Hastigheten med vilken vindhastigheten förändras i höjddled måste också vara precis rätt.

På så stora avstånd som sex kilometer kommer andra atmosfäriska egenskaper att ha mycket stor betydelse. För att ett mänskligt ljud ska färdas så långt och fortfarande kunna uppfattas av en människa måste därför ropens frekvens vara förhållandevis låg, annars skulle hela toninnehållet absorberas av atmosfären då absorptionen blir högre ju högre frekvensen är. Trots en låg ropfrekvens måste den atmosfäriska absorptionen ändå vara exceptionellt låg för att ljudet ska ha en chans. Turbulensen måste också vara ytterst begränsad. Annars skulle dämpningen på grund av ljusets interferens med sig själv vara för stor. Situationen kräver således därför att luftmassan genom vilken ljudet färdas, i stor utsträckning, är stabil och homogen. Är de atmosfäriska förhållandena som nämns ovan uppfyllda är chanserna för att höras på så stora avstånd optimala.

Situationen skulle kanske kunna förbättras ytterligare om ljudets färdväg utgörs av en smal dalgång med tydligt definierade berg på sidorna. I bästa fall skulle dalens botten utgöras av en sjö. I det fallet skulle dalen kunna agera vägledare och ljudet reflekteras tillbaka in i den efter att det reflekteras mot dalens sidor. I extrema fall kanske de kritiska atmosfäriska förhållanden som beskrivits ovan till och med vara överflödiga om terrängens och dalens utseende är otroligt gynnsamma för ljudets utbredning.

Naturakustiska dokumentationer

För att närmare studera upplevelser av ljudutbredning och respons i naturen gjordes ett fältarbete under sommaren 2018 som gick ut på att testa kulning och hornlåtar utomhus där fokus var den enskilde individens upplevelser av ljudutbredningen. Förstudier gjordes under hösten 2017 vid **Östra Grunuberg** i Orsa, **Olsnäs** fåbodar i **Siljansnäs** och **Arvselen** i **Malung**. Huvudstudien utfördes på ett urval fåbodavallar; **Mosselbodarna** och **Ekfännsberget** i **Floda**, **Nysjöns** fåbodar i **Svärdsjö**, **Prästbodarna** vid **Dådran** i **Rättvik**, **Risåsen** i **Äppelbo**, **Välbrändan** i **Transtrand** och **Nysättersvallen** norr om **Särna**, vid Vedungsfjället. Som referens



Isak Stomberg, Kerstin Sonnback, Agneta Stolpe och Jennie Tiderman-Österberg under den naturakustiska dokumentationen vid Vedungsfjället. Foto: Daniel Hedblom, Dalarnas museum.

har vi också dokumenterat respons och ljudutbredning under två tillfällen vid Dalagård i **Fors, Avesta**.

Platserna valdes ut genom att titta på hur terrängen ser ut, exempelvis med hjälp av laserdata. Vi har efter det försökt besöka platser med olika terräng. Vi har haft en kärngrupp med tre kulerskor: Jennie Tiderman-Österberg, Agneta Stolpe och Kerstin Sonnback, vilka var med under samtliga dokumentationer. Vi tog även in fler personer vid olika tillfällen för referens. Kulerskor vi hade med oss vid enskilda tillfällen var Sofia Sandén och Anna-Karin Jobs Arnberg. Ann-Sofi Nilsson var med under förstudien vid **Arvselen**. Hornblåsarna Anna Aronsson och Bernt Lindström deltog också vid varsitt tillfälle.

Det är inte enkelt att dokumentera naturakustiska förhållanden och enskilda individers upplevelser av dessa förhållanden. Hur ska vi kunna samla in data som utgår ifrån individens upplevelser, men ändå få någon form utav mätbara uppgifter om naturens respons? Det finns många parametrar att ha i beaktande här.

När det kommer till att dokumentera människors upplevelser, behöver man alltid räkna in faktorer som kan påverka upplevelserna. Vi har alla olika röster med olika resonatoriska egenskaper. Vi kommer därför automatiskt att påverkas av hur varje ton hanteras tekniskt och hur den känns i kroppen. Kular du i ett läge som är bekvämt för dig och där du upplever att din kropp och din röst svarar allra bäst, kommer du säkert automatiskt också att uppleva en bättre respons i naturen. Samma princip gäller naturligtvis också för hornblåsare. Upplevelsen påverkas också



Laserdata: Terränglutning, Nysjön, Svärdsjö. Symbolen visar platsen för fäbodvallen. © Lantmäteriet I2018/00142.

av din blåsteknik, vilket horn du har, samt relationen mellan teknik, spelstil och typ av horn. Eftersom vi arbetade med en kärngrupp på tre kulerskor, lärde vi oss under resans gång vilket läge som var just dessa personers "dragläge", vilket gjorde att vi med lätthet kunde använda oss av denna parameter i analysen. Vi var också noggranna med att notera kommentarer kring den psykologiska aspekten, för att få en så bred och djup bild som möjligt. Ibland kom kommentarer som "idag är inte rösten med mig i det läget", eller "jag spelar inte gärna i det läget med det här hornet". Kommentarer som är viktiga att ha med i en analys.

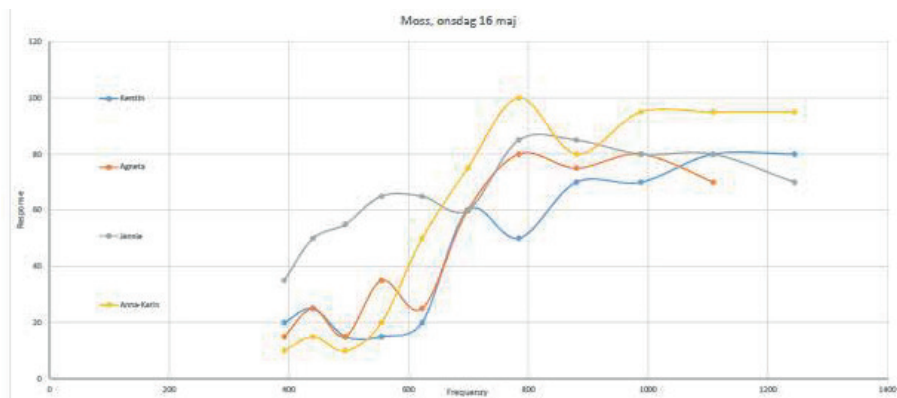
Terränglandskap	Messebodarna, Dala Floda Förmiddagen 16/5 2018	EMfäbodungen Dala Floda Eftermiddagen 16/5 2018	Nybjörn fäbodarna Svärdsjö Förmiddagen 22/5 2018	Frätbodarna Rättvik Eftermiddagen 22/5 2018	Rådan Äppelbo Eftermiddagen 11/6 2018	Vilbrändan Sälen Förmiddagen 11/6 2018	Nybjörnsvallen Sälen Förmiddagen 11/6 2018	
Koordinater	60.32.23 N 14.43.57 E	60.32.31 N 14.37.53 E	60.56.38 N 15.57.57 E	60.56.33 N 15.34.01 E	60.23.27 N 14.01.48 E	60.06.49 N 13.03.35 E	61.52.11 N 13.14.34 E	
Mark	Mycket torr gräs- och mossbeklädd mark. Bevattat kalkhagar med stenar.	Mycket torr mark med klippigt gräs. Kuperat med mindre träd och kullar.	270 m över havet. Betingsöverskåd. Terräng, men högt gräs så djuren ej syns. Inga stenar. Stenigt.	170 m över havet. Betingsöverskåd. Terräng, men högt gräs så djuren ej syns. Inga stenar. Bred stenar.	Tät skog, rösten.	Tät skog, rösten.	Mjuk, porös, mycket fuktig mark. Betingsöverskåd. Gräs och laven.	Våtmark.
Reflektioner	Ropar i västlig riktning mot skogsparti 200 meter från oss. Berg 200 meter från oss.	Ropar i nordlig riktning mot skogsparti 60 meter från oss. Klätters klack, bergshög ca. 2,5 km från oss.	Ropar i västlig riktning mot högt klack och mindre bergskullar runt gården. 400-600 meter från oss.	Ropar i västlig riktning mot klackarna 100-200 meter framför oss. Klackberget syns tydligt bakom oss.	Ropar i västlig riktning mot skogsparti 100-200 meter från oss. Klackberget syns tydligt bakom oss.	Ropar i västlig riktning mot skogsparti 100-200 meter från oss. Klackberget syns tydligt bakom oss.	Ropar i västlig riktning mot skogsparti 100-200 meter från oss. Klackberget syns tydligt bakom oss.	Ropar i västlig riktning mot skogsparti 100-200 meter från oss. Klackberget syns tydligt bakom oss.
Trädslag	Löv, björk, Metastadels lövskog, få granar.	Tunna björkar. Berrskog på berget som även är kalk mot toppen.	Björk och gran, men löven var. Tät skog omkring 500 meter bakom oss.	Fästm gran.	unga granar, tall, få björkar.	Fästm berrskog och få björkar.	Gran, tall och gläsbjörk.	
Ljuslandskap	Mycket lite vind i träden. Stjär	Knapp vind i träden, fåtar, grissällare och flyggen.	Få träd på den öppna vallen ger mindre brus och ljuskvistar. Spår var stilla.	Vind i träden och lite ljuskvistar. Flyggen.	Kraftig vind i träden, regn, miltligt ljuskvistar.	Vind i träden, ljuskvistar, björk som parlar samt flyggen.	Mycket lite vind, försiktigt ljuskvistar.	
Frekvensspektra	25-4 kHz	36 Hz - 4,5 kHz	43 - 1,9 kHz	36 Hz - 1,5 kHz	40 Hz - 1,2 kHz	30 Hz - 4 kHz	279 Hz - 1,4 kHz	
Decibel	40-43	40-43	43-50	42-46	32-39	43-48	43-48	
Lufthastighet								
Vädret	Sol och få moln	Växlande molnighet	Sol utan molnighet	Iskall	Mulet och tätta regn	Växlande molnighet.	Mulet, få moln	
Temperatur	22 grader C	23 grader C	20 grader C	22 grader C	26 grader C	23 grader C	23 grader C	
Vind	0, 5 m/s östlig vind	1,4 m/s nordlig vind	2,2 m/s, nordvästlig vind	1,9 m/s västvästlig vind	3,9 m/s nordlig vind	3,6 m/s västvästlig vind	0,6 m/s västvästlig vind	
Karvindar	8,1 m/s	1,9 m/s	2,0 m/s	1,2 m/s	4,7 m/s	4,2 m/s	0,8 m/s	
Luftfuktighet	42 %	36 %	30 %	30 %	72 %	45 %	53 %	
Atmosfäriskt tryck	1018 hPa	1013 hPa	1012 hPa	1019 hPa	1000 hPa	1008 hPa	1000 hPa	

Data från naturakustikdokumentationerna. Illustration: Jennie Tideman-Österberg, Dalarnas museum.

Det är också av yttersta vikt att även räkna in hur bilden *av* omgivningarna kan påverka upplevelsen av ljudutbredningen. Ett öppet vackert landskap kan säkerligen förstärka känslan av att rösten når långt, medan en tät skog kan upplevas som bromsande. Om individen som kular eller blåser horn är påverkad av våta fötter, sömnhet, hunger eller irritation, kan detta ge en negativ effekt på upplevelsen.

Med dessa tankar som bakgrund arbetade vi fram en skissartad undersökningsmetod som kan ge tillräckliga data för att få en uppfattning om detta komplexa forskningsfält. För att samla in data som kan beskriva den specifika platsen vid ett specifikt tillfälle, fokuserade vi först och främst på att beskriva platsens terränglandskap, ljudlandskap och luftlandskap. Detta gjorde vi dels genom att notera våra upplevelser av detta, samt att göra ett protokoll med specifika värden, såsom atmosfäriskt tryck, luftfuktighet, temperatur, vind, avstånd till eventuell reflektionsyta och decibel på ljudlandskapet. Alla dessa data var tänkta att hjälpa oss att besvara frågan *varför* naturakustiken upplevdes som den gjorde av kulerskor och hornblåsare.

För att sedan gå in på enskilda upplevelser arbetade vi med ett moment som vi kallade för *ljudbollar*. Detta innebär att varje individ uppmanades att kula eller spela på en slumpvis vald ton inom en vald uppsättning, inte enligt skala eller i specifik tonart. Därefter värderades responsen i naturen på en skala mellan 1-100. Samtidigt mätte vi också varje tons intensitet (dB), för att se om ljudstyrkan var en avgörande parameter för upplevelsen av responsen. Decibel mättes på ett avstånd av 5,4 meter rakt framför vallmusikern i höjd med munnen eller instrumentet.



Grafisk representation. Illustration: Isak Stomberg.

Efter "ljudbollarna" utfördes ett improvisationsmoment med olika slingor, frekvenser och korta lockrop. Vallmusikern som improviserade delade hela tiden med sig av sina upplevelser av respons och ljudutbredning och diskuterade detta med de övriga. På ett sätt var improvisationsmomentet ett gruppsamtal med naturakustik i fokus.

Ovan ser vi en utav de grafiska representationerna som visar hur kulerskorna uppfattade responsen vid en särskild plats, i detta fall **Mosselbodarna i Floda**. Varje linje indikerar medelst ett numeriskt värde, där 0 är försumbar respons

och 100 är exceptionell respons, hur respektive vallmusiker upplevde responsen i landskapet. Notera att värdena är subjektiva och därmed beror både på platsen och vallmusikerna. Till exempel måste med vad som avses exceptionell respons vara olika från plats till plats och från kulerska till kulerska. Diagrammen och de respektive linjerna ger därför bara en *relativ indikation* om responsen varför någon direkt jämförelse diagrammen och musikerna emellan inte nödvändigtvis tillför kunskap. Det torde dock vara tydligt att diagrammen ändå ger en god indikation om hur den akustiska responsen uppfattas och hur den varierar med frekvens, samt om denna uppfattning delas av vallmusikerna. Undersökningar av rösternas och instrumentens tonspektra gjordes med appen Advanced Spectrum Analyzer PRO av Vuche Labs. På så sätt kan vi se hur övertonsserierna ser ut och även se hur starka övertonerna är. Vi kan helt enkelt i detalj analysera varje individs unika röst, eller varje instruments unika klang. Detta är en parameter att ta hänsyn till vid en analys av värden och upplevelser.

Mosselbodarna, Floda

Något som här upplevdes av samtliga deltagare, var att det var svårt att få en tillfredsställande ljudutbredning när det rörde sig om rop över 880 Hz i riktning mot skogen. En kulerska beskrev upplevelsen med orden "*det är helt dött här*". Något *tydligt eko* uppfattades inte, men den svaga efterklngen beskrevs som "rullande" åt höger från utropsplatsen.

Ungefär fyra sekunder efter avslutat rop hördes dock ett svagt eko. Ekot beskrevs då återge samma grundton som ursprungsropet. Stor skillnad noterades på höga rop över 880 Hz och lägre rop under 659 Hz, särskilt då ropens riktning skiftade



Mosselbodarna, Floda. Foto: Isak Stomberg.

och skickades in i skogen. Samtliga upplevde att de lägre frekvenserna fick tydligare efterklang i skogen än de höga ropen. Då ropen skickades över öppet landskap, upplevde kulerskorna att det var rop i de högre frekvenserna som genererade det svaga ekot.

Ekfännsberget, Floda

Vid **Ekfännsberget** upplevde vi alla ett mycket spännande fenomen. Vi stod och ropade i riktning mot Ekfännsklack. Mellan oss och berget hade vi barrskog. De lägre ropen, omkring 440 - 523 Hz, gav en efterklang i skogen på samma sätt som vi upplevde i skogen vid Mosselbodarna. Dock gav dessa rop ett eko som speglade övertonerna, då främst oktaven över. Vi ropade alltså med stamton 440 Hz, men ekot från berget svarade på den dubbla oktaven, övertonen omkring 1,7 kHz. Vi upplevde även här att ljudet rullade åt höger ifrån utropsplatsen på samma sätt som vid **Mosselbodarna**.



Agneta Stolpe, Anna-Karin Jobs Arnberg, Kerstin Sonnback och Jennie Tideman-Österberg vid Ekfännsbergets fåbodar, Floda. Foto: Isak Stomberg.

Det var också så att vi upplevde att de slingor som vandrade från högt till lågt, eller som rörde sig högfrekvent men landade på en lägre slutton, besvarades av naturen från två distinkta platser – den närliggande skogen för de låga frekvenserna och skogskanten längre bort för de höga. Då kunde vi höra dessa olika svar i stereo - när vi fick eko från de inledande höga tonerna, fick vi samtidigt efterklang på de lägre tonerna.

Nysjöns fåbodar, Svärdsjö

När vi besökte **Nysjöns** fåbodar hade vi också med oss Bernt Lindström, som blåste både bock- och kohorn. Ett horn kan ha en tydligare och renare övertonserie än en människoröst, vilket gjorde att fenomenet med starkt responderande övertoner var ännu tydligare här. Precis som vid både **Mosselbodarna** och **Ekfännsberget**, var det även vid **Nysjön** frekvenserna närmast 440 Hz som gav tydligast eko på



Vid Nysjöns fäbod, Svärdsjö, ropade vi över sjön.
Foto: Jennie Tideman-Österberg, Dalarnas museum.

den dubbla oktavens överton 1,7 kHz. Fenomenet upplevdes även tydligare här av de kulerskor som också ropade vid **Ekfännsberget**. Det som gjorde fenomenet extra intressant här, var att det näst intill uteslutande var just 440 Hz som gav ett "övertonseko". Precis som vid exempelvis **Ekfännsberget**, upplevde vi även här att ljudet "rullade".

Prästbodarna, Rättvik

Vid **Prästbodarna** stod vi och ropade mot en tät barrskog. Som vi upplevt tidigare, gav skogen *efterklang* på lägre frekvenser, mellan 440-622 Hz. Då det blåste relativt kraftiga kastvindar vid tidpunkten för vår dokumentation, beskrev samtliga



Vid Prästbodarna ropade vi mot en tät barrskog.
Foto: Isak Stomberg.

att det var svårt att få en känsla för ljudutbredningen då det *upplevdes* att ljudet fördes bort i vindarna. På grund av vindarna upplevdes det också som att det akustiska rummet var i ständig förändring. Vindarna tilltog också under vår dokumentation, vilket gjorde att det var stor skillnad på väderförhållandena mellan den första och sista testpersonen. Detta gjorde att vi hade relativt olika uppfattningar av naturakustiken vid **Prästbodarna** denna dag.



Vid Risåsen i Äppelbo ropade vi över dalen med Lammåsmyrans. Foto: Isak Stomberg.

Risåsen, Äppelbo

Dagen vi var på **Risåsen** präglades av kastvindar och snabba regnskurar. Dessutom hade en enorm mängd knott kläckts i den fuktiga marken, vilket naturligtvis påverkade känslan av ljudutbredningen negativt. På grund av regnet och knotten hade vi luvor på huvudet, samtidigt som vi viftade med grenar framför våra ansikten. Alla dessa faktorer, gjorde att vi inte hörde på samma sätt som vid de tidigare dokumentationerna. Det var svårt att få en känsla av exakt vilka frekvenser som naturen svarade bäst på när det var kastvindar och regn vid vissa tidpunkter, medan det kunde vara uppehåll och vindstilla andra stunder. Därför var vi inte helt överens gällande naturens gensvar, men vi kunde ändå enas om att rop i bröstklang, under 500 Hz, inte gav tydliga ekon, utan mer en upplevelse av rumsklang.

Vålbrändan, Transtrand

Vålbrändan besökte vi en dag då luften beskrevs med abstrakta begrepp som "tunn" och "hög". Vi ropade mot en tät skogsrand, över betad, fuktig mark. Som så många gånger förr, beskrev vi alla att det var enklare att få respons på lägre frek-



Vålbrändan, Transtrand. Foto: Jennie Tiderman-Österberg, Dalarnas museum.

venser när vi ropar mot skogen. Även bröstropen kunde här ge en lång efterklang. Vi började ana ett mönster, att skogen gärna svarar på rop mellan 587 Hz och 698 Hz. Något vi hade lagt märke till på fler platser vid det här laget. Alltså ungefär omkring de frekvenser som motsvarar ett kohorns tonspektrum. Någon upplevde också här att det blev bättre respons i skogen om man använde en sångteknik med höjd gom så att klangen efterliknade ett horn så mycket som möjligt. Rop i de högre frekvenserna upplevdes här inte nå ut på samma sätt. Det beskrevs som att rop omkring 750-880 Hz *”helt försvann i atmosfären”*. Dock kunde vi alla uppleva att något enskilt rop i högre frekvens kunde nå ut och vi tyckte oss höra ett svagt eko vid den bakre skogskanten när ropen låg omkring 1000 Hz.

Nysättersvallen, Särna

Ropplatsen vid **Nysättersvallen** var i närheten av Gillermýran. Vi ropade över myren, mot en lång kant av barrskog vilken bestod av mestadels tall med nakna stammar. Här upplevde vi inte ett tydligt och avgränsat eko, utan istället en mycket lång, rullande efterklang. Som vi hört tidigare, upplevde vi även här att frekvenserna mellan 587 Hz och 698 Hz gav längst och tydligast efterklang. När vi ropade i bröstklang, omkring 392-440 Hz, hörde vi att övertonerna var mycket tydliga i efterklangen. Just 392 Hz gav en efterklang där vi kunde urskilja den dubbla oktaven mycket tydligt i övertonsserien. Det var nästan uteslutande rop i bröstrop som gav så tydlig övertonsrespons. När vi kom över frekvenser omkring 698 Hz, upplevde vi dock att efterklangen gick över i något som mer skulle liknas vid tre till fem mycket snabba ekon. Vi upplevde här att ljudet tog sig fram i snabba mycket tydliga ”vågor”.



Ropplatsen vid Gillermyran i närheten av Vedungsfjället.
Foto: Jennie Tiderman-Österberg, Dalarnas museum.

Förklaringar

Vad kan vi då lära oss utav dessa naturakustiska dokumentationer? Först och främst kan vi slå fast att ljud betar sig oerhört olika på olika platser, olika dagar, olika tidpunkter. Terrängen och växtligheten spelar stor roll, men det som är helt avgörande för ljudets utbredning är *luftlandskapet*.

På flertalet platser upplevde vi att ljudet ”rullar”. Detta beror på att reflektorn inte är vinkelrät mot kulerskan/hornblåsaren och ljudets färdriktning. Ekot från en punkt på reflektorn belägen längre bort från kulerskan, ger ett eko med större fördröjning än ett eko från en punkt närmare kulerskan. Är reflektorn vinklad når ljud från ena sidan kulerskan först, vilket följs av ett kontinuerligt eko som succesivt upplevs förflytta sig i den riktning i vilken reflektorn är vinklad från kulerskan.

Ett mycket spännande fenomen som upplevdes på fler platser, då särskilt vid **Nysjön**, är det som vi kallar *övertonsrespons*. Alltså när vi upplevde att svaret primärt innehöll övertoner. Detta kan indikera att reflektorn utgörs av en skogskant, eftersom att lägre frekvenser är frånvarande i ekot. Dessa har helt enkelt fortsatt färdas in i skogen, samtidigt som de högre frekvenserna, i enlighet med trädkronornas förväntade låg-pass-filter, reflekteras och spridits och således bidragit till ekot. Det övertonrika ekot tolkar vi som att reflektorn utgörs av trädkronor. Denna indikerar att effekten av att skogen agerar låg-pass-filter, som beskrivet i teoridelen, är ytterst märkbar. Det är också detta som gör att vi upplevde att *lägre* frekvenser gav längre *efterklang* i skogen än högre frekvenser, som istället för att reflekteras succesivt längre och längre in i skogen och därmed ge efterklang reflekteras primärt vid skogens vägg.

Varför just dubbla oktavens överton från primärtonen 440 Hz responderade bäst vid **Nysjön** är svårt att avgöra. Eventuellt kan detta bero på att träden är av en viss typ, vilket ger upphov till en karaktäristisk storlek på löv eller barr. Samtliga löv har då liknande resonans/reflektionsegenskaper, vilket gör att vissa minimum och maximum kan uppstå för speciella våglängder och därmed frekvenser på ljudet, vilket skulle kunna förklara att övertonerna i ekot var starkast för just 440 Hz. Detta är dock spekulativt och bör inte betraktas som en förklaring utan endast en hypotes. Det enda vi med säkerhet kan säga är att naturen här hade egenskaper som främjade just dessa frekvenser, vilket i sig är en intressant observation.

Stereoeffekten som upplevdes exempelvis vid **Ekfännsberget**, där olika frekvenser svarade från olika håll, kan troligtvis förklaras av att skogen närmast kulerskor-na gav både en mörkare efterklang på grund av trädstammarnas diffusering och ett högfrekvent eko från trädskronorna. Stereoeffekten uppstår när ett vi hör ett sekundärt eko, troligtvis från en skogskant med högre träd längre bort. Från denna kommer ingen efterklang att upplevas men istället ett tydligare, mer högfrekvent eko från trädskronorna. Då denna är längre bort upplevs en fördröjning av ljudet, vilket tillät oss att uppleva de inledande tonerna högfrekventa eko från denna dunge samtidigt som vi hörde efterklangen från den närmare skogen.

Effekten av kastvindar, såsom den beskrivits i teorin, var väldigt tydlig vid **Prästbodarna**. Den ger upphov till ett variabelt ljudlandskap vilket ibland förstärker och ibland försvagar ljudet.

Alla fenomen som beskrivits här, innebär att den som kular eller spelar horn, kan behöva ändra sitt sätt att kommunicera över stora avstånd beroende på hur just alla dessa olika parametrar ser ut. Även om du kular på samma plats flera gånger, kan denna plats naturakustik förändras helt beroende på väder och tidpunkt. Många har en uppfattning att kulning alltid måste vara högfrekvent för att fungera, men så är alltså inte fallet. Ropar du i en tät skog kan till och med de högre frekvenserna vara rent ineffektiva. Ibland behöver du också invänta naturen och lyssna efter svaret. På vissa platser där ekot kommer långt efter ditt första ljud, kan du därför behöva göra kortare rop då längre fraser med mycket ornamenteringar blir otydliga signaler.

Kanske finns det också en uppfattning att ju starkare du ropar, desto bättre ljudutbredning får du. Men faktum är att i vår studie hade decibel en försumbar effekt på *upplevelsen* av responsen. Dock är ljudstyrkans effekt på själva utbredningen, alltså hur *långt* ljudet propagerar, mycket kraftig.

Detta ska ses som en pilotstudie. Ett försök att glänta på dörren till detta enormt spännande vetenskapliga fält. Ämnet naturakustik är ännu tämligen outforskat när det gäller hur den mänskliga rösten, och ljud från instrument, beter sig i naturen. Vi hoppas kunna fortsätta våra studier inom detta, för att öka både förståelse för ljudets vägar utomhus och lyhörddheten inför vallmusikernas ständige duettpartner – naturen.