Infraljudsexponering är kopplad till aversive responding, negativ bedömning och förhöjd salivkortisol hos människor

Kale R. Scatterty [1,2] Dawson VonStein [1] Lisa Prichard, Brian Franczak, Trevor J. Hamilton [1,2*] Rodney M. Schmaltz [1*]

TORIGN FORSKNING Artikel
Neurosci., 27 april 2026 Sek. Individuella och sociala beteenden
Volym 20 - 2026 | https://doi.org/10.3389/fnbeh.2026.1720179876

- LB

  Lisa B. Prichard [3]

- BC

  Brian C. Franczak [4]

1. Department of Psychology, MacEwan University, Edmonton, AB, Canada
2. Neuroscience and Mental Health Institute, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada

Abstrakt

Inledning:
Infraljud beskriver ljudvågsfrekvenser under 20 Hz, som vanligtvis är omärkliga för människor. Vissa djur uppfattar och demonstrerar motvilja mot infraljud, vilket väcker oro för dess potentiella negativa effekter som en antropogen förorening. Ny forskning tyder på att människor också kan reagera på infraljud, trots att de ligger under den konventionella gränsen för mänsklig hörsel. Denna studie undersökte den icke-hörbara effekten av infraljud på mänskligt humör och stressreaktioner.

Metoder:
Deltagare (*n (olika* = 36) utsattes för lugnande eller oroande musik med infraljud (~ 18 Hz) närvarande eller frånvarande i en 2 × 2 mellan subjekts design (*Lugnande* vs. *oroande*, *Infraljud på vs. av*). Självrapporteringsåtgärder samlades omedelbart efter exponering, och saliv samlades omedelbart in före exponering och 20 minuter efter debut för kortisolanalys.

Resultat:
Deltagarna upptäckte inte infraljud över chansen (p = 0,241). Infraljud var förknippat med förhöjd salivkortisol (p = 0,022, $r_{rb\ (olika\ betydelse}$ = 0,390) och högre självrapporterad irritabilitet (p = 0,049, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,096), ointresse (p = 0,044, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,121; p = 0,047, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,118) och sorgbedömning (p = 0,002, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,253) över båda musikförhållandena, utan förväntade effekter. Intresse, irritabilitet, sorgbedömning och kortisol identifierades också som viktiga prediktorer för infraljudsexponering via "random forest" modellering.

AI-översikt
The phrase "chance" means that in a scientific experiment, participants could not consciously identify or "hear" the infrasound (low-frequency sound waves below 20 Hz) any better than random guessing. The p-value (p = 0.241) confirms this, indicating the results were not statistically significant. [1, 2, 3]
A clean breakdown of this finding:
1. What does "chance" mean?
In perception tests, "chance" refers to random probability (e.g., guessing correctly 50% of the time in a coin toss). Because participants did not detect infrasound *above* chance, it means they were essentially guessing whether the sound was on or off.
2. What does p = 0.241 mean?
In statistics, the p-value tells you the probability that your results happened purely by random luck.
- Scientists typically look for a p-value of 0.05 or lower to prove a meaningful effect.
- A p-value of 0.241 means there is a 24.1% probability that the detection rates were just a fluke. Because this number is much larger than 0.05, the researchers conclude there is **no meaningful evidence** that humans can consciously hear or detect infrasound.

3. Why does it matter?
This specific phrasing is often seen in psychoacoustics and environmental research (such as studies regarding wind turbine noise or psychological responses to low-frequency hums). The data implies that even if infrasound causes physical or emotional symptoms, humans do not need to *consciously hear* it for it to affect their bodies. [1, 2, 3]

Diskussion:
Utan hörseldetektering eller förväntade effekter var infraljudsexponering kopplad till förhöjt kortisol och mer negativ affektiv självrapportering. Dessa resultat stämmer överens med tidigare djurstudier och tyder på att infraljud kan vara aversiv för människor, som fungerar som en potentiell miljöirriterande och bidrar till mer negativ subjektiv upplevelse.

1 Introduktion

Infraljud kan definieras akustiskt som ljudvågor med en övre frekvensgräns under 20 Hz (**Bedard-Georges (2000)**. Infraljud har postulerats för att orsaka aversion och känslor av rädsla på förment hemsökta platser och att bidra till ångest, nöd och minskat välbefinnande i närheten av energi-infrastrukturer som vindkraftverk (**3 Boczar et al (2022), 54 Scatterty et al (2023). *Zebrafish aversion to infrasound...*, Salt-Hullar (2010), Persinger (2013), 5 Burt (1996) *Sick building syndrome...*, 8 Chaban et al (2021). *Negative effect of high-level infrasound...*, 29 Leventhall (2007),16 Friedrich (2023). *Temporal integration of infrasound at threshold..., 57 Tandy-Lawrence (1998). The ghost in the machine.***). Infraljud förekommer också naturligt, genererat, till exempel genom tektonisk eller vulkanisk aktivitet, (**20 Hamama-Yamamoto (2021) *Infrasonic earthquake..*, 61 Watson et al (2022). *Volcano infrasound..*, *32* Marchetti et al (2019). *Long range infrasound.*.**), konvektiva stormar (**56 Sindelarova et al (2015). *Atmospheric infrasound observed***) och luftvatten- interaktioner såsom vid uppströms vattenutsläpp **(9 Che et al (2023) *Detections of infrasound waves*)**. Infraljud är dock också vanligt förekommande i stadsområden nära ventilationssystem, luftkonditionering, lågt mullrande rör, trafik och byggkraft, uppvärmning, mekaniska system (**42 PersingerM. A. (2013). *Infrasound, human health, and adaptation: an integrative overview of recondite hazards in a complex environment..*, 5 BurtT. (1996), 6 Butkus-Vasiliauskas (2013), 19 Grafkina et al (2019), 33 McComas et al (2019), 33 McComas et al (2019), 62 Wynn-Dugick (2023), 41 Nowicki et al (2014). *Effects of infrasound generated in urban areas on health of people and animals.***)

Utforskande fältinspelningar upptäckte också lågfrekvent akustisk energi i infraljudsområdet från liknande urbana källor i Edmonton (AB, Kanada) samt under musikaliska föreställningar (se Kompletterande material).

Djurmodeller tyder på att infraljud kan förändra affektiva tillstånd och stressresponser (**54 Scatterty et al. (2023), 50 Salt-Hullar (2010), 25 Karlsen (1992a), 26 Karlsen (1992b), 13 Enger et al (1993), *Detection and reaction of fish to infrasound,* 52 Sand- Karlsen (1986)*Torsk,* 53 Sand-Karlsen (2000), 4 Bui et al (2013), 27 Karlsen et al (2004), 51 Sand et al (2001) *Lax*.**). Det är dock okänt om detta också gäller för människor, eftersom direkta beteendemässiga, fysiologiska och anatomiska jämförelser i samband med exponering för infraljud är begränsade och ännu inte kan göras på ett tillförlitligt sätt. Vissa studier tyder på att infraljud kan påverka mänsklig sömn och potentiellt framkalla känslor av trötthet, illamående eller ångest (**2 Persinger (2013)**), samt förhöjda känslor av irritation och obehag (**37 Møller (1984). *Physiological and psychological effects of infrasound on humans***). Forskning om påverkan av infraljud på människor har dock varit motstridig (**29 Leventhall (2007), 31 Maijala et al. (2021), 39 Mühlhans (2017**)). Medan vissa undersökningar rapporterar liten signifikant effekt av infraljudsexponering på mänskliga fysiologiska eller psykologiska åtgärder (**29 Leventhall (2007)**. Andra har dokumenterade biverkningar, inklusive obehag, ångest och sömnstörningar (**42 Persinger (2013), 37 Møller (1984)**). En trolig bidragande orsak till dessa blandade resultat är att studier tenderar att förlita sig starkt på observationsdesign och självrapportering, med begränsad experimentell kontroll över infraljud exponering och inkonsekvent rapportering eller validering av stimulansegenskaper. Dessutom har relativt få kontrollerade studier reparerat infraljudsexponering och dess effekter på självrapportering med etablerade fysiologiska markörer för affektiv eller stressrelaterad förändring. För närvarande gör dessa faktorer det svårt att avgöra om infraljud kan *Kategori: Austiskt* modulera påverkan och stress på både psykologiska och fysiologiska nivåer under kontrollerade förhållanden.

Experimentella paradigm som parar verifierad infraljudexponering med både självrapportering och fysiologiska åtgärder ger ett direkt sätt att testa om infraljudspåverkan påverkar och orsakar stress-respons hos människor. I denna studie parade vi närvaron eller frånvaron av infraljud (~ 18 Hz, 75–78 dB) med musikstimuli utformade för att vara lugnande eller oroande och undersökte både självrapporterad påverkan och prepost salivkortisol som konvergerande indikatorer på affektiv och stressrelaterad reaktion. Vi antog att infraljudsexponering skulle skifta självrapporterad påverkan negativt och öka kortisol i förhållande till no-infraljudförhållanden, oberoende av musiktyp. Vi förväntade oss vidare att eventuella effekter skulle upptäckas oberoende av deltagarnas medvetenhet om närvaron av infraljud i rummet. Följaktligen testade vi om infraljudsexponeringen ökar negativa affektiva reaktioner och ökar salivkortisol i förhållande till infraljudskontroller och om sådana effekter beror på musiksammanhanget inom 2 × 2 faktorialdesignen. Genom att kombinera verifierad infraljuds- exponering med konvergerande självrapportering och fysiologiska resultat ger denna studie

en kontrollerad undersökning av huruvida infraljud kan modulera mänsklig påverkan och stressfysiologi under experimentellt kontrollerade förhållanden.

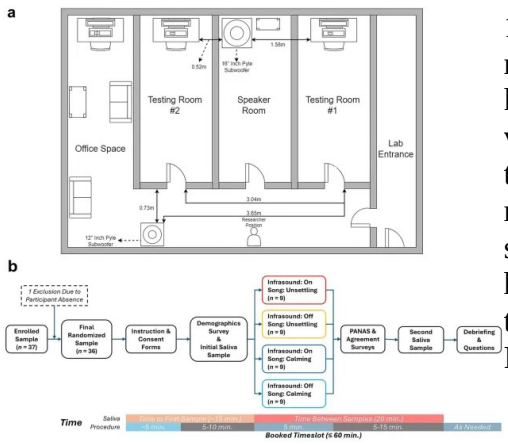
2 Metoder och material

2.1 Deltagare

Ett bekvämlighetsprov av studenter från MacEwan University (*n (olika*$_{mål\ för\ mål}$ *= 40,* n_{Totalt} = 36; 9 män, 27 kvinnor; $\mu_{Ålder}$ = 23.471, *SEM (OLIKA* = 1.231, *min* = 18, *max* = 36; Edmonton, AB, Kanada) rekryterades från andra och tredje års psykologiklasser och beviljade 1% bonuskredit mot sin slutliga klass för att delta i studien. Deltagarna tilldelades slumpmässigt till en av fyra grupper: i) *infraljud på + lugnande musik*, (ii) *infraound off + lugnande musik*, (iii) *infraljud på + oroande musik*, och (iv) *infraound off + oroande musik*, som resulterar i en 2 × 2 grupperingsstruktur. Deltagarna ansågs vara berättigade till studien om de var vuxna (≥18 år) som kunde ge informerat samtycke och slutföra protokollet och rapporterade inga hälsoproblem som rimligen kan förvirra hörseluppfattning (t.ex. hörselnedsättning). Deltagare som inte följde förtestningsinstruktioner vid inskrivning (t.ex. avstår från mat, andra drycker än vatten och marijuana eller tobaksprodukter i minst 1 timme före testning) skulle också uteslutas. Eftersom provstorleken var liten beräknades effektstorleken också och rapporterades eftersom de är oberoende av begränsningar av provstorlek. Med tanke på provets begränsade storlek och tunga skevhet mot kvinnliga deltagare användes opartiska analyser av prediktiv variabel betydelse (diskuterad framåt) för att beskrivande komplettera betydelsen. Denna studie fick etiskt godkännande från MacEwan University Research Ethics Board. All forskning utfördes i enlighet med relevanta riktlinjer och föreskrifter.
Alla deltagare gav experimentellt informerat samtycke efter en introduktion och förklaring av studien. Deltagarna informerades om att de kunde återkalla samtycke när som helst och ingen drog sig tillbaka under studieperioden. Testning av deltagare ägde rum över 10 dagar (24 juli 2023 - 3 augusti 2023) under vilken studenter fick anmäla sig till en 1-h tid mellan 9 och 5 pm varje dag via online-deltagare rekryteringssystem. Deltagarna instruerades att avstå från att konsumera mat, andra drycker än vatten och marijuana eller tobaksprodukter i minst 1 timme före testperioden. Inga deltagare rapporterade hälsoproblem utanför psykiatrisk medicinering, till exempel historia av hörselnedsättning. Varje deltagare kunde bara delta i studien en gång, och kredit beviljades endast till studenten efter avslutad studie. Ett manus användes för att välkomna, informera och instruera deltagare att se till att varje deltagare fick samma kommunikation, språk och kontakt med de behandlande forskarna (se Kompletterande material). Skicklighetstilldelningen randomiserades i Qualtrics och konfigurerades för att upprätthålla balanserad allokering över de tillgängliga testtidsplatserna (9–5 p.m.) och testdagar, vilket minskar sannolikheten för att något enskilt villkor oproportionerligt inträffade vid en viss tidpunkt på dagen.

2.2 Infraljud administration

Infraljud genererades via två out-of-sight subwoofer högtalare: En 12″ Pyle subwoofer orienterad mot deltagarna från korridoren utanför testrummen, och en 16″ Pyle subwoofer orienterad mot taket som ligger i ett rum mellan de två testrummen (Figur 1a). Denna två-högtalare konfiguration identifierades under första installationen och valideringen på rummet efter att ha testat flera konfigurationer, eftersom den gav stabil frekvens och amplitudmätningar på deltagarplatsen i båda testrummen samtidigt som man minimerar potentiella icke-akustiska signaler (t.ex. hörbar rumsresonans, mekaniska artefakter) som kunde lossa tillståndet.



Figur 1

Testrummen var 3,04 m från varandra med 12″ högtalare placerad intill vänster testrum, och 16″ högtalaren placerade 0,61 m från vänster testrum och 1,52 m från höger testrum. Lugnande och oroande musik spelades för deltagarna via separata konsumentklassade datorhögtalare anslutna till undersökningsdatorerna. Infraljudshögtalarna var anslutna till PI-9598-signalgeneratorer (Pasco Scientific, Roseville, CA, USA) och deltagarna utsattes för infraljudsfrekvenser centrerad ~ 18 Hz kollektivt mellan de två källorna. 18 Hz valdes som infraljudsstimulans baserad på tidigare djurfynd som visar undvikande obehaglig reaktion ~ 15 Hz med liknande trender mot 20 Hz (**54 Scatterty (2023).** ***Zebrafish aversion to infrasound***) i kombination med testrumsoptimering för att uppnå stabil, validerad stimulansleverans på deltagarplatsen.
Infraljudsgeneratorn optimerades så att deras vågsamplitud och frekvenser som användes var stabila med liten fluktuation och inte orsakade lätt observerbara mekaniska störningar på grund av rums-resonans. Infraljudsfrekvenser validerades i varje testrum med hjälp av en Spider −20-mikrofon med Spider EDM 6.0-programvara (Crystal Instruments, Santa Clara, CA, United States) och var konsekvent närvarande vid en amplitud mellan 75-78 dB i båda rummen. Detta amplitudsområde ansågs vara säkert för mänsklig exponering under provningsperiodens varaktighet[1]. Det uppnådda amplitudområdet låg också inom intervallet för dem som vanligen genereras av mekanisk energi, ventilation och värmeteknik som ofta ligger mellan 70–80 dB inom ett avstånd från 100 m från källan (**Salt-Hullar (2010), Persinger (2013)** ***Infrasound, human health, and adaptation,*** **Chaban-Vahl et al (2021).** ***Negative effect of high-level infrasound on human myocardial...,*** **Butkus-Vasiliauskas (2013)**). Med infraljuds-generatorn avstängd, etablerades en stabil baslinje av befintligt lågfrekvent bakgrundsbuller i båda testrummen. Vid start av generatorn erhölls en konsekvent distinkt topp runt 18 Hz som var ~ 35–40 dB över baslinjen. Motsvarande FFT/spektral effektvisualiseringar som jämför OFF kontra ON-förhållanden finns i Kompletterande material (se ”Infraljudstestning Av Rumsvalidering”).
Omgivande ljus- och temperaturförhållanden i varje testrum upprätthölls konsekvent över dagar, och deltagarna, liksom deras tilldelade grupper, fördelades slumpmässigt mellan rummen för att kontrollera potentiella oupptäckta förvirrande skillnader.

2.3 Musik stimuli

Deltagarna utsattes för ett av två ljudklipp, utformade för att vara antingen *Lugnande* eller *oroande*. Dessa typer valdes av forskarna för att representera kontrasterande affektiva valens; *Lugnande* förväntas framkalla typiskt positiva reaktioner, *oroande* förväntas framkalla negativa. Det lugnande klippet var instrumentalt och avsett för meditation, medan det oroande klippet bestod av skräck-tema omgivande ljud som var avsett att framkalla obehag. Klippen presenterades *via* konsument-klassade datorhögtalare anslutna till undersökningsdatorerna och var ungefär 5 min i varaktighet. Deltagarna tilldelades slumpmässigt till varje musiktillstånd (*Lugnt* vs. *oroande*) och till samtidig infraljudsexponering (*på vs. av*), vilket resulterar i en 2 × 2 design. Ljudklippen som används i denna studie finns i Kompletterande material.
Musik valdes som en hörbar stimulans som är känd för att framkalla affektiva reaktioner hos människor, vilket ger ett känsligt sammanhang för att testa om infraljud förändrar affektiv erfarenhet och utvärdering av hörselstimuli, samtidigt som man uttryckligen modellerar musikvalens i den fabrikella designen. Att välja musiktyper som kontrasterade i positiv och negativ valens möjliggjorde också utvärdering av huruvida kortisolåtgärden var känslig för att vara en affektiv reaktion, om varje musiktyp framkallar det förväntade reaktionen (ökning för *Oroande*, minskning för *Lugnande*).
Musikfiler var högpass filtrerade för att ta bort oavsiktligt lågfrekvent innehåll i infraljud-sortimentet. På samma sätt förväntades datorhögtalarna som användes för musikuppspelning inte producera sub-20 Hz-utgång.

2.4 Åtgärder för självrapportering

En undersökning utformades och administrerades med hjälp av online-undersökningsplattformen Qualtrics (Qualtrics, 2023, Provo, Utah, USA, https://www.qualtrics.com/) inklusive tidsinställda frågor för att säkerställa att deltagarna slutförde testperioden inom samma tidsram. Utöver skriftliga samtyckesformulär samlades även deltagarnas samtycke in i undersökningen. Undersökningen

omfattade demografiska och läkemedelsstatusartiklar, följt av påverkans- och stimulans-utvärderingsåtgärder som beskrivs nedan.

2.4.1 Positivt och negativt påverkansschema (PANAS)

Deltagarna slutförde ett 20-objekt Positivt och negativt effektschema (PANAS) (**60 Watson et al (1988). *Development and validation..***) omedelbart efter musikklippet, med hjälp av standard 5-punktsintensitetsskala ("*väldigt lite*" till "*extremt*") att betygsätta hur de kände i det ögonblicket. PANAS valdes för sina starka psykometriska egenskaper, inklusive omfattande validering som ett mått på både baslinjen och experimentellt förändrad positiv och negativ påverkan (**60 Watson et al (1988). *Development and validation..*, 11 de Carvalho et al. (2013), 10 Crawford-Henry (2004), 12 Díaz-García et al (2020)**. Utöver standarden PANAS slutförde deltagarna två korta uppsättningar av anpassade föremål som är utformade för att fånga (i) affektiv utvärdering av musikklippet (14 deskriptorer) och ii) självrapporterad beskrivning av påverkan under klippet (12 deskriptorer), var och en klassad på en 9-punkts avtalsskala ("*starkt oenigt*" till "*starkt överens*") Ordalymatoriet och svarsformaten i hela artikeln tillhandahålls i Kompletterande material.

2.5 ELISA kortisol analys

Kortisol är en etablerad hormonell biomarkör för stress (**24 James et al (2023). *Understanding the relationships between physiological and psychosocial stress, cortisol and cognition***) och föreslås också spela en roll i negativa affektiva tillstånd (**45 Qin et al (2016). *Prolonged secretion of cortisol as a possible mechanism underlying stress and depressive behaviour***). Fyra Invitrogen Cortisol Competitive Human ELISA Kit köptes från Fisher Scientific (Fisher Scientific Company, 112 Colonnade Road, Ottawa, ON) och lagrades i en-20 ° C frys före användning, enligt leverantörsrekommendation. ELISA-analyser används ofta för att upptäcka kortisolnivåer i urin, blod, avföring och saliv och har validerats väl både internt av leverantören och externt genom tredjepartsstudier (**22 Invitrogen. *Cortisol Competitive ELISA Kit: Product Description,* 18 Gholib et al (2019). *The validation of a commercial enzyme..*, 58 Thomsson et al (2014) *Validation of an enzyme-linked immunosorbent..*,17 Gatti et al *(2009). Cortisol assays*)**. All kortisol-testning ägde rum i ett biolaboratorium vid MacEwan University och analyser av prover utfördes med hjälp av en Beckman Coulter DTX880 Multimode Detector (Beckman Coulter Inc., Indianapolis, IN, United States) och Multimode System Software (Version 3.3; Beckman Coulter Inc., Indianapolis, IN, USA).

All ELISA-testning utfördes enligt tillverkarens protokoll. Alla prover kördes i duplikat; Således krävdes två ELISA-plattor för att bestämma den optiska densiteten för varje prov. Plate 1 bestod av "före" och "efter" prover av deltagarna 1 till 19 och Plate 2 bestod av "före" och "efter" prover av deltagarna 20 till 36. Plattor kördes vid ett optimerat utspädningsförhållande på 1:2 och endast ett prov ansågs vara olämpligt och uteslöts från statistisk testning på grund av en avvikande låg kortisol-koncentration och markant låg viskositet som överensstämmer med vattenutspädning (misstänkt för att skölja vatten snarare än saliv). Alla dubblettvärden kontrollerades för avvikande avvikelser och i genomsnitt när ingen hittades.

2.6 Saliv samling

Deltagarna välkomnades individuellt in i labbet och tilldelades ett av två isolerade testrum (Figur 1a). Efter samtyckesproceduren och en översikt av studien följde deltagarna datoriserade instruktioner när forskaren flyttade till ett angränsande rum som innehöll infraljudsgeneratorn. Vid denna tidpunkt lärde sig forskaren om infraljudstillståndet *via* ett nedåtgående, randomiserat anteckningsblock och aktiverade antingen infraljudet vid en amplitud mellan 75–78 dB i båda rummen eller lämnade det inaktivt. Ingen ytterligare interaktion mellan forskare och deltagare före datainsamlingen var klar. Forskaren var blind för både sång och infraljudstillstånd i alla interaktioner med deltagarna före datainsamlingen.

Varje deltagare utsattes för en enda musikalisk stimulans. För deltagare i infraljudstillståndet varade infraljudsexponeringen under en varaktighet av 4 min och 40 s, vilket gav forskaren tid att subtilt vända infraljudet till och av i början och slutet av varje ~5-min musikklipp. Omedelbart efter slutförde deltagarna den modifierade PANAS. Detta bedömde deras nuvarande affektiva tillstånd, utvärdering av musiken och affektiva upplevelse under musiken. Efter slutförandet av PANAS

ombads deltagarna att ange om de trodde att infraljudet var på under musikklippet. Alla undersökningar efter exponeringen slutfördes omedelbart efter ljudklippet, och deltagarna instruerades att tillhandahålla sitt andra salivprov 20 min efter ljudinställning, oavsett om undersökningen hade slutförts ännu. Deltagare som gav sitt andra prov i mitten av undersökningen instruerades sedan att fortsätta undersökningen tills de var färdiga. En visuell sammanfattning av protokollsekvensen och viktiga timingankare, inklusive salivsamling i förhållande till ljudinställningen, finns i Figur 1b.

2.6.1 Saliv samling

På varje skrivbord i testrummen placerades två 5 ml Eppendorfrör öppna och med en markerad linje vid 1 ml-punkten inom fälten på ett pappersark märkt "före" och "efter". Eppendorfrör har använts i tidigare studier som samlar salivprover och ansågs lämpliga för denna studie (**36 Mohanan et al(2019). Assessment of salivary.., 2 Bellagambi et al (2020). *Saliva sampling: methods..*, 35 Mohamed et al (2012). *The impact of saliva collection*..**). Bredvid rören var två ~ 3-tums längder av plastsugrör, steriliserat före testning. Små plastkoppar fylldes halvvägs med rent dricksvatten och placerades vid varje skrivbord för munsköljning. Ett punktform instruktionsblad, som ses i Kompletterande material, tillhandahölls för att påminna deltagarna om insamlingsstegen och när man ska ge prover. Före undersökningen och musikklippet fick deltagarna en demonstration av varje steg i salivsamlingen. Deltagarna instruerades att skölja munnen innan de gav sina prover genom att skölja sina munnar med vatten och svälja. Sköljningsförfarandet skulle göras 3 gånger före insamling för att standardisera provtagning och minimera potentiell förorening från rester av livsmedel, drycker eller munhygienprodukter som finns från tidigare på dagen. Deltagarna skulle sedan spotta genom sugröret i Eppendorf-röret och sikta på att fylla den ungefär till den markerade 1 ml-linjen. Efter provsamlingen instruerades deltagarna att stänga Eppendorf-röret säkert och placera det tillbaka på skrivbordet i motsvarande "efter" fält. En ny längd av halm användes för varje prov. Den närvarande forskaren var att se till att pre-stimulansproverna gavs omedelbart före ljudexponering och post-stimulansprover var 20 minuter efter ljudexponering. 20 min post-stimulus bestämdes vara en optimal tid för att upptäcka förändringar i salivkortisolnivåer (**48 Robert-Mercier(2014). *Salivary amylase as a stress biomarker,* 44 Qi et al (2016). *Subjective stress, salivary cortisol..,* 23 Iqbal et al (2023). *Cortisol detection methods for stress***).
Alla insamlingsrör var förmärkta med ett anonymt deltagaridentifikationsnummer, med bokstaven "A" som representerar deras första prov och "B" som representerar deras andra prov (t.ex. "12B"). Deltagarna informerades om att dessa nummer endast var för databehandling och inte kunde spåras tillbaka till deras personuppgifter. Efter provinsamlingen togs deltagarnumren in i slutet av undersökningen av forskaren för att para självrapportpoäng till motsvarande salivprov. Efter testning och insamling var alla deltagare anonyma från data.
Efter slutförandet kasserades alla provuppsamlingsmaterial (koppar, sugrör etc.) och testområdet sanerades med 70% etanol. Prover lagrades i en bricka och transporterades i slutet av varje testdag till en frysning −20 °C för förvaring och senare provning. Varje prov tinades bara en gång när det användes för ELISA. Alla procedurer som involverade proverna efter den första frysningen ägde rum i samma laboratorieutrymme som frysen där de lagrades för att undvika transportrelaterade upptiningshändelser. Forskare bar full längd laboratorierockar och nitrilhandskar under hela varje testperiod. Handskar byttes mellan varje testperiod för att säkerställa sterilitet och undvika korskontaminering.

2.7 Statistisk analys

All data analyserades med hjälp av GraphPad Prism (v9.1.2; GraphPad, San Diego, CA, United States), JASP (v0.17.1; JASP Team, 2023) och R Statistical Software (v4.4.1; R Core Team, 2024). Statistisk betydelse fastställdes till $\alpha = 0{,}05$ (95 % förtroende). Effektstorlekar och testvärden rapporterades tillsammans med *p*-val för att stödja transparent tolkning. Data presenteras som medel ± standardfel för medelvärdet (SEM). Potentiella outliers screenades med hjälp av ROUT (robust regression och outlier borttagning), som flaggar observationer med ovanligt stora rester medan de kontrollerar den falska upptäcktsfrekvensen. Ett Q-värde av 1 (*Q (engel* = 1) valdes, motsvarande

en maximal falsk upptäcktsfrekvens på 1 % för avvikande identifiering, och inga outliers detekterades. Normalitet och variansjämlikhet verifierades med hjälp av D'Agostino-Pearson respektive Bartletts tester. Med tanke på de små gruppstorlekarna behandlades formella antagande-tester som kompletterande och tolkade tillsammans med restdiagnostik (t.ex. Q- och rest-mot-anpassade tomter). Univariat och små delmängdsanalyser av varians (ANOVA) genomfördes i alla oberoende variabler. Med tanke på att den slutliga provstorleken inte kunde förutbestämmas, *post hoc (olika betydelse* känslighetsanalyser användes (G*Power; $\alpha = 0{,}05$) för att uppskatta effekt-storlekarna detekterbara med 80% effekt för den färdiga konstruktionen.
Optisk densitetsdata modellerades i GraphPad som kortisolstandardkoncentration kontra optisk densitet för både standarder och salivprover. En icke-linjär regressionsmodell användes för att generera standardkurvorna, och provkortisolkoncentrationerna interpolerades och justerades med en faktor på två för att ta hänsyn till 1:2-utspädning.
Ett chi-squared test användes för att bedöma sambandet mellan självrapporterad och faktisk infraljudsnärvaro, vilket indikerar om deltagarna korrekt kunde identifiera och därmed medvetet upptäcka infraljud i sin miljö.
PANAS-poäng analyserades med 2 × 2 tvåvägs ANOVAs testeffekter av sångtillstånd (*Oroande* vs. *Lugnande*) och exponering för infraljud (*på* vs. *avstängd*). Modellantaganden utvärderades med hjälp av restdiagnostik, inklusive bedömning av varians homogenitet. Huvud- och inter-aktionseffekter undersöktes med Tukeys jämförelser efter hoc när det var lämpligt. Där genom-snittliga skillnader rapporteras återspeglar de den första listade nivån minus den andra noterade nivån (till exempel Off-On), så positiva värden indikerar högre poäng för den första listade nivån. Eftersom denna testning på artikelnivå ökade falsk-positiv risk, och tillämpning av en enda global multiplicititetskorrigering över många olika tester kan omvänt blåsa upp falsk-negativ risk i små prover, tolkades objektnivåresultat som beskrivande signaler snarare än bekräftande fynd och betonades endast när de stöddes av effektstorlekar och konvergerande mönster över relaterade åtgärder.
Kortisoldata analyserades med hjälp av en 2 × 2 × 2 trevägs ANOVA med sångtillstånd, infraljudsexponering och tid (*Före-* vs. *post-stimulus*) som faktorer. Varje PANAS-poäng kodades numeriskt och gick in som en skala (kvasikontinuerlig) kovariat som en undersökande justering för att utvärdera om infraljudseffekter på kortisolförändringen kvarstod efter att redovisningen efter exponeringen självrapporterad påverkan efter exponeringen. Betydande effekter av infraljud på kortisolförändring tolkades som fysiologiska bevis på infraljudsutfärdad aversion när den upp-skattade effektstorleken motiverade tolkningsvikt. Eventuella sådana effekter korsrefererades sedan med varierande viktpoäng (diskuterades framåt) för att hjälpa till att kontextualisera ANOVA-resultaten.
För att kontrollera deltagarnas förväntningar på förväntan jämförde en upprepad mätning 2 × 2 ANOVA deltagarnas självrapporterade tro på att infraljudet var på / av mot dess faktiska närvaro. Betydande effekter av deltagarnas rapporterade upptäckt av infraljud skulle tolkas som en potentiell delta-förväntningseffekt.
Slutligen monterades en villkorlig inferensskog (CIF) via R för att undersöka varierande betydelse. CIF är ett användbart verktyg som står för bias mot prediktorer med många delade punkter och hög potential för interaktioner och är idealisk för mycket komplexa data med många variabler och fler prediktorer än fall (t.ex. i dataset med självrapporteringsdata från lägre provstorlekar, i förhållande till antalet prediktorer) (**30 Levshina (2020). *Conditional inference trees and random forests*)**. Resultaten från CIF ger opartiska viktpoäng för varje prediktor som används för att undersöka relationerna mellan de övervägda variablerna och närvaron av infraljud och kortisolförändring. R-kod för denna modell kan hittas i Kompletterande material.
Analyser var strukturerade kring två primära utfall med olika mätstrukturer.
Självrapporteringsresultaten efter exponering (PANAS och relaterade objekt) analyserades som mellan ämnesutfall i 2 × 2 designen. Däremot analyserades pre- och postexponerings-saltkärlsnivåer med tiden som en inomdelsbehållaresfaktor tillsammans med de mellan ämnesfaktorerna (musiktillstånd och infraljudexponering). Utforskande uppföljningsanalyser (t.ex.

mönster på objektnivå och beskrivande variabler med variabel betydelse) tolkades försiktigt och behandlades inte som bekräftande belägg. Detta tillvägagångssätt användes tillsammans med effektstorleksrapportering för att ge ytterligare sammanhang när man tolkar resultat över flera, icke-matchade jämförelser. Resultaten av intresse fokuserade därför på resultat som nådde statistisk signifikans, visade starkare effektstorlekar och var konsekventa över relaterade analyser. Variabelt viktigt poäng ansågs också beskrivande för att hjälpa till att kontextualisera mönster i data och undersöka om variabler av intresse också rankas högt i prediktiv betydelse. Dessa poäng behandlades inte som ett substitut för inferentiell testning eller som någon form av korrigering av flera jämförelser; snarare betraktades de som en kompletterande signal tillsammans med varandra. *p*-värden, effektstorlekar och konsekvens över relaterade åtgärder vid prioritering av vilka mönster som motiverade diskussion. Effektstorlekar tolkades som små (*f f* ≥ 0,10; $\eta^{2\,(OLI}$ ≥ 0,01), måttlig (*f f* ≥ 0,25, $\eta^{2\,(OLI}$ ≥ 0,006, eller stora (*f f* ≥ 0,40, $\eta^{2\,(OLI}$ ≥ 0,14).

3 Resultat

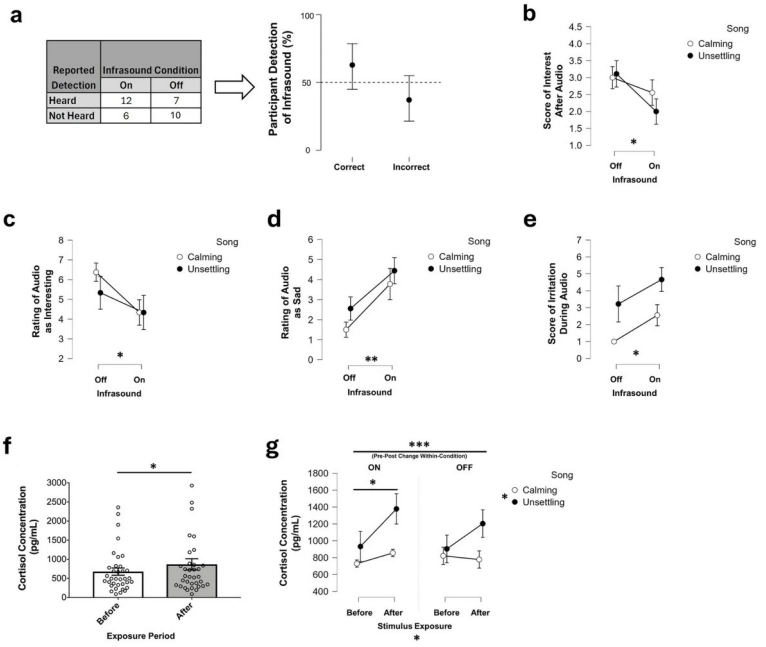
Vi fann att deltagarna i infraljud-på-tillståndet rapporterade högre irritation, lägre intresse och bedömde stimulansen som sorgligare än de i infraljudstillståndet. Infraljud höjde också salivkortisolnivåerna, både oberoende och i samband med irritation och obehag. Dessa själv-rapporterade skillnader och kortisolförändringar påverkades inte av musiktyp eller självrapporterad uppfattning om förekomsten av infraljud. Slutliga provstorlekar uppgick till *n (olika* = 9 deltagare per grupp (*n (olika*$_{\text{Totalt}}$ = 36; 9 män, 27 kvinnor; $\mu_{Ålder}$ = 23.471 y/o, *SEM (OLIKA* = 1.231, *Min.* = 18 y/o, *max* = 36 y/o). En deltagare uteslöts på grund av dålig salivprovkvalitet, vilket resulterade i *n (olika*$_{\text{Totalt}}$ = 35. Alla refererade tabeller finns i slutet av denna artikel och i Kompletterande material.

Känslighetsanalyser indikerade att med *N (engel* = 36, studien hade 80% effekt för att upptäcka stora mellan ämneseffekter (Cohens *f f* ≈ 0,6, $\eta^{2\,(OLI}$ ≈ 0.28) och måttlig till stor inom mellan interaktionseffekter i modellen före posten (*f f* ≈ 0.23–0.35*;* $\eta^{2\,(OLI}$ ≈ 0,05–0.11), medan mindre effekter skulle förväntas ha minskad effekt och bör tolkas med försiktighet.

3.1 Närvaro av infraljud

Vid utvärdering av deltagarnas förmåga att korrekt rapportera upptäckten av infraljud returnerade ett Chi-kvadrat självständighetstest mellan deltagarens rapporterade upptäckt och infraljud en *p*-värdet som var större än det konventionella 5–litageriumet (Figur 2a. *p* = 0,2406). Detta tyder på att skillnader i deltagarnas reaktioner på infraljud inte kan förklaras av korrekt självrapporterad uppfattning om förekomsten av infraljud.

Figur 2



3.2 Affektiva självrapporteringspoäng

Självrapporterade poäng utvärderades först på den allmänna nivån och sedan per post. Vid utvärdering av allmänna PANAS-poäng ensam observerades skillnader mellan villkor i övergripande positiv och negativ påverkan för betyg efter exponering som hänvisar till hur deltagarna kände *Under under* och *efter efter* ljudklämman, liksom i betyg av själva musikens affektiva egenskaper (Kompletterande figur S1. Kompletterande tabeller S1–S3). Även om det inte var signifikant, ledde dessa trender i differentiell affektiv rapportering mellan infraljudsförhållanden till en närmare undersökning av skillnader på punktnivå i de affektiva variablerna själva.

En måttlig till stor huvudeffekt av infraljud hittades på självrapporterat intresse efter exponering (Figur 2b, Tabell 1. $F(1, 31) = 4.410$, $p = 0{,}044$, $\eta^{2\ (OLI} = 0{,}121$). Deltagare i infraljud-on-förhållandet rapporterade lägre intresse än deltagare i infraljud-av-förhållandet. Inga ytterligare effekter hittades på alla andra variabler som rapporterade hur deltagarna kände efter stimulans-exponeringen (Tilläggssiffror 2a–g. $p > 0{,}05$).

Tabell 1

Självrapport variabel	**Riktning**	***F***	**df (olika betydelse**	***p (< 0,05)***	***η²*** *(OLI*	**Betydelse (*μ* > 0.002)**
Intresse efter exponering	↓	4.410 (olika betydelse	(1,31)	0.044**	0.121 (olika betydelse	0,004
Musik rankad som intressant	↓	4.290 (olika betydelse	(1,31)	0.047*	0.118 (olika betydelse	0.006 (olika betydelse
Musik rankad som sorglig	↑	11.078 (olika betydelser)	(1,31)	0.002***	0.253 (engelska	0.019 (olika betydelse
Irritabilitet under exponering	↑	4.176 (olika betydelse	(1,31)	0.049**	0,096 (olika betydelse	0.008 (OLIKA

Sammanfattning av effekter av infraljud på självrapporterade affektiva variabler. Riktningspilar representerar höjd eller minskning av rapporteringen. F motsvarar den teststatistik som gavs av 2 × 2 tvåvägs ANOVA. $\eta^{2\ (OLI}$ (eta-kvadrat) betecknar effektstorlek. Betydelsen återspeglar genomsnittliga variabler med variabel betydelse från den villkorade vinkelskogen; värden > 0,002 överskred den lägsta viktgränsen som används för att identifiera informativa prediktorer för infraljudsexponering. Fulla utgångar för varje effekt kan ses i Kompletterande tabeller S10–S13. *$p < 0{,}05$, **$p < 0{,}01$.

För deltagande beskrivning av musiken fanns det en måttlig till stor inverkan av infraljud om deltagarna tyckte att musiken var intressant (Figur 2c, Tabell 1. $F(1, 31) = 4.290$, $p = 0{,}047$, $\eta^{2\ (OLI} = 0{,}118$) där deltagarna rapporterade att de tyckte att musiken var mindre intressant när infraljudet var på. Deltagarna visade också en stor huvudeffekt av infraljud om de tyckte att musiken var ledsen (Figur 2d, Tabell 1. $F(1, 31) = 11.078$, $p = 0{,}002$, $\eta^{2\ (OLI} = 0{,}253$) när infraljudet var på. Inga ytterligare effekter hittades på alla andra variabler som rapporterade hur deltagarna beskrev musiken (Kompletterande siffror S3a-f. $p > 0{,}05$).

En huvudeffekt av infraljud på självrapporterad irritabilitet observerades (Figur 2e, Tabell 1. $F(1, 31) = 4.176$, $p = 0{,}049$, $\eta^{2\ (OLI} = 0{,}096$), vilket indikerar en ökning av irritabilitetsnivåer bland deltagarna under infraljudsexponeringen för musikklippet. Analys av andra känslomässiga reaktionerer under musikexponeringen visade inga ytterligare effekter (Kompletterande siffror S4a–f. $p < 0{,}05$), vilket tyder på att den observerade infraljudseffekten kan vara specifik för irritabilitet utan en bredare inverkan på deltagarnas känslomässiga tillstånd.

3.3 Kortisolnivåer

Oavsett självrapporterade affektiva poäng var kortisolkoncentrationerna högre post än preexponering i infraljudstillståndet (Figur 2f. $W\ (engel(35) = 192$, $p = 0{,}022$, $r_{rb\ (olika\ betydelse} = 0{,}390$) vilket visar en ökning av kortisol efter stimulusexponering. Explorativa kovariatjusterade analyser visade dock att infraljudrelaterade kortisolförändringseffekter kvarstod efter att ha

redovisat självrapporterad påverkan efter exponering. Dessa kovariatmodeller inkluderades som en robusthetskontroll, inte som bekräftande tester av högre ordningsinteraktioner.
Antaganden om normalitet och homoscessasticitet möttes för grupp självrapportering och kortisolnivåer, och en Trevägs ANOVA-modell (*Lugnt* vs. *oroande*, Infraljud *på* vs. *av, innan* vs. *efter efter* kortisolnivå) med PANAS-variablerna som kovariater ansågs lämpliga för data. Efter musikklippet hade känslan upprörd en stor huvudeffekt på kortisolbytet (Kompletterande tabell S4. $F(1, 30) = 10.413$, $p = 0{,}003$, $\eta^{2\,(OLI} = 0{,}215$) och att känna sig skyldig hade en liten interaktionseffekt med stimulusexponering på kortisolförändring (Kompletterande tabell S5. $F(1, 31) = 4.772$, $p = 0{,}037$, $\eta^{2\,(OLI} = 0{,}014$), även om båda resultaten var förväntade. Intressant nog hade infraljud en huvudeffekt på kortisolförändring även när man redogjorde för betydande känslor av irritabilitet (Tabell 2. $F(1, 31) = 4.557$, $p = 0{,}041$, $\eta^{2\,(OLI} = 0{,}106$), samt en måttlig huvudeffekt på kortisolförändring när man tar hänsyn till känslor av rädsla (Tabell 2. $F(1, 31) = 4.229$, $p = 0{,}049$, $\eta^{2\,(OLI} = 0{,}093$). Alla andra effekter av infraljud på kortisol förändring som står för självrapportering efter att musikklippet inte var signifikanta (Kompletterande tabell S6).
Tabell 2

Självrapport kovarierar	**Effekt på kortisol**	***F***	**df (olika betydelse**	***p* (< *0,05)***	***η²* (OLI**	**Betydelse (*μ* > 0.002)**
Irritabilitet efter exponering	↑	4.557 (olika betydelse	(1,31)	0.041*	0.106 (olika betydelse	< 0,002
Rädd efter exponering	↑	4.229 (olika betydelse	(1,31)	0.049**	0,093 (olika betydelse	< 0,002
Dåligt under exponering	↑	6,612	(1,31)	0.015*	0.125 (engelska	< 0,002
Irriterad under exponering	↑	5.609 (olika betydelser	(1,31)	0.025*	0.125 (engelska	0.008 (OLIKA

Unadjusted effects	**Effect level**	**Contrast**	**Effekt på kortisol**	**Inference**	***p* (< 0.05)**	***η²***
Stimulus exposure	Main	Before *vs.* After	↑	Increase over time	0.031*	0.142
Song	Main	Calming *vs.* unsettling	↑ (calming) ↓ (unsettling)	Parallels song affective valence	0.019*	0.084

Post-hoc comparison	**Corrected**	**Contrast**	**Effect on cortisol**	**Inference**	***P*$_{bonf}$ (< 0.05)**	***d***
Infrasound by calming *vs.* unsettling	Bonferroni	Infrasound/ calming *vs.* infrasound/unsettling	↑(calming)↓ (unsettling)	Higher cortisol across both song types post-exposure	0.045*	0.710
Infrasound by before *vs.* after exposure	Bonferroni	Infrasound/ before *vs.* infrasound/after	↑	Increased cortisol from pre-post within each infrasound condition	< 0.001***	0.347

Sammanfattning av infraljudsrelaterade effekter på salivkortisol över kovariatjusterade och ojusterade modeller.
Riktningspilar representerar höjd eller minskning av kortisolnivåer i samband med den angivna faktorn eller kontrasten. För kovarierade rader, F, *df (olika betydelse*, *p*, och $\eta^{2\,(OLI}$ summera infraljudseffekten på kortisol efter justering för den listade självrapporten covariate. Betydelsen återspeglar genomsnittliga variabler med variabel betydelse från den villkorade vinkelskogen; värden > 0,002 överskred den lägsta viktgränsen som används för att identifiera informativa prediktorer för infraljudsexponering. Post-hoc (olika betydelser) *p* Värden är Bonferroni-

korrigerade. Fulla utgångar för kovariatjusterade effekter kan ses i Kompletterande tabeller S14–S17. *p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001.

Under musikklippet hade infraljud en stor huvudeffekt på kortisolbytet när man redogjorde för rapporterade poäng av att må dåligt (Tabell 2. F(1, 31) = 6,612, p = 0,015, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,125) samt en annan stor effekt på kortisolförändring när man redovisar rapporterade poäng av känsla irriterad (Tabell 2. F(1, 31) = 5, 5,609, p = 0,025, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,125). Alla andra effekter på kortisolförändring som tar hänsyn till självrapporteringspoäng under musikklippet var inte betydande (Kompletterande tabell S7).

Inga signifikanta effekter hittades på kortisolbytet när man redovisar självrapporterade poäng på känsloladdad beskrivning av musikklippet (Kompletterande tabell S8).

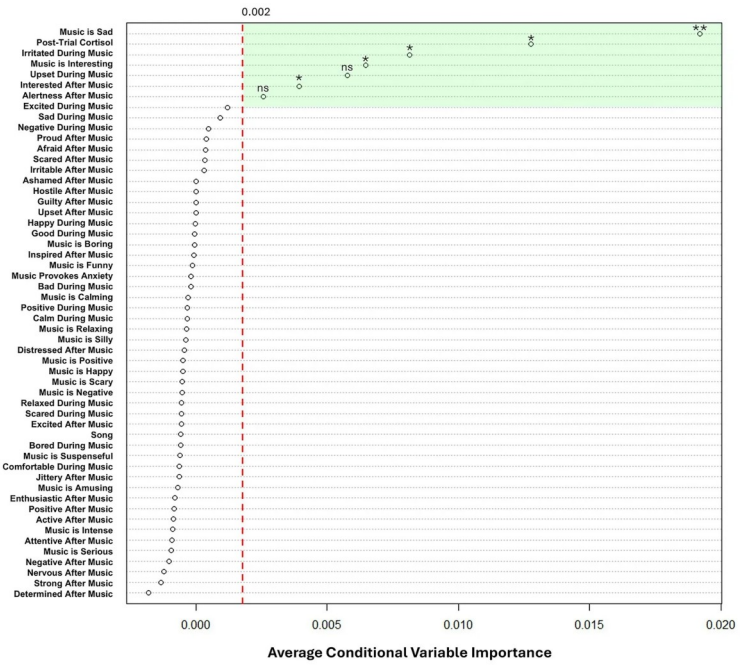
Inom den fullständiga ojusterade faktorn (dvs. utan kovariater i självrapportering) visade kortisolnivåerna en huvudeffekt av stimulusexponering (*före vs. efter.* p = 0,031, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0.142) och en huvudeffekt av sång (*Lugnande* vs. *oroande*. p = 0,019, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0,084) och Bonferroni-justerad *post hoc (olika betydelse* provningar indikerade signifikanta förändringar mellan grupper i kortisol i infraljudstillståndet ($p_{Bonf\ (olika\ betydelser)}$ = 0,045; d = 0,710) och inom-villkor pre-post kortisol förändringar i båda villkoren ($p_{Bonf\ (olika\ betydelser)}$ < 0,001; d = 0,347). En visualisering av dessa interaktioner mellan musik och infraljudsförhållanden kan ses i Figur 2gSlutsatser, interferensiella slutsatser bygger på den fullständiga faktorn och tolkas i samband med både statistisk signifikans och effektstorlekar för storlek.

3.4 Effekteffekter för deltagandet

Vid utvärdering av potentiella förväntade effekter på kortisolförändringar som orsakades av deltagarnas förväntningar om att infraljud var närvarande, visade det sig att det inte fanns någon huvudeffekt av deltagarnas självrapportering (Tilläggsfigur S5. Kompletterande tabell S9. F(1, 31) = 0,019, p = 0,891, $\eta^{2\ (OLI}$ < 0.001) eller en interaktionseffekt med den faktiska närvaron av infraljud (F(1, 31) = 0,166, p = 0,687, $\eta^{2\ (OLI}$ = 0.005) på kortisol förändring. Detta tyder på att deltagarna inte visade höjder i kortisolnivåer på grund av förutfattade meningar om att det fanns infraljud närvarande.

3.5 Undersökning av varierande betydelse *via* villkorliga innervängskogar

En villkorlig slutfenelskog (CIF) genomfördes för att undersöka varierande betydelse med avseende på förekomsten av infraljud. I denna analys monterades ett CIF innehållande 500 träd på 25 slumpmässiga permutationer av de variabler av intresse. Efter genomsnittliga viktiga poäng beräknades ett absolut minimum av de genomsnittliga viktpoängen vid μ = 0,002. I synnerhet deltagarbeskrivningar av musiken som sorgliga (μ = 0,019, *SD (SMD* = 0,002), kortisolnivåer efter ljudexponeringen (μ = 0,012, *SD (SMD* = 0,003), irritation under musiken (μ = 0,008, *SD (SMD* = 0,002), beskrivning av musiken som intressant (μ = 0,006, *SD (SMD* = 0,002), känner sig upprörd under musiken (μ = 0,006, *SD (SMD* = 0,002), intressekänslor efter exponering (μ = 0,004, *SD (SMD* = 0,002) och känslor av vakenhet (μ = 0,003, *SD (SMD* = 0.002) var de enda variablerna med genomsnittlig betydelse poäng över μ = 0,002. Dessa resultat kan ses i Figur 3. Figur 3



En andra CIF monterades för att bedöma varierande betydelse med avseende på kortisolförändring. Efter det förfarande som beskrivs för infraljud beräknade vi det absoluta minimumet av den genomsnittliga viktpoängen som ska vara $\mu = 0{,}002$. I synnerhet returnerade närvaron av infraljud en genomsnittlig viktig poäng ($\mu = 0{,}06$, *SD (SMD* = 0,01) över $\mu = 0{,}002$. Tilläggsfigur S6 av det kompletterande materialet visar resultaten från detta CIF som visar att fördelningen av variabel betydelse för både infraljud och kortisolförändring är likartade.

4 Diskussion

4.1 Infraljud framkallar negativa affektiva och fysiologiska reaktioner

I linje med våra primära mål var infraljudsexponering förknippad med mer negativa självrapporterade reaktioner och ökad salivkortisol. Dessa resultat tolkas i samband med självrapporten efter exponering och pre-post cortisol mönster. Deltagare i *Infraround-on* tillstånd rapporterade mer negativ effekt efter exponering än de i *Infraround-off* skick, över musikförhållanden. Självrapportåtgärder visade att infraljud minskade intresset för musiken, ökad irritation under lyssnandet och ökade beskrivningar av musiken som sorgliga över båda förhållandena. Självrapportpoäng bekräftade också att lugnande musik ökade positiv påverkan och oroande musik ökade negativ påverkan, oavsett infraljud. Infraljud förhöjde kortisolnivåer hos deltagare som rapporterade större känslor av skuld och upprördhet samtidigt som de visade liknande effekter oberoende av att må dåligt och irriterat. Detta tyder på att även om *Infraround-on* Tillståndet var förknippat med mer negativ påverkan efter exponering (särskilt högre disränta och irritation), kortisolnivåerna ökade även när man redovisade förhöjda negativa humörtillstånd. Detta belyser både subjektiva och fysiologiska bevis på infraljudsutvisade negativa effekter och aversion. Viktigt är att inga anmärkningsvärda effekter av infraljud hittades på mått på positiv påverkan och CIF-resultaten överensstämde i stort sett med betydelsen, där nivåerna av kortisol, sorg, irritation och intresse var viktiga prediktorer. Dessa resultat verkar stödja tidigare studier som tyder på att infraljud kan öka negativ påverkan och framkallar aversiva reaktioner hos människor.

4.2 Avsaknad av medveten detektering och förväntad effekt

Deltagarna verkade inte vara bättre än chansen att identifiera närvaron av infraljud, och om deltagarnas tankeinfraljud var närvarande eller inte visade sig vara låg som en prediktor för närvaron av infraljud. Utöver detta visade deltagarnas förväntningar på närvaron av infraljud inte ett statistiskt detekterbart samband med kortisolnivåförändring. Detta tyder på att känslomässiga och fysiologiska förändringar sannolikt inte skulle förklaras av medvetna audition- eller delta-expektiva effekter. Sådana resultat stöder tidigare forskning som tyder på att även om människor vanligtvis inte hörbart kan upptäcka infraljudsfrekvenser (dvs. under ~20 Hz) (.), närvaron av infraljud kan fortfarande påverka känslomässiga tillstånd eller beteendemässiga reaktioner (. .). Deltagare som utsattes för infraljud rapporterade att de kände mindre intresse och beskrev själva musikklippet som mindre intressant och mer sorgligt än de som inte var det. Tillsammans med ökad irritabilitet under musikklippet med infraljud på, tyder dessa resultat på att infraljud kan vara aversiv för människor och kan påverka humöret negativt.

4.3 Infraljud framkallar irritabilitet och irritation snarare än ångest

Intressant nog upptäcktes inte ökningar av självrapporterad ångest, trots vanliga förslag om att infraljud kan vara anxiogenic. Ökad irritabilitet, dock, utan en ökning av ångestrelaterade variabler paralleller tidigare forskning som tyder på att infraljud intensifierar irritation (.) snarare än ångest (). Djurmodeller har använts för att studera infraljudets negativa påverkan på beteendet, med vissa

fiskarter som uppvisar aversiva reaktioner på infraljud (. . . . .) som vanligtvis kan tolkas som ångestliknande eller rädsla-liknande beteenden. Dessa aversiva effekter hittades vid amplituder och frekvenser som liknar de som kan upplevas när de var i närheten av mänsklig infrastruktur (. .) och de som används i denna studie. Till exempel () fann att 15 Hz infraljud utlöste avstötande beteendemässiga reaktioner i vild typ zebrafisk (*Kategori: Danio rerio*) under ett kontrollerat öppet fälttest. I dessa fiskstudier upptäckte djur infraljud via de otolitiska organen. Medan människor uppfattar auditiva stimuli istället via cochleatransduktion, är otoliter fortfarande närvarande och ansvariga för liknande vestibulära sinnen, vilket tyder på att infraljud kan detekteras genom underagrandentiv uppfattning (. . .). Det är möjligt att markbundna ryggradsdjur (t.ex. människor) behöll infrasonic uppfattning genom otoliterna som en icke-granuitologisk mening, medan audition migrerade till cochlea över tiden. Dessutom erbjuder den omfattande anslutningen mellan det vestibulära systemet och det limbiska systemet hos människor potentiella insikter om hur vestibulär känsla påverkar känslomässiga reaktioner (. .).

4.4 Förhållandet mellan irritation, kortisol och aversion

Förändringarna i kortisol stärker ytterligare sambandet mellan exponering för infraljud och mänsklig aversion. Kortisol tolkades som ett valens-ospecifikt index för stressrelaterad upphetsning, medan självrapporteringsåtgärder användes för att ge ett affektivt sammanhang för att tolka erfarenhetsriktningen. Infraljud ökade kortisolnivåerna även när man redogör för de ökade känslor av irritabilitet som redan finns i självrapportåtgärderna. Infraljud ökade också kortisol när man redogör för känslor av rädsla och obehag (känner sig "dålig"). Marginella bevis noterades också i att infraljud kan ha skadliga effekter på nivåer av spänning och sorg också. Dessa resultat överensstämmer med tidigare resultat att infraljud framkallar irritation både beteendemässigt och fysiologiskt (.). Intressant nog var uppfattningen av musiken som "ledsen" både den viktigaste och viktigaste prediktorn för närvaron av infraljud och näst viktigaste prediktor för kortisolförändring. Detta kan tolkas som en affektiv komponent som kompletterar effekterna på irritation och ointresse, uttryckt som resulterande känslomässigt obehag som negativt påverkar humöret.

Det negativt affektiva elementet till de uppenbara irriterande effekterna av infraljud väcker ytterligare oro över vilka effekter som mer långvarig exponering kan ha på känslomässigt välbefinnande över tiden. Dessa resultat var oberoende av någon interaktion med tidens gång (*före vs. efter*), vilket visar att infraljud hade sådana effekter oavsett någon medfödd kortisolökning som inträffade under försöksperioden (dvs. deltagarna blev frustrerade över försökets längd). Viktigt är att effekterna av infraljudstillstånd (*på vs. av*) på kortisol observerades över båda musikförhållandena, vilket indikerar att detta mönster inte heller sannolikt drevs av eller förvirrades med musiktyp. Tidigare rumsvalidering tyder vidare på att det är osannolikt att okontrollerade bakgrundsinfraljudsskillnader står för dessa resultat.

4.5 Begränsningar och anvisningar för framtida forskning

Mönstren av irritation och ointresse i denna studie, tolkade som en ofrivillig motvilja, motsvarar de undvikande reaktioner som observerats i zebrafisk, som visar infraljud-utdragen aversion. För att ytterligare undersöka detta resultat kan framtida studier undersöka de irriterande och avstötande effekterna av infraljud med hjälp av tester som är speciellt utformade för att upptäcka skillnader och förändringar i varje, såsom Brief Irritability Test () eller multipel-objektens irritationsskala (). Denna studie utsatte också endast deltagarna för ett tillstånd där infraljud antingen var närvarande eller frånvarande och förlitade sig starkt på självrapporteringsåtgärder efter exponering för att indikera känslomässiga affektiva reaktioner. För att stärka bevisen för de irriterande och aversiva egenskaperna hos infraljud beteendemässigt kan framtida studier använda en tvångsvalsuppgift där deltagarna väljer mellan ljudstimuli med eller utan infraljud. Detta skulle bedöma om deltagarna föredrar att undvika stimuli som innehåller infraljudsfrekvenser. På samma sätt samlades PANAS-data endast in efter exponering utan en baslinje för jämförelse, vilket gör att undersubjektkontroll av självrapporterade affektiva förändringar var svåra att kvantifiera eller verifiera. Följaktligen bör PANAS-fynd tolkas som skillnader efter exponering mellan randomiserade tillstånd. En pre-exponering PANAS kan också introducera priming eller förväntad livslängd genom att cue deltagarna för att övervaka specifika känslor under den efterföljande infraljudsexponeringen, och

därför kan denna begränsning helt enkelt presentera som en avvägning i design mellan experimentell kontroll och jämförelse av baslinjen.
När det gäller frekvens användes endast ett mål (~ 18 Hz) baserat på tidigare fynd hos zebrafiskar (), stimulansvalidering och rumsoptimering. Även om detta mål ansågs lämpligt för denna studie, bör framtida studier undersöka om liknande eller null effekter kan observeras i en rad frekvensmål över eller under ~ 18 Hz. Den blygsamma provstorleken och användningen av ett bekvämlighetsprov av unga vuxna studenter begränsar generaliserbarheten till andra åldersgrupper och populationer. Medan randomisering över förhållanden i vår mellansubjektdesign hjälpte till att minska sannolikheten för individuella skillnader i hörselförmåga och lyssningsbeteende, bör framtida studier replikera dessa resultat i större och mer olika prover. Med tanke på att provet var övervägande kvinnlig, representerar menstruationscykelfas och hormonell preventivanvändning ouppmätta källor till variation som kan påverka kortisolkoncentrationer och fysiologisk eller känslomässig lyhördhet. Dessa variabler registrerades inte i denna studie och bör bedömas eller övervägas i framtida arbete där det är möjligt.
Det viktigaste, Figur 2f illustrerar att musikklipp utan infraljudsnuva gav de förväntade effekterna av lugnande musik, minska kortisolnivåerna och oroande musikhöjande kortisolnivåer. Lika anmärkningsvärt var omkastningen av den lugnande musikeffekten och intensifieringen av reaktioner på den oroande musiken när infraljudet var på. Dessa resultat visade också att tidpunkten mellan initiala och poststimulerande prover var tillräckligt känslig för att upptäcka förändringar i kortisolnivåer (Figur 2f). Framtida studier kommer att validera dessa resultat genom att analysera blod- eller urinprover för att bekräfta salivmått för kortisolförändring på grund av infraljudexponering med stimulanstid och provtagningstider justerat enligt fysiologin för varje metod. Även om tillståndstilldelningen var balanserad över testfönstret och kortisol bedömdes med hjälp av byte före post, återspeglar salivkortisol en latent fysiologisk reaktion och därför bör preexponeringsprovet inte tolkas som en rent omedelbar baslinje. Framtida studier kan ytterligare minska risken för tidsprestanda genom att begränsa sessioner till snävare tidsfönster eller uttryckligen modellera specifika dagliga tidspunkter. Framtida studier kommer också att återbesöka djurmodeller, utnyttja salivkortisol som en biomarkör för infraljudd iraklet, för att validera tidigare resultat och stärka resultaten av denna studie. Detta kommer att inkludera att återvända till zebrafiskmodellen av infraljud-utvisade aversion av , bedöma replika djur för kortisolnivåförändringar i hudslemhinnan (. .), koncentrationer av innehav av vatten (.), blodplasma (), eller helkroppsprovtagning (.). Replikerat experiment med hjälp av däggdjursdjurmodeller (t.ex. gnagare) kommer också att anses fastställa generaliserbarhet. Slutligen bedömde utvärderingen av förväntanseffekter på kortisolförändringen i denna studie endast deltagarrapporter om huruvida de trodde att infraljudet var på eller av utan att ta hänsyn till hur starkt de kände sina reaktioner. En framtida studie kan ytterligare undersöka effekterna av deltagarnas förväntningar genom att informera en deltagare om att infraljudet är på och utvärdera deras självrapport och fysiologiska reaktioner oavsett om infraljudet verkligen är på eller inte.

4.6 Slutsats

Sammantaget använde denna studie en kombination av självrapportering och biologiska åtgärder för att visa att infraljud kan ha irriterande och aversiva egenskaper på människor. På samma sätt verkar infraljud påverka ökningar av negativ affektiv utvärdering. Inga bevis upptäcktes i detta prov som tyder på att infraljud är anxiogent eller framkallar positiv påverkan under exponering för positiva stimuli, vilket innebär att infraljud är förknippad med negativt affektiva tillstånd och inte en allmän ökning av upphetsning. Med tanke på förekomsten av infraljud i och runt mänskliga livsmiljöer betonar dessa resultat det potentiella värdet av att identifiera och mildra källor till infraljuds-föroreningar i våra miljöer.

Uttalanden

Utlåtande för datatillgänglighet

De ursprungliga bidragen som presenteras i studien ingår i artikeln/Kompletterande materialYtterligare förfrågningar kan riktas till motsvarande författare.

Etik uttalande
Studierna med människor godkändes av MacEwan University Research Ethics Board. Studierna genomfördes i enlighet med den lokala lagstiftningen och de institutionella kraven. Deltagarna gav sitt skriftliga informerade samtycke till att delta i denna studie.
Bidrag från författaren
KS: Konceptualisering, Formell analys, Skrivande – recension & redigering, Metod, Undersökning, Skrivande – originalutkast. DV: Undersökning, Skrivande – recension & redigering, Skrivande – originalutkast. LP: Konceptualisering, Skrivande – recension & redigering, Metodik. BF: Formell analys, Skrivande – originalutkast, Skrivande – recension & redigering. TH: Resurser, Konceptualisering, Skrivande – recension & redigering, Finansieringsförvärv, Skrivande – originalutkast. RS: Skrivande – originalutkast, Metodik, Konceptualisering, Finansieringsförvärv, Resurser, Formell analys, Skrivande – recension & redigering, Övervakning, Projektadministration.
Finansiering
Författaren eller författarna förklarade att ekonomiskt stöd mottogs för detta arbete och/eller dess publicering. Detta projekt finansierades av ett Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Discovery Grant (03403) som innehades av TH.
Erkännanden
Författarna vill tacka Danielle Stimeler för hennes hjälp i utformningen av Qualtrics-undersökningen som används för självrapporteringsåtgärder i studien; Jennifer Bubenko och MacEwan Biological Sciences-labbet för deras hjälp med ELISA-protokollet och utlåning av obligatoriska laboratoriearbetsutrymmen och utrustning; och slutligen University of Alberta Symphony Orchestra (uppförande av Petar Dundjerski) och Grand Mal (CAD)
Konflikt av intresse
Författaren eller författarna förklarade att detta arbete utfördes i avsaknad av kommersiella eller finansiella relationer som kunde tolkas som en potentiell intressekonflikt.
Författaren TH förklarade att de var en redaktionsledamot i Frontiers, vid tidpunkten för inlämningen. Detta påverkade inte peer review-processen och det slutliga beslutet.
Generativ AI uttalande
Författaren eller författarna förklarade att generativ AI inte användes vid skapandet av detta manuskript.
Alla alternativa texter (alt text) som tillhandahålls tillsammans med siffror i denna artikel har genererats av Frontiers med stöd av artificiell intelligens och rimliga ansträngningar har gjorts för att säkerställa noggrannhet, inklusive granskning av författarna där det är möjligt. Om du identifierar några problem, vänligen kontakta oss.
Förlagets anteckning
Alla påståenden som uttrycks i denna artikel är endast författarnas och representerar inte nödvändigtvis deras anslutna organisationer, eller de av utgivaren, redaktörerna och granskarna. Alla produkter som kan utvärderas i den här artikeln, eller påstående som kan göras av tillverkaren, garanteras inte eller godkänts av utgivaren.
/Anm. Nedreglering av Cx43 HC betyder att celler producerar mindre mängd av detta protein, varvid antalet fungerande HC (hemikanaler) minskar på cellytan. Cx43 (Connexin 43) är ett protein som fungerar som byggsten (rör) som sätts ihop till hemikanaler (HC, Hemichannels), som går genom cellens vägg. Kanalerna låter celler skicka små molekyler (som energi och signalsubstanser) till varandra eller till omgivningen)/.Forskning visar att detta ofta sker vid sjukdomar, till exempel i hjärnan eller i blodkärl. Det kan leda till att celler dör lättare eller att cancerceller blir mer aggressiva och sprider sig.
När det sker en nedreglering (minskning) av Cx43 HC i hjärnan och nervsystemet påverkas framförallt astrocyterna, som är stödjeceller som skyddar och matar nervcellerna. Eftersom Cx43 är det dominerande kanalproteinet i dessa celler, får en minskning avsevärda konsekvenser för hjärnans funktion. Både skadliga och i vissa fall skyddande.
1. Störd energiförsörjning och metabolisk obalans

Astrocyter använder sina kanaler för att skicka näring (som glukos och laktat) till aktiva nervceller. När Cx43-kanalerna minskar drabbas nervcellerna drastiskt av energibrist. Detta försämrar hjärnans plasticitet, vilket innebär att det blir svårare för hjärnan att lära sig nya saker, minnas och reparera sig själv.
2. Depression och humörsvängningar. Forskning har visat en direkt koppling mellan minskat Cx43 i hjärnan och psykisk ohälsa. Hos patienter med svår depression (MDD) ser man ofta en kraftig nedreglering av Cx43 i pannloben. När kanalerna minskar störs frisättningen av viktiga signalämnen som ATP och glutamat. Det bidrar till den kemiska obalans och minskade cellförnyelse som är typisk för depression. Antidepressiva läkemedel fungerar ibland genom att just återställa eller korrigera dessa kanaler.
3. Försvagat skydd vid neurodegenerativa sjukdomar
Vid sjukdomar som Parkinsons sjukdom har man observerat en nedreglering av Cx43 i sena stadier. När stödsystemet kollapsar förlorar astrocyterna sin förmåga att skydda nervcellerna mot skadliga ämnen. Detta påskyndar nervcellsdöd och förvärrar sjukdomsförloppet.
Dubbelsidig effekt: Nedreglering är oftast negativ, men ny forskning visar att det i specifika situationer kan vara ett försvar:
Hjärnskada och stroke: Direkt efter en stroke eller trauma kan Cx43-hemikanaler öppnas okontrollerat och läcka ut giftiga mängder glutamat och ATP, vilket dödar omgivande celler. En nedreglering eller blockering av dessa hemikanaler kan då faktiskt skydda hjärnan från att skadan sprider sig.
Alzheimers sjukdom: Studier visar att blockering eller minskning av Cx43-hemikanaler i hjärnans immunceller (microglia) kan växla om cellerna till att bli neuroprotektiva (skyddande) och hjälpa till att rensa bort skadliga plack.
Sammanfattning
I en frisk hjärna leder en nedreglering av Cx43 HC till ***sämre signalering, energibrist och ökad sårbarhet för depression****. Men i ett akut sjukdomstillstånd (som stroke eller inflammation) kan en sänkning av hemikanalernas aktivitet fungera som en nödbroms för att stoppa spridningen av celldöd.*
Påverkan av celler och deras funktion:
Vid nedreglering av Cx43 HC rubbas balansen mellan två helt olika sätt som kanaler fungerar på: gap junctions (kanaler mellan celler) och hemikanaler (kanaler ut till omgivningen). Minskningen förändrar dramatiskt hur celler pratar med varandra och avgör ofta om en cell överlever eller dör.
1. Påverkan på cellernas kommunikation
Cx43-proteiner bygger upp två typer av kommunikationsvägar. Nedregleringen slår hårt mot båda:
Bruten direktkontakt (Gap Junctions): Normalt kopplas två hemikanaler ihop från varsin cell för att bilda en tunnel (gap junction). Härigenom delar celler blixtsnabbt joner, energi och signalsubstanser. När Cx43 minskar isoleras cellerna från varandra. De kan ***inte längre synkronisera sina funktioner eller hjälpa grannceller i kris****.*
Stoppad extern signalering (Hemichannels): Enskilda hemikanaler (HC) öppnas mot vätskan utanför cellen för att släppa ut viktiga signalmolekyler som ATP och glutamat. Vid en nedreglering stryps detta flöde, vilket tystar cellens förmåga att skicka "parakrina" signaler till celler som ligger en bit bort.
2. Påverkan på celldöd (Apoptos och Nekros)
Effekten på celldöd är komplex och beror helt på om cellen är frisk eller redan skadad. Nedregleringen fungerar som ett tveeggat svärd:
A. Hur det LEDER TILL celldöd (Den negativa effekten)
I frisk vävnad är Cx43 livsviktigt för överlevnad. En nedreglering kan starta en dödsprocess:
Isolering och svält: När celler tappar kontakten med sina grannar förlorar de tillgång till delad näring och tillväxtfaktorer. Detta kan trigga programmerad celldöd (apoptos).
Känslighet för stress: Utan fungerande Cx43-kanaler kan celler inte metabolisera bort skadliga restprodukter eller hantera oxidativ stress, vilket gör att de dör lättare.
B. Hur det SKYDDAR MOT celldöd (Den positiva effekten)

Vid akuta skador, som hjärtinfarkt, stroke eller kraftig inflammation, blir Cx43-hemikanaler (HC) ofta hyperaktiva. De öppnas för mycket, vilket dödar cellen genom att cellen sväller och spricker (nekros). I dessa fall är en nedreglering räddningen:

Stoppar "bystander-effekten": När en cell dör skickar den ut giftiga "dödssignaler" till sina grannar genom gap junctions. Om Cx43 nedregleras stängs tunnlarna. Skadan isoleras och granncellerna överlever.
Förhindrar energiläckage: Genom att minska antalet öppna hemikanaler (HC) hindrar cellen att livsviktigt ATP och joner läcker ut i tomma intet, vilket sparar cellens energi och håller den vid liv.
Sammanfattning
En nedreglering isolerar cellen. I en normal, frisk miljö leder denna isolering till att cellen fungerar sämre och riskerar att dö. Men i en akut krissituation fungerar nedregleringen som en skyddsbarriär som hindrar giftiga ämnen från att spridas och räddar omgivande vävnad från celldöd.
Vill du veta mer om de specifika signalsubstanser (som ATP eller kalcium) som blockeras, eller vill du gå vidare till hur detta påverkar det sista området, cancer och tumörtillväxt?
….…....
När Cx43 HC (hemikanaler) nedregleras, stryps transporten av mycket specifika molekyler och joner genom cellmembranet. Cx43-kanaler är selektiva baserat på storlek och laddning; de släpper generellt igenom hydrofila (vattenlösliga) molekyler som är mindre än 1 kilodalton (kDa).
<u>De viktigaste signalsubstanserna och jonerna vars flöde blockeras, och vad det får för biologiska konsekvenser</u>:
1. ATP (Adenosintrifosfat) – Cellens energivaluta och nödsignal
ATP fungerar inte bara som energi inuti cellen, utan är också en kritisk budbärare utanför cellen (så kallad purinerg signalering).
Vad som händer normalt: Celler släpper ut ATP genom Cx43-hemikanaler till vätskan utanför för att signalera till immunceller, reglera blodflöde eller kommunicera med nervceller.
Effekt vid blockering/nedreglering: Det extracellulära flödet av ATP minskar drastiskt.
I nervsystemet dämpar detta kommunikationen mellan astrocyter och neuroner.
Vid inflammation kan det vara positivt, eftersom för mycket ATP utanför cellerna fungerar som en stark varningssignal som driver på kronisk inflammation och smärta.
2. Kalciumjoner (\(Ca^{2+}\)) och \(IP_{3}\) – De synkroniserade kalciumvågorna
Kalcium är den viktigaste sekundära budbäraren för cellkontroll. \(IP_{3}\) (Inositoltrifosfat) är molekylen som frigör kalcium inuti cellen.
Vad som händer normalt: Celler skickar \(IP_{3}\) direkt till varandra via gap junctions, eller släpper ut ATP via hemikanaler vilket aktiverar kalciuminsläpp i granncellerna. Detta skapar en koordinerad kalciumvåg som gör att tusentals celler kan agera som en enda enhet (t.ex. vid hjärtslag eller astrocyt-aktivitet i hjärnan).
Effekt vid blockering/nedreglering: Kalciumvågorna bryts helt. Cellerna kan inte längre synkronisera sina svar. Detta förhindrar spridning av celldöd vid skada, men förstör samtidigt hjärnans förmåga till storskalig informationsbehandling och hjärtats rytmiska koordination.
3. Glutamat – Den livsviktiga men farliga signalsubstansen
Glutamat är hjärnans primära gaspedal (excitatorisk signalsubstans).
Vad som händer normalt: Vid intensiv hjärnaktivitet eller under embryonal utveckling kan Cx43 HC bistå med att reglera eller frisätta glutamat.
Effekt vid blockering/nedreglering: Nedregleringen stoppar okontrollerat utsläpp av glutamat. Detta är extremt viktigt vid stroke eller trauma, då hyperaktiva hemikanaler annars kastar ut giftiga mängder glutamat. För mycket glutamat utanför cellerna leder till excitotoxicitet – att nervceller överstimuleras till döds genom ett massivt, okontrollerat inflöde av just kalcium. Nedregleringen skyddar alltså mot detta.
4. Adenosin och NAD+ – Ämnesomsättning och inflammation
Adenosin: Bildas när ATP bryts ner. Det är en dämpande signalsubstans som skyddar hjärnan och gör oss sömniga. Blockeras Cx43 HC, minskar det extracellulära adenosinet, vilket kan störa hjärnans

inbyggda skyddsmekanismer mot kramper och epilepsi.
NAD+ (Nikotinamidadenindinukleotid): En nyckelmolekyl för cellens energiomsättning och reparation av DNA. När flödet av NAD+ genom hemikanalerna blockeras, påverkas cellens förmåga att hantera åldrande och oxidativ stress i den extracellulära miljön.
…….
*När blockeringen av **ATP** och **kalciumvågor (Ca^{2+}-vågor)** sker i hjärnan på grund av nedreglerat Cx43, slår det direkt mot hjärnans "sociala nätverk".*
*I hjärnan är det framför allt **astrocyterna** (stödjecellerna) som använder denna specifika mekanism för att prata med varandra över långa avstånd. De har inga elektriska impulser som nervceller, utan deras språk är helt kemiskt och baseras på just ATP och kalcium.*
Så här hänger blockeringen ihop med hjärnans specifika funktioner:
1. Hjärnans dämpade "samtal" (Gliotransmission)
Astrocyter lyssnar på nervcellernas elektriska aktivitet. När en nervcell är aktiv, svarar astrocytens Cx43-hemikanaler med att släppa ut ATP i utrymmet mellan cellerna. Detta ATP binder till mottagare (receptorer) på grann-astrocyter, vilket triggar dem att frigöra kalcium inuti sina celler.
***Mekanismen:** Denna kalciumhöjning gör att nästa astrocyt släpper ut mer ATP. Det skapar en dominoeffekt – en **kalciumvåg** – som kan färdas genom stora delar av hjärnan.*
***Konsekvens vid blockering:** När Cx43 minskar bryts dominokedjan i första steget. Hjärnans stödjevävnad blir "stum". Astrocyterna kan inte längre samordna sitt stöd till nervcellerna, vilket leder till trögare signalbehandling.*
2. Sämre minne och inlärning (Synaptisk plasticitet)
För att vi ska kunna lära oss saker måste kopplingarna mellan nervceller (synapserna) kunna förstärkas. Detta kallas synaptisk plasticitet (eller LTP – Long-Term Potentiation). Astrocyternas kalciumvågor och ATP-utsläpp är helt nödvändiga för att styra denna process.
***Konsekvens vid blockering:** Utan ATP och kalciumvågor kan astrocyterna inte frisätta de näringsämnen och tillväxtfaktorer som krävs för att stabilisera nya minnesspår. Resultatet blir kognitiva svårigheter och sämre närminne.*
3. Stört blodflöde (Neurovaskulär koppling)
Hjärnan har inget centralt energilager, utan blodflödet måste hela tiden styras till de exakta områden som arbetar just nu (t.ex. till syncentrum när du läser). Det är astrocyternas kalciumvågor som känner av var energin behövs och skickar signaler till blodkärlen att vidga sig.
***Konsekvens vid blockering:** När kalciumvågorna blockeras förlorar hjärnan sin förmåga till lokal blodreglering. Blodkärlen reagerar inte optimalt på nervcellernas energibehov, vilket kan leda till lokal syrebrist under intensivt hjärnarbete.*
4. Sömn och hjärntvätt (Det glymfatiska systemet)
När vi sover krymper astrocyterna något för att tillåta hjärnvätska att skölja rent hjärnan från giftiga proteiner (som beta-amyloid, vilket kopplas till Alzheimers). Denna synkroniserade "pumpservice" styrs till stor del av globala kalciumvågor i astrocytnätverket.
***Konsekvens vid blockering:** Blockeringen stör synkroniseringen. Hjärnans nattliga städning blir ineffektiv, vilket på sikt ökar risken för att skadliga restprodukter ansamlas i hjärnvävnaden.*
Sammanfattning: Det tveeggade svärdet i hjärnan

Funktion	***Normalt (Med ATP & Ca^{2+}-vågor)***	***Vid blockering (Nedreglerat Cx43)***
Inlärning	*Synapser stärks, minnen formas*	*Svårare att lagra ny information*
Blodflöde	*Blod styrs till aktiva områden*	*Sämre energiförsörjning vid ansträngning*
Hjärntvätt	*Slaggprodukter rensas under sömn*	*Sämre rensning, ökad risk för plack*
Vid Stroke / Trauma	*Skadesignaler sprids till friska celler*	***Skyddande:** Skadan isoleras och begränsas*

I den vardagliga, friska hjärnan leder blockeringen alltså till att vi blir mentalt trögare, får sämre minne och sämre återhämtning. Men om du drabbas av en akut syrebrist eller en smäll mot huvudet, är denna blockering hjärnans bästa sätt att "stänga dörren" till det skadade området så att inte hela nervsystemet kollapsar
…….

*När det gäller **cancer och tumörtillväxt** är nedregleringen av **Cx43 HC** och gap junctions ett av de mest studerade områdena inom tumörbiologi. Cx43 beskrivs ofta klassiskt som en **tumörsuppressor** (ett protein som bromsar cancer), vilket innebär att en nedreglering oftast hjälper tumören att växa och sprida sig.*
Men precis som i hjärnan är bilden komplex: cancerceller är extremt smarta och kan utnyttja både bristen på kanaler och förekomsten av dem i olika stadier av sjukdomen.
Nedregleringen av Cx43 påverkar cancerns utveckling steg för steg:
1. Frisläppning från cellkontroll (Tumörtillväxt)
I normal vävnad skickar celler stoppsignaler till varandra via gap junctions när det börjar bli trångt. Detta kallas kontakthämning och förhindrar att celler delar sig okontrollerat.
***Effekt vid nedreglering:** När Cx43 nedregleras klipper cancercellen kontakten med sina friska grannceller. Den blir "blind" för omgivningens stoppsignaler och kan börja dela sig helt okontrollerat, vilket leder till att tumören växer snabbt.*
2. Ökad överlevnad och motstånd mot celldöd
Normalt sett ska en cell som blir skadad eller muterad begå självmord (apoptos). Omgivande friska celler kan också skicka signaler via Cx43 för att tvinga en defekt cell till apoptos.
***Effekt vid nedreglering:** Genom att stänga ner Cx43-kanalerna isolerar sig cancercellen. Den slutar ta emot de yttre orderna om celldöd och blir dessutom mycket mer resistent mot **cytostatika (cellgifter)** och **strålbehandling**, eftersom cellen inte kan sprida vidare den stress eller de skadesignaler som behandlingen orsakar.*
3. Metastasering – Cancern börjar vandra
Detta är ett av de mest fascinerande och lömska stegen. Här ändrar Cx43 roll beroende på var cancercellen befinner sig:
***I primärtumören (Nedreglering är fördelaktigt):** För att cancerceller ska kunna lossna från modertumören och ta sig ut i blodet måste de släppa taget om varandra. Här är en kraftig nedreglering av Cx43 helt nödvändig för att cellerna ska bli rörliga.*
***Vid fäste i ett nytt organ (Uppreglering sker ofta):** När cancercellen väl har färdats till exempelvis hjärnan eller lungorna, händer något paradoxalt. Cancercellen börjar ofta öka (uppreglera) Cx43 igen. Den använder då Cx43-hemikanaler och gap junctions för att "hacka" de friska cellerna på den nya platsen (t.ex. astrocyter i hjärnan), stjäla deras näring (ATP/glukos) och etablera en ny metastas.*
Sammanfattning: Cx43 i olika cancerstadier

Stadium	*Cx43-status*	*Vad det innebär för cancern*
Tidigt stadium	***Nedreglerat***	*Cancercellen ignorerar stoppsignaler, delar sig fritt och undviker celldöd.*
Behandling	***Nedreglerat***	*Tumören blir mer resistent mot cellgifter eftersom cellerna är isolerade.*
Spridning (Metastas)	***Först nedreglerat, sedan uppreglerat***	*Nedregleras för att lossna från tumören → uppregleras sedan för att docka i det nya organet och stjäla näring.*

*Inom modern cancerforskning försöker man hitta läkemedel som antingen kan **återställa** Cx43 i de tidiga stadierna (för att tvinga cancercellerna att lyssna på stoppsignaler igen), eller **blockera** kanalerna i de sena stadierna för att hindra metastaser från att suga näring ur frisk vävnad./*

Frågor:
Kan infraljud orsaka nedreglering av hemikanaler Cx43?
Ja, forskning visar att exponering för infraljud kan påverka uttrycket av Cx43, men effekten på hemikanalerna är paradoxal. Själva infraljudet orsakar primärt en skadlig *aktivering* av kanalerna, medan en nedreglering av Cx43 fungerar som kroppens eller forskarnas sätt att skydda sig mot skadan. [1]

Neurobiologiska studier visar hur infraljud hänger ihop med Cx43-hemikanaler i hjärnan:

1. Infraljud orsakar patologisk AKTIVERING (inte nedreglering)

När hjärnans astrocyter (stödjeceller) utsätts för infraljud reagerar de på vibrationerna och den medföljande cellulära stressen. [1, 2]

- **Öppning av kanaler:** Istället för att stängas eller minska, leder infraljud till att Cx43-hemikanaler (HC) **öppnas okontrollerat**.
- **Giftigt läckage:** Genom de öppnade hemikanalerna börjar cellerna läcka ut massiva, skadliga mängder av signalsubstanserna **ATP och glutamat** i hjärnvävnaden. Detta skapar en lokal inflammation och så kallad excitotoxicitet, vilket skadar nervcellerna och leder till försämrat minne och inlärningsförmåga. [1, 2]

2. NEDREGLERING är lösningen som skyddar mot infraljudet

Det är här kopplingen till nedreglering blir intressant. Eftersom infraljudet skadar hjärnan genom att tvinga Cx43-kanalerna att öppna sig, har forskare testat att avsiktligt stänga av dem. [1]

- **Forskning på möss** visar att om man använder genetiska verktyg (som siRNA) för att **nedreglera uttrycket av Cx43** i hippocampus, eller blockerar hemikanalerna med läkemedel, så **förhindras skadorna** från infraljudet. [1, 2]
- När Cx43 nedregleras kan cellerna inte längre läcka ut det giftiga glutamatet, och djurens minnesfunktioner skyddas helt från ljudvågornas negativa effekter. [1]

Sammanfattning

Infraljud i sig orsakar en **uppreglering eller skadlig öppning** av Cx43-hemikanaler, vilket leder till inflammation och cellstress i hjärnvävnaden. En **nedreglering** av Cx43 är alltså inte en direkt effekt av ljudet, utan snarare den biologiska försvarsmekanism eller terapeutiska metod som krävs för att *stoppa* de skador som infraljudet orsakar. [1]
Undersöker du detta i samband med hälsoeffekter från miljöbetingat infraljud (som exempelvis **vindkraftverk** eller **industrier**), eller läser du en mer **renodlad labbstudie**? Berätta gärna så kan vi titta närmare på just den biten!
Kopplingen mellan vindkraftverkens infraljud och mekanismer kring Cx43 är ett växande forskningsområde, men resultaten skiljer sig kraftigt mellan storskaliga laboratoriestudier på djur och mätningar i verkliga miljöer.
När man studerar miljöbetingat infraljud från vindkraftverk och dess potentiella effekter på cellnivå, är det viktigt att skilja på *mekaniska laboratorieeffekter* och de *faktiska ljudnivåer* som når boende. [1, 2]

---

1. Vad laboratorieforskningen visar (Mekanismen)

I kontrollerade djurstudier där möss eller råttor exponeras för infraljud (ofta med höga ljudtrycksnivåer för att provocera fram rektioner) har man kunnat kartlägga exakt vad som händer med Cx43 i vävnaderna:

- **I hjärnan (Kognitiv påverkan):** Studier visar att infraljud stimulerar mekanoreceptorer på astrocyter. Detta leder till en skadlig öppning av Cx43-hemikanaler (HC), vilket orsakar ett överskott av ATP och glutamat. Detta leder i sin tur till lokal neuroinflammation och

försämrat närminne. Som tidigare nämnts är det just genom att *nedreglera* Cx43 som forskare har lyckats blockera denna skadliga effekt. [1, 2, 3]

- **I hjärtat (Fibros):** Det finns även djurstudier som undersökt kronisk exponering av intensivt infraljud på hjärtvävnad. Där har man paradoxalt nog sett en **direkt nedreglering av Cx43-proteiner** i hjärtats muskelceller. Detta resulterade i att cellernas normala sammankoppling (gap junctions) minskade, vilket ledde till ökad bindvävsombildning (*atrial fibros*) och därmed en högre risk för hjärtarytmier. [1, 2]

2. Debatten om vindkraftverk i verkligheten

Det stora glappet i forskningen ligger i **ljudtrycksnivån** (decibel, dB) och hur vågorna beter sig i verkliga miljöer jämfört med i ett laboratorium. [1]

- **Den kritiska/varnande sidan:** Forskare (bland annat i projekt samarbetade mellan **Högskolan i Gävle och Uppsala universitet**) har lyft fram att infraljud från vindkraftverk kan mätas upp i högre nivåer än man tidigare trott och att det kan samverka med vibrationer. De menar att den biologiska påverkan på celler (via mekanotransduktion, där celler reagerar på fysiska vibrationer) kan förklara varför vissa närboende upplever symtom som sömnlöshet, migrän, stress och yrsel. [1, 2, 3, 5]
- **Myndigheternas och majoritetsforskningens sida:** Stora folkhälsostudier (bland annat från **Naturvårdsverket** och oberoende nordiska expertrapporter) menar att de nivåer av infraljud som faktiskt når bostäder i närheten av vindkraftverk är **alltför låga** för att kunna trigga igång dessa cellförändringar. De ligger oftast långt under människans fysiologiska tröskelvärden. De rapporterade symtomen (så kallat "Wind Turbine Syndrome") tillskrivs i dessa rapporter snarare psykologisk stress, irritation över buller eller den så kallade noceboeffekten (att förväntan om sjukdom skapar fysiska symtom). [1, 2, 3, 4]

Sammanfattning för din undersökning

Om du skriver en rapport eller gör en utredning kan du sammanfatta kopplingen så här:

1. **Biologisk mekanism finns:** Det är vetenskapligt bevisat i labbmiljö att infraljud kan störa balansen av Cx43 (orsaka skadlig öppning i hjärnans hemikanaler och nedreglering i hjärtats celler) via mekanisk cellstress. [1, 2, 3]
2. **Dos-respons-problemet:** Den stora vetenskapliga oenigheten handlar om *dosen*. Det är ännu inte kliniskt bevisat att de låga doser av infraljud som avges från kommersiella vindkraftverk till bostäder är tillräckligt starka för att sätta igång dessa cellulära Cx43-processer hos människor. [, 2, 3]

Håller du på att sammanställa en **miljökonsekvensbeskrivning**, ett **akademiskt arbete**, eller undersöker du detta av **personligt intresse** för en specifik plats? Berätta gärna så kan vi fokusera på rätt typ av argument och källor!

Kompletterande material
Tilläggsmaterialet för den här artikeln finns online på:
https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbeh.2026.1729876/full#skomplementärt-material

Referenser
1. BedardA. J.GeorgesT. M. (2000). Atmospheric infrasound. *Phys. Today*53, 32–37. doi: 10.1063/1.883019

2. BellagambiF. G.LomonacoT.SalvoP.VivaldiF.HangouëtM.GhimentiS.et al. (2020). Saliva sampling: methods and devices. An overview. *TrAC Trends Anal. Chem.*124:115781. doi: 10.1016/j.trac.2019.115781
3. BoczarT.ZmarzłyD.KoziołM.NagiŁ.WotzkaD.NadolnyZ. (2022). Measurement of infrasound components contained in the noise emitted during a working wind turbine. *Energies*15:597. doi: 10.3390/en15020597
4. BuiS.OppedalF.KorsøenØ. J.SonnyD.DempsterT. (2013). Group behavioural responses of Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) to light, infrasound and sound stimuli. *PLoSOne.*8:e63696. doi: 10.1371/journal.pone.0063696,
5. BurtT. (1996). Sick building syndrome: acoustic aspects. *Indoor Built Environ.*5:44. doi: 10.1177/1420326X9600500107
6. ButkusR.VasiliauskasG. (2013). Infrasonic and low frequency environment in the shadow zones of noise barriers. *Proc. Int. Sci. Conf. Rural Dev*6, 36–40. doi: 10.15544/RD.2013.3.084
7. CarbajalA.SolerP.Tallo-ParraO.IsasaM.EchevarriaC.Lopes-BejarM.et al. (2019). Towards non-invasive methods in measuring fish welfare: the measurement of cortisol concentrations in fish skin mucus as a biomarker of habitat quality. *Animals*9:939. doi: 10.3390/ani9110939.
8. ChabanR.GhazyA.GeorgiadeE.StumpfN.VahlC. F. (2021). Negative effect of high-level infrasound on human myocardial contractility: in-vitro controlled experiment. *Noise Health*23, 57–66. doi: 10.4103/nah.NAH_28_19,
9. CheI. Y.KimI.ParkJ.KimB. I.KimK. (2023). Detections of infrasound waves from water discharges at a hydroelectric dam: implementation of timely warnings for unexpected discharge events. *Geophys. Res. Lett.*50:e2023GL103026. doi: 10.1029/2023GL103026
10. CrawfordJ. R.HenryJ. D. (2004). The positive and negative affect schedule (PANAS): construct validity, measurement properties and normative data in a large non-clinical sample. *Br. J. Clin. Psychol.*43, 245–265. doi: 10.1348/0144665031752934
11. de CarvalhoH. W.AndreoliS. B.LaraD. R.PatrickC. J.QuintanaM. I.BressanR. A.et al. (2013). Structural validity and reliability of the positive and negative affect schedule (PANAS): evidence from a large Brazilian community sample. *Rev. Bras. Psiquiatr.*35, 169–172. doi: 10.1590/1516-4446-2012-0957
12. Díaz-GarcíaA.González-RoblesA.MorS.MiraA.QueroS.García-PalaciosA.et al. (2020). Positive and negative affect schedule (PANAS): psychometric properties of the online Spanish version in a clinical sample with emotional disorders. *BMC Psychiatry*20:56. doi: 10.1186/s12888-020-2472-1,
13. EngerP. S.KarlsenH.KnudsenF.SandO. (1993). Detection and reaction of fish to infrasound. *ICES Mar. Sci. Symp.*196, 108–112.
14. FélixA. S.FaustinoA. I.CabralE. M.OliveiraR. F. (2013). Noninvasive measurement of steroid hormones in zebrafish holding-water. *Zebrafish*10, 110–115. doi: 10.1089/zeb.2012.0792,
15. Franco-MartinezL.BrandtsI.Reyes-LópezF.TortL.TvarijonaviciuteA.TelesM. (2022). Skin mucus as a relevant low-invasive biological matrix for the measurement of an acute stress response in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Water*14:1754. doi: 10.3390/w14111754
16. FriedrichB.JoostH.FedtkeT.VerheyJ. L. (2023). Temporal integration of infrasound at threshold. *PLoS One*18:e0289216. doi: 10.1371/journal.pone.0289216,
17. GattiR.AntonelliG.PrearoM.SpinellaP.CappellinE.De PaloE. F. (2009). Cortisol assays and diagnostic laboratory procedures in human biological fluids. *Clin. Biochem.*42, 1205–1217. doi: 10.1016/j.clinbiochem.2009.04,
18. GholibG.WahyuniS.AkmalM.HasanM.AgilM.PurwantaraB. (2019). The validation of a commercial enzyme-linked immunosorbent assay and the effect of freeze-thaw cycles of serum on the stability of cortisol and testosterone concentrations in Aceh cattle. *F1000Res.*8:1220. doi: 10.12688/f1000research.19804.3,
19. GrafkinaM. V.NyuninB. N.SviridovaE. Y. (2019). Environmental monitoring and simulation of infrasound generating mechanism of traffic flow. *J. Ecol. Eng.*20, 90–97. doi: 10.12911/22998993/109877

20. HamamaI.YamamotoM. Y. (2021). Infrasonic earthquake detectability investigated in southern part of Japan, 2019. *Sensors*21:894. doi: 10.3390/s21030894, 2
21. HoltzmanS.O'ConnorB. P.BarataP. C.StewartD. E. (2015). The brief irritability test (BITe): a measure of irritability for use among men and women. *Assessment*22, 101–115. doi: 10.1177/1073191114533814,
22. Invitrogen. *Cortisol Competitive ELISA Kit: Product Description*. Frederick, MD, USA: Invitrogen (2018)
23. IqbalT.ElahiA.WijnsW.ShahzadA. (2023). Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health. *Health Sci. Rev.*6:100079. doi: 10.1016/j.hsr.2023.100079
24. JamesK. A.StrominJ. I.SteenkampN.CrombrinckM. I. (2023). Understanding the relationships between physiological and psychosocial stress, cortisol and cognition. *Front. Endocrinol.*14:1085950. doi: 10.3389/fendo.2023.1085950,
25. KarlsenH. E. (1992a). The inner ear is responsible for detection of infrasound in the perch (*Perca Fluviatilis*). *J. Exp. Biol.*171, 163–172. doi: 10.1242/jeb.171.1.163
26. KarlsenH. E. (1992b). Infrasound sensitivity in the plaice (*Pleuronectes Platessa*). *J. Exp. Biol.*171, 173–187. doi: 10.1242/jeb.171.1.173
27. KarlsenH. E.PiddingtonR. W.EngerP. S.SandO. (2004). Infrasound initiates directional fast-start escape responses in juvenile *Rutilus rutilus*. *J. Exp. Biol.*207, 4185–4193. doi: 10.1242/jeb.01274,
28. KulczykowskaE. (2019). Stress response system in the fish skin—welfare measures revisited. *Front. Physiol.*10:72. doi: 10.3389/fphys.2019.00072,
29. LeventhallG. (2007). What is infrasound?*Prog. Biophys. Mol. Biol.*93, 130–137. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.006,
30. LevshinaN. (2020). "Conditional inference trees and random forests," in *A Practical Handbook of Corpus Linguistics*, eds. PaquotM.GriesS. T. (Cham: Springer).
31. MaijalaP. P.KurkiI.VainioL.PakarinenS.KuuramoC.LukanderK.et al. (2021). Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound. *J. Acoust. Soc. Am.*149, 2238–2248. doi: 10.1121/10.0003509,
32. MarchettiE.RipepeM.CampusP.Le PichonA.VergozJ.LacannaG.et al. (2019). Long range infrasound monitoring of Etna volcano. *Sci. Rep.*9:18015. doi: 10.1038/s41598-019-54468-5,
33. McComasS.HaywardC.SimpsonC.StumpB. W.McKennaM. H. (2019). Ambient infrasound noise in urban environments. *J. Acoust. Soc. Am.*145:1660. doi: 10.1121/1.5101096
34. MidttunH. L. E.ØverliØ.TudoracheC.MayerI.JohansenI. B. (2022). Non-invasive sampling of water-borne hormones demonstrates individual consistency of the cortisol response to stress in laboratory zebrafish (*Danio rerio*). *Sci. Rep.*12:6278. doi: 10.1038/s41598-022-10274-0,
35. MohamedR.CampbellJ. L.Cooper-WhiteJ.DimeskiG.PunyadeeraC. (2012). The impact of saliva collection and processing methods on CRP, IgE, and myoglobin immunoassays. *Clin. Transl. Med.*1:19. doi: 10.1186/2001-1326-1-19,
36. MohananA.VarmaB. R.KumarS.KumaranP.XavierA. M. (2019). Assessment of salivary flow rate and antioxidant levels in ectodermal dysplasia patients: an in vivo study. *Contemp Clin Dent.*10, 74–80. doi: 10.4103/ccd.ccd_358_18,
37. MøllerH. (1984). Physiological and psychological effects of infrasound on humans. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*3, 1–16. doi: 10.1177/026309238400300101
38. MøllerH.PedersenC. S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health*6, 37–57.
39. MühlhansJ. H. (2017). Low frequency and infrasound: a critical review of the myths, misbeliefs and their relevance to music perception research. *Music. Sci.*21, 267–286. doi: 10.1177/1029864917690931
40. NeumannN.FullanaM. A.RaduaJ.BrandtT.DieterichM.LotzeM. (2023). Common neural correlates of vestibular stimulation and fear learning: an fMRI meta-analysis. *J. Neurol.*270, 1843–1856. doi: 10.1007/s00415-023-11568-7,
41. NowickiG.NowickiT. J.PrystupaA.ŚlusarskaB.ChemperekE. (2014). Effects of infrasound generated in urban areas on health of people and animals—an attempt to localize environmental

infrasound sources using computer simulations. *J. Pre-Clin. Clin. Res.*8, 81–85. doi: 10.26444/jpccr/71473
42. PersingerM. A. (2013). Infrasound, human health, and adaptation: an integrative overview of recondite hazards in a complex environment. *Nat. Hazards*70, 501–525. doi: 10.1007/s11069-013-0827-3,
43. PhilippeC.VergauwenL.HuygheK.De BoeckG.KnapenD. (2023). Chronic handling stress in zebrafish *Danio rerio* husbandry. *J. Fish Biol.*103, 367–377. doi: 10.1111/jfb.15453,
44. QiM.GaoH.GuanL.LiuG.YangJ. (2016). Subjective stress, salivary cortisol, and electrophysiological responses to psychological stress. *Front. Psychol.*7:229. doi: 10.3389/fpsyg.2016.00229,
45. QinD. D.RizakJ.FengX. L.YangS. C.LüL. B.PanL.et al. (2016). Prolonged secretion of cortisol as a possible mechanism underlying stress and depressive behaviour. *Sci. Rep.*6:30187. doi: 10.1038/srep30187,
46. RajagopalanA.JinuK. V.SaileshK. S.MishraS.ReddyU. K.MukkadanJ. K. (2017). Understanding the links between vestibular and limbic systems regulating emotions. *J. Nat. Sci. Biol. Med.*8, 11–15. doi: 10.4103/0976-9668.198350,
47. RamsayJ. M.FeistG. W.VargaZ. M.WesterfieldM.KentM. L.SchreckC. B. (2009). Whole-body cortisol response of zebrafish to acute net handling stress. *Aquaculture*297, 157–162. doi: 10.1016/j.aquaculture.2009.08.035,
48. Robert-MercierT.DehouxM.LongroisD.GuglielminottiJ. (2014). "Salivary amylase as a stress biomarker," in *General Methods in Biomarker Research and their Applications*, (Dordrecht: Springer)
49. SadoulB.GeffroyB. (2019). Measuring cortisol, the major stress hormone in fishes. *J. Fish Biol.*94, 540–555. doi: 10.1111/jfb.13904,
50. SaltA. N.HullarT. E. (2010). Response of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hear. Res.*268, 12–21. doi: 10.1016/j.heares.2010.06.007,
51. SandO.EngerP. S.KarlsenH. E.KnudsenF. R. (2001). Detection of infrasound in fish and behavioural responses to intense infrasound in juvenile salmonoids and European silver eels: a minireview. *Am. Fish. Soc. Symp.*26, 183–193.
52. SandO.KarlsenH. E. (1986). Detection of infrasound by the Atlantic cod. *J. Exp. Biol.*125, 197–204. doi: 10.1242/jeb.125.1.197,
53. SandO.KarlsenH. E. (2000). Detection of infrasound and linear acceleration in fishes. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.*355, 1295–1298. doi: 10.1098/rstb.2000.0687,
54. ScattertyK. R.PitmanT.EckersleyT.SchmaltzR.HamiltonT. J. (2023). Zebrafish aversion to infrasound in an open field test. *Front. Behav. Neurosci.*16:1019368. doi: 10.3389/fnbeh.2022.1019368,
55. SchreckenbergD.BelkeC.SpilskiJ. (2018). The development of a multiple-item annoyance scale (MIAS) for transportation noise annoyance. *Int. J. Environ. Res. Public Health*15:971. doi: 10.3390/ijerph15050971,
56. SindelarovaT.ChumJ.SkripnikovaK.BaseJ. (2015). Atmospheric infrasound observed during intense convective storms on 9–10 July 2011. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*122, 66–74. doi: 10.1016/j.jastp.2014.10.014
57. TandyV.LawrenceT. R. (1998). The ghost in the machine. *Journal-Society for Psychical Research*62, 360–364. doi: 10.1592/phco.29.4.363
58. ThomssonO.Ström-HolstB.SjunnessonY.BergqvistA. S. (2014). Validation of an enzyme-linked immunosorbent assay developed for measuring cortisol concentration in human saliva and serum for its applicability to analyze cortisol in pig saliva. *Acta Vet. Scand.*56:55. doi: 10.1186/s13028-014-0055-1,
59. UnoA.NakagawaA.HoriiA.TakedaN.KuboT. (2006). Neural substrate for motion sickness: involvement of the limbic system. *Equilib. Res.*65, 213–222. doi: 10.3757/jser.65.213
60. WatsonD.ClarkL. A.TellegenA. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *J. Pers. Soc. Psychol.*54, 1063–1070. doi:

10.1037/0022-3514.54.6.1063,
61. WatsonL. M.IezziA. M.ToneyL.ToneyL.MaherS. P.FeeD.et al. (2022). Volcano infrasound: progress and future directions. *Bull. Volcanol.*84:44. doi: 10.1007/s00445-022-01544-w
62. WynnN. R.DugickF. K. D. (2023). Modeling and characterizing urban infrasonic and low-frequency noise in the Las Vegas, NV region. *J. Acoust. Soc. Am.*154, 1439–1447. doi: 10.1121/10.0020837.

Sammanfattning

Nyckelord: aversion, beteende, Kortisol (olika betydelser, ELISA (olika betydelser, Infraljud, perception, psykoakustik, stress
Citering
Scatterty KR, VonStein D, Pridard LB, Franczak BC, Hamilton TJ och Schmaltz RM (2026) Infraljudsexponering är kopplad till aversive responding, negativ bedömning och förhöjd salivkortisol hos människor. *Fram till. Behav alltså. Det är Neurosci.* 20:1729876. doi: 10.3389/fnbeh.2026.1729876
Mottagen 22 oktober 2025
Reviderad 04 mars 2026
Accepterat 06 mars 2026
Publicerad 27 april 2026
Volym 20 - 2026
Redigerat av Walter Adriani, National Institute of Health (ISS), Italy
Läst av Oliver Niebuhr, University of Southern Denmark, Denmark
James Stone, Brighton and Sussex Medical School, United Kingdom
Sedat Yıldız, Inonu Universitesi Tip fakultesi, Türkiye