



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**AZ ANTROPOGÉN HATÁSOK INDUKÁLTA KÖRNYEZETI
VÁLTOZÁSOK ÖKOAKUSZTIKAI VIZSGÁLATA
DENEVÉREK ESETÉBEN**

Doktori értekezés tézisei

Szabadi Kriszta Lilla

Gödöllő

2026

Doktori iskola: MATE Természettudományok Doktori Iskola

tudományága: Biológiai Tudományi Doktori Program

vezetője: Dr. Nagy Zoltán

egyetemi tanár DSc

MATE, Vadgazdálkodási és Természetvédelmi Intézet
Állattani és Ökológiai Tanszék (a szervezeti egység neve)

Témavezető(k): Dr. *habil* Estók Péter

egyetemi docens, PhD

Eszterházy Károly Katolikus Egyetem

Biológiai Intézet, Állattani Tanszék

Dr. Görföl Tamás

tudományos munkatárs

Pécsi Tudományegyetem

Virologiai Nemzeti Laboratórium

.....
Dr. Nagy Zoltán

.....
Dr. *habil* Estók Péter

.....
Dr. Görföl Tamás

A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

A denevérek az emlősök osztályának második legfajgazdagabb rendje, ők teszik ki a szárazföldi vadon élő emlősfajok egyötödét, ezzel jelentősen hozzájárulva a biodiverzitáshoz (Greenspoon és mtsai. 2023; Simmons és Cirranello 2023; Wilson és Mittermeier 2019). A denevérek mind a mezőgazdasági, mind a természetes élőhelyeken kulcsfontosságú ökoszisztéma-szolgáltatásokat nyújtanak, mint például a beporzás, a magok terjesztése és az ízeltlábúak populációinak szabályozása (Kunz és mtsai. 2011). Populációik azonban jelentős csökkenést mutatnak különféle emberi tevékenységek miatt. Tekintettel erre, fontos a denevéreket veszélyeztető tényezők feltárása, valamint a denevérbárát gyakorlatok kidolgozása a negatív hatások mérséklése érdekében. Doktori munkám során az ember által okozott különböző környezeti változások denevérekre gyakorolt hatásait vizsgáltuk, disszertációm három kutatás eredményeit foglalja össze.

Kutatásunk során az elsők között vizsgáltuk az egyik legnagyobb ütemben fejlődő megújuló energiaforrás – napelemparkok – denevérekre gyakorolt hatását. Az éghajlatváltozás elleni küzdelem részeként a megújuló energiaforrások felhasználása világszerte gyors ütemben növekszik. Az elmúlt évtizedben a fotovoltaiikus (PV) napelemparkok jelenléte világszerte gyorsan növekedett a javuló hatékonyság, a hardverkötségek csökkenése, valamint a hálózatba betáplálható többlet miatt (Harrison és mtsai. 2017). A hálózatra kapcsolt és azon kívüli napenergia-kapacitás az egy évtizeddel ezelőtti 70 GW-ról 2021-re 942 GW-ra bővült (REN21 jelentés, 2022). Figyelembe véve, hogy 1 MW villamos energia előállításához 1,5-3,5 hektár közötti terület szükséges (Blaydes és mtsai. 2021; Walston és mtsai. 2021) a világ nagy energiaigényű régióinak, mint például Európának, Japánnak és Indiának a becslések szerint 2050-re földterületük 0,5–5%-át napelem parkoknak kellene borítania (Van De Ven és mtsai. 2021). Nagy területigényük miatt az erőművek telepítése összeütközésbe kerülhet a mezőgazdasági területek hasznosításának és a biológiai sokféleség megőrzésének

érdekeivel. Az élő- és táplálkozóhelyek potenciális elvesztése mellett a fotovoltaikus napelemparkok – a nagyméretű sima felületek megjelenése miatt – a tájékozódás során is kihívást jelenthetnek a denevérek számára. Bár a napelemek denevérekre gyakorolt konkrét hatása még nem ismert, Greif és Siemers (2010) megállapították, hogy a denevérek a vízszintes, sima felületeket (akusztikus tükröket) vízként érzékelik hasonló visszhang-akusztikus tulajdonságaik miatt.

A második kutatásunk során három vizsgálati módszer együttes alkalmazásával teszteltük, hogyan mérsékelhető egyszerű mechanikai módosítások segítségével a mesterséges sima felületek denevéreket megtévesztő negatív hatása. Az ember környezetátalakító hatása nemcsak a természetes tájakat változtatja meg, hanem új kihívásokat is támaszt a vadon élő állatok számára. Antropogén hatások miatt bizonyos élőlények érzékszervi kihívásokkal szembesülnek. Az állatok a környezeti információk feldolgozásában különböző érzékszervi rendszerekre – például hallásra, szaglásra, visszhangészlelésre, az elektromos és mágneses terek, valamint a rezgések érzékelésére – támaszkodnak, amelyek megzavarása viselkedésbeli változásokat idézhet elő, és egyedi, populációs, valamint ökoszisztéma-szintű következményekkel járhat. A sima felületek az érzékszervi zavarok egyik kevésbé ismert forrásai, ezért az ilyen felületek, például az üveglablakok és a napelemek növekvő száma komoly problémákat okozhat a vadon élő állatok számára. A madarak pusztulásának egyik fő oka az üvegepületekkel való ütközés (Klem 1990; Loss és mtsai. 2014; Santos, De Abreu és De Vasconcelos 2017), míg a sima, mesterséges felületekről visszaverődő polarizált fény a vízi rovaroknál maladaptív szaporodási viselkedést válthat ki, például a napelemek felszínére történő tojásrakást (Malik és mtsai. 2008; Horváth és mtsai. 2009, 2010). A denevérek a visszaverődő hangok alapján találják meg, ismerik fel és osztályozzák a tereptárgyakat vagy a növényzetet, például a fákat, leveleket, virágokat és víztesteket (Yovel és mtsai. 2008). A mesterséges sima felületek akusztikus tükrő tulajdonságokkal rendelkeznek, ami

azt jelenti, hogy megtörik a denevérek ultrahangját, így a visszhang nagy része nem tér vissza a forráshoz (Greif és Siemers 2010). A vízszintesen elhelyezett sima felületek akusztikus mintázata hasonlít a természetes vízfelszínéhez, ezért a denevérek megpróbálhatnak inni ezekről a felületekről, függetlenül azok anyagától, amit laboratóriumi (Greif és Siemers 2010) és a természetes körülmények között (Russo, Cistrone és Jones 2012) is kimutattak. A függőleges sima felületeket nyitott repülési útvonalakként érzékelik, ami ütközéseket és potenciális sérüléseket okozhat (Greif és mtsai. 2017). A növekvő urbanizációval a mesterséges sima felületek egyre nagyobb veszélyt jelentenek a denevérekre nézve, ugyanis nem korlátozódnak a városi környezetre, hanem attól távol eső területeken is megjelennek.

A harmadik kutatás során pedig azt vizsgáltuk, hogyan hatnak az állattartó telepek különböző paraméterei (a tartott állatok faja, az állatállomány nagysága, a településtől való távolság) és az őket körülvevő tájösszetétel a denevérek aktivitására. Az állattenyésztés jelentős szerepet játszik a vidéki területek gazdaságában, ökoszisztémájában, sőt az ember és vadon élő állatok egészségében is. Az állattenyésztési rendszerek azonban jelentősen eltérnek egymástól a tartott állatfajok és azok tartási körülményei tekintetében, többek között a legelőkhöz vagy kültéri karámokhoz való hozzáférés, a gyógyszerhasználat, a földhasználat, a termelés intenzitása, a növénytermesztési rendszerekkel való integráció, valamint az előállított termékek típusa alapján (Steinfeld, Wassenaar és Jutzi 2006). Az állattartó gazdaságok olyan egyedi élőhelyeket képviselnek, amelyek ötvözik a városi és a mezőgazdasági területek jellemzőit, ezért különösen érdekesek lehetnek a denevérek számára. Az olyan elemek, mint az épületek, az utak és a mesterséges megvilágítás a városi környezet sajátosságait tükrözik, míg a gazdasági épületek potenciális búvóhelyet biztosíthatnak az épületlakó fajok számára. A haszonállatok és trágyájuk által vonzott rovarok jelentős táplálékforrást nyújthatnak, míg a gazdasági épületek

körüli fák, fasorok és sövények pihenőhelyet, tájékozódási pontot és közlekedési útvonalat biztosíthatnak a denevérek számára.

Kutatásaink átfogó célja különböző antropogén tényezők denevérek viselkedésére és ökológiájára gyakorolt hatásainak feltárása volt.

Első kutatásunk során a napelemparkok rovarrevő denevérekre gyakorolt ökológiai hatásait vizsgáltuk. Passzív akusztikai módszerekkel célunk volt:

- (i) a napelemparkok denevérek által történő hasznosításának jellemzése,
- (ii) összehasonlítani a fajösszetételt, a gyakoriságot és a táplálékszerző tevékenységet a napelemparkok és más közeli élőhelyek – erdők, gyepek, szántóföldek, települések és vízpartok – között, mozaikos tájakon.

A második kutatás céljai között szerepelt, hogy:

- (i) gyakorlatban teszteljük a sima felületek mechanikai módosításának hatásait a denevérek viselkedésére.
- (ii) Tanulmányoztuk a módosított felületek hangvisszaverő képességét hang visszajátszásos kísérlettel és
- (iii) matematikai modellezéssel.

Vizsgálatunk a denevérek víz érzékelésére és az ehhez kapcsolódó ivási viselkedésére összpontosított, mivel ez minimális zavarással és sérülések elkerülésével vizsgálható az ütközések megfigyeléséhez képest.

Harmadik kutatásunk során célunk volt:

- (i) leírni az állattartó telepek denevérközösségeinek összetételét,
- (ii) tesztelni a gazdaságok jellemzőinek (pl.: tartott állatok faja és állomány mérete) és a környező táj összetételének hatását a denevérek aktivitására

- (iii) összehasonlítani a denevérek aktivitását az állattartó telepek és más élőhelyek között, figyelembe véve a táji kontextust.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A napelemparkok denevérekre gyakorolt ökológiai hatásainak vizsgálata

A vizsgálatot Magyarország 15 mintavételi területén végeztük mozaikos tájban. Különböző méretű napelemparkokat (1,2-45 ha között) vizsgáltunk, ahol a panelek dőlésszöge 0 és 35 fok között változott. Minden mintavételi terület tartalmazott egy napelemparkot, valamint a napelempark 5 km-es körzetében elhelyezkedő különböző kontroll élőhelyeket, amelyek erdőket, mezőgazdasági területeket, gyepeket, településeket és vízpartokat foglaltak magukba. Minden területen, minden élőhelytípusban 1-6 mintavételi pontot jelöltünk ki (átlagosan $3,6 \pm 1,3$), a vizsgált élőhely méretétől függően. Összesen 190 mintavételi pontról gyűjtöttünk adatokat.

Az akusztikus mintavételeket 2020. július 5. és szeptember 16. között végeztük. Minden területen csak egyszer mintavételeztünk, szimultán a területen található összes mintavételi ponton. Az akusztikus felvételek napnyugtakor kezdődtek és 4 órán keresztül tartottak. A denevérek hangjait AudioMoth (OpenAcousticDevices; Hill és mtsai. 2018; v.1.1.0) teljes spektrumú detektorokkal rögzítettük. A szekvenciákat manuálisan határoztuk faj, illetve fajcsoport szinten a Kaleidoscope Pro programban (Wildlife Acoustics, Inc.). A denevéraktivitást az éjszaka során rögzített hangszekvenciák összegzésével határoztuk meg, melyet minden mintavételi pontra külön-külön számoltunk ki fajok és fajcsoportok szintjén, valamint fajoktól függetlenül az összesített denevéraktivitást is meghatároztuk.

A denevérek aktivitásának összehasonlításához a napelemparkban és más élőhelyeken általánosított lineáris kevert modelleket (GLMM) alkalmaztunk. A denevérek élőhelyhasználatának közösségi szintű feltárásához nem-metrikus

többdimenziós skálázást (NMDS) alkalmaztunk a „vegan” csomag (Oksanen és mtsai. 2016) segítségével.

A sima felületek megtévesztő hatásának mérséklési lehetőségei

A terepi kísérleteket Budapesten az Eötvös Loránd Tudományegyetem botanikus kertjében végeztük egy kisebb mesterséges tónál. A tó egyik oldalán kijelöltünk egy 1 × 2 m-es területet, ahol a különböző kezeléseket mutattuk be a denevéreknek. Az első kezelés a kontroll volt, ami a vízfelületet jelentette bármiféle mesterséges tárgy nélkül (N = 6 éjszaka). A második kezelés egy sima fekete műanyag lap volt (1 × 2 m), amelyet közvetlenül, rés nélkül a vízfelület fölé helyeztünk (N = 5 éjszaka). A további kezeléseket során fekete műanyag zsinórokat rögzítettünk a lemez tetejére a lemez rövidebb oldalával párhuzamosan, egymástól 20 cm távolságra. A zsinórok átmérője 0,25; 0,50; 1,00; 1,50 és 2,50 mm volt (N = 3, 5, 3, 3, 3 mintavételi éjszaka). Az utolsó kezelés során a kilenc párhuzamos (Ø 0,50 mm) szál mellé 4 keresztirányú 0,50 mm átmérőjű zsinórt helyeztünk el (N = 5 éjszaka). Így összesen nyolc különböző kezelést kaptunk, amelyeket minden éjszaka véletlenszerűen alkalmaztunk, hogy kiküszöböljük azt az eshetőséget, hogy a denevérek hozzászokjanak az adott kezelésekhöz. Az adatgyűjtés 2020 július végétől október elejéig zajlott. A kísérleteket minden második este végeztük – összesen 33 mintavételi éjszakán – így két kísérlet között zavartalan éjszakákat biztosítva a denevérek számára. A vizsgálatok napnyugtakor kezdődtek és körülbelül 90 percig tartottak.

A denevérek viselkedését a bemutatott sima felületek felett két normál sebességű kamerával (különböző szögből) rögzítettük éjszakai üzemmódban. Az érdeklődési terület megvilágítására infravörös fényt használtunk. Hangfelvételt is készítettünk egy AudioMoth detektorral, hogy meghatározzuk a fajonkénti denevéraktivitást. A videofelvételeket a BORIS szoftverrel (Behavioural Observation Research Interactive Software, Friard és Gamba 2016) elemeztük.

Három viselkedési eseményt határoztunk meg: a „denevér áthaladást”, az „ivást” és az „ütközést”. Minden éjszaka esetében összegeztük az események számát kategóriánként és kiszámoltuk az ivás relatív előfordulását az „ivási” események számának és az összes „denevér áthaladások” számának hányadosaként. A Kaleidoscope Pro (Wildlife Acoustics) szoftvert használtuk a denevér hangok automatikus faj alapú határozására, majd a fajazonosítást manuálisan ellenőriztük Russ (2012) munkája alapján.

A sima lemez és a felületmódosítások hatását a denevérek ivási viselkedésére több statisztikai módszerrel teszteltük. A sima lemez önmagában kifejtett hatását lineáris modellel (lm, R 4.1.0) vizsgáltuk. A legvékonyabb (0,25 mm) zsinór elhelyezésének hatását a sima lemezhez képest Wilcoxon rangösszeg teszttel elemeztük. Az ivás arány és a zsinórok átmérője közötti kapcsolatot nemlineáris regresszióval (drm, „drc” csomag) vizsgáltuk exponenciálisan csökkenő modell alkalmazásával. A zsinórok elrendezésének hatását a párhuzamos és a keresztezett elrendezések (Ø 0,5 mm zsinórok) között szintén Wilcoxon teszttel teszteltük. Minden statisztikai számítást R-ben végeztünk, az ábrákat a ggplot2 csomag segítségével készítettük.

A hangvisszajátszásos kísérlethez mesterséges echológiai impulzusokat készítettünk R-ben a „seewave” csomag segítségével, majd azokat ultrahangos hangszórával játszottuk le, a visszatérő visszhangokat pedig egy ultrahang detektorral (Pettersson D1000X, Pettersson Elektronik AB, Uppsala, Svédország) rögzítettük.

Minden rögzített hangfájlból minden visszhangsorozathoz spektrogramokat generáltunk a „seewave” csomag segítségével, majd kinyertük azokat a spektrogramokat, amelyekben kizárólag a húrok visszhangját jelenítik meg.

A zsinórok és a sima lemez visszhangjának külön-külön történő vizsgálatához, valamint a zsinórok átmérőjének visszhangerősségre gyakorolt hatásának elemzéséhez numerikus szimulációs keretrendszerrel hoztunk létre

MATLAB 2022b-ben. Két különböző elrendezést vizsgáltunk, amelyekben a visszhang erősségét (1) egy lemez nélküli zsinórról és (2) egy sima felülethez rögzített zsinórról számoltuk ki. A keretrendszer lehetővé tette a visszavert hullámintenzitások becslését az akusztikus hullámegyenlet numerikus megoldásával. Az egyes visszhang-erősségeket a Kuttruff (2017) akusztikus tükörforrás-módszer alapján számítottuk ki a másodrendű visszaverődésekig. A szimulációk MATLAB kódja a firtha@hit.bme.hu címen igényelhető.

Az állattartó telepek jellemzőinek és a táj összetételének hatása a denevérek aktivitására

2020. június 3. és augusztus 30. között passzív akusztikus mintavételezést végeztünk (AudioMoth detektorokkal) Vas megyében, Magyarországon. Az akusztikai felvételek napnyugtakor kezdődtek és minden mintavételi ponton 4 órán át tartottak, minden mintavételi ponton egy alkalommal. Összesen 199 mintavételi pontról gyűjtöttünk adatokat különböző élőhelyekről. 92 mintavételi pont 35 állattartó telepről származott. Minden gazdaságban 1-5 detektort ($2,6 \pm 1,0$) helyeztünk el különböző távolságokban, az állattartó épületek 50 m-es körzetében ($12,0 \pm 12,7$ m). Szarvasmarha ($N = 20$), ló ($N = 7$) és vegyes állományokat tartó gazdaságokban – ahol a szarvasmarha- vagy lófajták mellett más állatok, mint a magyar szürkemarha, szamár, bölény, juh, sertés és csirke is előfordult – ($N = 8$) mintáztunk. A gazdaságok különböző távolságban helyezkedtek el a legközelebbi település szélétől, 0 és 1860 m között (350 ± 470 m).

A tájösszetétel leírásához a következő lépéseket hajtottuk végre. A Magyar Ökoszisztéma Alaptérképet (Tanács és mtsai. 2022) használtuk referencia adatbázisként, és a térbeli adatokat a QGIS 3.32.3 (Lima) programmal dolgoztuk fel (QGIS Development Team 2009). Ezután meghatároztuk a hat élőhelytípus – mezőgazdasági terület, mesterséges környezet, túlevelű erdő, lombhullató erdő, gyep, mesterséges környezetben található zöldterület – relatív

gyakoriságát a mintavételi pontok körül 100, 250, 500, 1000, 2000 és 3000 méteres sugarú körben. Egy tájat egy adott élőhelytípushoz soroltunk, ha az adott élőhely dominált a 20 m-es rácscellában.

Az állattartó telepek mellett hat további élőhelytípusban végeztünk akusztikus mintavételeket, hogy összehasonlítsuk a denevéráktívítást az állattartó telepeken tapasztaltakkal. A „kontroll” élőhelyek közé tartoztak: szántóföldek (N = 12), gyepek (N = 15), tölgy (N = 25) és fenyőerdők (N = 17), település utak (N = 16) és a település zöldövezetek (N = 22).

A rögzített denevérh hang szekvenciákat a SonoChiro program (Biotope Society, Franciaország) segítségével automatikusan elemeztük, majd manuálisan ellenőriztük.

Minden statisztikai elemzést R-ben végeztünk, a grafikonokat a ‘ggplot2’ csomaggal készítettük. Az állattartó telepeken előforduló denevérfajokat, a fajspecifikus és összesített aktivitást, valamint a táplálkozási hangokat GLMM-ekkel és 20 cm távolságra egymástól,-ekkel vizsgáltuk, figyelembe véve az állattartó telepek jellemzőit (állatfaj, állományméret) és a környező élőhelyek relatív gyakoriságát. A modelldiagnosztikát a „DHARMA” könyvtár (Hartig 2022), a reziduumok eloszlását, a „performance” könyvtár (Lüdecke és mtsai. 2021), a térbeli autokorreláció teszteléséhez a Moran's I autokorrelációs együtthatót pedig az „ape” könyvtár (Paradis és Schliep 2019) segítségével számítottuk ki.

A denevérh hang-szekvenciák számának összehasonlításához az egyes fajok között (35 telep, összesen 92 mintavételi pontja alapján), általánosított lineáris kevert modelleket alkalmaztunk és negatív binomiális hibaeloszlást használtunk a túlzott szórás kezelése érdekében.

A farmon belüli variancia meghatározásához teszteltük a denevéráktívítást különbségét az állattartó telepeken belül az épületekhez közeli és az épületektől távolabbi mintavételi pontok között GLMM-ekkel. Mivel nem találtunk szignifikáns különbséget a denevéráktívításban az épületekhez közeli és távoli

területek között, a közelségi faktort kizártuk a további statisztikai modellekből. Ehelyett az egyes farmokon belül véletlenszerűen kiválasztottunk egy mintavételi pontot minden farmról, és ezeknek az egyedi pontoknak az aktivitási értékeit használtuk a későbbi elemzésekhez.

A (ii) célkitűzés (állattartó telepek közötti összehasonlítások) esetében 100, 250, 500, 1000, 2000 és 3000 méteres sugarú léptékeket vettünk figyelembe, hogy lefedjük a helyi környezetet, ahol feltehetően a denevérek éjszakánként mozognak a pihenőhelyek és a táplálkozó-területek között (Laforge és mtsai. 2021). A (iii) célkitűzés (élőhelyek összehasonlítása) esetében azonban csak az 1000, 2000 és 3000 méteres skálákat vettük figyelembe, mivel a környező élőhelyek relatív gyakorisága nagymértékben korrelált a mintázott élőhelyekkel az 1000 m sugarúnál kisebb skálákon. A legjobb hatásskála megtalálása érdekében minden egyes élőhelytípus esetében a különböző skálákhoz tartozó relatív gyakoriságot egyenként bevontuk a modellekbe, és a „MuMin” csomag (Bartón 2010) „dredge” funkciójának segítségével kiszámított AICc érték alapján kiválasztottuk azt a skálát, ahol a modell a legjobban magyarázta az adatokat. Ezután a következő statisztikák minden egyes lineáris modelljéhez bevontuk a hat környező élőhely (mezőgazdasági terület, túlevelű erdő, lombhullató erdő, gyeperdő, mesterséges környezet, zöldterület mesterséges környezetben) relatív gyakoriságát.

Az állattartó telepek jellemzőinek és a környező élőhelyek hatásának vizsgálata érdekében (ii célkitűzés) GLM-eket építettünk mind az egyes denevérfajok, mind az összesített denevéraktivitás és táplálkozási hangok számára.

A (iii) célkitűzés megvalósítása érdekében, összehasonlítottuk az állattartó telepek és a kontroll élőhelyek denevéraktivitását, amelyhez szintén GLM-t alkalmaztunk.

EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

A napelemparkok denevérekre gyakorolt ökológiai hatásainak vizsgálata

Összesen 29853 denevérhangot rögzítettünk, melyek alapján hat fajt és három fajcsoportot, valamint táplálkozási hangokat azonosítottunk. A legkevesebb szekvencia a nyugati piszedenevértől (*B. barbastellus*) származott, amely főként erdőben fordult elő, de szántóföldi és gyepes élőhelyeken is kimutattuk. A többi fajt és fajcsoportot valamennyi élőhely típusban kimutattuk. A fehérszélű/durvavitorlájú törpedenevér (*Pipistrellus kuhlii/nathusii*) csoportba tartozó hangokat rögzítettük a legnagyobb számban (11835 szekvencia), amelyet a rőt koraidenevér (*Nyctalus noctula*) (6906 szekvencia) követett. Összesen 197 táplálkozási hangot rögzítettünk.

A napelemparkokban a *B. barbastellus* kivételével minden fajt és fajcsoportot kimutattunk. A *P. kuhlii/nathusii* és a *N. noctula* a napelemparkok mintavételi pontjainak több mint 98%-án előfordult. A QCF csoportba tartozó hangok, az alpesi denevér (*Hypsugo savii*) és a szőröskarú denevér (*N. leisleri*) szintén jelen voltak a mintavételi pontok több mint 50%-án ebben az élőhelytípusban. A napelemparkokban táplálkozási hangokat is észleltünk a különböző fajokból: 14-et a *P. kuhlii/nathusii*, 10-et a *N. noctula*, kettőt a *H. savii* és a QCF-csoport, valamint egyet szoprán törpedenevér (*P. pygmaeus*) esetében.

Az észlelt szekvenciák száma több denevérfaj esetében is jelentős különbségeket mutatott a napelemparkok és a többi élőhelytípus között. A napelemparkokhoz képest a *H. savii*, *P. kuhlii/nathusii* és *N. noctula* aktivitása szignifikánsan alacsonyabb volt az erdőben, míg a *Myotis* spp. aktivitása szignifikánsan magasabb. A *Myotis* spp. csoport esetében szignifikánsan magasabb aktivitását, a *P. pygmaeus* esetében pedig magasabb aktivitási trendet tapasztaltunk gyepterületeken, a napelemparkokhoz képest. A településeken a *H. savii*, a *P. kuhlii/nathusii*, a *P. pipistrellus* aktivitása és az összesített denevéraktivitás szignifikánsan magasabb volt, mint a napelemparkokban. A

vízparti élőhelyeken a *P. kuhlii/nathusii*, a *P. pipistrellus*, a QCF csoport és az általános denevéraktivitás tekintetében is szignifikánsan több szekvenciát rögzítettünk, mint a napelemparkokban. A szántóföldek és a napelemparkok között nem találtunk szignifikáns különbséget a denevéraktivásban.

A *P. kuhlii/nathusii* csoport további vizsgálatához a manuálisan elemzett szociális hangokat is megnéztük, a *P. kuhlii* szociális hangjait két napelemparkból, két vízpartról, két gyepes élőhelyről és három településről mutattuk ki, míg a *P. nathusii* szociális hangjait két vízparti és egy szántóföldi élőhelyen észleltük, de napelemparkokban nem.

Az NMDS eredmények vizuális vizsgálata alapján a különböző élőhelyekhez tartozó denevéreközösségek mintavételi pontjainak eloszlása nagymértékű átfedést mutatott. A napelemparkok és a mezőgazdasági élőhelyek denevéreközösségei voltak a leghasonlóbbak, mivel ezen élőhelyek pontfelhőinek középpontja volt a legközelebb, és a pontfelhők átfedése volt a legnagyobb az NMDS-térben.

A sima felületek megtévesztő hatásának mérséklési lehetőségei

Terepi kísérlet

A 33 mintavételi éjszaka során összesen 6691 denevéráthaladást és 688 ivási eseményt rögzítettünk. A vizsgálati terület felett csak a kisméretű denevérektől figyeltünk meg áthaladást és ivási viselkedést. Az akusztikai mintavétel során 1002 olyan echolokációs hang sorozatot azonosítottunk, amelyek kis testméretű denevérekhez tartoztak. Ezek közül 846 (84,4%) *Pipistrellus kuhlii*, 119 (11,9%) *Hypsugo savii*, 37 (3,7%) pedig *P. pipistrellus* denevérektől származott.

Nem figyeltük meg, hogy a denevérek ütköztek volna a lemezekkel vagy leszálltak volna arra. Nyitott vízfelület esetén a denevérek az áthaladások 32%-ában (medián) mutattak ivási viselkedést, ami a zsinórok nélküli sima lemez felett 21%-ra csökkent; ez a különbség azonban statisztikailag nem volt szignifikáns

(LM, $t = -1,93$, $F_{1,9} = 3,73$, $P = 0,085$). A 0,25 mm-es zsinórokkal ellátott lemez esetében az ivási események aránya szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a zsinórok nélküli sima lemez esetében (egyoldalú Wilcoxon rangsorösszeg-teszt, $W = 15$, $P = 0,018$).

Az ivási arányt szignifikánsan alacsonyabbnak találtuk a keresztezett zsinór elrendezés esetén, mint párhuzamos elrendezésnél (egyoldalú Wilcoxon rangösszeg-teszt, $W = 22$, P -érték = 0,022). Keresztezett elrendezés esetén nem figyeltünk meg ivási kísérletet.

Párhuzamos zsinórokkal ellátott sima lemezek esetén az átmérő növekedésével csökkenő tendenciát találtunk az ivási események arányában. A 2,5 mm átmérő esetén nem volt megfigyelhető ivási esemény. Az exponenciális lecsengési modell eredményei alapján a sima lemezes kezeléshez képest szignifikánsan csökkenő mintázatot találtunk az ivási események arányában a zsinórok átmérőjének növekedésével.

Hangvisszajátszásos kísérlet

A hangvisszajátszásos kísérlet eredményei alátámasztják a feltételezésünket, hogy a visszhang erőssége a húrok átmérőjének függvénye, tehát a nagyobb átmérőjű húrok erősebb visszhangokat generálnak. Következésképpen, a legvékonyabb húrok (0,25 mm) a legvastagabb húrokhoz (2,50 mm) képest lényegesen gyengébb visszhangot eredményeztek. Ezenkívül a húrok számának növelése is erőteljesebb visszhangot generált, illetve, ahogy nőtt a zsinór átmérője a visszhangok viszonylag erősebb komponenseket tartalmaztak az alacsony frekvenciatartományban. A sima lemez tekintetében csak a hangszóróból érkező közvetlen hangot és a lemeztől merőlegesen visszaverődő hangot figyeltük meg.

Analitikai eredmények

A matematikai számítások eredményei egyértelmű tendenciákat mutattak a visszhang erősségére vonatkozóan a beérkező hang frekvenciájának és a húr

átmérőjének függvényében. A várakozásoknak megfelelően, a visszavert hang erőssége az átmérő és a frekvencia növekedésével egyaránt nőtt. Ez a tendencia különösen egyértelmű az alsó frekvenciatartományban 30 kHz-ig minden átmérőnél, valamint 30 kHz fölött egészen az 0,5 mm-es átmérőig. Azonban 30 kHz felett, 1-5 mm átmérőjű zsinóroknál a visszavert hang erőssége már csökkenő tendenciát mutat. Az 1 mm-es zsinóroknál az intenzitás 90 kHz felett kezdett csökkenni, míg a 2,50 és 5 mm átmérőjű zsinórok nagy szórással verték vissza a hangot.

A sima lemezről származó merőleges visszhang erőssége a frekvencia növekedésével a vizsgált frekvenciatartományban csak kismértékű csökkenést mutatott, és körülbelül 15 dB-lel magasabb volt, mint a zsinórok legerősebb visszhangja. A visszavert hang erőssége körülbelül 10 dB-lel volt magasabb azokban az esetekben, amikor a zsinórokat a sima felületre helyezték, mint amikor azokat egyedül, sima felület nélkül mutatták be.

Az állattartó telepek jellemzőinek és a táj összetételének hatása a denevérek aktivitására

Összesen 28.412 denevérhang-szekvenciát detektáltunk, amelyek 44,8%-át (12.722 szekvenciát) sikerült azonosítanunk a SonoChiro programmal. A leggyakoribb denevértaxonok, az állattartó telepeken a *Nyctalus spp.*, a *P. kuhlii/nathusii*, a *P. pipistrellus* és a *P. pygmaeus* voltak, több mint 68%-os gyakorisággal a vizsgált telepeken. Ezeknél a fajoknál regisztráltuk a legtöbb denevérhang-szekvenciát is, egyes esetekben több mint 100 detektálással, a *P. pygmaeus* esetében pedig alkalmanként több mint 1000 szekvenciával. A denevérhang-szekvenciák száma fajonként szignifikánsan eltért; a *B. barbastellus*, a *H. savii* és a *Myotis spp.* ritkábban fordult elő az állattartó telepeken, és alacsonyabb aktivitást mutatott. Az észlelt szociális hangok manuális elemzésével 208 szekvenciát találtunk, ami a *P. kuhlii*-hoz tartozott 13 különböző telepről, és 1 észlelést egy farmról a *P. nathusii* esetében.

A hangrögzítő eszközök elhelyezésének (közel vagy távol az épületektől) a telepen belül nem volt hatása az összes denevérhang-szekvencia számára ($\beta = -0,40 \pm 0,31$, $z = -1,30$, $p = 0,13$, $N = 16$) és a táplálkozási hangok számára ($\beta = -0,26 \pm 0,68$, $z = -0,38$, $p = 0,70$, $N = 16$). Néhány gazdaságban azonban az épületek közelében nagyobb számban rögzítettünk táplálkozási hangokat, 10, 16, 65 észleléssel a szarvasmarha-telepeken, és két másik vegyes állatállományú telepen 1-1 észleléssel.

Az állattartó telepek közötti összehasonlítások során azt találtuk, hogy mind a gazdaságok jellemzői, mind a tájösszetétele befolyásolják a denevérek aktivitását. A szarvasmarha telepeken szignifikánsan magasabb volt a *P. kuhlii/nathusii* fajpár aktivitása, mint a lóirtó telepeken. Szignifikáns pozitív kapcsolatot találtunk a *Nyctalus* spp. aktivitása és a mesterséges környezet aránya (250 m-en belül) között. Továbbá pozitív összefüggést találtunk az összesített denevéraktivitás és a mesterséges környezet zöldterületének aránya között (250 m-en belül) is.

Az állattartó telepek és más élőhelyek denevéraktivitásának összehasonlításakor jelentős különbségeket figyeltünk meg a *B. barbastellus*, a *Nyctalus* spp., *Myotis* spp., a *P. kuhlii/nathusii* és a *P. pygmaeus*, valamint az összesített denevéraktivitás esetében. Az összesített denevér aktivitása szignifikánsan magasabb volt az állattartó telepeken, mint a kontroll élőhelyeken, a települések kivételével. A post-hoc tesztek azt mutatták, hogy a *Nyctalus* spp aktivitás szignifikánsan magasabb volt az állattartó telepeken a mezőgazdasági területekhez, a gyepkezhöz, a tölgyesekhez és a településeken lévő zöldterületekhez képest. A *P. kuhlii/nathusii* fajcsoport esetében a szántóföldekhez, a két erdőtípushoz és a települések zöldterületéhez képest, a *P. pygmaeus* esetében pedig a szántóföldekhez képest találtunk magasabb aktivitást az állattartó telepeken. Azonban a *B. barbastellus* és a *Myotis* spp. esetében alacsonyabb aktivitást találtunk az állattartó telepeken, mint a tölgyerdőkben.

Továbbá a *B. barbastellus* esetében a fenyvesekben is magasabb aktivitást tapasztaltunk, mint az állattartó telepeken.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK

A napelemparkok denevérekre gyakorolt ökológiai hatásainak vizsgálata

Kutatásunk során az elsők között vizsgáltuk az egyik leggyorsabban terjedő megújuló energiaforrás, a napelemparkok denevérekre gyakorolt hatását akusztikus módszerekkel. Előzetesen azt feltételeztük, hogy ezek az élőhelyek kedvezőtlenek a denevérek számára, mivel gyakran homogén mezőgazdasági területeken helyezkednek el, és a napelemek sima felülete akusztikus tükörként működhet (Greif és Siemers 2010; Greif és mtsai. 2017). Ezzel szemben több faj esetében is jelentős denevéraktivitást tapasztaltunk, ami arra utal, hogy a tájékozódás a napelemek közelében nem jelent komoly akadályt. Ennek egyik lehetséges magyarázata, hogy a paneleket tartó fém szerkezetek elegendő akusztikus támpontot biztosítanak. Ezt alátámasztja, hogy a magasabban repülő *Nyctalus* fajok és QCF- csoport mellett, az általában zártabb élőhelyekhez kötődő *Pipistrellus* fajok is nagy számban fordultak elő a napelemparkokban.

A napelemparkok területén észlelt táplálkozási hangok bizonyították, hogy a denevérek nemcsak átrepülnek ezeken az élőhelyeken, hanem táplálkoznak is ott. A napelemparkok esetében több mechanizmus feltételezünk, melyek hozzájárulhatnak a rovarzsákmány jelenlétéhez. Először is, az általunk mintázott napelemparkok általában rendelkeztek némi alacsony lágyszárú aljnövényzettel, amely alkalmas élőhely lehet számos repülő rovar taxon számára, mint a hártvány szárnyúak (*Hymenoptera*), a lepkék (*Lepidoptera*), a kétszárnyúak (*Diptera*) és az egyenesszárnyúak (*Orthoptera*) (Báldi és mtsai. 2013, Bonari és mtsai. 2017), amelyek táplálékforrást jelenthetnek a denevéreknek (Dietz és Kiefer 2016, Kusch és Schmitz 2013 Rainho, Augusto és Palmeirim 2010). Továbbá, bizonyos típusú napelemek felületeinek fénypolarizációs mintázata

vonhat vízhez kötődő rovarokat pl.: egyes kétszárnyú (*Diptera*) bogár (*Coleoptera*) és poloska (*Heteroptera*) fajokat, valamint a kérészeket (*Ephemeroptera*), tegzeseket (*Trichoptera*) és szitakötőket (*Odonata*) (Horváth és mtsai. 2011, Horváth és mtsai. 2010, Horváth és mtsai. 2009). Ezek a rovarok több denevérfaj táplálékának jelentős részét teszik ki, köztük a *N. noctula*, a *P. kuhlii* és a *P. nathusii* (Dietz és Kiefer 2016), amelyek a napelemparkokban leggyakrabban észlelt fajok voltak, és mindegyiküktől regisztráltunk táplálkozási hangokat is. Mivel a kutatás során a rovarok jelenlétét nem vizsgáltuk, így csak feltételezhetjük, hogy mindkét rovarforrás hozzájárulhatott a napelemparkok rovarkínálatához, és elősegítheti a denevérek táplálékszerzését.

Várakozásunknak megfelelően az urbanizált környezethez jól alkalmazkodott denevérfajok, mint a *H. savii*, a *P. kuhlii* és a *N. noctula* (Ancillotto és mtsai. 2015; Gili és mtsai. 2020; Jung és Threlfall 2016; Russo és Ancillotto 2015; Zsebők és mtsai. 2012) fordultak elő nagy számban a napelemparkokban, ami arra utal, hogy ezek az élőhelyek az urbanizált területekhez hasonló szelekciós nyomást gyakorolhatnak a denevérközösségekre. Bár a fény- és zajszennyezés várhatóan alacsonyabb, a kiterjedt sima felületek jelenléte a településekhez hasonló funkciókat tölthet be. Ugyanakkor a napelemparkokban leggyakrabban észlelt fajok (*H. savii* és *P. kuhlii/nathusii*) aktivitása alacsonyabb volt, mint a településeken, ami arra utal, hogy ezek az élőhelyek kevésbé optimálisak számukra. Ennek hátterében az alacsony élőhelyi diverzitás, valamint a megfelelő búvóhelyek és fás növényzet hiánya állhat. A napelemparkokban és a településeken kizárólag *P. kuhlii* szociális hangokat észleltünk. Korábbi vizsgálatok szerint a *P. kuhlii* jóval gyakoribb városi élőhelyeken, ezért feltételezhető, hogy a napelemparkokban is dominánsabb, amit további, célzott vizsgálatokkal szükséges megerősíteni.

A különböző fajok eltérő módon alkalmazkodnak az új élőhelyekhez, a napelemparkok esetében egyes fajok – például a *H. savii*, a *N. noctula* és a *P. kuhlii* – képesek lehetnek kiaknázni a napelemparkok nyújtotta lehetőségeket,

míg más fajok hátrányba kerülnek. A *B. barbastellus* – mely természetvédelmi szempontból kiemelt jelentőségű faj – például nem figyeltük meg a napelemparkok területén, továbbá a *Myotis* fajok aktivitását is szignifikánsan alacsonyabbnak találtuk a napelemparkokban, mint az erdőkben és a gyepen. A *P. pygmaeus* aktivitása is alacsonyabb volt a napelemparkokban a gyepkehez képest. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy bár ezek a fajok zárt, szegély- és nyílt élőhelyeken is előfordulnak, a napelemparkok szuboptimálisak lehetnek a számukra, ezért a naperőművek értékes természetes élőhelyeken belüli és azok közelében történő telepítése számos aggályt vet fel.

A napelemparkok és a szántóföldek denevérközösségei hasonlítottak leginkább egymáshoz, ami arra utal, hogy ezek az élőhelyek hasonló ökológiai erőforrásokat biztosítanak. Fontos megjegyezni, hogy a vizsgált napelemparkokat gyakran szántóföldek veszik körül, ami hozzájárulhat a két élőhelytípus denevérközösségeinek hasonlóságához. Korábbi kutatások szerint az intenzív mezőgazdasági művelés alatt álló területek a denevérek számára a legalkalmatlanabb élőhelyek közé tartoznak (Azam és mtsai. 2016), így eredményeink alapján a napelemparkok denevérközösségei a táj „legrosszabb” élőhelyeihez hasonlíthatók, és meglehetősen szegényes élőhelynek tekinthetők. Ugyanakkor a mezőgazdasági élőhelyekhez hasonlóan a napelemparkok környezetének strukturális gazdagítása (pl. bokrok, fasorok) kedvezően hathat a denevérekre. Az alacsony természetességű területeken természetvédelmi szempontok szerint kialakított és megfelelően kezelt napelemparkok – például őshonos magkeveréssel bevetett extenzíven kezelt (évi egy-két kaszálás, legeltetés, gyomirtók mellőzése) – akár természeti értéknövekedést is eredményezhetnek, mivel a napelemek körül kialakított gyep fennmaradása a park működési idejére biztosítható (Tölgyesi és mtsai. 2023).

Tanulmányunk az éjszaka első négy órájára és a nyári–kora őszi időszakokra korlátozódott, azonban az egész éjszakás, több éjszakán át tartó mintavételezés, valamint a tavaszi és késő őszi időszakok bevonása a zsákmánydinamika és a

denevérek vonulási mintázatai miatt részletesebb és eltérő aktivitási mintázatokat tárhatna fel.

Mivel a napelemparkok száma világszerte növekedni fog, fontos részletesen feltárni ezen élőhelyek ökológiai szerepét. További kutatások szükségesek a napelemekhez és a parkok növényzetéhez kötődő rovarcsoportok, valamint a denevérek és más gerincesek viselkedésének (pl. táplálkozás, tájékozódás, ivási kísérletek, ütközések) vizsgálatára. A napelemparkok méretének, heterogenitásának, táji környezetének és összesített hatásának vizsgálata jelentősen hozzájárulhat a természetvédelmi kezelések tervezéséhez. Hasonló mérséklési hierarchiák kialakítását javasoljuk, mint amelyet a szélerőművek esetében kidolgoztak (Peste és mtsai. 2015). Ennek megfelelően a fotovoltaikus napelemparkok esetében is szükség van denevéreket is figyelembe vevő előzetes ökológiai hatásvizsgálatokra. A biodiverzitás csökkenésének elkerülése érdekében a napelemparkok telepítésekor figyelembe kell venni a diverzitásvesztés minimalizálását, vagy akár változatos élőhelyek kialakítását a létesítés során; a már működő napelemparkok esetében pedig kompenzációs intézkedéseket kell tenni. A regionális különbségek feltárása érdekében javasoljuk a napelemparkok globális szintű nemzetközi együttműködések keretében összehangolt monitorozását.

A sima felületek megtévesztő hatásának mérséklési lehetőségei

Eredményeink azt mutatták, hogy a denevérek mesterséges sima felületekről való ivási kísérleteinek száma csökkenthető, ha hosszú, egyenes, henger alakú tárgyakat (pl.: vékony zsinórokat) helyezünk a sima felületre. A zsinór átmérőjének növelése fokozta a mérséklő hatást, ezt a megállapítást a hangvisszajátszásos kísérlet és a matematikai modellezés is alátámasztotta. Empirikus bizonyítékot találtunk arra is, hogy a keresztezett elrendezés alkalmazása, a párhuzamos elrendezéssel megegyező távolságok fenntartásával, növeli a mérséklő hatást.

Mind a hangvisszajátszásos kísérletben, mind a matematikai modellezésben a nagyobb átmérőjű zsinórok alkalmazása esetén jelentős növekedést figyeltük meg a visszavert hang erősségében. Ennek megfelelően a viselkedési kísérlet során az ivási arány nemlineáris csökkenő tendenciát mutatott az átmérő növelésével.

Eredményeink összeecsengenek Sümer, Denzinger és Schnitzler (2009) eredményeivel, akik az amerikai késeidenevért (*Eptesicus fuscus*) vizsgálták, amelynek 35 és 45 kHz közötti maximális amplitúdójú hangokat adnak ki. Kísérletük során szintén nemlineáris mintázatot találtak a denevérek viselkedése és a zsinórok vertikális elrendezése tekintetében, a legnagyobb változást a 0,5 mm átmérőjű zsinórok esetén mutatták ki, a mi eredményeinkhez hasonlóan. Greenfeld és mtsai (2018) azt találták, hogy a vízszintesen elhelyezett, 2 mm átmérőjű zsinórok könnyen észlelhetőek a *P. kuhlii* számára. Eredményeink arra utalnak, hogy a denevérek már kis átmérőjű ($\geq 0,25$ mm) zsinórok jelenlétét is képesek érzékelni a sima felületeken, ami jelentősen csökkenti az ivási viselkedést.

A hangvisszajátszásos kísérlet és a matematikai modellezés eredményei egyaránt azt mutatták, hogy a visszhang erőssége függ a hang frekvenciájától. Általánosságban elmondható, hogy a 10 és 150 kHz között kiadott hangok esetében körülbelül 5–10 dB-es növekedést tapasztaltunk a visszhang erősségében, ami azzal magyarázható, hogy magasabb frekvenciákon a jel rövidebb hullámhossza nagyobb visszaverődést okoz (Morse és Ingar, 1986; Pye, 1993; Housto, Boonman, és Jone, 2004). Azonban 0,5 mm húrátmérő felett az interferenciajelenségek a visszhang intenzitásának erős ingadozását eredményezik, ami látszólagos intenzitáscsökkenésben nyilvánul meg (Morse és Ingard 1986; Pye 1993). Következésképpen ezek az eredmények arra utalnak, hogy a húrátmérő további növelése, különösen 1 mm felett, főként alacsony frekvenciatartományban járul hozzá az erőteljesebb visszhang képződéséhez. A denevérfajokat célzó mérséklési intézkedések esetében ezt a jelenséget

figyelembe kell venni, biztosítva, hogy a zsinór átmérője jól illeszkedjen a védeni kívánt faj/fajok által kibocsátott hangok hullámhosszaihoz.

A matematikai számítások kimutatták, hogy a sima felületre helyezett zsinórok körülbelül 10 dB-lel erősebb visszhangot képeztek, mint a felület nélküli zsinórok. Ennek magyarázata az, hogy nemcsak magának a zsinórnak a visszhangja, hanem a zsinór és a felület között képződő hangok visszaverődése is növeli a visszhang erősségét. Mivel az akusztikus tükröhatás hozzájárulhat a sima felületekre helyezett zsinórok észleléséhez, célszerű ezt kihasználni a jövőbeli mérséklési megközelítések tervezésénél.

A zsinórok elrendezése befolyásolhatja a mérséklő hatást, mivel a denevérek különböző irányokból közelítik meg a területet és a zsinórokról a hangforrás felé akkor várható a legnagyobb visszhang, ha a hang merőlegesen éri el a zsinórokat. Ennek megfelelően statisztikailag alacsonyabb ivási arányt figyeltünk meg a keresztezett zsinórelrendezés esetén. Következésképpen a jövőbeli mérséklési módszerek tervezése során fontolóra kell venni a több irányban elrendezett jó hangvisszaverő képességű henger alakú tárgyak használatát.

Vizsgálatunkban a sima felületű műanyag lap akusztikai szempontból jól reprodukálta a vízfelszín, amit az is alátámaszt, hogy a denevérek ivási viselkedése nem különbözött szignifikánsan a két felület között. Mivel az akusztikus tükrö jelensége az anyagtól független (Greif és Siemers 2010), bármely ember alkotta sima felület tájékozódási problémát okozhat. Tehát gyakorlati szempontból kulcsfontosságú annak meghatározása, hogy mely felületek tekinthetők akusztikus tükröknek. A felületek akusztikai tulajdonságai az érdességük függvényében változhatnak, amely gyártási eltérések miatt antropogén környezetben is jelentős lehet. Ez hangsúlyozza a sima felületek kvantitatív érdesség- és akusztikai jellemzésére irányuló további kutatások szükségességét. Ehhez kapcsolódóan egy háromlépéses mérséklési tervet javaslunk, amelyben először azonosítani kell a potenciálisan problémát okozó

sima felületeket; másodsor, mérséklésre alkalmas tárgyakat kell alkalmazni ezeken a felületeken; végül pedig a módosított felületeket monitorozni kell a denevérek viselkedésében bekövetkező változások megfigyelése céljából.

Potenciálisan minden nagyméretű sima felület – például ablakok, napelemek vagy műanyag- és fémfelületek – különböző dőlésszögekben, megzavarhatja a denevérek navigációját, de minden tárgy módosítása gyakorlatilag lehetetlen. A denevérek erős veleszületett vízfelismerése miatt a vízszintes, sima felületekről többször is próbálnak inni, azonban természetes környezetben a legtöbb egyed rövid időn belül új ivóhelyet keres (Greif és Siemers 2010; Russo, Cistrone és Jones 2012). Ez arra utal, hogy a maladaptív ivási viselkedés különösen akkor lehet energiaigényes, ha a mesterséges sima felületek aránya meghaladja a természetes vízfelületekét például száraz vagy antropogén területeken, és sivatagi naperóművek esetében.

A sima felületek közelsége a kolóniákhoz, hibernálóhelyekhez vagy a denevérek vonulási útvonalaihoz növelheti az ütközések kockázatát, különösen fiatal egyedek esetében, akiknek hiányzik a tapasztalat az ilyen felületek elkerülésében (Ingeme és mtsai. 2018). A vízszinteshez közeli mesterséges sima felületek, főleg száraz környezetben, nehezíthetik a vízfelületek megtalálását. Így az ilyen területeken előforduló sima felületek esetében különösen fontos a mérséklő technikák alkalmazása.

A sima felületű termékek gyártóit ösztönözni kell a denevérbarát kialakításra, figyelembe véve az akusztikai tulajdonságokat és a denevérek érzékszervi ökológiáját. A jövőbeli kutatások során pedig érdemes az akusztikus jelzések mellett a vizuális jelek szerepét is vizsgálni, mivel a kombinált alkalmazás tovább fokozhatja a mérséklő hatást.

Eredményeink azt mutatják, hogy az egymástól távol (20 cm) elhelyezkedő vékony, lineáris objektumok hatékonyak lehetnek az akusztikus szennyezés mérséklésében. Az ilyen lineáris struktúrák a felület viszonylag kis részét foglalhatják el, ami lehetővé teszi olyan megoldások fejlesztését, amelyek

minimálisan befolyásolják az ablaküvegen keresztüli kilátást vagy a napelemek energiatermelését. A világos vagy kontrasztos mintázatok további előnyt jelenthetnek például a polarizált fény okozta vonzás csökkentésében is, így egyszerre több állattaxon számára szolgálhatnak jelzéseként.

Összefoglalva, kutatásunk hatékony és könnyen alkalmazható módszert mutat a sima felületek hatásainak mérséklésére, amit viselkedési kísérletek, hangvisszajátszás és matematikai modellezés is alátámaszt. Ugyanakkor további vizsgálatok szükségesek az érzékszervi és viselkedési mechanizmusok, valamint a sima felületek ökológiai és fitness-következményeinek feltárására, különösen nagy kiterjedésű mesterséges környezetekben, mint a napelemparkok (Barré és mtsai. 2023; Szabadi és mtsai. 2023; Tinsley és mtsai. 2023).

Az állattartó telepek jellemzőinek és a táj összetételének hatása a denevérek aktivitására

Kutatásunk során négy denevérfajt és három fajcsoportot figyeltünk meg a vizsgált állattartó telepeken. Azt tapasztaltuk, hogy számos denevértaxon aktivitása magasabb volt az állattartó telepeken más élőhelyekhez képest. Továbbá összefüggéseket találtunk bizonyos denevérfajok aktivitása, a telepek jellemzői és a tájösszetétel között.

A leggyakrabban észlelt fajok – *Nyctalus* spp., *P. kuhlii/nathusii*, *P. pipistrellus* és *P. pygmaeus* – a városi élőhelyekhez jól alkalmazkodó fajok közé tartoznak, ami alátámasztja feltételezésünket, miszerint főként városi fajok használják a telepeket. A denevér fajok melyek jól alkalmazkodtak a városi élőhelyekhez, képesek kiaknázni az ember által átalakított élőhelyek nyújtotta adottságokat, beleértve az épületekben való szálláshely foglalást és a lámpák fényénél való táplálkozást (Ancillotto és mtsai. 2015; Dietz és Kiefer 2016; Russo és Jones 2003), így ennek köszönhetően könnyen kihasználhatják az állattartó telepek által nyújtott lehetőségeket.

Ugyanakkor a nem színurbikus *B. barbastellus* jelenlétét is kimutattuk az állattartó telepeken. A *B. barbastellus* jellemzően a jó természetességi állapotú,

őreg erdőkhöz kötődik, következésképpen a ritkább fajok közé tartozik Magyarországon (Dietz és Kiefer 2016; Görföl és mtsai. 2019; Ruczyński és mtsai. 2010; Russo és mtsai. 2004). Bár a faj aktivitása alacsony volt a többihez képest, jelenléte ezen az élőhelyen arra utal, hogy a denevérfajok széles köre profitálhat az állattartó telepek által biztosított táplálékforrásokból.

Zhan és mtsai. (2022) eredményei szintén arra utalnak, hogy a szarvasmarha-telepek számos denevérfaj számára fontos táplálkozóterület jelenthetnek. Az általuk vizsgált istállók körül leggyakrabban a *P. pipistrellus* fordult elő, ezt követték a *Myotis* fajok, továbbá a *P. pygmaeus*, *P. nathusii*, a *Plecotus* fajok és a *Rhinolophus ferrumequinum*. A két vizsgálat között tapasztalati alapján több színurbikus és rugalmas táplálkozású faj rendszeresen használja az állattartáshoz kapcsolódó élőhelyeket. Míg a két vizsgálat között tapasztalt fajösszetételbeli különbségek tükrözhetik a regionális eltéréseket a denevérközösségekben, a mintavételi módszerek különbségeit és a telepek szerkezeti sajátosságait

Az állattartó telepeken a denevérek aktivitása más élőhelyekhez viszonyítva

Az összesített denevéreaktivitás magasabb volt az állattartó telepeken, mint a szántóföldeken, a gyepterületeken, valamint a fenyő- és tölgyerdőkben, de nem magasabb, mint a települések útjain vagy a települések zöldterületein. Fajspecifikus mintázatok is találtunk: a *B. barbastellus* és a *Myotis* spp előfordulása relatív alacsonyabb volt az állattartó telepeken, mint az erdős élőhelyeken míg a *Nyctalus* spp. – mely elsősorban nyílt területeken táplálkozik – aktivitása magasabb volt az állattartó telepeken, mint az erdőben és a gyepeken, jelezve, hogy az állattartó telepek jó táplálkozási lehetőségeket biztosítanak számukra. A *P. kuhlii/nathusii* aktivitása az állattartó telepeken szignifikánsan magasabb volt a többi élőhelyhez képest, csak a gyepes és a település utak esetében nem különbözött szignifikánsan. Míg a *P. pygmaeus* más élőhelyeken is hasonló aktivitást mutatott, mint az állattartó telepeken, aktivitása csak a szántóföldeken bizonyult alacsonyabbnak.

Ezek az eredmények arra utalnak, hogy az állattartó telepeken az erőforrások elérhetősége és az élőhely minősége hasonló a városias élőhelyeken tapasztaltakhoz. Fontos azonban megjegyezni, hogy a tanulmányunkban leggyakrabban észlelt fajok a városi élőhelyeken is gyakoriak; ehhez hozzájárulhat a beépített területek által kínált nagyobb számú potenciális búvóhely, valamint az állattartó telepek településekhez való közelsége is. Továbbá a megfigyelt különbség egy része magyarázható azzal is, hogy a nyílt területeken, mint az állattartó telepek, nagyobb az észlelés valószínűsége a zárt erdőkhez képest, mivel a hang jobban terjed nyílt környezetben, ráadásul az élőhely szerkezete azt is befolyásolhatja, hogy az adott élőhelyen mely fajok fordulnak elő (Dietz és Kiefer 2016; Freeze és mtsai. 2021).

Az állattartó telepek jellemzőinek és a tájösszetétel hatása

Eredményeink, miszerint a *P.kuhlii/nathusii* fajok a szarvasmarha tartó telepeken aktívabbak voltak, mint a lovas gazdaságokban, összhangban áll Zahn és mtsai (2010) eredményeivel, miszerint a denevérek előnyben részesítették a tehénistállóban való táplálkozást a lóistállóhoz viszonyítva. Ez részben a tartási célok és körülmények különbségeivel magyarázható: a szarvasmarhákat gyakran nagy egyedsűrűségű, nyitottabb istállóban tartják hús- és tejtermelés céljából, míg a lovakat főként rekreációra és sportcélokra, tisztább, zártabb istállóban. A trágya mennyisége, összetétele és az ehhez kapcsolódó rovarpopulációk eltérései szintén befolyásolhatják a denevéraktivitást. Továbbá a lovas és vegyes gazdaságok kis mintaszáma ($n = 7-8$) korlátozza az eredmények általánosíthatóságát, ezért a jövőbeni vizsgálatokba többféle telep bevonása szükséges.

Szignifikáns kapcsolatot találtunk a denevéraktivitás és két tájtípus – a mesterséges környezet és a mesterséges környezetben lévő zöldterületek – relatív aránya között, ami részben az élőhelyek gyakoriságából és így nagyobb statisztikai erőből adódhat. A telep központja körüli 250 m-es körben a mesterséges környezet nagyobb aránya összefüggött a *Nyctalus* spp. magasabb

aktivitásával, amit részben a nagyobb állatállományú gazdaságok épületei és infrastruktúrája magyarázhat. Ugyanezen körön belül a zöldterületek aránya pozitívan korrelált az összesített denevéraktivitással, ami arra utal, hogy a telepen belüli és környéki mozaikos zöldfelületek kedvezőek a szinurbikus fajok, például *P. kuhlii*, *P. pipistrellus* és *Nyctalus noctula* számára (Ancillotto és mtsai. 2015; Roeleke mtsai. 2016; Gili mtsai. 2020; Printz és Jung 2023). Ez az eredmény releváns lehet az állattartó telepek tervezésében és fejlesztésében.

A gazdaságok, mint denevérélőhelyek, a denevérek ökoszisztéma-szolgáltatása és denevérbarát fejlesztési lehetőségek

Az állattartó telepeken megfigyelt magas denevéraktivitás arra utal, hogy a denevérek ökoszisztéma-szolgáltatásai a kártevő rovarokkal szemben a – mezőgazdasági területek mellett – a telepeken is hasznosak lehetnek. Az állattenyésztés hozama magába foglalja például a tej, a hús és a tojás mennyiségét, az utódok számát és az általános pénzügyi hasznot. A rovarcsípések azonban kedvezőtlenül befolyásolhatják ezeket a mérőszámokat. A rovarok jelenléte és csípései megnövekedett stresszt válthat ki, a csípések irritációt és heveny fájdalmat okozhatnak továbbá vírusokat, baktériumokat és endoparazitákat is átadhatnak, ami orvosi kezelést igénylő betegségekhez vezethet (Baldacchino és mtsai. 2013; Wichgers Schreur és mtsai. 2021). Ezek az egészségügyi problémák nemcsak az állatok jólétét érintik, hanem növelik az állatorvosi költségeket és a gazdaságok kiadásait, ami végső soron csökkenti a gazdák jövedelmét. A legtöbb denevérfaj rovarrevő és egyetlen éjszaka alatt rendszerint a testtömegük 70–84%-ának megfelelő mennyiségű rovarot fogyasztanak el, amivel jelentősen hozzájárulnak a rovarpopulációk szabályozásához, és enyhítik a rovarok állatállományra gyakorolt negatív hatásait.

Az állattartó gazdaságok ugyanakkor potenciális kockázatokat is jelentenek (Russo és mtsai. 2024). Az iparosított gazdaságok gyakran használnak vegyszereket, gyógyszereket és gépesített rendszereket (Mallin és mtsai. 2015;

Tullo és mtsai. 2019), amelyek negatívan hathatnak a denevérekre. A növényvédő és rovarölő szerek közvetlen halálos vagy szubletális hatásokkal járhatnak, emellett a rovarölő szerek használata csökkentheti a denevérek számára elérhető táplálék mennyiségét. Vidéki területeken a szabadon élő házimacskák is jelentős veszélyt jelentenek, a denevérzsákmányolásuk révén. A kockázatok ellenére a megfelelően kialakított és kezelt állattartó telepek optimális élőhelyek lehetnek a denevérek számára, amennyiben kedvező táplálkozó- és szálláshelyeket nyújtanak, míg a denevérek jelenlétükkel támogathatják a kártevők elleni védekezést (García és mtsai. 2021; Puig-Montserrat és mtsai. 2015).

A fenntarthatóbb gazdálkodás érdekében elengedhetetlen a táji összekapcsoltság és az élőhelyek sokféleségének fejlesztése, például bokorsorok és erdőfoltok fenntartásával, valamint a fény- és zajszennyezés mérséklésével. Emellett alapvető fontosságú a denevérek védelme a vegyszerekkel és ragadozókkal, különösen a házi macskákkal szemben. Továbbá fontos a denevérek és a haszonállatok közötti potenciális érintkezés minimalizálása, a zoonotikus betegségek átadási valószínűségének csökkentése végett (Bonilla-Aldana és mtsai. 2021; Szentiványi és mtsai. 2023), így célszerű az állattartó létesítményektől távolabb eső területeken – például felhagyott pajtákban vagy fákön elhelyezett odvakkal – kialakítani a denevér szálláshelyeket. Az ilyen intézkedésekkel a gazdák segíthetik a denevérek és az állatállomány együttélését, ezzel hozzájárulva a fenntarthatóbb gazdálkodási gyakorlatokhoz.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A napelemparkok denevérekre gyakorolt ökológiai hatásainak vizsgálata

1. Tudomásunk szerint kutatásunk az első mely a napelemparkok denevérekre gyakorolt hatását vizsgálta. Ennek során megállapítottuk, hogy a jellemzően városi és mezőgazdasági élőhelyeken található denevérfajok (*H. savii*, *N. noctula* és *P. kuhlii*) gyakran megtalálhatók napelemparkok területén is, míg más fajok (*Myotis* spp. és *B. barbastellus*) nem, vagy csak ritkán fordulnak elő ebben az élőhelytípusban.
2. Eredményeink alapján a napelemparkok és a szántóföldek denevérközösségei hasonlítottak a leginkább, ami rámutat arra, hogy a napelemparkok denevérközösségei leginkább a tájban előforduló „legrosszabb” élőhelyekre hasonlítanak.

A sima felületek megtévesztő hatásának mérséklési lehetőségei

1. Kutatásunk során azt találtuk, hogy a denevérek mesterséges sima felületekről való ivási kísérleteinek száma sikeresen mérsékelhető, ha hosszú, egyenes, henger alakú tárgyakat (pl.: vékony zsinórokat) helyezünk a sima felületre. Eredményeinket viselkedési és hangvisszajátszásos kísérletekkel, valamint matematikai modellezéssel is alátámasztottuk.
2. Kimutattuk, hogy a visszhang erőssége, ezáltal a denevérek ivási kísérleteinek gyakorisága függ a zsinórok átmérőjétől, illetve a felületen való elrendezésétől.
3. A matematikai modellezés eredményei alapján a felületre érkező hang frekvenciája befolyásolja a visszhang erősségét.

Az állattartó telepek jellemzőinek és a táj összetételének hatása a denevérek aktivitására

1. Eredményeink alapján a denevéraktivitást szignifikánsan befolyásolták a telepek jellemzői és a környező táj összetétele: a *P. kuhlii/nathusii* aktivitása magasabb volt szarvasmarhatelepeken, míg a *Nyctalus* spp. aktivitása nőtt a mesterséges felszínek arányával.

- I. A teljes denevéraktivitás pozitív kapcsolatban állt a mesterséges környezeten belüli zöldterületek arányával.
- II. Az állattartó telepeken több denevérfaj aktivitása is magasabb volt, mint mezőgazdasági területeken és erdei élőhelyeken, ugyanakkor az erdőhöz kötődő fajok (*B. barbastellus*, *Myotis* spp.) alacsonyabb aktivitást mutattak a telepek területén.

AZ ÉRTEKEZÉSHEZ TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Disszertációhoz közvetlenül kapcsolódó publikációk:

Abdul Rahman NA., Firtha G, **Szabadi KL**, Jones G, Zsebők S (2024). Mitigating the deceptive effects of smooth surfaces: Subtle surface modifications can eliminate maladaptive drinking attempts by bats. *Animal Conservation*, 27(6), 788–801. <https://doi.org/10.1111/acv.12960>

Szabadi KL, Kurali A, Estók P, Görföl T, Froidevaux JSP, Zsebők S (2025). Bats in livestock farms—Effects of farm characteristics and landscape composition on bat activity. *Landscape Ecology*, 40(9), 179. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02196-9>

Szabadi KL, Kurali A, Rahman NAA, Froidevaux JSP, Tinsley E, Jones G, Görföl T, Estók P, Zsebők, S. (2023). The use of solar farms by bats in mosaic landscapes: Implications for conservation. *Global Ecology and Conservation*, 44, e02481. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02481>

Disszertáció témájához kapcsolódó publikációk:

Tinsley E, Froidevaux JSP, Zsebők S, **Szabadi KL**, Jones G (2023). Renewable energies and biodiversity: Impact of ground-mounted solar photovoltaic sites on bat activity. *Journal of Applied Ecology*, 60(9), 1752–1762. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14474>

Egy oldalas idegen vagy magyar nyelvű összefoglaló - előadás vagy poszter alapján - tudományos folyóiratban, vagy annak különszámában:

Szabadi KL; Kurali A, Estók P, Görföl T, Zsebők S: Denevéraktivitás állattartó gazdaságokban: a telepjellemzők, az épített környezet és a zöldfelületek szerepe, 3. Urbanizációs Ökológia Konferencia, Pécs, Magyarország 2025. október 16-17.

Szabadi KL, Firtha G, Zsebők S Denevérek és mesterséges sima felületek – hogyan lehet mérsékelni az akusztikus csapdák hatását? A Magyar Etológiai Társaság XXVI. Konferenciája, Veszprém, Magyarország 2024.11.21-2024.11.23. p 38

Kurali A, Kugler P. **Szabadi KL**, Győrössy D, Kriska G, Egri Á, Estók P, Boldogh SA, Görföl T, Bán M, Váczi O, Zsebők S Solar panels and bats: behavioural and ecological investigations to better understand the impact of renewable energy

developments on wildlife 16th European Bat Research Symposium Tarragona, Catalonia, Spain, 2024.09.02-2024.09.06 p 161

Szabadi KL; Kurali A, Golen G, Estók P, Görföl T, Zsebők S Állattartó telepek jelentősége a denevérközösségek életében, XIII. Magyar Természetvédelmi Biológiai Konferencia, Pécs, Magyarország 2022.08.28. - 2022.08.31. p103

Szabadi KL, Kurali A, Abdul Rahman NA, Görföl T, Estók P, Zsebők S Napelemparkok ökológiai hatása - A hazai denevérfajok fajspecifikus válaszai, 12. Magyar Ökológus Kongresszus, Vác, Magyarország 2021.08.24. - 2021.08.26. p108.

Szabadi KL, Kurali A, Abdul Rahman NA, Görföl T, Estók P, Zsebők S Napelemparkok denevérekre gyakorolt ökológiai hatása, 2. Urbanizációs Ökológia Konferencia, Győr, Magyarország 2021.10.14. - 2021.10.15.: pp 37-38

IRODALOMJEGYZÉK

- Ancillotto L, Tomassini A, Russo D (2015). The fancy city life: Kuhl's pipistrelle, *Pipistrellus kuhlii*, benefits from urbanisation. *Wildlife Research* 42, 598. doi:[10.1071/wr15003](https://doi.org/10.1071/wr15003)
- Azam C, Le Viol I, Julien J-F, Bas Y, Kerbiriou C (2016). Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecology* 31, 2471–2483. doi:[10.1007/s10980-016-0417-3](https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3)
- Baldacchino F, Muenworn V, Desquesnes M, Desoli F, Charoenviriyaphap T, Duvallet G (2013). Transmission of pathogens by *Stomoxys* flies (Diptera, Muscidae): a review. *Parasite* 20, 26. doi:[10.1051/parasite/2013026](https://doi.org/10.1051/parasite/2013026)
- Báldi A, Batáry P, Kleijn D (2013). Effects of grazing and biogeographic regions on grassland biodiversity in Hungary – analysing assemblages of 1200 species. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 166, 28–34. doi:[10.1016/j.agee.2012.03.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.005)
- Barré K, Thomas I, Le Viol I, Spoelstra K, Kerbiriou C (2023). Manipulating spectra of artificial light affects movement patterns of bats along ecological corridors. *Animal Conservation* 26, 865–875. doi:[10.1111/acv.12875](https://doi.org/10.1111/acv.12875)
- Bartoń K (2010). MuMIn: Multi-Model Inference. doi:[10.32614/cran.package.mumin](https://doi.org/10.32614/cran.package.mumin)
- Blaydes H, Potts SG, Whyatt JD, Armstrong A (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>
- Bonari G, Fajmon K, Malenovský I, Zelený D, Holuša J, Jongepierová I, Kočárek P, Konvička O, Uříčář J, Chytrý M (2017). Management of semi-natural grasslands benefiting both plant and insect diversity: The importance of heterogeneity and tradition. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 246, 243–252. doi:[10.1016/j.agee.2017.06.010](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.010)
- Bonilla-Aldana DK, Jimenez-Diaz SD, Arango-Duque JS, Aguirre-Florez M, Balbin-Ramon GJ, Paniz-Mondolfi A, Suárez JA, Pachar MR, Perez-Garcia LA, Delgado-Noguera LA, Sierra MA, Muñoz-Lara F, Zambrano LI, Rodriguez-Morales AJ (2021). Bats in ecosystems and their wide spectrum of viral infectious potential threats: SARS-CoV-2 and other emerging viruses. *International Journal of Infectious Diseases* 102, 87–96. doi:[10.1016/j.ijid.2020.08.050](https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.08.050)
- Dietz C, Kiefer A (2016). *Bats of Britain and Europe* Bloomsbury Publishing, London

- Freeze SR, Shirazi M, Abaid N, Ford M, Silvis A, Hakkenberg D (2021). Effects of environmental clutter on synthesized Chiropteran echolocation signals in an anechoic chamber. *Acoustics* 3, 391–410. doi:[10.3390/acoustics3020026](https://doi.org/10.3390/acoustics3020026)
- Friard O, Gamba M (2016). BORIS: a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations Ed R Fitzjohn. *Methods in Ecology and Evolution* 7, 1325–1330. doi:[10.1111/2041-210x.12584](https://doi.org/10.1111/2041-210x.12584)
- García D, Miñarro M, Martínez-Sastre R (2021). Enhancing ecosystem services in apple orchards: Nest boxes increase pest control by insectivorous birds Ed L Marini. *Journal of Applied Ecology* 58, 465–475. doi:[10.1111/1365-2664.13823](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13823)
- Gili F, Newson SE, Gillings S, Chamberlain DE, Border JA (2020). Bats in urbanising landscapes: habitat selection and recommendations for a sustainable future. *Biological Conservation* 241, 108343. doi:[10.1016/j.biocon.2019.108343](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108343)
- Görföl T, Haga K, Dombi I (2019) Roost selection of barbastelle bats (*Barbastella barbastellus*) in an intensively managed floodplain forest: implications for conservation. *J. Zool*, 15, pp.184-186.
- Greenfeld A, Saltz D, Kapota D, Korine C (2018). Managing anthropogenic driven range expansion behaviourally: Mediterranean bats in desert ecosystems. *European Journal of Wildlife Research* 64. doi:[10.1007/s10344-018-1182-1](https://doi.org/10.1007/s10344-018-1182-1)
- Greenspoon L, Krieger E, Sender R, Rosenberg Y, Bar-On YM, Moran U, Antman T, Meiri S, Roll U, Noor E, Milo R (2023). The global biomass of wild mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120, e2204892120. doi:[10.1073/pnas.2204892120](https://doi.org/10.1073/pnas.2204892120)
- Greif S, Siemers BM (2010). Innate recognition of water bodies in echolocating bats. *Nature Communications* 1, 107. doi:[10.1038/ncomms1110](https://doi.org/10.1038/ncomms1110)
- Greif S, Zsebők S, Schmieder D, Siemers BM (2017). Acoustic mirrors as sensory traps for bats. *Science* 357, 1045–1047. doi:[10.1126/science.aam7817](https://doi.org/10.1126/science.aam7817)
- Harrison C, Lloyd H, Field C, (2017). Evidence review of the impact of solar farms on birds, bats and general ecology. Natural England Technical Report. Available from: <https://10.13140/RG.2.2.24726.96325> (accessed December 14, 2022)
- Hartig F (2022). DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi- level/mixed) regression models.
- Hill AP, Prince P, Piña Covarrubias E, Doncaster CP, Snaddon JL, Rogers A (2018). AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and

- the environment Ed N Isaac. *Methods in Ecology and Evolution* 9, 1199–1211. doi:[10.1111/2041-210X.12955](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12955)
- Horváth G, Blahó M, Egri Á, Kriska G, Seres I, Robertson B (2010). Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology* 24, 1644–1653. doi:[10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x)
- Horváth G, Kriska G, Malik P, Robertson B (2009). Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7, 317–325. doi:[10.1890/080129](https://doi.org/10.1890/080129)
- Horváth G, Móra A, Bernáth B, Kriska G (2011). Polarotaxis in non-biting midges: Female chironomids are attracted to horizontally polarized light. *Physiology & Behavior* 104, 1010–1015. doi:[10.1016/j.physbeh.2011.06.022](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.06.022)
- Houston RD, Boonman AM, Jones G (2004). Do echolocation signal parameters restrict bats' choice of prey. *Echolocation in bats and dolphins*, 339, 345.
- Ingeme Y, Bush A, Lumsden L, van Harten E, Bourne S, Reardon T (2018). Hit or miss could mean life or death for juvenile southern bent-wing bats. *Australasian Bat Society News* 50, 59. Available form: <http://st1.asflib.net/JNS/AUNat/ASF/ASF-ConfProc/ASFConfProcs31.html> (accessed December 14, 2022).
- Jung K, Threlfall CG (2016). Urbanisation and its effects on bats—a global meta-analysis. *Bats in the Anthropocene: conservation of bats in a changing world*, 13-33.
- Klem D (1990). Collisions between birds and windows: mortality and prevention. *J. Field Ornithol.* 61, 120–128. <https://www.jstor.org/stable/4513512>
- Kunz TH, Braun De Torrez E, Bauer D, Lobova T, Fleming TH (2011). Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1223, 1–38. doi:[10.1111/j.1749-6632.2011.06004.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06004.x)
- Kusch J, Schmitz A (2013). Environmental Factors Affecting the differential use of foraging habitat by three sympatric species of *Pipistrellus*. *Acta Chiropterologica* 15, 57–67. doi:[10.3161/150811013x667858](https://doi.org/10.3161/150811013x667858)
- Kuttruff H (2017). *Room acoustics*, Sixth edn. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Laforge A, Archaux F, Coulon A, Sirami C, Froidevaux J, Goux N, Ladet S, Martin H, Barré K, Roemer C, Claireau F, Kerbiriou C, Barbaro L (2021). Landscape composition and life-history traits influence bat movement and space use: Analysis of 30 years of published

- telemetry data. *Global Ecology and Biogeography* 30, 2442–2454. doi:[10.1111/geb.13397](https://doi.org/10.1111/geb.13397)
- Loss SR, Will T, Loss SS, Marra PP (2014). Bird–building collisions in the United States: Estimates of annual mortality and species vulnerability. *The Condor* 116, 8–23. doi:[10.1650/CONDOR-13-090.1](https://doi.org/10.1650/CONDOR-13-090.1)
- Lüdecke D, Ben-Shachar M, Patil I, Waggoner P, Makowski D (2021). performance: An R package for assessment, comparison and testing of statistical models. *Journal of Open Source Software* 6, 3139. doi:[10.21105/joss.03139](https://doi.org/10.21105/joss.03139)
- Malik P, Hegedüs R, Kriska G, Horváth G (2008). Imaging polarimetry of glass buildings: why do vertical glass surfaces attract polarotactic insects? *Applied Optics* 47, 4361. doi:[10.1364/AO.47.004361](https://doi.org/10.1364/AO.47.004361)
- Mallin MA, McIver MR, Robuck AR, Dickens AK (2015). Industrial swine and poultry production causes chronic nutrient and fecal microbial stream pollution. *Water, Air, & Soil Pollution* 226. doi:[10.1007/s11270-015-2669-y](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2669-y)
- Morse PM, Ingard KU (1986). Theoretical acoustics. Princeton university press.
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin PR, O’Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Henry M, Stevens H, Szoecs E, Wagner H (2016). vegan: Community ecology package. R package version 2.4–1. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed December 14, 2022).
- QGIS Development Team. (2009). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Paradis E, Schliep K (2019). ape 5.0: an environment for modern phylogenetics and evolutionary analyses in R Ed R Schwartz. *Bioinformatics* 35, 526–528. doi:[10.1093/bioinformatics/bty633](https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty633)
- Peste F, Paula A, Da Silva LP, Bernardino J, Pereira P, Mascarenhas M, Costa H, Vieira J, Bastos C, Fonseca C, Pereira MJR (2015). How to mitigate impacts of wind farms on bats? A review of potential conservation measures in the European context. *Environmental Impact Assessment Review* 51, 10–22. doi:[10.1016/j.eiar.2014.11.001](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.11.001)
- Printz L, Jung K (2023). Urban areas in rural landscapes – the importance of green space and local architecture for bat conservation. *Frontiers in Ecology and Evolution* 11, 1194670. doi:[10.3389/fevo.2023.1194670](https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1194670)
- Puig-Montserrat X, Torre I, López-Baucells A, Guerrieri E, Monti MM, Ràfols-García R, Ferrer X, Gisbert D, Flaquer C (2015). Pest control service provided by bats in

- Mediterranean rice paddies: linking agroecosystems structure to ecological functions. *Mammalian Biology* 80, 237–245. doi:[10.1016/j.mambio.2015.03.008](https://doi.org/10.1016/j.mambio.2015.03.008)
- Pye JD (1993). Is fidelity futile? The ‘true’ signal is illusory, especially with ultrasound. *Bioacoustics* 4, 271–286. doi:[10.1080/09524622.1993.10510438](https://doi.org/10.1080/09524622.1993.10510438)
- Rainho A, Augusto AM, Palmeirim JM (2010). Influence of vegetation clutter on the capacity of ground foraging bats to capture prey. *Journal of Applied Ecology* 47, 850–858. doi:[10.1111/j.1365-2664.2010.01820.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01820.x)
- REN21 Report, Renewables (2022). global status report; REN21 Secretariat. Available from: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (accessed December 14, 2022).
- Roeleke M, Teige T, Hoffmeister U, Klingler F, Voigt CC (2018). Aerial-hawking bats adjust their use of space to the lunar cycle. *Movement Ecology* 6. doi:[10.1186/s40462-018-0131-7](https://doi.org/10.1186/s40462-018-0131-7)
- Ruczyński I, Nicholls B, MacLeod CD, Racey PA (2010). Selection of roosting habitats by *Nyctalus noctula* and *Nyctalus leisleri* in Białowieża Forest—Adaptive response to forest management? *Forest Ecology and Management* 259, 1633–1641. doi:[10.1016/j.foreco.2010.01.041](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.041)
- Russ J (2012). British bat calls: a guide to species identification. Pelagic publishing.
- Russo D, Ancillotto L (2015). Sensitivity of bats to urbanization: a review. *Mammalian Biology* 80, 205–212. doi:[10.1016/j.mambio.2014.10.003](https://doi.org/10.1016/j.mambio.2014.10.003)
- Russo D, Cistrone L, Jones G (2012). Sensory ecology of water detection by bats: a field experiment Ed B Fenton. *PLoS ONE* 7, e48144. doi:[10.1371/journal.pone.0048144](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048144)
- Russo D, Cistrone L, Jones G, Mazzoleni S (2004). Roost selection by barbastelle bats (*Barbastella barbastellus*, Chiroptera: Vespertilionidae) in beech woodlands of central Italy: consequences for conservation. *Biological Conservation* 117, 73–81. doi:[10.1016/s0006-3207\(03\)00266-0](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(03)00266-0)
- Russo D, Jones G (2003). Use of foraging habitats by bats in a Mediterranean area determined by acoustic surveys: conservation implications. *Ecography* 26, 197–209. doi:[10.1034/j.1600-0587.2003.03422.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2003.03422.x)
- Russo D, Tanalgo K, Rebelo H, Cistrone L (2024). To improve or not to improve? The dilemma of “bat-friendly” farmland potentially becoming an ecological trap. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 375, 109215. doi:[10.1016/j.agee.2024.109215](https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109215)

- Simmons NB, Cirranello AL (2024). Batnames.org Species List Version 1.5. doi:[10.5281/ZENODO.10580176](https://doi.org/10.5281/ZENODO.10580176)
- Steinfeld H, Wassenaar T, Jutzi S (2006). Situación, fuerzas motrices y tendencias de los sistemas de producción agropecuaria en los países en desarrollo: -EN- Livestock production systems in developing countries: status, drivers, trends -FR- Les systèmes de production animale dans les pays en développement : statuts, moteurs, tendances -ES-. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE* 25, 505–516. doi:[10.20506/rst.25.2.1677](https://doi.org/10.20506/rst.25.2.1677)
- Sümer S, Denzinger A, Schnitzler H-U (2009). Spatial unmasking in the echolocating Big Brown Bat, *Eptesicus fuscus*. *Journal of Comparative Physiology A* 195, 463–472. doi:[10.1007/s00359-009-0424-9](https://doi.org/10.1007/s00359-009-0424-9)
- Szabadi KL, Kurali A, Rahman NAA, Froidevaux JSP, Tinsley E, Jones G, Görföl T, Estók P, Zsebök S (2023). The use of solar farms by bats in mosaic landscapes: Implications for conservation. *Global Ecology and Conservation* 44, e02481. doi:[10.1016/j.gecco.2023.e02481](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02481)
- Tanács E, Belényesi M, Lehoczki R, Pataki R, Petrik O, Standovár T, Pásztor L, Laborczi A, Szatmári G, Molnár Z, Bede-Fazekas Á, Somodi I, Kristóf D, Kovács-Hostyánszki A, Török K, Kisé Fodor L, Zsembery Z, Friedl Z, Maucha G (2022). Compiling a high-resolution country-level ecosystem map to support environmental policy: methodological challenges and solutions from Hungary. *Geocarto International* 37, 8746–8769. doi:[10.1080/10106049.2021.2005158](https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2005158)
- Tinsley E, Froidevaux JSP, Zsebök S, Szabadi KL, Jones G (2023). Renewable energies and biodiversity: Impact of ground-mounted solar photovoltaic sites on bat activity. *Journal of Applied Ecology* 60, 1752–1762. doi:[10.1111/1365-2664.14474](https://doi.org/10.1111/1365-2664.14474)
- Tölgyesi C, Bátori Z, Pascarella J, Erdős L, Török P, Batáry P, Birkhofer K, Scherer L, Michalko R, Košulič O, Zaller JG, Gallé R (2023). Ecovoltaics: Framework and future research directions to reconcile land-based solar power development with ecosystem conservation. *Biological Conservation* 285, 110242. doi:[10.1016/j.biocon.2023.110242](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110242)
- Tullo E, Finzi A, Guarino M (2019). Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of The Total Environment* 650, 2751–2760. doi:[10.1016/j.scitotenv.2018.10.018](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.018)
- Van De Ven D-J, Capellan-Peréz I, Arto I, Cazcarro I, De Castro C, Patel P, Gonzalez-Eguino M (2021). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports* 11, 2907. doi:[10.1038/s41598-021-82042-5](https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5)

- Walston LJ, Li Y, Hartmann HM, Macknick J, Hanson A, Nootenboom C, Lonsdorf E, Hellmann J (2021). Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. *Ecosystem Services* 47, 101227. doi:[10.1016/j.ecoser.2020.101227](https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227)
- Wichgers Schreur PJ, Vloet RPM, Kant J, Van Keulen L, Gonzales JL, Visser TM, Koenraadt CJM, Vogels CBF, Kortekaas J (2021). Reproducing the Rift Valley fever virus mosquito-lamb-mosquito transmission cycle. *Sci Rep* 11:1477.
- Wilson DE, Mittermeier RA (2019). Handbook of the mammals of the world. Lynx edicions, Barcelona
- Yovel Y, Franz MO, Stilz P, Schnitzler H-U (2008). Plant Classification from Bat-Like Echolocation Signals Ed PE Bourne. *PLoS Computational Biology* 4, e1000032. doi:[10.1371/journal.pcbi.1000032](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000032)
- Zahn A, Bauer S, Kriner E, Holzhaider J (2010). Foraging habitats of *Myotis emarginatus* in Central Europe. *European Journal of Wildlife Research* 56, 395–400. doi:[10.1007/s10344-009-0331-y](https://doi.org/10.1007/s10344-009-0331-y)
- Zahn A, Gerges M, Gohle D, Kriner E, Lustig A, Meiswinkel B, Rudolph BU, Swoboda B (2022). Ställe als Jagdhabitate für Fledermäuse. – ANLiegen Natur 44(1): online preview, 8 p., Laufen; www.anl.bayern.de/publikationen.
- Zsebök S, Estók P, Görföl T (2012). Acoustic discrimination of *Pipistrellus kuhlii* and *Pipistrellus nathusii* (Chiroptera: Vespertilionidae) and its application to assess changes in species distribution. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 58(2), 199-209.