

Vízírovarok polarizációérzékelése, poláros ökológiai csapdák¹

KRISKA GYÖRGY^{1,2}

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Biológiai Szakmódszertani Csoport, 1117 Budapest, Pázmány sétány 1/C.

² HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont, Vízi Ökológiai Intézet, Lendület Folyóvízi Ökológia Kutatócsoport, 1113 Budapest, Karolina út 29-31.

E-mail: kriska.gyorgy@ttk.elte.hu

Kivonat. Az áttekintő tanulmányban bemutatott kutatások egyrészt új adatokat eredményeztek különböző vízírovaraxonok polarizációérzékelésével és ennek biológiai szerepével kapcsolatban, másrészt bemutatták különböző mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok vízírovarokra kifejtett hatásait. Az első részben ismertetett kutatások a kérészek (Ephemeroptera), a szitakötők (Odonata), az árvaszünnyogok (Chironomidae) és a bögölyök (Tabanidae) körében tártak fel olyan fénypolarizáció-érzékelésen alapuló viselkedésmintákat, amelyek meghatározó szerepet töltenek be az egyes taxonok túlélésében. A második tematikai egységbe sorolt kutatások nyomán vált egyértelművé, hogy a polarotaktikus vízírovarok tojásrakásra sokszor a vízfelszínnel szemben előnyben részesítenek olyan, élőhelynek teljesen alkalmatlan mesterséges felületeket, melyek erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza. Az ilyen mesterséges felületek közelében gyakorta megfigyelhető szembeszökő mértékű rovarpusztulás fontos szerepet játszott az ökológiai csapda fogalmának tudományos meghatározásában. Az ökológiai csapdák speciális formája a vízírovarokat fenyegető poláros fényszennyezés, melynek tipikus forrásai a kőolaj- és pakuravak, az aszfaltutak, a mezőgazdaságban használatos fekete műanyag fóliák, az üvegházak és épületek üvegfelületei, az autók karosszériája, fekete sírkövek, a napelemek és napkollektorok. Ha egy polarotaktikus vízírovar választhat e vízszintesen polarizáló felületek és egy vízfelület között, akkor az előbbiek szupernormális polarizációs jele miatt nem a vizet választja. E jelenségnek a feltárása vezetett el az ökológiai fényszennyezés egy új válfájának, a poláros fényszennyezésnek a felismeréséhez és meghatározásához.

Kulcsszavak: kompenzációs repülés, polarizációlátás, polarotaxis, *Palingenia longicauda*, *Ephoron virgo*, *Hydropsyche pellucidula*, *Sympetrum*

Elfogadva: 2024.11.17.

Elektronikusan megjelent: 2024.11.22.

¹ Akadémiai nagydoktori mű rövid ismertetése (védés éve: 2021). A teljes disszertáció elérhetősége: <https://real-d.mtak.hu/1254/>

Bevezetés

RUDOLF SCHWIND a Regensburgi Egyetem Állattani Intézet professzorának felfedezése (SCHWIND 1983a, b, 1984a, b, 1985a, b, 1989, 1991, 1995), miszerint a vízben és nedves anyagokban élő rovarok szeme képes érzékelni a fénypolarizációt, és ezek a rovarok a vízfelszínről visszatükröződő vízszintesen poláros fény segítségével találják meg életterüket, felhívta a figyelmet arra, hogy az egyes vízirovartaxonok szaporodási és kolonizációs viselkedésének értelmezéséhez elengedhetetlen a vizes élőhelyek optikai környezetének fénypolarizációs feltárása és a vízirovarok polarotaktikus viselkedésének részletes tanulmányozása. E felismerés nyomán közel 20 éve alkalmaztuk kutatásainkban és esetenként tovább is fejlesztettük (MIZERA *et al.* 2001, EGRI *et al.* 2018) az optikai környezet polarizációs mintázatát feltáró képpalkotó polarimetriát (HORVÁTH & VARJÚ 1997), valamint vizsgáljuk és értelmezzük az egyes polarizációs mintázatok vízirovarokra gyakorolt hatásait. Kutatásaink bizonyították, hogy a repülő polarotaktikus vízirovarok távérzékelésük során felhasználják a vizes élőhelyek és a vérszívó bögölyök esetében a gazdaállatok fénypolarizációs mintázatából eredő információkat, amelyek meghatározó jelentőségűek lehetnek a szaporodási, kolonizációs és táplálkozási viselkedésükben.

Az elmúlt 20 évben számos alkalommal igazoltuk, hogy egyes globálisan elterjedt mesterséges objektumok (pl. aszfaltutak, üvegépületek, napelemek) optikai sajátásaik folytán jelentős mértékű vízirovar-pusztulások okozói lehetnek, így az édesvizek biológiai sokféleségének megőrzése szempontjából is kitüntetett figyelmet kell fordítani az antropogén eredetű fénypolarizációs jelenségek és az általuk kiváltott polarotaktikus viselkedésformák feltárására. Munkánk fontos hatásának tartom, hogy eredményeink hozzájárultak az ökológiai csapda fogalmának meghatározásához (KOKKO & SUTHERLAND 2001, SCHLAEPFER *et al.* 2002, ROBERTSON & HUTTO 2006) és lehetőséget adtak arra, hogy leírjuk az ökológiai fényszennyezés egy új típusát, a poláros fényszennyezést (HORVÁTH *et al.* 2009).

A jelen összefoglaló első részében azokat a kutatásainkat mutatom be, amelyek célja a polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovartaxonoknál. Itt ismertetem a kérészek (Ephemeroptera), az árvaszúnyogok (Chironomidae) és a bögölyök (Tabanidae) polarotaxisával valamint több taxon polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálatával kapcsolatos eredményeinket.

Az összefoglaló második része tartalmazza mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálatára vonatkozó eredményeinket. Itt mutatom be a különböző színárnyalatú gépkocsik, a pernyemezők, a folyóparti üvegépületek, a fényes fekete sírkövek és a hidak vízirovarokra gyakorolt hatásait. E helyen kerül ismertetésre az előbb felsorolt, valamint más, itt részletesen nem kifejtett kutatások egyfajta szintézisaként, a poláros fényszennyezés, mint a környezeti ártalom egy újonnan felismert formája; a poláros fényszennyezés kivédésének, ill. hasznosításának lehetőségei.

Eredmények

1. Polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovar-taxonoknál

1.1. A tiszavirág (Palingenia longicauda) polarotaktikus viselkedése

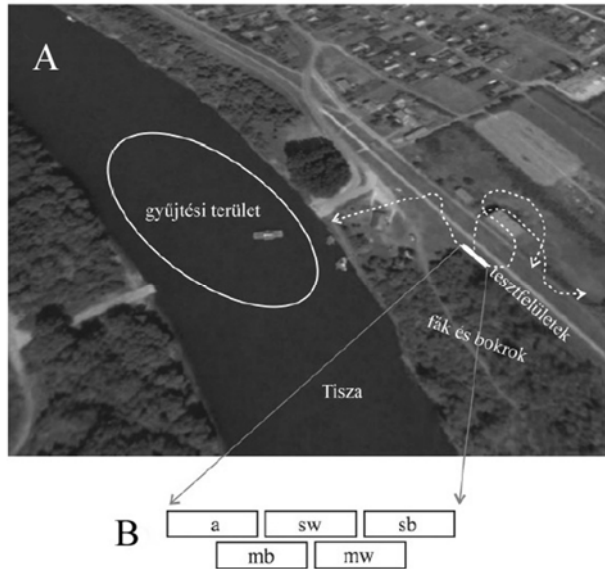
A tiszavirág (*Palingenia longicauda* (OLIVIER, 1791)) imágói rajzásuk során a Tisza fölött repülnek. Mivel rajzáskor vízszintes irányban nem távolodnak el jelentősebb mértékben a víztől, a repülő egyedeknek a sikeres szaporodáshoz nincsen feltétlenül szükségük a víz fénypolarizáción alapuló érzékelésére. Mindezek alapján fölmerül a kérdés, hogy a patak lakó kérészfajokhoz hasonlóan a *P. longicauda* is rendelkezik-e polarotaxissal? A kérdés megválaszolására érdekében terepkísérleteket végeztünk a tiszavirág rövid rajzási periódusa alatt (1. ábra). A terepkísérletben használt különböző polarizációs sajátságú teszt-felületek fölött a *P. longicauda* két, egymástól jelentősen különböző repülési viselkedését sikerült megfigyelni. Az egyik a vízkereső, a másik pedig a vízfelszín fölött kialakuló, vízkövető repülés volt. A vízkereső repülés megkezdésekor a rovarok egyenes vonalban vagy egy nagyobb ív mentén, akár 15–30 m magassáig emelkedve repülnek, majd nagy magasságban szállnak mindaddig, amíg nem érzékelnek egy nagyobb kiterjedésű, vízszintesen polarizáló felületet, ami kiváltja a vízkövető repülést. Ez utóbbi viselkedést alacsony repülési magasság (10–50 cm) és cikk-cakkos, a vízfelszín fölötti, vagy esetünkben a fólia egyik szélétől a másikig haladó röppálya jellemzi.

A nagyméretű, vízszintesen poláros fényt visszaverő felület érzékelése mind a hím, mind pedig a nőstény imágók esetében nagy jelentőséggel bírhat az állatok repülésének irányításában. A hím szubimágóknál ez biztosítja az imágóvá vedlést követően a folyó sodorvonalához való visszatérést, a nőstényt kereső hím egyedeknél pedig lehetővé teszi, hogy a folyóba torkolló kisebb csatornák és ártéri állóvizek által megtévesztett állatok visszatérhessenek a folyó fölé, vagy megakadályozza, hogy e mellékvizek rossz irányba vezessék az állatokat. A nőstény tiszavirágoknál elsősorban a a folyásiránnyal szembeni, néhány kilométeres kompenzációs repülés során fontos a folyó nagy kiterjedésű és vízszintesen polarizáló felülete, ami a nagyobb magasságban repülő kérésznőstények számára is biztos támpontot jelent.

Összefoglalva megállapítható, hogy a tiszavirág rajzásakor két viselkedésforma (vízkövető és vízkereső repülés) jellemző az állatokra, amelyek kiváltásában az erősen és vízszintesen poláros, megfelelően nagy kiterjedésű felület megléte vagy hiánya jelenti a kulcsingert (KRISKA *et al.* 2007).

1.2. Polarotaxis az árvaszúnyogoknál: a nőstény árvaszúnyogok vonzódnak a vízszintesen poláros fényhez.

Különböző optikai sajátságú teszt-felületek alkalmazásával sikerült igazolnunk több árvaszúnyogtaxon esetében a pozitív polarotaxis meglétét. Kísérleteinkben a nőstény árvaszúnyogok gyakorlatilag csak a fekete folyadékcsapdához vonzódtak, amely erősen és vízszintesen poláros fényt tükrözött Brewster-szögben. Mindezek alapján megállapítható, hogy a vizsgált árvaszúnyogfajok nőstényei, más vízirovarokhoz hasonlóan, pozitív polarotaxissal rendelkeznek.



1. ábra. (A) Légifotó (forrás: Google Earth – Imagery ©2005 Digital Globe) a Tisza azon szelvényéről, ahol a terepkísérletünk folyt. Ellipszis jelöli azt a folyószakaszt, ahol a tiszavirágokat gyűjtöttük. Fehér négyszög jelzi a tesztfelületek helyét a gátoldalban. A szaggatott görbék a műanyag fóliákat elhagyó kérészek három jellegzetes röppályáját ábrázolják. (B) A tesztfelületek elrendezése. a: alumínium fólia, mb: matt fekete vászon, mw: matt fehér vászon, sw: fényes fehér műanyag fólia, sb: fényes fekete műanyag fólia. (Az ábra forrása: KRISKA GY. (2020) Vízirovarok polarizációérzékelése, poláros ökológiai csapdák. MTA doktori értekezés)

Figure 1. (A) Aerial photograph (source: Google Earth— Imagery ©2005 Digital Globe) about the section of river Tisza where our field experiment was performed with *P. longicauda* mayflies. The ellipse represents the river area where the mayflies were collected. The white rectangle shows the position of the test surfaces on the shore, from which the water surface was not visible due to trees and bushes. Dotted curves represent three typical paths of mayflies leaving the plastic sheets. (B) Arrangement of the test surfaces; a: aluminium foil, mb matt black cloth, mw matt white cloth, sw shiny white plastic sheet, sb shiny black plastic sheet (Original figure in: KRISKA GY. (2020) Polarization vision of aquatic insects, polarized ecological traps. DSc dissertation)

Eredményeink szerint az árvaszúnyogoknál általánosnak tekinthető a polarotaxis. Az ismert polarotaktikus árvaszúnyogfajok száma háromról (LERNER *et al.* 2008, 2011, MELTSEY *et al.* 2008) több mint a duplájára nőtt kutatásunk eredményeként (HORVÁTH *et al.* 2011).

1.3. Bögölyök polarotaktikus viselkedésének vizsgálata

1.3.1. Polarotaxis kísérleti bizonyítása bögölyöknél: a polarizációlátás lehetséges szerepe a bögölyök szaporodási és táplálkozási viselkedésében

Vizsgálataink során arra kerestük a választ, hogy a bögölyök érzékeli-e a poláros fényt, és ha igen, szemüknek melyik részével. Kísérleteink során bebizonyítottuk, hogy a bögölyök szemének ventrális része érzékeli a vízszintesen poláros fényt, de az összetett

szem frontális, laterális és dorzális része nem érzékeny a lineárisan poláros fényre. Ennek oka az, hogy a természetben vízszintesen poláros fényt kizárólag vízfelszínnek vernek vissza, amit a bögölyök a szemük ventrális régiójában elhelyezkedő ommatidiumokkal érzékelnek.

Korábban már több, vízbe tojástartó rovarcsoportról kiderült, hogy egyes fajaik vízdetekciója a vízfelszínről visszavert vízszintesen poláros fény érzékelésén alapszik (KRISKA *et al.* 1998, HORVÁTH & VARJÚ 2004). Míg azonban a vízbogarak, vízipoloskák, tegzesek, kérészek és szitakötők polarotaktikusan a víztestet keresik, hogy tojásaikat közvetlenül abba rakják, addig a bögölyök más okból kutatják polarizációlátásukkal a vizeket, például azért, hogy a vízfelszín megtalálása után fölleljék a tojástartásra alkalmas vízparti növényeket és köveket, ahonnan a lárvák kikelésük után esnek/másznak a vízbe. Kutatásaink alapján a polarizációlátásra épülő forráskeresésnek két formája különböztethető meg: (1) A forrás (pl. vízi tojástartóhely) pozitív polarotaxissal közvetlenül megtalálható. Ez a helyzet számos vízirovarnál, melyek közvetlenül a vízbe rakják tojásaikat. (2) A forrás (pl. vízparti tojástartóhely vagy gazdaállat) közvetett módon található meg polarotaxissal. A nőstény bögölyök először a vizet észleli távolról, majd a vízparti tojástartóhelyet vagy az itatónál megjelenő gazdaállatot találja meg. A hím bögölyök polarotaktikus vízdetekciója ugyancsak előnyös lehet, mert azok így a polarotaxissal a vízhez odavonzott nőstényekkel találkozhatnak és párosodhatnak.

A vérszívó rovarok közül a bögölyök az elsők, melyeknél sikerült kimutatni a pozitív polarotaxist, ami lehetőséget nyújt olyan optikai alapon működő, új rovarcspadák kifejlesztésére, amelyek a fény erős és vízszintes lineáris polarizációja révén fejtik ki jelentős vonzó és csapdázó hatásukat (HORVÁTH *et al.* 2008, KRISKA *et al.* 2008a, EGRI *et al.* 2013).

1.3.2. A gazda kültakaró optikai sajátosságainak hatása a bögölyök gazdaválasztására. A leginkább „bögölyálló” ló depolarizáló fehér szőrű.

A bögölyökkel Szokolyán (Börzsöny-hegység, 47°52' É, 19°00' K) 2008 nyarán folytatott terepkísérletünk során véletlenül sikerült megfigyelnünk egy szabadtéri karámban, hogy a sötétbarna színezetű lovakat a bögölyök jól láthatóan sokkal nagyobb számban támadják, mint a fehéréket. Ez a megfigyelés vetette fel annak a vizsgálatnak a létjogosultságát, amely a lovak kültakarójának optikai sajátosságait vizsgálná a bögölyvonzóképeség tekintetében.

A kutatás eredményeként sikerült bizonyítani, hogy a fehér lovak a bögölyök számára kevésbé vonzóak, mint a sötétebb színűek. Kísérletekkel és képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal sikerült alátámasztani, hogy e jelenség a testfelület fénypolarizáló képességével és a bögölyöknél általunk felfedezett pozitív polarotaxissal (HORVÁTH *et al.* 2008, HORVÁTH *et al.* 2010a) magyarázható.

A témához kapcsolódva egy további kutatás során sikerült bizonyítanunk, hogy a bögölyök polarotaktikus gazdadetekciója során a poláros jel a polarizáció iránytól függetlenül is képes kiváltani a bögölyök vonzását (EGRI *et al.* 2012a). Tehát sikerült felfedeznünk a bögölyök esetében egy újfajta polarotaxist, amely eltér a korábban leírt polarotaktikus vízdetekciótól (HORVÁTH *et al.* 2008), és amelynek kiváltó ingere csak a vízszintesen poláros fény lehet.

További, a bögölyökkel kapcsolatos kutatásaink eredményeként igazoltuk a csíkos és foltos mintázatú kültakaró és az emberi bőr bögölytaszító hatását is (EGRI *et al.* 2012b, BLAHÓ *et al.* 2012a, HORVÁTH *et al.* 2019). A tapasztalt jelenség egyértelműen a bögölyök

polarotaktikus gazdadetekciójához volt köthető. A bögölytaszító hatás megjelent a fényintenzitás tekintetében homogén, ugyanakkor a polarizációirány mintázat vonatkozásában inhomogén tesztfelületek esetében is. Kutatásaink szerint a kültakaró inhomogén polarizációs mintázatának kiemelt szerepe van a bögölytaszító hatás elérésében, ami akkor is képes kifejteni a hatását, ha bögölyöket vonzó kémiai anyagok (pl. ammónia, szén-dioxid) vannak jelen (BLAHÓ *et al.* 2013).

1.4. A polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálata különböző vízirovarfajoknál

Egy víztest fényessége (a vízből érkező fény intenzitása) nem érzékelhető a vízfelszínhez viszonyított alacsony látószög esetében, mert a vízből érkező fényt elnyomja a vízfelszínről tükröződő fény. Eképpen a víztestek világosságának távérzékelésében a vízből érkező fény p polarizációfokának lehet jelentősége. A fénypolarizáló mesterséges tárgyak vízirovarokra kifejtett hatásának mértéke függ a tárgyfelület érdességétől, megvilágításától, a megfigyelés irányától és az adott vízirovarfaj p^* polarizációs ingerküszöbétől. A fajspecifikus és hullámhosszfüggő p^* a p lineáris polarizációfok azon minimális értékét jelenti, amely még képes pozitív polarotaxist kiváltani.

Kutatásunk fő célkitűzése az volt, hogy kísérleti alapon szolgáltatassunk adatokat a szitakötők, a kérészek és a bögölyök p^* -értékeiről. A spektrum vörös, zöld és kék tartományában elvégzett képalkotó polarimetriai mérésekkel és választásos terepkísérletekkel sikerült kimérni olyan szitakötők, kérészek és bögölyök ventrális szemrészének p^* -értékét (KRISKA *et al.* 2009), amelyek pozitív polarotaxisának igazolása már korábban megtörtént (kérészek: KRISKA *et al.* 1998, 2007, szitakötők: WILDERMUTH 1998, HORVÁTH *et al.* 1998, 2007, BERNÁTH *et al.* 2002, bögölyök: HORVÁTH *et al.* 2008). A vízirovarok p^* -értékeinek ismerete lehetőséget ad arra, hogy az ember alkotta optikai környezetben mérjük és monitorozzuk azokat a mesterséges felületeket, amelyek vízszintesen poláros fényt visszaverve megteveszthetik a vizet kereső különböző vízirovar fajokat.

1.5. A kérészek számára kedvezőtlen élőhelyek elkerülése polarotaktikus viselkedés révén. A kérészek legkevésbé a függőlegesen poláros fényhez vonzódnak.

A víz fölött rajzó kérészfajok, mint például az *Ephoron virgo* (OLIVIER, 1791) és a *Palingenia longicauda* esetében a pozitív polarotaxisnak meghatározó szerepe van abban, hogy rajzás közben e rovarok végig a vízfelszín fölött repüljenek (KRISKA *et al.* 2007, MÁLNÁS *et al.* 2011, SZÁZ *et al.* 2015, FARKAS *et al.* 2016). A kérészfajok egy része rajzáskor több mint egy kilométerre is eltávolodhat a víztől (BRODSKIY 1973), náluk a pozitív polarotaxis segítheti a nőstények visszatérését a vízhez, ahol lerakhatják tojáscsomóikat.

Az előzmények nyomán fölmerülhet a kérdés, hogy a függőlegesen poláros fény gyakorol-e valamilyen hatást a kérészek rajzási viselkedésére? Ennek megválaszolása érdekében öt terepkísérletben vizsgáltuk az *E. virgo* és *Caenis robusta* EATON, 1884 viselkedését vízszintesen és függőlegesen poláros, valamint polarizálatlan fényt kibocsátó lámpákkal.

Az eredmények arról tanúskodnak, hogy a két vizsgált kérészfaj egyedei kevésbé vonzódnak a függőlegesen poláros fényhez, mint a polarizálatlanhoz. A különbség a vízszintesen poláros és a függőlegesen poláros fény között még kifejezettebb: az előbbi sokkal vonzóbb, mint az utóbbi. E viselkedés jelentősége abban áll, hogy a kérészek vízfelszíni repülésükkor visszafordulnak azon felszínrészekről, amelyek függőlegesen vagy nem-vízszintesen poláros fényt tükröznek, így jelezve a kérészek rajzása és tojásrakása szempontjából alkalmat-

lan partrészeket. Egy különleges következménye e viselkedésnek a kompenzációs repülésben részt vevő kérészek visszafordulása a hidaknál, ahol a híd vízre vetülő árnyékánál és tükröképénél gyakran függőlegesen poláros fény tükröződik (MÁLNÁS *et al.* 2011).

A dunavirág és a *C. robusta* fajok esetében a függőlegesen poláros fény minimális vonzásának oka és egyben jelentősége abban rejlik, hogy a vízparti növényzet árnyéka és tükröképe a vízfelszín szélén gyengén ($p < 25\%$) és nem vízszintesen poláros (FARKAS *et al.* 2016). A vízpartokon gyakran kialakul egy vízszintes, sötét, iszapos sáv, amely általában vízszintesen poláros fényt reflektálva vízfelszínt utánoz a polarotaktikus vízirovarok számára. Ha a vízfelszín szélén nem alakulna ki a vízparti növényzet függőlegesen poláros árnyéka és tükröképe, amely távol tartja a kérésznőstényeket az iszapfelszíntől, akkor azok lerakhatnák tojáscsomóikat a lárvák kifejlődésére alkalmatlan területre.

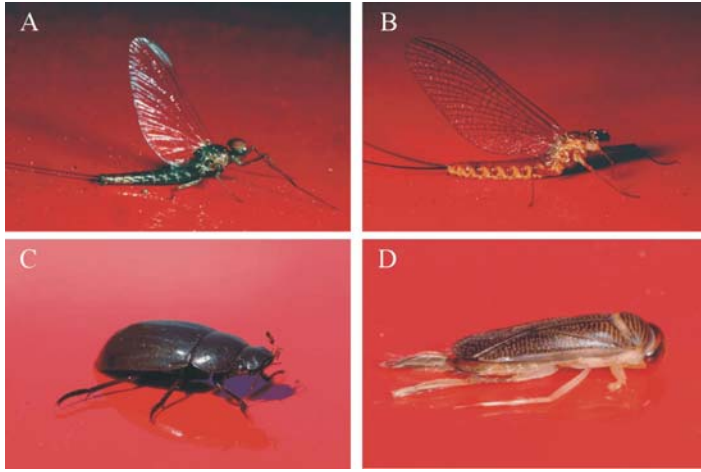
A folyóalakó kérészek kolonizációjában fontos szerepe lehet a pozitív polarotaxisnak, amely a folyó és mellékfolyó vízszintesen poláros jele alapján vezeti a kérésznőstényeket az alkalmas élőhelyekre. Másrészről a folyóba torkolló kisebb csatornák és ártéri kisvizek alkalmatlan helyei lehetnek a lárvák kifejlődésének, ezért kifejezetten előnyös lehet, hogy ezek kisebb mérete miatt a vízfelszínen kialakuló teljes vagy majdnem teljes árnyékoltság, és a növényzet tükröződése miatt kialakuló, nem vízszintes polarizáció távol tartja a kérésznőstényeket.

2. Mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok hatása vízirovarokra

2.1. Különböző színárnyalatú gépkocsik polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálata

Terepi tapasztalataink és irodalmi adatok is arra utaltak, hogy a gépkocsik vízszintes, sötét színárnyalatú karosszériaelemei és a ferde szélvédők vonzzák a polarotaktikus vízirovarokat (2. ábra) (WYNIGER 1955, SVIHLA 1961, WATSON 1992, WILDERMUTH 1998, STEVANI *et al.* 2000a, b, BERNÁTH *et al.* 2001a, GÜNTHER 2003, TORRALBA & OCHARAN 2003, WILDERMUTH & HORVÁTH 2005), aminek feltételezhetően az áll a háttérben, hogy ezek a részek vízszintesen poláros fényt tükröztek. Mindezek nyomán a kutatás alapvető célkitűzése az volt, hogy választ kapjunk a kérdésre, miért vonzódnak a vízirovarok a piros színű és más sötét színárnyalatú gépkocsikhoz?

Kutatásainkkal bizonyítottuk, hogy a gépkocsik vonzó hatásának háttérben a rovarok fénypolarizáció-érzékelésen alapuló vízkeresése áll (KRISKA *et al.* 2006a). A sötét színű, különösen a fekete és piros gépkocsik fényes felületéről erősen és vízszintesen poláros fény verődik vissza, amely a polarotaktikus rovarok számára vizet jelez. Ez az oka annak, hogy a repülő rovarok rászállnak a gépkocsik karosszériájára, és gyakran a tojásaikat is erre a felületre rakják le a víz helyett. A fejlődésükben vízhez kötődő rovarok elsősorban a vizes élőhelyek közelében repülnek nagy számban, ezért a piros és fekete gépkocsik ezeken a területeken jelenthetik rájuk a legnagyobb veszélyt.



2. ábra. Vörös gépkocsi tetejére leszállt, fejlődésükben vízhez kötött rovarok. (A) Teleszkópszemű kérész (Baetidae sp.) (B) Erezett kérész (Heptageniidae sp.). (C) Kis csibor (*Hydrochara caraboides*). (D) Búvárpóloskafaj (*Sigara striata*). A rovarokat 2005 áprilisában és májusában figyeltük meg és fényképeztük le Magyarországon, ugyanazon piros autó (Daewoo Matiz) tetején. (Az összes ábra forrása: KRISKA GY. (2020): Vízirovarok polarizációérzékelése, poláros ökológiai csapdák. MTA doktori értekezés)

Figure 2. Insects associated with water landing on the roof of a red car. (a) A mayfly, Baetidae sp. (b) Another mayfly, Heptageniidae sp. (c) A water beetle, *Hydrochara caraboides*. (d) A water bug, *Sigara striata*. The insects were observed and photographed in April and May of 2005 in Hungary on the roof of the same red car (Daewoo Matiz). (All figures in: KRISKA GY. (2020) Polarization vision of aquatic insects, polarized ecological traps. DSc dissertation)

2.2. Pernyemezők polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálata

Minden erősen és vízszintesen polarizáló természetes vagy mesterséges felület vonzza a repülő, vízkereső rovarokat, amelyek a vizet pozitív polarotaxissal találják meg (HORVÁTH & VARJÚ 2004, HORVÁTH & KRISKA 2008). Ezek alapján logikus volt a feltevés, hogy az erősen polarizáló fekete pernyemezők szintén vonzóak lehetnek a repülő polarotaktikus vízirovarok számára. Azonban terepen azt tapasztaltuk, hogy a fekete hamuval borított föld egyáltalán nem vonzó a vízirovarok számára, a visszavert fény magas lineáris polarizációfoka ellenére sem. Kutatásunk során megállapítottuk, hogy ezt a tapasztalatot a hamurétegről visszavert fény polarizációirány-mintázatának sajátágaival lehet magyarázni: a pernyemező hamurétege durva felszínű a megperzselt szalmaszálak véletlenszerű irányultsága miatt. Minden érdes felszínre jellemző, hogy a róla visszavert fény polarizációiránya mindig merőleges a visszaverődés síkjára (KÖNNEN 1985, HORVÁTH & VARJÚ 2004). A napfénnel megvilágított pernyemezőknél a visszaverődés síkja átmegy a megfigyelőn, a Napon és a hamuréteg megfigyelt pontján. A visszaverődés síkja függőlegesen a szoláris meridián (SM) és az antiszoláris meridián (ASM) irányában, és ferde bármely más megfigyelési irányban. Ez a magyarázata azon eredményünknek, miszerint a pernyemezőkről visszavert fény átlagos polarizációs iránya közel vízszintes a SM és az ASM irányokban, és ferde bármely más megfigyelési irányban. A hamuról visszavert fény polarizációirányának nagy szórása a megperzselt szalmaszálak véletlenszerű irányával magyarázható.

Ezért tehát, bár a fekete pernyemezők erősen lineárisan polárosak, a szoláris és antiszoláris meridián irányától eltekintve a róluk visszaverődő fény átlagos polarizáció-iránya nem vízszintes, és a polarizációirány szórása mindig nagy (KRISKA *et al.* 2006b). Következésképpen az általában nem vízszintesen poláros fekete pernyemezők nem vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára, amelyeket csak a közel vízszintesen poláros fény vonz.

2.3. Folyóparti üvegépületek *Hydropsyche pellucidula*-imágókra gyakorolt hatásának vizsgálata

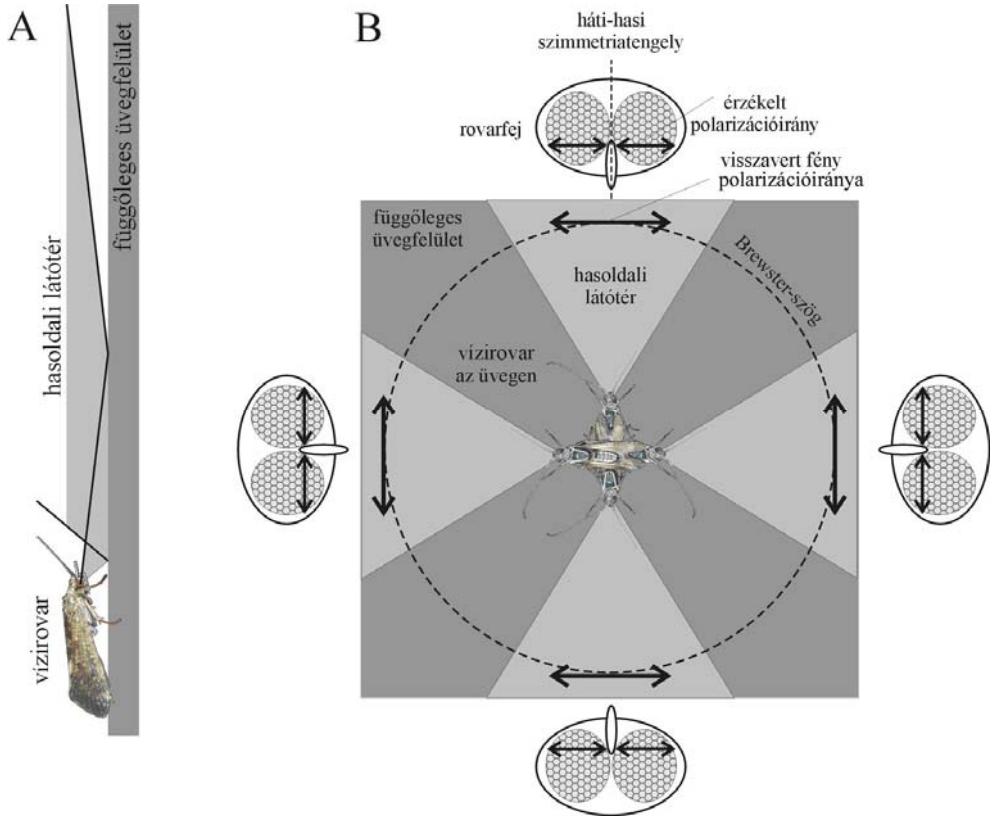
Kutatásaink során a dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula* (CURTIS, 1834)) üvegezett falú épületek melletti szaporodási viselkedését tanulmányoztuk a budapesti Dunaparton. A legintenzívebb rajzási időszakban számoltuk az épület fényes fekete és fehér függőleges üvegtábláin tartózkodó tegzesek számát, és a tömegtegzesek polarotaxisának vizsgálatára választásos laboratóriumi kísérleteket végeztünk. A tesztfelületek, az épület és ez utóbbi függőleges üvegfelületei fénypolarizálóképességét képalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös, zöld és kék tartományában.

Laboratóriumi kísérletekkel sikerült igazolnunk, hogy a nőstény *H. pellucidula*-egyedek tojásrakásukkor előnyben részesítik az erősen és vízszintesen poláros fényt tükröző tesztfelületeket a csak gyengén és nem vízszintesen poláros fényt visszaverő tesztfelületekkel szemben. Ebből egyértelműen következik a tegzesek pozitív polarotaxisa (KRISKA *et al.* 2008b).

Képalkotó polarimetriai vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az üvegfelületekkel fedett függőleges épületfalaknak mindig vannak olyan részei, melyek a röpködő polarotaktikus *H. pellucidula*-egyedek számára vonzó polarizációjú fényt tükröznek. Ezzel magyarázható, hogy a Dunából kirepülő tegzesek előbb-utóbb a Duna-parti épületek függőleges üvegfelületeihez vonzódnak, s ott folytatják a rajzásukat a napállás és az égbolt felhőzettségétől függetlenül. Másrészt pedig miután e tegzesek leszálltak a függőleges üvegfelületekre, azok jó része megint a számukra vonzó polarizációjú fényt ver vissza (3. ábra), ami a többi érzékszervük által szolgáltatott jelzéseket elnyomva szupernormális ingerként, vizet utánozva ott marasztalja őket (MALIK *et al.* 2008). Így a rovarok egyes mesterséges ingerek hatására kialakuló ökológiai csapdák eredményeként olyan torz viselkedésmintákat követnek, amelyek populációik hanyatlásához, vagy akár kipusztulásához is vezethetnek (BATTIN 2004, KOKKO & SUTHERLAND 2001, SCHLAEPFER *et al.* 2002). Erre láthattunk példát a *H. pellucidula* folyóparti üvegépületeknél történő tömegrajzása esetén is.

2.4. Temetőben vizet kereső polarotaktikus *Sympetrum* szitakötők viselkedése a fényt polarizáló fekete sírköveknél

A szitakötők vizeknél fellépő természetes viselkedése egyes antropogén eredetű, optikai tulajdonságaival vizet utánzó felületeknél (például fekete agrofóliáknál, nyíltfelszínű olajtározóknál és sötét színű gépkocsiknál) is megjelenik (WILDERMUTH & SPINNER 1991, WILDERMUTH 1993, 1998, HORVÁTH & ZEIL 1996, HORVÁTH *et al.* 1998, BERNÁTH *et al.* 2001a, WILDERMUTH & HORVÁTH 2005). Ugyanezt tapasztaltuk a kiskunhalasi református ótemetőben: a *Sympetrum* szitakötőnem számos fájának egyedei nagy számban vonzódnak a temető fekete, polírozott sírköveinek vízszintes felületeihez, ahol pontosan olyan viselkedést mutatnak, mint a vizek esetén (4. ábra).



3. ábra. (A) Egy függőleges üvegfelületre leszállt vízirovar szemének hasoldali látótérébe a környezetből jövő fény jut az üvegről történő tükröződés után. (B) Bárhogyan is irányul a függőleges üvegfelületre leszállt rovar feje, az üvegről Brewster-szögben visszaverődő fény kettősfejú nyilakkal jelzett rezgéssíkja mindig merőleges a rovar háti-hasi szimmetriasíkjára. Ezért az üvegről tükröződő fény rovar által érzékelt polarizációiránya is mindig „vízszintesnek” tűnik, ami vonzó a rovarnak.

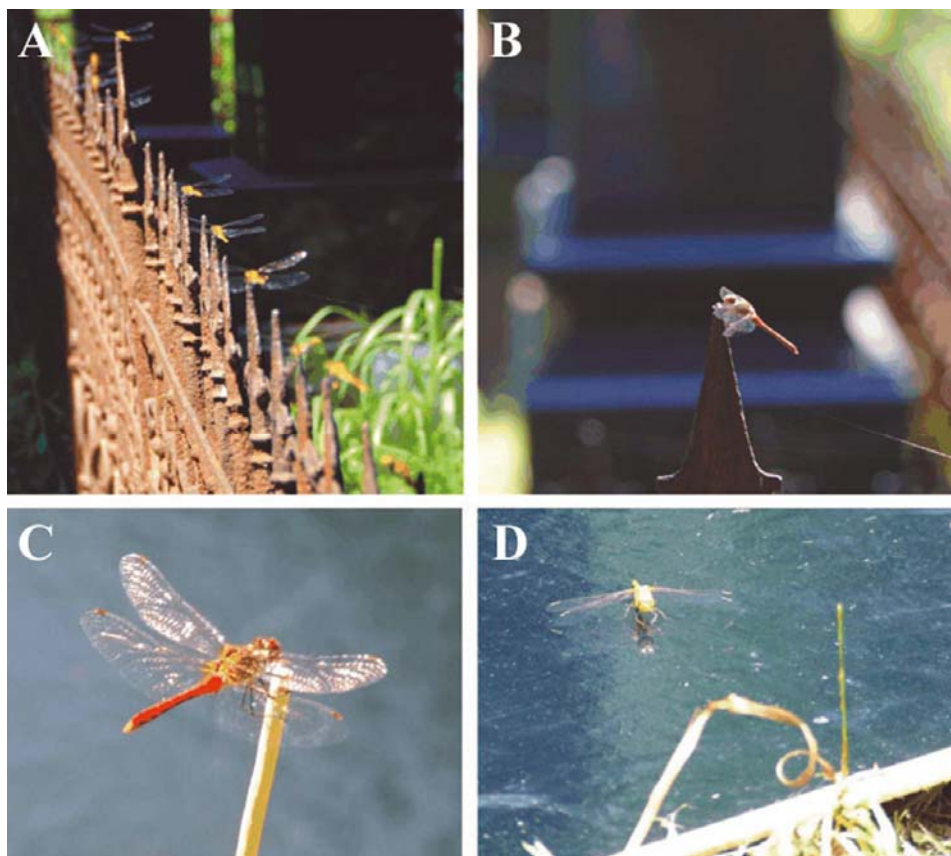
Figure 3. (A) Side view of a light beam (light gray) reflected from a vertical glass surface and received by the ventral eye region of an insect landed on the glass. (B) How a polarization-sensitive insect landed on a vertical glass surface and looking into different directions (here only four such directions are shown) perceives the direction of polarization (double-headed arrows) of light reflected from the glass at the Brewster angle (dashed circle). Since the perceived direction of polarization is always perpendicular to the insect's dorsoventral symmetry axis (independently of the direction of view), the light reflected from the Brewster angle is always attractive to a polarotactic aquatic insect landed on the glass.

Korábbi kutatások kimutatták, hogy egyes szitakötők polarotaktikusak, azaz a vizet a felszínéről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik föl (HORVÁTH *et al.* 1998, WILDERMUTH 1998). Ennek alapján föltételeztük, hogy a temetői szitakötők különös viselkedésében is fontos szerepe lehet a fekete sárga fénypolarizációs sajátosságainak, a rovarok polarizációlátásának. Ezért hipotézisünk bizonyítása érdekében képalkotó polarimetriával mértük a sárga tükröződési-polarizációs mintázatokat, és választásos terepkiérletekkel

igazoltuk azt, hogy a fekete sírkövekhez vonzódó *Sympetrum* szitakötőfajok is pozitív polarotaxissal rendelkeznek (HORVÁTH *et al.* 2007).

A képalkotó polarimetriai mérések igazolták, hogy a fényes fekete, hozzátétőlegesen vízszintes felületű sírkövek a környezetükkel és más sírkövekkel ellentétben erősen és vízszintesen poláros fényt tükröznek (HORVÁTH *et al.* 2007).

A szitakötőket vonzó sírkövek hatására megvalósulhatnak egy ökológiai csapda kialakulásának feltételei (SCHLAEPFER *et al.* 2002): megtévesztik a tojásrakáshoz készülő szitakötő nőstényeket, melyek így a sírkövekre rakják le a tojásaikat. A tojások a szárazon rövid idő alatt kiszáradnak és elpusztulnak.



4. ábra. (A–B) Hím és nőstény *Sympetrum* szitakötők ülőágként használják egy fekete síremlék vaskerítésének tartóoszlopait a kiskunhalasi temetőben. (C) Hím *Sympetrum* szitakötő egy ülőág csúcsán egy fekete síremlék mellett. (D) Nőstény *Sympetrum* szitakötő érinti meg a fényes fekete tesztfelületet.

Figure 4. (A) Male and female dragonflies (*Sympetrum* sp.) perching on the tips of sunlit iron railings in a cemetery in the Hungarian town Kiskunhalas. (B, C) Males of *Sympetrum* sp. perching near polished black tombstones. (D) A female *Sympetrum* sp. displaying touching behaviour at the shiny black plastic sheet used in the double-choice experiments.

2.5. A tiszavirág és a dunavirág rajzási viselkedésének módosulása a környezet természetes polarizációs mintázatának megváltozására

2.5.1. A tivadari Tisza-híd (48°03' É, 22°31' K) hatása a tiszavirág (*Palingemia longicauda*) kompenzációs repülésére

A kutatás alapját az a megfigyelés adta, miszerint a tivadari Tisza-hídnál a tiszavirág nőstények vízfolyással szembeni kompenzációs repülését megállította a híd, ezért a tojásrakás közvetlenül a híd előtt következett be. A repülő nőstények nem a híd mechanikai hatása miatt álltak meg, mert még azelőtt megszakították továbbhaladó repülésüket, mielőtt fizikai kontaktusba kerültek volna a híddal. Mivel a tiszavirággal folytatott korábbi kutatásainkkal igazoltuk, hogy a nőstények vízfolyással szembeni kompenzációs repülését a folyófelszín vízszintesen poláros jele irányítja (KRISKA *et al.* 2007), logikusnak tűnt az a feltételezés, hogy az ingermozgás megállítását a vezérlő polarizációs jel híd általi megváltozása, eltűnése okozhatja. Ezt a feltételezést támasztotta alá az a tény is, hogy a kompenzációs repülés folytatásának nem volt mechanikai akadálya, hiszen a kérészek a híd alatt, vagy afölött átrepülve is folytathatták volna előrehaladásukat, mindezt azonban csak az egyedek igen kis hányada tette meg. A tiszavirág tivadari Tisza-hídnál tapasztalt különleges viselkedésének okát a jelenség részletes dokumentálásával, valamint a környezet polarizációs mintázatainak kimérésével és kiértékelésével tártuk fel.

A polarizációs mintázatok kiértékelése alapján megállapítható volt, hogy a vízfelszín mérsékelt és vízszintesen poláros égboltfényt és napfényt reflektál. Ez a két hatás egy polarizációs csatornát képez, amely szűkebb, mint a folyó teljes szélessége, és irányítja a hímek vízkövető, valamint a nőstények kompenzációs repülését (KRISKA *et al.* 2007). Ezzel szemben a folyóparti növényzettel árnyékolt vízfelszín alacsony polarizációfokú függőlegesen poláros fényt ver vissza. A híd szürke betonelemei és zöld fém szerkezete gyakorlatilag polarizálatlan fényt tükröz. A vízfelszínről a híd árnyékában szintén polarizálatlan fény érkezik. A polarizálatlan fényt tükröző felületek megszakítják a folyó korábban folytonos polarizációs csatornáját, amely a kérészek mozgását irányítja. Ez végsősoron megzavarja a tiszavirág nőstények kompenzációs repülését, amelyek többsége nem képes tovább haladni a híd alatt vagy fölött, a folyó középvonalát követve.

Kutatásaink eredményeként igazoltuk, hogy a hidak optikai gátat (barriert) jelentenek a *P. longicauda* kérészek számára, amely akadályát jelentheti a faj kolonizációjának és a populáció ivararányának megváltozását okozhatja (MÁLNÁS *et al.* 2011).

2.5.2. A dunavirág (*Ephoron virgo*) foto- és polarotaxisán alapuló komplex ökológiai csapda

A dunavirág (*Ephoron virgo*) tömegrajzása közel 40 év óta először 2012-ben jelent meg a budapesti Duna-szakaszon, ami együtt járt a védett kérészfaj tömeges pusztulásával a kivilágított hidakon (5. ábra). A jelentős természetvédelmi kárt okozó jelenség vizuális ökológiai hátterének feltárására és a dunavirág polarizációérzékelésének megismerésére helyszíni megfigyeléseket, választásos terepkísérleteket és képalkotó polarimetriai méréseket végeztünk.

A dunavirág sötétedés utáni rajzásakor az első nimfa-imágó átalakulások után 30–60 perccel a nőstények laza szerkezetű rajokba szerveződve megkezdik kompenzációs repülésüket a Duna középvonala fölött, a folyásiránnyal szemben. Mozgásuk során természetes viszonyok között a dunavirágok nem közelítik meg a partot, ugyanakkor azokat a parton lévő mesterséges fényforrások erőteljesen vonzzák, így elhagyva a folyó középvonalát a partra



5. ábra. (A–D) Az *Ephoron virgo* éjszakai tömegrajzása a Dunán átívelő hídon Tahitótfalunál. (A) A rajzás során a híd alatti folyószakasz partjáról megfigyelhető volt, hogy a kompenzációs repülésben résztvevő nőstény kérészek fölrepültek a hídhöz. (B) A híd fölé érő nőstények egy része le szállt tojást rakni a hídon futó aszfaltútra, míg a többi kérész az utat megvilágító lámpáknál kialakuló tízezres rajokhoz csatlakozott. (C) A dunavirág tömegrajzásának előrehaladtával a tojásrakó nőstények egyre nagyobb tömegben borították be a híd aszfaltútját. Az úton nagy kiterjedésű fehér foltokat alkottak a már elpusztult és a még tojást rakó egyedekből álló kérésztömegek. (D) Az aszfaltfelszínen látszó fehér kérésztömegben jól fölismerhetők a sárga tojáscsomók is, amelyek egyenként több ezer tojásból állnak.

Figure 5. (A) Mass swarming of *Ephoron virgo* mayflies at night in Tahitótfalu (northern Hungary) at a bridge overarching the river Danube. (B) During the swarming we could observe that female mayflies performing their compensatory flight, flew up to the bridge-lamps. One part of females reaching the bridge landed on the asphalt road to oviposit, whereas the others joined to the swarm of several thousands individuals around the bridge-lamps. (C) With the progress of mass congregation the ovipositing females covered in greater and greater deal the asphalt road of the bridge. The mass of mayflies containing already perished and still ovipositing individuals formed large, extended, white stains. (D) The yellow egg batches are easy to recognise in the white crowd of mayflies, that consisted of several thousand eggs each.

repülnek és az ottani lámpák körül rajzanak a pusztulásukig. A kérészek e reakcióját pozitív fototaxisuk okozhatja, amelyet akár egy gyengébb fényű kézilámpával is ki lehet váltani.

A dunavirághoz hasonló életmódot folytató és vele azonos élőhelyen is élő tiszavirág (*P. longicauda*) esetében a nőstények kompenzációs repülésének a folyófelszín vízszintesen poláros jele általi polarotaktikus vezérlését korábban már igazoltuk (KRISKA *et al.* 2007, MÁLNÁS *et al.* 2011). Mindezek alapján föltételezhető, hogy a dunavirág víz fölötti rajzásában és folyó fölötti kompenzációs repülésének irányításában is fontos szerepe van a pozitív

polarotaxisnak. A kompenzációs repülést végző nőtény dunavirág egyedek útjába eső intenzív mesterséges fényforrások a vízfelület által kiváltott pozitív polarotaxist elnyomva, magukhoz vonzották e rovarokat. Ugyanakkor e fototaxis nem hatástalanította teljesen a vízfelszínről visszavert vízszintes poláros fény által a dunavirágokban kiváltott polarotaxist, mert csak a folyó közeli/fölötti mesterséges fényforrások vonzották magukhoz tömegesen a kérészeket. A hidak lámpáinak fénye által megvilágított aszfaltútjára tojásként rakó nagyszámú nőtény jelentős hányada nem a lámpák fénykörében szállt le, hanem távol attól. Ezekre nyilván nem a fototaxis hatott, hanem aktívan szálltak az út kisebb fényintenzitású, de erősen és vízszintes poláros fényt visszaverő részeire. Ily módon tehát a dunavirág hidaknál megfigyelt tömegrajzásában a domináns fototaxis mellett fontos szerepet játszott az alárendelt polarotaxis is. A pozitív fototaxis eredményezte a kérészek hidlámpákhoz való tömeges vonzódását, míg a pozitív polarotaxis pedig az aszfaltútra leszállást és tojásrakást, ami egy foto- és polarotaktikus ökológiai csapda kialakulását eredményezte.

A naplemente környékén, de még világosan rajzó tiszavirág (MÁLNÁS *et al.* 2011) és az éjjel rajzó dunavirág hidaknál tapasztalt viselkedését összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy mindkét kérészfaj esetében egy híd megállítja a nőtények kompenzációs repülését, ugyanakkor a feltorlódott kérésztömeg a tiszavirág esetében a híd előtti folyószakasz fölött, míg a dunavirágnál a híd fölött jelenik meg. Ily módon a híd előtt feltorlódó tiszavirág nőtények végül a vízbe hullva a vízbe rakják tojásaikat, míg a dunavirágnak a hidlámpák fénycsapdájába került nőtényei tojásaikkal együtt a híd aszfaltútjára hullanak. A tojáscsomók kiszáradás miatti elpusztulásával az utódgeneráció is károsodik, így a dunavirág foto- és polarotaxisán alapuló ökológiai csapda alakul ki.

Vízszintes poláros és polarizálatlan fényforrásokkal folytatott kísérleteink során sikerült kimutatnunk, hogy a vízszintes poláros fény szignifikánsan, általában egy nagyságrenddel több, kompenzációs repülésben résztvevő nőtény kérészt vonz, mint a polarizálatlan fényű fényforrás. Ennek az lehet a magyarázata, hogy bár mindkét fényforrás képes volt pozitív fototaxissal magához vonzani a kompenzációs repülésben résztvevő rovarokat, a vízszintes poláros fény a pozitív fototaxis mellett pozitív polarotaxist is kiváltott, miáltal sokkal több kérészt tudott magához vonzani (SZÁZ *et al.* 2015).

A dunavirág-egyedek tömeges pusztulása a természetvédelmi károkozás mellett veszélyes helyzetek kialakulását is okozhatja. A kérésztömeg megjelenése miatt romlanak a látási viszonyok a hidak útjain, miközben a rovartetemek miatt csúszóssá, balesetveszélyessé válnak az aszfalt útburkolatok. Közegészségügyi szempontból pedig az elpusztult kérészeket fogyasztó patkányok megjelenése jelenthet veszélyt. Mindezek alapján megállapítható, hogy több ok miatt is fontos csökkenteni a kialakult ökológiai csapda károkozását.

A fentiekben ismertetett kettős hatáson alapuló ökológiai csapda káros hatásainak mérséklésére kérészvédő fénysorompót fejlesztettünk ki (EGRI *et al.* 2017), melynek első példánya 2019. április 24-én került felszerelésre a tahiótfalui Tildy Zoltán Kis-Duna hídra.

2.6. A poláros fényszennyezés a környezet ártalmak egy új fajtája

Az elmúlt húsz évben végzett vizuális-ökológiai és környezetbiofizikai kutatásokra (HORVÁTH & ZEIL 1996, HORVÁTH *et al.* 1998, KRISKA *et al.* 1998, HORVÁTH & VARJÚ 2004, WILDERMUTH & HORVÁTH 2005, CSABAI *et al.* 2006, KRISKA *et al.* 2006a, 2006b, HORVÁTH *et al.* 2007, HORVÁTH & KRISKA 2008, KRISKA *et al.* 2008b, MALIK *et al.* 2008) alapozva mutattunk rá az ökológiai fényszennyezés (ÖF) egy új formájára, a poláros fény-

szennyezésre (PF). PF alatt szűkebb értelemben a sima (fényes) mesterséges felületekről visszaverődő, erősen és vízszintesen poláros fénynek a polarotaktikus vízirovarokra (beleértve minden rovar, melynek lárvái a vízben fejlődnek) kifejtett káros hatásait értjük.

A PF fizikai, viselkedési és ökológiai alapjai a következők: az Umow-szabály szerint, minél sötétebb egy felület a spektrum adott tartományában, annál nagyobb a róla visszaverődő fény lineáris polarizációfoka. Mivel a durva (matt) felületekről való visszaverődés depolarizációt eredményez, ezért minél simább egy felület, annál polárosabb a visszavert fény. Mivel a sima felszínű nem-fémes anyagokról visszavert fény polarizációiránya mindig merőleges a visszaverődés síkjára, ezért, ha e sík pontosan vagy közel függőleges, akkor a visszavert fény pontosan vagy közel vízszintesen poláros. Mindebből következik:

(1) Függőleges visszaverődési sík mellett a sima és fekete felületek erősen és vízszintesen poláros fényt tükröznek. (2) Minél polárosabb a fény és minél kevésbé tér el a polarizáció iránya a vízszintestől, annál vonzóbb a polarotaktikus vízirovaroknak. (3) Pontosan/közel függőleges visszaverődési sík esetén a sima és fekete felületek többé/kevésbé vonzóak a polarotaktikus rovarok számára. (4) Az erősen és vízszintesen polarizáló száraz felületekhez vonzott vízirovarok kiszáradhatnak, a felületekre rakott tojásaik pedig óhatatlanul elpusztulnak (HORVÁTH & ZEIL 1996, HORVÁTH *et al.* 1998, KRISKA *et al.* 1998, HORVÁTH & VARJÚ 2004, WILDERMUTH & HORVÁTH 2005, CSABAI *et al.* 2006, KRISKA *et al.* 2006a, HORVÁTH *et al.* 2007, HORVÁTH & KRISKA 2008, KRISKA *et al.* 2008b). (5) Az erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felületek poláros ökológiai csapdák lehetnek a tojásrakó vízirovarok számára, mivel az odavonzott polarotaktikus rovaroknak e felületekre rakott tojásai elpusztulnak (ROBERTSON & HUTTO 2006, HORVÁTH & KRISKA 2008).

A fentiek alapján a következő tézis fogalmazható meg: Sima és sötét mesterséges felületek pontosan/közel függőleges visszaverődési sík esetén többé/kevésbé vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára, ezért e rovarok poláros ökológiai csapdáiként működnek, miáltal a poláros fényszennyezés egyik legfőbb forrásainak számítanak.

A poláros fényszennyezés egyes gerincesekre és pókokra gyakorolt hatásai

A PF polarotaktikus rovarokat megtévesztő elsődleges hatása mellett a másodlagos hatásai akár előnyösek is lehetnek, mikor bizonyos állatok (például pókok, madarak, denevérek) azokkal a polarotaktikus rovarokkal táplálkoznak, melyeket a poláros fényszennyező források például földre terített mezőgazdasági fényes fekete műanyag fóliák (BERNÁTH *et al.* 2001b, 2008), aszfaltutak (KRISKA *et al.* 1998) vagy a budapesti Duna-part épületeinek üvegfelületei (KRISKA *et al.* 2008b) vonzottak magukhoz.

A rowarevő madarak számára első közelítésben előnyt jelent a poláros fényszennyező forrásokhoz odavonzott polarotaktikus rovarok tömege, amely időszakos és térben jól körülhatárolt, bő zsákmányforrást jelent. Másrészt viszont a tömegrajzó tegzesek miatt megjelenő fészekrabló szarkák és a városi környezettel együttjáró egyéb ragadozók, pl. kőbor macskák megnövekedett predációs veszélyt jelenthetnek rájuk. Ez utóbbi hatást tovább súlyosbíthatja, hogy az időszakosan (a tegzesrajzáskor) megjelenő táplálékhiány elmúltával a madarak nem találnak a területen elegendő táplálékot a fiókáik felneveléséhez. Ezáltal tehát egy kezdetben előnyösnek tűnő élőhely egyes madárfajok esetében később kifejezetten hátrányosnak bizonyulhat az utódnemzedék túlélése szempontjából, ami egy tipikus ökológiai csapda (ROBERTSON & HUTTO 2006, HORVÁTH & KRISKA 2008, ROBERTSON *et al.* 2010, PERESZLÉNYI *et al.* 2017) kialakulását eredményezheti.

A polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró természetes tényezők

A polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró mesterséges hatások mellett természetes tényezőket is megemlíthetünk. Az ősi aszfaltmocsarak esetében például a föld mélyén felhalmozódott kőolaj természetes módon került a felszínre és csapdázott polarotaktikus vízirovarokat (PILCHER & SEXTON 1993).

Miközben egy kutatásunk során arra kerestük a választ, hogy miért található jelentős mennyiségű vízirovar a borostyánban (WICHARD *et al.* 2009), egy újabb, a polarotaxissal történő vízdetektálást megzavaró természetes tényezőt sikerült felderítenünk. A balti borostyán alapanyagát az eocénben, mintegy 40–50 millió éve élt fák gyantatermelése adta. Kutatásunk során számos vízirovaraxon esetében valószínűsítettük, hogy a gyantás fatörzsek optikai sajátosságait utánzó ragacsos tesztfelületek bizonyos körülmények között a róluk visszavert erősen és vízszintesen poláros fény által megtévesztik, magukhoz vonzzák és csapdázzák a polarotaxissal vizet kereső rovarokat. Mindezek alapján feltételezhető, hogy a fentiekben leírt jelenségnek is szerepe volt abban, hogy a vízirovarok ilyen nagy számban foszilizálódtak a borostyánban (HORVÁTH *et al.* 2019).

A poláros fényszennyezés ellenszerei

A PF egyik lehetséges ellenszere, hogy az azt okozó tükröző felületeket tegyük olyan durvává, hogy a róluk visszaverődő s depolarizálódó fény polarizációfoka essen a polarotaktikus vízirovarok ingerküszöbe alá. A felületi durvaság további előnye, hogy a durva felszínről visszavert fény polarizációjának irányában általában nem vízszintes, miáltal nem vonzó a polarotaktikus vízirovarok számára.

Egy másik lehetőség a poláros fényszennyezés csökkentésére, hogy a fényt visszaverő felületeket minél világosabbá tesszük, mert az Umow-szabály szerint egy adott hullámhosszon egy felület annál kevésbé polarizálja a róla visszaverődő fényt, minél világosabb. Ennélfogva a fényes (sima) és fekete felületek a poláros fényszennyezés legerősebb forrásai, míg a matt (durva) és fehér felszínek a legkevésbé poláros fényszennyezők.

A napelemek terepkiérletű alkalmazása során figyeltünk fel egy, a poláros fényszennyezés elleni harcban fontos szerepet játszó új jelenségre: a napelemtáblák a vízirovarok számára akkor nem vonzóak, ha a felületükön fehér csíkokból álló, a visszavert fényt depolarizáló rácsmintázat található. Erősen és vízszintesen polarizáló tesztfelületekkel igazoltuk, hogy ha ezeket olyan fehér rácsosattal látjuk el, amely az egységes fényes, fekete felületet kisebb-nagyobb mértékben fölaprózza, akkor ezekre akár harmincszor kevesebb vízirovar száll le, mint az azonos felületű rácsosatlan tesztfelületekre (HORVÁTH *et al.* 2010b). A jelenség hátterében az áll, hogy a repülő vízirovarok vízszintesen poláros fényt tükröző olyan felületeket keresnek az optikai környezetükben, melyek kiterjedése egy fajra jellemző küszöbértéknél nem kisebb.

Napjainkban a gyorsan bekövetkező, globális szintű környezetváltozások miatt az ökológiai csapdák kialakulására egyre nagyobb az esély. A létező ökológiai csapdáknak ma még sajnos csak egy töredékét ismerjük, ezért az ökoszisztémára kifejtett káros hatásuk valószínűleg jóval nagyobb, mint azt eddig gondolták. Ezért is bír nagy jelentőséggel minden olyan módszer, amellyel csökkenthető az ökológiai csapdahatás.

A poláros fényszennyezés hasznosítása

A PF környezetbarát módszert kínál a haszonállattartásban igen káros, és az emberre is veszélyes betegségek kórokozóit terjesztő vérszívó bögölyök új típusú csapdába ejtésére. A szabadalmaztatott (HORVÁTH GÁBOR & KRISKA GYÖRGY (2007): Rovarcsapda, különösen bögölycsapda (701245/DO), Taba-NOid technológiának nevezett módszer kifejlesztését a bögölyök pozitív polarotaxisának felfedezése tette lehetővé, vagyis annak felismerése, hogy e vérszívó rovarok a poláros fényhez vonzódnak, ezért az ilyen fényt keltő alkalmas csapdaszerkezetekkel befoghatók és elpusztíthatók (HORVÁTH *et al.* 2008, KRISKA *et al.* 2008a, EGRI *et al.* 2012a).

Összefoglalás

A két tematikai egységre osztható cikkben bemutatott kutatásaink egyrészt új adatokat eredményeztek különböző vízirovar-taxonok polarizációérzékelésével és ennek biológiai szerepével kapcsolatban, másrészt bemutatták különböző mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok vízirovarokra kifejtett hatásait.

[1] Kimutattuk, hogy a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) más kérészfajokhoz hasonlóan rendelkezik pozitív polarotaxissal, amely ingermozgás jelentős szerepet játszik a hím és nőstény imágók rajzási viselkedésében (KRISKA *et al.* 2007).

[2] Bizonyítottuk, hogy a három korábban vizsgált melegéögvi árvaszúnyogfajon (LERNER *et al.* 2008, 2011, MELTSEY *et al.* 2008) túl további árvaszúnyogfajok rendelkeznek pozitív polarotaxissal (HORVÁTH *et al.* 2011). Az eredmények arra utalnak, hogy az árvaszúnyogoknál általánosnak tekinthető a polarotaxis. Ez az eredmény megalapozhatja vizuális alapon működő árvaszúnyogcsapdák kifejlesztését, amelyek a közegészségügyi vagy turisztikai szempontú árvaszúnyogirtások megfelelő eszközei lehetnek.

[3] Igazoltuk a bögölyök ventrális polarizációlátását és pozitív polarotaxisát (HORVÁTH *et al.* 2008, KRISKA *et al.* 2008a). A kutatás eredményeként sikerült valószínűsíteniünk a polarotaxis meghatározó szerepét a bögölyök táplálkozási és szaporodási viselkedésében. A polarotaxis domináns tulajdonságként való igazolása a nőstény és a hím bögölyöknél lehetőséget ad e rovarok optikai alapon működő, nagy hatékonyságú csapdázására (BLAHÓ *et al.* 2012b, EGRI *et al.* 2013).

Megállapítottuk, hogy a fehér szőrű lovak a bögölyök számára kevésbé vonzóak, mint a sötétebb színűek (HORVÁTH *et al.* 2010a). Kísérletekkel és képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal alátámasztottuk azt, hogy e jelenség a testfelület fénypolarizáló képességével és a bögölyök pozitív polarotaxisával magyarázható. További, a bögölyök polarotaktikus gazdadetekciójával kapcsolatos kutatások eredményeként leírtunk egy újfajta polarotaxist (EGRI *et al.* 2012a), és kapcsolatot találtunk a potenciális gazdaállatok kültakaró-mintázata és bögölytaszító képessége között (BLAHÓ *et al.* 2012a, 2013, EGRI *et al.* 2012b).

[4] Képalkotó polarimetriai mérésekkel és választásos terepkísérletekkel kimértük olyan szitakötők, kérészek és bögölyök ventrális szemrészének polarizációfok ingerküszöb p^* -értékét, amelyek pozitív polarotaxisának igazolása már korábban megtörtént (KRISKA *et al.* 2009). Ez a munka nyújtott először kísérleti alapon p^* -értékeket a kérészek, szitakötők és

bögyölyök esetében. A vízirovarok p^* -értékeinek ismerete lehetőséget ad arra, hogy az ember alkotta optikai környezetben mérhető és monitorozhatóak legyenek azok a mesterséges felületek, amelyek vízszintesen poláros fényt visszaverve megtéveszthetik a vizet kereső különböző vízirovarfajokat.

[5] Megállapítottuk, hogy az *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* kérészfajok egyedei kevésbé vonzódnak a függőlegesen poláros fényhez, mint a polarizálatlanhoz (FARKAS *et al.* 2016). A különbség a vízszintesen poláros és a függőlegesen poláros fény között még kifejezettebb: az előbbi sokkal vonzóbb, mint az utóbbi. Eredményeink szerint e viselkedés jelentősége abban áll, hogy a kérészek vízfelszíni repülésükkor visszafordulnak azon felszínrészekről, amelyek függőlegesen vagy nem vízszintesen poláros fényt tükröznek, így jelezve a kérészek rajzása és tojásrakása szempontjából alkalmatlan partrészeket. Egy különleges következménye e viselkedésnek a kompenzációs repülésben részt vevő kérészek visszafordulása a hidaknál, ahol a híd vízre vetülő árnyékánál és tükörképénél gyakran függőlegesen poláros fény tükröződik.

[6] Meghatároztuk az ökológiai csapdák egy speciális formáját: a vízirovarokat fenyegető poláros fényszennyezést (HORVÁTH *et al.* 2009), melynek tipikus forrásai a kőolaj- és pakuratavak (BERNÁTH *et al.* 2001a), az aszfaltutak (KRISKA *et al.* 1998), a mezőgazdaságban használatos fekete műanyag fóliák (BERNÁTH *et al.* 2008), az üvegházak és épületek üvegfelületei (KRISKA *et al.* 2008b, MALIK *et al.* 2008), az autók karosszériája (KRISKA *et al.* 2006a), fekete sírkövek (HORVÁTH *et al.* 2007), a napelemek és napkollektorok (HORVÁTH *et al.* 2010b). Ha egy polarotaktikus vízirovar választhat e vízszintesen polarizáló felületek és egy vízfelület között, akkor az előbbieket szupernormális polarizációs jele miatt nem a vizet választja. A poláros fényt visszaverő pernyemező vizsgálata (KRISKA *et al.* 2006b) során viszont azt bizonyítottuk, hogy ez a mesterséges objektum nem képes pozitív polarotaxist kiváltani a vízirovarokból, ami azzal magyarázható, hogy bár az erősen polarizáló fekete pernyemezők magas lineáris polarizációfokú fényt vernek vissza, a szoláris és antiszoláris meridián irányától eltekintve a róluk visszaverődő fény átlagos polarizációiránya nem vízszintes, és a polarizációirány szórása mindig nagy.

[7] Kutatásaink eredményeként kimutattuk, hogy az ökológiai fényszennyezés különböző forrásai képesek összetett ökológiai csapdákat képezni, amelyek nagyobb területen fejtik ki hatásukat, és váratlanul nagy rovarpusztulásokat is okozhatnak (BODA *et al.* 2014, SZÁZ *et al.* 2015). Megállapítottuk, hogy az összetett fénypolarizációs ingerek által vezérelt ökológiai csapdák egyik típusa a polarotaktikus szívóhatással kiegészülő foto- és polarotaktikus ökológiai csapda. Ennél egy pozitív polarotaxissal bíró rovar tömeget egy fénypolarizációs jel vezethet valamely mesterséges fényforrás közelébe, ahol a pozitív foto- és polarotaxisuk révén halálos ökológiai csapdába kerülhetnek. E jelenség első két példáját a dunavirág (*Ephoron virgo*) éjszakai tömegrajzása (SZÁZ *et al.* 2015) és a dán kérész (*Ephemera danica*), valamint a tarka kérész (*E. vulgata*) szaporodási viselkedése esetében sikerült dokumentálnunk (EGRI *et al.* 2017).

A vízirovarok polarotaxisának és fénypolarizációs csapdáinak alaposabb megismerését célzó kutatásaink során nagy hangsúlyt fektettünk a megszerzett ismeretek gyakorlati felhasználására is. A cikk részeként bemutatásra kerültek a poláros fényszennyezés és az összetett foto- és polarotaktikus ökológiai csapda hatását csökkentő/megszüntető eljárások, eszközök (KRISKA *et al.* 1998, 2006a, 2008b, HORVÁTH *et al.* 2009, 2010b, 2010c, SZÁZ *et al.* 2016).

A poláros fényszennyezés jelenségének gyakorlati hasznosítását jelentheti a közegészségügyi vagy gazdasági szempontból kártékonnak tekinthető polarotaktikus rovarokat, például a bögölyöket fénypolarizációs módszerrel csapdázó eszközök kifejlesztése. Az erre irányuló tevékenységünk eredményeként számos publikáció jelent meg, amelyek a jelenség elméleti hátterének feltárása (HORVÁTH *et al.* 2008, 2010a, KRISKA *et al.* 2008a, 2009, BLAHÓ *et al.* 2012a, EGRI *et al.* 2012a, 2012b) mellett a nagy hatékonyságú fénypolarizációs bögölycsapdák megvalósításához (BLAHÓ *et al.* 2012b, EGRI *et al.* 2013) is segítséget adnak.

Köszönetnyilvánítás. Hálás vagyok a következő magyar és külföldi kollégáimnak, társszerzőimnek és diákjaimnak a cikkben bemutatott kutatási eredmények eléréséhez történő nélkülözhetetlen hozzájárulásukért: ANDRIKOVICS SÁNDOR, ANTONI GYÖRGYI, BARTA ANDRÁS, BÁHIDSZKI LEA, BERNÁTH BALÁZS, BLAHÓ MIKLÓS, BODA PÁL, BRUCE ROBERTSON (USA), CSABAI ZOLTÁN, CZINKE LÁSZLÓ, DÉVAI GYÖRGY, EGRI ÁDÁM, FARKAS ALEXANDRA, FARKAS RÓBERT, GYURKOVSKY MÓNICA, HANSRUEDI WILDERMUTH (SVÁJC), HEGEDÜS RAMÓN, HERCZEG TAMÁS, HORVÁTH GÁBOR, HORVÁTH VIKTOR, LENGYEL SZABOLCS, MAJER JÓZSEF, MALIK PÉTER, MÁLNÁS KRISTÓF, MÉSZÁROS ÁDÁM, MOLNÁR GERGELY, MIZERA FERENC, MÓRA ARNOLD, NEUMANN LÁSZLÓ, POLYÁK LÁSZLÓ, PRILL ÉVA, SÁNDOR ANDRÁS, SERES ISTVÁN, SUHAI BENCE, SUSANNE AKESSON (SVÉDORSZÁG), SZÁZ DÉNES, SZEDENICS GÁBOR, SZIVÁK ILDIKÓ, TÁRJÁNYI NIKOLETT. Az Eu-FP7 kutatás-fejlesztési pályázat (TaBaNOid-232366) tette lehetővé számunkra a poláros bögölycsapda különböző prototípusainak kifejlesztését és terepen történő tesztelését, optimalizálását (BLAHÓ *et al.* 2012b, EGRI *et al.* 2013).

Irodalomjegyzék

- BERNÁTH B., SZEDENICS G., MOLNÁR G., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2001a. Visual ecological impact of "shiny black anthropogenic products" on aquatic insects: oil reservoirs and plastic sheets as polarized traps for insects associated with water. *Archives of Nature Conservation and Landscape Research*, 40(2): 89–109.
- BERNÁTH B., SZEDENICS G., MOLNÁR G., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2001b. Visual ecological impact of a peculiar waste oil lake on the avifauna: dual-choice field experiments with water-seeking birds using huge shiny black and white plastic sheet. *Archives of Nature Conservation and Landscape Research* 40(1): 1–28.
- BERNÁTH B., SZEDENICS G., WILDERMUTH H. & HORVÁTH G. 2002. How can dragonflies discern bright and dark waters from a distance? The degree of polarization of reflected light as a possible cue for dragonfly habitat selection. *Freshwater Biology*, 47: 1707–1719. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00931.x>
- BERNÁTH B., KRISKA GY., SUHAI B. & HORVÁTH G. 2008. Insectivorous birds as insect indicators on plastic sheets attracting polarotactic aquatic insects. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 54(1) (Suppl. 1): 145–155.
- BLAHÓ M., EGRI Á., BÁHIDSZKI L., KRISKA GY., HEGEDÜS R., AKESSON S. & HORVÁTH G. 2012a. Spottier targets are less attractive to tabanid flies: on the tabanid-repellency of spotty fur patterns. *PLoS ONE*, 7(8): e41138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041138>
- BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., KRISKA GY., ANTONI G. & HORVÁTH G. 2012b. How can horseflies be captured by solar panels? A new concept of tabanid traps using light polarization and electricity produced by photovoltaics. *Veterinary Parasitology*, 189: 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.04.016>

- BLAHÓ M., EGRI Á., SZÁZ D., KRISKA GY., ÅKESSON S. & HORVÁTH G. 2013. Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO₂, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior*, 119: 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2013.06.013>
- BODA P., HORVÁTH G., KRISKA GY., BLAHÓ M. & CSABAI Z. 2014. Phototaxis and polarotaxis hand in hand: night dispersal flight of aquatic insects distracted synergistically by light intensity and reflection polarization. *Naturwissenschaften*, 101(5): 385–395. <https://doi.org/10.1007/s00114-014-1166-2>
- BRODSKIY A.K. 1973. The swarming behavior of mayflies (Ephemeroptera). *Entomological Review*, 52: 33–39.
- CSABAI Z., BODA P., BERNÁTH B., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2006. A ‘polarisation sun-dial’ dictates the optimal time of day for dispersal by flying aquatic insects. *Freshwater Biology*, 51: 1341–1350. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01576.x>
- EGRI Á., BLAHÓ M., SÁNDOR A., KRISKA GY., GYURKOVSKY M., FARKAS R. & HORVÁTH G. 2012a. New kind of polarotaxis governed by degree of polarization: attraction of tabanid flies to differently polarizing host animals and water surfaces. *Naturwissenschaften*, 99: 407–416. <https://doi.org/10.1007/s00114-012-0916-2>
- EGRI Á., BLAHÓ M., KRISKA GY., FARKAS R., GYURKOVSKY M., ÅKESSON S. & HORVÁTH G. 2012b. Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: An advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology*, 215: 736–745. <https://doi.org/10.1242/jeb.065540>
- EGRI Á., BLAHÓ M., SZÁZ D., BARTA A., KRISKA GY., ANTONI G. & HORVÁTH G. 2013. A new tabanid trap applying a modified concept of the old flypaper: Linearly polarizing sticky black surfaces as an effective tool to catch polarotactic horseflies. *International Journal for Parasitology*, 43: 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2013.02.002>
- EGRI Á., SZÁZ D., FARKAS A., PERESZLÉNYI Á., HORVÁTH G. & KRISKA GY. 2017. Method to improve the survival of night-swarming mayflies near bridges in areas of distracting light pollution. *Royal Society Open Science*, 4: 171166, 9p. <https://doi.org/10.1098/rsos.171166>
- EGRI Á., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2018. Method to reduce motion artifacts of sequential imaging polarimetry: Long enough exposures minimize polarization blurs of wavy water surfaces. *Applied Optics*, 57: 7564–7569. <https://doi.org/10.1364/AO.57.007564>
- FARKAS A., SZÁZ D., EGRI Á., BARTA A., MÉSZÁROS Á., HEGEDÜS R., HORVÁTH G. & KRISKA GY. 2016. Mayflies are least attracted to vertical polarization: a polarotactic reaction helping to avoid unsuitable habitats. *Physiology and Behavior*, 163: 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.05.009>
- HORVÁTH G. & ZEIL J. 1996. Kuwait oil lakes as insect traps. *Nature*, 379: 303–304. <https://doi.org/10.1038/379303a0>
- HORVÁTH G., BERNÁTH B. & MOLNÁR G. 1998. Dragonflies find crude oil visually more attractive than water: multiple-choice experiments on dragonfly polarotaxis. *Naturwissenschaften*, 85: 292–297. <https://doi.org/10.1007/s001140050503>
- HORVÁTH G. & VARIJÚ D. 1997. Polarization pattern of freshwater habitats recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges and its relevance for water detection by aquatic insects. *Journal of Experimental Biology*, 200: 1155–1163. <https://doi.org/10.1242/jeb.200.7.1155>
- HORVÁTH G. & VARIJÚ D. 2004. *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer-Verlag, Heidelberg–Berlin–New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09387-0>
- HORVÁTH G., MALIK P., KRISKA GY. & WILDERMUTH H. 2007. Ecological traps for dragonflies in a cemetery: the attraction of *Sympetrum* species (Odonata: Libellulidae) by horizontally polarizing black gravestones. *Freshwater Biology*, 52: 1700–1709. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01798.x>

- HORVÁTH G. & KRISKA G. 2008. Polarization vision in aquatic insects and ecological traps for polarotactic insects. In: LANCASTER J. & BRIERS R.A. (eds.): *Aquatic Insects: Challenges to Populations*. Wallingford, UK: CAB International Publishing, pp. 204–229.
<https://doi.org/10.1079/9781845933968.0204>
- HORVÁTH G., MAJER J., HORVÁTH L., SZIVÁK I. & KRISKA GY. 2008. Ventral polarization vision in tabanids: horseflies and deerflies (Diptera: Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light. *Naturwissenschaften*, 95: 1093–1100. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0425-5>
- HORVÁTH G., KRISKA GY., MALIK P. & ROBERTSON B. 2009. Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(6): 317–325.
<https://doi.org/10.1890/080129>
- HORVÁTH G., BLAHÓ M., KRISKA GY., HEGEDŰS R., GERICS B., FARKAS R. & ÅKESSON S. 2010a. An unexpected advantage of whiteness in horses: the most horsefly-proof horse has a depolarizing white coat. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 277: 1643–1650.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2009.2202>
- HORVÁTH G., BLAHÓ M., EGRI Á., KRISKA GY., SERES I. & ROBERTSON B. 2010b. Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology*, 24: 1644–1653. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>
- HORVÁTH G., KRISKA GY., MALIK P., HEGEDŰS R., NEUMANN L., ÅKESSON S. & ROBERTSON B. 2010c. *Asphalt surfaces as ecological traps for water-seeking polarotactic insects: How can the polarized light pollution of asphalt surfaces be reduced?* Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, New York, USA
- HORVÁTH G., MÓRA A., BERNÁTH B. & KRISKA GY. 2011. Polarotaxis in non-biting midges: female chironomids are attracted to horizontally polarized light. *Physiology and Behavior*, 104(5): 1010–1015. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.06.022>
- HORVÁTH G., PERESZLÉNYI Á., ÅKESSON S. & KRISKA GY. 2019. Striped bodypainting protects against horseflies. *Royal Society Open Science*, 6: 181325.
(<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.181325>).
- HORVÁTH G., EGRI Á., MEYER-ROCHOW V.B. & KRISKA GY. 2019. How did amber get its aquatic insects? Water-seeking polarotactic insects trapped by tree resin. *Historical Biology*, 33(6): 846–856. <https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1663843>
- KOKKO H. & SUTHERLAND W.J. 2001. Ecological traps in changing environments: ecological and evolutionary consequences of a behaviourally mediated Allee effect. *Evolutionary Ecology Research*, 3: 537–551.
- KÖNNEN G. P. 1985. *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.
- KRISKA GY. 2020. *Vízirovarok polarizációérzékelése, poláros ökológiai csapdák*. MTA doktori értekezés (Polarization vision of aquatic insects, polarized ecological traps. DSc dissertation). 151 pp.
https://real-d.mtak.hu/1254/10/dc_1715_19_doktori_mu.pdf
- KRISKA GY., HORVÁTH G. & ANDRIKOVICS S. 1998. Why do mayflies lay their eggs en masse on dry asphalt roads? Water-imitating polarized light reflected from asphalt attracts Ephemeroptera. *Journal of Experimental Biology*, 200: 2273–2286. <https://doi.org/10.1242/jeb.201.15.2273>
- KRISKA GY., CSABAI Z., BODA P., MALIK P. & HORVÁTH G. 2006a. Why do red and dark-coloured cars lure aquatic insects? The attraction of water insects to car paintwork explained by reflection–polarization signals. *Proceedings B of the Royal Society*, 273: 1667–1671.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3500>
- KRISKA G., MALIK P., CSABAI Z. & HORVÁTH G. 2006b. Why do highly polarizing black burnt-up stubble-fields not attract aquatic insects? An exception proving the rule. *Vision Research*, 46: 4382–4386. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.08.020>

- KRISKA GY., BERNÁTH B. & HORVÁTH G. 2007. Polarotaxis in a mayfly that needs not search for water: polarotactic water detection in *Palingenia longicauda* (Ephemeroptera). *Naturwissenschaften*, 94: 148–154. <https://doi.org/10.1007/s00114-006-0180-4>
- KRISKA GY., MAJER J., HORVÁTH L., SZIVÁK I. & HORVÁTH G. 2008a. Polarotaxis in tabanid flies and its practical significance. *Acta Biologica Debrecina, Supplementum Oecologica Hungarica*, 18: 101–108.
- KRISKA GY., MALIK P., SZIVÁK I. & HORVÁTH G. 2008b. Glass buildings on river banks as "polarized light traps" for mass-swarming polarotactic caddis flies. *Naturwissenschaften*, 95(5): 461–467. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0345-4>
- KRISKA GY., BERNÁTH B., FARKAS R. & HORVÁTH G. 2009. Degrees of polarization of reflected light eliciting polarotaxis in dragonflies (Odonata), mayflies (Ephemeroptera) and tabanid flies (Tabanidae). *Journal of Insect Physiology*, 55: 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2009.08.013>
- LEE J.J. 2012. Mystery of zebra's stripes finally solved? *Science*: <http://news.sciencemag.org/2012/02/mystery-zebras-stripes-finally-solved>
- LERNER A., MELTSEY N., SAPIR N., ERLICK C., SHASHAR N. & BROZA M. 2008. Reflected polarization guides chironomid females to oviposition sites. *Journal of Experimental Biology*, 211: 3536–3543. <https://doi.org/10.1242/jeb.022277>
- LERNER A., SAPIR N., ERLICK C., MELTSEY N., BROZA M. & SHASHAR N. 2011. Habitat availability mediates chironomid density-dependent oviposition. *Oecologia*, 165: 905–14. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1893-9>
- MALIK P., HEGEDŰS R., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2008. Imaging polarimetry of glass buildings: Why do vertical glass surfaces attract polarotactic insects? *Applied Optics*, 47(24): 4361–4374. <https://doi.org/10.1364/AO.47.004361>
- MÁLNÁS K., POLYÁK L., PRILL É., HEGEDŰS R., KRISKA GY., DÉVAI GY., HORVÁTH G. & LENGYEL SZ. 2011. Bridges as optical barriers and population disruptors for the mayfly *Palingenia longicauda*: an overlooked threat to freshwater biodiversity? *Journal of Insect Conservation*, 15: 823–832. <https://doi.org/10.1007/s10841-011-9380-0>
- MELTSEY N., KASHI Y. & BROZA M. 2008. Does polarized light guide chironomids to navigate toward water surfaces? *Boletim do Museu Municipal do Funchal (História Natural)*, 13: 141–149.
- MIZERA F., BERNÁTH B., KRISKA GY. & HORVÁTH G. 2001. Stereo videopolarimetry: measuring and visualizing polarization patterns in three dimensions. *Journal of Imaging Science and Technology*, 45(4): 393–399. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2001.45.4.art00012>
- PERESZLÉNYI Á., HORVÁTH G. & KRISKA GY. 2017. Atypical feeding of woodpeckers, crows and redstarts on mass-swarming *Hydropsyche pellucidula* caddisflies attracted to glass panes. *Urban Ecosystems*, 20: 1203–1207. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0672-3>
- PILCHER C.W.T. & SEXTON D.B. 1993. Effects of the gulf war oil spills and well-head fires on the avifauna and environment of Kuwait. *Sandgrouse*, 15: 6–17.
- ROBERTSON B.A. & HUTTO R.L. 2006. A framework for understanding ecological traps and an evaluation of existing evidence. *Ecology*, 87: 1075–1085. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1075:AFFUET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1075:AFFUET]2.0.CO;2)
- ROBERTSON B., KRISKA GY., HORVÁTH V. & HORVÁTH G. 2010. Glass buildings as bird feeders: Urban birds exploit insects trapped by polarized light pollution. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 56(3): 283–293.
- SCHLAEPFER M.A., RUNGE M.C. & SHERMAN P.W. 2002. Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology and Evolution*, 17(10): 478–480. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02580-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02580-6)

- SCHWIND R. 1983a. Zonation of the optical environment and zonation in the rhabdom structure within the eye of the backswimmer, *Notonecta glauca*. *Cell and Tissue Research*, 232: 53–63. <https://doi.org/10.1007/BF00222373>
- SCHWIND R. 1983b. A polarization-sensitive response of the flying water bug *Notonecta glauca* to UV light. *Journal of Comparative Physiology*, 150: 87–91. <https://doi.org/10.1007/BF00605291>
- SCHWIND R. 1984a. Evidence for true polarization vision based on a two-channel analyser system in the eye of the water bug, *Notonecta glauca*. *Journal of Comparative Physiology A*, 154: 53–57. <https://doi.org/10.1007/BF00605390>
- SCHWIND R. 1984b. The plunge reaction of the backswimmer *Notonecta glauca*. *Journal of Comparative Physiology A*, 155: 319–321. <https://doi.org/10.1007/BF00610585>
- SCHWIND R. 1985a. Sehen unter und über Wasser, Sehen vom Wasser: Das Sehsystem eines Wasserinsektes. *Naturwissenschaften*, 72: 343–352. <https://doi.org/10.1007/BF00410595>
- SCHWIND R. 1985b. A further proof of polarization vision of *Notonecta glauca* and a note on threshold intensity for eliciting the plunge reaction. *Experientia*, 41: 466–467. <https://doi.org/10.1007/BF01966149>
- SCHWIND R. 1989. A variety of insects are attracted to water by reflected polarized light. *Naturwissenschaften*, 76: 377–378. <https://doi.org/10.1007/BF00366211>
- SCHWIND R. 1991. Polarization vision in water insects and insects living on a moist substrate. *Journal of Comparative Physiology A*, 169: 531–540. <https://doi.org/10.1007/BF00193544>
- SCHWIND R. 1995. Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. *Journal of Comparative Physiology A*, 177: 439–448. <https://doi.org/10.1007/BF00187480>
- STEVANI C.V., PORTO J.S., TRINDADE D.J. & BECHARA E.J.H. 2000a. Automotive clearcoat damage due to oviposition of dragonflies. *Journal of Applied Polymer Science*, 75: 1632–1639. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(20000328\)75:13<1632::AID-APP9>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(20000328)75:13<1632::AID-APP9>3.0.CO;2-M)
- STEVANI C.V., FARIA D.L.A., PORTO J.S., TRINDADE D.J. & BECHARA E.J.H. 2000b. Mechanism of automotive clearcoat damage by dragonfly eggs investigated by surface enhanced Raman scattering. *Polymer Degradation and Stability*, 68: 61–66. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00165-2)
- SVIHLA A. 1961. An unusual ovipositing activity of *Pantala flavescens* Fabricius. *Tombo*, 4: 18.
- SZÁZ D., HORVÁTH G., BARTA A., ROBERTSON B.A., FARKAS A., EGRI Á., TÁRJÁNYI N., RÁCZ G. & KRISKA GY. 2015. Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarming mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of polarized and unpolarized light pollution. *PLoS ONE*, 10(3): e0121194. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121194>
- SZÁZ D., MIHÁLYI D., FARKAS A., EGRI Á., BARTA A., KRISKA GY., ROBERTSON B. & HORVÁTH G. 2016. Polarized light pollution of matte solar panels: anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, 20: 663–675. <https://doi.org/10.1007/s10841-016-9897-3>
- TORRALBA-BURRIAL A. & OCHARAN F. J. 2003. Coches como hábitat para libélulas? Algunos machos de *Crocothemis erythraea* creen que sí. *Boletín de la Sociedad Entomología Aragonesa*, 32: 214–215.
- WATSON J.A.L. 1992. Oviposition by exophytic dragonflies on vehicles. *Notulae Odontologicae*, 3: 137.
- WICHARD W., GRÖHN C. & SEREDSZUS F. 2009. *Aquatic Insects in Baltic Amber*. Verlag Kessel.
- WILDERMUTH H. 1993. Habitat selection and oviposition site recognition by the dragonfly *Aeshna juncea* (L.): an experimental approach in natural habitats (Anisoptera, Aeshnidae). *Odonatologica*, 22: 27–44.

- WILDERMUTH H. 1998. Dragonflies recognize the water of rendezvous and oviposition sites by horizontally polarized light: A behavioural field test. *Naturwissenschaften*, 85: 297–302. <https://doi.org/10.1007/s001140050504>
- WILDERMUTH H. & SPINNER W. 1991. Visual cues in oviposition site selection by the *Somatochlora arctica* (Zetterstedt) (Anisoptera: Corduliidae). *Odonatologica*, 20: 357–367.
- WILDERMUTH H. & HORVÁTH G. 2005. Visual deception of a male *Libellula depressa* by the shiny surface of a parked car (Odonata: Libellulidae). *International Journal of Odonatology*, 8: 97–105. <https://doi.org/10.1080/13887890.2005.9748246>
- WYNIGER R. 1955. Beobachtungen über die Eiablage von *Libellula depressa* L. (Odonata, Libellulidae). *Mitteilungen der Entomologischen Gesellschaft Basel (NF)*, 5: 62–63. <https://doi.org/10.5962/bhl.part.75438>

Polarization vision of aquatic insects, polarized ecological traps²

GYÖRGY KRISKA^{1,2}

¹ Group for Methodology in Biology Teaching, Biological Institute, Eötvös University, H-1117 Budapest, Pázmány sétány 1, Hungary

² HUN-REN Centre for Ecological Research, Institute of Aquatic Ecology, MTA-ÖK Lendület "Momentum" Fluvial Ecology Research Group, H-1113 Budapest, Karolina út 29, Hungary
E-mail: kriska.gyorgy@ttk.elte.hu

ÁLLATTANI KÖZLEMÉNYEK (2024) 109(1–2): 151–175.

Abstract. The research presented in this review paper provided new data on the polarization vision of different aquatic insect taxa and its biological role. It has also demonstrated the effects of different artificial polarized light sources and their polarization patterns on aquatic insects. In the first part we summarize the light polarization vision-based behaviour of mayflies (Ephemeroptera), dragonflies (Odonata), non-biting midges (Chironomidae) and horseflies (Tabanidae) that play a crucial role in the survival of each taxon. Research presented in the second thematic unit has shown that polarotactic aquatic insects often prefer artificial surfaces that are totally unsuitable as habitat and reflect strongly and horizontally polarized light, rather than the water surface. The striking levels of insect mortality frequently observed near such artificial surfaces have played an important role in the scientific definition of the term ecological trap. A specific form of ecological traps is polarized light pollution, which is a threat to aquatic insects, and whose typical sources are oil lakes, asphalt roads, black plastic sheeting used in agriculture, glass surfaces of greenhouses and buildings, car bodies, black tombstones, solar panels and solar collectors. If a polarotactic aquatic insect has a choice between these horizontally polarizing surfaces and a water surface, it will not choose water because of the supernormal polarization signal of the former. The exploration of this phenomenon has led to the recognition and definition of a new type of ecological light pollution, polarized light pollution.

Keywords: compensation flight, polarization vision, polarotaxis, *Palingenia longicauda*, *Ephoron virgo*, *Hydropsyche pellucidula*, *Sympetrum*

Accepted: 17.11.2024

Published online: 22.11.2024

² Short outline of DSc dissertation (defended in 2021). The complete work can be accessed: <https://real-d.mtak.hu/1254/>