

# **MTA Doktori Pályázat**

## **Doktori értekezés**

### **Vízirovarok polarizációérzékelése, poláros ökológiai csapdák**

Kriská György PhD  
az ELTE habilitált doktora

Budapest

2020

# TARTALOMJEGYZÉK

<b>0.</b>	<b>ELŐSZÓ.....</b>	<b>5</b>
0.1.	A téma jelentőségének szélesebb körű beágyazása	5
0.2.	Fizikai alapok	6
0.3.	Képkalkotó polarimetria	7
0.4.	Kutatási előzmények	8
0.5.	Az értekezés felépítése	9
<b>1.</b>	<b>BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS.....</b>	<b>11</b>
1.1.	Polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovar taxonok esetében	11
1.1.1.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	11
1.1.2.	Polarotaxis az árvaszúnyogoknál	12
1.1.3.	Bögyők polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	13
1.1.3.1.	Polarotaxis kísérleti bizonyítása bögyöknél: a polarizációlátás lehetséges szerepe a bögyők szaporodási és táplálkozási viselkedésében	13
1.1.3.2.	A gazda kültakaró optikai sajátosságainak hatása a bögyők gazdaválasztására	15
1.1.4.	A polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálata különböző vízirovar taxonoknál	16
1.1.5.	A kérészek számára kedvezőtlen élőhelyek elkerülése polarotaktikus viselkedés révén	17
1.2.	Mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok hatása vízirovarokra	19
1.2.1.	Különböző színárnyalatú gépkocsik polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálata	19
1.2.2.	Pernyemezők hatása polarotaktikus vízirovarokra	20
1.2.3.	Folyóparti üvegépületek <i>Hydropsyche pellucidula</i> (Trichoptera) imágókra gyakorolt hatása	21
1.2.4.	Temetőben vizet kereső polarotaktikus <i>Sympetrum</i> szitakötők viselkedése a fényt polarizáló fekete sárgaköveknél	22
1.2.5.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) és a dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) rajzási viselkedésének módosulása a környezet természetes polarizációs mintázatának megváltozására	23
1.2.5.1.	A tivadari Tisza-híd hatása a tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) kompenzációs repülésére	23
1.2.5.2.	A dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) foto- és polarotaxisán alapuló komplex ökológiai csapda	25
1.2.6.	A poláros fényszennyezés a környezeti ártalmak egy új fajtája	26
<b>2.</b>	<b>MÓDSZEREK.....</b>	<b>28</b>
2.1.	Polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovar taxonok esetében	28
2.1.1.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	28

2.1.2.	Polarotaxis az árvaszúnyogoknál	29
2.1.3.	Bögölyök polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	31
2.1.3.1.	Polarotaxis kísérleti bizonyítása bögölyöknél: a polarizációlátás lehetséges szerepe a bögölyök szaporodási és táplálkozási viselkedésében	31
2.1.3.2.	A gazda kültakaró optikai sajátosságainak hatása a bögölyök gazdaválasztására	32
2.1.4.	A polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálata különböző vízirovar taxonoknál	34
2.1.5.	A kérészek számára kedvezőtlen élőhelyek elkerülése polarotaktikus viselkedés révén	37
2.2.	Mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok hatása vízirovarokra	41
2.2.1.	Különböző színárnyalatú gépkocsik polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálata	41
2.2.2.	Pernyemezők hatása polarotaktikus vízirovarokra	42
2.2.3.	Folyóparti üvegépületek <i>Hydropsyche pellucidula</i> (Trichoptera) imágókra gyakorolt hatása	43
2.2.4.	Temetőben vizet kereső polarotaktikus <i>Sympetrum</i> szitakötők viselkedése a fényt polarizáló fekete sárgaköveknél	44
2.2.5.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) és a dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) rajzási viselkedésének módosulása a környezet természetes polarizációs mintázatának megváltozására	45
2.2.5.1.	A tivadari Tisza-híd hatása a tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) kompenzációs repülésére	45
2.2.5.2.	A dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) foto- és polarotaxisán alapuló komplex ökológiai csapda	45
<b>3.</b>	<b>EREDMÉNYEK, ÉRTÉKELÉS</b>	<b>47</b>
3.1.	Polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovar taxonok esetében	47
3.1.1.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	47
3.1.2.	Polarotaxis az árvaszúnyogoknál	51
3.1.3.	Bögölyök polarotaktikus viselkedésének vizsgálata	53
3.1.3.1.	Polarotaxis kísérleti bizonyítása bögölyöknél: a polarizációlátás lehetséges szerepe a bögölyök szaporodási és táplálkozási viselkedésében	53
3.1.3.2.	A gazda kültakaró optikai sajátosságainak hatása a bögölyök gazdaválasztására	59
3.1.4.	A polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálata különböző vízirovar taxonoknál	68
3.1.5.	A kérészek számára kedvezőtlen élőhelyek elkerülése polarotaktikus viselkedés révén	71
3.2.	Mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok hatása vízirovarokra	79
3.2.1.	Különböző színárnyalatú gépkocsik polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálata	79
3.2.2.	Pernyemezők hatása polarotaktikus vízirovarokra	83
3.2.3.	Folyóparti üvegépületek <i>Hydropsyche pellucidula</i> imágókra gyakorolt hatása	86

3.2.4.	Temetőben vizet kereső polarotaktikus <i>Sympetrum</i> szitakötők viselkedése a fényt polarizáló fekete sírköveknél	93
3.2.5.	A tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) és a dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) rajzási viselkedésének módosulása a környezet természetes polarizációs mintázatának megváltozására	97
3.2.5.1.	A tivadari Tisza-híd hatása a tiszavirág ( <i>Palingenia longicauda</i> ) kompenzációs repülésére	97
3.2.5.2.	A dunavirág ( <i>Ephoron virgo</i> ) foto- és polarotaxisán alapuló komplex ökológiai csapda	103
3.2.6.	A poláros fényszennyezés a környezeti ártalmak egy új fajtája	112
<b>4.</b>	<b>ÖSSZEGZÉS ÉS KITEKINTÉS</b>	<b>131</b>
<b>5.</b>	<b>A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE</b>	<b>135</b>
<b>6.</b>	<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b>	<b>138</b>
<b>7.</b>	<b>IRODALOMJEGYZÉK</b>	<b>139</b>



## 0. ELŐSZÓ

### 0.1. A TÉMA JELENTŐSÉGÉNEK SZÉLESEBB KÖRŰ BEÁGYAZÁSA

A szárazföldek vizeinek átfogó tudományát, a limnológiát a svájci Francois-Alphonse Forel alapította meg. A Genfi-tó több évtizedes, különböző tudományterületekre támaszkodó vizsgálata rávezette arra, hogy a Föld felszínének más élőhelytípusaival szemben, a tavak jól elhatárolódó víztestének egyedülállóan nagyfokú a zártsága. Belső folyamatait kívülről döntő mértékben a napenergia határozza meg (FOREL 1892, 1895, 1904).

E megállapítások nyomán és az ez időben már színre lépett ökológia hatásaival kölcsönösen erősödve megindult a tó kutatás multidiszciplináris megközelítéssel. Az érdekelt tudósok konszenzusra jutottak abban, hogy a limnológia tárgykörét valamennyi kontinentális vízre kiterjesztve értelmezik (Nemzetközi Limnológiai Egyesület /SIL/ alapítása és első határozata, Kiel 1922). A fentiek szellemében a kontinentális vizek szervezett kutatása kezdettől az élővilág és környezete funkcionális egységének szemléletében folyik.

A limnológiában a vízalatti fényklíma megismerése központi jelentőségű, mert a fényviszonyok megváltozása jelentősen hat a vízi fototróf közösségre és elsősorban a napfény ultrabolya sugárzása révén a vizek oldott szerves anyagainak transzformációjára és degradációjára. A folyóvizekben sajátos a fényklíma a víz állandó mozgása következtében szállított, nagy mennyiségű lebegtetett hordalék miatt (PADISÁK 2005).

A vizes élőhelyek optikai vizsgálatában napjainkra egyre jelentősebb szerepe van a távérzékelésnek. A távérzékelés, mint az adatnyerési módszerek és eszközök rendszere, valamint az adatok kiértékelésének technológiája az első műholdak megjelenésétől a mai napig gyors ütemben fejlődik. Az alkalmazása szinte minden területre kiterjed, és egyre nélkülözhetetlenebbé válik. Ma már több évtizedes kísérleteknek és gyakorlati alkalmazásnak az eredményei bizonyítják, hogy a távérzékelés igen hatékony eszköz a természeti erőforrások felmérésében és változásainak nyomon követésében (ENGMAN és GURNEY 1991). A távérzékelés homogén, jó térbeli, időbeli mintavételezésű adatrendszert szolgáltat, naprakészséget, olcsó és automatizálható adatnyerést biztosít. Mindezek alapján eredményesen alkalmazható a vizes élőhelyek különböző növényborítású és nyílt vízfelszínű részeinek elkülönítésében, a vízi növényzet jellemzésében (STRATOULIAS et al. 2015). A látható spektrumtartományban a tiszta víz fényvisszaverése alacsony és a hullámhossz növekedésével tovább csökken. A víztestben bekövetkező egyes változások a reflektancia változását eredményezik, ami lehetőséget ad a lebegőanyag, a klorofill-a koncentráció és hőmérséklet meghatározására távérzékelési adatok alapján (AVARD et al. 2000, RITCHIE és SCHIEBE 2000, TORGERSEN et al. 2001, RITCHIE et al. 2003, PALMER et al. 2015).

*A víz alatti fényklíma viszonyok feltárása megfelelő alapját adja a vízben kialakuló bonyolult folyamatok és összetett rendszerek intenzív kutatásának, a távérzékelés pedig a vizes élőhelyeket monitorozó vizsgálatok körében hozott jelentős áttörést. RUDOLF SCHWIND felfedezése (SCHWIND 1983a, b, 1984a, b, 1985a, b, 1989, 1991, 1995) miszerint a vízirovarok a vízfelszínről visszavert vízszintesen poláros fény alapján azonosítják a víztesteket (polarotaktikus vízdetekció) felhívta a figyelmet arra, hogy az eddig alkalmazott módszerek nem elegendők a vizes élőhelyek komplex optikai jellemzésére. Ahhoz például, hogy egyes vízirovar taxonok szaporodási és kolonizációs viselkedését értelmezhesük elengedhetetlen a vizes élőhelyek optikai környezetének fénypolarizációs feltárása és a vízirovarok polarotaktikus viselkedésének részletes tanulmányozása. E felismerés nyomán közel 20 éve alkalmazom kutatásaimban az optikai környezet polarizációs mintázatát feltáró képalkotó polarimetriát, valamint vizsgálom és értelmezem az egyes polarizációs mintázatok vízirovarokra gyakorolt hatásait.*

A kutatásaim megkezdése óta eltelt időben számos további nagyrészt az értekezésben is bemutatott eredmény igazolta, 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. Kutatásaink egyértelműen igazolták azt is, hogy egyes globálisan elterjedt mesterséges objektumok (pl. aszfaltutak, üvegépületek, napelemek) fénypolarizációs sajátságaiak folytán jelentős mértékű vízirovar pusztulások okozói lehetnek, így az édesvizek biológiai sokféleségének megőrzése szempontjából is kitüntetett figyelmet kell fordítani a jelenség háttérében álló fénypolarizációs jelenségek és polarotaktikus viselkedésformák feltárására. Kutatásaink úttörő jellegét mutatja, hogy több eredményünket (KRISKA et al. 1998, KRISKA et al. 2006a, HORVÁTH et al. 2010a, EGRI et al. 2012b), a Nature (MITCHELL 1998, Research Highlights – Ecology: Why horses wear white. 463/7283: 852, 18 February 2010) és a Science (LEE 2012, Random Samples: Great moments in entomology. Science 313/5783/7: 25, July 2006) is méltatta. Munkánk fontos hatásának tartom, hogy eredményeink hozzájárultak az ökológiai csapda fogalmának meghatározásához (KOKKO és SUTHERLAND 2001, SCHLAEPFER et al. 2002, ROBERTSON és HUTTO 2006) és lehetőséget adtak arra, hogy leírjuk az ökológiai fényszennyezés egy új típusát, a poláros fényszennyezést (HORVÁTH et al. 2009).

Megjegyzem végül, hogy az értekezés témájára tekintettel az utóbbi évtizedek elismert limnológiai világklasszisainak összefoglaló kézikönyveiben megnéztem a tárgykört érintő fejezeteket. Ramon Margalef (Barcelona) „Limnológia” című 1983-ban megjelent 1010 oldalas monográfiájában, a sugárzási viszonyokat tárgyaló 40 oldalas fejezetében nem utalt a fénypolarizációs sajátságokra. Robert G. Wetzel „Limnology – Lake and Rivers Ecosystems” című 1006 oldalas 3. kiadásának fénnel foglalkozó 20 oldalas fejezetéről is ugyanezt állapíthattam meg.

## 0.2. FIZIKAI ALAPOK

A fény elektromágneses hullám, melynek egyik fő tulajdonsága, hogy transzverzális, tehát a terjedési irányára merőlegesen rezeg benne az elektromos és a mágneses tér. Optikai jellemzői az intenzitás, vagy fényesség ( $I$ ), a hullámhossz ( $\lambda$ ), a polarizációs irány, vagy rezgési sík ( $\alpha$ ) és a polarizációs irány állásának gyakorisága a polarizációfok ( $p$ ).

Ha egy adott fényforrásból érkező fény polarizációs iránya időben állandó, akkor a polarizációfoka  $p=100\%$ , ha pedig minden irányt azonos gyakorisággal vesz fel, akkor a polarizációfoka  $p=0\%$ . Amennyiben a részlegesen poláros fény  $E$  elektromos térerősségvektorait (a továbbiakban röviden  $E$ -vektorait) a terjedési irányra merőleges koordináta-rendszerben vesszük fel, akkor a vektorok egy úgynevezett polarizációs ellipszist rajzolnak ki, amit három paraméterrel ( $E_{\max}$  félnagy tengely,  $E_{\min}$  félkistengely, a nagy tengely és a függőleges koordinátatengely által bezárt  $\varphi$  szög) egyértelműen leírhatunk. Ebben az ábrázolásban a nagy tengely iránya megegyezik a polarizációs iránnyal ( $\alpha = \varphi$ ).

A polarizációs ellipszis geometriai paraméterei és a poláros fény három, mérhető fizikai paramétere között az alábbi megfeleltetés áll fenn:  $I=(E_{\max}^2+E_{\min}^2)/2$ ,  $p=(E_{\max}^2-E_{\min}^2)/(E_{\max}^2+E_{\min}^2)$ . Ha a fény polarizálatlan, akkor ( $p=0\%$ ) és a polarizációs ellipszis kör alakú, míg ha a fény teljesen poláros ( $p=100\%$ ), akkor az ellipszis egyenessé válik. Az egyre polárosabb fény tehát fokozatosan összelapuló polarizációs ellipszissel rendelkezik.

A fény optikai sajátságai fontos információkat hordoznak, amelyeket a fényérzékelésre képes állatok hasznosítanak. Ugyanakkor a fotoreceptorokkal rendelkező állatcsoportok és gyakran az azonos rendszertani csoportba sorolt különböző fajok között is jelentős különbségek adódnak abban a tekintetben, hogy a fény előbbieken felsorolt négy optikai sajátsága közül melyik információtartalmát használják ki (HORVÁTH 2014).

A fénypolarizáció kutatásának fontos eredménye volt 1669-ben a dán E. BARTOLIUS felfedezése, aki először írta le a kalcit kristály kettőtörését. A kalcittal folytatott kísérletek eredményeként mutatta ki 1690-ben C. HUYGENS a kalcitkristályon áthatoló kettősen megtört fény polárosságát. Ezt követően L. MALUS 1808-ban figyelte meg a visszavert fénynek a felülettel párhuzamos polarizáltságát. 1809-ben D. F. J. ARAGO (1855) francia fizikus és

csillagász felfedezte az égboltny polarizációját. E tudományos felfedezés járult hozzá a fényhullám transzverzális jellegének igazolásához, amely alapján A. FRESNEL 1821-ben kidolgozta a fénypolarizáció elméletét.

Az égboltny polarizációjának értelmezése LORD RAYLEIGH, más néven J. W. STRUTT (1871) nevéhez fűződik. Magyarázata azon a megfigyelésen alapult, hogy a fény egy átlátszó közegen áthaladva szóródik, és részlegesen síkban polarizálódik a közeg részecskéin. A szóródás hatására kialakuló polarizáció a fény beesési irányára merőlegesen szóródott fény sugarakra a legnagyobb, ezért az égboltny elektromos terének vektorai, az E-vektorok koncentrikus köröket alkotnak a Nap körül. A fény szóródás eredményeként a Naptól távolodva az égboltny polarizációfoka nulláról fokozatosan növekszik, addig, amíg a Naptól 90°-ra eléri a maximumát. Ezt követően a polarizációfok ismét csökkenni kezd, majd a Nappal ellentétes pontban újra zérus lesz az értéke. Ez a magyarázat képes értelmezni a szoláris meridiánra tükröszimmetrikus égboltpolarizáció kialakulását. Hozzáteve azonban azt, hogy a fotonok többszörös szóródása a légkörben hatással van az égboltny polarizációs mintázatának alakulására, a valódi polarizációs mintázat némiképp eltér az ideálisnak tekinthető Rayleigh-mintázattól (HORVÁTH et al. 1998b, GÁL et al. 2001b). LORD RAYLEIGH elmélete alapján, a fény szóródás jelenségével magyarázhatjuk az égboltpolarizáció kialakulása mellett azt is, hogy miért kék színű az égboltny és vörös a naplemente.

A fénypolarizációs jelenségek jelentős részét a tükröződési polarizáció eredményezi (KÖNNEN 1985), amelynek a természetben előforduló legfontosabb forrásai a vízfelszínek (SCHWIND és HORVÁTH 1993, HORVÁTH 1995, HORVÁTH és VARJÚ 1997). A vizek polarizációját egyrészt a felületről visszatükröződő vízszintes poláros fény, másrészt a víztestből visszaszóródó, majd a vízből kilépő, függőlegesen poláros fény határozza meg. A kétféle polarizáció lerontja egymás hatását, ezért a visszavert fény polarizációs jellegzetessége elsősorban attól függ, hogy az adott víztípusban a felszínről, vagy a víztestből visszavert fény jelenik-e meg dominánsan.

A sekély, világos színű (pl. karbonát-mésziszapos szikes vizek), vagy átlátszó vizek esetében a fenékről és a vízben lebegő anyagokról visszaverődő és a felszínen kilépő függőlegesen poláros fény dominál, a felszíni fény visszaverődés vízszintes polarizációjával szemben. Ezért ezekről a vizekről gyakran függőlegesen poláros fény érkezik a szemünkbe. A sötét, mély, vagy sok huminsavat tartalmazó lápi vizek esetében a vízbe érkező fény túlnyomórésze elnyelődik, ezért a víztestből alig érkezik fény, így a felszíni reflexió által létrejövő vízszintes poláros komponens érvényesül. A fény visszaverő objektum sötétsége, vagy világossága mellett a közeg törésmutatója is hatással van a fénypolarizációra. Ha nagyobb a fény visszaverő közeg levegőre vonatkoztatott törésmutatója, akkor a Fresnel-formulából következően (GUENTHER 1990) nagyobb lesz a reflektivitás, a polarizációfok és a vízszinteshez közelebb lesz a visszatükröződő fény rezgés iránya. Ezért például a fekete kőolaj, vagy kátrány töcsa nemcsak a színe, hanem a víznél nagyobb törésmutatója miatt is jobban polarizálja a felszínről visszaverődő fényt (HORVÁTH és ZEIL 1996, BERNÁTH et al. 2001a, 2001b).

### 0.3. KÉPALKOTÓ POLARIMETRIA

A polarizálatlan és a teljesen lineárisan poláros fény keveréke részlegesen, lineárisan poláros fényt eredményez, melyben minden irányú rezgés előfordul. A földi környezetben leggyakrabban részlegesen lineárisan poláros fény fordul elő a nemfém tárgyakról történő fény visszaverődés, vagy a fény szóródás, pl. szórt égboltny kialakulásának következtében. A részlegesen, lineárisan poláros fény esetében a  $p$  lineáris polarizációfok adja meg, hogy az összintenzitás hányad részét képezi a teljesen poláros fény. Az emberi szem számára a lineárisan poláros fényt lineáris polárszűrőkkel lehet érzékelhetővé tenni. Ezek a szűrők áteresztési irányuknak megfelelően, a beeső fénynek csak egy adott rezgésirányú komponensét engedik át és az erre merőleges rezgésirányú komponens szinte teljesen elnyelik. Egy lineárisan

poláros fényforrást forgó polárszűrőn át nézve szinuszosan változó fényintenzitást érzékelünk. Ennek a módszernek a segítségével feltérképezhetők a környezetben található a lineárisan poláros fény forrásai. Ezzel a módszerrel természetesen csak kvalitatív módon szerezhetünk adatokat a poláros fény környezeti eloszlásáról. A lineáris polarizáció pontos méréséhez az intenzitás, a polarizációirány, a lineáris polarizációfok adott hullámhosszon való méréséhez polariméterre van szükség. Ez a mérőeszköz alapesetben adott hullámhossz mellett minimum három független mérést végez. Ennek során a fényintenzitás kerül meghatározásra három lineáris polárszűrőn keresztül három különböző áteresztési irány mellett. A mért intenzitásértékekből kiszámítható a polarizációirány és a lineáris polarizációfok. A pontforrású polariméterek egy adott szűk térszögből érkező fényt vizsgálnak egy adott pillanatban, míg a képalkotó polariméterek segítségével a tér több irányába egyszerre is mérhető a fénypolarizáció. A pontforrású polarimetria már régi, évszázados módszere a fizikai optikának (AZZAM és BASHARA 1989, COLLETT 1994, COULSON 1988). Az első képalkotó polariméterek csak az 1980-as években jelentek meg. Ezen eszközök alkalmazása forradalmasította a természetben és a mesterséges környezetben előforduló polarizációs mintázatok feltérképezését, mert segítségével mérhetővé váltak a nagy kiterjedésű objektumok (pl. vízfelszínek, épületek), vagy az időben változó, csak rövid ideig megjelenő, vagy előre nem kiszámítható helyeken és időben fellépő légköroptikai jelenségek polarizációs sajátosságai (BERNÁTH et al. 2001a, DESCHAMPS et al. 1994, EGAN 1986, GÁL et al. 2001a, 2001b, HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1997, 1998a, 1998b, HORVÁTH és POMOZI 1997, HORVÁTH és VARJÚ 1997, KRISKA et al. 1998, 2008b, MALIK et al. 2008, NORTH és DUGGIN 1997, POMOZI et al. 2001, PROSCH et al. 1983, SHASHAR et al. 1995, VOSS és LIU 1997, WALRAVEN 1981).

Elsősorban oktatói munkámhoz kapcsolódva foglalkozom évtizedek óta a térhatású megjelenítés új eszközeinek és módszereinek alkalmazásával, (EGRI et al. 2011, KRISKA 2008a, 2008b, 2008c, SZÁLASSY et al. 2009), amely tevékenység megfelelő alapot adott számunkra egy új térhatású polarimetria kifejlesztéséhez (MIZERA et al. 2001).

A terepi körülmények között a legkönnyebben és ezért leggyakrabban használatos képalkotó polarimetriai eljárás a forgó analízatoros módszer. A gyakran hullámozó vagy turbulensen áramló természetes vízfelületek mérésekor az eredmény általában hibával terhes a mért objektum mozgása miatt. A hosszúexpozíciós polarimetria módszerének kidolgozásával azonban sikerült elhanyagolható mértékűre csökkentenünk a mozgási műtermékeket ezekben az esetekben (EGRI et al. 2018).

## **0.4. KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK**

### **0.4.1. A FÉNYPOLARIZÁCIÓ ENTOMOLÓGIAI VONATKOZÁSAI**

A fénypolarizáció érzékelésére képes állatcsoportok közül különösen a rovarok között találunk olyanokat, amelyek számára ez az egyéb optikai jegyeket kiegészítő inger létfontosságú információhordozó. A fénypolarizáció érzékelésével kapcsolatos rovar-tani kutatások eredményei kezdetben az egyes rovarfajok térbeli tájékozódásának vizsgálatához kapcsolódtak. Ennek során elsőként K. VON FRISCH (1965) volt az, aki megállapította, hogy a háziméhek tájékozódása részben az égbolt polarizációs mintázata alapján történik, ha a Napot felhők takarják. A háziméh szemének vizsgálata napjainkra már az anatómiai és funkcionális alapjait is feltérképezte a K. VON FRISCH által megfigyelt tájékozódási képességnek (MENZEL és SNYDER 1974, LABHART 1980).

A méhek után számos más ízeltlábúnál is igazolták, hogy képesek érzékelni a lineárisan poláros fény rezgésirányát (WEHNER 1997, HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH 2014).

R. SCHWIND (1985a, 1991, 1995), a Regensburgi Egyetem Állattani Intézetének professzora fedezte fel, hogy 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. Kísérletei során a talaj fölött néhány deciméterre  $1\text{ m}^2$ -es üveglapokat helyezett el, amelyeknek enyhén lejtő felszínét gyenge vízárammal mosta le folyamatosan. Ezzel a módszerrel vízipoloskákat és vízbogarakat fogott be. Az üveglapok alá helyezett különböző spektrális és reflexiós tulajdonságú lapok alkalmazásával a fajok egy részénél az ultraibolya (UV) spektrális tartományban működő polarotaxist is igazolta. A kísérletek eredményeként egyértelművé vált, hogy a vizet kereső repülő rovar, ha optikai környezetében vízszintesen poláros fényt érzékel, akkor ebben az irányban folytatja repülését, majd rászáll a felületre. Más terepkísérletek során az is kiderült, hogy egyes tesztfelületek fölött a szitakötők a vizek mellett szokásos jellegzetes viselkedésmintáikat mutatják be (WILDERMUTH és SPINNER 1991, WILDERMUTH 1993, 1998, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005).

#### **0.4.2. A POLAROTAXISSAL TÖRTÉNŐ VÍZDETEKTÁLÁST ZAVARÓ HATÁSOK**

A szakirodalomban számos, a vízirovarokkal kapcsolatos megfigyelés szerepel, amelyek szerint e rovarok gyakran fellelhetők száraz üvegtáblákon, kocsitetőkön és nedves aszfaltutakon. (FERNANDO 1958, POPHAM 1964). A kérészek aszfaltút feletti rajzása esetén általában azt feltételezték, hogy a mesterséges objektum olyan markert jelent a kérészeknek, amely jelzi a rajzás és szaporodás helyét (pl. BRODSKIY 1973, SAVOLAINEN 1978). A kérészek aszfaltutakra történő tojásrakását egyszerűen azzal magyarázták, hogy a fényes felületű, nedves aszfaltutak optikailag hasonlóak lehetnek a rovarok számára, mint a valódi vízfelszínnek. A témában folytatott korábbi kutatásaink alapján ma már ismert, hogy az aszfaltutak megtévesztésig hasonlóak egy vízszintesen poláros fényt visszaverő vízfelszínhez a vizet kereső rovarok számára. Mivel a kérészek vízdetektálása a vízfelszínről érkező vízszintesen poláros fény segítségével történik, hasonlóan sok más vízirovarhoz, az antropogén eredetű aszfaltút vizuális csapdaként hat rájuk (KRISKA et al. 1998, EGRI et al. 2017a).

A föld mélyén képződő kőolaj bizonyos esetekben a felszínre szivároghatva kátránytavak kialakulását eredményezi. Napjainkban a kőolaj- és pakuravak kialakulását elsősorban az ember környezet átalakító tevékenysége okozza. Erre láthattunk példát az Öböl-válság nyomán kialakult kőolajtavak esetében is. Az olajfelszín ugyan homokkal fűjja be a sivatagi szél, de az évszakok váltakozása során a csillogó felület rendszeresen megújul. A felbuggyanó kőolaj az ősi aszfaltmocsarakhoz hasonlóan számos állatot megtéveszt és csapdába ejt (PILCHER és SEXTON 1993). Ezek az állatok túlnyomórészt vízirovarok és vízimadarak (HORVÁTH és ZEIL 1996, BERNÁTH et al. 2001a, 2001b). A kőolaj és kátránytavak az aszfaltutakhoz hasonlóan (KRISKA et al. 1998) a felszínükről visszavert vízszintesen poláros fénnel tévesztik meg a vizet kereső rovarokat. Az olajfelszínről tükröződő nap- és égboltfény polarizációs mintázata szupernormális ingerként hat (HORVÁTH et al. 1998a, BERNÁTH et al. 2001a). Ennek két fő oka van. Az egyik az, hogy a kőolaj levegőre vonatkoztatott törésmutatója sokkal nagyobb, mint a vízé. A híg folyós kőolaj törésmutatója (1.39–1.49) de a kátrányé elérheti az 1.57-et is (LEVORSEN 1967), míg a vízé csak 1.33 a látható spektrum középső részén. A Fresnel-formulából következően (GUENTHER 1990) minél nagyobb a törésmutató, annál nagyobb a reflektivitás, a polarizációfok és annál vízszintesebb a tükröződő fény rezgéssíkja. A másik oka a szupernormális hatásnak a kőolaj erőteljes fényelnyelő sajátsága, amely jelentősen lecsökkenti a kőolaj belsejéből visszaszóródó fény intenzitását, teret engedve a vízszintesen poláros felszíni reflexió dominanciájának.

#### **0.5. AZ ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE**

A két részre tagolt értekezés (3.1. és 3.2. részek) tizenegy fejezetében (3.1.1.-3.1.5. és 3.2.1.-3.2.6. fejezetek) harminckilenc publikációban közölt eredmények jelennek meg. A publikációk közül tizenhatot fejtettem ki részletesen, míg a többi huszonhárom esetében,

főként terjedelmi okok miatt, csak az eredmények rövid összefoglalására szorítkoztam. Ezek az összefoglalók többségükben a közel húszéves kutatásaim eredményeit szintetizáló 3.2.6. fejezetben (A poláros fényszennyezés a környezeti ártalmak egy új fajtája) szerepelnek.

A tematikailag két részre osztott értekezés első felében azokat a kutatásokat mutatom be, amelyek a polarotaxis kimutatását, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálatát tűzték ki célul különböző vízirovar taxonoknál. Itt ismertetem a kérészek (Ephemeroptera) (3.1.1. és 3.1.5. fejezetek), az árvaszúnyogok (Chironomidae) (3.1.2. fejezet) és a bögölyök (Tabanidae) (3.1.3. fejezet) polarotaxisával valamint több taxon polarotaxis polarizációfok ingerküszöbének vizsgálatával kapcsolatos eredményeimet (3.1.4. fejezet).

Az értekezés második felében azokat a kutatásokat mutatom be, amelyek a mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok vízirovarokra gyakorolt hatásának vizsgálatát tűzték ki célul. Itt ismertetem a különböző színárnyalatú gépkocsik (3.2.1. fejezet), a pernyemezők (3.2.2. fejezet), a folyóparti üvegépületek (3.2.3. fejezet), a fényes fekete sírkövek (3.2.4. fejezet) és a hidak (3.2.5. fejezet) polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásait.

Itt kerül bemutatásra az előbb felsorolt, valamint más az értekezésben részletesen nem kifejtett kutatások egyfajta szintéziseként a poláros fényszennyezés, mint a környezeti ártalmak egy újonnan felismert formája (3.2.6. fejezet). Mivel ez a fejezet különböző metodikákat alkalmazó és nagyrészt az értekezésben már részletesen kifejtett kutatásokra épül, ezért a „Módszerek” részben nem szerepel ehhez a témához kapcsolódó szöveg.

Az értekezés 4. fejezetében (Összegzés és kitekintés) foglalom össze a több mint 20 éve tartó, a vízirovarok polarizációérzékelésén alapuló kutatások indulási körülményeit, legfontosabb eredményeit és a komplex ökológiai csapdák feltárása irányába mutató továbblépési lehetőségeket.

Az 5. fejezetben soroltam fel az értekezés alapjául szolgáló publikációim listáját, amelyben egyértelműen jeleztem a részletesen bemutatott, valamint a csupán tézisszerűen ismertetett dolgozatokat impakt faktoraikkal együtt.

## 1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

### 1.1. POLAROTAXIS KIMUTATÁSA, JELLEMZŐINEK ÉS BIOLÓGIAI SZEREPÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOK ESETÉBEN

#### 1.1.1. *A TISZAVIRÁG (PALINGENIA LONGICAUDA) POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA*

##### 1.1.1.1. Bevezetés

A kérészek lárvái fajtól függően 0,5–3 évig fejlődnek a vízben. Az utolsó fejlődési stádiumú lárvából, azaz a nimfából bújik elő a szárnyas rovar, mely a fajok jelentős részénél még nem pározóképes, úgynevezett szubimágó, ami vedléssel alakul át kifejlett imágóvá. A kérészek többsége az esti órákban rajzik. Ilyenkor a hímek kisebb csapatokba verődnek a vízpart közelében vagy attól távolabb, és megkezdik emelkedő–süllyedő násztáncukat. A rajokban repülő nőstényekre a hímek alulról csapnak rá, és a levegőben párzanak velük. A megtermékenyítést követően a nőstények visszatérnek a vízhez. Az áramló vizekben élő fajoknál a nőstények a folyásiránnyal ellentétesen repülnek víz fölött, azaz kompenzációs repülést végeznek, mielőtt a vízre ereszkedve lerakják tojásaikat. E kompenzációs repülésükkel a vízbe kerülő tojások elsodródását ellensúlyozzák (TERCEDOR és ORTEGA 1991, ANDRIKOVICS et al. 1992, ANDRIKOVICS és TURCSÁNYI 2001).

Korábban kimutattuk (KRISKA et al. 1998), hogy az *Ephemera danica* (Müll.), *Ecdyonurus venosus* (Fabr.), *Epeorus silvicola* (Etn.), *Baetis rhodani* (Pict.), *Rhithrogena semicolorata* (Curt.) és *Haproleptoides confusa* (Hag.) pataklakó kérészfajok a vizet polarotaxis segítségével találják meg, amely a vízfelszínről visszavert, vízszintesen poláros fény érzékelésén alapszik. E kérészek gyakran rajzottak száraz aszfaltutak fölött, a nőstények pedig több esetben tojásaikat is az aszfaltra rakták le. Ez a napnyugta körül kialakuló természetellenes viselkedés azzal magyarázható, hogy az aszfaltfelszínről visszaverődő fény polarizációs iránya ebben az időszakban hozzávetőlegesen vízszintes, polarizációfoka pedig gyakran magasabb, mint a vízfelszínről visszaverődő fényé. Ennek következtében az aszfaltfelszín a vízfelületnél vonzóbb lehet a vizet kereső polarotaktikus kérészek számára.

BRODSKIY (1973) nyomán a kérészeket rajzásuk helye alapján három csoportba sorolhatjuk: (1) mindvégig a víz fölött rajzó fajok; (2) szárazföld fölött rajzó, de a vízzel vizuális kontaktusban maradó fajok; (3) a víztől távol rajzó, a vízfelszínnel vizuális kapcsolatot nem tartó fajok. A korábbi kutatásaink (KRISKA et al. 1998) során tanulmányozott hat kérészfaj a 2. és 3. csoportba tartozott, vagyis e fajok rajzáskor többé-kevésbé eltávolodtak a víztől. Megállapítottuk, hogy a rajzáshelyek szomszédságában található aszfaltút a felületéről visszaverődő vízszintesen poláros fény miatt megtévesztheti és magához vonzhatja e kérészeket. Mindezek alapján joggal vetődhet föl a kérdés, hogy vajon a rajzásuk alapján az 1. csoportba sorolható kérészek is a visszavert fény polarizációja alapján érzékelik-e a vizet.

A legtöbb mesterséges fényes és vízszintes felület optikai csapdaként működik, amennyiben számos vízirovart téveszt meg és pusztít el (BERNÁTH et al. 2001a, HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH et al. 2014). Az ilyen felületek jelenléte a vizes élőhelyek közvetlen közelében veszélyt jelenthet a 2. és 3. csoportba sorolt kérészfajok rajzó egyedeire (KRISKA et al. 1998). A tiszavirág viszont az 1. típusú rajzást követő kérészfajok tipikus példája, esetében nem lehet előre megjósolni, hogy ezek a felületek szintén hatással vannak-e rá.

ANDRIKOVICS SÁNDOR egykori szakdolgozati és PhD témavezetőm irányításával 1991-ben volt alkalmam részt venni a Szolnok fölötti Tisza szakaszon Dobapusztánál egy tiszavirággal

kapcsolatos terepmunkában. Az itt megszerzett ismeretek és a pataklakó kérészfajokkal 1996-ban és 1997-ben elvégzett vizsgálatok eredményei (KRISKA et al. 1998) alapozták meg később a tiszavirág polarotaxisával kapcsolatos kutatásunkat.

A tiszavirág lárvái Magyarországon a Tiszában, néhány mellékfolyójában, valamint a Rába vízrendszerében élnek (KOVÁCS et al. 1999, 2001, 2003, KOVÁCS és BAUERNFEIND 2003, KOVÁCS és AMBRUS 2001). Ezeken az élőhelyeken a hároméves lárvafejlődést követő rajzás kivétel nélkül minden esetben a folyó fölött megy végbe (ANDRIKOVICS et al. 1992, ANDRIKOVICS és TURCSÁNYI 2001). LADÓCSY (1930) azonban egy szegedi megfigyelés nyomán a tiszavirág aszfaltfelület fölötti rendellenes rajzásáról is tudósított, tehát a vízfelszín optikai jelei bizonyosan fontos szerepet játszanak a rajzó tiszavirág imágók tájékozódásában, és a hasonló sajátosságokkal bíró felületek felre is vezethetik őket! Mindazonáltal nem világos, hogy Szegeden a nedves aszfaltfelület fényessége (fototaxis) vagy a visszavert fény vízszintes polarizációja (polarotaxis) tévesztette-e meg a tiszavirágokat.

Kiindulási hipotézisem alapján logikus feltételezésnek tűnt, hogy nem polarotaktikusak azok a kérészfajok, amelyek rajzásuk alapján az 1. csoportba sorolhatók, mert repülésük során nem távolodnak el a vízfelszíntől, így nincs is szükségük a vízfelszín polarizáción alapuló detektálására. Egy korábbi elgondolás szerint a rajzó tiszavirágok a szárnyaikon található higroreceptorokkal érzékelik a víz közelségét (FINK és ANDRIKOVICS 1997), ami szintén azt a feltételezést erősítette, miszerint a tiszavirág vízdetekciója polarotaxis hiányában is működhet. Másrészt viszont a vízirovarok és a fejlődésükben vízhez kötődő rovarok körében gyakori a polarotaxis (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004). Ez alapján az is elképzelhető, hogy ez az ingermozgás a vízirovarok ősi, alapvető, genetikailag rögzült viselkedése, így a tiszavirág annak ellenére rendelkezik a polarotaktikus vízdetektálás képességével, hogy a rajzása teljes egészében a víz fölött megy végbe.

#### 1.1.1.2. Célkitűzés

A kutatás során a legfőbb célkitűzésünk a tiszavirág rövid rajzási periódusa alatt annak eldöntése volt, hogy e rovar polarotaktikus-e, vagy sem. A kérdés megválaszolására három terepkísérletet végeztünk, melyek eredményeként igazoltuk, hogy a *P. longicauda* is rendelkezik polarotaxissal. E tény alátámasztja azt a feltételezést, mely szerint a polarotaxison alapuló vízdetekció egy pleziomorf viselkedési jelleg, amely mindvégig fennmaradt a kérészek evolúciója során, és napjainkban is jellemző tulajdonsága az egyes kérészfajoknak.

### 1.1.2. POLAROTAXIS AZ ÁRVASZÚNYOGOKNÁL

#### 1.1.2.1. Bevezetés

A vízirovar családok közül az árvaszúnyogok (Chironomidae, Diptera) a legszélesebben elterjedtek, a legnagyobb fajszerűségűek, és lárváik sokszor tömeges megjelenésűek a vizes élőhelyeken (CRANSTON 1995). A rövid életű imágók többnyire csak néhány napos rajzásuk során szembeötlők. Ismétlődő tömegrajzásuk miatt egyes helyeken kifejezetten rossz hírű rovarok, mert negatívan hatnak a helyi turizmusra. A hazai szakemberek körében jól ismert a Balaton mellett rendszeresen gigantikus rajzásokat produkáló *Chironomus balatonicus* faj, amely a vitorlásversenyek és a parti kempingek működésének megzavarásával érdemelt ki kétes hírnevet. A rajzó árvaszúnyogok vektorszervezetként bakteriális fertőzést vihetnek át egyik víztestből a másikba. Tojáscsomók számottevő mértékben lehetnek a *Vibrio cholerae* baktérium köztesgazdái (HALPERN et al. 2006). Másrészt viszont az árvaszúnyogok fontos szerepet töltenek be a bentikus ökoszisztémákban (CRANSTON 1995). A vízben élő lárvák óriási tömegben tenyésznek az iszapban, ahol szerves törmelékekkel és baktériumokkal



táplálkozva a táplálékhálózatok alapját képezik. Az imágók rajzásuk során jelentős mennyiségű biomasszát visznek ki a természetes vizekből, ami nagymértékben csökkentheti a víztest nitrogén és foszfor terhelését. Mi több, a tetemeik által képződött szerves anyag többlet a vízközei szántóföldek termékenység növekedésében is szerepet játszhat. Mindezek az ökológiai és ökonómiai tényezők fontossá teszik mindazokat a kutatásokat, amelyek az árvízszűnyogok, különösképpen a tojástartó nőstények elterjedésére és tömegességére vannak hatással.

Az optikai ingerek, ideértve a fényvisszaverődésen alapuló polarizációt is, bizonyítottan fontosak három mediterrán árvízszűnyog faj viselkedése esetében (LERNER et al. 2008, 2011, MELTSEY et al. 2008). A poláros fény egyike lehet azoknak a faktoroknak, amelyek szerepet játszanak e három fajba tartozó nőstények tojástartó hely választásában.

#### **1.1.2.2. Célkitűzés**

Fejlődésében a vízhez kötött számos rovarfaj (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH és VARJÚ 2004, KRISKA et al. 2007, 2008a, 2008b, 2009, LERNER et al. 2008) a vizes élőhelyeket a vízfelszínről visszavert vízszintes poláros fény alapján ismeri föl (SCHWIND és HORVÁTH 1993, GÁL et al. 2001a, BERNÁTH et al. 2004, CSABAI et al. 2006, MOLNÁR et al. 2011). Ekképpen vonzódnak a vízszintes poláros fény különböző természetes (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004), vagy mesterséges (WATSON 1992, NILSSON 1997, VAN VONDEL 1998, STEVANI et al. 2000a, 2000b, GÜNTHER 2003, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, HORVÁTH et al. 2009, HORVÁTH et al. 2010a, 2010b) forrásaihoz, amely viselkedés a polarotaxis. Egyes árvízszűnyog fajok vonzódnak a vízszintes poláros fényhez (LERNER et al. 2008, 2011, MELTSEY et al. 2008). A polarotaktikus tojástartó hely keresés kérdése nem tisztázott teljesen, mert LERNER és munkatársai (2011) azt találták, hogy e folyamatot jelentősen befolyásolhatja az élőhely elérhetősége és az árvízszűnyogok egyedszáma. Választásos terepkiérleteket akartunk elvégezni az árvízszűnyogok polarotaxisának vizsgálatára, hogy megállapítsuk a három korábban vizsgált melegégyi fajon (LERNER et al. 2008, 2011, MELTSEY et al. 2008) túl ki lehet-e mutatni a pozitív polarotaxist további árvízszűnyog fajoknál is. A kérdés megválaszolása fontos, tekintettel az árvízszűnyogok vizuálökológiájának jobb megértésére és a rovarcsoport hatékony optikai csapdájának kifejleszthetőségére.

#### **1.1.3. BÖGÖLYÖK POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA**

##### **1.1.3.1. POLAROTAXIS KÍSÉRLETI BIZONYÍTÁSA BÖGÖLYÖKNÉL: A POLARIZÁCIÓLÁTÁS LEHETSÉGES SZEREPE A BÖGÖLYÖK SZAPORODÁSI ÉS TÁPLÁLKOZÁSI VISELKEDÉSÉBEN**

##### **1.1.3.1.1. Bevezetés**

A kétszárnyúak (Diptera) közé tartozó bögölyök (Tabanidae) fajdiverzitása nagy, és világszerte elterjedtek. A kifejlett egyedek általában nektárral és pollennel táplálkoznak, de számos bögölyfaj megtermékenyített nőstényeinek a tojástartásához szükségük van valamilyen gerinces, sok esetben nagytestű háziállat (pl.: ló, marha) vagy ember vérére. Mivel a nőstények vérszívók a bögölyök biológiája, viselkedése intenzív kutatások tárgyát képezi (pl. TASHIRO és SCHWARDT 1953, HAYAKAWA 1980, MAJER 1988, HALL et al. 1998, LEHANE 2005). A bögölyök orsó alakú tojásait olykor több százas csomókban rakják le vízparti növényekre vagy nedves talajra. A lárvák vízben vagy a nedves talajban fejlődnek 1-3 évig, a bebábozódás a víz közvetlen közelében lévő növényeken következik be (TASHIRO és SCHWARDT 1953). A kifejlett bögölyök közül főleg a nagyobb testű, igen jól repülő fajok egyedei távolodnak el nagy távolságra (akár 100 km-re is) a tenyészhelyeiktől, ezért a

különböző állati és emberi betegségek kórokozóinak terjesztésében elsősorban ezek vesznek részt (WIESENHÜTTER 1975, KRINSKY 1976, FOIL 1989, LUGER 1990, CHAINEY 1993, VEER et al. 2002, LEHANE 2005, RAHMAN 2005).

A bögölyfajok jelentős része kevésbé válogatós a tojásrakó hely kiválasztásakor, hiszen már egy kocsikeréknyomnyi vízgyülemelés is alkalmas helye lehet a lárvák fejlődésének. Elsősorban ez a sajátság és a kifejtett egyedek nagy röpképessége az, ami jelentősen megnehezíti a bögölyök elleni védekezést. A megóvandó területek közelében igen nehéz, szinte lehetetlen a bögölyök minden, vízhez kötődő tenyészhelyét fölszámolni, de ha ez sikerülne is, a nagy távolságokból érkező vérszívó bögölyök ellen ez sem nyújtana megfelelő megoldást. Ezért szinte az egyedüli fegyver a bögölyök elleni harcban egy hatékony csapdarendszer működtetése, amely koncentráltan és környezetkímélő módon képes védelmet nyújtani a vérszívók támadásával szemben.

A korszerű, intenzív és gazdaságos állattenyésztési eljárások fokozott mértékben megkövetelik azon környezeti tényezők ismeretét, amelyek jelentős befolyást gyakorolnak a termelési eredményekre. Világszerte sok helyen alkalmazzák az olcsó, szabad vagy félig szabad állattartást. A réteken, legelőkön vagy nyitott karámokban tartott állatokat gyakran zaklatják bögölyök, és ezzel a termelési eredmények jelentős csökkenését okozzák. A hatásuk nem lebecsülendő, hiszen egy szarvasmarha napi vérvesztése akár 200-300 cm<sup>3</sup> is lehet a bögölyök vérszívása miatt (LEHANE 2005). Ennek következtében csökken a tejhozam, a hízómarhák később érik el a kívánt vágósúlyt (HOLLANDER és WRIGHT 1980, MAJER 1984).

A bögölyökkel foglalkozó kutatások mindig is a figyelem középpontjában álltak az említett gazdasági és közegészségügyi jelentőségük miatt (LEHANE 2005). Miután a szakemberek már igen korán fölismerték, hogy a vérszívók elleni hatékony védekezést jól működő bögölycsapdák kifejlesztésével érhetik el, világszerte nagy energiákat fektettek ezek létrehozásába. A jelenleg is használatban lévő bögölycsapdák (MALAISE 1937, GRESSITT és GRESSITT 1962, THORSTEINSON et al. 1965, WILSON et al. 1966, CATTS 1970, KNIEPERT 1979, HAYAKAWA 1980, WALL és DOANE 1980, HRIBAR et al. 1992, MOORE et al. 1996, MIHOK 2002, LEHANE 2005) alapvetően két fő összetevőből állnak: egy vizuálisan vonzó tárgyból vagy felületből, és az odavonzott bögölyöket csapdába ejtő szerkezetből. A vizuálisan vonzó alkotórész lehet például egy színes (például kék vagy vörös) tárgy vagy felület (például műanyag vödör vagy sátorlap) vagy egy fekete (színtelen) gömb (például levegővel fölfújt gumilabda). A megfigyelések szerint a bögölyök kedvelik a kék és vörös színt, ami odacsábíthatja őket az ilyen színű tárgyakhoz, felületekhez. Hasonló mondható el a fényes fekete tárgyakról/felületekről is, amelyek a korábbi föltevések szerint azért lehetnek vonzóak a bögölyök számára, mert a prédaállatok testének a horizont fölé emelkedő, a világos égbolt háttéréhez képest sötét kontúrját utánozhatják. Ugyancsak tapasztalati tény, hogy ezek a színes vagy fekete tárgyak még jobban vonzzák a bögölyöket, ha a prédaállatok lassú mozgását imitálva nem túl nagy sebességgel mozognak. Ezért szokták olykor a tárgyakat/felületeket autókra (terepjárókra vagy tehergépkocsikra) szerelve lassan mozgatni, de ezt a célt szolgálja az is, hogy például a fekete gömböt egy madzagra kötve lógatják le, miáltal a gömb a szélben ide-oda mozoghat.

A szóban forgó tárgyak/felületek által odavonzott bögölyöket kétféleképpen szokás csapdába ejteni: (i) Be nem száradó ragasztóanyaggal kenik be a tárgyakat/felületeket, amibe beleragadnak a rájuk szálló bögölyök. (ii) A vizuálisan vonzó tárgy fölé színes és/vagy színtelen szövet vagy műanyag lapokból emelnek egy sátorszerű kupolát, melynek legfőbb csúcsában gyűjtőüveget helyeznek el. A vizuálisan vonzó tárgyról fölrepülő bögölyök egy részét a fölfelé fokozatosan szűkülő kupola tereli a gyűjtőedénybe, ahonnan aztán nem tudván kiszabadulni, csapdába esnek. E sátrakat gyakran önmagukban is alkalmazzák, ilyenkor a színesre vagy feketére festett oldalfalaik szolgálnak az optikailag vonzó felületnek. Minden várakozás ellenére azonban eddig egyetlen bögölycsapda sem váltotta be teljesen a hozzáfűzött reményeket, sem a hatékonyság (azaz a csapdázott bögölyök számának maximalizálása), sem pedig a szelektivitás (vagyis a bögölyöktől eltérő rovarfajok számának

minimalizálása) tekintetében. A részleges sikertelenség oka elsősorban abban állt, hogy a csapdákat nem a bögölyök biológiájának (életciklusának, fiziológiájának) és érzékelésük biofizikájának (látásuknak, vizuális környezetüknek) a föltárásán keresztül próbálták megközelíteni, hanem antropomorf szemléletű csapdázási hipotéziseket teszteltek terepi viszonyok között (MALAISE 1937, GRESSITT és GRESSITT 1962, THORSTEINSON et al. 1965, WILSON et al. 1966, CATTS 1970, KNIERT 1979, HAYAKAWA 1980, WALL és DOANE 1980, HRIBAR et al. 1992, MOORE et al. 1996, MIHOK 2002, LEHANE 2005).

Annak ellenére, hogy korábbi vizsgálatokban már számos vízirovar polarotaxisát kimutatták (HOMBERG 2004, HORVÁTH és VARJÚ 2004, WEHNER és LABHART 2006), nem merült fel az a kérdés, hogy vajon a bögölyöknek van-e polarizációlátása és ez szerepet játszhat-e a viselkedésmintázatuk kialakulásában.

#### **1.1.3.1.2. Célkitűzés**

Kutatásunk célja az volt, hogy választásos viselkedési terepkísérletekkel igazoljuk a bögölyök ventrális polarizációlátását és pozitív polarotaxisát, vagyis azt, hogy a rovarok az alulról jövő, vízszintesen poláros fényhez vonzódnak. Hipotézisünk szerint a polarotaxisnak fontos szerepe van a bögölyök életében: a polarizációérzékeny nőstény bögölyök először a vizet detektálják a róla tükröződő vízszintesen poláros fény segítségével, majd a víz fölé hajló növények leveleit, mint tojásrakó helyeket, valamint a vízparton ivó/fürdőző nagytestű emlősöket vérszívás céljából keresik föl, továbbá ott találkozhatnak a hím egyedekkel is. A polarotaxis domináns tulajdonságként való igazolása a nőstény és a hím bögölyöknél, lehetőséget ad a rovarok optikai alapon működő, nagy hatékonyságú csapdázására.

#### **1.1.3.2. A GAZDA KÜLTAKARÓ OPTIKAI SAJÁTSÁGAINAK HATÁSA A BÖGÖLYÖK GAZDAVÁLASZTÁSÁRA**

##### **1.1.3.2.1. Bevezetés**

A hímek versengése a nőstényekért sok esetben vezetett a kültakaró (tollazat, szőrzet) látványos mintázataihoz, amelyek a hímekben hordozott „jó gének” és a paraziták elleni nagy ellenálló képesség vizuális jelzőinek számítanak (CLAYTON 1991, CLUTTON-BROCK 2007, HAMILTON és ZUK 1982). A tesztoszteron szabályozza a szőrzet növekedését (THORNTON et al. 2001) és a melaninképződést (WILSON 1983), valamint befolyásolja a hímek agresszióját (MARLER és MOORE 1988), amely jellemzők a hímek dominanciájával és megnövekedett párosodási lehetőségével állnak szoros kapcsolatban. Ugyanakkor a magasabb tesztoszteronszint nagyobb parazitaterheléssel és a paraziták miatti nagyobb halálozási aránnyal jár együtt (ZUK és MCKEAN 1996, MOORE és WILSON 2002). A feltűnőségük miatti nagy sebezhetőségük következtében a természetben csak igen ritkán fordulnak elő fehér (világosszürke vagy albínó) lovak és más patás állatok. Az ilyen fehér állatok sokkal kevésbé védettek a napsugárzás ultraibolya összetevőjével szemben, ami megnöveli a bőrrák kialakulásának esélyét, továbbá a látórendszer betegségeihez vezethet (PIELBERG et al. 2008). Másrészt viszont – éppen a természetbeli ritkaságuk miatt – az emberek kitenyésztették a fehér (lovas szaknyelven szürke) lovak különféle fajtáit. A fehér ló az emberi kultúrában idővel a ritkaság, a méltóság és a gazdagság státuszszimbólumává vált (TRESIDDER 2005). A fehér lovak egy speciális mutációt hordoznak, ami egy több ezer évvel ezelőtt élt közös ősről vezethető vissza (PIELBERG et al. 2008). A fehér lovak többsége egy őszülést okozó domináns mutációt hordoz, amennyiben a lovak színes (fekete vagy barna) szőrzettel születnek, de egyéves korukra megőszülnek. E folyamat hasonlít az emberek őszülésére, csak a lovaknál sokkal gyorsabban történik. A ma élő lovak mintegy 10%-a hordozza ezt az őszülést kiváltó mutációt. E genetikai mutáció miatt a fehér lovak sokkal érzékenyebbek a káros ultraibolya- sugárzással szemben, ami növeli a bőrrák kialakulásának esélyét. A 15

évesnél öregebb fehér (szürke) lovak 75%-ának van valamilyen jóindulatú daganata, ami néhány esetben rosszindulatúvá alakulhat (PIELBERG et al. 2008). Tehát a lovak látványos fehérségének ára az ultraibolya-sugárzás kiváltotta bőrrák nagyobb kockázata.

A bögöly nőtények vérszívása a meleg nyári napokon szinte állandó zavarást jelent a nyitott karámban tartott lovak számára, amelyek intenzív védekező reakciókat mutatnak a paraziták ellen. A bögölyökkel Szokolyán, 2008 nyarán folytatott terepkísérletünk során véletlenül sikerült megfigyelnem egy szabadtéri karámban, hogy a sötétbarna színezetű lovakat a bögölyök jól láthatóan sokkal nagyobb számban támadják, mint a fehéreket. Ez a megfigyelés vetette fel annak a vizsgálatnak a létjogosultságát, amely a lovak kültakarójának optikai sajátságait vizsgálja a bögölyvonzó képesség tekintetében.

### 1.1.3.2.2. Célkitűzés

A kutatás célkitűzése annak a kimutatása volt, hogy a fehér lovak a bögölyök számára kevésbé vonzóak, mint a sötétebb színűek. Kísérletekkel és képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal terveztük alátámasztani azt, hogy e jelenség a testfelület fénypolarizáló képességével és a bögölyöknél korábban fölfedezett pozitív polarotaxissal (HORVÁTH et al. 2008) magyarázható, vagyis azzal, hogy a bögölyök vonzódnak az erősen és vízszintesen poláros fény természetes vagy mesterséges forrásaihoz. A terepi megfigyeléseket választásos kísérletekkel terveztük kiegészíteni, melyekben a bögölyök lovakhoz, lómakettekhez és különböző fénypolarizáló-képességű tesztfelületekhez való vonzódását tanulmányozzuk. Feltételezésünk szerint nem önmagában a szőrzet sötét színe, hanem fénypolarizáló-képessége okozza a bögölyök erősebb vonzódását a sötétebb lovakhoz. Hogy a választásos terepkísérletekben használt lómakettek és tesztfelületek polarizációs sajátságait össze lehessen hasonlítani a bögölyök által támadott tipikus gazdaállatokéival, élő lovak és szarvasmarhák polarizációs mintázatait is meg kívántuk határozni képalkotó polarimetriával.

## 1.1.4. *A POLAROTAXIS POLARIZÁCIÓFOK INGERKÜSZÖBÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOKNÁL*

### 1.1.4.1. Bevezetés

Ma már általános elvnek tekinthető, hogy a fejlődésükben vízhez kötött rovarok polarotaktikus vízdetekcióval rendelkeznek, a vízfelszínt a róla visszavert vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH 2014, LERNER et al. 2008). Azt is számos kutatás igazolja, hogy a pozitív polarotaxissal rendelkező vízirovarokat megtéveszthetik az erősen és vízszintesen poláros fényt tükröző mesterséges felületek, mint például a kőolajtavak (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, BERNÁTH et al. 2001a), az aszfaltutak (KRISKA et al. 1998, HORVÁTH et al. 2010c, EGRI et al. 2017a), a fényes fekete agrofóliák (WILDERMUTH 1998, KRISKA et al. 2007), a fekete, vörös és más sötét színárnyalatú gépkocsik (WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, KRISKA et al. 2006a), a fényesre polírozott fekete sírkövek (HORVÁTH et al. 2007), a sötét üvegfelületek (KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008) és még a fényes fekete napelemtáblák és napkollektorok (HORVÁTH et al. 2009) is. Ezek a mesterséges felületek poláros ökológiai csapdái lehetnek a vízirovaroknak, mert alkalmatlan helyei a megtévesztett rovarok által azokra lerakott tojások kifejlődésének (HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH 2014, HORVÁTH és KRISKA 2008).

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, ami még képes pozitív polarotaxist kiváltani.

A fajspecifikus  $p^*$  értékek a természetes élőhelyválasztásban is fontosak lehetnek. A víz zavarossága, a vízi növényzet sűrűsége jelentős befolyással lehet a ragadozó-préda interakciókra (VAN DE MEUTTER et al. 2005). Ezek a fizikai és egyéb paraméterek közvetlenül nem hozzáférhetőek a megfelelő tojásrakó helyet kereső repülő vízirovarok számára, ugyanakkor a visszavert fény  $p$  polarizációfoka egy távolról érzékelhető, megbízható fizikai előrejelzője a vízi tojásrakó helynek (BERNÁTH et al. 2002). Egy vízirovarfaj magasabb  $p^*$ -értéke azt valószínűsíti, hogy e faj a sötétebb, mélyebb vagy tisztább (kevesebb lebegőanyagot tartalmazó) vizeket részesíti előnyben, és elkerüli a világosabb, sekélyebb, zavaros és eutrofizálódott víztesteket (BERNÁTH et al. 2004).

A szakirodalom nem tartalmazza a vízirovarok megbízható, kvantitatív  $p^*$  értékeit, ugyanakkor SCHWIND (1995) feltételezte, hogy az általa vizsgált vízibogarak és poloskák ventrális, polarizációérzékeny szemrészének  $p^*$  értéke magasabb lehet ( $p^* \approx 35\%$ ), a mezei tücsök (*Gryllus campestris*) ( $p^* \approx 5\%$  a spektrum kék tartományában, LABHART 1996) és a háziméh (*Apis mellifera*) ( $p^* \approx 11\%$  a spektrum ultraibolya tartományában, VON FRISCH 1967, ROSSEL és WEHNER 1984) szemének polarizációérzékeny dorzális szegélyéhez képest.

#### 1.1.4.2. Célkitűzés

A kutatásunk fő célja az volt, hogy adatokat szolgáltatassunk 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, amelyek pozitív polarotaxisának igazolása már korábban megtörtént (kérészek: KRISKA et al. 1998, 2007, szitakötők: WILDERMUTH 1998, HORVÁTH et al. 1998a, 2007, BERNÁTH et al. 2002, bögölyök: HORVÁTH et al. 2008). Ez a munka nyújtott először kísérleti alapon  $p^*$  értékeket a kérészek, szitakötők és bögölyök esetében. 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 megtéveszthetik a vizet kereső különböző vízirovar fajokat.

### 1.1.5. A KÉRESZÉK SZÁMÁRA KEDVEZŐTLEN ÉLŐHELYEK ELKERÜLÉSE POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉS RÉVÉN

#### 1.1.5.1. Bevezetés

A fejlődésükben vízhez kötött rovarok, ezen belül is a kérészek számos faja esetében sikerült bizonyítani a polarotaktikus vízdetekciót, aminek során a rovarok a víztestet a felszínéről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel (KRISKA et al. 1998, 2007, 2009). A víz fölött rajzó kérészfajok, mint például az *Ephoron virgo* (Olivier 1791) és a *Palingenia longicauda* (Olivier 1791) 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). 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.

A függőlegesen poláros fény kérészrajzásra gyakorolt hatásának vizsgálatára az *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* (Eaton 1884) kérészfajokkal végeztünk terepkísérleteket. E kérészfajokat különböző családokba (Polymitarcyidae, Caenidae) soroljuk, és míg az *E. virgo* lárvái kizárólag folyókban (KAZANCI 2013), a *C. robusta* lárvák lassúfolyású patakokban és állóvizekben is kifejlődnek (BRADBEER 1980, LANGFORD és BRAY 1969). A két faj rajzási viselkedése hasonló képet mutat abban a tekintetben, hogy mindkettőjük rajzása sötétedéskor kezdődik (BRADBEER és SAVAGE 1980, SZÁZ et al. 2015) és rajzáshelyük a vízfelszínhez kötődik (BRODSKIY 1973).

A rajzás nyitányaként az *E. virgo* lárvabőről előbújó hím szubimágói a partra repülnek, ahol párzóképes imágókká vedlenek és visszarepülnek a folyófelszín fölé (IBANEZ et al. 1991). A hímek a rajzás során gyorsan és egyenes vonalban repülnek közvetlenül a vízfelszín fölött 2,5-5,0 cm magasságban, és ha egy nőténnyel találkoznak, akkor párzanak velük. Az *E. virgo* esetében a rajzásban résztvevő hímek azt a benyomást keltik, mintha folyamatosan a lárvabőről előbújó, azonnal párzóképes nőtényeket keresnék. A hímek vízfelszínt pásztázó kereső repülése kompenzálja a más fajokra jellemző konkrét rajzáshely hiányát, ahol a hímek vizuális alapon könnyen megtalálhatják a nőtényeket (BRODSKIY 1973). A vízfelszíni repülés igen jellegzetes eleme az, hogy a partvonalhoz közelítő rovarok már a part elérése előtt hirtelen visszafordulva a folyó középvonala felé repülnek, így a rajzás során a kérészek mindvégig a folyó felszíne fölött a parttól több méteres távolságban tartózkodnak (SZÁZ et al. 2015). A nőtények a rajzás kezdetén a hímekhez hasonlóan repülnek a vízfelszín fölött, majd egyre magasabbra emelkedve megkezdik a folyó középvonala fölött a folyásiránnyal szembeni néhány kilométeres kompenzációs repülésüket, amelynek végén a vízfelszínre ereszkedve lerakják tojáscsomóikat (KAZANCI 2013). A fentiekben leírt rajzási viselkedés jellemző a szintén folyólakó *P. longicauda* fajra is (KRISKA et al. 2007).

A Caenidae családba sorolt kérészfajok rajzása a vízfelszín és a vízpart fölött megy végbe, ahol több száz, több ezer hímről és nőtényről álló csoportok alakulnak ki, amelyekben a hímek egyedszáma 4-6-szor több, mint a nőtényeké (BRODSKIY 1973).

A *P. longicauda* folyófelszín fölött rajzó kérészfaj esetében korábban megfigyeltük (MÁLNÁS et al. 2011), hogy a nőtények vízfolyással szembeni kompenzációs repülését megállítják a folyón átívelő hidak. Megállapítottuk, hogy a folyó középvonala fölött haladó kérészrepülést a hídról és a híd képét tükröző vízfelszínről kisebb polarizációfokú, gyakran függőlegesen poláros fény visszaverődése állítja meg. Ennek eredményeként megszakad a folyó korábban folytonos, erősen és vízszintesen poláros optikai jele, amely a kérészek repülését irányítja. Képalkotó polarimetriával azt is igazoltuk, hogy a vízparti növényzet képének tükröződése miatt a kisebb polarizációfokú, függőlegesen poláros fényt visszaverő vízfelszín a part mentén is megjelenik, ami hozzájárulhat ahhoz, hogy a vízfelszín fölött repülő kérészek ezt a sávot elkerülve a folyófelszín parttól távolabbi részein maradnak.

### 1.1.5.2. Célkitűzés

Az előzmények nyomán fölmerülhet a kérdés, hogy a függőlegesen poláros fény gyakorol-e valamilyen hatást a kérészek rajzási viselkedésére?

A fenti kérdés megválaszolása érdekében öt terepkísérletben vizsgáltuk az *E. virgo* és *C. robusta* viselkedését vízszintesen és függőlegesen poláros, valamint polarizálatlan fényt kibocsátó lámpákkal.

Korábbi eredményeink (MÁLNÁS et al. 2011) értelmezésekor az alacsony polarizációfokú függőlegesen poláros fénynek nem tulajdonítottunk aktív szerepet a kérészrepülés irányításában, mert az ilyen polarizációjú fényt tükröző vízfelszín elkerülését az erősen és vízszintesen poláros fény hiányával magyaráztuk. Ezzel szemben a továbbiakban részletezett kutatás során a függőlegesen poláros fénynek e két kérészfaj rajzásában játszott szerepét kívántuk vizsgálni.

## 1.2. MESTERSÉGES POLÁROS FÉNYFORRÁSOK ÉS POLARIZÁCIÓS MINTÁZATOK HATÁSA VÍZIROVAROKRA

### 1.2.1. KÜLÖNBÖZŐ SZÍNÁRNYALATÚ GÉPKOCSIK POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

#### 1.2.1.1. Bevezetés

Az 1980-as évek végén, még egyetemi hallgatóként, figyeltem fel elsőként a Pilis hegységi Dömörkapunál, egy a Bükkös-patak mellett futó aszfaltútnál arra, hogy a természetvédelmi terület előtt, az út mellett kialakított parkolóban a piros és más sötét színárnyalatú gépkocsik fölött gyakran rajzanak kérészek. Ezek a rovarok más, fejlődésükben vízhez kötődő rovarokhoz (pl. csiborok, csíkbogarak, molnárkák, álkérészek, tegzesek és szitakötők) hasonlóan gyakran le is szállnak a gépkocsik vízszintes és ferde részeire, a motorháztetőre a szélvédőre és a tetőre és esetenként ide rakják le a tojászsomóikat is.

Az irodalmi adatok szerint a vízirovarok leszállását a piros autókra több alkalommal is megfigyelték már a kutatók (JACH 1997, NILSSON 1997, KRISKA et al. 1998, VONDEL 1998, BERNÁTH et al. 2001a), amely jelenséget a piros gépkocsi karosszéria színével, fényességével (JACH 1997, NILSSON 1997), vagy valami rejtélyes okkal magyaráztak (VONDEL 1998). NILSSON (1997) számos, különböző *Hydroporus* vízbogár faj (*Hydroporus angustatus*, *H. geniculatus*, *H. incognitus*, *H. morio*, *H. nigrita*, *H. palustris*, *H. striola*) nőtény és hím egyedét figyelte meg, amint piros autók tetejére szálltak le különböző időjárási körülmények között. A piros autók tetején leszálló *Hydroporus* rovarok nagy számát NILSSON (1997) részben az autókarosszéria piros színével magyarázta. BEHR (1990) fekete rovarcsapdái ugyanakkor magukhoz vonzottak mintegy 400 *Hydroporus incognitus* egyed, ami arra mutatott, hogy nem csak a piros szín lehet vonzó a vizsgált vízbogarak esetében. JACH (1997) számos további vízbogár faj egyedeit (Elmidae: *Elmis aenea*, *E. maugetii*, *Esolus parallelepipedus*, *Limnius perrisi*, *L. volckmari*, *Riolus cupreus*, *R. subviolaceus*; Hydraenidae: *Hydraena minutissima*, *H. gracilis*; Haliplidae: *Halipus lineatocollis*) gyűjtötte be tiszta időben egy piros autó tetejéről, motorháztetőjéről és csomagtartójáról. VONDEL (1998) szintén különböző vízbogár családok több fajáról (Haliplidae: *Halipus lineatocollis*; Dytiscidae: *Hydroglyphus pusillus*, *Hydroporus planus*; Hydraenidae: *Ochthebius minimus*, *Limnebius papposus*; Hydrophilidae: *Helophorus flavipes*, *H. granularis*, *H. minutus*, *Anacaena lutescens*, *Enochrus quadripunctatus*, *Hydrobius fuscipes*; Elmidae: *Oulimnius tuberculatus*) számolt be, amelyek egyedei egy piros autó tetejére szálltak le tiszta és felhős ég alatt egyaránt.

Habár különböző fejlődésükben vízhez kötött rovarok, különösen szitakötő fajok esetében (WYNIGER 1955, SVIHLA 1961, WATSON 1992, WILDERMUTH 1998, STEVANI et al. 2000a, b, BERNÁTH et al. 2001a, GÜNTHER 2003, TORRALBA és OCHARAN 2003, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005) ismereteseek olyan megfigyelések, melyek szerint a rovarok autók fölött repkedtek és leszálltak piros autókra, a jelenség csak kismértékben keltette fel a vízirovarok migrációjával foglalkozó kutatók érdeklődését.

Az aszfaltutak kérészekre gyakorolt polarotaktikus vonzóhatásának vizsgálata során (KRISKA et al. 1998) merült fel bennem, hogy a gépkocsiknál tapasztalt jelenség háttérében is, az aszfaltúthoz hasonlóan, az objektumról visszaverődő vízszintesen poláros fény vonzóhatása állhat. A saját terepi tapasztalatok és az irodalmi adatok is arra utaltak, hogy a gépkocsik vízszintes karosszéria elemei és a ferde szélvédők vonzzák a polarotaktikus vízirovarokat (WYNIGER 1955, SVIHLA 1961, WATSON 1992, WILDERMUTH 1998, STEVANI et al. 2000a, b, BERNÁTH et al. 2001a, GÜNTHER 2003, TORRALBA és OCHARAN 2003, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005), aminek feltételezhetően az áll a háttérében, hogy ezek a részek tükröznek vízszintesen poláros fényt.

A feltevés igazolása kezdetben aggályosnak tűnt, mert színes tesztfelületekkel kellett volna választásos terepkísérleteket folytatnunk. A színes felületek alkalmazása azért vet fel problémákat, mert a terepkísérleteinkben korábban alkalmazott szintelen tesztfelületeinkkel (fényes fehér és fekete műanyag fóliák, matt fehér és fekete szövetek, alumínium fólia) ellentétben ezek polarizációs mintázatai eltérőek a spektrum különböző tartományaiban. A másik problémát az jelentette, hogy a dömörkapui terephelyszínen a vízirovarok fajgazdagsága és egyedszáma is elég alacsony volt, ami bizonytalanná tette egy sikeres terepmunka megszervezhetőségét.

Első poláros tesztfelületekkel folytatott kutatásaink közzé tételekor (KRISKA et al. 1998) javaslatot tettünk a vízirovarokkal foglalkozó entomológusoknak arra, hogy faunisztikai és a kolonizációval kapcsolatos terepkísérleteikben használják rovarcsapdaként az általunk kipróbált és sikerrel alkalmazott, erősen és vízszintesen poláros fényt reflektáló tesztfelületeket. A hazai kutatók közül elsőként Csabai Zoltán, Boda Pál és munkatársaik használták terepmunkájuk során vizuális rovarcsapdaként a poláros tesztfelületeket és színes műanyag fóliákkal is folytattak a vízirovarok vándorlásával kapcsolatos kutatásokat (BODA et al. 2003, CSABAI et al. 2003, 2004, CSABAI és BODA 2005). Taxonómiai adataik egyébirányú felhasználásaként rövid időn belül két közös publikációnk is megjelent névös lapokban. Az egyik egy korábbi, a vízirovarok napszakos vándorlásának napi ritmusára vonatkozó elméleti feltételezés (BERNÁTH et al. 2004) jelentős mennyiségű taxonómiai adattal történő alátámasztása, megerősítése volt (CSABAI et al. 2006), míg a másik, jelen fejezet tárgyát képező, a különböző színárnyalatú gépkocsik polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt hatásvizsgálatának választásos terepkísérleti hátterét adta (KRISKA et al. 2006a).

### **1.2.1.2. Célkitűzés**

A kutatás alapvető célkitűzése az volt, hogy választ kapjunk arra a kérdésre, hogy miért vonzódnak a vízirovarok a piros színű és más sötét színárnyalatú gépkocsikhoz. Mivel a vízirovarok a vizet a felszínéről visszatükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel (SCHWIND 1991, 1995), ezért kimértük egy piros, egy sárga, egy fehér és egy fekete gépkocsi polarizációs mintázatát a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. A választásos terepkísérletek és a képalkotó polarimetriai mérések eredményei alapján kívántunk magyarázatot adni arra a kérdésre, hogy miért tévesztik meg a piros autók a vízirovarokat. Igazolni kívántuk továbbá, hogy a piros autók vízirovarokat vonzó tulajdonsága teljes mértékben megmagyarázható a gépkocsi polarizációs mintázatával. Végül vizes élőhelyek vízirovar együtteseinek védelmének vonatkozásában meg kívántuk válaszolni a kérdést hogy milyen színű a környezetbarát autó.

### **1.2.2. *PERNYEMEZŐK HATÁSA POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA***

#### **1.2.2.1. Bevezetés**

A vízirovarok polarotaxis segítségével keresik a vizet, azaz, a vízfelületről visszavert fény vízszintes polarizációja alapján (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004). Ezeket a polarotaktikus rovarokat magukhoz vonzhatják mindazon mesterséges eredetű felületek, melyek erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, 2007, KRISKA et al. 1998, BERNÁTH et al. 2001a, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, KRISKA et al. 2006a, 2008, MALIK et al. 2008).

Ezen eredmények alapján az a paradigma alakult ki, hogy minden “fekete antropogén termék” – értve ez alatt mindazon mesterséges felületet, amely erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza – megtéveszti és magához vonzza a polarotaktikus vízirovarokat (BERNÁTH et al. 2001a). Egy tipikus és sok helyen megjelenő ilyen antropogén felület a pernyemező. Jól ismert tény, hogy a megművelt földterületeken a tarló égetése végzetes következményekkel



járhat azon állatokra és mikroszervezetekre nézve, melyek a földfelszínen és a talaj legfelső rétegében élnek. Egy ilyen tarlóégés eredményeként nagyszámú gerinces és gerinctelen állat pusztulhat el. A talaj állapota jelentősen romlik a hamu lúgos oldatának bemosódása és a humusztartalom csökkenése miatt. A tarló égése során a levegő is szennyeződik a nagy mennyiségű füst miatt, ami a széllel együtt távoli helyekre is elérhet, és káros hatásokat okozhat. Az Umow-effektus (UMOW 1905, KÖNNEN 1985, HORVÁTH és VARJÚ 2004) miatt a pernyemezők fekete hamurétege erősen poláros fényt ver vissza. Ezért feltételezhető, hogy a fekete hamuréteg nagy számban téveszti meg és vonzza magához a polarotaktikus vízirovarokat, a többi erősen polarizáló, fekete antropogén termékhez (pl. kőolajtavak, fekete műanyag agrofóliák, aszfaltutak, sötét üvegépületek, fényes fekete sírkövek) hasonlóan, és emiatt a vízirovarok tömegesen pusztulhatnak el a leégett, fekete tarlókon.

#### 1.2.2.2. Céltitűzés

A kutatás céltitűzése az volt, hogy képalkotó polarimetriai mérésekkel, valamint a vízirovarok vizsgálatával megállapítsuk, hogy a pernyemezők polarizációs sajátságaiak folytán megtévesztik-e a vizet kereső repülő vízirovarokat.

Képalkotó polarimetriával kívántuk mérni a pernyemezők tükröződési-polarizációs sajátságait a spektrum vörös, zöld és kék tartományaiban a szoláris meridiánhoz képest különböző irányokban. Fel kívántuk kutatni a pernyemezőkön esetlegesen fellelhető vízirovarokat, valamint a pernyemezők közvetlen közelében a földre terített fényes fekete műanyag fóliák által vonzott vízirovarok révén terveztük bizonyítani, hogy repülő vízirovarok nagy számban tartózkodtak a pernyemező légterében.

#### 1.2.3. *FOLYÓPARTI ÜVEGÉPÜLETEK HYDROPSYCHE PELLUCIDULA (TRICHOPTERA) IMÁGÓKRA GYAKOROLT HATÁSA*

##### 1.2.3.1. Bevezetés

Az utóbbi évtized kutatásainak eredményeként ma már köztudott, hogy bizonyos mesterséges tárgyak, felületek, mint például a nyíltfelszíni olajtárolók, az aszfaltutak, a fényes fekete agrofóliák vagy a sötét színű autókarosszériák magukhoz vonzzák a vízirovarokat (HORVÁTH és ZEIL 1996, WILDERMUTH 1998, HORVÁTH et al. 1998a, KRISKA et al. 1998, KRISKA et al. 2006a, 2007). A vizuálisan megtévesztett vízirovarok sokszor rajzanak az antropogén eredetű tárgyak fölé, és gyakran a tojásaikat is ezekre rakják le. Ennek fő oka, hogy e rovarokat vonzza a vízszintesen poláros fény. A vízirovarok a vizet a felszínéről tükröződő erősen és vízszintesen poláros fény alapján érzékelik, ezért minden olyan tárgy, felület, ami ilyen fényt ver vissza, pozitív polarotaxissal csábítja magához a lárvaalakjukban, vagy egész életükben vízhez kötődő, kifejllett, röpképes rovarokat (SCHWIND 1985a, 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004).

Az alkonyatkor aktív rovarok, mint a kérészek és a tegzesek, a vízpartok közelében gyakran rajzanak tömegesen épületeknél, amit korábban az épületek messziről is jól látható körvonalainak vonzó hatásával magyaráztak a kutatók: az égbolt világos hátteréhez képest az épületek sötét tömbje olyan erős vizuális ingert jelent a repülő rovarok számára, ami rajzásmarkerként alkalmas lehet arra, hogy egybetartsa a párzás céljából összegyűlt rovarokat (BRODSKIY 1973, SAVOLAINEN 1978, REICH és DOWNES 2003). Az ELTE TTK Északi Tömbjénél a *Hydropsyche pellucidula* (Curtis 1834) tegzesfaj 2006-os rajzása idején egy különös jelenséget figyeltem meg, miszerint a rajzó tegzeseket erőteljesen vonzották az épület nagy csillogó függőleges üvegtáblái, amelyekre különösen a rajzás második felében szálltak rá tömegesen a rovarok. A tapasztalt jelenség nyomán feltételeztem, hogy a különös viselkedés hátterében a faj polarotaktikus jellege állhat.

### 1.2.3.2. Célkitűzés

A *H. pellucidula* tegzesfaj minden évben kirajzik a Dunából Budapestnél és nagy tömegben vonzódik a folyóparton álló magas épületek függőleges üvegfelületeihez (9A. ábra). Az egyedek erőteljesen vonzódnak a sötét üvegfelületekhez, amelyekre leszállnak (9B-E. ábra), itt párzanak és órákig itt is maradnak. Ahhoz, hogy magyarázatot lehessen találni a különleges jelenségre, kollégáimmal tanulmányoztuk a *H. pellucidula* szaporodási viselkedését az ELTE számos függőleges üveglablakkal és üveg homlokzatdíszítő elemmel rendelkező épületeinél. Képkalkotó polarimetriával mértük az üvegborítású falak tükröződéses polarizációs mintázatát és választásos laboratóriumi kísérletet végeztünk a tegzesfaj polarotaxisának vizsgálatára.

### 1.2.4. *TEMETŐBEN VIZET KERESŐ POLAROTAKTIKUS SYMPETRUM SZITAKÖTŐK VISELKEDÉSE A FÉNYT POLARIZÁLÓ FEKETE SÍRKÖVEKNÉL*

#### 1.2.4.1. Bevezetés

A szitakötők erősen kötődnek a vizes élőhelyekhez, hiszen a lárváik vízben fejlődnek (CORBET 1999). Miután a szitakötők átváltoznak és megvedlenek, a kifejlett rovarok általában eltávolodnak a víztől és csak a szaporodási, tojásrakási időszakban térnek vissza oda. A nász idején a nyílt vízfelszín és a mocsári szegélynövényzet alkalmas helyet biztosít a különböző nemű szitakötők találkozásához és a nőstények tojásrakásához. 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 és SPINNER 1991, WILDERMUTH 1993, 1998, HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, BERNÁTH et al. 2001a, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005).

Ugyanezt tapasztaltuk a kiskunhalasi református ótemetőben: a *Sympetrum* nem számos szitakötőfajának egyedei nagy számban vonzódnak a temető fekete, polírozott sírköveinek vízszintes felületeihez, ahol pontosan olyan viselkedést mutatnak, mint a vizeknél (24. ábra).

#### 1.2.4.2. Célkitűzés

Korábbi kutatások kimutatták, hogy egyes szitakötők polarotaktikusak, azaz a vizet a felszínéről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik föl (HORVÁTH et al. 1998a, WILDERMUTH 1998). Ez az oka annak, hogy vizuálisan megtéveszthetik őket olyan mesterséges felületek, amelyek a vízfelszínhez hasonlóan vízszintesen poláros fényt tükröznek. Ennek alapján föltételeztük, hogy a temetői szitakötők különös viselkedésében is fontos szerepe lehet a fekete sírkövek fénypolarizációs sajátosságainak, valamint e rovarok polarizációlátásának. Ezért hipotézisünk bizonyítása érdekében képkalkotó polarimetriával terveztük mérni a sírkövek tükröződési-polarizációs mintázatait, és választásos terepkísérletekkel szándékoztuk igazolni azt, hogy a fekete sírkövekhez vonzódó *Sympetrum* szitakötők is pozitív polarotaxissal rendelkeznek. A vizsgált szitakötők pozitív polarotaxisa magyarázatot adhat arra, hogy ezek a rovarok miért vonzódnak a vízszintesen poláros fényt reflektáló sírkövekhez. Azt szintén vizsgálni akartuk, hogy szitakötőket vonzó sírkövek hatására megvalósulnak-e egy ökológiai csapda kialakulásának feltételei (SCHLAEPFER et al. 2002).

### 1.2.5. *A TISZAVIRÁG (PALINGEMIA LONGICAUDA) ÉS A DUNAVIRÁG (EPHORON VIRGO) RAJZÁSI VISELKEDÉSÉNEK MÓDOSULÁSA A KÖRNYEZET TERMÉSZETES POLARIZÁCIÓS MINTÁZATÁNAK MEGVÁLTOZÁSÁRA*

#### 1.2.5.1. A TIVADARI TISZA-HÍD HATÁSA A TISZAVIRÁG (*PALINGEMIA LONGICAUDA*) KOMPENZÁCIÓS REPÜLÉSÉRE

##### 1.2.5.1.1. Bevezetés

A tengeri és szárazföldi életközösségekkel összehasonlítva az édesvizek biológiai sokféleségének csökkenési üteme jelentősebb mértékűnek tekinthető (DUDGEON et al. 2006, WORD WILDLIFE FUND 2008). A természetes élőhelyek degradálódásának világszerte egyik fontos oka az eredetileg összefüggő nagyobb élőhelyek felaprózódása. E hatások a fokozódó urbanizáció miatt elsősorban a szárazföldi életközösségeket veszélyeztetik, de a folyóvizeknél is kialakulhatnak például a folyókon történő gát- és hídépítésekkel (PETTS 1984, BRITAIN és SALTVEIT 1989, ZWICK 1992, DYNESIUS és NILSSON 1994, LENGYEL 1998, LIGON et al. 1995). A folyók környezetében felépített műtárgyak közül mindezidáig igen kevesen vizsgálták a folyókon átívelő hidak környezetre gyakorolt hatásait, hiszen ezek csak igen kis mértékben, a pilléreiken keresztül érintkeznek a folyóvízzel. Így arra vonatkozóan is csak kevés adat áll rendelkezésre, hogy a hidak miként változtatják meg a folyók természetes optikai környezetét, és a változások miként hatnak a folyók élővilágára. A vízirovarok populációira ökológiai és evolúciós csapdaként ható mesterséges szárazföldi objektumokról sokkal több ismerettel rendelkezünk (KRISKA et al. 2006a, 2008b, MALIK et al. 2008, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005), amelyek lehetővé tették a poláros fényszennyezés, mint az ökológiai fényszennyezés egy új típusának meghatározását (HORVÁTH et al. 2009).

A folyók természetes környezetét jellemző polarizációs mintázat hidak miatti megváltozása hatással lehet a vízirovarok élőhelyválasztására, viselkedésére és elterjedésére. Erre utal LADÓCSY (1930) beszámolója is, mely szerint a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) rajzásakor a nőstények a Tiszán átívelő híd esőáztatta aszfaltútjára rakják tojásaikat, ahelyett, hogy a folyó vizébe rakták volna le ezeket (26B. ábra). Lengyel Szabolcs biológus kollégám 2009. április 9-én a Kolozsvári Biológus Napokon hívta fel a figyelmet egy a tiszavirág (*P. longicauda*) rajzásával kapcsolatos különös megfigyelésükre. Tapasztalatai szerint a tivadari Tisza hídnál a nőstények vízfolyással szembeni kompenzációs repülését megállította a híd, ezért a tojásrakás közvetlenül a híd előtt következett be. Elmondása szerint a repülő nőstények nem a híd mechanikai hatása miatt álltak meg, mert még azelőtt megszakították tovahaladó 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 feltételezésemet 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.

A tiszavirág faj korábban igen elterjedt volt Európa folyóinak meanderező középszakaszain, ám onnan a XX. században jórészt eltűntek: a Loire-ből 1922-ben, a Rajnából 1952-ben, a Dunából pedig 1974-ben (ANDRIKOVICS és TURCSÁNYI 2001). A legtöbb európai országból való gyors eltűnése és a megmaradt élőhelyein való veszélyeztetettsége miatt e faj az európai, vadon élő élővilág és a természetes élőhelyek védelméről szóló Berni Egyezményben is szerepel (SARTORI és LANDOLT 1998, BARBER-JAMES et al. 2008).

A tiszavirág-rajzás minden évben júniusban és júliusban figyelhető meg az esti órákban. A rajzás kezdetekor elsőként a hím szubimágók kelnek ki, melyek a partra repülnek, ahol a vízparti növényzeten vagy az agyagos fövényen vedlenek imágóvá (ANDRIKOVICS et al. 1992, ANDRIKOVICS és TURCSÁNYI 2001, BRODSKIY 1973). A már párzóképes rovarok ezt követően

visszarepülnek a folyó fölé, ahol megkezdik jellegzetes vízkövető repülésüket. Ennek során többnyire 5-50 cm magasságban repülnek a víz fölött, közel 20-50 m hosszú szakaszokból álló cikk-cakk vonalakban. Amikor a nőtényeket a vízfelszín közelében kereső hímek repülésük során 1-2 méterre megközelítik a partot, mindenkor bekövetkezik egy gyors, többnyire 180°-os irányváltás a mozgásukban, aminek eredményeként a folyó közepe felé repülnek tovább. A nőtény imágók a rajzás második részében jelennek meg a folyó fölött. Ezek később rajokba szerveződve megkezdik a Tisza fölött 10-15 m-es magasságban a kompenzációs repülésüket. Ennek során a Tisza középvonalát követve repülnek a folyásiránnyal szemben 1-2 km-t, majd a vízre ereszkedve lerakják tojásaikat (KRISKA et al. 2007). A kompenzációs repülésben résztvevő nőtények egy része, egyes becslések szerint akár 50%-a nem vesz részt a párzásban (ANDRIKOVICS és TURCSÁNYI 2001), ezek az egyedek parthenogenetikus tojásokat raknak le, amelyekből csak nőtény egyedek fejlődhetnek ki (SOLDÁN és PUTZ 2000). A kompenzációs repülés végén lerakott tojásokat a folyó sodra juttatja vissza az eredeti lárvakikelési helyekhez.

A tiszavirág pozitív polarotaxisát korábban választásos terepkísérletekkel igazoltuk (KRISKA et al. 2007). Ennek során bizonyítást nyert, hogy a tiszavirág pozitív polarotaxisát a pataklakó kérészekkel szemben csak nagyméretű, legalább 20 m<sup>2</sup>-es poláros felületekkel lehet kiváltani. A nagyméretű, vízszintesen poláros fényt visszaverő felület érzékelése mind a hím, mind pedig a nőtény imágók esetében nagy jelenőséggel bírhat az állatok repülésének irányításában. A hím szubimágóknál ez biztosítja az imágóvá vedlést követően a folyóhoz való visszatérést, a nőtényt kereső hím egyedeknél pedig lehetővé teszi, hogy a kérészek mindig a vízfelszín fölött maradjanak, és a folyóba torkolló kisebb csatornák és ártéri állóvizek által megtévesztett állatok visszatérhessenek a folyó fölé. A nőtény tiszavirágoknál elsősorban a néhány km-es, folyásiránnyal szembeni kompenzációs repülés során fontos a folyó nagy kiterjedésű és vízszintesen polarizáló felülete, ami a nagyobb magasságban repülő kérésznőtények számára is mindvégig biztos támpontot jelent (KRISKA et al. 2007).

A tiszavirággal kapcsolatos korábbi kutatások a *P. longicauda* esetében két jellemző, egymástól jelentősen különböző repülési viselkedést mutattak ki. Az egyik a vízkereső, a másik pedig a vízfelszín fölött kialakuló, vízkövető repülés. A vízkereső repülés megkezdésekor a rovarok egyenes vonalban vagy egy nagyobb ív mentén, akár 15-30 m-es magasságig emelkedve repülnek, majd nagy magasságban szállnak mindaddig, amíg nem érzékelnek egy nagyobb kiterjedésű, vízszintesen polarizáló felületet, ami kiváltja a vízkövető repülésüket. Ez utóbbi viselkedést a hímeknél alacsony repülési magasság (5-50 cm) és cikk-cakkos, a vízfelszín fölötti, míg a nőtényeknél 10-15 m-es magasságban a folyó középvonala fölött, a folyásiránnyal szemben haladó röppálya (kompenzációs repülés) jellemzi. A Tisza fölötti rajzáskor a kérészek vízkereső repülését csak egy mesterséges objektum, például egy híd közelében lehet megfigyelni, mivel az erősen és vízszintesen poláros, megfelelően nagy kiterjedésű vízfelület állandó jelenléte miatt másutt mindig vízkövető repülést végeznek (KRISKA et al. 2007).

#### 1.2.5.1.2. Célkitűzés

A tiszavirág (*P. longicauda*) tivadari Tisza-hídnál tapasztalt különleges viselkedésének okát a jelenség részletes dokumentálásával, valamint a környezet polarizációs mintázatainak kimérésével és kiértékelésével kívántuk feltárni.

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.

### 1.2.5.2. A DUNAVIRÁG (*EPHORON VIRGO*) FOTO- ÉS POLAROTAXISÁN ALAPULÓ KOMPLEX ÖKOLÓGIAI CSAPDA

#### 1.2.5.2.1. Bevezetés

A rovarok helyváltoztató mozgásai közül jól ismert az optikai ingerek által vezérelt fototaxis (MENZEL 1979, MOORE et al. 2006, JÉKELY 2009) és polarotaxis (SCHWIND 1991, 1995, KRISKA et al. 2007, 2009, HORVÁTH et al. 2009, EGRI et al. 2012a). A mesterséges fényforrások erős intenzitása és színe vonzza az éjjel aktív állatokat (pozitív fototaxis), aminek természetkárosító hatása, vagyis a hagyományos (fototaktikus) ökológiai fényszennyezés már régóta vizsgált és jól dokumentált jelenség (LONGCORE és RICH 2004, RICH és LONGCORE 2006).

KURECK (1992) és TOBIAS (1996) folyóparti és hidak menti lámpák körül rajzó nagyszámú rajzó kérészről (*Ephoron virgo* és más fajok) számolt be. E rajzásokat "nyári hóvihár"-ként írták le, mivel a kérészek olyan tömegben vonzódtak oda, hogy az utcai lámpák közelében több centiméter vastagon borították a talajt. Egy éjszaka 1,5 millió egyedre becsülték egy híd kivilágított útfelszínén összegyűlt kérésztömeget. Minden nőstény kérész lerakta tojáscsomóját az úttal való érintkezés során. Azon tojásokat, amelyeket nem a vízbe raktak, populációs veszteségnek kell tekinteni, aminek jelentős helyi hatásai is lehetnek (EISENBEIS 2006).

Az erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő mesterséges felületek (például aszfaltutak, köolajtavak, üvegépületek, fekete sírkövek és sötét gépkocsi karosszériák) polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt vonzásának (pozitív polarotaxis) és hatásainak tanulmányozása vezetett a poláros fényszennyezés jelenségének leírásához (HORVÁTH et al. 2009). Számos esettanulmány igazolta, hogy a fototaktikus fényszennyezés és a poláros fényszennyezés külön-külön egymástól függetlenül képes ökológiai csapdákat kialakítani (EISENBEIS 2006, HORVÁTH és KRISKA 2008). Sokáig nem ismertünk azonban olyan optikai ingerek által vezérelt ökológiai csapdát, aminek létrejöttében a fototaxisnak és a polarotaxisnak is egyszerre lehet szerepe.

Már korábban is valószínűsítettük, hogy a megvilágított, vízszintesen poláros fényt visszaverő mesterséges felületek a fényforrások nagy fényintenzitása miatt jelentős távolságból magukhoz vonzhatják a pozitív fototaxissal rendelkező vízirovarokat, amelyek pozitív polarotaxisuk révén leszállnak és lerakják tojásaikat a víznek hitt poláros felületre (HORVÁTH et al. 2009). Ily módon egy olyan kettős hatáson alapuló ökológiai csapda valósulhat meg, ami fototaxissal magához vonzza és polarotaktikusan csapdázza a vízirovarokat. Ezt az elképzelést sikerült kísérleti úton igazolnunk (BODA et al., 2014). A fototaxis és a polarotaxis fordított irányú együtthatását, nevezetesen azt, hogy a pozitív polarotaxissal repülő rovarokat a poláros jel vezeti a mesterséges fényforráshoz, ahol a rovarok pozitív foto- és polarotaxisuk révén egy halálos ökológiai csapdába kerülnek, korábban egyetlen megfigyelés sem valószínűsített.

#### 1.2.5.2.2. Célkitűzés

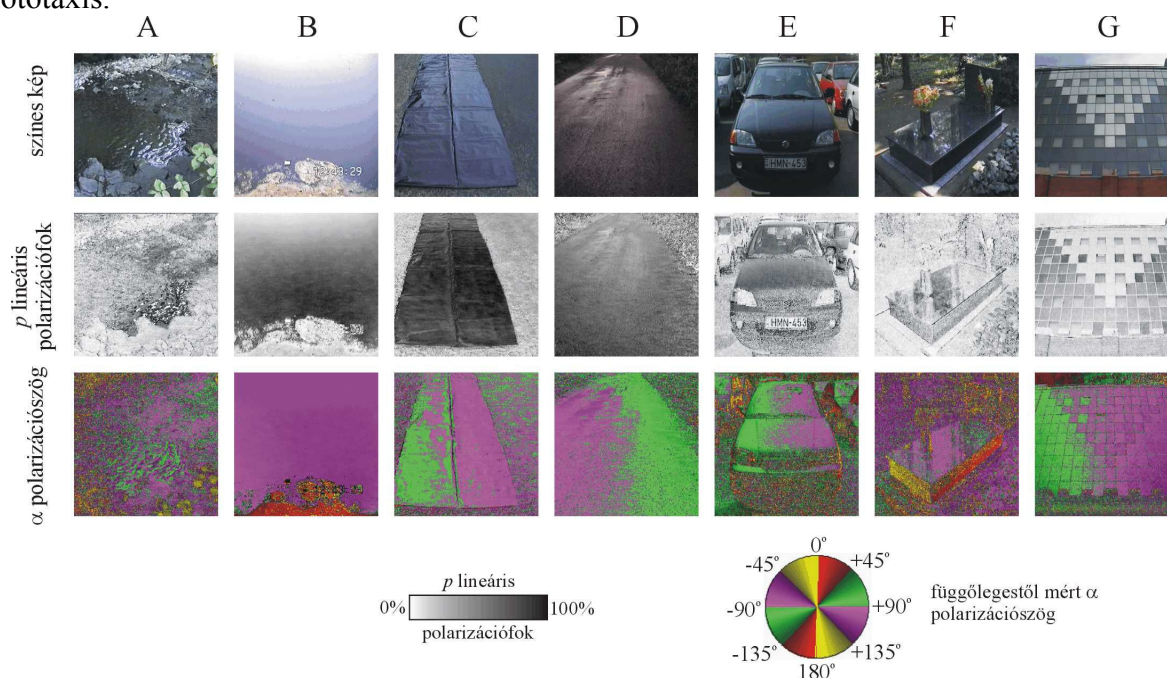
2012 augusztusának végén egy újságírói megkeresés nyomán értesültem arról, hogy a budapesti Árpád-hídon tömeges dunavirág rajzás történt. A dunavirág (*Ephoron virgo*) tömegrajzása közel 40 év óta először jelent meg ekkor a budapesti Duna szakaszon. A kérészek hídon való megjelenése arra utalt, hogy a kompenzációs repülésben részt vevő nőstények fénycsapdázódtak, ezért feltételeztem, hogy a védett faj egyedeinek tömegpusztulását okozó jelenség hátterében a kompenzációs repülést is irányító polarotaxis és a hídlámpák által kiváltott fototaxis játszhat szerepet. Az Árpád-hídnál a későbbiekben nem, ugyanakkor a tahitótfalui Tildy-hídnál további tömegrajzások alakultak ki, ami lehetőséget adott arra, hogy kollégáimmal helyszíni megfigyeléseket, választásos terepkísérleteket és

képképző polarimetriai méréseket végezzünk a jelenség vizuális ökológiai hátterének feltárására és a dunavirág polarizációérzékelésének megismerésére. A kutatási eredmények alapján egyrészt elemezni kívántam a foto- és polarotaxis szinergizmusával kialakuló ökológiai csapdát, másrészt megoldást kerestem arra, hogy miként lehetne megakadályozni azt, hogy a hidak és más kivilágított vízparti/vízi tárgyak az éjszaka rajzó dunavirág utódgenerációját súlyosan veszélyeztető optikai csapdává váljanak.

### 1.2.6. A POLÁROS FÉNYSZENNYEZÉS A KÖRNYEZETI ÁRTALMAK EGY ÚJ FAJTÁJA

#### 1.2.6.1. Bevezetés

Az éjszakai égbolt csillagainak emberi szemmel való láthatósága a városokban és azok közelében közismerten annyira leromlik, hogy gyakorlatilag minden tudományos csillagászati megfigyelést lehetetlenné tesz. E jelenség a csillagászati fényszennyezés. Ökológiai fényszennyezés alatt az élővilág élettereinek mesterséges fények miatti degradációja értendő. Az ökológiai fényszennyezés (ÖF) magába foglalja a mesterséges vakító fényeket, a fokozatosan erősödő kivilágítást és a megvilágítás ideiglenes, váratlan ingadozásait. Az ÖF forrásai lehetnek például az utcai és biztonsági lámpák, járművek, halászhajók, tengeri kőolaj- és földgázplatformok, valamint mélytengeri búvárhajók fényei, a települések fölötti éjjeli égbolt világítása, és a megvilágított építményekről visszaverődő fény. E mesterséges éjszakai fények bizonyított és lehetséges ökológiai következményeinek részletes összefoglalását adja RICH és LONGCORE (2006) monográfiája. A mesterséges éjszakai fények elsődleges hatása, hogy a sötét környezethez képest nagyobb intenzitásuk miatt vonzzák, vagy taszítják az állatokat. E jelenség a pozitív vagy negatív fototaxis, amit a mesterséges fény erőssége és/vagy színe okoz. Kevesebb, mint 10 éve még úgy vélték, hogy az ÖF egyetlen okozója a fototaxis.



**1. ábra:** Vízfelszínnek (A) és poláros fényszennyezést okozó mesterséges tükröző felületeknek (B-G) a spektrum kék (450 nm) tartományában mért fénypolarizációs mintázatai. (A) Sötét víztest. (B) Kőolajtó. (C) Aszfaltútra terített fekete műanyag fólia. (D) Száraz aszfaltút. (E) Fekete autó. (F) Csiszolt fekete sírkő. (G) Az ELTE északi épülettömbjének ablaküvegekkel, valamint szürke és fekete díszítő üvegtáblákkal fedett függőleges fala.

Az 1980-as években SCHWIND (1985a) mutatta ki, hogy a repülő tarka hanyattúszó-poloska (*Notonecta glauca*) a vízfelületről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján keresi a vizet,

nem pedig a vízről visszavert fény intenzitása, színe vagy a vízfelület csillogása segítségével. A tarka hanyattúszó-poloska szemének hasoldali részén ultraibolya-érzékeny fotoreceptorok vannak vízszintes és függőleges membráncsövecskékkel, melyek a vízszintesen és függőlegesen poláros fényre érzékenyek leginkább. E merőleges polarizációérzékenységgű fotoreceptorok képesek meghatározni, hogy az optikai környezetből érkező fény polarizációiránya vízszintes vagy sem. A repülő tarka hanyattúszó-poloskában a pontosan vagy közel vízszintesen poláros fény sztereotip vízbeugrási és merülési reakciót vált ki. A tarka hanyattúszó-poloska vonzódása a vízszintesen poláros fényhez pozitív polarotaxis. SCHWIND (1991, 1995) és mások kutatásai (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, KRISKA et al. 1998, HORVÁTH és VARJÚ 2004, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, CSABAI et al. 2006, KRISKA et al. 2006a, HORVÁTH et al. 2007, HORVÁTH és KRISKA 2008, KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008) kiderítették, hogy a tarka hanyattúszó-poloskához hasonlóan az Ephemeroptera, Odonata, Plecoptera, Coleoptera, Heteroptera, Diptera és Trichoptera rendekbe tartozó, 300-nál is több vízirovarfaj is pozitív polarotaxissal, azaz a vízről tükröződő fény vízszintes polarizációja (1A. ábra) alapján keresi vízi élőhelyeit. E polarotaktikus rovarokat azonban könnyen becsaphatja és magához vonzhatja minden olyan mesterséges felület, amely erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza: az ilyen felületek „szuper víznek” tűnnek a vizet kereső vízirovaroknak, ha a róluk visszavert fény lineáris polarizációfoka nagyobb, mint a vízről visszaverté (1B-G. ábra).

Az elmúlt húsz évben végzett vizuális-ökológiai és környezetbiofizikai kutatásokra (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, KRISKA et al. 1998, HORVÁTH és VARJÚ 2004, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, CSABAI et al. 2006, KRISKA et al. 2006a, HORVÁTH et al. 2007, HORVÁTH és KRISKA 2008, KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008) alapozva rámutattunk az ÖF egy új formájára, a poláros fényszennyezésre (PF). PF alatt szűkebb értelemben a sima (fényes) mesterséges felületekről visszaverődő, erősen és vízszintesen poláros fénynek (1B-G. ábra) a polarotaktikus vízirovarokra (beleértve minden rovar, melynek lárvái a vízben fejlődnek) kifejtett káros hatásait értjük.

#### 1.2.6.2. Célkitűzés

A kutatás eredményeként bevezetem a poláros fényszennyezés (PF) fogalmát, ami a mesterséges poláros fénynek a polarizációérzékeny állatokra kifejtett ártalmas hatásait jelenti (HORVÁTH et al. 2009). Ezen belül is csak a sima és sötét mesterséges felületekről visszaverődő erősen és vízszintesen poláros fénynek a polarotaktikus vízirovarokra kifejtett káros hatásairól szólok. A PF a környezeti ártalmak egy új formája, ami globális és evolúciós értelemben egészen újkeletű. A továbbiakban áttekintem a PF eddig ismert kísérleti bizonyítékait. Minden erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felület poláros ökológiai csapdaként működhet, mivel e felületeken az odavonzott polarotaktikus rovarok gyakran, míg az általuk lerakott tojások minden esetben elpusztulnak. Ezáltal a PF a kipusztulással fenyegetett vízirovar-populációkat veszélyeztetheti az utódgeneráció megnövekedett pusztulási rátája miatt. Röviden tárgyalom a poláros fényszennyező forrásokhoz vonzódó rovarokkal táplálkozó pókokat, madarakat és denevéreket érintő hatásokat (KRISKA et al. 1998, BERNÁTH et al. 2001b, 2008b, ROBERTSON et al. 2010, PERESZLÉNYI et al. 2017). Bemutatok egy a polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró természetes tényezőt (HORVÁTH et al. 2019) és ismertetek néhány a PF hatását csökkentő (KRISKA et al. 1998, KRISKA et al. 2006a, KRISKA et al. 2008b, HORVÁTH et al. 2010b) és a hasznosítását lehetővé tevő módszert (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a, KRISKA et al. 2009, BLAHÓ et al. 2012b, EGRI et al. 2012a, EGRI et al. 2013). A fejezetben ismertetett eredmények nyomán megállapítható, hogy a természetbarát környezettervezésnek több figyelmet kellene fordítania a PF már jelenleg is jól dokumentált káros hatásaira és azok kiküszöbölésére, illetve csökkentésére.

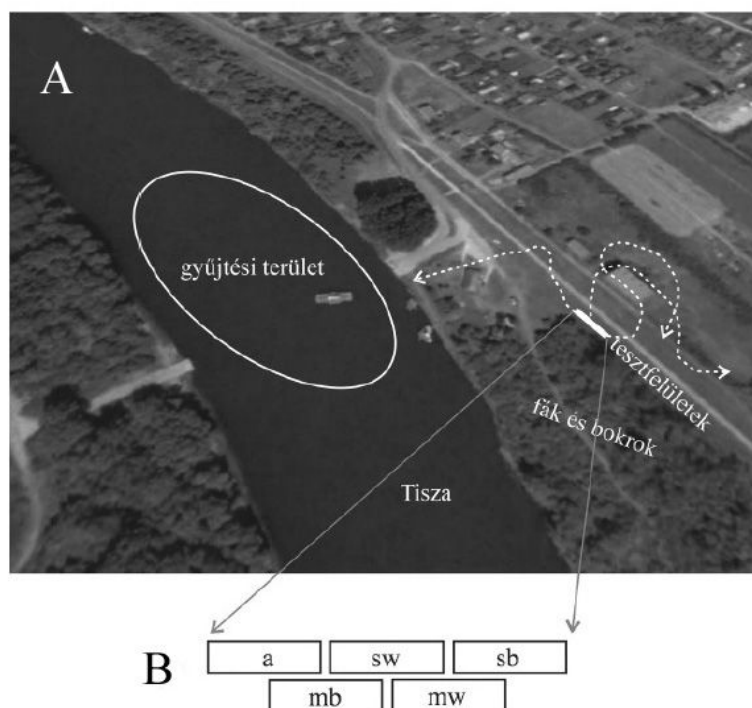
## 2. MÓDSZEREK

### 2.1. POLAROTAXIS KIMUTATÁSA, JELLEMZŐINEK ÉS BIOLÓGIAI SZEREPÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOK ESETÉBEN

#### 2.1.1. A TISZAVIRÁG (*PALINGENIA LONGICAUDA*) POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A vizsgálatok 2005. június 27-én és 30-án a Tiszánál (2. ábra), Tiszaroff (47°23'É, 20°26'K) térségében, 18:00 és 21:00 óra (helyi nyári időszámítás = UTC+2) között folytak. Az adott időpontokban e helyszíneken a tiszavirágnak néhány ezres rajzása folyt le.

A kísérletben motorcsónakból 52 rajzó hím és 8 nőtény tiszavirágot fogtunk be lepkéhálóval. E kérészeket puha papírdobozokban (10 cm × 10 cm × 20 cm) a partra szállítottuk, ahol a földre kiterített tesztfelületek fölött közel 10 cm-es magasságban egyenként elengedtük el őket. A kísérletben öt különböző tesztfelületet (2 m × 10 m) alkalmaztunk: (sb) fényes fekete műanyag fólia, (sw) fényes fehér műanyag fólia, (a) alumínium fólia, (mb) matt fekete vászon, (mw) matt fehér vászon. A tesztfelületek a 2B. ábra szerinti módon lettek elhelyezve a vízpart és a gát közti területen, ahonnét a 15–20 m magas vízparti puhafás erdősáv miatt a folyót nem lehetett látni. A tesztfelületek fölött elengedett kérészek mozgását megfigyeltük, lejegyeztük és videofilmre rögzítettük. A tesztfelületek és a Tisza felszínének fénypolarizációs jellemzőit képalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában tiszta égboltnál, napnyugtakor. A mérés alatt a polariméter optikai tengelye a vízszintessel –20°-ot zárt be. A módszer részletes leírása HORVÁTH és VARJÚ (1997) publikációjában olvasható.

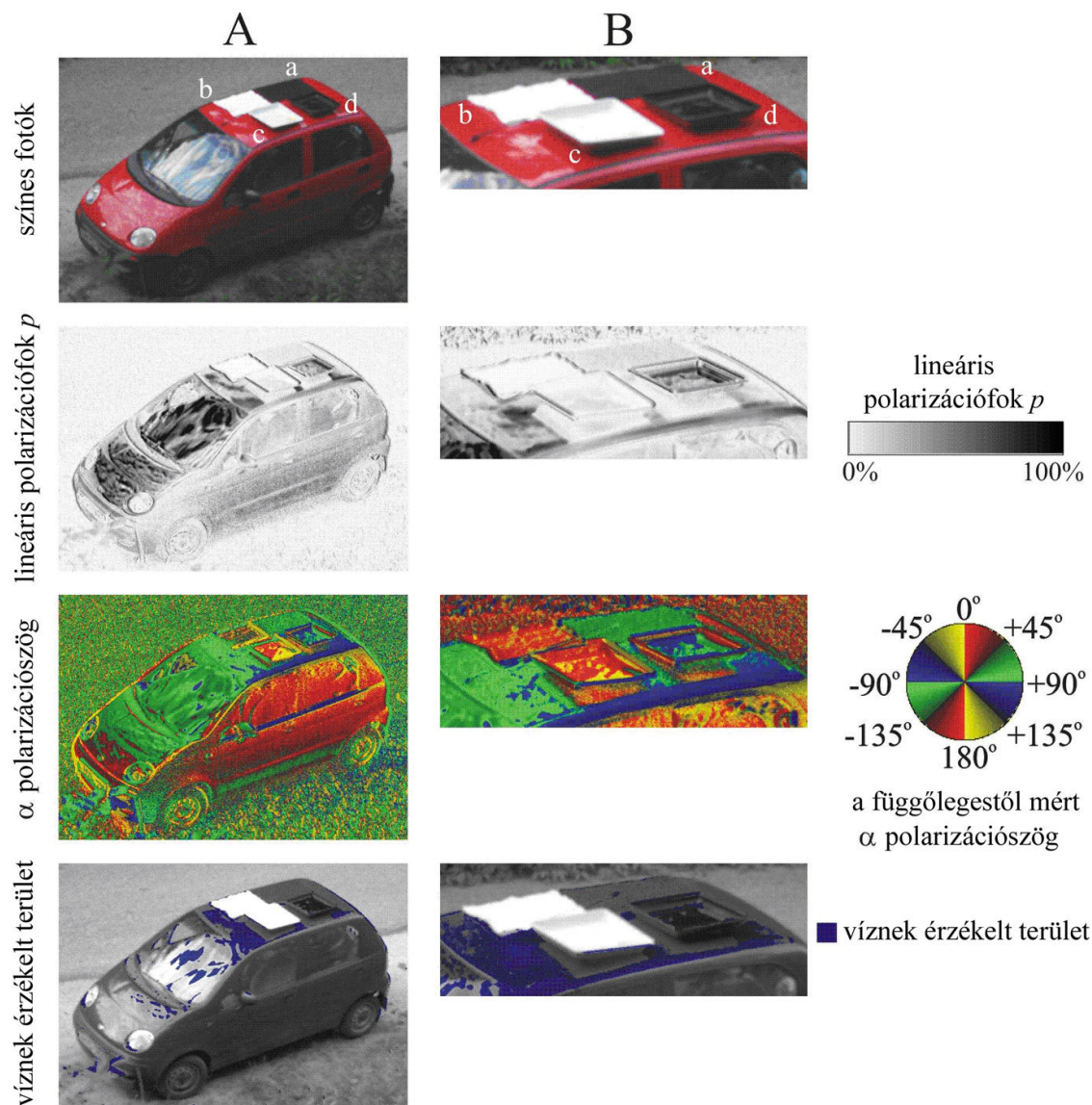


**2. ábra:** (A) Légifotó (forrás: Google Earth – Imagery ©2005 Digital Globe) a Tisza azon szelvényéről, ahol a terepkísérletünk folyt. Ellipszis jelöli azt a folyószakaszt, ahol a tiszavirágokat gyűjtöttük. Fehér négyszög jelzi a tesztfelületek helyét a gátoldalban. A szaggatott görbék a műanyag fóliákat 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.



### 2.1.2. POLAROTAXIS AZ ÁRVASZÚNYOGOKNÁL

Az 1. terepkísérletet a Pilis hegységi Dömörkapunál ( $47^\circ 40'$  É,  $19^\circ 03'$  K) végeztük 2010. június 8. és 10. között minden nap 18:00-tól 21:00-ig (helyi nyári időszámítás = UTC+2) a középhegységi kőgörgeteges Bükkös-patak és a mellette futó aszfaltút közelében. A három nap során a naplementekor a fák és a hegy árnyékában lévő kísérleti helyszínt tiszta égbolt világította meg. A vizsgált árvaszúnyog fajok a patakból rajzottak ki. Négy tesztfelületet helyeztünk ki 150 cm-es magasságban egy piros gépkocsi (Daewoo Matiz, 3. ábra) tetejére.



**3. ábra:** Az árvaszúnyogok választásos terepkísérletében használt tesztfelületek (a: matt fekete szövet, b: matt fehér szövet, c: étolajjal teli fehér műanyag tálcá, d: étolajjal teli fekete műanyag tálcá) színes fényképei,  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai és a víznek érzékelt terület ( $p > 20\%$ ,  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) a spektrum zöld (550 nm) tartományában kimérve. A kísérlet során a tesztfelületek egy piros gépkocsi tetején lettek elhelyezve. A helyszínt a tiszta égbolt fénye világította meg. A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-25^\circ$  (A) és  $-15^\circ$  (B) volt.

A tesztfelszínek egyike matt fekete, másika matt fehér szövet volt ( $50 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ ). A másik két tesztfelületet tiszta, átlátszó napraforgó étolajjal töltött fekete és fehér műanyag tálcák ( $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ) adták. A fekete és fehér szövet felülete nagyobb volt a tálcákéhoz képest. A

nagyobb területük ellenére e polarizálatlan, illetve gyengén poláros tesztfelszínek nem vonzották az árvaszúnyogokat. A helyhatás kiküszöbölése érdekében a négy tesztfelület helyzetét 15 percenként véletlenszerűen fölcseréltük. A műanyag tálcákat azért töltöttük fel étolajjal, mert korábbi terepkísérleteinkben (HORVÁTH et al. 2008, 2010a, HORVÁTH és KRISKA 2008) azt tapasztaltuk, hogy e folyadék nagy hatékonysággal csapdázza a felületét érintő rovarokat. Az olajfelszínnek két szerepe volt: (i) csapdázta az olajjal töltött fekete és fehér műanyag tálcába szálló árvaszúnyogokat, és (ii) Brewster-szögből nézve egy erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő tesztfelületet biztosított a fekete tálcá esetében. A kísérletben csak szintelen (fekete és fehér) tesztfelületeket használtunk, hogy elkerüljük az árvaszúnyogok szín- és polarizáció-érzékeléséből eredő esetleges interferenciákat. A négy tesztfelszínt azért helyeztük egy gépkocsi tetejére, mert egy előkísérletben azt tapasztaltuk, hogy az árvaszúnyogok tömegesen vonzódtak a gépkocsi tetejéhez, ahol a vízfelszín fölött jellemző rajzási viselkedést mutattak. E kísérleti beállítással vizsgálni kívántuk, hogy (i) a vízszintesen poláros fény lényeges-e az árvaszúnyogok gépkocsihoz való vonzódásában, és (ii) a különböző fényességű, többé-kevésbé poláros tesztfelszínek képesek-e pozitív polarotaxist kiváltani az árvaszúnyogokból akkor, ha e fényforrások a földfelszín fölött helyezkednek el. A kísérletben az olajfelszínt megérintő árvaszúnyogok mindegyike csapdázódott, így minden kísérleti nap végén le tudtuk számolni az egyes tálcák által fogott egyedeket (1-2. táblázat). A fajok meghatározását Móra Arnold biológus kollégám végezte el. Minden terepkísérleti napon megfigyeltük az árvaszúnyogok viselkedését a matt tesztfelületek fölött is, abból a célból, hogy megszámloljuk az árvaszúnyogok felületérintéseit.

Ezeket a felületeket nem kenhettük be ragadós anyaggal, mert ez az eredetileg matt felületet fényessé változtatta volna, elkerülhetetlenül megváltoztatva azok polarizációs sajátosságait. A két matt tesztfelület alkalmazásának célja csupán az volt, hogy az árvaszúnyogok számára felkínáljunk két különböző fényességű polarizálatlan, vagy gyengén poláros fényt visszaverő tesztfelületet is. A tesztfelületek hőmérsékletét digitális kontakthőmérővel mértük  $\pm 0.25$  °C pontossággal.

A 2. terepkísérletet 2010. június 9. és 12. között végeztük. Ez a megismétlése volt az 1. kísérletnek azon különbséggel, hogy ekkor nem egy gépkocsi tetején, hanem az aszfaltúton helyeztük el a tesztfelületeket (2. táblázat), és a közelben ezúttal nem volt gépkocsi. A tesztfelületek helyét a kísérlet során 15 percenként véletlenszerűen megcseréltük. A 2. kísérletben azt vizsgáltuk, hogy a gépkocsi optikai ingerének hiányában és a vizsgált árvaszúnyogok élőhelyén futó aszfaltút gyengébb vízszintesen poláros ingerének jelenlétében kialakul-e az árvaszúnyogok polarotaxisa.

A négynapos kísérlet égboltfényvel megvilágított helyszíne megegyezett az 1. kísérletével. A csapdázódott árvaszúnyogokat minden kísérleti nap végén begyűjtöttük, miáltal négy ismétlést végeztünk. Mivel a fogások közötti különbségek magasan szignifikánsak voltak (2. táblázat), nem volt szükség újabb ismétlések elvégzésére.

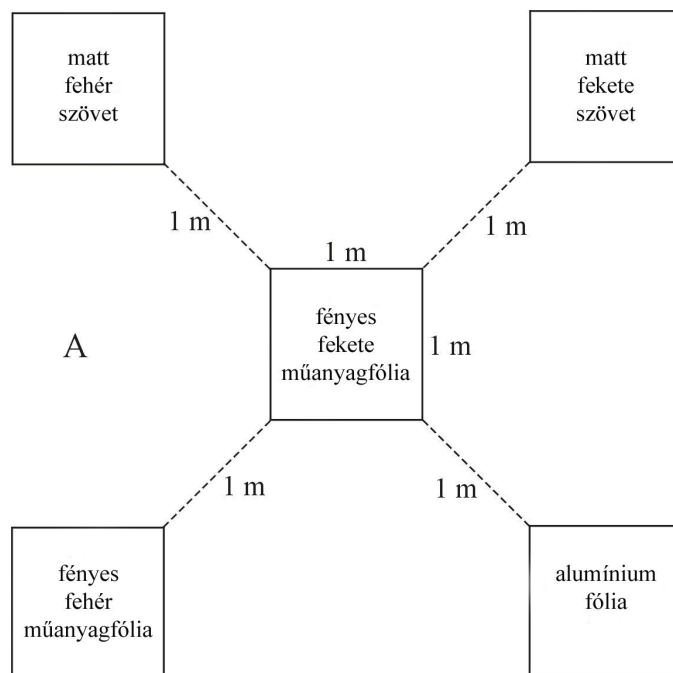
A tiszta égbolt fényével megvilágított tesztfelületek polarizációs mintázatát (3. ábra) képalkotó polarimetriával (HORVÁTH és VARJÚ 1997, 2004) mértük a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában a polariméter optikai tengelyének a vízszintestől mért három különböző  $\theta$  szöge mellett: (i) mikor a tesztfelületek a gépkocsi tetején voltak (1. kísérlet), akkor  $\theta = -25^\circ$  (3A. ábra) és  $-15^\circ$  (3B. ábra) volt. Ekkor a polariméter egy meredek hegyoldalon volt felállítva a gépkocsi közelében. (ii) Mikor a tesztfelületek az aszfaltúton, az autó korábbi helyének közelében voltak (2. kísérlet), biztosítandó a  $\theta$  nagyobb abszolút értékét,  $\theta = -34^\circ$  volt, ami gyakorlatilag egyezett a Brewster-szöggel, aminél a  $p$  polarizációfok maximális. Egy vízszintesen poláros felületet a polarotaktikus árvaszúnyogok, hasonlóan a többi vízirovarhoz, víznek érzékelik, ha (i) a visszavert fény  $p$  polarizációfoka magasabb, mint egy  $p^*$  küszöbérték, és (ii) a polarizációs szög vízszintestől ( $\alpha = 90^\circ$ ) mért  $\Delta\alpha = |90^\circ - \alpha|$  eltérése kisebb, mint egy  $\Delta\alpha^*$  küszöbérték (HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH et al. 2008). A  $p^*$  és  $\Delta\alpha^*$  küszöbértékek fajfüggőek (KRISKA et al. 2009). Korábbi tapasztalataink szerint a 3. ábra esetében  $p^* = 20\%$

és  $\Delta\alpha^* = 10^\circ$  értékeket használtunk (HORVÁTH et al. 2011). Habár ezen értékek önkényesen lettek kiválasztva, a használatuk nincsen hatással az eredményekre és a következtetésekre. A fekete és fehér olajtálcák által begyűjtött árvaszúnyog taxonok számának összevetése  $\chi^2$ -próbával történt a Statistica 6.1. program segítségével.

### 2.1.3. BÖGÖLYÖK POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

#### 2.1.3.1. POLAROTAXIS KÍSÉRLETI BIZONYÍTÁSA BÖGÖLYÖKNÉL: A POLARIZÁCIÓLÁTÁS LEHETSÉGES SZEREPE A BÖGÖLYÖK SZAPORODÁSI ÉS TÁPLÁLKOZÁSI VISELKEDÉSÉBEN

A 2006. és 2007-es év során 5 különböző típusú választásos viselkedési kísérletet végeztünk. Az első négy vizsgálatot a kiskunhalasi Presbiteriánus temetőben ( $46^\circ 43' \text{ É}$ ,  $19^\circ 5' \text{ K}$ ) állítottuk be. A temetőtől 2 km-es távolságra található legközelebbi természetes víz, egy szikes tó. A kísérletek során az időjárás szélcsendes, meleg és általában napos volt (a maximális és minimális nappali hőmérséklet  $35\text{--}38^\circ\text{C}/25\text{--}26^\circ\text{C}$  volt). Az első és második kísérlet során légycsapóval begyűjtött bögölyöket metil-alkoholban konzerváltuk a későbbi meghatározás céljából. Az adatok összehasonlítása  $\chi^2$ -próbával történt a Statistica 6.1 program segítségével.



#### 4. ábra: Az első terepkísérletben használt tesztfelületek elhelyezkedése

Az első választásos kísérletet 2006. július 11-én (13:45-től 17:15-ig) és 12-én (9:15-től 16:30-ig) (helyi nyári időszámítás = UTC+2) végeztük. 5 darab  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ -es falapot fektettünk vízszintesen a földre egymástól 1 métere, amiket különböző típusú, száraz felszínű anyagokkal borítottunk (4. ábra). Ezek rendre a következők, (1) fényes fekete műanyag fólia, (2) fényes fehér műanyag fólia, (3) alumínium fólia, (4) matt fekete szövet, (5) matt fehér szövet. A nyílt égbolt alatt elhelyezett tesztfelületek végig árnyékban voltak, hőmérsékletüket digitális kontakthőmérővel több alkalommal mértük. A tesztfelületek hőmérséklete a kísérlet során mindvégig  $\pm 0.25^\circ\text{C}$  pontossággal – azonos volt. A lapok sorrendjét óránként, véletlenszerűen változtattuk. 3 m-ről figyelve följegyeztük a különböző tesztfelületekre leszálló bögölyök viselkedését, tesztfelületekkel való érintkezéseik és az onnan történő fölröppenéseik számát, valamint az ott töltött időtartamokat (3A. táblázat).

A második választásos kísérletet 2006. július 14-én 9:00 és 14:00 óra (UTC+2) között ugyanazon a helyszínen végeztük, mint az elsőt. Ebben a vizsgálatban kétféle tesztfelszínt használtunk a falapok borítására: a fényes fekete műanyag fóliát és fényes fehér műanyag fóliát. A köztük lévő távolság 1 m volt. Függőleges, illetve vízszintes helyzetüket óránként változtattuk, a pozíciójukat pedig 30 percenként fölcseréltük. A tesztfelületekhez érkező bögölyök viselkedését 3 m-ről figyelve folyamatosan rögzítettük (3B. táblázat).

A harmadik választásos kísérletben 3 pár különböző beállítású, ragasztóval bevont csapdát helyeztünk ki 2007. július 4. 8:00 óra és 2007. július 6. 19:00 óra (UTC+2) között. A csapdák alapjait falapok képezték, melyekre fényes fekete illetve fehér műanyag fóliákat erősítettünk és színtelen, szagtalan nem beszáradó ragasztóval (BabolnaBio® egérragacs) vontuk be őket. Az első pár csapdát (egy fekete és fehér műanyag fóliával takart) vízszintesen a földre fektettük. A második pár csapdát a lombkorona szintjén, 190 cm-es magasságban vízszintesen helyeztük el úgy, hogy fényes, ragasztós felületük a föld felé nézzen. A harmadik pár csapdát függőleges irányultsággal szintén a lombkorona szintjén, 190 cm-es magasságban, függesztettük fel, és a csapdák mindkét oldalát ragasztóval bevontuk. A csapdákat egymástól 2 m-re, a kísérleti párokat pedig egymástól 20 m-re állítottuk fel. Kétóránként felcseréltük a páronkénti csapdák helyzetét. A befogott bögölyöket leszámoltuk (4. táblázat) és metil-alkoholban tartósítottuk a későbbi határozás végett.

A negyedik választásos kísérlethez egy fehér és egy fekete, 70 cm átmérőjű kör alakú műanyag tálcát használtunk. Ezeket 4 cm-es vastagságban csapvízzel feltöltöttük, és egymástól 1 m-re, árnyékos helyen helyeztük el. A két tálca pozícióját kétóránként cseréltük. 3 m-es távolságból figyelve rögzítettük a tálcákhoz érkező bögölyök viselkedését (5. táblázat). A vizsgálatok a következő időszakokban lettek lebonyolítva: 2007. július 3. 11:30-tól 17:40-ig és 2007. július 7. 13:40-től 18:10-ig (UTC+2).

Az ötödik választásos kísérlet öt különböző helyszínén ugyanazokat a műanyag tálcákat használtuk, mint a 4. terepkísérletben, csak most a csapdába étolajat öntöttünk (4 cm-es vastagságban). A vizsgálat alapvető célja a bögölyök pozitív polarotaxisán alapuló poláros bögölycsapda prototípus tesztelése volt. Korábbi kísérletekből tudjuk, hogy az étolaj képes csapdába ejteni azokat a rovarokat, amelyek megérintik a felületét (HORVÁTH et al. 1998a, HORVÁTH és VARJÚ, 2004). A tálcák közötti távolságot 2 m-re állítottuk be. A csapdákat minden második órában felcseréltük. Napnyugtától napkeltéig a csapdákat lefedtük, hogy elkerüljük az éjszaka aktív rovarok csapdázódását. A begyűjtött rovarokat metil-alkoholban konzerváltuk, majd laborban meghatároztuk. A kísérleti helyszíneket és dátumokat a 6. táblázat tartalmazza.

A vizsgálati helyszíneken képalkotó polarimetriával kimértük a száraz illetve ragadós tesztfelületek (műanyag fóliák) és a vízzel illetve étolajjal töltött tálcák tükröződési-polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban.

#### 2.1.3.2. A GAZDA KÜLTAKARÓ OPTIKAI SAJÁTSÁGAINAK HATÁSA A BÖGÖLYÖK GAZDAVÁLASZTÁSÁRA

Lovak bögölyök általi zaklatásának megfigyelése:

Egy meleg napsütéses napon, 2008. június 22-én, Szokolyán (47° 52' É, 19° 00' K) egy nyitott karámban figyeltük meg egy barna (lovas szaknyelven pej) és egy fehér (szürke) ló bögölytámadásokkal szembeni viselkedését. A bögölyök mindkét lovat folyamatosan zaklatták, a lovakat valóságos bögölyfelhő vette körül. A bögölyszám dokumentálása érdekében 70-70 fényképet készítettünk a legelő barna és fehér lóról. A 10 megapixel-es felbontású képeket számítógépes képernyőn megjelenítve számoltuk le a vizuálisan fölsimert bögölyöket (7. táblázat). Az intenzív bögölytámadások elől a lovak időnként a napos legelőről a rétet határoló erdő árnyékába menekültek, amiről szintén képi dokumentációt készült. Emellett mértük mindkét ló esetén a legelőn és árnyékban töltött időt (8. táblázat).

Az 1. kísérlet 2008. június 23–24-én és 25–26-án zajlott meleg, napos időben egy-egy lovastanyán Szokolyán (47° 52' É, 19° 00' K) és Gödön (47° 43' É, 19° 09' K), naponta 9:30-tól 17:30-ig (helyi nyári idő = UTC+2h). Egy adott helyszínen, az első napon két azonos méretű (150×150 cm) és minőségű, száraz, matt, barna vásznat fektettünk vízszintes deszkákra, egymástól 1 m távolságra. Az egyik vásznat egy szintelen, átlátszó, 3 mm vastag műanyag lappal fedtük le. A tesztfelületeket óránként fölcseréltük és kétóránként az árnyékból a közeli napos területre helyeztük át. A tesztfelületek hőmérsékletét digitális kontakthőmérővel mértük. A két tesztfelület hőmérséklete a kísérlet során mindvégig –  $\pm 0.25$  °C pontossággal – azonos volt. Mindkét tesztfelületnél számoltuk az odavonzott bögölyöket és a tesztfelületre való leszállásaikat (9. és 10. táblázat). A második napon is elvégeztük ezt a kísérletet azzal a különbséggel, hogy a műanyag lappal borított barna vásznat egy azonos méretű matt fehér vászonra cseréltük.

A 2. kísérletet először 2008. augusztus 3-án 9:00 órától 19:00 óráig (UTC+2h) végeztük el egy lovasiskola melletti temetőben, Kiskunhalason (46° 43' É, 19° 05' K). A kísérleti elrendezés az 1. kísérlettel megegyező volt, csak a vízszintes átlátszó, szintelen műanyag lapot szintelen, szagtalan ragasztóval (BabolnaBio® egérragacs) vontuk be, amely a felületre szálló minden rovarot megfogott, továbbá a tesztfelületek végig árnyékban voltak. Számoltuk a matt barna felületre szálló és a csillogó ragadós felülettel csapdába ejtett bögölyöket. A ragasztóba ragadt bögölyöket azonnal eltávolítottuk a felületről, így a következő bögöly számára a csapdába ejtett légy látványa nem befolyásolta a felület vonzókéességét. A kísérletet 2008. augusztus 4-én ugyanott megismételtük azzal a különbséggel, hogy a műanyag lappal borított matt barna vásznat egy azonos méretű matt fehér vászonra cseréltük. Megint számoltuk a két tesztfelületre szálló bögölyöket. A tesztfelületek hőmérséklete a kísérlet során végig azonos volt, mivel árnyékban voltak. A kísérlet első részét, amiben matt barna és fényes barna tesztfelületeket használtunk, 2009. augusztus 16. és 25. között, naponta 12:00-tól 13:00-ig, összesen 10 alkalommal megismételtük. Számoltuk a vízszintes matt barna felületre szálló és a vízszintes csillogó ragadós felülettel csapdába ejtett bögölyöket (11. táblázat). A fényes barna felületre ragadt bögölyöket most is azonnal eltávolítottuk. Miközben a ragadós felületről leszedtük a bögölyöket, azok súlyosan megsérültek, ami a faji szintű meghatározásukat lehetetlenné tette. Mindazonáltal bizonyosan bögölyök (Tabanidae: Diptera) voltak. 2009. augusztus 16. és 25. között, naponta 13:00-tól 14:00-ig a kísérlet második felét is – amiben egy száraz matt barna és egy száraz matt fehér tesztfelületet használtunk – tízszer megismételtük, számolva a tesztfelületekre rászálló bögölyöket.

A 3. kísérlet 2009. július 17-től szeptember 13-ig folyamatosan zajlott egy lovastanyán, Szokolyán (47° 52' É, 19° 00' K). Egy barna, egy fekete és egy fehér lómakettet (mindhárom azonos formájú és méretű: hosszúság: 160 cm, magasság: 110 cm, szélesség: 60 cm) állítottunk a füves talajra normál testtartásban. A három lómakettet 5 m távolságra helyeztük el egymástól egy egyenes mentén. A felületüket minden második napon szintelen, szagtalan ragasztóval (BabolnaBio® egérragacs) kentük be. A lómakettek sorrendjét kétnaponként véletlenszerűen fölcseréltük. A kísérlet helyét úgy választottuk meg, hogy mindhárom lómakett egyszerre legyen napon vagy árnyékban. A lómakettek ragadós felületeivel csapdába ejtett bögölyöket kétnaponta leszedtük és megszámláltuk (12. táblázat). Felhős vagy esős időben a bögölyök nem repültek, s ekkor a lómakettek egyetlen bögölyt sem fogtak. Miközben a lómakettek ragadós felületéről a bögölyöket leszedtük, azok súlyosan megsérültek, ami a faji szintű meghatározásukat lehetetlenné tette. Mindazonáltal a leszedett rovarok bizonyosan bögölyök (Tabanidae: Diptera) voltak.

A 4. kísérlet egy gödi lovastanyán (47° 43' É, 19° 09' K) zajlott 2008. július 11. és szeptember 7. között. Öt (fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke, fekete) étolajjal



töltött tálcát tettünk a földre (5. ábra), sorrendjüket naponta, véletlenszerűen változtatva. Éjszakára, valamint esős időben a tálcákat letakartuk. A tálcák által csapdába ejtett bögölyöket begyűjtöttük és etil-alkoholban tartósítottuk a későbbi határozás céljából.

A tesztfelületek (6. és 13. ábrák), lómakettek (14. ábra), valamint lovak és szarvasmarhák (12. ábra) polarizációs mintázatait képkalkuló polarimetriával (HORVÁTH és VARJÚ 2004) mértük a spektrum vörös ( $650 \pm 40$  nm = a polariméter CCD-detektora maximális érzékenysége hullámhossza  $\pm$  annak félértékszélessége), zöld ( $550 \pm 40$  nm) és kék ( $450 \pm 40$  nm) tartományában.



**5. ábra:** A gödi lovastanyán kihelyezett öt (fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke, fekete) étolajjal töltött tálca a 4. kísérletben.

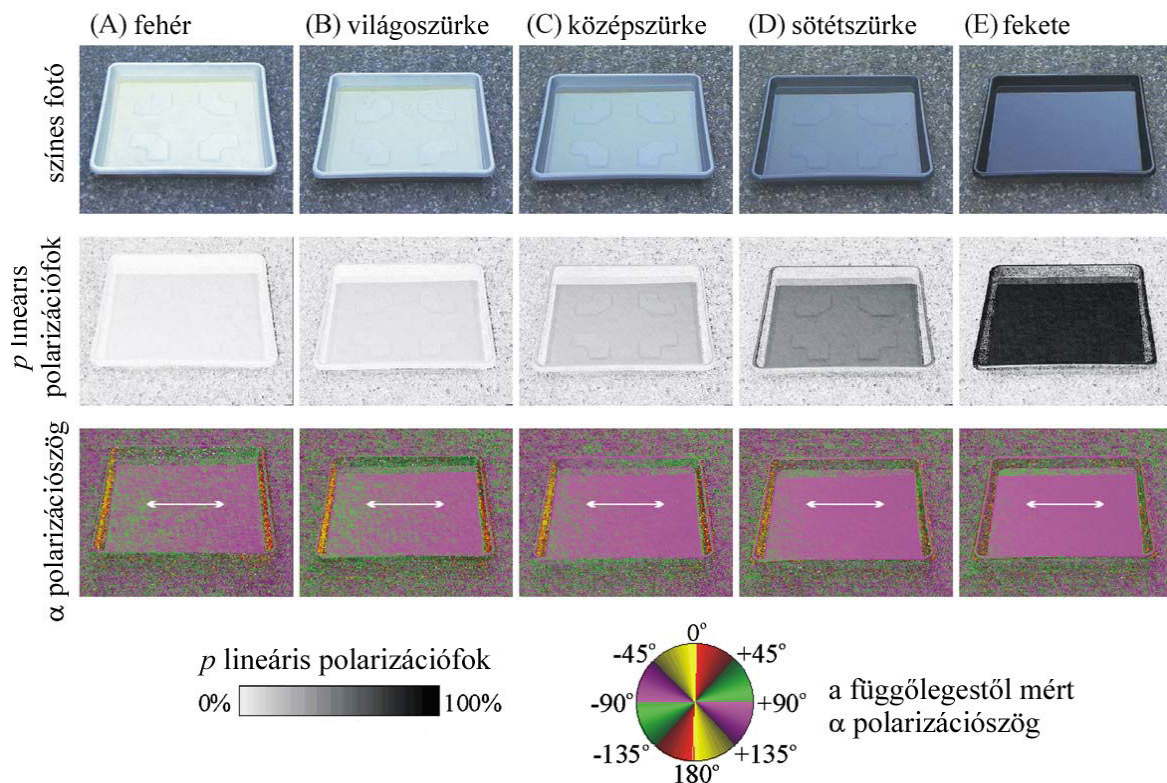
A továbbiakban csak a kék tartományban mért polarizációs mintázatokat mutatom be, a mintázatok mindhárom csatornában gyakorlatilag azonosak voltak. A polarizációs méréseket tiszta égbolt alatt végeztük. A polarotaktikus vízirovarok, például a bögölyök akkor érzékelnek víznek egy felületet, ha az arról visszavert fény (i)  $p$  lineáris polarizációfoka nagyobb egy fajfüggő  $p^*$  küszöbértéknél, és (ii) az  $\alpha$  polarizációirányának a vízszintestől ( $\alpha = 90^\circ$ ) való  $\Delta\alpha = |90^\circ - \alpha|$  eltérése pedig kisebb egy fajfüggő  $\Delta\alpha^*$  küszöbértéknél. Példaként a 14. ábrán  $p^* = 10\%$  és  $\Delta\alpha^* = 10^\circ$  értékeket használtunk. Habár e küszöbértékeket önkényesen választottuk, más értékek alkalmazása sem befolyásolta az eredményeket és következtetéseket. A 3. kísérlettel párhuzamosan egy másik kísérletet is végeztünk július 17-től 26-ig, illetve augusztus 11-től 16-ig. Egy fekete, négyzet alakú ( $50 \times 50$  cm), étolajjal töltött műanyag tálcával fogtunk bögölyöket, ami lehetővé tette az adott területen jelenlévő bögölyfajok meghatározását (13. táblázat).

A bögölyök meghatározása Az etil-alkoholban tartósított bögölyök faji meghatározását Farkas Róbert (SZIE Parazitológiai és Állattani Tanszék) végezte. Az eredmények statisztikai elemzését (ANOVA, binomiális és multinomiális  $\chi^2$  tesztek) a Statistica 7.0 számítógépes program segítségével végeztük.

#### **2.1.4. A POLAROTAXIS POLARIZÁCIÓFOK INGERKÜSZÖBÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOKNÁL**

A kérészek, szitakötők és bögölyök befogására szintelen (fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke és fekete) folyadékcsapdákat alkalmaztunk, amelyek különböző polarizációfokú vízszintesen poláros fényt tükröztek (6. ábra). A csapdázott rovarok száma alapján meghatároztuk a legalacsonyabb ( $p_{\min}$ ) és felső ( $p_{\max}$ ) értékeit a  $p^*$ -nak a vizsgált polarotaktikus rovarfajok esetében.

A szitakötőkkel elvégzett 1. terepkísérlet 1997. július 24. és augusztus 8. között folyt, 500 m-re egy kisebb szikes állóvíztől Kunfehértónál ( $46^{\circ} 22' \text{ É}$ ,  $19^{\circ} 23' \text{ K}$ ) (14. táblázat). A folyamatosan kihelyezett csapdák fogásait naponta ellenőriztük. A csapdákat éjszakára és az esős időszakok idejére deszkalapokkal fedtük le. A tálcák 50 cm távolságban voltak egymástól, a helyzetüket pedig minden napnyugtakor véletlenszerűen megváltoztattuk. Ezzel a közvetlen környezet egyenetlenségeinek esetleges hatásait kívántuk megszüntetni (HORVÁTH et al. 1998a). E kísérletben csak négy szürke olajtálcát (fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke, fekete) használtunk, az 5. kontroll olajtálca alját alumínium fóliával vontuk be, miáltal gyengén és nem vízszintesen poláros fényt vert vissza. Mivel ez utóbbi olajtálca csak a szitakötők pozitív fototaxisáról szolgáltatott adatokat, ezért az általa fogott szitakötők egyedszámát nem vontuk be a  $p^*$  értékének meghatározását célzó statisztikai elemzésbe, ezek az adatok az 14. táblázatban sem szerepelnek.



**6. ábra:** A terepkísérletben használt, árnyékban elhelyezett fehér (A), világosszürke (B), középszürke (C), sötétszürke (D) és fekete (E) étolajtálcák a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával kimért polarizációs mintázatai (lásd még a 4. táblázatot). A fehér kettősfejű nyilak a visszavert fény helyi polarizációirányát mutatják a 3. sorban. A képalkotó polariméter az antiszoláris meridián felé tekintett, optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-56,3^{\circ}$  (Brewster szög) volt, amely az étolaj törésmutatója  $n \approx 1,5$  alapján lett meghatározva. A napsütötte tesztfelületek polarizációs mintázatai hasonlóak voltak, mint az ábrán láthatók.

A 2. választásos terepkísérletet kérészekkel végeztük a Pilis hegységi Dömörkapunál ( $47^{\circ} 40' \text{ É}$ ,  $19^{\circ} 23' \text{ K}$ ) 2008. május 11. és június 3. között minden nap. Az öt étolajtálcát (fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke, fekete) a kérészlárvák élőhelyén (KRISKA et al. 1998), a Bükkös-patak mellett futó aszfaltútra helyeztük ki. A tálcák alá 70 cm x 300 cm-es fényes fekete műanyag fóliát terítettünk, ami erősen és vízszintesen poláros fényt vert vissza, miáltal már nagyobb távolságokból is a kísérleti helyszínhez vonzza a kérészeket. A tálcák sorrendjét a rajzási idő alatt 19:00-tól 21:00-ig óránként véletlenszerűen megváltoztattuk.

Mivel a tálcák mindvégig a fák árnyékában voltak, a hőmérsékletük ugyanaz volt. A tálcák által befogott kérészeket alkoholban tartósítottuk és később azonosítottuk (15. táblázat).

A 3. terepkísérletben bögölyök reakcióit vizsgáltuk egy gödi lovastanyán 2008. július 11. és szeptember 7. között. A fehér, világosszürke, közészürke, sötétszürke és fekete étolajtálcákat a füves talajra helyeztük, egymástól 50 cm-es távolságban. A tálcák helyét minden napnyugtakor véletlenszerűen megváltoztattuk, amivel a helyhatást küszöböltük ki. Mivel a vizsgált kérészek csak napnyugta körül voltak aktívak, ezért a szitakötőkkel és bögölyökkel ellentétben velük nem egész nap, hanem csak a naplemente körüli rajzási időszakukban végeztük a kísérletet. Emiatt Dömörkapunál sűrűbben, óránként kellett megváltoztatni az olajtálcák elrendezését. A csapdákat éjszakára és az esős időszakok idejére deszkalapokkal fedtük le. A 3. kísérletben befogott bögölyöket etil-alkoholban tartósítottuk és később azonosítottuk (16. táblázat).

A 3. terepkísérletben használt tesztfelületek polarizációs mintázatát képalkotó polarimetriával mértük ki a spektrum vörös ( $650 \pm 40$  nm = a polariméter CCD maximális hullámhossz érzékenysége  $\pm$  fél sáv szélesség), zöld ( $550 \pm 40$  nm) és kék ( $450 \pm 40$  nm) tartományában. A 6. ábrán az árnyékban elhelyezkedő étolajtálcák polarizációs mintázata a spektrum kék tartományában lett megjelenítve. Hasonló mintázat tapasztalható a vörös és zöld tartományban, és akkor is, ha az öt olajtálcát közvetlen napfény éri. A képalkotó polarimetriai eljárás részletes leírása HORVÁTH és VARJÚ (1997) munkájában olvasható. A képalkotó polariméter az antiszoláris meridián felé tekintett, optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-56,3^\circ$  (Brewster szög:  $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n)$ ) volt, amely az étolaj törésmutatója  $n \approx 1,5$  alapján lett meghatározva. Brewster szögnél a felszínről visszavert fénysugár merőleges a folyadékba belépő megtört fénysugárra, ami a lehetséges legmagasabb  $p$  polarizációfokot eredményezi a visszavert fény esetében. Ennek megfelelően a 17. táblázat adatai a maximális  $p$  értékeket jelenítik meg, amelyeket a csapdákhöz közelítő polarotaktikus rovar érzékelhet.

A tálcákban lévő étolaj hőmérsékletét digitális kontakthőmérővel ellenőriztük  $\Delta T = \pm 0,25^\circ\text{C}$  pontossággal. Amikor a tálcák árnyékban voltak, alacsony napállásnál, vagy borult időben, akkor az étolaj hőmérséklete azonos volt a tálcákban, míg napsütésnél minél sötétebb volt a tálca annál melegebb volt a benne lévő étolaj hőmérséklete.

Az olajtálcák által az 1. és 2. kísérlet során csapdázott rovarok statisztikai analíziséhez egyutas ANOVA tesztet használtunk (1. modell), kísérletenként 0.05-ös becsült hibarátaival. Ortogonális összehasonlításokat végeztünk, hogy megállapítsuk a  $p$  lineáris polarizációfok fajspecifikus  $p^*$  küszöbértékét, mely elválasztja a nem vonzó tálcákat azoktól, melyek polarotaxist váltanak ki. A következő esteket vizsgáltuk: (i) fehér tálca vonzó hatása a világosszürke, sötétszürke, és fekete szürke együttes vonzó hatásával szemben, (ii) világosszürke vonzó hatása a sötétszürke és a fekete tálca együttes vonzó hatásával szemben, és (iii) a sötétszürke vonzó hatása a fekete tálca vonzó hatásával szemben. A 2. kísérletben ezzel analóg módon, közepesen szürke tálca esetében is megvizsgáltuk négy összehasonlítással, hogy mennyi kérész esik az olajtálcák fogságába.

A harmadik kísérlet során rögzített adatok nem voltak elegendőek az ANOVA teszt elvégzéséhez, így  $\chi^2$  tesztet alkalmaztunk. Az összehasonlításokat ismételt tesztek során végeztük el az összes tálca felhasználásával (0. összehasonlítás), majd a sötét tálcákat rendre kihagytuk, a feketével kezdve (1-3. összehasonlítás). A teljes kísérletenkénti hibaráta 0.0127-re csökkent a Dunn-Sidak módszert követve.

Minél sötétebb a csapdafelszín, annál nagyobb a visszavert fény polarizációfoka (6. ábra, 17. táblázat) minden hullámhossztartományban. Mivel a tükröződő fény polarizációs iránya mind az 5 tálca esetében vízszintes volt (6. ábra), az összes csapdának vonzónak kellene lennie a pozitív polarotaxissal rendelkező szitakötők, kérészek és bögölyök számára, abban az esetben, ha a visszavert fény  $p$  polarizációfoka nem kisebb, mint a fajspecifikus polarizációérzékenység  $p^*$  értéke. Így összefoglalhatjuk, hogy adott taxon esetében a  $p^*$  értékének a hasonló egyedszámot csapdázó tálcák közül a legvilágosabb tálcáról visszavert



fény  $p$  (Brewster szögben mért) és a szignifikánsan kevesebb rovarot fogó tálcák közül a legsötétebből visszavert fény  $p$  (Brewster szögben mért) értékek közé kell esnie. Mivel a csapdázott rovarok elpusztultak, ezért a pszeudoreplikáció jelensége kizárható. A statisztikai kiértékelés során a Statistica 6.0 programot használtuk.

### **2.1.5. A KÉRÉSZEK SZÁMÁRA KEDVEZŐTLEN ÉLŐHELYEK ELKERÜLÉSE POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉS RÉVÉN**

#### **1. terepkísérlet (1-4. nap)**

Az *Ephoron virgo* tömegrajzását Tahitótfalunál (47° 75' É, 19° 08' K) a híd alatti folyószakaszon figyeltük meg 2013-ban augusztus 15. és szeptember 2. között minden este 21:00-tól 23:00-ig (helyi nyári időszámítás = UTC+2). A fajjal 2013. augusztus 23-án, 24-én, 27-én és 28-án végeztünk terepkísérleteket, amelyek során polarizálatlan, vízszintesen- és függőlegesen poláros fényű, azonos fényintenzitású és spektrális tulajdonságú lámpák kérészekre gyakorolt hatását vizsgáltuk.

Ennek során egy fotóállványhoz rögzített nagy fényerejű LED-es kézilámpát (UltraFire C8 Cree XM-L T6 LED) helyeztünk el a folyóparton, 110 m-re a hídtól, és fényét egy szűrőelötéten keresztül a folyó közepén a folyásiránnyal szemben haladó, kompenzációs repülést folytató kérésztömegre irányítottuk (8D. ábra). A szűrőelötét egy lineáris polárszűrőből (XP42-18 ITOS, Mainz, Germany) és egy depolarizátorként működő pauszpapírból állt. Az első kísérletben először úgy helyeztük a szűrőelötétet közvetlenül a fényforrás elé, hogy a fény előbb a pauszpapíron, majd a polárszűrőn haladt át, aminek az áteresztési iránya függőleges volt. Így a lámpa függőlegesen poláros fényforrásként ( $p = 100\%$ ) működött. Ezután a szűrőelötétet megfordítottuk, miáltal a polárszűrő került a lámpa felőli oldalra, a depolarizáló pauszpapír pedig kívülre. Ennek eredményeként a fénynyaláb intenzitása és spektruma azonos volt az első szakaszban alkalmazott fényével, mindössze annyi volt a különbség, hogy ez esetben polarizálatlan ( $p = 0\%$ ) volt a nyaláb. A harmadik szakaszban visszafordítottuk a szűrőelötétet, viszont úgy állítottuk be, hogy a polárszűrő áteresztési iránya vízszintes legyen, tehát a lámpa vízszintesen poláros fényforrásként ( $p = 100\%$ ) működött. Az 1. terepkísérletben használt fényforrások polarizációs tulajdonságait képalkotó polarimetriával (HORVÁTH és VARJÚ 1997, 2004) mértük ki (8. ábra).

Az 1. kísérlet során mindhárom szűrőállásnál 7-7 fotót készítettünk a lámpa fénycsóvájáról, hogy e képek kiértékelésével megbecsülhessük a lámpafénybe vonzott kérészek egyedszámát. Minden fénykép elkészítése után lekapcsoltuk a lámpát 5 másodpercre, majd az újbóli bekapcsolás után 5 másodperccel (miután a folyó közepén haladó kompenzációs rajból kiváló kérészek elérték a lámpa környezetét) készítettük el a következő fotót, ami után újra kikapcsoltuk a lámpát. A lámpa lekapcsolásakor a kérészek azonnal elrepültek a lámpa közeléből, és a kompenzációs rajhoz csatlakozva folytatták útjukat a folyásiránnyal szemben. Így elérhetővé vált, hogy a lámpa újbóli felkapcsolásakor mindig más kérészegyedek viselkedését vizsgáljuk, elkerülve a pszeudoreplikációt.

A terepvizsgálatokat összesen négy rajzásnapon végeztük. A kísérletsorozatot a kompenzációs raj kialakulásától annak megszűnéséig folytattuk. A leghosszabb időintervallum 20:15-től 21:20-ig tartott. A teljes rajzási periódusra vonatkoztatva megállapítható volt, hogy a kompenzációs repülés egyre korábban kezdődött és egyre rövidebbé vált. Az utolsó rajzási napokon a kompenzációs repülés már 19:30 körül kezdődött és 20 óra után néhány perccel ért véget.

Az 1. kísérlet alatt készült 966 fotó kiértékelése saját fejlesztésű számítógépes programmal történt (AlgoNet, <http://www.estrato.hu/algonet>, SZÁZ et al. 2015).

A kiértékelés során a szoftver felismerte a dunavirág egyedeivel azonosítható, egymástól elkülönülő fehér foltokat, majd megadta ezek számát. Azon tereptárgyakat, melyek hasonló színűek voltak és a program tévesen kérészekként ismerhette volna fel azokat, kimaszkoltuk, így nem kerültek bele a számlálásba (7. ábra).



**7. ábra:** *Ephoron virgo* egyedek vonzódása az állványra rögzített vízszintesen poláros fényforráshoz a Dunaparton Tahitótfalunál. A világosszürke maszk lefedi azt a területet, amely nem lett figyelembe véve a kérészek leszámlálásakor. A maszk alkalmazására a kiértékelő szoftver téves egyedfelismerésének kiküszöbölése miatt volt szükség.

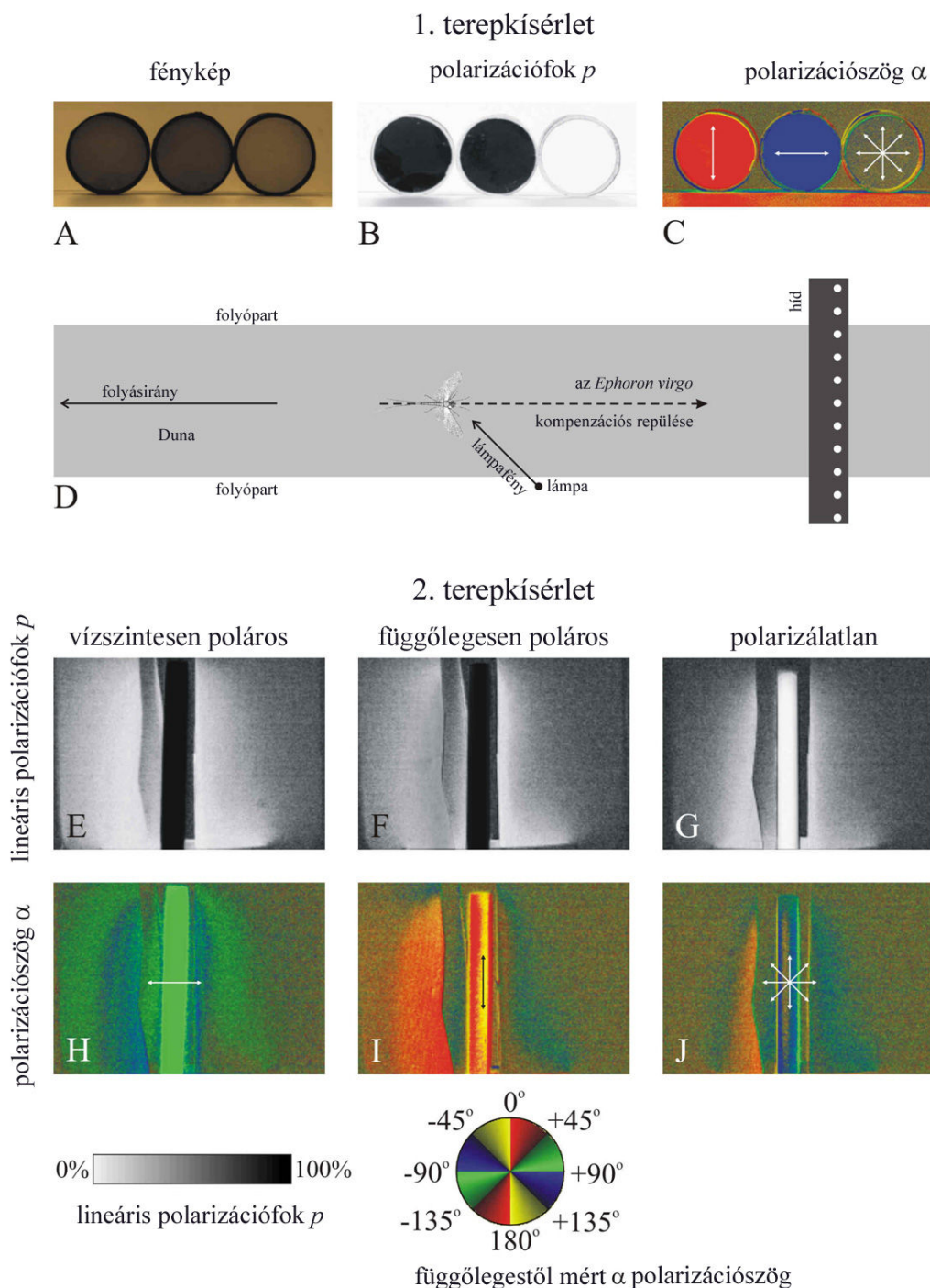
## 2. terepkísérlet (5. nap)

A *Caenis robusta* fénycsapdás vizsgálatát az Ócsai Tájvédelmi Körzet területén ( $47^{\circ} 28' \text{ É}$ ,  $19^{\circ} 26' \text{ K}$ ) végeztük 2014. július 22-én 19:00 órától 23:00 óráig (UTC+2) abból a célból, hogy adatokat nyerjünk e faj különböző polarizációjú fényforrásokhoz való vonzódásáról. A hajdan kiterjedt lápterület egyik utolsó maradványfoltjának egész területére jellemző a mozaikosság, a nyílt vizek, nádasok, rétek, erdők és sztyepprétek váltakozása. A terepkísérletben három egyforma felépítésű, azonos fényintenzitású és spektrális tulajdonságú vízszintesen poláros, függőlegesen poláros, valamint polarizálatlan fényt kibocsátó fénycsapdákat alkalmaztunk, amelyek kialakításának részletes leírása FARKAS és munkatársai (2016) publikációjában szerepel. A csapdák polarizációs jellemzőit képalkotó polarimetriával mértük (8E-J. ábra). A három fénycsapdát a vizes élőhely partjától 10 m-re, egymástól pedig 2 m-re telepítettük, a partvonallal párhuzamosan. A csapdák helyzetét a vizsgálat időszakban félóránként véletlenszerűen megcseréltük, hogy kiküszöböljük a helyspecifikus hatásokat. A vízfelszín irányából mindhárom csapda jól látható volt, mert a csapdákkal szembeni partvonalon korábban kiirtották a vízparti növényzetet, hogy a közelben elhelyezkedő madárlesről jó kilátás nyíljon a vizes élőhelyre. A csapdához vonzódott kérészeket három fehér függőleges műanyag lap terelte a gyűjtőüveg fölé, ahol a párolgó kloroform hatására elpusztuló kérészek az edény aljára hullottak. A rovarok azonosítását és leszámlálását később a laboratóriumban végeztük el. A fénycsapdák polarizációs mintázata (8E-J. ábra) képalkotó polarimetriával (HORVÁTH és VARJÚ 1997, 2004) lett kimérve.

## 3. terepkísérlet (6-7. nap)

A 3. terepkísérletben 2015. augusztus 4. és 6. között Rábahídvégen ( $47^{\circ} 03' \text{ É}$ ,  $16^{\circ} 44' \text{ K}$ ) vizsgáltuk az *E. virgo* rajzását minden nap 20:30 és 21:30 (UTC+2) között. A közúti híd mellett bonyolítottuk le azon terepkísérleteinket, amelyek azonos fényspektrumú, de különböző polarizációjú és intenzitású fényforrások vonzóhatását vizsgálták az *E. virgo*

esetében. A kísérletben fotóállványhoz rögzített nagy fényerejű LED-es kézilámpát (UltraFire C8 Cree XM-L T6 LED) helyeztünk el a folyóparton, 30 m-re a hídtól. A lámpa fényét a folyó közepén a folyásiránnyal szemben haladó, kompenzációs repülést folytató kérészekre irányítottuk a Tahitótfalunál korábban már alkalmazott módszer (8D. ábra) szerint.



**8. ábra:** Az 1. (A-C) és a 2. (E-J) terepkísérletekben használt fényforrásoknak a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért  $p$  lineáris polarizációfok és az óramutató járása szerint a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szög mintázatai. (A-C) 1. kísérlet: színes fotói (A),  $p$  polarizációfok (B) és  $\alpha$  polarizációs szög (C) mintázatai a függőlegesen-, vízszintesen polarizáló és depolarizáló szűrőknek. (D) Az első kísérletet bemutató rajz. (E-J) 2. kísérlet:  $p$  polarizációfok és  $\alpha$  polarizációs szög (C) mintázatai a vízszintesen poláros (E, H), a függőlegesen poláros (F, I) és a polarizálatlan (G, J) fényt kibocsátó fénycsapdáknak. A polariméter optikai tengelye vízszintes volt. A fehér kettősféjű nyilak a helyi polarizációirányt mutatják.

A 3. kísérlet első részében lineáris polárszűrőt (XP42-18 ITOS, Mainz, Germany) helyeztünk közvetlenül a fényforrás elé függőleges fényáteresztéssel, miáltal a lámpa függőlegesen poláros fényforrásként ( $p = 100\%$ ) működött. Ekkor az  $I_{rel} = 100\%$  relatív fényintenzitás maximális volt. A 3. kísérlet második részében egy semleges szürke szűrő alkalmazásával a fényforrás  $I_{rel} = 68\%$  relatív fényintenzitású, polarizálatlan ( $p = 0\%$ ) fényt bocsátott ki. A 3. kísérlet 3. részében a fényforrás, semleges szürke szűrők és egy lineáris polárszűrő alkalmazásával  $I_{rel} = 29\%$  relatív fényintenzitású, vízszintesen poláros ( $p = 100\%$ ) fényt bocsátott ki. A lámpafény polarizációs sajátosságainak mérése képalkotó polarimetriával történt. A 3. kísérlet mindhárom részében minden egyes szűrőbeállításnál 10-10 fotót készítettünk a lámpa fénycsóvájáról, hogy e képek kiértékelésével megbecsülhessük a lámpafénybe vonzott kérészek számát. A fényképezési eljárás és az elkészült összesen 360 fotó kiértékelésének menete megegyezett a tahitótfalui, 1. kísérletnél leírtakkal (FARKAS et al. 2016).

#### 4. terepkísérlet (8. nap)

A 4. kísérletben 2015. augusztus 10-én 19:00-tól 23:00-ig az Ócsai Tájvédelmi Körzet területén a 2. kísérlet helyszínén fénycsapdákkal vizsgáltuk a *Caenis robusta* különböző polarizációjú és intenzitású fényforrásokhoz való vonzódását. A kísérletben alkalmazott három egyforma fölépítésű fénycsapda közül az egyik fényforrása függőlegesen poláros ( $p = 100\%$ ),  $I_{rel} = 100\%$  relatív intenzitású fényt, a másik polarizálatlan ( $p = 0\%$ ),  $I_{rel} = 50\%$  relatív intenzitású fényt, a harmadik pedig vízszintesen poláros ( $p = 100\%$ ),  $I_{rel} = 22\%$  relatív intenzitású fényt bocsátott ki. A kérészek befogása és azonosítása a 2. kísérletnél leírtak szerint történt.

#### 5. terepkísérlet (9-10. nap)

Az 5. kísérletet az *Ephoron virgo* rajzási időszakában, 2015. augusztus 26. és 27-én végeztük Tahitótfalunál 21:00 és 23:00 (UTC+2) között. A kísérletben két különböző polarizációjú és intenzitású fényforrás vonzóképességét vizsgáltuk az *E. virgo* esetében. Két-két egyforma lámpát rögzítettünk egy-egy 2.5 m-es farúd végére, és a fényforrásokkal felszerelt két rudat a híd folyásirányú oldaláról lógattuk a vízfelszín fölé. A kísérleti apparátust később Rábahídvégen is használtuk (32B. ábra).

A lámpák energiaellátását a hídon elhelyezett akkumulátorok biztosították a rúdra rögzített elektromos vezetékeken keresztül. Az első rúdon lévő lámpákat megfelelően beállított lineáris polárszűrővel (XP42-18 ITOS, Mainz, Germany) borítottuk be, miáltal ezek fénye vízszintesen poláros ( $p = 100\%$ ) és  $I_{rel} = 40\%$  relatív intenzitású volt. A második rúdra rögzített lámpák polarizálatlan ( $p = 0\%$ ),  $I_{rel} = 100\%$  relatív intenzitású fényt bocsátottak ki. A fényforrások folyásirányba néztek, ahonnan a kompenzációs repülésüket végző *E. virgo* nőstények érkeztek a hídra. A polarizálatlan és poláros fényforrások fénynyalábjába vonzott kérészekről külön-külön fotókat készítettünk a híd korlátján áthajolva. Az egyes képpárok elkészítése között 10 másodperc telt el. Az 5. kísérlet során a dunavirágok nagy tömegben rajzottak a lámpák előtt, ezért a kérészek függőleges irányban több rétegben helyezkedtek el egymás alatt, ami lehetetlenné tette az egyedek külön-külön történő leszámolását, mint ahogy az az 1. és 3. kísérletben történt.

A kérészek egyedszámának megbecslése érdekében összesen 549 fényképet készítettünk a fénysorompó köré gyűlt sűrű kérészrajokról, miközben a fényképezőgép beállításai végig azonosak voltak. A kiértékelés első lépésében a színes fényképeket szürke árnyalatossá alakítottuk, majd azokon egy 35%-os intenzitásküszöb alá eső képpontokat feketére cseréltük, az e fölöttiek pedig fehérre. Következő lépésként minden képen ugyanazt a maszkot alkalmaztuk, miáltal a továbbiakban a fényképekre elkerülhetetlenül rákerülő lámpákat és hídelemeket figyelmen kívül hagytuk. A kimaszkolt képrészeket szintén feketére színeztük, így végeredményben olyan fényképeket kaptunk, melyeken kizárólag a háttér fekete, illetve a kérészek fehér színe látszott. A kiértékelés utolsó lépéseként leszámoltuk a fényképeken látható fehér képpontokat, mely érték arányos a lámpák körül megjelenő kérészek számával.

Az 5. kísérletben készült 35 olyan fénykép, melyeken a lámpák köré gyűlő kérészek száma olyan alacsony volt, hogy az egyedek nem egymást eltakarva, hanem teljesen elkülönülten jelentek meg. E fényképeken tehát nemcsak a fehér kérészek teljes képméretéhez képesti képpontarányát tudtuk meghatározni, hanem a 3. kísérlet során készült fényképek kiértékeléséhez hasonlóan, a kérészek egyedszámát is. E 35 fénykép kiértékelésével meghatároztunk egy  $R = 960 \pm 186$  képpont/kérész arányt, aminek segítségével ezután minden olyan fényképen is meg tudtuk becsülni a fénysorompó köré gyűlő kérészek hozzávetőleges számát, ahol a kérészek a sűrű rajokban részben takarták egymást.

Az 1., 3. és 5. kísérletek, illetve a 2. és 4. kísérletek során nagyban eltérő módszert alkalmaztunk a kérészek reakcióinak vizsgálatára, aminek több oka is volt: (i) Az 1., 3. és 5. kísérletekben elegendő volt kizárólag fényképeken rögzíteni a különböző polarizációjú lámpákhoz vonzódó *Ephoron virgo* egyedeket, mivel éjszakai, Duna fölötti tömegrajzásukkal egy időben más fajok nem rajzottak, tehát a fényképeken, a lámpák előterében megjelenő fehér foltok kizárólag az *E. virgo* kérészekkel azonosíthatók. A vonzott fajokat elpusztító fénycsapdákat a dunavirág védettsége miatt sem alkalmazhattunk. (ii) A 2. és 4. kísérletek helyszínén a vizsgált *Caenis robusta* kérészek rajzásával egyidőben más vízirovarok (például Chironomidae, Ceratopogonidae) is rajzottak. Ez esetben tehát a fénycsókák fényképezése nem jöhetett szóba, hiszen a fényképeken megjelenő fehér foltok több faj egyedeit is jelenthették volna, amiket a kiértékelés során nem lehetett volna teljes bizonyossággal elkülöníteni. Ráadásul a 2. és 4. kísérletek tóparti helyszínén a folyásiránnyal ellentétes kompenzációs repülés hiánya egy fénycsóva-fényképezéses módszernél nagyban növelte volna a pszeudoreplikáció valószínűségét. Mivel Magyarországon a *C. robusta* nem védett, ezért a fénycsapdás módszer bizonyult megfelelőnek e faj vizsgálatára.

A terepkísérletek adatainak összehasonlítását R-ben végeztük  $\chi^2$ -teszttel. A páronkénti összehasonlítások esetében Bonferroni-korrekciót is alkalmaztunk (ZAR 2010).

## **2.2. MESTERSÉGES POLÁROS FÉNYFORRÁSOK ÉS POLARIZÁCIÓS MINTÁZATOK HATÁSA VÍZIROVAROKRA**

### **2.2.1. KÜLÖNBÖZŐ SZÍNÁRNYALATÚ GÉPKOCSIK POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA**

A Hortobágyi Nemzeti Park egyik mocsaras részén, a Hagymás-laposnál (47° 33' É, 20° 55' K) 2004. augusztus 4-én, 18 és 21 óra (helyi nyári időszámítás = UTC+2) között egy terepkísérletben lett vizsgálva, hogy számos vízirovar- és vízipoloskafaj közül hányat és milyen egyedszámban vonzanak a mezőre vízszintesen kiterített 9 x 3 m-es, a vízparttól 30 m-re elhelyezkedő, egymást 30 m-es távolságban követő átlátszatlan, fényes piros, sárga, fehér és fekete műanyag fóliák, melyek gyakorlatilag ugyanolyan fénypolarizáló-képességgel rendelkeztek, mint a vizsgált piros, sárga, fehér és fekete autók. A vizsgálatok elvégzése előtt egy előkísérletben igazolást nyert, hogy a vízszintes matt fekete, piros, sárga és fehér szövetek nem vonzzák a vízirovarokat. Ez a kísérlet jól demonstrálta azt, hogy a színes műanyag fóliákkal megtévesztett vízirovarok vonzását a visszavert fény polarizációja okozta nem pedig a színe és/vagy az intenzitása. Korábban már számos terepvizsgálat során igazolást nyert (HORVÁTH és VARJÚ 2004), hogy a tükröződő fény vízszintes polarizációja a fő optikai oka annak, hogy a vízirovarok vonzódnak a fényes felületekhez. A terepvizsgálat mintavételi órái a vízirovarok optimális repülési időszaka szerint lettek megválasztva (BERNÁTH et al. 2004, CSABAI et al. 2006). A fóliákról az összes vízirovar be lett gyűjtve és a 70%-os etanolban rögzített állatok a laboratóriumban lettek meghatározva.

Egy-egy fekete, fehér, sárga és piros autó (Suzuki swift) tükröződési-polarizációs mintázatait 2005. április 4-én mértük ki képalkotó polarimetriával Budapesten (47° 32' É, 19° 4' K) 10:30-kor (helyi nyári időszámítás = UTC + 2) napsütéses időben, felhőtlen, tiszta ég alatt, a

spektrum vörös ( $650 \pm 40$  nm), zöld ( $550 \pm 40$  nm) és kék ( $450 \pm 40$  nm) (a kamera CCD érzékelőjének maximális érzékenysége  $\pm$  félérték szélesség) tartományában. Az alkalmazott képalkotó polarimetria módszerének részletes leírása HORVÁTH és VARJÚ (1997, 2004) publikációiban található. Az autókat a Nap bal oldalról világította meg, mikor a Nap hozzávetőleg  $42^\circ$ -ra volt a horizont fölött. Az autók hossz tengelye és a polariméter optikai tengelyének iránya merőleges volt a szoláris meridiánra. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-20^\circ$ -os szöget zárt be. A négy autó tükröződési-polarizációs mintázatának megmérése közel 15 percig tartott, így a megvilágítási viszonyok (a Nap állása) gyakorlatilag ugyanazok voltak.

A vízirovarokkal folytatott terepkísérletekben alkalmazott fényes piros, sárga, fekete és fehér műanyag fóliáknak tükröződési-polarizációs sajátosságai is ki lettek mérve képalkotó polarimetriával. Minden fóliánál a mérést a szoláris meridián irányában és arra merőlegesen is elvégeztük a Nap horizonttól mért közel  $42^\circ$ -os szögénél tiszta, felhőtlen ég alatt. A polariméter optikai tengelyének iránya a vízszinteshez képest  $-20^\circ$  volt.

### 2.2.2. *PERNYEMEZŐK HATÁSA POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA*

1995-től 2005-ig folytatódtak azok a vizes élőhelyeken folytatott terepkísérleteink, ahol az állóvizekben fejlődő/élő rovarok polarotaktikus vízkeresését tanulmányoztuk különböző optikai sajátosságú tesztfelületekkel. Ezek a kísérletek Kunféhértön, Balatonszemesen, Budapesten és a Hortobágyi Nemzeti Parkban folytak kisebb-nagyobb tavak közelében, az áprilistól szeptemberig tartó időszakban néhány héten keresztül (BERNÁTH et al. 2001a). Ha e terepkísérletek közelében a tarlót leégették, akkor vizsgáltuk, hogy a vízirovarok vonzódnak-e az erősen polarizáló fekete hamuhoz: szisztematikusan és több napon át rendszeresen bejártuk az egész pernyemezőt rovarokat keresve a hamuval borított földön.

2005. szeptember 3-án, 14:00 órakor (helyi nyári időszámítás = UTC+2) Balatonszemes közelében ( $46^\circ 82'$  É,  $17^\circ 78'$  K) a következő egyszerű viselkedési kísérletet hajtottuk végre: a Balatontól és a Balatonszemes mellett futó Tetves-patakból gyűjtött vízbogarakat (5 *Hydrophilus piceus*, 5 *Dytiscus marginalis* és 5 *Colymbetes fuscus* egyed) engedtünk el a pernyemező fölött 1 m magasságból, figyeltük viselkedésüket, amit fotókkal dokumentáltunk. Képalkotó polarimetriával mértük két pernyemező tükröződési-polarizációs sajátosságait: az egyiket 2005. szeptember 3-án, 13:00 órakor (UTC+2) Balatonszemes közelében (19. ábra), a másikat pedig 2005. szeptember 30-án, 14:00 órakor (UTC+2) Kunféhértónál ( $46^\circ 23'$  É,  $19^\circ 24'$  K) tiszta égbolt alatt, napsütésben. Az első mérést három héttel a tarló égetése után végeztük, a másodikat viszont a tarlóégetés másnapján. Mivel az idő tiszta és szélcsendes volt, a földet borító fekete hamuréteg mindkét pernyemezőn többé-kevésbé sértetlen volt a mérésekkor. A polariméter a szoláris meridiánhoz viszonyítva három különböző irányba nézett: (i) a szoláris meridiánnal párhuzamos (SM), (ii) az antiszoláris meridiánnal párhuzamos (ASM) és (iii) a szoláris meridiánra merőleges (MSM) irányba. Mindhárom esetben a polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-30^\circ$ -os szöget zárt be. A képalkotó polarimetria módszerének részletes leírását HORVÁTH és VARJÚ (1997) közölte. A pernyemezők polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban mértük.

Balatonszemesen a repülő vízirovarokat a pernyemező határára leterített, 2 m  $\times$  2 m-es fényes fekete műanyag fóliával monitoroztuk, 150 m-re a Tetves-pataktól és 2 km-re a Balatontól. Korábbi terepkísérleteink eredményeként (HORVÁTH és KRISKA 2008) már megállapítást nyert, hogy azokat a vízirovarokat, melyek a fekete műanyag fóliára szállnak, a visszavert fény vízszintes polarizációja vonzza, nem pedig ennek színe és/vagy intenzitása és/vagy szaga és/vagy hőmérséklete. 2005. szeptember 3-án a vízirovarok monitorozását 13:00 és 16:00 óra (UTC+2) között végeztük. A mintavételi órákat a vízirovarok optimális repülési időszaka szerint választottuk meg (BERNÁTH et al. 2004, CSABAI et al. 2006). A rovarokat kézzel



gyűjtöttük be a tesztfelületekről: a kisebbeket rovarszippantóval, a nagyobbakat pedig kézi hálóval. A befogott rovarokat 70%-os etanolban tartósítottuk a későbbi a laboratóriumi azonosításhoz.

### 2.2.3. *FOLYÓPARTI ÜVEGÉPÜLETEK HYDROPSYCHE PELLUCIDULA (TRICHOPTERA) IMÁGÓKRA GYAKOROLT HATÁSA*

Kutatásaink során a dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula*) üvegezett falú épületek melletti szaporodási viselkedését tanulmányoztuk Budapesten (47° 29' É, 19° 03' K) (9. ábra). A tömegtegzes rajzását április és május 15-e között vizsgáltuk 2006. és 2007-ben. Terepi megfigyelések naponta 14 órától 21 óráig (helyi nyári időszámítás = UTC+2) tartottak az ELTE Természettudományi Karának két lágymányosi épületénél, melyek a Dunától és egymástól is közel 100 méterre helyezkednek el. A tegzesek tömegrajzását az épületek mind a négy oldalánál kívülről és belülről is tanulmányoztuk a különböző emeleti szinteken.



**9. ábra:** (A) *H. pellucidula* rajzása függőleges ablaküvegek előtt. (B) Függőleges üvegfelületekre rászállt és ott hosszan időző tegzesek. Az egyedek sötét foltként jelennek meg az üvegtáblákon. (C-E) *H. pellucidula* egyedek függőleges ablaküvegeken.

Az épületekben központi légkondicionálás működik, de a bukóablakok nyitásával és csukásával, kézzel is szabályozható az épületek levegőjének minősége. A bukóablakok a nyitott állapotukban jelentős szerepet játszanak a tegzesek csapdába ejtésében.

Binokuláris távcsővel a legintenzívebb rajzási időszakban, szélcsendes és meleg időben, felhőtlen égbolt alatt öt napig számoltuk az épület 50-50 db 4 m<sup>2</sup>-es fényes fekete és fehér függőleges üvegtábláin tartózkodó tegzesek számát (28. táblázat). A számolás 5 percig tartott és három alkalommal 17:30-kor, 18:00-kor és 18:30-kor (UTC+2) lett megismételve egy napon.

A tömegtegzesek polarotaxisának vizsgálatára választásos laboratóriumi kísérleteket végeztünk, melyek azon alapultak, hogy a rajzáskor megtermékenyített nőstények természetes, zavartalan körülmények között mindig visszatérnek a vízhez, hogy lerakják tojásaikat. E kísérletek során 100 db *H. pellucidula* nőstényt helyeztünk el üveg akváriumban, melynek alját két kísérletben két különböző optikai sajátságú felülettel takartuk le egyenlő arányban. Az akvárium oldalhosszúságai a következők voltak: 120 x 50 x 50 cm. Az akvárium fenéklapjának két egyenlő területű része (60 x 50 cm) volt befedve 2-2 tesztfelülettel a két kísérletben. A tesztfelületek az első kísérletben alumínium fólia és fényes fekete műanyag fólia, míg a második kísérletben matt fekete szövet és fényes fekete műanyag

fólia voltak. Az épület bukóablakainál kézhálóval befogott tegzeseket a párasított terű akváriumba helyeztük, amelyet fehér vászonnal és falappal fedtünk le. A kísérletek két-két napja alatt az akváriumok természetes megvilágítási körülmények között voltak. A tojáscsomók leszámllását a tesztfelületek 6-6 egyenlő felületű (10 x 50 cm) sávjain végeztük el (29. táblázat). A tojáscsomók egyenként 4-11 tojást tartalmaztak. A 28. és 29. táblázat adatainak összevetése  $\chi^2$ -próbával történt a Statistica 6.1. program segítségével.

A tesztfelületek, az épület és ez utóbbi függőleges üvegfelületei fénypolarizáló-képességét képalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. A módszer részletes leírását HORVÁTH és VARJÚ közölte (1997, 2004). A tesztfelületek polarizációs mintázatait korábbi kutatásaink során is kimértük már (pl. KRISKA et al. 1998).

#### **2.2.4. TEMETŐBEN VIZET KERESŐ POLAROTAKTIKUS SYMPETRUM SZITAKÖTŐK VISELKEDÉSE A FÉNYT POLARIZÁLÓ FEKETE SÍRKÖVEKNÉL**

Választásos terepkísérleteinket 2006. június 24–26. és július 6–8. között végeztük napsütéses, meleg időben, a kiskunhalasi ótemető (46° 43' É, 19° 05' K) egy fáktól és bokroktól mentes területén. A sűrű bokrok és terebélyes fák kora tavasztól késő őszig a lombátruk árnyával borítják az elhunytak végső nyughelyét, bár a földutak szomszédságában lévő sírok fölött az ég általában nyitott. A temető Kiskunhalas kertés lakóövezetének szélén áll, ahol a legközelebbi vizes élőhely, egy kisebb tó, 2 km-re fekszik a temetőtől. E tavacsánál a Libellulidae családba sorolt *Sympetrum* fajokon túl az Aeshnidae és Corduliidae család képviselőit tudtuk megfigyelni.

A tesztfelületek és a sírkövek fénypolarizáló-képességét képalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. A sírkövek és tesztfelületek szintelenek voltak, ezért polarizációs mintázatuk független volt a fény hullámhosszától. A 25. ábrán a spektrum zöld tartományában lettek feltüntetve a polarizációs mintázatok. Az alkalmazott képalkotó polarimetriai módszer részletes leírását HORVÁTH és VARJÚ közölte (1997, 2004). A tesztfelületek polarizációs mintázatait korábbi kutatásaink során is kimértük már (pl. KRISKA et al. 1998).

Választásos terepkísérleteinket 2006. június 24–26. és július 6–9. között végeztük napsütéses, meleg időben, a kiskunhalasi temető egy fáktól és bokroktól mentes területén. Azt vizsgáltuk, hogy két 1 m<sup>2</sup>-es vízszintes, különböző tesztfelület hány szitakötőt vonz (30. táblázat). Az egyik tesztfelület mindig egy vízszintes fényes fekete műanyag fólia volt, ami jól modellezte a vízszintes fényes fekete sírkövek optikai sajátságait. A másik tesztfelület egy fényes fehér műanyag fólia, vagy alumínium fólia, vagy matt fekete, illetve fehér vászon volt. A terepkísérletek során a tesztfelületek pozícióját óránként felcseréltük. A fényes fekete műanyag fólia, a sötét vizek felszínéhez hasonlóan, erősen és vízszintesen poláros fényt tükrözött, míg a többi tesztfelületről függőlegesen vagy ferdén poláros, illetve polarizálatlan fény verődött vissza (KRISKA et al. 1998). E különböző polarizálóképességű szintelen és szagtalan tesztfelületekkel megállapítható volt, hogy a róluk visszaverődő fény intenzitásának vagy polarizációjának van-e szerepe a szitakötők vonzásában. A tesztfelületek sarkain a szitakötők ülőágául szolgáló 30 cm hosszú, függőleges fapálcákat szúrtunk a földbe. Az ülőágak az idő előrehaladtával árnyékban, vagy napon voltak. 3 méter távolságból folyamatosan figyeltük a tesztfelületekhez odavonzott szitakötők számát, ülőágakon való elhelyezkedését és viselkedését az idő függvényében. Az ülőágáról 30 szitakötő egyedet gyűjtöttünk be, amelyeket laboratóriumi körülmények között határoztunk meg. A 30. táblázat adatainak összevetése  $\chi^2$ -próbával történt a Statistica 6.1. program segítségével.



### 2.2.5. *A TISZAVIRÁG (PALINGEMIA LONGICAUDA) ÉS A DUNAVIRÁG (EPHORON VIRGO) RAJZÁSI VISELKEDÉSÉNEK MÓDOSULÁSA A KÖRNYEZET TERMÉSZETES POLARIZÁCIÓS MINTÁZATÁNAK MEGVÁLTOZÁSÁRA*

#### 2.2.5.1. A TIVADARI TISZA-HÍD HATÁSA A TISZAVIRÁG (*PALINGEMIA LONGICAUDA*) KOMPENZÁCIÓS REPÜLÉSÉRE

A tiszavirág tivadari Tisza-hídnál tapasztalt különleges viselkedésének okát a jelenség részletes dokumentálásával, valamint a környezet polarizációs mintázatainak mérésével tártuk föl. A dokumentálás során Tivadar mellett (48° 03' N, 22° 31' E, 27. ábra) 2009. június 25-én fénykép- és videofelvételeket készítettünk a rajzásról a híd alatt és fölött a bal partról és a hídról. A híd alatt és fölött percenként fotóztunk 18:45 és 19:34 (helyi nyári időszámítás = UTC+2) között. A fényképek azonos márkájú és optikájú fényképezőgéppel (Fuji Finepix S2 Pro, 105 mm Micro Nikkor) készültek. Az elkészült, összesen 50 db fényképen leszámoltuk a tiszavirág egyedeket, a kapott adatokat táblázatba foglaltuk (31. táblázat). A nagyfelbontású fényképeken nagy nagyításon szabad szemmel azonosítottuk a tiszavirág egyedeket, a kérészek helyzetét a kiértékelt fotókon sárga korongokkal jelöltük.

A hídról történő folyamatos megfigyelés, fotózás és videózás eredményeként dokumentáltuk a tiszavirág egyedek viselkedését a híd mindkét oldalán, a híd alatt és fölött, valamint a híd aszfaltútjánál.

A híd és környezetének polarizációs jellemzőit képalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában tiszta égboltnál, napnyugtakor. A mérés alatt a polariméter optikai tengelye a vízszintessel –20°-ot zárt be. A módszer részletes leírása HORVÁTH és VARJÚ (1997) publikációjában olvasható.

#### 2.2.5.2. A DUNAVIRÁG (*EPHORON VIRGO*) FOTO- ÉS POLAROTAXISÁN ALAPULÓ KOMPLEX ÖKOLÓGIAI CSAPDA

Rajzásvizsgálat:

A dunavirág rajzását 2012. és 2013. augusztus 15. és szeptember 2. között vizsgáltuk minden este Tahitótfaluban (47° 75' N, 19° 08' E), a Duna mellékágán átívelő közúti hídon és a híd alatti folyószakaszon.

A 2012. szeptember 1-i tömegrajzáskor 19:30 és 20:30 között kérészeket gyűjtöttünk a híd egy lámpája alatt az aszfaltútra hullott kérésztömegből. A begyűjtött 10 minta mindegyike közel 100-100 egyedeket tartalmazott, amelyek nemét később a laboratóriumban határoztuk meg. A rajzás alatt folyamatosan figyeltük, hogy a híd mely részeire szállnak le a kérészek és a nőstények hol rakják le tojásaikat. 2012-ben a tömegrajzások csúcspontján, mikor a híd lámpái körül tízezerszámmra örvénylett a kérésztömeg, kézilámpával vizsgáltuk a fénynek a kérészek mozgására gyakorolt hatását.

Kézilámpás vizsgálat:

A kézilámpás vizsgálatot elvégeztük a híd alatti folyószakaszon a hídtól 1 km távolságban is. Ekkor a parton állva a híd felé a folyó középvonala fölött a kompenzációs repülésben résztvevő kérészekre irányítva a fénycsóvát figyeltük viselkedésüket. A rajzás során digitális kamerákkal (Nikon D90, Nikon D3200) filmfelvételekkel és fényképfelvételekkel dokumentáltuk megfigyeléseinket.

Polárszűrős vizsgálatok:

A 2012-ben elvégzett eredményes kézilámpás elővizsgálatok nyomán 2013-ban augusztus 23-án, 24-én, 27-én és 28-án terepkísérleteket végeztünk azonos fényintenzitású vízszintes poláros és polarizálatlan fényforrások dunavirágokra gyakorolt hatásának vizsgálatára. A kísérlet lebonyolítása lényegileg megegyezik a 2.1.5. fejezet 1. terepkísérlet (1-4. nap)

résznél leírtakkal. Az eltérő részletek a kutatást ismertető publikációnkban érhetők el (SZÁZ et al. 2015).

Képfeldolgozás, statisztikai kiértékelés:

A kísérletekben készült közel 1500 fotó kiértékelése egy erre a célra készített szoftverrel, egy foltdetektorral történt (SZÁZ et al. 2015). E szoftver fölismerte a fekete háttér előtt a dunavirág egyedekhez tartozó, egymástól elkülönülő fehér képpont csoportokat, majd ezeket összeszámolta. A fényképeken látszó fehér tereptárgyakat a kiértékelés előtt kimaszkoltuk, így azok nem kerültek bele a foltszámlálásba (7. ábra). Mivel a kapott adatok nem mutatnak egyértelműen normál eloszlást, ezért nemparaméteres Mann-Whitney U tesztet használtunk a statisztikai elemzés során.

Képalkotó polarimetria:

A vizsgált folyószakaszon átívelő híd polarizációs mintázatát is mértük a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában olyan napállásnál, melynél a Nap pozíciója megfelelt a telihold helyének a rajzási időszakban. Így a megvilágítási körülmények hasonlóak voltak, ugyanakkor a napfény nagyobb intenzitása lehetővé tette a képalkotó polarimetriai mérést, amire a fényszegény holdvilágos éjszakai körülmények között nem lett volna lehetőségünk. Mértük továbbá a híd aszfaltútjának polarizációs mintázatait napnyugta előtt (mikor a tiszta égről jövő fény világította meg az utat) és éjjel (mikor egyedül csak a híd lámpái világították meg az utat). Az alkalmazott képalkotó polarimetriai módszer részletes leírása HORVÁTH és VARJÚ (1997, 2004) közleményeiben található meg.

### 3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

#### 3.1. POLAROTAXIS KIMUTATÁSA, JELLEMZŐINEK ÉS BIOLÓGIAI SZEREPÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOK ESETÉBEN

##### 3.1.1. A TISZAVIRÁG (*PALINGENIA LONGICAUDA*) POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSE

##### 3.1.1.1. Eredmények

A tiszavirág–rajzás kezdetekor elsőként a hím szubimágók keltek ki, melyek a partra repültek, ahol a vízparti növényzeten vagy az agyagos fövényen vedlettek imágóvá. A már párzóképes rovarok ezt követően visszarepültek a folyó sodorvonala fölé, ahol megkezdték jellegzetes vízkövető repülésüket. Ennek során többnyire 10–50 cm magasságban repültek a víz fölött, nagyjából 20–50 m hosszú szakaszokból álló cikk-cakk vonalakban. A nőstény imágók a rajzás második részében, 18:30 után jelentek meg a folyó fölött. Ezek, a párzást követően rajokba szerveződve megkezdték a Tisza fölött 10–15 m-es magasságban a kompenzációs repülésüket. Ennek során a Tisza sodorvonalát követve repültek a folyásiránnyal szemben 1–2 km-t, majd a vízre ereszkedve lerakták tojásaikat. Rajzáskor az első tiszavirág szubimágók 17 órakor jelentek meg, a néhány ezres tömegrajzás 18:30 körül alakult ki. A rajzó állatok egyedszáma 19:30-ra néhány százra csökkent, 20:30-ra pedig az utolsó egyedek is eltűntek.

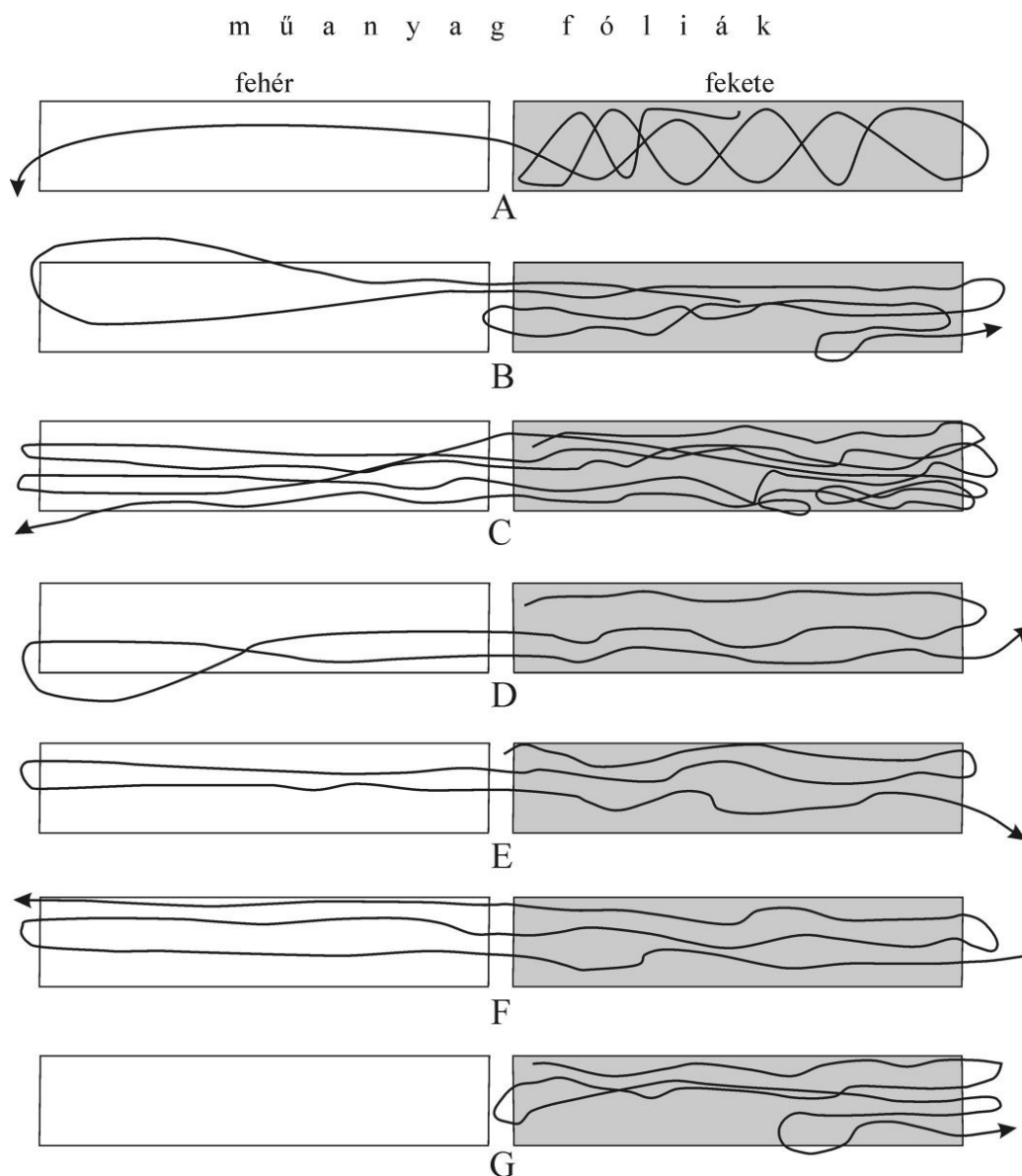
Terepkísérletünk során lehetőségünk volt megfigyelni a kérészek tesztfelületekre adott, a polarotaxis igazolásában döntő reakcióit (KRISKA et al. 2007). A *P. longicauda* imágók igen érzékeny és sérülékeny rovarok, ezért a begyűjtött 60 rovar közül csak 16 kapott szárnyra a tesztfelületek fölött a gyűjtődobozok fölnyitásakor. Ezek viselkedése két reakciótípusba volt besorolható:

(A) 9 kérész a 16-ból elengedés után rögtön elhagyta a tesztfelületet, és nagyobb ívet leírva emelkedett egyre följebb, közel 30 m-es magasságig. E kérészek különböző irányokba repültek, egy részük eltávolodott a Tiszától, míg mások közelítettek a folyóhoz. Az utóbbiak, amint észrevették a vízfelszínt, egyenesen odarepültek (2A. ábra). Többük a közelben vadászó füsti fecskék (*Hirundo rustica*) áldozatává vált. A 16 egyed közül 14-et a fekete műanyag fólia középső részén, kettőt pedig a fekete és a fehér műanyag fólia között engedtünk el.

(B) 7 kérész a 16-ból a tesztfelület fölött maradt egy rövid ideig, miközben a víz fölötti repülés jellegzetességeit mutatta (10. ábra). E rovarok többnyire 40–80 cm-es magasságban, de mindig 120 cm-nél alacsonyabban, egyenes vonalú vagy jellegzetes cikk-cakk pályán repültek a műanyag fóliák fölött. Csak addig maradtak a fóliák fölött, amíg elegendően nagy látószögben láthatták azokat. Követték a fóliafelszínt, és több alkalommal visszafordultak a széleinél, azonban egyik egyed sem maradt a műanyag fóliák fölött 2 percnél hosszabb ideig. Végül mindegyikük fölemelkedett, és az A típusú reakcióra váltva, eltávolodott a fóliáktól. Mindegyik tiszavirág elhagyta a tesztfelületeket, amikor 120 cm-nél magasabbra emelkedett. A csillogó alumínium fólia, a matt fekete vászon és a matt fehér vászon egyáltalán nem befolyásolta a repülő imágókat. A 10. ábrán láthatóak a B típusú reakciót adó egyedek pályái a műanyag fóliák fölött.

Az 1. kérészt (10A. ábra) a fekete fólia közepe fölött engedtük el. Lassan, cikk-cakk vonalban repült a fekete fólia fölött mintegy 60 másodpercig. Végül egyenesen átrepült a fehér fólia fölött, majd gyorsan emelkedve elhagyta a tesztfelületeket. Hamarosan látóterébe került a folyó, ekkor egyenesen a part felé fordult, és csatlakozott a folyó fölött rajzó kérészekhez.

Viselkedéséből arra következtetünk, hogy ez az egyed a fekete fóliát részesítette előnyben a fehérrel szemben.



**10. ábra:** A harmadik terepkísérletben elengedett 7 hím tiszavirág (*Palingenia longicauda*) röppályája a Tisza partján elhelyezett fekete és fehér műanyag fóliák fölött, ahonnan a folyó nem volt látható. A közvetlen közelben lévő másik három tesztfelületet (matt fehér és matt fekete vászont, illetve alumínium fóliát nem ábrázoltam, mivel azok nem befolyásolták a kérészek viselkedését.

A 2. kérészt (10B. ábra) is a fekete fólia közepe fölött engedték el. A fehér fólia fölött hosszan elnyújtott hurkokat írt le, visszafordult a szélénél, majd a fekete fólia fölé szállt, ahol még közel 40 másodpercen át cikk-cakk vonalban repült, míg végül elhagyta a tesztfelületeket. Ebből arra következtetünk, hogy ez az egyed is a fényes fekete felületet részesítette előnyben.

A 3. kérészt (10C. ábra) a fekete és a fehér fólia közötti határoló gyepsáv fölött engedték el. A fekete műanyag fólia felé indult, és mintegy 80 másodpercen keresztül repült a két fólia közös hossz tengelye mentén. A fehér fólia fölött pályája egyenes, a fekete fölött cikk-cakkos, hurkokkal tarkított volt. Mindebből arra következtetünk, hogy ez az egyed szintén a fényes fekete felületet részesítette előnyben.

A 4., 5. és 6. kérész nagyon hasonló módon reagált a fóliákra (10D., E., F. ábra). Mind a 4. és 5. egyed, melyeket szintén a fekete és a fehér fóliát elválasztó gypsáv fölött engedtünk el, mind a 6. egyed, amelyet a fekete fólia fehér fóliától távolabbi szélénél, a fekete fóliától jobbra röptettünk, a fekete fólia felé indult. Mindhárom egyed elhagyta a tesztfelületeket, miután végigrepültek a fehér és fekete fólia fölött. A fehér fólia fölött egyenes, a fekete fölött cikk-cakk vonalban haladtak. Ebből arra következtetünk, hogy ez a három egyed is a fekete fóliát részesítette előnyben.

A 7. kérészt (10G. ábra) szintén a fekete és a fehér fólia közti gypsáv fölött engedtük el. A fekete fólia felé indult, és csak e fölött repült 20 másodpercig lassan, a fólia szélénél visszafordulva, 40 cm-nél nem magasabban. Végül magasan a föld fölé emelkedve elhagyta a tesztfelületeket. Ebből arra következtetünk, hogy ez az egyed is a fekete fóliát részesítette előnyben.

Mivel csak a műanyag fóliák befolyásolták a tiszavirágok repülését, és e kérészek mindenkor a fekete fóliát részesítették előnyben a fehérrel szemben, arra következtetünk, hogy a *P. longicauda* szintén rendelkezik polarotaxissal, vagyis a vizeket e faj is a vízfelszínről tükröződő, vízszintesen poláros fény felé repülve találja meg.

Ezt a következtetést a terepi megfigyeléseinken túl a képalkotó polarimetriai méréseink is alátámasztották: a fekete fólia erősen (lineáris polarizációfok:  $p \approx 74\%$ ) és minden esetben vízszintesen, míg a fehér fólia gyengén ( $p < 20\%$ ), és nem is mindig vízszintesen poláros fényt vert vissza. A matt fekete és matt fehér vászonról gyakorlatilag polarizálatlan ( $p \approx 0\%$ ) fény szóródott, míg az alufólia gyakorlatilag a polarizáció módosítása nélkül verte vissza a környezetből különböző irányokból rá vetülő, gyakorlatilag polarizálatlan fényt.

### 3.1.1.2. Értékelés

A tiszavirág polarotaxisának kimutatását célzó kutatásunkban a *P. longicauda* két, egymástól jelentősen különböző repülési viselkedését sikerült megfigyelnünk a terepkísérletben használt tesztfelületek fölött. 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-es magasságig 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.

Mikor a kérészek áthaladnak a fólia széle fölött, a vízkövető repülést fölváltja a vízkereső repülés, mely mindaddig tart, amíg a tiszavirág nem érzékeli újra a tesztfelület polarizációs jelét, ami ismét kiváltja a kérész vízkövető repülését. Ha a repülő tiszavirág szem elől téveszti a polarizációs jelet, akkor elhagyja a fóliát. Mind a 7 megfigyelt hím imágónál a vízkövető repülést vízkereső repülés váltotta fel, miután az állatok átrepülték a műanyag fólia határát. Megfigyeléseink szerint a kérészek csak akkor térnek vissza a műanyag fóliához, ha a repülési magasságuk kisebb, mint 4–5 m és az orientációjuk lehetővé teszi a műanyag fólia polarizációs jelének újbóli érzékelését. A kísérletünkben alkalmazott tesztfelületek mérete (20 m<sup>2</sup>) közel eshetett a vízdetektálás szempontjából kritikus legkisebb vízfolt mérethez, amely megfelelő körülmények között még képes kiváltani a tiszavirág vízkövető repülését.

A vízkereső repülés során az egyedek folyamatosan emelkedő, egyenes vonalú vagy nagy körívek mentén haladó repülést végeznek, amely lehetővé teszi a számukra, hogy a sűrű ártéri növényzet fölé emelkedve észleljék a folyót. A kérészek vízkereső repülését azonban sem a széles folyók, sem a keskeny patakok fölött nem lehet megfigyelni az erősen és vízszintesen polarizáló, megfelelően nagy kiterjedésű vízfelület állandó jelenléte miatt.

A 7 *P. longicauda* egyednél megfigyelt vízkövető repülést alacsony repülési magasság és cikk-cakkos röppálya jellemzi, amely igen hasonló egyes pataklakó kérészfajok, például az *Ephemera danica*, *Ecdyonurus venosus*, *Epeorus silvicola*, *Baetis rhodani*, *Rhithrogena*

*semicolorata* és *Haproleptoides confusa* fekete műanyag fólia fölötti repüléséhez (KRISKA et al. 1998). Ez utóbbi kérészfajokat kizárólag az erősen és vízszintesen poláros fényt tükröző fekete műanyag fóliák vonzották. E kérészfajokkal ellentétben a 7 tiszavirág egyed közül 5 esetében a kismértékben polarizáló ( $p < 15\%$ ) fényes fehér műanyag fólia fölött is megjelent a vízkövető repülés. A megfigyelt jelenség feltehetően a Tisza vizében feloldott agyagásványok vizet világosító hatására vezethető vissza, amire a költői "szőke Tisza" elnevezés is utal. A világosabb vízfelszín a visszavert fény alacsonyabb polarizációfokát eredményezi (Horváth és Varjú 2004), ennek megfelelően a Tisza mérsékelten ( $20\% < p < 30\%$ ) vagy kevésbé ( $p < 20\%$ ) poláros fényt ver vissza. Mindezek alapján feltételezhető, hogy a tiszavirág egyedek vízkövető repülése a kevésbé polarizáló fehér műanyag fólia fölött a tiszavirág egyfajta adaptálódását demonstrálja a Tisza kevésbé vagy mérsékelten poláros felszínéhez. Mindemellett figyelemreméltó, hogy a *P. longicauda* cikk-cakkos röppályáját csak az erősen és vízszintesen poláros fekete műanyag fólia fölött figyeltük meg.

A Tisza fölött a kérészek egyenes vonalú vagy cikk-cakkos repülését láttuk, a hím imágók egyszer sem emelkedtek 2 m-es magasság fölé.

Nőstény *P. longicauda* egyedekkel nem sikerült elvégezni a röptetési kísérletet, ugyanakkor a fekete műanyag fólián maradó nőstények lerakták tojásaikat a fóliára. Ez a folyamat azonban valószínűleg reflexszerűen ment végbe a rovar elpusztulása előtt, ahogy az természetes körülmények között is bekövetkezik a vízfelszínen.

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 vízfelszínéhez 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 kompenzációs repülés során fontos a folyó nagy kiterjedésű és vízszintesen polarizáló felülete, ami a nagyobb magasságban repülő kérésznőstények számára is biztos támpontot jelent a folyásiránnyal szembeni, néhány kilométeres kompenzációs repülés során.

A 20 m<sup>2</sup>-es tesztfelületeink alkalmasnak bizonyultak arra, hogy kiváltsák a *P. longicauda* vízkövető repülését olyan helyszínen, ahonnan nem látható a folyó. Jóval kisebb (1–2 m<sup>2</sup>), vízszintesen poláros fényt tükröző felszínek képesek megtéveszteni a hegyi patakokból kirajzó kérészeket (KRISKA et al. 1998). A tiszavirág azonban sokkal nagyobb vízfelszín fölött rajzik, ezért a mi viszonylag kis területű műanyag fóliáink csak az egészen alacsonyan repülő kérészeket tudták polarotaktikusan megtéveszteni. Nagyobb tesztfelületek alkalmazásával a hatás valószínűleg kifejezettebb lett volna. Ám meg kell jegyeznünk, hogy nagyobb tesztfelületek alkalmazása szinte lehetetlen egy ilyen rövid időtartamra korlátozódó terepkísérletben, de a tesztfelületek méretének többszörözésével sem lett volna akkora a fóliák mérete, hogy az összevethető lett volna a Tisza hatalmas vízfelületével (2. ábra). A közepes méretű, mesterséges, vízszintesen polarizáló felületek, mint amilyenek például a keskeny száraz aszfaltutak, nem fejtenek ki jelentős hatást a rajzó tiszavirágokra. De a vízpart közvetlen közelében húzódó, erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő, nagy kiterjedésű, nedves és száraz aszfaltfelületek már megtéveszthetik a tiszavirágokat, és azok rendellenes rajzását válthatják ki (LADÓCSY 1930, MÁLNÁS et al. 2011).

A tiszavirág rajzásakor két viselkedésforma (vízkövető és vízkereső repülés) jellemző az állatokra, melyek kiváltásában az erősen és vízszintesen poláros, megfelelően nagy kiterjedésű felület megléte vagy hiánya jelenti a kulcsingert. A kérészek mellett számos polarotaktikus faj ismert a szitakötők körében is, ami a vízhez kötődő rovarok egy másik ősi rendjét képezi (HORVÁTH és VARJÚ 2004). Habár a tudomány számára ismert polarotaktikus rovarfajok száma korlátozott, a tény, hogy mindeddig egyetlen nem polarotaktikus fajt sem sikerült találni e vízhez kötődő csoportokban, azt valószínűsíti, hogy a polarotaxis egy

pleziomorf karakter ezekben az ősi rovarrendekben. Ez a tulajdonság fennmaradt a kérészek evolúciója során, így kimutatható a tiszavirágnál is, annak ellenére, hogy a sikeres szaporodás szempontjából a polarotaxis kevésbé tűnik fontosnak a Tisza fölött rajzó kérészfajnál.

### 3.1.2. POLAROTAXIS AZ ÁRVASZÚNYOGOKNÁL

#### 3.1.2.1. Eredmények

A 1. és 2. terepkísérletben az árvaszúnyogok nem érintették és nem is szálltak le a matt fehér és matt fekete tesztfelületekre. Habár szabad szemmel jól megfigyelhető volt az árvaszúnyogok rajzása a kiterített tesztfelületeknél, a matt felületek érintését és az azokra való leszállást nem lehetett megfigyelni.

Nagyon kevés, mindössze 8 és 9 árvaszúnyogot fogtak a fehér olajtálcák, míg a fekete olajtálcák igen sok, 801 és 799 egyedet csapdáztak (1-2 táblázat).

árvaszúnyog taxonok	olajtálcák		$\chi^2$ próba p, df=1 fekete-fehér párok nemenkénti bontásban	$\chi^2$ próba p, df=1 fekete-fehér párok nemektől függetlenül
	fekete	fehér		
<i>Chironomidae</i> spp. (8 faj)	n = 20	n = 0	< 0.001	< 0.001
	h = 0	h = 0	-	
<i>Chironominae</i> sp. (1 faj)	n = 45	n = 1	< 0.001	< 0.001
	h = 0	h = 0	-	
<i>Chironomus riparius</i>	n = 545	n = 6	< 0.001	< 0.001
	h = 21	h = 1	< 0.001	
<i>Micropsectra atrofasciata</i>	n = 5	n = 0	< 0.001	< 0.001
	h = 5	h = 0	0.025	
<i>Micropsectra notescens</i>	n = 80	n = 0	< 0.001	< 0.001
	h = 5	h = 0	0.025	
<i>Rheocricotopus atripes</i>	n = 0	n = 0	-	0.046
	h = 4	h = 0	0.046	
sum	n = 765	n = 7	< 0.001	< 0.001
	h = 36	h = 1	< 0.001	

**1. táblázat:** Az első terepkísérlet során a fekete és fehér olajtálcákkal befogott árvaszúnyog taxonok egyedszáma és neme (n: nőstény, h: hím), valamint a két különböző  $\chi^2$  próba p értékei. Az első próba esetében a fekete és fehér tálcák által csapdázott taxonoknál az egyedszámok nemenként lettek összehasonlítva. A második próbánál a taxonokhoz tartozó összesített egyedszámok lettek összevetve.

dátum (2010)	olajtálcák		$\chi^2$ próba p, df=1 fekete-fehér párok nemektől függetlenül
	fekete	fehér	
június 9.	253	2	< 0.001
június 10.	189	1	< 0.001
június 11.	169	4	< 0.001
június 12.	188	2	< 0.001
sum	799	9	< 0.001

**2. táblázat:** A második terepkísérlet során, a talajszinten elhelyezett fekete és fehér olajtálcákkal befogott árvaszúnyogok száma és a  $\chi^2$  próba p értékei.

Az 1. kísérletben a fekete és fehér olajtálcák  $765/36 = 21.3$ -szor és  $7/1 = 7$ -szer több nőstény árvaszúnyogot csapdáztak, mint hímet. A csapdák által fogott 13 árvaszúnyog faj közül négyet lehetett faji szinten (*Chironomus riparius*, *Micropsectra atrofasciata*, *M. notescens*, *Rheocricotopus atripes*), egyet nem szinten, és nyolcat család szinten azonosítani (1. táblázat).

Az 1. terepkísérletben az összes árvaszúnyog taxon statisztikailag magasan szignifikánsan jobban vonzódott a fekete olajtálcához ( $N = 801$ ), mint a fehérhez ( $N = 8$ ).

Hasonló eredményeket kaptunk, mikor a 2. kísérletben a tesztfelületek az aszfaltúton voltak: a fekete olajtálca  $1600/17 = 94$ -szer vonzóbb volt az árvaszúnyogok számára, mint a fehér (2. táblázat), és az aszfaltfelszín nem érintgette e rovarok. A 2. kísérletben begyűjtött árvaszúnyogok nem lettek meghatározva és nemek szerint sem lettek elkülönítve. Mivel e kísérletet közvetlenül az 1. után, annak helyén végeztük, ezért föltételezésünk szerint ugyanazon árvaszúnyogfajok hasonló ivararányával fordultak elő mindkét kísérletben. Tehát a vizsgált árvaszúnyogok gyakorlatilag csak a fekete olajtálcákhoz vonzódtak, függetlenül attól, hogy azok a talajszinten vagy magasabban voltak.

A polarimetriai mérések (3. ábra) alapján megállapítható volt, hogy a piros gépkocsitető, a fekete olajtálca, a vízszintes matt fekete szövet és a száraz aszfaltfelszín vízszintesen poláros fényt vert vissza a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. Ezzel szemben a fehér olajtálcáról és a matt fehér szövetről visszavert fény polarizációiránya függőleges volt a vörös (650 nm) és zöld (550 nm) spektrális tartományban és csak a spektrum kék (450 nm) tartományában volt vízszintes. A gépkocsi karosszéria bizonyos részei, beleértve a tetőt is, erősen poláros fényt tükröztek (polarizációfok  $p > 50\%$ ) a spektrum zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. A fehér olajtálca és a matt fehér szövet nagyon gyengén poláros fényt vert vissza ( $p < 10\%$ ), a matt fekete szövet és a szürke aszfaltfelszín gyengén polárosat ( $p < 18\%$ ), míg a fekete olajtálca erősen poláros fényt tükrözött ( $p > 60\%$ ). E polarizációs jellemzők következménye az volt, hogy csak a fekete olajtálcát és a gépkocsi egyes részeit téveszthették össze a vízfelszínnel a polarotaktikus árvaszúnyogok (késsel jelölt részek a 3. ábra utolsó sorában).

Ez azt mutatja, hogy a vizsgált árvaszúnyogok a vízszintesen poláros fény által kiváltott pozitív polarotaxissal vonzódtak a fekete olajtálcákhoz.

Mindkét kísérletben a közvetlen napfényt nem kapó négy tesztfelület hőmérséklete azonos volt és megegyezett a levegő hőmérsékletével.

### 3.1.2.2. Értékelés

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 (1. táblázat).

Ha terepkísérleteinkben az árvaszúnyogok választását pozitív fototaxis vezérelte volna, akkor e rovaroknak erőteljesen vonzódniuk kellett volna a matt fehér szövethez és a fényes fehér olajtálcához is, de egyik fehér tesztfelület sem volt vonzó számukra. Ha az árvaszúnyogok választását negatív fototaxis vezérelte volna, akkor a matt fekete szövethez és a fényes fekete olajtálcához kellett volna vonzódniuk. Ezzel szemben a nőstény árvaszúnyogok gyakorlatilag csak a fekete olajtálcához vonzódtak, ami erősen és vízszintesen poláros fényt tükrözött a Brewster-szögben. Mindezek alapján megállapítható, hogy a vizsgált árvaszúnyogfajok nőstényei, más vízirovarokhoz hasonlóan, pozitív polarotaxissal rendelkeznek. A tesztfelületeink hőmérséklete mindig azonos volt, ezért az árvaszúnyogok választását nem lehetett a különböző hőmérsékletekkel magyarázni. Mivel a tesztfelületek árnyékban voltak, nem világította meg őket közvetlen napfény, így a fekete szövet és a fekete olajtálca nem volt melegebb a fehér szövetnél és a fehér olajtálcánál, mint ahogyan az közvetlen napsütésben lett volna.



Terepkísérleteinkben a ragacos olajfelszín befogta az azt érintő összes árvaszúnyogot. Ha a szövetet érintették volna az árvaszúnyogok, akkor ezen egyedek túlélhettek volna s így ők később beszámíthatnának volna az olajtálcák által fogott árvaszúnyogok közé. E lehetőség azonban nem befolyásolta az eredményeinket, mert a matt fehér és matt fekete szövetek felületét egyáltalán nem érintették és nem is szálltak rájuk az árvaszúnyogok. Az olajtálcákban használt étolaj szag- és színhatása sem befolyásolhatta az árvaszúnyogok választását, mert a fekete és fehér olajtálcákban ugyanazt az étolajat használtuk. A fehér és fekete matt szövetek esetében is hasonló volt a helyzet, mert mindkét szövet lepedőanyag volt. Mivel a tesztfelületek színtelenek (feketék és fehérek) voltak, ezért különböző szerepük csak a fototaxis és a polarotaxis esetében lehetett. Az 1. terepkísérletben a fehér és fekete olajtálcák 7-szer és 21-szer több nőtényt fogtak, mint hímeket, amit azzal lehet magyarázni, hogy a párzást követően a nőtények tojásrakó helyül szolgáló vízfelszínt keresnek.

Más jelenség is magyarázhatja a kapott eredményt, például a fajok eltérő ivararánya. A *Tanytarsus* nem esetében 65-70%-os a nőtények megjelenése (LINDEBERG 1971), ugyanakkor más fajoknál pedig 1:1 az ivararány (BUTLER 1984). Ráadásul az árvaszúnyogok párzása többnyire rajokban történik, ami után a nőtények tojásrakó helyet keresve elrepülnek, míg a hímek a rajban maradnak (ARMITAGE 1995). Az általunk begyűjtött árvaszúnyogok különböző taxonómiai csoportokba tartoztak, ezért az előbbieken említett tulajdonságok eltérőek lehettek esetükben. E tény és az olajtálcával befogott árvaszúnyog-nőtények erős dominanciája (93-100%) arra utal, hogy a pozitív polarotaxisnak meghatározó szerepe van a nőtény árvaszúnyogok viselkedésében. A befogott árvaszúnyogok jelentősen eltérő ivararányának másik lehetséges magyarázata, hogy a hímek és nőtények látószerve jelentősen eltér egymástól. Hasonlóan sok más rovarhoz, az árvaszúnyogok szeme is mutathat ivari kétalakúságot (dimorfizmust). A *Belgica antarctica* fajnál például a hímek szeme 25%-kal nagyobb fényérzékeny területtel rendelkezik, mint a nőtényeké (MEYER-ROCHOW és REID 1994).

Azon eredmény, hogy a vizsgált árvaszúnyogok pozitív polarotaxissal rendelkeznek, hasznosak lehetnek a taxonnal foglalkozó kutatók számára, mivel ez lehetőséget ad erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő árvaszúnyog csapdák előállítására és alkalmazására, melyek egyébiránt csökkenthetik az árvaszúnyog tömegrajzásból eredő káros idegenforgalmi hatásokat is.

### 3.1.3. BÖGÖLYÖK POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

#### 3.1.3.1. POLAROTAXIS KÍSÉRLETI BIZONYÍTÁSA BÖGÖLYÖKNÉL: A POLARIZÁCIÓLÁTÁS LEHETSÉGES SZEREPE A BÖGÖLYÖK SZAPORODÁSI ÉS TÁPLÁLKOZÁSI VISELKEDÉSÉBEN

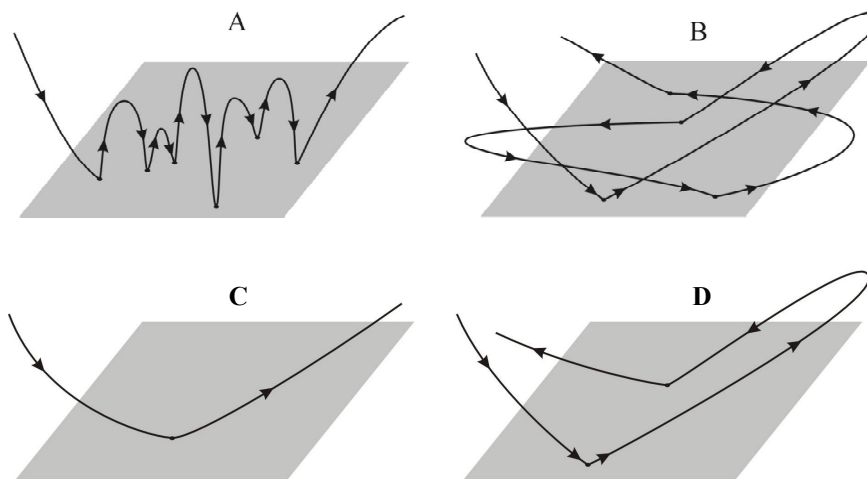
##### 3.1.3.1.1. Eredmények

A választásos kísérleteinkben használt tesztfelületek nem voltak színesek, ezért a tükröződéses polarizációs mintázataik függetlenek voltak a fény hullámhosszától. A vízszintes helyzetű, száraz, és beragacsozott fényes fekete műanyag fóliák a vízzel és étolajjal feltöltött fekete tálcák erősen és vízszintesen poláros fényt tükröztek (polarizációfok:  $p = 70\% \pm 20\% = \text{átlag} \pm \text{standard deviáció}$ ). A vízszintes helyzetű, száraz, és beragacsozott fényes fehér műanyag fóliák a vízzel és étolajjal feltöltött fehér tálcák nagyon alacsony polarizációfokú függőlegesen, vagy ferdén poláros, vagy polarizálatlan fényt tükröztek (polarizációfok:  $p = 10\% \pm 10\%$  vagy  $p = 0\%$ ). A függőlegesen elhelyezett beragacsozott fekete és fehér tesztfelületek függőlegesen, vagy ferdén poláros fényt tükröztek ( $p_{\text{fekete}} = 70\% \pm 20\%$  és  $p_{\text{fehér}} = 10\% \pm 10\%$ ). A vízszintes helyzetű alumínium fólia közepes polarizációfokú fényt tükrözött ( $p = 30\% \pm 15\%$ ), amelynek iránya többnyire eltért a vízszintestől. A

vízszintes helyzetű matt fehér és matt fekete szövet és a tesztfelületek alapját képező világosbarna fatáblák polarizálatlan ( $p = 0\%$ ) fényt vernek vissza.

Az első választásos terepi kísérletben a következő 9 bögölyfaj hím és nőstény egyedeit sikerült begyűjteni a vízszintes fekete műanyag fólián: *Haematopota pluvialis* (Linnaeus 1758), *Heptatoma pellucens* (Fabricius 1776), *Hybomitra ciureai* (Séguy 1937), *H. solstitialis* (Meigen 1820), *H. ucrainica* (Olsufjev 1952), *Tabanus bovinus* (Linnaeus 1758), *T. bromius* (Linnaeus 1758), *T. sudeticus* (Zeller 1842), és *T. tergestinus* (Egger 1859). A befogott hímek száma 26, a nőstényeké 17 volt.

A kísérletek során 7 különböző viselkedéselemet lehetett megfigyelni a tesztfelületeknél, amelyek a következők voltak:



**11. ábra:** Mielőtt a bögölyök leszállnának egy vízszintesen poláros fényt visszaverő, sima felületű, vízszintes fekete műanyag fóliára jellegzetes "érintő röppülést" végeznek, aminek során többször is megérintik a felületet (fekete pontokkal jelölve). A röppálya a fényes fekete fólia esetén két szélsőséges esetben közel függőleges (A), illetve vízszintes (B) ívekből áll. A bögölyök a leszállás előtt egyszer (C) vagy kétszer (D) érintik meg a felületet. A repülési irányt a nyílfejek mutatják.

**Érintés:** A vizsgált bögöly többször elrepül a tesztfelület fölött, miközben 5-30-szor röviden megérinti azt. Két jellegzetes „érintő repülési” típust különítettünk el: közel függőleges, illetve vízszintes röppályával (11A-B. ábra) jellemezhető.

**Leszállás:** A rovar azonnal vagy az „érintő repülést” követően leszáll a tesztfelületre, és legalább 2 másodpercig ott marad (11C-D. ábra).

**Helyben maradás:** A bögöly leszállás után több másodpercig a tesztfelület ugyanazon pontján mozdulatlanul áll.

**Járálás:** A rovar gyorsan és folyamatosan mászik a tesztfelületen, közben többször irányt változtat.

**Söprögetés:** A bögöly járálás közben meg-megáll, miközben két első lábával „söprögetni” kezdi a felszínt. Ezután kissé tovább halad, majd újra kezdi az előző mozdulatot.

**Fölröppenés:** Az előző három tevékenység közben a rovar föl-fölszáll a tesztfelületről, majd 1-2 másodperc múlva visszatér annak más pontjára.

**Elrepülés:** A bögöly végleg elhagyja a tesztfelületet.

Az első vizsgálat során mért paraméterek ( $\Sigma t$ ,  $\tau$ ,  $\Sigma N_T$ ,  $\Sigma N_F$ ,  $\Sigma N_I$ ) alapján a fényes fekete műanyag fólia statisztikailag szignifikánsan vonzóbb volt a bögölyök számára, mint a másik négy

tesztfelület. Az érintések száma a fényes fekete fólia esetében sokkal magasabb, mint a többi négy esetben. Ez azzal magyarázható, hogy általában a fényes fekete fóliára való leszállást az „érintő repülés” előzte meg, míg a többi tesztfelület esetén ez a viselkedésem ritkán volt megfigyelhető. Az alumínium fólia, a matt fehér szövet és a matt fekete szövet nem bizonyult vonzónak a bögölyök számára (3A. táblázat).

## A

tesztfelület	időtartam (s)		darabszám		
	$\Sigma t$	$\tau_{\min}$ , $\tau$ , $\tau_{\max}$	$\Sigma N_T$ érintés	$\Sigma N_F$ fölröppenés	$\Sigma N_I$ egyedszám
alumínium fólia	170 (3.6%)	5, 12.1, 45	3 (0.2%)	20 (5.8%)	14 (6.9%)
matt fehér szövet	45 (0.9%)	4, 9.0, 27	0 (0%)	5 (1.5%)	5 (2.5%)
matt fekete szövet	23 (0.5%)	3, 2.9, 5	10 (0.6%)	6 (1.7%)	8 (3.9%)
fényes fehér fólia	331 (6.9%)	7, 18.4, 75	30 (1.8%)	80 (23.3%)	18 (8.9%)
fényes fekete fólia	4,203** (88.1%)	7, 26.6*, 189*	1,611** (97.4%)	233** (67.7%)	158** (77.8%)

## B

tesztfelület	időtartam (s)		darabszám		
	$\Sigma t$	$\tau_{\min}$ , $\tau$ , $\tau_{\max}$	$\Sigma N_T$ érintés	$\Sigma N_F$ fölröppenés	$\Sigma N_I$ egyedszám
fényes fehér fólia	91 (6.0%)	4, 13.0, 33	5 (0.6%)	39 (37.1%)	7 (8.7%)
fényes fekete fólia	1426** (94.0%)	5, 19.5*, 215*	834** (99.4%)	66* (62.9%)	73** (91.3%)

**3. táblázat:** Az első (A) és a második (B) kísérletben elvégzett vizsgálatok eredményei, ahol  $\Sigma t$ : a bögölyök fólián töltött összideje;  $\tau_{\min}$ ,  $\tau$ ,  $\tau_{\max}$ : az egyedenkénti fólián töltött idő minimum, átlag és maximum értéke;  $\Sigma N_T$ : az érintések száma;  $\Sigma N_F$ : felröppenések száma;  $\Sigma N_I$ : egyedszám. A \*-gal és \*\*-gal jelölt értékek szignifikánsan különböznek (nagyobbak) az azonos oszlopban szereplő értékektől ( $\chi^2$ -teszt,  $*p < 0.05$ ,  $**p < 0.001$ ).

A második kísérletben a függőlegesen elhelyezett tesztfelületek (fényes fehér illetve fekete fólia) egyáltalán nem voltak hatással a bögölyökre. Ha mindkét fóliát vízszintesen a földre fektettük, akkor ugyanazokat a viselkedés elemeket figyeltük meg, mint az első kísérletben. A fényes fekete fólia ebben az esetben is szignifikánsan vonzóbb, mint a fényes fehér (3B. ábra).

A harmadik kísérlet eredményét összefoglaló 4. táblázat adataiból megállapítható, hogy a bögölyökre vonzó hatást kizárólag a földre fektetett, fényes fekete felületével felfelé néző csapdák fejtettek ki. Mindezek alapján megállapítható, hogy a bögölyök érzékenyek a vízszintesen poláros fényre, ha az szemük ventrális régióját stimulálja.

A ragadós, fényes csapdák tulajdonságai	Bögölyök egyedszáma
fekete, vízszintes, lefelé néző	0
fehér, vízszintes, lefelé néző	0
fekete, függőleges	0
fehér, függőleges	0
fekete, vízszintes, felfelé néző	45
fehér, vízszintes, felfelé néző	1

**4. táblázat:** A harmadik kísérletben használt csapdákkal begyűjtött bögölyök egyedszáma.

A 4. kísérlet eredményei szerint (5. táblázat) a bögölyök szinte kizárólag a fekete vizes tálcat választják. Szignifikánsan többször érintik meg a fekete vizes tálca felszínét, mint a fehérét ( $\chi^2$ -teszt,  $p < 0.001$ ). Míg a fekete vizes tálca erősen (nagy  $p$  lineáris polarizációfokú) és

vízszintesen poláros (a függőlegestől mért  $\alpha = 90^\circ$  polarizációs szögű) fényt, addig a fehér vizes tálca gyengén és nem vízszintesen poláros fényt reflektál. Ezen eredmények újból alátámasztják a hipotézist, amely szerint a bögölyök erősen és vízszintesen poláros fény felé vonzódnak, azaz pozitív polarotaxist mutatnak.

A bögölyök az „érintő repülés” alatt egyszer ( $N_T = 1$ ) vagy kétszer ( $N_T = 2$ ) érintik meg a fekete tálca vízfelületét, ami jóval kevesebb, mint a fényes fekete fólián történő érintések száma ( $2 < N_T < 52$ ).

		vizes tálca	
		fekete	fehér
vízfelszín érintése	$N_T = 1$	21	1
	$N_T = 2$	2	0
leszállások és járkálások száma a tálca peremén		0	2

**5. táblázat:** Az érintés, leszállás és járkálás viselkedéselemek száma a negyedik kísérletben.  $N_T$ : Az „érintő repülés” során a vízfelszín megérintésének száma.

A 6. táblázat mutatja az ötödik kísérlet során, a fehér illetve fekete olajtálccával begyűjtött bögölyök fajneveit, egyedszámát, nemét és a gyűjtések helyszínét. Az adatok alapján megállapítható, hogy a fekete olajtálcaik összességükben 776 darab, míg a fehér olajtálcaik 25 darab egyedre csapdáztak, ami statisztikailag szignifikáns különbséget mutat ( $\chi^2$ -teszt,  $p < 0.001$ ). Az *Atylotus loewianus*, *Heptatoma pellucens*, *Tabanus bovinus*, *T. bromius*, *T. exclusus*, *T. maculicornis*, *T. sudeticus* and *T. tergestinus* bögöly fajok esetében sikerült kimutatni szignifikáns különbséget a fekete és a fehér olajtálca csapdázása között. Az ötödik választásos viselkedési kísérlet eredményei újfent alátámasztják az alaphipotézist, (miszerint a bögölyök pozitív polarotaxist mutatnak, és a vízszintesen poláros fény szemük ventrálián elhelyezkedő ommatidiumaival érzékelik).

Polarimetriai mérésekkel kimutattuk, hogy a kísérletekben használt tesztfelületek közül csak a vízszintesen elhelyezett fényes fekete fólia vert vissza erősen és vízszintesen poláros fényt, amihez a bögölyök vonzódnak. Az Umow-szabály értelmében minél sötétebb egy felület, annál nagyobb a róla visszavert fény lineáris polarizációfoka. A fekete szín esetén ez az érték maximális, mivel ekkor minimális a festékrétegből a spektrum bármely tartományában visszaszóródó fény mennyisége.

A felszínről visszavert fény lineáris polarizációfoka annál nagyobb, minél simább (fényesebb), vagyis minél kisebb a diffúzan visszavert komponens. A vízszintesen elhelyezett fekete fólia a fényt függőleges reflexióssíkkal veri vissza, miáltal a tükröződő fény vízszintesen poláros.

Az első választásos terepkísérletben a fényes fekete műanyag fóliára sokkal érzékenyebben reagáltak a vizsgált bögölyök, mint a matt fekete szövetre, illetve a fehér műanyag fóliára, matt fehér szövetre és az alumínium fóliára (az utóbbi három felület sok fényt ver vissza). Így megállapíthatjuk, hogy a bögölyök nem mutatnak negatív illetve pozitív fototaxist a kísérletekben. A tesztfelületek hőmérséklete azonos volt a vizsgálat során, így a bögölyök preferenciája a fekete műanyag fólia hőmérsékletének különbözőségével sem magyarázható. A tesztfelületek (fekete, szürke, fehér) a spektrum látható, és SCHWIND (1991,1995) spektrális reflexiók mérései alapján UV tartományában is színtelenek, így a szín nem játszik szerepet a bögölyök választása során. A második kísérletben a vizsgált bögölyökre a vízszintesen lerakott fekete műanyag fólia erős vonzó hatással volt, míg függőlegesen elhelyezett fóliára nem mutattak érzékenységet.

helyszín dátum (2007)	fajlista	olajtálca	
		fekete	fehér
<b>Erdőkertes</b> 47° 40' N, 19° 19' E Július 8-9.	<i>Atylotus fulvus</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Chrysops caecutiens</i>	f= 0, m = 0	f= 0, m = 1
	<i>Chrysops divaricatus</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Chrysops viduatus</i>	f= 1, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Chrysops</i> sp.	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Hybomitra acuminata</i>	f= 1, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Hybomitra lundbecki</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Hybomitra nitidifrons confusa</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Heptatoma pellucens</i>	f= 2, m = 4	f= 0, m = 0
	<i>Haematopota pluvialis</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Hybomitra tropica</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bovinus</i>	f= 17, m = 3	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bromius</i>	f= 69, m = 22	f= 3, m = 3
	<i>Tabanus cordiger</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus exclusus</i>	f= 8, m = 2	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus glaucopis</i>	f= 1, m = 3	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus maculicornis</i>	f= 116, m = 23	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus spectabilis</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus sudeticus</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus tergestinus</i>	f= 173, m = 173	f= 7, m = 2
	<i>Tabanus unifastiatius</i>	f= 2, m = 1	f= 0, m = 0
	<b>szumma</b>	<b>f = 392, m = 241</b>	<b>f = 10, m = 6</b>
<b>Pécsely</b> 46° 57' N, 17° 47' E Július 20-21.	<i>Atylotus fulvus</i>	f= 4, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Atylotus loewianus</i>	f= 3, m = 2	f= 0, m = 0
	<i>Atylotus</i> sp.	f= 1, m = 2	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bromius</i>	f= 22, m = 5	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bifarius</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus maculicornis</i>	f= 3, m = 4	f= 3, m = 2
	<i>Tabanus miki</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus tergestinus</i>	f= 9, m = 5	f= 1, m = 0
	<i>Tabanus sudeticus</i>	f= 3, m = 2	f= 0, m = 0
	<b>szumma</b>	<b>f = 47, m = 20</b>	<b>f = 4, m = 2</b>
<b>Kiskunhalas</b> 46° 43' N, 19° 5' E Június 28-29.	<i>Chrysops viduatus</i>	f= 2, m = 2	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bromius</i>	f= 25, m = 3	f= 0, m = 2
	<i>Tabanus cordiger</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus glaucopis</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus maculicornis</i>	f= 12, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus sudeticus</i>	f= 2, m = 5	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus tergestinus</i>	f= 4, m = 2	f= 1, m = 0
	<b>szumma</b>	<b>f = 45, m = 15</b>	<b>f = 1, m = 2</b>
<b>Balatonszemes</b> 46° 49' N, 17° 47' E Július 16-17.	<i>Chrysops viduatus</i>	f= 3, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus bromius</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus cordiger</i>	f= 0, m = 2	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus maculicornis</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus spodopternus</i>	f= 1, m = 0	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus sudeticus</i>	f= 0, m = 1	f= 0, m = 0
	<i>Tabanus tergestinus</i>	f= 7, m = 0	f= 0, m = 0
	<b>szumma</b>	<b>f = 12, m = 4</b>	<b>f = 0, m = 0</b>
<b>összesen</b>		<b>f = 496, m = 280</b>	<b>f = 15, m = 10</b>

**6. táblázat:** Az ötödik választásos kísérlet során, a fehér és fekete olajtálcákkal begyűjtött bögölyök faji identitása, egyedszáma, neme és gyűjtések helyszíne (f= nőstény, m= hím).

### 3.1.3.1.2. Értékelés

Számos rovarfaj, így feltehetőleg a bögölyfajok összetett szemének egyes részei is specializálódtak. Vizsgálataink során arra is kerestük a választ, hogy a bögölyök szemének melyik részével érzékelik a poláros fényt. Az első kísérlet során bebizonyítottuk, hogy a bögölyök szemének ventrális része érzékeli a vízszintesen poláros fényt, de a vizsgálat eredménye nem zárta ki szemük frontális és laterális részének polarizációérzékenységét. A második választásos kísérlet eredményei (a függőlegesen elhelyezett fényes fekete műanyag fólia nem vonzó) alapján arra következtethetünk, hogy a bögölyök összetett szemének frontális és laterális része nem érzékeny a lineárisan poláros fényre. Mivel a függőlegesen elhelyezett fekete fóliáról tükröződő poláros fény a szem előbb említett területeire vetül. A harmadik választásos kísérletben a szem dorzális részének polarizációérzékenységét vizsgáltuk. Kiderült, hogy a bögölyök nem vonzódnak a vízszintesen elhelyezett, fényes fekete felülettel a föld felé néző műanyag fóliához, így szemük dorzális része nem érzékeny a vízszintesen poláros fényre. Ennek oka az, hogy a természetben vízszintesen poláros fényt kizárólag vízfelszínnek vernek vissza, amit a bögölyök a szemük ventrális régiójában elhelyezkedő ommatídiumokkal érzékelnek.

Terepkísérleteink során kimutattuk, hogy a bögölyök ugyanolyan felszín érintő viselkedést mutatnak, mikor fényes fekete műanyag fóliára vagy vízfelszínre repülnek, de az érintések száma különbözik (11. ábra). A fényes fekete fóliára többször (3A-B. táblázat) szállnak le és röppenek fel 1 másodpercen belül, mint a vízfelületre (5. táblázat). A vízfelszínre ivás vagy termoreguláció céljából szállnak, ami kisszámú (1-2) érintéssel jár együtt. Ezzel szemben a fényes fekete fólia fölött jellegzetes "érintő röpülést" végeznek, aminek során többször (1-51) is megérintik a felületet feltehetően azért, hogy azonosítsák a felszín minőségét (víz- vagy nem vízfelület).

Korábban már több, vízbe tojást rakó rovarcsoportról kiderült, hogy egyes fajaik vízdetekciója a vízfelszínről visszavert vízszintesen poláros fény érzékelésén alapszik (KRISKA et al. 1998, HORVÁTH és VARJÚ 2004). Míg azonban a vízibogarak, vízipoloskák, tegzesek, kérészek és szitakötők polarotaktikusan a víztestet keresik, hogy tojásaikat közvetlenül abba rakják, addig a bögölyök nem ezért kutatják polarizációlátásukkal a vizeket, hanem például azért, hogy a vízfelszín megtalálása után fölleljék a tojásrakásra 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. tojásrakó hely) pozitív polarotaxissal közvetlenül megtalálható. Ez a helyzet számos vízirovarnál, melyek közvetlenül a vízbe rakják tojásaikat. (2) A forrás (pl. tojásrakó hely vagy gazdaállat) közvetett módon található meg polarotaxissal. A nőstény bögölyök először a vizet észlelik távolról, majd a vízparti tojásrakó helyet vagy az itatónál megjelenő gazdaállatokat találják meg. A hím bögölyök polarotaktikus vízdetekciója ugyancsak előnyös lehet, mert ők a polarotaxissal a vízhez odavonzott nőstényekkel találkozhatnak és párosodhatnak.

Terepkísérleteink során azt tapasztaltuk, hogy a vízszintesen poláros fény egyfajta szupernormális ingerként ellenállhatatlan vonzerőt gyakorol a bögölyökre, még akkor is, mikor számos ló és/vagy szarvasmarha, azaz gazdaállat volt a közelben. Mivel ez az erőteljes pozitív polarotaxis nemcsak a nőstény, hanem a hím bögölyöknél is megjelenik, e reakciót nem lehet pusztán a tojásrakó hely keresésével magyarázni. Különböző helyszíneken folytatott terepkísérletekkel sikerült valószínűsíteniünk a pozitív polarotaxis további lehetséges funkcióit a bögölyöknél. A bögölyök, sok más repülő rovarhoz hasonlóan, előszeretettel keresik föl a vízfelszíneket fürdőzés (a fölhevült test hűtése) és/vagy ivás (vízfölvétel) céljából. Ilyenkor rárepülnek a vízfelszínre, majd 1-2 másodperc után elhagyják azt. E viselkedésforma során a bögölyök közvetlen érintkezésbe kerülnek a vízzel. A röpképes vérszívó rovarok táplálkozási stratégiája általában akkor lehet igazán sikeres, ha a gazdaállatokat nem közvetlen vizuális vagy szagingereket útján kutatják föl, hanem közvetett

módon, a szabad vízfelülettel bíró vizes élőhelyek fölkeresésével, mivel azok környékén nagy valószínűséggel rendszeresen és jelentős számban jelennek meg az oda inni, fürödni vagy dagonyázni járó nagytetű növényevő emlősök. A vérszívó rovarok közül a bögölyök az elsők, melyeknél sikerült kimutatni a pozitív polarotaxist, ami lehetőséget nyújt olyan optikai alapon működő, új rovarcsapdák kifejlesztésére, amelyek a fény erős és vízszintes lineáris polarizációja révén fejtik ki jelentős vonzó és csapdázó hatásukat. A hagyományos bögölycsapdák működése nem a fénypolarizáción alapszik, hanem valamilyen más vizuális hatáson, például a visszavert fény erősségén, színén, a csapda alakján, méretén vagy mozgásán (GRESSITT és GRESSITT 1962, WILSON et al. 1966, VON KNIEPERT 1979, HRIBAR et al. 1992, MOORE et al. 1996, SASAKI 2001). Ezen csapdákban gyakran használtak vonzó hatású anyagokat, ilyenek a szén-dioxid, ammónia és aceton. Azonban eddig egyetlen bögölycsapda sem váltotta be teljesen a hozzáfűzött reményeket, sem a hatékonyság, sem pedig a szelektivitás tekintetében.

Az általunk kifejlesztett csapdaprototípusok (BLAHÓ et al. 2012b, EGRI et al. 2013, HORVÁTH et al. 2014) a bögölyök pozitív polarotaxisának maximális kihasználására épülnek: e csapda arra optimalizált, hogy a róla visszaverődő fény lineáris polarizációfoka minél magasabb legyen, a rezgéssíkja pedig minél közelebb essen a vízszinteshez.

### 3.1.3.2. A GAZDA KÜLTAKARÓ OPTIKAI SAJÁTSÁGAINAK HATÁSA A BÖGÖLYÖK GAZDAVÁLASZTÁSÁRA

#### 3.1.3.2.1. Eredmények

Megfigyeltük, hogy a barna és fehér lovakat a bögölyök egyaránt és folyamatosan támadták. A lovak jellemző védekező reakciói a bögölyökkel szemben a következők voltak: legyezés (farokkal történő ide-oda csapkodás), dobantás, hempergés a földön, hirtelen megrázkódás, fej himbálása, a vérszívó bögölyök harapással és nyalással történő eltávolítása a kültakaróról. E viselkedési elemekkel próbálták elhajtani a lovak a rájuk szálló bögölyöket. 70 képpáron számláltuk meg a vizuálisan felismert bögölyöket a barna és fehér lovakon, illetve azok körül (7. táblázat). A barna lovon  $405/110 = 3.7$ -szer annyi bögölyt számoltunk, mint a fehérén, amely különbség statisztikailag magasan szignifikáns. A barna lónak a fehérhez képesti, bögölyökre kifejtett nagyobb vonzereje összhangban áll a 3. kísérlet eredményével (lásd később).

bögölyök N száma	
barna ló	fehér ló
405	110

**7. táblázat:** Szokolyán 2008. június 22-én egy barna és egy fehér lóról készült 70 képpáron vizuálisan azonosított bögölyök N száma. Az  $N = 405$  és  $110$  közti különbség statisztikailag magasan szignifikáns ( $\chi^2 = 169$ ,  $df = 1$ ,  $p < 0.0001$ ).

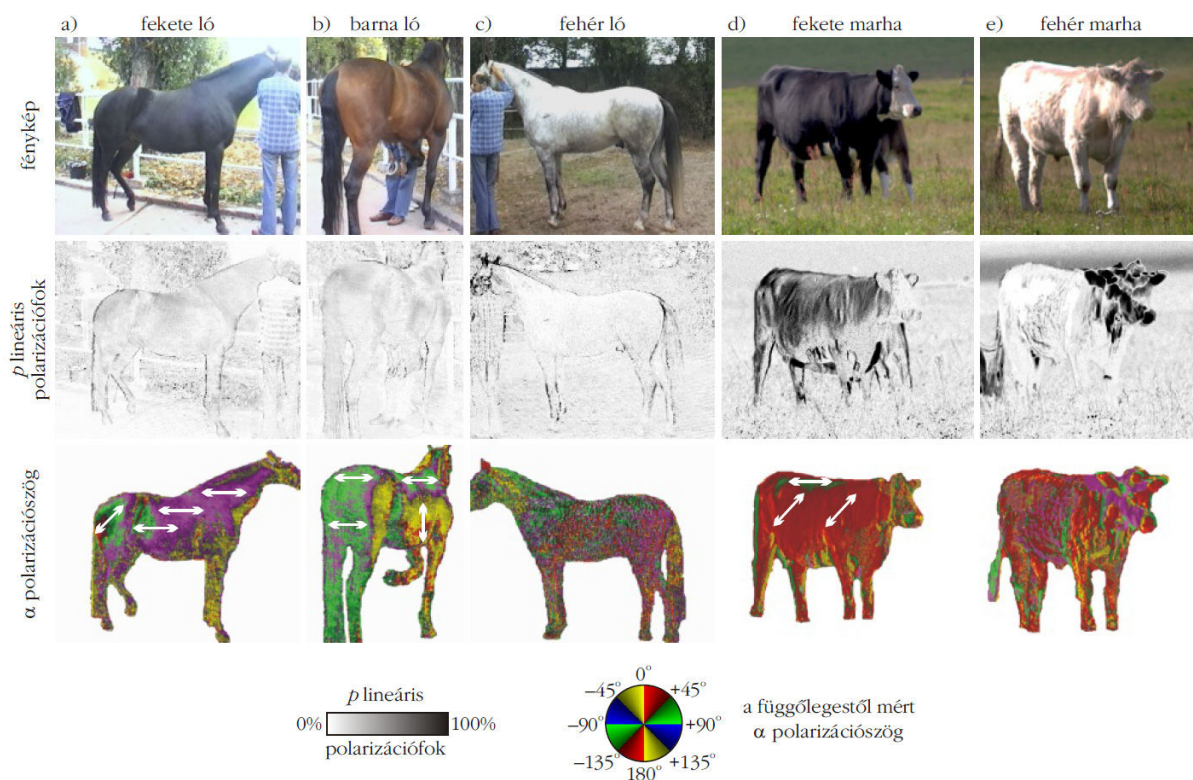
A terepen azt is megfigyeltük, hogy a nyílt legelőn és az árnyékos erdőben nem azonos a bögölytámadások intenzitása, miáltal a lovak a két terület között folyamatosan ingáztak (8. táblázat). Bizonyos, legeléssel töltött idő után a lovak az árnyékos erdőbe menekültek a bögölyök elől, ahová a bögölyök csak ritkán követték őket, így nyugodtan tudtak pihenni. Egy idő elteltével a lovak újra előmerészkedtek a napos mezőre legelni, ahonnan azonban hamarosan megint visszakényszerültek az árnyékba. Ezt az ingázó viselkedést ismételtették periodikusan a nap közepéig (13:00), mikortól a bögölyök általi zaklatás oly mértékű lett, hogy a lovak már egyáltalán nem tudtak a mezőn legelni. A napos legelőről elsőként mindig a barna ló menekült az erdőbe (8. táblázat). A barna ló  $82 \text{ perc} / 38 \text{ perc} = 2.2$ -szer több időt töltött a bögölymentes, árnyékos erdőben, mint a napos legelőn, míg a fehér ló  $65 \text{ perc} / 54 \text{ perc} = 1.2$ -szer több időt töltött a legelőn, mint az árnyékban (8. táblázat).



idő	árnyékos erdő		napos karám	
	fehér ló	barna ló	fehér ló	barna ló
11:00	-	-	+	+
11:15	-	+	+	-
11:25	+	+	-	-
11:30	-	-	+	+
11:40	-	+	+	-
11:43	-	-	+	+
11:46	-	+	+	-
11:49	-	-	+	+
11:58	-	-	+	+
11:59	-	+	+	-
12:02	-	+	+	-
12:03	-	+	+	-
12:04	+	+	-	-
12:23	-	+	+	-
12:30	+	+	-	-
13:00	+	+	-	-
t (perc)	54	82	66	38

**8. táblázat:** Egy barna és egy fehér ló megfigyelt előfordulása 2008. június 22-én egy szokolyai napos karámban és a legelő melletti erdő árnyékában az idő függvényében (t teljes tartózkodási idő, +: megjelenés, -: eltűnés). Helyi nyári időszámítás = UTC+2h

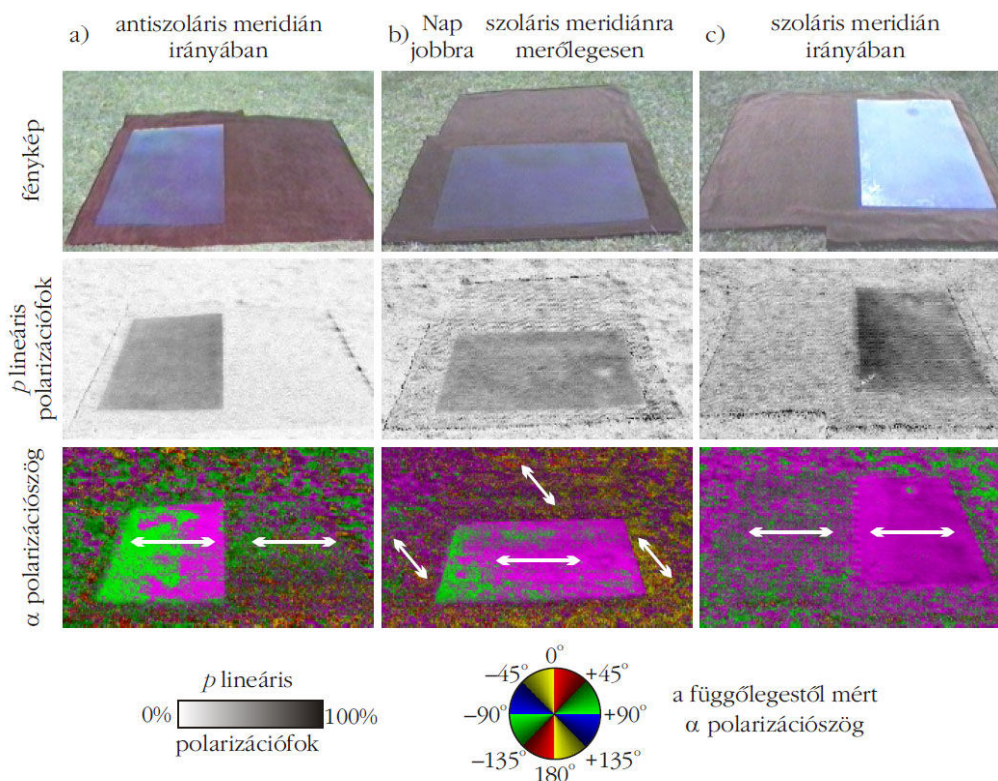
Mivel számos bögölyfaj vonzódik az erősen és vízszintesen poláros fényhez (HORVÁTH et al. 2008), föltételezhető volt, hogy a sötétebb (barna) ló nagyobb vonzóképesége részben magyarázható az állat szőrzetének fénypolarizáló-képességével, ami erősen függ annak színétől és világosságától, ahogyan az a 12. ábrán is látható. E föltevést négy különböző választásos kísérlettel ellenőriztük, amelyek közül néhányat többször is megismételtünk.



**12. ábra:** Fekete (a), pej (barna, b) és szürke (fehér, c) lovak, valamint egy fekete (d) és egy fehér (e) szarvasmarha képkalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A d) és e) képeken a Nap a bal felső sarok irányából sütött.



A polarizációirány mintázatain a háttér ki lett fehérítve, hogy az állatok mintázata jobban látszódjon. Az állatok testének néhány helyén a jellemző polarizációirányokat kettősfejű nyilak jelölik. Az e) képen látható bika a polarizációs mérés közben elfordította fejét, s az emiatti mozgási műtermék okozta a fej látszólag magas polarizációfokait. Valójában a bika feje is a testéhez hasonlóan polarizálatlan, illetve gyengén poláros fényt ver vissza.



**13. ábra:** Az 1. és 2. kísérletben használt fényes barna (bal oldalt) és matt barna (jobb oldalt) napos testfelületeknek a szoláris meridiánhoz képest három különböző irányból képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában. A polariméter optikai tengelyének dőlésszöge  $-35^\circ$  volt a vízszinteshez képest. Az  $\alpha$ -mintázatokon a jellemző polarizációirányokat kettősfejű nyilak is mutatják. Amikor a testfelületek árnyékban voltak, a polarizációs mintázatuk teljesen hasonló volt, azzal a különbséggel, hogy a visszavert fény polarizációiránya mindig vízszintes volt.

Az 1. kísérletből kiderült, hogy a matt barna vászon, amely a lovak barna szőrét utánozta, a bögölyök számára nem volt vonzó, míg az átlátszó, szintelen műanyag lappal letakart matt barna vászon számos bögölyt vonzott (Szokolyán 44 bögölyt 174 leszállással, Gödön 47 bögölyt 157 leszállással a 9. és 10. táblázatok szerint).

E különbségek a megvilágítási körülményektől (napos vagy árnyékos) függetlenül statisztikailag magasan szignifikánsak.

bögölyök $N_B$ száma		leszállások $N_L$ száma	
fényes barna	matt barna	fényes barna	matt barna
44	1	174	1

**9. táblázat:** Az 1. kísérletben Szokolyán, 2008. június 23-án 6,5 óra alatt a fényes és matt barna testfelületekhez vonzott bögölyök  $N_B$  száma és azok testfelületre való leszállásainak  $N_L$  száma. A kísérlet 10:30 és 17:00 (UTC+2h) óra között tartott. Az  $N_B = 44$  és 1, valamint az  $N_L = 174$  és 1 közti különbségek statisztikailag magasan szignifikánsak ( $df = 1$ ,  $44/1$ :  $\chi^2 = 41,1$ ,  $174/1$ :  $\chi^2 = 171,0$ ,  $p < 0.0001$ ).

bögölyök $N_B$ száma		leszállások $N_L$ száma	
fényes barna	matt barna	fényes barna	matt barna
47	1	157	1

**10. táblázat:** Az 1. kísérletben Gödön, 2008. június 25-én 6,5 óra alatt a fényes és matt barna tesztfelületekhez vonzott bögölyök  $N_B$  száma és azok tesztfelületre való leszállásainak  $N_L$  száma. A kísérlet 10:30 és 17:00 (UTC+2h) óra között tartott. Az  $N_B = 47$  és 1, valamint az  $N_L = 157$  és 1 közti különbségek statisztikailag magasan szignifikánsak ( $df = 1$ ,  $47/1$ :  $\chi^2 = 44,1$ ,  $157/1$ :  $\chi^2 = 154,0$ ,  $p < 0.0001$ ).

A bögölyök azonnal vagy 2–15 felületérintés után szálltak rá az adott felületre. A bögölyök a barna tesztfelületeknél ugyanazt a viselkedést mutatták, mint a bögölyök pozitív polarotaxisának fölfedezésekor korábban lefolytatott választásos kísérleteinkben (HORVÁTH et al. 2008).

Mikor az 1. kísérletet matt barna és matt fehér felületekkel ismételtük meg, azok egyáltalán nem vonzottak magukhoz bögölyöket. Hogy az 1. kísérletben elkerülhetetlenül föllépő pszeudoreplikációt kizárjuk, elvégeztük a 2. kísérletet, amiben a bögölyök többségét a ragasztó megfogta. A 2. kísérlet eredménye tovább erősítette az 1. kísérletét. 2008-ban az átlátszó, szintelen, ragacsos műanyag lappal letakart barna felület 21 bögölyt fogott, míg a matt barna és matt fehér felületekre csak egyetlen bögöly szállt le ( $\chi^2 = 18,2$ ,  $df = 1$ ,  $p < 0.0001$ ). E kísérletet 2009-ben tízszer megismételve, a következő eredmény adódott: az 11. táblázat szerint ekkor a fényes, ragacsos barna felület 189 bögölyt fogott, míg a matt, száraz barna mindössze négyet. Mindkét különbség statisztikailag magasan szignifikáns.

bögölyök $N$ száma	
száraz matt barna	ragadós fényes barna
4	189

**11. táblázat:** A száraz matt barna tesztfelületre leszállt és a ragadós, fényes, barna felülettel csapdába ejtett bögölyök száma a 2. kísérletben, 2009. augusztus 16. és 25. között. A különbség magasan szignifikáns ( $\chi^2$  teszt:  $df = 1$ ,  $\chi^2 = 177,3$ ,  $p < 0.0001$ ).

Mikor 2009-ben a 2. kísérletet is 10-szer elvégeztük a száraz matt barna és száraz matt fehér tesztfelületekkel, megint egyikük sem vonzott egyetlen bögölyt sem. Az 1. és 2. kísérletekből az a következtetés vonható le, hogy a bögölyök nem vonzódnak a vízszintes matt barna (kevésbé poláros) és a matt fehér (depolarizáló) tesztfelületekhez, viszont erősen vonzódnak a vízszintes fényes barna (vízszintesen poláros fényt visszaverő) felületekhez. Tehát a barna lovak bögölyökre kifejtett nagyobb vonzóképesége nem magyarázható pusztán a lovak szőrének színével és fényességével.

A képalkotó polarimetriai mérések szerint, míg a vízszintes fényes (száraz vagy ragadós) barna tesztfelületek (13. ábra), a szoláris meridiánhoz képesti nézőiránytól függetlenül, mindig erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza, addig a vízszintes matt száraz barna és fehér felületekről mindig csak gyengén poláros fény verődik vissza, aminek polarizációiránya függ a Naphoz képesti nézőiránytól. Így a felületek bögölyökre kifejtett vonzását nem okozhatja önmagában a barna szín, a visszavert fény polarizációs tulajdonságai is számítanak.

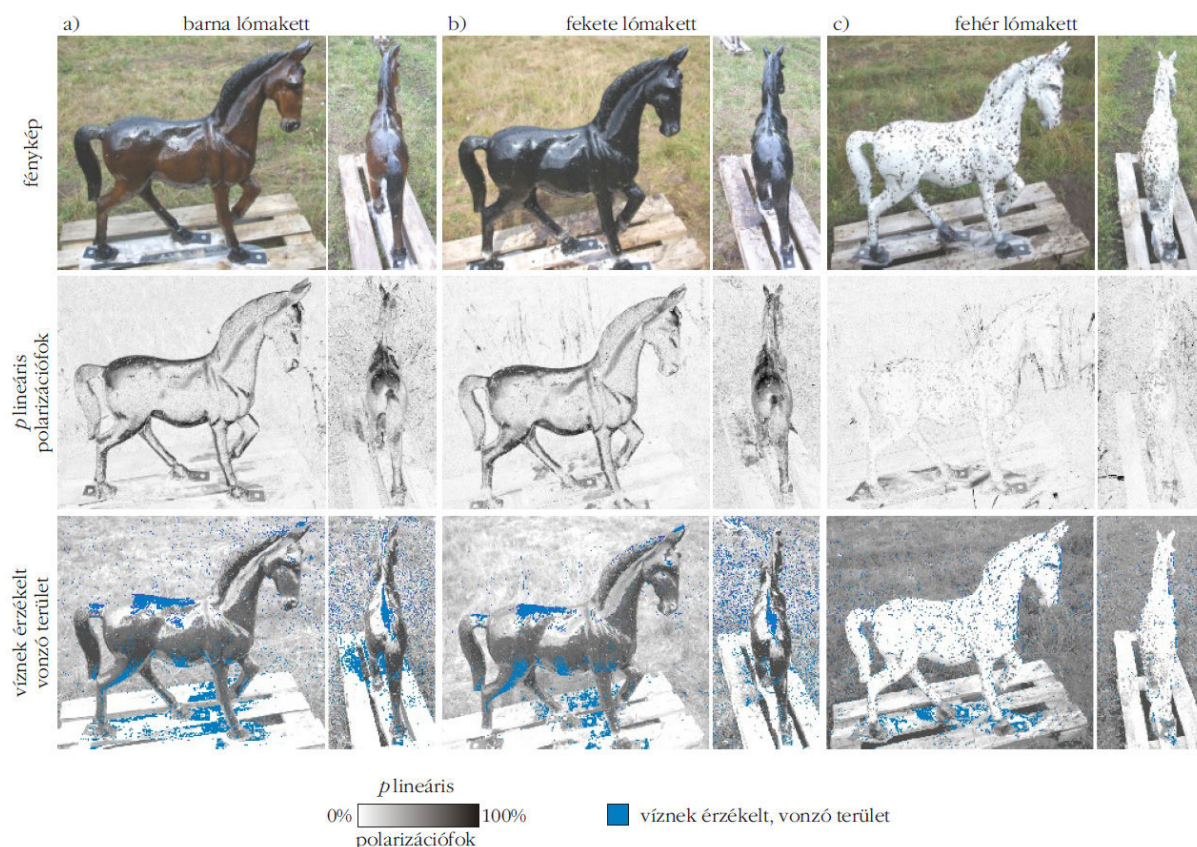
E következtetést a 3. kísérlet (14. ábra, 12. táblázat) eredményei is alátámasztották. A 12. táblázat szerint a fényes ragadós barna és fekete lómakettek  $334/22 = 15,2$ -szer, illetve  $562/22 = 25,5$ -ször annyi bögölyt fogtak, mint a ragadós fényes fehér lómakett. E különbségek most is statisztikailag magasan szignifikánsak.

dátum (2009)	időjárás	ragadós lómakettekkel fogott bögölyök N száma		
		barna	fekete	fehér
július 17–18.	napos, meleg	41	50	4
július 19–20.	napos, meleg	23	33	2
július 21–22.	napos, meleg	9	18	2
július 23–24.	napos, meleg	35	59	2
július 25–26.	napos, meleg	11	50	1
július 27–29.	esős, hideg	0	0	0
július 30–31.	napos, meleg	40	50	1
augusztus 1–2.	napos, meleg	64	78	2
augusztus 3–4.	napos, meleg	20	28	1
augusztus 5–6.	napos, meleg	10	13	1
augusztus 7–10.	felhős, hideg	0	0	0
augusztus 11–12.	napos, meleg	15	58	0
augusztus 13–14.	napos, meleg	16	32	1
augusztus 15–16.	napos, meleg	21	40	0
augusztus 17–18.	napos, meleg	7	12	2
augusztus 19–20.	napos, meleg	9	19	2
augusztus 21–22.	esős, hideg	0	0	0
augusztus 23–24.	napos, meleg	1	5	0
augusztus 25–26.	napos, meleg	2	4	0
augusztus 27–28.	napos, meleg	2	6	0
aug. 29. – szept. 1.	esős, hideg	0	0	0
szeptember 2–3.	napos, meleg	2	4	0
szeptember 4–5.	napos, meleg	2	1	0
szeptember 6–7.	felhős, hideg	0	0	0
szeptember 8–9.	napos, meleg	3	0	1
szeptember 10–11.	felhős, hideg	0	0	0
szeptember 12–13.	napos, meleg	1	2	0
<b>összesen:</b>		<b>334</b>	<b>562</b>	<b>22</b>

**12. táblázat:** A ragadós barna, fekete és fehér lómakettekkel fogott bögölyök száma a 3. kísérletben. Az e kísérlettel párhuzamosan (július 17-től 26-ig, illetve augusztus 11-től 16-ig) a terepen kint lévő fekete étolajtálca fogási eredményei szerint a következő bögölyfajok voltak jelen a 3. kísérlet során: *Tabanus tergustinus*, *T. bromius*, *T. bovinus*, *T. autumnalis*, *Atylotus fulvus*, *A. loewianus*, *A. rusticus* és *Haematopota italica*. A különbségek magasan szignifikánsak.  $\chi^2$  tesztek: a) barna–fekete:  $df = 1$ ,  $\chi^2 = 58.0$ ,  $p < 0.0001$ , magasan szignifikáns; b) barna–fehér:  $df = 1$ ,  $\chi^2 = 273.4$ ,  $p < 0.0001$ , magasan szignifikáns; c) fekete–fehér:  $df = 1$ ,  $\chi^2 = 499.3$ ,  $p < 0.0001$ , magasan szignifikáns; d) multinomiális teszt:  $df = 2$ ,  $\chi^2 = 480.3$ ,  $p < 0.0001$ , magasan szignifikáns. Egyutas ANOVA teszt:  $SS_{hatás} = 5443.6$ ,  $df = 2$ ,  $MS_{hatás} = 2721.8$ ;  $SS_{hiba} = 21132.4$ ,  $df = 78$ ,  $MS_{hiba} = 270.9$ ;  $F = 10.05$ ,  $p < 0.0001$ , magasan szignifikáns.

A megfogott bögölyök eloszlása a lómakettek testfelületén véletlenszerű volt, egyik részük sem volt kitüntetett a bögölyök számára. A 14. ábrán látható, hogy a barna és a fekete lómakett egyes részei nagyon erősen poláros fényt tükröznek, míg a fehér lómakett gyakorlatilag polarizálatlan fényt ver vissza. A barna és a fekete lómakett háta, valamint fara ver vissza erősen és vízszintesen poláros fényt (14. ábra 3. sora).

A 4. kísérlet (5. ábra) eredményei szerint minél sötétebb egy színtelen, vízszintesen polarizáló tesztfelület, annál vonzóbb a bögölyök számára: a fehér, világosszürke és közpszürke olajtálca a teljes fogásnak csak 0.9–2.7%-át adták, a sötétszürke tálca a bögölyök 19.8%-át fogta meg, míg a fekete tálca 74.8%-ot (13. táblázat). Ez az eredmény azzal magyarázható, hogy minél sötétebb egy színtelen (fekete, szürke, fehér) felület, annál nagyobb a róla visszavert fény polarizációfoka a hullámhossztól függetlenül (6. ábra).



**14. ábra:** A 3. kísérletben használt barna (a), fekete (b) és fehér (c) ragadós lómakettek fényképei, polarizációfok mintázatai és a polarotaktikus bögölyök által víznek érzékelt területei (ahol a  $p$  polarizációfokra:  $10\% < p < 100\%$ , és az  $\alpha$  polarizációirányra:  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) két különböző nézőpontból képalkotó polarimetriával mérve a spektrum kék (450 nm) tartományában. A lómakettekben jól láthatók a csapdába esett rovarok tetemei. A lómakettek napsütésben voltak, a polariméter optikai tengelye a vízszinteshez képest  $-20^\circ$ -os szögben dőlt. A 3. sorban a polarotaktikus bögölyök által víznek észlelt területeket kék szín jelzi.

bögölyök N száma				
fehér	világosszürke	középszürke	sötétszürke	fekete
1 (0.9%)	2 (1.8%)	3 (2.7%)	22* (19.8%)	83* (74.8%)

**13. táblázat:** Az étolajjal töltött fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke és fekete tálcákkal fogott bögölyök száma a 4. kísérletben, 2008. július 11. és szeptember 7. között, Gödön. A következő bögölyfajok estek csapdába: *Atylotus loewianus*, *Haematopota italica*, *Tabanus bovinus*, *T. maculicornis*, *T. tergustinus*. Az  $N_{\text{fekete}} - N_{\text{sötétszürke}}$  ( $\chi^2 = 35.44$ ,  $df = 1$ ,  $p < 0.0001$ ) és az  $N_{\text{sötétszürke}} - N_{\text{középszürke}}$  ( $\chi^2 = 14.44$ ,  $df = 1$ ,  $p < 0.0001$ ) közti különbségek statisztikailag magasan szignifikánsak, amit \* jelöl, míg a fehér, világosszürke és középszürke közti különbségek nem szignifikánsak:  $N_{\text{fehér}} - N_{\text{világosszürke}}$  ( $\chi^2 = 0.3333$ ,  $df = 1$ ,  $p = 0.5637$ ),  $N_{\text{világosszürke}} - N_{\text{középszürke}}$  ( $\chi^2 = 0.2$ ,  $df = 1$ ,  $p = 0.6547$ ),  $N_{\text{fehér}} - N_{\text{középszürke}}$  ( $\chi^2 = 1$ ,  $df = 1$ ,  $p = 0.3171$ ).

### 3.1.3.2.2. Értékelés

A választásos terepkísérleteinkből és polarizációs méréseinkből az a következtetés vonható le, hogy a nemfémes (szigetelő) felületek közül – függetlenül attól, hogy naposak vagy árnyékosak, barnák vagy színtelenek – a bögölyök számára az a legvonzóbb, amelynek a felületéről visszavert fény polarizációfoka a legnagyobb. Ennek alapján logikus azt



föltételezni, hogy a sötét színű lovak fénypolarizáló testfelületei a bögölyök számára sokkal vonzóbbak, mint a világos színű lovak ugyanazon testrészei. A 12. és 14. ábrák szerint minél sötétebb a testfelület, annál nagyobb a róla visszavert fény polarizációfoka. A fekete, barna, illetve fehér testfelszín erősen, közepesen, illetve gyengén poláros vagy polarizálatlan fényt ver vissza. A nézőiránytól és a megvilágítási körülményektől függően a normál, álló testtartású lovak nyaka, háta és fara általában vízszintesen poláros fényt ver vissza, míg a test többi részéről ferdén vagy függőlegesen poláros fény verődik vissza (a 12. ábra polarizációirány-mintázatain kettősfejú nyilakkal jelölve). E polarizációs sajátosságok általánosak és a bögölyök minden gazdaállatra egyaránt érvényesek.

Napsütésben a sötétebb lovak szőre jobban fölmelegszik, mint a világosabbaké, mert a sötétebb testfelület több fényt nyel el. Ez részben magyarázhatná, hogy a sötétebb lovak miért vonzanak több bögölyt, ha a bögölyök egyértelműen vonzódnának a melegebb helyekhez.

Habár a bögölyöknél a gazdaállat kiválasztásában a testhőmérséklet is szerepet játszik (THORSTEINSON 1958), a gazdaállat testfelületének hőmérsékletét csak akkor tudják érzékelni, ha már rászálltak, mert nagyobb távolságból a különböző színű gazdaállatok testfelszíni hőmérséklete a repülő bögölyök számára észlelhetetlen, mivel nincsen infravörös látásuk. Továbbá, az 1. és 2. kísérletünkben a különböző testfelületek hőmérséklete mindig azonos volt. Ezek alapján állíthatjuk, hogy a sötét szőrű lovak bögölyökre kifejtett nagyobb vonzóképesége nem magyarázható csupán a sötét és világos lovak testfelszíni hőmérsékletének esetleges különbségével.

Habár egy barna lónak lehetne a bögölyök számára vonzóbb szaga (például a sötétebb testfelszín magasabb hőmérséklete miatti erősebb izzadáستól), a választásos kísérleteinkben használt testfelületeknek egyforma volt a szaga. Ezért a különböző színű lovak szagának esetleges különbsége nem lehet a bögölyök preferenciájának fő oka. Mivel a vizsgált pej (barna) és szürke (fehér) lovak alakjában és mozgásában sem volt fölfedezhető semmilyen lényeges különbség, ez sem magyarázhatja, hogy a bögölyök miért vonzódnak jobban a barna lovakhoz. Az 1. és 2. kísérletünk együttes eredményei kizárják annak lehetőségét is, hogy a barna szín önmagában jobban vonzaná a bögölyöket. A fentiek alapján az egyetlen lehetséges magyarázat arra, hogy a barna lovak több bögölyt vonzanak a fehéreknél, az a testfelületükről visszavert fény polarizációja. Az 1. és 2. kísérletből kiderült, hogy a bögölyök jobban vonzódnak az erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő fényes barna testfelülethez, mint a gyengén és nem mindig vízszintesen poláros fényt visszaverő matt barna vagy a depolarizáló matt fehér testfelületekhez. Ezért nem a szín és/vagy a fényesség a döntő, hanem a célpont (testfelület, gazdaállat) polarizációs mintázata.

Az evolúció során kifejlődött a bögölyök polarizációlátása és pozitív polarotaxisa, amely képesség a víz felszínéről visszavert fény vízszintes polarizációjának köszönhetően segíti őket a vízkeresésben. A víz közvetlen környezete ideális helye a bögölyök tojásrakásának, a fajtársakkal való találkozásnak, valamint az inni és/vagy fürdeni rendszeresen a vízhez látogató gazdaállatok megtalálásának is. Logikus föltételezni, hogy a bögölyök polarotaxisa a gazdaállat kiválasztásában is szerepet játszik. Ha egy bögöly választhat egy sötét és egy világos megjelenésű, s minden egyéb tulajdonságában (nem, alak, méret, szag, hőmérséklet, mozgás, vér stb.) megegyező gazdaállat közül, akkor a sötétebbet választja, mert a sötétebb gazdaállatról visszavert fény polárosabb. Ezek alapján a következő föltevések tehetők:

1. Ha a nőstény bögölyök a gazdaállat kiválasztásában is szerepet játszó pozitív polarotaxissal rendelkezik, akkor azon gazdaállatokat preferálják, amelyek testfelülete erősebben poláros fényt ver vissza.

2. Mivel a sötétebb felületek polárosabb fényt vernek vissza (UMOW-szabály, HORVÁTH és VARJÚ 2004), a sötétebb szőrzetű gazdaállatok a polarotaktikus bögölyök számára vonzóbbak, mint a világosabb szőrűek.

A 4. kísérletünk eredményei szerint a vízszintesen poláros fényt visszaverő szintelen felületek közül a fényt jobban polarizálók több bögölyt vonzanak, mint a gyöngébben polarizálók. Ez megerősíti a 2. föltevést. A képalkotó polarimetriás mérések (12., 13. ábra) megmutatták, hogy a sötétebb szőrű lovak és szarvasmarhák nagyobb polarizációfokú fényt vernek vissza. Az 1. föltevés a következőkön alapszik: a vizsgált bögölyöknek pozitív polarotaxisa van (HORVÁTH et al. 2008). Az 1. föltevés teljesüléséhez például az kell, hogy a 2. föltevés összhangban legyen a megfigyelések és kísérletek eredményeivel. A vadonban a bögölyök gazdaállatainak, a nagytestű növényevőknek, általában sötét (barna, szürke, fekete) a szőrzete. Álló helyzetben ezen állatok nyaka, háta és fara mindig mérsékelt (barna, szürke) vagy erősen (fekete) és vízszintesen poláros fényt ver vissza. Így tehát a bögölyök a pozitív polarotaxisukkal a gazdaállatokat éppúgy meg tudják találni, mint a vízfelületeket.

A gazdaállatok szemszögéből nézve, a bögölyök sötétpreferenciája nem semleges: a sötét szőrű állatoknak hátrányos, a világos szőrűeknek pedig előnyös a kisebb fertőzésveszélynek és kevesebb zaklatásnak köszönhetően.

Az ember által mesterségesen tenyésztett és tartott lovak esetében a legkevésbé bögölyvonzó fehér testfelszín előnye részben ellensúlyozhatja az ultraibolya-sugárzás okozta bőrrákra való nagyobb érzékenységet. A vadon élő lovaknál mindazonáltal a sötétebb testfelület (a sikeresebb rejtőzködés miatt) előnyösebb, mint a világos (amely a bögölyök számára kevésbé vonzó). A kísérleti eredmények határozottan alátámasztják azt, hogy a gazdaállatok testfelületének fehérsége egy bizonyos szempontból előnyös tulajdonság, mivel a fehér állatok a bögölyöket kevésbé vonzzák, mint a sötétek. Számos bögölyfaj pozitív polarotaxisal bír, azaz vonzódik az erősen és vízszintesen poláros fényhez (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2009), csakúgy, mint a vízirovarok általában (HORVÁTH és VARJÚ 2004, SCHWIND 1991, WILDERMUTH 1998, CSABAI et al. 2006). A bögölyök pozitív polarotaxisának a következő biológiai szerepei lehetnek:

- Odavezeti a nőtény bögölyöket a megfelelő, vízközeli tojásrakó helyhez, ahonnan a lárvák a vízbe vagy az iszapba kerülhetnek.
- A hím és nőtény bögölyöket egyaránt a vízhez vezeti, ahol ihatnak, és a testüket hűthetik.
- A víz közelében a különböző nemű bögölyök könnyen egymásra találhatnak és párosodhatnak.
- A nőtény bögölyök a víz közelében jó eséllyel találhatnak vérszívásra alkalmas gazdaállatokat (főleg csapatokban élő növényevőket), mert azok rendszeresen látogatják a vizeket ivás és/vagy fürdőzés végett.

A fentiek alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a bögölyök polarotaxisának a gazdaállat kiválasztásában is fontos szerepe van. Habár a különböző színű gazdaállatok egyaránt megfelelőek a nőtény bögölyöknek a vérszíváshoz, a bögölyök mégis a sötétebb (barna, fekete) szőrű állatokat részesíti előnyben a világos (szürke, fehér) szőrűekkel szemben. Ez a jelenség jól magyarázható a gazdaállatok testfelületének fénypolarizáló-képességével és a bögölyök polarotaktikus viselkedésével. A korábbi föltevések szerint a bögölyök gazdaállat-kiválasztásában csak a mozgás, alak, szín, fényesség, szag és hőmérséklet játszik fontos szerepet (THORSTEINSON 1958, ALLAN és STOFFOLANO 1986, HALL et al. 1998, MIHOK 2002).

A 3. kísérletben a bögölyök a lómakettekről (14. ábra) visszavert poláros fény mennyiségének megfelelően vonzódtak azokhoz.

A fentiekben részletezett eredmények publikálását (HORVÁTH et al. 2010a) követően egy további kutatás során sikerült bizonyítanunk, hogy a bögölyök polarotaktikus gazdatekciója során a poláros jel a polarizáció iránytól függetlenül is képes kiváltani a bögölyök vonzását

(EGRI et al. 2012a). Tehát sikerült fölfedeznünk a bögölyök esetében egy újfajta polarotaxist, ami eltér a korábban leírt polarotaktikus vízdetekciótól (HORVÁTH et al. 2008), amelynek kiváltó ingere csak a vízszintesen poláros fény lehet. Ez az eredmény utólag jobban értelmezhetővé teszi a 3. kísérlet tapasztalatait is, miszerint a lómakettek csapdázódott bögölyök eloszlása véletlenszerű volt, a rovarok nem csak a vízszintesen poláros fényt reflektáló felületeken voltak fellelhetők.

További a bögölyökkel kapcsolatos kutatásaink eredményeként igazoltuk a csíkos és foltos mintázatú kültakaró bögölytaszító hatását is (EGRI et al. 2012b, BLAHÓ et al. 2012a). A tapasztalt jelenség egyértelműen a bögölyök polarotaktikus gazdadetekciójához volt köthető, mert 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, amely akkor is képes kifejteni a hatását, ha bögölyöket vonzó kémiai anyagok (pl. ammónia, szén-dioxid) vannak jelen (BLAHÓ et al. 2013).

A témához kapcsolódó egyik legutóbbi kutatásunk eredményeként sikerült igazolnunk, hogy a természeti népek körében, Afrikában és Ausztráliában elterjedt fehércsíkos testfestésnek is bögölytaszító hatása van (15. ábra). Kimutattuk, hogy egy sötétbarna ember modell bögölyvonzó képessége szignifikáns módon lecsökken, ha fehércsíkos testfestéssel látjuk el. A sötétbarna ember modell tízszer vonzóbb volt a bögölyök számára, mint a fehércsíkos sötétbarna modell és a drapp (fehér ember) ember modell kétszer több bögölyt vonzott, mint a becsíkozott barna (HORVÁTH et al. 2018).



**15. ábra:** Beragacsozott ember modellek alkalmazása bögölyös terepkísérletben.

A fentiekben említett bögölykutatások részletes ismertetéseit terjedelmi okok miatt nem tartalmazza a disszertáció.

A lovasok, valamint a lovak és más haszonállatok tartói számára is fontos eredményeket (HORVÁTH et al. 2010a) számos más nyomtatott és elektronikus médium mellett a Nature (Research Highlights – Ecology: Why horses wear white 463/7283: 852, <http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7283/>) is méltatta.

### 3.1.4. A POLAROTAXIS POLARIZÁCIÓFOK INGERKÜSZÖBÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ VÍZIROVAR TAXONOKNÁL

#### 3.1.4.1. Eredmények

Mindhárom terepkísérletben világosan nyomonkövethető volt a következő tendencia: minél sötétebb volt a szintelen fényes poláros tesztfelszín, annál magasabb volt a róla visszavert fény polarizációfoka (6. ábra, 17. táblázat) és jobban vonzotta a szitakötőket (14. táblázat), a kérészeket (15. táblázat) és a bögölyöket (16. táblázat).

szitakötő fajok	étolajtálca			
	fehér	világosszürke	sötétszürke	fekete
<i>Ischnura elegans</i>	6	22	32	30
<i>Erythromma viridulum</i>	2	4	8	14
<i>Lestes macrostigma</i>	0	1	5	4
<i>Enallagma cyathigerum</i>	17	15	24	19
<b>sum</b>	<b>25 (12.3%)</b>	<b>42 (20.7%)</b>	<b>69 (34.0%)</b>	<b>67 (33.0%)</b>

**14. táblázat:** Az 1. terepkísérlet során csapdázott szitakötő fajok egyedszámai.

kérész fajok	étolajtálca				
	fehér	világosszürke	középszürke	sötétszürke	fekete
<i>Baetis rhodani</i>	0	1	2	20	39
<i>Epeorus silvicola</i>	0	0	2	12	60
<i>Ephemera danica</i>	1	8	14	31	195
<i>Rhithrogena semicolorata</i>	14	14	17	69	440
<b>sum</b>	<b>15 (1.6%)</b>	<b>23 (2.4%)</b>	<b>35 (3.7%)</b>	<b>132 (14.1%)</b>	<b>734 (78.2%)</b>

**15. táblázat:** A 2. terepkísérlet során csapdázott kérész fajok egyedszámai.

A fehér és a világosszürke olajtálca az összes csapdázott szitakötőnek csak 12.3 és 20.7%-át fogták. A fehér, a világosszürke és a középszürke olajtálca az összes kérésznek csak 1.6, 2.4 és 3.7%-át csapdázták. A bögölyök esetében ezen értékek 0.9, 1.8 és 2.7% voltak. Másrésről viszont a sötétszürke olajtálca 34.0% szitakötőt, 14.1% kérészt és 19.8% bögölyt fogott. Végül a fekete olajtálca 33.0% szitakötőt, 74.8% kérészt és 74.8% bögölyt csapdázott. A legtöbb egyed (90 és 75) az 1. kísérletben sikerült befogni két szitakötő faj (*Ischnura elegans*, *Enallagma cyathigerum*) esetében, ezért az adatokat esetükben külön kezeltük. A többi 47 *Erythromma viridulum* és *Lestes macrostigma* szitakötőegedet összesítve értékeltük. Mivel az *I. elegans* esetében a fehér étolajtálca szignifikánsan kevésbé volt vonzó, és a többi étolajtálca (világosszürke, sötétszürke, fekete) esetében a fogásértékek különbségei nem voltak szignifikánsak egyértelműen megadható egy  $p^*$  érték a fehér és a világosszürke étolajtálca felszínéről tükröződő fény  $p$  értékei között (18. táblázat). Az *E. cyathigerum* egyedek esetében nem volt szignifikáns különbség az étolajtálca fogásában (KRISKA et al. 2009), ezért a faj pozitív polarotaxisát jellemző  $p^*$  érték az alumínium fóliával bélelt étolajtálca és a fehér étolajtálca felszínéről visszavert fény  $p$  értékei közötti (18. táblázat).

bögöly fajok	fehér	világosszürke	középszürke	sötétszürke	fekete
<i>Atylotus loewianus</i>	-	-	-	1	2
<i>Haematopota italica</i>	-	-	-	1	2
<i>Tabanus bovinus</i>	-	1	-	9	13
<i>Tabanus maculicornis</i>	-	-	-	-	16
<i>Tabanus tergstinus</i>	1	1	3	11	50
<b>sum</b>	<b>1 (0.9%)</b>	<b>2 (1.8%)</b>	<b>3 (2.7%)</b>	<b>22 (19.8%)</b>	<b>83 (74.8%)</b>

**16. táblázat:** A 3. terepkísérlet során csapdázott bögöly fajok egyedszámai.



	<i>p</i> lineáris polarizációfok (%)		
	vörös (650 nm)	zöld (550 nm)	kék (450 nm)
fehér	6.8 ± 1.6	7.3 ± 1.5	17.0 ± 3.4
világosszürke	11.0 ± 2.1	11.1 ± 1.9	23.5 ± 4.7
középszürke	23.2 ± 3.1	20.7 ± 2.8	31.8 ± 5.6
sötétszürke	47.7 ± 4.9	45.7 ± 4.4	55.4 ± 5.6
fekete	90.3 ± 6.1	88.7 ± 5.7	91.9 ± 5.3

**17. táblázat:** A választásos terepkísérletekben használt étolajjal feltöltött fehér, világosszürke, középszürke, sötétszürke és fekete tálcákról (5. ábra) visszavert fény képalkotó polarimetriával a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és a kék (470 nm) Brewster-szögben ( $\theta_{\text{Brewster}} = 63^\circ$  a függőlegetől mérve az egész tálca felületére átlagolva) kimért *p* lineáris polarizációfoka (átlag ± szórás) (6. ábra).

fajok		$p_{\min} < p^* < p_{\max}$ (%)			
		vörös (650 nm)	zöld (550 nm)	kék (450 nm)	olajtálcák között
szitakötők	<i>Ischnura elegans</i>	6.8–11	7.3–11.1	17.0–23.5	fehér
	<i>Enallagma cyathigerum</i>	0–6.8	0–7.3	0–17.0	fehér–világosszürke
kérészek	<i>Baetis rhodani</i>	23.2–47.7	20.7–45.7	31.8–55.4	középszürke–sötétszürke
	<i>Epeorus silvicola</i>				
	<i>Ephemera danica</i>				
	<i>Rhithrogena semicolorata</i>	47.7–90.3	45.7–88.7	55.4–91.9	sötétszürke–fekete
bögölyök	<i>Tabanus bovinus</i>				
	<i>Tabanus maculicornis</i>	23.2–47.7	20.7–45.7	31.8–55.4	középszürke–sötétszürke
	<i>Tabanus tergustinus</i>	47.7–90.3	45.7–88.7	55.4–91.9	sötétszürke–fekete

**18. táblázat:** A vizsgált szitakötők, kérészek és bögölyök választásos terepkísérletekkel (14–16. táblázat) és polarimetriai mérésekkel (17. táblázat) becsült  $p^*$  polarizációérzékenységének  $p_{\min}$  alsó- és  $p_{\max}$  felső határa.

A vizsgált kérészek és bögölyök esetében hasonló eredményeket kaptunk: A *Baetis rhodani* kérésznél és a *Tabanus bovinus* és *Tabanus tergustinus* bögölyfajoknál a polarotaxis  $p^*$  küszöbe a középszürke és a sötétszürke étolajtálcákról visszavert fény *p* értékei között voltak, míg az *Ephemera danica*, *Epeorus silvicola* és *Rhithrogena semicolorata* kérészfajok és a *Tabanus maculicornis* bögölyfaj esetében a  $p^*$  értéke a sötétszürke és a fekete olajtálcákról visszavert fény *p* értékei közé esett (18. táblázat). A csapdázott bögölyök egyedszáma az *Atylotus loewianus* és *Haematopota italica* fajok esetében nem volt elegendő a statisztikai elemzés elvégzéséhez. A 18. táblázat a  $p^*$  küszöbértékek alsó ( $p_{\min}$ ) és felső ( $p_{\max}$ ) határértékeit tartalmazza a vizsgált polarotaktikus szitakötők, kérészek és bögölyök esetében, ahol statisztikailag szignifikáns becslést lehetett adni a választásos terepkísérletek (14–16. táblázat) és polarimetriai mérések (17. táblázat) alapján.

### 3.1.4.2. Összegzés

Az égbolt polarizációs mintázata alapján tájékozódó rovarok az égboltfény polarizációirányát használják, mert ez a legstabilabb optikai jellemzője az égboltnak (HORVÁTH és VARJÚ 2004).

A légköri zavarokra sokkal érzékenyebb  $p$  polarizációfok érzékelése kevésbé segítheti tájékozódásukat (COULSON 1988). Másrészt viszont a 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. Ekképpen a víztestek világosságának távérzékelésében a vízből érkező fény polarizációfokának lehet jelentősége. A vízfelszínről tükröződő fény jellegzetes  $p$  polarizációfoka korrelál a vízmélységgel és a zavarossággal (BERNÁTH et al. 2002), ami meghatározó lehet a préda-predátor interakciókban, és szorosan kapcsolódhat a víztest tápanyag- és oxigénforgalmához. Ezért a polarizációfok érzékelése előnyös lehet azon vizet kereső repülő rovarok számára, amelyek lárvái vízben fejlődnek. Az erősen és vízszintesen poláros fény alapvetően stabil optikai ingere a sötét/mély víztesteknek, ezért a magas  $p^*$  értékkel jellemzett polarotaxissal rendelkező vízirovarokat képes a sötét/mély vizekhez vezetni az esetek többségében. Másrészt viszont a sekély és világos (pl. egyes szikes) víztestek gyengén poláros fényt tükröznek (alacsony  $p$  érték), mert a fénynek jelentős része érkezik a vízből (a vízfénéről és a lebegő részecskékről visszavert), amely függőlegesen poláros a vízfelszíni fénytörés miatt és lecsökkenti a hatását a vízfelszínről tükröződő vízszintesen poláros fénynek. Az ilyen világos vizeket kereső vízirovarok  $p^*$  értéke alacsonyabb lehet és/vagy napnyugta és napkelte körül repülnek, kihasználva a víztestből ekkor visszaverődött, depolarizáló fénykomponens lecsökkenését. Ez utóbbi állítást erősíti meg az a kutatásunk, amely számos vízibogár és vízipoloska faj esetében igazolta a vízkeresési időszak és a polarotaktikus vízdetektálhatóság legmegfelelőbb időszakainak átfedését (CSABAI et al. 2006).

Habár a kísérleteink során alkalmazott tesztfelületek a legsötétebbtől a világosabbak felé haladva egyre csökkenő  $p$  polarizációfokú és egyre nagyobb  $I$  intenzitású fényt tükröztek, ez mégsem okozott problémát, mert korábbi terepkísérletek igazolták, hogy a vizsgált szitakötő (HORVÁTH et al. 1998a, 2007, WILDERMUTH 1998, BERNÁTH et al. 2001a, 2002), kérész (KRISKA et al. 1998, 2007, HORVÁTH és VARJÚ 2004) és bögöly (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a) taxonok polarizációérzékeléssel és pozitív polarotaxissal rendelkeznek, ezért a vonzódásukban a vízszintes polarizáció játszik szerepet, nem pedig a visszavert fény intenzitása.

A világos vizekbe tojást rakó szitakötők polarizációérzékenységének küszöbértéke alacsonyabb,  $p^* \approx 35\%$ , és ezek a világosabb vizes élőhelyek bizonyos poloskák (SCHWIND 1995) számára láthatatlanok maradnak az aktív periódusuk nagy részében (BERNÁTH et al. 2004).

A világos víztestekkel kapcsolatos feltételezést támasztja alá a kisebb, világos szikes vizekbe tojást rakó *Enallagma cyathigerum* és *Ischnura elegans* fajok alacsony  $p^*$  küszöbe. Amint azt a 14. és 18. táblázat mutatja az *I. elegans* polarotaxisának  $p^*$  ingerküszöbe 6.8 és 23.5% közötti, míg az *E. cyathigerum* esetében a  $0\% < p^* \leq 6.8 - 17.0\%$  érték attól függően, hogy polarizációérzékelés milyen hullámhossztartományban történik.

Az *E. cyathigerum* szitakötő alacsony  $p^*$  küszöbe különösen figyelemreméltó. Ez majdnem olyan alacsony, mint az elektrofiziológiai módszerrel meghatározott  $p^*$  küszöb a mezei tücsök, *Gryllus campestris* ( $p^* \approx 5\%$ , kék fényben, LABHART 1996) és a háziméh, *Apis mellifera* ( $p^* \approx 11\%$ , ultraibolya fényben, VON FRISCH 1967, ROSSEL és WEHNER 1984) dorzális szemrészének ommatídiumai esetében.

Az alacsonyabb  $p^*$  küszöbérték egyik hátránya, hogy megnöveli a fogékonyságát az adott taxonnak a vízszintesen poláros fényt visszaverő mesterséges felületek poláros fényszennyezésére (HORVÁTH et al. 2009).

Ha az alumínium fóliával bélelt olajtálcák nagy intenzitású és változó polarizációirányú visszavert fénye legalább annyi *E. cyathigerum* egyedet vonzott volna (HORVÁTH et al. 1998a), mint a sötétebb olajtálcák vízszintesen poláros visszavert fénye, akkor lehetett volna realitása annak, hogy az *E. cyathigerum* vonzásában a fényintenzitásnak van szerepe a fénypolarizáció helyett. Mivel az alumínium tálcák nem vonzották az *E. cyathigerum* szitakötőt, ezért ez a faj is pozitív polarotaxissal rendelkezik. Az északi féltekén az *E.*

*cyanthigerum* és az *I. elegans* lárvák is kisebb állóvizekben élnek. Az *E. cyanthigerum* lárvák jól tűrik a gyengébb vízminőséget és a szélsőségesen alacsony oxigénkoncentrációt (STEINER et al. 2000). Az *I. elegans* lárváival szemben az *E. cyanthigerum* lárvái képesek megélni az igen sekély, gyorsan fölmelegedő szikes vizekben. Mivel ezen élőhelyek magas albedójúak és alacsony  $p$  polarizációfokú fényt vernek vissza ezért az *E. cyanthigerum* imágók igen alacsony  $p^*$  küszöbe módot ad ezen élőhelyek észlelésére. Ezzel ellentétben a  $p^*$  küszöb 6.8 és 23% közötti értéke lehetővé teszi az *I. elegans* faj számára az ilyen sekély és világos vizek elkerülését. A vizsgált kérész és bögöly fajok esetében a hullámhossztól függő  $20.7\% \leq p^* \leq 91.9\%$  küszöbértékek (15., 16. és 18. táblázat) szignifikánsan magasabbak, mint a vizsgált, világos szikes vizeknél élő szitakötők (14. és 18. táblázat). A kérészlárvák élőhelye Dömörkapunál egy gyorsfolyású hegyipatak, a vizsgált bögölyfajok lárváinak élőhelye Gödnél pedig sötét, kis víztest. Mindkét vizes élőhelynél a vízfelszínről visszatükröződő fénynek nagy a  $p$  polarizációfoka. Ekképpen nem meglepő, hogy e fajoknak magasak a  $20.7\% \leq p^* \leq 91.9\%$  küszöbértékei, mely intervallum magában foglalja a SCHWIND (1995) által a sötét vizekben élő egynémely vízipoloska- és vízigórfajra becsült  $p^* \approx 35\%$  küszöböt is. A polarizáció-érzékenység hullámhosszfüggésének megfelelően a *Baetis rhodani* kérésznél  $20.7\% \leq p^* \leq 55.4\%$ , míg az *Ephemerella danica*, *Epeorus silvicola* és *Rhythrogena semicolorata* kérészfajoknál  $45.7\% \leq p^* \leq 91.9\%$  küszöbértékeket kaptunk (15. és 18. táblázat). A vizsgált bögölyfajok közül a *Tabanus maculicornis*  $45.7\% \leq p^* \leq 91.9\%$  küszöbértékkel sötétebb víztesteket részesít előnyben, mint a *Tabanus bovinus* és *Tabanus tergatus* a  $20.7\% \leq p^* \leq 55.4\%$  küszöbvel (17. és 18. táblázat). Mindezek az eredmények jól mutatják azt, hogy a fajspecifikus  $p^*$  küszöbértékeknek a vízirovarok életmenetében nagy a jelentősége. A  $p^*$  küszöb meghatározottsága lehetőséget adhat a polarotaktikus vízdetekció során különböző viselkedésformák megjelenésére, mivel a vízfelszínről visszavert fény polarizációfoka utalhat a víztest mélyégre és zavarosságára (BERNÁTH et al. 2002). A  $p^*$  küszöb finomhangolása alapját adhatja az imágók tojáshoz való hely választásának, azaz a lárvaélőhely megválasztásának és hatással lehet egy adott édesvízi élőlényegyüttes kialakulására. Korábbi megfigyelések alátámasztották, hogy a szitakötőlárvák zsákmányszerzésére befolyást gyakorol a víz zavarossága (VAN DE MEUTTER et al. 2005), ezért logikus lehet az a feltételezés, hogy a szitakötőlárvák élőhelyének egyes fizikai paraméterei hatással lehetnek az imágók választásának  $p^*$  szerinti finomhangolására.

A 18. táblázatban a  $p^*$  értékek a spektrum vörös, zöld és kék tartományában lettek megadva, mert a polarizációérzékenység hullámhosszfüggése a vizsgált szitakötő-, kérész- és bögölyfajok esetében nem ismeretes.

A  $p^*$  küszöbértékek meghatározását célzó viselkedési tesztekben minden rovarcsoport esetében hímek és nőstények is csapdázódtak, ami alátámasztotta, hogy mindkét nem rendelkezik pozitív polarotaxissal, ugyanakkor a  $p^*$  küszöb esetleges ivarfüggésének megállapításához nem állt rendelkezésre kellő mennyiségű adat.

### 3.1.5. A KÉRESZÉK SZÁMÁRA KEDVEZŐTLEN ÉLŐHELYEK ELKERÜLÉSE POLAROTAKTIKUS VISELKEDÉS RÉVÉN

#### 3.1.5.1. Eredmények

Az 1-5. kísérletek során több mint 250 ezer *Ephoron virgo* egyed és 3741 *Caenis robusta* egyed viselkedési reakcióját vizsgáltuk.

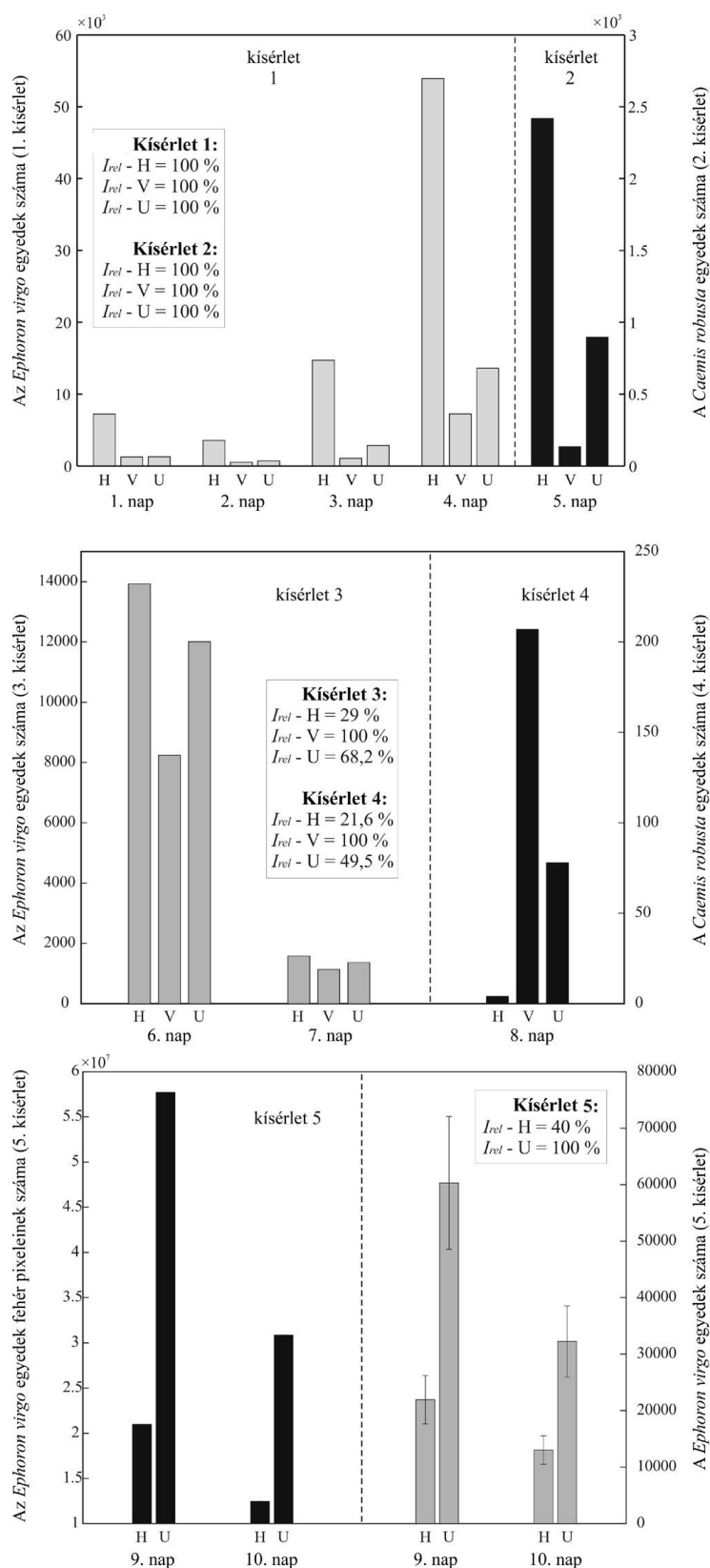
Az 1. és 3. kísérletben számos *E. virgo* kérésznőstény szakította meg a folyó sodrásával szemben haladó kompenzációs repülését és a különböző polarizációs sajátságú fényekhez vonzódott. A lámpa lekapcsolásakor az odavonzott kérészraj egyedei elrepültek és azonnal csatlakoztak a folyó fölött repülő kompenzációs rajhoz. Az 1. terepkísérlet 1-4 rajzási napja során készített 966 fotón hozzávetőlegesen 108 ezer egyedet sikerült azonosítani képfeldolgozó szoftverünkkel. Rajzási naptól függően, (i) a vízszintesen poláros fény 5.6-

11.9-szer több kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros fény, (ii) a polarizálatlan fény 1.3-2.7-szer több kérészegyedet vonzott, mint a függőlegesen poláros fény, és (iii) a vízszintesen poláros fény 4.0-5.6-szor volt vonzóbb, mint a polarizálatlan fény. (19. táblázat, 16. ábra).

Az összes lámpa által vonzott kérészegyedet figyelembe véve, (a) a vízszintesen poláros fény  $79450/10115 = 7.9$ -szer volt vonzóbb, mint a függőlegesen poláros fény, (b) a polarizálatlan fény  $18447/10115 = 1.8$ -szer több *E. virgo* egyedet vonzott, mint a függőlegesen poláros fény, és (c) a vízszintesen poláros fény  $79450/18447 = 4.3$ -szer volt vonzóbb, mint a polarizálatlan fény (19. táblázat, 16. ábra). A 20. táblázat adatai szerint e különbségek itt is szignifikánsak voltak.

kibocsátott fény	<i>Ephoron virgo</i> egyedszám (1. terepkísérlet)					<i>Caenis robusta</i> egyedszám (2. terepkísérlet)
	1. nap	2. nap	3. nap	4. nap	1-4. napok	5. nap
vízszintesen poláros, $I_{rel} = 100\%$	7242	3560	12725	53923	79450	2419
függőlegesen poláros, $I_{rel} = 100\%$	1276	525	1065	7249	10115	135
polarizálatlan, $I_{rel} = 100\%$	1282	700	2857	13608	18447	898
kibocsátott fény	<i>Ephoron virgo</i> egyedszám (3. terepkísérlet)			kibocsátott fény		<i>Caenis robusta</i> egyedszám (4. terepkísérlet)
	6. nap	7. nap	6-7. nap			8. nap
vízszintesen poláros, $I_{rel} = 29\%$	13925	1578	15503	vízszintesen poláros, $I_{rel} = 21.6\%$		4
polarizálatlan, $I_{rel} = 68,2\%$	12010	1363	13373	polarizálatlan, $I_{rel} = 49.5\%$		78
függőlegesen poláros, $I_{rel} = 100\%$	8239	1132	9371	függőlegesen poláros, $I_{rel} = 100\%$		207
kibocsátott fény	az <i>Ephoron virgo</i> egyedek fehér pixeleinek száma (5. terepkísérlet)		az <i>Ephoron virgo</i> becsült egyedszáma (5. terepkísérlet)			
	9. nap	10. nap	9. nap	10. nap		
vízszintesen poláros, $I_{rel} = 40\%$	20997957	12466372	21942 ± 4 276		13027 ± 2538	
polarizálatlan, $I_{rel} = 100\%$	57703013	30863529	60300 ± 11 749		32253 ± 6284	

**19. táblázat:** A különböző polarizációs sajátságú és intenzitású fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott és csapdába ejtett *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* kérészegyedek száma az 1-5. terepkísérletekben.  $I_{rel}$ : relatív fényintenzitás.



**16. ábra:** A különböző polarizációjú és intenzitású fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott és csapdába ejtett *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* kérészegyek teljes száma az 1-5. terepkísérletekben (1. táblázat). H: vízszintesen poláros fény, V: függőlegesen poláros fény, U: polarizálatlan fény,  $I_{rel}$ : relatív fényintenzitás.

<i>Ephoron virgo</i>	1. kísérlet 1. nap	V versus U	$\chi^2 = 0.0141$ , $df = 1$ , $p = 0.9056$	nem szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 4167.245$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 4178.581$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	1. kísérlet 2. nap	V versus U	$\chi^2 = 25$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 1920.094$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 2254.89$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	1. kísérlet 3. nap	V versus U	$\chi^2 = 818.7823$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 8011.001$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 11817.33$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	1. kísérlet 4. nap	V versus U	$\chi^2 = 1938.768$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 24067.45$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 35612.08$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	1. kísérlet 1-4. napok	V versus U	$\chi^2 = 2430.58$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 38013.08$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 53674.34$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
<i>Caenis robusta</i>	2. kísérlet 5. nap	V versus U	$\chi^2 = 563.5712$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 697.4498$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 2042.543$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
<i>Ephoron virgo</i>	3. kísérlet 6. nap	V versus U	$\chi^2 = 354.02$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 70.72$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 741.55$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	3. kísérlet 7. nap	V versus U	$\chi^2 = 10.62$ , $df = 1$ , $p = 0.0011$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 7.80$ , $df = 1$ , $p = 0.0052$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 36.95$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
<i>Caenis robusta</i>	4. kísérlet 8. nap	V versus U	$\chi^2 = 30.32$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 41.93$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 126.18$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
<i>Ephoron virgo</i>	5. kísérlet 9. nap	H versus U	$\chi^2 = 3.01 \cdot 10^{15}$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns
	5. kísérlet 10. nap	H versus U	$\chi^2 = 2.86 \cdot 10^{14}$ , $df = 1$ , $p < 0.000001$	szignifikáns

**20. táblázat:** A függőlegesen poláros (V), vízszintesen poláros (H) és polarizálatlan (U) fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* egyedek számának statisztikai összevetése ( $\chi^2$  teszt) az 1., 2., 3., 4. és 5. terepkísérlet esetében.

A 8A-C. ábra mutatja az 1. kísérletben használt lineárisan polarizáló és depolarizáló szűrők polarizációs jellegzetességeit a spektrum kék (450 nm) tartományában. A 8E-J. ábra a 2. terepkísérletben használt vízszintesen poláros ( $p = 97.4 \pm 2.6\%$ ,  $\alpha = 92.3^\circ \pm 0.6^\circ$ ), függőlegesen poláros ( $p = 98.0 \pm 2.0\%$ ,  $\alpha = 0.1^\circ \pm 1.9^\circ$ ) és gyakorlatilag polarizálatlan ( $p = 7.7 \pm 7.6\%$ ,  $\alpha = 71.3^\circ \pm 34.7^\circ$ ) fényt kibocsátó három különböző fénycsapda lineáris  $p$  polarizációfok (8E-G. ábra), és  $\alpha$  polarizációs szög (az óramutató járása szerint a függőlegetől mért (8H-J. ábra), képalakító polariméterrel kimért mintázatát mutatja a spektrum kék (450 nm) tartományában. Habár a fénycsapda fényének visszaverődése a fehér, függőleges műanyag terelőlapokról kissé megváltoztatta a fényforrás polarizációs jellegzetességeit a műanyag lapokról visszavert fény és a kibocsátott fény polarizációs szöge azonos volt.

A 2. kísérletben 3452 *Caenis robusta* kérészt azonosítottunk. Az eredmények alapján megállapítható, hogy (i) a vízszintesen poláros fény  $2419/135 = 17.9$ -szer vonzóbb a *Caenis robusta* számára, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény  $898/135 = 6.7$ -szer

több *Caenis robusta* kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény  $2419/898 = 2.7$ -szer vonzóbb volt, mint a polarizálatlan fény (19. táblázat, 16. ábra). Ezek a különbségek statisztikailag szignifikánsak (20. táblázat).

Az 1. és 2. kísérlet eredményei alapján megállapítható, hogy (1) a polarizálatlan fény pozitív fototaxist vált ki az *E. virgo* és *C. robusta* imágók esetében, (2) a vízszintesen poláros fény pozitív polarotaxist vált ki ezeknél a kérészeknél, és (3) és a függőlegesen poláros fény mindkét faj esetében a legkevésbé vonzó, ha a fényforrás fényintenzitása azonos.

A 3. kísérletben 360 fotó készült, amelyeken közel 38 ezer *Ephoron virgo* egyedét azonosított a képkiértékelő szoftverünk (FARKAS et al. 2016). Rajzásnaptól függően, (i) a vízszintesen poláros fény 1.4-1.7-szer több kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 1.2-1.5-szer volt vonzóbb a függőlegesen polárosnál, és (iii) a vízszintesen poláros fény 1.2-szer volt vonzóbb, mint a polarizálatlan.

A vonzott kérészek összegyedszámát alapul véve megállapítható, hogy (i) a vízszintesen poláros fény  $15503/9371 = 1.7$ -szer vonzóbb volt, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény  $13373/9371 = 1.4$ -szer több dunavirágot vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény  $15503/13373 = 1.2$ -szer vonzóbb volt, mint a függőlegesen poláros (19. táblázat, 16. ábra). A 3. terepkísérlet alapján megállapítható, hogy a függőlegesen poláros fény volt a legkevésbé vonzó az *E. virgo* egyedek számára, habár a fényintenzitása ennek a fényforrásnak volt a legnagyobb.

A 4. kísérletben 289 *Caenis robusta* kérészt azonosítottunk. Azt kaptuk, hogy (i) a függőlegesen poláros fény  $207/4 = 51.8$ -szer volt vonzóbb a *Caenis robusta* számára, mint a vízszintesen poláros, (ii) a függőlegesen poláros fény  $207/78 = 2.7$ -szer több kérészt vonzott, mint a polarizálatlan, és (iii) a polarizálatlan fény  $78/4 = 19.5$ -szer vonzóbb volt, mint a vízszintesen poláros (19. táblázat, 16. ábra). A 4. kísérlet eredményei alapján levonhatjuk a következtetést, miszerint a függőlegesen poláros fény sokkal vonzóbb a *Caenis robusta* számára, ha e fény intenzitása a három fényforrás közül a legmagasabb.

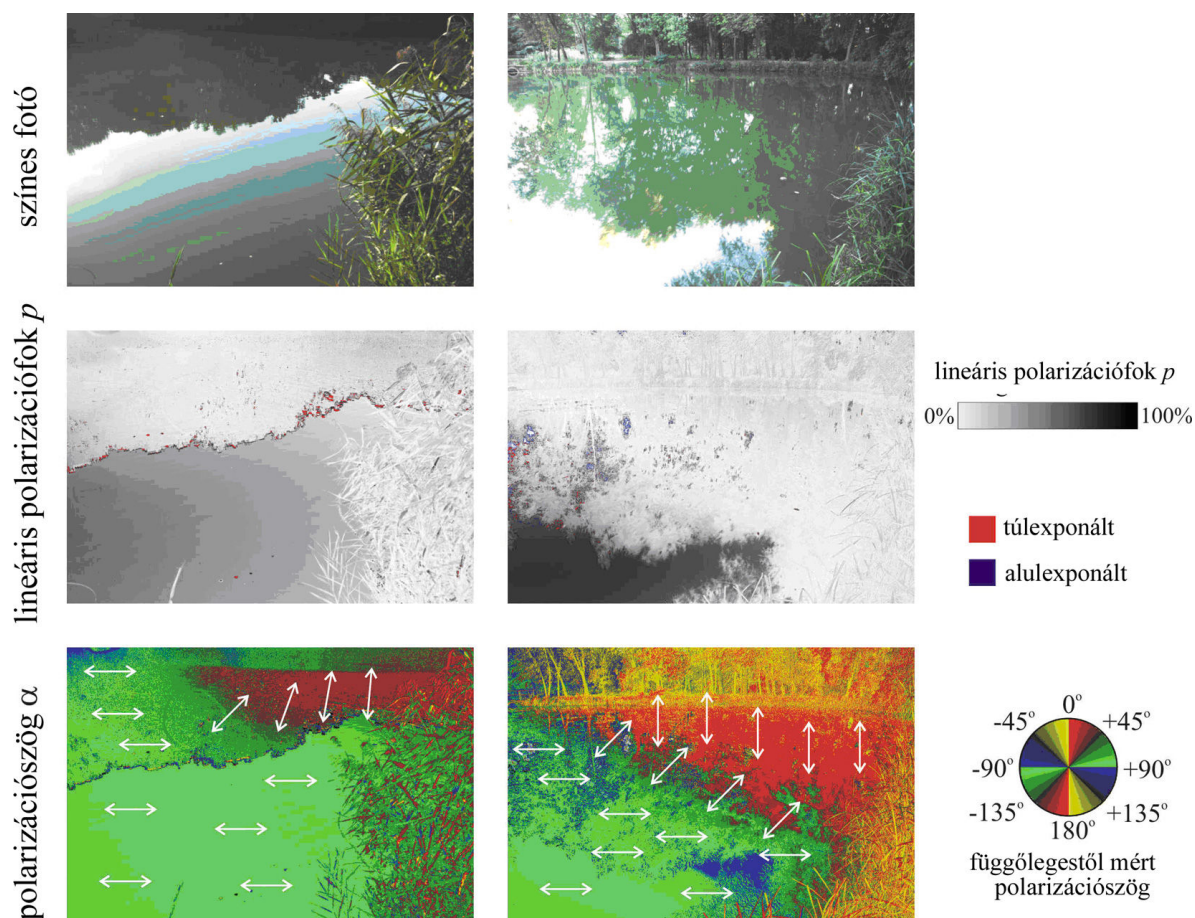
Az 5. kísérletben készült 549 fotón  $127522 \pm 24847$  kérészegyedet azonosított a képkiértékelő szoftver. Rajzásnaptól függően, a polarizálatlan fény 2.5-2.7-szer több dunavirágot vonzott, mint a vízszintesen poláros, mely utóbbinak 40% volt az intenzitása a polarizálatlan fény intenzitásához képest (19. táblázat, 16. ábra). A 20. táblázat alapján látható, hogy a tapasztalt különbségek statisztikailag szignifikánsak voltak.

A 17. ábra két állóvíz parti régiójának napnyugtakor, tiszta égbolt alatt képalkotó polarimetriával készült polarizációs mintázatát mutatja be, ahol a víztestnek azon része, amelyről a vízparti növényzet képe tükröződik, nem vízszintesen poláros fényt reflektál. Az égboltot tükröző vízfelszín vízszintesen poláros fényt ver vissza (polarizációs szög  $\alpha \approx 90^\circ$  a függőlegestől mérve) magas polarizációfokkal ( $p < 25\%$ ).

### 3.1.5.2. Értékelés

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 alkalmatlan partrészeket (17. ábra). 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. Mint korábban kimutattuk, e jellegzetes viselkedés populációs szintű változásokat okozhat a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) esetében (MÁLNÁS et al. 2011).



**17. ábra:** Két példa, amikor a víztest széli régiója nem vízszintesen poláros fényt tükröz a vízparti növényzet tükröződésénél. (A) A vízfelszín polarizációs mintázata képalkotó polarimetriával lett kimérve a spektrum kék (450 nm) tartományában tiszta égbolt alatt napnyugta előtt Vácon. A képalkotó polariméter az antiszoláris meridián felé tekintett, optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-25^\circ$  volt. A fehér kettősfejű nyilak a visszavert fény helyi polarizációirányát mutatják a vízfelszínen. (B) A képalkotó polariméter az antiszoláris meridián felé tekintett, optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-37^\circ$  (Brewster szög) volt.

Természetes körülmények között a dunavirág és a *Caenis robusta* kérészek a vízfelszín felett rajzanak, ugyanakkor a vízhez közeli mesterséges fényforrások fényszennyezésükkel magukhoz vonzhatják és csapdába ejthetik e rovarokat pozitív fototaxisuk révén (SCHLAEPFER et al. 2002, LONGCORE és RICH 2004). A két faj esetében pozitív fototaxisukat kihasználva tudtuk véghezvinni terepkísérleteinket, amelyek során különböző polarizációjú fényforrásokkal vonzottuk a kérészeket. A dunavirág és *Caenis robusta* fajok esetében a függőlegesen poláros fény minimális vonzásának oka és egyben jelentősége abban rejlik, hogy a vízparti növényzet árnyéka és tükörképe a vízfelszín szélén gyengén ( $p < 25\%$ ) és nem vízszintesen poláros. (17. ábra, lásd még HORVÁTH és VARJÚ 1997: 3-6. ábra, BERNÁTH et al. 2002: 4-6. ábra, BERNÁTH et al. 2008a: 4. ábra és MÁLNÁS et al. 2011: 2-3. ábra). A fent említett jelenség oka a következő: a vízfelszín polarizációs mintázatát két fénykomponens határozza meg: (i) a vízfelszínről tükröződő, és (ii) a vízfelszín alól érkező fény. Az első összetevő többnyire vízszintesen poláros a napfény és az égboltfény levegő-víz határon



bekövetkező tükröződési polarizációja miatt (HORVÁTH 1995), míg a második mindig függőlegesen poláros a víz alól érkező fény víz-levegő határon történő fénytörési polarizáció miatt (HORVÁTH és VARIJÚ 1995). Ha az első vagy a második összetevő dominál, akkor a víztestről visszatérő fény eredő polarizációja vízszintes vagy függőleges. Ha mindkét összetevő hasonló intenzitású, akkor a  $p$  polarizációfok alacsony. Az optikai szempontból nyílt vízfelszínről a napfény és az égboltfény szabadon tükröződhet, és a vízfelszín polarizációjának iránya általában vízszintes. A vízparti növényzet tükröződésénél a fény forrása a növényzetről visszavert, a közvetlen napfényénél és égboltfényénél kisebb intenzitású fény. Ekképpen a második (a víztestből kilépő) fénykomponens általában elnyomja az első (vízfelszínről tükröződő) összetevőt, különösen a világosabb víztestek esetében, amelyek vízben lebegő részecskéiről több fény szóródik vissza. Végül soron ennek eredményeként a növényzet tükörképe függőlegesen poláros. Hasonló a helyzet a vízfelszín árnyékos részén is, ahol nincs a közvetlen napfénynek hozzájárulása a polarizációhoz. A tükröződés és árnyékolás hatása gyakran együttesen jelenik meg, mert a vízparti növényzet árnyékot vet a saját vízparti tükörképére.

A fotók kiértékelésével nem lehetett megállapítani az egyedek nemét, de mivel a kompenzációs repülésben csak nőtények vesznek részt (SZÁZ et al. 2015), ezért megállapítható, hogy az *E. virgo* fajjal folytatott kísérleteinkben nőtények vettek részt. Másrészt viszont a *C. robusta* faj esetében a csapdázott egyedek mind hímeknek bizonyultak. Ez a tapasztalat valószínűleg arra vezethető vissza, hogy a kérészrajokban a hímek egyedszáma sokkal nagyobb, 4-6-szor több, mint a nőtényeké (BRODSKIY 1973).

Tiszavirággal folytatott korábbi terepkísérleteinkben vízszintes tesztfelületeket (fényes fekete és fehér műanyag fólia) terítettünk ki füves területre a Tisza mellett, és tanulmányoztuk az e felületek felett elengedett tiszavirágok repülési viselkedését naplementekor (KRISKA et al. 2007). E kérészek visszafordultak a vízszintesen poláros, megfelelően magas polarizációfokú fényt tükröző fényes fekete és fehér műanyag fóliák szélénél. E kísérletben a vízszintesen poláros műanyag fóliákat gyengén és nem vízszintesen poláros napfény által megvilágított gyepterületre helyeztük. Ezért e mesterségesen kialakított kísérleti helyzetben az optikai ingerek térbeli sorrendje (a műanyag fóliák által tükrözött erősen és vízszintesen poláros fényt a gyepterület által visszavert gyengén és nem vízszintesen poláros fény követte) utánmozgott a természetes viszonyok között a vízfelszínen megjelenő helyzetet (a nyílt vízfelszín által tükrözött erősen és vízszintesen poláros fényt a vízfelszín partszélénél gyengén és nem vízszintesen poláros fény követte). Mindkét helyzetben a repülő kérészek visszafordultak a vízszintesen poláros felületek szélétől a függőlegesen poláros fény rájuk gyakorolt minimális vonzó hatása miatt.

Egy tiszavirággal kapcsolatos másik kutatásunk (MÁLNÁS et al. 2011) eredményeként már feltételeztük, hogy a folyóparti növényzet gyengén és függőlegesen poláros tükörképe és árnyéka miatt a vízszegélyen kialakuló optikai gát szerepet játszhat abban, hogy a kérészek rajzásuk során, a hím szubimágók vedlését leszámítva, végig a vízfelszín felett maradnak. A vízszintesen poláros jel hiányában a kérészek elhagyják az adott felszíni régiót. Fenti kutatásunk a dunavirág és a *Caenis robusta* esetében kimutatta, hogy e kérészek a függőlegesen poláros fényvel szemben a vízszintesen poláros és polarizálatlan fényt preferálják. Feltételezzük, hogy e viselkedés adaptív értéke az, hogy lehetővé teszi a kérészek vízfelszín felett maradását rajzáskor. A vízpartokon gyakran kialakul egy vízszintes sötét iszapos sáv, amely általában vízszintesen poláros fényt reflektálva vízfelszínt utánmozgató a polarotaktikus vízirovarok számára. Ha a vízfelszín szélén nem alakulna ki a vízparti növényzet függőlegesen poláros árnyéka és tükörképe, ami távol tartja a kérésznőtényeket az iszapfelszíntől, akkor azok lerakhatnák tojáscsomóikat a lárvák kifejlődésére alkalmatlan területre.

Habár a terepkísérleteinkben gyakorlatilag teljesen poláros fényvel ( $p \approx 100\%$ ) dolgoztunk, fontos megjegyezni, hogy a  $p$  polarizációfok csak abból a szempontból fontos, hogy ez alacsonyabb vagy magasabb-e, mint az adott faj  $p^*$  polarizációérzékenységi küszöbe.

Pataklakó kérészfajokkal folytatott korábbi polarizációérzékenységi vizsgálatainkban a  $p^*$  tartományára a következőket kaptuk (KRISKA et al. 2009): *Baetis rhodani* ( $32\% \leq p^* \leq 55\%$ ), *Ephemera danica*, *Epeorus silvicola*, *Rhithrogena semicolorata* ( $55\% \leq p^* \leq 92\%$ ). A fenti magyarázat, ami a dunavirág és a *Caenis robusta* viselkedésének adaptív előnyére utal, feltételezi, hogy a vízfelszín határán kialakuló gyengén függőlegesen poláros fényt képesek érzékelni ( $p^* < p$ ) az egyedek.

A kérészek és álkérészek (Plecoptera) sikeres kolonizációjában fontos szerepet tulajdonítanak a kompenzációs repülésnek a kutatók (SPIETH 1940, TERCEDOR és ORTEGA 1991). A kompenzációs repülés eredményeként a kérésznőtények több kilométert repülnek a folyásiránnyal szemben a folyó középvezetékében miközben egyes mellékvízfolyások betorkolását elérve és ezek irányában továbbrepülve újabb élőhelyeket népesíthetnek be. E jelenség magyarázatot adhat az *E. virgo* legújabbkori gyors elterjedésére Európa folyóiban a korábbi több évtizedes eltűnést követően (IBANEZ et al. 1991, SZÁZ et al. 2015). E kolonizációban a folyólakó kérészeknél fontos szerepe lehet a pozitív polarotaxisnak, ami a folyó és mellékfolyó vízszintesen poláros jele alapján vezeti a kérésznőtényeket az alkalmas élőhelyekre. Másrészt a folyóba torkolló kisebb csatornák és ártéri kisvizek alkalmatlan helyei lehetnek a lárvák kifejlődésének, ezért kifejezetten előnyös lehet, hogy az ezek kisebb mérete miatt a vízfelszínen kialakuló teljes vagy majdnem teljes árnyékoltság és a növényzet tükröződése (17. ábra) miatt kialakuló, nem vízszintes polarizáció távol tartja a kérésznőtényeket. A tiszavirág (*P. longicauda*) rajzásakor több alkalommal is megfigyeltem a Szolnok fölötti Dobapusztánál, hogy egy, a Tiszába szélesebb torkolattal kapcsolódó csatorna irányába elindulnak a kompenzációs repülésüket végző nőtények, majd a csatorna beszűkülésekor visszafordulnak és a folyó fölé repülve folytatják kompenzációs repülésüket a Tisza fölött. Ezt a jelenséget is magyarázhatja a csatorna beszűkülésével kialakuló teljes vízfelszíni árnyékoltság és a növényzet tükröződése, ami nem vízszintes polarizációt eredményezve irányítja vissza a folyó fölé a kérészeket.

A 3. terepkísérletben az *Ephoron virgo* kérészek előnyben részesítették a vízszintesen poláros fényt, amikor ennek intenzitása a fele, illetve harmada volt a polarizálatlan és függőlegesen poláros fényének. E kísérletben az *E. virgo* kérészeket pozitív polarotaxis (vonzódás a vízszintes polarizációhoz) vezette, ami felülírta a pozitív fototaxis (vonzódás a nagyobb intenzitású fényhez). Másrészt viszont a 4. kísérletben a *Caenis robusta* egyedek előnyben részesítették a függőlegesen poláros fényt, amikor ennek intenzitása kétszer, illetve ötször nagyobb volt, mint a polarizálatlan és a vízszintesen poláros fényé. Ekkor a *C. robusta* viselkedésére inkább a fototaxis volt hatással, mint a polarotaxis. Ezért a kritikus fényintenzitás, melynél a polarotaxis képes kontrollt gyakorolni a fototaxis fölött, különböző a két vizsgált kérészfajnál.

Az 5. kísérletben a polarizálatlan fény nagyjából háromszor annyi dunavirágot vonzott, mint a vízszintesen poláros, mely utóbbi intenzitása a polarizálatlan fényének 40%-a volt. Ennek oka a következő lehet: Feltételezhető, hogy a kérészeknek csak a hasoldali szemrésze polarizáció-érzékeny, akárcsak a tarka hanyattúszó-poloskáké (*Notonecta glauca*) (SCHWIND 1983a, 1985a), mert a vízirovarok polarizáció-érzékeny szemrészének feladata a vízfelszínről tükröződő, vízszintesen poláros fény érzékelése a vízkereső repülés során. Az 5. kísérletben a fényforrások a hídról lógtak le, ami miatt ezek a közeledő kérészeknek csak a hátoldali és elülső szemrészét ingerelték, amelyek nem érzékelik a fénypolarizációt, ezért a kérészek választását csak a fényintenzitás befolyásolta. A pozitív fototaxis miatt a dunavirágok többsége az erősebb intenzitású fényforrást választotta, függetlenül annak polarizációjától. Összefoglalva, ebben az esetben a kérészek reakciójára nagyobb hatással volt a fototaxis, mint a polarotaxis. A többi terepkísérletben a fényforrás a földön volt, ami hatással lehetett a közeledő kérészek hasoldali szemrészére, ezért a választást a polarotaxis erősebben befolyásolta, mint a fototaxis.

## 3.2. MESTERSÉGES POLÁROS FÉNYFORRÁSOK ÉS POLARIZÁCIÓS MINTÁZATOK HATÁSA VÍZIROVAROKRA

### 3.2.1. KÜLÖNBÖZŐ SZÍNÁRNYALATÚ GÉPKOCSIK POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

#### 3.2.1.1. Eredmények

A műanyag fóliás terepkísérlet során 1229 vízirovar (1059 vízibogarat, 170 vízipoloskát) sikerült begyűjteni a háromórás mintavételi idő alatt. A befogott egyedek 30 vízibogár és 7 vízipoloska fajhoz tartoztak. A fekete és piros műanyag fólia sok egyedet és fajt vonzott a sárga és fehér fóliákhoz képest. A fekete és piros fóliák által vonzott rovarokat a nagy (1098) egyedszám és a változatos (33) fajösszetétel jellemezte. A fehér és sárga fóliák azonban csak kis számú (131) egyedet és kevesebb (10) fajt vonzottak. A fekete és piros fóliák között nem volt statisztikailag szignifikáns eltérés az egyed- és fajszámokban. Ugyanez igaz a sárga és fehér fóliákra is. Másrészt viszont a fehér és sárga fóliák vonzereje jelentősen kisebb volt a piros és fekete fóliákétól. Szignifikánsan nagy különbség adódott a piros/fekete és a fehér/sárga fóliapárok között, úgy az egyedszámban, mint a fajszámban (KRISKA et al. 2006a). Ezzel tehát kísérletileg sikerült igazolni, hogy a vízirovarok a vízszintes piros és fekete tükrözőfelületekhez sokkal jobban vonzódnak, mint a sárgákhoz és fehérekhez.

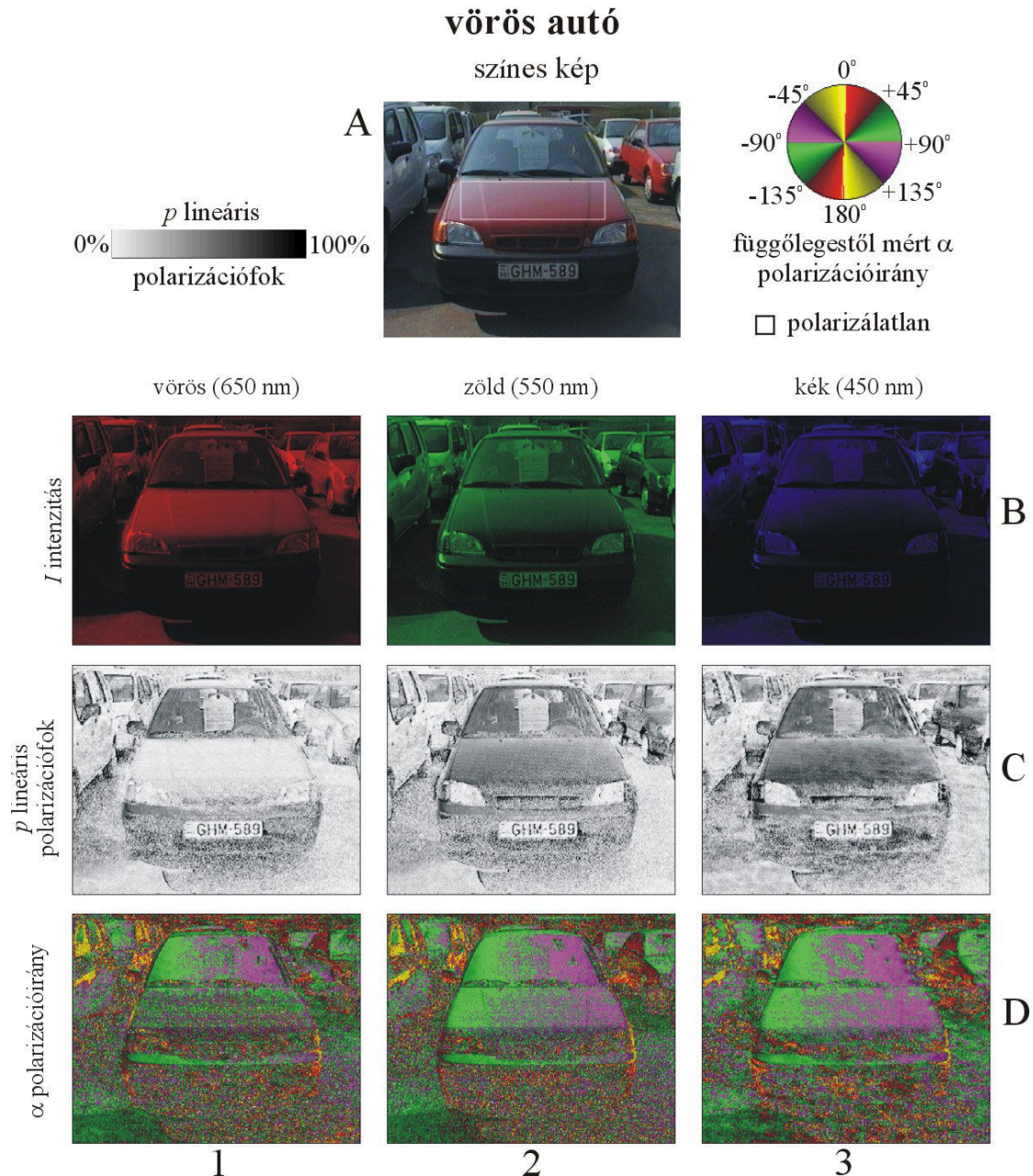
spektális tartomány	optikai változó	gépkocsi			
		fehér	fekete	sárga	piros
vörös (650 nm)	$I$ (%)	94.2±4.3	23.4±6.3	96.1±4.0	56.2±6.5
	$p$ (%)	5.8±2.1	48.9±10.5	3.1±1.8	9.6±4.6
	$\alpha$ (°)	140.4±11.6	91.7±8.6	63.1±56.1	78.0±26.5
zöld (550 nm)	$I$ (%)	100	28.2±7.7	91.7±5	30.5±8.1
	$p$ (%)	2.3±1.5	50.0±9.3	3.3±1.7	42.4±14.8
	$\alpha$ (°)	59.5±47.3	91.7±7.9	63.9±43.1	88.3±11.4
kék (450 nm)	$I$ (%)	98.3±2.0	33.1±8.3	59.8±5.2	33.3±8.9
	$p$ (%)	2.9±1.6	54.4±10.3	11.8±3.6	52.4±16.2
	$\alpha$ (°)	71.3±34.5	92.1±7.6	89.2±14.6	91.0±9.76

**22. táblázat:** A fehér, fekete, sárga és piros autók (Suzuki swift) motorháztetőjéről visszavert fénynek a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban képalkotó polarimetriával mért  $I$  (%) relatív intenzitása,  $p$  (%) lineáris polarizációfoka és a függőlegeshez viszonyított  $\alpha$  polarizációs szöge. Az  $I$ ,  $p$  és  $\alpha$  átlaga  $\pm$  szórása a motorháztetők téglalapokkal jelölt területére van megadva, míg az  $I$  intenzitásértékek a fehér autóról tükröződő fénynek a zöld spektrális tartományban mért intenzitásához képest lettek kiszámolva.

A 18. ábra a piros autónak a spektrum vörös, zöld és kék tartományaiban mért tükröződési-polarizációs mintázatait mutatja, a 22. táblázat pedig a fehér, fekete, sárga és piros, közel vízszintes motorháztetők felületrészletéről (KRISKA et al. 2006a: 3. ábra) visszavert fény  $I$  intenzitásának,  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének az átlagát és szórását tartalmazza.

A fehér autó vízszintes felületrészeiről visszavert fény  $p$  lineáris polarizációfoka nagyon alacsony ( $p \approx 2$ -6%) és a polarizáció iránya nem mindig vízszintes (22. táblázat, KRISKA et al. 2006a: 3. ábra). A fekete autó vízszintes részeiről tükröződő fény ellenben erősen poláros ( $p \approx 49$ -54%) és a polarizáció iránya mindig közel vízszintes (KRISKA et al. 2006a, 3. ábra, 22.

táblázat). Borult égbolt alatt a fehér és fekete autók fénypolarizációs sajátosságai gyakorlatilag függetlenek a  $\lambda$  hullámhossztól, mivel az autók festékrétege szintelen. Ez kissé módosul tiszta, kék égbolt alatt, mikor a spektrum kék tartományában legnagyobb a visszavert fény polarizációfoka és vörösben a legkisebb.



**18. ábra:** Egy piros autónak a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért tükröződési-polarizációs sajátosságai tiszta égbolt alatt és a Nap horizont fölötti  $42^\circ$ -os szögtávolsága mellett. Az autót (Suzuki swift) bal oldalról világította meg a Nap. Az autó hossz tengelye és a polariméter megfigyelési iránya merőleges volt a szoláris meridiánra. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-20^\circ$ -os szöget zárt be. (A) A színes képen egy téglalap mutatja a motorháztető azon részét, melyre a 22. táblázat adatai ki lettek számolva. (B-D) Az autó karosszériájáról visszavert fény  $I$  intenzitásának,  $p$  lineáris polarizációfokának és a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációszögének mintázatai.

Ezzel ellentétben a sárga és piros autók tükröződési-polarizációs jellemzői erősen hullámhosszfüggőek. A sárga autóról visszaverődő fény csak gyengén poláros: legkevésbé a

spektrum vörös tartományában ( $p \approx 3\%$ ) és legjobban a kékben ( $p \approx 12\%$ ), a polarizáció iránya pedig csak a kékben közel vízszintes, a többiben ettől eltérő (22. táblázat, KRISKA et al. 2006a: 3. ábra). A piros autó vízszintes részeiről tükröződő fény polarizációja alacsony a spektrum vörös tartományában ( $p \approx 10\%$ ), de magas a zöldben és a kékben ( $p \approx 42\text{--}52\%$ ) (18C. ábra, 22. táblázat), a polarizáció iránya pedig közel vízszintes a zöldben és kékben, de viszonylag távol áll a vízszintestől a vörösben (18D. ábra, 22. táblázat).

Az autók ferde síkú szélvédőjéről és a közel függőleges oldalfalairól és ablakairól visszaverődő fény polarizációiránya szintén közel vízszintes, de csak akkor, ha a fényvisszaverődés síkja közel függőleges, mikor a beeső fény fölülről érkezik. A 18. ábra azt az esetet mutatja, mikor a szélvédő a fölülről jövő égboltfényt tükrözi.

A 23. táblázat a polarotaktikus vízirovarokat vizsgáló terepkísérletben használt vízszintes fehér, fekete, sárga és piros műanyag fóliákról visszavert fénynek a spektrum vörös, zöld és kék tartományaiban, a szoláris meridián irányában és arra merőlegesen képalkotó polarimetriával mért visszavert fény  $I$  intenzitásának,  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének az átlagát és szórását tartalmazza.

spektrális tartomány	MI	optikai változó	vízszintes műanyag fólia			
			fehér	fekete	sárga	piros
vörös (650 nm)	SM	$I$ (%)	88.3±11.7	44.8±16.4	79.4±13.1	77.3±4.5
		$p$ (%)	4.8±4.9	71.3±15.3	9.9±6.0	6.1±3.0
		$\alpha$ (°)	88.8±23.8	90.9±9.2	87.6±15.9	89.5±21.9
	MSM	$I$ (%)	92.3±7.7	23.8±5.8	95.2±5.8	96.4±2.0
		$p$ (%)	3.2±3.6	39.9±8.9	2.4±2.9	1.7±1.5
		$\alpha$ (°)	150.0±10.0	91.2±9.5	158.0±10.0	140.0±20.0
zöld (550 nm)	SM	$I$ (%)	92.8±7.2	47.3±17.4	75.1±14.8	41.9±6.3
		$p$ (%)	4.7±4.4	70.6±15.1	14.5±7.9	57.3±6.6
		$\alpha$ (°)	86.6±22.3	90.1±9.5	86.0±13.3	88.7±3.3
	MSM	$I$ (%)	100	24.6±5.9	85.3±7.2	26.4±3.0
		$p$ (%)	2.4±2.4	42.0±8.9	3.6±2.5	33.3±7.8
		$\alpha$ (°)	160.0±10.0	90.1±9.1	160.0±20.0	105.6±8.2
kék (450 nm)	SM	$I$ (%)	96.0±4.0	49.7±15.7	52.2±15.9	54.8±8.1
		$p$ (%)	4.8±5.0	71.3±14.8	51.7±13.8	65.6±9.7
		$\alpha$ (°)	86.7±22.7	91.0±9.3	92.7±7.7	92.1±3.0
	MSM	$I$ (%)	99.0±1.0	28.0±6.3	19.6±4.5	26.2±4.4
		$p$ (%)	3.3±3.4	49.4±9.6	29.5±13.7	57.7±12.3
		$\alpha$ (°)	159.0±15.0	90.7±9.1	100.2±21.4	104.6±7.8

**23. táblázat:** A fehér, fekete, sárga és piros műanyag fóliákról visszavert fénynek a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban képalkotó polarimetriával mért  $I$  (%) relatív intenzitása,  $p$  (%) lineáris polarizációfoka és a függőlegeshez viszonyított  $\alpha$  polarizációs szöge. Az  $I$  intenzitásértékeket a fehér műanyag fóliáról tükröződő fénynek a zöld spektrális tartományban mért intenzitásához képest adtam meg. MI: a polariméter optikai tengelyének megfigyelési iránya. SM: a szoláris meridián irányában, MSM: a szoláris meridiánra merőlegesen.

A fehér műanyag fóliáról visszavert fény átlagos  $p$  lineáris polarizációfoka nagyon alacsony volt ( $p \approx 2\text{--}5\%$ ), függetlenül a megfigyelés Naphoz viszonyított irányától, és gyakorlatilag függetlenül a  $\lambda$  hullámhossztól. A fehér és sárga fóliákról visszaverődő fény polarizációiránya közel vízszintes volt a Nap irányában, de nem volt vízszintes a szoláris meridiánra merőlegesen. A fekete fóliáról tükröződő fény átlagos  $p$  lineáris polarizációfoka magas volt ( $p \approx 40\text{--}72\%$ ) és polarizációiránya közel vízszintes volt, függetlenül a megfigyelési iránytól és  $\lambda$ -tól. A sárga fóliáról visszavert fény átlagos  $p$  polarizációfoka a szoláris meridiánra merőlegesen, a spektrum vörös tartományában volt a legalacsonyabb ( $p \approx 2\%$ ) és a kékben a

legmagasabb ( $p \approx 30\%$ ). A szoláris meridiánnal párhuzamos irányban azonban magasabb volt a  $p$  ( $p \approx 10-52\%$ ). A piros fóliáról visszaverődő fény  $p$  polarizációfoka alacsony ( $p \approx 2-6\%$ ) volt a vörösben és magas ( $p \approx 33-66\%$ ) a zöldben, valamint kékben, a megfigyelési iránytól függetlenül. A piros fóliáról tükröződő fény polarizációiránya a spektrum mindhárom vizsgált tartományában közel vízszintes volt a Nap irányában, de viszonylag távol volt a vízszintestől a szoláris meridiánra merőleges irányban. A műanyag fóliákról visszavert fény  $p$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének szórása nagyobb volt, mint az autókról tükröződő fény esetében, mivel a fóliák felszíne kissé egyenetlen volt, ellentétben a sima motorháztető felszínével.

### 3.2.1.2. Értékelés

A polarotaktikus vízirovarok számára a parkoló autók veszélyesek lehetnek: az autók teteje, csomagtartója és motorháztetője e rovarok számára vízfelületnek tűnik a róluk visszavert erősen és vízszintesen poláros fény miatt, ami becsaphatja, odavonzhatja őket. A fekete és piros autókra rakott összes rovar tojás hamar elpusztul a kiszáradás miatt. Nagy autóparkolóknál a vízirovarok vizuális megtévesztése még jelentősebb lehet. Az autók itt közel állnak egymáshoz, miáltal a polarizációs hatásuk összeadódik, s egy nagy felületű polarizációs ökológiai csapdát képeznek. Ez a jelenség meglehetősen káros az olyan természetvédelmi területek közelében, ahol vizes élőhelyek is előfordulnak. Másrésről azonban a fehér vagy sárga autók nem tévesztik meg a polarotaktikus vízirovarokat. Ezért ezeket a világos színű autókat esetünkben környezetbarátnak tarthatjuk.

A fekete autókról visszavert fény mindig erősen és vízszintesen poláros a spektrum minden tartományában. Ez az oka annak, hogy a fekete autók teteje, motorháztetője és csomagtartója nagyon vonzó a polarotaktikus vízirovarok számára. Másrésről viszont a piros autók karosszériája a spektrum vörös tartományában polarizálja a fényt legkevésbé, s a visszavert fény lineáris polarizációfoka a kékben és az ultraibolyában (UV) a legnagyobb. A vízirovarok többsége vak a piros színre, mivel csak UV, kék és zöld fényre érzékeny fotoreceptorokkal rendelkezik (HORVÁTH és VARJÚ 2004). Ezáltal a piros autók fénypolarizáló-képessége csak a spektrum zöld, kék és UV tartományaiban érdekes a vízirovarok szempontjából. A spektrum ezen részeiben a piros autók fénypolarizáló-képessége gyakorlatilag ugyanolyan, mint a feketéké. Ez tehát az oka annak, hogy a piros autók teteje, motorháztetője és csomagtartója annyira vonzó a vízirovarok számára, és körülbelül ugyanolyan vonzó, mint a fekete autóké. A fehér vagy sárga autók tetejéről, motorháztetőjéről és csomagtartójáról tükröződő fény sokkal gyengébben poláros, és a polarizáció iránya többnyire nem vízszintes. Ezért ezek a felületek gyakorlatilag nem vonzzák a vízirovarokat.

Kutatásainkkal bizonyítottuk, hogy a gépkocsik rejtélyes vonzó hatásának hátterében a rovarok fénypolarizáció-érzékelésen alapuló vízkeresése áll. A sötét színű, különösen a fekete és piros gépkocsik fényes felületéről erősen és vízszintesen poláros fény verődik vissza, amely a vizet kereső polarotaktikus rovarok számára vizet jelez. Ez az oka annak, hogy a repülő rovarok rászállnak a gépkocsik karosszériájára, és gyakran a tojásaikat is a víz helyett erre a felületre rakják le. A fejlődésükben a vízhez kötődő rovarok elsősorban a vizes élőhelyek közelében repülnek nagy számban, ezért a piros és fekete gépkocsik ezeken a területeken jelenthetik a legnagyobb veszélyt rájuk. Világszerte elterjedt az a szokás, hogy a védett vizes élőhelyekre a látogatók nem hajthatnak be gépkocsival, ezért ezen élőhelyek közvetlen szomszédságában többnyire nagy parkolókat alakítanak ki. Az itt parkoló, különböző színű és polarizációs sajátságú gépkocsik igen közel állnak egymáshoz, ezért sötét színű autók egymás melletti parkolásakor a vízirovarokat vonzó polarizációs jel felerősödhet, amelynek eredményeként nagy kiterjedésű, vizuális alapon működő ökológiai csapdák alakulhatnak ki.

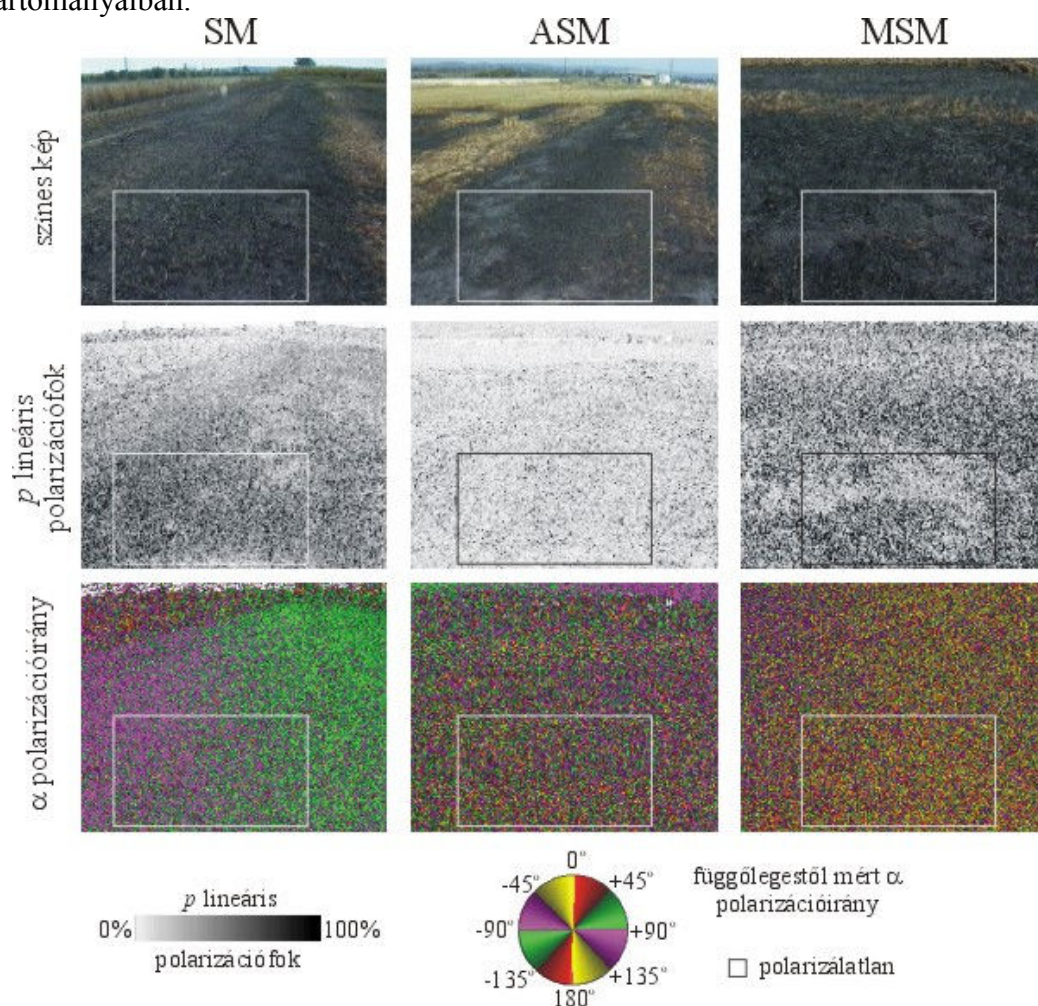


### 3.2.2. *PERNYEMEZŐK HATÁSA POLAROTAKTIKUS VÍZIROVAROKRA*

#### 3.2.2.1. **Eredmények**

1995 és 2005 között 8 pernyemezőt vizsgáltunk meg alaposan és egyszer sem találtunk vízirovarokat vagy azok tetemeit az erősen polarizáló fekete hamu által fedett földön. Ebből arra lehet következtetni, hogy a fekete pernyemezők nem vonzzák a polarotaktikus vízirovarokat a visszavert fény magas lineáris polarizációfoka ellenére sem.

A 19. ábra egy pernyemező  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatát mutatja a spektrum zöld (550 nm) tartományában, mikor a polariméter a szoláris meridián (SM), az antisoláris meridián (ASM) és a szoláris meridiánra merőleges (MSM) irányba nézett. A 24. és 25. táblázat tartalmazza a  $p$  lineáris polarizációfoknak és  $\alpha$  polarizációs szögnek a 19. ábrán látható és egy kunfehértói pernyemező téglalapokkal kijelölt területeire számolt átlagát és szórását a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban.



**19. ábra:** A Balatonszemes (46° 82' É, 17° 78' K) közelében lévő fekete pernyemezőről készült színes képek (1. sor), a pernyemezőről visszavert fény  $p$  lineáris polarizációfokának (2. sor) és  $\alpha$  polarizációs szögének (3. sor) a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával, tiszta ég alatt, napsütésben mért mintázata, mikor a polariméter a szoláris meridián felé (SM, bal oszlop), az antisoláris meridián felé (ASM, középső oszlop) és a szoláris meridiánra merőleges (MSM, jobb oszlop) irányba nézett. Az  $\alpha$  szög a függőlegestől lett mérve. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel mindhárom esetben  $-30^\circ$ -os szöget zárt be. A mintázatokon a téglalapok azokat a területeket jelölik, melyekre a  $p$  és  $\alpha$  átlagát és szórását a 24. táblázatban adtam meg.

A 24. és 25. táblázatok alapján megállapítható, hogy  $p$  és  $\alpha$  gyakorlatilag független a hullámhossztól. A szoláris meridiánhoz viszonyított megfigyelési iránytól függően  $p$  átlaga 16.2%-tól 41.3%-ig változik viszonylag nagy, 12.4%-tól 23%-ig terjedő szórással.  $p$  legnagyobb (39.2-41.3%) a SM irányában, alacsonyabb (26.3-37.1%) a SM-ra merőlegesen, és legalacsonyabb (16.2-19.1%) az ASM irányában. A pernyemezőkről visszaverődő fény polarizációiránya közel vízszintes ( $89.6^\circ < \alpha < 92.6^\circ$ ) a SM és az ASM irányában, de a SM-ra merőlegesen nem vízszintes ( $58.6^\circ < \alpha < 118.5^\circ$ ). Az  $\alpha$  polarizációs szög szórása  $17.9^\circ$ -tól  $43.9^\circ$ -ig terjedően meglehetősen nagy. Mindezen polarizációs sajátságok jól láthatóak a 19. ábrán.

		SM (1024)	ASM (1026)	MSM (1028)
vörös (650 nm)	$p$ (%)	$41.3 \pm 19.1$	$16.9 \pm 12.4$	$35.6 \pm 22.8$
	$\alpha$	$91.0^\circ \pm 23.0^\circ$	$90.6^\circ \pm 42.8^\circ$	$118.5^\circ \pm 43.8^\circ$
zöld (550 nm)	$p$ (%)	$40.2 \pm 18.7$	$17.6 \pm 12.8$	$35.1 \pm 22.4$
	$\alpha$	$90.4^\circ \pm 23.4^\circ$	$90.1^\circ \pm 42.5^\circ$	$118.3^\circ \pm 43.9^\circ$
kék (450 nm)	$p$ (%)	$39.2 \pm 18.7$	$19.1 \pm 13.8$	$37.1 \pm 23.0$
	$\alpha$	$90.5^\circ \pm 25.3^\circ$	$90.4^\circ \pm 42.1^\circ$	$118.6^\circ \pm 43.8^\circ$

**24. táblázat:** A Balatonszemes ( $46^\circ 82' \text{ É}$ ,  $17^\circ 78' \text{ K}$ ) közelében lévő pernyemezőről visszaverődő fény  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációirányának átlaga és szórása (átlag  $\pm$  szórás) a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban, mikor a polariméter a szoláris meridián (SM), az antiszoláris meridián (ASM) és a szoláris meridiánra merőleges (MSM) irányba nézett. Az adatok a 19. ábrán látható téglalapokkal jelölt területre vannak megadva. Az  $\alpha$  szög a függőlegetől lett mérve (függőleges:  $\alpha = 0^\circ$ , vízszintes:  $\alpha = 90^\circ$ ).

		SM (0102)	ASM (0104)	MSM (0103)
vörös (650 nm)	$p$ (%)	$39.2 \pm 18.6$	$16.2 \pm 13.7$	$26.8 \pm 16.4$
	$\alpha$	$91.0^\circ \pm 18.4^\circ$	$89.6^\circ \pm 41.7^\circ$	$58.6^\circ \pm 29.0^\circ$
zöld (550 nm)	$p$ (%)	$39.2 \pm 18.0$	$16.8 \pm 13.9$	$26.3 \pm 15.9$
	$\alpha$	$91.6^\circ \pm 17.9^\circ$	$92.6^\circ \pm 41.1^\circ$	$59.0^\circ \pm 30.4^\circ$
kék (450 nm)	$p$ (%)	$40.2 \pm 18.4$	$17.7 \pm 14.5$	$27.2 \pm 16.7$
	$\alpha$	$90.7^\circ \pm 18.8^\circ$	$91.2^\circ \pm 41.8^\circ$	$58.6^\circ \pm 30.0^\circ$

**25. táblázat:** A Kunfehértó ( $46^\circ 23' \text{ É}$ ,  $19^\circ 24' \text{ K}$ ) közelében lévő pernyemezőről visszaverődő fény  $p$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációirányának átlaga és szórása (átlag  $\pm$  szórás) a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományaiban. A további adatok megegyeznek a 19. ábra aláírásában szereplőkkel.

A két fekete pernyemező közvetlen közelében elhelyezett vízszintes fényes fekete műanyag fóliáról számos vízirovar taxont gyűjtöttünk be (KRISKA et al. 2006b). Ebből arra a következtetésre juthatunk, hogy változatos fajösszetételben jelentek meg a pernyemező légterében repülő vízirovarok. Tehát a vízirovaroknak az erősen polarizáló fekete hamuval borított földön tapasztalt teljes hiányát nem lehet azzal magyarázni, hogy nem voltak repülő vízirovarok a pernyemezők környékén.

A balatonszemesi pernyemező fölött elengedett fajokként 5-5 vízibogár (*Hydrophilus piceus*, *Dytiscus marginalis*, *Colymbetes fuscus*) közül a *H. piceus*, a *D. marginalis* egyedek és egy *C. fuscus* egyed az elengedést követően leestek a fekete hamuval borított földre, és néhány métert másztak a hamuban és megpróbáltak elbújni a forró, a napsütés miatt  $43^\circ\text{C}$ -os hamuban, míg 7-10 percen belül a kiszáradás miatt el nem pusztultak.



4 *C. fuscus* egyed fölszállt és egy egyenes mentén a pernyemező fölött elrepült. Ezek a reakciók teljesen eltértek a *H. piceus* és *D. marginalis* egyedeknek az erősen és vízszintesen polarizáló fényes fekete műanyag fóliák fölött korábban megfigyelt viselkedésétől (BERNÁTH et al. 2001a, HORVÁTH és VARJÚ 2004). Az utóbbi esetben a vízirovarok föl-fölszálltak néhány méter magasságba, de mindig visszatértek az erősen és vízszintesen polarizáló fekete műanyag fóliához, míg el nem pusztultak kiszáradás következtében. Ebből ismét arra következtethetünk, hogy a pernyemezők erősen, de általában nem vízszintesen polarizáló fekete hamuja nem vonzó a repülve vizet kereső, polarotaktikus vízirovarok számára.

### 3.2.2.2. Értékelés

Minden erősen és vízszintesen polarizáló természetes vagy mesterséges felület vonzza a repülő, vízkereső rovarokat, amelyek a vizet pozitív polarotaxissal találják meg (HORVÁTH és VARJÚ 2004, HORVÁTH és KRISKA 2008). Ezek alapján logikus volt a feltevés, hogy az erősen polarizáló fekete pernyemezők szintén vonzóak lehetnek a repülő polarotaktikus vízirovarok számára. Azonban terepen ennek az ellenkezőjét tapasztaltuk, mégpedig azt, hogy a fekete hamuval borított föld egyáltalán nem vonzó a vízirovarok számára a visszavert fény magas lineáris polarizációfoka ellenére sem.

Ezen megfigyelés legegyszerűbb magyarázata az lehetne, hogy nem voltak vízirovarok a megfigyelt pernyemezők légterében. Azonban a terepkísérletek alkalmával pernyemezők mellett földre terített, a visszavert fényt erősen és vízszintesen polarizáló fekete műanyag fóliákkal odavonzott vízirovarok azonosításával kimutattuk, hogy ez a magyarázat nem tartható: a vizsgált pernyemezők közelében mindig voltak kisebb-nagyobb állóvizek, és a fekete hamuval borított föld mellett leterített fekete műanyag fóliák mindig számos különféle vízirovar taxont vonzottak a pernyemezők légteréből (KRISKA et al. 2006b: 3. és 4. táblázat). Ennek ellenére nem szálltak le a vízirovarok a fekete hamura, itt tetemeik sem fordultak elő. Ebből arra következtethetünk, hogy a pernyemezők a szabályt erősítő kivételnek számítanak: a fölégetett tarlók olyan fekete antropogén termékek, melyek nem vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára még akkor sem, ha erősen polarizálják a róluk visszaverődő fényt.

A pernyemezők hamujának árnyalata a sötétszürkétől a feketéig terjedhet. Az Umow-szabály szerint minél sötétebb a hamu, annál magasabb a visszavert fény  $p$  lineáris polarizációfoka. Ez jól látszik a 19. ábrán, ha a  $p$ -mintázatokat összehasonlítjuk a megfelelő színes képekkel. A pernyemezőkről visszavert fény lineáris polarizációfokának viszonylag nagy szórása a hamu fényességének nagy térbeli változásával indokolható. Első közelítésként a pernyemezők erősen poláros sötét hamurétegét vonzónak tarthatnánk a polarotaktikus vízirovarok számára, mert minél magasabb a visszavert fény  $p$ -je, annál nagyobb a vonzereje (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004).

Azt, hogy a pernyemezők mégsem vonzzák a vízirovarokat, a hamurétegről visszavert fény polarizációirány mintázatának sajátágaival lehet magyarázni: A pernyemező hamurétege durva felszínű a megperzszelt szalmaszálak véletlenszerű irányulása miatt. Minden érdes felszínre jellemző, hogy a róla visszavert fény polarizációiránya mindig merőleges a visszaverődés síkjára (KÖNNEN 1985, HORVÁTH és VARJÚ 2004). A napfénnel megvilágított pernyemezőknél a visszaverődés síkja átmegy a megfigyelőn, a Napon és a hamuréteg megfigyelt pontján. A visszaverődés síkja függőleges 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 (24. és 25. táblázat, 19. ábra). A hamuról visszavert fény polarizációirányának nagy szórása a megperzszelt 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 polarizációiránya nem

vízszintes és a polarizációirány szórása mindig nagy. Következésképpen az általában nem vízszintesen poláros fekete pernyemezők nem vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára, melyeket csak a közel vízszintesen poláros fény vonz.

### 3.2.3. *FOLYÓPARTI ÜVEGÉPÜLETEK HYDROPSYCHE PELLUCIDULA IMÁGÓKRA GYAKOROLT HATÁSA*

#### 3.2.3.1. **Eredmények**

A *H. pellucidula* rajzása Budapesten május első hetében kezdődik, majd ezt követően 3-5 hétig tart. Ebben az időszakban a szabadvégtagú bábok kora délután 15 órától kezdődően kimásznak a vízből, és a parton kifejlett szárnyas rovarrá, imágóvá vedlenek. A tegzesek ezután 50-200 egyedből álló rajokba verődnek, amelyek 17 óra után egyre gyakoribbak a folyópart pár száz méteres körzetében. Szélcsendes időben közvetlenül a vízparton lévő tereptárgyak, bokrok és fák közelében rajzanak a tegzesek. A folyónál kialakuló erősebb légmozgás esetén a csapongva repülő rovarok csak a vízparttól távolabbi szélcsendes helyeken tudnak rajokba szerveződni. A víztől messzebb kialakuló tegzesrajok rajzási helyei a vízparti épületek kiszögellései, melyek az égbolt világos hátterénél erősen kontrasztos megjelenésűek, ezért alkalmasak a rajok egybetartására. A hím tegzesek a rajukba berepülő nőtényekkel párzanak, ami 2-3 percig tart, majd az imágók elválnak egymástól. Az épületek ablaktáblái erősen vonzzák a tegzesrajokat, melyek gyakran egyik ablaktól a másikig csapódnak, miközben az egyedek és a kopuláló párok leszállnak a függőleges üvegfelületre (9C-E. ábra). Mindeközben a rovarok a nyitott bukóablakokon keresztül gyakran bejutnak az épületbe, ahol elpusztulnak.

Az épület melletti kedvezőbb rajzási körülmények, kisebb légmozgás, a falak hőkisugárzása miatti magasabb léghőmérséklet hosszabb rajzást tesznek lehetővé az épületek közelében, mint a vízparton. A napi rajzási periódus vége felé lecsökken a tegzesrajok száma, és az imágók jelentős számban leszállnak az épület függőleges sötét üvegfelületeire (9B. ábra), ahol egyhelyben tartózkodnak. A rajzás 21 óra körül fejeződik be. A Duna magyarországi szakasza nagyjából egységes élőhelyi viszonyokat biztosít a vízben fejlődő tegzeslárvák számára, ezért a *H. pellucidula* rajzása a természetes ártéri növénytársulásokkal jellemezhető, és a kibetonozott, teljesen beépített, belvárosi és külvárosi partszakaszokon egyaránt megjelenik.

A folyóparti üvegépületeknél rajzó tegzesekre a nyitott bukóablakok jelentik a legnagyobb veszélyt. Ha ugyanis rajzáskor nyitva van egy bukóablak, akkor megfigyeléseink szerint 3 percenként átlagosan 2 rovar jut be az épületbe az ablak és az épületfal keskeny nyílásán keresztül. A véletlenül bejutott egyedek pozitív fototaxissal próbálnak meg kiszabadulni fogságukból a fényes ablaktáblának repülve. A rovarok újra és újra nekiszállnak az ablaküveg belső felszínének, míg végül kiszáradva és elgyengülve az ablakpárkányokra hullanak. A bukóablakok sötétedés után is kifejtik csapdázó hatásukat, hiszen ilyenkor a termekben felkapcsolt világítás vonzza magához pozitív fototaxissal a még repülő tegzeseket. Végeredményként elmondható, hogy a szaporodásból kényszerűen kivont tízezernyi tegzes ivarsejtjeivel együtt pusztul el az üvegépületek belső ablakpárkányain, ami hozzájárulhat az utódgeneráció egyedszámának csökkenéséhez, és ezáltal a folyóvízi életközösségek elszegényesedéséhez is. Ezért a dunaparti üvegépületek a *H. pellucidula* ökológiai csapdájának tekinthetők.

Az ELTE általunk részletesen vizsgált épületének fala függőleges fekete és világosszürke üveglapokkal, mint dekorációval borított, köztük számos ablakkal. Az ablakok általában sötétszürkének tűntek, mert a mögöttük lévő helyiségekből alig jött fény. Ha viszont be volt húzva a fehér függöny, akkor az ablakok világosszürkék vagy fehérek voltak, mert a függönyök sok fényt vertek vissza. Az ilyen sötét (fekete, sötétszürke) és világos (fehér, világosszürke) üvegfelületekkel tarkított falaknál nagy számban rajzottak a tegzesek, és gyakran rá is szálltak az üvegre. Az azonos méretű sötét és világos üvegfelületekre leszálló

tegzesek számát összehasonlítva megállapítottuk, hogy a sötét üveglapokra átlagosan 3.0-7.2-szer több tegzes szállt le, mint a világosakra (26. táblázat), ami azzal magyarázható, hogy a világos üvegfelület által visszavert fény sokkal kevésbé poláros, mint a sötét üvegfelszínről tükröződő fény.

dátum (2007)	függőleges üvegfelszín	
	fekete ( $N = 50$ )	fehér ( $N = 50$ )
április 19.	$6.6 \pm 3.5^*$	$2.2 \pm 1.0$
április 20.	$10.1 \pm 4.2^*$	$3.0 \pm 1.3$
április 22.	$17.2 \pm 5.3^*$	$5.3 \pm 2.2$
május 1.	$28.5 \pm 11.3^*$	$5.1 \pm 2.1$
május 5.	$65.2 \pm 24.6^*$	$9.1 \pm 3.2$

**26. táblázat:** Az ELTE északi épületének 50 sötét és 50 világos függőleges üvegfelületére (2 m x 2 m) leszálló tegzesek száma (átlag  $\pm$  szórás). \*A fekete üvegfelszínhez tartozó adatok szignifikánsan magasabbak, mint a fehér üvegfelszínhez tartozók ( $\chi^2$  teszt:  $p < 0.001$ ).

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. A poláros felületekre a tegzesek 5.2-6.5-ször több tojáscsomót raktak le, mint a másik két tesztfelületre (27. táblázat). Ebből egyértelműen következik a tegzesek pozitív polarotaxisa.

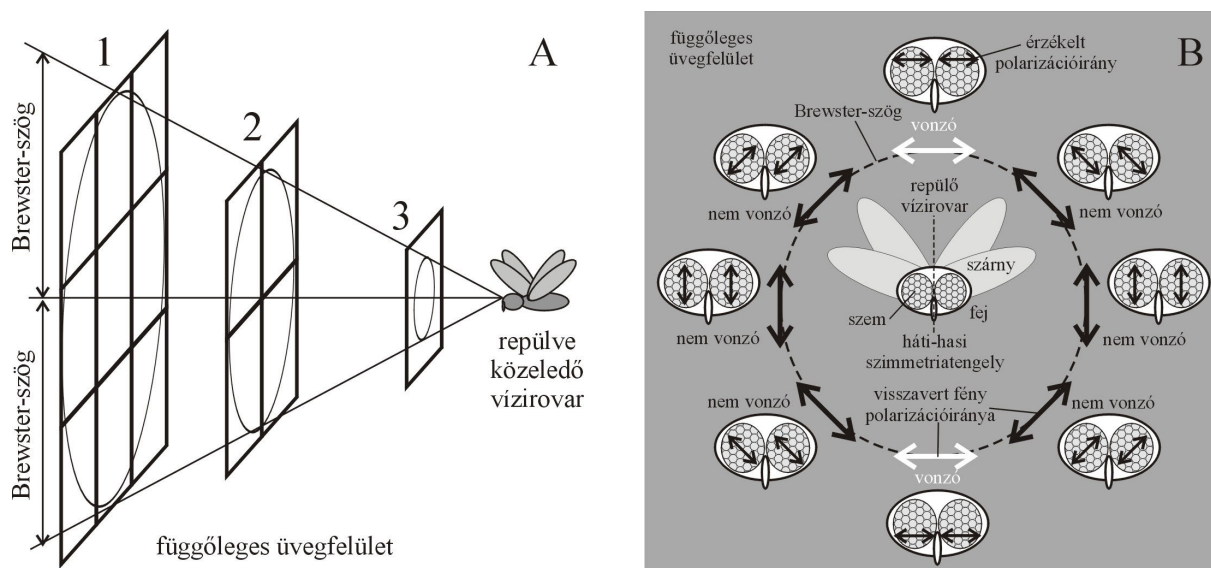
felület	1. kísérlet		2. kísérlet	
	alumínium fólia	fényes fekete műanyag fólia	matt fekete vászon	fényes fekete műanyag fólia
1	10	46	9	124
2	14	25	11	30
3	13	57	12	61
4	11	175	8	54
5	23	115	21	87
6	26	83	22	124
összesen	97	501*	83	539*

**27. táblázat:** A tegzes nőstények által lerakott tojáscsomók száma a három különböző vízszintes tesztfelületen az első és második választásos laboratóriumi kísérletben. \*A fényes fekete műanyag fóliához tartozó adatok szignifikánsan magasabbak, mint a másik két tesztfelülethez tartozók ( $\chi^2$  teszt:  $p < 0.001$ ).

A *H. pellucidula* pozitív polarotaxisának bizonyítása után képalkotó polarimetriai vizsgálatokat végeztünk, hogy megtudjuk mi a vizuális oka, hogy e rovarok erősen vonzódnak a függőleges ablakfelületekhez, rászállnak ezekre, és hosszú ideig rajtuk is maradnak.

Egy üvegfelületről tükröződő fény akkor a legpolárosabb, ha Brewster-szögben történik a visszaverődés. Mivel egy polarotaktikus vízirovar számára annál vonzóbb a vízszintes rezgésű fény, minél nagyobb annak  $p$  lineáris polarizációfoka, ezért egy függőleges üvegfelülethez repülve közeledő vízirovar viselkedését leginkább a Brewster-szögben tükröződő fény polarizációs sajátosságai határozzák meg. A Brewster-szögben visszaverődő fény rezgésirányja, azaz polarizációiránya mindig merőleges a visszaverődési síkra, s párhuzamos a tükröző felülettel. Ily módon egy függőleges üvegfelszínhez röpködő rovar szemébe az üvegről Brewster-szögben visszaverődő fény polarizációiránya egy függőleges síkú kör kerületével párhuzamosan változik a látóiránnyal (20A. ábra). Egy repülő

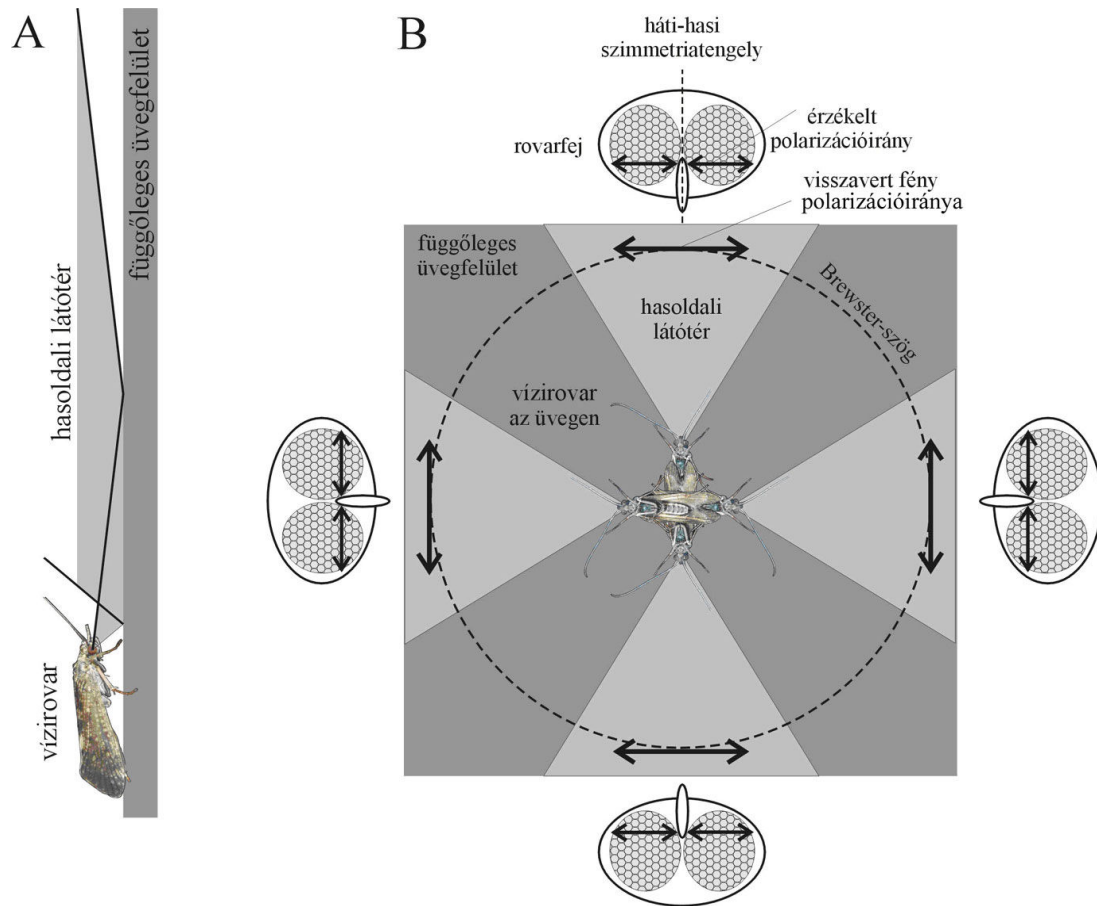
polarotaktikus vízirovar számára a függőleges üvegfelszínnek csak azon részei lehetnek vonzóak, melyekről vízszintes vagy ahhoz közeli rezgésű fény tükröződik, az ettől eltérő polarizációirányú visszavert fény nem vonzó még akkor sem, ha Brewster-szögben verődik vissza (20B. ábra).



**20. ábra:** (A) Egy üveggel borított függőleges falhoz repülve közeledő vízirovar Brewster-szögnyi látóterébe egyre kisebb üvegfelület esik. (B) Egy polarotaktikus vízirovar számára a függőleges üvegfelszínnek csak azon részei lehetnek vonzóak, melyekről vízszintes (fehér kettősfejű nyilak) vagy ahhoz közeli polarizációirányú fény tükröződik közel Brewster-szögben a repülő rovar összetett szemébe. Az ettől eltérő rezgésű (fekete kettősfejű nyilak) visszavert fény nem vonzó a rovar számára még akkor sem, ha Brewster-szögben verődik vissza.

A vízirovarok röpülve keresnek vizet, mikor is a fejük háti-hasi szimmetriásíkja függőleges, amire tehát pont merőleges a vízről visszaverődő fény vízszintes rezgésű. A polarotaktikus vízirovaroknak minden olyan fény vonzó, aminek polarizációiránya merőleges a fejük háti-hasi szimmetriásíkja. Úgy is fogalmazhatunk tehát, hogy e rovaroknak az a "vízszintes" polarizációirány, ami merőleges a háti-hasi szimmetriásíkjukra, függetlenül a fejtartásuktól. Mikor egy vízirovar leszáll egy függőleges üvegfelületre, akkor szemének hasoldali látóterébe is a környezetből jövő fény jut az üvegről történő tükröződés után (21A. ábra). Miközben a rovar ide-oda mászik az üvegen, bárhogyan is irányul a feje, az üvegről Brewster-szögben visszaverődő fény rezgésűje mindig merőleges a rovar háti-hasi szimmetriásíkja (21B. ábra). Ebből kifolyólag az üvegről tükröződő fény rovar által érzékelt polarizációiránya is mindig "vízszintesnek" tűnik. Ha e visszavert fény  $p$  lineáris polarizációfoka meghaladja a rovar polarizációérzékelésének  $p^*$  küszöbét, akkor a függőleges üvegfelület mindig vonzó a rovar számára, függetlenül attól, hogy merre irányul a feje, teste.

A fentiek szerint a *H. pellucidula* függőleges üvegfelületekhez való vonzódásának magyarázatához nem kell mást tennünk, mint mérni az üvegről tükröződő fény polarizációs sajátságait a meteorológiai viszonyok függvényében, s meghatározni az üvegfelszín azon részeit, melyeket e rovarok víznek tekintenek röptükben, illetve mikor már az üvegre leszálltak. Egy felületpontot akkor érzékel víznek egy vízirovar, ha a visszavert fény  $p$  polarizációfokára és a rovarfej háti-hasi szimmetriásíkjától mért  $\alpha$  polarizációs szögére teljesül a következő két feltétel: (1)  $p > p^*$ , (2)  $|90^\circ - \alpha| < \Delta\alpha$ , ahol  $\Delta\alpha$  az a küszöbszög, amennyivel a fény rezgésűje eltérhet a rovar háti-hasi szimmetriásíkja merőleges, azaz a rovar számára "vízszintes" iránytól, hogy a rovar még vonzónak találja.

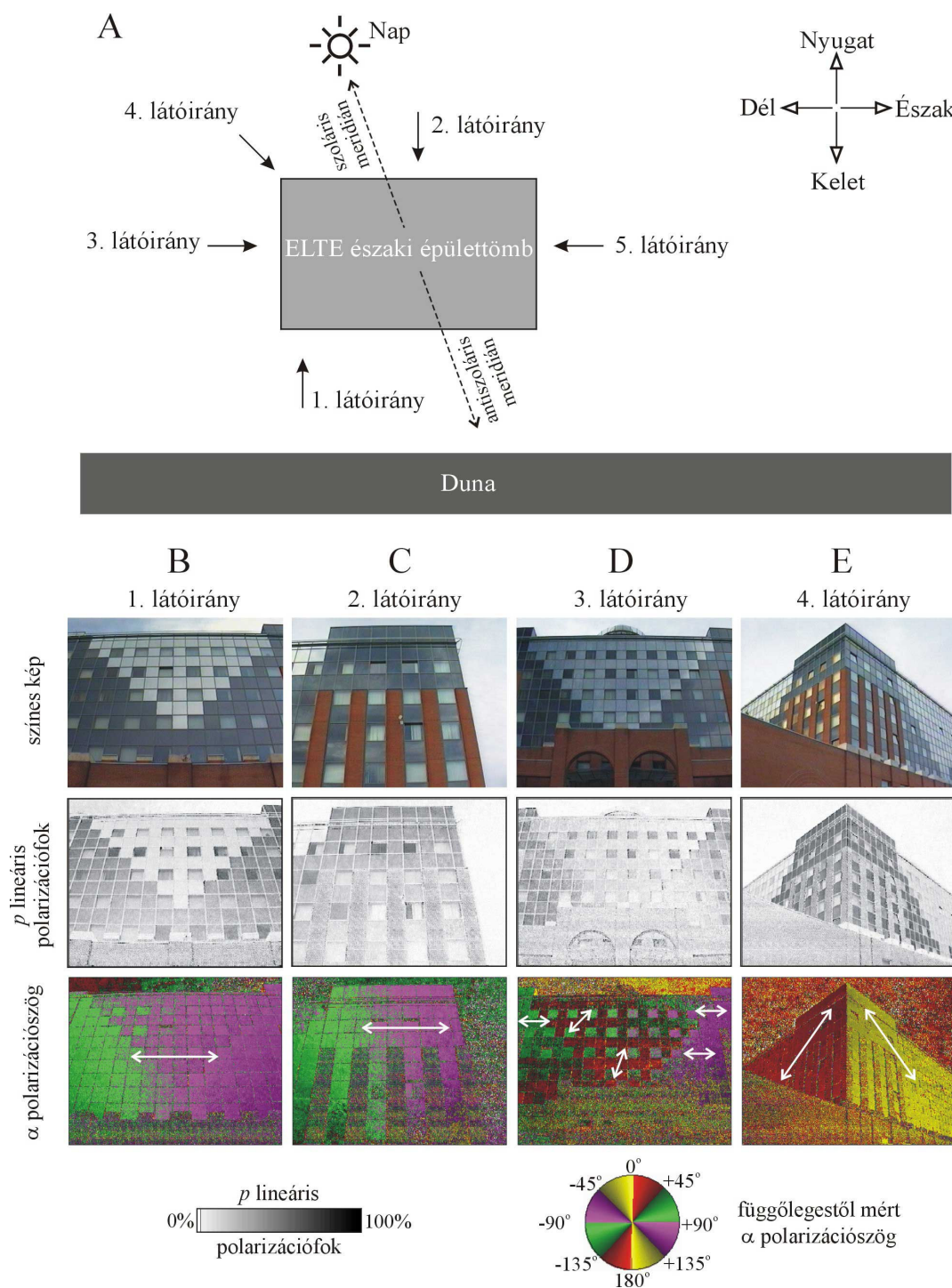


**21. ábra:** (A) Egy függőleges üvegfelületre leszállt vízirovar szemének hasoldali látóterébe a környezetből jövő fény jut az üvegről történő tükröződés után. (B) Bárhogyan is irányul a függőleges üvegfelületre leszállt rovar feje, az üvegről Brewster-szögben visszaverődő fény kettősfejú nyilakkal 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.

Ahol a dunai tömegtegzések rajzottak az ELTE lágymányosi dunaparti épületeinek üveggel borított függőleges falainál, képalkotó polarimetriával mértük az épületfalak fénypolarizálóképességét a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) részében. A 22. ábra például az ELTE TTK északi épülettömbje üvegezett falainak tükröződési-polarizációs mintázatait mutatja a spektrum kék tartományában. Ilyen mérésekből kiderült, hogy a nap bármely szakában, az égbolt felhőzettségétől (tisztá vagy borult) függetlenül mindig voltak olyan részei a falaknak, melyek függőleges üvegfelületeiről vízszintes vagy ahhoz közeli rezgésű, kellően nagy polarizációfokú fény tükröződött (22B-C. ábra). Az ilyen felületek vonzóak lehetnek a polarotaktikus tegzesek számára. Azok a felületrészek viszont nem vonzzák e rovarokat, melyek nem vízszintes rezgésű és/vagy alacsony polarizációfokú fényt vernek vissza (22D-E. ábra).

A 23A. ábra egy árnyékban lévő függőleges fekete üvegfelület 180° látószögű halszemoptikás fényképét mutatja tiszta égbolt alatt. A 23B. ábra a fekete üvegről tükröződő égboltfény  $p$  lineáris polarizációfokának mintázata, ahol jól látszik a nagy  $p$ -jú Brewster-gyűrű (sötétszürke-fekete). E Brewster-gyűrűnek azonban csak azon részei vonzhatnak polarotaktikus tegzeseket, melyekről a rovarok számára "vízszintesnek" érzékelt rezgésű fény tükröződik.

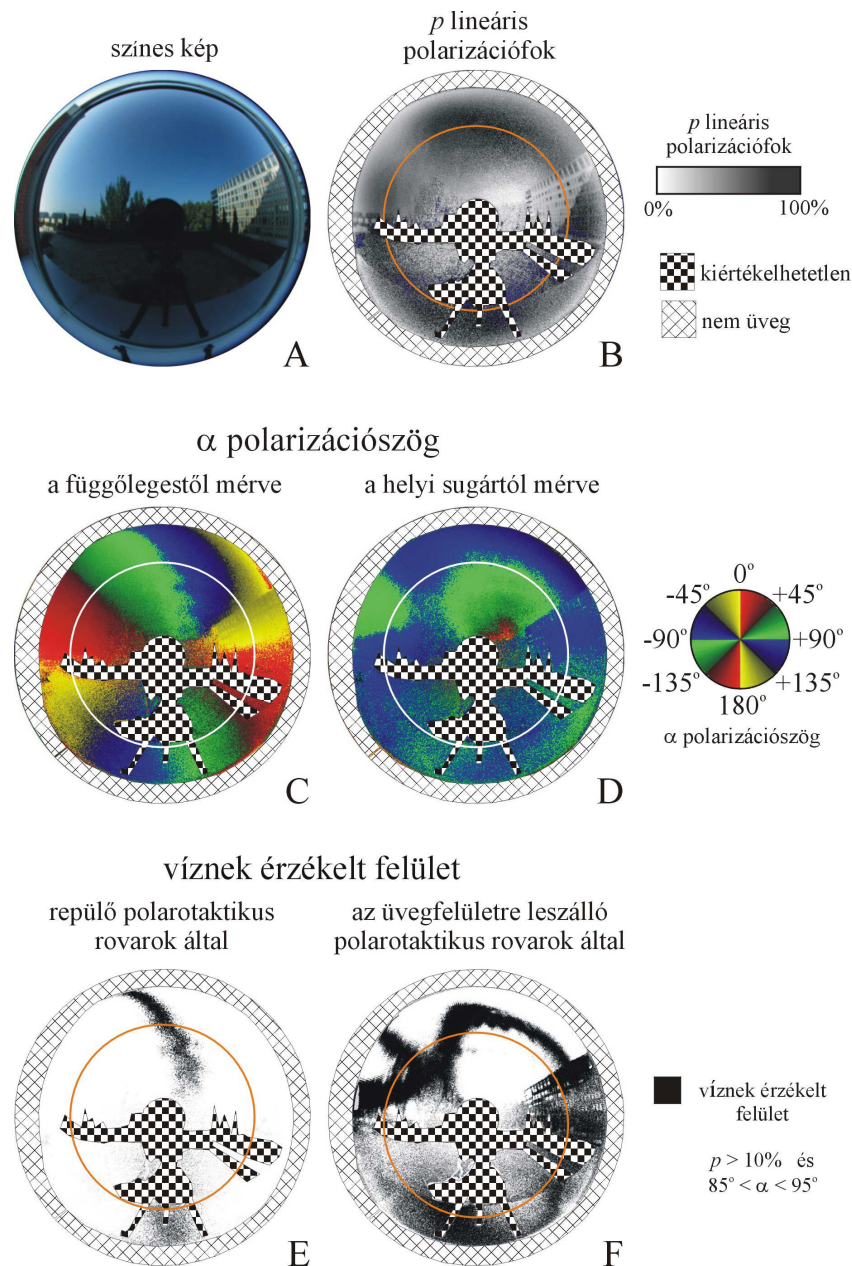




**22. ábra:** (A) Az ELTE TTK északi épülettömbjének elhelyezkedése a Dunához képest, és azon öt különböző látóirány, amiből az épület üvegfelülettel borított falainak fénypolarizálóképességét mértük. (B-E) Az üvegezett falak tükröződési-polarizációs mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában mérve. A fehér kettősfejű nyilak a visszavert fény helyi polarizációirányát mutatják.

A 23C., illetve 23D. ábra a fekete üvegről visszavert fény  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatát szemlélteti, mikor  $\alpha$ -t a függőlegestől, illetve a kör alakú mintázat adott pontján átmenő sugártól mérjük. Az előbbi, illetve utóbbi  $\alpha$ -mintázat annak felel meg, amit az üveg felé röpülve közeledő, illetve az üvegre rázállt tegzes érzékel. A 23E., illetve 23F. ábrán a fekete tartományok az üvegfelszínnek egy olyan polarotaktikus vízirovar által víznek érzékelt részeit jelölik, mely rovar az üveg felé röpül, illetve az üvegen mászik. Jól látszik az 23E. és 23F.

ábrán, hogy mikor a tegzes röpülve közelít a függőleges üvegfelülethez, annak csak egy közel függőleges keskeny sávját tekintheti víznek, ugyanakkor mikor már leszállt az üvegre, akkor annak a Brewster-gyűrű mentén húzódó jóval nagyobb részét. Lényegében ugyanezt kaptuk más napállások és az ég különböző felhőzettségei mellett is a fekete üvegre.



**23. ábra:** (A) Egy árnyékban lévő függőleges fekete üvegfelület  $180^\circ$  látószögű halszemoptikás fényképe tiszta égboltnál. (B) Az üvegfelületről tükröződő égboltfény  $p$  lineáris polarizációfokának mintázata. (C, D) Az üvegről visszavert fény  $\alpha$  polarizációs szöge, mikor  $\alpha$ -t a függőlegetől (C), illetve a kör alakú mintázat adott pontján átmenő sugártól (D) mérjük. (E, F) A fekete tartományok az üvegfelszínnek egy olyan polarotaktikus vízirovar által víznek érzékelt részeit jelölik, mely rovar az üveg felé röpül (E), illetve az üvegen mászik (F).

A vizsgált épület falait azonban nemcsak dekorációul szolgáló fekete és sötétszürke üvegtáblák borítják, hanem fehér és világosszürkék is, továbbá az ablaküvegek attól függően látszanak fehérnek, világosszürkének vagy sötétszürkének, hogy le vannak-e eresztve, össze vannak-e húzva a fehér függönyök. Ezért mértük az ilyen világos üvegfelületek polarizálóképességét is. A mérések alapján megállapítottuk, hogy a világos üvegről visszaverődő fény



jóval kevésbé poláros, mint a feketéről visszavert, mivel az üveg mögül jövő polarizálatlan intenzív fény többé-kevésbé depolarizálja az üveg külső felszínéről visszaverődő fény polarizációját (MALIK et al. 2008).

Amikor a tegzes röpkülve közelít a világos üveghez, annak megint csak egy függőleges keskeny sávját tekinti víznek, s miután leszállt az üvegre, annak megint a Brewster-gyűrű mentén húzódó részét érzékeli víznek, de ez jóval kisebb területű, mint a fekete üvegnél. Más meteorológiai körülmények között is hasonló eredményre jutottunk (MALIK et al. 2008).

### 3.2.3.2. Értékelés

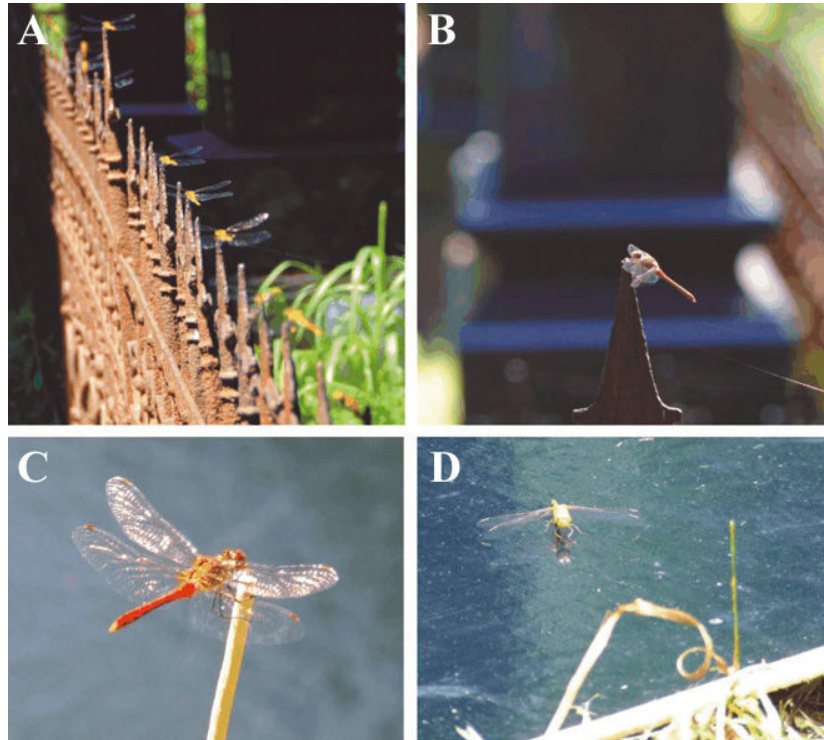
Összefoglalva a polarizációs mérések eredményeit, megállapítható, hogy az üvegfelületekkel fedett függőleges épületfalaknak mindig vannak olyan részei, melyek a röpködő polarotaktikus *H. pellucidula* egyedek számára vonzó polarizációjú fényt tükröznek. Ezzel magyarázható, hogy a Dunából kirepülő tegzesek előbb-utóbb a dunaparti 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, ami a többi érzékszervük által szolgáltatott jelzéseket elnyomva szupernormális ingerként vizet utánozva ott marasztalja őket. Ez lehet az egyik fő vizuális/optikai oka annak, hogy a függőleges üvegre szálló tegzesek miért időznek hosszan az üvegen. A sötétebb üveg nagyobb polarizációfokú fényt tükröz, mint a világosabb, miáltal a sötétebb függőleges üveg nagyobb része utánoz vizet a rászállt tegzesek számára, mint a világos, így a sötétebb üveg mindig vonzóbb a világosabbnál. Ez magyarázza azt a tapasztalatunkat, hogy a sötét üvegtáblákon sokkal több tegzes tartózkodik, mint a világosakon.

A gyorsan változó környezet megzavarhatja az evolúciós fejlődés során kialakult viselkedésmintákat, mert az állatok egyes viselkedésének irányítását olyan új környezeti ingerek vehetik át, melyekről az állatok még nem rendelkeznek elegendő információval, ezért nem is tudtak alkalmazkodni hozzájuk. Az úgynevezett "evolúciós csapda" akkor jelenik meg, ha a gyorsan átalakuló környezet olyan irányban befolyásol egy élőlényt, hogy az egy, a saját maga és a populációja túlélése szempontjából előnytelen döntést hoz, azaz evolúciós szempontból hibás viselkedésmintát követ. Az evolúciós csapda egyik fajtája az "ökológiai csapda", amiről akkor beszélünk, ha az új környezeti viszonyok hatására az állatok egy gyenge minőségű élőhelyet választanak letelepedésre. Az állatok egyes mesterséges ingerek hatására olyan torz viselkedésmintákat követnek, melyek a populációik hanyatlásához, vagy akár kipusztulásához is vezethetnek (BATTIN 2004, KOKKO és SUTHERLAND 2001, SCHLAEPFER et al. 2002). Erre láthattunk példát a *H. pellucidula* folyóparti üvegépületeknél történő tömegrajzása esetén is.

### 3.2.4. *TEMETŐBEN VIZET KERESŐ POLAROTAKTIKUS SYMPETRUM SZITAKÖTŐK VISELKEDÉSE A FÉNYT POLARIZÁLÓ FEKETE SÍRKÖVEKNÉL*

#### 3.2.4.1. Eredmények

A temetőbeli szitakötők többsége a fák és bokrok ágainak csúcsán ült, de tömegesen fordultak elő a sírköveket övező kerítések oszlopcsúcsain is (24A-B. ábra).



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

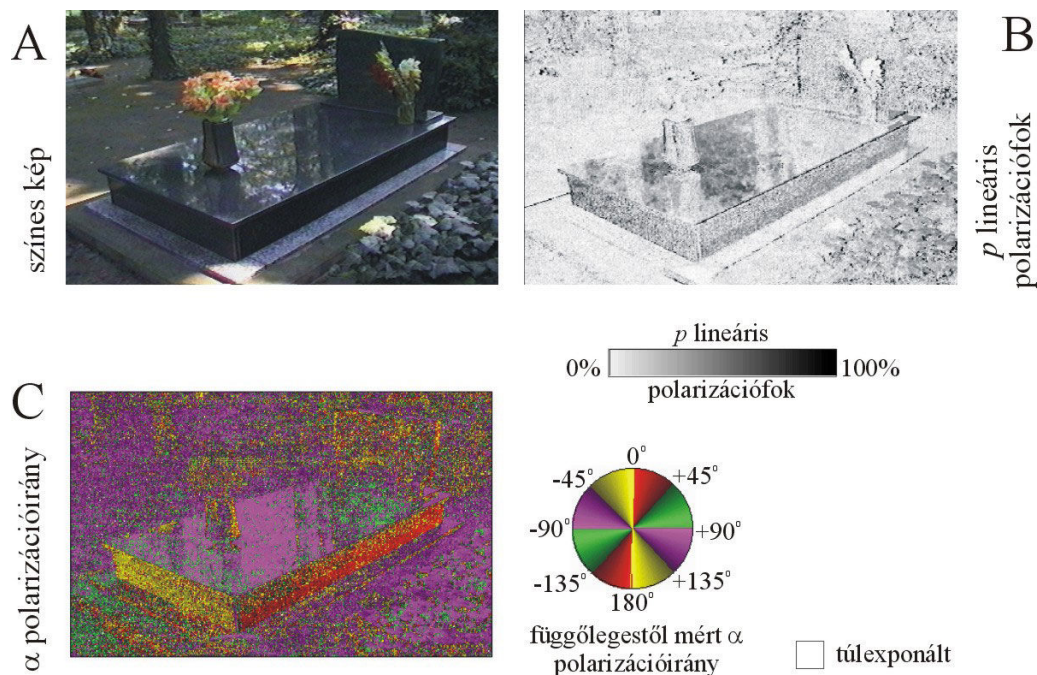
A szitakötők leggyakrabban a fekete sírkövek mellett ültek egy helyben. A vízszintes fényes fekete sírkövek fölött a szitakötők egy része ide-oda repült, miközben 10-30 alkalommal a felülethez érintették potrohvégüket. A síremlékek vízszintes fekete felülete fölött gyakran köröztek párosodó szitakötők. Mind a felületérintő viselkedést, mind pedig a párzó egyedet röptét csak a fényesre polírozott sötétszürke vagy fekete, vízszintes felületű síremlékeknél figyeltük meg, a fehér vagy világos színű sírköveknél egyszer sem. A szitakötők sírköhhöz való vonzódásának előfeltételei a következők voltak: (i) a sírkő anyaga sötétszürke vagy fekete, (ii) a síremléknek van egy legalább 0.5 m<sup>2</sup>-es, közel vízszintes, fényesre csiszolt felületrésze, (iii) az égbolt nyitott a sírkő fölött, és (iv) a síremlék közvetlen közelében található legalább egy ülőág.

A fényes fekete, hozzávetőlegesen vízszintes felületű sírkövek erősen és vízszintesen poláros fényt tükröznek. A sírkőről visszatükröződő fény polarizációs iránya mindig merőleges volt a visszaverődés síkjára, azaz vízszintes volt, ha a sírkő tükröző felülete vízszintes volt és a fény felülről érkezett (25. ábra).

A fényes fekete síremlékek vízszintes felületével ellentétben a növényzettel borított környezet csak gyengén, vagy közepesen poláros reflektált, a vízszintesen poláros fény polarizációfoka alacsony, vagy közepes volt. A környezetből érkező fény polarizációs iránya véletlenszerűen változott a levéllemezek véletlenszerű orientációja következtében.

A temetőben található sírkövek nagyrésze világosszürke műkőből készült, amelyeken csak a hozzávetőlegesen  $0.5 \text{ m}^2$ -es fényes fekete márványból készült, vízszintes helyzetű névtáblák reflektáltak erősen és vízszintesen poláros fényt. A világos műkő felszínéről alacsony polarizációfokú fény tükröződött, amelynek polarizációs iránya eltért a vízszintestől. Ennek következtében ezek a síremlékek nem voltak vonzóak a polarotaktikus szitakötők számára.

A 25. ábrán egy fekete márványból készült sírkő látható, amelynek teljes felszíne erősen fel volt polírozva, aminek következtében erősen poláros fényt tükrözött (25B. ábra). A sírkő vízszintes felszíne vízszintesen poláros, míg a függőleges felszíne függőlegesen poláros fényt reflektált (25C. ábra).



**25. ábra:** Egy fekete márványból álló síremlék színes képe (A), valamint a róluk visszaverődő fény  $p$  lineáris polarizációfokának (B) és vízszintestől mért  $\alpha$  polarizációs szögének (C) a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért mintázatai. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-30^\circ$ -os szöget zárt be. A fák árnyékában lévő sírkövet a tiszta égboltról érkező fény világította meg.

Különböző síremlékekkel elvégzett további hasonló polarimeriai mérésekkel sikerült igazolni, hogy a matt és/vagy világos és/vagy nem vízszintes helyzetű felületekről visszatükröződő vízszintesen poláros fény polarizációfoka alacsony és/vagy a polarizáció iránya eltér a vízszintestől.

A vízszintes fényes fekete sírkövekhez és tesztfelülethez vonzódó szitakötőfajok mind a *Sympetrum* nembe tartoztak: *Sympetrum flaveolum*, *S. striolatum*, *S. sanguineum*, *S. meridionale* és *S. danae*. Köztük nőstények és hímek egyaránt előfordultak, és a többségük ivarérett volt. A sírkövekhez és a tesztfelületekhez odavonzott *Sympetrum* szitakötők a következő jellegzetes viselkedési elemeket mutatták:

(1) *Ülőágon való időzés:* A szitakötők a fapálcika, vagy a sírköveket körülvevő kerítésoszlopok csúcsán (24A-C. ábra) ültek, miközben a testtartásuk a környezet hőmérsékletétől függően kétféle volt: alacsonyabb hőmérséklet esetén vízszintes testhelyzetet vettek föl (sütkérező testtartás), így testfelszínük nagyobb részét érték a napsugarak, míg magasabb hőmérséklet mellett igyekeztek függőlegeshez közeli testtartást fölvenni (obeliszk testtartás), miáltal testüknek csak az elülső részét sütötte a Nap. A szitakötők alkalmanként vízszintes irányban megváltoztatva testhelyzetüket mozdultak el különböző irányokba.

(2) *Zsákmányszerzés, táplálkozás*: Az ülőágon tartózkodó szitakötők föl-fölrepültek és a közelükben elrepülő kisebb rovarokat zsákmányoltak, majd visszatértek az ülőághoz. Egy-egy vadászat mindössze 2-3 másodpercig tartott.

(3) *Szitakötők megtámadása*: Mikor egy másik szitakötő jelent meg a fekete sárgakövek és tesztfelület fölött, az ülőágon ülő szitakötő fölrepült és megtámadta a betolakodót. Amennyiben az ülőágon hím szitakötő tartózkodott és a közeledő egy nőstény fajtárs volt, a hím megpróbált párzani vele. Ellenkező esetben a területét védő hím szitakötő elűzte a közeledő szitakötőt. A néhány másodpercig tartó támadások után a szitakötő újra visszatért ülőághoz.

(4) *Párzási repülés*: E viselkedési forma magában foglalta az ülőágról fölrepülő hím párzási viselkedését, amikor az összefonódott párok a fekete sárgakövek vagy tesztfelület fölött szálltak, és a tojásrakási viselkedést, melynek során az összekapcsolódott párok úgy repültek el közvetlenül a fekete sárgakövek és tesztfelület fölött, hogy közben a nőstények tojásrakást végezve potrohvégükkel a felszínt érintgették. A párzási repülés 20-120 másodpercig tartott, s az összefonódott szitakötők le-leszálltak a fekete sárgakövek vagy tesztfelületek melletti ülőágra, ahol 20-300 másodpercig is időztek.

(5) *Felületérintés*: A szitakötők 20-60 másodpercig oda-vissza szálltak a fekete sárgakövek vagy tesztfelület fölött, miközben 10-30 alkalommal érintették a felületet testük hasoldalával (24D. ábra).

Tesztfelület	Tartózkodás az ülőágon $t$ (min)		Viselkedéselemek száma ( $n$ )			
	Napfényes	Árnyékos	Táplálkozás	Támadás	Párzási repülés	Felületérintés
(a) Dátum: 2006. 06. 24., 14:45-17:45 és 2006. 06. 25., 09:25-13:00. A kísérlet időtartama $T = 395$ min						
Fényes fekete műanyagfólia	798* <sup>†</sup>	315*	47	211*	37*	25*
	Sum = 1113*					
Alumínium fólia	290 <sup>†</sup>	122	52	27	0	0
	Sum = 412					
(b) Dátum: 2006. 06. 25., 14:30-18:26 és 2006. 06. 26., 09:00-12:50. A kísérlet időtartama $T = 466$ min						
Fényes fekete műanyagfólia	1011* <sup>†</sup>	395*	63	251*	50*	25*
	Sum = 1406*					
Fényes fehér műanyagfólia	430 <sup>†</sup>	137	67	42	0	0
	Sum = 567					
(c) Dátum: 2006. 07. 06., 13:50-17:25 és 2006. 07. 07., 08:55-12:37. A kísérlet időtartama $T = 437$ min						
Fényes fekete műanyagfólia	557* <sup>†</sup>	130*	59	236*	47*	28*
	Sum = 687*					
Matt fehér szövet	181 <sup>†</sup>	16	61	39	0	0
	Sum = 197					
(d) Dátum: 2006. 07. 07., 14:15-18:30 és 2006. 07. 08., 09:00-13:00. A kísérlet időtartama $T = 495$ min						
Fényes fekete műanyagfólia	499* <sup>†</sup>	190*	169	392*	81*	22*
	Sum = 689*					
Matt fekete szövet	81 <sup>†</sup>	16	143	33	0	0
	Sum = 97					

**28. táblázat:** A *Sympetrum* fajok reakciói a választásos terepkísérletekben. Az ülőágon való tartózkodás „ $t$ ” azt az időtartamot jelenti, amit az egyedek együttevén eltöltöttek az ülőágon a terepkísérlet során az adott tesztfelületnél. A „ $t$ ” a napsütéses és árnyékos időszakokra külön lett feltüntetve. „ $T$ ” a kísérlet időtartamát, míg az „ $n$ ” az egyes viselkedések számát jelenti. Összehasonlítva a függőlegesen elrendezett, bármely két tesztfelülethez tartozó adatpárokat \*-al lettek megjelölve a szignifikánsan magasabb értékek ( $\chi^2$  teszt:  $p < 0.001$ ). Összehasonlítva a vízszintesen elrendezett, a napsütötte és az árnyékos ülőágra vonatkozó adatpárokat †-el lettek megjelölve a szignifikánsan magasabb értékek ( $\chi^2$  teszt:  $p < 0.001$ ).

A *Sympetrum* szitakötők mindegyike a 2. (zsákmányszerzési, táplálkozási) viselkedési elem kivételével statisztikailag szignifikánsan a vízszintes fényes fekete tesztfelülethez vonzódott a legjobban: e felület mellett töltötte ideje túlnyomó részét, azt védte a legintenzívebben más hím szitakötőkkel szemben, csak fölötté röpdöstek párzó szitakötők, és egyedül e felületet érintették repülés közben (28. táblázat).

### 3.2.4.2. Értékelés

A *Sympetrum* szitakötők hímjei az úgynevezett "ülő típusba" sorolhatók, ami azt jelenti, hogy a nőstényekre a vízpart egy olyan ülőágán kapaszkodva várnak, ahonnan jól beláthatják a környezetüket. Ezzel magyarázható, hogy legalább egy ülőágnak kellett lennie a sírkövek mellett ahhoz, hogy folyamatosan üljenek mellettük *Sympetrum* szitakötők.

A szitakötők repülés közben egymást és a zsákmányukat alulról ismerik föl az égbolt világos háttere előtt. Ez az egyik oka annak, hogy a temetőben mindig olyan sírkövek közelében tartózkodnak, melyek fölött nyitott az égbolt. A másik ok, hogy a nyitott égbolt alatt több napsütés éri a sütkérező szitakötőket, mint a lombok árnyékában.

Mivel a fényes fekete tesztfelület sokkal vonzóbb volt a *Sympetrum* szitakötők számára, mint a matt fekete vászon, ezért nem lehet negatív fototaxissal magyarázni a szitakötők viselkedését. A szitakötőket sem a fényes fehér és alumínium fólia, sem pedig a matt fehér vászon nem vonzotta, ezért a pozitív fototaxist is kizárhatjuk a lehetséges magyarázatok közül. Mindezek alapján levonhatjuk a következtetést, hogy a megfigyelt szitakötőfajok, más vízirovarokhoz hasonlóan, pozitív polarotaxissal rendelkeznek, vagyis az erősen és vízszintesen poláros fényhez vonzódnak, s ezzel magyarázható a vízszintes fényes fekete sírkövekhez való vonzódásuk. A temetői *Sympetrum* szitakötők is a vízfelszín a róla visszavert vízszintesen poláros fény segítségével ismerik föl, ezért tévesztik meg őket az erősen és vízszintesen polarizáló fényes fekete sírkövek és tesztfelületek.

A vízszintes sima felszínű fekete sírkövek ökológiai csapdaként működhetnek, mivel optikai sajátásaik folytán megakadályozhatják a szitakötők utódgenerációjának kifejlődését: Megtévesztik a tojásrakáshoz készülő szitakötő nőstényeket, melyek így a sírkövekre rakják le tojásaikat. A tojások a szárazon rövid idő alatt kiszáradnak és elpusztulnak.

A temetők többsége távol helyezkedik el a vizes élőhelyektől, hiszen ezek közelében a magasabb talajvízszint megakadályozhatja a temetkezést. E száraz területeken a szitakötők számára az egyetlen ideálisnak tűnő tojásrakó hely a polarizációs sajátásaiban vizet utánzó fényes fekete sírkövek vízszintes felülete, melyek lépre csalják a vizet kereső szitakötőket és rendellenes tojásrakásra késztetik őket.

A kiskunhalasi szitakötők különös temetői viselkedése egyáltalán nem számít unikumnak, hiszen e viselkedésforma bármelyik temetőben megfigyelhető szerte az egész világon, ahol előfordulnak a fényt erősen és vízszintesen polarizáló fekete síremlékek.



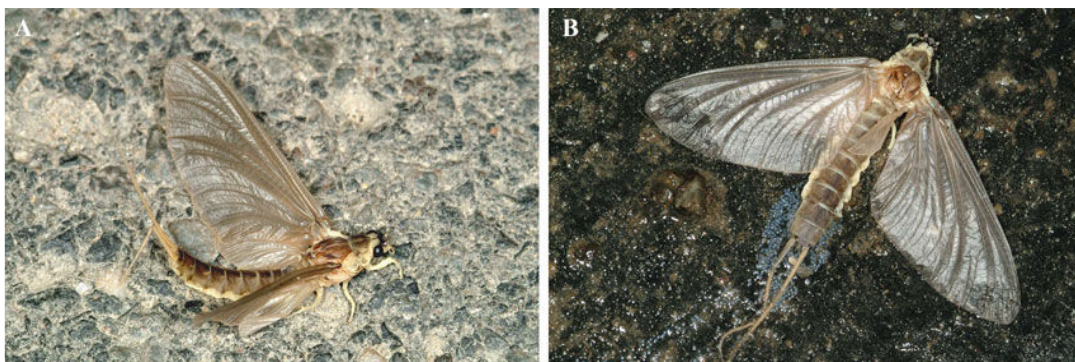
### 3.2.5. *A TISZAVIRÁG ÉS A DUNAVIRÁG RAJZÁSI VISELKEDÉSÉNEK MÓDOSULÁSA A KÖRNYEZET TERMÉSZETES POLARIZÁCIÓS MINTÁZATÁNAK MEGVÁLTOZÁSÁRA*

#### 3.2.5.1. A TIVADARI TISZA-HÍD HATÁSA A TISZAVIRÁG (*PALINGEMIA LONGICAUDA*) KOMPENZÁCIÓS REPÜLÉSÉRE

##### 3.2.5.1.1. Eredmények

A tiszavirág rajzása Tivadarhoz tartozó Tisza-hídnál 2009. június 25-én 17:30-kor kezdődött meg. Elsőként a hím szubimágók keltek ki, amelyek a partra repültek és imágóvá vedlettek. A vedlést követően a hímek visszatértek a folyó fölé, ahol vízkövető repülést folytattak. A hím kérések többsége közvetlenül a vízfelszín fölött közel 5 cm-es magasságban repült úgy, hogy két cercusza a vízfelszínt érintette. A kibújó nőtények után kutatva a hímek folyamatosan pásztázták a vízfelszínt, miközben igyekeztek egymástól eltávolodni. Ennek eredményeként a hím egyedek nagyjából egyenletes eloszlást mutattak a vízfelszín fölött. Csak akkor emelkedtek nagyobb, 0.5-1 m-es magasságba a vízfelszín fölé, ha valami megzavarta őket repülés közben. Az első nőtény imágók félórával később, 18:00 után jelentek meg a folyó fölött. A rajzás előrehaladtával egyre nagyobb egyedszámban megjelenő nőtények egy újabb félóra elteltével 18:30 körül, rajokba szerveződve megkezdtek a Tisza fölötti kompenzációs repülésüket. Ennek során a Tisza középvonalát követve repültek a folyásiránnyal szemben a híd felé. A rajzás egy helyi zápor kialakulása előtt 19:45-kor hirtelen fejeződött be, mikor a nőtények leszálltak a vízre és lerakták tojásaikat. Rajzáskor a hídnál a nőtények négy jellegzetes viselkedését sikerült megkülönböztetnünk.

1. Visszarepülés: A tiszavirág nőtények a hídhöz érkezve visszafordultak és az ellenkező irányba kezdtek el repülni. Mintegy 30-50 m megtétele után a visszafelé repülő egyedek újra a folyásiránnyal szembe fordultak és csatlakoztak a híd felé haladó kérésztömeghez.
2. Továbbhaladás: Az alacsonyabb, 2-8 m-es magasságban repülő nőtények folyamatosan haladtak át a híd alatt, a hídpillérek között. Ez a viselkedés azonban a kompenzációs repülésben résztvevő nőtényeknek csupán csekély hányadát jellemezte.
3. Leszállás: A rajzás során mindössze 7 nőtény szállt le a híd száraz, illetve egy kora délutáni esőzés miatt még vizes aszfaltútjára, ahol lerakták tojásaikat (26A-B. ábra).



**26. ábra:** (A) Tiszavirág (*Palingenia longicauda*) nőtény a híd száraz aszfaltútján. (B) Tiszavirág nőtény és a vizes aszfaltra lerakott tojásai.

4. Átrepülés: A rajzás alatt néhány száz kérész esetében sikerült megfigyelnünk az átrepülést a híd fölött. Ilyenkor a hídhöz érkező kérészeknél megjelent a vízkereső repülés, amikor fölemelkedtek a híd fölé, majd a híd túloldalán leereszkedtek újra a folyó fölé, ahol tovább folytatták a kompenzációs repülésüket. A híd alatti és fölötti kérések egyedszámának meghatározása érdekében a híd alatt és fölött azonos időpontokban készítettünk fényképeket a rajzásban résztvevő tiszavirágokról.

	Időpont	Repülő tiszavirág egyedek száma	
		Híd előtt	Híd után
1	18:45	96	22
2	18:46	129	30
3	18:47	162	32
4	18:48	167	44
5	18:49	123	40
6	18:50	113	36
7	18:51	107	25
8	18:52	140	37
9	18:53	122	29
10	18:54	106	25
11	18:55	153	34
12	18:56	137	31
13	18:57	153	41
14	18:58	178	45
15	18:59	153	42
16	19:00	164	49
17	19:01	172	47
18	19:02	179	46
19	19:03	221	35
20	19:04	202	28
21	19:05	190	33
22	19:06	220	32
23	19:07	232	44
24	19:08	214	41
25	19:09	237	36
26	19:10	201	45
27	19:11	208	17
28	19:12	142	22
29	19:13	177	29
30	19:14	180	24
31	19:15	189	28
32	19:16	197	20
33	19:17	178	32
34	19:18	169	29
35	19:19	223	38
36	19:20	244	34
37	19:21	260	33
38	19:22	217	25
39	19:23	247	21
40	19:24	282	22
41	19:25	275	62
42	19:26	279	31
43	19:27	255	41
44	19:28	308	39
45	19:29	239	45
46	19:30	402	37
47	19:31	362	39
48	19:32	392	23
49	19:33	360	22
50	19:34	393	29
<b>sum</b>		<b>10 449</b>	<b>1 691</b>

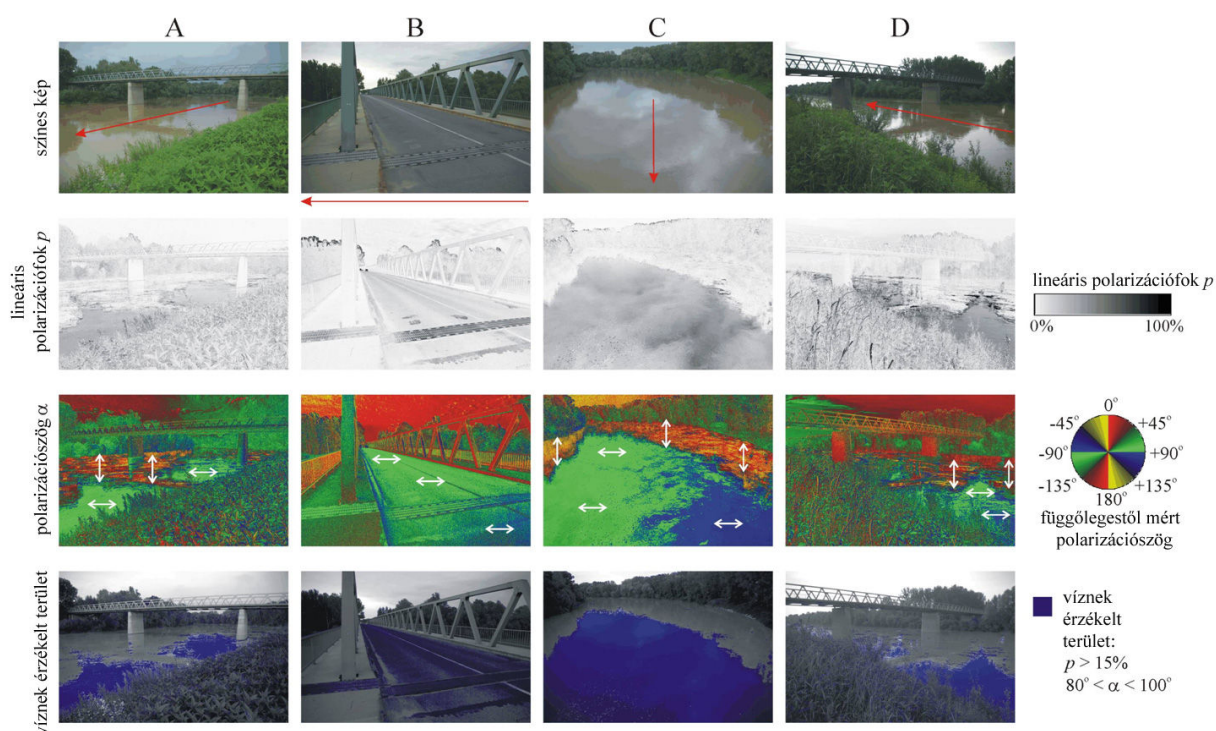
**29. táblázat:** A tiszavirág (*Palingenia longicauda*) egyedek száma a híd előtt és után 2009. június 25-én, 18:45 és 19:34 között, percenkénti bontásban. A különbség a két helyen a nőstények átlagos számában erősen szignifikáns volt (kétmintás  $t$  próba,  $t_{48} = 16.035$ ,  $p < 0.0001$ ).

A fényképek alapján nem lehetett megállapítani a tiszavirágok nemét, emiatt a képek kiértékelésével kapott egyedszámok nőstények mellett hímeket is magukba foglaltak. E tény egyrészt azért nem okozott problémát, mert a kiértékeléskor nem vettük figyelembe a



közvetlenül a vízfelszín fölött repülő hímeket (ezek nem látszottak a felvételeken). Másrészt azért nem, mert a hímek eloszlása a vízfelszín fölött megközelítőleg egyenletes volt. Ily módon a számolásba esetlegesen bevont, magasabban repülő hímek száma a híd előtt és alatt is nagyjából azonos mértékben emelhetette meg a kapott egyedszámokat. A híd alatt és fölött készített 50 képpár kiértékelése alapján megállapítottuk, hogy a kompenzációs repülésben résztvevő tiszavirág nőstényeknek csak mintegy 16%-a jutott át a híd fölötti folyószakaszra, túlnyomó többségük a híd előtt kényszerült lerakni tojásait (29. táblázat)

A polarizációs mintázatok kiértékelése alapján megállapítható, hogy bár a Tisza felszínéről visszavert fény csak közepesen poláros ( $p \leq 20\text{-}30\%$ ) a folyó vizében nagy mennyiségben jelenlévő agyagásványok miatt, ez a polarizációfok még mindig sokkal nagyobb, mint azé a fényé, amely a hídról tükröződik. A világoszöld matt hídfelületről gyakorlatilag polarizálatlan ( $p \approx 0\%$ ) fény szóródott. Korábbi kutatások már bizonyították, hogy a Tisza közepes fokú vízszintes irányú polarizációja képes kiváltani a tiszavirág pozitív polarotaxisát, ami útmutatást adhat a nőstényeknek a kompenzációs repülés során (KRISKA et al. 2007).



**27. ábra:** A vízszintes polarizáció  $p$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének (az óramutató járásával megegyező irányban a függőlegestől mért) mintázata, és a polarotaktikusan víznek érzékelt területek (amelyekre igaz, hogy  $p > 15\%$  és  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) a terepkísérlet helyszínén, híd környezetében készült képek esetében. A polarizációs mintázatok képalkotó polarimetriával lettek kimérve a spektrum kék ( $450 \pm 40 \text{ nm}$ ) tartományában. Hasonló mintázatot kaptunk a spektrum vörös és a zöld tartományában is. A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-15^\circ$  volt. A színes képeken piros nyilak jelzik a Tisza folyásirányát. A 3. sorban az egyes képeken a fehér kettősfejű nyilak a visszavert fény helyi polarizációirányát mutatják. (A) A folyó híd alatti szakasza. (B) Aszfaltút a hídon. (C-D) A folyó híd fölötti szakasza.

A vízfelszín mérsékelten poláros égboltfényt és napfényt reflektál ( $30\% < p < 50\%$ , 27. ábra, 2. sor). Ilyen felszínek mindig vízszintesen poláros fényt tükröznek (27. ábra, 3. sor) és ezeket a kérészek víznek érzékelik (27. ábra, 4. sor). Ez a két hatás egy polarizációs csatornát képez (27. ábra), 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 ( $0\% \leq p < 10\%$ , 27. ábra, 3. sor).

A híd szürke betonelemei és zöld fémszerkezete gyakorlatilag polarizálatlan fényt tükröz (27. ábra, 2. sor). A vízfelszínről a híd árnyékában szintén polarizálatlan fény érkezik (27A. ábra, 2. sor). A polarizálatlan fényt tükröző felületek megszakítják a folyó korábban folytonos polarizációs csatornáját, amely a kérészek mozgását irányítja. Ez végső soron megzavarja a tiszavirág nőstények kompenzációs repülését. A kérészek visszafordulnak, ha a szemük alsó polarizációérzékeny részét gyengén-, vagy nem vízszintesen poláros fény éri (pl. amikor a vízpart felé közelednek). A depolarizáló, vagy a nem vízszintesen poláros felszínek a hídon és a híd alatt kiváltják a kérészek visszafordulási reakcióját.

A kérészek könnyedén átjuthatnak a hídkorlát fémrácszatán, ami lehetővé teszi, hogy onnan észrevegyék a híd aszfaltútjának őket megtévesztő vízszintesen poláros ( $30\% < p < 50\%$ , 27B. ábra) jelét, és a nőstények egy része itt rakja le tojáscsomóját (26. ábra). Az alacsonyan, 1-2 m-es magasságban repülő kérészek, amelyek csak egy kis hányadot képviselnek a nagyobb 5-15 m-es magasságban haladó nőstényekhez képest, képesek átjutni a híd alatt a kompenzációs repülésük során.

### 3.2.5.1.2. Értékelés

Mint számos más fejlődésében a vízhez kötött rovar (BERNÁTH et al. 2002, CSABAI et al. 2006, HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH és VARJÚ 2003, HORVÁTH és KRISKA 2008, HORVÁTH et al. 2008, LERNER et al. 2008, SCHWIND 1991) a tiszavirág is pozitív polarotaxisal rendelkezik (KRISKA et al. 2007). A tiszavirág hímek esetében a pozitív polarotaxisnak alapvetően két feladata van. Egyrészt lehetővé teszi, hogy a szubimágók vedlése után a párzóképes hímek a polarizálatlan fényt tükröző parti részéről visszatálaljanak a vízszintesen poláros fényt tükröző vízhez, másrészt megfelelő támpontot ad a hímeknek ahhoz, hogy a nőstények folyamatos keresése mellett végig a vízfelszín fölött tudjanak maradni. A part közelében a hímek hirtelen megváltoztatják repülési irányukat, és a folyó közepe felé repülnek.

A nőstény kérészek többsége a kompenzációs repülését 10-15 m-es magasságban folytatja, így ezek az állatok a folyón átívelő hidat (és annak tükörképét) elérve egy olyan mesterséges tárggyal kerülnek szembe, ami optikailag megszakítja a folyó középvonalának egyenletes, vízszintesen poláros jelét, ami korábban a kompenzációs repülésükkor állandó vezérfonalat nyújtott számukra. Ennek hatására hirtelen bekövetkezik egy gyors, többnyire  $180^\circ$ -os irányváltás a kérészek mozgásában, aminek eredményeként visszafordulva eltávolodnak a hídtól. E viselkedés teljesen hasonló ahhoz a vízfelszíni viselkedéshez, amit a part közelébe repülő hímeknél tapasztalhatunk.

A híd polarizációs barrier mivoltát korábbi választásos terepkísérletek, és a nőstény imágók hídnál megfigyelt viselkedése támasztja alá. Korábbi kísérletekben a tiszavirág polarotaxisának bizonyítása során sikerült kiváltani a rovarok vízkövető viselkedését vízszintesen poláros fényt reflektáló mesterséges felületekkel, míg a csak kevésbé poláros mesterséges felületekkel a rovarok visszafordulását lehetett előidézni (KRISKA et al. 2007). A kérész nőstények hídnál megfigyelt mind a négy típusú viselkedése alátámasztja, hogy a híd egyfajta vizuális gátként hat a repülő kérészekre.

A visszarepülés során a hídhöz érkező tiszavirág nőstények megfordultak és az ellenkező irányba kezdtek el repülni. A visszafordulás mindig anélkül következett be, hogy az egyedek közvetlen kontaktusba kerültek volna a híddal, tehát a híd látványa, vagy pontosabban a folyó polarizációs jelének eltűnése/megváltozása képes volt kiváltani a visszafordulást. A visszafelé repülő egyedek később újra a folyásiránnyal ellentétes irányba fordultak, amit a híd felé haladó kérésztömeg hatásával lehet magyarázni.

A polarizációs gát magyarázatot támasztja alá a nőstény tiszavirágok híd alatti viselkedése is. A híd alá repülő nőstényeknél két jellegzetes viselkedés volt megfigyelhető: Azon egyedek,

amelyek repülésük során szembetalálkoztak a hídpillérekkel, ugyanúgy visszafordultak, mint azok, amelyek magasabban repülve a híddal találkoztak. Ezen egyedek a korábban már leírt körpálya megtétele után jutottak vissza újra a hídhöz és csak akkor tudtak áthaladni a híd alatt, ha visszatérve nem a hídpillérrel találkoztak újra. Azon tiszavirágnőtények repülésében, melyek a hídpillérek között értek a híd alá, semmilyen zavart nem lehetett megfigyelni, akkor sem, ha csupán néhány cm-re repültek el a híd vasszerkezete alatt. E kérészek mindig egyenletesen repülve haladtak át a híd alatt. Ez utóbbi megfigyelés azt mutatja, hogy a tiszavirágnőtények ugyan jól érzékelték a fölöttük akár csak néhány cm-re elhelyezkedő hidat, e látvány mégsem váltotta ki repülésirányuk megváltozását, hiszen a kompenzációs repülésüket irányító nagy kiterjedésű vízszintes poláros folyófelszínt folyamatosan látták maguk alatt összetett szemük hasoldali részével.

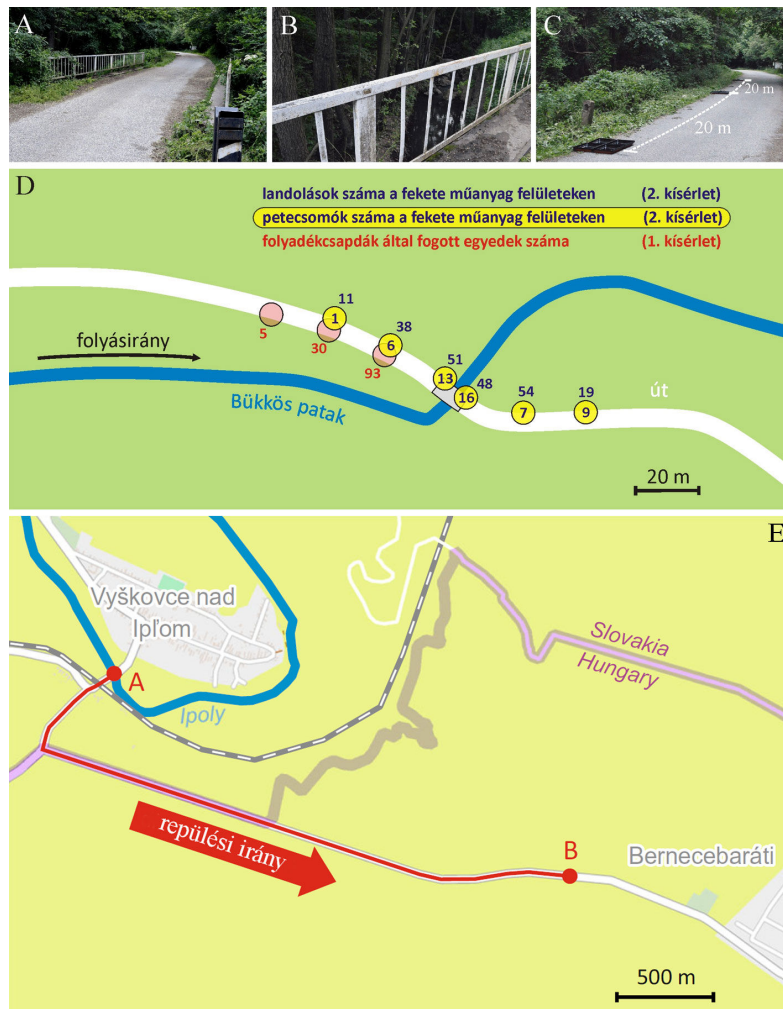
A híd aszfaltútja fölé repülő kérész nőtények leszálltak a száraz és vizes aszfaltfelszínre, ahol később tojásaikat is lerakták (26. ábra). A száraz és különösen a vizes aszfaltfelszín erősen és vízszintes poláros fényt reflektál (KRISKA et al. 1998), ami a fénypolarizáció szerepét bizonyítja a tiszavirág rendellenes tojásrakási viselkedésének a kiváltásában.

A híd fölé repülő kérészek egy részére nem hatott az aszfaltútnak a folyó felszínéhez képest jóval kisebb poláros felülete, ami miatt e rovarok vízkereső viselkedést mutattak, nagy magasságba, a híd fölé repültek, majd miután érzékelték a folyó polarizációs jelét, a híd túloldalán újra leereszkedtek a víz közelébe és folytatták kompenzációs repülésüket. Korábbi kutatások már kimutatták, hogy a polarizációs inger eltűnése vízkereső viselkedést vált ki a tiszavirágból, ami mindaddig tart, amíg a rovar nem fedez föl újra egy nagy kiterjedésű vízszintes poláros fényt visszaverő felületet, például egy fekete műanyag fóliát, vagy folyófelszínt (KRISKA et al. 2007).

A folyón átívelő híd, mint kolonizációs gát a tiszavirág híd alatti és híd fölötti populációiban az egyedszámcsökkentő hatáson túl jellegzetes ivararányeltolódást is okoz. POLYÁK és munkatársai (2010) három egymást követő év nimfabőreinek vizsgálata alapján kimutatták, hogy a híd alatti szakaszon nagyobb a nőtény kérészek aránya a híd fölötti populációhoz képest. Föltételezésünk szerint e meglepő tapasztalat azzal magyarázható, hogy a kimerítő párzásban részt nem vevő, megtermékenyítetlen tojásokat lerakó nőtények nagyobb távolságot tudnak megtenni a kompenzációs repülésük során, mint azon nőtények, amelyek részt vettek a párzásban. A megtermékenyített tojásokból 50-50%-ban kelhetnek ki nőtény és hím imágók, míg a megtermékenyítetlen tojásokból csak nőtények lehetnek. A híd nélküli folyószakaszokon a hosszabb kompenzációs repülés miatt távolabb lerakott megtermékenyítetlen tojásoknak csak egy kisebb hányada jut vissza az eredeti lárvafejlődési helyekhez, ezért ezek ivararány megváltoztató hatása csak kisebb mértékben jelentkezik. Ugyanakkor a híd, mint kolonizációs gát a megtermékenyített és a megtermékenyítetlen nőtényeket is megállásra, majd tojásrakásra készíti, miáltal a híd alatti szakaszon sokkal erőteljesebben jelenhet meg a szűznemzéssel keletkezett tojásokból kikelő nőtények ivararánymódosító hatása. Ezért a híd alatti szakaszon megnő a nőtények aránya a tiszavirág populációban.

Újabb a témához kapcsolódó kutatásaink során más, a tiszavirághoz hasonlóan alkonyatkor rajzó kérészfajok (*Ephemera danica*, *Ephemera vulgata*) esetében is vizsgáltuk a hidak hatását a kompenzációs repülést folytató nőtényekre (EGRI et al. 2017a). Megfigyeléseink szerint a kérésznőtények egy része a vízfolyást keresztező hídnál eltávolodva a vízfelszíntől az aszfaltút fölött repült tovább (28. ábra). Az aszfaltút vonalát követő egyedek amikor észleltek egy erősen poláros jelet (pl. egy parkoló sötét gépkocsi vagy a kísérletben használt tesztfelület), akkor leszálltak rá, és gyakran kinyomták tojáscsomóikat is (28D. ábra). Tehát a száraz aszfalt út kevésbé poláros jele önmagában nem váltotta ki rendellenes tojásrakásukat, de polarotaktikus vízkövetésüket igen. Így az aszfaltút egy komplex ökológiai csapda részeként képes volt a tojásrakást kiváltó erősen poláros felületekhez a nagyobb távolságban lévő hídtól is odavezetni a kérészeket. Az *E. vulgata* rajzásának vizsgálata során megállapítottuk, hogy a folyót az Ipoly-hídnál elhagyó kérésznőtények a hídon áthaladó

aszfaltút fölött repülve 3200 métert is megtettek Bernecebaráti irányába (28E. ábra). Az *E. danica* és az *E. vulgata* esetében tapasztalt fenti jelenség kialakulását a tiszavirág esetében nem tapasztaltuk (MÁLNÁS et al. 2011), aminek hátterében az állhat, hogy a Tiszához képest az aszfaltút sokkal kisebb poláros felülete nem váltotta ki a tiszavirág nőstények kompenzációs repülését.



**28. ábra:** (A-E) Az *Ephemera danica* és az *E. vulgata* rajzásvizsgálatának helyszínei Dömörkapunál a Bükkös-patak mellett (A-D) és az Ipolynál Bernecebaráti közelében (E). (A-C) Terepkísérleti helyszín Dömörkapunál. (A-B) A patakot keresztező híd. (C) Az aszfaltút szélén jól láthatók a fényes fekete műanyag tesztfelületek. (D) Az *E. danica* reakciók összesítése. (E) A térképen piros vonal jelzi az Ipoly-hídtól (A pont) eltávolodó *E. vulgata* nőstények útvonalát a legtávolabbi észlelési pontig (B pont). A és B pont távolsága 3200 m volt.

### 3.2.5.2. A DUNAVIRÁG (*EPHORON VIRGO*) FOTO- ÉS POLAROTAXISÁN ALAPULÓ KOMPLEX ÖKOLÓGIAI CSAPDA

#### 3.2.5.2.1. Eredmények

Rajzásvizsgálat:

A vizsgált időintervallumban (augusztus 15. és szeptember 2. között) 2012-ben 13, míg 2013-ban 10 alkalommal fordult elő a dunavirág tömegrajzása a megfigyelt híd közvetlen környezetében. 2012-ben a terepvizsgálatok az első rajzások után kezdődtek, ezért ebben az esetben a helyi lakosok és a hídon folyamatosan működő webkamera információi alapján azonosítottuk a korábbi tömegrajzások időpontjait. A mintegy kéthetes rajzási időszakban az esős időszakok kivételével minden este kialakult a tömegrajzás.

Az első dunavirágok minden nap 19:30 körül bukkantak föl a Duna víztükre fölött, folyó fölötti repülésük pedig közel 21:30-ig befejeződött. Elsőként a hím szubimágók jelentek meg, amelyek miután a parton vagy a vízfelszínen imágóvá vedlettek megkezdtek a vízfelszín fölötti repülésüket. Ennek során gyakran változtatták meg repülési irányukat, de mindvégig a vízfelszín fölött maradtak, és legfeljebb néhány 10 cm-es magasságba emelkedtek fel. A kérészek a teljes folyófelszínt benépesítették, leszámítva a parttól mért néhány méteres sávot. A rajzás előrehaladásával egyre nagyobb számban voltak megfigyelhetők a vízfelszín fölött repülő kopuláló párok. A rajzás ezen első szakaszában a kérészekre nem voltak hatással a lámpáink fényei, ezek nem váltottak ki pozitív fototaxist. Az ezernyi nőtényből kifejlődő kompenzációs rajok 20:30 után jelentek meg a folyó középvonalában és folyamatosan haladtak a folyásiránnyal szemben a híd felé.

A híd előtt feltorlódnak a kérészek a tiszavirágtól eltérően nem fordultak vissza (MÁLNÁS et al. 2011), hanem nagyobb rajok váltak ki belőlük, amelyek felrepültek a hídra. A híd északi oldala felől (a Duna folyásirányából) nem érkeztek kérészek a hírhoz. Ez is mutatja, hogy a hídra többségükben a híd déli oldalától az északi oldala felé irányuló kompenzációs repülésben részt vevő nőtények repültek fel. A kérészek folyó fölötti repülése 21:30 körül befejeződött.

A híd lámpáinál kialakult kérészrajok térbeli elhelyezkedése igen különös és jellemző képet mutatott minden tömegrajzáskor. A kérésztömeg csak a folyóvíz fölött és a vízzel érintkező néhány 10 m szélességű partrész fölötti hídrészekben jelent meg. Ezért míg a folyó fölötti hídszakasz partfelőli legszélső lámpájánál tízezernyi kérész rajzott, addig a part felé a következő ugyanolyan lámpánál már csak néhány tíz egyed volt megfigyelhető, míg az ezután következő lámpánál már egyetlen kérész sem fordult elő.

A több tízezer egyedből álló kérészrajok a lámpáktól kiinduló, az uralkodó gyenge szél irányában dél felé elnyúlt, állandóan kigyózó kérészcsóvaként hajladoztak ide-oda (29A-B. ábra). A vonagló csóva vége alkalmanként leért az aszfaltútra, ahol több száz dunavirág az úton maradt, s lerakta tojáscsomóját, majd némi vergődés után elpusztult (29C-D. ábra).

A híd fölé röpködő hím szubimágók leszálltak a híd déli szélén futó világosszürke matt betonjárda, ahol imágóvá vedlettek. A vedlés után a hím imágók minden esetben azonnal a hídlámpák felé repültek, és csatlakoztak az ott kialakult kérészrajokhoz. A hím szubimágók imágóvá vedlése csak a rajzás kezdeti szakaszában 20:15 és 20:45 között volt megfigyelhető.

A nőtények a kompenzációs repülés során elérték a hidat, ahol az addig egyirányú, a vízfolyással szemben haladó repülésük csapongóvá vált: az egyedek össze-vissza röpködtek, majd a híd lámpái felé szálltak. A nőtények egy része, a híd fölé érve azonnal leszállt az aszfaltútra, ahol az aszfaltfelszínt a hasoldalával érintve rövid, 5-10 cm-es távolságokat tett meg, miközben lerakta tojáscsomóját. Ezek az egyedek az aszfalton maradtak és rövidesen elpusztultak. A kérészek többsége a híd fölé érve egyenesen fölrepült a lámpákhoz, ahol hatalmas kavargó rajokat alkottak. A híd fölé érkező újabb egyedek az egyre növekvő kérésztömeghez csatlakoztak. Miután a folyó fölött 21:30 körül befejeződött a kérészek



repülése, a híd lámpáinál kialakuló rovarcsóvákhoz már nem csatlakoztak újabb egyedek, a rajzás a lámpáknál azonban tovább folytatódott nagyjából 23:30-ig. A rajzás előrehaladtával egyre több nőstény szállt le az aszfaltfelszínre és rakta le sárga tojáscsomóját, aminek eredményeként az aszfaltút egyre nagyobb részét borították be több centiméter vastag rétegben a fehér kérészek és sárga tojáscsomók (29C-D. ábra). A kérésztakaró alsó rétegeiben az elpusztult, míg a felsőbb rétegekben a szárnyaikkal egyre gyengébben verdeső tojástartó egyedek voltak többségben. A rajzás legvégén az összes kérész leszállt az aszfaltútra, lerakta tojáscsomóját és elpusztult.



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

A híd felületét borító kérésztetemek többsége nőstény volt, közöttük nagy számban lehetett megfigyelni a lerakott sárga tojáscsomókat (29D. ábra). A rajzások alkalmával begyűjtött kérészek laboratóriumi vizsgálata is megerősítette az előbbi tapasztalatot. Az egyedek túlnyomó többsége (99%) nőstény volt (30. táblázat), ami arra utal, hogy a hídra elsősorban a kompenzációs repülésben résztvevő nőstények jutottak fel.

A rajzás második felében, 21:30 és 23:30 között a lámpák körül kigyózó kérészcsova vége gyakran leért az aszfaltútra. E leérések véletlenszerűen kialakuló helyein kérészek százai lepték el az utat. A rajzás befejeztével az utat egyenletesen, több cm vastagon borították be a

kérészetemek a lámpák alatti fénykörben (29C-D. ábra). Ugyanakkor, az aszfaltút mentén is végig rengeteg kérészetemet és tojáscsomót figyeltünk meg.

minta	<i>Ephoron virgo</i> egyedek száma	
	nőstény	hím
1.	96	2
2.	104	2
3.	98	1
4.	120	0
5.	115	0
6.	100	1
7.	106	2
8.	108	1
9.	95	0
10.	91	2
sum	1033 (98.95%)	11 (1.05%)

**30. táblázat:** 10 mintában leszámolt, etil-alkoholban tartósított *Ephoron virgo* nőstény és hím egyedek száma (valamint százalékos arányuk). Minden minta közel 100 egyedet tartalmaz. A mintavétel 19:30 és 20:30 között történt 2012. szeptember 1-én a tahitótfalui híd aszfaltútjáról a kérészek tömegrajzásakor.

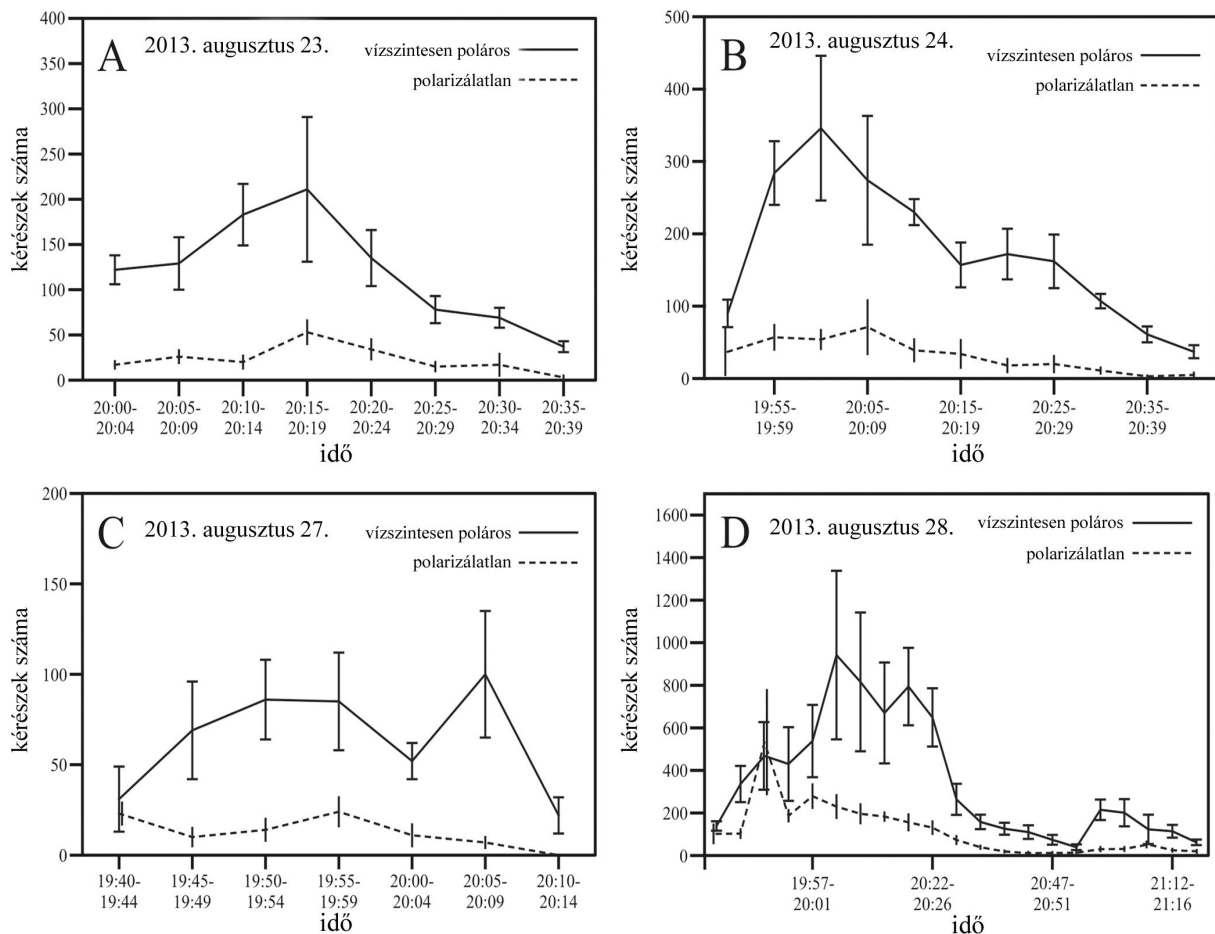
Kézilámpás vizsgálat:

A kézilámpa nem túl erős fénye is alkalmas volt arra, hogy fénynyalábjával magához vonzza a folyó fölött repülő vagy a híd lámpái körül rajzó kérészeket. A fénycsóva hatására a kérészek befejezték a folyó középvonala fölötti, a folyásiránnyal ellentétes kompenzációs repülésüket, és a fénynyalábjába tömörültek. A kézilámpa fénye a híd lámpái körül tízezerszámba rajzó dunavirág-tömegből egy jelentős egyedszámú rajt vonzott magához. E raj a lámpa mozgatásakor folyamatosan követte a fénycsóvát. A lámpa lekapcsolásakor a kérészraj azonnal felbomlott, és az egyedek újra a híd lámpája körüli kérészcsapathoz csatlakoztak.

Polárszűrős vizsgálatok:

A polárszűrős vizsgálatok eredményeit több mint 1.500 fotó kiértékelése alapján kaptuk meg, amelyeken a kiértékelés alapján közel 150.000 db kérészegyed szerepelt. Az eredmények grafikus megjelenítése és statisztikai kiértékelése nyomán megállapítható volt, hogy a vízszintesen poláros fény minden esetben szignifikánsan több, a kompenzációs repülésben résztvevő kérésznőstényt vonzott, mint a polarizálatlan fény (30. ábra). A kérész egyedszám tetőzése 19:50 és 20:20 között következett be, a két különböző polarizációs sajátosságú fényforráshoz ebben az időintervallumban vonzódott a legtöbb kérész. A rajzás vége felé mindkét szűrőnél erős egyedszám csökkenés volt tapasztalható, ekkorra ugyanis már jóval kevesebb rajzó egyed maradt a helyszínen. A rajzási naptól függően a vízszintesen poláros fény átlagban 5-10-szer több kérészt vonzott, mint a polarizálatlan.



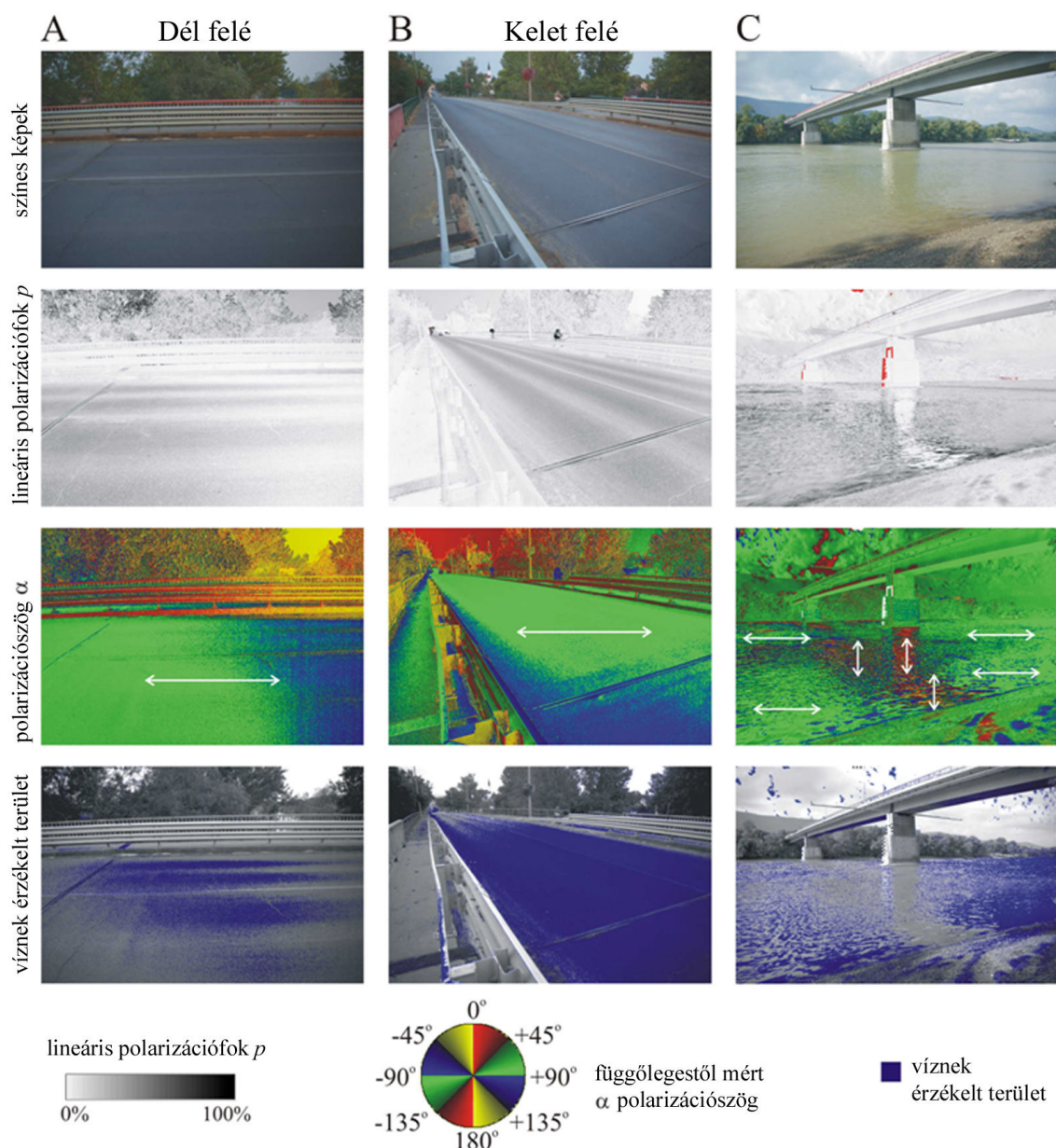


**30. ábra:** A Duna fölé világító vízszintesen poláros és polarizálatlan fényforráshoz vonzódó *Ephoron virgo* kérészek egyedszáma négy 2013-as kísérleti napokon. A vízszintesen poláros (folytonos vonal) és polarizálatlan (szaggatott vonal) fényforráshoz vonzott kérészek egyedszáma (átlag  $\pm$  szórás) az idő függvényében lett ábrázolva. Minden egyes becslés alapját 10 számítógéppel kiértékelt fotó adta. Összevetve az összes mérést megállapítható, hogy a két azonos fényintenzitású fényforrás közül mindig a vízszintesen poláros fényt kibocsátó vonzott több kérészt. (A) augusztus 23.,  $N = 11582$ ,  $U = 181$ ,  $Z = 10.302$ ,  $p < 0.00001$ ; (B) augusztus 24.,  $N = 22786$ ,  $U = 674.5$ ,  $Z = 11.388$ ,  $p < 0.00001$ ; (C) augusztus 27.,  $N = 5425$ ,  $U = 303.5$ ,  $Z = 8.945$ ,  $p < 0.00001$ ; (D) augusztus 28.,  $N = 93935$ ,  $U = 8682$ ,  $Z = 10.465$ ,  $p < 0.00001$ , ahol  $N$  az összes kérész felismerés száma,  $U$  jelöli a nemparametrikus módszernél használt rangszumma paramétert,  $Z$  egy adott  $p$  értékhez tartozó adatok szórása,  $p$  pedig a szignifikancia szint ( $p < 0.05$  esetén szignifikáns).

#### Polarimetriai vizsgálatok:

A Hold, illetve a hasonlóan magasan elhelyezkedő Nap fényét tükröző vízfelszín vízszintesen poláros fényt tükrözött, amit a dunavirágok vízként érzékelnek. Emiatt egy vízszintesen poláros csatorna jön létre a folyón, amely képes vezérelni a hím és nőstény kérészek vízkövető repülését a rajzás első szakaszában, és a nőstény egyedek kompenzációs repülését a rajzás második szakaszában (KRISKA et al. 2007, MÁLNÁS et al. 2011).

A folyón átívelő hídról polarizálatlan, a híd tükörképéről pedig függőlegesen poláros fény verődik vissza, ami megszakítja a kérészeket vezető vízszintesen poláros csatornát, és megállítja a nőstények kompenzációs repülését (31C. ábra).



**31. ábra:** Tahitófalunál a Duna fölött húzódó híd száraz aszfaltútjának és a híd folyásirányú oldalának a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával nappal mért polarizációs mintázatai, ahol az Ephoron virgo dunavirág tömegesen rajzolt. 1. sor: a híd színes fényképei. 2. és 3. sor: a  $p$  lineáris polarizációfok és az óramutató járása szerint a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szög mintázatai. A fehér kettősfejű nyilak a visszavert fény helyi polarizációirányát mutatják. 4. sor: a polarotaktikus kérészek által víznek tekintett területek (ahol a visszavert fény polarizációs jellemzői a következők:  $p > 20\%$ ,  $75^\circ < \alpha < 105^\circ$ ). A mintázatok három különböző irányból lettek kimérve, mikor a polariméter optikai tengelye északra, nyugatra és keletre mutatott. A hidat a napnyugta utáni tiszta égbolt fénye világította meg. A polariméter optikai tengelye  $20^\circ$ -os szöggel nézett a horizont alá.

A vízszintesen poláros jel közvetlenül a híd előtt szakad meg, ahol a pozitív fototaxissal rendelkező kérészekre már erőteljesen hatnak a híd erős fényei, ezért a nappal rajzó tiszavirággal ellentétben a dunavirág nőtények nem fordultak vissza a hídtól, hanem felrepültek rá.

A hídon vezető aszfaltút bármely irányból nézve, naplemente előtt (égboltnfény által megvilágítva) és éjjel (lámpafénnyel megvilágítva) egyaránt lineárisan ( $p > 20\%$ ) és közel

vízszintesen ( $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) poláros fényt vert vissza a látható spektrum mindhárom vizsgált tartományában (SZÁZ et al. 2015). Az ilyen fény a polarotaktikus kérészek számára vizet jelent (KRISKA et al. 1998, 2007, 2009).

A hídra érkező kérészekre egyrészt a pozitív fototaxist kiváltó, ezért fénycsapdaként működő lámpák és a pozitív polarotaxist kialakító megvilágított aszfaltfelszínek, mint poláros csapdák hatottak. E kétféle csapda váltotta ki a nőstény dunavirágok két jellegzetes viselkedését a hídon, a lámpák körül örvénylő tömegrajzást és az aszfaltfelszínre való tömeges tojásrakást.

### 3.2.5.2.2. Értékelés

Egy naplemente előtt rajzó, folyólakó kérészfaj, a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) polarotaktikus viselkedésének vizsgálata (KRISKA et al. 2007, MÁLNÁS et al. 2011) alapján ismert, hogy a vízfelszín vízszintesen poláros jele (SCHWIND és HORVÁTH 1993, GÁL et al. 2001a) nemcsak a kérészek polarotaktikus vízkeresésében játszik szerepet, hanem a víz fölötti repülésük irányításában is fontos. MÁLNÁS és munkatársai (2011) arra mutattak példát, hogy egy híd a folyófelszín vízszintesen poláros mintázatának folytonosságát megszakítva képezett optikai gátat úgy, hogy a polarotaktikus nőstény kérészek a híd polarizálatlan, vagy gyengén függőlegesen poláros vízfelszíni tükörképétől visszafordultak, majd később újra a híd felé repültek. Ezáltal a kérészek körkörös mozgása alakult ki a híd folyásirány felőli oldalán. Miután ezen örvénylő röpködésben kimerültek a nőstények, a folyóba hullva lerakták tojásaikat, így az utódgeneráció megmenekült.

A tiszavirághoz igen hasonló életmódot folytat a vele egy élőhelyen is előforduló dunavirág (*Ephoron virgo*). Az *E. virgo* egy ásó típusú kérészfaj, amely számos európai és észak-afrikai folyót népesít be, néhányban tömeges telepeket alkotva. E faj vízszűrővel táplálkozó lárvái U-alakú üregeket vájnak a folyómederbe, hogy a tracheakopoltyúik mozgásával keltett vízáramban lebegő szerves részecskékkel táplálkozzanak. A dunavirág életciklusát már korábban részletesen leírták (IBANEZ et al. 1991, BIJ et al. 1992, KURECK és FONTES 1996). Erre egy őszi és téli közötti késleltetett tojásállapot jellemző, ami április közepén ér véget a lárvák kikelésével. Ekkor kezdődik az augusztusig tartó növekedési periódus, mikor a hím szubimágók és a kifejlett nőstények kirajzanak a vízből. Az *Ephoron virgo* korábban évtizedekre eltűnt a legtöbb szennyezett közép-európai folyóból, például a Rajnából és a Dunából. A vízminőség javulásának köszönhető 1990-es évekbeli visszatérése óta e faj a folyók ökológiai minőségének jó bioindikátorává vált (KURECK és FONTES 1996).

A tiszavirág és a dunavirág rajzásában alapvető különbség, hogy míg a tiszavirág napnyugta előtt kezdődő rajzása sötétedés előtt befejeződik, addig a dunavirág rajzása mindig a naplemente utáni besötétedés kezdetén, 20:00 óra körül indul, és közel 21:30-ig tart. Ezért a folyónál lévő mesterséges fényforrások csak a dunavirágokra veszélyesek a pozitív fototaxis miatt.

A dunavirág éjjeli 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 a parton lévő mesterséges fényforrások erőteljesen vonzzák őket, így elhagyva a folyó középvonalát a partra repülnek és az ottani lámpák körül rajzanak a pusztulásukig. A kérészek e reakcióját pozitív fototaxisuk okozhatja, amit akár egy gyengébb fényű kézilámpával is ki lehet váltani.

A folyó közelében lévő mesterséges fényforrások kérészekre gyakorolt hatásának vizsgálatakor megállapítottuk, hogy elsősorban azon fényforrások vonzották magukhoz a kérészeket, amelyek közvetlenül a vízparton vagy a folyófelszín fölött helyezkedtek el. Ily módon óriási kérésztömegeket vonzottak magukhoz a part mellett horgonyzó kivilágított hajók, a fényárban úszó vízparti büfék és a folyón átívelő kivilágított hidak (29. ábra).

EISENBEIS (2006) a rovarok utcai lámpák körüli viselkedésének háromféle típusát definiálta: (i) "Fénycsapda", mikor a rovarok nem képesek elszabadulni a lámpák közeléből. (ii) "Fénygát", vagyis a rovarok hosszú távú repülésének zavarása vagy megszakítása a táj fölötti repülési útvonalukba kerülő mesterséges fények által. (iii) "Fény általi szívó hatás", azaz mikor az egyébként nem repülő rovarokat a mesterséges fények a halálba vonzzák (kiszívják az élőhelyeikről, mint egy porszívó). Az *E. virgo* hídlámpákra adott reakciója tipikus fénygát viselkedés az EISENBEIS-féle értelemben (2006).

Korábbi terepkísérleteink szerint számos kérészfaj pozitív polarotaxissal detektálja a vizet (KRISKA et al. 1998, 2007, 2009) a vízfelszínről tükröződő fény vízszintes polarizációja alapján, mint ahogyan sok más vízirovarfaj (SCHWIND 1991, 1995, HORVÁTH és VARJÚ 2004, CSABAI et al. 2006, KRISKA et al. 2006a, b, 2009, HORVÁTH et al. 2010b, EGRI et al. 2012a). 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. Ez a fő oka annak, hogy az aszfaltutakról visszaverődő vízszintesen poláros fény megtéveszti és vonzza a polarotaktikus kérészeket is (KRISKA et al. 1998; HORVÁTH és KRISKA 2008, HORVÁTH et al. 2009, 2010b, MÁLNÁS et al. 2011, HORVÁTH 2012).

A kompenzációs repülést végző nőstény dunavirág egyedek útjába eső intenzív mesterséges fényforrások a vízfelület által kiváltott pozitív polarotaxist elnyomva magukhoz vonzották a rovarokat. Ugyanakkor a fototaxis nem nyomta el teljesen a vízfelszínről visszavert vízszintesen poláros fény által a dunavirágokban kiváltott polarotaxist, mert csak a folyó közeli/fölötti mesterséges fényforrások vonzották magukhoz tömegesen a kérészeket. Továbbá, a hídon futó, a lámpák fénye által megvilágított aszfaltútra tojásként rakó nagyszámú nőstény jelentős hányada nem a lámpák fénykörében szállt le, hanem távol attól. Ezekre nyilván nem a fototaxis hatott, hanem a lámpák körüli hosszas röpködésben történt kifáradás miatt hullottak az aszfaltúra, hanem aktívan szálltak az út kisebb fényintenzitású, de erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő részeire. Ily módon tehát a dunavirág hídnál megfigyelt tömegrajzásában a domináns fototaxis mellett fontos szerepet játszott az alárendelt polarotaxis is. A pozitív fototaxis eredményezte a kérészek hídlámpákhoz való tömeges vonzódását, míg a pozitív polarotaxis pedig az aszfaltútra leszállást és tojásrakást, ami egy foto- és polarotaktikus ökológiai csapda kialakulását eredményezte.

A híd közelében a folyóból kikerülő hím szubimágóik imágóvá vedlettek, majd a híd lámpáihoz vonzódtak. Megfigyeléseink szerint a hím szubimágók nem az erősen polarizáló aszfaltfelszínen, hanem a kevésbé polarizáló világosszürke matt betonjárda felszínén vedlettek imágóvá. Ez föltehetően azzal magyarázható, hogy természetes körülmények között az imágóvá vedlés gyakran nem az erősen poláros vízfelszínen, hanem a kevésbé vagy nem poláros vízparton történik.

A naplemente környékén, de még világosban rajzó tiszavirág, *Palingenia longicauda* (MÁLNÁS et al. 2011) és az éjjel rajzó dunavirág, *Ephoron virgo* hidaknál tapasztalt viselkedését összehasonlítva megállapíthatunk egy hasonlóságot és egy lényeges különbséget: Mindkét kérészfaj esetében egy híd megállítja a nőstények kompenzációs repülését, ugyanakkor a feltorlódott kérésztömeg a tiszavirág esetében a híd előtti folyószakasz fölött, míg a dunavirágnál a híd fölött alakul ki. Ily módon a híd előtt feltorlódó tiszavirág nőstények végül a vízbe hullva a vízbe rakják tojásaikat, míg a dunavirágnak a hídlámpák fénycsapdjába került nőstényei a tojásaikkal együtt a híd aszfaltútjára hullanak (29C-D. ábra). A tojáscsomók kiszáradás miatti elpusztulásával az utódgeneráció is károsodik, így a dunavirág esetében a foto- és polarotaxis által okozott dupla ökológiai csapda alakul ki.

Régóta közismert tény, hogy a fénycsapdák nagy mennyiségben fogják be az elsődleges (például vízibogarak, vízipoloskák) és másodlagos (például tegzesek, kérészek) vízirovarokat (LONGCORE és RICH 2004, RICH és LONGCORE 2006). Az óriáscsiboroknál figyeltük meg, hogy az erősfényű utcai lámpák pozitív fototaxisal magukhoz vonzottak e polarotaktikus rovarokat, amelyek az aszfaltút közelébe érve csapdázódtak a vízszintesen polarizáló aszfaltfelszínen (HORVÁTH et al. 2009). Ily módon a fényforrások miatt jelentősen megnőtt a poláros ökológiai csapdaként működő aszfaltút hatóköre, és ezáltal a hatékonysága is. E jelenség fordítottjának tekinthető a dunavirágnál megfigyelt ökológiai csapda, ahol a folyó folytonos vízszintesen poláros jele a kompenzációs repülés során vezeti a milliós kérésztömeget a végzetes fénycsapdához (a híd lámpái) és poláros csapdához (a híd megvilágított aszfaltútja). A dunavirág egyedek a kompenzációs repülésük során nem távolodnak el a vízfelszíntől, ezért például a Duna mellett távolabb futó főút lámpái sincsenek rájuk hatással. Így ekkor a lámpáknak nem az a szerepe, hogy nagy távolságból magukhoz vonzzák a kérészeket, hanem az, hogy fénycsapdaként levadásszák és elpusztítsák őket. Ehhez a jelenséghez járul hozzá az ekkor alárendelt szerepű poláros ökológiai csapda, a híd megvilágított aszfaltútjának hatása (KRISKA et al. 1998).

Arra is van példa, hogy egy poláros ökológiai csapda hatását nem erősíti, hanem gyengíti valamilyen ingermozgás. Erre példa a tiszavirág: a dunavirághoz hasonlóan a Tisza folytonos vízszintesen poláros jele a kompenzációs repülés során a poláros ökológiai csapda közelébe (a híd aszfalt útjához) vezeti a tiszavirágokat, de a híd vízfelszíni tükörképe és árnyéka a vízszintesen poláros jelet megszakítva gyakorlatilag megállítja a kompenzációs repülést, miáltal az egyedeknek csak kis része jut a híd aszfalt útja fölé (MÁLNÁS et al. 2011).

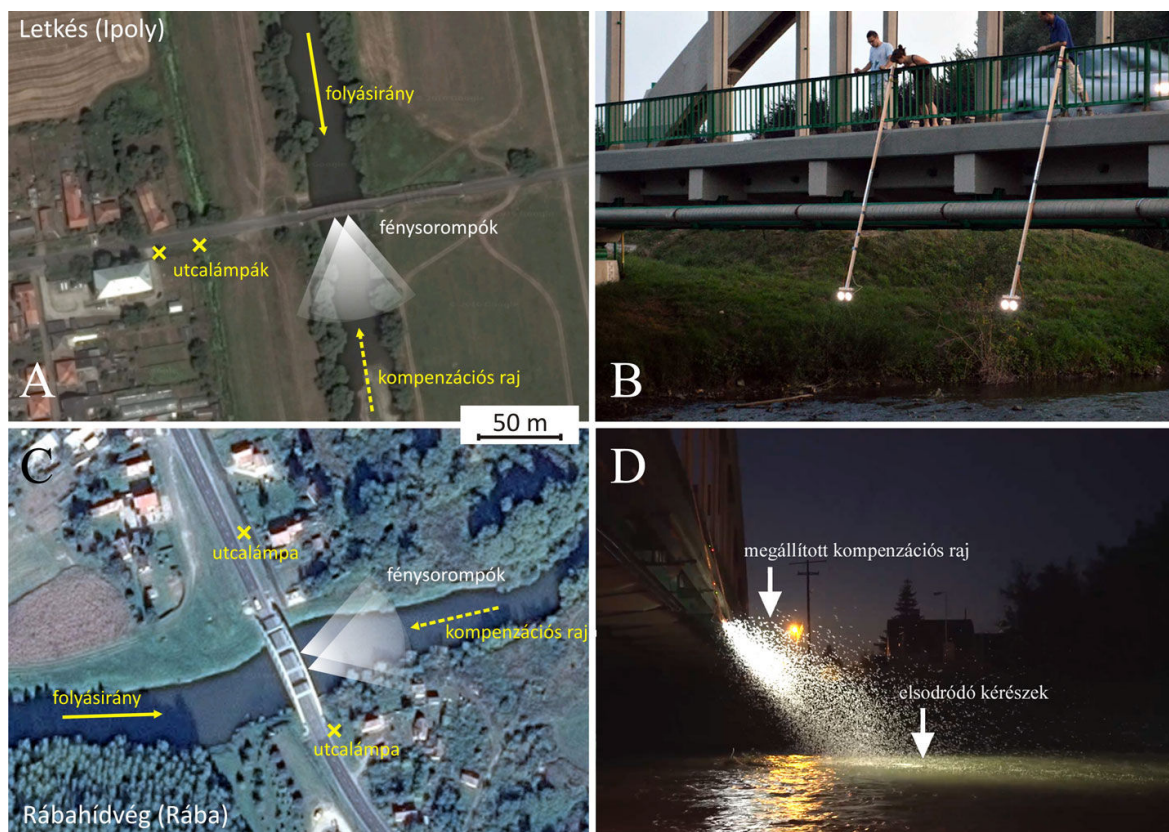
A vízszintesen poláros és polarizálatlan fényforrással folytatott kísérleteink során sikerült kimutatnunk, hogy a vízszintesen poláros fény szignifikánsan, általában egy nagyságrenddel több a kompenzációs repülésben résztvevő nőstény kérészt vonz, mint a polarizálatlan fényű fényforrás. Mindkét fényforrás azonos fényintenzitású és spektrális tulajdonságú fényt bocsátott ki, ezért a jelentős különbség hátterében minden bizonnyal az eltérő polarizációs sajátság állhat, nevezetesen az, hogy a kérészek erősen vonzódtak a vízszintesen poláros fényhez. Ennek magyarázata az lehet, hogy bár mindkét fényforrás képes volt pozitív fototaxisal magához vonzani a kompenzációs repülésben résztvevő rovarokat a vízszintesen poláros fény a pozitív fototaxis mellett pozitív polarotaxist is kiválthatott miáltal sokkal több kérészt tudott magához vonzani. Mindezek alapján feltételezhető, hogy kétféle ingermozgást kiváltó kulcsingerek, az erős fényintenzitás, és vízszintesen poláros fény együttes jelenléte áll az erőteljes vonzóhatás hátterében.

A dunavirág egyedek tömeges pusztulása a természetvédelmi károkozás mellett veszélyes helyzetek kialakulását is okozhatja. A kérésztetek miatt csúszóssá váló utak közlekedési kockázatot jelentenek. Terepmunkánk során mi magunk is megfigyeltük autók összekoccanását és kerékpárosok elesését a dunavirágokkal elborított hídon. A 2013-as esősebb rajzási időszakban pedig a rothadásnak indult kérésztömeg bűze borította el a környéket, magához vonzva a közegészségügyi szempontból veszélyes patkányokat. Mindezek alapján megállapítható, hogy több ok miatt is fontos csökkenteni a kialakult ökológiai csapda károkozását.

Új kutatási eredményeinkre alapozva teszteltünk sikerrel egy „fénysorompónak” elnevezett módszert, ami a kérészek pozitív fototaxisát kihasználva védi az utódgenerációt. Az Ipolyon és a Rábán (32A., C. ábra) végzett kísérleteinkben hídról lelógatott, a folyás irányába világító reflektorokkal (32B., D. ábra) a víz fölött tartottuk és a vízbe csalogattuk a kompenzációs repüléssel érkező nőstényeket. Így sikerült megakadályozni, hogy a parti lámpákhoz vonzódjanak, és a szárazon pusztuljanak el tojáscsomóikkal együtt. A két kivilágítatlan híd esetében jól működött a módszer, a kompenzációs repüléssel érkező kérésztömeget a



fénysorompó lámpái képesek voltak gyakorlatilag teljes mértékben a víz fölött tartani, a rovarok nem repültek ki a hídfőknél álló erősfényű lámpákhoz (EGRI et al. 2017b). A kérészek a lámpák előtt rajzoltak, majd a vízfelszínre szállva lerakták tojásaikat és elsodródtek (32D. ábra). A fénysorompó lekapcsolásakor a feltorlódott dunavirágok azonnal a hídfőknél és távolabb az út szélén álló közvilágítási lámpák felé repültek, ahol a nagy kérészcsovékat alakítottak ki, mint azt korábban Tahitótfalunál is tapasztaltuk. A lámpáktól az egyedek később sem tértek vissza a vízhez, ezért tojásaikkal együtt elpusztultak. A kérészek folyótól való elrepülését az idő és a lelógatott reflektorok ki és bekapcsolt állapotának függvényében mérve arra a megállapításra jutottunk, hogy módszerünkkel gyakorlatilag teljes mértékben meg lehet akadályozni a kérészek pusztulását (EGRI et al. 2017b).



**32. ábra:** (A, C) A letkési Ipoly-hídnál és a rábahídvégi Rába-hídnál lebonyolított terepkísérletek helyszínei. (B) A két rúdból és a végeiken elhelyezett lámpákból álló fénysorompó felszerelése a híd folyással szembeni oldalára a dunavirág rajzás előtt. (D) A fénysorompó működése a dunavirág rajzása során. Jól megfigyelhető a kompenzációs repülés során a hídhoz érkező kérésztömeg feltorlódása a fénysorompó előtt és a vízfelszínre kerülő egyedek elsodródása.

Kutatásainkra alapozva, együttműködve a Tahitótfalui Önkormányzattal, a Magyar Közút NZrt-vel, és az ELMŰ-vel 2019 áprilisában egy kérészvédő fénysorompót létesítettünk a Tildy Zoltán Duna-hídon. A védőeszköz a híd pilléreire folyásirányban felszerelt és a víz felé irányított két nagyfényerejű kék lámpából áll. Ennek feladata, hogy a hídhoz érkező rovarokat a lámpa előtt tartsa és megakadályozza felrepülésüket a hídra. Különböző hullámhosszú fényekkel kísérletezve állapítottuk meg, hogy a dunavirágot leginkább a kék fény vonzza, ezért alkalmazunk ilyen fényforrásokat. A fénysorompó annál hatékonyabban tudja ellátni feladatát minél kevésbé hat a kérészekre a hídlámpák vonzó fénye. Ezért a védőeszköz kialakítása mellett megtörtént a hídvilágítás átalakítása is. Ennek során olyan energiatakarékos, a jelenleginél sokkal olcsóbban működtethető lámpák kerültek felszerelésre, amelyek fényerőssége is szabályozható. Ezzel elérhetővé vált, hogy a 3-4 hetes rajzási

időszakban naponta 4 órán keresztül a fényforrások a hatóságok által is jóváhagyott kisebb fényerősséggel működjenek. A világon elsőként Tahitótfalun kialakított rendszer tesztelését 2019 augusztusában kezdtük el. A fentiekben részletezett „dunavirág probléma” Európa több nagyobb folyójánál is megjelent az elmúlt 10-15 évben ezért egy hatékony kérészvédő eszköz megvalósítása nemzetközi vonatkozásban is jelentőséggel bír.

### **3.2.6. A POLÁROS FÉNYSZENNYEZÉS A KÖRNYEZETI ÁRTALMAK EGY ÚJ FAJTÁJA**

#### **3.2.6.1. Eredmények**

A poláros fényszennyezés (PF) fizikai (1), viselkedési (2) és ökológiai (3) 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. Minél polárosabb a fény és minél kevésbé tér el polarizációiránya a vízszintestől, annál vonzóbb a polarotaktikus vízirovaroknak.

Következésképpen:

2) Pontosán/közel függőleges visszaverődési sík esetén a sima és fekete felületek többé/kevésbé vonzóak a polarotaktikus rovarok számára.

Az erősen és vízszintesen polarizáló száraz felületekhez vonzott vízirovarok kiszáradhatnak, a felületekre rakott tojásaik pedig óhatatlanul elpusztulnak (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, KRISKA et al. 1998, HORVÁTH és VARJÚ 2004, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005, CSABAI et al. 2006, KRISKA et al. 2006a, HORVÁTH et al. 2007, HORVÁTH és KRISKA 2008, KRISKA et al. 2008b).

Ebből következően:

3) Az erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felületek poláros ökológiai csapdák (ROBERTSON és HUTTO 2006, HORVÁTH és KRISKA 2008) lehetnek a tojásrakó vízirovarok számára, mivel az odavonzott polarotaktikus rovaroknak e felületekre rakott tojásai elpusztulnak.

A fentiek alapján a következő tézist 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. Az alábbiakban összefoglalom e tézis kísérleti bizonyítékait.

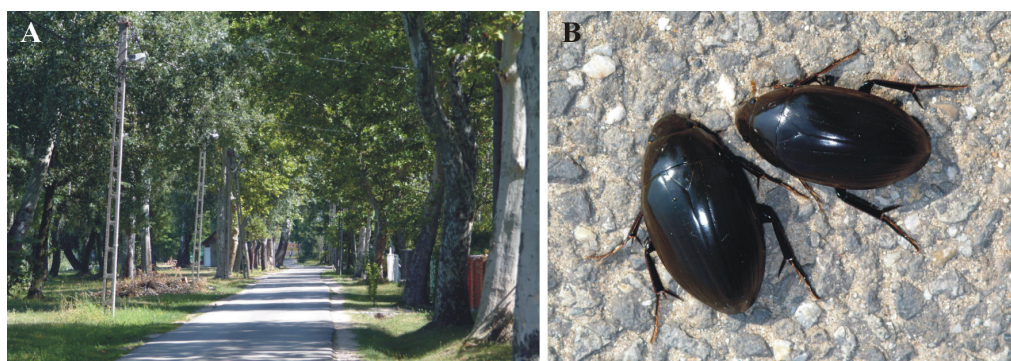
A PF forrásai leghatékonyabban képalkotó polarimetriával (HORVÁTH és VARJÚ 2004) térképezhetők föl. A természetes optikai környezetben csak a sima vízfelület ver vissza erősen és vízszintesen poláros fényt nagyobb látószögben. Az emberi technikai fejlődés az utóbbi évtizedekben azonban egyre több poláros fényszennyező forrásnak számító mesterséges felülettel (1B-G. ábra) árasztotta el a korábban természetes élőhelyeket. A PF zömében az emberi építészeti, ipari és mezőgazdasági technológiák mellékterméke, ami a polarotaktikus rovarok és ragadozóik táplálkozási hálóját működtetheti (KRISKA et al. 1998, BERNÁTH et al. 2001b, 2008b, ROBERTSON et al. 2010, PERESZLÉNYI et al. 2017).



A PF jelensége az egész világra kiterjed (globális), és evolúciós értelemben újkeletű, hiszen csak az elmúlt évtizedekben fokozódott, követve az erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felületek (például nyílt olajfelszínek, aszfaltutak, műanyag fóliák, üvegtáblák, autókarosszériák) világméretű elterjedését. A PF főleg a veszélyeztetett vízirovarfajok populációit fenyegeti. PF nemcsak napközben fordulhat elő, hanem éjszaka is, mikor a holdfény vagy a települések fényei verődnek vissza a poláros fényszennyező felületekről.

A PF káros hatása erősödhet a mesterséges éjszakai megvilágítások által okozott hagyományos (fototaxis által előidézett) fényszennyezéssel kombinálódva. Ez utóbbi állítást támasztja alá az a kutatásunk, amelynek eredményeként sikerült kimutatnunk, hogy a fototaxis és a polarotaxis együttes megjelenése károsabb hatást vált ki az éjszaka aktív vízirovarok diszperziójára, mint a két ingermozgás külön-külön (BODA et al. 2014).

A kutatás alapját egy Balaton-parti megfigyelés adta. A Balaton parttal párhuzamosan, a part menti nyaralók előtt hozzávetőlegesen 10-50 m-re a víztől egy aszfaltozott sétány fut Balatonszemes belterületétől Balatonlelle felé több kilométeren keresztül. A sétány egyes szakaszait erősfényű halogén lámpák (33A. ábra) világítják meg. A víz felőli oldalon elhelyezkedő lámpák többsége benyúlik az aszfaltút fölé, ezért a fényük éjjel az aszfalton koncentrálódik. Több egymást követő meleg nyári éjjel 23 és 1 óra között az előbbieken leírt útszakaszon minden esetben óriáscsibor (*Hydrophilus piceus*) egyedeket sikerült megfigyelni több halogén lámpa aszfaltra vetülő fénykörén belül (33B. ábra). Ezek az állatok intenzíven mozogtak az úton, mégsem másztak be a megvilágított aszfalttrésztől 20-30 cm-re elhelyezkedő füves szegélybe. Az egyes vizsgálati alkalmakkor megfigyelt bogarak száma 1 és 7 között változott.

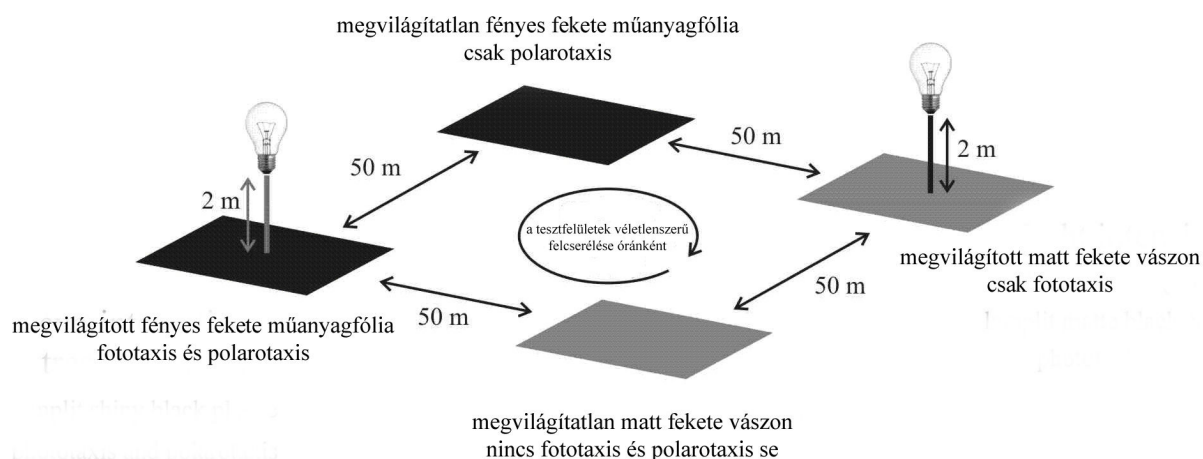


**33. ábra:** (A) A megfigyelés helyszíne: Balaton-parti aszfaltút szakasz, amit éjszaka erősfényű halogénlámpákkal világítanak meg. (B) Óriáscsiborok (*Hydrophilus piceus*) éjszaka az aszfaltúton a lámpa útra vetülő fénykörében. A bogarak két villanórészlet ellátott körvakuval lettek megvilágítva a fotózásnál.

A megfigyelések alapján feltételezhető volt, hogy a vizet éjszaka elhagyó óriáscsiborokat az utcai lámpák erős fénye pozitív fototaxissal vonzotta akár nagyobb távolságból is a sétányhoz, míg a megvilágított aszfaltfelszín a róla visszavert vízszintesen poláros fény miatt vizet utánózva tartotta helyben az útra leszálló pozitív polarotaxissal rendelkező bogarakat.

Az alapmegfigyelést követően terveztük meg azokat a választásos terepkísérleteket, amelyek a talajfelszínre vízszintesen elhelyezett különböző optikai sajátságú tesztfelületek vonzóhatását vizsgálták az éjszaka repülő vízirovarokra (BODA et al. 2014).

A pozitív foto- és polarotaxis szinergisztikus együttthatását bizonyító terepkísérletben alkalmazott tesztfelületek a következők voltak: (1) megvilágított matt fekete vászon (csak fototaxist vált ki), (2) megvilágítatlan fényes fekete műanyag fólia (csak polarotaxist vált ki), (3) megvilágított fényes fekete műanyag fólia (fototaxis és polarotaxis együttes kiváltása), (4) megvilágítatlan matt fekete vászon, mint nem vonzó kontroll felület (34. ábra). A terepkísérletek kivitelezését és a begyűjtött vízirovarok meghatározását Boda Pál és Csabai Zoltán kollégáim végezték el.



**34. ábra:** A különböző, megvilágított és megvilágítatlan tesztfelületekkel folytatott választásos terepkísérlet sematikus rajza

A megvilágítatlan matt fekete szövet elhanyagolható mennyiségű vízirovar (13) csapdázott. A megvilágított matt fekete vászon és a megvilágítatlan fényes fekete műanyag fólia által befogott vízbogarak és vízipoloskák száma együttesen ( $7922+8510=16432$ ) sokkal kevesebb volt, mint a megvilágított fényes fekete műanyag fólia által csapdázott vízirovarok száma (29682). Ez kísérleti bizonyítékot jelent a polarizálatlan lámpafény által kiváltott fototaxis és a fényes fekete műanyag fóliáról visszaverődő vízszintesen poláros fény szinergisztikus interakciójára a vizsgált vízirovar taxonok esetében. Ennek következtében a vízszintesen poláros fényt reflektáló megvilágított felületek ökológiai csapdaként funkcionálnak két optikai inger egymás hatását erősítő jellege miatt, ami különösen városi környezetben okozhat természetkárosítást.

Mivel a vízirovarok fontos tagjai a vízi ökoszisztémák táplálékláncainak, a PF ezen állatokra kifejtett káros hatásai komoly ökológiai következményekkel járhatnak. A PF ellen teendő lépések hasonlóan időszerűek és sürgetően szükségesek a vízirovar-populációk védelme érdekében, mint például az éjszaka aktív állatok védelmében a mesterséges éjszakai megvilágítások ellen tett lépések (RICH és LONGCORE 2006).

### ***A poláros fényszennyezés kísérleti bizonyítékai***

Már régóta ismeretes a jelenség, miszerint szitakötők gyakran pusztulnak nyíltfelszínű olajtárolókba (KENEDY 1917). E jelenség magyarázatát a kuvaiti kőolajtavak és a budapesti pakurató fénypolarizáló sajátságainak mérésével (1B. ábra) és az általuk csapdába ejtett szitakötők polarizációlátásának vizsgálatával (HORVÁTH és ZEIL 1996, HORVÁTH et al. 1998a, BERNÁTH et al. 2001a) sikerült megadni: kiderült, hogy a szitakötők a tojásrakáshoz szükséges víztesteket pozitív polarotaxissal kutatják föl. Mivel a fekete olajfelszín a vízekenél általában erősebben és mindig vízszintesen poláros fényt tükröz (1A–B. ábra), ezért szupernormális ingerként hatva sokkal vonzóbb a szitakötők számára, mint maga a vízfelület. Ezért a polarotaktikus szitakötőket megtévesztik és magukhoz vonzzák a sötét olaj-, kátrány- és aszfaltfelszínek (1B. és 1D. ábra). A budapesti pakuratónál folytatott terepkísérleteink során számos alkalommal tapasztaltuk, hogy a szitakötők pontosan ugyanúgy viselkednek e poláros fényszennyező forrásoknál, mint a vízfelületeknél: járőröző repülés, territórium védelem, vízérintés (a fölhevült test hűtése érdekében), levegőbeli zsákmányszerzés, párázás és tojásrakás. A szitakötők akkor ragadnak az olajba, mikor testük hűtésekör vagy tojásrakáskor megérintik annak felszínét. Az aszfaltutak szintén erős poláros fényszennyező források lehetnek (1D. ábra): másokhoz (PUSCHNIG 1926, FRASER 1936, WHITEHOUSE 1941) hasonlóan több alkalommal megfigyeltem, hogy szitakötők száraz aszfaltutak mentén járőröznek, és gyakran megérintik az aszfaltfelszínt. Napnyugtakor pedig kérészek rajzását

tapasztaltam azon aszfaltutak fölött, melyek a kérészek lárváinak fejlődéséül szolgáló hegyi patakok mellett húzódnak (KRISKA et al. 1998). E kérészek gyakran le is szálltak az aszfaltra, ahová a párást követően a nőstények lerakták tojásaikat. Viselkedési kísérletekkel igazoltuk, hogy e kérészfajok is pozitív polarotaxissal keresik a vízfelszínt (KRISKA et al. 1998). Tavasszal a tojáscsomóikat potrohvégükön cipelő, tojásrakásra készülő nőstény álkérészeket (*Perla abdominalis*) is gyakran megfigyeltem aszfaltúton a Pilisben Dömörkapunál, mint ahogyan óriáscsiborokat (*Hydrophilus piceus*) is (33B. ábra) a Balaton mellett. Képalkotó polarimetriával kimutattuk, hogy a kérészrajzás helyén napnyugtakor az aszfaltfelszín erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza (1D. ábra), továbbá minél sötétebb és simább az aszfalt, annál vonzóbb a kérészek számára, mert annál nagyobb polarizációfokú fényt reflektál.

A mezőgazdaságban gyakran használnak nagy kiterjedésű fehér és fekete műanyag (polietilén) fóliákat, melyek például megakadályozzák a gyomnövények burjánzását, csökkentik a víz elpárolgását a talajból, kora tavasszal mérséklék a fölmelegedett termőföld hőkisugárzását, vagy védik a szénakazlakat az esőtől. A fekete olajfelülethez hasonlóan egy vízszintes fekete műanyag fólia is mindig erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza a Brewster-szög közelében (1C. ábra), míg egy fehér műanyag fólia alacsony polarizációfokú, s nem mindig vízszintesen poláros fényt. Így a talajra terített fényes fekete műanyag fólia erős poláros fényszennyező forrás, míg a fehér nem.

Terepkísérleteink során (CSABAI et al. 2006, KRISKA et al. 2006b) azt tapasztaltuk, hogy e fényes fekete műanyag fóliák tényleg nagy számban vonzanak magukhoz különböző vízbogarakat és vízipoloskákat, szitakötőket, kérészeket, tegzeseket és böglyöket, míg a fehér fóliák nem. E vízirovarok is pozitív polarotaxissal találják meg vizes élőhelyeiket, ahol ők és/vagy lárváik élnek.

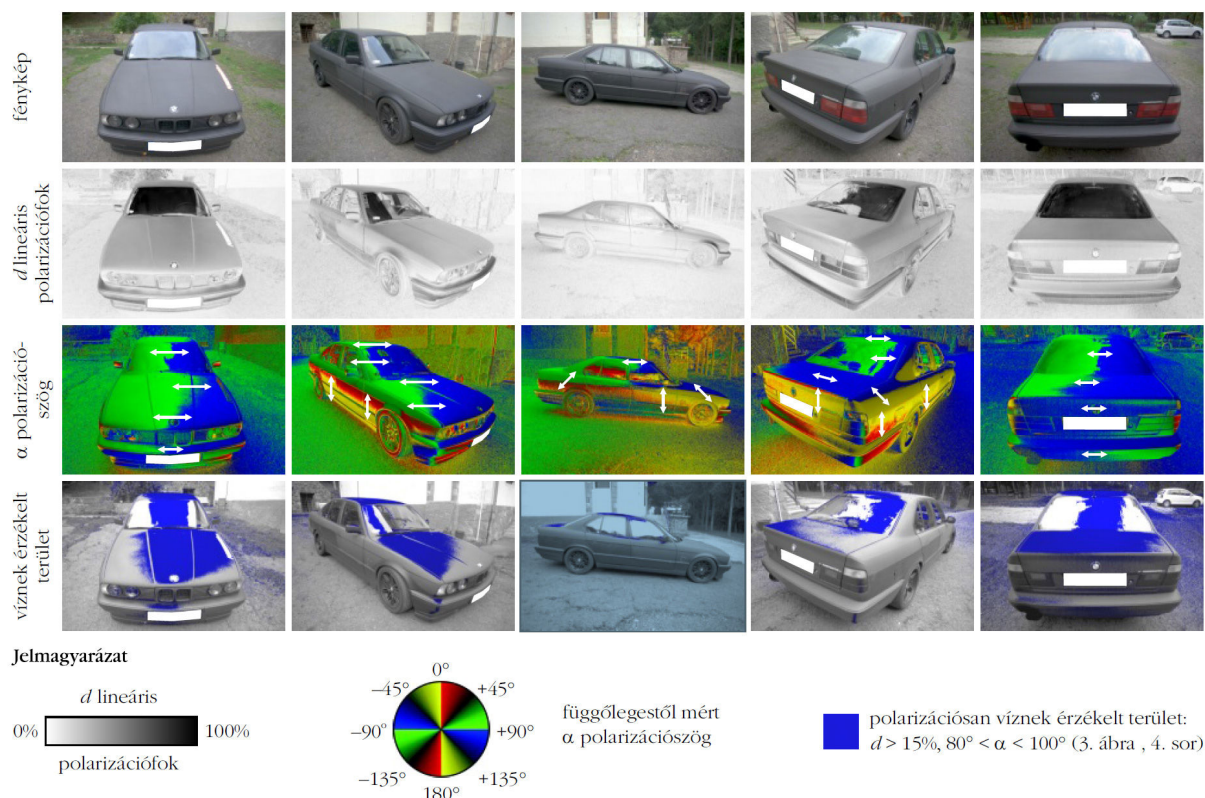
Másokhoz hasonlóan többször megfigyeltem vízbogarak és vízipoloskák leszállását fekete és vörös gépkocsik karosszériájának vízszintes részein (motorháztetőn, tetőn, csomagtartón), és azt is, hogy kérészek és szitakötők gyakran rakják a tojásaikat az ilyen színű autókra (KRISKA et al. 2006a, WILDERMUTH és HORVÁTH 2005). Kísérletekkel megállapítottuk, hogy a vörös és fekete vízszintes tükröző felületek majdnem teljesen azonos mértékben vonzzák a vízbogarakat és vízipoloskákat, míg a sárga és a fehér vízszintes tükröző felületek nem vonzóak (KRISKA et al. 2006a). Képalkotó polarimetriával kimutattuk, hogy a spektrum kék és zöld tartományában a vörös (18. ábra) és fekete autókról visszavert fény polarizációfoka nagy és a motorháztetőről, a tetőről és a csomagtartóról tükröződő fény rezgéssíkja vízszintes. Így a vörös és fekete autók vízszintes felületei erősen vonzzák a polarotaktikus vízirovarokat. Másrészt pedig a sárga és fehér autók vízszintes részeiről visszaverődő fény polarizációfoka igen alacsony és polarizációiránya általában nem vízszintes. Ekképpen a sárga és fehér gépkocsik nem vonzzák a polarotaktikus vízirovarokat. A gépkocsikhoz vonzott vízirovarok által a karosszériára rakott tojások rövid idő alatt kiszáradnak és elpusztulnak.

E pusztító hatás gyakran megjelenik egyes vízirovarok imágóinál is, amelyek leszállásuk után szinte rögtön odasülnek a napsütésben fölhevült autófelszínhez. A gépkocsik karosszériájára rakott tojások is sérülést okozhatnak a fényezésen a savas esők hatásához hasonlóan, a tojásokban található kéntartalmú aminosavakból képződő kénsav révén (STEVANI 2000a, 2000b).

Napjainkban egyre terjed azon új és drága divathóbort, hogy főleg a luxusautók karosszériáját vagy annak egy részét matt feketére/szürkére festik, vagy matt karbonfóliával borítják. Az ilyen érdes felületű autók kinézete a megszokott csillogótól eltérő, matt lesz (35. ábra).

Mivel a matt (érdes) felületek többé-kevésbé depolarizálják a róluk diffúzan visszavert fényt, ezért a polarotaktikus rovarok számára várhatóan nem vagy kevésbé vonzóak, mint a fényes megfelelőik. Ekképpen tehát a poláros fényszennyezés csökkentésének egyik hatásos módja lehetne az érintett fényes felületek mattá tétele (HORVÁTH et al. 2009, HORVÁTH 2014).





**35. ábra:** Matt fekete autó öt különböző nézőpontból mért polarizációs mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában. Az első sorban az eredeti fényképfelvételek, a második sorban a  $p$  lineáris polarizációfok-mintázatok, a harmadik sorban a polarizációirány-mintázatok ( $\alpha$ , az óramutató járásával megegyező irányban) láthatók. A negyedik sorban sötétkék színnel lettek ábrázolva a polarotaktikus rovarok által vízként érzékelt területeket, amelyek esetében a visszavert fény a következő tulajdonságokkal rendelkezik:  $p > 15\%$ ,  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ . A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-20^\circ$  volt.

Hipotézisünk szerint az új divathóbort kapcsán terjedő matt fekete/szürke autók kevésbé idéznek elő poláros fényszennyezést, ami környezetvédelmi szempontból előnyös tulajdonság lehet. E feltételezésünk ellenőrzésére terepkísérleteket végeztünk fényes fekete, matt fekete és szürke autókarosszériákból kivágott és a földre vízszintesen elhelyezett tesztfelületekkel. Azt vizsgáltuk, hogy e felületek miként vonzanak bizonyos polarotaktikus rovarokat (kérészeket, szúnyoglábu legyeket és bögyöket). E pozitív polarotaxissal bíró rovarokat az erősen és vízszintesen poláros visszavert fény indikátoraiként használtuk (EGRI et al. 2012a, KRISKA et al. 1998, 2009). A vizsgált kérészek és szúnyoglábu legyek tömegesen előfordultak a kísérletünk helyszínén, a bögyök pedig mezőgazdasági kártevőként szintén gyakoriak. Eredményeink (BLAHÓ et al. 2014) fölfedték a matt fekete autók poláros fényszennyezésének mértékét, és kiderült, hogy a várakozásokkal ellentétben az alkalmazott matt fekete festékek és bevonatok nem környezetbarátok, mert optikailag azok is többé-kevésbé, de vonzzák a polarotaktikus rovarokat.

A 35. ábrán egy tipikus matt fekete autó öt különböző irányból mért polarizációs mintázatát mutatja a spektrum kék (450 nm) tartományában. Jól megfigyelhető, hogy a szélvédő napsütötte részéről visszavert fény  $p$  polarizációfoka igen magas ( $85\% < p < 100\%$ ), míg a függőleges ablakok és karosszériarészek csak gyengén polárosak ( $p < 15\%$ ). A tető, motorháztető és csomagtartó csak részlegesen poláros fényt ver vissza ( $25\% < p < 55\%$ ).

Az autóról visszavert fény polarizációfokának térbeli eloszlása meglehetősen homogén. A ferde szélvédő és a vízszintes tető, csomagtartó és motorháztető vízszintesen poláros fényt ver

vissza, míg a többi ferde és függőleges autófelület ferde vagy függőleges polarizációirányút. Az autókarosszéria azon részeit, amelyek egy küszöbnél ( $p > 15\%$ ) magasabb polarizációfokú, és közel vízszintes polarizációirányú ( $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) fényt vernek vissza, a polarotaktikus rovarok víznek tekintik (HORVÁTH 2014, KRISKA et al. 2009). E kettős feltétel a 35. ábra alapján a matt fekete autó szélvédőjére, tetejére és motorháztetejére teljesül, így e felületrészek vonzzák a vizet kereső polarotaktikus rovarokat. Mindez általában is igaz a matt fekete/szürke karbonfólia- vagy festékbevonatú autókra. A kísérletekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az autókarosszériák mattá tétele nem csökkenti a fekete autók poláros fényszennyezését.

Temetőekben megfigyeltük, hogy különféle szitakötők reproduktív viselkedést mutatnak csiszolt felszínű fekete sírköveknél (24. ábra), ahol ugyanazt a viselkedést mutatták (ülőágon való tartózkodás, felületérintés, párzás) mint a vizeknél (HORVÁTH et al. 2007). A szitakötők azokat a síremlékeket részesítették előnyben, amelyek rendelkeztek egy legalább  $0.5 \text{ m}^2$ -es vízszintes, fényes fekete felülettel, nyílt égbolt alatt voltak és volt legalább egy üllőág a közvetlen szomszédságukban. Képzalkotó polarimetriával azt találtuk, hogy a vízszintes fekete sírkövek is erősen és vízszintesen poláros fényt tükröznek (25. ábra), miáltal vonzzák a polarotaktikus szitakötőket.

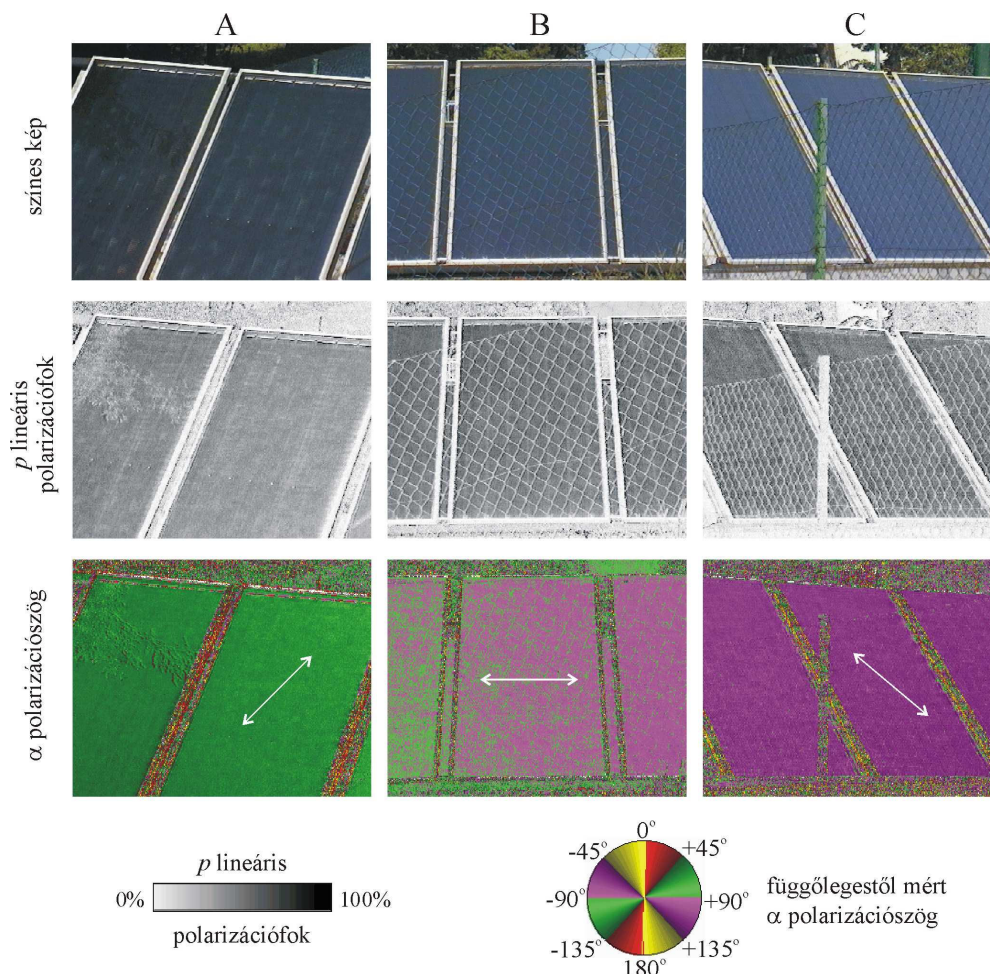
A dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula*) napnyugtakor repül ki a Dunából, majd a fák és bokrok körül rajzanak a folyóparton. Budapesti vizsgálataink (KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008) szerint e vízirovarok a folyóparti épületek függőleges üvegfelületeihez vonzódnak, ott rajzanak, s főleg a sötét üveglapokra szállnak, ahol másznak, párzanak és tojástartóznak, miközben jelentős részüket csapdába ejtik az épület nyitott bukóablakai (9. ábra). Kimutattuk, hogy e tegzesek is, mint más vízirovarok, vonzódnak az erősen és vízszintesen poláros fényhez (KRISKA et al. 2008b). Igazoltuk, hogy a tükrözött fényt erősebben polarizáló fekete üvegfelületek sokkal több tegzest vonzanak, mint a kevésbé polarizáló fehér vagy világosszürke üvegtáblák. Képzalkotó polarimetriával megmutattuk, hogy a repülő tegzesek vonzódása a függőleges üvegfelületekhez és az üvegre való leszállásuk utáni helyben maradásuk jól magyarázható a függőleges üvegfelületek tükröződési-polarizációs sajátosságaival (22-23. ábrák) és e rovarok pozitív polarotaxisával (MALIK et al. 2008). E vonzódást és csapdahatást csak fokozza az épületek napnyugta utáni világítása által kiváltott pozitív fototaxis.

A "zöld" technológiák alkalmazása lecsökkenti a légszennyezés mértékét, az épületek széndioxid-kibocsátását, ugyanakkor a használatuk során káros, előre nem várt hatások is fölmerülhetnek, mint például a szélturbináknak repülő madarak pusztulása. A napelemtáblák és napkollektorok fölhasználása a "zöldenergia" termelésében jelentősen megnövekedett az utóbbi években, köszönhetően a hatékonyságukat jelentősen növelő új fejlesztéseknek, és a háztartások számára is megfizethető árúknak. A napelemtáblák és napkollektorok a fizikai jellemzőik (sima, fekete felület) miatt egy fontos új forrását jelentik a poláros fényszennyezésnek (HORVÁTH et al. 2010b) (36. ábra).

Terepi vizsgálataink során a lárvakorukban vízben élő rovarokkal: kérészekkel, álkérészekkel, szúnyoglábu legyekkel és bögölyökkel végeztünk választásos kísérleteket. Kimutattuk, hogy e rovarok polarotaktikusak, miáltal erőteljesen vonzódnak a napelemtáblákhoz és napkollektorokhoz, melyek fölött gyakran tömegesen röpködnek, és a tojásaikat is rájuk rakják (HORVÁTH et al. 2010b) (37. ábra).

Terepkísérleteinkben a földön vízszintesen fekvő napelemtáblák vagy azok optikai modelljei a természetes vízfelszíneket utánozták. A napelemtáblákat és napkollektorokat azonban általában a földfelszín fölött, megdöntve helyezik el, hogy maximalizálják a felületükre eső napfény mennyiségét. Meglepő módon a napelemtáblák és napkollektorok dőlésszöge és talajfelszínhez viszonyított elhelyezkedése általában lényegtelen a polarotaktikus rovarokra

kifejtett vonzásuk szemszögéből. Tapasztalataink szerint ugyanis akár több tíz méter magasságban lévő, függőleges üvegfelszínek is képesek a róluk tükröződő erősen és vízszintesen poláros fénnel nagy tömegben magukhoz vonzani a tojásrakásra készülő vízirovarokat, például a dunai tömegtegzeseket (*Hydropsyche pellucidula*) (KRISKA et al. 2008b).



**36. ábra:** Napkollektoroknak a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai jobbról (A), szemből (B), és balról (C). Az 1. sor színes képeken mutatja be a napkollektorokat. A 2. és 3. sorban a napkollektorokról tükröződő fény  $p$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai láthatók. A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-35^\circ$  volt. A kettősfejű nyilak az uralkodó polarizációirányt mutatják.

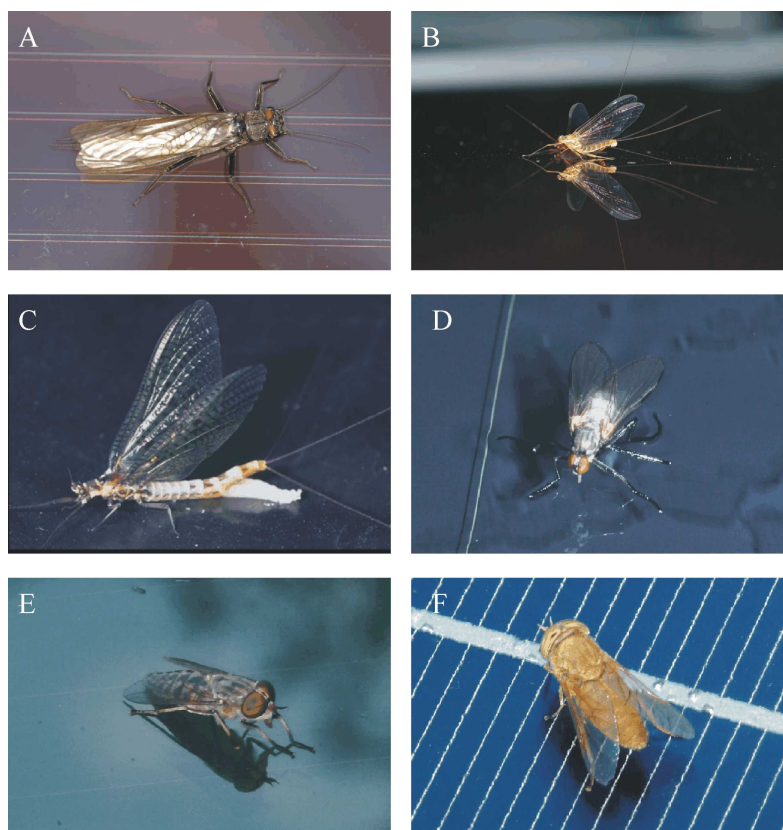
Közismert az a jelenség is, hogy a vízbogarakat, vízipoloskákat, szitakötőket és kérészeket vonzzák a vízszintesen poláros fényt visszaverő üvegházak és a sötét színárnyalatú gépkocsik különböző dőlésszögű karosszériaelemei (KRISKA et al. 2006a). Mindezen megfigyelések alapján várható, hogy a magasabban és ferdén elhelyezett napelemtáblák és napkollektorok is képesek magukhoz csalni a vízirovarokat. E felületek dőlése ahhoz is hozzájárulhat, hogy a repülő, vizet kereső vízirovarok már távolabbról is észlelik őket, így akár még több vízirovar is magukhoz vonzhatnak, mintha vízszintesek lennének.

A napelemtáblák és napkollektorok poláros fényszennyezésének a vízirovar-populációkra gyakorolt konkrét negatív hatásairól egyelőre még keveset tudunk. Azonban az ökológiai csapdák általában gyors és katasztrofális hatásúak.

A napelemtáblák és napkollektorok százait-ezreit használó naperőművek száma az utóbbi időben gyorsan növekszik Európában, Afrikában és Észak-Amerikában is. Mint mesterséges fénypolarizátorok, e naperőművek a modernkori tájkép gyakori elemeivé váltak, és erőteljes



szelekciós hatást fejthetnek ki egyes állatpopulációk természetes élőhelyválasztására, ami evolúciós változásokat okozhat az adott életközösségekben.



**37. ábra:** Poláros fényszennyező napelemtáblákra leszállt különféle polarotaktikus vízirovarok. (A) Tojásrakáshoz készülő óriás álkérész (*Perla abdominalis*). (B) Tojászsomós kérész (*Rhithrogena semicolorata*). (C) Tojásrakó dánkérész (*Ephemera danica*). (D) Szúnyoglábu légy (*Dolichopodidae*). (E, F) Bögölyök (*Tabanidae*).

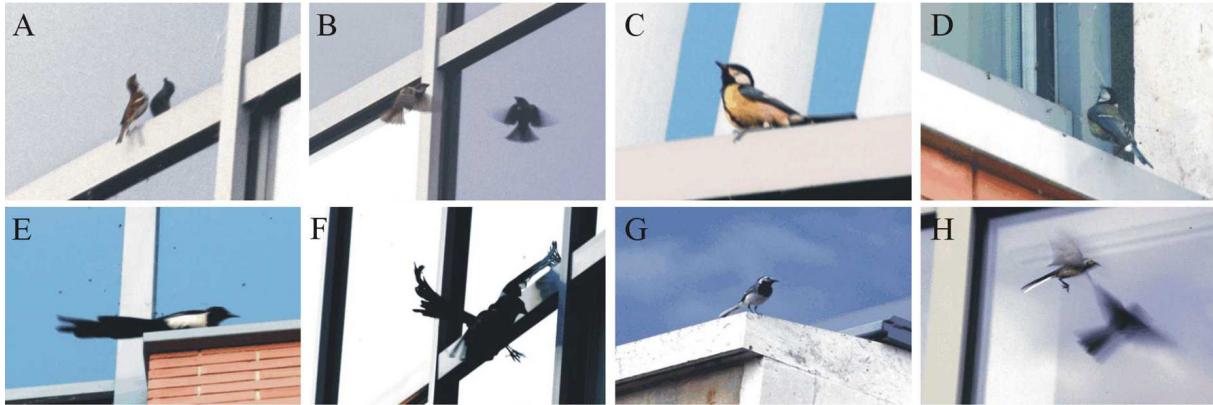
Mivel a vízirovarok fontos tagjai a vízi ökoszisztémák táplálékláncainak, a PF ezen állatokra kifejtett káros hatásai komoly ökológiai következményekkel járhatnak. A következmények számszerűsítése érdekében nemrégiben egy középhegységi patak szakasz mellett futó aszfaltút PF miatti károsító hatását vizsgáltuk meg egy álkérészfaj a *Perla abdominalis* [Guérin-Méneville, 1838] esetében (EGRI et al. 2019).

#### ***A poláros fényszennyezés egyes gerincesekre és pókokra gyakorolt hatásai***

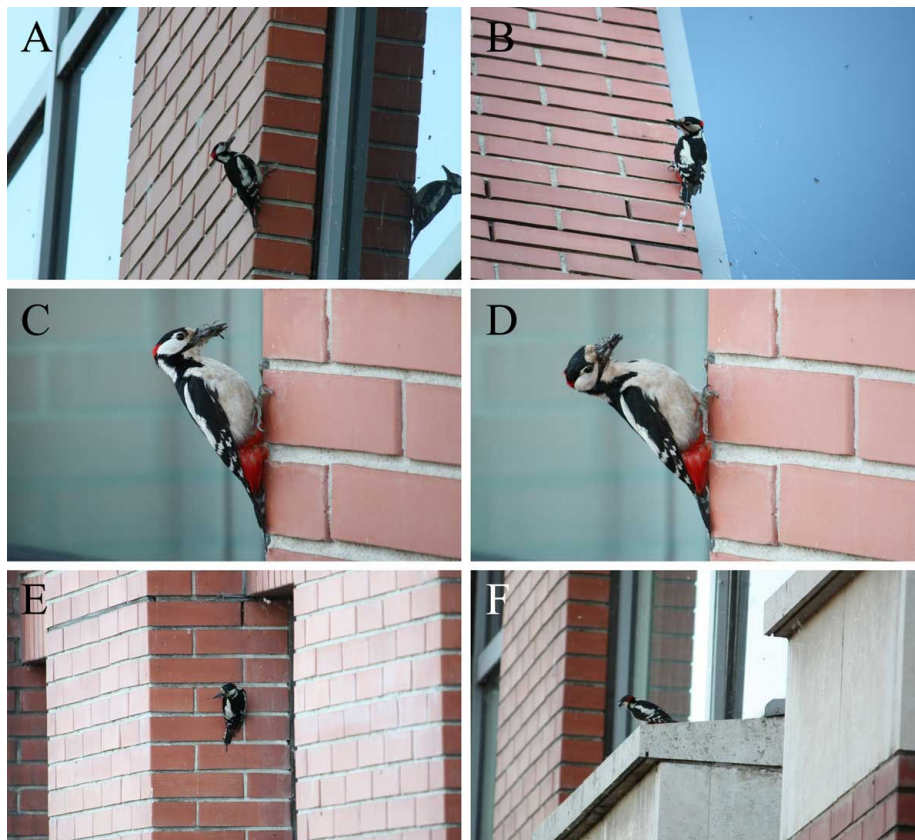
A PF jelzője arra utal, hogy e jelenséget poláros fény váltja ki, míg a „szennyezés” azt az elsődleges és negatív hatást fejezi ki, hogy a fény vízszintes polarizációja a polarotaktikus rovarokat megtéveszti, magához vonzza, sokszor tojásrakásra készíti (37B-C. ábra) és gyakran el is pusztítja a tojásokkal együtt. Ezen elsődleges hatás mellett a PF másodlagos hatásai akár előnyösek is lehetnek, mikor bizonyos állatok (például pókok, madarak, denevérek) azokkal a polarotaktikus rovarokkal táplálkoznak, melyeket a poláros fényszennyező források vonzottak magukhoz. Közismert, hogy az utcai lámpákhoz odacsalt éjszakai rovarokra pókok, békák, gyíkok, madarak és denevérek vadásznak (RICH és LONGCORE 2006), ami egy másodlagos következménye a hagyományos (nem poláros) ökológiai fényszennyezésnek. Hasonló jelenséget figyeltünk meg több különféle poláros fényszennyező forrásnál is: a földre terített mezőgazdasági fényes fekete műanyag fóliák által odavonzott polarotaktikus rovar tömeg barázdabillegetők rajait vonzotta, mely madarak levadászták le a fóliák fölött repülő és azokra leszálló rovarokat (BERNÁTH et al. 2001b,



2008). Ezáltal e föliák úgy működtek, mint hatalmas madáretetők. Azt is megfigyeltük, hogy a barázdabillegetők összeszedgették a patakok mellett húzódó aszfaltutak fölött rajzó és párosodó polarotaktikus kérészeket (KRISKA et al. 1998). Tapasztalataink szerint a budapesti Duna-part épületeinek üvegfelületeinél a tavasszal tömegesen rajzó tegzesek (9A. ábra) nagy számban vonzanak házi verebeket (*Passer domesticus*) (38A-B. ábra), széncinegét (*Parus major*) (38C-D. ábra), szarkákat (*Pica pica*) (38E-F. ábra) és barázdabillegetőket (*Motacilla alba*) (38G-H. ábra), mely madarak tervszerűen fogdossák össze az üvegfelületekre leszálló és ott rajzó rovarokat (ROBERTSON et al. 2010).



**38. ábra:** Függőleges üvegfelszínek által odavonzott tegzeseket (*Hydropsyche pellucidula*) fogyasztó madarak. (A, B) Házi veréb (*Passer domesticus*). (C, D) Széncinege (*Parus major*). (E, F) Szarka (*Pica pica*). (G, H) Barázdabillegető (*Motacilla alba*).



**39. ábra:** (A-F) Az ELTE dunaparti üvegépületnél *Hydropsyche pellucidula* egyedekkel táplálkozó nagy fakopáncs (*Dendrocopos major*). (A-D) A nagy fakopáncs az ablakok mellett a téglafalba kapaszkodva közelíti meg az üvegfelületre leszállt rovarokat. (E-F) A téglafal és az épület peremek jó kapaszkodó és leszállóhelyet biztosítanak a fakopáncs számára.

Az ELTE dunaparti üvegépületeinél a dunai tömegtegzes rajzásakor elsőként 2015-ben, majd 2016-ban és 2017-ben is sikerült megfigyelnünk nagy fakopáncs (*Dendrocopos major*) párok rendszeres megjelenését (39. ábra). A nagy fakopáncsok a fentebb említett madarakhoz hasonlóan szintén az üvegfelületekre leszálló tegzesekkel táplálkoztak (PERESZLÉNYI et al. 2017). A szóban forgó rovarrevő madarak számára első közelítésben előnyt jelent a poláros fényszennyező forrásokhoz odavonzott polarotaktikus rovarok tömege, ami időszakos és térben jól körülhatárolt, bő zsákmányforrást jelent. Ezt különösen a szarkák képesek kiaknázni, nem lévén természetes ellenségeik az épületek környékén. Másrésről viszont a tömegrajzó tegzesek által odavonzott fészekrabló szarkák megnövekedett predációs veszélyt jelenthetnek a többi madárfajra. Ez a helyzet egy tipikus ökológiai csapda (ROBERTSON és HUTTO 2006, HORVÁTH és KRISKA 2008) kialakulását eredményezheti a verebek, barázdabillegetők és széncinegék számára: (i) A poláros fényszennyező üvegfelületekhez vonzódó polarotaktikus tegzesek tömege a közelbe csalja az említett madarakat. (ii) E madarak tojást raknak az üvegépületek közelében a bőséges rovarzsákmánynak köszönhetően. (iii) A szarkák és a városi környezettel együtt járó egyéb ragadozók, pl. kőbormacsák elpusztíthatják a barázdabillegetők, verebek és széncinegék fiókáit. (iv) Ez utóbbi hatást tovább súlyosbíthatja, hogy az időszakosan (a tegzesrajzásakor) megjelenő táplálékosság elmúltával a madarak a fiókák kikelése után már nem találhatnak a területen elegendő táplálékot az utódok felneveléséhez. Ezáltal tehát egy kezdetben előnyösnek tűnő élőhely egyes madárfajok esetében később kifejezetten hátrányosnak bizonyulhat az utódnemzedék túlélése szempontjából (ROBERTSON et al. 2010).

Hasonló, de még összetettebb táplálékhálózatot figyeltünk meg egy másik poláros fényszennyező forrásnál, a budapesti pakuratonál: az erősen és vízszintesen polarizáló fekete olajfelszín (1B. ábra) polarotaktikus vízirovarok tömegeit vonzotta magához, mely rovar tömeg számos rovarrevő madarat és denevért csalt a közelbe, amelyeket gyakran foglyul ejtett a ragacsos pakura. A csapdába esett madarak és denevérek tetemei pedig ragadozó madarakat, például baglyokat és vércsákat csábítottak a pakuratóhoz, melyek szintén a pakurába ragadtak és elpusztultak. Ekkor tehát a táplálékhálózat több tagja is a poláros fényszennyező pakurató áldozata lett (BERNÁTH et al. 2001b).

### ***A polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró természetes tényezők***

A polarotaxissal történő vízdetektálást zavaró tényezők között a fentiekben emberi tevékenységekhez köthető, mesterséges hatásokról esett szó. Természetes tényezőket is megemlíthetünk azonban ebben a vonatkozásban. Az ősi aszfaltmocsarak esetében például a föld mélyén felhalmozódott kőolaj természetes módon került a felszínre és csapdázott polarotaktikus vízirovarokat (PILCHER és SEXTON 1993).

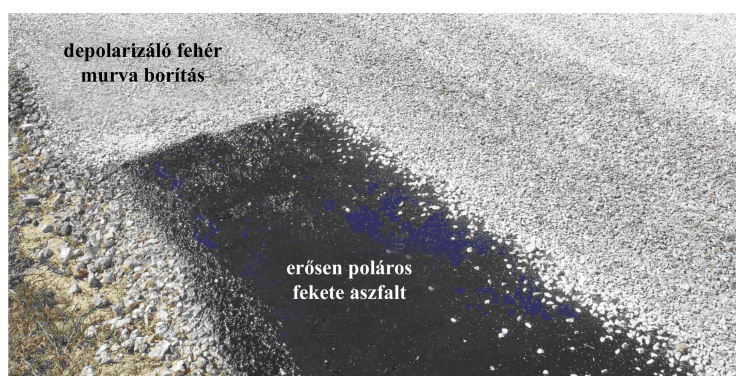
Miközben egy kutatásunk során arra kerestük a választ, hogy miért található jelentős mennyiségű vízirovar a borostyánban (WICHARD et al. 2009) egy újabb, a polarotaxissal történő vízdetektálást megzavaró természetes tényezőt sikerült felderítenünk. A Balti borostyán alapanyagát az Eocénben, mintegy 40-50 millió éve élt fák gyantatermelése adta. Különös módon az ebben megőrződött állati szervezetek igen jelentős része, kb. 25%-a vízirovar. A vízirovarok (pl. kérészek, szitakötők, álkérészek, tegzesek, vízipoloskák, vízibogarak, vízfátyolkák, partifátyolkák, szivacsfátyolkák) kifejlett egyedei mellett ezek lárvái is megtalálhatók a borostyánban. Mivel a lárvák nem hagyják el a vízteret, ezért ezek a vízbe került gyantába ragadhattak bele, amely később szárazra kerülve alakult borostyánná. A vízben élő kifejlett vízibogarak és vízipoloskák is kerülhettek így módon a borostyánba (SCHMIDT és DILCHER 2007) a csak szárazföldi életmódot folytató vízirovar imágók (pl. kérészek, szitakötők, álkérészek, tegzesek) viszont csak a szárazföldön csapdázódhattak. A vízipoloskák és vízibogarak nagy része időszakosan elhagyja vízi élőhelyét és szárnyra kapva keres új élőhelyet (CSABAI et al. 2006), így módon elmondható, hogy minden repülő vízirovar beleragadhat a fa által kiválasztott gyantába.

Kutatásunk során számos vízirovar taxon 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 iránya általában nem vízszintes, miáltal nem vonzó a polarotaktikus vízirovarok számára. Ebből kifolyólag például a piszkos autók matt felületéről visszavert fény kevésbé poláros, mint a csillogó felszínűekéről tükröződő (KRISKA et al. 2006a). 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. Ebből fakadóan a fehér vagy világos színű autókarosszéria kevésbé polarizálja a róla visszaverődő fényt, mint a sötét. Ezért javasoltuk (KRISKA et al. 2006a), hogy a természetvédelmi szempontból értékes vizes élőhelyeket csak fehér vagy világos színű autókkal lehessen látogatni, miáltal elkerülhető a veszélyeztetett polarotaktikus vízirovarok autókhoz való vonzódása és az ezekre történő tojásrakása.

A kérészek imágóinak az erősen poláros fényszennyező aszfaltutakhoz való vonzódása és az ezekre való tojásrakása (KRISKA et al. 1998) is mérsékelhető, ha a kérészek előfordulási helyei közelében futó útszakaszok felületét a visszaverődő fényt depolarizáló tulajdonságúvá, azaz durvává és világossá tesszük, például fehér és szemcsés anyag (például murva) aszfaltba való hengerlésével (HORVÁTH et al. 2010c) (40. ábra).



**40. ábra:** A fényes fekete vízszintes aszfaltfelszínek erősen és vízszintesen polárosak, ezért jelentős forrásai a poláros fényszennyezésnek. Ez a hatás mérsékelhető, vagy akár teljesen meg is szüntethető, ha az aszfaltfelszínt befedik apró fehér kötőrmelékekkel, amely depolarizálja a visszavert fényt a diffúz visszaverődés (felületi egyenetlenség) és az Umow szabályból eredően (fehér anyag).

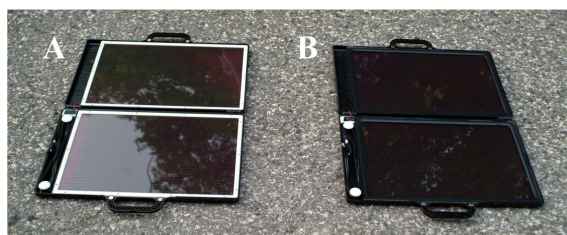
Hasonlóképpen, a PF csökkentése céljából tanácsos volna megtiltani a mezőgazdáknak, hogy védett vizes élőhelyek közelében sima, fekete műanyag fóliákat (1C. ábra) használjanak: ahol lehetséges, ott ezeket a fényt kevésbé polarizáló fehér, sárga vagy világosszürke, s lehetőleg matt felületű műanyag fóliákra kellene cserélni.



A vízirovarok polarizációs ökológiai csapdájaként (ROBERTSON és HUTTO 2006, HORVÁTH és KRISKA 2008) működő városi csupaüveg épületek poláros fényszennyezését (1G. ábra) a következő környezetbarátabb építészeti megoldásokkal lehetne kiküszöbölni, vagy csökkenteni:

1. Minimalizálni kell az üvegfelületeket: kerülendő minden fölösleges üvegtábla, melynek csak díszítő szerepe van. Egy épületben gyakorlatilag csak az ablakok a szükséges üvegfelületek.
2. Kerülendők a fényes (sima) felszínű dísztéglák is, helyettük matt felületűek használandók.
3. Ugyancsak kerülendők a fényes és sötét burkolófelületek.
4. Az ablakokon fehér függönyök használandók, melyek lehetőleg be is húzandók az ablaküvegről visszavert fény polarizációfokának csökkentése érdekében.
5. Mivel a vízirovarok általában nem érzékelik a vörös fényt, s így számukra a vörös és fényes felületek sötétnek és erősen polarizálónak tűnnek, ezért kerülendő a fényes és vörös felületek használata.
6. Az épület felületei nem lehetnek túl világosak sem, mert napnyugta után nagy mennyiségű városi fényt vernek vissza, ami fototaxissal vonzhatja a védendő rovarokat. Az optimális kompromisszum a középszürke és matt felületek használata, melyek csak mérsékelten vernek vissza fényt, gyenge és általában nem vízszintes polarizációval.
7. Az ablakok ne vízszintes forgástengely körül legyenek csak részben dönthetőek, hanem függőleges forgástengely körül legyenek teljesen nyithatóak, miáltal sokkal kisebb eséllyel ejthetik csapdába az odavonzott és a szobákba bejutott rovarokat. Ha egy épület vizes élőhely közelében áll, és mégis vízszintes tengely mentén részben dönthető bukóablakokkal rendelkezik, akkor úgy tehető „zöldebbé”, hogy az ablakait (ha lehetséges) zárva tartják a polarotaktikus és/vagy fototaktikus rovarok fő (tavaszi, esetleg őszi) rajzási időszaka(i) alatt.

A napelemek terepkísérleti alkalmazása során figyeltem 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. Terepvizsgálatainkhoz két olyan szétnyitható diplomata táska méretű hordozható napelemet vásároltam, amelynek két napelemét fehér keret választotta el egymástól (41A. ábra). A terepkísérletek során a fehér kerettel rendelkező kinyitott napelemek nem vonzották a kérészeket, de ha fekete szigetelőszalaggal letakartam a keretet (41B. ábra), akkor a napelemek erőteljesen vonzották a polarotaktikus vízirovarokat.

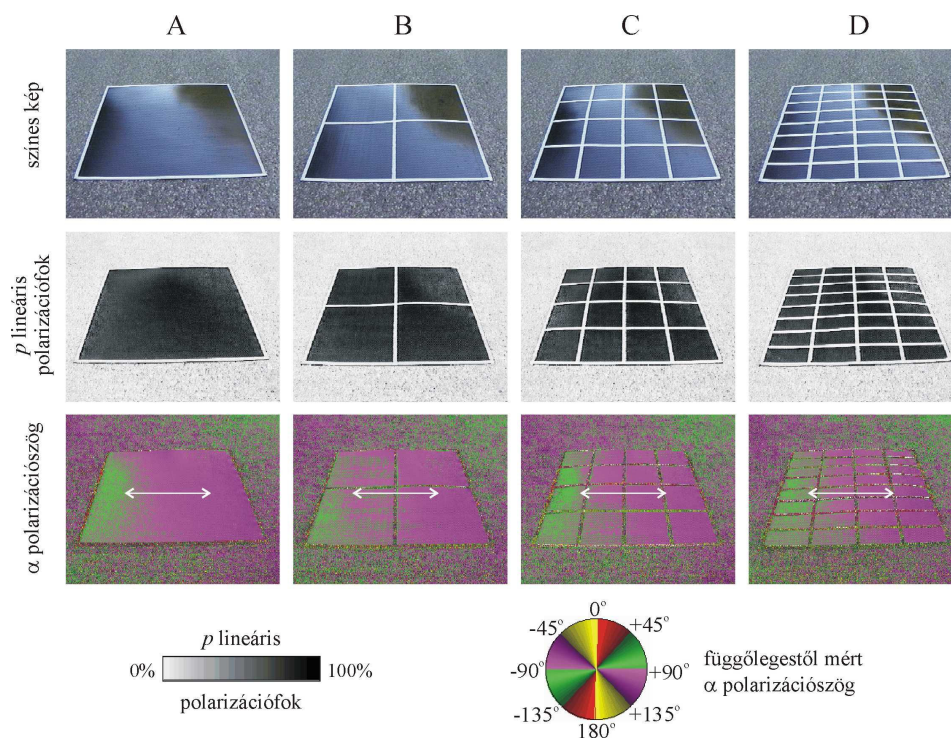


**41. ábra:** A depolarizációs rács hatás felismerését lehetővé tevő fehér kerettel ellátott és fehér keret nélküli hordozható napelemek.

Erősen és vízszintesen polarizáló tesztfelületekkel (42. ábra) 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 rácsoszatlan tesztfelületekre (43. ábra). E fölfedezésünk nyomán elmondható, hogy a poláros fényszennyezésük miatt a polarotaktikus rovarok számára ökológiai csapdát

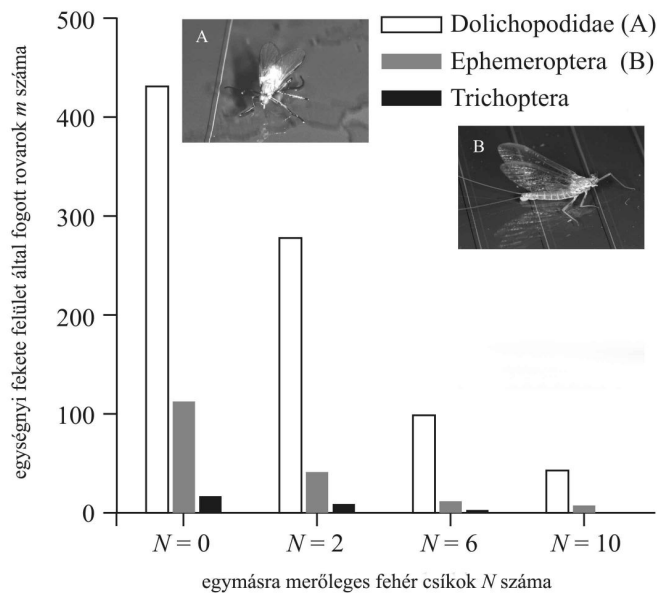
képező napelemtáblák és napkollektorok egy depolarizáló felületi rács hatására elveszítik a vízirovarokra gyakorolt vonzókéességüket.

Bizonyos poláros fényszennyező felületeknél, például a napelemtábláknál vagy ablaküvegeknél funkciójukból kifolyólag nem lehet a felületet érdekessé és/vagy világossá tenni. A napelemtáblák és napkollektorok azért feketék, hogy a lehető legtöbb fényt nyeljék el, s alakítsák át elektromossággá vagy hővé. Szerencsére ma már ezen esetekben is csökkenthető a poláros fényszennyezés a fent említett depolarizáló rács hatás alkalmazásával. Ha erősen és vízszintesen polarizáló mesterséges felületeket egy vékony, akár 1-2 mm-es csíkokból álló, polarizálatlan fényt visszaverő (durvafelszínű és/vagy fehér) rácsmintával látunk el, akkor elvesztik a polarotaktikus rovarokra kifejtett vonzásukat. Minél sűrűbb a fényt depolarizáló fehér rács, annál kevesebb polarotaktikus rovar vonzanak az egyébként fényes és fekete felületrészek (42-43. ábrák).



**42. ábra:** A terepkísérletekben használt különféle vízszintes, fehérrácsos fényes fekete tesztfelületek a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai. Az 1. sor azt mutatja, ahogyan az emberi szem látja a tesztfelületeket. A 2. és 3. sorban a felületekről tükröződő fény  $p$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai láthatók. A képalkotó polariméter optikai tengelyének magassági szöge a vízszintestől  $-35^\circ$  volt. A kettősfejű nyilak az uralkodó polarizációirányt mutatják. Minél sűrűbb a fehér rácsozat, annál kevésbé vonzza a fekete felület a polarotaktikus vízirovarokat, azaz annál kisebb a poláros fényszennyezése.

Megfigyeléseink szerint egy adott módon fehéren berácsozott fekete felület vízirovarokra kifejtett vonzókéessége taxonfüggő lehet. A repülő vízirovarok vízszintesen poláros fényt tükröző olyan felületeket keresnek az optikai környezetükben, melyek kiterjedése egy fajra jellemző küszöbértéknél nem kisebb. Ennek biológiai jelentősége abban állhat, hogy a túl kicsi víztestek például hamar kiszáradhatnak, s a vízirovarok bennük fejlődő lárvái könnyen elpusztulhatnak. A küszöbértéknél nagyobb kiterjedésű, erősen és vízszintesen polarizáló felület vonzó a polarotaktikus rovaroknak.

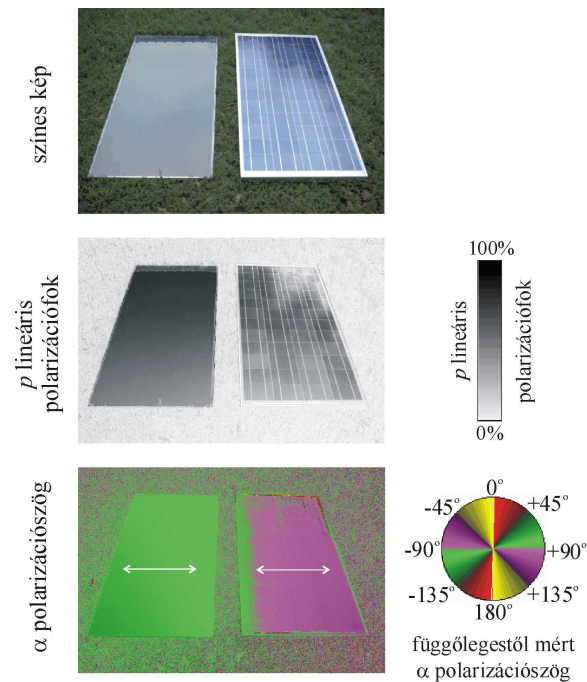


**43. ábra:** A terepkísérleteinkben az  $N = 0, 2, 6$  és  $10$  egymásra merőleges fehér csíkkal cellákra osztott vízszintes, fényes, fekete, ragadós csapdafelszínek egységnyi fekete felülete által csapdába ejtett polarotaktikus szúnyoglábú legyek (A, Dolichopodidae), kérészek (B, Ephemeroptera) és tegzesek (Trichoptera) m száma.

Ha azonban e felületet egy vékony depolarizáló ráccsal a küszöbértéknél kisebb kiterjedésű cellákra osztjuk, akkor e cellák egyenként már nem vonzóak, és amint kísérletekkel kimutattuk, a vízirovarok nem képesek egységes felületként érzékelni e cellák összességét.

E felismerésünk lehetőséget ad arra, hogy csökkentsük, vagy akár meg is szüntessük a napelemtáblák és napkollektorok poláros fényszennyezését, polarizációs csapdahatását: A napfényt elnyelő aktív felületet megfelelően kis részekre kell fölosztani egy fehér ráccsal. A kereskedelemben az összefüggő fekete felületű napelemtáblák (44. ábra bal oldalt) mellett olyanok is kaphatóak, melyekben az elemi napelem cellákat vékony fehér falak választják el egymástól (44. ábra jobb oldalt). Terepkísérletekben igazoltuk, hogy egy ilyen fehérrácsos napelemtábla sokkal kevésbé vonzó a kérészek, szúnyoglábú legyek, nagy álkérészek és bögölyök számára, mint egy azonos nagyságú, homogén fekete napelemtábla (HORVÁTH et al. 2010b). A depolarizáló fehér rács csíkszélességétől és az elemi cellák méretétől függ, hogy egy erősen és vízszintesen polarizáló felület vonzza-e egy adott vízirovarfajt. E kritikus paraméterek a különböző polarotaktikus rovarcsoportok esetében eltérőek lehetnek, hiszen például a folyólakó rovarok nagyobb, míg a patakokban vagy kisebb állóvizekben fejlődő rovarok kisebb vízszintesen polarizáló felületeket keresnek az élőhelyválasztásuk során. A nanotechnológia egyik legújabb eredményeként ma már léteznek olyan "háromdimenziós" napelem cellák is, melyek aktív felületét az arra merőlegesen álló szén nanocsövek erdeje borít abból a célból, hogy a rájuk eső fény ne tükröződjön, hanem a nanocsövek között sokszor ide-oda verődve végül elnyelődjön, miáltal sok százalékkal megnő a teljesítményük. Habár nem ez volt az eredeti cél, de az ilyen, nanoszinten durva felületű napelemtáblák csak igen kevés, szinte teljesen polarizálatlan, diffúz fényt vernek vissza, miáltal nem okoznak poláros fényszennyezést sem. A nanocsövekkel nem borított felületű, hagyományos, sima napelemtáblák és napkollektorok poláros fényszennyezését pedig az általunk feltalált és szabadalmaztatott (HORVÁTH GÁBOR és KRISKA GYÖRGY (2009): Mintázat polarizált fényt visszaverő felülettel rendelkező tárgyhoz, ilyen mintázattal ellátott tárgy és eljárás poláros fényszennyezés csökkentésére (6750R) depolarizáló ráccsal lehet "zöldebbé", kevésbé poláros fényszennyezővé változtatni.





**44. ábra:** A terepkísérletekben használt homogén fekete napelemtábla (bal) és egy vékonyszálú fehér ráccsal cellákra osztott fekete napelemtábla (jobb) a spektrum kék tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai. A fehérrácsos napelemtábla jóval kevésbé vonzza a polarotaktikus vízirovarokat, azaz kevésbé poláros fényszennyező.

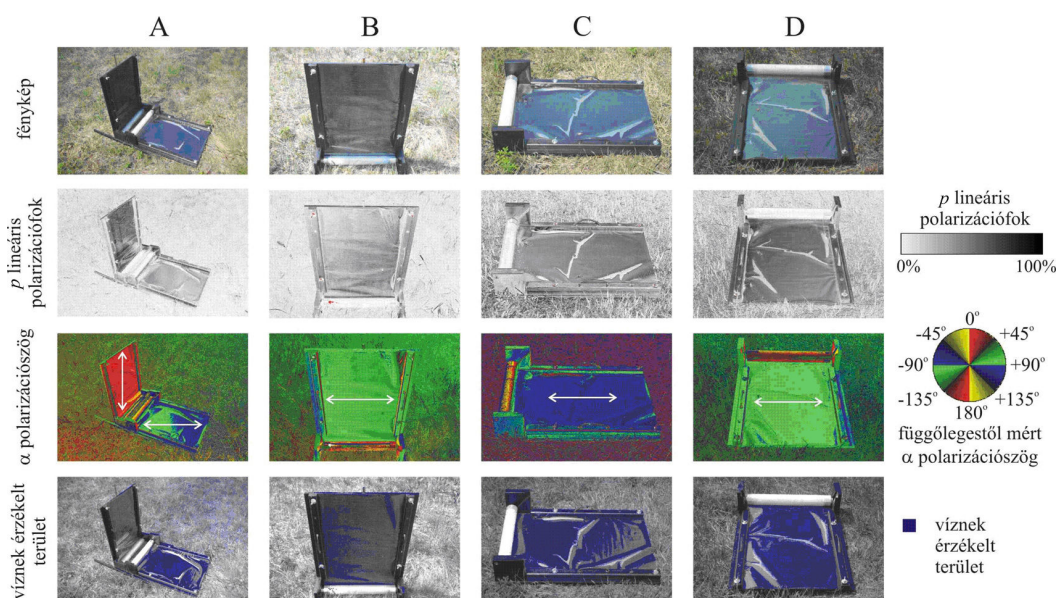
A korszerű napelemek felületét a gyártók fényvisszaverődést gátló, matt réteggel látják el az energiatermelés hatékonyságának növelése érdekében. Ennek következtében ezek az új napelemek kisebb mértékben tükröznek erősen és vízszintesen poláros fényt, így feltételeztük, hogy a poláros fényszennyezésük is kisebb mértékű lehet. Ennek igazolására olyan mesterséges tesztfelületeket hoztunk létre, amelyek a fényvisszaverő réteggel ellátott és csupasz napelemeket utánozták. Egész pontosan fényes fekete műanyag fóliát fedtünk le üveglappal (csupasz napelem utánzata) és a korszerű napelemek gyártásánál használt antireflexiós lappal. A két tesztfelület poláros fényszennyezésének terepi vizsgálata során különböző vízirovar taxonokat, kérészeket, árvaszúnyogokat és bögölyöket használtunk indikátorként. A kétféle tesztfelület polarizációs mintázatát négyféle irányból mértük ki napsütéses és borult időben a spektrum látható és ultraibolya tartományában. A mérések alapján kiderült, hogy antireflexiós réteg hiányában a tesztfelület minden irányból, napos és borult időben is erősen és vízszintesen poláros fényt tükrözött. Ezzel szemben a fényvisszaverődést gátló réteggel rendelkező matt felület csak a nappal szembeni és az ezzel ellentétes irányból vert vissza vízszintesen poláros fényt. Mindezek alapján logikusnak tűnt, hogy az antireflexiós réteggel ellátott tesztfelület kevesebb vízirovart fog vonzani. Ezzel szemben az eredmények árnyaltabb képet mutattak. A matt felület kevesebb bögölyt, viszont több kérészt vonzott az árvaszúnyogok számára pedig mindkét tesztfelület egyformán vonzó volt. Ez az eredmény felhívja a figyelmet arra, hogy a poláros fényszennyezés különböző forrásai eltérő mértékben fejthetik ki hatásukat a különböző vízirovar taxonokra, aminek hátterében ezek életmódbeli különbözőségei állhatnak (SZÁZ et al. 2016).

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 böglyök új típusú csapdába ejtésére. A szabadalmaztatott (HORVÁTH GÁBOR és KRISKA GYÖRGY (2007): Rovarcsapda, különösen böglycsapda (701245/DO), Taba-NOid technológiának nevezett módszer kifejlesztését a böglyök pozitív polarotaxisának fölfedezése tette lehetővé, vagyis annak fölismerése, hogy a vérszívó rovarok a vízszintesen poláros fényhez vonzódnak, ezért az ilyen fényt keltő alkalmas csapdaszerkezetekkel befoghatók és elpusztíthatók (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a). A böglyök pozitív polarotaxisát kihasználva csapdák fejleszthetők ki befogásukra olyan mesterséges csapdaelemek alkalmazásával, amelyek a PF forrásainak tekinthetők.

Egy Eu-FP7 kutatás-fejlesztési pályázat (TaBaNOid-232366) tette lehetővé a poláros böglycsapda különböző az alábbiakban röviden ismertetésre kerülő prototípusainak kifejlesztését és terepen történő tesztelését, optimalizálását. A TabaNOid<sup>®</sup> böglycsapda-család három, polarizációs elven működő, magyar szabadalmi oltalommal védett böglycsapdát foglal magába: (1) ragadós böglypapír, (2) vizes-étolajos folyadéktálca, (3) napelemes, forgódrótos rovarcsapda.

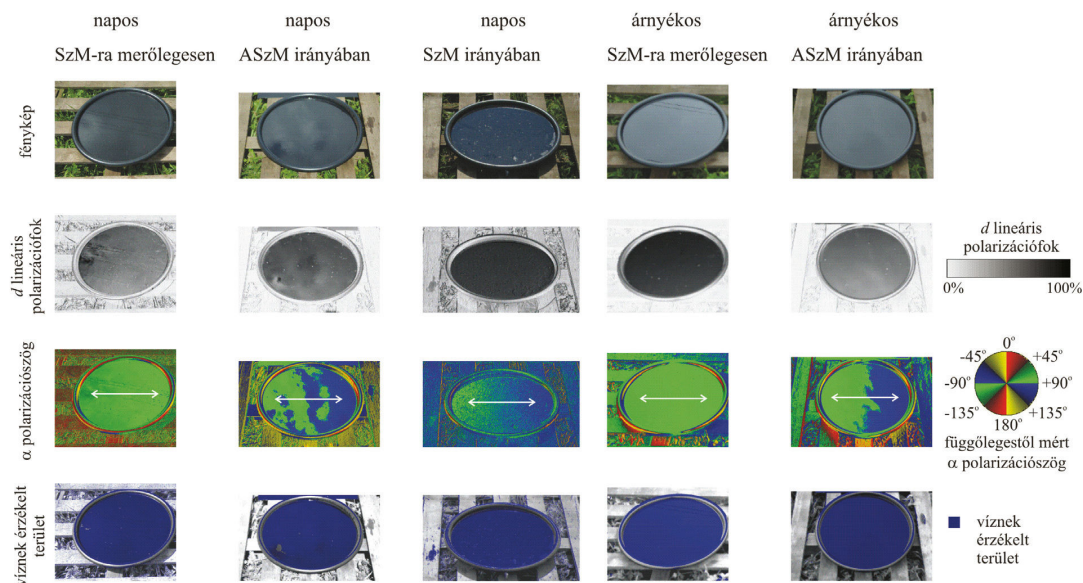


**45. ábra:** A ragadós böglypapír prototípusáról készült fényképek, a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatok ( $p$  lineáris polarizációfok, függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szög), és a böglyök által vizuálisan víznek érzékelt területek (melyekre igaz, hogy  $p > 20\%$  és  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) különböző irányokból nézve. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-35^\circ$ -os szöget zárt be. A 3. sorban a fehér kettősfejű nyilak a csapda olajfelszínéről visszaverődő fény polarizációjának irányát mutatják.

A legyek ragacsos papírral történő csapdázása ősrégi eljárás. A hagyományos légypapírnak négy fontos tulajdonsága van: (i) világos (drapp vagy sárgás) színű, (ii) hosszúkás alakú, (iii) függőlegesen lefelé lóg, és (iv) a talajszint fölött néhány méterrel függesztik föl. E klasszikus légypapír azonban a böglyöket nem fogja meg, mert nem vonzza őket. A böglyök poláros fényhez való vonzódására alapozva (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a, EGRI et al. 2012a), a klasszikus légypapírt továbbfejlesztve, megalkottuk az ideális böglypapírt (45. ábra). Terepkísérletekben igazoltuk, hogy az optimális böglypapír (1) fényes fekete színű, (2) kellően nagyméretű (75 cm  $\times$  75 cm), (3) egy-egy ragadós vízszintes és függőleges elemből áll L alakban elrendezve úgy, hogy (4) a vízszintes rész a talajon fekszik, a függőleges rész pedig 1–1.5 méterrel a talaj fölött (EGRI et al. 2013).

Képalkotó polarimetriával mértük a bögölypapír fénypolarizációs sajátosságait (45. ábra). Ezen új polarizációs bögölycsapda terepkísérletekben meghatározott ideális optikai és geometriai paramétereire fizikai és biológiai magyarázatot adtunk (EGRI et al. 2013). A csapda vízszintes eleme a vízkereső hím és nőstény bögölyöket fogja meg (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2009), míg a függőleges része a vérszívás céljából gazdaállatot kereső nőstény bögölyöket csapdázza (EGRI et al. 2012a).

A polarizációs folyadékcsapda egy kör alakú (átmérő = 50 cm) fekete műanyag tálca (mélység = 2 cm), aminek oldalán fém túlfolyócső van. A tálcába 2 liter csapvizet, majd 1 liter étolajat töltünk. Az utóbbi vékony réteget alkot a vízen, mivel sűrűsége kisebb a vízénél. Esőben a fölösleges víz a túlfolyócsővön át távozik, de az olajréteg a felszínen megmarad. A folyadékcsapda vízszintes, fekete felülete erősen és vízszintesen poláros fényt tükröz, ami vonzza a polarotaktikus bögölyöket.



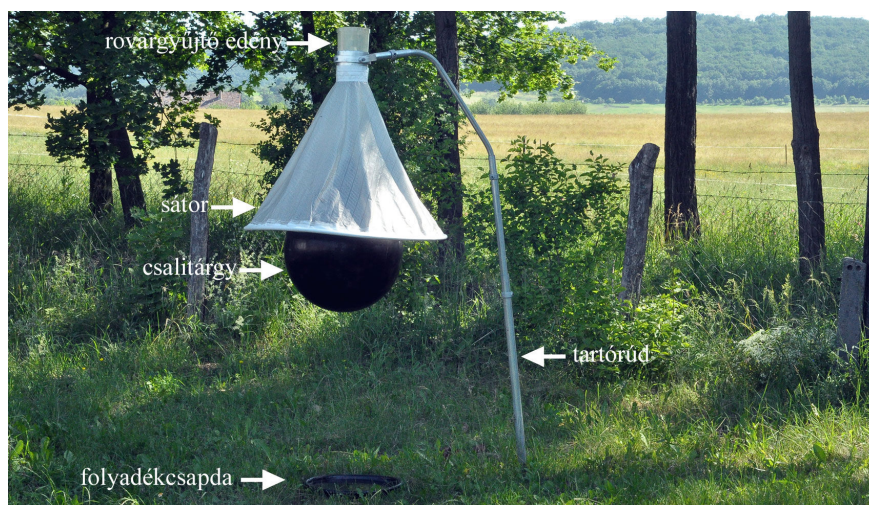
**46. ábra:** A TabanoId<sup>®</sup> polarizációs folyadékcsapdáról készült fényképek, a spektrum zöld (550 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatok ( $p$  lineáris polarizációfok, függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szög), és a bögölyök által vizuálisan víznek érzékelt területek (melyekre igaz, hogy  $p > 20\%$  és  $80^\circ < \alpha < 100^\circ$ ) napos és borult időben a Naphoz képesti különböző irányokból nézve. SzM irányában: a polariméter a szoláris meridián irányába nézett. ASzM irányában: a polariméter az antiszoláris meridián irányába nézett. SzM-ra merőlegesen: a polariméter a szoláris meridiánra merőleges irányba nézett. Az árnyékos esetekben a csapdát az égbolt minden irányából érkező, a felhőzeten szóródó fény világította meg. A polariméter optikai tengelye a vízszintessel  $-35^\circ$  szöget zárt be. A 3. sorban a fehér nyilak a csapda olajfelszínéről visszaverődő fény polarizációjának irányát mutatják.

A folyadékcsapda fénypolarizációs tulajdonságait az 46. ábra mutatja napsütötte és árnyékos esetben a szoláris meridiánhoz képesti különböző irányokból mérve. A fekete olajfelszínről visszaverődő fény minden meteorológiai viszony között erősen és vízszintesen poláros (napsütésben a Naphoz képesti látóiránytól függetlenül). Ez az oka annak, hogy a folyadékcsapda minden körülmény között vonzó a polarotaktikus bögölyök számára.

A folyadékcsapda nagy előnye, hogy a hím és nőstény bögölyöket egyaránt és minden meteorológiai körülmény között vonzza az általa visszavert erősen és vízszintesen poláros fénnel. A bögölyök megfogását a víz felszínén úszó vékony olajréteg biztosítja, ami nedvesíti a bögölyök kitintestét, így megakadályozza, hogy a rovarok elrugaszkodjanak róla. A csapda esőállóságaért a tálca oldalán lévő víztúlfolyó felel. Esőben a tálcába hulló víz



lesüllyed az olaj alá, és a fölösleges víz kifolyik a túlfolyón. Így az olajat nem éri veszteség, ráadásul a víz párolgását is megakadályozza.



**47. ábra:** Hagyományos sátorcsapda és folyadékcsapda együttese Szokolyán.

A hagyományos sátorcsapda egy kúp vagy piramis alakú sátorból és annak csúcsában egy rovargyűjtő edényből áll. A sátor alatt egy optikailag vonzó csalitárgy (fényes fekete gömb) függ (47. ábra). A bögölyvonzó-képességet például szén-dioxiddal, ammóniával, fenollal vagy acetonnal növelhetik. E sátras csapdák kizárólag a vérszívásra alkalmas gazdaállatot kereső nőtény bögölyöket fogják meg, mivel a fényes fekete csaligömb a gazdaállatot imitálja. Kombinációs kísérleteinkben azt tanulmányoztuk, hogy a folyadékcsapda mennyire növeli meg a klasszikus sátorcsapda hatékonyságát.

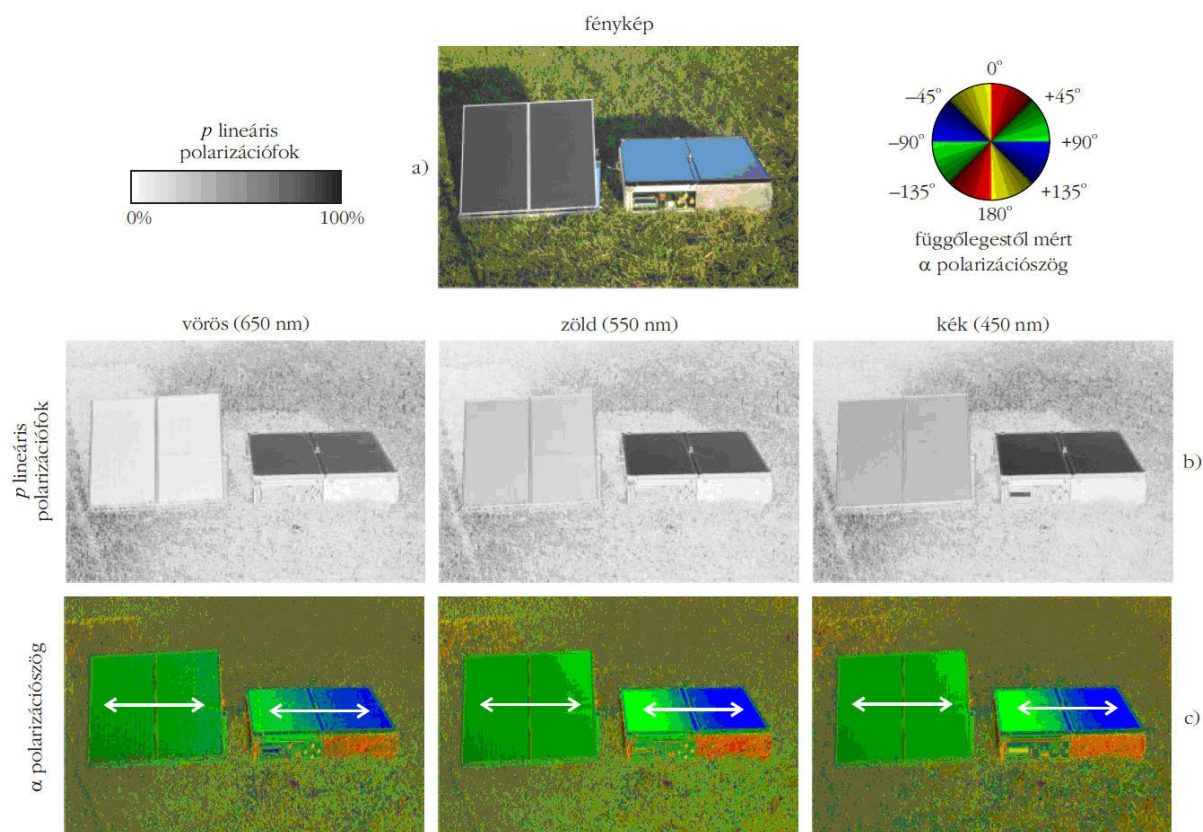
A földre helyezendő folyadéktálccával kiegészített sátorcsapda (kombinált csapda, 47. ábra) 2-8-szor több bögölyt fogott, mint az egyedüli sátorcsapda. A kombinált csapda megnövekedett hatékonyságának oka az, hogy egyszerre vonzza a gazdaállatot kereső nőtény és a vízkereső hím és nőtény bögölyöket. A bögölyök kétféle polarotaxissal rendelkeznek:

- (1) A hím és nőtény bögölyök a vízszintesen poláros fény alapján keresik a vizeket. Ekkor a polarizációs információk közül a fény rezgésirányja a meghatározó (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a).
- (2) A nőtény bögölyök a vérszívásra alkalmas gazdaállatot részben a kültakarójukról visszaverődő fény polarizációja alapján találják meg. Egy gazdaállat annál vonzóbb egy nőtény bögöly számára, minél nagyobb a róla visszaverődő fény polarizációfoka. A gazdaállatról visszaverődő fény polarizáció-iránya helyről helyre változik (függőleges, vízszintes és ferde is lehet). Ezért, amikor egy nőtény bögöly gazdaállatot keres, a polarizációirány lényegtelen számára, és csak a polarizációfok vezérli a polarotaxisát (EGRI et al. 2012a).

A hagyományos sátorcsapdában lógó fekete csaligömb kizárólag a nőtény bögölyöket vonzza, mivel a gömb gazdaállatot utánoz. Vizsgálataink szerint a fekete gömbnek sima, fényes felületűnek kell lennie a hatékonyság érdekében. Ekkor a gömb erősen poláros fényt ver vissza csakis, mint a bögölyök sötétszörű gazdaállatai. Ha a sátorcsapda csaligömbjét matt fekete gömbbel helyettesítjük, akkor a csapda hatékonysága drasztikusan lecsökken (EGRI et al. 2012a). A kombinált csapdabeli folyadéktálca kiváltható bögölypapírral is (ragacsos, fekete, vízszintes lappal, ami ugyancsak erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza).

Műszaki kialakítását tekintve merőben új típusú bögölycsapdát testesít meg a fénypolarizációra és fotoelektromosságra épülő napelemes bögölycsapda (BLAHÓ et al. 2012b). E csapdában a vizuális csalitárgy egy vízszintes napelemtábla, ami a felületéről visszavert erősen és vízszintesen poláros fénnel vonzza magához a polarotaktikus

böglyöket. A napelemtáblára rászállni próbáló böglyöket egy gyorsan forgó drót kaszálja el, amit a napelemtábla által termelt villamos energiával forgatott elektromotor hajt (48. ábra).



**48. ábra:** A kiegészítő napelemtáblával ellátott napelemes böglyocsapda fényképe (a), valamint a róla visszaverődő fény  $p$  lineáris polarizációfokának (b) és  $\alpha$  polarizációs szögének (c) a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért mintázatai. A kettősfejű nyilak a vízszintes csalfelszínről visszavert fény vízszintes polarizációirányát jelzik. A polariméter optikai tengelye  $-34^\circ$ -ot zárt be a vízszintessel (Brewster-szög). A csapda árnyékban lévő vízszintes, sima, fekete, kör alakú felszínét a tiszta égbolt fénye világította meg.

Terepkísérleteink során kimutattuk, hogy a hím és nőstény böglyök vonzódnak az erősen és vízszintesen poláros fényt tükröző napelemfelszínhez, ahol elpusztulnak a napelemmel táplált elektromotor által megfelelően nagy szögsebességgel forgatott drót mechanikai ütése által. E terepi tapasztalat az alapja az új böglyocsapdánk koncepciójának, amiben a napelem kettős szereppel bír: (i) a felszínéről tükröződő vízszintesen poláros fény vonzza a vizet kereső polarotaktikus böglyöket, és (ii) elektromos áramot termel a böglyöket elpusztító drót forgatásához. Az új csapda napsütésben 92%-os hatékonysággal képes elpusztítani a böglyöket, ha a Nap elevációs szöge nem kisebb, mint közel  $30^\circ$ . Egy ferde kiegészítő napelemmel e hatékonyság 94%-ra nőhet és a csapdázási időszak is meghosszabbodhat néhány órával, amennyiben a Nap elevációs szöge nem kisebb  $10^\circ$ -nál.

#### 4. ÖSSZEGZÉS ÉS KITEKINTÉS

Munkám legfontosabb eredményének azt tartom, hogy a földi élet egyik alapvető fizikai tényezőjének, a fénynek egy évszázadok óta ismert tulajdonságának, a polarizációnak, bizonyos hatásait ismerhettem fel. Vizsgálataimat a vízirovarok körében végeztem, amelyek a vízi táplálékhálózat és anyagforgalom vonatkozásában is jelentősek.

Horváth Gábor fizikus kollégámmal és Andrikovics Sándor egyetemi doktori témavezetőmmel 1995-ben kezdtünk el egy közös biológia-fizika határterületi kutatást, melynek eredményeként **a világon elsőként sikerült választásos terepkísérletekkel és képalkotó polarimetriai mérésekkel igazolnunk egy mesterséges tárgyról**, nevezetesen egy patak mellett futó aszfaltútról, **hogy a felszínéről visszatükröződő vízszintesen poláros fény révén pozitív polarotaxist vált ki** egyes kérészfajokból (KRISKA et al. 1998). Habár SCHWIND kutatásai (1983a, b, 1984a, b, 1985a, b, 1989, 1991, 1995) nyomán az 1980-as évek közepétől ismert volt már egyes vízirovar fajok polarotaktikus vízdetekciója, miszerint a repülő vízirovarok a víztesteket az ezek felszínéről visszatükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel, egy mesterséges objektum által kiváltott pozitív polarotaxis bizonyítása meglepő új eredménynek számított, amelyet a Nature is méltatott (MITCHELL 1998).

A főt említett kutatás egyrészt új adatokat eredményezett a kérészek polarizációérzékelésével és ennek biológiai szerepével kapcsolatban, másrészt egy mesterséges tárgy (aszfaltút) esetében igazolta ennek pozitív polarotaxist kiváltó szerepét.

További, az értekezésben bemutatott eredményeimet is ez a kettősség jellemzi, ami miatt az értekezés is az alábbi két fő tematikai egységre különül el:

1. Polarotaxis kimutatása, jellemzőinek és biológiai szerepének vizsgálata különböző vízirovar taxonoknál.
2. Mesterséges poláros fényforrások és polarizációs mintázatok hatása vízirovarokra

Az első tematikai egységben öt vizsgálat szerepel. Ezek közül az első (3.1.1. fejezet) legfőbb célkitűzése annak megállapítása volt, hogy a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) polarotaktikus rovar-e, vagy sem. Választásos terepkísérletek során **sikerült igazolni, hogy a *P. longicauda* más kérészfajokhoz hasonlóan rendelkezik pozitív polarotaxissal**, amely ingermozgás jelentős szerepet játszik a hím és nőstény imágók rajzási viselkedésében (KRISKA et al. 2007).

A második vizsgálat (3.1.2. fejezet) eredményeként sikerült kimutatni, hogy a három korábban vizsgált melegégyövi árvaszúnyog fajon (LERNER et al. 2008, 2011, MELTSEY et al. 2008) túl további árvaszúnyog fajok 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 árvaszúnyog csapdák kifejlesztését, amelyek a közegészségügyi, vagy turisztikai szempontú árvaszúnyog ritkítások megfelelő eszköze lehet.

A harmadik vizsgálat első része (3.1.3.1. fejezet) **igazolta a bögyölyök ventrális polarizációlátását és pozitív polarotaxisát**, melynek eredményeként e rovarok az alulról jövő, vízszintesen poláros fényhez vonzódnak (HORVÁTH et al. 2008, KRISKA et al. 2008a). A kutatás eredményeként sikerült valószínűsíteni a polarotaxis meghatározó szerepét a bögyölyök táplálkozási és szaporodási viselkedésében. A polarotaxis domináns tulajdonságként való igazolása a nőstény és a hím bögyölyöknél, lehetőséget ad e rovarok optikai alapon működő, nagy hatékonyságú csapdázására (3.2.6. fejezet, BLAHÓ et al. 2012b, EGRI et al. 2013).

A harmadik vizsgálat második részében (3.1.3.2. fejezet) a vérszívó nőstény bögyölyök gazdaválasztásának tanulmányozása során megállapítást nyert, hogy **a fehér szőrű lovak a**



**bögölyök számára kevésbé vonzóak, mint a sötétebb színűek** (HORVÁTH et al. 2010a). Kísérletekkel és képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal sikerült alátámasztani azt, hogy e jelenség a testfelület fénypolarizáló képességével és a bögölyök pozitív polarotaxisával magyarázható. A lovasok, valamint a lovak és más haszonállatok tartói számára is fontos eredményeket számos más nyomtatott és elektronikus médium mellett a Nature (Research Highlights – Ecology: Why horses wear white. 463/7283: 852, doi:10.1038/463852b, <http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7283/>) is méltatta.

További, a bögölyök polarotaktikus gazdadetekciójával kapcsolatos kutatások eredményeként **sikerült leírunk egy újfajta polarotaxist** (EGRI et al. 2012a), **és kapcsolatot találtunk a potenciális gazdaállatok kültakarómintázata és bögölytaszítóképessége között** (BLAHÓ et al. 2012a, 2013, EGRI et al. 2012b).

A negyedik vizsgálat (3.1.4. fejezet) során a spektrum vörös, zöld és kék tartományában elvégzett képalkotó polarimetriai mérésekkel és választásos terepkísérletekkel **sikerült kimérni 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 bögölyök esetében. A vízirovarok  $p^*$  értékeinek ismerete lehetőséget ad arra, hogy az ember alkotta optikai környezetben mérhető és monitorozható legyenek azok a mesterséges felületek, amelyek vízszintesen poláros fényt visszaverve megtéveszthetik a vizet kereső különböző vízirovar fajokat.

Az ötödik vizsgálat eredményei (3.1.5. fejezet) arról tanúskodnak, 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. 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 tükröképénél gyakran függőlegesen poláros fény tükröződik.

Újabb polarotaktikus vízdetekcióval kapcsolatos kutatásaink során a vízi ugróvillás (*Podura aquatica* (Linnaeus 1758)) példáján **elsőként mutattunk ki polarotaxist ugróvillások körében** (EGRI et al. 2016). Mindemellett arra is fényt derítettünk, hogy e faj polarizációérzékelése a kék spektrális tartományban működik, ami jól követi a vízirovaroknál meglévő tendenciát. Arra is rávilágítottunk azonban, hogy a hosszabb hullámhosszú fény is vonzza e faj egyedeit. Ennek jelentősége abban állhat, hogy polarotaxisuk a vízdetekcióban, míg fototaxisuk a vízfelszín part menti, növényekkel benőtt régiójának felismerésében fontos. Így módon a foto- és polarotaxis eltérő spektrális érzékenysége miatt az állatok képesek vizuálisan felismerni a számukra legmegfelelőbb habitatot, a nyugodtfelszínű, tápanyagban gazdag partközeli vízfelszínt (EGRI és KRISKA 2019). Ez utóbbi példa is felhívja arra a figyelmet, hogy a jövőben az egyes taxisok tanulmányozásán túl érdemes lesz megvizsgálni azt is, hogy a különböző fényszabályozta ingermozgások együttes működése miként hat az élőlények viselkedésére.

A második tematikai egységbe sorolt kutatások nyomán vált egyértelművé, hogy **a polarotaktikus vízirovarok tojásrakásra sokszor a vízfelszínnel szemben előnyben részesítenek olyan, élőhelynek teljesen alkalmatlan mesterséges felületeket, melyek erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza**. Az ilyen műtárgyak és mesterséges

felületek közelében gyakorta megfigyelhető szembeszökő mértékű rovarpusztulás fontos szerepet játszott az ökológiai csapda fogalmának (KOKKO és SUTHERLAND 2001, SCHLAEPFER et al. 2002, ROBERTSON és HUTTO 2006) tudományos meghatározásában, ami hozzájárult az értekezés második tematikai egységéhez kapcsolódó elsőként megjelent publikáció (KRISKA et al. 1998) magasabb citációjához (független idéző: 154).

Ökológiai csapdának tekintjük azokat az emberi tevékenység nyomán rövid idő alatt bekövetkező változásokat, melyek során valamely populáció egyedei korábban adaptív viselkedési mintákat követve alkalmatlan vagy a közeljövőben alkalmatlanná váló élőhelyet választanak maguknak vagy utódaiknak. Ennek eredményeként a populáció kihalhat, vagy egyedszáma veszélyesen lecsökkenhet akkor is, ha környezetében változatlanul elegendő kedvező élőhely található, így a jelenség felismerése a modern természetvédelem és konzervációbiológia számára különösen jelentős.

Az ökológiai csapdák speciális formája a vízirovarokat fenyegető poláros fényszennyezés (3.2.6. fejezet), melynek tipikus forrásai a kőolaj- és pakurata- (BERNÁTH et al. 2001a), az aszfaltutak (KRISKA et al. 1998), a mezőgazdaságban használatos fekete műanyag fóliák (BERNÁTH et al. 2008b), az üvegházak és épületek üvegfelületei (KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008, 3.2.3. fejezet), az autók karosszériája (KRISKA et al. 2006a, 3.2.1. fejezet), fekete sírkövek (HORVÁTH et al. 2007, 3.2.4. fejezet), 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. **E jelenségnek a feltárása vezetett el az ökológiai fényszennyezés egy új válfájának, a poláros fényszennyezésnek a felismeréséhez és meghatározásához** (HORVÁTH et al. 2009, 3.2.6. fejezet).

A poláros fényt visszaverő pernyemező vizsgálata (KRISKA et al. 2006b, 3.2.2. fejezet) során viszont azt sikerült bizonyítani, 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. Következésképpen **az általában nem vízszintesen poláros fekete pernyemezők nem vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára**, melyeket csak a közel vízszintesen poláros fény vonz.

**A fénypolarizációs ökológiai csapdák kialakulásában és az általuk kiváltott hatások súlyosságában** (vagyis, hogy milyen mértékben csapdazzák a polarotaktikus rovarokat) **meghatározó szerepe lehet többféle fizikai inger által kiváltott viselkedésem, illetve e külső ingerek által irányított helyváltoztató ingermozgások sorának**, melyek több lépcsőben újabb ingerforrásokhoz, majd végül a csapdához vezetik az egyedeket. Így a poláros fényszennyezés kis forrásai összetett fénypolarizációs ökológiai csapdák részeként váratlanul nagy rovarpusztulást okozhatnak (BODA et al. 2014, SZÁZ et al. 2015). 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 példáját 2012 és 2013 nyarán vizsgáltam a dunavirág (*Ephoron virgo*) éjszakai tömegrajzása idején, az utcai lámpákkal kivilágított tahiótófalui hídnál, melyen aszfaltút vezet keresztül (SZÁZ et al. 2015, 3.2.5.2. fejezet). Megfigyelhető volt, hogy a híd a folyó fölött kompenzációs repülést végző dunavirág nőstények számára optikai gátat képezett. E gát azonban nem csupán megszakította a tojásrakás előtt álló nőstények kompenzációs repülését, ahogy azt a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) rajzásánál a korábbi tapasztalataink mutatták (MÁLNÁS et al. 2011, 3.2.5.1. fejezet), de el is pusztította a nőstényeket

tojáscsomóikkal együtt. A híd lámpáinak fénykörében csapdába esett rovarok végső kimerülésük után nem a folyóba, hanem a hídon futó száraz aszfaltút vízszintesen poláros jelét követve az útra rakták tojásaikat. A hídhöz érkező kérészek a folyó különböző szakaszairól repülnek ki, vannak közöttük olyanok, amelyek már hosszabb, míg mások csak rövidebb szakaszt tettek meg a kompenzációs repülésük során, ezért a foto- és polarotaktikus ökológiai csapdaként működő híd esetenként egymástól nagyobb távolságokra elhelyezkedő élőhelyek dunavirág állományait is ritkíthatja.

A dunavirág összetett fénypolarizációs csapdájának megismerése nyomán ma már egyre nyilvánvalóbb, hogy a vízirovarok tömeges pusztulását okozó fénypolarizációs csapdák hatókörét és ezáltal veszélyességét is jelentősen megnövelhetik a polarotaktikus kompenzációs repülésen túl egyéb viselkedési elemek is. Így például a kivilágított aszfaltutak lámpái éjszaka nagy távolságból pozitív fototaxissal vonzhatják a fénypolarizációs csapdaként működő aszfaltúthoz a vízirovarokat (HORVÁTH et al. 2009, BODA et al. 2014).

A rajzasmarker-detekció és a polarotaktikus tojásrakás kombinációja tömegrajzású vízirovaroknál, például egyes kérész-, tegzes- és árvaszúnyogfajoknál is eredményezheti összetett fénypolarizációs csapda kialakulását. A vizet utánzó poláros ökológiai csapda hatékonyságát óriási mértékben megnövelheti, ha ennek közelében egy rajzási marker (tereptárgy) is található. A dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula*) esetében ilyen marker lehet egy folyóparti sötét épülettömb, amihez a rajzás kezdetén tömegesen vonzódnak a tegzesek, majd a rajzás második szakaszában, amikor már tojásrakó helyet keresnek a nőstények, az épület vízszintesen poláros fényt tükröző felületeire rakják tojásaikat (KRISKA et al. 2008b, MALIK et al. 2008, 3.2.3. fejezet). Itt tehát **a rajzasmarker jelenléte növeli a polarotaktikus vízdetekcióra épülő ökológiai csapda hatékonyságát.**

**A polarotaxissal történő vízdetektálást esetenként természetes tényezők is zavarhatják.** Kimutattuk, 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 e jelenségnek is szerepe volt abban, hogy a vízirovarok nagy számban foszilizálódtak a borostyánban (HORVÁTH et al. 2019).

A vízirovarok polarotaxisának és fénypolarizációs csapdáinak alaposabb megismerését célzó kutatásaim során nagy hangsúlyt fektettem **a megszerzett ismeretek gyakorlati felhasználására** is. Értekezésem részeként bemutattam egyes a poláros fényszennyezés és az összetett foto- és polarotaktikus ökológiai csapda hatását csökkentő/megszüntető eljárásokat, eszközöket (3.2.5.2. és 3.2.6. fejezetek, KRISKA et al. 1998, 2006a, 2008b, HORVÁTH et al. 2009, 2010b, 2010c).

A poláros fényszennyezés jelenségének gyakorlati hasznosítását jelentheti a közegészségügyi, vagy gazdasági szempontból kártékonynak tekinthető polarotaktikus rovarokat, például **a bögölyöket fénypolarizációs módszerrel csapdázó eszközök kifejlesztése** (3.2.6. fejezet). 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.

Az utóbbi félévszázad rohamos technikai fejlődésével felgyorsuló településfejlesztés folyamatosan növeli a poláros fényszennyező objektumok elterjedését, ami egyértelműen indokoltá teszi a poláros ökológiai csapdák kapcsolatos ismereteink bővítését az élővilág sokféleségének fenntartása érdekében.

## 5. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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. IF: 0.522
- [4] Blahó, M.; Egri, Á.; Báhidszki, L.; **Kriska, Gy.**; Hegedüs, R.; Åkesson, 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. IF: 3.730
- [5] 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. IF: 2.381
- [6] Blahó, M.; Egri, Á.; Száz, D.; **Kriska, Gy.**; Åkesson, S.; Horváth, G. (2013) Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO<sub>2</sub>, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. Physiology and Behavior, 119: 168–174. IF: 3.033
- [7] Blahó, M.; Herczeg, T.; **Kriska, Gy.**; Egri, Á.; Száz, D.; Farkas, A.; Tarjányi, N.; Czinke, L.; Barta, A.; Horváth, G. (2014) Unexpected attraction of polarotactic water-leaving insects to matt black car surfaces: mattness of paintwork cannot eliminate the polarized light pollution of black cars. PLoS ONE, 9/7:e103339. IF: 3.234
- [8] 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. IF: 2.098
- [9] Egri, Á.; Blahó, M.; Sándor, A.; **Kriska, Gy.**; Gyurkovszky, 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. IF: 2.144
- [10] Egri, Á.; Blahó, M.; **Kriska, Gy.**; Farkas, R.; Gyurkovszky, 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. IF: 3.236
- [11] 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. IF: 3.404
- [12] Egri, Á.; Pereszlényi, A.; Farkas, A.; Horváth, G.; Penksza, K.; **Kriska, Gy.** (2017a) How can asphalt roads extend the range of in situ polarized light pollution? A complex ecological trap of *Ephemera danica* and a possible remedy. Journal of Insect Behavior, 30: 374–384. IF = 0.970
- [13] Egri, Á.; Száz, D.; Farkas, A.; Pereszlényi, Á.; Horváth, G.; **Kriska, Gy.** (2017b) Method to improve the survival of night-swarmer mayflies near bridges in areas of distracting light pollution. Royal Society Open Science, 4: 171166, 9p. IF = 2.243

- [14] Egri, Á.; Száz, D.; Pereszlényi, Á.; Bernáth, B.; **Kriska, Gy.** (2019) Quantifying the polarised light pollution of an asphalt road: an ecological trap for the stonefly, *Perla abdominalis* (Guérin-Méneville, 1838) (Plecoptera: Perlidae). *Aquatic Insects*, 40/3: 257–269. IF: 0.970
- [15] Farkas, A.; Száz, D.; Egri, Á.; Barta, A.; Mészáros, Á.; Hegedüs, R.; Horvath, 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. IF2015: 2.976\*
- [16] 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*, 52/9: 1700–1709. IF: 2.65\*
- [17] Horváth, G.; **Kriska, Gy.** (2008) Polarization vision in aquatic insects and ecological traps for polarotactic insects. In: *Aquatic Insects: Challenges to Populations*. (Lancaster, J. and Briers, R. A., eds.) CAB International Publishing, Wallingford, Oxon, UK, Chapter 11, 204–229\*
- [18] 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*, 95/11: 1093–1100. IF: 2.126\*
- [19] 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. IF: 6.922\*
- [20] Horváth, G.; Blahó, M.; **Kriska, Gy.**; Hegedüs, 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 B*, 277/1688: 1643–1650. IF: 5.064\*
- [21] 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 IF: 4.894
- [22] Horváth, G.; **Kriska, Gy.**; Malik, P.; Hegedüs, 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
- [23] 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 IF: 2.869\*
- [24] 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>) IF: 2.504
- [25] 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*, DOI: 10.1080/08912963.2019.1663843 (<https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1663843>) IF: 1.489
- [26] **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. *J. Exp. Biol.*, 200: 2273–2286 IF: 2.284
- [27] **Kriska, Gy.**; Malik, P.; Csabai, Z.; Horváth G. (2006) Why do highly polarizing black burnt-up stubble-fields not attract aquatic insects? An exception proving the rule. *Vision Research*, 46/26: 4382–4386. IF: 2.167\*
- [28] **Kriska, Gy.**; Csabai, Z.; Boda, P.; Malik, P.; Horváth, G. (2006) Why do red and dark-coloured cars lure aquatic insects? The attraction of water insects to car paintwork

- explained by reflection-polarization signals. Proceedings of the Royal Society B, 273/1594: 1667–1671. IF: 3.612\*
- [29] **Kriska, Gy.**; Bernáth, B.; Horváth, G. (2007) Positive polarotaxis in a mayfly that never leaves the water surface: polarotactic water detection in *Palingenia longicauda* (Ephemeroptera). Naturwissenschaften, 94/2: 148–154. IF: 1.955\*
- [30] **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\*
- [31] **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. IF: 2.126\*
- [32] **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, 55/12: 1167–1173. IF: 2.235\*
- [33] Malik, P.; Hegedüs, 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. IF: 1.763\*
- [34] Málnás, K.; Polyák, L.; Prill, É.; Hegedüs, 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. IF: 1.688\*
- [35] 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. IF: 0.541
- [36] 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, 20/6: 1203–1027. IF = 1.970
- [37] 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. IF: 0.474
- [38] Száz, D.; Horváth, G.; Barta, A.; Robertson, B. A.; Farkas, A.; Egri, Á.; Tarjányi, 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. IF: 3.234\*
- [39] 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, 20/91: doi:10.1007/s10841-016-9897-3. IF: 1.431

A doktori mű alapjául szolgáló közlemények száma és összesített impakt faktora: 39 db, IF: 72,039

A doktori mű alapjául szolgáló első és utolsó szerzős közlemények száma és összesített impakt faktora: 18 db, IF: 35,73

\*A doktori műben részletesen kifejtett közlemények száma és összesített impakt faktora: 16 db, IF: 41,387



## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt köszönetet mondok Horváth Gábor fizikus kollégámnak, az MTA doktora, egyetemi tanárnak, akivel húsz éve folytatunk válllvetve nemzetközi szinten is elismertté vált kutatásokat a vízirovarok polarizációérzékelésével és a mesterséges poláros tárgyak vízirovarokra gyakorolt hatásával kapcsolatosan. Munkánk során sikerült egyesítenünk a teljesen eltérő fizikusi- és biológusi képzettségünkre épülő tudást a közös kutatási célok elérése érdekében.

Köszönettel tartozom Guti Gábornak (PhD) az önállóvá alakuló MTA Duna-kutató Intézet igazgatójának félállású tudományos főmunkatársi alkalmazásomért, ami lehetőséget adott arra, hogy megvalósíthassam szélesebbkörű, újabb kutatási céljaimat.

Nagyon köszönöm Báldi Andrásnak, az MTA doktora az MTA Ökológiai Kutatóközpont korábbi főigazgatójának és Engloner Attilának (PhD) a Duna-kutató Intézet volt igazgatójának támogatását, amellyel lehetővé tették számomra egy Polarizációs Ökológiai Laboratórium létrehozását a Duna-kutató Intézetben belül, amelyben Egri Ádám (PhD) posztdoktori ösztöndíjas munkatársammal teljesen új, módszertanilag és tudományos szempontból is úttörő jellegű vizsgálatok elvégzését kezdhettük meg. Hálásan köszönöm Szathmáry Eörs akadémikusnak, az Ökológiai Kutatóközpont főigazgatójának és Végvári Zsoltnak, az MTA doktora, a Duna-kutató Intézet igazgatójának a munkánkhoz nyújtott támogatásukat.

Hálás vagyok a következő magyar és külföldi kollégáimnak, társszerzőimnek és diákjaimnak az értekezésben 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, Gyurkovszky Mónika, Hansruedi Wildermuth (*Svájc*), Hegedüs Ramón, Herczeg Tamás, 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, Tarjányi Nikolett, Victor Benno Meyer-Rochow (*Dél-Korea*).

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- Allan, S. A.; Stoffolano, J. G. (1986) The effects of hue and intensity on visual attraction of adult *Tabanus nigrovittatus* (Diptera: Tabanidae). *Journal of Medical Entomology*, 23: 83–91
- Andrikovics, S.; Fink, Th. J.; Cser, B. (1992) Tiszavirág monográfia. Tisza Klub Füzetek, 2: 9–35
- Andrikovics, S.; Turcsányi, I. (2001) Tiszavirág. Tisza Klub Füzetek, 10: 1–69
- Arago, F. (1855) Meteorological Essays. (English translation) – Longman-Brown-Green-Longmans, London.
- Armitage, P. D. (1995) Behaviour and ecology of adults. In: Armitage P.; Cranston P. S.; Pinder L. C. V. (Eds.) *The Chironomidae. The biology and ecology of non-biting midges.* pp. 194–224. Chapter 9. London - Weinheim - New York - Tokyo - Melbourne - Madras: Chapman & Hall.
- Avard, M. M.; Schiebe, F. R.; Everitt, J. H. (2000) Quantification of chlorophyll in reservoirs of the Little Washita River water-shed using airborne video. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66/2: 213–218
- Azzam, R. M. A.; Bashara, N. M. (1989) *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam.
- Barber-James, H. M.; Gattolliat, J-L.; Sartori, M.; Hubbard, M. D. (2008) Global diversity of mayflies (Ephemeroptera, Insecta) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595: 339–350
- Battin, J. (2004) When good animals love bad habitats: Ecological traps and the conservation of animal populations. *Conservation Biology*, 18/6: 1482–1491
- Behr, H. (1990) Untersuchungen zum Flug- und Immigrationsverhalten von Wasserkäfern der Gattung *Hydroporus* Clairv. (Col.: Dytiscidae). *Drosera*, 90: 77–94
- 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. and 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
- Bernáth, B.; Gál, J.; Horváth, G. (2004) Why is it worth flying at dusk for aquatic insects? Polarotactic water detection is easiest at low solar elevations. *Journal of Experimental Biology*, 207: 755–765
- Bernáth, B.; Horváth, G.; Gál, J.; Fekete, G.; Meyer-Rochow, V. B. (2008a) Polarized light and oviposition site selection in the yellow fever mosquito: No evidence for positive polarotaxis in *Aedes aegypti*. *Vis. Res.*, 48: 1449–1455
- Bernáth, B.; Kriska, Gy.; Suhai, B.; Horváth, G. (2008b) Insectivorous birds as insect indicators on plastic sheets attracting polarotactic aquatic insects. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 54/1 (Suppl. 1): 145–155
- Bij de Vaate, A.; Klink, A.; Oosterbroek, F. (1992) The mayfly, *Ephoron virgo* (Olivier), back in the dutch parts of the rivers Rhine and Meuse. *Hydrobiol. Bulletin*, 25: 237–240
- 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

- 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
- Blahó, M.; Egri, Á.; Száz, D.; Kriska, Gy.; Åkesson, S.; Horváth, G. (2013) Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO<sub>2</sub>, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior*, 119: 168–174
- Blahó, M.; Herczeg, T.; Kriska, Gy.; Egri, Á.; Száz, D.; Farkas, A.; Tarjanyi, N.; Czinke, L.; Barta, A.; Horváth, G. (2014) Unexpected attraction of polarotactic water-leaving insects to matt black car surfaces: mattness of paintwork cannot eliminate the polarized light pollution of black cars. *PLoS ONE*, 9/7: e103339
- Boda, P.; Csabai, Z.; Gidó, Zs.; Móra, A.; Dévai, Gy. (2003) Vízibogarak és vízipoloskák vándorlási ritmusának vizsgálata (Coleoptera, Heteroptera) II. A *Helophorus brevipalpis* (BEDEL, 1881) és a *Sigara lateralis* (LEACH, 1817) vándorlásának szezonális dinamikája. *Hidrológiai közlöny* (Journal of Hungarian Hydrological Society), 83: 20–21
- 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
- Bradbeer, P. A.; Savage, A. A. (1980) Some observations on the distribution and life history of *Caenis robusta* Eaton (Ephemeroptera) in Cheshire and North Shropshire, England. *Hydrobiologia*, 68: 87–90
- Brittain, J. E.; Saltveit, S. J. (1989) A review of the effect of river regulation on mayflies (Ephemeroptera). *Regul. Riv. Res. Manag.*, 3: 191–204
- Brodskiy, A. K. (1973) The swarming behavior of mayflies (Ephemeroptera). *Entomological Review*, 52: 33–39
- Butler, M. G. (1984) Life histories of aquatic insects. In: Resh V. H. and Rosenberg D. M. (Eds.) *The ecology of aquatic insects*. pp. 24–55, New York: Praeger
- Catts, E. P. (1970) A canopy trap for collecting Tabanidae. *Mosquito News*, 30: 472–474
- Chainey, J. E. (1993) Horse-flies, deer-flies and clegs (Tabanidae). In: *Medical Insects and Arachnids*. (R. P. Lane & R. W. Crosskey, eds.) pp. 310–332, Chapman and Hall, London
- Clayton, D. H. (1991) The influence of parasites on host sexual selection. *Parasitology Today*, 7: 329–334
- Clutton-Brock, T. (2007) Sexual selection in males and females. *Science*, 318: 1882–1885
- Collett, E. (1994) *Polarized Light. Fundamentals and Applications*. M. Dekker Inc., New York.
- Corbet, P. S. (1999) *Dragonflies. Behaviour and Ecology of Odonata*. Harley Books, Martins, Great Horkesley, Colchester, Essex
- Coulson, K. L. (1988) *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia.
- Cranston, P. S. (1995) Introduction. In: *The Chironomidae. The biology and ecology of non-biting midges* (eds.: Armitage, P.; Cranston, P. S.; Pinder, L. C. V.) p. 1–7, London - Weinheim - New York - Tokyo - Melbourne - Madras: Chapman & Hall
- Csabai, Z.; Gidó, Zs.; Móra, A.; Boda, P.; Dévai, Gy.; Király, A.; Szilágyi, K.; Varju, T. (2003) Vízibogarak és vízipoloskák vándorlási ritmusának vizsgálata (Coleoptera, Heteroptera) I. Az egyedszám és a fajgazdagság változásai. *Hidrológiai közlöny* (Journal of Hungarian Hydrological Society), 83: 29–32
- Csabai, Z.; Gidó, Zs.; Boda, P.; Móra, A. (2004) Vízibogarak és vízipoloskák vándorlási ritmusának vizsgálata (Coleoptera, Heteroptera) III. Az egyes fajok migrációjának

- időbeli alakulása. Hidrológiai közlöny (Journal of Hungarian Hydrological Society), 84: 28–30
- Csabai, Z.; Boda, P. (2005) Vízibogarak és vízipoloskák vándorlási ritmusának vizsgálata IV. - szín, méret, távolság – különböző tulajdonságú fóliák alkalmazhatósága. Hidrológiai közlöny (Journal of Hungarian Hydrological Society), 85: 26–28
- 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
- Deschamps, P. Y.; Bréon, F. M.; Leroy, M.; Podaire, A.; Bricaud, A.; Buriez, J. C.; Séze, G. (1994) The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Transactions of Geosciences and Remote Sensing*, 32: 598–615
- Dudgeon, D.; Arthington, A. H.; Gessner, M. O.; Kawabata, Z. I.; Knowler, D. J.; Leveque, C.; Naiman, R. J.; Prieur-Richard, A-H.; Soto, D.; Stiassny, M. L. J.; Sullivan, C. A. (2006) Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol. Rev.*, 81: 163–182
- Dynesius, M.; Nilsson, C. (1994) Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world. *Science*, 266: 753–762
- Egan, W. G. (1986) Proposed design of an imaging spectropolarimeter/photometer for remote sensing of earth resources. *Opt. Eng.*, 25: 1155–1159
- Egri, Á.; Blahó, M.; Horváth, G.; Barta, A.; Kriska, Gy.; Antoni, Gy. (2011) Sztereóhatás időkéseleltetett forgással, avagy „sírjukban forgó néhai hírességek háromdimenziós exhumálása”. *Fizikai Szemle*, 61: 384–386
- Egri, Á.; Blahó, M.; Sándor, A.; Kriska, Gy.; Gyurkovszky, 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
- Egri, Á.; Blahó, M.; Kriska, Gy.; Farkas, R.; Gyurkovszky, 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
- 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
- Egri, Á.; Farkas, A.; Kriska, Gy.; Horváth, G. (2016) Polarization sensitivity in Collembola: an experimental study of polarotaxis in the water-surface-inhabiting springtail. *Journal of Experimental Biology*, 219: 2567–2576
- Egri, Á.; Pereszlényi, Á.; Farkas, A.; Horváth, G.; Penksza, K.; Kriska, Gy. (2017a) How can asphalt roads extend the range of in situ polarized light pollution? A complex ecological trap of *Ephemera danica* and a possible remedy. *Journal of Insect Behavior*, 30: 374–384
- Egri, Á.; Száz, D.; Farkas, A.; Pereszlényi, Á.; Horváth, G.; Kriska, Gy. (2017b) Method to improve the survival of night-swarmer mayflies near bridges in areas of distracting light pollution. *Royal Society Open Science*, 4: 171166, 9p
- 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
- Egri, Á.; Kriska, Gy. (2019) How does the water springtail optically locate proper habitats? Spectral sensitivity of photo- and polarotaxis in *Podura aquatica*. *Journal of Experimental Biology*
- Egri, Á.; Száz, D.; Pereszlényi, Á.; Bernáth, B.; Kriska, Gy. (2019) Quantifying the polarised light pollution of an asphalt road: an ecological trap for the stonefly, *Perla*

- abdominalis* (Guérin-Méneville, 1838) (Plecoptera: Perlidae). *Aquatic Insects*, 40/3: 257–269
- Eisenbeis, G. (2006) Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (eds.: Rich, C.; Longcore, T.) Chapter 12, pp. 281–304, Island Press, Washington – Covelo – London
- Engman, E. T.; Gurney, R. J. (1991) *Remote Sensing in Hydrology*. Remote Sensing Applications Series. xiv + 225 pp. London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman and Hall
- Farkas, A.; Száz, D.; Egri, Á.; Barta, A.; Mészáros, Á.; Hegedüs, R.; Horvath, 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
- Fernando, C. H. (1958) The colonization of small freshwater habitats by aquatic insects. General discussion, methods and colonization in the aquatic Coleoptera. *Ceylon J. Sci.*, 1: 116–154
- Fink, Th. J.; Andrikovics, S. (1997) The presumed role of wing sensory structures in the unique mating behaviour of the endangered European mayflies *Palingenia longicauda* (Olivier) and *Palingenia fuliginosa* (Georgi) (Insecta, Ephemeroptera). 326–331. – In: Landolt, P. and Sartori, M. (eds). *Ephemeroptera and Plecoptera: Biology–Ecology–Systematics MTL*, Fribourg, 569 pp.
- Foil, L. D. (1989) Tabanids as vectors of disease agents. *Parasitology Today*, 5: 88–96
- Forel, F.-A. (1892) *Le Léman: Monographie Limnologique. Tome I. Géographie, Hydrographie, Géologie, Climatologie, Hydrologie*, Lausanne, F. Rouge, 543 pp. (Reprinted Genève, Slatkine Reprints, 1969.)
- Forel, F.-A. (1895) *Le Léman: Monographie Limnologique. Tome II. Mécanique, Hydraulique, Thermique, Optique, Acoustique, Chemie*, Lausanne, F. Rouge, 651 pp. (Reprinted Genève, Slatkine Reprints, 1969.)
- Forel, F.-A. (1904) *Le Léman: Monographie Limnologique. Tome III. Biologie, Historie, Navigation, Peche*, Lausanne, F. Rouge, 715 pp. (Reprinted Genève, Slatkine Reprints, 1969.)
- Fraser, F. C. (1936) *The Fauna of British India. Odonata*, vol 3. Taylor and Francis, London
- Frisch K. von (1965) *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Gál, J.; Horváth, G.; Meyer-Rochow, V. B. (2001a) Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset, *Remote Sensing of Environment*, 76: 103–111
- Gál, J.; Horváth, G.; Meyer-Rochow, V. B.; Wehner, R. (2001b) Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle, *Proc. Roy. Soc. London A*, 457: 1385–1399
- Gressitt, J. C. L. and Gressitt, M. K. (1962) An improved Malaise trap. *Pacific Insects*, 4: 87–90
- Guenther, D. (1990) *Modern Optics*. John Wiley & Sons, Inc., Duke University.
- Günther, A. (2003) Eiablage von *Sympetrum vulgatum* auf ein parkendes Auto (Odonata: Libellulidae). *Libellula*, 22: 19–23
- Hall, M. J. R.; Farkas, R.; Chainey, J.E. (1998) Use of odour-baited sticky boards to trap tabanid flies and investigate repellents. *Medical and Veterinary Entomology*, 12: 241–245
- Halpern, M.; Raats, D.; Lavion, R.; Mittler, S. (2006) Dependent population dynamics between chironomids (nonbiting midges) and *Vibrio cholerae*. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 55: 98–104

- Hamilton, W. D.; Zuk, M. (1982) Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites? *Science*, 218: 384–387
- Hayakawa, H. (1980) Biological studies on *Tabanus iyoensis* group of Japan, with special reference to their blood-sucking habits (Diptera, Tabanidae). *Bulletin of the Tohoku Natural and Agricultural Experimental Station*, 62: 131–321
- Hollander, A. L. & Wright, R. E. (1980) Impact of Tabanids on cattle: Blood meal size and preferred feeding sites. *Journal of Economical Entomology*, 73: 431–433
- Homberg, U. (2004) In search of the sky compass in the insect brain. *Naturwissenschaften*, 91: 199–208
- Horváth, G. (1995) Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. *J. Theor. Biol.*, 175: 27–37
- Horváth, G.; Varjú D. (1995) Underwater refraction-polarization patterns of skylight perceived by aquatic animals through Snell's window of the flat water surface. *Vision Research*, 35: 1651–1666
- Horváth, G.; Zeil, J. (1996) Kuwait oil lakes as insect traps. *Nature*, 379: 303–304
- Horváth, G.; Gál, J.; Wehner, R. (1997) Why are water-seeking insects not attracted by mirages? The polarization pattern of mirages. *Naturwissenschaften*, 84: 300–303
- Horváth, G.; Pomozi, I. (1997) How celestial polarization changes due to reflection from the deflector panels used in deflector loft and mirror experiments studying avian navigation. *J. Theor. Biol.*, 184: 291–300
- Horváth, G.; Varjú, 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. *J. Exp. Biol.*, 200: 1155–1163
- Horváth, G.; Bernáth, B.; Molnár, G. (1998a) Dragonflies find crude oil visually more attractive than water: multiple-choice experiments on dragonfly polarotaxis. *Naturwissenschaften*, 85: 292–297
- Horváth, G.; Gál, J.; Pomozi, I.; Wehner, R. (1998b) Polarization portrait of the Arago point: Video-polarimetric imaging of the neutral points of skylight polarization. *Naturwissenschaften*, 85: 333–339
- Horváth, G.; Varjú, D. (2004) *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer-Verlag, Heidelberg – Berlin – New York
- 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
- Horváth, G.; Kriska, G. (2008) Polarization vision in aquatic insects and ecological traps for polarotactic insects. In: J. Lancaster and R. A. Briers (eds.) *Aquatic Insects: Challenges to Populations*. Wallingford, UK: CAB International Publishing, 204–229
- 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
- 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
- Horváth, G.; Blahó, M.; Kriska, Gy.; Hegedüs, 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
- 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



- Horváth, G.; Kriska, Gy.; Malik, P.; Hegedüs, R.; Neumann, L.; Akesson, 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
- Horváth, G. (2012) Chapter 9: Polarized Light Pollution. pp. 82–108. In: (2012) *Environmental Physics Methods Laboratory Practices* (authors: Csanád, M.; Horváth, Á.; Horváth, G.; Veres, G.) Electronic text-book (editor: Horváth, Á.), p. 206, ISBN 978-963-279-551-5, Typotex Kiadó, Budapest
- Horváth, G. (ed) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd edition, p. 649) Springer Series in Vision Research, volume 2 (series editors: Shaun P. Collin, Justin N. Marshall) Springer-Verlag: Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York
- Horváth, G.; Kriska Gy.; Robertson, B. (2014) Chapter 20. Anthropogenic Polarization and Polarized Light Pollution Inducing Polarized Light Traps. In: Horváth G. (ed.) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd edition) Springer Series in Vision Research, Volume 2. Springer: Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York. 443–513
- Horváth, G.; Egri, Á.; Herczeg, T.; Antoni Gy.; Majer J.; Kriska, Gy. (2014) Polarizációs bögyölycsapdák. II. rész: Folyadékcsapda. *Természet Világa* 145: 169–171
- 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*, DOI: 10.1080/08912963.2019.1663843 (<https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1663843>)
- Hribar, L. J.; LePrince, D. J. and Foil, L. D. (1992) Ammonia as an attractant for adult *Hybomitra lasiophthalma* (Diptera: Tabanidae). *Journal of Medical Entomology*, 29: 346–348
- Ibanez, C.; Escosa, R.; Munoz, I.; Prat, N. (1991) Life cycle and production of *Ephoron virgo* (Ephemeroptera: Polymitarcyidae) in the lower river Ebro (NE Spain). In: *Aba-Tercer J. and Sanchez-Ortega A. (Eds.) Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera*. pp. 483–492, Sandhill Crane Press, USA
- Jékely, G. (2009) Evolution of phototaxis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364: 2795–2808
- Kazanci, N. (2013) The swarm of *Ephoron virgo* (Olivier, 1791) (Ephemeroptera: Polymitarcyidae) as nuptial behaviour in Sakarya River (Turkey). *Review of Hydrobiology*, 6: 69–80
- Kennedy, C. H. (1917) Notes on the life history and ecology of the dragonflies (Odonata) of central California and Nevada. *Proc. US Nat. Mus.*, 52: 483–635
- Kniepert, F. W. von (1979) Eine leistungsfähige Methode zum Fang Männlicher Bremsen (Diptera, Tabanidae). *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 88: 88–90
- Kokko, H.; Sutherland, W. J. (2001) Ecological traps in changing environments: ecological and evolutionary consequences of a behaviourally mediated Allee effect. *Evol. Ecol. Res.*, 3: 537–51
- Kovács, T.; Ambrus, A.; Bánkuti, K. (1999) Data to the Hungarian mayfly (Ephemeroptera) fauna arising from collectings of larvae. *Folia historico-naturalia Musei matraensis*, 23: 157–170

- Kovács, T.; Péter, J.; István, T. P. (2001) Ephemeroptera, Odonata and Plecoptera larvae from the River Tisza (1997–1999). *Folia historico–naturalia Musei matraensis*, 25: 135–143
- Kovács, T.; Ambrus, A. (2001) Ephemeroptera, Odonata and Plecoptera larvae from the River Rába and Lapincs. *Folia historico–naturalia Musei Matraensis*, 25: 145–162
- Kovács, T.; Ambrus, A.; Bánkuti, K.; Juhász, P. (2003) Data to the Hungarian mayfly (Ephemeroptera) fauna arising from collectings of larvae II. *Folia historico–naturalia Musei matraensis*, 27: 59–72
- Kovács, T.; Bauernfeind, E. (2003) Checklist of the Hungarian mayfly fauna (Ephemeroptera). *Folia entomologica hungarica*, 64: 69–84
- Kovács, T. (2006) Data to the Hungarian mayfly (Ephemeroptera) fauna arising from collectings of larvae IV. *Folia Historico-naturalia Musei Matraensis*, 30: 143–158
- Können, G. P. (1985) *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge
- Krinsky, W. L. (1976) Animal disease agents transmitted by horse flies and deer flies (Diptera: Tabanidae). *Journal of Medical Entomology*, 13: 225–275
- 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. *J. Exp. Biol.*, 200: 2273–2286
- 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
- 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
- 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
- Kriska, Gy. (2008a) Térhatású szemléltetés – térlátás és érzéksalódások. *A biológia tanítása – módszertani folyóirat*, 16/1: 17–21
- Kriska, Gy. (2008b) Térhatású szemléltetés – 2D – 3D átalakítás. *A biológia tanítása – módszertani folyóirat*, 16/2: 12–15
- Kriska, Gy. (2008c) Térhatású fényképezés és szemléltetés. Flaccus Kiadó + CD-ROM
- 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-swarving polarotactic caddis flies. *Naturwissenschaften*, 95/5: 461–467
- 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
- Kureck, A. (1992) Das Massenschwärmen der Eintagsfliegen am Rhein: Zur Rückkehr von *Ephoron virgo* (Olivier 1791). *Natur und Landschaft*, 67: 407–409
- Kureck, A.; Fontes, R. J. (1996) The life cycle and emergence of *Ephoron virgo*, a large potamal mayfly that has returned to the river Rhine. *Archiv für Hydrobiologie (Supplement)*, 113: 319–323
- Labhart T (1980) Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee's compound eye: polarizational and angular sensitivity. *Journal of Comparative Physiology* 141: 19–30
- Labhart, T. (1996) How polarization-sensitive interneurons of crickets perform at low degrees of polarization. *Journal of Experimental Biology*, 199: 1467–1475

- Ladócsy, K. (1930) A Tiszavirág *Palingenia longicauda*, Oliv.) 1929-évi nászrepülése Szegeden. Halászat, 31/7-8: 28–30
- Langford, T. E.; Bray, E. S. (1969) The distribution of Plecoptera and Ephemeroptera in a Lowland Region of Britain (Lincolnshire). *Hydrobiologia*, 34/2: 243–271
- Lee, J. J. (2012) Mystery of zebra's stripes finally solved? *Science*: <http://news.sciencemag.org/2012/02/mystery-zebras-stripes-finally-solved>
- Lehane, M. J. (2005) *The Biology of Blood-Sucking in Insects*. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Lengyel, S. (1998) An overview of the literature on the biological effects of dams. *Természetvédelmi Közlemények*, 7: 19–32
- Lerner, A.; Meltser, N.; Sapir, N.; Erlick, C.; Shashar, N. and Broza, M. (2008) Reflected polarization guides chironomid females to oviposition sites. *Journal of Experimental Biology*, 211: 3536–3543
- Lerner, A.; Sapir, N.; Erlick, C.; Meltser, N.; Broza, M.; Shashar, N. (2011) Habitat availability mediates chironomid density-dependent oviposition. *Oecologia*, 165: 905–14
- Levorsen, A. I. (1967) *Geology of petroleum*. (2nd ed. F. A. F. Berry) - Freeman, San Francisco.
- Ligon, F. K.; Dietrich, W. E.; Trush, W. J. (1995) Downstream ecological effects of dams. *Bioscience*, 45: 183–192
- Lindeberg, B. (1971) Parthenogenetic strains and unbalanced sex ratios in Tanytarsini (Diptera, Chironomidae). *Ann. Zool. Fenn.*, 8: 310–317
- Longcore, T.; Rich, C. (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 191–198
- Luger, S. W. (1990) Lyme disease transmitted by a biting fly. *New England Journal of Medicine*, 322: 1752
- Majer J. (1984) Szarvasmarha telepek és legelők bögöly (Tabanidae) faunájának összehasonlító vizsgálata. *Állattani Közlemények*, LXXI: 137–143
- Majer, J. (1988) Study of the host preference of some tabanid species in a zoological garden. *Zoological Bulletin*, 74: 89–95
- Malaise, R. (1937) A new insect-trap. *Entomologisk Tidskrift Stockholm*, 58: 148–160
- Malik, P.; Hegedüs, 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
- Málnás, K.; Polyák, L.; Prill, É.; Hegedüs, 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
- Margalef, R. (1983) *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona 1010 pp.
- Marler, C. A.; Moore, M. C. (1988) Evolutionary costs of aggression revealed by testosterone manipulations in free-living male lizards. *Behavioural Ecology and Sociobiology*, 23: 21–26
- Meltser, N.; Kashi, Y.; Broza, M. (2008) Does polarized light guide chironomids to navigate toward water surfaces? *Bol Mus Munic Funchal (História Natural)*, 13: 141–9 (Suppl)
- Menzel, R.; Snyder, A. (1974) Polarised light detection in the bee *Apis mellifera*. *Journal of Comparative Physiology* 88: 247–270
- Menzel, R. (1979) Spectral sensitivity and colour vision in invertebrates. In: *Comparative Physiology and Evolution of Vision in Invertebrates* (Autrum, H. ed.) vol. VII/6A, pp. 503–580, Springer-Verlag, Berlin

- Meyer-Rochow, V. B.; Reid, W. A. (1994) Male and female eyes of the Antarctic midge *Belgica antarctica* (Diptera: Chironomidae) — a scanning electron microscopic study. *Appl. Entomol. Zool.*, 29: 439–442
- Mihok, S. (2002) The development of a multipurpose trap (the Nzi) for tsetse and other biting flies. *Bulletin of Entomological Research*, 92: 385–403
- Mitchell, A. (1998) News and Views - Ecology: Polarized flight. *Nature*, 394: 425
- 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
- Molnár, Á.; Hegedüs, R.; Kriska, Gy.; Horváth, G. (2011) Effect of cattail (*Typha* spp.) mowing on water beetle assemblages: changes of environmental factors and the aerial colonization of aquatic habitats. *Journal of Insect Conservation*, 15: 389–99
- Moore, S. L.; Wilson, K. (2002) Parasites as a viability cost of sexual selection in natural populations of mammals. *Science*, 297: 2015–2018
- Moore, T. R.; Slosser, J. E.; Cocke, J. and Newton, W. H. (1996) Effect of trap design and color in evaluating activity of *Tabanus abactor* Philip in Texas rolling plains habitat. *Southwestern Entomologist*, 21: 1–11
- Moore, M. V.; Kohler, S. J.; Cheers, M. S. (2006) Artificial light at night in freshwater habitats and its potential ecological effects. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (eds.: Rich, C.; Longcore, T.) Chapter 15, pp. 365–384, Island Press, Washington – Covelo – London
- Nilsson, A. N. (1997) On flying *Hydroporus* and the attraction of *H. incognitus* to red car roofs. *Latissimus*, 9: 12–6
- North, J. A.; Duggin, M. J. (1997) Stokes vector imaging of the polarized sky-dome. *Appl. Opt.*, 36: 723–730
- Padisák, J. (2005) Általános limnológia. ELTE Eötvös Kiadó
- Palmer, S. C. J.; Odermatt, D.; Hunter, P. D.; Brockmann, C.; Présing, M.; Balzter, H.; Tóth, V. R. (2015): Satellite remote sensing of phytoplankton phenology in Lake Balaton using 10 years of MERIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 158/1: 441–452
- Pereszlenyi, Á.; Horváth, G.; Kriska, Gy. (2017) Atypical feeding of woodpeckers, crows and redstarts on mass-swarmed *Hydropsyche pellucidula* caddisflies attracted to glass panes. *Urban Ecosystems*, 20/6: 1203–1027
- Petts, G. E. (1984) *Impounded rivers: perspectives for ecological management*. Wiley, Chichester
- Pielberg, G. R.; Golovko, A.; Sundström, E.; Curik, I.; Lennartsson, J.; Seltenhammer, M. H.; Druml, T.; Binns, M.; Fitzsimmons, C.; Lindgren, G.; Sandberg, K.; Baumung, R.; Vetterlein, M.; Strömberg, S.; Grabherr, M.; Wade, C.; Lindblad-Toh, K.; Pontén, F.; Heldin, C. H.; Sölkner, J.; Andersson, L. (2008) A cis-acting regulatory mutation causes premature hair graying and susceptibility to melanoma in the horse. *Nature Genetics*, 40: 1004–1009
- 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
- Pomozi, I.; Gál, J.; Horváth, G.; Wehner, R. (2001) Fine structure of the celestial polarization pattern and its temporal change during the total solar eclipse of 11 August 1999, *Remote Sensing of Environment*, 76/2: 181–201
- Polyák, L.; Lengyel, Sz.; Málnás, K.; Prill, É.; Kriska, Gy.; Horváth, G. (2010) Emberi létesítmények hatása a tiszavirág-állomány [*Palingenia longicauda* (Olivier, 1791)] nagyságára és ivararányára. *Acta Biologica Debrecina, Supplementum Oecologica Hungarica*, 21: 177–188
- Popham, E. J. (1964) The migration of aquatic bugs with special reference to the Corixidae (Hemiptera Heteroptera). *Arch. Hydrobiol.*, 60: 450–496

- Prosch, T.; Hennings, D.; Raschke, E. (1983) Video Polarimetry: A new imaging technique in atmospheric science. *Appl. Opt.*, 22: 1360–1363
- Puschnig, R. (1926) Albanische Libellen. *Konowia*, 5: 33, 113, 208, 313
- Rahman, A. H. A. (2005) Observations on the trypanosomosis problem outside the tsetse belts of Sudan. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.*, 24: 965–972
- Reich, P.; Downes, B. J. (2003) Experimental evidence for physical cues involved in oviposition site selection of lotic hydrobiosid caddis flies. *Oecologia*, 136: 465–475
- Rich, C.; Longcore, T. (2006) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington – London
- Ritchie, J. C.; Zimba, P. V.; Everitt, J. H. (2003) Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69/6: 695–704
- Ritchie, J. C.; Schiebe, F. R. (2000) Water Quality, pp. 287–303, 351–352. In: Schultz G. A.; Engman, E. T. (eds.), *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, Springer-Verlag, Berlin, Germany
- Robertson, B. A.; Hutto, R. L. (2006) A framework for understanding ecological traps and an evaluation of existing evidence. *Ecology*, 87: 1075–85
- 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
- Rossel, S.; Wehner, R. (1984) How bees analyse the polarization patterns in the sky. *Journal of Comparative Physiology A*, 154: 607–615
- Sartori, M.; Landolt, P. (1998) Memorandum concernant la candidature de *Palingenia longicauda* (Olivier, 1791) (Insecta Ephemeroptera) a son inscription en annexe de la Convention de Berne. Document T-PVS (98) 15, Council of Europe, Strasbourg
- Sasaki, H. (2001) Comparison of capturing tabanid flies (Diptera: Tabanidae) by five different color traps in the fields. *Applied Entomology and Zoology*, 36: 515–519
- Savolainen, E. (1978) Swarming in Ephemeroptera: the mechanism of swarming and the effects of illumination and weather. *Annales Zoologica Fennici*, 15: 17–52
- Schlaepfer, M. A.; Runge, M. C.; Sherman, P. W. (2002) Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology and Evolution*, 17/10: 478–480
- Shashar, N.; Cronin, T. W.; Johnson, G.; Wolff, L. B. (1995) Portable imaging polarized light analyzer. *Proc. SPIE*, 2426: 28–35
- Schmidt, A. R.; Dilcher, D. L. (2007) Aquatic organisms as amber inclusions and examples from a modern swamp forest. *PNAS*, 104/42: 16581–16585
- Schwind, R. (1983a) Zonation of the optical environment and zonation in the rhabdom structure within the eye of the backswimmer, *Notonecta glauca*. *Cell Tiss. Res*, 232: 53–63
- Schwind, R. (1983b) A polarization-sensitive response of the flying water bug *Notonecta glauca* to UV light. *Journal of Comparative Physiology*, 150: 87–91
- 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
- Schwind, R. (1984b) The plunge reaction of the backswimmer *Notonecta glauca*. *Journal of Comparative Physiology A*, 155: 319–321
- Schwind, R. (1985a) Sehen unter und über Wasser, Sehen vom Wasser: Das Sehsystem eines Wasserinsektes. *Naturwissenschaften*, 72: 343–352
- 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
- Schwind, R. (1989) A variety of insects are attracted to water by reflected polarized light. *Naturwissenschaften*, 76: 377–378

- Schwind, R. (1991) Polarization vision in water insects and insects living on a moist substrate. *Journal of Comparative Physiology A*, 169: 531–540
- Schwind, R.; Horváth, G. (1993) Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky. *Naturwissenschaften*, 80: 82–83
- Schwind, R. (1995) Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. - *J. Comp. Physiol. A*, 177: 439–448
- Soldán, T.; Putz, M. (2000) Karyotypes of some Central European mayflies (Ephemeroptera) and their contribution to phylogeny of the order. *Acta Societas Zoologicae Bohemicae*, 64: 437–445
- Spieth, H. T. (1940) Studies on the biology of the Ephemeroptera II. The nuptial flight. *J. New York Entomol. Soc.*, 48: 379–390
- Steiner, C.; Siegert, B.; Schulz, S.; Suhling, F. (2000) Habitat selection in the larvae of two species of Zygoptera (Odonata): biotic interactions and abiotic limitation. *Hydrobiologia*, 427: 167–176
- Stevani, C. V.; Porto, J. S.; Trindade, D. J.; Bechara, E. J. H. (2000a) Automotive clearcoat damage due to oviposition of dragonflies. *J. Appl. Polym. Sci.*, 75: 1632–1639
- 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. *Polym. Degrad. Stab.*, 68: 61–66
- Stratoulas, D.; Balzter, H.; Zlinszky, A.; Tóth, V. R. (2015): Assessment of ecophysiology of lake shore reed vegetation based on chlorophyll fluorescence, field spectroscopy and hyperspectral airborne imagery. *Remote Sensing of Environment* 157: pp. 72–84
- Strutt, J. W. (Lord Rayleigh) (1871): On the light from the sky, its polarisation and colour. – *Philosophical Magazine*, 41: 107–120, 274–279
- Svihla, A. (1961) An unusual ovipositing activity of *Pantala flavescens* Fabricius. *Tombo*, 4: 18
- Szállassy, N.; Gánóczy, A.; Kriska, Gy. (2009) Three dimensional illustrating – three-dimensional vision and deception of sensibility. *Acta Didactica Napocensia*, 2/1: 29–36
- Száz, D., Horváth, G., Barta, A., Robertson, B. A., Farkas, A., Egri, Á., Tarjányi, 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
- 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
- Tashiro, H. and Schwardt, H. H. (1953) Biological studies of horseflies in New York. *Journal of Economical Entomology*, 46: 813–822
- Tercedor, J. A.; Ortega, A. S. (eds.) (1991) Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera. Gainesville, Florida: The Sandhill Crane Press, Inc.
- Thorsteinson, A. J. (1958) The orientation behavior of horseflies and deerflies (Tabanidae: Diptera). I. The attractance of heat to tabanids. *Entomologia experimentalis et applicata*, 1: 191–196
- Thorsteinson, A. J.; Bracken, G. K. & Hanec, W. (1965) The orientation behaviour of horseflies and deerflies (Tabanidae: Diptera). III. The use of traps in the study of orientation of tabanids in the field. *Entomologia experimentalis et applicata*, 8: 189–192
- Thornton, M. J.; Hibberts, N. A.; Street, T.; Brinklow, B. R.; Loudon, A. S. I.; Randall, V. A. (2001) Androgen receptors are only present in mesenchyme-derived dermal papilla



- cells of red deer (*Cervus elaphus*) neck follicles when raised androgens induce a mane in the breeding season. *Journal of Endocrinology*, 168: 401–408
- Tobias, W. (1996) Sommernächtliches "Schneetreiben" am Main: zum Phänomen des Massenfluges von Eintagsfliegen. *Natur und Museum*, 126/2: 37–54
- Torgersen, C. E.; Faux, R. N.; McIntosh, B. A.; Poage, N. J.; Norton, D. J. (2001) Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* 76/3: 386–398
- 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
- Tresidder, J. (2005) *The Complete Dictionary of Symbols*. Chronicle Books, San Francisco, California, USA
- Turcsányi, I., Szentkirályi, F., Bernáth, B. and Kádár, F. (2009) Flight of mayflies towards horizontally polarised and unpolarised light. *Aquatic Insects*, 31: 301–310
- Umow, N. (1905) Chromatische Depolarisation durch Lichtzerstreuung. *Physikalische Zeitschrift*, 6: 674–676
- Van de Meutter, F.; De Meester, L.; Stoks, R. (2005) Water turbidity affects predator–prey interactions in a fish-damselfly system. *Oecologia*, 144: 327–336
- van Vondel, B. J. (1998) Another case of water beetles landing on a red car roof. *Latissimus*, 10: 29
- Veer, V.; Parashar, B. D. & Prakash, S. (2002) Tabanid and muscoid haematophagous flies, vectors of trypanosomiasis or surra disease in wild animals and livestock in Nandankanan Biological Park, Bhubaneswar (Orissa, India). *Current Science*, 82: 1–4
- Voss, K. J.; Liu, Y. (1997) Polarized radiance distribution measurements of skylight, I. System description and characterization. *Appl. Opt.*, 36: 6083–6094
- Wall, W. J. and Doane, O. W. (1980) Large scale use of box traps to study and control saltmarsh greenhead flies (Diptera: Tabanidae) on Cape Cod, Massachusetts. *Environmental Entomology*, 9: 371–375
- Walraven, R. L. (1981) Polarization imagery. *Opt. Eng.*, 20: 14–18
- Watson, J. A. L. (1992) Oviposition by exophytic dragonflies on vehicles. *Notulae Odonatologicae*, 3: 137
- Wehner, R.; Labhart, T. (2006) Polarization vision. In: Warrant EJ, Nilsson DE (eds) *Invertebrate vision*. Cambridge Univ Press, Cambridge, pp 291–348
- Wehner, R. (1997) The ant's celestial compass system: spectral and polarization channels. In: Lehrer M. (ed.). *Orientation and communication in Arthropods*; Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 145–185
- Wetzel, R. G. (2001) *Limnology – Lake and River Ecosystems*. 1006 pp. Academic Press, San Diego, London, New York
- Whitehouse FC (1941) A guide to the study of dragonflies of Jamaica. *Bull Inst Jamaica Sci Ser no 3*
- Wichard, W.; Gröhn, C.; Seredusz, F. (2009) *Aquatic Insects in Baltic Amber*. Verlag Kessel
- Wiesenhütter, E. (1975) Research into the relative importance of Tabanidae (Diptera) in mechanical disease transmission. *International Journal of Natural History*, 9: 377–384
- 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

- 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
- Wilson, B. H.; Tugwell, N. P. and Burns, E. C. (1966) Attraction of tabanids to traps baited with dry-ice under field conditions in Louisiana. *Journal of Medical Entomology*, 3: 148–149
- Wilson, M. J. (1983) Inhibition of development of both androgen-dependent and androgen-independent pigment cells in scrotal skin dermis of the rat by antiandrogen treatment during fetal growth. *Endocrinology*, 112: 321–325
- Wolff, L. B. (1993) Polarization camera technology. *Proceeding of the DARPA Image Understanding Works.*, 1031–1036
- World Wildlife Fund (2008) *Living Planet Report 2008*. Gland
- Wyniger, R. (1955) Beobachtungen über die Eiablage von *Libellula depressa* L. (Odonata, Libellulidae). *Mitteilungen der Entomologischen Gesellschaft Basel NF*, 5: 62–63
- Zar, J. H. (2010) *Biostatistical Analysis*. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- Zuk, M.; McKean, K. A. (1996) Sex differences in parasite infections: patterns and processes. *International Journal of Parasitology*, 26: 1009–1024
- Zwick, P (1992) Stream habitat fragmentation—a threat to biodiversity. *Biodivers. Conserv.*, 1: 80–97