

**A poláros fényszennyezés két új példája:
a dunavirág (*Ephoron virgo*, Ephemeroptera) és a
közönséges szitakötő (*Sympetrum vulgatum*,
Odonata) polarizációs megtévesztődése**

Tudományos diákköri dolgozat

Készítette: Száz Dénes

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar
Biofizikus MSc.

Témavezetők: Dr. Horváth Gábor, ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Dr. Kriska György, ELTE, Biológiai Szakmódszertani Csoport



Budapest, 2012. november 11.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. A hagyományos ökológiai fényszennyezés	4
1.2. A poláros ökológiai fényszennyezés	4
1.3. A fénypolarizáció érzékelése	6
2. A képképző polarimetria módszere és alkalmazása	7
3. Egy nőstény közönséges szitakötő (<i>Sympetrum vulgatum</i>) vizuális megtélvezéstől	9
3.1. Szitakötők polarotaxisa	9
3.2. A megfigyelés helyszíne, körülményei	10
3.3. A megfigyelés helyének visszaverődési-polarizációs mintázatai	13
3.4. A megfigyelés és a polarizációs mérés alapján levonható következtetések	16
3.5. Természet- és környezetvédelmi szempontok	18
4. Egy kivilágított híd polarizáló aszfalt úttal mint az éjjel rajzó dunavirág (<i>Ephoron virgo</i>) kettős fénycsapdája	19
4.1. Ökológiai fénycsapdák	19
4.2. A dunavirág rajzásának helyszíne és körülményei	20
4.3. A dunavirág tömegrajzásai során megfigyelt jelenségek	22
4.3.1. A folyóvíz felszínéről visszavert vízszintesen poláros fény jelentősége	22
4.3.2. A tömegrajzás időbeli lefolyása	23
4.3.3. A kérészrajok térbeli elhelyezkedése és viselkedése	25
4.3.4. Kézipólár vizsgálatok	28
4.4. A híd aszfalt útjának visszaverődési-polarizációs sajátosságai	29
4.5. A gyűjtött adatok elemzése és következtetések	33
4.5.1. A dunavirág ivararányának meghatározása	33
4.5.2. A tömegrajzás során tapasztalt viselkedési formák magyarázata	35
4.5.3. A helyváltoztató ingermozgások hatása az ökológiai fénycsapdák hatékonyságára	37

4.6. A kivilágított hidak fénycsapdájának hatástalanítására tett természetvédelmi javaslat.....	40
5. Összefoglalás.....	41
6. Köszönetnyilvánítás.....	42
7. A kiegészítő CD-melléklet tartalma	42
8. Felhasznált irodalom	44

1. Bevezetés

1.1. A hagyományos ökológiai fényszennyezés

Éjszakai sétát téve a város utcáin, gyakran megfigyelhetjük, amint utcai lámpák, kivilágított épületek lámpái körül rovarok rajzanak, kör-körös repülést végezve a fényforrás körül. E rovarok annyira a fényforrás hatása alá kerülhetnek, hogy önszántukból képtelenek elhagyni a világító objektumot, amely ezzel befolyásolja és megváltoztatja ezen állatok természetes viselkedését. Ez a jelenség is egy példája a hagyományos értelemben vett ökológiai fényszennyezésnek.

Ökológiai fényszennyezést válthatnak ki a mesterséges vakító fények, a fokozatosan erősödő kivilágítás és a megvilágítás ideiglenes, váratlan ingadozásai. Forrásai lehetnek például az utcai és biztonsági lámpák, járművek, halászhajók, tengeri kőolaj- és földgázplatformok, mélytengeri búvárhajók fényei, a települések fölötti éjjeli égbolt világítása, és a megvilágított építményekről visszaverődő fény.

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.

1.2. A poláros ökológiai fényszennyezés

Sokáig úgy vélték, hogy az ökológiai fényszennyezés egyetlen okozója a fototaxis. Az elmúlt években végzett vizuális-ökológiai és környezet-biofizikai kutatások azonban rámutattak az ökológiai fényszennyezés egy új formájára, a poláros fényszennyezésre (HORVÁTH G.-ZEIL, J. 1996; HORVÁTH G. et al. 1998; KRISKA GY. et al. 1998; HORVÁTH G.-VARJÚ D. 2004; WILDERMUTH H.-HORVÁTH G. 2005; CSABAI Z. et al. 2006; KRISKA GY. et al. 2006; ROBERTSON, B. A., HUTTO, R. L. 2006; HORVÁTH G. et al. 2007; KRISKA GY. et al. 2008; MALIK P. et al. 2008).

Ezen a sima, sötét mesterséges felületekről visszaverődő, erősen és vízszintesen poláros fénynek a polarotaktikus vízirovarokra kifejtett káros hatásait értjük (HORVÁTH G.-KRISKA GY. 2008; HORVÁTH G. et al. 2009). E rovarok e felületeket vizuálisan tévesen vízként érzékelhetik, ami eltérítheti őket a természetes élőhelyektől. Az 1980-as években SCHWIND, R. (1985) mutatta ki, hogy a repülő 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 *Notonecta* vonzódását a vízszintesen poláros fényhez pozitív polarotaxisnak hívjuk.

A későbbiekben sikerült kimutatni, hogy 300-nál is több vízirovar faj rendelkezik pozitív polarotaxissal, azaz a vízről tükröződő fény vízszintes polarizációja 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 vízirovarok számára, ha a róluk visszavert fény lineáris polarizációfoka nagyobb, mint a vízről visszaverté.

A poláros fényszennyezés fizikai, viselkedési és ökológiai alapjai a következők: 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. 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.

Amikor a pozitív polarotaxissal rendelkező rovarok e felületeket közelébe repülnek, azokat vizuálisan tévesen vízként érzékelhetik, ami eltérítheti őket a természetes élőhelyektől. Az így megtévesztett rovarok a velük táplálkozó állatokat (madarakat, denevéreket) is vonzhatják, miáltal a poláros fényszennyezés közvetve az utóbbiakra is hat.

Maga a jelenség nem újkeletű, emberemlékezet óta léteznek olyan építmények, melyek sötét fényes és sima felülettel rendelkeznek, gondoljunk csak az ókori márványépületekre. Pusztán a felismerés új, hogy számos rovarfajra hatással lehetnek e mesterséges építmények.

1.3. A fénypolarizáció érzékelése

Felmerülhet a kérdés, hogy miben különbözik a vízirovarok látásérzékelése az emberétől, illetve az összes emlősétől (ugyanis rajtuk kívül szinten minden állatosztálynak vannak olyan képviselői, melyek érzékelni képesek a poláros fényt).

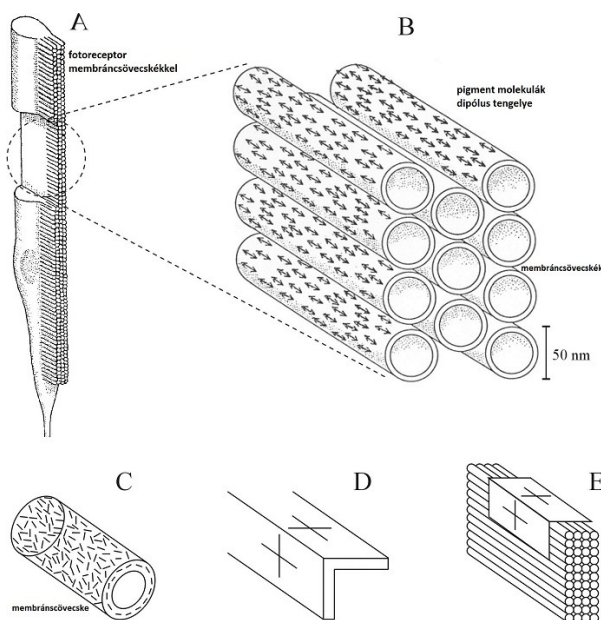
SCHWIND, R. (1991, 1995) kimutatta, hogy az előző fejezetben említett *Notonecta* szemének hasoldali részén ultraibolya-érzékeny fotoreceptorok helyezkednek el, vízszintes és függőleges membráncsővecskékkel, melyek a vízszintesen és függőlegesen poláros fényre érzékenyek leginkább (1. ábra). E membráncsővecskék

elnyúlt henger alakúak, ez teszi lehetővé a kitüntetett irányok érzékelését (emlősöknél korong alakú képletek találhatók a retina pálcika sejtjeiben, melyek szimmetriája megakadályozza a polarizáció irányának észlelését). E merőleges

polarizációérzékenységű

fotoreceptorok képesek meghatározni, hogy az optikai környezetből érkező fény polarizációiránya vízszintes vagy sem. A repülő *Notonectában* a pontosan vagy közel vízszintesen poláros fény vízbeugrási és merülési reakciót vált ki, azaz poláros fényszennyező felületek közelében is olyan viselkedésformát mutat, mintha természetes eredetű vízközeli élőhelyén lenne.

Hasonló felépítés figyelhető meg más polarizáció érzékeny rovarfajok fotoreceptorainál is, ezzel lehetővé téve a felületekről visszaverődő fény



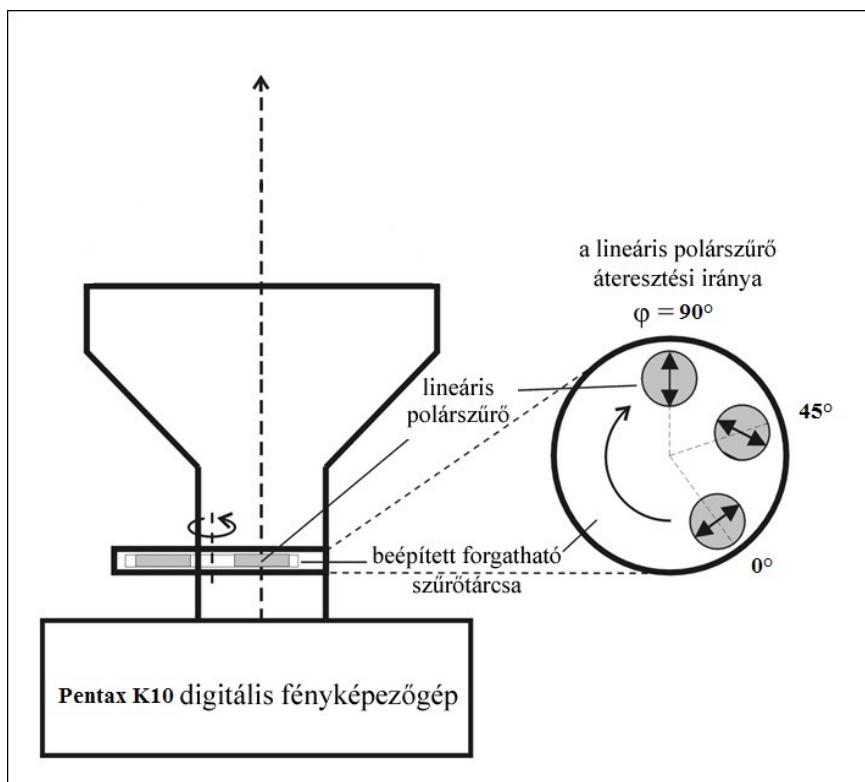
1. ábra: A polarizáció-látást lehetővé tevő szemfelépítés.

A: Egy rovar összetett szemének fotoreceptora. B: A fotoreceptorban található membráncsővecskék. C: Egyetlen membráncsővecske felszínén a lineáris polarizáció irányába álló látópigmentek (bár vannak a tengellyel szöget bezáró pigmentek is, a többség a tengely irányában áll). D, E: Annak szemléltetése, hogy a membráncsővecskék elrendeződésükből következően a vízszintesen és a függőlegesen poláros fényre érzékenyek.

polarizációjának érzékelését. E rovarok a spektrum különböző tartományaiban érzékelhetik a polarizációt, aminek élettani jelentősége, hogy különböző (akár egészen kis) fényintenzitások mellett is képesek vizet találni, amikor a polarizációfok nagyon alacsony.

2. A képalkotó polarimetria módszere és alkalmazása

A poláros fényszennyezés mértékének megállapításához, illetve a különböző felületekről visszavert fény polarizációjának méréséhez egy modern, digitális képalkotó polarimétert használtam. A berendezés egy Pentax K10, 10 megapixel felbontású digitális fényképezőgépből, valamint annak objektíve elé elhelyezett forgatható tárcsára szerelt lineáris polárszűrőből (HOYA, 52 mm, PL-CIR, Japan) épült fel (2. ábra). A polárszűrő három előre meghatározott pozícióban, azaz három áteresztési irányban rögzíthető, ezek rendre $\varphi = 0^\circ$, 45° , 90° .



2. ábra: Egy digitális képalkotó polariméter vázlatos fölépítése. Az ábrán látható a fényképezőgép objektívlencséjére szerelt forgatható szűrőtárcsa, valamint a lineáris polárszűrők áteresztési irányai.

Egy mérés során három felvételt készítettünk egymás után, a lineáris polárszűrő három különböző áteresztési iránya mellett. Az egyes felvételek között el kellett forgatni a lineáris polárszűrőt hordozó tárcsát a soron következő állásba.

A fényképezőgép mérés közben egy háromlábú állványon helyezkedett el, annak érdekében, hogy a három kép készítése közben ne történjen elmozdulás, valamint, hogy az elkészült képek bemozdulásmentesek legyenek a 1-3 másodperces záridő alkalmazása mellett. A polarizációs felvételeket RAW (.NEF) és JPG formátumban is elkészítettük.

Az elkészített polarizációs felvételek számítógépes kiértékelésen mentek keresztül, ami egy speciálisan e célra megírt program segítségével történt. Ha a felvett kép adott pontjáról jövő fény részlegesen lineárisan poláros, akkor a fény I intenzitása szinusz-négyzetesen változik a forgó polárszűrő φ irányától függően. A programmal az adott képponthoz tartozó három fényintenzitás-értékre illesztett függvény paramétereiből kiszámította a vizsgált pontból jövő fény lineáris polarizációjának p fokát ($p = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, ahol $I_{\max}$ és $I_{\min}$ az elforgatott polárszűrőn áthaladó fény intenzitásának maximuma és minimuma a kép adott pontján), és irányát (az $I_{\max}$ fényerősség α iránya). E számításokat a felvett kép minden pontjára elvégezve végül meghatározható, és hamisszínes kódolással megjeleníthető a vizsgált égbolt I fényintenzitásának, p lineáris polarizációfokának, és a vízszintestől mért α polarizációs szögének térbeli eloszlása (GÁL J. et al. 1998/b, HORVÁTH G. et al. 1998/a). A módszert részletesen leírta HORVÁTH G.-VARJÚ D. (1997, 2004).

A felvételek archiválása után az elkészített fényképhármasokra a fent leírtak szerint elvégeztem a kiértékelést, amit a megfelelő fejezeteknél mellékelten közlök.

3. Egy nőstény közönséges szitakötő (*Sympetrum vulgatum*) vizuális megtévesztődése

3.1. Szitakötők polarotaxisa

A szitakötők vízbe rakják a petéiket, így erősen vízhez kötött életmódot folytatnak (CORBET, P. S. 1999). A kifejlett rovarok pozitív polarotaxissal rendelkeznek, azaz vonzódnak a vízszintesen poláros fényhez (WILDERMUTH, H. 1998). Ezt használják például peterakó helyük megtalálására is (HORVÁTH G. et al. 1998; BERNÁTH B. et al. 2002; HORVÁTH G.-VARJÚ D. 2004). Polarotaktikus viselkedésük miatt a szitakötőket megtévesztheti bármilyen mesterséges felület, ami vízszintesen poláros fényt ver vissza, ha elég nagy a lineáris polarizációfoka (KRISKA GY. et al. 2009).

Korábban gyakran megfigyelték (WYNIGER, R. 1955; SVIHLA, A. 1961; WATSON, J. A. L. 1992; WILDERMUTH, H. 1998; STEVANI, C. V. et al. 2000/a,b; BERNÁTH B. et al. 2001; GÜNTHER, A. 2003; TORRALBA, B. A.- OCHARAN, F. J. 2003; WILDERMUTH, H.-HORVÁTH G. 2005), hogy a hím és nőstény szitakötők különféle színű autók fényes karosszériája közelében a vízpartoknál is megfigyelhető viselkedést (pl. felületérintés, vadászat, párzás, peterakás) mutatnak. Számos megfigyelés van arról is, hogy vízibogarak és vízpoloskák vonzódnak a piros autókhoz (JÄCH, M. A. 1997; NILSSON, A. N. 1997; VONDEL, B. J. 1998; KRISKA GY. et al. 1998, 2006/a,b; BERNÁTH B. et al. 2001). További, normálistól eltérő viselkedéséről más kutatók is beszámoltak: a szitakötők vonzódhatnak a fekete olajfelszínekhez (KENNEDY, C. H. 1917, 1938; HORVÁTH G.-ZEIL, J. 1996; HORVÁTH G. et al. 1998; BERNÁTH B. et al. 2001), sötét üvegtáblákhoz (JURZITZA, G.-KORMANN, K. 1960; PAINE, A. 1992), fényes fekete műanyagfóliákhoz (NOORDWIJK, M. V. 1980; BERNÁTH B. et al. 2001; WILDERMUTH, H. 2007) és csiszolt fekete sírkövekhez (HORVÁTH G. et al. 2007) is. E felületek tehát viselkedésükben megzavarják a fenti állatfajok egyedeit.

Ezek és további hasonló megfigyelések háttérében az *1. fejezetben* leírt poláros fényszennyezés jelensége áll, melyet mesterséges felületekről visszaverődő erősen és vízszintesen poláros fény vált ki.

Jelen tudományos diákköri dolgozatomban első példaként egy olyan szitakötő viselkedéséről számolok be, amely egy fatároló piros tetejéhez vonzódott. Sejtésem szerint e megfigyelésnek is köze lehet a poláros fényszennyezéshez, így képalkotó

polarimetria felhasználásával kimértem a tető visszaverődési-polarizációs tulajdonságait a spektrum látható tartományában. Magyarázatot adok a tetőről visszavert fény polarizációjának és színének lehetséges szerepére a megfigyelt szitakötő reakcióinál.

3.2. A megfigyelés helyszíne, körülményei

Egy sárga színű közönséges szitakötőt (*Sympetrum vulgatum*) figyeltünk meg 2012. július 19-én Mogyoródon (47° 36' N, 19° 15' E), 10:00 és 11:15 között (helyi nyári időszámítás szerint = UTC + 2 h), egy forró, nyári délelőttön (3.A ábra). A szitakötő egy fatárolónak használt melléképület mellett elhelyezkedő vasrúdon ült, ahonnan kiindulva időnként járőröző illetve zsákmányszerző repüléseket végzett. Ezen viselkedést két szemtanú is megfigyelte (Farkas Alexandra és Farkas Viktor), a jelenségről fénykép-dokumentáció készült.

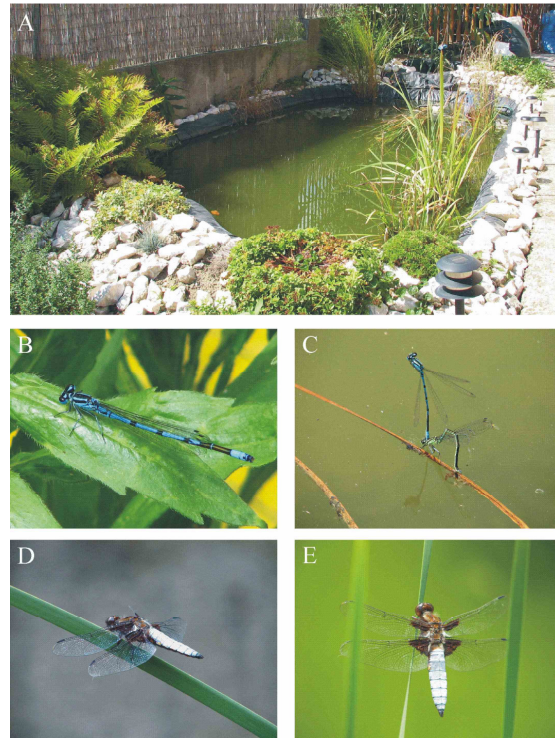
3. ábra: A: A megfigyelés helyét és annak környezetét bemutató légifotó (készítette: Farkas Alexandra). a: A piros tető, ahol a közönséges szitakötőt megfigyeltük. b: A szomszédos kertben lévő mesterséges tó helye. c: Itt folyik a Csíkvölgyi-patak egy kis erdőben.
B: Fénykép a kertről (készítette: Horváth Gábor) a piros tetővel, ahol a közönséges szitakötőt megfigyeltük. d: Függőleges vasrúd, mely közel függőlegesen támaszkodott egy mellette lévő matt, világosszürke tetejű melléképületnek. e: A fatároló piros teteje. f: Kék műanyag hordó.



A fatárolót piros bitumen zsindely borította, alatta fekete bitumen lemez helyezkedett el. A piros tető (3,4 m × 5,1 m) fölött derült volt az ég, így közvetlen napfény érte a megfigyelés során. A szóban forgó vasrúd 2,5 m hosszú volt, és majdnem függőlegesen állt egy másik melléképület matt világosszürke tetejével szemben, amely 1 m-re helyezkedett el a piros tetejű fatárolótól (3.B ábra). Egy diófa hajolt be a szürke tetejű melléképület fölé. A megfigyelés helyéhez közel egy kék színű, henger alakú hordó állt (magasság = 90 cm, átmérő = 50 cm), esővízzel az aljában (a vízoszlop magassága = 20 cm). A hordó vízszintes irányban 5 m-re helyezkedett el a függőleges fémrúdtól a 3.B ábrán látható módon.

2004 óta van egy kisméretű, (2 m × 4,5 m) vízínövényekkel beültetett mesterséges tó a szomszéd kertben, 16 m-re a megfigyelés helyétől (4.A ábra), ahol minden nyáron számos különböző szitakötőfaj egyede fordul elő, amint ágon ülő, röpködő és párzó viselkedést folytatnak (pl. légivadászok (Coenagrionidae) vagy laposhasú acsák (Libellulidae), 4.B-E ábra). Szitakötő nimfák levedlett bőre is megtalálható a tó közelében lévő vízínövényeken, ami

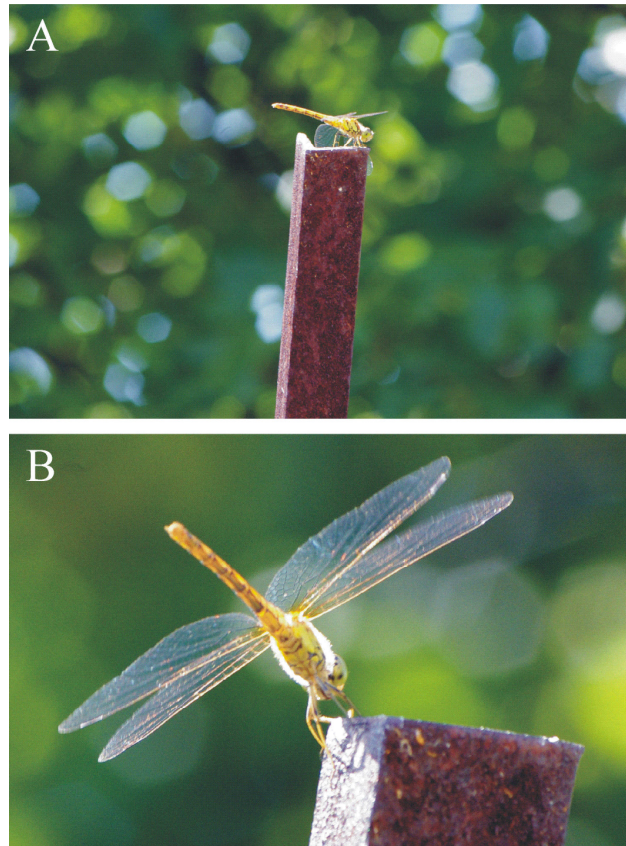
egyértelműen jelzi, hogy az élőhely megfelelő körülményeket biztosít a szitakötő imágók kifejlődéséhez. A megfigyelési helytől kb. 300 m távolságra, egy kis erdőben folyik a Csíkvölgyi-patak (3.A ábra), ami szintén kiváló élőhelyet jelent e rovarok számára.



4. ábra: A: Mesterséges tó a megfigyelés helyének környezetében. B-E: Különböző szitakötőfajok vízínövényeken, a tónál fényképezve. A: Hím légivadász (Coenagrionidae) szitakötő. B: Párzó légivadászok (Coenagrionidae). D, E: Hím Libellulidae szitakötő (készítette: Farkas Szilvia).

A megfigyelések alapján az észlelt rovar (5. ábra) egy kifejlett nőstény *Sympetrum vulgatum* szitakötő volt (Odonata: Libellulidae). A rovar nemére a teste sárga színéből, valamint a hímekre jellemző testvégi fogószerv hiányából lehetett következtetni.

Ahogy az 5. ábrán is látható, a rovar nyilvánvalóan ülőágként használta a piros tetejű fatároló mellett lévő vasrudat. A megfigyelés alatt a szitakötő hosszú ideig a rúdon ült, néha lassan mozgatta szárnyait. A testtartása (i) sütkérező (a testtengely majdnem merőleges a beeső napfényre) és (ii) obeliszk volt (a rovar potroha a Nap felé nézett). A rovar időnként megváltoztatta testtengelyének irányát. Néha 10-70 cm-re a tető fölött járörözött, hurkokban és körökben repülve. Időnként tipikus zsákmányszerző repülést is végzett, azaz a rúdról kiindulva



5. ábra: Fényképek (készítette: Farkas Alexandra) a piros tető fölött megfigyelt, vasrúdon obeliszk pozícióban ülő közönséges szitakötő (*Sympetrum vulgatum*) nőstényéről.

rövid meredek kitöréseket vitt véghez, rárontva a nála kisebb repülő rovarokra, majd visszatért a rúdra. Ezek a vadászatok 1-2 másodpercig tartottak, de néha további 1-2 másodpercig még üldözte a prédát. A rovar mindig a piros tető közelében maradt, és azonnal visszatért az ülőághoz, miután befejezte a közvetlen környékre tett „kirándulásait”. Körülbelül egy óra múlva a szitakötőt megriasztotta egy közeli ajtónyikorgás, emiatt elhagyta a rudat és a piros tető környezetét. Ezután a szitakötőt nem sikerült újra megfigyelni ezen a helyen.

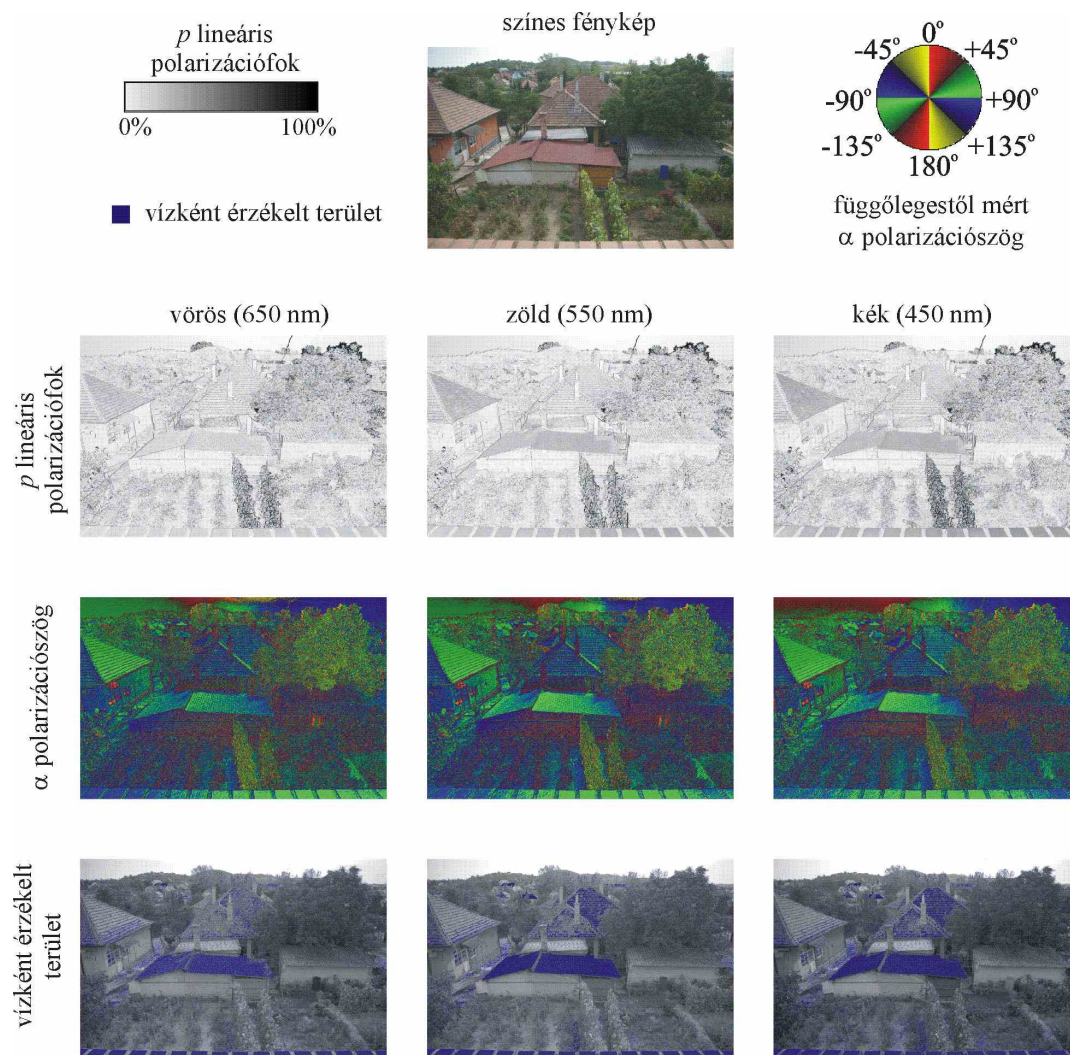
3.3. A megfigyelés helyének visszaverődési-polarizációs mintázatai

Amint a 3.1. fejezetben is írtam, a szitakötő fajokra általánosan jellemző, hogy képesek érzékelni a vízszintesen poláros fényt. Ebből, és azon korábbi eredményekből, tapasztalatokból kiindulva, miszerint a sötét, sima és fényes felületekről visszavert erősen és vízszintesen poláros fény alapján a szitakötők e felületeket tévesen vizuálisan vízként érzékelhetik, felmerült a lehetősége annak, hogy a piros tető ökológiai csapdaként működött, és mint poláros fényszennyező forrás, odavonzhatta a megfigyelt *Sympetrum vulgatum* egyedet.

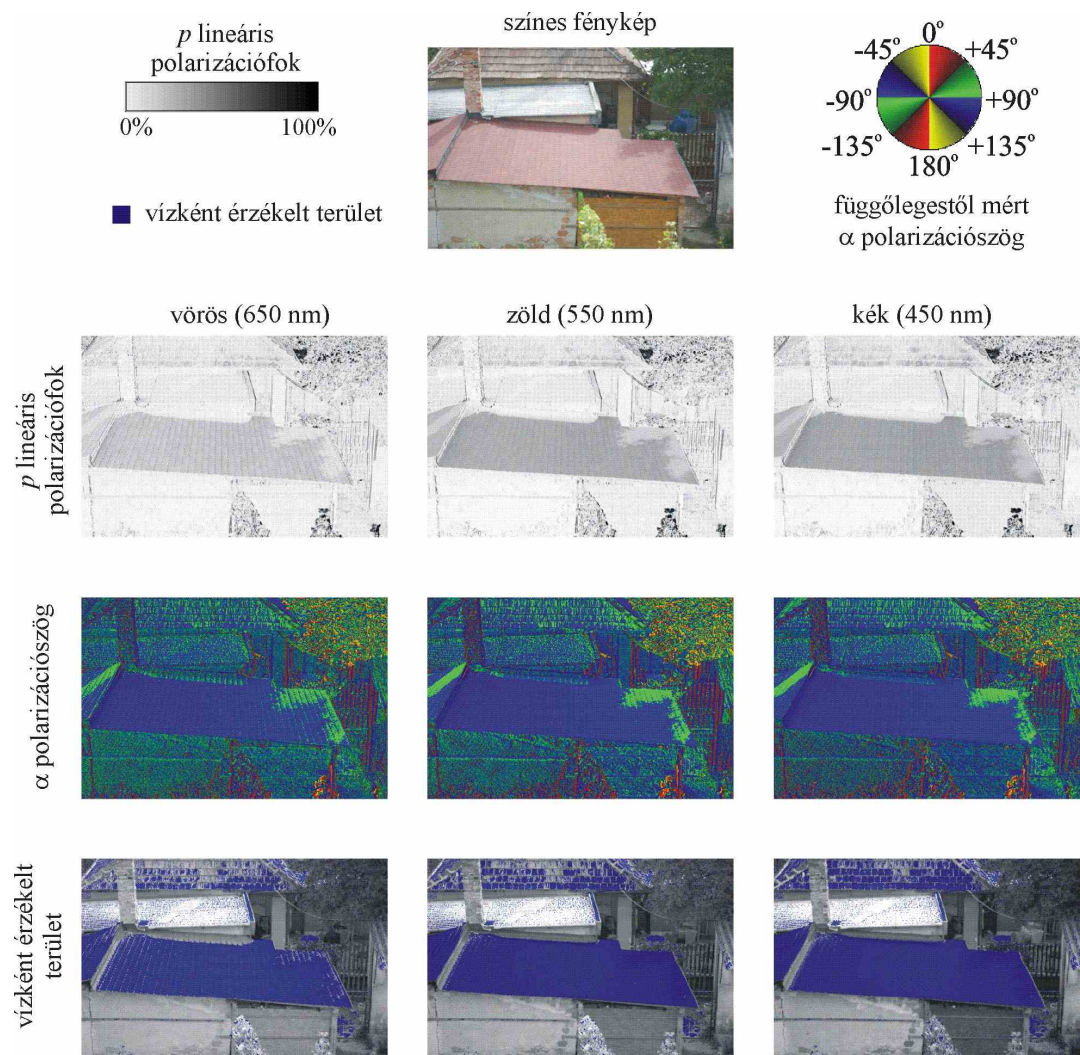
Tekintve, hogy a fatároló egy magántelek kertjében állt, annak visszaverődési-polarizációs tulajdonságait korábban még senki nem mérte ki. Ezért 2012. szeptember 27-én, egy a megfigyelés napjához hasonló derült napon, tiszta égbolt alatt elvégeztem a képalkotó polarimetriás mérést (6. és 7. ábra) a spektrum vörös (650 ± 40 nm = maximális érzékenység hullámhossza $\pm$ a CCD detektorok és a polariméter félsáv szélessége), zöld (550 ± 40 nm) és kék (450 ± 40 nm) tartományában. A felvételeket egy szomszédos ház második emeleti ablakából készítettem. A polariméter optikai tengelyének elevációs szöge -20° volt a vízszintestől mérve.

A megfigyelés helyének környékén a szomszéd ház piros tetőcserepe, a fatároló piros zsindelyteteje, az ablakpárkány piros fényezett téglái - ahonnan a polarimetriás mérések történtek - és az uborkák zöld levelei azok a helyek, ahonnan a visszavert fény polarizációfoka a legnagyobb volt, $p > 75\%$ (sötétszürkével színezve a p-mintázatot a 6. és 7. ábrán). Ezek közül az ablakpárkány fényezett tégláit nem láthatta a *Sympetrum vulgatum* szitakötő. Ettől eltekintve, a fent említett erősen poláros felületek közül csak a fatároló piros tetőzsindelye vert vissza vízszintesen, vagy közel vízszintesen poláros fényt (világoszöld és kék színekkel jelölve az 6. és 7. ábra α -mintázatán).

A piros tetőről visszavert fény polarizációfoka a spektrum piros tartományában volt a legalacsonyabb, és kékben a legmagasabb. A polarotaktikus szitakötők vízként érzékelik a $p > 20\%$ polarizációfokú és $75^\circ < \alpha < 105^\circ$ polarizációs irányú fényt, és így vonzódnak hozzá (KRISKA GY. et al. 2009). E visszaverődési-polarizációs tulajdonság következménye, hogy a piros tető teljes felszínét vízként érzékelik a szitakötők (kék színnel jelölve az 6. és 7. ábra 4. sorában).



6. ábra: A megfigyelés helyéről készült színes fotó és a képkötő polarimetriával mért polarizációs mintázatok. A 2. sorban a p lineáris polarizációfok, a 3. sorban az α polarizációs szög (függőlegestől mérve az óramutató járása szerint) mintázatai láthatók, a 4. sorban pedig a kert és a piros tető vízként érzékelt területei figyelhetők meg (melyeknél a visszavert fény a következő tulajdonságú: $p > 20\%$, $75^\circ < \alpha < 105^\circ$). A *Sympetrum vulgatum* szitakötőt éppen e vízként érzékelt területek fölött figyeltük meg. A színes kép alján látható vízszintes piros négyszögsort az ablakpárkány mázas piros téglái alkotják.



7. ábra: A piros tető közvetlen környezetének polarizációs mintázatai a 6. ábráéval azonos jelölésrendszert használva.

3.4. A megfigyelés és a polarizációs mérés alapján levonható következtetések

A megfigyelt *Sympetrum vulgatum* egyed nem kelhetett ki a tető közelében lévő kék hordóban összegyűlt esővízből, mert abban soha nem figyeltek meg szitakötő lárvákat az ott lakók. A szitakötő vagy a szomszéd kertben lévő mesterséges tóból származott (4.A ábra), vagy a megfigyelés helyétől 300 m-re lévő kis erdőben folyó patakából (3.A ábra). A szitakötő viselkedése és a piros tárolótető visszaverődési-polarizációs mintázata (6. és 7. ábra) megerősíti azt a feltételezést, hogy a megfigyelt jelenség a tetőről visszavert fény polarizációja (és talán a színe) által kiváltott vizuális megtévesztődés tipikus példájának tekinthető. Ezt a magyarázatot a következő tények támasztják alá:

1) Jól dokumentált jelenség, hogy a *Sympetrum* szitakötőket (más szitakötőkhöz és viziroparokhoz hasonlóan) megtévesztheti a különféle mesterséges felületekről visszavert vízszintes poláros fény (WILDERMUTH, H. 1998; HORVÁTH G. et al. 1998, 2007; KRISKA GY. et al. 2009). Ezekben az esetekben a megtévesztett szitakötők mindig ugyanolyan viselkedési elemeket mutatnak, mint vízfelszínnek közelében: ágon ülés, lebegés, járőröző repülés, territórium védelem (légi harc hímek között), felület érintés, letelepedés, zsákmány megtámadása, nőtények hímek általi megtámadása, párzás és peterakás. Ezen reakciók közül az általunk észlelt *Sympetrum vulgatum* a megfigyelés ideje alatt csak az ágon ülést, zsákmányszerzést és járőröző repülést mutatta be.

2) A *Sympetrum* hímek az „ágon ülő” típusba tartoznak (CORBET, P. S. 1999), azaz egy olyan vízközeli kiálló faágon ülve várják a nőtényeket, ahonnan belátják a környéket (8.



8. ábra: Ágon ülő sütkérező hím szitakötő.

ábra). A hím *Sympetrum* szitakötők általában vadásznak is a vízközeli ülőágról, míg a fiatal és kifejlett nőtények ezeket csak sütkérezésre és táplálkozásra használják

(OEHME, H. 1999). Az aktív hőszabályozással nem rendelkező szitakötők rendszerint a napsütötte helyeket részesítik előnyben a test felmelegítése miatt, ami a zsákmány felé gyors kitörést vagy a fajtársakkal gyors érintkezést tesz lehetővé (MOORE, N. W. 1991; CORBET, P. S. 1999; OEHME, H. 1999). A *Sympetrum* fajok legkönnyebben alulról ismerik fel egymást vagy a zsákmányt, amikor a célpont kitűnik az egységes és fényes égbolt mögül (LABHART, T.-NILSSON, D. E. 1995).

3) Feltehető, hogy az erősen és vízszintesen poláros piros tetőt a rövidebb hullámhossztartományban (kék vagy UV) víznek érzékelhette a megfigyelt *Sympetrum vulgatum* szitakötő, miközben ülőágot keresett. A piros tető a zöld és kék (és minden valószínűség szerint az UV) spektrális tartományokban utánozta jól a néhány m²-nél nem nagyobb nyílt vízfelszínnek optikai tulajdonságait. Ezek különösen vonzóak a *Sympetrum* szitakötők számára, melyek előszeretettel tenyésznek kis felszínű állóvizekben. A tetőzsinde sima felülete miatt a tetőről visszavert fény polarizációfoka viszonylag nagy volt a zöld és a kék tartományban, míg a spektrum piros tartományában a tetőről visszavert fény csak gyengén volt polarizált (6. és 7. ábra). Ezért valószínű, hogy a piros tetőről a spektrum zöld vagy kék (esetleg UV) tartományában visszavert erősen és vízszintesen poláros fény vonzhatta oda a megfigyelt *Sympetrum vulgatum* szitakötőt. Ezt tovább erősíti, hogy a tényleges vízfelületek, mint a kék hordó alján összegyűlt esővíz, vagy a kerti tó úgy helyezkedtek el, hogy a vasrúd végén ülő rovar nem láthatott rájuk. Kizártnak tartom tehát, hogy ezek vonzották volna a tető közelébe a szitakötőt.

Mivel a *Sympetrum vulgatum* teste sárga (nőstény, fiatal hím) vagy piros (idősebb hím), e szitakötők érzékelhetik e színeket is, azok vonzóak lehetnek számukra. Egy, a megfigyelthez hasonló szitakötőfaj, a *Sympetrum rubicundulum* például olyan fotoreceptorokkal rendelkezik a szem ventrális régiójában, melyek maximális érzékenysége a spektrum ultraibolya ($\lambda_{\max} = 340$ nm), kék ($\lambda_{\max} = 410$ nm), zöld ($\lambda_{\max} = 490$ és 540 nm) és vörös ($\lambda_{\max} = 620$ nm) tartományába esik (MEINERTZHAGEN, I. A. et al. 1983). Egyelőre még nem ismert, hogy a *Sympetrum vulgatum* a spektrum melyik tartományában érzékeli a vízről visszavert vízszintesen poláros fényt. A *Sympetrum rubicundulum* esetében a vörös-érzékeny ($\lambda_{\max} = 620$ nm) fotoreceptorok is polarizáció-érzékenyek (MEINERTZHAGEN ET AL. 1983). SCHWIND, R. (1991, 1995) szerint előnytelen lenne a hosszú hullámhosszú tartományban (vörös) detektálni a vizet, mivel a spektrumnak ebben a részében a vízről visszavert fény polarizációfoka egészen

alacsony. Ezért minden bizonnyal nem a tető vörös színe, hanem a spektrum más tartományában érzékelt magas polarizációfok volt vonzóbb a megfigyelt *Sympetrum vulgatum* egyed számára.

Ez nem zárja ki azt, hogy a közönséges szitakötő kis mértékben a tetőről visszavert fény piros színéhez vonzódhatott. Vízbogarak és vízpoloskák is gyakran megfigyelhetők piros felszínek (pl. autók vízszintes tető, csomagtartó, motorháztető felületeinek) közelében (JÄCH, M. A. 1997; NILSSON, A. N. 1997; VONDEL, B. J. VAN 1998; KRISKA GY. et al. 1998; BERNÁTH B. et al. 2001). Azonban a *Sympetrum* szitakötőkkel szemben, ezeknek a rovaroknak nincs vörös-érzékeny fotoreceptoruk (hanem csak UV-, kék- és zöld-érzékeny receptorral rendelkeznek), így a piros autókhoz nem a róluk visszavert fény színe miatt vonzódnak, hanem KRISKA GY. et al. (2006/b) kimutatta, hogy ez utóbbi esetben a visszaverődési-polarizációs jel játssza a főszerepet.

3.5. Természet- és környezetvédelmi szempontok

Az elvégzett mérések alapján kijelenthető, hogy a vizsgált tetőfelület is egy poláros fényszennyező forrás. Levonható az a következtetés, hogy az általam vizsgált piros tetőhöz hasonlóan a vízszintesen poláros fényt visszaverő tetőfelületek (bitumenes zsindely, cserép) is ökológiai csapdát jelenthetnek az ehhez vonzódó élőlények számára. Bár cseréptető polarizációs mintázatát nem vizsgáltuk, általánosságban elmondható, hogy a frissen lerakott cseréptető is erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza mindaddig, amíg az időjárási körülmények érdessé nem teszik a felületét (ekkor a p polarizációfok annyira lecsökkenhet, hogy elveszíti vonzóképességét).

Természet- és környezetvédelmi szempontból ajánlatos a védelem alatt álló állatok élőhelyének környezetében elkerülni az ilyen jellegű építkezést.

4. Egy kivilágított híd polarizáló aszfalt úttal mint az éjjel rajzó dunavirág (*Ephoron virgo*) kettős fénycsapdája

4.1. Ökológiai fénycsapdák

A rovarok helyváltoztató mozgásai közül jól ismert az *1.1. fejezetben* bemutatott, optikai ingerek által vezérelt fototaxis (MENZEL, R. 1979; MOORE, M. V. et al. 2006; JÉKELY G. 2009) és az *1.2. valamint a teljes 3. fejezetben* bemutatott polarotaxis (SCHWIND, R. 1991, 1995; KRISKA GY. et al. 2007, 2009; HORVÁTH G. et al. 2009; EGRI Á. et al. 2012). A mesterséges fényforrások erős intenzitása és színe vonzza az éjjel aktív állatokat (pozitív fototaxis), aminek természetkárosító hatása (a hagyományos ökológiai fényszennyezés) már régóta vizsgált és jól dokumentált jelenség. Ezzel foglalkozó fontosabb munkák például LONGCORE, T.-RICH, C. (2004) és RICH, C.-LONGCORE, T. (2006).

Az erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő mesterséges felületek (például aszfalt utak, kőolajtavak, üvegépületek, fekete sírkövek és sötét gépkocsikarosszériák) polarotaktikus vízirovarokra gyakorolt vonzásának (pozitív polarotaxis) és hatásainak tanulmányozása vezetett az utóbbi években a poláros fényszennyezés jelenségének HORVÁTH G. et al. (2009) általi leírásához. Számos esettanulmány igazolta, hogy a fototaktikus fényszennyezés és a poláros fényszennyezés külön-külön, egymástól függetlenül is képes ökológiai csapdákat kialakítani (EISENBEIS, G. 2006; HORVÁTH G.-KRISKA GY. 2008). Mindezidáig nem ismertünk azonban olyan optikai ingerek által vezérelt ökológiai csapdát, aminek létrejöttében a fototaxisnak és a polarotaxisnak is egyszerre szerepe lenne.

Korábban valószínűsítették, hogy a megvilágított, vízszintesen poláros fényt visszaverő mesterséges felületek fényforrásai nagy fényintenzitásuk miatt nagy távolságból magukhoz vonzhatják a pozitív fototaxissal rendelkező vízirovarokat, amelyek pozitív polarotaxisuk révén leszállnak és lepetéznak a víznek hitt poláros felületre (HORVÁTH G. et al. 2009). Ily módon egy olyan kettős hatáson alapuló ökológiai csapda valósulhat meg, ami fototaxissal magához vonzza és vizuálisan csapdázza a vízirovarokat, amit tovább erősít a polarotaktikus csapdázás. E kétségtől logikusnak tűnő elképzelést mindezidáig nem sikerült kísérleti úton igazolni. A fototaxis és a polarotaxis fordított irányú együtthatását, nevezetesen azt, hogy egy

pozitív polarotaxissal repülő rovar/rovar tömeget a poláros jel vezet a mesterséges fényforráshoz, ahol a rovarok pozitív foto- és polarotaxisuk révén egy halálos ökológiai csapdába kerülnek mindaddig egyetlen megfigyelés sem valószínűsített. Dolgozatomban hátralévő részében egy ilyen jelenség megfigyeléséről számolok be.

KURECK, A. (1992) és TOBIAS, W. (1996) folyóparti és hidak menti lámpák körül nagyszámban rajzó kérészekről (*Ephoron virgo* és más fajok) számolt be. E rajzásokat „nyári hóvihár”-ként írták le, mivel a kérészek olyan tömegben voltak jelen, 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 petecsomóját az úttal való érintkezés során. E faj hímjei a párzást követően, a nőstények pedig a pete rakás után nem sokkal elpusztulnak, így módon nagy mennyiségű kérészteteme halmozódott fel az aszfalt úton. A petéket, amelyeket nem a vízbe raktak le a nőstények, populációs veszteségnek kell tekinteni, aminek jelentős helyi hatásai is lehetnek (EISENBEIS, G. 2006).

2012 nyarán mi is megfigyeltük a dunavirág (*Ephoron virgo*) kérészfaj éjszakai tömegrajzását egy utcai lámpákkal kivilágított, Tahitótfalu határában álló hídnál, amin egy aszfalt út vezetett át. A fejezet további részében e megfigyelést, illetve az ezzel a viselkedéssel kapcsolatos vizsgálatokat mutatom be.

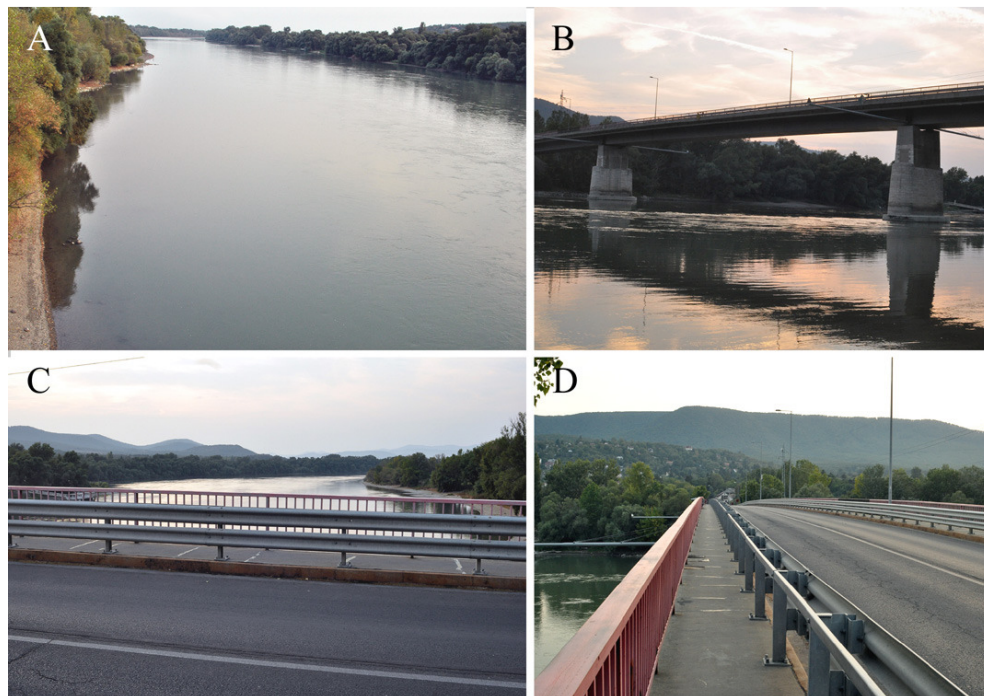
4.2. A dunavirág rajzásának helyszíne és körülményei

2012. augusztusának második felében több Duna-menti helyszínen is történt megfigyelés nagymértékű kérészrajzásról. A jelenség a folyón átívelő hidak közelében volt igazán látványos, ahol napokkal a rajzás után is több centiméter vastag rétegnyi rovar teteme maradt a hidak aszfalt útján. E megfigyelés azért is figyelemreméltó, mert a faj a vizek szennyezettsége miatt hosszú évtizedekre eltűnt a közép-európai folyókból, így a Dunából is. Újbóli megjelenése csak az elmúlt évtizedben történt, ami kétségtelenül jelzi a vízminőség javulását.

Az *Ephoron virgo* dunavirágok naplemente után, a sötétedés beálltával kezdenek rajzani, amikor a hidak utcai lámpái már világítanak. Az innen érkező erős fény hatással van a fototaktikus kérészekre, így ökológiai csapdaként magukhoz vonzzák őket.

2012. augusztus 15. és szeptember 2. között témavezetőim, Dr. Horváth Gábor és Dr. Kriska György társaságában kimentem a Tahitótfalu határában lévő (47° 75' N,

19° 08' E), a Duna mellékágán átvíelő Tildy Zoltán közúti hídhöz, ahol milliós tömegrajzást sikerült megfigyelnünk. A rajzást az említett időintervallumban minden este vizsgáltuk a hídon és a híd alatti folyószakaszon is (9. ábra). A tömegrajzások során 20:30 és 22:45 között (nyári időszámítás szerint = UTC + 2 óra) kérészeket gyűjtöttünk a híd egy lámpája alatt az aszfalt útra hullott kérésztömegből. A rajzás alatt folyamatosan figyeltük, hogy a híd mely részeire szállnak le, és hová rakják le petéiket a dunavirágok. A rajzó kérészek viselkedését egy Nikon D90 digitális kamerával film- és fényképfelvételek formájában dokumentáltuk. Emellett a hídon elhelyezett nyilvános webkamera fényképfelvételeinek átnézésével is további adatokhoz jutottunk a dunavirág 2012. évi repülésének lefolyásáról. E fényképeken jól látszott, hogy mikor alakultak ki kisebb-nagyobb rajok a híd lámpáinál a fototaktikusan odavonzott kérészekből. Megfigyeléseink alapján nagyobb rajzások leginkább tiszta, felhőtlen, szélcsendes estéken fordultak elő, a sűrű felhőzet és az erős szél nem kedvezett a jelenség létrejöttének. A levegő hőmérséklete ekkor 20-23 °C között volt.



9. ábra: A terepvizsgálatok helyszínei (készítette: Kriska György). A: A híd előtti folyószakasz a hídról fényképezve a folyásirány felé nézve. B: A híd alatti folyószakasz a Duna bal partjáról fényképezve. C: A híd déli oldala az aszfalt úttal a folyásirány (dél) felé nézve. D: A híd déli oldala és középső része az aszfalt úttal a Dunára merőlegesen, nyugat felé nézve.

4.3. A dunavirág tömegrajzásai során megfigyelt jelenségek

4.3.1. A folyóvíz felszínéről visszavert vízszintesen poláros fény jelentősége

Egy naplemente előtt rajzó, folyólakó kérészfaj, a tiszavirág (*Palingenia longicauda*) polarotaktikus viselkedésének KRISKA GY. et al. (2007) és MÁLNÁS K. et al. (2011) általi vizsgálata alapján ismert, hogy a vízfelszín vízszintesen poláros jele nemcsak a kérészek polarotaktikus vízkeresésében játszik szerepet, hanem a víz fölötti repülésük irányításában is fontos (SCHWIND, R.-HORVÁTH G. 1993; GÁL J. et al. 2001). A tiszavirág lárvái három évig fejlődnek a Tisza folyó szürke agyagpadjaiban, majd egy nyári alkonyon, 18:00 óra körül az utolsó lárvastádiumú egyedek, a nimfák a vízfelszínre úsznak, és szárnyas rovarrá vedlenek. A hím szubimágók, amelyek a partra repülnek, még egyszer vedlenek, és így alakulnak ivarérett imágóvá. A nőtények a lárvabőrökből kibújva rögtön alkalmasak a párzásra. A nászrepülés és a párzás is a víz fölött történik, ami után a nőtények megkezdik kompenzációs repülésüket. Ennek során néhány kilométert repülnek a folyásiránnyal szemben, végig a folyó középvonala fölött, majd a vízfelszínre ereszkedve lerakják petéiket. A vízárammal lefelé sodródó peték eléri a szülők bölcsőjét jelentő agyagpadot, biztosítva három év múlva az újabb generáció kirepülését. A polarotaktikus tiszavirág nőtények folyó fölötti kompenzációs repülését a folyó középvonala mentén húzódó folytonos, vízszintesen poláros csatorna irányítja. Ha e csatorna megszakad a folyó fölött húzódó híd függőlegesen poláros vízfelszíni tükörképe miatt, leáll a kérésznőtények kompenzációs repülése.

MÁLNÁS K. et al. (2011) erre mutattak példát egy, a Tisza folyót átívelő hídnál. A híd a folyófelszín vízszintesen poláros mintázatának folytonosságát megszakítva képezett optikai gátat úgy, hogy a polarotaktikus nőtény kérészek a híd függőlegesen poláros vízfelszíni tükörképétől visszafordultak, majd később újra a híd felé repültek. Ezáltal a kérészek örvénylő mozgása alakult ki a híd folyásirány felőli oldalán. Miután ezen örvénylő röpködésben kimerültek a nőtények, a folyóba hullva lerakták petéiket, így az utódgeneráció megmenekült.

A tiszavirághoz igen hasonló életmódot folytat a (vele sokszor egy élőhelyen is előforduló) dunavirág (*Ephoron virgo*), mely faj életciklusát IBANEZ, P. et al. (1991); BIJ, A. et al. (1992) és KURECK, A.-FONTES, R. J. (1996) írták le részletesen. Erre egy őszi és téli késleltetett peteállapot jellemző, ami április közepén ér véget a lárvák

kikelésével. Ekkor kezdődik az augusztusig tartó növekedési periódus, mikor a hím szubimágók és a kifejlett nőtények kirajzanak a vízből, majd nagyon rövid ideig tartó párzás után a nőtények lerakják petéiket.

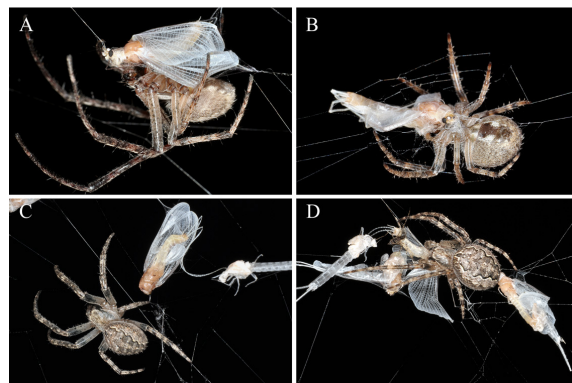
A tiszavirág és a dunavirág rajzásában alapvető különbség, hogy míg a tiszavirág napnyugta előtt kezdődő rajzája sötétedés előtt befejeződik, addig a dunavirágé mindig a naplemenete utáni besötétedés után, 20:30 óra körül kezdődik, és közel 23:30-ig tart.

A híd a dunavirág kompenzációs repülése számára is optikai gátat képezett. E gát azonban nemcsak megszakította a petezés előtt álló dunavirág nőtények kompenzációs repülését, hanem el is pusztította a nőtényeket petecsomóikkal együtt, mert a híd lámpáinál röpködve csapdába esett nőtények később nem a folyóba, hanem a hídon futó száraz aszfalt útra rakták petéiket. Ezért a mesterséges fényforrások csak a sötétedés után rajzó kérészfajokra különösen veszélyesek.

4.3.2. A tömegrajzás időbeli lefolyása

A saját tapasztalataink és a híd web-kamerájának felvételei szerint a vizsgált időintervallumban (2012. augusztus 15. és szeptember 2. között) összesen 13 alkalommal fordult elő a dunavirág tömegrajzása a megfigyelt hídon (1. táblázat). Az első tömegrajzás 2012. augusztus 18-án alakult ki, ezt követően augusztus 25-ig majdnem minden este rajzott a dunavirág. Augusztus 26-án eső esett, így ekkor, és a rákövetkező napon is elmaradt a rajzás. Ezután augusztus 31-e kivételével augusztus 28-tól szeptember 2-ig minden nap újra megfigyelhető volt a hídnál a tömegrajzás.

Az első dunavirág egyedek minden nap 20:15 körül jelentek meg a Duna víztükre fölött. Ezután a kérészek a vizsgált híd déli oldala felől egyre nagyobb tömegben repültek föl a hídroz, kb. 22:30-ig. A híd északi oldala felől (a Duna folyásirányából) nem érkeztek



10. ábra: A vizsgált híd fém korlátján szőtt hálókkal keresztes pókok (Araneidae) dunavirágokat ejtettek csapdába a kérészek tömegrajzásakor (készítette:

Kriska György).

kérészek a hídhöz. Ez mutatja, hogy a híd déli oldalától az északi oldala felé irányuló kompenzációs repülésben részt vevő nőtény kérészekről volt szó. Később az egyedek száma fokozatosan csökkent egészen 23:30-ig, amikor már nem repültek újabb kérészek a híd fölé. A híd déli oldalán futó fém korláton keresztespókok (Araneidae) feszítették ki hálójukat, melyek a rajzás során több száz dunavirágot fogtak (10. ábra).

dátum (2012)	egy hídlámpánál rajzó <i>Ephoron virgo</i> egyedek számánk becsült nagyságrendje	
	több millió	néhány száz
augusztus 15.	–	+
augusztus 16.	–	+
augusztus 17.	–	+
augusztus 18.	+	–
augusztus 19.	+	–
augusztus 20.	+	–
augusztus 21.	+	–
augusztus 22.	+	–
augusztus 23.	+	–
augusztus 24.	+	–
augusztus 25.	+	–
augusztus 26.	–	+
augusztus 27.	–	+
augusztus 28.	+	–
augusztus 29.	+	–
augusztus 30.	+	–
augusztus 31.	–	+
szeptember 1.	+	–
szeptember 2.	+	–
összesen	13 +	6 +

1. táblázat: Az *Ephoron virgo* kérészek rajzási intenzitása 2012. augusztus 15. és szeptember 2. között.

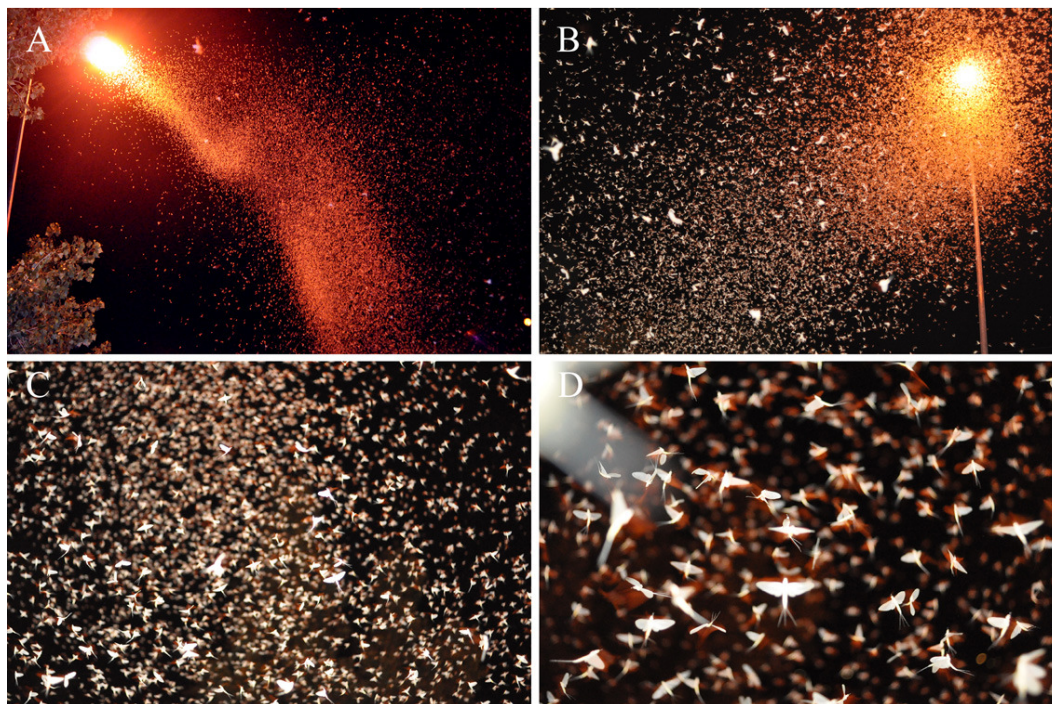
+ jelöli, hogy az adott napon volt rajzás, - jelöli, hogy nem volt rajzás.

4.3.3. A kérészrajok térbeli elhelyezkedése és viselkedése

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 hídrészeken 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 (11. ábra, 1. videófilm). A több tízezer egyedből álló kérészrajok a lámpáktól kiinduló, az uralkodó gyenge szél irányában, dél felé elnyúlt, állandóan kígyózó csóvaként hajladoztak ide-oda (12. ábra). A rajzás második felében (21:30 és 23:30 között) a lámpák körül kígyózó kérészcsóva vége gyakran leért az aszfalt útra. E leérések véletlenszerűen kialakuló helyein dunavirágok százai maradtak az úton, ahol lerakták petecsomóikat, majd némi vergődés után elpusztultak.



11. ábra: A vizsgált híd Dunához közelebbi lámpáinál (a képen bal oldalt) több tízezer, míg a folyótól távolabb lévő szomszédos lámpánál (a képen jobb oldalt) csupán néhány száz dunakérész rajzott (készítette: Kriska György).

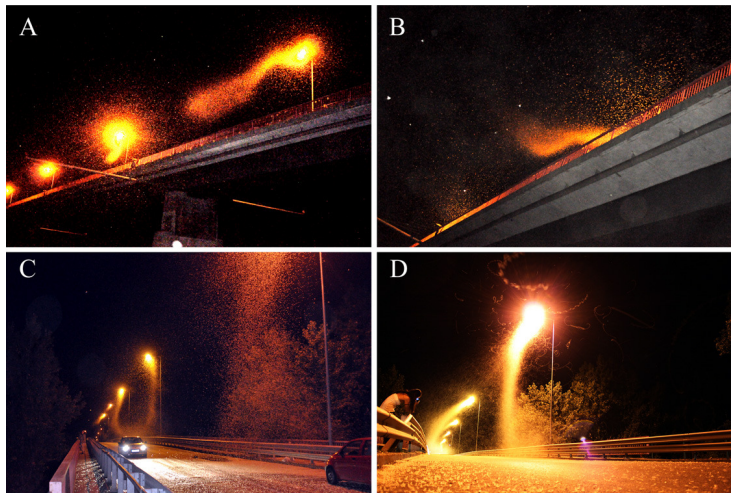


12. ábra: A híd egyik lámpájánál rajzó dunavirágok fényképei A-tól D-ig növekvő nagyítással (készítette: Kriska György). A lámpánál kezdődő s az uralkodó gyenge szél fújásirányában elnyúló, több tízezer egyedből álló kérészcsóva folyamatosan változtatta az alakját.

A híd fölé repülő hím szubimágók leszálltak a híd déli szélén futó világosszürke matt betonjárdára, ahol imágóvá vedlettek. E jelenséget a tömegrajzások során csak egyetlen alkalommal, szeptember 1-én figyeltük meg. Ez arra utal, hogy e rajzásnál a kérészek átváltozása (a szárnyas rovar lárvabőréből való kibújása) közvetlenül azon a folyószakaszon történt, ami a híd folyásiránnyal megegyező oldalára esett. Így a Dunából kirepülő kérészek elsőként a hídon találtak az imágóvá vedlésre alkalmas helyet. A vedlés után a levedlett szubimágó bőr a világosszürke matt betonjárdán maradt. A lárvabőrök összeszámolásával 632 vedlést találtunk a teljes hídszakaszon a vizsgált rajzás során. A vedlés után a hím imágók minden esetben azonnal a hídlámpák felé repültek, és csatlakoztak az ott kialakult kérészrajokhoz. A hím szubimágók imágóvá vedlését csak a rajzás kezdeti szakaszában (20:15 és 20:45 között) figyeltük meg.

A nőstények a párzás után rendszerint megkezdik kompenzációs repülésüket. Ennek során néhány kilométert repülnek a folyó folyásirányával szemben, végig a folyó középvonala fölött. Jelen esetben e kompenzációs repülés során érték el a hidat, ahol az addig egyirányú, a vízfolyással szemben haladó repülésük csapongóvá vált: az egyedek

össze-vissza röpködtek, majd a híd lámpái felé szálltak (13.A,B ábra; 2. videófilm). A nőstények egy része (kb. 1000 egyed) a híd fölé érve azonnal leszállt az aszfalt útra, ahol az aszfalt felszín a hasoldalával érintve rövid, 5-10 cm-es távolságokat tett meg, miközben lerakta petecsomóját. Ezek az egyedek az aszfalton maradtak és rövidesen elpusztultak (13.C,D ábra). A kérészek többsége (több millió egyed) a híd fölé érve egyenesen fölrepült a lámpákhoz, ahol hatalmas kavargó rajokat alkottak. A híd fölé érkező újabb egyedek az egyre növekvő kérésztömeghez csatlakoztak (3. és 4. videófilm).



13. ábra: Dunavirág éjszakai tömegrajzása a Dunán átívelő hídon Tahitótfalunál (készítette: Kriska György és Rácz Gergely). A rajzás során a híd alatti folyószakasz partjáról megfigyelhető volt, hogy a kompenzációs repülésben résztvevő nőstény dunavirágok fölrepültek a hídhöz. A híd fölé érő nőstények egy része leszállt petézni a hídon futó aszfalt útra, míg a többiek az utat megvilágító lámpáknál kialakuló tízezres rajokhoz csatlakoztak.

A rajzás előrehaladtával egyre több kérész szállt le az aszfalt felszínére és rakta le sárga petecsomóját, aminek eredményeként az aszfalt út egyre nagyobb részét borították be több centiméter vastag rétegben a fehér kérészek (14. ábra, 5. videófilm). A kérésztakaró alsó rétegeiben az elpusztult, már lepetézett nőstények, míg a felsőbb rétegekben a szárnyaikkal egyre gyengébben verdeső petéző vagy már lepetézett egyedek voltak. A rajzás legvégén az összes kérész leszállt az aszfalt útra, lerakta petecsomóját és elpusztult. A rajzás befejeztével a teljes aszfalt utat egyenletesen, több cm vastagon borították be a kérésztetemek és petecsomók, ám ez kiemelten a lámpák alatti fénykörben volt jellemző.



14. ábra: A dunavirág tömegrajzásának előrehaladtával a petéző nőtények egyre nagyobb tömegben borították be a híd aszfalt útját (Kriska György fényképei). A: Az úton nagy kiterjedésű fehér foltokat alkottak a már elpusztult és a még petéző egyedekből álló kérésztömeg. B-D: A fehér kérésztömegben jól fölismerhetők a sárga petecsomók, amelyek egyenként több ezer petéből álltak.

4.3.4. Kézilámpás vizsgálatok

A tömegrajzások csúcspontján, mikor a híd lámpái körül tízezerszámra örvénylett a kérésztömeg, kézilámpával vizsgáltuk a fénynek a kérészek mozgására gyakorolt hatását. 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 a kérészek viselkedését.

Már a kézilámpa nem túl erős fénye is alkalmas volt arra, hogy fénycsójával magához vonzza a folyó fölött repülő, vagy a híd lámpái körül rajzó kérészeket. A nyílt folyószakaszon a fénycsóva hatására a kérészek befejezték a folyó középvonala fölött, a folyásiránnyal ellentétes kompenzációs repülésüket, és a fénycsóvába tömörültek. A híd lámpái körül pedig a fénycsóva, a már eleve tízezerszámra rajzó dunavirág-tömegből egy jelentős egyedszámú rajt vonzott magához. E raj a lámpa mozgásakor folyamatosan követte a fénycsóvát (6. videófilm). A lámpa lekapcsolásakor az

odavonzott kérészraj azonnal felbomlott, és az egyedek újra a híd lámpája körüli kérészcsapathoz csatlakoztak (7. videófilm).

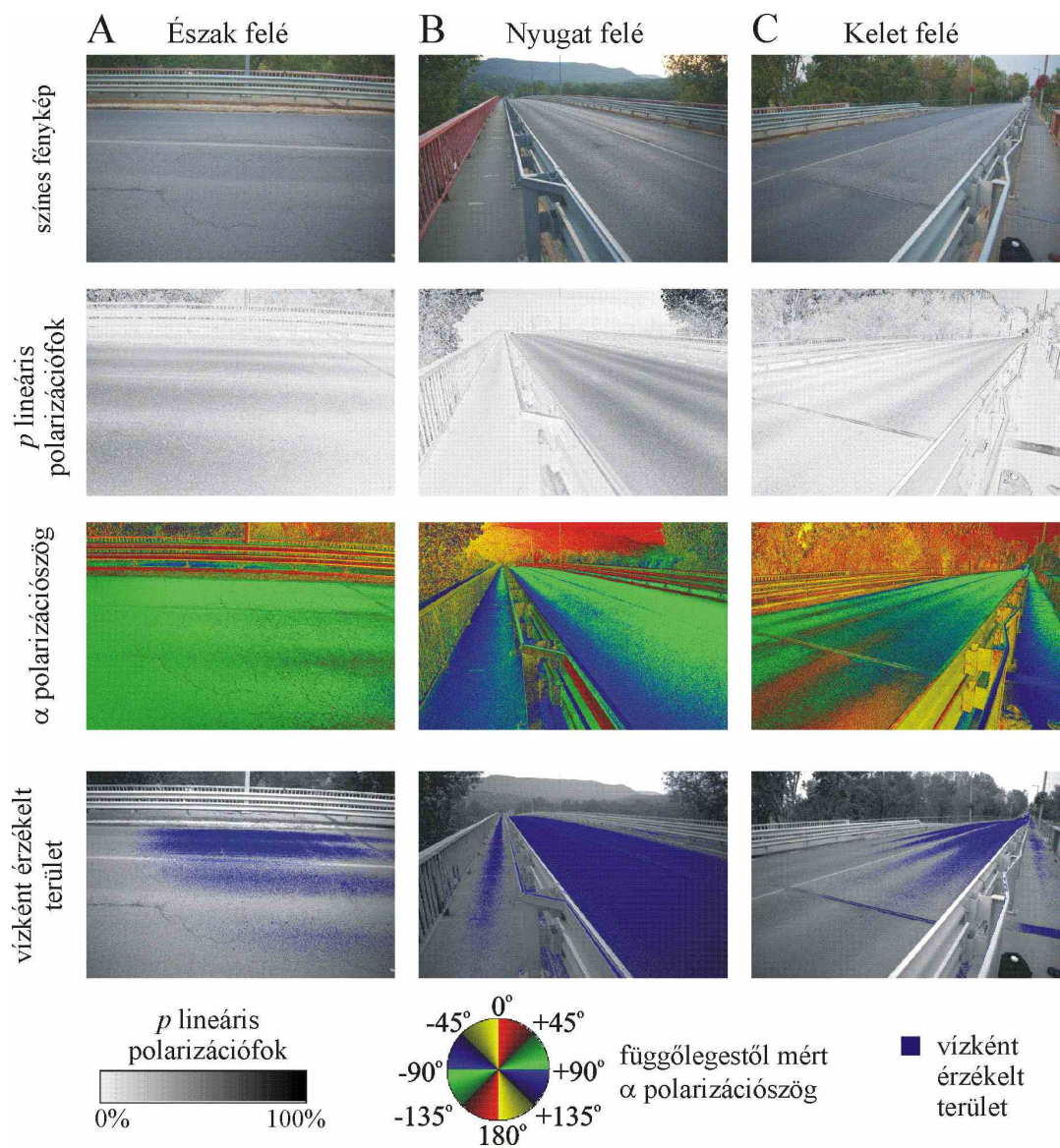
4.4. A híd aszfalt útjának visszaverődési-polarizációs sajátosságai

A megfigyelés helyén lévő híd aszfalt útja jelentős poláros fényszennyező forrás lehet a kérészek számára, a róla visszaverődő erősen és vízszintesen poláros fény miatt. Ennek mértékének megállapításához szükséges volt kimérni az aszfalt út visszaverődési-polarizációs tulajdonságait a 2. fejezetben leírt módszer használatával.

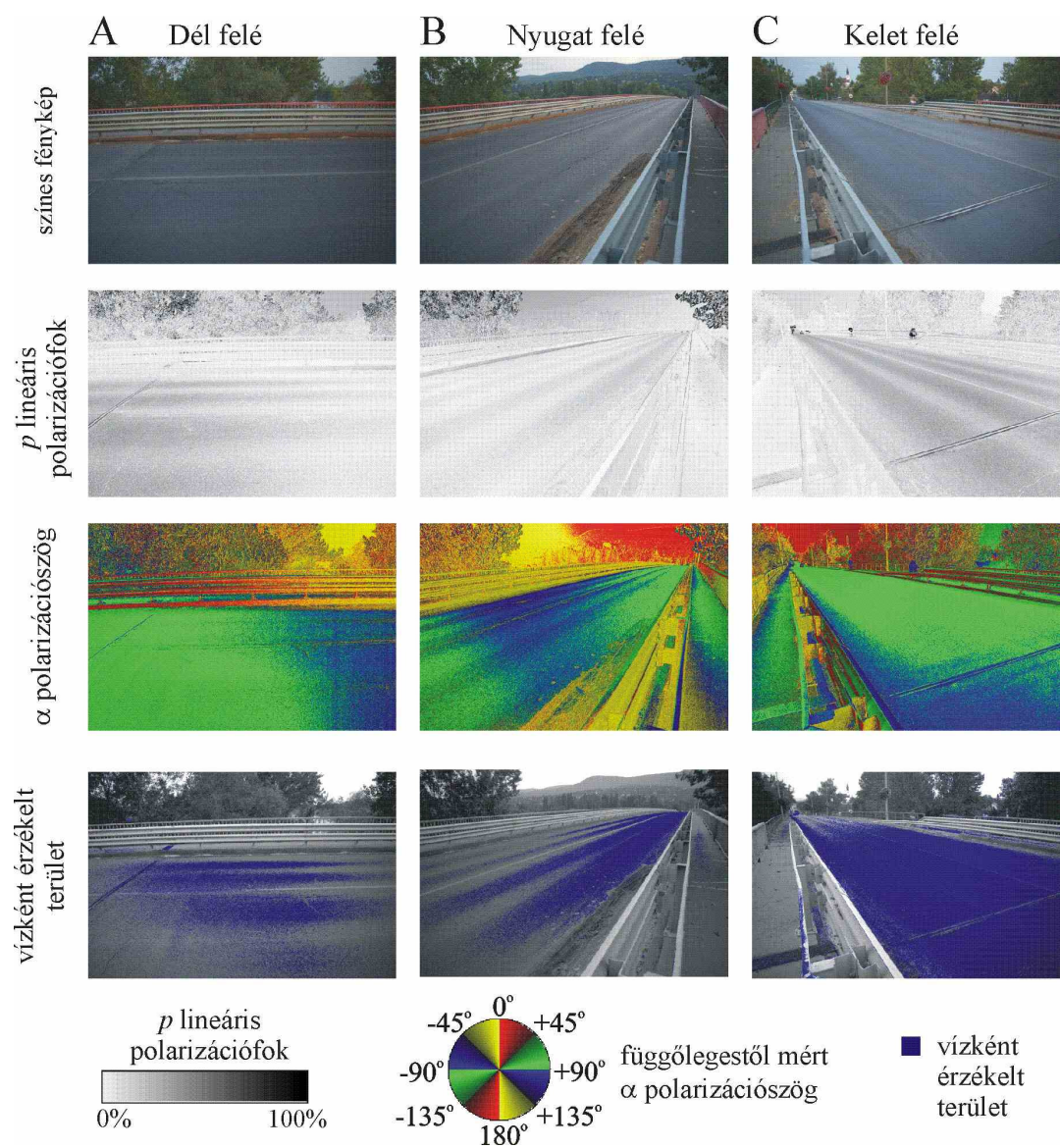
A hídon vezető aszfalt út polarizációs mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában vettem fel napnyugta előtt (mikor a tiszta égről jövő fény világította meg az utat; 15-16. ábra) és éjjel (mikor egyedül csak a híd lámpái világították meg az utat; 17. ábra). Az útról több irányban is készítettem felvételeket: a 15. ábrán a fényképezőgép optikai tengelye észak, nyugat és kelet felé mutatott, míg a 16. ábrán dél, nyugat és kelet felé nézett.

Az aszfalt út bármely irányból nézve, naplemente előtt (égboltn fény által megvilágítva) és éjjel (lámpafénnyel megvilágítva) egyaránt lineárisan és közel vízszintesen poláros fényt vert vissza (polarizációfok: $p > 20\%$, függőlegestől mért polarizációs szög: $75^\circ < \alpha < 105^\circ$), a látható spektrum mindhárom vizsgált tartományában (8-10. ábra). Az ilyen fény a polarotaktikus kérészek számára vízfelületként értelmezhető (KRISKA GY. et al. 1998, 2007, 2009), így a híd aszfaltja vizuálisan megtéveszti őket és ökológiai csapdát jelent számukra.

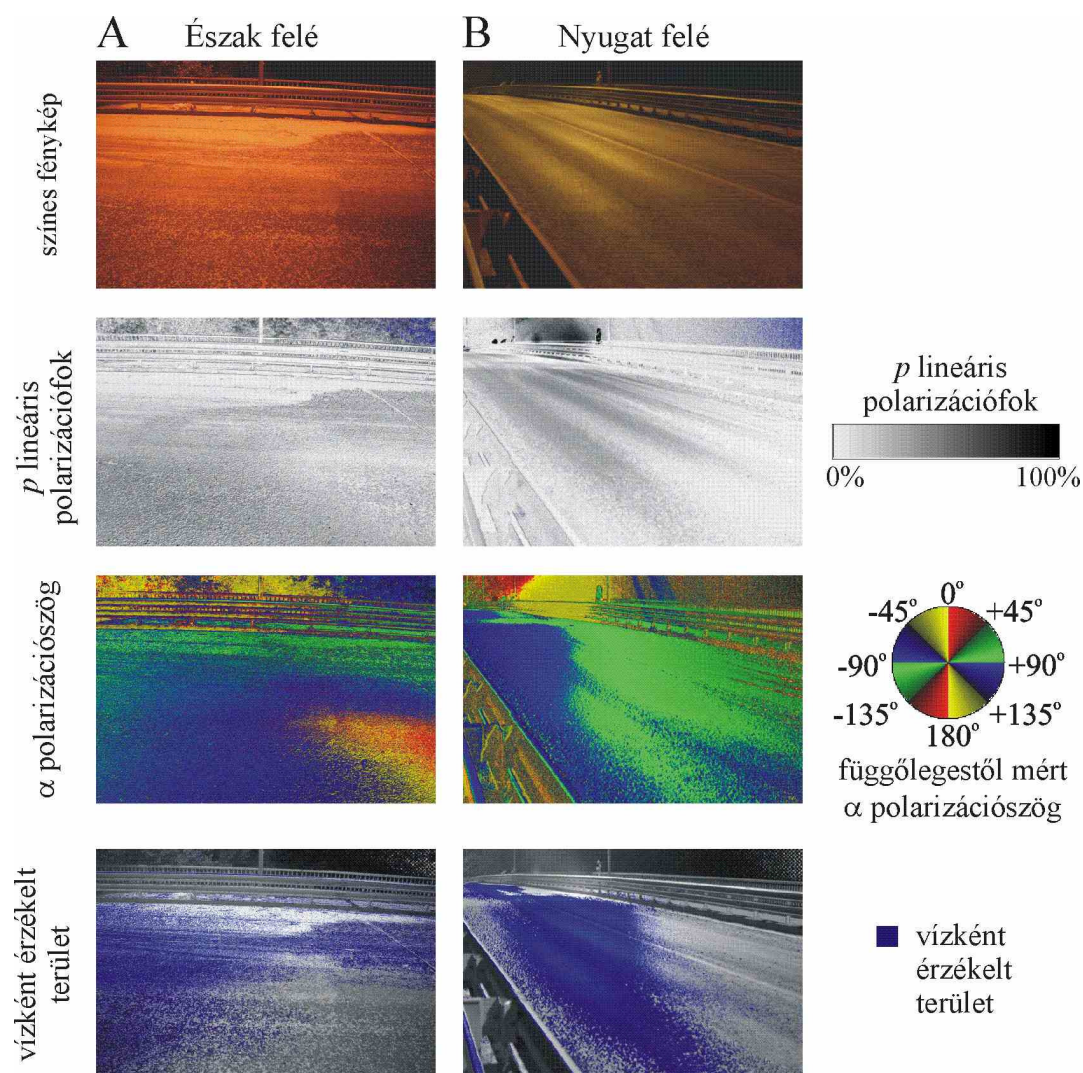
Amikor rajzáskor a lámpák alatt egy vastag, fehér, kör alakú réteg alakult ki az aszfalt útra szállt dunavirágokból (14. ábra), az aszfalt út kérészekkel borított részei teljesen polarizálatlan fényt vertek vissza (szürkével jelölve a 17. ábra 2. sorában, és fehérrel jelezve a 4. sorban). Bár ilyenkor a felület eléggé depolarizáló ahhoz, hogy az újabb kérészek ne tekintsék víznek a felületet, az utcai lámpák fototaxisa mégis ökológiai csapdává változtatja a hidat.



15. ábra: Tahitótfalunál a Duna fölött húzódó híd száraz aszfalt útjának a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatai, ahol az *Ephoron virgo* dunavirág tömegrajzását megfigyeltük. 1. sor: a híd színes fényképe. 2. és 3. sor: a p lineáris polarizációfok és az óramutató járása szerint a függőlegetől mért α polarizációs szög mintázatai. 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 mintázatokot három különböző irányból mértük, 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° -os szöggel nézett a horizont alá.



16. ábra: Mérés a híd másik oldaláról, mikor a polariméter optikai tengelye dél, nyugat és kelet felé nézett. A jelölésrendszer a 15. ábráéval azonos.



17. ábra: A híd polarizációs mintázatai éjszaka (az *Ephoron virgo* dunavirág tömegrajzásakor), mikor az aszfalt utat utcai lámpák világították meg. A polariméter optikai tengelye észak és nyugat felé nézett. A jelölésrendszer a 15. ábráéval azonos.

4.5. A gyűjtött adatok elemzése és következtetések

4.5.1. A dunavirág ivararányának meghatározása

A tömegrajzások alkalmával megfigyelt viselkedések közül több is arra utalt, hogy a tízezres rajokat túlnyomórészt nőnemű egyedek alkotják. Ennek egyik bizonyítékát abban láttuk, hogy 4.2. fejezetben leírtak szerint a lámpákhoz vonzódott egyedek kizárólag a híd déli oldaláról érkeztek. Ez egyértelműen arra utal, hogy a kompenzációs repülésüket végző nőtényeket térítette el az utcai lámpák erős éjszakai világítása. Másik érv emellett, hogy nem sikerült megfigyelni a híd fölött vagy annak közelében párzó egyedeket. Bár a párzás leginkább a víz fölött történik, azonban ha nagy számban lettek volna jelen hím *Ephoron virgo* kérészek, életmódjukból kifolyólag szinte azonnal kirajzás és vedlés után párzásba kellett volna kezdeniük, amit az egyedek nagy száma miatt a hídról is látnunk kellett volna.

Ahhoz, hogy ezt az állítást tudományos alapokra helyezzük, 2012. szeptember 1-jén mintát gyűjtöttünk az aszfalt útra hullott kérészetem halomból. A mintagyűjtés 19:30 és 20:30 között történt kétféle módon: egyrészt a rajzás megkezdése előtt, a már korábban az aszfalton heverő egyedekből (ezeket később kiszárítva, száraz mintaként demonstrációs célokra is használtuk), melyekből korábbi rajzások átlagos ivararányára lehetett következtetni, másrészt a rajzás közepén, a frissen elhullott egyedekből, melyekből az éppen aktuális napra vonatkozó ivararányt tudtuk meghatározni (ezeket etil-alkohollal tartósítottuk). Mintavételt a híd mentén több helyen is végeztünk.

A nemek meghatározását az ELTE TTK Környezetoptikai Laboratóriumában végeztem, mikroszkóp alatt vizsgálva az egyedeket. A hímek jellegzetessége a potroh végén elhelyezkedő kampó alakú páros fogószerv, mely a nőtények párzás közbeni megragadására szolgál, hogy végig összekapcsolódva tudjanak maradni. A nőtények ilyen szervvel nem rendelkeznek.

A szeptember 1-jei rajzásból származó etil-alkoholban tartósított mintából véletlenszerűen vizsgáltam kicsivel több, mint 1000 egyedet. Az elemzés eredményeként közel 99%-os nőtényarányt kaptam, ami alátámasztotta a várakozást. (2. táblázat).

A korábbi rajzásokból származó egyedeket tartalmazó mintát a laboratóriumban lezáratlanul, levegőn hagytuk, amíg teljesen ki nem száradtak. Az előzőhöz hasonló módon ezeket is megvizsgáltam, és amint a 3. táblázatban látható, még az előbbinél is magasabb arányban (99,8%) fordultak elő a nőnemű dunavirágok. Ez esetben azonban csak feleannyi (kb. 500) egyedet elemeztem, mert a gyűjtött minta már eleve nem volt olyan jó állapotban, mint az aznapi friss rajzásból származó. Ezért kizárólag a teljesen ép, egyértelműen meghatározható nemű kérészeket számláltam.

<i>Ephoron virgo</i> egyedek		
minta	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
összesen	1033 (98.95 %)	11 (1.05 %)

2. táblázat: 10 mintában leszámolt, etil-alkoholban tartósított *Ephoron virgo* nőstény és hím egyedek száma (valamint százalékos arányuk). Minden minta kb. 100 egyedet tartalmaz.

<i>Ephoron virgo</i> egyedek		
minta	száma	
	nőstény	hím
1.	96	0
2.	104	1
3.	93	0
4.	96	0
5.	127	0
összesen	516 (99.8 %)	1 (0.2 %)

3. táblázat: 5 száraz mintában leszámolt *Ephoron virgo* nőstény és hím egyedek száma (valamint százalékos arányuk). Minden minta kb. 100 egyedet tartalmaz.

A mérési adatok egyértelműen bizonyítják, hogy a kompenzációs repülésüket végző nőstény dunavirágok kerültek ezen ökológiai csapda hatása alá. Egyedül a mintavétel napján (szeptember 1-jén) sikerült hím szubimágók imágóvá való vedlését megfigyelni, ahogy az a 18. ábrán is látható.



18. ábra: Egy hím szubimágó dunavirág imágóvá vedlésének képei, a híd világosszürke matt betonjárdáján (készítette: Kriska György). A: a vedlés kezdete. D: A vedlés vége.

4.5.2. A tömegrajzás során tapasztalt viselkedési formák magyarázata

A dunavirág (*Ephoron virgo*) 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 nem közelítik meg a partot, ugyanakkor a parton lévő mesterséges fényforrások erőteljesen vonzzák őket. Emiatt 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 4.4.3. fejezetben leírtak szerint (6. és 7. videófilm).

A folyó közelében található mesterséges fényforrások kérészekre gyakorolt hatásának vizsgálatakor megállapítható volt, hogy csak azon fényforrások vonzották magukhoz a kérészeket, amelyek közvetlenül a vízparton vagy a folyófelszín fölött helyezkedtek el. Ily módon óriási kérésztömegeket vonzhattak magukhoz a part mellett horgonyzó kivilágított hajók, a fényárban úszó vízparti büfék és a folyón átívelő kivilágított hidak is (4. videófilm), míg a folyó mellett, 50-100 m-re haladó főút erős fényű lámpái már egyáltalán nem vonzották a dunavirágokat.

Eisenbeis, G. (2006) a rovarok utcai lámpák körüli viselkedésének háromféle típusát definiálta:

- 1) "Fénycsapda", mikor a rovarok nem képesek elszabadulni a lámpák közeléből.
- 2) "Fénygát", vagyis a rovarok hosszútávú mozgásának zavarása vagy megszakítása a táj fölötti repülési útvonalukba kerülő mesterséges fények által.
- 3) "Fény általi szívó hatás", azaz mikor az egyébként nem mozgó rovarokat a mesterséges fények a halálba vonszolják (kiszívják az élőhelyeikről, mint egy porszívó).

Az *Ephoron virgo* hídlámpákra adott, általunk megfigyelt reakciója tipikus fénygát viselkedés az Eisenbeis-féle értelemben.

Korábbi terepkísérletek szerint számos kérészfaj pozitív polarotaxissal detektálja a vizet a vízfelszínről tükröződő fény vízszintes polarizációja alapján (KRISKA GY. et al. 1998, 2007, 2009), mint ahogyan sok más vízirovarfaj és vízhez kötődő rovarfaj is (SCHWIND, R 1991, 1995; HORVÁTH G.-VARJÚ D. 2004; CSABAI Z. et al. 2006; KRISKA GY. et al. 2006/a,b, 2009; HORVÁTH G. et al. 2010; EGRI Á. et al. 2012). A tiszavirág (*Palingenia longicauda*) esetében a nőtények kompenzációs repülésének a folyófelszín vízszintesen poláros jele általi polarotaktikus vezérlése is igazolást nyert (MÁLNÁS K. et al. 2011). Mindezek alapján feltételezhető, 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 aszfalt utakról visszaverődő vízszintesen poláros fény megtéveszti és vonzza a polarotaktikus kérészeket is (KRISKA GY. et al. 1998; HORVÁTH G.-KRISKA GY. 2008; HORVÁTH G. et al. 2009, 2010; MÁLNÁS K. et al. 2011; HORVÁTH G. 2012).

A kompenzációs repülést végző nőtény dunavirágok útjába eső intenzív mesterséges fényforrások a vízfelület által kiváltott pozitív polarotaxist elnyomva magukhoz vonzották e rovarokat. Ugyanakkor e fototaxis nem nyomta el teljesen a vízfelszínről visszavert, vízszintesen poláros fény által a dunavirágokban kiváltott polarotaxist, mert csak a folyóhoz közeli/fölötti mesterséges fényforrások vonzották magukhoz tömegesen a kérészeket. A Duna felszínének nagy részén a polarotaxis dominált, az irányította a kérészek vízfelszín fölötti röpködését, majd a nőtények kompenzációs repülését.

Mindazonáltal a hídon futó, és a lámpák fénye által megvilágított aszfalt útra petéző nőtények jelentős hányada nem a lámpák fénykörében szállt le, hanem attól

távolabb. Rájuk nyilván nem a fototaxis hatott, de nem is a lámpák körüli hosszas röpködésben történt kifáradás miatt hullottak az aszfaltra, hanem aktívan szálltak az út kisebb fényintenzitású, de erősen és vízszintesen poláros fényt visszaverő részeire (15-17. *ábra*). Ily módon tehát a dunavirágok hídnál megfigyelt tömegrajzásában a domináns fototaxis mellett fontos szerepet játszott az alárendelt polarotaxis is. E két hatás egymást erősítve, szinergikus kölcsönhatásban eredményezte, hogy a dunavirágok tömegesen vonzódtak a híd lámpáihoz, majd az aszfalt útra petéztek.

A híd közelében a folyóból kirepülő hím szubimágóik imágóvá vedlettek (18. *ábra*), majd a híd lámpáihoz vonzódtak. Megfigyeléseink szerint a hím szubimágók nem az erősen polarizáló aszfalt felszínén, hanem a kevésbé polarizáló világosszürke matt betonjárda felszínén vedlettek imágóvá. Ez feltehetően azzal magyarázható, hogy természetes körülmények között az imágóvá vedlés sem az erősen polarizáló vízfelszínen, hanem a kevésbé vagy nem polarizáló vízparton történik.

A naplemente környékén, de még világosban rajzó tiszavirág és az éjjel rajzó dunavirág hidaknál tapasztalt viselkedését összehasonlítva megállapíthatunk egy hasonlóságot és egy lényeges különbséget: Mindkét kéremszaj esetében az útjukba kerülő híd megállítja a nőstények kompenzációs repülését, ugyanakkor a feltorlódott kéremszaj a tiszavirág esetében a híd előtti folyószakasz fölött, míg a dunavirágnál a híd fölött alakul ki. Így a híd előtt feltorlódó tiszavirág nőstények végül a vízbe hullva a vízbe rakják petéiket, míg a dunavirág nőstényei a hídlámpák fénycsapdjába kerülve a petéikkel együtt a híd aszfalt útjára hullanak (14. *ábra*, 5. *videófilm*). A petecsomók kiszáradás miatti elpusztulásával az utódgeneráció is károsodik, így a dunavirág esetében a foto- és polarotaxis által okozott kettős ökológiai csapda alakul ki.

4.5.3. A helyváltoztató ingermozgások hatása az ökológiai fénycsapdák hatékonyságára

Régóta közismert tény, hogy a fénycsapdák nagy mennyiségben fogják be az elsődleges (pl. vízbogarak, vízpoloskák) és másodlagos (pl. tegzesek, kéremszaj) polarotaktikus vízirovarokat (LONGCORE, T.-RICH, C. 2004; RICH, C.-LONGCORE, T. 2006). Az óriáscsiborok esetében pedig sikerült megfigyelni, hogy az erősfényű utcai lámpák pozitív fototaxissal magukhoz vonzották e polarotaktikus rovarokat, amelyek az aszfaltút közelébe érve csapdázódtak a poláros aszfaltfelszínen (HORVÁTH G. et al. 2009). Ily módon a fényforrások miatt jelentősen megnőtt egy poláros ökológiai csapda,

az aszfaltút hatóköre, és ezáltal a hatékonysága is. E jelenség fordítottjának tekinthető a dunavirág esetében megfigyelt ökológiai csapda, ahol a folyó folytonos polarizációs 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 futó főút lámpái sincsenek rájuk hatással. Így esetükben a lámpáknak nem az a szerepe, hogy nagy távolságból magukhoz vonzzák a rovarokat, hanem az, hogy fénycsapdaként levadásszák és elpusztítsák őket. Ehhez a jelenséghez járul hozzá az ez esetben alárendelt szerepű poláros ökológiai csapda, a híd megvilágított aszfaltútjának hatása (KRISKA GY. et al. 1998).

Arra is van példa, hogy egy poláros ökológiai csapda hatását nem erősíti, hanem gyengíti valamilyen ingermozgás. Ilyen a „tiszavirág-tiszahíd” jelenség, ahol a dunavirághoz hasonlóan a folyó folytonos polarizációs jele a kompenzációs repülés során a poláros ökológiai csapda közelébe (a híd aszfaltútjához) vezeti a tiszavirág egyedeket, de a híd vízfelszínre vetülő árnyéka a vízszintesen poláros jelet megszakítva gyakorlatilag megállítja a kompenzációs repülést, miáltal az egyedeknek csak kis része jut a híd aszfaltútja fölé, ahol csapdázódik (MÁLNÁS K. et al. 2011).

Különös módon arra is lehet példát találni, hogy eltérő erősségű poláros kulcsingerek eltérő válaszokat kiváltva eredményezzenek egy komplex, a szimpla csapdánál hatékonyabb poláros ökológiai csapdát. A kérészekkel foglalkozó terepkutatásaik során KRISKA GY. et al. (2006/b, 2009, 2010) számos alkalommal megfigyelték, hogy a dánkérész (*Ephemera danica*) nőstények hosszan repültek egy patakot kísérő aszfaltút fölött, majd amikor érzékelték egy erősen poláros jelet (pl. az általuk kirakott tesztfelületeket, parkoló sötét gépkocsikat), akkor erre leszálltak és azonnal kinyomták a petecsomójukat. Tehát ebben az esetben a száraz aszfaltút gyengébben poláros jele nem váltotta ki a petézést, ugyanakkor képes volt a polárosabb objektumokhoz nagy távolságból odavezetni a kérészeket, ahol ezek poláros ökológiai csapdába estek.

A tömegrajzású vízirovarok esetében (pl. egyes árvaszúnyog és tegzes fajok) a vizet utánzó poláros ökológiai csapda hatékonyságát óriási mértékben megnövelheti, ha ennek közelében ideális rajzási marker található. A dunai tömegtegzes (*Hydropsyche pellucidula*) ideális rajzási markere lehet például egy folyóparti sötét épülettömb, amelyhez a rajzás kezdetén tömegesen odavonzódnak a rovarok, majd a rajzás második

felében, amikor már petéző helyet keresnek a nőstények, az épület vízszintesen poláros fényt tükröző felületeire lerakják petéiket (KRISKA GY. et al. 2008; MALIK P. et al. 2008). Tehát ebben az esetben a rajzási marker jelenléte erősít rá a polarotaktikus vízdetekcióra épülő ökológiai csapda hatékonyságnövelésére.

Korábbi kutatások azt is igazolták, hogy egyes *Sympetrum* szitakötő fajok esetében egy az optikai tulajdonságaiban vizet utánzó mesterséges objektum a fényes fekete sírkő is ökológiai csapdaként működik, amelynek hatékonyságát az is befolyásolja, hogy a környezetében van-e üllőág, vagy nincs. Az üllőág jelenléte megnöveli az esélyét annak, hogy a szitakötők hosszabb ideig itt maradnak és rápetéznak a sírkő felszínére (HORVÁTH G. et al. 2007).

A fenti elemzésből is megállapítható, hogy a poláros ökológiai csapdák kialakulásában és az általuk kiváltott hatások súlyosságában meghatározó szerepe lehet különböző helyváltoztató ingermozgásoknak, amelyek a poláros csapdához vezetik az egyedeket, vagy akadályozzák a csapdához való eljutásukat.

4.6. A kivilágított hidak fénycsapdájának hatástalanítására tett természetvédelmi javaslat

Jelen ismereteink szerint a dunavirágok számára káros ökológiai csapda ellen nem tudunk olyan ellenszert javasolni, ami a mesterséges fényforrások hatását teljesen kiküszöbölve biztosítaná a dunavirágok kompenzációs repülésének zavartalanságát.

A kézilámpás vizsgálataink eredményeire alapozva azonban felmerül egy lehetőség a probléma megoldására. Javasolom egy "fényesorompó" kialakítását a kivilágított hidak és horgonyzó hajók előtt: e fényesorompó a víz fölé nyúló rudakon lévő lámpákból állna (a 9.B ábrán látható, vízszintes rudak végén lévő radartükrökhöz hasonlóan). E lámpák magukhoz vonzanák a dunavirágokat, de a körülöttük rajzó kérészek kifáradás után végül a lámpák alatti folyóba hullának, a petéikkel együtt. A hidak testén és pillérein is elhelyezhetők e lámpák. A lényeg, hogy a fényesorompó lámpái alatt a folyó vízfelszíne legyen, hogy oda hulljanak a fénycsapdájába esett kérészek, ne pedig a híd sokszor erősen fénypolarizáló aszfalt útjára, ahol a petéikkel együtt menthetetlenül elpusztulnak.

A másik, triviális megoldás az lenne, ha a hídlámpákat lekapcsolnák a dunavirágok rajzásának éjjeli óráiban. Erre azonban a hídon vezető közúti közlekedés biztonságának veszélyeztetése miatt nem sok esély van.

5. Összefoglalás

A hagyományos értelemben vett ökológiai fényszennyezés mellett napjaink egyre égetőbb problémája a poláros fényszennyezés is. Modern épületeink, építményeink többsége erősen és vízszintesen poláros fényt ver vissza, ami az azt érzékelni képes számos rovarfaj ökológiai csapdájává válhat.

Dolgozatomban a poláros fényszennyezés két új, igencsak figyelemre méltó példáját mutattam be, a megfigyelések részletes leírásával, fénykép-dokumentációval, videómelléklettel és képalkotó polarimetriás mérésekkel együtt. A munkám második felében szereplő dunavirágok tömegrajzásának példája mutatja leginkább, mennyire komolyan kell vennünk a poláros fényszennyezést, különösen olyan helyeken, ahol a hagyományos és a poláros fényszennyezés együttesen, egymás hatását erősítve és kiegészítve (szinergikusan) jelentkezik. Úgy gondolom, hogy mindemellett nem szabad csukott szemmel elmennünk, hiszen az itt (mindössze egyetlen Duna-hídon) elpusztult dunavirággyedek milliőről van szó, melyek nem a természetes élőhelyükön petéztek le. A vizsgált időszakban magam is megfigyeltem jelentős mennyiségű kérésztetemeteket más hidaknál is, többek között a budapesti Szabadság-híd és Rákóczi-híd utcai lámpái közelében. Az utóbbi tömegrajzásokról ugyan fénykép-dokumentáció nem készült, és pontos adataink sincsenek, de ezek és az ehhez hasonló hidak komoly károkat okozhatnak a dunavirágpopulációk túlélési esélyeinek szempontjából.

A dolgozat 3. fejezetében bemutatott szitakötő viselkedésének megfigyeléséről angol nyelvű cikket is írtunk, és benyújtottuk az *International Journal of Odonatology* című folyóiratba: FARKAS A., SZÁZ D., HORVÁTH G. (2012) Visual deception of a female *Sympetrum vulgatum* dragonfly by the red roof of a storage. E cikk jelenleg elbírálás alatt van.

A 4. fejezetben leírt dunavirág tömegrajzásról Dr. Kriska György (ELTE TTK Biológiai Szakmódszertani Csoport) tartott előadást a 2012. október 3-5. között megrendezett 14. Tihanyi Hidrobiológus Napokon: KRISKA GY., SZÁZ D., RÁCZ G., HORVÁTH G. (2012) Újra virágzik a Duna! A dunavirág (*Ephoron virgo*) foto- és polarotaxisán alapuló ökológiai csapda. (Előadás) 54. Tihanyi Hidrobiológus Napok, MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany, 2012. október 3-5. Tervben van továbbá egy angol nyelvű cikk írása is e témában, amit valamely nemzetközi referált szakfolyóiratba fogunk benyújtani.

A dolgozathoz tartozik egy kiegészítő CD-melléklet, melyen a megfigyelésekről készült videófelvevételek, illetve további fényképek találhatók.

6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőimnek, Dr. Horváth Gábornak és Dr. Kriska Györgynek, valamint Farkas Alexandra doktorandusznak a dolgozatom elkészülésében nyújtott segítségükért, amiért munkámat többször is átnézték, a szerkesztésben segítettek, és hasznos szakmai tanácsokkal láttak el. Köszönettel tartozom nekik továbbá a rendelkezésemre bocsátott fénykép- és videódokumentációért, amit engedélyükkel használtam fel.

Köszönet illeti családomat, barátaimat, akik talán maguk sem tudják, mennyit jelentett támogatásuk, bátorításuk, hogy e dolgozat elkészülhessen.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm az ELTE Környezetoptika Laboratóriuma minden tagjának, hogy témám felé érdeklődéssel fordultak, támogató közösségük vendégszeretetét mindvégig érezhettem.

7. A kiegészítő CD-melléklet tartalma

A mellékelt CD-lemez 7 videófilmet tartalmaz, részletesen bemutatva a dunavirág tömegrajzása közben vizsgált és észlelt jelenségeket. Ezek részletesen a következők:

1. videófilm: A kompenzációs repülésüket végző, több tízezer egyedből álló kérészraj tömegének bemutatása. Látható, hogy a híd folyó fölötti szakaszánál álló lámpa alatt hosszú kígyózó csóvaként jelenik meg a raj, míg a partközeli lámpáknál csak alig néhány tíz egyed szálldogál. Az aszfalt utat több centiméter vastagon, hótakaró szerűen borítja a lehullt kérésztömeg.

2. videófilm: A híd alól, a lámpák fényéhez vonzódó kérészek csapongóvá váló, összezavarodó mozgása jól megfigyelhető. Jól látszik a lámpák körül kialakuló kérészcsóva alakja és mozgása.

3. és 4. videófilm: A rajzó kérészcsova mozgásának megfigyelése. Jól látható, amint egy-egy csóvából kivált nagyobb kérészraj leér az aszfalt felszínre, és több száz egyed az úton marad, majd lepetézik és elpusztul. A túlélők ezt követően visszatérnek a lámpafény vonzásába.

5. videófilm: Az aszfalt útra leszállt és petéiket lerakó kérészek. Helyenként a szárnyaikkal verdeső fehér dunavirágok mellett a sárga petecsomó is megfigyelhető.

6. és 7. videófilm: Kézipilámpás vizsgálatok bemutatása. A kézipilámpa fénye elegendő ahhoz, hogy eltérítse az utcai lámpák körül rajzó kérésztömeget. A lámpa mozgatására a kérészraj követi annak fényét, majd kikapcsolásakor a dunavirágok visszaszállnak az utcai lámpa körül rajzó társaikhoz.

A CD-melléklet további fényképeket is tartalmaz a dunavirág rajzásáról, melyek egyenként nem fértek bele a dolgozatomba, csak a mozaikváltozatukat közöltem.

A videófilmek a YouTube-on is megtekinthetők a következő címeken:

1. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=XJYZpAlT0CE>
2. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=IragYQwNRR8>
3. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=MuxPRMuzSBM>
4. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=YISuA8BDJ2M>
5. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=R6nDfukB-mU>
6. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=w9gLQBF2joo>
7. videófilm: <http://www.youtube.com/watch?v=mWNeLLFsZDg>

8. Felhasznált irodalom

- BERNÁTH B.-SZEDENICS G.-MOLNÁR G.-KRISKA GY.-HORVÁTH G. 2001: 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.-WILDERMUTH, H.-HORVÁTH G. 2002: How can dragonflies discern bright and dark waters from a distance? The degree of polarization of reflected light as a possible cue for dragonfly habitat selection. - *Freshwater Biology* 47: 1707-1719
- 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
- CORBET, P. S. 1999: Dragonflies. Behaviour and Ecology of Odonata. - *Harley Books, Martins, Great Horkesley, Colchester, Essex, UK*
- CSABAI Z.-BODA P.-BERNÁTH B.-KRISKA G.-HORVÁTH G. 2006: A 'polarisation sundial' dictates the optimal time of day for dispersal by flying aquatic insects. - *Freshwater Biology* 51: 1341-1350
- EGRI Á.-BLAHÓ M.-SÁNDOR A.-KRISKA GY.-GYURKOVSKY M.-FARKAS R.-HORVÁTH G. 2012: 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 + electronic supplement
- EISENBEIS, G. 2006: Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. - *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (eds.: Rich, C.; Longcore, T.) Chapter 12, pp. 281-304, Island Press, Washington - Covelo - London
- GÁL J.-HORVÁTH G.-POMOZI I.-WEHNER, R. 1998b: Az égbolt polarizálatlan pontjai, avagy amit már Arago, Babinet és Brewster is ismert, de eddig közvetlenül még senki sem látott. 2. rész. - *Természet Világa* 129. 5. pp. 212-215.

- GÁL J.-HORVÁTH G.-MEYER-ROCHOW, V. B. 2001: Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset. - *Remote Sensing of Environment* 76: 103-111
- GÜNTHER, A. 2003: Eiablage von *Sympetrum vulgatum* auf ein parkendes Auto (Odonata: Libellulidae). - *Libellula* 22: 19-23
- HORVÁTH G.-ZEIL, J. 1996: Kuwait oil lakes as insect traps. - *Nature* 379: 303-304
- 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. - *Journal of Experimental Biology* 200: 1155-1163
- HORVÁTH G.-POMOZI I.-GÁL J. 1998a: Sarkított világ. Videopolarimetria. - *Élet és Tudomány* 24. pp. 756-757.
- HORVÁTH G.-BERNÁTH B.-MOLNÁR G. 1998: Dragonflies find crude oil visually more attractive than water: Multiple-choice experiments on dragonfly polarotaxis. - *Naturwissenschaften* 85: 292-297
- HORVÁTH G.-VARJÚ D. 2004: Polarized Light in Animal Vision ? Polarization Patterns in Nature. - *Springer-Verlag, Heidelberg - Berlin - New York*, p. 447, ISBN 3-540-40457-0
- HORVÁTH G.-MALIK P.-KRISKA GY.-WILDERMUTH H. 2007: Ecological traps for dragonflies in a cemetery: the attraction of *Sympetrum* species (Odonata: Libellulidae) by horizontally polarizing black gravestones. - *Freshwater Biology* 52: 1700-1709
- 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, pp. 204-229
- 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: 317-325

- HORVÁTH G.-BLAHÓ M.-EGRI Á.-KRISKA GY.-SERES I.-ROBERTSON, B. 2010: Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. - *Conservation Biology* 24: 1644-1653 + electronic supplement
- HORVÁTH G.-KRISKA GY.-MALIK P.-HEGEDÜS R.-NEUMANN L.-AKESSON, S.-ROBERTSON, B. 2010: Asphalt Surfaces as Ecological Traps for Water-Seeking Polarotactic Insects: How can the Polarized Light Pollution of Asphalt Surfaces be Reduced? Series: Environmental Remediation Technologies, Regulations and Safety. - *Nova Science Publishers, Inc.*, Hauppauge, New York, USA, p. 47, ISBN 978-1-61668-863-9
- 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
- IBANEZ, C.-ESCOSA, R.-MUNOZ, I.-PRAT, N. 1991: Life cycle and production of Ephoron virgo (Ephemeroptera: Polymitarcidae) in the lower river Ebro (NE Spain). In Aba-Tercr J. and Sanchez-Ortega A. (Eds.) - *Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera*. pp. 483-492, Sandhill Crane Press, USA
- JÄCH, M. A. 1997: Daytime swarming of rheophilic water beetles in Austria (Coleoptera: Elmidae, Hydraenidae, Haliplidae). - *Latissimus* 9: 10-11
- JÉKELY G. 2009: Evolution of phototaxis. - *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364: 2795-2808
- JURZITZA, G.; KORMANN K. 1960: Libellenbeobachtungen in der Umgebung von Karlsruhe (Baden). - *Beiträge zur naturkundlichen Forschung in Südwest-Deutschland* 19: 56-57
- KRISKA GY.-HORVÁTH G.-ANDRIKOVICS S. 1998: Why do mayflies lay their eggs en masse on dry asphalt roads? Water-imitating polarized light reflected from asphalt attracts Ephemeroptera. - *Journal of Experimental Biology* 201: 2273-2286
- KRISKA GY.-MALIK P.-CSABAI Z.-HORVÁTH G. 2006a: Why do highly polarizing black burnt-up stubble-fields not attract aquatic insects? An exception proving the rule. - *Vision Research* 46: 4382-4386 + cover picture

- KRISKA GY.-CSABAI Z.-BODA P.-MALIK P.-HORVÁTH G. 2006b: 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: 1667-1671
- 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: 148-154 + cover picture
- KRISKA GY.-MALIK P.-SZIVÁK I.-HORVÁTH G. 2008: Glass buildings on river banks as 'polarized light traps' for mass-swarming polarotactic caddis flies. - *Naturwissenschaften* 95: 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.-NILSSON, D.-E. 1995: The dorsal eye of the dragonfly *Sympetrum*: specializations for prey detection against the blue sky. - *Journal of Comparative Physiology A* 176: 437-453
- LONGCORE, T.-RICH, C. 2004: Ecological light pollution. - *Frontiers in Ecology and the Environment* 2: 191-198
- MALIK P.-HEGEDÜS R.-KRISKA GY.-HORVÁTH G. 2008: Imaging polarimetry of glass buildings: why do verticalglass surfaces attract polarotactic insects? - *Applied Optics* 47/24: 4361-4374
- MÁLNÁS K.-POLYÁK L.-PRILL É.-HEGEDÜS R.-KRISKA GY.-DÉVAI G.-HORVÁTH G.-LENGYEL S. 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 + electronic supplement

- MEINERTZHAGEN, I. A.-MENZEL, R.-KAHLE, G. 1983: The identification of spectral receptor types in the retina and lamina of the dragonfly *Sympetrum rubicundulum*. - *Journal of Comparative Physiology* 151: 295-310
- MENZEL, R. 1979: Spectral sensitivity and colour vision in invertebrates. - *Comparative Physiology and Evolution of Vision in Invertebrates* (Autrum, H. ed.) vol. VII/6A, pp. 503-580, Springer-Verlag, Berlin
- MOORE, N. W. 1991: Male *Sympetrum striolatum* "defends" a basking spot rather than a particular locality (Anisoptera: Libellulidae). - *Notulae odonatologicae* 3: 112
- MOORE, M. V.-KÖHLER, S. J.-CHEERS, M. S. 2006: Artificial light at night in freshwater habitats and its potential ecological effects. - *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: 12-16
- NOORDWIJK, M. V. 1980: Dragonfly behaviour over shining surfaces. - *Notul. Odonatol.* 1: 105
- OEHME, H. 1999: Jagderfolg und Jagdtaktik bei *Sympetrum striolatum* (Charpentier) (Anisoptera: Libellulidae). - *Libellula* 18: 79-87
- PAINE, A. 1992: Notes and observations. - *Journal of the British Dragonfly Society* 8: 14-18
- RICH, C.-LONGCORE, T. (eds.) 2006: Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. - *Island Press*, Washington - Covelo - London
- 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 + cover picture
- SCHWIND, R. 1995: Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light. - *Journal of Comparative Physiology A* 177: 439-448

- STEVANI, C. V.-PORTO, J. S.-TRINDADE, D. J.-BECHARA, E. J. H. 2000a: Automotive clearcoat damage due to oviposition of dragonflies. - *Journal of Applied Polymer Science* 75: 1632-1639
- STEVANI, C. V.-FARIA, D. L. A.-PORTO, J. S.-TRINDADE, D. J.-BECHARA, E. J. H. 2000b: Mechanism of automotive clearcoat damage by dragonfly eggs investigated by surface enhanced Raman scattering. - *Polymer Degradation and Stability* 68: 61-66
- SVIHLA, A. 1961: An unusual ovipositing activity of *Pantala flavescens* Fabricius. - *Tombo* 4: 18
- TOBIAS, W. 1996: Sommernächtliches "Schneetreiben" am Main: zum Phänomen des Massenfluges von Eintagsfliegen. - *Natur und Museum* 126 (2): 37-54
- 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
- VONDEL, B. J. VAN 1998: Another case of water beetles landing on a red car roof. - *Latissimus* 10: 29
- WATSON, J. A. L. 1992: Oviposition by exophytic dragonflies on vehicles. - *Notulae Odonatologicae* 3: 137
- 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.-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
- WILDERMUTH, H. 2007: Polarotaktische Reaktionen von *Coenagrion puella* und *Libellula quadrimaculata* auf Erdbeerkulturen als ökologische Falle (Odonata: Coenagrionidae, Libellulidae). - *Libellula* 26 (3/4): 143-150
- WYNIGER, R. 1955: Beobachtungen über die Eiablage von *Libellula depressa* L. (Odonata, Libellulidae). - *Mitteilungen der Entomologischen Gesellschaft Basel* NF 5: 62-63