

# **Sekélyvizű tavak vízminőség-vizsgálata, állapotfelmérése műholdas távérzékelés segítségével**

**Sváb Emese**

## **Doktori (Ph. D) értekezés**

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar

Földtudományi Doktori Iskola  
Vezetője: Dr. Monostori Miklós, D.Sc, egyetemi tanár

Térképész Doktori Program  
Programvezető: Dr. Klinghammer István, CMHAS, egyetemi tanár



Témavezető: Dr. Zentai László, D.Sc, egyetemi tanár  
ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék  
Budapest  
2008

1. Bevezetés .....	3
2. A vizsgálati terület – a Balaton, és a távérzékelés .....	7
2.1. A Balaton és vízminősége.....	7
2.2. A Balaton fitoplanktonja.....	10
2.3. A tavak vízminőségének meghatározása távérzékeléssel .....	12
2.3.1. A víz fényvisszaverő képessége általában .....	12
2.3.2. A lebegő anyag fényvisszaverése .....	14
2.3.3. A fitoplankton fényvisszaverési tulajdonságai .....	14
2.3.4. A huminanyagok fényvisszaverő tulajdonságai.....	18
2.4. A távérzékelés alkalmazása a Balaton vízminőségének meghatározásában.....	18
3. Alkalmazott módszerek .....	24
3.1. Terepi adatgyűjtés .....	24
3.2. Vízminták elemzése .....	26
3.3. Fényvisszaverés mérés.....	28
3.4. Medencekísérletek .....	33
3.5. A felvételező rendszer kiválasztása .....	37
3.6. Műholdképek előkészítése (előfeldolgozása) .....	41
3.6.1. A képek összeállítása .....	42
3.6.2. Térképi vetületi rendszerbe való illesztés .....	43
3.6.3. Atmoszférikus korrekció.....	46
3.6.4. Az elemzésre szánt területek leválogatása.....	50
3.7. Távérzékelte adatok elemzési módszerei.....	51
3.7.1. Távérzékelte adatok és vízminőség összefüggései (korreláció, regresszió)	51
3.7.2. A „lágý” (soft) osztályozási technika .....	52
4. Eredmények .....	59
4.1. Medencekísérletek eredményei.....	59
4.1.1. Az a-klorofill és a lebegőanyag fényvisszaverési tulajdonságai.....	59
4.1.2. Huminos vízzel végzett kísérletek .....	66
4.1.3. A kísérletek összevetése .....	68
4.2. Terepi mérési expedíciók értékelése .....	70
4.3. Távérzékelte adatok összevetése a vízminőségi adatokkal .....	74
4.3.1. A Balatonon végzett fényvisszaverés korrelálása a vízminőségi jellemzőkkel.....	75
4.3.2. Landsat TM ill. ETM+ adatok és a terepi mérések eredményeinek korrelációja .....	76
4.3.3. Az a-klorofill mennyiségének meghatározása Landsat képek alapján .....	79
4.3.4. Az a-klorofill modell alkalmazása 1994-re.....	82
4.4. Térképek előállítása kutatási eredmény bemutatásához .....	85
4.5. Módszerben rejlő lehetőségek.....	89
5. Összefoglalás .....	90
Köszönetnyilvánítás .....	93
Irodalom.....	94
Mellékletek .....	101

*„A szél járta tó felülről csupa titok,  
szín és fény, és a festő, aki a palettán  
mindezt kikeveri, a szél”*

*(A magyar tenger mellékén című film)*

## **1. BEVEZETÉS**

A tavak és környezetük mindenütt kiemelt természeti értéket képviselnek, ám igen sérülékenyek. Védelmükről gondoskodni akkor lehet, ha minél alaposabb ismeretek állnak rendelkezésre ezeknek az igen összetett rendszereknek az állapotáról és folyamatairól. A tavak vizének minősége kiemelt jelentőségű ebben a tekintetben.

A vízminőség térképezése hagyományosan pontszerű mintavételezés és elemzés alapján történik. Néhány jellemző folyamatos megfigyelésére alkalmas berendezés hajóval való vontatása, pedig vonal menti értéket ad. A mintavételi hajók mozgási sebességéből, a laboratóriumok minta-feldolgozó képességéből ki lehet számítani, hogy mekkora az a vízfelület, melyről (időben, térben) homogénnek tekinthető adat gyűjthető, s ez a terület kisebb lesz a gyorsan, ill. nagyobb lesz a lassabban változó tényezők tekintetében.

Amikor a vizsgált tó kiterjedése meghaladja a fentiekben kiszámított területet, akkor érdemes a távérzékelés nyújtotta lehetőségeket kihasználni. A módszer alapja azon az egyszerű megfigyelésen alapszik, hogy a vízminőséget befolyásoló tényezők hatással vannak a víz fényvisszaverő képességére. A visszavert fény intenzitása alapján, közvetett módon, következtetni lehet az egyes vízminőségi jellemzők mennyiségére (pl. Quibell 1991, Gitelson 1993a, Arenz *et al.* 1996, Han 1996, Lindell *et al.* 1999). A kapcsolat megteremtéséhez – kalibrációhoz –, azonban a hagyományos technikával nyert vízminőségi adatokra is szükség van, igaz csak néhány mérési pontról. Előfordulhat, hogy több jellemző ugyanarra a hullámhossz-tartományra hat, ilyenkor nehézségekbe ütközhet reflektancia alapján történő szétválasztásuk.

Számos esetben sikerrel térképezték távérzékelte adatok – műholdképek, hiperspektrális légi szenzorok – segítségével a-klorofill-eloszlást olyan tavakban (például Kinnereth-tó, Genfi-tó, Angol-tóvidék /Lake District/ egyes tavai), ahol a lebegőanyag-tartalom a vízben elhanyagolható volt. A tavak távérzékeléses megfigyelésére indított, több Európai Unió ország részvételével lezajlott kutatás eredménye szerint (Lindell *et al.* 1999) durva spektrális felbontású távérzékelte adat (pl. Landsat) alapján magas lebegőanyag-tartalom mellett nem lehet az a-klorofill mennyiségét

meghatározni. Megállapították, hogy a természetes vizek reflektanciáját elsősorban annak lebegőanyag-, klorofill-, és oldott szerves szén tartalma határozza meg (Gitelson *et al.* 1990, Quibell 1991, Gaille *et al.* 1992, Hudson *et al.* 1994, Han *et al.* 1994).

A tavak vizének általában akkor alacsony a lebegőanyag-tartalma, ha olyan mély, hogy például a szél által keltett vízmozgások nem keverik fel a fenék üledéket, vagy nem ömlik beléjük olyan folyó, ami sok hordalékot szállítana, esetleg sekélyek ugyan, de fenekükön nincsen felkavarható üledék. A címben jelzett sekélység sokkal inkább a magas lebegőanyag-tartalomra utal, mint vízmélységre. A bemutatandó eljárás megoldást kínál az a-klorofill-tartalom meghatározására aránylag durva spektrális felbontású (Landsat) képek alapján, olyan víztesten, melyre a magas lebegőanyag-koncentráció jellemző.

A vizsgálatok eredménye tematikus térképek sorozata, amelyek információ-tartalma sokkal nagyobb, minthogy azokat változtatás nélkül a térképolvasó közönség elé lehetne bármilyen formában tárni. A térképeket generalizálással tettük olvashatóvá. A generalizálás foka és minősége attól függött, milyen körülményei és lehetőségei voltak a térképi információ közlésének.

#### ***A célok megjelölése, a feladat végrehajtása***

Az elsődleges általános cél olyan eljárás kialakítása volt, amely segítségével távérzékelt adatok alapján lehetséges heterogén eloszlású, magas lebegőanyag-tartalommal rendelkező – sekélyvizű – tavak vízminőségi térképezése. Olyan módszer kidolgozását tűztük ki célul, amely nem csak egyetlen képre – azaz időpontra – vonatkoztatva szolgáltat adatokat, hanem kiértékelhető vele korábban készült űrfelvétel is. Szem előtt tartottuk, hogy a kialakított eljárásnak akár más, magas lebegőanyag-tartalommal rendelkező tavak esetében is lehet alkalmazni a vízminőségi jellemzők meghatározására.

A mintaterület kiválasztásánál szempont volt, hogy rendelkezésre álljon róla minél szélesebb körben az elmúlt évekre, évtizedekre hagyományos módon gyűjtött vízminőségi adat. Ez a Balaton esetében a Balatoni Limnológiai Kutatóintézet (BLKI) adatbázisa segítségével biztosítva volt.

A feladat végrehajtásához lehetőleg olyan műholdkép készítő rendszert kellett választani, amely teljesíti az alábbi kritériumokat:

- spektrális felbontása megfelelő a választott elemzési módszer alapján történő vízminőségi kiértékeléshez,
- térbeli felbontás legyen minél finomabb,
- automatikusan, megbízhatóan készít felvételeket a Föld minél nagyobb területéről (más területek kiértékelésénél a módszer adaptációja minél egyszerűbb lehet),
- archívumában lehetőleg régebbi, akár 8-10 éves felvételek is megtalálhatóak legyenek a módszer ellenőrzése érdekében,
- képei megvásárolhatóak, ill. megszerezhetőek legyenek,
- a lehetőségekhez képest minél több kép vizsgálatára nyújtson lehetőséget: költséghatékony legyen.

Ezeknek a kritériumoknak a vizsgálatok idején leginkább a Landsat műholdak Thematic Mapper (TM) és Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) érzékelői által készített képek feleltek meg.

A Balatonra vízminősége az 1970-es évek közepe óta folyamatosan romlott. A problémát Kis-Balaton védőrendszer kialakítása sem szüntette meg, mert annak üzembe-helyezését követően is előfordultak vízvirágzások. Ennek a folyamatnak a megértéséhez szolgált a biológusoknak adalékot a részletes a-klorofill térkép. Abban, hogy ma már nem tapasztalunk a még az 1990-es évek közepét is jellemző a-klorofill-koncentrációt nyaranta, nem csak a Kis-Balatonnak van szerepe, hanem számtalan egyéb intézkedésnek is, például a szennyvíztisztítás megoldása, a tisztított szennyvíz vízgyűjtőről történő kivezetése, stb.

A Balatonon korábban már történt próbálkozás a vízminőség távérzékeléses adatokon alapuló meghatározására. Ezek a vizsgálatok az 1970-es évek végén indultak, és 1991-ben véget értek. Műholdképek – elsősorban Landsat –, ill. terepi fénymérés alapján a különböző vízminőségi jellemzők mennyiségét célul tűző próbálkozások voltak ezek, melyeket időnként együttesen is alkalmaztak. Kutatásaik alapján gyűjtött tapasztalataik értékesek, egy része megegyezik az itt bemutatandó kutatási eredményekkel, ám nem sikerült megbízható eljárást kidolgozniuk az a-klorofill-tartalom kimutatására.

A választott statisztikai módszer hatékonyságának ellenőrzésére a műholdképek elemzése előtt kísérletsorozatot végeztünk. Egy medence vizéhez különböző mennyiségű lebegőanyagot ill. alga koncentrátumot adtunk, és rögzítettük a fényvisszaverő képességet. A fénymérések eredményeit hasonló módszerrel vizsgál-

tuk, mint a műholdképet, és az eredmények alapján megállapítottuk, hogy lehetséges Landsat műhold által készített képek alapján az a-klorofill-tartalom meghatározása magas lebegőanyag-tartalom mellett is.

Műholdképek készültével párhuzamosan több alkalommal terepi méréseket végeztünk, amik egyrészt vízmintavételből, és a vízminták hagyományos vízkémiai elemzéséből álltak, másrészt spektrométerrel rögzítettük a víz reflektanciáját.

A műholdképeket előkészítéssel tettük alkalmassá a vizsgálatokra, majd összevetettük a mért vízminőségi jellemzőket és a műholdképeken, a mintavétel helyén tapasztalt intenzitásértékeket. Az összes vizsgált időpontban szoros szignifikáns korreláció mutatkozott a lebegőanyag-tartalom és a 3. Landsat sáv között ( $r^2=0,8$ ). A regressziós együtthatók segítségével elkészítettük azt az egyenletet, amellyel később olyan képek esetében is térképezni tudtuk a lebegőanyag-tartalmat, amikor a műholdátvonalással párhuzamosan terepi mintavételezés nem történt.

Egyéb vizsgált vízminőségi jellemzővel, például a-klorofill, nem találtunk minden időpontra jellemző szoros szignifikáns korrelációt. Ezért a már megszokott módszerekkel kivitelezhetetlennek ítélt feladatot más megközelítésbe helyeztük azzal, hogy egy a sekély tavak esetében még ki nem próbált statisztikai eljárással – lineáris szétválasztás – (Linear Spectral Unmixing) sikerült térképeznünk a Balaton vizének a-klorofill-tartalmát.

A módszert sikerrel alkalmaztuk egy korábban – 1994. július – készült Landsat kép elemzésére. A rendelkezésre álló a-klorofill-értékeket az ellenőrzésre használtuk fel. A mért és a számított a-klorofill-mennyiség igen nagy egyezést mutatott.

A vizsgálatok eredményeit tematikus térképsorozaton jelenítettük meg. A térképek nagyfokú generalizálására volt szükség ahhoz, hogy az eredményeket be tudjuk mutatni, például szürke fokozatos térképeken.

## **2. A VIZSGÁLATI TERÜLET – A BALATON, ÉS A TÁVÉRZÉKELÉS**

### **2.1. A Balaton és vízminősége**

A Balaton Magyarország nyugati felén – a Dunántúlon – helyezkedik el, az é. sz. 46° 43' és 47° 04' és k. h. 17° 15' és 18° 10' között. A tó víztükre középvíznél 104,21 m-en (a Balti-tenger felett) kerül el, felszíne e szintnél 596 km<sup>2</sup>, mellyel Közép-Európa legnagyobb tava. Átlagos mélysége 3,25 m. A legmélyebb pont a Tihanyi-szorosban, a Tihanyi-kútnál található, ahol a vízmélység 11-11,5 m. Ezt a bemélyedést a szorosra jellemző erős áramlatok alakították ki. A tó hossza 77 km, átlagos szélessége 7,8 km, a Tihanyi-szorosban a legkeskenyebb: 1,5 km.

Vízgyűjtő területe 5775 km<sup>2</sup>, melyből 2622 km<sup>2</sup> a Zala vízgyűjtő területe, ez a folyó a tó legfontosabb táplálója. Lefolyása a mesterséges Sió-csatorna.

A Balaton vízgyűjtőjének vízföldtani felépítése és vízrajzi viszonyai között szoros összefüggések állapíthatók meg. A Balaton-felvidéki részvízgyűjtőn fakadó források vize a fő-karsztvíztárolóból és a hegységperemi rétegvíztárolókból származik. A főkarsztvíztároló középhegységi típusú dolomitos-mészköves, gyakran 3-4 m vastagságú közbetelepült márga rétegekkel. A Zala-vízgyűjtő forrásait kisebb részben a karsztvíztárolók, nagyobb részben a felszínközeli rétegvíztárolók táplálják, melyek lejtőtörmelékből, löszből és iszapos löszből épülnek fel. Rétegvíztárolókból fakadnak a somogyi-dombsági részvízgyűjtő vízfolyásainak forrásai is (Virág 1997).

A tó medrét ma 6–10 m vastag iszapos üledék, részben folyóvízi hordalék béleli ki (Somogyi 1997), melyet a Zala és egyéb vízfolyások szállítottak a tóba. A levegőből por és pollen ülepedik ki, de a part pusztulása révén is kerül üledék a tóba. Az üledékszemcsék mérete átlagosan 10-40 µm, de előfordulnak 100 µm-es szemcsék is. A déli parton durvább üledék található, az északin finomabb, igen laza szerkezetű, például a felső 5 cm víztartalma 65-80%. Az üledék 20%-a kalcium, 4%-a magnézium, az összes karbonáttartalom 60%, a vastartalom 1,5%, a szerves szén alacsony, 2-4% körül alakul (Heródek *et al.* 1988).

A Balaton és szűkebb környezete mérsékelten meleg éghajlatú. A napsütéses órák száma 2000-2050 óra. A vízfelszín feletti levegő hőmérséklete nyáron kissé alacsonyabb, télen, általában melegebb, mint a környező tájaké. A tó vizének átlagos havi hőmérséklete nyáron meglehetősen magas, júliusban elérheti akár a 22,5°C-ot a

víz sekélysege miatt. A legmagasabb nyári hőmérséklet 26-28 °C is lehet, melyet délután 4 óra körül érhet el (Martonné 1996).

A víz mozgásáért elsősorban a szél felelős. Leggyakoribb szélirányok az északi és az északnyugati. A szél gyakran kelt erős hullámzást, sőt áramlásokat is a tó két vége között (Martonné 1996).

Az átlagos szélsébség 3,2 m/s a Balaton felett. A legszelesebb hónap a július, 5 m/s-mal, a legkevésbé szelesek az őszi hónapok. Nyáron 15-20 viharos nap is lehet, amikor a szélsébség meghaladja a 15 m/s-ot, de akár 45 m/s is előfordulhat.

Ha a szél erőssége 2, 3, ill. 4 m/s, a tó vize rendre 2, 3, és 4 m mélységig kavardik fel abban az esetben, ha eléri ezt a mélységet. Ám a tó igen sekély – átlagos mélysége 3,25 m –, ezért amikor tartósan 4 m/s-nál erősebb szél fúj, akkor az egész tó vize fölkavardik, sőt még a legfelső iszapréteg finom üledéke is feljut a felszínre, amitől viharban a víz barnásszürkévé válik. A lebegőanyag-tartalomnak döntő szerepe van a vízfelszín alatti fényviszonyok alakulásában, s viharban akár 500 mg·l<sup>-1</sup> is lehet töménysége (Entz 1983). A tó hossz tengelye mentén délnyugati irányban haladva általában nő a víz lebegőanyag-tartalma.

Tihanytól északkeletre a tóra átlagosan 550-590 mm, délnyugatra 630-690 mm csapadék hull (Martonné 1996). A Balaton vízutánpótlását részben a felszínére hulló csapadék, részben az idetorkolló vízfolyások biztosítják, melyek közül legjelentősebb a Zala. A tóból jelentős mennyiségű víz párolog el évente, a vízfelesleget a Sión vezetik le.

A 2.1. táblázatban a vízháztartás elemeinek alakulását mutatjuk be két korábbi időszakra és 2000-re. A 2000-es év értékei ezért térnek el nagyban a többi adatától, mert egyetlen év mérlegét mutatják be, nem egy időszak átlagát.

	1921-70 <sup>1</sup> (mm)	1971-95 <sup>1</sup> (mm)	2000 <sup>2</sup> (mm)
csapadék	633	596	457
hozzáfolyás	954	810	553
párolgás	902	882	1033
lefolyás (leeresztés)	681	423	375
készletváltozás	+4	+12	-430
természetes készletváltozás	+685	+517	-23
vízfelhasználás a Balatonból	n. a.	34	32

2.1. táblázat. A vízháztartás alakulása 1921 óta (forrás: <sup>1</sup>Szabó 1997, <sup>2</sup>Szabó 2001)



Bulla Béla így ír a Balaton fizikai tulajdonságairól (1962): „A tó vize szulfátos, alkaliföldfémek oldatokban viszonylag gazdag, mert lefolyása viszonylag gyenge, párolgása pedig erős. Ezért is, de mert gyakran felkavarják a hullámok, a víz átlátszó-sága csekély. Színe zöldeskék.”

A Pannon enciklopédiában ezt olvashatjuk (Somogyi 1997): „A víz színe alkáli sókban való bősége miatt nyugalmi állapotban zöldesszürke, azonban az égbolt felhőzete és a hullámzás szerint váltakozik, és így igen különböző színárnyalatok jönnek létre. A víz sótartalma  $450 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  körüli, kémhatása kissé lúgos.”

A Balaton vizének fő kationjai:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , anionjai:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (Entz 1983). A kalciumion-tartalom általában a Zala-torkolattól a Siófoki-mence irányába csökken, a magnéziumion-tartalom pedig növekszik (Virág 1997).

A tó vizének kémhatása lúgos (8,3 pH) nyílt vízen, és a part közelében a semlegeshez tart. Vízirágás idején a pH 9,0 értékig emelkedhet, amit az *Anabaena spiroides* fonalas kékalga – cianobaktérium – felúszó tömegei okoznak, s ez nagymértékű mézskiválással jár együtt. A virágzás végén a kémhatás visszaáll az eredetire (Heródek *et al.* 1988).

A Balatonra jellemző az állandó pH érték és a sekélységgel együtt járó csekély átlátszóság és hamvas szín, amit a  $\text{CO}_2$  távozásakor kicsapódó  $\text{CaCO}_3$  okoz. Az algák fotoszintézise következtében leváló biogén mészkő is szerepet játszik a víz fényklímájának kialakításában (Köte 1986, Felföldy 1986).

A tó vízminősége napjainkban ismét jónak mondható, de nem volt ez mindig így. Az 1960-as évek óta folyamatosan nőtt a külső növényi tápanyagterhelés a vízgyűjtőn bekövetkezett társadalmi-gazdasági fejlődés miatt: például nőtt az idegenforgalom és az urbanizáció foka, egyre intenzívebb lett az ipari és a mezőgazdasági termelés. Ezt a fejlődést a csatornahálózat és a szennyvíztisztítás fejlesztése nem követte. Ez is oka volt az eutrofizáció növekedésének az 1980-as évek elején. Mára a tápanyagterhelés jelentősen csökkent az 1970-es évekhez képest. Ennek oka a csatornahálózat kiépítésében, a tisztított szennyvíznek a vízgyűjtőről való kivezetésében – a szennyvíztelepek foszforszűrővel való ellátásában –, a Kis-Balaton helyreállításában és a kevésbé intenzív ipari és mezőgazdasági tevékenységben keresendő. A Balaton ökoszisztémája csak lassan válaszolt ezekre a pozitív változásokra.

A Balaton a Föld egyik legjobban kutatott tavának tekinthető (Martonné 1996), szinte minden tudományterület szakemberei számtalan tudományos munkája bizonyítja tavunk érdekességét, egyediségét. Nem csak hazai, hanem nemzetközi érdeklő-

désre is számot tart a Balaton. Ha csak a vízügyi vonatkozású kutatásokat nézzük, akkor is szinte minden földrész képviselteti magát a hazai kutatókkal együttműködők sorában.

## 2.2. A Balaton fitoplanktonja

Fitoplanktonnak nevezzük a vízben lebegő, mikroszkopikus méretű algákat vagy növényeket. A fogalomba beleértjük a kékalgákat is, amelyek cianobaktériumok, de méretük és vízoszlopban elfoglalt helyük miatt kerülnek ebbe a kategóriába (Felföldy 1986).

A Balaton fitoplanktonjáról részletesen szól „A Balaton múltja és jelene” (Virág 1997) című könyv, valamint a „Cianobaktériumok és a Balaton vízminősége” című cikk (Vörös *et al.* 1999). Ezek alapján a következőkben foglalhatjuk össze jelenlegi ismereteinket.

A Balatonban előforduló algafajok számát napjainkban 1400-ra teszik. A rendszeres vízminőség-vizsgálatok során végzett alga-meghatározások az elmúlt két évtizedben azt mutatták, hogy mintegy 25-30 algafaj nagyobb számban kimutatható, de ezek összetétele évről évre változik.

A fitoplankton mennyiségi és minőségi szezonális változása jelentős. Télen a jég-tükör alatt – ha simára fagy be, és sokáig nem borítja hó – az üledék felszínén kova- és zöldalgákból alakul ki „algaszőnyeg”. Miután a jég elolvad, az olvadékvizek által a tóba szállított tápanyag hatására, alakulhat ki egy kora tavaszi virágzás április tájékán, melyet a diatomák dominanciája jellemez. Májusra a fitoplankton visszaesése tapasztalható. Június közepétől rendszerint fokozatosan nő az algabiomassza, főleg baráz-dásmoszatok (pl. *Ceritum hirundinella*) és részben a zöld- és kékalgák megjelenése jellemző. Ez a folyamat kiterjed a tó összes medencéjére. A vízvirágzások többnyire a nyár végi hőmérséklet-maximumok után következnek be – többnyire szeptember elején –, leginkább a legsekélyebb, tápanyaggal jobban ellátott Keszthelyi-medencében. A fitoplanktonban ilyenkor a legnagyobb számban kékalgák vannak jelen (*Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena flos-aquae*). A virágzásnak a víz hőmérséklet őszi csökkenése következtében hamar vége szakad.

Látható tehát, hogy a lassan induló algabiomassza növekedést felgyorsítja a tó erőteljes felmelegedése, amelynek időpontja igen változó lehet: július, augusztus, akár szeptember eleje. A biomassza mennyiségének változása fokozatos, egyik napról a

másikra csak erősebb viharok következtében mutat nagyobb változást. Vihar után a növekedés folytatódik egészen a víz hőmérsékletének csökkenéséig.

A Balatonban már több mint három évtizeddel ezelőtt is előfordultak epizódszerű alga-elszaporodások: például 1966 őszén a Keszthelyi-medencében. Ezek azonban csak előjelei voltak a tó 1970-es években felgyorsult eutrofizálódásának. Ettől kezdve megszűnt – a korábban aggodalmat keltő – hínárosodás veszélye, és a tó legtömegesebb élőlényei a nyári időszakban elszaporodó fonalas nitrogénkötő cianobaktériumok lettek.

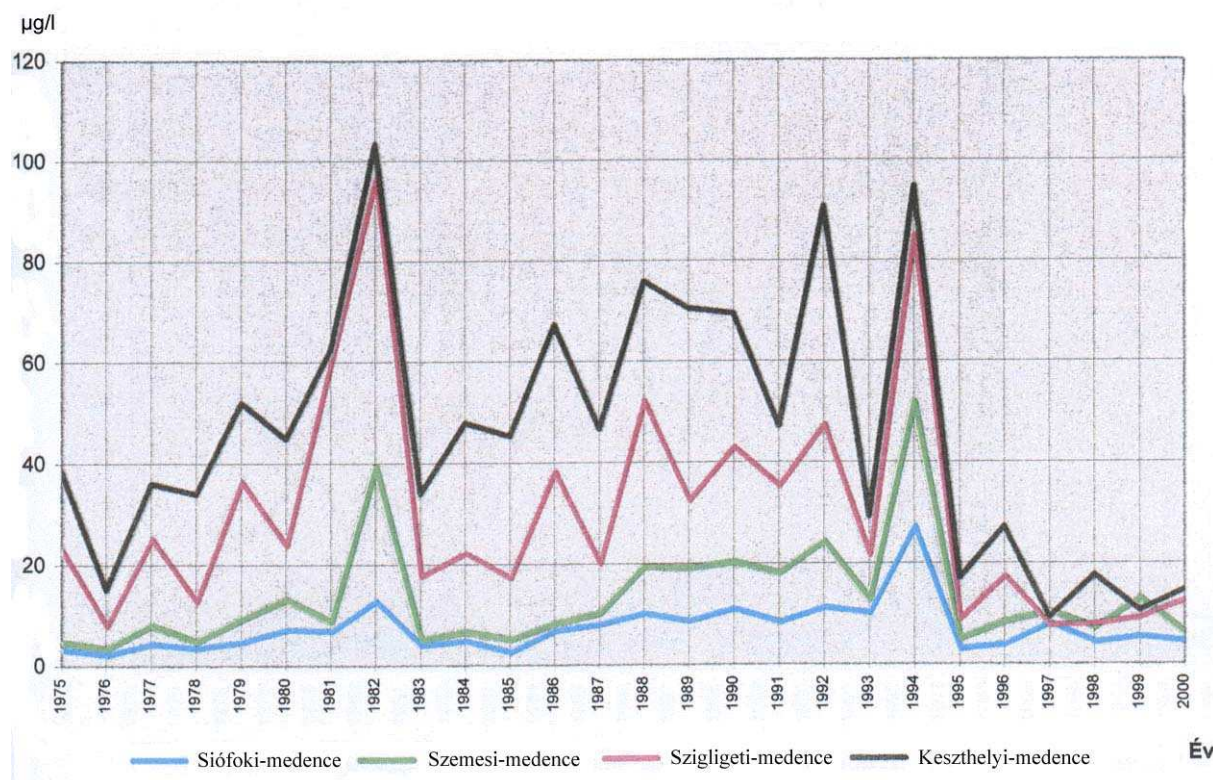
A fitoplankton mennyiségének időbeli változásán kívül megfigyelhető a tó hossz-tengelye mentén ÉK-DNy-i irányú növekedése is. Ezt támasztották alá a rendszeres és korszerű módszerrel végzett mennyiségi fitoplankton-vizsgálatok, melyek 1965-ben indultak meg a Balatonon.

1978 augusztusában észlelték először a *Cylindrospermopsis raciborskii* megjelenését, s e trópusi eredetű kékalga faj 1982-re dominánssá vált az egész tavon. 1995-ig ez az algafaj tette ki az augusztusi fitoplanktontömegnek több mint 80%-át. A vízvédelmi célú nagy beruházások (Kis-Balaton, szennyvíz- és foszforleválasztó Zalaegerszegen, közművesítés és szennyvíztisztítás – tisztított szennyvíz vízgyűjtő területéről való kivezetés – a Balaton környéki településeken) hatására jelentősen csökkent a Balaton foszforterhelése. Ezt többéves késéssel – 1995 óta – követte a fitoplankton biomasszájának csökkenése is. Késés jellemzi a fitoplankton összetétel visszaállását is a korábban észleltre, ami elsősorban a *Cylindrospermopsis raciborskii* jelentős visszaszorulását jelenti.

A fitoplankton tömegének és produkciójának csökkenése a Balaton egész ökológiai rendszerének gyökeres átalakulásával, módosulásával jár. Megnőtt például a víz átlátszósága. Ez egyéb hatásokkal együtt kedvez a hínár szaporodásának, ami komoly problémát okoz a strandokon.

A vízben élő algatömeg nagyságának meghatározására a rutinszerű vizsgálatokban az a-klorofill-koncentráció meghatározása terjedt el. A 2.1. ábrán a nyári hónapok a-klorofill átlagait láthatjuk 1975-től 2000-ig a Balaton egyes részmedencéiben (Szabó szerk. 2001). Jól látható, hogy az a-klorofill-koncentráció mindig a Keszthelyi-medencében volt a legmagasabb, kelet felé haladva egyre csökkent, és a Siófoki-medencében a legalacsonyabb, akár alacsony, akár magas a-klorofill-tartalmú nyarat tekintünk. Nagyjából kétévente volt nagyobb vízvirágzás. A legnagyobb csúcsok a következő években voltak: 1982, 1992 és 1994.

A legnagyobb maximumok tekintetében is jelentős volt ez a három év. 1992 nyarán a Keszthelyi-medencében  $250 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  feletti a-klorofill-koncentrációt mértek, további három évben érte el, és haladta meg kis mértékben, a  $200 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t: 1982, 1986, 1994. 1994-ben a Szigligeti-medencére is kiterjedt az igen magas a-klorofill-tartalom. Ez a jelenség azt jelentette, hogy a különösen magas koncentráció az addig védettebbnek vélt keleti medencéket is fenyegetheti. A vízgyűjtőn lezajlott pozitív változások hatására ilyen magas értékeket már nem mértek, a víz minősége javul.



2.1. ábra. Az a-klorofill-koncentráció június, július, augusztusi mérési eredmények átlagértékei (Szabó *et al.* 2001)

### 2.3. A tavak vízminőségének meghatározása távérzékeléssel

A vízminőség térbeli és időbeli változásának követése tavak, tórendszerek esetében hagyományos vízmintavételi technikával nehézkes (George 1997, Dekker *et al.* 2002). Minél nagyobb a vizsgált vízfelület annál költséghatékonyabb a távérzékeléssel nyert adatok vízminőségi alkalmazása. Ebben a fejezetben összefoglaljuk azokat a vizsgálatokat, amelyek megalapozták kutatásainkat.

#### 2.3.1. A víz fényvisszaverő képessége általában

A természetes vizek fényvisszaverése a vízfelszín, a vízben lebegő anyagok és a medencefenék reflektancia tulajdonságainak komplex eredője (Mucsi 1995, 2004). A

víz egyik legjellemzőbb spektrális tulajdonsága az infravörös tartománytól fellépő energiaelnyelése (Lillesand *et al.* 1999).

Számos kísérlet történt már arra, hogy meghatározzák az egyes vízminőséget befolyásoló komponensek reflektanciáját. Ezek során megállapították, hogy elsősorban a víz fitoplankton biomasszájának becslésére szolgáló a-klorofill-, lebegőanyag- és oldott szerveszén-tartalma (DOC) hat a víztest fényvisszaverő-képességére (Gitelson *et al.* 1990, Quibell 1991, Gaille *et al.* 1992, Hudson *et al.* 1994, Han *et al.* 1994).

Nagy térbeli felbontóképességű hiperspektrális szenzorokat állítottak Föld körüli pályára, melyeket a vízminőség és az óceán színének megfigyelésére terveztek. Ilyen például a SeaWiFS (Conkright *et al.* 2003, Darecki *et al.* 2005), vagy a MODIS (Hu *et al.* 2004). Térbeli felbontásuk (SeaWiFS: 1,1 km; MODIS: 250-500 m, MERIS 300m) a nyílt tenger és a partvidék térképezésére megfelelőek, azonban édesvízi tavak esetében, ahol a kutatás éppen a kisebb skálájú inhomogenitások megfigyelésére irányul, ezek felhasználási lehetősége korlátozott.

A magas lebegőanyag-tartalommal jellemezhető édesvízi tavak a-klorofill-tartalmának meghatározására ígéretes előrelépések történtek már légi hiperspektrális szenzorok bevetésével (pl. Dall'Omo *et al.* 2003). Abban az esetben, ha nem légifelvételt alkalmazunk a vízminőségi jellemzők meghatározására, a durva spektrális felbontású, műholdakra rögzített kamerák által készített képek alkalmazása marad lehetőségként (Dekker *et al.* 1992, George 1997, Thiemann *et al.* 2002).

A lebegőanyag meghatározása távérzékelte adatok alapján egyszerű feladatnak tekinthető (pl. Ritchie *et al.* 1990, Harrington *et al.* 1992). Az a-klorofill becslése korlátokba ütközik különösen olyan durva spektrális felbontással rendelkező felvételező rendszer alkalmazása esetén, mint a Landsat műhold TM és ETM+ érzékelői, vagy az újabb ASTER, IKONOS vagy Quick Bird műholdak.

Az olyan mély tavak esetén, ahol a lebegőanyag-tartalom egységesen alacsony az egész víztesten, az a-klorofill jó korrelációt mutatott a műholdas távérzékeléssel nyert jobb terepi, rosszabb térbeli felbontással bíró adatokkal (Mayo *et al.* 1995, Brivio *et al.* 2001). Amikor a tavon a lebegőanyag mennyisége magas, az általában heterogén eloszlású, és az a-klorofill-tartalmat elfedi, azt nem lehet megbízhatóan térképezni a nagyobb sávszélességgel rendelkező távérzékelte adatok felhasználásával (Lindell *et al.* 1999). Az irányított osztályozáson is túlmutató statisztikai módszerek, az ún. „lágý” (soft) osztályozás a jövő útja, ahol a csoporthoz való tartozás mértékében rejlik az információ (van der Meer 1995). A tengerek partvidékeinek a-klorofill mennyiség-

gét meghatározó empirikus algoritmus (OC4), amely SeaWiFS adatok alapján „lágý” képosztályozási technikán alapszik, és neutrális hálózatok segítségével veszi igénybe (Dzwonkowski *et al.* 2005).

### 2.3.2. A lebegő anyag fényvisszaverése

A víz színét befolyásolja, hogy mennyi és milyen színű lebegőanyagot tartalmaz. Amennyiben világos színű lebegő-anyagot adunk a vízhez, színe egyre világosabb lesz, egyre jobban visszaveri a fényt. Ezt az általános megállapítást fényvisszaverési vizsgálatokkal is alá lehet támasztani. Itt most csak néhányat mutatunk be példaként.

Quibell (1991) mesterséges megvilágítás mellett folytatott medencekísérleteket. 200, 400 és 600 mg·l<sup>-1</sup> lebegőanyag-koncentrációjú desztillált víz 0,4–1 µm közötti reflektanciát vizsgálták. Azt találták, hogy a 200 és 400 mg·l<sup>-1</sup> töménység mellett tapasztalt visszaverési görbék menete hasonló volt, de a csúcsok a magasabb koncentráció mellett a nagyobb hullámhosszak felé tolódtak el. A 400 és 600 mg·l<sup>-1</sup> töménységű vizek fényvisszaverési tulajdonságaiban már alig volt különbség. A fényvisszaverés a hullámhosszak függvényében a következőképpen alakult: 0,55–0,65 µm között volt egy nagy reflektanciájú zóna, amit egy kisebb hullámvölgy és 0,8–0,81 µm-en egy helyi maximum követett.

Han (*et al.* 1994, 1996) szintén medencekísérleteket folytattak természetes fény mellett. Vizsgálták az egyes hullámhosszakon (0,4–0,9 µm) kapott reflektancia értékek és a lebegőanyag-tartalom korrelációs együtthatóját. Azt állapították meg, hogy az optimális hullámhosszak lebegőanyag-tartalom vizsgálatára a 0,7 µm feletiek, legjobb a 0,8–0,9 µm-es tartomány.

Abban az esetben, ha a víztest lebegőanyag-tartalma megfelelően kicsiny, a fényenergia egy része elérheti a mederfeneket, és onnan verődhet vissza. Ilyen jellegű tavakban a mederfenék morfológiájának térképezése is elvégezhető távérzékeléses módszerrel (Szabó *et al.* 1984, 1985, Winterbottom *et al.* 1997). A Balaton vizében levő nagy mennyiségű lebegő anyag és algabiomassza miatt a fenékről többnyire nem történik visszaverődés.

### 2.3.3. A fitoplankton fényvisszaverési tulajdonságai

Gitelson (*et al.* 1993a, b) vizsgálták a fitoplankton fényvisszaverési tulajdonságait a Balatonon. Az 1985. szeptember 2–3-án végzett mérések alapján ismertetik,

hogy milyen különbségek adódhatnak a reflektancia-görbékben a különböző a-klorofill-koncentráció (5, 23, 82 és 98  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) mellett. A minták lebegőanyag-tartalmáról nem tesznek említést. Az alkalmazott Spektrum-01-es spektrométer 0,45–0,75  $\mu\text{m}$  között 0,001  $\mu\text{m}$ -es spektrális felbontással dolgozott.

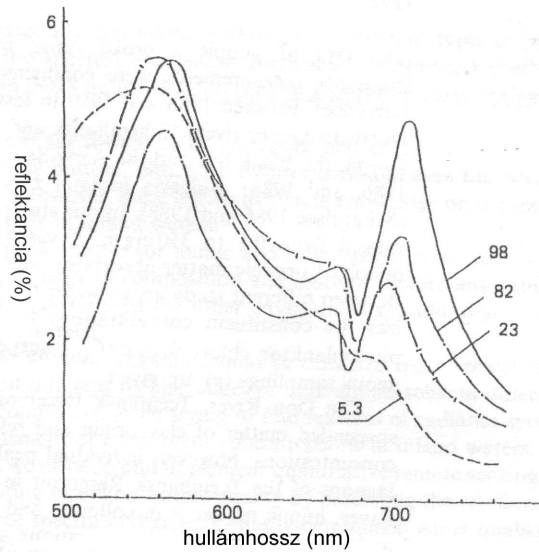
A következő megállapításokat tették a visszaverési görbék alapján: 0,5  $\mu\text{m}$  alatt az algák szintestjei és az oldott szerves anyag fényelnyelése miatt alacsony visszaverési értékeket tapasztaltak. 0,56–0,59  $\mu\text{m}$ -ig növekszik a reflektancia, a fitoplankton fotoszintetizáló pigmentjeinek csökkenő fényelnyelése, és az ezen a spektrumon megjelenő, a lebegő anyagokról való fényvisszaverődés miatt. Ezt a lokális csúcsot két helyi minimum követi 0,63  $\mu\text{m}$  és 0,670  $\mu\text{m}$ -en, mindkettő az algák fényvisszaverési minimumához kapcsolódik: az első a cianobaktériumok pigmentjeinek (pikocianinjának) elnyeléséhez, a második az – *in vivo* – a-klorofilléhoz.

Visszaverési helyi maximum tapasztalható 0,685–0,715  $\mu\text{m}$  között, melyre már több kutató is megpróbált magyarázatot adni:

- a-klorofill pigmentek fluoreszkálása,
- a fény szórásában beálló anomália az előtte levő minimum miatt,
- az algabiomassza és a víz közös abszorpciós görbéjének minimuma az oka.

Gitelson (*et al.* 1993a) hangsúlyozza, hogy ez a 0,71  $\mu\text{m}$  hullámhossz környékén lévő csúcs a fitoplankton sajátos fényvisszaverési jelensége.

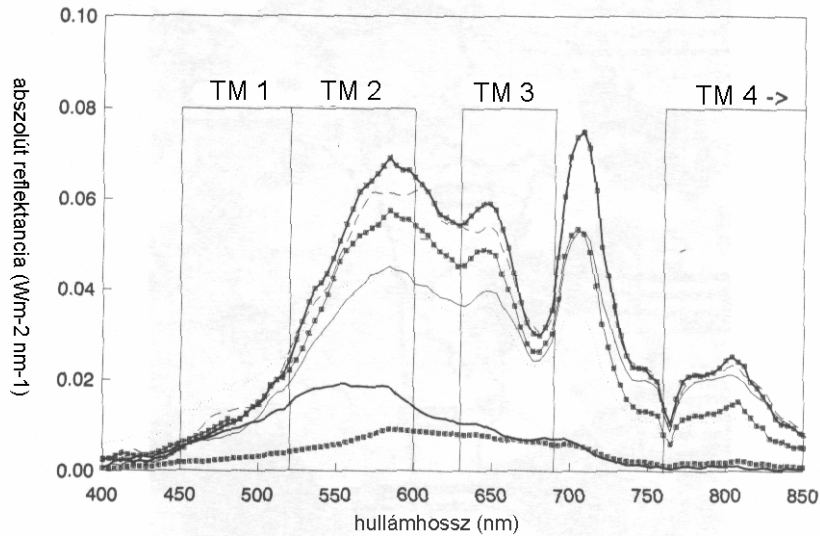
A Balaton esetében azokon a helyeken, ahol az a-klorofill-tartalom nem haladta meg a 20  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t, ott 0,685  $\mu\text{m}$ -en volt a csúcs (2.2. ábra). Növekvő koncentrációval ez a csúcs a nagyobb hullámhosszak felé tolódott el. Ennek oka valószínűleg a 0,68  $\mu\text{m}$ -en történő fényelnyelésben keresendő.



2.2. ábra. Az 1985 szeptemberében a Balatonon tapasztalt fényvisszaverési görbék. A számok az a-klorofill-tartalmat jelölik  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -ben. (Gitelson *et al.* 1993a)

Hasonló fényvisszaverési görbéket tapasztaltak holland tavak vizsgálata során (Dekker *et al.* 1992, 1993). Ebben a tanulmányban tavak vizének fényvisszaverési karakterisztikáját vizsgálták légi, vízfelszínközeli (*in situ*) és laboratóriumi spektrométeres mérések alapján. Kissé szélesebb hullámhossztartományon (0,4–0,85  $\mu\text{m}$ ) működő spektrométert alkalmaztak, 0,001  $\mu\text{m}$ -es sávszélességgel. Igen eutróf, magas humintartalmú tavakat vizsgáltak Hollandiában. Megállapították, hogy a reflektancia mértéke 0,5  $\mu\text{m}$ -ről 0,4  $\mu\text{m}$ -re exponenciálisan csökken, annyira, hogy lehetetlen ezen a spektrumon távérzékeléssel kimutatni. Az atmoszférikus hatások is jelentősek még ebben a tartományban, és a szenzorok jel-zaj aránya sem kielégítő. A huminanyagok és az algák pigmentjei nyelik el a fényt ezen a tartományon. Ezért Dekker (*et al.* 1992) szerint a vízminőség jellemzésére legalkalmasabb tartomány 0,5 és 0,8  $\mu\text{m}$  között van, mert itt lehetőség nyílik a cianobaktériumok pigmentjének mérésére, az a-klorofill-tartalom becslésére. 0,85  $\mu\text{m}$ -ről 0,9  $\mu\text{m}$ -re a víz okozta fényabszorpció gyorsan nő.





2.3. ábra. A víz fényvisszaverő tulajdonsága holland tavakon a Landsat TM érzékelő sávjainak (TM 1–4) feltüntetésével (Dekker *et al.* 1992)

Dekker (*et al.* 1992) megállapítja, hogy a nagy sáv szélességű szenzorok (Landsat TM) esetén nincs lehetőség az alga szintestek által okozott elnyelési jelenségek elkülönítésére (2.3. ábra). A látható fény tartományába eső sávok spektrális értelemben igen szélesek (0,6–0,8  $\mu\text{m}$ ), ezért a növekvő fényvisszaverést növekvő lebegőanyag-tartalommal lehet azonosítani. A nagy sáv szélesség elfedhet olyan visszaverési sajátosságokat, melyek kis hullámhossztartományban játszódnak le (Dekker *et al.* 1992, 1995). A 2.3. ábrán jól látszik, hogy a Landsat TM az algabiomassza olyan jellegzetes fényvisszaverési helyén nem érzékel, mint a vörös és a közeli infravörös közti átmenet (0,7  $\mu\text{m}$ ).

Javaslatot tesz eutróf tavak vízminőségi vizsgálatára alkalmazandó sáv kiosztásra (S=sáv):

- S1: 0,51–0,53  $\mu\text{m}$ . A spektrumnak ebben a tartományában a fényvisszaverés mérhető szintre nő.
- S2: 0,555–0,575  $\mu\text{m}$  és S3: 0,59–0,61  $\mu\text{m}$ . Ezek a sávok az első visszaverési csúcs környékén helyezkednek el, melynek oka az alga szintestek elnyelési minimuma. A visszaverés mértékét ezekben a tartományokban koncentrációjával arányos mértékben növeli a lebegő anyag.
- S4: 0,62–0,64  $\mu\text{m}$ . A sáv a 0,63  $\mu\text{m}$  körüli minimum észlelését végzi. A minimum oka a cianobaktériumok fényelnyelése.

–S5: 0,645–0,655  $\mu\text{m}$ . Az előző sáv utáni helyi maximum detektálására hivatott sáv.

–S6: 0,66–0,67 és S7: 0,67–0,685  $\mu\text{m}$ . Az a-klorofill fényelnyelési csúcsa felé vezető utat és magát az elnyelési maximumot vizsgálja.

–S8: 0,695–0,715  $\mu\text{m}$ . A visszaverési minimum után – annak ellenlábasként – megjelenő maximumot detektálja, mely eutróf tavak esetén igen jellegzetes.

–S9: 0,77–0,8  $\mu\text{m}$ . Ez a sáv már a közeli infravörös tartományban található, ahol a víz fényelnyelése élesen megnő. A fény nagymértékű szóródása miatt azonban még tapasztalható visszaverődés, ezért ezt a tartományt nem mindig tartják teljesen fényelnyelőnek.

#### 2.3.4. A huminanyagok fényvisszaverő tulajdonságai

A huminanyagok egy összefoglaló név, melyen belül három vegyületcsoportot különböztetünk meg (V.-Balogh *et al.* 1996):

– a humin, ami oldhatatlan vízi környezetben, ezért például az üledékben található,

– huminsavak, melyek 1 pH alatt oldhatatlanok,

– fulvosavak, melyek minden körülmény között oldhatóak.

A két oldható csoport van magában a vízoszlopban. A huminsavat kémiaiilag nem lehet definiálni, mert véletlenszerűen összekapcsolódó vegyületek elegyéből áll. A felszíni vizekben az oldott szerves szén akár 70%-át adhatja a huminanyagoknak, amelyek döntően a fulvosavak.

A vízben lévő huminanyagok a fényt elnyelik, különösen az ultraviola tartományban (Arenz *et al.* 1996). Jellemző fizikai tulajdonságuk, hogy színük barna. Legsötétebb a humin, világosabb a huminsavak és a legvilágosabb a fulvosavak frakció. Ennek oka, hogy olyan anyagokat tartalmaznak (kromoforok), melyek vízben oldva jobban elnyelik az ultraviola sugárzást (Kirk 1994). A dolgozatban a huminanyagos sötét színű vizet összefoglalóan huminos víznek nevezzük.

#### 2.4. A távérzékelés alkalmazása a Balaton vízminőségének meghatározásában

A Balaton vízminőségének eddigi vizsgálatairól elsősorban a Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóközpont (VITUKI) budapesti könyvtárában fellelhető éves kutatási jelentésekből lehet tájékozódni. Ebben a fejezetben többnyire ezekre a – kéziratnak

minősülő – kutatási jelentések támaszkodunk. A munkálatok kisebb része tudományos folyóiratokban is fellelhető.

A kutatási jelentések tanúsága szerint a Balaton távérzékelés vizsgálata már az 1970-es évek közepén megindult, de a rendszerváltás miatt 1990-ben vége szakadt. Kezdetben a műholdképek hagyományos vízkémiai adatokkal való összevetésével próbálkoztak, később spektrométeres méréseket végeztek a Balaton fényvisszaverési tulajdonságainak meghatározása érdekében. Végül a reflektancia vizsgálatokat összehangba hozták műhold áthaladásával a vízminőségi vizsgálatokon kívül.

Az elemzett műholdfelvételeket kivétel nélkül a Landsat műholdcsalád eleinte Multispectral Scanner (MSS) majd TM érzékelője készítette. Ezeknek hullámhossztartományait elsősorban a szárazföld megfigyelésére alakították ki, de ez nem zárja ki teljesen a képek vízminőségi célú alkalmazását.

Az első elemzett Landsat MSS képek 1976. április 1-én és 1978. szeptember 9-én készültek. A műhold áthaladása és a balatoni mintavételezés között 1976 áprilisában hat, 1978 szeptemberében négy nap telt el. Vizsgálták a vízminőségét alapján kapott a-klorofill és az egyes csatornák intenzitásértékei közötti összefüggést. A második kép esetében, ahol a felvételezés és a terepi mintavételezés között rövidebb idő telt el – és a szél is kevésbé kavarta át a tavat –, jó korreláció adódott az a-klorofill és a 4. csatorna értékei között ( $r=0,94$ ). Elkészítették a lineáris regressziós egyenletet a 4. csatorna adatai segítségével, majd a tavat illető képpontokra kiszámították az a-klorofill-koncentrációt. Ezt követően négy kategóriába sorolva az értékeket tematikus térképen ábrázolták az eredményt (Büttner *et al.* 1981). Többé nem sikerült ilyen jó korrelációt kimutatni egyetlen sáv és az a-klorofill-koncentráció között, még TM képek esetében sem.

1981. július 2-án a műholdátvonulással párhuzamosan vett vízminőség minták segítségével értékelték ki a Landsat MSS képet. A kép koordinátarendszerbe való illesztése oly módon történt, hogy a Balatonról átlátszó fóliára 1:625 000 méretarányú vázlatot készítettek, amit a monitorra ragasztottak, a képet pedig alátorzították. Légköri korrekciót nem végeztek. A különböző sávok intenzitásadatai és a vízminőségi jellemzők között talált összefüggések alapján Bayes-féle osztályozás segítségével a következő tematikus térképeket készítették el: a-klorofill, lebegőanyag, Secci-féle átlátszóság, UV extinkció (vízminőség fényelnyelése 0,254  $\mu\text{m}$  hullámhosszon 1 cm-es küvettában). Próbálkoztak a műholdfelvétellel párhuzamosan légi távérzékeléses adatgyűjtéssel is, de ezt technikai problémák miatt nem tudták kivitelezni. AN-30-as repülőgépről tervez-

ték MKF-6-os spektrométerrel hatsávós képek készítését (Szabó *et al.* 1984, Motyovszki 1985).

1981-ben egy kép elemzésében japán szakemberek is részt vettek. Motyovszki szakdolgozatában (1985) megjegyzés nélkül szerepel ez, a Keszthelyi-öbölben az a-klorofill-mennyiségét ábrázoló, vízminőségi tematikus térkép.

Az 1980-as évekre jellemző volt, hogy a műholdképeket fogadó földi állomás (pl. Fucino, Olaszország) tévesen adta meg a műhold áthaladásának időpontját. Megtörtént az is, hogy kárbaveszett a szakemberek terepi mintavételezése, mert pályamódosítás miatt a műhold nem készített felvételt (pl. 1982). Arra is volt 1986-ban példa, hogy a kutatók időben kaptak értesítést arról, hogy nem készül júliusban kép, majd szeptemberben sem. Előkészültek a mérőexpedíció megismétlésére októberben. Ekkor azonban már az a-klorofill kis töménysége miatt el sem végezték a vizsgálatokat.

A terepi mintavételi pontok helyzetét, a mérőhajó útvonalát parti mérőállomásokról előremetszéssel határozták meg 50 cm-s pontossággal, ami megfelel a Landsat MSS és TM felvételeken való azonosításhoz. A mintázási munka koordinálását URH-rádiók segítették, és több mérőcsoport összehangolt munkáját igényelte.

1983-ben és 1984-ben az év folyamán két mérési expedíciót terveztek, mindegyiket műholdátvonulás idejére: egyet nyár elejére (induló a-klorofill) és egyet nyár végére (tetőző a-klorofill). A képkiértékelés (MSS) első lépése az egyes vízminőségi jellemzők és a vízmintavételi pontokhoz tartozó képpontok körüli 3×3 képpont átlaga közötti korreláció vizsgálata volt. Nem találtak lineáris regressziós egyenlet készítésére alkalmas szignifikáns összefüggést se a-klorofill-tartalomra, se lebegőanyag-töménységre. Második lépésként irányított osztályozást hajtottak végre. A hasonló tulajdonságú vízmintákból alakították ki a tanulóterületeket. Mindig csak azokat a sávokat használták föl, amivel a vízminőségi jellemzők legjobban korreláltak. Az eredmény kategória-térképek sorozata volt, mely kiterjedt az a-klorofill-, a lebegőanyag-, az oldott szervesszén-mennyiségének a kép készítésének időpontjára vonatkozó bemutatására. 1984-ben a nyár eleji felvétel (1984. június 12.) képpontjait a-klorofill-tartalomra az ötödik sáv denzitás-szeletelésével osztották csoportokba.

Landsat TM úrfelvétel alapján készült 1987. augusztus 23-án vízminőségi interpretáció. Az osztályok kialakításához olyan referenciapontokat használtak, amelyek vízminőségi értékei (a-klorofill-tartalom, lebegőanyag-mennyiség, fluoreszcencia) nem estek messze az osztályátlagtól. Egy osztályba 5-10 mintavételi pont tartozott. Ez

után Bayes-féle osztályozást hajtottak végre a termális infravörös csatorna értékeinek elhagyásával (Kozák 1995). Az eredmény tematikus térképek sorozata lett, ahol az egyes képpontokról csak azt lehetett megmondani, hogy mely kategóriába tartoznak – pontos értéket ez a módszer nem ad. Nem találtak megfelelően szoros korrelációt a referenciaadatok és az egyes sávok intenzitásértékei között. Szignifikáns összefüggés csak a TM2/TM3-as sávok aránya és az a-klorofill-koncentráció között adódott:  $r=0,84$ , ami logaritmikus egyenletre vezetett (Varga *et al.* 1988).

A terepi spektrométerrel végzett vizsgálatok során a vízfelszínről távozó sugárzásban rejlő vízminőségi információ dekódolása (Gitelson *et al.* 1990), és nem közvetlenül műholdképek kiértékelése volt a cél. A rosztovi Hidrokémiai Intézet (volt Szovjetunió) által fejlesztett Spektrum-01 elnevezésű spektrométer segítségével, a VITUKI és más kutatóintézetek munkatársainak együttműködésével három évben is (1985, 1986 és 1988) történt reflektancia mérés a Balatonon. A műszer a 0,43–0,75  $\mu\text{m}$ -es hullámhossz-tartományban dolgozott kb. 0,001  $\mu\text{m}$ -es spektrális felbontással, így névlegesen 320 sáv keletkezett. A műszer alapja a prizmás monokromátor, a pásztázás mechanikus, és az észleléseket hajóról végezték a Balaton esetében. A víz felszínére érkező, és az onnan távozó, fényenergiát egyszerre rögzítette, ebből számították ki a víz adott hullámhosszon értelmezett sugárzási együtthatóit.

Azoknak a komponenseknek a távérzékeléses mérését próbálták megoldani, amelyek módosítják a vízre érkező, ill. az onnan távozó fényenergiát. Ezek az a-klorofill-, a lebegőanyag-, és az oldott szervesanyag-tartalom.

Mérési körülményektől független interpretációs algoritmusok kidolgozását tűzik ki célul (Gitelson *et al.* 1989). Feltételezésük az volt, hogy minden spektrális sajátosságának a vízminőségi jellemzők értékeinek valamilyen együttese felel meg, ami meghatározza a víz optikai tulajdonságait az adott hullámhosszon vagy sávban.

A modell kidolgozásához egymástól jelentős mértékben eltérő víztípusú teszterületeket választottak ki: Don, Észak-Donyec, Azovi-tenger, a Bajkál-tó a volt Szovjetunió területén, a Mőgelsee a volt Német Demokratikus Köztársaságban, a Fekete-tenger bulgáriai partvidéke és a Balaton.

Az 1985-ös balatoni vizsgálatok faktoranalízissel történő elemzése után megállapították, hogy az a-klorofill-töménység távérzékelésére a 0,7–0,72  $\mu\text{m}$ -es, a lebegőanyagra a 0,52–0,56  $\mu\text{m}$ -es, oldott szerves anyagra pedig a 0,45–0,47  $\mu\text{m}$ -es hullámhossztartomány a legalkalmasabb (Gitelson *et al.* 1989). Ezeknek a tartományoknak viszonyát vizsgálták a három vízminőségi jellemzőhöz. Sikerült a 0,7 és 0,56  $\mu\text{m}$ -en

mért intenzitásérték hányadosával olyan megfeleltetést alkotni az a-klorofill-töménység meghatározására, melynek standard hibája  $2,8 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  volt. A következő év júliusában megismételték a méréssorozatot, és ismét szoros összefüggés adódott az a-klorofill-koncentráció és a 0,7 és 0,56  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszak intenzitásértékeinek hányadosa között ( $r=0,94$ ). Az 1985-ös egyenlet alapján megbecsülték az 1986-os a-klorofill adatokat. Az átlagos négyzetes eltérés  $2,3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -nél kisebb volt (Gitelson *et al.* 1989). A modell kidolgozásán tovább kellett azonban dolgozni, mert egyrészt a két évre felírt egyenletek különböztek egymástól – további adatgyűjtésre volt szükség –, másrészt egyéb víztestekre nem lehetett azokat kiterjeszteni.

1988-ban a reflektancia-vizsgálatokat júniusban végezték, igen alacsony a-klorofill-koncentráció ( $9,7 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) mellett. Ez a körülmény kedvezőtlenül befolyásolta az adatok távérzékelési referenciaadatként való felhasználását.

A nemzetközi vizsgálatsorozat eredménye, hogy az a-klorofill-tartalom és a fényvisszaverési értékek között – egy-egy helyszínen egy időpontban – kielégítően szoros összefüggést találtak, ám azok paraméterei vízterületenként és mérési alkalmanként jelentősen különböztek, ezért nem tekinthetők általános érvényűnek. Megállapították, hogy a kialakított egyenletekkel, referenciaadatok nélkül, távérzékeléssel az a-klorofill-koncentráció csak nagy hibával becsülhető. Tanulmányokat végeztek annak érdekében, hogy megállapíthassák a Landsat műholdcsalád MSS csatornáinak mely kombinációi lesznek alkalmasak az egyes vízminőségi jellemzők meghatározására. Az MSS felvételek sávkiosztását vízminőségi térképezésre alkalmasabbnak találták, mint a TM-ét. A vízfelszín-közeli spektrométeres mérések eredményeit az érzékelőknek megfelelő hullámhossztartományokba integrálták, és korreláltatták az a-klorofill-értékekkel. Optimális sáv-kombinációkat adtak meg például az a-klorofill-tartalom műholdképes meghatározására. (Gitelson *et al.* 1990, 1993a)

A háromféle mérési technikát összehangolva műhold áthaladással párhuzamosan terepi spektrométeres mérés és hagyományos vízkémiai elemzés is történt már a Balatonon.

Az alkalmazott radiométer az Amerikai Egyesült Államokban készült EXOTECH 100BX M+T volt. A műszer 0,45–1,1  $\mu\text{m}$  között 4 sávon képes érzékelni, melyek megfelelnek a TM szenzor 2–5 sávjainak. Az érzékelő eredetileg analóg (0–5 V) jelet szolgáltatott, de megoldották az analóg-digitális jel átalakítást. A gyártó cég a teljes

kapcsolási rajzot a geofizikusok rendelkezésére bocsátotta (Pásztor Szilárd szóbeli közlése alapján). BaSO<sub>4</sub>-tal bevont falemez szolgált referenciaként.

A felszíni reflexiómérések alapján a képek kiértékelésekor légköri korrekciót is alkalmaztak.

Vizsgálták a TM intenzitásértékek, a radiométer által rögzített értékek és a vízminőségi jellemzők közötti összefüggéseket, majd kijelölték a képfeldolgozáshoz szükséges vízminőségi osztályokat, és ez alapján végezték el a műholdkép osztályozását (Kőrösiné 1992). Az elemzésbe csak a TM 2–5 sávját vonták be. Az eredmény tematikus térképek sorozata lett, melyek az a-klorofill-koncentrációt, a lebegőanyag mennyiségét, valamint az UV extinkciót ábrázolják a Balaton nyugati felében 1989. július 11-én.

A második összehangolt észlelés 1990. június 28-án történt, az 1989. évvel megegyező módon. A mérési pontokra vonatkozóan vízminőségi kategóriákat alakítottak ki az a-klorofill-koncentráció, a lebegőanyag-töménység és az oldott szervesanyag-tartalom minimum és maximumértékeinek figyelembe vételével. Minden mérési pont egy 3 számból álló kódot kapott: az első számjegy megadta, hogy a pont hányadik a-klorofill osztályba tartozik, a második szám ugyanígy a lebegőanyag-tartalomra, a harmadik pedig az oldott szervesanyag-tartalomra utalt. Így 19-féle számhármass alakult ki, ezek lettek a vízminőségi osztályok. 13 olyan osztály volt, ahova egyetlen földi referenciapont tartozott. A tanulóterületeket úgy jelölték ki, hogy a földi referenciapontok műholdképi helyének 5×5 képpontnyi környezetét vették. Az irányított osztályozás (maximum likelihood) során a Landsat TM kép 1. és 7. csatornáját kihagyták az elemzésből. Az így kapott 19 osztályt tartalmazó képen az egyes vízminőségi tulajdonságok szerint összetartozó képpontokat össze kellett vonni. Az eredmény 3 térképet tartalmazó sorozat lett a Balaton nyugati feléről, amelyek az a-klorofill-koncentrációt, a lebegőanyag-tartalmat, és az oldott oxigén mennyiségét ábrázolják 1990. június 28-án.

A vízminőségi adatok és a mért reflektancia értékek között nem találtak összefüggést, aminek oka a reflektancia-értékek csekély megbízhatósága, és a vízminőségi jellemzők szűk értéktartománya lehetett.

A Balaton vízminőségének eddigi távérzékeléses vizsgálatairól elmondható, hogy nem adódott szoros, éveken átívelő összefüggés távérzékelési adat és vízminőségi mutató között.

### **3. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK**

#### **3.1. Terepi adatgyűjtés**

A műholdképek kalibrálásához, vizsgálatához, elemzéséhez szükséges terepi alapadatgyűjtés egyrészt vízminták vételéből állt, másrészt a terepi reflektancia rögzítését végeztük el. A mérési kampányok vagy expedíciók műhold-áthaladáshoz kötődtek.

A terepi alap adat annál megbízhatóbb, minél jobban szinkronban van a műholdkép felvételezésével. Azonban nem minden vizsgált jellemző egyformán változó, például az a-klorofill- vagy az oldott szerveszén-tartalom szélsőséges időben akár 3-4 nap alatt sem mutat nagy változást. Ezzel szemben a lebegőanyag-tartalom a feltámadó szél erősségének függvényében akár pár órán belül nagyságrenddel is változhat. A reflektancia-méréseknél a fényviszonyok időbeli változására is figyelemmel kellett lenni: a napsugarak beesési szöge változik, felhősödés következhet be a mérés időtartama alatt.

A mérési időszakokat úgy választottuk meg, hogy legyen közöttük egy a nyár eleji kiinduló állapotot mintázó, a többi pedig, az általában nyár végén bekövetkező, vízvirágzásra essen. Az expedíciók időpontját jóval a vegetációs időszak előtt meg kellett határozni a spektrométer és a motorcsónak bérlése miatt. A fitoplankton csúcsának időszakát igen nehéz ilyen időtávlatból eltalálni.

Három alkalommal végeztünk terepi spektrométeres vizsgálatokkal kiegészített méréseket. Mindhárom alkalommal legalább két Landsat műhold áthaladásból választhattuk ki azt, amelyik alatt tiszta égbolt esetén elindíthattuk a mérési akciót. Ezt az áthaladás napjának hajnalán kellett eldönteni az időjárási helyzet figyelembevételével (felhősség, vihar, időjárás előrejelzés).

Az expedíció első napján, a Landsat műhold áthaladásakor, vízmintákat és spektrométerrel reflektanciát gyűjtöttük a Balaton kijelölt pontjain. Az ezt követő napokon a kiegészítő kalibráló méréseket végeztük a Kis-Balatonon, ill. más vízfelületeken a Balaton körül, továbbá homogén felületekről (tihanyi füves labdarúgópályán, sármelléki Fly Balaton repülőtér beton kifutópályáján) gyűjtöttünk fényvisszaverést.

A teljes Balaton felületére szeretnénk volna vízminőségi térképeket készíteni a műholdképek alapján, ezért a mérési pontok Balaton hossz tengelyén helyezkedtek el



(3.1. ábra). Ennek a megközelítően 77 km-es vonal mentén változik leginkább a vízminőség (Virág 1997).

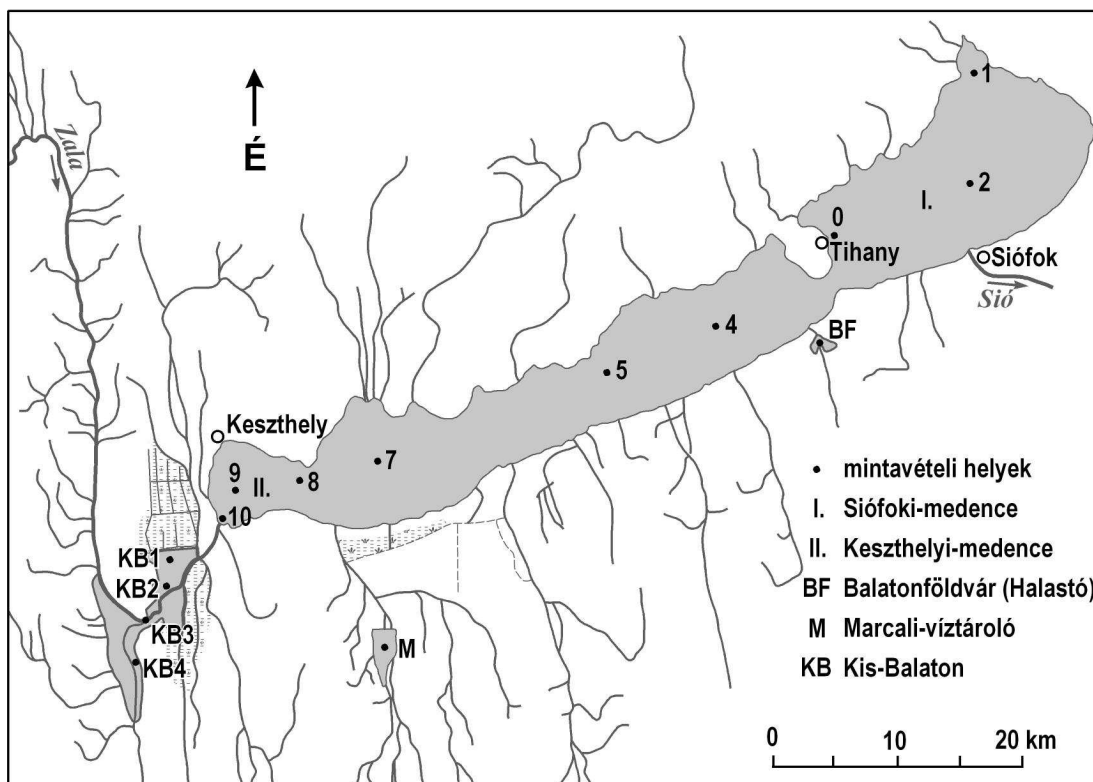
Ahhoz, hogy a főbb pontokat egy mérési kampány során – műhold áthaladása körüli két órában – meg lehessen látogatni gyors, motoros járműre volt szükség. A Balatonon azonban, éppen a tó védelme érdekében, motorcsónakok nem közlekedhetnek. Kivételek ez alól a rendőrség motorcsónakjai, amelyek 60-70 km/h sebességre is képesek, és személyzettel együtt három alkalommal segítették a munkánkat. A negyedik alkalommal, amikor fénymérés nem történt (2000. szeptembere) a vízmintavétel lassúbb motorcsónakkal két napig tartott.

A víz analízishez minden mérési pontról teljes vertikális vízmintát vettünk egy 3 m hosszú cső alakú mintavevővel. A nagyméretű zooplankton eltávolítására a vizet 200 µm lyukbőségű, planktonhálón szűrtük, és a további feldolgozásig sötétben, a tóvíz hőmérsékletén tároltuk. A spektrométert a motorcsónakból végzett mintavételek esetében 3 m hosszú rúdra szereltük, és így tartottuk a víz fölé. A Kis-Balatonon, Marcali-víztárolón és a balatonföldvári halastavon a vízmintavétel és a reflektancia mérése vagy a víz színe fölé nyúló stégről vagy gumicsónakból történt.

Vigyáztunk, hogy a hajó, stég vagy csónak Nap felőli oldalán mérjünk, árnyék ne zavarhassa az eredményt. A mérési pontokon a motorcsónakot nem kötöttük ki, hagytuk sodródni, biztosítandó, hogy nem a motor által felkavart víz fényvisszaverését vizsgáljuk.

A tájékozódást két Magellán típusú GPS segítette, melyek alkalmasak voltak a differenciális jelfeldolgozásra térinformatikai pontossággal. A bázisállomást a BLKI tetején létesítettük, a másik műszerrel pedig rögzítettük a mérési pont helyét, ill. segítségével tértünk vissza a már vizsgált pontokra az ismételt vizsgálatok esetén.

A GPS mérés során WGS'84 koordinátákat rögzítettünk, amiket a Földmérési és Távérzékelési Intézet honlapján található átszámító segítségével alakítottunk Egységes Országos Vetületi (EOV) koordinátákká (<http://fish.fomi.hu/termekek/honlap/szolgalattasok/Atszamitas/atszamitas.htm>).



3.1. ábra. Vízmintavételi pontok elhelyezkedése. A mintavételi pontok elnevezése a következő: 0 Tihany, 1 Balatonfüzfő, 2 Alsóörs, 4 Akali, 5 Révfülöp, 7 Szigliget, 8 Balatongyörök, 9 Keszthely, 10 Zalatorok.

A mintavételi pontokra nem számokkal, hanem a hozzájuk tartozó elnevezésekkel fogunk utalni. A névből a térképre való visszalapozás nélkül lehet az elhelyezkedésre következtetni.

### 3.2. Vízminták elemzése

A mérési expedíciók során sötétben, a tó vizének hőmérsékletén tárolt minták a begyűjtésüktől számított hat órán belül elemzésre kerültek. Minden hagyományos vízkémiai analízis a BLKI laboratóriumaiban történtek. Minden vízminta elemzése a magyar szabvány vonatkozó pontjainak megfelelt.

A kémiai vizsgálatok leírása részletesebb a lebegőanyag és az a-klorofill tekintetében, mivel ezeknek az anyagoknak a kimutatása történt meg a műholdképek alapján. A további elemzett anyag is befolyásolhatja a víz fényvisszaverését, ezért kerültek be a vizsgálatba.

A hidrobiológiai gyakorlatban lebegőanyagnak nevezünk minden olyan részecskét, mely a természetes vizekből merített, felrázott mintából szűrhető, ülepsző (Felföldy

1986). A részecskéket a víz mozgása tartja lebegésben (pl. hullámozás, víz hőmozgása).

Mintáink 10-250 mg·l<sup>-1</sup> lebegőanyagot tartalmaztak, melyekből partikulált szén- és nitrogéntartalmat (PC, PN) is mértünk. Ezért a vízmintát előre lemért, 450 °C-on izzított, 1,2 μm pórusbőségű üvegszálalás szűrőre (Whatman GF/C) szűrtük, szárítószekrényben 24 órán keresztül 60 °C-on szárítottuk, majd exsikkátorba helyezve hagytuk kihűlni. Ezután Sartorius mérlegen mértük az összes tömeget, melyből az előre lemért szűrő tömegét levonva és a leszűrt térfogattal elosztva mg·l<sup>-1</sup>-ben megkaptuk a minta lebegőanyag-tartalmát:

$$C_{ss} = (m_3 - m_1) \frac{1000}{V} \quad (3.1.)$$

ahol

$C_{ss}$  a lebegőanyag koncentrációja [mg·l<sup>-1</sup>],

$m_1$  az izzított üvegszálalás szűrő papír tömege [mg],

$m_3$  a szűrő és a lebegőanyag tömege szárítás után [mg],

$V$  a meghatározáshoz használt minta térfogata [ml].

A partikulált nitrogén (PN) és a partikulált szén (PC) meghatározását elem analízátor segítségével végeztünk, amit stabil izotóp arány mérésére alkalmas, folyamatos működésű tömegspektrométerhez (Isotope Ratio Mass Spectrometer, ANCA-MS, Europa Scientific Ltd., UK) illesztettünk. A módszer részletesebb leírása Présing (*et al.* 2001) közleményében található.

Az a-klorofill-koncentráció az egyetlen olyan könnyen mérhető vízminőségi jellemző, ami a vízben élő algatömeg nagyságára utal. Mérését a BLKI-ban Iwamura (*et al.* 1970) módosított módszerével végeztük. A vízmintát üvegszálalás szűrőre (GF/C) szűrtük, majd metanolt adtunk hozzá. A pigmentek gyorsabb kioldása és a klorofilláz enzim inaktiválása érdekében a mintát az első forrásig (74 °C) melegítettük és lehűlés után leszűrtük. A pigmentkivonat fényáteresztő képességét ( $T_\lambda$ ) Shimadzu UV-1601 spektrofotométeren metanollal szemben 3 hullámhosszon mértük: 0,653, 0,666 és 0,75 μm.  $T_\lambda$  alapján kiszámítottuk az extinkciót adott hullámhosszon ( $E_\lambda$ ):

$$E_\lambda = \log \frac{100}{T_\lambda} \quad (3.2.)$$

ahol  $E_\lambda$  extinkció az adott hullámhosszon,  $T_\lambda$  adott hullámhosszon mért transzmisszió.

A 0,653 és 0,666  $\mu\text{m}$ -es extinkcióból levontuk a 0,75  $\mu\text{m}$ -en mért, zavarosság extinkciójának értékét ( $E_{653}$ ,  $E_{666}$ ). A vízminta a-klorofill-koncentrációját ( $a\text{-Kl}$ ) pedig a 3.3. képlet alapján számítottuk:

$$a - \text{Kl} = \frac{(17,12E_{666} - 8,68E_{653}) \times m \times 1000}{L \times V} \quad (3.3.)$$

ahol

$a\text{-Kl}$  a vízminta a-klorofill-koncentrációja [ $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ]

$m$  a metanol térfogata [ml]

$L$  a kuvetta hosszúsága (cm)

$V$  a leszűrt vízminta térfogata (ml).

A szerves szén analíziseket Elementar High TOC (Elementar Analysensysteme GmbH Germany) szén analizátorral végeztük. Az összes szerves szén (TOC) koncentráció méréséhez szűretlen víz szolgált. Az oldott szerves szén (DOC) analízisét 0,45  $\mu\text{m}$  pórusméretű 450 °C-on előzetesen kiizzított GF-5 üvegszálalás filteren szűrt vízmintákkal végeztük. A partikulált szerves szén (POC) koncentrációt az előbbiekből (TOC-DOC) számoltuk. A víz barna színintenzitását Cuthbert (*et al.* 1992) szerint a 0,44  $\mu\text{m}$ -en mért abszorbancia értékek alapján számítottuk és Pt-egységben ( $\text{mg Pt l}^{-1}$ ) adtuk meg. A mérésekhez Shimadzu UV-160 A spektrofotométert használtunk.

A partikulált nitrogén (PN) és a partikulált szén (PC) meghatározását elem analízátor segítségével végeztünk, amit stabil izotóp arány mérésre alkalmas, folyamatos működésű tömegspektróméterhez (Isotope Ratio Mass Spectrometer, ANCA-MS, Europa Scientific Ltd., UK) illesztettünk. A módszer részletesebb leírása Présing (*et al.* 2001) közleményében található.

### 3.3. Fényvisszaverés mérés

A fényvisszaverés az a folyamat, melyben az elektromágneses energia egy közeg határához érve azt azon az oldalán hagyja el, melyen beérkezett, mégpedig változatlan frekvenciával. A visszaverődés a beeső energia azon része, mely visszaverődött. Általános esetben a kétirányú visszaverődés eloszlási függvény (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) írja le egy felszín visszaverési képességét (Lillesand *et al.* 1999). Ez közvetlenül nem mérhető, mert a térszög igen kicsiny változása nem tartalmaz mérhető mennyiségű sugárzásienergia-változást. Ezért került bevezetésre a reflektancia-faktor, amely egyesíti magában egy adott be- és kilépési térszöghöz tartozó energiát. A visszaverési-faktor definíció szerint az adott felszínről visszavert

energia aránya ahhoz, amilyen lenne, ha az adott sugár ugyanezzel a geometriával egy tökéletesen szóró felületről verődne vissza. A tökéletesen szóró, általában durva felületeket, amelyek minden irányban egyenletesen verik vissza az elektromágneses sugárzást, nevezik Lambert-féle felületnek (Mucsi 1995).

$$R_s(\lambda) = \frac{V_s(\lambda)}{V_r(\lambda)} R(\lambda) \quad (3.4.)$$

ahol

$V_s(\lambda)$  a vizsgált felszín adott hullámhosszon való visszaverése,

$V_r(\lambda)$  egy referencia felszínről az adott hullámhosszon való visszaverés,

$R(\lambda)$  adott hullámhosszra jellemző szorzótényező.

A (3.4.) egyenlet segítségével kapjuk meg a kétirányú reflektancia-faktor  $R_s(\lambda)$  értékét adott hullámhosszon.  $R_s(\lambda)$  számításához szükség van arra, hogy a bejövő energiának legyen iránya (vagyis tiszta legyen az ég), a műszer regisztrátuma egyenesen arányos legyen a belejutó fény energiájával, a referencia- és a vizsgált felszín megvilágítása ugyanazon szög alatt és feltételek mellett történjen, valamint ismert legyen a referenciafelszín visszaverési tulajdonsága. A természetben tökéletes Lambert-féle felület ritka, ezért a mérések során egy bárium-szulfátból ( $BaSO_4$ ) készült referenciafelületet használtunk, amely fényelnyelése kalibrált volt (Atkin 2000). A mérőműszernek is kalibrálnak kell lennie, mert csak így biztosítható, hogy az eredmények különböző műszerek esetén is összehasonlíthatóak legyenek. A használt műszer és referenciapanel kalibrációjának eredményét megkaptuk, az eredmények feldolgozása ezek segítségével folyt.

A terepi spektrométerek számtalan fajtája létezik, ezek között az érzékelés technikai megoldásában, ill. a vizsgált hullámhossz-tartományban van különbség. A Balaton korábbi vizsgálatait során alkalmaztak olyat, amely csak néhány spektrum érzékelésére alkalmas, ez a négycsatornás Exotech 100BX volt (Kőrösiné 1992). A különböző modern műszerek a spektrum széles tartományában – akár  $0,35\text{--}2,5\ \mu\text{m}$  – működnek  $0,001\text{--}0,002\ \mu\text{m}$  sáv szélességgel. Az első spektrométerek a mérési eredményt milliméterpapírra nyomtatták (pl. Spektrum-01), ma már digitálisan, a felvételezéssel egy időben áll rendelkezésre az adat. A fényforrás tekintetében előnyösebb a természetes napsütés (tiszta égbolt), de előfordulnak mesterséges megvilágítást alkalmazó laboratóriumi kísérletek is (Quibell 1991).

Munkánk során a víz felszínéről távozó sugárzási energiát vizsgáltuk a 0,4–1  $\mu\text{m}$ -es hullámhossztartományban, melyet legjobban az alábbi tényezők befolyásolnak (Varga *et al.* 1991):

- a víz lebegőanyag-tartalmának fényszóró hatása,
- a víz és a benne lévő anyagok fényabszorpciója,
- a vízben lévő anyagok fényemissziója (fluoreszkálás),
- fényvisszaverődés a vízfelszínről és a mederfenékről.

### ***A spektrométer és beállításai***

A terepi mérésekhez és a medence-kísérletekhez GER 1500 típusú hordozható terepi spektrométert használtunk (3.2. ábra). A műszert a hozzá tartozó referenciapanellel és hordozható számítógéppel együtt Nagy-Britanniából a Natural Environment Research Council (NERC) eszköztárából, Southamptonból kaptuk kölcsön tartozékokkal és kalibrációs jegyzőkönyvekkel együtt.

A Geophysical and Environmental Research Corporation (GER) által gyártott GER 1500 típusú spektrométer a látható- és a közeli-infravörös fény tartományában a 0,3–1,1  $\mu\text{m}$  hullámhosszak között mér, 512 szilícium fotódiódán keresztül. A névleges sávszélessége 0,0015  $\mu\text{m}$ , automatikus fekete szint beállítással.



3.2. ábra. A GER 1500 spektrométer (forrás: [www.ger.com](http://www.ger.com))

A műszer méretei: 8,3x15,2x19,7 cm, súlya akkumulátorral együtt sem éri el a 2 kg-ot. Az optika látószöge (field of view, FOV)  $\sim 4^\circ \times 5^\circ$ , ami kivezetett optikával  $23^\circ$ -ig bővíthető. Beépített lézeres célzó-mechanizmus segíti, hogy a műszert pontosan a kívánt terület fölé lehessen állítani. A spektrométer állítható háromlábúra, üzemeltethető kézből, ill. fémből készült, 1–3 m hosszú bot végéről.

A spektrométerhez tartozik két 6 V-os nikkelfémhidrid (NiMH) akkumulátor, melyek egyenként két órás működést biztosítanak. Biztonságosabb azonban, ha külső akkumulátort (12 V) alkalmazunk.

A műszer beállítható, ill. működtethető a hozzá csatlakoztatott számítógépen keresztül, vagy saját LCD kijelzője és nyomógombjai segítségével. Mindkét módszerrel igen egyszerű, például a kívánt mérési mód, látószög stb. megadása vagy az expozíció.

A felvételezés hossza minimálisan 5 millimásodperc lehet. Többnyire az automata üzemmódot szokás alkalmazni: ilyenkor az expozíciós idő a felvételezendő felület színétől függően változik – sötét felületeké általában hosszabb, mint világosaké –, általában 10 másodperc alatt van.

A műszer rendelkezik 500 spektrum tárolását lehetővé tevő memóriaegységgel, de a csatlakoztatott számítógéppel már ilyen korlátok nincsenek. Ilyenkor az adatok közvetlenül számítógépre töltődnek, az egyes hullámhosszakhoz tartozó intenzitásértékek a képernyőn azonnal megjelennek. A rendellenes fénymeneteket az üzemeltető rögtön észreveheti a képernyőn és megismételtetheti az expozíciót.

A mérési mód függ az adott feladattól. Egy felvételezésnek önmagában nagy a zaj tartalma, ezért minden színekép több ismétlés átlagaként áll elő. Ennek száma beállítható, a minimális érték 5. Ilyenkor a spektrométert nem mozdítjuk a vizsgálandó felszín (cél) fölé, s a műszer automatikusan minden mérésnél ennyi számú felvételezés átlagaként adja meg a spektrumot. A zajszint annál jobban csökken, minél több ismétlést állítunk be, ám ezzel a felvételezési idő hosszát is növeljük. Dönteni kell, hogy mi a fontosabb: egy adott területről minél több helyről adatot gyűjteni, vagy egy aránylag kis mértékű változást kimutatni. Az első esetben egy mérésnek gyorsnak kell lenniük, itt az alacsony ismétlésszámot kell választani. A második esetben magának a jelnek keressük a finom eltéréseit, ezért a zajszintet a lehető legkisebbre kell csökkenteni, tehát magas ismétlésszámot állítunk be.

A készülék működtethető lézeres célzóberendezés segítségével, gombnyomásra vagy a két módszer keverékét alkalmazva.

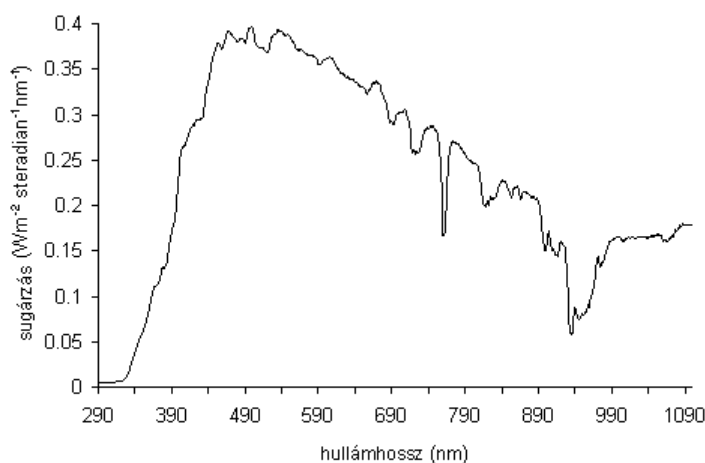
A színmélység 16bit-es.

További tartozék a bárium-szulfátból készült fehér referenciapanel. Ezt az előzetesen bemért fényvisszaverő tulajdonságainak védelmében óvni kell a mechanikai sérülésektől, és a szükségesnél több direkt napsugárzástól. Az utófeldolgozás során a mért adatokat a panelről észlelt spektrum segítségével alakíthatjuk százalékos visszaverési értéké. Lehetőség van két spektrométer összehangolt működtetésére is. Ilyenkor az egyik a fehér bárium-szulfát referenciapanelről, a másik a célterületről visszavert sugárzást méri.

Méréseink során végig ugyanazokat a beállításokat használtuk. Ezek a következők voltak.

Az energiaforrás 12V-os akkumulátor volt. Az adatokat közvetlenül laptopra töltöttük, a spektrométer beállítása, vezérlése is innen történt. A készüléket botra (1-3 m) szerelve üzemeltettük, gondosan ügyelve arra, hogy a felvételezést végző személy nappal szemben álljon, árnyék se a kísérleti medence faláról, se a motorcsónak oldaláról ne vetüljön a célterületre. A tavon végzett mérések során arra is ügyeltünk, hogy ne a motor által felkavart oxigénben dús, habos víz reflektanciáját mérjük.

Öt felvétel átlagából számoltattunk reflektanciát, az expozíciós időt automatára állítottuk. Szükség volt az aránylag rövid időtartamú mérésekre, de a zajszint csökkentésére is törekedni kellett. A Balaton vize sötétnek mondható – például a szikes talajéhoz képest –, 10-15 másodperc is kellett, mire a kellő mennyiségű fényenergiát a műszer összegyűjtötte. Minden mérést legalább háromszor ismételtünk. A számítógép monitorján közvetlenül ellenőriztük, hogy a színeképzet valami külső körülmény – például a célfelületre vetülő árnyék, beúszó hínárdarab stb. – negatívan befolyásolta. Ha hibát észleltünk a méréseket addig ismételtük, amíg három értékelhető spektrumot nem kaptunk. A mérések között az optikát a célfelület fölülr elmozdítottuk, majd visszaállítottuk. A referencia-panelről mérési helyenként egyszer vettünk mintát a tavi mérések során, a medencekísérletek alkalmával pedig minden új kísérletsor kezdetekor, de maximum 10 percenként.



3.3. ábra. A bárium-szulfát panelről a szenzorba érkező sugárzás mennyisége a hullámhossz függvényében

A spektrométer laptopon keresztül kapott parancsot a felvételezés megkezdésére, az expozíció végét kattanó hang jelezte.



Az optikát alapbeállítással használtuk:  $\sim 4^\circ \times 5^\circ$ .

Fontos az adott meteorológia helyzet rögzítése. A BLKI rendelkezik egy kis meteorológiai állomással Tihanyban. A jegyzőkönyvben rögzítettük, hogy mennyire zavartalan a napsütés.

A mérés menete a következő volt függetlenül attól, hogy a Balatonon végeztük őket, vagy az Intézet mólójának közelében. A rendszer elemeinek összeállítása – a számítógép, a spektrométer és az akkumulátor összekapcsolása – után kezdődhetett a valódi mérés.

A spektrométert tartó ember először a fehér panel fölé tartja a műszert. Ekkor a számítógépet kezelő kiadja az utasítást: referencia. Erről a spektrométeres tudja, hogy most mérés következik, és nem szabad mozdítania a készüléket a bárium-szulfát panel fölül. A számítógépen keresztül kap a spektrométer parancsot a működésre, a be- és kikapcsolást kis kattánó hang jelzi, és rögzül a 3.3. ábrán láthatóhoz hasonló intenzitásfüggvény. Ez után a spektrométert a célterület fölé irányítjuk. A parancsszó ekkor: cél. A célterület fölötti mérést háromszor megismételjük a fent leírt módon. A laptopon azonnal kirajzolódnak az egyes hullámhosszakhoz tartozó visszaverés-értékek, így a mérés irányítója a felvételezés ismétlését kérheti, ha rendellenességet tapasztal a képernyőn kirajzolódó spektrumok alapján. A spektrométeres mérés összehangolt együttműködést kíván a laptop- és a spektrométer üzemeltetőjétől.

Az adatokról minden mérési nap végén biztonsági másolatot készítettünk. A műszerhez tartozó futtatható (.exe) fájl segítségével lehetett a mért adatokat a hozzájuk kapcsolódó referenciapanelről érkező jellel korrigálni. Az így keletkezett szöveg fájlokat aztán egy kisebb makró segítségével készítettük elő a statisztikai elemzésre.

### **3.4. Medencekísérletek**

A medencekísérleteket úgy állítottuk össze, hogy segítségükkel meg lehessen határozni a víz lebegőanyag-tartalmának hatását a fényvisszaverésre különböző algafajok, és a-klorofill-tartalom mellett. Az eredmények alapján bizonyítható volt a műholdképek elemzésére szánt statisztikai módszer érvényessége.

A kísérletekre a BLKI Tihanyban található (é.sz.  $46^\circ 54' 48''$ , k.h.  $17^\circ 53' 33''$ ) épületei előtt, a parkban került sor 2000 augusztusának első felében. A medencét a kikötő mellett található beton járdára, és nem a gyepre helyeztük a medencét, mert a gyepről melegedés hatására feláramló pára megzavarta volna a mérési eredményeket (3.4. ábra).



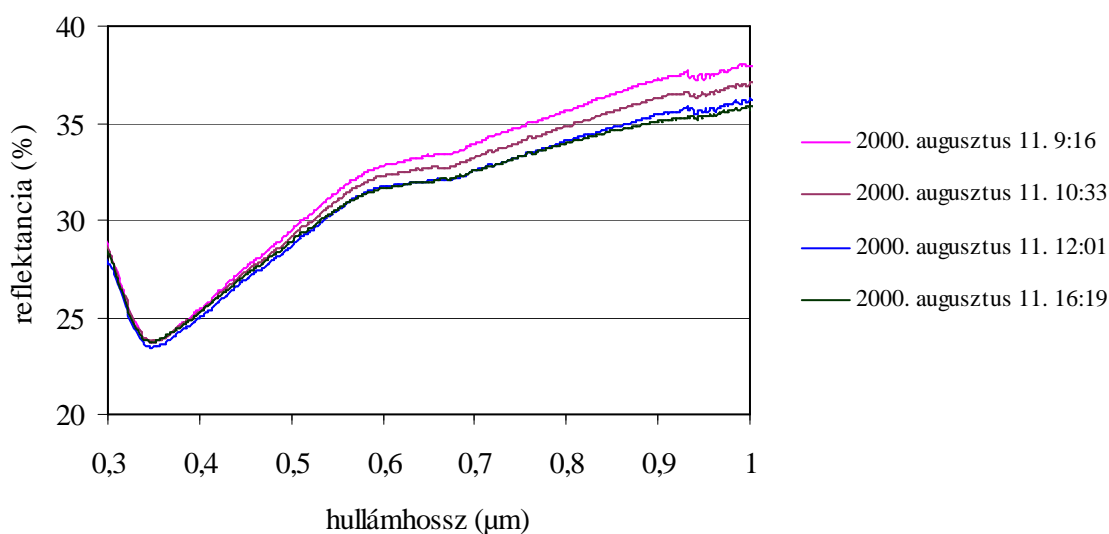
3.4. ábra. A medencekísérletek felépítése (Tihany, BLKI mólója)

A kísérleteket természetes megvilágítás mellett végeztük. Egy napon néha cumulusok zavarták meg a napsütést, ilyenkor leállítottuk a méréseket, amíg az árnyék elhaladt. A többi napot teljes szélcsend és jelentéktelen felhőképződés jellemezte, ideális feltételeket biztosítva a fény visszaverődésének vizsgálatára. A kiválasztott helyszínt a felhők árnyékán kívül egyéb (növények, épületek) árnyék nem zavarta.

A Balatonból származó vizet fekete műanyag medencébe öntöttük, melynek fala matt volt, hogy a fényt minél nagyobb mértékben elnyelje. A medencébe 20 l vizet töltöttünk, egy kísérlet alkalmával, a víz mélysége 0,11 m, a felszíne 0,58×0,32 m méretű volt. A medence 0,44 m mély volt, s a bele töltött víz fölé kb. 1 m magasságba tartottuk a műszert, így az egy kb. 0,1×0,1 m-es felületet „látott” a vízből. A vízbe vagy algát, vagy üledéket kevertünk. Egy műanyag keverőlapát segítségével biztosítottuk az egyenletes eloszlást. A spektrométeres méréseket akkor kezdtük el, amikor a víz felszíne már megnyugodott.

A hasznos mérések időszaka korlátozott (Mantovani *et al.* 1992, Zomer *et al.* 1998). Azt vettük figyelembe, hogy a Nap horizont feletti magassága elegendően nagy legyen: a napszög sosem volt kisebb, mint 30°. A nap folyamán félóránként, a napsugarak beesési szögváltozásának tanulmányozása céljából, a betonjárda egy teljesen homogén területéről intenzitásértékeket gyűjtöttünk. A visszaverődésben kisebb eltérések a 0,8  $\mu\text{m}$  feletti hullámhosszakon tapasztalhatunk (3.5. ábra).

A kísérletsorozatot úgy terveztük el, hogy a fényviszonyok a lehető legjobban közelítsenek a természetes víztestben kialakuló fényklímához.



3.5. ábra. A betonfelszín fényvisszaverési képességének változása 2000. augusztus 11-én, Tihanyban

### ***Kísérletek***

A kísérletekre 2000. augusztus 2-a és 12-e közötti időszakban került sor. Különböző lebegőanyag- és a-klorofill-koncentrációjú víz radianciáját vizsgáltuk.

A felhasznált víz szempontjából a kísérletek két csoportra oszthatók: magas huminanyag-tartalommal rendelkező Balaton vízzel, ill. huminanyagtól mentes vízzel végeztek. A huminos vizet a Zala-folyó torkolatától mintegy 100 m-re, a Balatonból gyűjtöttük a tó felső 0,5 m-es vízrétegéből. A huminos minták elemzése kimutatta, hogy ebben a vízben igen alacsony ( $4 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) volt az a-klorofill-koncentráció, s mivel a vizet a felhasználásig hűtőben tároltuk ez tovább csökkenhetett. Így szinte teljesen üledék- és klorofillmentes huminos vizet kaptunk. A többi kísérlethez is igen nagy mennyiségű, lebegőanyag-tartalmától jórészt megszabadított – ülepített balatoni vízre volt szükségünk. Ilyet a BLKI kertjének öntözésére használt hatalmas tartályból kaptunk. Ezt időnként Balaton-vízzel teleszivattyúzzák, és a finom szemcsék is aránylag jól kiülepednek belőle. Amikor a tartály kiürülőben van, akkor az aljáról felkavarodó finom lebegőanyag-szemcséktől tejszerűvé válik a víz. Ez a víz is alkalmas volt kísérletezésre.

A medence vízében modelleztük a különféle – a tóban természetes körülmények között is előforduló – lebegőanyag- és az a-klorofill-koncentrációkat és a kettő

kombinációit. Az irodalom áttanulmányozása alapján a Balatonban az eddig észlelt maximális a-klorofill-koncentráció  $300 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  körüli érték (Heródek *et al.* 1988), lebegőanyagból erős vihar esetén 450 mg is lehet 1 l-ben (Virág 1997).

A vizsgálatokhoz lebegőanyagot a BLKI tihanyi kikötőjéből kievezve gyűjtöttük külön iszapminták vételezésére szolgáló eszközzel, az aránylag kisebb szemcseméretű felsőbb iszaprétegből. Ezt azután tálcákon szétterítettük és szárítószekrényben kiszárítottuk. Szárítás után újra porítani kellett, mert keményre száradt. Meghatároztuk, hogy az egyes lebegőanyag-töménységek eléréséhez hány gramm kell az iszapőrleményből. Az inkubátoros kísérletsorozatnál ezt használtuk. Azt tapasztaltuk, hogy az iszap szemcsemérete nem felel meg, mert az elkeverés után szinte azonnal kiüledett a vízből. A továbbiakhoz még egyszer porcelán mozsárban áttörtük és  $50 \mu\text{m}$ -es szitán átszitáltuk az örleményt. Így mesterségesen kicsi lett a szemcseméret, de a kísérletek során a lebegőanyag színe volt a fontos, és hogy a megfelelő mennyiség lebegjen belőle a vízben. Egy alkalommal a BLKI kerti öntözőrendszeréből származó vízben szemmel láthatóan igen magas volt a lebegőanyag-tartalom – ami valószínűleg a kiürülőben lévő tartály aljáról kavardhatott fel. A minták elemzése szerint ez  $336 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  volt. Valószínűleg ürülőben volt a tartály, és az alján felhalmozódott finom Balaton üledék keveredett a vízbe. Még egyszer sikerült üledékes vizet venni, de ekkor már – talán a tartály feltöltése miatt – már sokkal kisebb töménységű ( $69 \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) volt.

Arra is választ kerestünk, van-e különbség a négy leggyakoribb algafaj fényvisszaverési tulajdonságai között. Természetesen nem lehetett minden variációt kipróbálni, ki kellett választani a legfontosabbakat.

A kísérleteket a nyári algavirágzásokkor domináns algafajokkal (Vörös *et al.* 1993, 1999) végeztük: *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena Aphaizomenioides*, *Aphanizomeidow issatchenko*; valamint az általánosan tesztalgaként alkalmazott zöldalgával: *Selenastrom capricornutum*. (Ez utóbbi faj is előfordul a Balatonban, de nem nagy tömegben.) Az algakultúrákat részünkre a BLKI egyik laboratóriumában tenyésztették ki: ideális hőmérsékletet, oxigénellátottságot és megvilágítást biztosítottak szaporodásukhoz. Az a-klorofill-koncentrációt többször is ellenőriztük: amikor megkaptuk az algákat, és amikor felhasználtuk őket. A kísérletek eltervezésekor figyelembe kellett venni a rendelkezésre álló alga mennyiségét.

Minden mérési sor végén a vízből mintát vettünk. Vizsgáltuk a lebegőanyag, ill. az a-klorofill-mennyiségét. A számításoknál természetesen a valódi és nem a szándékolt értékeket vettük figyelembe.

### **3.5. A felvételező rendszer kiválasztása**

A kitűzött célok határozták meg, hogy milyen felvételező rendszert választunk a vizsgálatokhoz. Különböző szempontok figyelembevételével választottuk ki végül a Landsat műholdcsalád felvételeit az elemzésekhez. Ezek a szempontok a következők voltak:

1. Az előállított képek spektrális felbontása alkalmas legyen a kapcsolat megteremtésére a vízminőségi adatokkal.

2. A képek térbeli felbontása aránylag finom legyen, mivel a választott statisztikai módszer csak vízfelszínt tartalmazó képpontok alapján működik megfelelően. Minél durvább a térbeli felbontás, annál kevesebb tisztán vízfelszíni borítással jellemezhető képpontot lehet elemezni, az eredménykép is ennek megfelelő felbontású lesz.

3. Nemcsak aktuális, hanem korábbi (pl. az 1990-es évek első feléből származó) magas a-klorofill-tartalommal jellemezhető vízvirágzások idejéről is rendelkezzen adatokkal. Így az elemzések kiterjeszthetők korábbi időpontokra is. Ez elsősorban akkor lehetséges, ha a rendszer automatikusan rögzít képeket, nem csak megrendelésre, mert akkor az adatbázis igen esetleges.

4. A Föld minél nagyobb területét, de minimum a mérsékelt övet fedje le a műhold képeivel, hogy a módszer átvihető legyen más sekély tavakra.

5. Mind a rögzített képek – mind a frissen készülők, mind a régebbiek – megvásárolhatók, megszerezhetők legyenek. Lehessen információt szerezni az egyes műholdáthaladások pontos időpontjáról, így lehet az áthaladással azonos időpontban – azonos napon – terepi mintavételezést végrehajtani.

6. Költséghatékony legyen. A képek megfizethetők legyenek a lehetőségekhez képest. A rendelkezésre álló anyagi kereteken belül minél több felvétel megvételére (és elemzésére) juthasson pénz.

Évről évre több műholdat állítanak Föld körüli pályára, hogy képeket készítsenek a Föld felszínéről, s ezek az adatok egyre könnyebben elérhetők bárki számára (a kép vásárlása, egy banki átutalás után a kép az internetről letölthető). Az e helyütt ismertett vizsgálatok kezdete (1999) óta is számos, ma már igen népszerű, képfellevő rendszer állt munkába: például QuickBird, Ikonos, MODIS, Envisat. Ahhoz, hogy

egyértelműen a Landsat képek mellett döntsünk, megvizsgáltuk az egyéb lehetséges megoldásokat is.

A legjobb térbeli- és spektrális felbontást a repülőre szerelt hiperspektrális szenzorok segítségével lehet elérni. A finom, és folytonosnak tekinthető spektrális felbontás (0,001-0,002  $\mu\text{m}$ ) lehetővé teszi olyan jelenségek kimutatását, amelyek rejtve maradnak a nagyobb sáv szélességgel (0,06–0,27  $\mu\text{m}$ ) rendelkező, a spektrumot hézagokkal lefedő szenzorok előtt (Lillesand *et al.* 1999). Előnyként említhető továbbá, hogy akár napi két repülés is rendelhető ugyanazon terület felett, ami a gyorsan lejárászó folyamatok megfigyelésében nélkülözhetetlen (Rainey *et al.* 1999, 2000).

A vízvirágzások azonban nem tartoznak a gyorsan lejárászó folyamatok közé, ezért ezt az előnyös tulajdonságot nem használnánk ki, ellenben általában augusztus, ill. szeptember hónapban következnek be – igen tág intervallumban –, így a repülés várható időpontját nehézségekbe ütközne előzetesen becsülni. A megfelelő műszerezettségű repülő programja igen szoros, esély a képkészítésre akkor lenne, ha konkrét időpontra rendelnénk meg a repülést, ami így nem biztos, hogy egybeesne az azévi vízvirágzással.

Az egyedi megrendelésre történő repülések alapján készített képek általában egy-egy projekthez kapcsolódnak. A Föld felszínének – így az édesvízű tavakénak –, az ilyen módon történő felmérése esetleges, korántsem lehet nagy területet felölelő felmérésnek nevezni.

Tehát a légi multispektrális felvételek kitűnő spektrális és térbeli felbontással rendelkeznek, de nem készül automatikusan kép a Föld minél nagyobb felszínarabjáról rendszeresen, és nem áll rendelkezésre archívum sem. Korábban készült képek megvásárlása – ha léteznek egyáltalán –, nehézségekbe ütközik.

További hátrány, hogy mind a felvételezés, mind a feldolgozás igen költséges. Hiába dolgoznánk ki eljárást a Balatonra, pénzügyi akadályokba ütköznénk más tavak vizsgálatakor. Esetleg előfordulhat, hogy egy adott tó felett tilos repülni polgári repülővel.

A Landsat műholdcsalád TM és ETM+ érzékelői által rögzített képeknél jobb térbeli, rosszabb spektrális felbontással – valamint azonos radiometriai felbontással rendelkeznek a SPOT képek. A vizsgálatokhoz a multispektrális érzékelő által készített 20 (SPOT4), ill. a SPOT 5-ös műholdon már 10 m-es felbontású felvételek lehettek volna alkalmasak (3.1. táblázat). Ezeket azonban kizárólag megrendelésre készítik, így archívumukban is csak esetlegesen készített képek találhatóak.

Egy SPOT4 által készített kép 60×60 km-t fed le, így legalább két képet kellett volna vennünk minden időpontra. A SPOT képek eleve drágábbak, mint a Landsat-ek, s ha ehhez hozzátesszük, hogy Landsat képből egy képnegyed is lefedi a tavat és környezetét, akkor nem nehéz belátni, hogy ez utóbbi a költséghatékonyabb. A feldolgozást nehezítette volna a két különböző napon készült kép összehangolása is, bár ez nem tette volna lehetetlenné a kiértékelést.

LANDSAT TM és ETM+ sávkiosztás (μm)	Térbeli felbontás (m)	SPOT4 és 5 mulitspektrális mód sávkiosztás (μm)	Térbeli felbontás SPOT4 (X mód) és 5 esetén (m)
0,45–0,52	30		
0,52–0,6	30	0,5–0,59	10, 20
0,63–0,69	30	0,61–0,68	10, 20
0,76–0,9	30	0,79–0,89	10, 20
1,55–1,75	30	1,58–1,73	20
10,4–12,5	120, 60 (ETM+)		
2,08–2,35	30		

3.1. táblázat. A SPOT és Landsat érzékelőinek sávkiosztása (<http://www.spotimage.fr> és <http://landsat.gsfc.nasa.gov>)

A 20-30m térbeli felbontással rendelkezik még az indiai IRS (Indian Remote Sensing Satellite System) műholdak LISS-III érzékelői által készített képek (3.2. táblázat). Ennél az érzékelőnél a sávok közül hiányzik a kék (0,4–0,5 μm), a közeli infravörös sávnak a térbeli felbontása (70 m) rosszabb, mint a többié (23 m). Ezen kívül a Landsat és a SPOT által készített felvételekhez képest a radiometriai felbontás is szerényebb, míg az előbbieknél ez 8 bit, az utóbbinál 7 bit. A felvételeket folyamatosan automatikusan rögzítik, ez megfelelne az általunk felállított kritériumoknak. Mégis az előnyösebb radiometriai és spektrális tulajdonságai miatt választottuk a Landsat képeket.

Spektrális felbontás (μm)	Térbeli felbontás (m)	Radiometrikus felbontás (bit)
0,52–0,59	23	7
0,62–0,68	23	7
0,77–0,86	23	7
1,55–1,7	70	7

3.2. táblázat. Liss-III szenzor tulajdonságai (IRS-1C és IRS-1D műholdak) (forrás: [www.euromap.de](http://www.euromap.de) és Mucsi 1995, <http://www.nrса.gov.in/engnrса/satellites/l3samppage.html>)

A nagy térbeli felbontású (1km<sup>2</sup> körüli) képeket elsősorban globális trendek meghatározására érdemes alkalmazni. A kutatásban résztvevő biológusok véleménye szerint (Présing Mátyás szóbeli közlés), ez a felbontás már nem adna elegendő információt a Balaton víztestének minőségi változásáról. Ezért vetettük el ezeknek a képeknek az alkalmazását.

Középvíznél a Balaton felszíne kb. 600 km<sup>2</sup>, egy felvételen akár 7-800 vízfelszín is tartalmazó képpont lehet. A kidolgozott módszer azonban a kizárólag vízfelszín tartalmazó képpontokra épül, melyek száma kb. 4-500-ra tehető. Ennyi képpontra kapnánk meg az egyes vízminőségi jellemzők adatait a folyamat végén. Meg kell jegyezni, hogy ez még mindig több információt jelentene, mint a hagyományos mérési módszerekkel végzett felmérések. Jó tulajdonsága ezeknek a felvételező rendszereknek, hogy gyakrabban térnek vissza ugyanazon területekre, így az időbeli változás megfigyelésére is alkalom nyílhatna egy vízvirágzáson belül. További kutatási irány lehetne a heti egy-két kép elemzése vízvirágzás idején: elterjedését, majd visszahúzódását lehetne megfigyelni. Ám már a vizsgálatok alatt 1999 óta sem volt a tavon olyan jelentős alga-biomassza növekedés, mint az 1970-es, 1980-as, vagy akár 1994-ig bezárólag.

A távérzékeléssel történő vízminőségi vizsgálatainkhoz a Landsat műholdcsalád műholdjai által készített felvételeket használtuk. Az előzetesen felállított kritériumok legtöbbször ezek a képek, ill. felvételező rendszer felelt meg.

Mivel a Landsat műhold által készített kép igen ismert alapanyag a magyar, és nemzetközi távérzékelésben, ezért a részletes technikai leírásától e helyütt eltekintünk, csak a vizsgálatokat közvetlenül érintőket említjük. Bőséges információ áll rendelkezésre a műholdakról, érzékelőkről és a képekről például a National Aeronautics and Space Administration (NASA) honlapján <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.

A Landsat műholdakon elhelyezett TM és ETM+ érzékelők csatornáinak kiosztása látható a 3.1. táblázatban. A térbeli felbontás a SPOT képeknél rosszabb – 10 és 20m helyett 30m –, cserébe a vizek szempontjából lényeges, a látható kék fény tartományába eső csatornát találunk (0,45–0,52  $\mu\text{m}$ ). Nem csak ez a különbség segített dönteni a Landsat képek mellett, hanem ennek a rendszernek további tulajdonságai.

A Landsat képeket automatikusan rögzítik, elraktározzák. Az archívumból bármilyen kép, amelyet a műholdak készítettek küldetésük során előhívható, megvásárolható. Azonban vannak olyan képek, amelyek megsemmisültek például az adathordozók meghibásodása miatt. Vizsgálatainkhoz kiválasztott képek egyikéről



(1994. 08. 10.) is azt az értesítést kaptuk a NASA adattárából, hogy bár átnézeti képük van erről az időpontról, az eredeti adatokat már nem tudják részünkre visszaállítani. Fölvettük a kapcsolatot a Földmérési és Távérzékelési Intézettel, ahol úgy tűnt megvették annak idején ezt a felvételt, de sajnos, nem az egész képet, csak a Sziget-közt lefedő ÉK-i képnegyedet, így a Balaton ezen a képen már nem szerepelt!

A Landsat műholdak képeikkel a lakott földfelszínt lefedik, a pólusok 9°-os környékét kivéve minden egyéb helyről készítenek felvételeket. A felvételek könnyen megvásárolhatók, azok akár interneten keresztül letölthetőek. Néhány kép összes sávjával együtt néhány éve szabadon hozzáférhető az interneten, ám ezek csak oktatási célra használhatók fel, egyéb esetekben fizetni kell értük. Ebből az adatbázisból általában egy aránylag friss, de legalább 5 éves Landsat ETM+, egy 10 évnél régebbi TM kép, valamint néhány MSS felvétel tölthető le ugyan arról a területről.

Az aktuális műholdáthaladás-időpontokat táblázatból le lehet olvasni az adott évre. A táblázat megtalálható például a következő honlapon:

<http://www.eurimage.com/products/landsat.html>.

A 2000-es terepi mérések idején az a kedvező helyzet állt elő, hogy egyszerre működött a Landsat-5 és a Landsat-7-es műhold. Az augusztusi mérési időszakban ezért három áthaladás is esett (Landsat-7: augusztus 2., 18. és Landsat-5: augusztus 12.). Így, ha az első alkalommal kedvezőtlen légköri pára állt volna elő, még két másik időpontra halaszthattuk volna a méréseket.

Egy Landsat kép 185×185km-s területet fed le. A 189/27 (sor/oszlop) jelű kép DK-i képnegyede lefedi a Balatont teljes egészében, így nem is volt szükség az egész kép megvásárlására. A Landsat ETM+ képek kezdettől olcsóbbak voltak, mint a TM felvételek.

### **3.6. Műholdképek előkészítése (előfeldolgozása)**

A Balaton teljes egészében a Landsat TM és ETM+ érzékelők által készített 189/27-es azonosítóval (sor/oszlop koordinátákkal) rendelkező képek DK-i képnegyedében található. Egy képnegyed kb. 91×86 km-s területet fed le.

Műholdképek elemzésre történő előkészítés körébe tartoznak azok a képátalakítási eljárások, mely során a nyers képi adatból a vízminőségi adatok kinyerésére alkalmas felvételt készítettünk. Az előfeldolgozás (Csornai *et al.* 1991, Csató 2000) a vizsgálatba bevont képek esetében a radiometriai- és geometriai korrekció, a térképi vetületi

rendszerbe való illesztés és a légköri korrekció voltak. Az előkészítés utolsó lépése a vízzel borított felületekhez tartozó képpontok leválogatása volt.

A vizsgálatba bevont képek mindegyike azonos előkészítési folyamaton ment keresztül. Az eredmény vetületi rendszerbe illesztett, a légkör torzító hatásától mentesített, egymással összehasonlítható állapotba hozott képek sorozata lett. Az előfeldolgozás részei a következők voltak:

1. a képek összeállítása,
2. térképi vetületi rendszerbe történő illesztés,
3. atmoszférikus korrekció, a képek radiometriai összehangolása
4. az elemzésre szánt terület leválogatása.

### 3.6.1. A képek összeállítása

A szenzorok által érzékelt képet a műhold továbbítja a földi vevőállomásra. Ez a nyers adat számos hibával terhelt, például a légkör zavaró hatása (szóródás, átlátszóság, páratartalom stb.), az érzékelő műszer torzításai (geometriai, radiometriai), a műhold mozgásának ill., pályájának szabálytalanságai, a földfelszín domborzatának a reflektanciát és geometriát megváltoztató hatásai, a szomszédos területekről történő átsugárzás (Csornai *et al.* 1991). A földi vevőállomáson a felvevőrendszer adatai alapján korrigálni tudják a durva hibákat. A képnek ezt az intenzitásértékeit és a geometriai tartalmát is érintő eljárást rendszer-korrekciónak nevezik (Czimer 2001).

Műholdképek vásárlásakor általában megadhatjuk, hogy milyen feldolgozottsággal kérjük az adatokat. Így van ez a Landsat műhold által készített képek esetében is.

A kutatás során olyan Landsat képeket elemeztünk, amelyek mind radiometriailag, mind geometriailag korrigáltak voltak. Ez megfelel a Landsat7-es műhold ETM+ érzékelője által készített képeknél az L1G jelű korrekciónak.

A geometriai korrekció során az olyan a rendszerrel kapcsolatos hibákat javították, mint a szenzor mozgása (pl. rázkódás) miatti, a műhold pályaelemeinek rendellenességeiből (pl. magasság) eredő, vagy a Föld forgásából, görbületéből származó.

Ezen kívül a képeken radiometriai korrekciót is végeztek: a felvevőműszer torzításait a műszer adatainak ismeretében a földi vevőállomáson korrigálták, elvégezték a durva hibákat kiküszöbölő rendszer-korrekciót (Czimer 2001). A javítások során a felvevőrendszer sajátosságaiból adódó vízszintes csíkosság csökkent, ill. a felvételen belüli és a sávok közötti eltérő intenzitások lettek kiegyensúlyozottabbak.

A képek csatornákra bontva érkeztek hozzánk, és az elemzésre szánt sávokat – a termál (6. csatorna) és ETM+ esetén a PAN sáv elhagyásával – egy fájlba kellett integrálni. A szoftverek nem minden esetben voltak felkészülve az újabb és újabb formátumban érkező sávok képpé alakítására, de kisebb programozással mindig sikerült a kívánt eredményt elérnünk.

A Landsat műholdakon elhelyezett TM, ill. ETM+ érzékelők egy, a haladási irányra – É-ről D-re – merőlegesen oda-vissza mozgó tükörrel juttatják a Föld felszínéről az elektromágneses sugárzást az érzékelőkre. Egy sorban az 1–5-ös csatornán ill. a 7-es csatornán 16 érzékelő helyezkedik el. Ennek a sajátosságának a következménye a képek „csíkosága”, amely főleg az olyan kis intenzitás-érték különbségekkel rendelkező felületeken válik láthatóvá, mint a vizek. A földi vevőállomásokon ezen a rendszerhibán korrigálnak, de a jelenséget nem tudják teljesen eltüntetni.

A csíkoság – a tapasztalatok szerint (Lillesand *et al.* 1999) – nem tüntethető el egy egyszerű simító szűrő alkalmazásával. Mértéke és kiterjedése szinte sorról sorra változik. Az előkészítés során ezért nem alkalmaztunk szűrőket a képek csíkoságának eltüntetésére, mert ezzel a vízfelületekre jellemző kis intenzitás-érték különbségekben rejlő információt is kiszűrtük volna.

Az elemzések során figyeltük, hogy a vízfelületen kialakított mérési pontokon befolyásolja-e, hogy azok egy ilyen 16-os sáv közepére, vagy szélére esnek. Azt tapasztaltuk, hogy intenzitásértékben igen kicsi (1-2 intenzitás értéknyi) az eltérés, és ez a kialakított mintavételi módszer segítségével kiegyenlítésre került.

Ugyanakkor a csíkoság látható az eredményképekben is. Azonban ez nem jelentős különbség (maximum  $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill esetében) a környező képpontokhoz képest.

### 3.6.2. Térképi vetületi rendszerbe való illesztés

A műholdképek vetületi rendszerbe való transzformálása a geometriai korrekció második lépése. A képek vetületi transzformációjának két fő célja volt. Egyrészt biztosította a terepi mérési pontok azonosítását a műholdképeken, így össze lehetett vetni a képek különböző csatornákon mért intenzitásértékét a helyszínen végzett vizsgálatok eredményeivel. Másrészt lehetővé tette összehasonlítható tematikus térképek készítését.

A beillesztés célterülete a tó felszíne, a Kis-Balaton, ill. a D-i part mentén található halastavak, víztározók voltak.

A transzformáció során a képek képi koordinátaíhoz valamilyen valós vonatkozási rendszer koordinátáit rendeljük. Az illesztés az illesztőpontok módszere szerint (Csornai *et al.* 1991, Lillesand *et al.* 1999) végeztük. Az egyes – például a műholdképeken is látható – objektumokat különböző vonatkoztatási rendszerekbe helyezve, a rendszerbeli koordinátaival azonosíthatjuk. A feldolgozás során a transzformálandó Landsat képek vonatkoztatási rendszerét koordináta-transzformáció útján képezzük le egy meghatározott koordináta-rendszerbe. Az illesztés akkor végrehajtható, ha meg lehet határozni olyan pontokat, amelyeknek ismerjük mindkét vonatkoztatási rendszerbeli koordinátáit. Ezek a referenciapontok vagy illesztési pontok.

A terepi mintavételezés helyszíneinek koordinátái differenciális GPS mérés alapján WGS'84 geodéziai vonatkozási rendszer szerint adtuk meg. Ilyen vetületi rendszerű, a Balatont és környékét ábrázoló térkép, vagy például illesztőpontok GPS-szel történő azonosítására nem volt lehetőség. A polgári használatban legelterjedtebb magyarországi vetületbe, az Egységes Országos Térképrendszer (EOTR) 1:100000 méretarányú szelvényei segítségével, az Egységes Országos Vetületbe (EOV) illesztettük a műholdképeket. A mérési pontok koordinátáit számítottuk át EOV koordinátákká.

A két különböző koordinátarendszer – a kép koordináta rendszere (forrás) és az EOV (referencia) – közötti meg kell adni egy olyan összefüggést, egyenletet, amely a megfelelő koordinátákat átviszi egymásba.

A transzformálandó területen egyenletesen elhelyezett illesztési pontok forrás- és referencia koordinátái alapján számíthatók az egyenletek együtthatóit matematikai közelítő módszert alkalmazva. A közelítéskor feltételeztük, hogy első vagy másod fokú kétváltozós polinom pár írja le a transzformációt. A forrás és referencia koordinátákkal rendelkező pontokból az átlagos hibanégyzet minimalizálását elvégző legkisebb négyzetek módszere szerint határoztuk meg az egyenletek együtthatóit. Az így meghatározott transzformációs egyenletek alapján a többi forráskoordinátával megadott pontnak már meg lehet határozni a korrigált vonatkoztatási rendszerbeli (EOV) koordinátáit (Csornai *et al.* 1991).

Az első fokú polinominális transzformáció az egész képre egységes elforgatást, eltolást, nyújtást tartalmaz. Magasabb hatványok alkalmazásakor a kép különböző részei különböző módon deformálódnak. Ebben az esetben több és a vizsgálati területen minél szabályosabb elrendezésű illesztőpontokra (Geographical Control Point GCP) van szükség. Első fokú polinom alkalmazásánál torz eredményre vezethet, ha a

GCP-ket csak a kép egyik felében helyezük el, a kevés GCP melletti magas fokszámnál ugyanígy rossz eredményre jutunk (Bódis 1999).

Mindezek figyelembevételével mind a térképszelvények, mind a Landsat képek EOVBa való illesztése első fokú polinominális transzformációval végeztük.

Az átalakítás minősége az átlagos négyzetes gyök eltéréssel (Root Mean Square RMS) jellemezhető. Az RMS hiba értékét az inverz transzformációs függvény alapján számított hely és a forrásként megadott hely számított távolságainak négyzetösszegének számtani közepéből vont négyzetgyökeként lehet megadni. Mivel a forrás-koordináta-rendszerbe számít vissza, ezért az eredmény mértékegysége a képpont lesz.

Ha  $F(x)$  az inverz transzformáció függvénye, egy A pont referencia koordinátáit  $(x_a; y_a)$ -vel, forráskoordinátáit  $(x'_a; y'_a)$ -vel jelöljük, akkor az eltérés ( $d_a$ ):

$$d_a = \sqrt{(F(x_a) - x'_a)^2 + (F(y_a) - y'_a)^2} \quad (3.5.)$$

Az RMS hiba értékét  $z$  számú pont esetén a következő képlet alapján kapjuk meg (ERDAS Field Guide):

$$RMS = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_z^2}{z}} \quad (3.6.)$$

Az így kiszámított RMS érték minden képen a célterületre vonatkoztatva kisebb volt, mint egy elemi képpont.

Az újravételezés módja a legközelebbi szomszéd (nearest neighbour) módszerrel végeztük, hogy az eredeti intenzitásértékek a lehető legkevésbé változzanak.

A vetületi transzformációra a skóciai University of Stirling Távérzékelési laboratóriumában került sor. Az átszámítás öt 1:100000-es EOVR szelvény alapján készült: 32, 33, 42, 43, 44. Ezeket a szelvényeket raszterizálás után, minden fokhálózati keresztveződésüket felhasználva az illesztéshez, transzformáltuk EOVBa, majd egyetlen fájlba mozaikoltuk őket.

Az illesztőpontok – képenként legalább 10 – kiválasztásakor figyelembe kell venni, hogy lehetőleg egyenletes eloszlással kerüljenek a vizsgált területre. Ezt az elvet a pontosság érdekében még akkor is a lehető leginkább be kell tartani, ha a képnegyed kb. 7%-a olyan felszínborítással (vízfelület, ill. nádas) bír, ami nem teszi lehetővé illesztőpont elhelyezését. Kedvező hatással volt a beillesztés pontosságára, hogy a vizsgált terület – a tó felszíne, a Kis-Balaton, ill. a D-i part mentén található halastavak, víztározók – sík, a magasságkülönbség nem éri el a 15 m-t sem.

### 3.6.3. Atmoszférikus korrekció

A Föld légköre módosítja a műholdas- vagy légi- eszközökön elhelyezett érzékelőkbe a Föld felszínéről érkező elektromágneses sugárzást. A napsugárzás egy része az atmoszféra részecskéiről érkezik a szenzorba, s ugyanezek a részecskék változtatják (elnyelés, szórás stb.) meg a Föld felszínéről visszaverődő napsugárzás karakteristikáját. A légkör módosító hatása függ az atmoszféra összetételétől, állapotától, és a vizsgált hullámhossztól, valamint térben és időben igen változó. Az atmoszférikus korrekció során a távérzékeléssel készült képeket mentesítettük a légkör hatásaitól.

Olyan megbízható és robusztus módszert kellett választottunk, amely biztosította a képsorozatok közötti összehasonlíthatóságot. Az atmoszférikus korrekciót két lépésben tettük meg, először a sötét képpont (dark pixel/dark target subtraction) vagy hisztogram minimum módszerét alkalmaztuk, ezt követte a képek egymáshoz igazítása (Richards 1986, Chavez 1989, Hadjimitsis *et al.* 2004).

A hisztogram minimum egy egyszerű közelítő módszer, ami több néven is ismert (haze removal /Richards 1986, Chavez 1989/, dark target subtraction /Hadjimitsis *et al.* 2004/). Azon a feltételezésen alapszik, hogy az adott képnek minden sávban kell tartalmaznia olyan képpontot, amely az elektromágneses sugárzást teljesen elnyeli. Ha erről a helyről mégis felfog valamilyen jelet az érzékelő, az a légkör torzító hatása miatt történik. A módosító hatás sávonként különböző, általában a rövidebb hullámhosszakon ennek a mértéke nagyobb, mint a hosszabbakon. Ezzel a hibával kell minden képpont intenzitásértékét megjavítani, így szabadítva meg a képet a légköri páráról. A folyamat végére az eredeti fehéres-kékes árnyalat eltűnik, a kép dinamikája javul.

Hadjimitsis (*et al.* 2004) számos légköri korrekciós lehetőséget hasonlított össze olyan Landsat képeket elemezve, melyek víztározót ábrázoltak. Azt találta, hogy a hisztogram minimum módszer (vagy dark target subtraction) megfelelőnek bizonyult felhőmentes képek esetében más korrekciós módszerekkel szemben, amelyek kiterjedt meteorológiai és atmoszférikus adatot igényelnek.

A 3.3. táblázat néhány az előfeldolgozásba bevont Landsat TM kép sávonkénti intenzitás minimumát mutatja.

	1994. 07. 25.	1999. 06. 05.	1999. 09. 25.	2000. 08. 02.	2000. 09. 11.
1. sáv	55	46	38	57	46
2. sáv	18	14	12	39	16
3. sáv	14	9	10	28	13
4. sáv	1	6	6	11	7
5. sáv	1	1	1	8	1
7. sáv	1	1	1	5	1

3.3. táblázat. Landsat TM képek (189/27) intenzitásérték minimumai atmoszférikus korrekció előtt

A légkör okozta torzítások kiküszöbölését úgy is el lehet végezni, ha a műholdon és a Föld felszínén egy időben, a műholdon elhelyezetthez hasonló hullámhossz tartományban működő érzékelővel mérjük a felszínt elhagyó elektromágneses sugárzást. Így egyszerre rendelkezésünkre áll a légkör által módosított, és az attól mentes adat. Három mérési expedíció során spektrométerrel is végeztünk terepi méréseket – 1999. június 5-én és szeptember 9-én, valamint 2000. augusztus 2-án. A műhold áthaladását követő legközelebbi felhőmentes napon – többnyire másnap – a sármelléki repülőtér kifutójának aszfalton, ill. betonnal fedett területein is rögzítettünk fénymeneteket. Ez a homogén nagy felület minden képen jól látható volt. Mivel egy spektrométerrel rendelkezünk, ezért nem volt kivitelezhető, hogy egy napon végezzünk méréseket a Balatonon és a repülőtér kifutópályáján.

Az 1999. szeptember 9-én a műhold átvonulásának idejére már túl nagy területet borított felhő a Balatonból, ezért a csak a következő – teljesen felhő- és páramentes – képet, a szeptember 25-ét vettük meg. A mérések és az átvonulás között eltelt 16 nap nem tette lehetővé a terepi adatok alapján történő atmoszférikus korrekciót.

A másik két alkalommal nem voltak összevethetők a műholdon lévő ETM+ szenzor által rögzített intenzitásértékkel a terepi fénymérés adatai, még akkor sem, ha figyelmen kívül hagytuk a kifutópályán gyűjtött reflektanciákat. Nem lehetett matematikai összefüggést kimutatni a terepen- és a műholdon gyűjtött adatsor között. Ennek okai a következők lehetnek:

- A fénymérések a terepen hosszabb idő alatt történtek, például 2000. augusztus 8-án helyi idő szerint reggel 8.42-től 13.14-ig tartottak, az átvonulás pedig helyi idő szerint 10.30-kor történik. A hosszabb idő alatt nemcsak a Nap beesési szögéből adódó eltérések lehetnek felelősek a korán megkezdett méréseknél.

– A vizsgálat reggelén még teljes szélcsendben tükör-szerű vízfelület mellett történt. Helyi idő szerint 11 óra felé már feltámadt a szél és hullámos lett a vízfelszín, és ez is okozhatott eltéréseket.

– A spektrométerrel a Landsat ETM+ 1–4 csatornáit lehet modellezni. Éppen azokat, melyeket leginkább befolyásol a légkör páratartalma.

Ezért a spektrométeres terepi mérések adatait nem használtuk fel a légköri korrekcióhoz.

Az előkészítésnek a következő fázisa során a képek radiometriai összehangolását végeztük el. Az eljáráshoz olyan felületeket választottunk, amely amelyek:

- homogének, egységesek, minél több képpontnyi területet fedjenek,
- felületük nem változott a vizsgálati időszakban (1994-2000),
- fényvisszaverési mutatói állandónak tekinthetők, azt legfeljebb a páratartalom és a nap beesési szöge befolyásolja.

A légköri korrekció második lépésének lényege az volt, hogy a különböző időpontokban készült képeket úgy alakítsuk át, mintha azonos légköri feltételek mellett készültek volna, ezzel biztosítva összehasonlíthatóságukat. A képeken található kifutópályák betonnal, ill. aszfalttal borított felületét választottuk referenciacélul. Nemcsak mesterségesen létrehozott felület szolgálhat referenciaként, hanem például rendszeresen nyírt és locsolt labdarúgó-, vagy golf pálya, esetleg fűvel borított reptér.

Az azonos területet ábrázoló, különböző időpontban készült képek közül kiválasztottunk egyet, amely legkevésbé volt párás. Ehhez az alapképhez igazítottuk a többit azzal a feltételezéssel, hogy a kiválasztott állandó fényvisszaverésű felületekről minden képen, minden sávban ugyanannak az intenzitásértéknek kell megjelennie. Az eltérés megszüntetésére olyan szorzótényezőket keresünk a módosítandó képek minden egyes sávjára, amely visszaállítja ezen „eredeti” intenzitásértéket, így tüntetve el a légkör módosító hatásából adódó különbségeket. A módszer alkalmazásakor feltételezzük, hogy a képnegyeden a légkör térben homogén módon torzítja az intenzitásértékeket, ill. az alapképen esetleg fennálló inhomogenitásokat „öröklük” a sorozat további képei.

A 189/27-es kép DK-i képnegyedén három valaha katonai reptérnek épült betonborítású kifutópályája (2500 m hosszú és 60 m széles) látszik, így nagyobb területet áthidaló adatok alapján lehetett az összehangolást elvégezni. A viszonyításban a következő reptereket használtuk fel:

- Pápán a reptér a képnegyed ÉNY-i szélére esik, csak részben látszik,



- Sármelléken a beton kifutó és nagyobb aszfalttal borított területtel,
- a Szentkirályszabadja melletti reptér beton kifutója.

Az 1999 évi vizsgálatok során még a feltételeknek megfelelőnek gondoltunk Tihanyi-félszigeten, a Belső-tó mellett található focipályát, amiről kiderült, hogy nem nyírnak rendszeresen, állapota évről évre változik. Az összehangolás során nagy változékonysága miatt nem használtuk fel ezt a területet.

Siófokról délre található egy füves kifutópályával rendelkező sportreptér. Az innen gyűjtött intenzitásértékeket viszont csak nagy körültekintés mellett lehetett az elemzésbe bevinni.

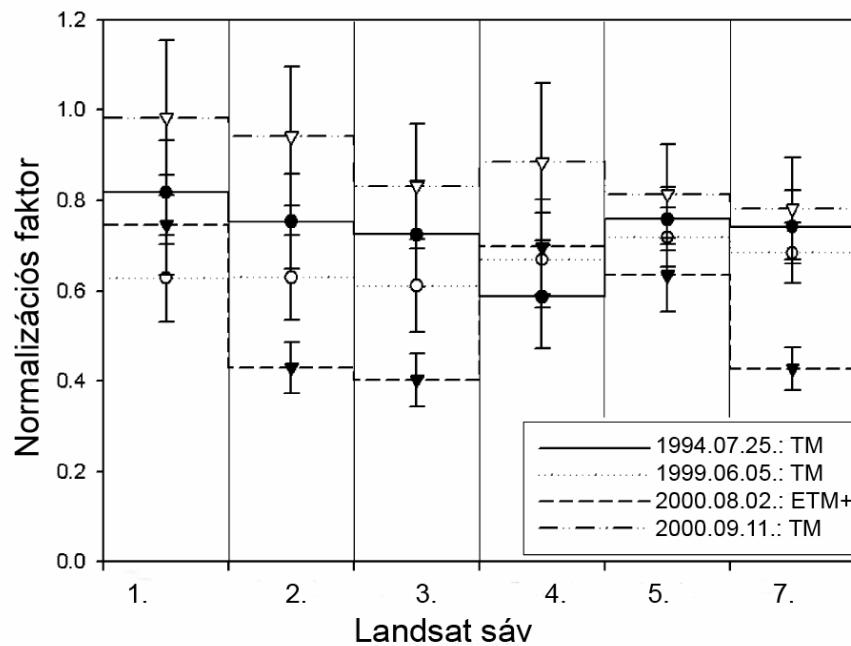
A legkevésbé páras képnek az 1999. szeptember 25-én készült kép bizonyult. A hasonlításához használt alap értékek kiszámításához minden kifutópályán 20 pont, a sármelléki aszfaltról pedig 5 pont átlagát vettük. Ugyanennyi pont szolgált a többi képen az illesztéshez, egy másik 20-20, ill. 10 pontból álló sorozat volt az ellenőrzés alapja.

A módszert nem lehet automatikusan alkalmazni, ki kell hagyni a normalizációs faktor megállapításából azokat a felületeket vagy sávokat, ahol a trendtől eltérő tényező adódott a szórások alapján. A különbség oka lehet, hogy az alapfeltételezéssel ellentétben nem volt homogén a légkör torzító hatása a vizsgált területen. Az eltérés lehet lokális, ilyenkor az eltérést mutató repteret hagytuk ki a normalizálásból, de lehet spektrális is. Ebben az esetben egy, vagy több sávon nem adódik olyan normalizációs faktor, amelynek segítségével a képek összehangolhatók lennének.

	1994. 07. 25.	1999. 06. 05	2000. 08. 02.	2000. 09. 11.
1. sáv	0,818	0,628	0,746	0,982
2. sáv	0,753	0,629	0,430	0,942
3. sáv	0,725	0,611	0,402	0,832
4. sáv	0,587	0,669	0,698	0,885
5. sáv	0,759	0,720	0,635	0,814
7. sáv	0,742	0,684	0,428	0,782

3.4.táblázat. Az eredeti képek különböző sávjainak összehangolására alkalmazott normalizációs faktorkok.

A normalizálás eredményének ellenőrzése a számításokhoz felhasznált képpontoktól különböző, a kifutópályákhoz tartozó intenzitásértékének az alapképhez (1999. szeptember 25.) való hasonlításával történt. Az eredményről elmondható, hogy ez minden képnél, és minden igazított sávnál 10%-os határon belül volt.



3.6. ábra. A kép normalizációs faktorainak összehasonlítása a képi adatokkal. A hibásávok két standard hibának felelnek meg.

A Landsat ETM+ érzékelő által készített kép bizonyult a legkevésbé konzisztensnek, és a 3.6. ábra és a 3.4. táblázat alapján is látszik, hogy ez kívánta a legnagyobb mértékű korrekciót a 2. és 3. sávban. A Landsat TM normalizációs faktorok a nagyobb hullámhosszak mellett egyre csökkentek.

A többféle stabil felszínhez való viszonyítás segítségével elsimultak a képet korábban terhelő apróbb atmoszférikus különbségek is. A légköri korrekció eredményeként radiometriai szempontból összehasonlítható képsort kaptunk, amely alapvető volt a további elemzések elvégzéséhez.

#### 3.6.4. Az elemzésre szánt területek leválogatása

Az előfeldolgozás utolsó lépése a vízzel borított képpontok leválogatása volt. Ezek elsősorban a Balaton, a Kis-Balaton, ill. a Balatontól délre található tározók tavak (pl. Marcali-tároló, a balatonföldvári halastó stb.). A további elemzések bemeneti adata már csak vízzel borított felület lehet. A szárazföld és a víz határa nem mindenhol egyértelmű, és kis mértékben évről évre változik, ezért minden képen el kell végezni a szétválasztást.

A módszer egyfajta osztályozásnak is tekinthető, azon alapszik, hogy a víz a látható fény tartományában (0,4–0,7  $\mu\text{m}$ ) aránylag magas intenzitás értékekkel jelentkezik, ezzel szemben minden fényt elnyel 0,9  $\mu\text{m}$  felett (Lindell *et al.* 1999). Azok a

képpontok, amelyek igen alacsony intenzitásértékkel rendelkeznek az 5. csatornán, de magassal a 2. csatornán, nagy valószínűséggel vízzel borítottak a valóságban.

A magyarul pontdiagrammnak nevezhető Feature Space vagy Scattergram segítségével legegyszerűbb ez a leválogatás. Derékszögű koordináta-rendszerben ábrázoltuk a képpontokhoz tartozó intenzitásérték párijait, az egyik tengelyen a 2. a másikon az 5. Landsat csatornán mértéket. A víz borította felülethez tartozóak az egyéb területektől igen elkülönülnek, egyszerű belőlük csoportot alkotni.

A leválogatás eredményét felül kellett vizsgálnunk, mert az eljárás során olyan képpontok is a vízzel fedett terület kategóriába sorolódtak, amelyek a valóságban kőzet borításúak – Balaton-felvidék bazalt tanúhegyek oldalai, ill. felhők voltak. Ez utóbbiakat a víztől eltérő fényvisszaverési sajátosságok alapján távolítottuk el az elemzésre szánt hasznos területről. Minden a Balatontól északra elhelyezkedő képpont félreosztályozottnak volt tekinthető, így ezek nem vettek részt a további elemzésben sem.

A további elemzésekbe már csak a fentiekben leírt leválogatás eredményeként létrejött képeket vontuk be. Ezek a vízzel borított földfelszínt fedik le: a Balatont, a tőle délre, dél-nyugatra elhelyezkedő tavakat, mesterséges tározókat, és a Kis-Balatont. Ezeket a képeket a későbbiekben előfeldolgozott műholdfelvételeknek fogjuk nevezni.

Az elemzésre kiválasztott nyers műholdképek több lépcsőből álló előkészítési folyamat végén váltak alkalmassá az elemzésre. Minden kép ugyanazon eljárások sorozatán esett át, ami biztosítja az összevethetőségüket.

A főbb lépések a nyers kép összeállítása, a vetületi rendszerbe való illesztés, a légköri korrekció, és végül az elemzésre szánt – azaz vízzel borított – terület leválogatása voltak.

### **3.7. Távérzékelte adatok elemzési módszerei**

Az adatok statisztikai feldolgozását minden esetben megelőzte azok normalitás-vizsgálata. Ezt az Anderson Darling teszttel végeztük Minitab V. 13 szoftverrel. A p érték minden esetben meg meghaladta a 0,05-öt, kielégítve a normalitás feltételét.

#### **3.7.1. Távérzékelte adatok és vízminőség összefüggései (korreláció, regresszió)**

Pearson-féle korreláció segítségével vizsgáltuk, hogy van-e összefüggés a vízminőségi és a távérzékelt adatok között. Összevetettük a víz színe fölött gyűjtött, majd a Landsat sávoknak megfelelően összevont reflektanciákat és a műholdképek adatait is a vízminőségi jellemzőkkel. Szoros, szignifikáns összefüggés csak a lebegőanyag-tartalom esetén adódott.

A megfelelő adatok alapján kiszámítottuk a regressziós együtthatókat, segítségével ezek után már számítani lehetett a lebegőanyag-mennyiségét az olyan Landsat képeknél, ahol ennek mérése nem történt meg, vagy az adat nem állt rendelkezésre. A többi jellemzővel nem adódott szoros szignifikáns összefüggés.

### 3.7.2. A „lágý” (soft) osztályozási technika

A természetben igen ritka, hogy egy elemi képrészlet (pixel) egyetlen felszínborítási kategóriához tartozzon. A távérzékélés során alkalmazott szenzorok a folytonos valóságot diszkrét képpontokra bontják, mindegyikhez – sávonként egy intenzitásértéket rendelve. A valóság térbeli mintázata azonban nem igazodik a szenzor által a terepre húzott rácshálóhoz. A felszínborítási típusok térben változatosan helyezkednek el saját törvényszerűségeiket követve, s az átmenet köztük általában folyamatos. Következésképp a távérzékéléssel készült képek tartalmaznak olyan képpontokat, melyek több felszínborítási osztály keverékeként állnak elő.

A felszínborítási típusok távérzékelt adatok alapján való szétválasztására a leggyakrabban alkalmazott módszer az irányított osztályozás. Ezzel a technikával a keverék képpontok is valamilyen döntési eljárás alapján osztályba sorolódnak. Az eredmény kvalitatív, tematikus térkép lesz, ahol a képpontok egyértelműen egyetlen osztályhoz tartoznak, mintha a valóságban homogén egységet képviselnének egyértelmű határvonalakkal. A kevert képpontok abba az osztályba sorolódnak, melyhez spektrálisan leginkább hasonlítanak, vagyis amelyikből felületükön a legtöbb található. Az apróbb, a területre húzott rácshoz nem igazodó – akár lineáris –, vagy nagy területi változékonysággal bíró jelenségek, az irányított osztályozás hatására eltűnnek.

Az irányított osztályozási technikát a szakirodalom az angol „hard” (kemény) szóval illeti, a képponton belüli információ kinyerésének folyamata az angol „soft” (lágý) jelzöt kapta. Az eredmény ugyanannyi térkép lesz, mint ahány osztály volt a kiindulásnál. A képponthez rendelt, pontról pontra folytonosan változó, érték pedig az adott csoporthoz tartozás mértékét jellemzi. Nagyobb értékek adott képponton belül nagyobb területet, annak spektrális tulajdonságaival szorosabb kapcsolatot feltételeznek.

Az eredmény kizárólag a képpont összetételéről ad információt, ezek térbeli elhelyezkedéséről nem (van der Meer *et al.* 2000).

Ahhoz, hogy a víz fényvisszaverésében szerepet játszó alkotóelemek mennyiségét minél pontosabban becsülhessük, képponton belüli („soft”) információt kell nyernünk. A különböző módszerek más-más típusú elemzés és képpont méret esetén vezetnek megfelelő eredményre. Kijelenthető, hogy bármelyik módszert is alkalmazzunk, szükséges, hogy rendelkezünk megfelelő terepi adatokkal a becslés pontosságának megadásához, hogy a kapott rész képponti értékeit összehasonlítsuk a valós mennyiségekkel (pl. regresszió analízissel).

Az egyik „lágý” technika a fuzzy c-közép algoritmus, mely iteratív módon méri a képpontoknak a spektrális térben kialakított osztály-középpontoktól vett távolságát. Előnye, hogy nem feltételezi a tanulóadatokat normáeloszlását. Sikerral alkalmazzák durva felbontású multispektrális képeken a különböző vegetációval fedett területek szétválasztására (Foody 1992). Ebben a kutatásban nem állt rendelkezésünkre olyan szoftver, amely szükséges a fuzzy c-közép algoritmus alkalmazásához.

Másik „lágý” technika a mesterséges neurális hálózatok alkalmazása (artificial neural network). Ennek a technikának az alkalmazása nagy tömegű terepi alapadatra támaszkodik (Atkinson *et al.* 1997, Barsi 1997, 1998), amit nem állt módunkban előállítani, ezért ezt a lehetőséget is elvetettük.

Egy további „lágý” osztályozási módszer, a lineáris szétválasztás (linear mixture modelling) használata mellett döntöttünk. Tanulmányok bizonyították, hogy a többi „lágý” technikához hasonlóan jó eredményekkel szolgált (Bastin 1997, Atkinson *et al.* 1997). Alkalmazása nem igényel széleskörű terepi alap adatot, és az ENVI (Environment for Visualising Images) szoftvercsomag tartalmazza az alkalmazásához szükséges eljárásokat.

A lineáris szétválasztás azon az elven alapul, hogy egy képpont földfelszíni vetülete több különböző spektrális tulajdonsággal rendelkező darabból áll, a szenzorba jutó jel az ezekről érkező reflektanciák keverékeként áll elő. A szenzorba jutó adatot lehet azután az azt felépítő összetevőkre szétbontani, ha ismerjük a spektrális keveredés módját.

A lineáris szétválasztás során feltételezzük, hogy a képpontot felépítő anyagok között nincs kölcsönhatás. Ha minden foton egyetlen anyagféleséggel találkozik a jelek lineáris módon összeadódnak (Settle *et al.* 1993). Ha a foton több anyaggal találkozik, akkor a jelek többszörös szorzódásáról lehet szó, ami nem lineáris.

A keveredés fokának meghatározásával és linearitás vizsgálatával számos kutató foglalkozott. Singer és McCord (1979) azt találta, hogy ha a keveredés skálája nagy (makroszkópikus), akkor annak jellege lineáris lesz. Mikroszkópikus, vagy belső keveredés esetén általános, hogy a keveredés jellege nem lineáris (Nash *et al.* 1974, Singer 1981).

Boardman (1989a, 1989b, 1991) a makroszkópikus keveredés problémáját szinguláris értékbontással (singular value decomposition SVD) vizsgálta, hogy meghatározza a spektrális keveredés fokát és linearitását. Az eljárás feltételezte, hogy a legtöbb keveredés makroszkópikus, ezért lineáris. Az esetek nagy részében azonban jelentős a belső keveredés is, ekkor is jó közelítést ad, ha lineárisként kezeljük őket.

Összességében a keveredés térbeli módja és a felszín borító felületek kiterjedése határozzák meg együttesen, hogy mennyire nem lineáris a spektrumok keveredése. A nagy skálájú keveredés lineáris jellegű, a kis skálájú keveredés, vagy az anyagok kölcsönhatása esetén a keveredés nem lineáris, sokszor másodfokú. Számos földfelszín borító anyagról való visszaverődés nem lineáris módon keveredik, de a lineáris szétválasztás módszere a legtöbb esetben még ekkor is igen jó eredményt hoz (Boardman *et al.* 1994).

Boardman (1989a) igen egyszerű lineáris szétválasztást vázolt fel, amely lineáris kapcsolaton alapul a megfigyelt spektrum és a különböző felszínféleléseket tisztán, önmagukban jellemző fényvisszaverési tulajdonságok között. A tiszta, csak az adott felszínborításra jellemző spektrumot szélső pontnak (end-member) is lehet nevezni, mert a spektrális térben ez egyfajta szélsőséget képvisel a kevert képpontokhoz képest. A különböző felszínfélelések képponton belüli aránya számítható, ha megfordítjuk a lineáris kapcsolatot (3.7.).

$$A \times X = B \Rightarrow X = A^{-1} \times B \quad (3.7.)$$

ahol

A szélső pontok spektrumainak mátrixa ( $M \times N$  mátrix),

X ismeretlen eloszlási vektor ( $N \times 1$  mátrix),

B az adott képponton észlelt távérzékelt adat vektor ( $M \times 1$  mátrix),

M a felhasznált sávok száma,

N a keveredő felszínfélelések száma.

A számítási műveleteket olyan adatbázison lehet elvégezni, ahol több csatorna áll rendelkezésre, mint szétválogatandó felszínfajta (Boardman 1989a). Ezt az állítást

Settle (*et al.* 1993) azzal finomította, hogy a képpontot felépítő felszín típusok száma legyen kevesebb vagy egyenlő az adatbázison belüli dimenziók számával (3.8.).

$$c \leq n + 1 \quad (3.8.)$$

ahol

$c$  a felszín típus száma,

$n$  az adatbázis spektrális dimenzióinak a száma.

Nem elég, ha több sáv áll rendelkezésre, mint szélső pont, mert sokszor az egyes csatornák igen hasonló információ tartalommal bírnak. Az adatbázis belső spektrális dimenzionáltságát például Minimális Zaj Frakció (Minimum Noise Fraction MNF) transzformációval meg lehet határozni.

Az alkalmazás körülményeitől függően a lineáris szétválasztás a végeredmény szempontjából lehet „korlátozott” (constrained) vagy „nem korlátozott” (unconstrained). A „korlátozott” lineáris szétválasztás esetén a képpontot felépítő felszín darabok ( $f$ ) aránya a képponton belül nem lehet negatív, és összességük ki kell adja az egy képpontnyi egységet (3.9).

$$f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_c = 1 \quad (3.9)$$

ahol

$f$  a felszín darab aránya a képponton belül,

$c$  ennyi felszín darabból áll a képpont.

A „nem kényszerített” modell használata esetén az eredménynek semmilyen szabályszerűséget nem kell követnie. Ezért az eredmény irreális is lehet, például a felszín borítások összege nagyobb, mint egy, vagy negatív felszín fedettség az adott kategóriában.

A gyakorlatban a lineáris szétválasztás a következő fő lépéseken keresztül véghezvük:

1. a képek jel-zaj arányának maximalizálása, a képi adat dimenzionáltságának megállapítása,
2. a keletkezett új vektortérben a szélső pontoknak az azonosítása
3. a szélső pontok alapján lineáris szétválasztás végrehajtása,
4. a szélső pontok szerinti eloszlás térképeken alapuló kalibráció regresszió vagy multivariációs regresszió segítségével.

A folyamat végeredménye olyan regressziós egyenlet lett, amely segítségével az a-klorofill-eloszlása meghatározható volt.

1. Az előfeldolgozott Landsat képek jel-zaj arányát maximalizáltuk és információ-sűrítést végeztünk az MNF-transzformációval. A rendelkezésre álló képi adatok valódi dimenzionáltságát is megállapíthattuk a transzformáció után.

Az MNF-transzformáció alapvetően továbbfejlesztett főkomponens analízis (Principal Component Analysis, PCA), amely két, egymás után végrehajtott főkomponens számításból áll. Az első dekorrelálja, és újraszkalázza az adathalmaz zajösszetevőit egy becsült zaj-kovariancia-mátrix alapján. A második szakaszban a zajjal súlyozott adathalmazon hagyományos PCA-transzformációt hajt végre (Green *et al.* 1988).

A bemeneti adat minden esetben a hat előfeldolgozott Landsat TM sáv volt, a termál sávot kivontuk az elemzés alól. Az MNF-transzformáció eredményeként újabb 6 sávot kaptunk, melyek rendre csökkenő képi információval rendelkeznek. Az utolsó sávok túlnyomó részt már csak zajt tartalmaznak.

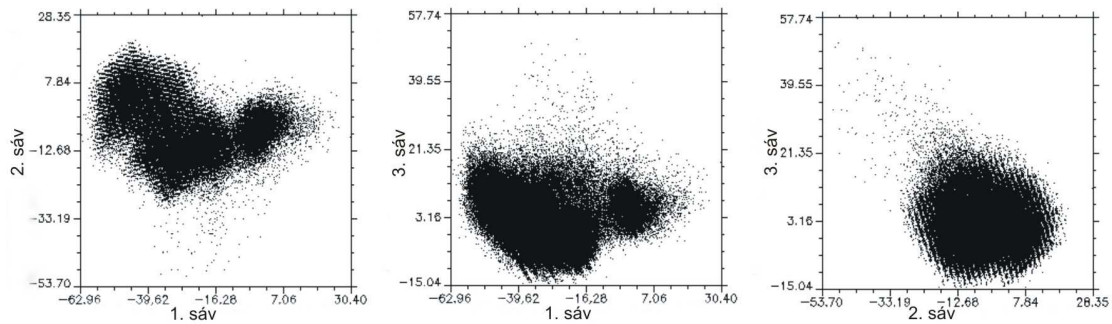
Az MNF-transzformáció során a főkomponens-analízishez hasonlóan ún. sajátérték-vektorok kerülnek kiszámításra. Nagyobb sajátérték nagyobb variációt jelez. Mivel a zajt egységnyire skálázza az algoritmus, így az egyhez közelítő sajátértékek szinte csak zajt tartalmaznak. Az adathalmaz belső dimenzionáltságát megadja, hogy hány egytől különböző sajátértékű MNF sávval rendelkezik. Ezeket használtuk fel a tiszta spektrumok vagy szélső pontok meghatározásában.

Az adathalmaz belső dimenzionáltságának ismerete azért fontos, mert minden egyes lineárisan független komponens egy újabb dimenziót jelent a tiszta spektrális adatállományban. Ha ismerjük a spektrális adatbázisunk valamennyi dimenzióját, vagyis a tiszta spektrumú tagjait — amiben az MNF-transzformáció nagy segítségére van a felhasználónak — akkor könnyebb kiválasztani a tiszta spektrumokat.

Az MNF-transzformáció során megkerestük azokat az MNF csatornákat, amelyek a legtöbb hasznos, redundanciamentes információt tartalmazták. Esetünkben ez az első négy csatornát jelentette minden elemzett képre.

2. Az MNF-transzformáció eredményeként előálló, három legmagasabb sajátértékkel rendelkező csatorna alkotta vektortérben (3.7. ábra) kerestük a tiszta spektrumokat. A negyedik, még mindig megfelelően magas sajátértékkel rendelkező, sávot a szélső pontok meghatározásába nem is kellett bevonni, mert a szélső pontok elkülönítését már az első három MNF sáv alapján el tudtuk végezni.





3.7. ábra. 2000. 09. 11-én készült kép első három MNF sávjának különböző párosításai pontdiagramon

Azt figyeltük, hogy milyen az értékek eloszlása, meghatározható-e a keveredés módja, szétválaszthatóak lesznek-e az egyes komponensek. A rendelkezésre álló Landsat képek belső dimenzionáltsága lehetővé tette négy relatív értelemben tiszta spektrum szétválasztását. A tiszta képpontok az MNF vektortérben elhelyezkedő pontfelhő szélein, kicsúcsosodásain helyezkednek el. A feladat a jelentőséggel bíró szélső pontok megtalálása, és a megfelelő méretű pontfelhő-darab lehatárolása. Az adott jellemző ezeken a szélső pontokon a többi képponthez képest tartalmazott a legtöbbet vagy legkevesebbet az adott jellemzőből. A leválogatásban segítséget nyújtott a lebegőanyag térkép, a terepi mintavétel során gyűjtött vízkémiai adatok, egyéb helyszíni ismert például a BLKI részéről, térképekről vett adatok.

A szélső pontok meghatározásában hasonló megközelítési módot alkalmaztunk, mint Adams (*et al.* 1993) és Rainey (*et al.* 2003). Az ENVI szoftver lehetőségeinek kihasználásával az 3.7. ábrán látható pontfelhőt például át lehetett színezni a szerint, hogy az egyes pontok milyen gyakorisággal fordulnak elő a képen (density slice). Egy másik ENVI kínálta lehetőség az volt, hogy a leválogatott szélső pontok valós térbeli elhelyezkedését a műholdképre vetítve meg lehetett tekinteni. Ezzel további információt kaptunk arról, hogy hogyan kell változtatni a szélső pont leválogatásán, így iteratív módon történt a szélső pontok lehatárolása.

A talált szélső pontokat a következő négy vízminőségi kategóriákba soroltuk jellemzőik alapján: a magas lebegőanyag-tartalom, a tiszta ülepített víz, a magas a-klorofill-tartalom, valamint a magas lebegőanyag- és az a-klorofill-töménység. A négy szélső pontok vízminőségi félesége egyezik a medencekísérletekben alkalmazottakkal.

Miután egy képnél meghatároztuk a tiszta spektrumokat, ENVI segítségével kiszámítottuk az ezeknek megfelelő képpontokhoz tartozó Landsat kép sávonkénti átlagát (kivéve a termális sávot).

3. A lineáris szétválasztást a tiszta képpontok meghatározása után a lineáris keverékmódellet (linear mixture modell) állítottunk fel.

A négy szélső pont alapján „korlátozás nélküli” spektrális szétválasztást (unconstrained spectral unmixing) hajtottunk végre ENVI nevű szoftverrel. Az eredmény annyi szürkefokozatos kép, ahány eredeti végpont volt, valamint egy RMS hibákat tartalmazó sáv. Ahol az RMS sáv értéke magas, ott nem sikerült jól a végpontok megválasztása. Ebben az esetben megismételtük a szélső pontok leválogatását kissé módosítva a bevont pontok számát, elhelyezkedését.

Lineáris keveredés esetén a szürkefokozatos képek megmutatják, hány százalék az adott földfelszíni komponens aránya a vizsgált képponton, ezért a képpontokhoz tartozó értékek általában 1–0-ig terjedhetnek. A vizek esetében a spektrális keveredés nem lineáris, ezért a „nem kényszerített” (unconstrained) szétválasztást alkalmaztunk, így előfordult negatív, és 1-nél nagyobb érték is az eloszlás-térképeken. Az utolsó lépés az eloszlástérképek és a terepi adatok közötti összefüggés megtalálása volt.

4. Regressziós vagy multivariációs regresszió segítségével teremtettünk kapcsolatot a szétválasztott eloszlási térkép és a terepen mért adatok között.

A kalibráció folyamata során először meghatároztuk a mintavételi pont helyét a műholdképen. Figyelembe véve a mintavételt végző hajó sodródását a mintavétel alatt, amely egyik esetben sem haladta meg a 100m-t, valamint a képfeldolgozás során a vetületbe való illesztéskor történt legfeljebb 2 képpontnyi eltolódást, mindig a képpont körül elhelyezkedő 5×5-ös mátrixot vizsgáltuk.

A többváltozós regresszió analízist a Minitab V. 13 elnevezésű szoftver segítségével végeztük. Az ún. „best subsets” regressziós analízist alkalmaztuk annak érdekében, hogy megtaláljuk az optimális többváltozós regressziót a terepen mért a-klorofill és a lineáris szétválasztás során keletkezett eloszlási értékek között. A végső többváltozós regressziós modelt alkalmaztuk azután az 1994 júliusában készült felvétel esetében a-klorofill-tartalom becslésére. Az eredményeket olyan terepi a-klorofill adatokkal ellenőriztünk, melyek mintavétele a műhold áthaladásához képesti két napon belül történt.

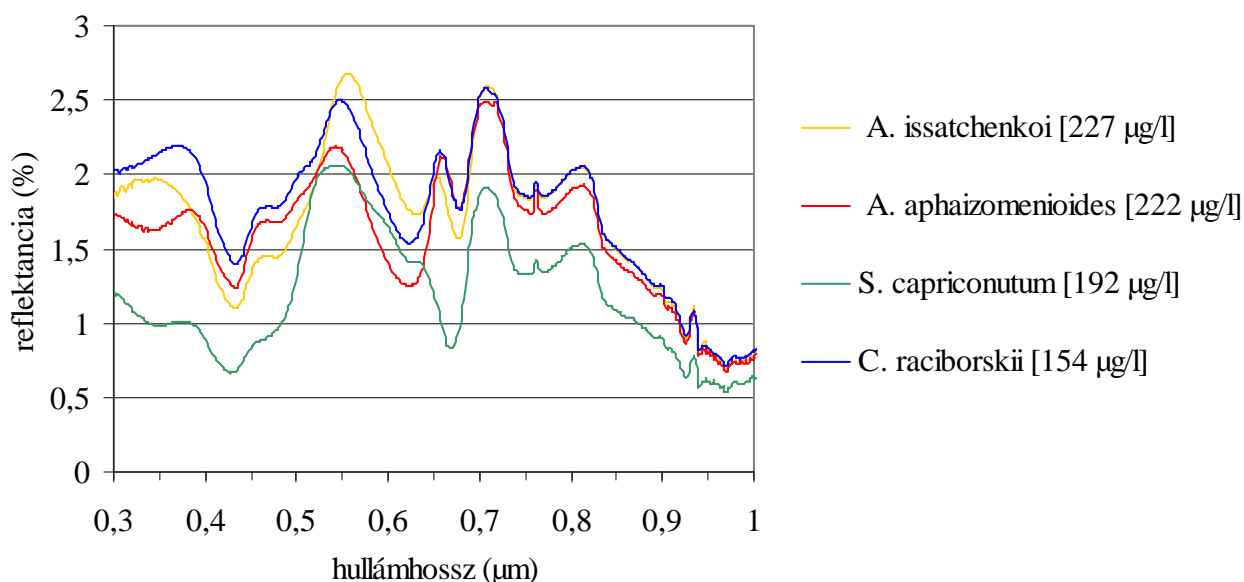
## 4. EREDMÉNYEK

### 4.1. Medencekísérletek eredményei

A medencekísérletek felépítését úgy terveztük meg, hogy támogassák a Balatonon végzett (*in situ*) fénymérések eredményeit. További céljuk volt annak eldöntése, hogy a lebegőanyag, vagy az a-klorofill úgy járul-e hozzá a víz spektrumához, hogy abból ezek valamelyike meghatározható lenne. Valamint tesztelni lehetett velük az alkalmazandó matematikai-statisztikai módszer érvényességét. Mindemellett egyéb törvényszerűségek megállapítására is módot adtak.

#### 4.1.1. Az a-klorofill és a lebegőanyag fényvisszaverési tulajdonságai

A Balaton tekintetében a nyári algavirágzásokkor legnagyobb tömegben jelen levő algafajok fényvisszaverési tulajdonságai a 4.1. ábrán látható.



4.1. ábra. A különböző algafajok fényvisszaverési tulajdonságai (szögletes zárójelben az a-klorofill-koncentráció)

A magas ( $154\text{--}227\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a-klorofill-koncentrációjú Balaton-víz fényvisszaverési görbéi alapján a következő megállapításokat lehet tenni:

- minden görbe reflektanciaértéke igen alacsony: a legnagyobb maximum is kisebb, mint 3%, a görbék kis intervallumon belül mozognak,
- a különböző algafajok nem különíthetők el egymástól görbéjük alapján,

– a reflektanciagörbék sajátos menettel (minimumok, maximumok) rendelkeznek, melyek alapján ki lehet jelölni a jellegzetes pontokat tartalmazó hullámhossztartományokat.

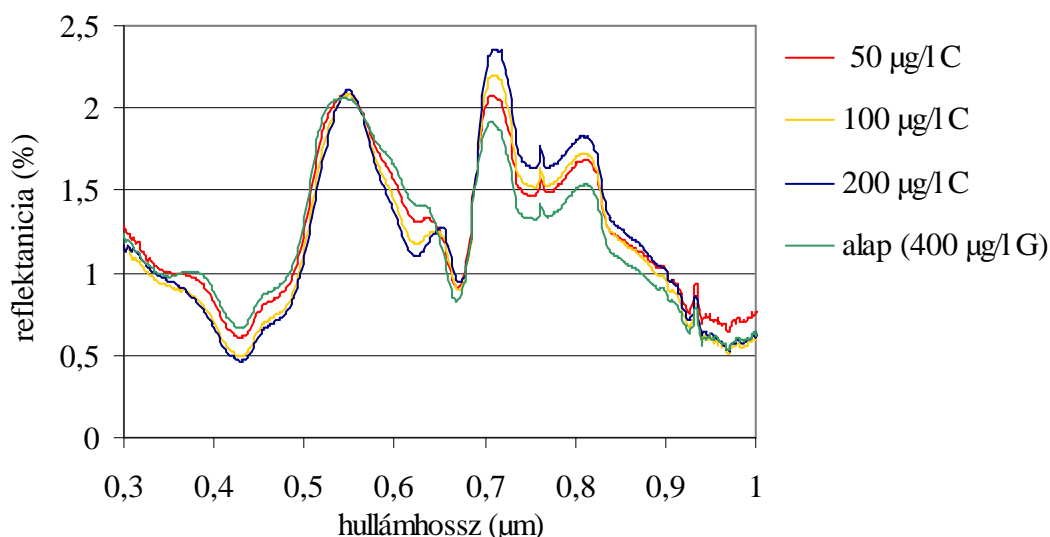
A látható fény és a közeli-infravörös tartományban az általunk tanulmányozott algakultúrák a beeső fény több mint 97%-át elnyelték. A vizsgált spektrumokon a fitoplankton reflektanciagörbéi igen kis tartományon belül mozognak. Ebből az következik, hogy nagy színmélységű és érzékenységgű szenzort kell alkalmaznunk, ha az algabiomassza fényvisszaverési tulajdonságairól szeretnénk többet megtudni.

A 4.1. ábrán látszik az is, hogy a különböző algafajok nem különíthetők el még a terepi spektrométer jó felbontóképességű szenzorával sem. Ugyan *S. capricornutum* mutat kisebb eltérést a több algafaj görbéjének menetétől, de ez sem teszi lehetővé megkülönböztetését. Az eltérés leginkább a zöld színtestek fényelnyelése miatti minimumot (0,67–0,68  $\mu\text{m}$ ) megelőző maximum kimaradásában nyilvánul meg. A függvények menete inentől megint hasonlóan alakul. A távérzékelés eredményétől ezért nem várhatjuk majd el, hogy a fitoplankton összetételéről adjon tájékoztatást.

A különböző algakultúrákkal végzett medencekísérletek során tapasztalt fényvisszaverési görbék menete hasonló volt az 1985-ben Gitelson (*et al.* 1993a) által a Balatonon tapasztaltakéval (2.2. ábra). Az akkor vizsgált vizek lebegőanyag-tartalma nem ismert, ezért csak a görbék menetei összehasonlíthatóak. Mindkét esetben az első fényvisszaverési csúcs 0,56  $\mu\text{m}$  környékén tapasztalható, bár a medencekísérletek során ez inkább 0,545–0,555  $\mu\text{m}$ -en volt. A csúcs oka a fitoplankton fotoszintetikus pigmentjeinek alacsony fényelnyelése és a vízben lévő részecskék e hullámhosszra jellemző fényszórása. Ezt mindkét esetben hullámvölgy követi, melynek legmélyebb pontja 0,63  $\mu\text{m}$ -en található, oka pedig a cianobaktériumok színtestjeinek, a pikocianinnak a fényelnyelése miatt következik be. A következő minimum 0,675  $\mu\text{m}$ -nél található, melyért az a-klorofill fényelnyelése felelős. A két minimum között egy helyi maximum látható, mely a medencekísérletek esetében jóval markánsabb. 1985-ben és 2000-ben is volt olyan görbe, amely nem rendelkezett ezzel a csúccsal: 1985-ben az alacsony a-klorofill, 2000-ben pedig a *S. capricornutum* tartalmú víz. Az utolsó jellegzetes csúcs 0,685–0,715  $\mu\text{m}$  között figyelhető meg, mely jelenségnek egyik lehetséges oka az a-klorofill színtestek fluoreszkálása. Az 1985-ben használt spektrofotométer 0,75  $\mu\text{m}$ -ig érzékelt, és 0,71  $\mu\text{m}$  felett már csak a meredeken csökkenő reflektancia látszik. 2000-ben spektrométerünk 0,27–1,1  $\mu\text{m}$  között érzékelt, bár

kb. 0,4  $\mu\text{m}$  alatt és 0,9  $\mu\text{m}$  felett a beérkező jelek igen zajosak. 0,765  $\mu\text{m}$ -en a görbén egy hegyes kis kiszögélés látható. Ez után egy magasabb csúcs következik 0,815-0,82  $\mu\text{m}$ -en, amit a víz kis fény-abszorbanáciája (Quibell 1991) vagy a lebegő részecskék okoznak (Han *et al.* 1994). A reflektancia mértéke 0,82  $\mu\text{m}$ -tól kezdődően a víz fény-abszorpciója miatt rohamosan csökken.

Megvizsgáltuk, hogy hogyan alakul a fényvisszaverési görbe, ha a többitől kissé eltérő visszaverési görbével rendelkező *S. capricornutum* vízbe ( $400 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) az 1980-as évek algavirágzásai során domináns *C. raciborskii*-t adagolunk – 4 lépésben –, míg az a-klorofill-tartalom  $600 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  lett. A kísérlet során észlelt reflektancia görbét a 4.2. ábra mutatja. Látható, hogy a fényvisszaverés jellege általában nem változott, csak a szélsőértékek hangsúlyozódtak még jobban ki, de ennek mértéke igen kicsi – elhanyagolható – volt.

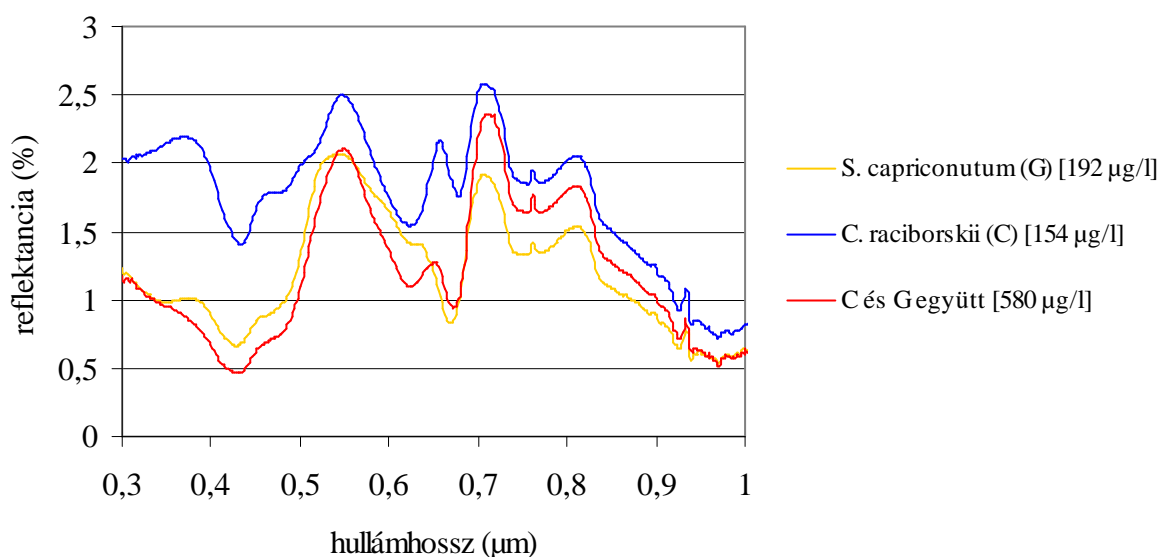


4.2. ábra.  $400 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill-koncentrációjú *S. capricornutum* (G) fényvisszaverési tulajdonságai a hullámhosszak függvényében, ha hozzá növekvő mennyiségben *C. raciborskii*-t (C) adunk. A hozzáadott anyagmennyiséget tüntettük fel.

A görbékre jellemző, hogy futásuk kb. 0,58  $\mu\text{m}$ -ig igen hasonló, bár ezen a szakaszon a kétféle alga fényvisszaverési jellege megegyezett, akkor is, amikor külön-külön voltak a medencében (4.1. ábra). Ezt követően a görbék meredeken futnak le a 0,62  $\mu\text{m}$  környékén található helyi reflektancia minimumig. A minimumot kis „váll” (0,65  $\mu\text{m}$ ) követi a kisebb a-klorofill-töménységű vizek fényvisszaverési görbéin, s csak a hozzáadott *C. raciborskii* okozta a-klorofill-koncentráció növekedésével válik jobban észrevehetővé. Már láttuk, hogy ezen a ponton volt különbség a *S.*

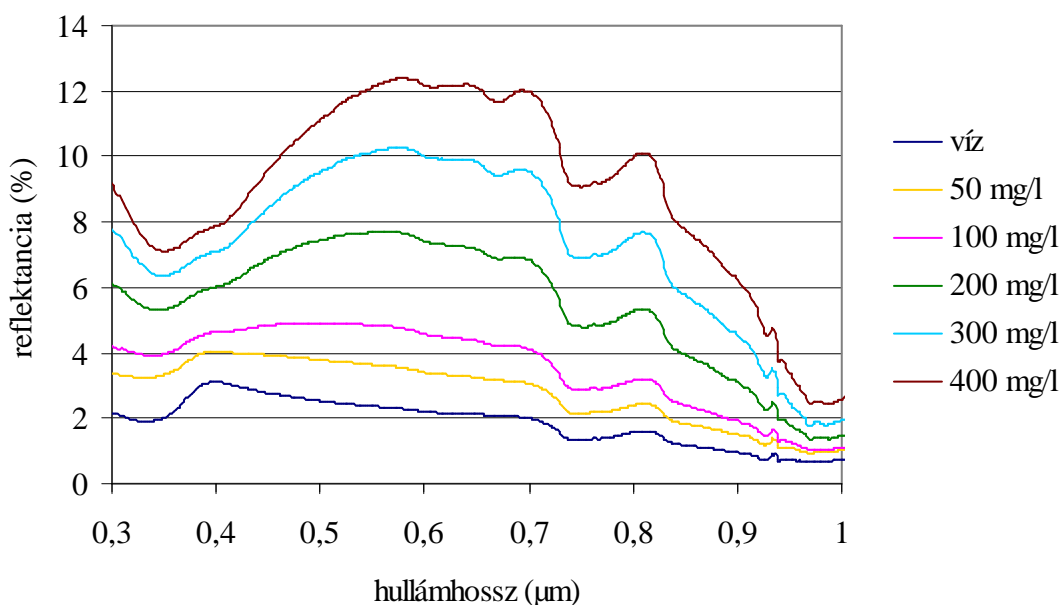
capricornutum és a többi algafaj reflektanciája között. Látszik, hogy a *C. raciborskii* fényvisszaverési sajátosságai nem tudnak teljes mértékben érvényesülni a *S. capricornutum*mal szemben.

A következő – 0,71–0,715  $\mu\text{m}$ -en található – fény visszaverési maximum már megtalálható mindegyik görbében, értéke *C. raciborskii* töménységével párhuzamosan nő. Minél magasabb az a-klorofill-töménysége annál nagyobb a fluoreszcencia is.



4.3. ábra. Két algafaj (*S. capricornutum* és *C. raciborskii*) fényvisszaverési tulajdonságai külön-külön és együtt. A szögletes zárójelben az a- klorofill koncentráció szerepel.

A 4.3. ábra alapján általános következtetéseket vonhatunk le. Látszanak a *S. capricornutum* és *C. raciborskii* fényvisszaverési sajátosságainak különbségei. Ha figyelembe vesszük, hogy a két algafaj elegyének koncentrációja  $600 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  körüli volt, akkor meglepő, hogy a fluoreszcenciából adódó csúcs nem múlja fölül a  $154 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill-töménységű *C. raciborskii*-t. Kisebb hullámhosszakon növekvő koncentráció miatt a víz színe egyre sötétebb lesz, nő a fényelnyelés mértéke.



4.4. ábra. A növekvő lebegőanyag-tartalmú víz fényvisszaverési tulajdonságai

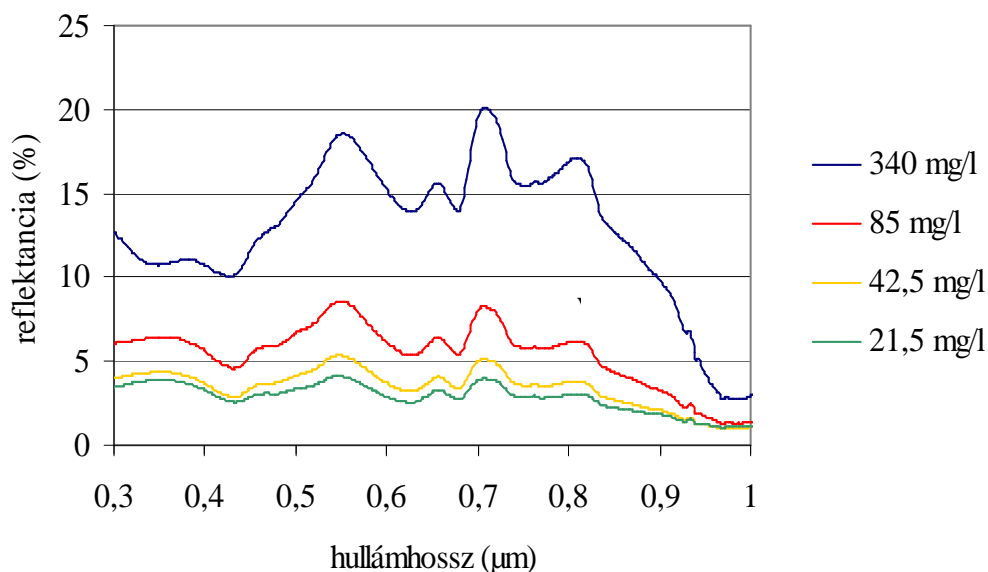
Általánosságban elmondható (4.4. ábra), hogy a vízben lévő lebegőanyag-koncentrációnak növekedésével a reflexió mértéke is nő hullámhossztól függetlenül, mert a fény szétszóródik a vízben lebegő részecskékről (Lillesand *et al.* 1999). A helyi szélső értékek a koncentráció növekedésével a nagyobb hullámhosszak felé tolódnak el.

A különböző algakoncentrátumokkal végzett kísérletekkel összehasonlítva lebegőanyag esetében a beérkező fény nagyobb százaléka verődik vissza. Az különféle alga fajokkal végzett kísérletek során a reflektancia maximális értéke 3% körül mozgott, míg a  $400 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  lebegőanyag-tartalom mellett meghaladja a beérkező fény 12%-át. Az egyes görbéken belül a minimumok és maximumok között is nagyobb a különbség.

Medencekísérleteink során azt tapasztaltuk, hogy a lebegőanyag fényvisszaverésének menete a hullámhosszak függvényében a következőképpen alakul. A 0,55–0,65 μm hullámhosszak között van nagy reflektanciájú zóna, amit egy kisebb hullámhossz követ. Egy kisebb helyi maximum látható még 0,8–0,81 μm-en. Tapasztalataink megegyeznek Quibell (1991) mesterséges megvilágítás mellett végzett kísérleteinek eredményeivel.

A Balatonban nyáron, amikor a vizsgálatokat tervezzük, aligha fordul elő olyan helyzet, hogy vagy csak a-klorofill- vagy csak lebegőanyag-tartalma legyen a víznek. Ezért tanulmányoztuk e két – a vízminőségi jellemzők közül a reflektancia

mértékét leginkább meghatározó – tényező különböző keverékének fényvisszaverési sajátosságait is.



4.5. ábra. A fényvisszaverés mértékének változása azonos a-klorofill-koncentráció ( $154 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ , *C. raciborskii*), változó lebegőanyag-tartalom mellett

Az egyik kísérletsorban az a-klorofill-töménységet kb.  $200 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -en tartottuk, és csak a lebegőanyag-tartalmat változtattuk, így kaptuk a 4.5. és a 4.6. ábrán látható fényvisszaverési értékeket a hullámhossz függvényében.

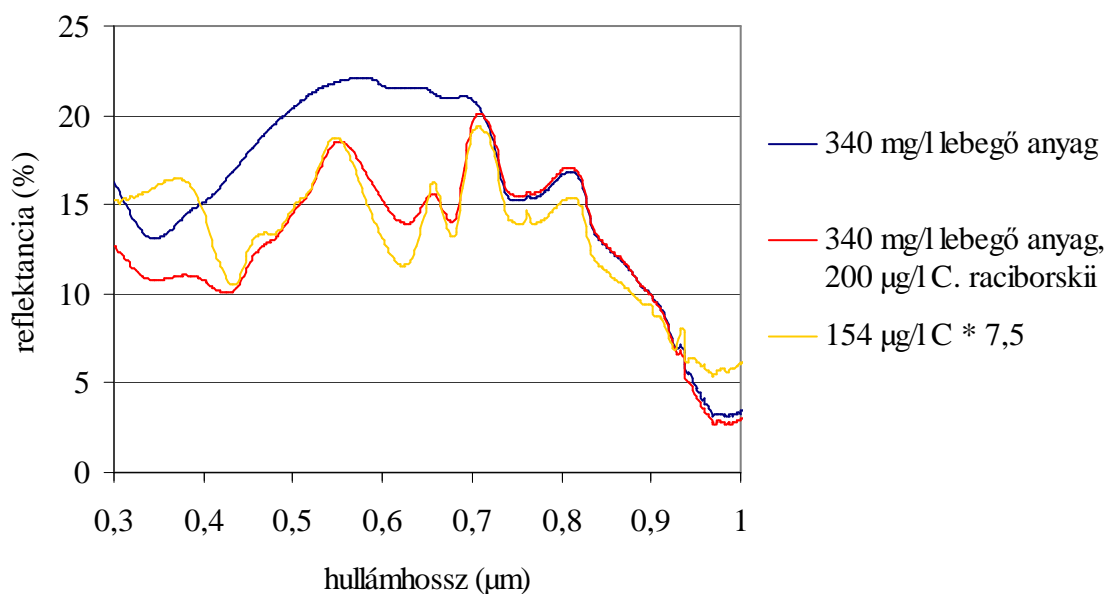
A magasabb lebegőanyag-tartalomhoz itt is arányosan magasabb fényvisszaverési értékek tartoznak, és a függvények helyi minimumai és maximumai kis mértékben a nagyobb hullámhosszak felé tolódnak el, ám ettől eltekintve a függvények azonos menetűek. A 4.5. ábrán a *C. raciborskii*-val folytatott kísérletsorozat eredményét mutatjuk be, de hasonló volt a *S. capricornutum*-mal végrehajtotté is.

A függvények menete a fitoplankton fényvisszaverési tulajdonságait tükrözik. A lebegőanyag-tartalom nem fedi el az alga szintesté által okozott az általunk vizsgált hullámhosszakon. Ez a tulajdonság teszi lehetővé az a-klorofill távérzékeléses vizsgálatát a Balatonon. A jelenséget Han (*et al.* 1994) is tapasztalták medencekísérleteik során.

Azt mondhatjuk, hogy a lebegőanyag felerősíti a fitoplankton által kialakított függvénymenetet, ezért megfelelő szorzószámot választva azonos algafaj (*C. raciborskii*) görbéjének többé-kevésbé ráillik magas lebegőanyag-tartalmú párjára. A 4.6. ábrán láthatjuk még a teljesen fitoplankton mentes magas lebegőanyag-tartalmú

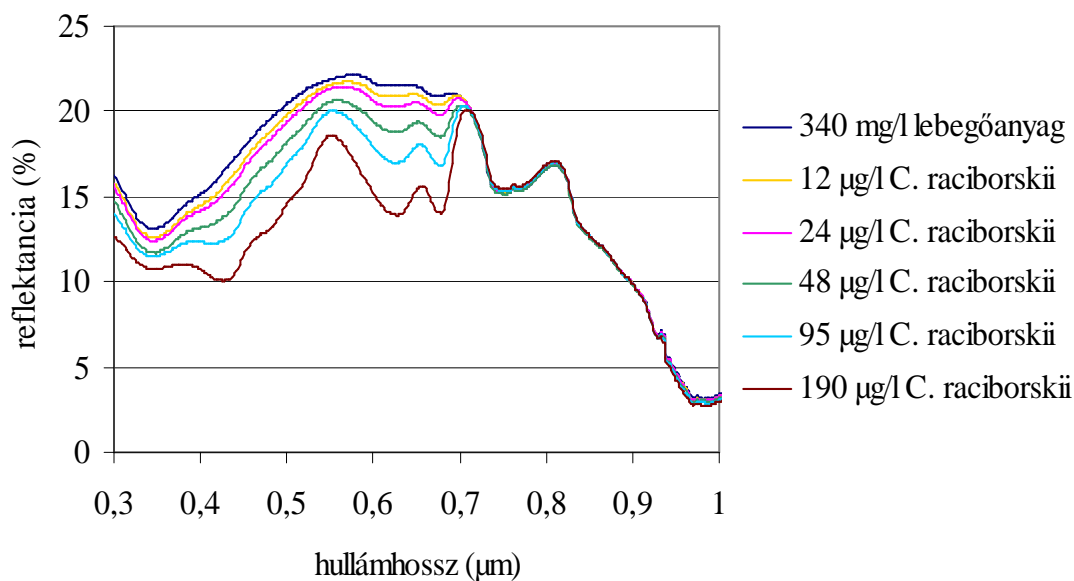


víz fényvisszaverési görbéjét, mely 0,72  $\mu\text{m}$  felett teljesen belesimul az a-klorofillos-lebegőanyag víz görbéjébe.



4.6. ábra. Három különböző vízminőség reflektancia-értékeinek összehasonlítása. A csak fitoplankton (C= C. raciborskii) tartalmazó víz reflektanciája 7,5-tel szorozva szerepel az ábrán.

Végül azt mutatjuk be, hogy ha magas ( $340 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) lebegőanyag-tartalmú vízhez adunk algakultúrát, akkor annak sajátos fényvisszaverési tulajdonságai befolyásolják a görbék futását. A 4.7. ábra alapján elmondhatjuk, hogy már a  $48 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill-koncentrációjú víz fényvisszaverési görbéjében felfedezhetjük ezeket a sajátosságokat.



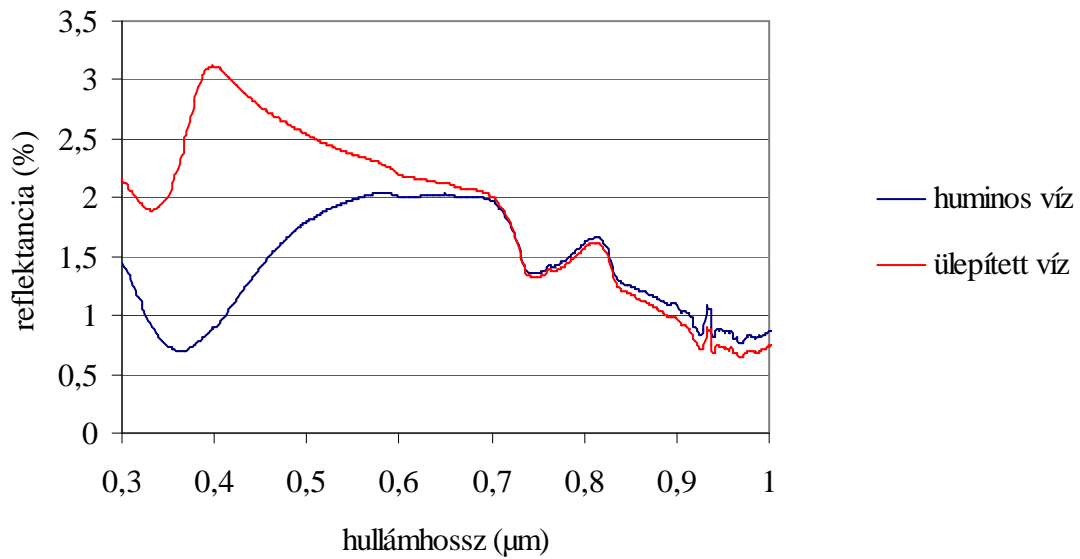
4.7. ábra. 340 mg·l<sup>-1</sup> lebegőanyag-tartalmú vízbe C. raciborskiit adunk

Az a-klorofill-koncentráció növekedésével nő a fényelnyelés mértéke a látható fény tartományában, és egyre jobban kirajzolódnak az algákra jellemző reflektancia-csúcsok 0,55 és 0,65 μm-en, a közeli-infravörös tartományban pedig a görbék futása teljesen egyező.

#### 4.1.2. Huminos vízzel végzett kísérletek

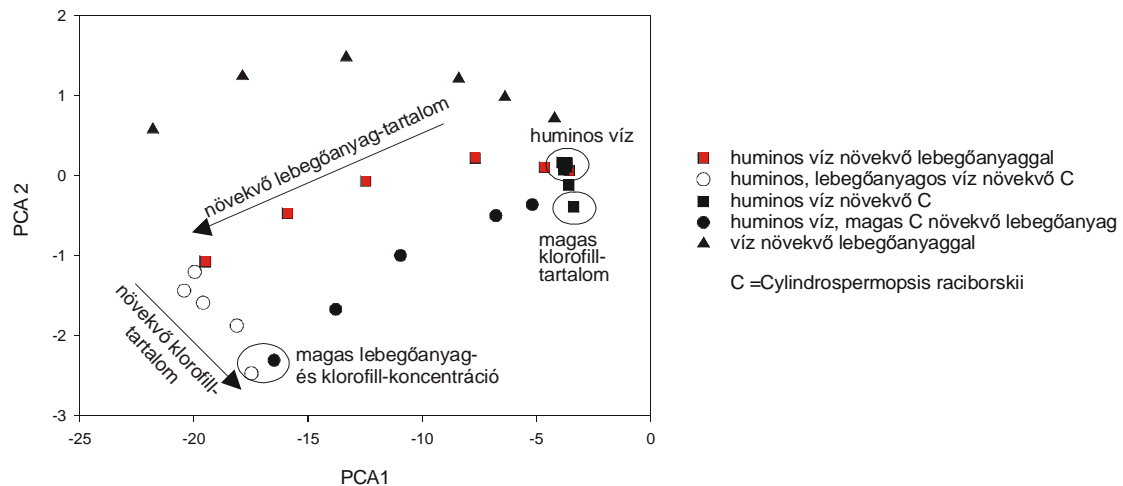
A huminos vizet a kísérletsorozathoz a Balatonból vettük a Zala-torkolatnál. Így a Zala és a Balaton vizének egyfajta elegyéről volt szó. A víz igen alacsony (4 μg·l<sup>-1</sup>) a-klorofill-tartalommal rendelkezett. Általában a huminos vízzel végzett kísérletsorokról elmondható, hogy a fénymenetekben hasonló eredményt hoztak, mint a huminanyag mentes kísérletek.

A különbség abban figyelhető meg, hogy a huminanyag jobb fényelnyelő tulajdonságokkal rendelkezik, mint az ülepített Balaton-víz. Ennek az a jelentősége, hogy bár a medence anyaga fekete volt, nem nyelte el teljesen a fényt. Huminos víz esetén, a minden hozzáadott anyag nélküli, fényvisszaverési értékek 0,55-0,65 μm között érik el a maximumot, ami alig haladta meg a 2%-ot (2,068%). Ugyanez az érték ülepített Balaton-víz esetében 3,85% volt, s ezt a maximumot 0,4 μm-nél érte el a függvény. Ez látható a 4.8. ábrán.



4.8. ábra. Az ülepített Balaton-vizes, ill. a huminos vizes medence fényvisszaverésének összehasonlítása.

Négy méréssorozatot végeztünk el huminos vízzel. Az algavirágzásokért felelősnek tartott *C. raciborskii* és lebegőanyag minden lehető kombinációját kipróbáltuk. Az eredményeket a Landsat TM 1–4 sávjainak megfelelően összevontuk, majd PCA-t hajtottunk végre.



4.9. ábra. A huminos vízzel végzett kísérletsorozatok eredményei főkomponens analízis első (PCA1) és második (PCA2) komponense mentén

A PCA olyan, a távérzékelésben gyakran alkalmazott eljárás, mely során a képi adatok új koordináta-rendszerbe kerülnek. Az így keletkezett vektortérben az

adatoknak az első tengely mentén a legnagyobb a variációjuk, az erre merőleges második tengely adatai már kisebb variációval rendelkeznek. Minél magasabb egy tengely dimenziószáma annál kisebb az adataihoz tartozó információtartalom, ezért ezeket el lehet hagyni a további elemzések során. Az információ az első néhány tengely, azaz komponens mentén fog elhelyezkedni. Az egyes tengelyekhez tartozó értékeket itt dimenzió nélküli számok. A módszer részletes bemutatása megtalálható Richards (1986) vagy Jensen (1986) a távérzékelés matematikai alapjairól szóló műveiben.

A 4.9. ábrán az első és második komponens menti értékekkel kerülnek bemutatásra a huminos vízzel végzett, Landsat 1–4 csatorák szerint összegzett, vizsgálatok eredményei. Jól látszik, hogy ebben az új vektortérben jól elkülönülnek egymástól a különböző tulajdonságú vizek, az azonosak pedig a diagram azonos részén jelennek meg. Az ábrán egymáshoz igen közel helyezkedik el az a két pont, amely két kísérlet-sorozat végén kialakult maximális lebegőanyag- és a-klorofill-tartalom fényvisszaveréséből származik. Ettől a ponttól teljesen elkülönülnek a lebegőanyag-mentes, huminos vízhez tartozó pontok. Megállapítható még egy magas lebegőanyag-tartalommal és egy magas a-klorofill-koncentrációval jellemezhető térség is. Ezek a tulajdonságok teszik lehetővé a vízminőség távérzékeléssel történő vizsgálatát.

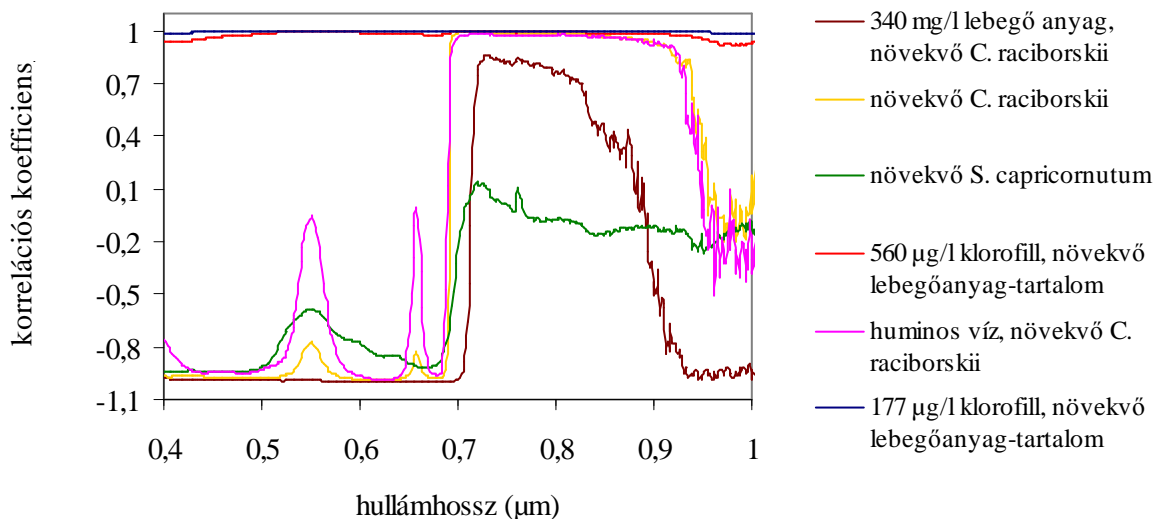
Hipotézisünk szerint a természetes körülmények között észlelt különböző tulajdonságú vizek is hasonló módon elkülönülnek egymástól. A szélsőségesen magas lebegőanyag- és/vagy a-klorofill-tartalom kiszögelésként (end member – szélső pont) fog jelentkezni egy hasonló PCA utáni ábrán.

A 4.9. ábrán látszik, hogy a kísérlet-sorozatok szélső pontjait között az értékek kissé ívelt, nem egy egyenes mentén helyezkednek el. Az összefüggés a szélső pontok között nem lineáris. Az is látható, hogy a legalacsonyabb felismerhető a-klorofill-koncentráció mennyisége függ a lebegőanyag-tartalomtól. A magasabb lebegőanyag-tartalom jobban kihangsúlyozza a különbségeket.

#### 4.1.3. A kísérletek összevetése

A 4.10. ábrán a medencekísérletek egyfajta összegzése látható. A korrelációs koefficiens megmutatja, mint változott a fényvisszaverés mértéke a hozzáadott anyag hatására. Abban az esetben, ha a koefficiens 1-hez tart, a medencében lévő víz fényvisszaverése növekedett a hozzáadott komponens (lebegőanyag vagy algakultúra)

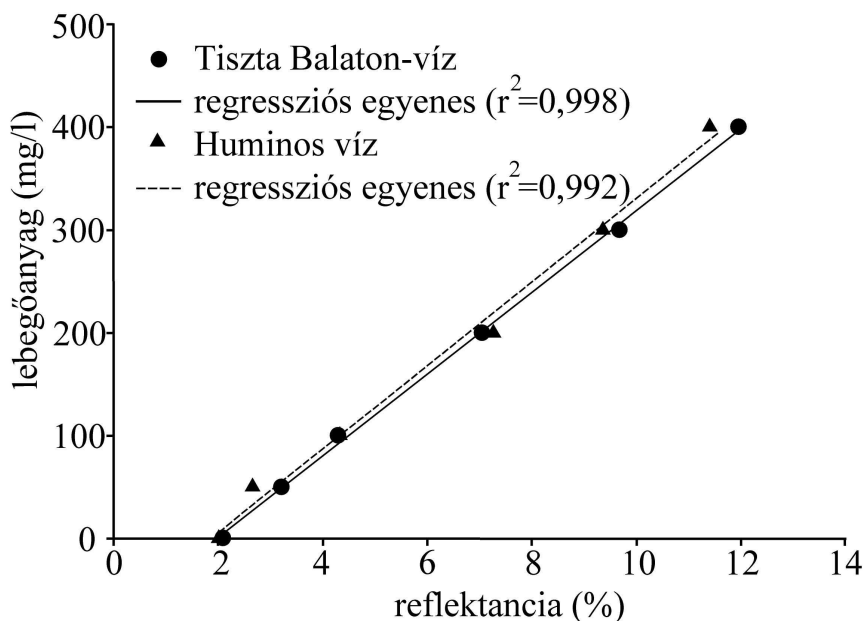
hatására. Amikor a koeficiens -1-hez tart, akkor a hozzáadott komponens hatására csökken a reflektancia.



4.10. ábra. A korrelációs koeficiens változásai a hullámhossz függvényében

A 4.10. ábra alapján elmondható, hogy növekvő mennyiségű lebegőanyag pozitívan korrelál minden spektrumon: az összes csatornán növekvő reflektanciát tapasztalunk, ha a vízhez lebegőanyagot adunk. Abban az esetben is hasonlóan tapasztalunk, ha magas a-klorofill-tartalmú vízhez adunk növekvő mennyiségű lebegőanyagot.

A medencéhez adott fitoplankton hatására a víz egyre sötétebb lesz nagyjából 0,5 µm-ig. Ez után az elnyelés után két fényvisszaverési csúcs tapasztalható, melyek már Gitelson (*et al.* 1993a) Balatonon végzett fényméréseiből is kirajzolódtak. Ezt mindkét esetben hullámvölgy – elnyelés – követi, melynek legmélyebb pontja 0,63 µm-en található, oka pedig a cianobaktériumok szintestjeinek, a pikocianinnak a fényelnyelése. A következő minimum 0,675 µm-nél található, melyért az a-klorofill fényelnyelése felelős. Az eddig említett koeficiensbeli változások azonban nem olyan markánsak, és nem is érintenek minden, az ábrán feltüntetett kísérletet, ahol fitoplanktonot adtunk a medence vizéhez. Markáns változás az ún. vörös-élhez (Seager *et al.* 2005) kapcsolódik az infravörös határán 0,68–0,73 µm között. Kis hullámhossz-tartományon belül az a-klorofill-tartalom fényelnyelése fényvisszaveréssé alakul, s ez nyilvánul meg a koeficiens görbékben is.



4.11. ábra. A terepi spektrométer adatai alapján készített Landsat 3-as sáv (B3) és a lebegőanyag-tartalom (SSC) regressziós egyenesei magas huminanyag-tartalmú-, ill. az azt nélkülöző Balaton-vízben (fényvisszaverés/reflektancia %)

A medencekísérletek során végzett fénymérések eredményeit is integráltuk a Landsat műhold sávjainak megfelelően. Az irodalmi adatok is utalnak rá (pl. Gitelson *et al.* 1993a, Lindell *et al.* 1999), és később a terepi méréseink is igazolták, hogy a lebegőanyag koncentráció a Landsat műhold 3-as sávjával mutat szoros korrelációt. A 4.11. ábra már mutatja, hogy a 3-as sáv igen jól használható lesz a lebegőanyag becslésére. A 4.11. ábrában két párhuzamos regressziós egyenest tartalmaz: az egyiknél huminanyagban gazdag vízbe érkezett a lebegőanyag a másikban ülepített Balatonvízbe.

## 4.2. Terepi mérési expedíciók értékelése

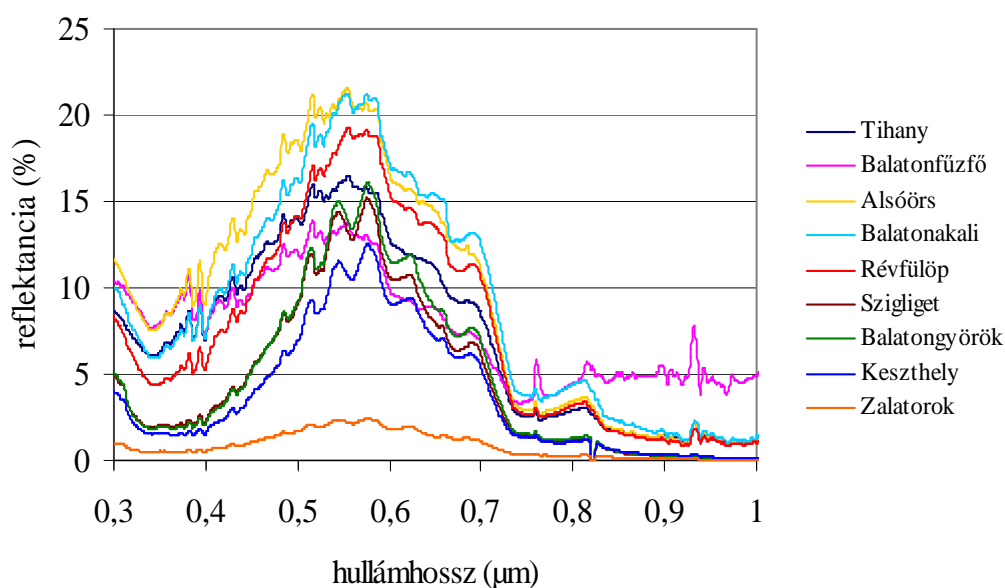
A terepi alapadatgyűjtés a Landsat műhold áthaladásaihoz kapcsolódott (3.5. táblázat). Három alkalommal végeztünk a Balatonon spektrométeres méréssel egybekötött vízminőség-vizsgálatot. Az eredeti cél az volt, hogy egy nyár eleji fitoplanktonban szegényebb állapotot, majd ezt követően nyár végén az ún. algavirágzást mintázzuk.

Külső körülmények miatt (pl. spektrométer bérlése) a mérések időpontját előre meg kellett határozni, egyik alkalommal sem sikerült mintáznunk igazi magas a-klorofill-tartalommal jellemezhető vízvirágzást. Ezért a 2000. augusztusi mérés alkalmával kiegészítő méréseket végeztünk Balaton környéki vízfelületeken, ahol éppen igen magas (balatonföldvári halastónál  $1600 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) fitoplankton-sűrűség volt.

dátum	Chla minimum		Chla maximum	
	Helyszín	( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )	Helyszín	( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )
1999. június 5.	Zala-torok	2,33	Szigliget	13,86
1999. szeptember 9.	Balatonfüzfő	4,26	Balatongyörök	15,86
2000. augusztus 2.	Alsóörs	3,77	Balatongyörök	12,93
2000. szeptember 11.	Zala-torok	2,13	Balatongyörök	58,65

3.5. táblázat. Az a-klorofill-koncentráció (Chla) ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) minimális és maximális értéke a három terepi mérés alkalmával

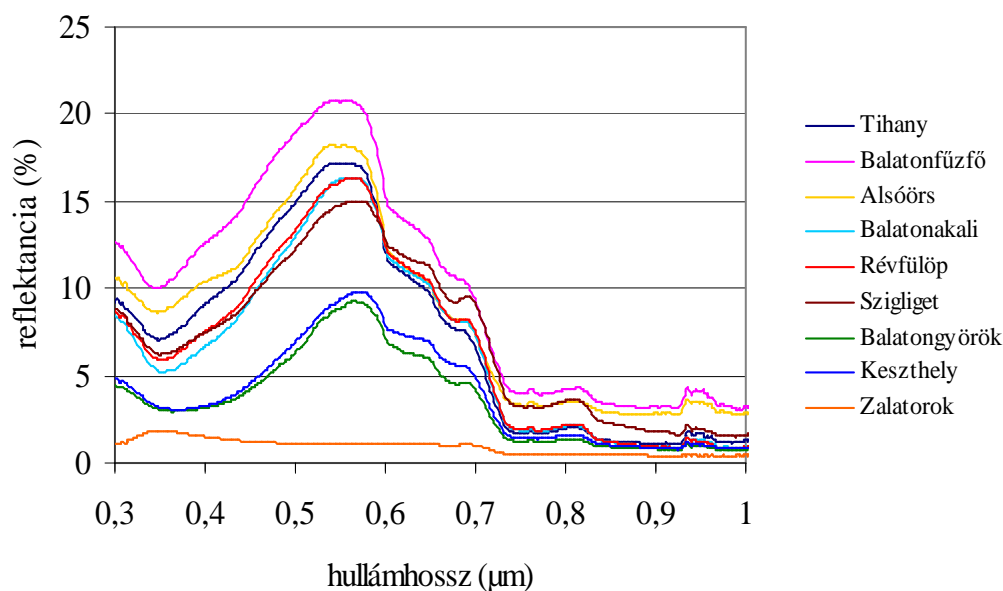
Ezen kívül egy további időpontot (2000. szeptember 11.) bevontunk a vizsgálatba, amikor a maximális mért a-klorofill-koncentráció  $58,65 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  volt Balatongyöröknél. A vízmintavételt már nem a gyors rendőrségi motorossal végeztük, hanem kis, motoros csónakkal. Így két nap alatt tudtuk az összes mérési pontot felkeresni. A gyorsan változó lebegőanyag-koncentráció már nem tükrözte azt az állapotot, ami műhold áthaladásának idején jellemző volt. Radiancia-mérés nem 2000. szeptember 11-én nem történt.



4.12. ábra. Az 1999. június 5-én a Balatonon végzett reflektanciamérések eredményei

Hátránya a gyors rendőrségi a motorcsónak használatának, hogy az azt üzemeltető rendőröknek időről időre szolgálatba kell magukat helyezniük, így igen gyakran kitérőket tettünk a szabályok ellen vétők figyelmeztetésére. Egy hosszabb technikai szünetet mindhárom alkalommal beiktattak Siófoknál. Ekkor múlt az értékes hasznos idő mérés szempontjából kihasználatlanul.

Az 1999. június 5-én gyűjtött fénymenetek a 4.12. ábrán láthatóak. Valószínűleg a referencia-panel helytelen kalibráltsága miatt a kapott fényvisszaverési görbék zajosak. Ennek ellenére, ha Landsat sávok szerint összevonjuk őket, már kiegyenlítődnék a hibák.



4.13. ábra. Az 1999. szeptember 9-én a Balatonon végzett reflektanciamérések eredményei

A Balatonon tapasztalt fényvisszaverési görbék (4.12., 4.13., 4.14. ábra) alapján elmondható, hogy a zalatoroki mérőhelyen (3.1. ábra) a huminos víznek mindig kisebb a fényvisszaverése, 2000 augusztusában még a 2%-ot sem érte el. A többi görbéről általában elmondható, hogy az 1999. szeptemberiek magasabb értékekkel bírnak a 2000. augusztusiakhoz képest, ami a szeptemberi kissé magasabb lebegőanyag-tartalmaknak tudható be. Az átlagos lebegőanyag szeptemberben  $15 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , a következő augusztusban pedig  $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  volt. A két időponthoz tartozó görbék menete hasonlóan alakul a spektrumon (4.13. és 4.14. ábra).

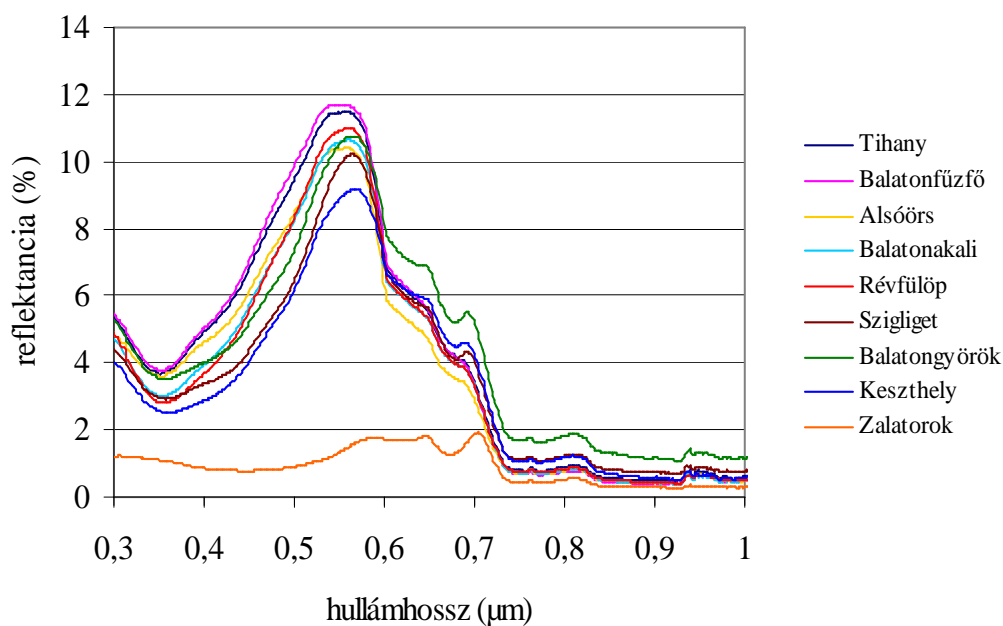
Az oldott szerves anyag az ultraviola tartományban a fény jelentős részét elnyeli. Ezért tapasztalható a görbéken  $0,35\text{--}0,36 \mu\text{m}$  környékén egy helyi minimum. Ez alól a zalatoroki mintavételi hely kivétel, ahol ezen a hullámhosszon épp maximum tapasztalható. Az első, egyben a legmagasabb maximum  $0,55\text{--}0,56 \mu\text{m}$  környékére esik. Az  $0,55 \mu\text{m}$ -es tetőző értékek után mindkét időpontban meredek csökkenés (nagyfokú abszorbancia) következik be. Csak a  $0,71 \mu\text{m}$ -en látható egy kis megtorpanás ebben a fogyásban. A medencekísérletekben a fényvisszaverési görbék egyik legnagyobb maximuma kapcsolódott ehhez a ponthoz. A természetes körülmények között nem tapasztaltunk ekkora csúcsot, aminek oka az alacsony a-klorofill-tartalom



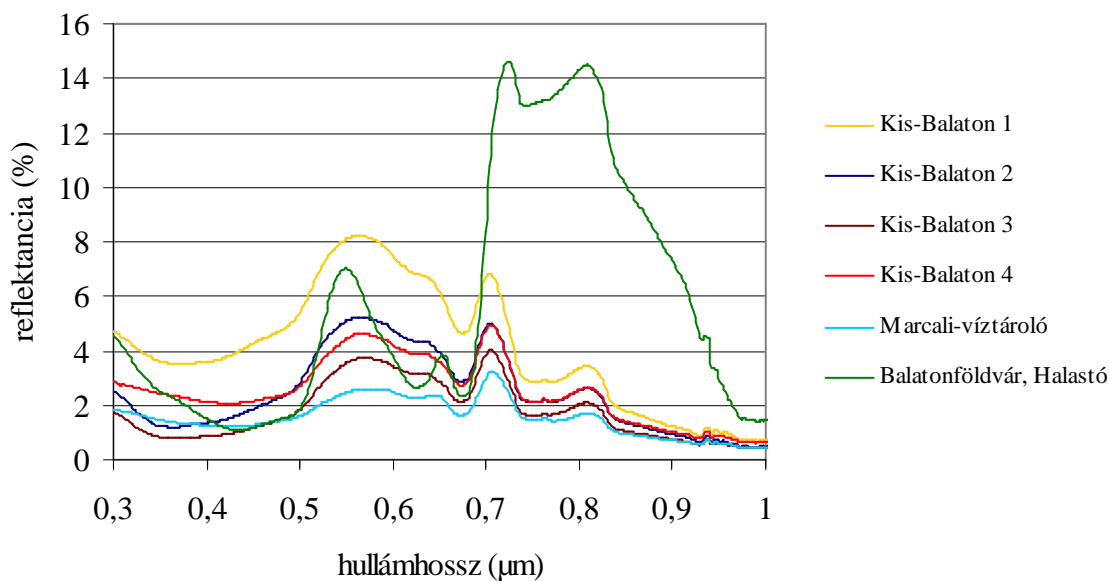
lehetett. Ezt támasztják alá a Balaton környéki természetes vizekből vett minták görbéi is.

A 0,71  $\mu\text{m}$ -en tapasztalható kisebb váll után gyorsan 2-5% alá zuhan tovább a fényvisszaverő-képesség. Megfigyelhető még egy apróbb csúcs 0,81  $\mu\text{m}$ -en – amit már a medencekísérletekkor is tapasztalhattunk –, ez után pedig már inkább zajokat láthatunk a görbékben, mint értékelhető jeleket.

Mivel a spektrométeres vizsgálatok során a Balaton aránylag alacsony volt az a-klorofill-tartalom, ezért 2000. augusztusában észleléseket végeztünk a Kis-Balatonon négy helyen, a Marcali-víztárolón és egy halastavon Balatonföldvár határában, ahol  $1600 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill-koncentrációt tapasztaltunk. Az igen nagy algabiomassza miatt a fényvisszaverési görbe (4.15. ábra) a növények görbéihez hasonlít magas infravörös reflektanciája miatt (Lillesand *et al.* 1999). A terepi mérések alapján is megerősíthetjük azt az alaptételt, általában a magasabb lebegőanyag-koncentrációhoz nagyobb reflektancia tartozik. A Marcali-víztárolóban  $177 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill- – és a környező vizeken mért legalacsonyabb – lebegőanyag-tartalmat mértük, ezért a víz színe általában sötétebb volt, mint a többié. A Kis-Balaton 1-es jelű pontjának visszaverési értékei a legmagasabbak, ez összefüggött a víz magas lebegőanyag-tartalmával.



4.14. ábra. A 2000. augusztus 2-án a Balatonon végzett reflektanciamérések eredményei



4.15. ábra. A 2000. augusztus 2–4. között a Balaton környékén lévő vízfelületeken végzett reflektanciamérések eredményei

1999. szeptember 9-én a terepi mérési expedíció elindítása mellett döntöttünk. A műhold áthaladásának pillanatára már felhős lett az ég. Az aznap készült felvétel olyan felhőborítást tartalmazott, amit nem vásároltunk meg. A következő felhőmentes áthaladás 1999. szeptember 25-én adódott. A terepi expedíció és a műholdáthaladás között ez esetben már annyi idő eltelt, hogy egyik vízminőségi tulajdonság sem maradt változatlan.

### 4.3. Távérzékelte adatok összevetése a vízminőségi adatokkal

Az adatsorok normalitásának tesztelése után a távérzékelte adatok korrelációját vizsgáltuk a vízminőségi jellemzőkkel. Azokat a változókat, amelyek szignifikáns korrelációs koefficienssel rendelkeztek regresszió analízisnek vetettük alá.

Korreláció segítségével vizsgáltuk, hogy van-e összefüggés a vízminőségi és a távérzékelte adatok között. Összevetettük a víz színe fölött gyűjtött, majd a Landsat sávoknak megfelelően összevont reflektanciákat és a műholdképek adatait is a vízminőségi jellemzőkkel. Szoros, szignifikáns összefüggés csak a lebegőanyag-tartalom esetén adódott.

A megfelelő adatok alapján kiszámítottuk a regressziós együtthatókat, segítségével ezek után már számítani lehetett a lebegőanyag-mennyiségét az olyan Landsat képeknél is, ahol ennek mérése nem történt meg, vagy az adat nem állt rendelkezésre. A többi jellemzővel nem adódott szoros szignifikáns összefüggés.

Az előfeldolgozott műholdképeket alávetettük a lineáris spektrális szétválasztásnak. A több lépcsős folyamat végén a 2000. szeptember 11-én készült műholdfelvétel alapján elkészítettük az erre az időpontra vonatkozó a-klorofill-eloszlás térképét az egész Balaton területére.

Az alkalmazott módszert sikerrel vittük át egy korábban (1994. július 25-én) készült képre. Erre az időpontra először a lebegőanyag térképét, majd részben ennek segítségével az a-klorofill térképét készítettük el.

#### 4.3.1. A Balatonon végzett fényvisszaverés korrelálása a vízminőségi jellemzőkkel

Három alkalommal a vízminta-vételezésen kívül a mintavételi pontokon a fényvisszaverést is rögzítettük (1999. 06. 05., 1999. 09. 09., 2000. 08. 02.). A reflektancia mérése a látható fény és a közeli infravörös mérési tartományban történt az erre alkalmas GER 1500-as spektrométerrel. A műszer névlegesen a 0,3–1,1  $\mu\text{m}$  közötti hullámhossz tartományban dolgozik.

A fényvisszaverési adatokból kiszámítottuk az első négy Landsat sáv reflektanciáját: átlagoltuk az adott sávnak megfelelő intervallumon mért reflektanciát. Az így keletkezett négy sáv adatainak Pearson-féle korrelációját elemeztük a vízminőségi jellemzők mennyiségével. A legjobban korreláló sávokat tartalmazza a 4.1. táblázat, a szignifikáns összefüggéseket vastagabb szedés jelöli.

Vízminőségi jellemző	Mérési időpontok		
	1999. június 5. sáv : korr.: p-érték	1999. szeptember 9. sáv : korr.: p-érték	2000. augusztus 2 sáv : korr.: p-érték
<i>Chl a</i> $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	B 2: 0.58 : 0.100	B3: 0.434: 0.243	<b>B4: 0.734: 0.004</b>
SSC $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	<b>B 2/3: 0.94: 0.000</b>	<b>B3: 0.741: 0.022</b>	<b>B3: 0.898: 0.000</b>
PON $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	B 4: -0.455: 0.220	B3: 0.398: 0.289	<b>B4: 0.730: 0.005</b>
PC $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	<b>B 2: 0.715: 0.030</b>	B3: 0.642: 0.072	<b>B4:0.806: 0.001</b>
PC:PON	<b>B 2: 0.929: 0.000</b>	<b>B3: 0.813: 0.008</b>	<b>B1: 0.882: 0.000</b>
DOC $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	<b>B 1/4: -0.84: 0.005</b>	<b>B1/3/2: -0.96: 0.000</b>	B4:0.614: 0.009
TOC $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	<b>B 4: -0.836: 0.005</b>	<b>B1/2: -0.923: 0.000</b>	B2: -0.498: 0.042
POC $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	<b>B 2: 0.666: 0.050</b>	B3: 0.539: 0.134	<b>B4: 0.813: 0.000</b>
Pt-egység	<b>B 1: -0.854: 0.003</b>	<b>B3/2: -0.89: 0.001</b>	<b>B1/2: -0.75: 0.000</b>

4.1. táblázat. Optimális Pearson-féle korrelációs (korr.) együtthatók a spektrométeres mérések alapján számított Landsat sávok (B1–4) és a mért vízminőségi jellemzők között. A szignifikáns korrelációt vastag szedés jelöli.

A 4.1. táblázatból kitűnik, hogy a lebegőanyag-koncentrációval a legszorosabb korrelációt a 3. sáv mutatta. Ezzel szemben nem volt olyan sáv, amellyel minden mérési expedíció alkalmával szoros korrelációt mutatott volna az a-klorofill-koncentráció. Ennek oka az aránylag magas lebegőanyag-tartalom (25-50 mg·l<sup>-1</sup> körüli maximumok), ill. az alacsony a-klorofill-tartalom (13-16 µg·l<sup>-1</sup> maximum). Szoros korreláció a 2000. augusztus 2-i mérés Landsat 4-es sávjával mutatkozott, amikor egy szélcsendes napon a lebegőanyag tartalom különösen alacsony volt: 4–14 mg·l<sup>-1</sup> között.

Egyetlen további vizsgált vízminőségi jellemző sem mutatott ugyanazzal a spektrométeres adat alapján számított Landsat sávval szoros korrelációt a három terepi expedíció adatait vizsgálva.

Hasonló eredményre jutottak a Balatonon korábban végzett mérési eredményeinek feldolgozása során, és egyéb magas lebegőanyag-tartalommal jellemezhető tavak esetében is a durva spektrális felbontású Landsat képek esetében (Lindell *et al.* 1999).

#### 4.3.2. Landsat TM ill. ETM+ adatok és a terepi mérések eredményeinek korrelációja

A 4.2. táblázat tartalmazza valódi Landsat sávok és mért vízminőségi jellemzők legszorosabb korrelációit. A három időpontból egy nem azonos a terepi spektrométeres mérés alapján, a vízminőségi jellemzőkkel való korreláció során vizsgálttal (4.1. táblázat). Ennek oka, hogy az 1999. szeptember 9-én készült kép igen nagy felhőborítású volt (elsősorban a Balaton feletti területen), így nem vásároltuk meg. 2000. szeptember 11-én pedig terepi spektrométeres felvételezést nem végeztünk.

Vízminőségi jellemző	Műhold áthaladásának időpontja		
	TM 1999. június 5. sáv : korr.: p-érték	ETM+ 2000. augusztus 2. sáv : korr.: p-érték	TM 2000. szeptember 11. sáv : korr.: p-érték
Chl a µg·l <sup>-1</sup>	B 3: 0.518 : 0.153	B7: 0.319: 0.288	<b>B1: -0.574: 0.106</b>
SSC mg·l <sup>-1</sup>	<b>B 3: 0.828: 0.006</b>	<b>B3: 0.899: 0.000</b>	nem áll rendelkezésre
PON mg·l <sup>-1</sup>	B 3: -0.550: 0.125	B3: 0.467: 0.108	<b>B7: -0.589: 0.095</b>
PC mg·l <sup>-1</sup>	B 3: 0.543: 0.131	<b>B3: 0.743 0.004</b>	<b>B7: -0.681: 0.043</b>
PC:PON	<b>B 3: 0.869: 0.002</b>	<b>B1: 0.864: 0.000</b>	<b>B3: -0.830: 0.006</b>
DOC mg·l <sup>-1</sup>	<b>B 1: -0.860: 0.003</b>	<b>B1: -0.898: 0.000</b>	B4: 0.919: 0.000
TOC mg·l <sup>-1</sup>	<b>B 1: -0.729: 0.005</b>	<b>B1 -0.883: 0.000</b>	<b>B1: -0.942: 0.000</b>
POC mg·l <sup>-1</sup>	B 3: 0.440: 0.236	B7: 0.414: 0.160	<b>B1: -0.682: 0.000</b>
Pt-egység	<b>B 1: -0.906: 0.001</b>	<b>B1: -0.820: 0.001</b>	<b>B4: 0.951: 0.000</b>

4.2. táblázat. Optimális Pearson-féle korrelációs (korr.) együtthatók a Landsat sávok (5×5 képpont átlaga) és a mért vízminőségi jellemzők között. A szignifikáns korrelációt vastag szedés jelöli.

Az előfeldolgozott műholdképeken a GPS adatok alapján azonosított képpont körül elhelyezkedő 5×5 képpontnyi terület átlagát vettük alapul. Az eredmények igen hasonlítanak a spektrométeres mérések – alapján számított Landsat sávok – vízminőségi jellemzőkkel való korrelációjához (4.2. táblázat). Az a-klorofillal egyetlen sáv sem mutat szoros korrelációt, semelyik időpontban sem. Ezzel szemben szoros korreláció mutatkozott a lebegőanyag-tartalom és a 3-as Landsat sáv között minden vizsgált időpontban.

A 2000. szeptember 11.-én a vízminták vételét nem a gyors rendőrségi motorossal végeztük, így a tó egyik feléről csak egy nap eltéréssel vannak vízminőségi adataink. Mivel nem volt vihar, vagy erős szél a képfelvételezés időpontja és a vízmintavétel között, a lassan változó vízminőségi jellemzők esetében (pl. a-klorofill) ez nem jelent problémát. A lebegőanyag-tartalom azonban egy ilyen sekély tó, és laza üledék mellett akár fél nap alatt is igen nagy változást mutathat.

A többi vízminőségi jellemzőről szólva elmondható, hogy oldott szerves szén (DOC) és összes szerves szén (TOC) esetében felmerül az autokorreláció, ill. mindkettő szoros korrelációt mutatott a Landsat 1. sávval, ami megerősíti az irodalmi adatokat (Hudson *et al.* 1994). DOC esetében szintén a mintavétel és a kép készítése közötti egy napos különbség okozhatja, hogy a szoros korreláció eltér a 2000. szeptemberi kép esetében. Más változóknál, mint a szén és a szerves nitrogén aránya (PC:PON) és a Pt-egység az adatbázis szoros korrelációja nem konzisztens. Pt-egység esetében lehetséges, hogy a már említett a mintavételi aszinkronitás is szerepet játszhat abban, hogy nem ugyanaz a sáv mutat minden vizsgált időpontban szoros korrelációt.

A lebegőanyag mennyiségének térképezését regresszió analízis alapján felállított egyenlettel, annak együtthatóinak segítségével végeztük. Szoros, szignifikáns korreláció adódott a 3. Landsat sáv és a lebegőanyag-tartalom között. Annak érdekében, hogy egyetlen egyenletet kapjunk az 1999. júniusi és 2000. augusztusi adatokat egybevetettük (4.16. ábra). Független regresszió analízis bizonyította a regresszió koefficiensének konzisztenciáját, mutatva ezzel, hogy az alkalmazott atmoszférikus korrekció és képnormálás megbízható volt. Az egyesített adatok determinációs együtthatója:  $r^2=0,891$  és a regressziós koefficiensek a következők 4.1. egyenlet:

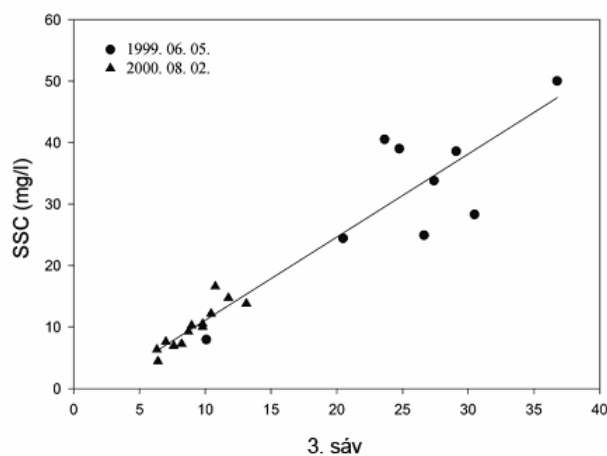
$$SSC = -2,44 + 1,36 \cdot DN_{B3} \quad (4.1.)$$

ahol

SSC lebegőanyag-tartalom ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ),

$DN_{B3}$  intenzitás érték (digital number) az előfeldolgozott kép Landsat 3. sávjában.

A magasabb lebegőanyag-tartalom, ill. a vele járó jobban szóró adatok egyenes következményei annak, hogy a műholdfelvétel készítése előtti napon nagy vihar volt, amit még aznap is viharos erejű szél követett. Ezért szokatlanul heterogén rendszer alakult ki a felvétel és a mintavétel idejére.



4.16. ábra. Lineáris regresszió a Landsat TM/ETM+ 3. csatorna ( $5 \times 5$  képpont átlaga) intenzitásértékei és a lebegőanyag-tartalom (SSC) között

A (4.1.) egyenlet alapján számítottuk a továbbiakban képpontok lebegőanyag mennyiségét. A lebegőanyag eloszlását azután tematikus térképen ábrázoltuk, és felhasználtuk a további képelemzések során.

Példaként a 2000. szeptember 11-én készült, előfeldolgozott Landsat kép alapján számított lebegőanyag-tartalom térképet mutatjuk be az I. mellékletben. A számítást a (4.1.) egyenlet alapján végeztük. A lebegőanyag-koncentráció a vizsgált területen  $0\text{-}36 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  között változik. A magasabb értékek az északi part közelében találhatók, ahol finomabb szemcséjű az üledék (Virág 1997). Alacsonyabb értékek a keleti medencék D-i felén, a Kis-Balaton egy részén és a Marcali-tárolóban láthatók. Megfigyelhető egy határozott ÉNy–DK irányú egyenes a Keszthelyi-öbölben, ami egy repülő kondenzcsíkja.

Hasonló lebegőanyag-eloszlás térképet készítettünk minden vizsgált időpontra. 2000. augusztus 2-án a lebegőanyag-eloszlás térképen a szélcsendes idő miatt ala-

csony lebegőanyag-tartalmú vízben még az is látszott, ahogy a menetrend szerint közlekedő hajók felkavarták a vizet.

### 4.3.3. Az a-klorofill mennyiségének meghatározása Landsat képek alapján

A medencekísérletek során gyűjtött fénymenetek elemzése igazolta, hogy a szétválasztásra szánt szélső pontok megfelelően egyedi spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek. Azt is megállapítottuk azonban, hogy nagyon alacsony a-klorofill-tartalom még ezzel a módszerrel sem kimutatható. A medencekísérletekkel előzetesen azt nem lehetett megállapítani, hogy milyen a-klorofill-töménység mutat elégséges spektrális elkülönülést ahhoz, hogy lineáris szétválasztással az a-klorofill mennyisége becsülhető legyen.

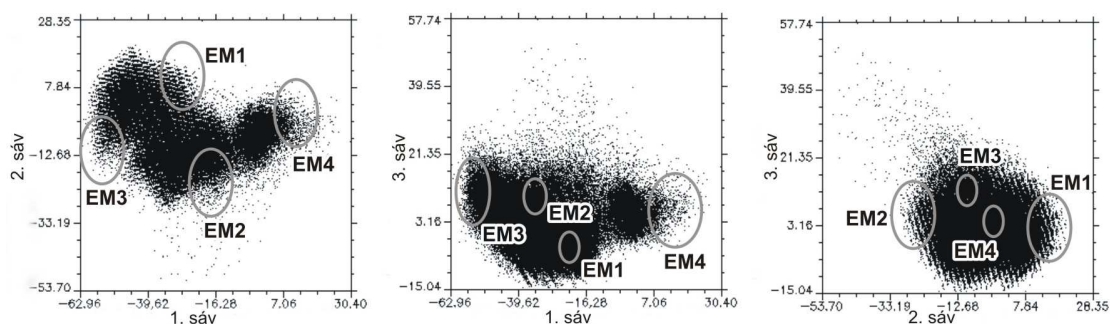
Négy alkalommal végeztünk műholdáthaladással párhuzamosan terepi mintavételezést. 1999. szeptember 9-én még tiszta égbolt mellett kezdtük a mérési expedíciót, de a műhold áthaladásának időpontjára a felhőborítottság elérte azt a fokot, hogy a felvételt nem volt érdemes megvásárolni. Az elemzésekbe az 1999. szeptember 25-i képet lehetett volna bevonni, ez azonban már túlságosan nagy időközot jelentett a mintavételezéshez képest. Erre az időpontra lineáris szétválasztás nem történt, csak a lebegőanyag-eloszlás térképet készítettük el.

Az 1999. június 5-én és a 2000. augusztus 2-án készített képek esetében végrehajtottuk a lineáris szétválasztás folyamatát, de a kapott szürkefokozatos eloszlástérképek és a terepi adatok között nem sikerült megfelelő kapcsolatot teremteni. Mindkét alkalommal igen alacsony volt a tó vizének a-klorofill-tartalma, a mért maximumok egyik időpontban sem érték el a  $16 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t.

2000. szeptember közepén Balatonyöröknél csaknem  $59 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  volt az a-klorofill koncentráció. Ez a maximum már elegendőnek bizonyult a sikeres a-klorofill-tartalom térképezéshez.

A 2000. szeptember 11-én készült előfeldolgozott Landsat TM felvétel MNF-transzformációja után az első három új sávot páronként pontdiagramon ábrázoltuk (4.17. ábra). Ezek vizsgálatával, továbbá az eredmények a műholdképpel ill. a térképpel való összevetése alapján kijelöltük a relatív szélső pontokat. A vízminőség szempontjából a következő kategóriákba sorolhatók a szélső pontok: tiszta víz ( $\text{EM}_1$ ); magas lebegőanyag-tartalom és magas a-klorofill-tartalom ( $\text{EM}_2$ ); magas lebegőanyag-tartalom ( $\text{EM}_3$ ); magas a-klorofill-tartalom ( $\text{EM}_4$ ) (4.17. ábra). A 4.7. ábrán

látható szélső pont határok (ellipszisek) csak az elhelyezkedésre utalnak, a méretre nem.



4.17. ábra Szélső pont választás 2000. szeptember 11.-ére MNF sávokkal: tiszta víz (EM1); magas lebegőanyag-tartalom és magas a-klorofill-tartalom (EM2); magas lebegőanyag-tartalom (EM3); magas a-klorofill-tartalom (EM4).

Azokat a relatív, az adott adathalmazra jellemző, szélső értékeket kerestük, amelyek elkülönülnek spektrálisan, és valós szélsőértékkel rendelkeznek. A földrajzi elhelyezkedés tisztázása alapján lehetett azonosítani, hogy milyen típusú szélső pontról van szó. Például a vízmintavételek alapján ismert volt, hogy magas a-klorofill-tartalommal, de alacsony lebegőanyag-tartalommal jellemezhetőek a Balaton környékén vizsgált tavak: Marcali-víztároló, földvári halastó, Kis-Balaton egyes pontjai. Hasznos segítségnek bizonyult a Balaton lebegőanyag térképe (I. melléklet) is a szélsőséges lebegőanyag-tartalommal rendelkező helyek meghatározásában.

A szélső pontok alapján a képeket alávetettük a lineáris szétválasztásnak, amit ENVI-vel végeztünk el. Az eredmény négy, képpont alapú, relatív sűrűségterkép lett a bemeneti négy szélső pont szerint. Az RMS sáv értékei igazolták a szélső pontok megfelelő leválogatását.

Többváltozós regresszió analízis segítségével kerestük meg a lehető legjobb kapcsolatot a Balatonon mért a-klorofill-mennyiség és az ezeken a pontokon tapasztalt négy eloszlástérkép értékei között. Az egyenlet (4.2.) a következő:

$$Chla = 72 - 57,8 \cdot EM_3 + 277 \cdot EM_4 + 56,6 \cdot EM_1 \quad (4.2.)$$

ahol

$Chla$  az adott képponton a-klorofill-tartalom [ $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ],

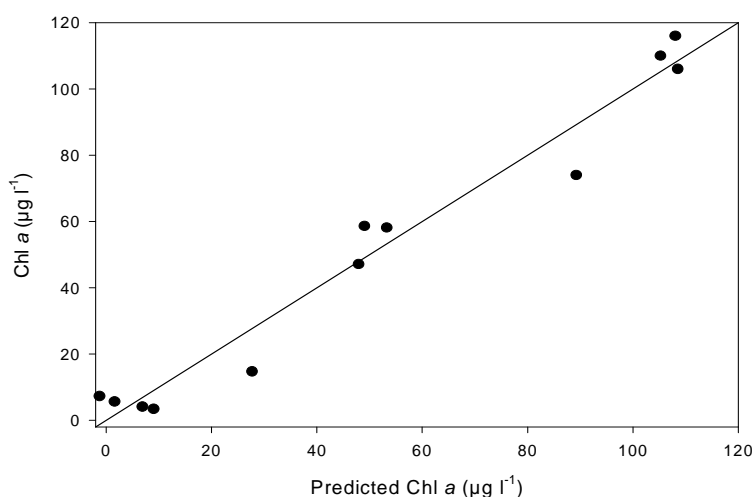
$EM_3$  a magas lebegőanyag-tartalom,

$EM_4$  a magas a-klorofill,

$EM_1$  a tiszta víz relatív eloszlástérképen vett értéke.



A Balatonon, és az azt körülvevő tavakban az a-klorofill mennyiségének megállapítása a tiszta víz (EM<sub>1</sub>), a magas a-klorofill- (EM<sub>4</sub>) és a magas lebegőanyag-tartalommal (EM<sub>3</sub>) jellemezhető szélső pontok meghatározásán múlik.



4.18. ábra. A mért és számított a-klorofill-mennyiség (x tengely: számított értékek, y tengely terepen mért értékek)

A 4.18. ábra mutatja az egyenlet (4.2.) alapján számított és az eredeti, mért a-klorofill-értékeket ( $r^2=0,952$ ).

A II. mellékletben látható az a-klorofill mennyiségét ábrázoló térképen, melynek előállításához az (4.2.) egyenletet alkalmaztuk. Összehasonlítva a lebegőanyag, és a-klorofill térképet megállapítható, hogy a két vízminőségi összetevő sűrűsége független egymástól. A lebegőanyag-tartalom eloszlásának nincs hatása az a-klorofillra, mint ahogy ezt a korábbi hagyományos képfeldolgozási technikák alkalmazása sugallta (Lindell *et al.* 1999).

A Szigligeti-öböl déli partján, pl. Balatonfenyves környékén, ahol a Nagy-Berekből tápanyagdús víz lép be a Balatonba (ill. néha szivattyúzzák), ott magasabb a-klorofill-tartalmat mutat a térkép. Nagy különbségek figyelhetők meg szintén az a-klorofill-tartalomban a Kis-Balaton egyes „kazettái”, részei között. Ahol a Zala a Balatonba torkollik, ott igen magas a-klorofill-értékek is előfordultak: akár 80-100  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ . A megfigyelések alapján elmondhatjuk, hogy a finom változásokat is ki lehet mutatni a felállított modellel.

A hibák lehetőségéről is szólnunk kell. Az azonos időpontra (2000. szeptember 11.) elkészített lebegőanyag térképen is látszott egy repülő kondenzcsíkja a Keszthelyi-öböl felett, ami az a-klorofill térképen is látható. A keleti tóféldéli és talán

az északi part mentén nagy szórást mutat mind a lebegőanyag-, mind az a-klorofill-tartalom. Ennek egyrészt oka lehet részben az igen sekély víz – esetleg a fenékről történő fényvisszaverés a víz helyett –, másrészt az úszó, vagy alábukó makrofiták (pl. hínár). Ilyen zavaró tényezők okán a számított a-klorofill-érték néhol eléri a  $200 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t is.

Mindezzel együtt a biológusok számára ezek a soha nem látott térképek hiánypótlóak voltak. Eddig nem láthatták, hiszen eddig csak pontokat mintáztak, hogy egy időpillanatban milyen lehet az a-klorofill eloszlása. A lebegőanyag térképeket ellenőrzésképpen használják a Balaton áramlásmo­delljénél.

#### 4.3.4. Az a-klorofill modell alkalmazása 1994-re

Az egyik utolsó nagy vízvirágzás a Balatonon 1994 augusztusának végén játszódott le. Ekkor a legmagasabb mért a-klorofill-koncentráció  $200 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  (Keszthelyi- és Szigligeti-öböl) volt.

A Landsat műhold áthaladási táblázatában megadják, hogy melyik napokon készültek a Balatonról (189/27) 1994-ben Landsat-5 a felvételek ([landsat.usgs.gov/technical\\_details/data\\_acquisition/15\\_acquisition\\_calendar.php](http://landsat.usgs.gov/technical_details/data_acquisition/15_acquisition_calendar.php)). Ezek közül választottuk ki azokat, amelyek augusztus végén készültek. A NASA archívumából előhívható átnézeti képek alapján a maximum időpontjához legközelebbi képen – augusztus 26. – vastag felhőréteg borította a tó teljes területét. Az utána következő áthaladásról – szeptember 11. – még átnézeti kép sem állt rendelkezésre. Ezt követi a szeptember 27-én készült kép, amely több felhőpamacsot tartalmazott, ill. a tó Ny-i részét fátyolfelhő borította, emellett erre az időpontra már a kritikus vízvirágzás véget ért, így a BLKI adatbázisában sem állt rendelkezésre megfelelő terepi referencia adat.

A következő lehetőség az 1994. augusztus 10-i kép lett volna. Azonban ezt a képet a NASA archívuma nem tudta számunkra összeállítani, noha átnézeti kép volt róla. A nekünk kellő képnegyed a FÖMI archívumában sem volt meg. Így esett a választás a végül sikerrel elemzett 1994. július 25-én, a Landsat-5-ös műhold által készített, teljesen felhőmentes képre. Ekkor még csak  $62 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  volt a vízben maximális mért a-klorofill-tartalom.

A műholdkép előkészítése, az előfeldolgozás után először a lebegőanyag-tartalom térképek készítettük el a (4.1.) egyenlet felhasználásával. Az MNF-transzformáció

után meghatároztuk a három domináns szélső pontot az új vektortérben pontdiagramok segítségével. Ebben a számított lebegőanyag térkép is segítségünkre volt.

Elkészítettük az eredeti előfeldolgozott képek alapján lineáris szétválasztással a három szélső pont szerinti eloszlástérképet. Az RMS hiba térkép megfelelő szélső pont kiválasztást mutatott. Ezek után a három domináns szélső pontot felhasználva, azok eloszlástérképén alapulva alkalmaztuk a (4.2.) egyenletet. Az eredmény a III. mellékletben látható térkép.

A számítás ellenőrzését a rendelkezésre álló, a képfelvétel időpontjához legközelebb eső, terepi mintavétel a-klorofill adataival végeztük, ami 1994. július 27-én történt. A rutinszerű vízmintavételek 1990-es évek végén mindig ugyanazon a helyen történtek, és a BLKI szakemberei végezték. Noha nem rendelkeztek GPS vevővel, a tapasztalatok alapján mindig ugyanarra a helyre tértek vissza mintát venni. Ezek a szakemberek mutatták meg a mintavétel helyét térképen, ill. a műholdképen. Becsléseink szerint ennek pontossága 1-2 képpontnyi lehet. A térbeli pontatlanságnak részbeni ellentételezése érdekében az összehasonlításnál a képpont környékének 10×10-es mátrixát vettük figyelembe. A minták elemzése a BLKI laboratóriumaiban történt.

Igen szoros egyezést találtunk a mért és számított a-klorofill-értékek között (4.3. táblázat).

Mintavételi hely	„térképi” a-klorofill ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )	mért a-klorofill ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )
Alsóörs	14,36	10,30
Balatonakali	36,20	37,10
Szigliget	58,98	59,10
Keszthely	57,80	61,70

4.3. táblázat. A Balaton vizében mért és számított a-klorofill-értékek 1994. júliusában. A műhold áthaladása július 25-én, a terepi mintavétel július 27-én történt.

Az elkészített a-klorofill eloszlástérkép (III. melléklet) betekintést nyújt a kibontakozó algavirágzás térbeli dinamikájába. A vízvirágzás csúcsa augusztus végén volt.

Az a-klorofill-koncentráció a tó nyugati felében magasabb, a Keszthelyi-medencében a néhol, a sekélyebb vízben, a  $80 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t is meghaladja. A virágzás a déli, sekélyebb területek felől terjed foltokban a keleti medencék felé. Ilyen, átfogó képet igen nehéz lenne a hagyományos hidrobiológiai technikák alkalmazásával készíteni. A modell jelentős segítséget nyújt a vízminőség védelme érdekében végzett kutatások-

ban. A vízvirágzás dinamikájának vizsgálói a fitoplankton biomassa elterjedéséről ezekkel az eloszlás-térképekkel értékes új információhoz jutottak.

Az 4.3. táblázat bizonyítja a módszer pontosságát, ahol a becsült a-klorofill-koncentráció és a felvételt követő 48 órán belüli mintavételből származó a-klorofill mennyiségét vetettük össze. A mért és számított értékek között  $4 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a maximális különbség.

Hasznos lenne, ha műholdképek alapján alacsonyabb a-klorofill-koncentrációjú víz meghatározása is lehetséges lenne ezzel a módszerrel. A medencekísérletek alapján azonban elmondható, hogy ez a vízben lévő lebegőanyag-tartalomtól függ. A magasabb lebegőanyag-tartalom lehetővé teheti alacsonyabb a-klorofill-koncentráció ki-mutatását.

Felmerül a kérdés, hogy hol lehet a határa a lineáris szétválasztással történő a-klorofill-koncentráció meghatározásnak Landsat képek alapján. Ennek megválaszolásában két tényezőt vehetünk figyelembe. Egyrészt a 2000. szeptember 11.-ére számított és mért a-klorofill-koncentrációt összehasonlító 4.18. ábrán a  $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  a-klorofill-koncentráció alatt pontfelhő látható, az értékek eltérnek a trendtől. Másrészt a 4.3. táblázatban pedig igen nagy egyezést tapasztaltunk, főleg a nagyobb koncentrációk mellett. Ezek alapján azt a durva becslést tehetjük, hogy az a-klorofill mennyiségének lineáris szétválasztással történő meghatározásának alsó határa  $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  körül mozog.

Ez lehetett az oka annak, hogy két olyan kép esetében (1999. június 5. és 2000. augusztus 2.-a), melyek készítésének időpontjában nem mértünk  $16 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -nál magasabb a-klorofill-értéket, nem volt sikeres a lineáris szétválasztás kalibrálása.

Az alsó határ csökkentése lehetséges a műhold-felvételezéshez időben minél közelebbi vízmintavétellel és elemzéssel, valamint sűrűbben felvételt készítő műholdak képeinek alkalmazásával. Tovább lehet csökkenteni a keverékmodell felállítással történő a-klorofill-becslés alsó határát olyan felvételezési technikák alkalmazásával, amelyek jobb spektrális (és térbeli) felbontást tesznek lehetővé pl. hiperspektrális repülés.

Ezzel a módszerrel költséghatékonyan lehet a pontszerű hagyományos mintavétellel nyert adatokat nagyobb felületre kiterjeszteni. Összességében szükség van egy kezdeti alaposabb vizsgálatra, ahol meg kell találni az összefüggést a műholdkép és a terepi minták között, ezt követően kisebb számú minta is elég a rendszeres képfeldolgozáshoz. Az időben feldolgozott képek segíthetik a biológust egy esetleges induló

vízvirágzásra: kijelölheti a már érintettek területeket, ill. figyelmeztethet arra, hogy melyek vannak veszélyben.

#### **4.4. Térképek előállítása kutatási eredmény bemutatásához**

A térbeli vonatkozással rendelkező adatokat térképek segítségével lehet bemutatni. A táj, a környezet adatainak feldolgozása során az eredmények megjelenítése tematikus térképpel, térképszerű ábrázolással történik, legyen szó tudományos, vagy ismeretterjesztő megjelenítésről.

A vizsgálataink eredményeit egy áttekintő térképen és az azt követő tematikus térképsorozaton mutattuk be. A megjelenés tekintetében a térképek színes és szürke árnyalatos változatban készítettük el a lehetőségeknek megfelelően.

A mérési pontok elhelyezkedését szürke árnyalatos átnézeti térképen mutattuk be. A kutatási eredményeket tematikus térképek sorozatán ábrázoltuk. Mindkét térképféleségnek több változatát kellett elkészíteni ahhoz, hogy tudományos folyóiratokban közölni tudjuk eredményeinket.

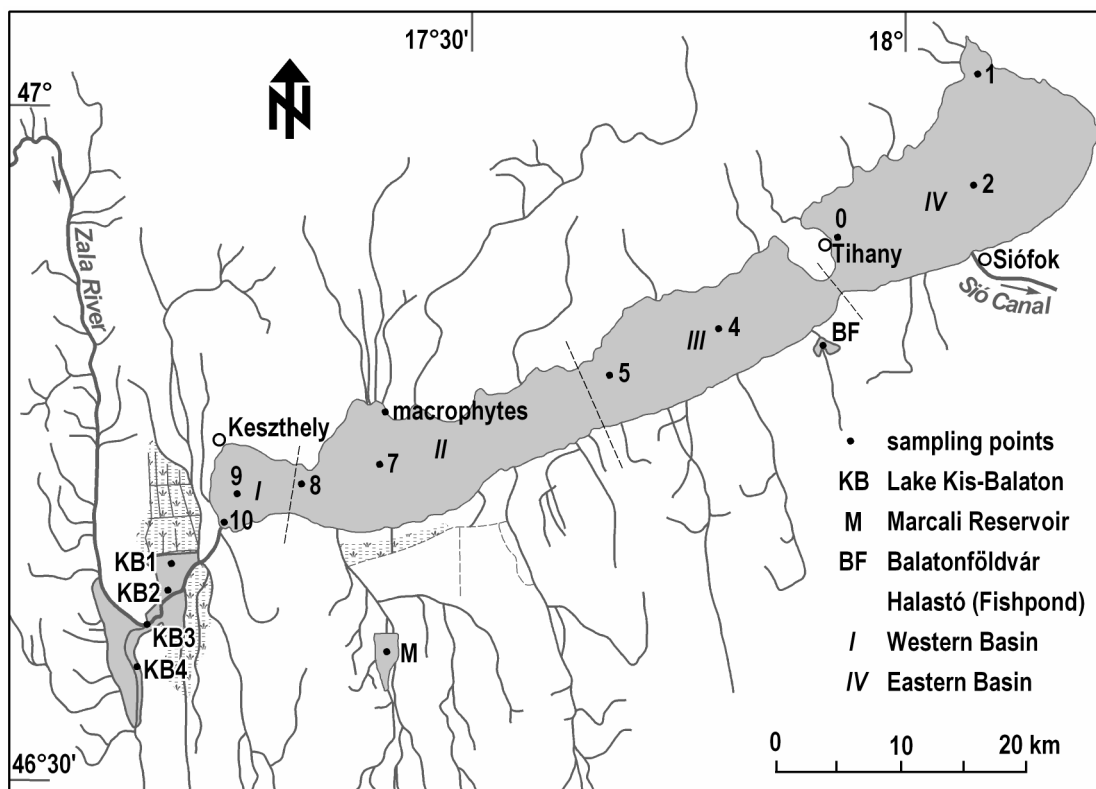
Az átnézeti térkép alapjául a máig publikálatlan 1996-ban az ELTE Térképtudományi Tanszékén készült Balaton atlasz nyomdai előkészítési fázisban lévő anyagai szolgáltak. Az atlasz térképei a teljes vízgyűjtőt lefedik, de a mérési pontok bemutatásához ennél kisebb terület is elegendő volt. Az atlasz még hagyományos térképszerkesztéssel kézi úton készült, ezért a szükséges vízrajzot beszkeneltük.

A térkép megrajzolása a tájfutó térképek szerkesztésére kifejlesztett OCAD szoftverrel végeztük. Ezzel a szoftverrel igen kényelmesen lehet olyan bonyolult rajzolatú térkitöltéseket kivitelezni, mint az áttekintő térkép a mocsarai pl. a Kis-Balaton területén.

Az áttekintő térkép szürke árnyalatos, mert ez a szaklapok adta lehetőségeknek jobban megfelel, mint a színes térkép. A szürke árnyalatok számát is a lehető legkevesebbre igyekeztünk korlátozni. A vízfelületek kitöltése 50%-os, a partvonal és az egyéb vízfolyások és megírásaik 60%-os fekete, azaz szürke színt kapott. A megírások, mértékléc, az északjel és a keret 100% fekete.

Annak érdekében, hogy a térkép méretét a szaklapok szerkesztői bizonyos kereteken belül változtathassák, nem méretarányt adtunk meg, hanem mértéklécet alkalmaztunk. Az eredeti térkép tükör 14,7×10,5 cm volt. Aránylag nagy betűket használtunk (10 pont) és olyan ún. vágott betűtípust (Arial Narrow Bold), amely legkevésbé érzékeny a kicsinyítésre. A jobb olvashatóság érdekében néhány térképi

megírás fehér háttérrel kapott. Arra törekedtünk, hogy a térkép könnyen áttekinthető legyen, de tartalmazza a tájékozódáshoz szükséges információkat.



4.19. ábra. A mintavételi pontokat ábrázoló angol nyelvű térkép

Az áttekintő térkép angol (4.19. ábra) és magyar (3.1. ábra) változatban is elkészült. A háttér térkép megegyezik a különbség a megírásokban rejlik. Az északjel is különbözik a két változatban. Az egyik folyóiratban a bíráló kérésének megfelelően az angol nyelvű térképet fokhálózati megírásokkal láttuk el. Szintén az angol változaton szaggatott vonallal lehatárolás található, ill. a medencékben római számokkal láttuk el, mert szükség volt a tó tagolására annak bemutatásakor. Ez a felosztás viszont egy magyar szemlélőnek egyértelmű, és csak két medencéhez köthető név. Ez a két név szerepel is a magyar térképen.

Készült még egyféle áttekintő térkép a medencekísérletek és a terepi spektrométeres vizsgálatokat feldolgozó szakdolgozathoz (Sváb 2001). Az egyik hamis színes Landsat felvételnek a Balatont ábrázoló kivágatát láttuk el a mérési pontokkal és jelmagyarázattal.

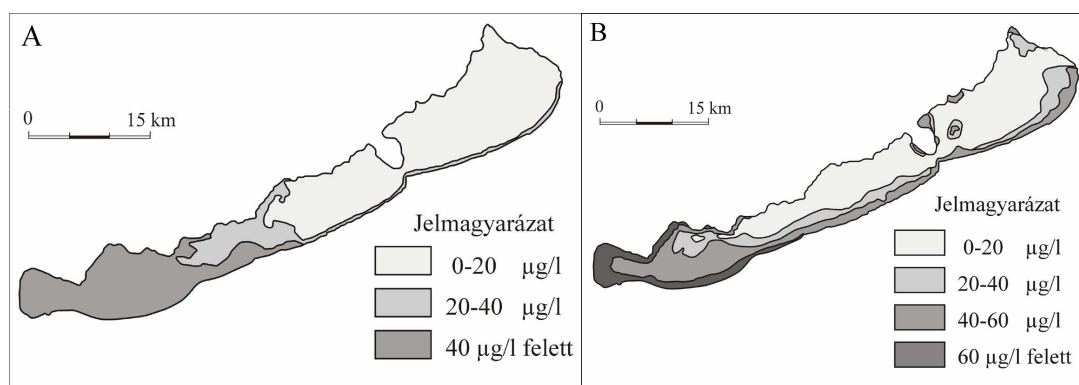
A tematikus térképek mind levezetett térképek. Alapjuk az a képpontról képpontra más-más értéket mutató eredménytérkép amely a megfelelő kalibrálás eredménye

volt. Ez után a felvett értékek alapján 11 osztályba soroltuk a képpontokat, majd minden osztály külön szintet kapott ENVI-ben. Ennek az osztályba sorolásnak az eredményét láthatjuk az I–III. mellékletekben. A térképek megközelítik az A/4-es lap hasznos tükörméretét.

A szaklapokba történő publikáláskor azonban nem állt rendelkezésünkre ekkora felület eredményeink közlésére. További nehézséget jelentett, hogy színes térképek közlésére sem volt lehetőségünk.

Az eredeti eredményeken alapulva ezért levezetett tematikus térképeket kellett készíteni. Figyelembe kellett vennünk az adott szaklap sajátosságait, mint például a méret, a felhasznált lap minősége és a nyomtatási technika.

A Hidrológiai Közlöny korábbi számait tanulmányozva (durva felületű papír, rossz felbontású nyomtatás) látható volt, hogy a lehető legegyszerűbb tematikus térképek kialakítására kell szorítkoznunk. A lap mérete A/4, de a cikkeknek igazodniuk kellett a kéthasábos elrendezéshez. A közlésre biztosított három lapon akár két hasábra átnyúló térképet is készíthettünk volna, de így sokkal rövidebb magyarázatra lett volna lehetőségünk. Ezért két térképet jelentettünk meg, melyek mérete 8,2×5,3 cm ill. 8,2×6 cm volt. Szerkesztéskor ezeken az eredeti méreteken nem változtattak. A betűtípus igazodott a szöveg betűtípusához (Times New Roman), mérete 8-10 pont volt.



4.21. ábra. A Balaton a-klorofill térképe a Landsat TM képek alapján. A – 2000. szeptember 11-én, B – 1994. július 25-én (A kategóriák a közlés lehetőségei miatt ilyen tágak.)

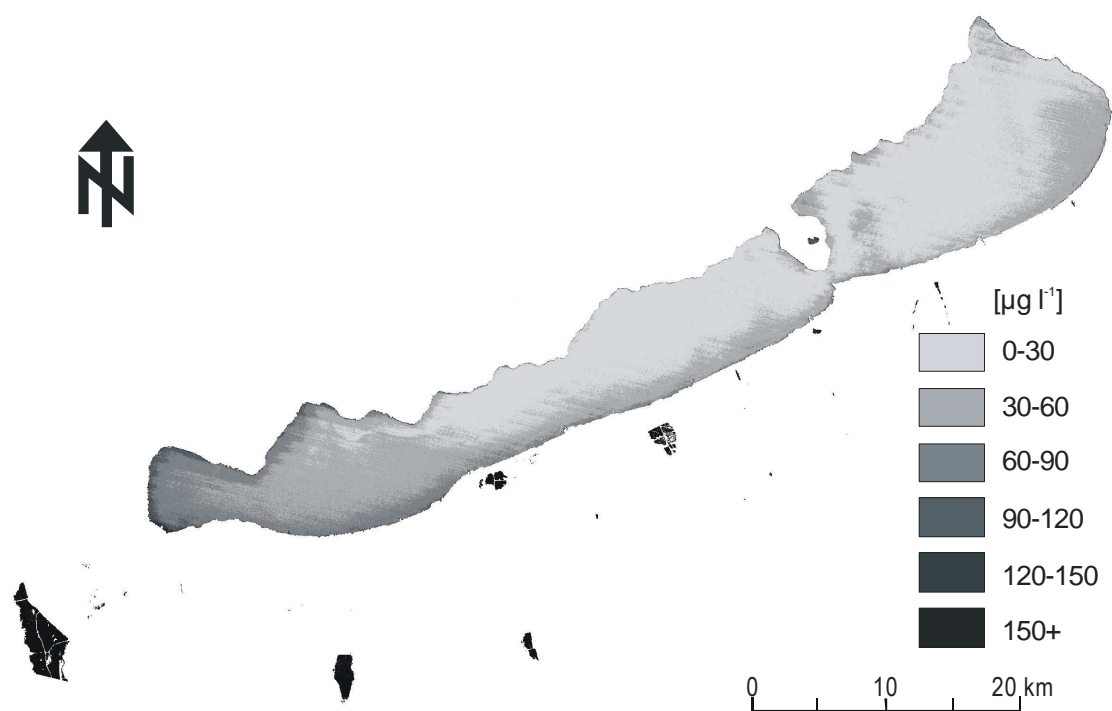
A szerény nyomtatás miatt a térképeken a lehető legkevesebb osztályt kellett kialakítani, s ezek határát fekete vonallal vettük körbe a jobb érthetőség kedvéért (4.21. ábra). A lehatárolás alapja a mellékletben szereplő tematikus térképek voltak, a munkát Corel Draw szoftverrel végeztük. A kategóriák száma háromra ill. négyre csökkentettük, és azokat rendre 5%, 15%, 35%, 50% feketével töltöttük ki. Az eredménytérképeken látható a nagyfokú generalizáltság, mivel törekedni kellett rá, hogy ne

legyenek bezáródó felületek, a legkisebb lekerített résznek is megfelelően nagynak kellett lennie.

Az International Journal of Remote Sensing (IJRS) a távérzékelés egyik elismert nemzetközi közlési fóruma. A szaklap mérete 17×25 cm, fényes papírra nyomják nyomdában kifogástalan minőségben. A papír minősége megfelel a színes nyomtatásnak is, de a színesen nyomott oldalakért magas árat kérnek. Ezért szürke árnyalatú tematikus térképeket közöltünk. Az eredeti alap adatokat soroltuk ENVI segítségével 5 ill. 6 kategóriába. Tekintettel a valóban kiváló minőségű nyomtatásra, és a térkép nagyobb méretére talán a kategóriák nagy száma a szürkefokozatos térképi ábrázolás ellenére sem okoz nehézséget az olvasónak.

A feliratokat Corel Draw segítségével készítettük annak ellenére, hogy az ENVI is rendelkezik térképek feliratozására alkotott modullal (Annotation). A beépített modul azok részére lehet hasznos, akik nem rendelkeznek egyéb rajzolásra, feliratozásra tervezett cél szoftverekkel, ezekkel gyorsabban célt lehet érni, különösen, ha magyar ékezeteket is használni kívánunk.

A mértékléc és az eredetileg 14 pontos betűméret, és a törzsszövegtől eltérő betűtípus – Arial Normal – mind a térkép nagyfokú méretbeli rugalmasságát szolgálta (4.22. ábra).



4.22. ábra. Az a-klorofill eloszlása 1994. július 25-én



## 4.5. Módszerben rejlő lehetőségek

További kutatási lehetőség, hogy folytassuk a vizsgálatokat a Balaton tekintetében. Ez jelenti egyrészt friss képek elemzését. A másik lehetőség olyan korábban készült képek vizsgálata, amelyek vízvirágzás idején készültek. Mindkét esetben alapvetően akkor lehet sikeres ennek a módszernek az alkalmazása, ha a víz a-klorofill-tartalmának maximuma eléri a  $20-30\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ -t, ha a vízmintavétel a műhold áthaladása körüli négy napon belül történik, ha megfelelő számú mérési ponton észlelt a-klorofill-érték áll rendelkezésre ahhoz, hogy belőlük az egyenletek kialakításához, és az ellenőrzéshez is jusson.

A kutatási módszer megválasztásánál szempont volt, hogy törekedjünk olyan vízminőség térképező eljárást kidolgozni, ami átvihető a Balatonhoz hasonlóan sekély vizű, ezért heterogén eloszlású magas lebegőanyag-tartalommal jellemezhető tavakra. Az átvihetőség lehetősége is szerepet játszott, hogy munkánk során Landsat műholdfelvételeket használtunk. Érdekes lenne megnézni, hogy nem mérsékelt övi, hanem mondjuk trópusi, vagy sivatagi éghajlaton elhelyezkedő sekély tavak esetében lehetséges-e a-klorofill-tartalom meghatározása Landsat képek alapján.

A kutatási terv kialakítása óta pályára állított képkészítő rendszerekre is ki lehetne próbálni a módszert. Alkalmask lehetnek a feldolgozásra az Európai Űrügynökség által, 2002. március 1-én fellőtt Envisat platformján működő MERIS érzékelő, vagy a NASA MODIS-a által készített képek. Ezek rosszabb térbeli felbontással rendelkeznek, mint a Landsat képek, viszont gyakrabban haladnak el ugyanazon területek felett. Ezért alkalmask lehetnének akár a vízvirágzás folyamatának térképezésére is pár nap eltéréssel készült képsorozatok elemzésével.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Olyan összefüggésrendszer kialakítását tűztük ki célul, mely segítségével megrajzolható egy sekélyvizű tó, a Balaton, adott időpontra vonatkozó vízminőségi térképsorozata. A kialakított módszert alkalmazni kívántuk korábban készült, a Balatont ábrázoló felvételek értékelésére is. Olyan rendszer kialakítására törekedtünk, amely egyrészt költséghatékony, másrészt megbízhatóan bevethető más sekélyvizű tavak vízminőségi vizsgálata esetén is.

A kutatás során választott statisztikai módszer hatékonyságának ellenőrzésére a műholdképek elemzése előtt kísérletsorozatot végeztünk. Durva falú fekete medencébe Balaton vizet töltöttünk, majd ismert mennyiségű lebegőanyagot (szárított, majd porrá őrölt fenéküledéket), ill. algatenyészetet hígítottunk fel benne. Spektrométer segítségével rögzítettük a reflektancia változásait.

A kísérleteket a Zala torkolatánál gyűjtött, a látható fényt szinte teljesen elnyelő huminanyagokban gazdag vízzel is megismételtük. A fénymenetek hasonlóak voltak a „tisztá” Balaton vízzel végzett kísérletekhez. A vizsgálatok eredményeit hasonló elemzéseknek vetettük alá – főkomponens-analízis (PCA) –, mint a képek intenzitásértékeit. Megállapíthattuk, a vízben lévő a-klorofill és lebegőanyag megfelelően egyedi spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek.

A Landsat műholdak évtizedek óta megbízhatóan, rendszeresen készítik a felvételeket, és megfelelő archívum áll a felhasználók rendelkezésére. Költségek tekintetében is előnyt élveznek, pl. a hiperspektrális légi felvételezéssel szemben, ezért választottuk Landsat felvételeket a vízminőségi elemzés alapjául. A Landsat műholdak által készített képek hátránya, hogy durva spektrális felbontással rendelkeznek, és a sávok kiosztása is elsősorban a Föld megfigyelését szolgálja.

A műholdképek készültével párhuzamosan több alkalommal terepi méréseket végeztünk, melyek vízmintavételből, és azok hagyományos vízkémiai elemzéséből álltak (BLKI laboratóriumaiban). A víz reflektanciáját ugyanakkor spektrométerrel rögzítettük.

A nyers képeket előkészítéssel tettük alkalmassá a vizsgálatokra. A műholdról érkező képi adatot radiometriai-, geometriai- és légköri korrekciónak vetettük alá. Ezt követően a térképi vetületi rendszerbe való illesztés és a vízzel borított felületekhez tartozó képpontok leválogatása által kaptam a vízminőségi adatok kinyerésére alkal-

mas felvételt. Az eredmény vetületi rendszerbe illesztett, a légkör torzító hatásától mentesített, egymással összehasonlítható állapotba hozott képek sorozata lett.

A mért vízminőségi jellemzők és az előkészített műholdképeken, a mintavétel helyén, tapasztalt intenzitásértékek összevetése kimutatta, hogy az összes vizsgált időpontban szoros szignifikáns a korreláció a lebegőanyag-tartalom és a 3. Landsat sáv között ( $r^2=0,89$ ). A regressziós együtthatók segítségével elkészíthető volt az egyenletet, amellyel később olyan képek esetében is térképezni lehetett a lebegőanyag-tartalmat, amikor a műholdátvonulással párhuzamosan terepi mintavételezés nem történt.

Egyéb vizsgált vízminőségi jellemzővel, pl. a-klorofill, nem mutatkozott minden időpontra jellemző szoros szignifikáns korreláció. Ez az eredmény várható volt a korábban sekély tavakon végzett vizsgálatok alapján (pl. Varga *et al.* 1991).

Tanulmányok bizonyították (pl. van der Meer 1995), hogy a „lágý” (soft) képelemzési módszer, mely lehetővé teszi bizonyos mennyiségek képponton belüli változékonyságának becslését, kvantitatív eredménnyel képes szolgálni oly módon, ha előbb többváltozós regresszió segítségével kalibráltunk. A már megszokott módszerekkel kivitelezhetetlennek ítélt feladatot ilyen új megközelítésbe helyezve vizsgáltuk.

A választott „lágý” osztályozási módszer a lineáris szétválasztás (linear mixture modelling) volt, mely szerint minden képpont intenzitás-értéke az azt felépítő felszínfeleségekről (komponensről) érkező reflektanciák összegeként értelmezhető, azok aránya szerint. Azoknak a komponensnek – ebben az esetben a lebegőanyag és a-klorofill – szétválasztása lehetséges, amelyek egyedi spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek.

Az alkalmazott eljárás a következő volt. Az előkészített Landsat képek jel-zaj arányát maximalizálását és információ-sűrítést kellett elvégezni továbbfejlesztett főkomponens számítással (Minimum Noise Fraction MNF). A keletkezett új vektortérben a képi adatok pontfelhőjéből válogattuk le azokat a szélső pontokat, amelyek többnyire egy vízminőségi tulajdonság jellemzői: a magas lebegőanyag-tartalom, a tiszta ülepített víz, a magas a-klorofill-tartalom, valamint a magas lebegőanyag- és az a-klorofill-töménység. Az MNF-transzformáció megmutatta az is, hogy a feldolgozásra szánt Landsat képek a lineáris szétválasztáshoz megfelelő spektrális dimenzióval rendelkeztek. A négy szélső pont alapján végrehajtott „korlátozás nélküli” lineáris szétválasztás (unconstrained spectral unmixing) eredménye négy eloszlástérkép volt, ahol az adott képpont az adott szélső ponthoz való tartozás mértékét tük-

rözte. Az eloszlástérképek kalibrálását a hagyományos technikával mért vízminőségi adatokhoz többváltozós regresszió segítségével végeztük.

A vizsgálati időszakban készült Landsat műholdképek lineáris szétválasztása után a módszer egy korábban (1994. július 25.) készült Landsat kép elemzésére alkalmasnak bizonyult. A rendelkezésre álló a-klorofill-értékeket az ellenőrzéskor használtuk fel.

A vizsgálatok eredményeit tematikus térképsorozat ábrázolja. A térképek nagyfokú generalizálására volt szükség ahhoz, hogy az eredményeket be lehessen mutatni, pl. szürke fokozatos, térképeken.

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Köszönettel tartozom a következőknek a kutatómunka elvégzésében és a dolgozat elkészítésében való közreműködésükért: Andrew Tyler, Tom Preston, Présing Mátyás, Antal Kristóf, Zentai László, Horváth Terézia, V.-Balogh Katalin, Kovács Attila, Kozma Erika, Tóth Viktor, Antal Gábor, Faragó Tibor.

A kutatások a NATO és a Royal Society anyagi támogatásával készültek.

## IRODALOM

- Adams, J. B. – Smith, M. O. – Gillespie, A. R. 1993. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis, *In: Pieters C.M. – Englert P. (szerk.) Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*, LPI and Cambridge Univ. Press, 145-166.
- Arenz, R. F. – Jr. Lewis, W. M. – Saunders, J. F. 1996. Determination of Chlorophyll and dissolved organic carbon from reflectance data for Colorado reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, **17(8)**, 1547-1566.
- Atkin, P. 2000. Investigating radionuclide bearing suspended sediment transport mechanism in the Ribble estuary using airborne remote sensing. *Doktori értekezés, Stirling University, Nagy-Britannia*.
- Atkinson, P. M. – Tatnall, A. R. L. 1997. Neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, **18(4)**, 699-709.
- Bastin, L. 1997. Comparison of fuzzy c-means classification, linear mixture modelling and MLC probabilities as tools for unmixing coarse pixels. *International Journal of Remote Sensing*, **18(17)**, 3629-3648.
- Barsi Á. 1997. Landsat-felvétel tematikus osztályozása neurális hálózattal, *Geodézia és Kartográfia*, **49(4)**, 21-28.
- Barsi Á. 1998. Felszínborítottság térképezése neuro-fuzzy módszerrel GIS környezetben. *Geodézia és Kartográfia*, **50(6)**, 10-15.
- Boardman, J. W. 1989a. Spectral and spatial unmixing: applications of singular value decomposition. *Proceedings of Image Processing*, 1989, Reno, NV.
- Boardman, J. W. 1989b. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition. *Proceedings, IGARSS '89, 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, **4**, 2069-2072.
- Boardman, J. W. 1991. Sedimentary Facies Analysis Using Imaging Spectrometry: A Geophysical Inverse problem. *Ph. D. Thesis, University of Colorado, Boulder*.
- Boardman, J. W. – Kruse, F. A. 1994. Automated spectral analysis: A geological example using AVIRIS data, northern Grapevine Mountains, Nevada. *Proceedings, Tenth Thematic Conference, Geologic Remote Sensing*, 9-12 May 1994, San Antonio, Texas, I-407 - I-418.
- Bódis K. 1999. Geometriai transzformációk, transzformációs egyenletek és alkalmazásuk a geoinformatikában. *Szakedolgozat, Szeged*.
- Brivio, P. A. – Giardino, C. – Zilioli, E. 2001. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, **22(2-3)**, 487-502.
- Bulla B. 1962. Magyarország természeti földrajza. *Tankönyvkiadó, Budapest*.

- Büttner Gy. – Vörös L. 1981. Investigation of Hungarian lakes by means of Landsat data. *Adv. Space Res.* **Vol.1**, 177-189.
- Conkright M. E. – Gregg W. W. 2003. Comparison of global chlorophyll climatologies: *In situ*, CZCS, Blended *in situ*-CZCS and SeaWiFS. *International Journal of Remote Sensing*, **24(5)**, 969-991.
- Cuthbert, I. D. – P. Del Giorgio 1992. Toward a standard method of measuring color in freshwater. *Limnology and Oceanography*, **37**, 1319-1326.
- Czimer K. 2001. Geoinformatika. *elektronikus jegyzet*  
<http://geo.eke.hu/hun/onlinejegyzet/geoinfo>
- Csató É. 2000. Műholdadatok térképészeti alkalmazása. *PhD értekezés*, ELTE TTK, Térképtudományi Tanszék, Budapest.
- Csornai G. – Dalia O. 1991. Távérzékelés. *Erdészeti és Faipari Egyetem, Földmérési és Földrendezői Kar, Székesfehérvár*.
- Dall'Olmo, G. – Gitelson, A. – Rundquist, D. 2003. Toward a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1938 – 1941.
- Darecki, M. – Kaczmarek, S. – Olszewski, J. 2005. SeaWiFS ocean colour chlorophyll algorithms for the southern Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, **26(2)**, 247–260.
- Dekker, A. G. – Malthus, T. J. – Wijnen, M. M. – Seyhan, E. 1992. The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signatures analysis of inland waters. *Remote Sensing of Environment*, **41**, 211-225.
- Dekker, A. G. – Peters, S. W. M. 1993. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*, **14 (5)**, 799-821.
- Dekker, A. G. – Malthus, T. J. – Hoogenboom, H. J. 1995. Remote Sensing of Inland Water Quality. *In: Advances in Environmental Remote Sensing*, Szerk.: Danson F. M., Plumer S. E., John Wiley & Sons Ltd. Chichester 123-142.
- Dekker, A. G. – Vos, R. J. – Peters, S. W. M. 2002. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, **23(1)**, 15–35.
- Dzwonkowski, B. – Yan, X. H. 2005. Development and application of a neural network based ocean colour algorithm in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, **26(6)**, 1175–1200.
- Entz B. 1983. Változó Balaton. *Natura Kiadó, Budapest*.
- Felföldy L. 1986. A vizek környezettana (általános hidrobiológia). *Mezőgazdasági Kiadó, Budapest*.
- Foody, G. M 1992. A fuzzy sets approach to the presentation of vegetation continua remotely sensed data: an example from lowland heath. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **58**, 221-225.

- Gallie, E. A. – Murtha, P. A. 1992. Specific absorption and backscattering spectra for suspended mineral and chlorophyll-a in Chilko Lake, British Columbia. *Remote Sensing of Environment*, **44**, 47-65. (39:103-118).
- George, D. G. 1997. The airborne remote sensing of phytoplankton chlorophyll in lakes and tarns of the English Lake District. *International Journal of Remote Sensing*, **18(9)**, 1961-1975.
- Gitelson, A. A. – Szilágyi F. – Garbuzov, G. P. 1989. Hidrooptikai modell felszíni vizek egyes vízminőségi jellemzőinek távérzékelésére. *Vízügyi Közlemények*, **71(3)**, 427-436.
- Gitelson, A. A. – Szilágyi F. – Garbuzov, G. P. 1990. Felszíni vizek a-klorofill töménységének becslése távérzékeléssel. *Vízügyi Közlemények*, **72(2)**, 142-152.
- Gitelson, A. – Garbuzov, G. – Szilágyi F. – Mittenzwey, K.-H. – Karnieli, A. – Kaiser, A. 1993a. Qualitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *International Journal of Remote Sensing*, **14(7)**, 1269-1295.
- Gitelson, A. – Szilágyi, F. – Mittenzwey, K.-H. 1993b. Improving quantitative remote sensing for monitoring of inland water quality. *Water Research*, **27(7)**, 1185-1194.
- Green, A. A. – Berman, M. – Switzer, P. – Craig, M. D. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26(1)**, 65-74.
- Gyenes K. (szerk.) 2006. A magyar tenger mellékén – A Balaton-felvidéki Nemzeti Park, *Magyarország Nemzeti Parkjai*, MTV Zrt és a Master Pro Kft. koprodukciója (DVD).
- Hadjimitsis, D. G. – Clayton, C. R. I. – Hope, V. S. 2004. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, **25(18)**, 3651–3674.
- Han, L. – Rundquist, D. C. 1996. Spectral characterization of suspended sediments generated from two texture classes of clay soil. *International Journal of Remote Sensing*, **17(3)**, 643-649.
- Han, L. – Rundquist, D. C. – Lui, L.L. – Fraser, R. N. – Schalles J. F. 1994. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, **15(18)**, 3707-3718.
- Harrington, J. A. – Schiebe, F. – Nix, J. F. 1992. Remote sensing of Lake Chicot, Arkansas: Monitoring suspended sediments, turbidity and Secchi depth with Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, **39**, 15–27.
- Heródek S. – Laczkó L. – Virág Á. 1988. Lake Balaton research and management. *MGKSZ Nyomda*.
- Hu, C. M. – Chen, Z. Q. – Clayton, T. D. – Swarzenski, P. – Brock, J. C. – MullerKarger, F. E. 2004. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands. *Initial results from Tampa Bay, FL. Remote Sensing of Environment*, **93**, 423–441.



- Hudson, S. J. – Moore, G. F. – Bale, A. J. – Dyer, K. R., – Airken, J. 1994. An operational approach to determining suspended sediment distributions in the Humber estuary by airborne multi-spectral imagery. *Proceedings of the first Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France. 11-15 Sept. 1994.
- Iwamura T. – Nagai H. – Ishimura S. 1970. Improved methods for determining contents of chlorophyll, protein, ribonucleic and desoxyribonucleic acid in planktonic populations. – *Internat. Rev. Hydrobiol.* **55**, 131-147.
- Jensen, R. J. 1986. Introductory digital image processing. *Prentice–Hall, New Jersey*.
- Kirk, J. T. O. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, Second edition.
- Kozák L. 1995. Felszíni vizek vízminőségi paramétereinek távérzékelése műholdfelvételek alapján. Diplomamunka, *ELTE TTK, Geofizika szak, Budapest*
- Körösine Kovács G. 1992. Felszíni vizek minőségének vizsgálata távérzékeléssel. Doktori értekezés, *Budapest Műszaki Egyetem, Budapest*.
- Köte Zs. 1986. Távérzékeléssel nyert adatok hasznosítása a Balaton vízminőségének védelmében. Doktori értekezés, *Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest*.
- Lillesand, T. M. – Kiefer R. W. 1999. Remote sensing and image interpretation. Fourth edition *John Wiley & Sons, New York*.
- Lindell, T. – Pierson, D. – Premazzi, G. – Zilioli, E. 1999. *Manual for Monitoring European Lakes Using Remote Sensing Techniques*, Part III Remote Sensing of Lakes, 81–122 (Salmon, Italy: European Commission Joint Research Centre, Environment Institute).
- Mantovani, J. E. – Carbal, A. P. 1992. Tank depth determination for water radiometric measurements. *International Journal of Remote Sensing*, **13(14)**, 2727-2733.
- Martonné Erdős K. 1996. Magyarország természeti földrajza I. *Kossuth Lajos Tudományegyetem, Debrecen*.
- Mayo, M. – Gitelson, A. – Yacobi, Y. Z. – Ben-Avraham, Z. 1995. Chlorophyll distribution in Lake Kinnereth determined from Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, **16(1)**, 175-182.
- van der Meer, F. 1995. Spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, **16(16)**, 3189-3194.
- van der Meer, F. – De Jong, S. M. 2000. Improving the results of spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper imagery by enhancing the orthogonality of end-members. *International Journal of Remote Sensing*, **21(15)**, 2781-2797.
- Motyovszki T. 1985. A Landsat űrfelvételek hasznosítási lehetőségei a Balaton vízminőségi kutatásának területi kiterjesztésében. Diplomamunka, *ELTE Térképtudományi Tanszék, Budapest*.
- Mucsi L. 1995. Műholdas távérzékelés és digitális képfeldolgozás I. *Jatepress, Szeged*.

- Mucsi L. 2004. Műholdas távérzékelés. Libellus kiadó, Szeged.
- Nash, E. B. – Conel, J. E. 1974. Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite, and ilmenite, *Journal of Geophysical Research*, **79**, 1615-1621.
- Présing M. – Herodek S. – Preston, T. – Vörös L. 2001. Nitrogen uptake and the importance of internal nitrogen loading in Lake Balaton. *Freshwater Biology*, **46**, 125-139.
- Quibell, G. 1991. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae. *International Journal of Remote Sensing*, **12(1)**, 177-182.
- Rainey, M. P. 1999. Airborne remote sensing of estuarine intertidal radionuclide concentrations. Doktori értekezés, *Stirling University, Nagy-Britannia*.
- Rainey, M. P. – Tyler, A. N. – Bryant, R. G. – Gilvear, D. J. – McDonald, P. 2000. The influence of surface and interstitial moisture on the spectral characteristics of intertidal sediments: implications for airborne image acquisition and processing. *International Journal of Remote Sensing*, **21(16)**, 3025-3038.
- Rainey, M. – Tyler, A.N. – Gilvear, D.J. – Bryant, R., – McDonald, P. 2003. Mapping Estuarine Intertidal Sediment Size Fractions through Airborne Remote Sensing. *Remote Sensing of the Environment*, **86**, 480-490.
- Richards, J. A. 1986. Remote sensing digital image analysis. *Springer-Verlag, Berlin*.
- Ritchie, J. C. – Cooper, C. M. – Schiebe, F. R. 1990. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, **33**, 137-148
- Seager, S. – Turner, E. L. – Schafer, J., – Ford, E. B. 2005. Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants. *Astrobiology*, **5(3)**, 372-390.
- Settle, J. J. – Drake, N. A. 1993. Linear mixing and the estimation of ground cover portions. *International Journal of Remote Sensing*, **14(6)**, 1159-1177.
- Singer, R. B. – McCord, T. B. 1979. Mars: Large scale mixing of bright and dark surface materials and implications for analysis of spectral reflectance. *Proceedings Lunar and Planetary Science Conference, 10th*, 1835-1848.
- Singer, R. B. 1981. Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 7967-7982.
- Somogyi S. 1997. Tavaink. *In: Karátsony D. (főszerk.) Pannon enciklopédia, Magyarország földje. Kertek 2000 Könyvkiadó, Budapest*, 250-251.
- Sváb E. 2001. A vízminőség-ellenőrzés spektrometriai lehetőségei a Balaton példáján. Szakdolgozat ELTE TTK, Természetföldrajzi Tanszék, Budapest.
- Szabó Gy. – Szilágyi F. 1984. Landsat űrfelvételek hasznosítása a Balaton vízminőség-védelmében. *Vízügyi Közlemények*, **66(3)**, 401-416.

Szabó Gy. – Szilágyi F. – Büttner Gy. – Remetey-Fülöpp G. 1985. Anwendung der Land-satellitenaufnahmen bei der forschung von seichten seen; möglichkeiten zur untersuchung des neusiedlersees. *BFB-Bericht*, 9-17.

Szabó Sz. (szerk.) – Moldován J. (szerk.) 2001. Jelentés, a Balaton vízgyűjtőjén 2000-ben végzett vízgazdálkodási és környezetvédelmi tevékenységről. *Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság és a Közép-dunántúli Környezetvédelmi Felügyelőség, Székesfehérvár*

Szabó Sz. 1997. A Balaton vízgazdálkodása. *Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Székesfehérvár*.

Thiemann S. – Kaufmann H. 2002. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data – a semiempirical multisensor and multitemporal approach for Mecklenburg Lake District, Germany. *Remote Sensing of Environment*, **81**, 228-237.

V.-Balogh K. – Vörös L. 1996. Oldott huminanyagok a Kis-Balatonban és hatásuk a Keszthelyi-medencére. *In.: Pomogyi P. (szerk.) 2. Kis-Balaton Ank. PATE GMKSZ TIK Nyomda, Keszthely* 555-565.

Varga Gy. – Michels, F. – Szilágyi F. – Tubákos É. – Bozó P. – Vadász V. 1988. Investigation by Landsat MSS and TM images used for water quality monitoring at Lake Balaton. *3<sup>rd</sup> Hungarian Conference on Satellite Remote Sensing*, 424-438.

Varga Gy. – Szilágyi F. 1991. Távérzékelési módszerek hasznosítása a Balaton vízminőségi célú tematikus térképezésében. *MHT IX. Országos vándorgyűlés, Székesfehérvár*, 219-229.

Virág Á. 1997. A Balaton múltja és jelene. *Egri Nyomda Kft., Eger*.

Vörös L. – Hiripi L. – Koncz E. – Kovács A. – Présing M. – V.-Balogh K. – Lomniczy K. – Shafik, H. M. 1999. Cianobaktériumok és a Balaton vízminősége. *Hidrológiai Közöny*, **79(6)**, 343-344.

Vörös L. – Nagy Göde P. 1993. Long term changes of phytoplankton in Lake Balaton (Hungary). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **25**, 682-686.

Winterbottom, S. J. – Gilvear, D. J. 1997. Quantification of channel-bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and areial photography. *Regulated Rivers: Research and Management*, **13**, 489-499.

Zomer, R. – Ustin, S. 1998. Ground-truth data collection protocol for hyperspectral remote sensing. <http://www.cstars.ucdavis.edu/classes/hsgrdtutorial.html>, University of California, Davis.

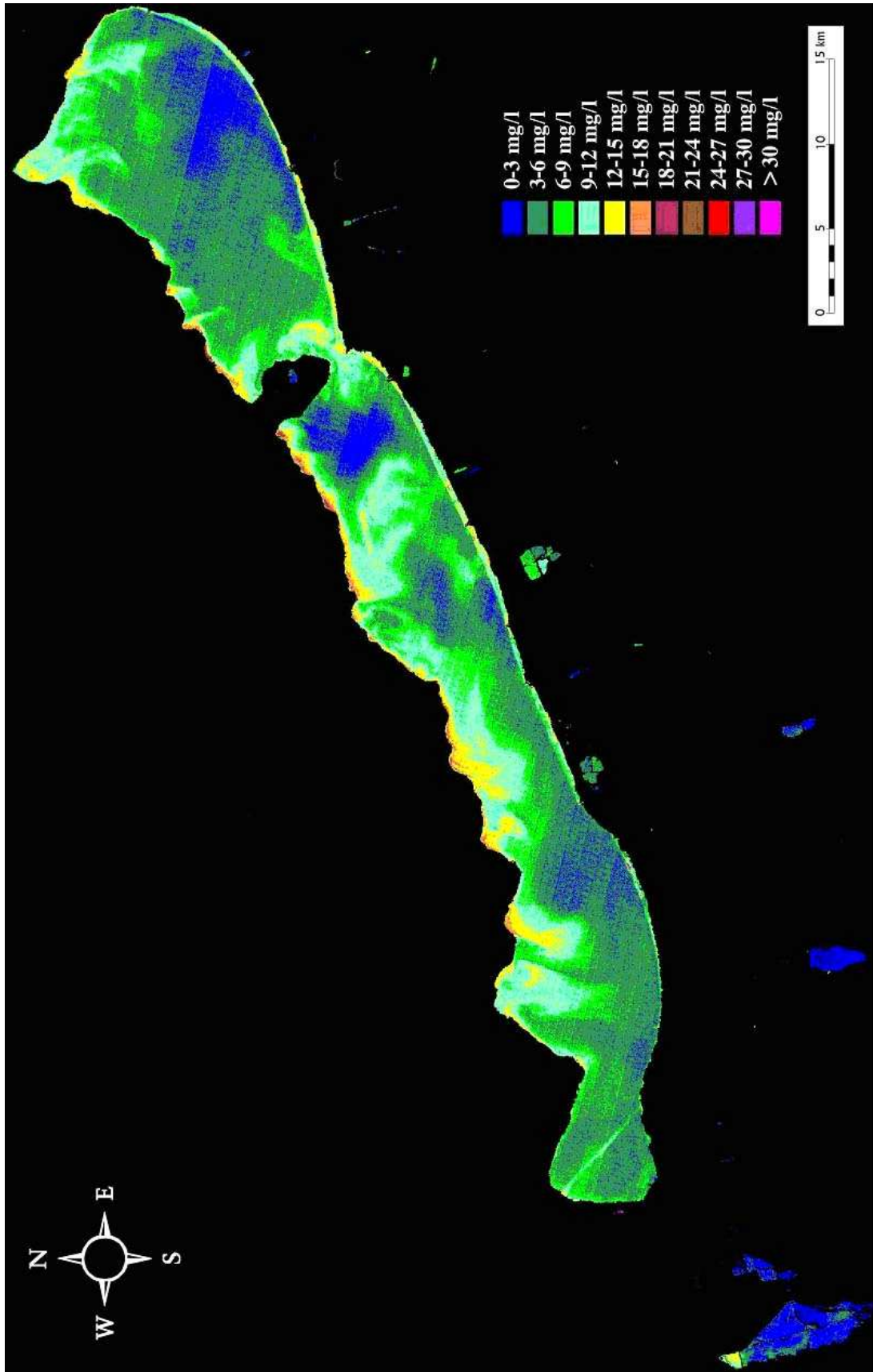
### **Internetes hivatkozások:**

<http://fish.fomi.hu/termekek/honlap/szolgaltatasok/Atszamitas/atszamitas.htm>  
<http://geo.eke.hu/hun/onlinejegyzet/geoinfo>  
<http://landsat.gsfc.nasa.gov>  
[http://landsat.usgs.gov/technical\\_details/data\\_acquisition/15\\_acquisition\\_calendar.php](http://landsat.usgs.gov/technical_details/data_acquisition/15_acquisition_calendar.php)  
<http://www.cstars.ucdavis.edu/classes/hsgrdtutorial.html>  
<http://www.eurimage.com/products/landsat.html>  
<http://www.euromap.de>  
<http://www.nrsa.gov.in/engnrsa/satellites/13samppage.html>  
<http://www.spotimage.fr>

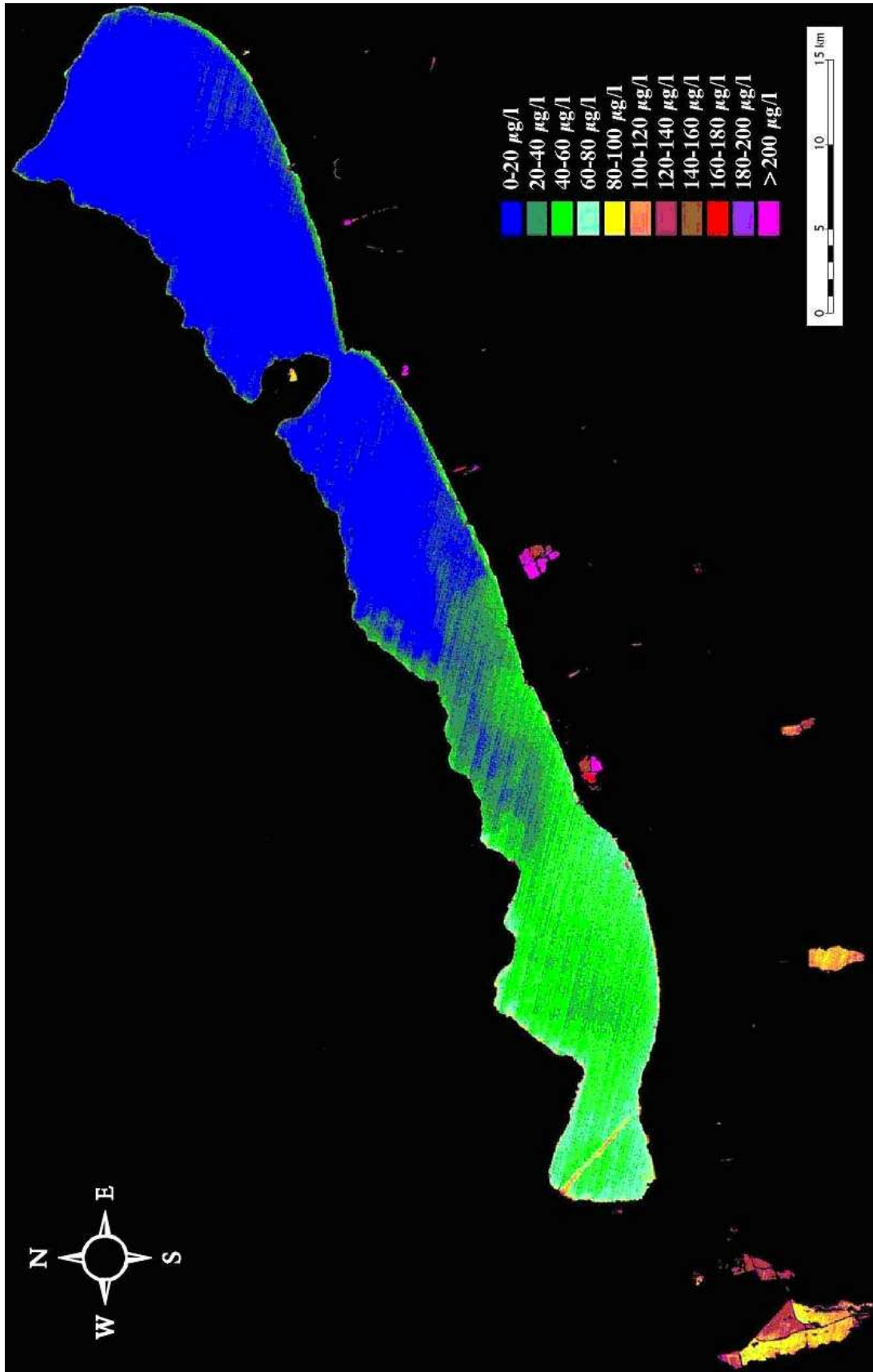
### **Vízügyi Tudományos Kutatóintézet témajelentései:**

1. A távérzékelés környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása. Összefoglaló jelentés (1986-1990)
2. A távérzékeléssel nyert adatok vízgazdálkodási hasznosítása. Összefoglaló jelentés 1981.
3. A távérzékeléssel nyert adatok – légi- és űrfelvételek – hasznosítása a Balaton vízminőségi és áramlási kutatásában. 1. részjelentés, 1982.
4. A távérzékeléssel nyert adatok környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása, a Balaton kutatása. 2. részjelentés, 1983.
5. A távérzékeléssel nyert adatok környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása, a Balaton kutatása. 3. részjelentés, 1983.
6. A távérzékeléssel nyert adatok hasznosítása a nagy tavak, a folyami tározók és folyószakaszok környezet- és vízgazdálkodási kutatásában. 3. részjelentés, 1988.
7. A távérzékeléssel nyert adatok környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása. Távérzékeléssel nyert adatok hasznosítása a Balaton kutatásában. 1. részjelentés, 1986.
8. A távérzékeléssel nyert adatok környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása. Távérzékeléssel nyert adatok hasznosítása a nagy tavak, a folyami tározók és folyószakaszok környezet- és vízgazdálkodási kutatásában. 4. részjelentés, 1989.
9. A távérzékeléssel nyert adatok környezet- és vízgazdálkodási hasznosítása. Távérzékeléssel nyert adatok hasznosítása a nagy tavak, a folyami tározók és folyószakaszok környezet- és vízgazdálkodási kutatásában. 5. részjelentés, 1990.

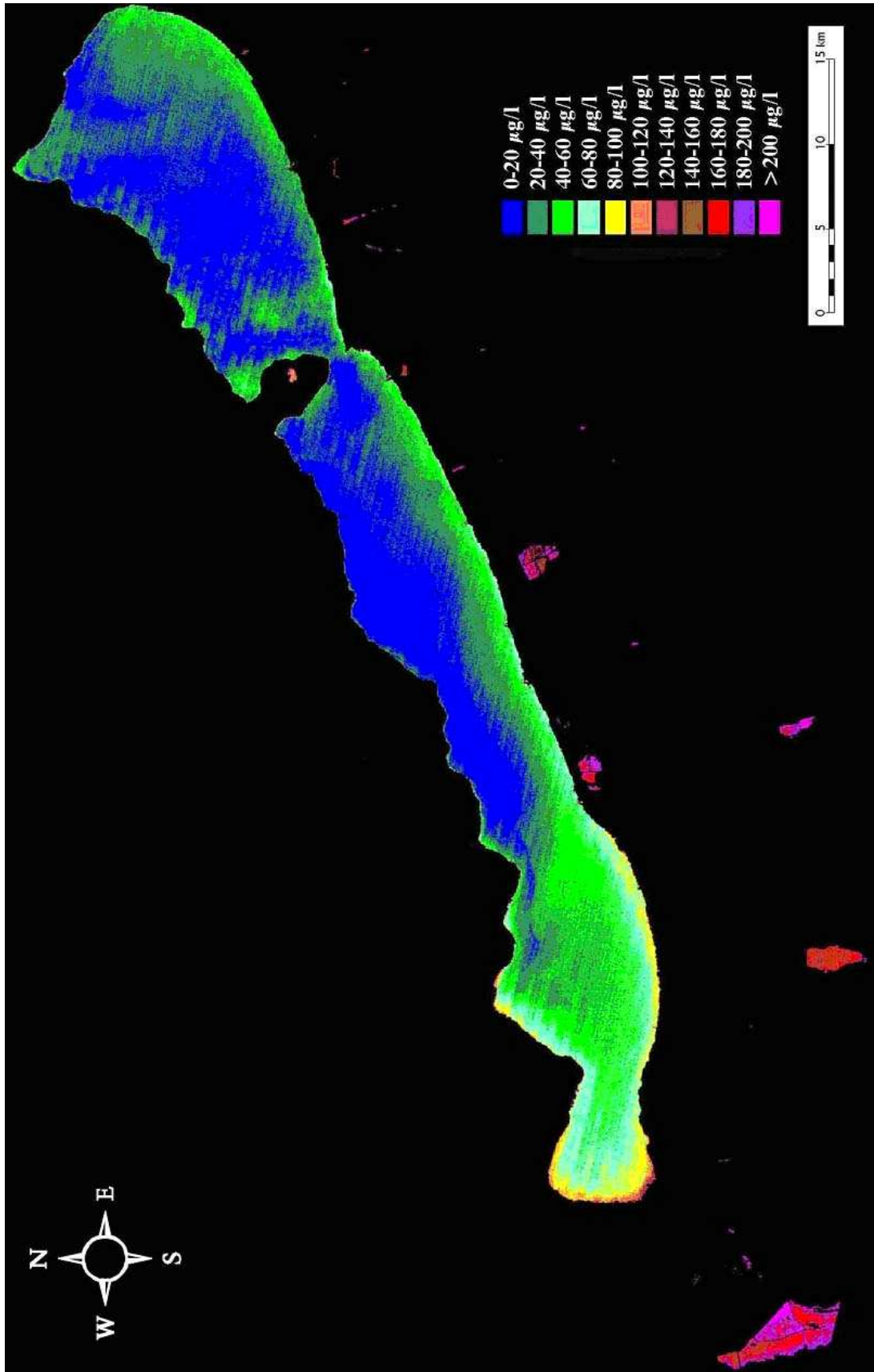
## **MELLÉKLETEK**



I. melléklet. A lebegőanyag eloszlása 2000. szeptember 11-én



II. melléklet. Az a-klorofill eloszlása a Balatonon 2000. szeptember 11-én



III. melléklet. Az a-klorofill eloszlása a Balatonon 1994. július 25-én



## Összefoglaló

A víz minősége hatással van felszínének fényvisszaverő képességére, ezért alkalmas a távérzékeléses módszerrel készített kép a vízminőség ellenőrzésére. A természetes vizek reflektanciájára a fitoplankton biomasszájának becslésére szolgáló a-klorofill- (Chla), a lebegőanyag- (SSC) és az oldott szerveszén-tartalom van hatással. Tavak műholdas vizsgálatát behatárolja, hogy nagy térbeli felbontású érzékelőket igyekszünk választani, melyek durva spektrális felbontásúak. Nagy sáv szélesség mellett a Chla mennyiségének meghatározása jelentős probléma olyan víztestek esetében, melyeket magas és heterogén eloszlású SSC jellemez. A SSC dominanciája elfedi a Chla meghatározási lehetőségét a spektrumon nagy sáv szélességek mellett, így annak műholdképek alapján való meghatározását megnehezíti. A dolgozat arról szól, hogy lineáris szétválasztás (linear mixture modelling) segítségével megfelelően pontos becslés adható Landsat képek alapján. A teszt terület a magas és heterogén SSC eloszlással jellemezhető Balaton volt, ahol szinte napjainkig gyakoriak a kisebb vízvirágzások. A módszert a tavon végzett terepi spektrométeres mérések alapozták meg medencekísérletekkel kiegészülve, melyek képet adtak a SSC és a Chla fényvisszaverő képességeiről. A kísérletek értékei és a számított Landsat sávok összevetése igazolta, hogy közvetlenül Landsat képekből, heterogén eloszlású SSC esetén, nem lehetséges Chla térképezése. Azonban főkomponens analízis segítségével igazolható volt, hogy spektrális tekintetben egyedi szélső tagok azonosíthatóak, jelezve, hogy a lineáris szétválasztás többváltozós regresszió analízissel összekötve alkalmas lehet Chla becslésére, függetlenül az SSC-től. Az utolsó nagyobb vízvirágzás 2000 szeptemberében történt, 11-én Landsat műholdkép készült, vele párhuzamosan vízminőségi vizsgálatok történtek. A képi adatokból levezetett Chla értékek igen jó egyezést mutatnak a terepen gyűjtött adatokkal ( $r^2=0,95$ ). Az eredményül kapott, fitoplankton eloszlását ábrázoló, tematikus adatok igen részlet-gazdagok. A 2000. szeptemberi kalibráció sikerrel alkalmazható volt egy 1994 júliusában készült képre. A számított Chla eredmények egyezést mutattak a két napon belül gyűjtött terepi Chla adatokkal. A vízminták adatai és a képi eredmények összevethetősége bizonyították a módszer időbeli stabilitását és megalapozottságát.

## Summary

Remote sensing has the potential to provide truly synoptic views of water quality, the assessment of which is known to be affected by suspended sediment, phytoplankton biomass (chlorophyll a (Chl a) concentration) and dissolved organic carbon. These three components also control the spectral reflectance characteristics of waterbodies. The application of satellite remote sensing to lake water is constrained by the need for high spatial resolution image data and thus remains limited by spectral resolution capabilities. This becomes a significant problem when attempting to quantify chlorophyll a (Chl a) in waters characterized by high and heterogeneous suspended sediment concentrations (SSC). The SSC dominates the spectral reflectance, masking the spectral influence from other components in broad spectral band systems, making Chl a determination from remote sensing imagery difficult. This thesis presents a linear mixture modelling approach to derive accurate estimates of Chl a from Landsat imagery. The approach was tested in Lake Balaton characterized by high suspended sediment and, until recently, frequent eutrophic and hypereutrophic episodes. This thesis uses in situ reflectance measurements of water in Lake Balaton on three different occasions, supplemented by controlled tank experiments, to characterize the influences of SSC and Chl a on spectral reflectance and simulated Landsat response. The results confirm that Chl a cannot be estimated directly from Landsat reflectance data in waters characterized by heterogeneous SSC. However, principal component analysis demonstrated that spectrally unique end-members can be identified, indicating that a spectral linear mixture modelling approach combined with a multivariate regression analysis may be used to provide estimates of Chl a concentrations, which would be independent of SSC. The last significant bloom occurred in September of 2000 and a Landsat image was acquired for 11th September, during which ground reference data of water quality was collected. The modelled image-derived results of Chl a demonstrate an excellent correspondence ( $r^2=0.95$ ) between the ground-based measurements of Chl a, and yield considerable detail of lake phytoplankton distributions. The September 2000 calibration was then successfully applied to a July 1994 Landsat image and validated with Chl a data collected coincidentally within two days of the image. The comparability between water sample data and image results demonstrates that there is temporal stability and robustness in the approach and calibration described.