

A foszfor mozgása a Balaton vízgyűjtőjében

SISÁK ISTVÁN és MÁTÉ FERENC

Pannon Agrártudományi Egyetem, Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar,
Agrokémiai és Talajtani Intézet, Keszthely

A felszíni vizek civilizációs eredetű eutrofizációja az egész világon elterjedt jelenség. Ilyen folyamat révén romlik a Balaton vízminősége is az utóbbi évtizedekben, ami a természeti érték degradációján túl nemzetgazdasági veszteségek forrása is, lévén a tó a hazai és nemzetközi turizmus kedvelt övezete. A hetvenes évek óta erőteljes kutatómunka folyik a vízminőségromlást kiváltó okoknak, befolyásoló tényezőinek feltárására.

Kutatások bebizonyították (OLÁH et al., 1977), hogy az elsődleges algatermelést a foszfor határozza meg. Későbbiekben az is igazolódott, hogy bizonyos körülmények között a nitrogén és a fény is limitáló faktor lehet, a vízminőség-szabályozás kulcseleme azonban továbbra is a foszfor marad (HERODEK et al., 1988; SOMLYÓDI, 1983).

A legsúlyosabb a helyzet a legkisebb, Keszthelyi-medencében, amelynek a vize 1973-1974-től eutrófnak, 1982-től hipertófnak minősül (SOMLYÓDI, 1983). Ide torkollik a Zala, a Balatont tápláló legnagyobb vízfolyás, melynek vízgyűjtője a teljes vízgyűjtő 50,6 %-át teszi ki (2,622 km²). A folyó által szállított tápanyagterhelés kiemelkedő szerepet játszik a Balaton eutrofizációjában. A torkolatánál létesített mérőszelvényben (Fenekpuszta) 1975 óta naponta mérik a tóba jutó lebegőanyag és tápanyagok mennyiségét, így az összes terhelésről pontos adatok állnak rendelkezésre.

A felszíni vizek eutrofizációját okozó foszforterhelés forrásainak feltárása világszerte kutatások tárgya. Általánosságban pontszerű és diffúz forrásokat különböztetnek meg. A pontszerű terhelés nagysága (szennyvízbevezetés) többé-kevésbé jól becsülhető, hasonlóan egyes diffúz forrásokhoz (nedves és száraz kiülepedés). Más diffúz források (nem csatornázott lakossági szennyvíz, városi lefolyás, talajok természetes tápanyagtartalma, szerves- és műtrágyák veszteségei) szerepe és viszonylagos jelentősége gyakran képezi vita tárgyát.

Egyes szerzők a Balaton terhelését vizsgálva a hosszú távú vízvizsgálati adatokat használták fel munkáikban. JOÓ és LOTZ (1980) megállapítják, hogy a tápanyagok mintegy $\frac{2}{3}$ -a árhullámokkal érkezik a tóba. Ezt teljes egészében - a talajok természetes tápanyagtartalma és a műtrágyákból származó részarány megkülönböztetése nélkül - mezőgazdasági eredetűnek tartják. SOMLYÓDI

jelentős részben a műtrágyák veszteségeinek tulajdonította. JOÓ (1986) már hosszabb időszakot átfogó adatokra támaszkodva a talajból származó foszfor mennyiségét az összes terhelés 50 %-ára, a műtrágyákból származót pedig 12 %-ára teszi.

Más szerzők az erózió mértékét veszik elsősorban számításba. MÁTÉ (1984) megállapítja, hogy a műtrágya foszfortartalma csak a talaj természetes foszfortartalmával együtt és csak a lebegtetve szállított hordalék mennyiségével arányosan juthat a Balatonba, így szerepe a teljes terhelésben nem lehet több 2-3 %-nál. Az eróziós talajvesztéssel számol DEZSÉNY (1982), illetve DEZSÉNY és LENDVAI (1986) is. A szerzők az erózióveszélyeztetettségi térkép alapján becslik az egyes területek szerepét a mezőgazdasági eredetű foszforterhelésben. HORVÁTH és KAMARÁS (1980) igen részletes munkájukban szintén az erózió becsléséből indulnak ki. A Balaton részvízgyűjtőire lebontva elvégezték a Wischmayer-Smith képlet egyúthatóinak meghatározását ill. becslését és ezzel számították a részvízgyűjtőkön erodálódott talaj mennyiségét. Ez alapján az irodalomból átvett képlettel hordaléktovábbítási hányadosokat számítottak és így határozták meg a Balatont érő lebegőanyag-terhelést. A lebegtetve szállított hordalék tápanyagokban való feldúsulásával azonban az említett szerzők nem számoltak.

PUSZTAI (1978) közlésével összhangban több szerző megállapítja, hogy a tápanyagok az eróziós transzport folyamán nagyobb mértékben mozdulnak el, mint a talaj szilárd részei (MILLER et al., 1982; SHARPLEY et al., 1987). Az erodálódott talajból a kolloid méretű agyagfrakció és a könnyebb szerves anyag éri el a felszíni vizeket, a durvább és nehezebb részek, amelyeknek a tápanyag-, főleg foszfortartalma lényegesen alacsonyabb, már előbb kiülepednek. A foszfordúsulási egyúthatóra különböző szerzők (MILLER et al., 1982; SHARPLEY, 1985) 2-3 közötti értékeket adnak meg az összes, illetve szerves foszfor tartalom tekintetében. NOLTE és WERNER (1991) a volt NDK területén a mezőgazdaság szerepét a diffúz foszforterhelésben 60 %-nak becsülik, 1,4-2,5-szeres foszfordúsulással számolva.

AUERSWALD (1989) a mezőgazdaság növekvő szerepét hangsúlyozza a felszíni vizek foszforterhelésében. Vizsgálatai szerint 1975-1985 között a mezőgazdaságból származó foszforterhelés 24 %-kal nőtt az NSZK területén, amiért 20 %-ban a művelés változása és 80 %-ban a talajok foszfortartalmának, főleg könnyen oldható foszfortartalmának növekedése a felelős. MILLER és munkatársai (1982) több mezőgazdasági vízgyűjtőt vizsgálva megállapítják, hogy a műtrágyázási szint és az agyagtartalom szignifikánsan növeli az oldott foszfor terhelést. Ezzel összhangban SHARPLEY és SMITH (1989) az oldott foszfor terhelést regressziós egyenlettel becslik, melyben a talajok könnyen oldható foszfor tartalma is szerepel. JOLÁNKAI (1986) a Balaton egyik kisvízgyűjtőjét vizsgálva szintén kimutatta a foszforműtrágyázás oldott foszfor terhelést növelő hatását.

Hazai és külföldi szerzők is hangsúlyozzák (JOLÁNKAI, 1986; LOGAN, 1987) hogy ott, ahol az egyre javuló hatásfokú szennyvíztisztítás teljessé válik, a

foszforterhelés fő okozójává a mezőgazdaság lép elő és ez szükségessé teszi a felszíni lemosódás részfolyamatainak elmélyültebb tanulmányozását a hatékony védekezés érdekében.

Vizsgálatainkban a terhelés szempontjából kulcsfontosságú két folyamat, a lebegőanyaghoz kötött foszfor dúsulásának és az oldott foszfor terhelés lehetséges mértékének tanulmányozását tűztük ki célul.

A probléma összetettsége miatt azonban csak a különböző módszertani megközelítéssel nyerhető adatok egybevetésétől várhatunk kielégítő eredményt. Ezért az alábbiakban a Zala vízgyűjtőre jellemzőnek tekinthető talajminta sorozat elemzésével, laboratóriumi modellkísérlet lefolytatásával és a vízminőségi monitoring adattömegének egybevetésével próbáltuk becsülni a vízgyűjtő talajtakarójának a Balaton foszforterhelésében játszott szerepét.

Anyag és módszer

1989 augusztusában a Zala vízgyűjtőjének talajaiból 15 helyről vettünk talajmintát a felső 15 cm-es rétegből. A mintavételi helyeket az 1. táblázatban adtuk meg. A talajminták lejtős területről származnak, mindegyik helyen több pontról (összesen 96 minta). A lejtő felső, középső és alsó szakaszát is mintáztuk és feljegyeztük a lejtő becsült meredekségét is. A mintavételi pontok kiválasztását úgy végeztük, hogy a vízgyűjtő talajainak mind genetikai, mind texturális sokfélesége kellőképpen képviselve legyen. Az összehasonlítás érdekében lehetőség szerint mezőgazdasági hatásoktól mentes és szántóföldi talajokat egyaránt mintáztunk egyazon mintavételi helyen. Néhány minta gyümölcsösből és rétről származott. A mintákat légszárazra szárítottuk és őrlöttük. A vizsgálatokat 2 mm-es szitán átengedett talajokkal végeztük.

Előkísérletben 25 g-ot mértünk be minden mintából, amit 300 ml desztillált vízzel egy órán át rázattunk. A talajszuszpenziót ülepítő hengerbe öntöttük, egy literre töltöttük föl, majd erős összerázás után 24 óráig ülepedni hagytuk. A Zalán kb. ennyi idő telik el, amíg egy csapadékesemény által kiváltott árhullám eléri a torkolatot. Ezután pipettával 10 cm mélységből 25 ml szuszpenziót vettünk ki, amit 45 μm -es szűrőn szűrve, majd a maradékot 105 °C-on szárítva meghatároztuk a lebegőanyag-tartalmat.

Az előkísérlet adatai alapján meghatároztuk, mennyi talajt kell bemérni ahhoz, hogy körülbelül 150-200 mg/l lebegőanyag-tartalmat kapjunk. (Ez az érték a Zala által árhullámok idején szállított, vélhetően elsősorban felszíni eredetű lebegőanyag koncentrációknak felel meg.) A kiszámított talajmennyiséget négyszeres ismétlésben mértük be. Az előkísérlethez hasonlóan elvégeztük a rázatást és az ülepítést, majd a négyszer 25 ml szuszpenziót egyesítettük. Utána 25 ml-ből összes foszfortartalmat, 75 ml-ből szűrővel lebegőanyag-tartalmat, a szűrletből foszfát-foszfor-tartalmat határoztunk meg a vízügyi szabványoknak megfelelően (SZEBELLÉDYNÉ, 1970). Az ilyen módon meghatározott foszfát

1. táblázat
Az ülepítéssel kísérletekhez felhasznált talajok és az ülepítés után kapott szuszpenziók átlagos vizsgálati eredményei a mintavételi helyek szerint

(1) Mintavételi pontok	(2) 25 g be- mérésből adódó lebegő- anyag- tartalom, mg/l	(3) Újonnan bemért talaj mennyi- sége, g	(4) Szusz- penzió lebegő- anyag- tartalma, mg/l	(5) Szusz- penzió foszfát- foszfor tartalma, mg/l	(6) Szusz- penzió összes foszfor tartalma, mg/l	(7) Talaj összes foszfor tartalma mg/kg	(8) K _A	(9) Talaj AL-old- ható P ₂ O ₅ - tartalma, mg/kg	(10) Talaj humusz- tartalma, %
1. Nagyhorvát	4	487	118	0,878	2,011	855	42,5	347,8	3,00
2. Zalaacsány	7	170	273	0,289	0,661	714	36,6	152,1	1,79
3. Türije	6	441	169	0,410	0,939	525	25,8	283,8	1,09
4. Zalabér	8	220	177	0,058	0,133	423	31,1	48,8	2,27
5. Pölöske	9	212	306	0,137	0,313	639	40,8	104,9	2,41
6. Vasboldog- asszony	9	214	178	0,259	0,593	501	28,4	144,2	2,37
7. Alsónemesapáti	6	182	57	0,176	0,404	522	34,3	149,8	1,14
8. Ozmánbük	6	228	101	0,163	0,374	542	38,5	62,5	2,41
9. Zalalövő	5	214	111	0,040	0,092	639	40,6	24,8	2,82
10. Bak	4	171	164	0,174	0,399	728	41,2	137,5	2,71
11. Nemesvid	5	331	152	0,126	0,288	412	27,8	138,6	1,66
12. Inke	5	121	83	0,152	0,347	349	28,7	92,7	1,56
13. Csapi	5	343	119	0,135	0,309	650	40,0	142,0	1,89
14. Zalakomár	7	331	177	0,151	0,346	739	33,3	302,0	1,27
15. Sárnellék	4	223	119	0,523	1,197	738	38,3	322,0	1,82

foszfor nem azonos az oldott foszfor mennyiségével, mivel kis mennyiségben más oldott formák is találhatóak a vízben (FELFÖLDI, 1980), ezt azonban a jelen kísérletben elhanyagoltuk és a összes foszfor és a foszfát-foszfor különbségét partikulált (lebegőanyaghoz kötött) foszfornak tekintettük. Meghatároztuk a talajminták szokásos agrokémiai jellemzőit (Arany-féle kötöttség, ammónium-laktát oldható P_2O_5 - és humusztartalom) és az összes foszfor tartalmát is (FÜLEKY, 1973).

Többszörös regressziós analízissel vizsgáltuk, hogy ezek a talajparaméterek hogyan hozhatók összefüggésbe az ülepítési kísérlet eredményeivel, hiszen óriási jelentősége lenne annak, ha a Növény és Talajvédelmi Állomások birtokában lévő nagy részletességű óriási adatállományt a mezőgazdasági területek környezeti hatásának megítélésére is felhasználhatnánk. Az adatokat variancia-analízissel és Duncan próbával is elemeztük.

Vizsgálatainkhoz referenciaként a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság által Fenékpusztánál mért heti részletes vízvizsgálati adatokat használtuk fel (lebegőanyag, összes foszfor, foszfát-foszfor tartalom) az 1975-1987 időszakból.

Eredmények és értékelésük

Az ülepítéssel vizsgálatok átlagos eredményeit mintavételi helyenkénti bontásban az 1. táblázat mutatja. Az előkísérletben a 25 g bemérésről átlagosan 253 mg/l lebegőanyag-tartalmú szuszpenziót kaptunk az egy napos ülepítés után. Ezt túl magas értéknek találtuk, amelyhez hasonlóak, vagy nagyobbak a Zala vízvizsgálatai adatai között csak igen kis százalékban találhatóak (2. táblázat). Úgy változtattuk meg a bemérés mennyiségét, hogy az átlagos lebegőanyag-tartalmú minták már több mint 5 %-os gyakorisággal szerepelnek a Zala vízmin-ták között.

Többszörös variancia-analízissel vizsgáltuk, hogy a mintavételi hely lejtőmeredeksége (0-5-10-15-20-25-30 %) és a lejtőn elfoglalt helye (felső, középső és alsó szakasz) illetve a terület művelési ága (erdő, rét, szántó és gyümölcsös) szerint különböznek-e az általunk vizsgált talajjellemzők illetve a szuszpenziók tulajdonságai. A viszonylag kis mintaszám miatt nem volt a változók minden értékének minden kombiációjában megfigyelésünk ($6 \times 4 \times 3 = 72$ lehetséges

2. táblázat

A lebegőanyag-tartalom eloszlása a heti Zala vízvizsgálati adatok alapján (Fenékpusztá, 1975-1987)

	(1) Lebegőanyag-tartalom kategóriák, mg/l					
	0-40	40-80	80-120	120-200	200-500	500-
a) Előfordulási gyakoriság, %	71,9	17,2	5,2	3,0	2,1	0,6

kombináció), ezért a kölcsönhatások tesztelésére nem volt lehetőség csak a főhatásokéra (3. táblázat).

A szuszpenziók tulajdonságaira nincs szignifikáns hatással a három vizsgált tényező, ezért az összes adatot egy csoportként kezelve összehasonlítottuk a referenciaként kezelt Zala vízvizsgálati adatokkal (4. táblázat).

3. táblázat

A lejtőn elfoglalt hely, a lejtő meredeksége és a művelési ág hatása a vizsgált paraméterekre a szignifikancia szint jelölésével

(1) Vizsgált változó	(2) Befolyásoló faktor		
	(3) Hely a lejtőn	(4) Meredek- ség, %	(5) Művelési ág, %
a) Talaj összes P	-	5	-
b) K_A	-	-	5
c) Talaj humusztartalma	-	5	0,1
d) Talaj AL- P_2O_5 -tartalma	-	-	0,1
e) Újonnan bemért talaj	-	-	-
f) Szuszpenzió lebegőanyag-tartalma	-	-	-
g) Szuszpenzió összes P tartalma	-	-	-
h) Szuszpenzió PO_4 -P tartalma	-	-	-

4. táblázat

A Zala és az ülepitéses kísérletek adatainak az összehasonlítása és a Duncan próba eredményét mutató betűjelzések a foszfortartalom esetében

	(1) SS Lebegő- anyag- tartalom mg/l	(2) TP Összes foszfor tartalom mg/l	(3) PO_4 -P Foszfát foszfor tartalom mg/l	(4) Parti- kulált foszfor tartalom mg/l	(5) Lebegő- anyag P- tartalma * mg/kg	n
Zala						
0-4 m ³ /s	29,6 a	0,516 c	0,287 c	0,229 a	13473 d	185
4-8 m ³ /s	30,8 a	0,407 b	0,197 b	0,210 a	10759 c	223
8-12 m ³ /s	38,6 ab	0,332 a	0,145 a	0,187 a	8631 bc	91
12-16 m ³ /s	61,8 b	0,339 ab	0,106 a	0,233 a	5936 b	60
16-20 m ³ /s	72,5 b	0,373 ab	0,134 a	0,239 a	5635 b	30
20- m ³ /s	124,7 c	0,396 ab	0,108 a	0,288 a	4151 ab	43
a) Szuszpenzió	182,5 d	0,727 d	0,193 b	0,534 b	5353 b	85
b) Talaj	-	-	-	-	588 a**	96

* (TP- PO_4 -P)/SS · 10⁶; ** A talaj összes foszfor tartalma

Ennél a vizsgálatnál kihagytuk azokat a mintákat, ahol a foszfát-foszfor-tartalom nagyobb volt, mint az összes foszfor tartalom, mivel ez nyilvánvaló mérési hiba, ami a partikulált foszforra negatív eredményt ad. Emiatt a Zala vizsgálati adatai és a szuszpenziós kísérletek adatai közül összesen 51 esetet ki kellett hagynunk, ami némileg módosította az átlagokat. Felhasználtuk azonban a mérési eredményeket a regressziós vizsgálatoknál, mert feltételeztük, hogy az adatok a viszonylag nagy kísérleti hiba ellenére is mutathatnak összefüggéseket, ha azok elég erősek.

Az ülepítési kísérletben az átlagos lebegőanyag-tartalom szignifikánsan magasabb még a legnagyobb vízhozam csoport (20 m³/s felett) átlagos értékénél is és olyan magas, ami a valós megfigyeléseknek csak kevesebb, mint 3 %-ára jellemző (2. táblázat). Ezzel a kivételesen nagy eróziós hatású heves csapadékok idején levonuló árhullámokat reprezentálhatja.

Az összes foszfor tartalom szintén szignifikánsan több mint bármelyik vízhozam kategória megfelelő adata. Figyelemre méltó azonban, hogy ehhez az értékhez a 4 m³/s alatti vízhozamoknál mért értékek átlaga áll legközelebb, pedig itt felszíni foszfor bemosódásról nem lehet szó. A legnagyobb vízhozamoknál a számok csak körülbelül fele akkorák. Hasonló a helyzet a foszfát-foszforral is: a szuszpenziók átlagos értéke magas, a 4-8 m³/s-nál mért Zala-átlagtól szignifikánsan nem különbözõ. Legnagyobb a 4 m³/s-nál mért, alapvetően a szennyvíz terhelés által befolyásolt Zala vízmintákban. A partikulált foszfor tartalom a szuszpenziókban kiugróan magas, az egymástól lényegesen nem különbözõ zalai adatoktól szignifikánsan eltér.

Érdekesen alakul a lebegőanyag foszfortartalma. A szuszpenziók és a nagy vízhozamok adatai szinte teljesen megegyeznek, azaz ebből a szempontból a kísérlet eredeti céljának megfelelően reprezentálhatja a nagy erózióval járó árhullámok hatását. Figyelemre méltó, hogy az átlagok lényeges eltérése ellenére, a nagy szórások miatt a vizsgált talajok összes foszfor tartalma nem különbözik szignifikánsan a legnagyobb vízhozam kategória lebegőanyagának foszfortartalmától.

A lebegőanyaghoz kötött foszfor és a lebegőanyag (SS) tartalom átlagainak hányadosa nem egyezik meg az egyes adatpárok hányadosának átlagával (Lebegőanyag P-tartalma), mivel a lebegőanyag-tartalom nem szimmetrikus eloszlású, gyakoribbak az alacsony értékek, és mivel a nevezőben szerepel, a hányadost felfelé tolja el.

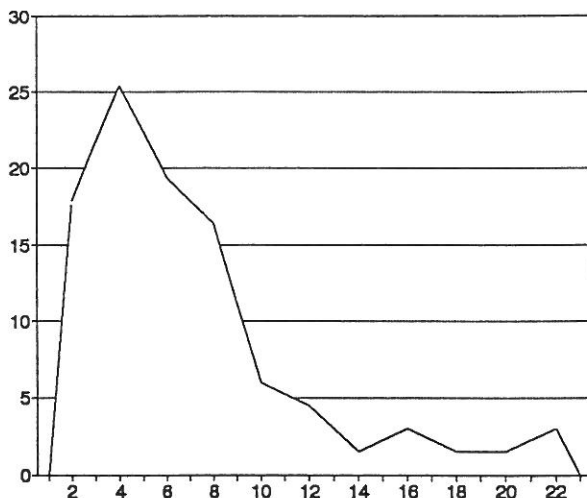
A szuszpenziók magas lebegőanyag-tartalma és összes-foszfor-tartalma, valamint a lebegőanyag-nak a magas vízhozam kategóriák értékeihez jól illeszkedő foszfor koncentrációja azt mutatja, hogy az árhullámok (elsősorban a frontszakasz) során lejátszódó hordaléktovábbítást és foszfor dúsulást a kísérlet megfelelően modellezi, de az igen magas foszfát-foszfor-tartalom és a kiugróan magas partikulált foszfor tartalom arra utal, hogy a valós csapadékok által a felszínen elfolyó vízben elmozduló talaj mennyisége lényegesen kisebb, mint a mi kísérletünkben választott talaj/víz arány. SHARPLEY és SMITH (1989) eredményeivel egybevetve, akik megállapították, hogy a kis mennyiségű lemosó-

dást okozó erozív csapadékok esetén gyakran kiugróan magas oldott foszfor koncentrációk is megfigyelhetők, megállapíthatjuk, hogy az eredményeink ezeket a körülményeket jól modellezik: bizonyos feltételek mellett koncentrált és igen magas oldott foszfor terhelést is okozó hatást eredményezhet a felszíni lemosódás.

A talajok eredeti foszfortartalma és a szuszpenziók lebegőanyagának foszfortartalma segítségével kiszámítottuk a foszfor dúsulási hányadosokat is. Ezek gyakorisági eloszlását mutatja az 1. ábra a nulla alatti és a szélsőségesen nagy értékek elhagyásával. Az adatok átlaga 6,8, de az eloszlás nem szimmetrikus. A leggyakoribb érték 4 körül van. Ez lényegesen magasabb mint az irodalomban közölt adatok.

A szokásos agrokémiai jellemzők szintén nem mutatnak szignifikáns különbséget a mintavételi pont lejtőn elfoglalt helye szerint. A lejtő meredeksége szerint is csak a humusz és a talaj összes foszfor tartalma mutat eltérést. A 15-20 és 20-25 %-os lejtőknel a kis esetszám következtében már csökken a teszt érzékenysége, ezért csak viszonylag kevés átlag tér el szignifikánsan egymástól. A tendencia az, hogy a magasabb lejtőkategóriáknál magasabb a humusztartalom és alacsonyabb az összes foszfor tartalom. Ez annak a következménye, hogy a meredekebb lejtőkön találjuk inkább az erdőket és az enyhébb lejtőkön a szántókat. Ez világosan tükröződik a talajjellemzők művelési áganként elvégzett variancia-analíziséből is (5. táblázat).

Egyértelmű tendencia, hogy a rétek és erdők talajának kötöttsége és humusztartalma magasabb, AL-P₂O₅ és összes foszfor tartalma alacsonyabb, mint a



1. ábra

A szuszpenzióknak az eredeti talajhoz viszonyított foszfor dúsulási hányadosainak gyakorisági eloszlása az ülepítései kísérletekben. Vízszintes tengely: Foszfor dúsulási hányados. Függőleges tengely: Gyakoriság, %.

5. táblázat

A művelési ágak hatása az ülepítéssel kísérletben vizsgált talajok agrokémiai jellemzőire és az összes foszfor tartalmára, valamint a Duncan próba eredményét mutató betűjelzések

(1) Művelési ág	(2) K _A	(3) Talaj összes P, mg/kg	(4) AL-P ₂ O ₅ , mg/kg	(5) Humusz, %	n
a) szántó	33,2 b	631 bc	204 b	1,55 a	45
b) gyümölcsös	28,5 a	532 ab	229 b	1,16 a	11
c) rét	42,4 d	710 c	103 a	2,70 b	11
d) erdő	36,6 c	495 a	71 a	2,78 b	29

szántó és gyümölcsös talajainak azonos értékei. Ez alól a rétek talajából vett minták összes foszfor tartalma kivétel, mivel itt nem tudtuk eléggé szétválasztani a növények gyökereit a talajszemcséktől, így valószínűleg a magasabb humifikálatlan szervesanyag-tartalom okozza a kiugró értéket.

A regressziós vizsgálatokkal azt kíséreltük meg kimutatni, milyen összefüggés található a szokásos agrokémiai vizsgálati adatok (kiegészítve az összes foszfor tartalommal) és a talajokból a kísérlet során kapott szuszpenziók jellemzői között. Az általunk befolyásoló változóknak választott agrokémiai jellemzők egyértelmű eltérése miatt az elemzést külön végeztük el az erdők és rétek, valamint a szántók és gyümölcsösök talajai esetében.

A szántóról és gyümölcsösökből vett mintákat vizsgálva a szuszpenzió foszfát-foszfor tartalmára a következő egyenletet kaptuk:

$$PO_4\text{-P} = 0,00125 \text{ AL-P}_2\text{O}_5 + 0,47 \text{ H} - 0,0177 \text{ KA} - 0,083$$

$$(\pm 0,00028) \quad (\pm 0,096) \quad (\pm 0,0083) \quad (\pm 0,233)$$

$$R = 0,77$$

ahol:

PO₄-P = a szuszpenzió foszfát-foszfor tartalma (mg/l);

AL-P₂O₅ = a talaj ammónium-laktát oldható P₂O₅-tartalma, (mg/kg);

H = a talaj humusztartalma, %;

K_A = a talaj kötöttsége.

SHARPLEY és SMITH (1989) eredményeivel összhangban a talaj AL-P₂O₅-tartalma pozitívan befolyásolja a szuszpenzió oldott foszfor tartalmát. Mi ezen túl a humusztartalom pozitív, és a kötöttség (agyagtartalom) negatív hatását is kimutattuk. Az egyenlet a tényleges terhelés leírására a korábbi megállapításainkat is figyelembe véve csak igen speciális esetben használható (kis lemosódást okozó erózió csapadékok). Alkalmas azonban a mezőgazdasági művelés

alatt álló talajok potenciális oldott foszfor terhelési kapacitásának becslésére az agrokémiai vizsgálati adatok alapján. Az illeszkedése viszonylag jó, a konstans igen kicsi, nem tér el szignifikánsan nullától, így nem befolyásolja az egyenlet becsló értékét.

A szuszpenziók partikulált foszfor tartalmát a következő egyenlet írja le:

$$PP = 8,9 \cdot 10^{-4} SS - 0,00118 AL-P_2O_5 - 0,333 H + 1,058$$

$$(\pm 4,1 \cdot 10^{-4}) \quad (\pm 0,0003) \quad (\pm 0,091) \quad (\pm 0,153)$$

$$R = 0,74$$

ahol:

PP = a szuszpenzió partikulált foszfor tartalma (= összes P-foszfát P, mg/l);

SS = a szuszpenzió lebegőanyag-tartalma (mg/l);

AL-P₂O₅: a talaj ammónium-laktát oldható P₂O₅-tartalma (mg/kg);

H = a talaj humusztartalma (%)

A vizsgált változó függése az erodált és le nem ülepedett, lebegve szállított részecskék mennyiségétől magától értetődő, az AL-P₂O₅ és a humusztartalom negatív hatása azonban magyarázatra szorul. A valószínű ok, hogy a partikulált foszfor tartalom számított érték, amit az összes foszfor és a foszfát-foszfor különbségeként kaptunk, így itt a foszfát-foszforral való összefüggést mutattuk ki ismét, ezúttal negatív előjellel. Az igen magas konstans (1,058) valószínűleg az általunk alkalmazott talaj/víz arány és az ülepitési idő, azaz a kísérleti körülmények által meghatározott érték. Mivel a konstans a kísérlet által meghatározott, az egyes táblákról elfolyó víz lebegőanyag-tartalma pedig nem ismert, az egyenlet nem alkalmas becslésre.

Az erdőben és réten vett talajminták esetében a szuszpenziók foszfát-foszfor tartalmára a következő egyenletet kaptuk:

$$PO_4-P = 0,00114 AL-P_2O_5 \quad R = 0,94$$

$$(\pm 0,00007)$$

ahol:

PO₄-P = a szuszpenzió foszfát-foszfor tartalma (mg/l);

AL-P₂O₅ = a talaj ammónium-laktát oldható P₂O₅-tartalma (mg/kg).

Az ammónium-laktát oldható P₂O₅-tartalom gyakorlatilag egyértelműen meghatározza a szuszpenzió foszfát-foszfor tartalmát. A konstans értéke elhanyagolhatóan kicsi és nullától nem tér el szignifikánsan, ezért az origón átmenő egyenest illesztettünk. Az egyenlet értelmében (figyelembe véve, hogy az ammónium-laktát oldható foszfort oxidban fejeztük ki) ennek a frakciónak kb. 0,26 %-a kerül vízoldható állapotba. Az egyenlet illeszkedése igen jó, ezért jó becslést jelenthet a felszíni, illetve felszín közeli leszivárgásra vonatkozóan. Mivel a minták között az erdőből származók voltak túlsúlyban, az egyenlet a rétek okozta felszíni foszfát-foszfor terhelés becslésére nem, csak az erdők

hatásának leírására ajánlható. Széles körű felhasználása azonban nem lehetséges, mivel nem állnak rendelkezésre az erdők talajainak vizsgálati adatai.

Más eredményekkel egybehangzóan (COOPER et al., 1987) az oldott foszfor tartalom igen alacsony, kisebb mint 0,1 mg/l. Figyelembe véve, hogy ezekről a területekről a sűrű borítottság és az intercepció nagy aránya miatt a felszíni lefolyás is kicsi, jelentőségüket a diffúz foszfát-foszfor terhelésben csekélynek ítéelhetjük. Ugyanezen okok miatt a partikulált foszfor terhelés is elhanyagolható. Emiatt, illetve az egyenlet viszonylag gyengébb illeszkedése miatt sem fogadhatjuk el az általunk kapott egyenletet mint a partikulált foszfor terhelés becslését:

$$PP = 6,87 \cdot 10^{-4} SS + 0,391 \quad R = 0,63$$

$$(\pm 1,69 \cdot 10^{-4}) \quad (\pm 0,051)$$

ahol:

PP = a szuszpenzió partikulált foszfor tartalma (= összes P-foszfát P, mg/l);

SS = a szuszpenzió lebegőanyag-tartalma (mg/l).

Összefoglalás

A Balaton, különösen a legkisebb Keszthelyi öböl vízminősége a hetvenes évek eleje óta jelentősen romlott, aminek elsődlegesen a Zalán át érkező foszforterhelés az oka. A Zala vízgyűjtő talajtakarójának a Balaton foszforterhelésében játszott szerepét különböző módszertani megközelítéssel vizsgáltuk: a Zala vízgyűjtőre jellemzőnek tekinthető talajminta sorozat elemzésével, laboratóriumi modellkísérlet lefolytatásával és a vízminőségi monitoring adattömegének egybevetésével.

A szuszpenziók lebegőanyag- és partikulált foszfor tartalma a kivételesen nagy felszíni erózió eseteit jellemezheti, oldott foszfor tartalma igen magas, a Zala kis vízhozamoknál mért értékeivel megegyező. A lebegőanyag foszfortartalma megegyezik a Zala által a legnagyobb vízhozamokkal szállított lebegőanyag foszfortartalmával. A kísérletben a foszfor dúsulási együtthatók átlaga 6,8, leggyakoribb értéke 4, ami az irodalmi adatoknál magasabb, de a Zala vízgyűjtőjére jellemző.

A szuszpenziók foszfát-foszfor tartalmát leíró regressziós egyenlet az erdők esetében alkalmas a felszíni foszfát-foszfor terhelés leírására, de felhasználását korlátozza, hogy nem állnak rendelkezésre kellő részletességű adatok az AL-P₂O₅-tartalomról. Ez azonban a gyakorlatban nem jelent hátrányt, mivel az erdők okozta foszfát-foszfor terhelés igen csekély.

A szántók és gyümölcsösök talajaira kapott regressziós egyenlet csak speciális esetben írhatja le a felszíni foszfát-foszfor terhelést (kis bemosódást okozó erozív csapadék) és nagyobb területre nem általánosítható. Alkalmas viszont az intenzív mezőgazdasági művelés alatt álló talajok potenciális foszfát-foszfor

terhelési kapacitásának becslésére, mivel olyan adatokon alapul, amelyeket nagy részletességgel, az egész vízgyűjtőre kiterjedően ismerünk (AL-P₂O₅- és humusztartalom, valamint a kötöttség).

Irodalom

- AUERSWALD, K., 1989. Prognose des P-Eintrags durch Bodenerosion in die Oberflächengewässer der BRD. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **59/II.** 661-664.
- COOPER, A. B. et al., 1987. Land use impacts on streamwater nitrogen and phosphorus. *New Zealand J. of Forestry Sci.* **17.** 179-192.
- DEZSÉNY Z., 1982. A Balaton részvízgyűjtőinek összehasonlító vizsgálata az erózió-veszélyeztetettség alapján. *Agrokémia és Talajtan.* **31.** 405-421.
- DEZSÉNY Z. & LENDVAI Z., 1986. A Zala vízgyűjtőjének eróziós viszonyai és hatásuk a felszíni vizek minőségére. *Agrokémia és Talajtan.* **35.** 363-382.
- FELFÖLDI L., 1980. A biológiai vízminősítés. *Vízügyi Hidrobiológia.* **9.** Országos Vízügyi Hivatal. Budapest.
- FÜLEKY GY., 1973. Néhány hazai talajtípus foszfortartalmának összehasonlító vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* **22.** 311-319.
- HERODEK, S. et al., 1988. Lake Balaton - Research and Management. *Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Minisztérium.* Budapest.
- HORVÁTH V. & KAMARÁS M., 1980. Mezőgazdasági eredetű tápanyagterhelés talajvédelmi eljárásokkal történő csökkentése lehetőségének vizsgálata a Balaton vízgyűjtőjén. Kézirat. MTA Biológiai Kutató Intézet - VIZITERV. Tihany.
- JOLÁNKAI G., 1986. A Balaton tápanyagterhelésének vízminőségi modelljei. *Kand. értekezés.* Budapest.
- JOÓ O., 1986. Mérések a zalaegerszegi és más zalai szennyezések Balatonba jutásáról. MHT VI. Országos Vándorgyűlés. I. A tavak élete és vízgazdálkodása. *Hévíz.*
- JOÓ O. & LOTZ GY., 1980. A Zala folyó szerepe a Balaton tó eutrofizálódásában. *Vízügyi Közlem.* **2.** 226-256.
- LOGAN, T. J., 1987. Diffuse (non-point) source loading of chemicals to Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* **13.** 649-658.
- MÁTÉ F., 1984. Korreferátum a "Környezetvédő tápanyaggazdálkodás a Balaton térségében" kérdéshez. A Balaton kutatás újabb eredményei III. *Veszprémi Akadémiai Bizottság. Veszprém.*
- MILLER, M. H. et al., 1982. Agriculture and water quality in the Canadian Great Lakes Basin: III. Phosphorus. *J. Environ. Qual.* **11.** 487-492.
- NOLTE, C. & WERNER, W., 1991. Flächendeckende Abschätzung des Stickstoff- und Phosphoreintrags durch die Grundwasserneubildung sowie durch Erosionsereignisse in Fließgewässern des Elbeinzugebietes im Bereich der ehemaligen DDR. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* **66/II.** 987-990.
- OLÁH J. et al., 1977. A Balaton foszfor anyagcseréje. *MTA Biológiai Oszt. Közlem.* **20.** 11-139.
- PUSZTAI A., 1978. Intenzív műtrágyázás és a környezetszennyezés. *Agrokémia és Talajtan.* **27.** 219-227.

- SHARPLEY, A. N., 1985. The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**. 1527-1534.
- SHARPLEY, A. N. & SMITH, S. J., 1989. Prediction of soluble phosphorus transport in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* **18**. 313-316.
- SHARPLEY, A. N. et al., 1987. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use. *J. Agric. Food Chem.* **35**. 812-817.
- SOMLYÓDY L., 1983. A Balaton eutrofizálódása. *VITUKI Közlemények.* **38**.
- SZEBELLÉDY L-NÉ (szerk.), 1970. Egységes vízvizsgálati módszerek. Kémiai módszerek. I. kötet. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet. Budapest.

Érkezett: 1993. augusztus 18.

Movement of Phosphorus in the Catchment Area of Lake Balaton

I. SISÁK and F. MÁTÉ

Institute for Agricultural Chemistry and Soil Science, Georgikon Faculty of Agriculture, Pannon University of Agriculture, Keszthely (Hungary)

Summary

The water quality of Lake Balaton, especially in the smallest bay near Keszthely, has deteriorated appreciably since the early seventies, due primarily to the phosphorus reaching it from the River Zala. The role of the soil cover in the catchment area of the Zala in the phosphorus overloading of Lake Balaton was examined using various methodological approaches: analysis of a series of soil samples which can be regarded as characteristic of the catchment area of the Zala, execution of a model laboratory experiment, and comparison of the data mass obtained in water quality monitoring.

The suspended sediment and particulated phosphorus content of the suspensions may be characteristic of cases of exceptionally strong surface erosion and has an extremely high dissolved phosphorus content, equal to the phosphorus content of suspended sediment transported by the Zala at its greatest rate of flow. In the experiment the mean value of the phosphorus concentration coefficient was 6.8, with a most frequent value of 4, which is higher than literary data, but characteristic of the Zala catchment area.

The regression equation describing the phosphate-phosphorus content of the suspensions is suitable in the case of forests for description of the surface phosphate-phosphorus load, but its use is restricted by the fact that no sufficiently detailed data are available on the AL-P₂O₅ contents. In practice, however, this is not a problem, since the phosphate-phosphorus load caused by forests is extremely low.

The regression equation obtained for the soils of arable land and orchards is only suitable for the description of surface phosphate-phosphorus loading in a few special cases (erosive precipitation causing slight hollows) and is not of general validity

over larger areas. It is applicable, however, for the estimation of the potential phosphate-phosphorus loading capacity of soils under intensive agricultural cultivation, since it is based on data which are known in great detail for the whole catchment area (AL-P₂O₅ and humus contents, and plasticity).

Table 1. Soils used in the sedimentation experiments and the mean results for the suspensions obtained after sedimentation, according to sampling sites. (1) Sampling points. (2) Suspended sediment content found for measurements on 25 g, mg/l. (3) Quantity of added soil, g. (4) Suspended sediment content of the suspension, mg/l. (5) Phosphate-phosphorus content of the suspension, mg/l. (6) Total phosphorus content of the suspension, mg/l. (7) Total phosphorus content of the soil, mg/kg. (8) Plasticity according to Arany. (9) AL-soluble P₂O₅ content of the soil, mg/kg. (10) Humus content of the soil, %.

Table 2. Distribution of suspended sediment content based on weekly water analysis data for the River Zala (Fenekpuszta, 1975-1987). (1) Categories of suspended sediment contents, mg/l. a) Frequency of occurrence, %.

Table 3. Effect of position on the slope, steepness of slope and branch of agriculture on the parameters studied, together with levels of significance. (1) Variable examined. a) Total soil P; b) Plasticity according to Arany; c) Humus content of the soil; d) AL-P₂O₅ content of the soil; e) Added soil; f) Suspended sediment content of the suspension; g) Total P content of the suspension; h) PO₄-P content of the suspension. (2) Influencing factor. (3) Position on the slope. (4) Steepness, %. (5) Branch of agriculture, %.

Table 4. Comparison of data from the Zala and the sedimentation experiment, and letter codes indicating the results of the Duncan test in the case of phosphorus content. a) Suspension; b) Soil. (1) SS: Suspended sediment content, mg/l. (2) TP: Total phosphorus content, mg/l. (3) PO₄-P: Phosphate-phosphorus content, mg/l. (4) Particulated phosphorus content, mg/l. (5) P content of suspended sediment, mg/kg*. Note: *(TP-PO₄-P)/SS.10⁶; **Total phosphorus content of the soil.

Table 5. Effect of branches of agriculture on the agrochemical characteristics and total phosphorus contents of the soils examined in the sedimentation experiment, and letter codes indicating the results of the Duncan test. (1) Branch of agriculture. a) Arable, b) Orchard, c) Meadow, d) Forest. (2) Plasticity according to Arany. (3) Total soil P, mg/kg. (4) AL-P₂O₅, mg/kg. (5) Humus, %.

Fig. 1. Frequency distribution of the phosphorus concentration ratios of the suspensions compared with the original soil in the sedimentation experiments. Horizontal axis: Phosphorus concentration ratio. Vertical axis: Frequency, %.