

A BALATON FOSZFOR ANYAGCSERÉJE

OLÁH JÁNOS, O.-TÓTH ERZSÉBET és TÓTH LÁSZLÓ

Haltenyésztési Kutató Intézet, Szarvas és Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet,
Budapest

Bevezetés

Az energia egyirányú áramlása és az elemek körforgalma jelenti az ökoszisztéma dinamizmusának lényegét az adott fiziko-kémiai és biológiai struktúrában. A foszfor mint a nukleinsavak, foszfolipidek, nagy energiataralmú vegyületek alkotóeleme egyike a legfontosabb tápanyagoknak a biológiai rendszerekben. A foszfor más biogén elemekhez viszonyított aránya általában nagyobb a szervezetekben, mint a környezetben, ezért ezt az elemet tekinthetjük a termelés leginkább limitáló, szabályozó tényezőjének (KORMONDY 1969).

A szervezet anyagcseréjéhez hasonlóan az ökoszisztémák foszfor anyagcseréjének komplex fogalma értelmezésünk szerint magába foglalja a foszfor körforgásának áramlási útjait, a csomópontok foszfor formáinak minőségi és mennyiségi leírását és az ökoszisztéma foszfor háztartásának mennyiségi elemzését.

Munkánk elkezdésekor a Balaton foszfor anyagcseréjéből csupán az oldott PO_4 -P mennyiségéről voltak egymásnak ellentmondó adatok. A tó foszfor anyagcseréjének az összeállítását jelen vizsgálataink mellett jelentős mértékben segítették azok az elmúlt években megindult vizsgálatok, amelyek során tanulmányozták az üledék szervesanyag-tartalmát (PONYI és mtsai 1972, FRANKÓ és PONYI 1973), a bentikus és planktonikus elsődleges termelést (KÁRPÁTI 1970, 1972, HERODEK és OLÁH 1973, HERODEK és TAMÁS 1973), továbbá a bentikus és planktonikus társulás anyagcserét (OLÁH 1975).

Anyag és módszer

Az 1969–1974. évek kiterjedt analitikai munkájának nagyobb részét a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézetben, az anyagcsere számos komponensének a meghatározásához, a folyamatok modellezéséhez nélkülözhetetlen kísérletes munkát pedig az MTA Tihanyi Biológiai Kutató Intézetben végeztük. A tó foszfor anyagcseréjét csak a kiterjedt, terepen történő adatgyűjtés és a kísérletes modellezés irányából megközelítve tudtuk összeállítani.

A foszfor formák és frakciók mennyiségi elterjedését az egész tavat jól képviselő kilenc standard szelvényen vizsgáltuk (2. ábra). A befolyó vizek foszfor tartalmát három éven keresztül vizsgáltuk a Zalán, a Nyugati-övcatornán és 20 kisebb vízfolyáson (8. táblázat). A foszfor és nitrogén formák meghatározását a legelterjedtebben használt módszerekkel végeztük (FELFÖLDY 1974). Az üledék foszfor frakcióit a módosított Chang és Jackson-módszerrel határoztuk meg (CHANG és JACKSON 1957, FRINK 1969, PETERSON és COREY 1966). Az üledék foszfor adszorpcióját, a rázatott üledék-tóvíz rendszer egyensúlyi foszfát koncentrációját és a foszfát felszabadulását az üledékből a terepen gyűjtött adatok mellett kísérletesen is vizsgáltuk. A modellkísérleteket a megfelelő fejezetben ismertetjük.

Foszfor formák elterjedése

Oldott foszfát a nyíltvízben

A Balaton vizében az első foszfor meghatározásokat ILOSVAY (1898) végezte. 20 kg víz száraz maradékában foszfort csak nyomokban talált. VARGHA (1934) havonkénti vizsgálatok alapján megállapította, hogy a tó nyíltvizében feltűnően kevés és évszakosan állandó az oldott foszfát mennyisége. Az irodalmi adatok összehasonlítása azt mutatja (1. táblázat), hogy a későbbi

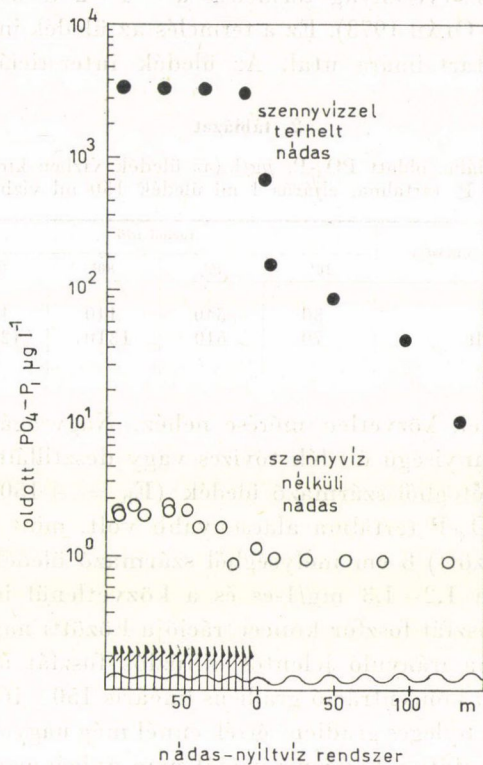
I. táblázat

A Balaton nyíltvizének oldott PO_4 -P tartalma különböző szerzők szerint

Szerző		Oldott PO_4 -P, $\mu g/l$
ILOSVAY	1898	nyomokban
MÜLLER	1929	nyomokban
VARGHA	1934	3,3–4
ENTZ	1953	39–366
LESENYEI és MUHITS	1953	113–195
ENTZ	1959	31–392

szerzők — módszertani okok következtében — igen eltérő és általában túlságosan magas oldott foszfát koncentrációt mértek a tóban. Jelen vizsgálataink szerint a Balaton nyíltvizében, a jég alatti periódus kivételével jelenleg is rendkívül alacsony az oldott PO_4 -P koncentrációja (0,12 — 2,72 $\mu g/l$). A legalacsonyabb értékek már az általunk is használt és jelenleg legérzékenyebb, n-butanolos kirázásos módszer hibahatárán vannak. A Balatonban tehát közel fél évszázada változatlan a növények számára hozzáférhető, az eutrofizálódás, vízminőségromlás szempontjából kulcsszerepet játszó foszfátion koncentrációja. Látni fogjuk, hogy az alacsony oldott foszfát szint fenntartásában a sajátos kémiai környezet mellett az üledék állandó felkeveredése a legfontosabb

ható tényező. Éppen ezért a foszfát szennyezés hatását legkönnyebben a téli, jég alatti vízben tudjuk nyomon követni. VARGHA (1934) még nem talált különbséget a jégmentes és jég alatti periódus oldott foszfát koncentrációjában. Vizsgálatainkban a $\text{PO}_4\text{-P}$ koncentrációja jég alatt már elérte a $10 \mu\text{g/l-t}$. A befolyó vizek hatásának közvetlenül kitett Keszthelyi-öbölben pedig megközelítette az $50 \mu\text{g/l-t}$. A tóba ömlő szennyvizek hatása, az oldott foszfát koncentráció növekedése tehát a jég alatti vízben már észlelhető.



1. ábra. Az oldott foszfát koncentrációja a szennyvízzel terhelt és szennyvíz nélküli nádas nyíltvíz rendszerben

Oldott foszfát a parti zónában

A foszfátion koncentrációja a parti zónában — még a szennyvízmentes nádasban is — alacsony (1. ábra). A sűrű makrofita és a dús perifiton állomány a parti zónába kerülő és a szerves foszforvegyületek lebomlása során felszabaduló foszfátot felhasználja és a foszfátion koncentrációját alacsony szinten tartja. A szennyvízzel terhelt nádasban a $\text{PO}_4\text{-P}$ tartalom magas, a balatonfüredi szennyvízbefolyó melletti nádasban elérte a 4 mg/l-t , a nádas parti

szélétől a nyíltvíz felé haladva azonban gyorsan csökken és néhány száz méterre a szennyvízbefolyó hatása a foszfáttartalomban már nem észlelhető (TÓTH 1972a).

Oldott foszfát az üledék intersticiális vizében

Az üledék felületén jég alatt, kedvező fényviszonyok mellett vastag kovamoszat szőnyeg alakul ki, amelynek a klorofill-a tartalma eléri a 150 mg/m²-t és a napi szervesanyag termelése a +1–2 C°-os vízben a 360 mg C/m²-t (HERODEK és OLÁH 1973). Ez a termelés az üledék intersticiális vizének jelentős foszfátion tartalmára utal. Az üledék intersticiális vizében oldott

2. táblázat

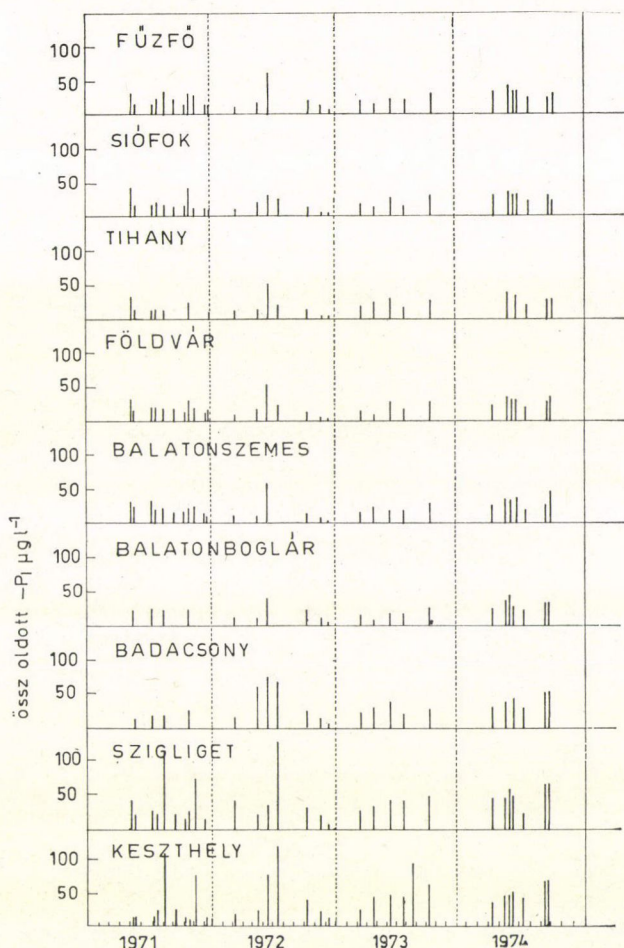
Intersticiális, oldott PO₄-P, µg/l (az üledék vízben kirázható PO₄-P tartalma, eljárás 1 ml üledék 150 ml vízben)

Üledék n.inósége	rázási idő			
	10'	40'	80'	300'
Oxidált	30	340	440	420
Redukált	70	610	1310	1280

PO₄-P mennyiségének közvetlen mérése nehéz. Nagyságáról közvetve tájékozódhatunk kismennyiségű üledék tóvizés vagy desztillált vizes kirázásával. A felszíni, oxidált rétegből származó üledék (E_h = +150 és +200 között) vízben kirázható PO₄-P tartalma alacsonyabb volt, mint a redukált (E_h = -20 és -100 között) 8 cm mélységből származó üledéké (2. táblázat). A redukált üledékszóna 1,2–1,3 mg/l-es és a közvetlenül üledékkal érintkező vízréteg 1 µg/l-es foszfát-foszfor koncentrációja közötti nagy gradiens az üledékből a vízoszlopba irányuló jelentős diffúziós foszfát áramlásra utal. Ha feltételezzük, hogy a koncentráció gradiens lineáris 150–160 µg/l/cm gradiens értéket kapunk. A tényleges gradiens érték ennél még nagyobb, mivel az intersticiális víz oldott foszfátion koncentrációját nem oxigénmentes eljárással mértük. Tengeri üledékek intersticiális vizében McROY és mtsai (1972) maximum 2,3 mg/l, BRAY és mtsai (1973) 18 mg/l oldott foszfát koncentrációt mértek. Az utóbbi szerző a mintavételt és a mérést az oxigén teljes kizárásával végezte.

Oldott össz-foszfor a tóvízben

A Balaton kilenc standard szelvényén négy év során mértük az oldott össz-foszfor koncentrációját (2. ábra). Az össz-foszfornak jelentős részét az oldott össz-foszfor adja. A Keszthelyi-öbölben és környékén a nyári hónapokban az oldott össz-foszfor koncentrációja lényegesen magasabb, mint a tó többi területén. A 110–120 µg/l-es értékek jóval meghaladják az össz-foszfor



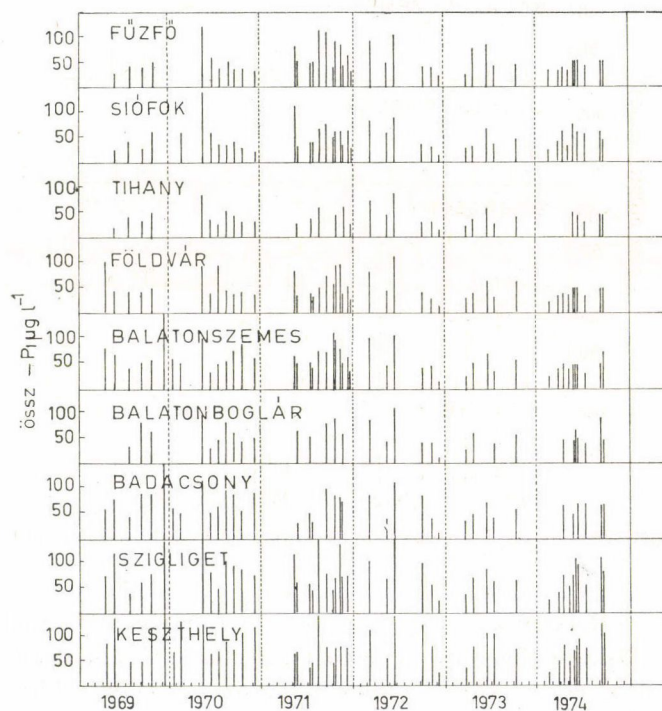
2. ábra. Az oldott össz-foszfor koncentrációja a standard 9 szelvényen 1971—1974. években

50 százalékát. A Balaton alacsony foszfátion tartalma mellett a jelentős mennyiségű oldott össz-foszfor fontos szerepet játszhat a fitoplankton foszfor ellátásában. Foszfátszegény környezetben ugyanis az algák többsége foszfátáz enzimük segítségével képesek az oldott szerves foszfort hasznosítani. A Balatonba ömlő foszfor hatásának a megítélésénél tehát figyelembe kell vennünk az oldott össz-foszfor szint alakulását is. A Keszthelyi-öbölben mért magas nyári értékek szépen mutatják az öböl súlyos foszfor terhelését. A pillanatnyi oldott szerves foszfor koncentráció bonyolult egyensúlyi folyamatok eredménye: fitoplankton felvétel és leadás (KUENZLER 1970), fitobentosz felvétel és leadás (JOHANNES 1964), zooplankton felvétel és leadás (HARGRAVE és GEEN 1968), zoobentosz felvétel és leadás (JOHANNES 1964a), bakteriális és autolitikus lebomlás. A kanadai kísérleti tóterület 227-es tavában az össz-oldott foszfor

koncentrációja 3–5 $\mu\text{g}/\text{l}$ volt és a foszfor trágyázás után a nyári hónapokban elérte az 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ -t (SCHINDLER és mtsai 1971). Wisconsin-i tavakban az oldott össz-foszfor átlagos mennyisége 14 $\mu\text{g}/\text{l}$, az össz-foszfornak 60 százaléka (HUTCHINSON 1957). Tengervízben az oldott össz-foszfor mennyisége szintén jelentős és általában nyáron, a fitoplankton maximumok idején a legnagyobb (KUENZLER 1970).

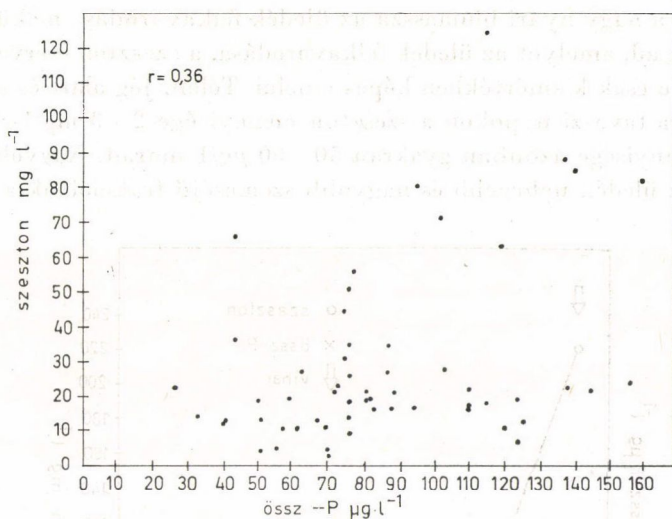
Össz-foszfor a tóvízben

A vizsgálatokban használt módszerrel az oldott, kolloidális, formált szerves és szervetlen foszfor össz-mennyisége mérhető. A Balatonban az össz-foszfor mennyiségét korábban nem mérték. A tó kilenc szelvényén hat év során

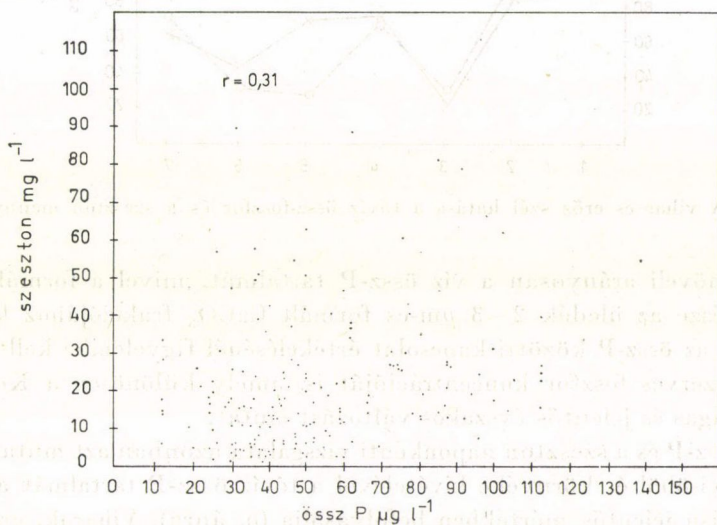


3. ábra. Az össz-foszfor mennyisége a standard 9 szelvényen 1969–1974. években

vizsgáltuk az össz-P mennyiségét. A legmagasabb értékeket az oldott össz-foszforhoz hasonlóan a Keszthelyi-öbölben és környékén kaptuk (3. ábra). Tavasszal és nyáron a legmagasabb értékek gyakran megközelítették a 150 $\mu\text{g}/\text{l}$ -t. A Keszthelyi-öböl és a tó többi területe között azonban a különbségek nem olyan szembetűnőek, mint az oldott össz-foszfor esetében. Az elsődleges termeléssel összehasonlítva (0,4–0,5 $\text{gC}/\text{m}^2/\text{nap}$), (HERODEK és OLÁH 1973,



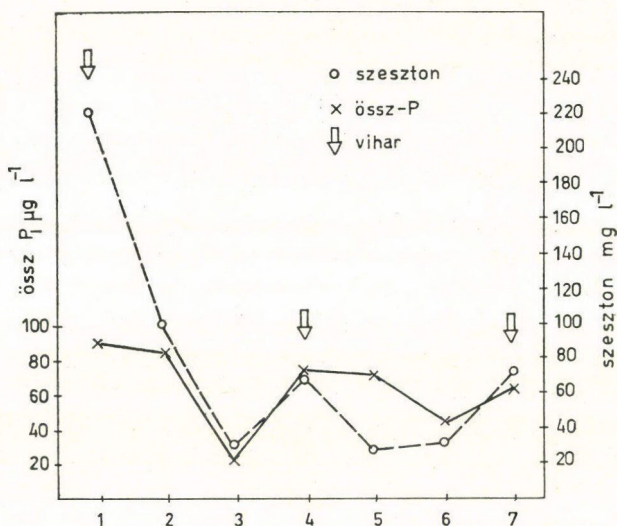
4. ábra. Az össz-foszfor és a szesztón közötti összefüggés a Keszthelyi-öbölben és környékén



5. ábra. Az össz-foszfor és a szesztón közötti összefüggés a tó kevésbé produktív területein

HERODEK és TAMÁS 1973) az össz-P mennyisége feltűnően magas. Az üledék gyakori felkavarodása következtében az össz-P jelentős része a szesztón nagy százalékát kitevő szerves frakcióhoz, elsősorban formált CaCO_3 -hoz kötött. Az öt év vizsgálatainak együttes értékelése azonban nem mutat szoros korrelációt az össz-P és a szesztón mennyisége között sem a Keszthelyi-öbölben és környékén (4. ábra), sem pedig a tó többi területén (5. ábra). Az összefüggést több, gyakran ellentétes irányban ható tényező bonyolítja. A Kesz-

helyi öbölben a nagy nyári biomassza az üledék felkavarodása nélkül is magas össz-P értéket ad, amelyet az üledék felkavarodása, a szesztón szerves részének a növelése csak kismértékben képes emelni. Télen, jég alatt és szélszáraz őszi vagy kora tavaszi napokon a szesztón mennyisége 2–3 mg/l-re csökken, az össz-P mennyisége azonban gyakran 50–60 $\mu\text{g/l}$ marad. Nagyobb viharok alkalmával az üledék nehezebb és nagyobb szemcséjű frakcióinak a felkevere-



6. ábra. A vihar és erős szél hatása a tóvíz össz-foszfor és a szesztón mennyiségére

dése nem növeli arányosan a víz össz-P tartalmát, mivel a formált foszfor nagyobb része az üledék 2–3 μm -es formált CaCO_3 frakciójához kötött. A szesztón és az össz-P közötti kapcsolat értékelésénél figyelembe kell vennünk az oldott szerves foszfor koncentrációját is, amely különösen a Keszthelyi-öbölben magas és jelentős évszakos változást mutat.

Az össz-P és a szesztón naponkénti vizsgálata azonban azt mutatja, hogy a Keszthelyi-öböl és környéke kivételével a tóvíz össz-P tartalmát az üledék felkavarodása jelentős mértékben befolyásolja (6. ábra). Viharok, erős szelek alkalmával a szesztón mennyiségének a növekedésével az össz-P értéke nő. Vihar után az üledék nehezebb és nagyobb frakcióinak gyors ülepedésével a szesztón mennyisége hirtelen csökken, az össz-P mennyisége viszont alig változik. A felkeveredés után ugyanis a 2–3 μm -es frakció még sokáig lebegve marad.

A Balaton sekélytavi jellege, az üledék gyakori felkavarodása fontos szerepet játszik mind az oldott foszfát, mind pedig az össz-foszfor mennyiségének az alakításában és sajátos, a mély, rétegzett tavakétól eltérő áramlási utakat eredményez a tó foszfor anyagcseréjében.

Foszfor frakciók az üledékben

A rétegzett tavak üledékében felhalmozódott foszfor hozzáférhetőségéről, a visszaáramlás jelentőségéről megoszlanak a vélemények (LEE 1973). A sekély, gyakran felkavarodó tavakban azonban az üledék foszfor tartalmának mind a felvétel, mind pedig a leadás szempontjából vitathatatlanul fontos szerepe van. A Balaton üledékének foszfor tartalmáról nincsenek adatok. A tó 16 pontjáról gyűjtött mintában meghatároztuk a foszfor frakciók, az össz-foszfor és a CaCO_3 mennyiségét (3. táblázat). Az össz-foszfor mennyisége 500 —

3. táblázat

Az üledék foszfor frakciói, $\mu\text{g/g}$ száraz üledék és CO_3 tartalma százalékban

Mintavételi hely	Kicsérélhető $\text{PO}_4\text{--P}$	Al—P	Fe—P	Ca—P	össz—P	CO_3 %
Keszthelyi-öböl közepe	10	0	3.2	104	570	49,6
Szt. Mihály-kápolna	10	0	0	74	590	50,6
Szigligeti-öböl	10	0	0	84	640*	51,2
Fonyód-Badaacsony	10	0	0	77	570	58,0
Bolgár-Révfülöp	9	0	0	73	540	58,3
Szemes, homokospart	8	0	0	98	390**	17,2
Szemes, tóközép	8	0	0	84	570	62,3
Ságpusztá előtt	7	0	0	92	550	47,2
Bozsai-öböl	7	0	0	96	720*	44,1
Földvár előtt	10	0	0	88	380**	40,4
Tihany	10	2,8	5,6	88	350**	25,3
Füredi-öböl	14	0	4,8	88	750*	51,2
Siófok	10	1,2	0	82	540	58,0
Siófok	10	0	4,1	88	540	51,2
Almádi-öböl	12	0	0	88	490	52,1
Fűzfői sarok	11	0	0	88	590	48,4

* öböl

** homokos alzat

600 $\mu\text{g/g}$ száraz üledék között volt. A nádasokkal szegélyezett nagy öblök üledékében magasabb, a homokos üledékben alacsonyabb. Az üledék magas CaCO_3 tartalmának megfelelően a szerves foszfor frakciók közül a balatoni üledékre a kalciumhoz kötött foszfor a jellemző. Alumíniumhoz és vashoz kötött foszfort csak egy-két mintában találtunk igen kis mennyiségben.

Az üledék össz-P tartalmának nagyobb, mintegy 4/5 része szerves foszfor. Az össz-P mennyisége az üledék 4 cm-es mélységében érte el maximumát, ettől kezdve fokozatosan csökkent (4. táblázat).

Az irodalmi adatokkal összehasonlítva (5. táblázat) a Balaton üledékének össz-P tartalma feltűnően alacsony. Tekintettel arra, hogy az össz-P túlnyomó többsége szerves frakcióhoz kötött, az alacsony foszfor tartalom jó összhangban van az üledék alacsony szervesanyag tartalmával (PONYI és mtsai 1972). A balatoni üledék fiziko-kémiai viszonyai mellett a szerves anyag bakteriális

4. táblázat

Az össz-P vertikális eloszlása az üledékben

Üledékréteg, cm	össz-P µg/g száraz üledék
1	498
2	560
3	533
4	715
5	523
6	369
7	341

5. táblázat

Különböző üledékek össz-P tartalma

Szerző	Víztypus	Össz-P µg/g száraz üledék
MOORE 1929—30	Clyde-tenger	560—1500
FATCHICHINA 1939	Tshernoie-tó (Kossino)	8000
	Maloie Medvezhie-tó	3200
	Beloie-tó (Kossino)	2500
	Krugloie-tó	1450
WATTS 1968	Trópusi halastó	200
SOMMERS és mtsai 1970	Wingra-tó	650
	Monona-tó	1260
	Mendota-tó	1460
	Devils-tó	1630
	Tomahawk-tó	1100
	Crystal-tó	2230
	Little John-tó	4120
Trout-tó	6090	
STANGENBERG—OPOROWSKA 1970	Newi Duzy halastó	100—240
	Wilczy Maly halastó	320—1570
	Trzcielín Wielki halastó	6600—41250
TESSENOW 1972	Ursee, láptó	2490
KRASZNIKOVA 1972	3 tó értékei, homokos üledék iszapos üledék	410—1080 1080—3580
HENDRICKS és SULVEY 1973	Víztározó	41—246
COOKE és WILLIAMS 1973	Folyóvízrendszer	768—1375

lebontása gyors, a felhalmozódás kicsi (OLÁH 1972). Balatonhoz hasonló meszes üledékű tavakban, nem meszes üledékű tavakkal összehasonlítva SOMMERS és munkatársai (SOMMERS és mtsai 1970) is lényegesen kevesebb össz-foszfort találtak. Tavi üledékekben az alumíniumhoz és vashoz kötött foszfát frakció lényegesen meghaladja a kalciumhoz kötött foszfát mennyiségét (WATTS 1968, FRINK 1969). A balatoni üledékben pedig az alumíniumhoz és vashoz kötött foszfát mennyisége elenyésző a kalciumhoz kötött foszfáthoz

6. táblázat

Az össz-P, az oldott össz-P és a PO_4 -P koncentrációjának évszakos és éves változása a Zala vizében ($\mu\text{g/l}$)

Időpont	Össz-P	Oldott össz-P	PO_4 -P
1969. 4. 16.	110	—	—
5. 20.	—	—	130
6. 19.	200	—	120
6. 24.	196	—	105
7. 21.	175	—	145
8. 26.	225	—	100
9. 8.	160	—	110
10. 13.	190	—	110
12. 2.	190	—	60
1970. 1. 27.	150	—	40
2. 23.	176	—	56
5. 20.	216	148	88
6. 30.	168	132	—
7. 21.	190	136	120
1971. 5. 24.	337	195	118
7. 6.	175	157	124
10. 18.	200	181	165
10. 24.	175	—	82
12. 13.	212	75	—

képest. A jelenség, mint említettük, az üledék magas mésztartalmával magyarázható.

A befolyó vizek foszfortartalma

Az egész tavi ekosisztéma foszfor anyagcseréjének megismeréséhez, a foszfor háztartás felvázolásához ismernünk kell a rendszerbe befolyó és az azt elhagyó vizek foszfor tartalmát. A Zala a tó legnagyobb befolyója, a foszfor bevétel legjelentősebb hányadát adja. A folyóvíz össz-P, oldott össz-P és PO_4 -P koncentrációját három év során évszakosan vizsgáltuk (6. táblázat). A Balaton-víz hasonló adataival összehasonlítva feltűnően magas az oldott foszfát mennyisége. Az oldott össz-P nagy részét az oldott foszfát adja. A kisebb befolyók közül a Nyugati-övesatorna foszfor tartalmát vizsgáltuk a Zalához hasonlóan három év során, évszakosan (7. táblázat).

Az oldott foszfát mennyisége a Balaton-vízhez viszonyítva jelentős, az össz-P és oldott foszfor aránya azonban nagyobb, mint a Zala esetében. A kisebb vízfolyások átlagos foszfor tartalmának a jellemzésére 20 befolyó foszfor tartalmát határoztuk meg (8. táblázat). A kiválasztott 20 befolyó között szennyvíz befolyók mezőgazdasági művelés alatt álló területeken átfolyó patakok is, szerepelnek, így érthető, hogy a minták össz-P és oldott össz-P tartalma nagyon változó.

7. táblázat

Az össz-P, az oldott össz-P és a PO_4 -P koncentrációjának évszakos és éves változása a Nyugati-övesatorna vizében ($\mu\text{g/l}$)

Mintavétel ideje	Össz.-P $\mu\text{g/l}$	Össz.-P szűrt $\mu\text{g/l}$	PO_4 -P $\mu\text{g/l}$
1969. 4. 16.	144	—	
5. 20.	184	—	68
6. 19.	185	—	55
6. 24.	160	—	40
7. 21.	125	—	45
8. 26.	320	—	210
9. 8.	250	—	70
10. 13.	—	—	25
12. 2.	100	—	40
1970. 10. 27.	85	—	40
2. 23.	85	—	32
5. 20.	188	144	84
6. 30.	80	40	—
7. 21.	144	78	50
1971. 5. 24.	237	150	100
7. 6.	—	147	32
10. 18.	212	162	74
10. 24.	200	—	78
12. 13.	200	75	—

8. táblázat

A Balatonba ömlő kisebb vízfolyások össz-P és oldott össz-P tartalma ($\mu\text{g/l}$)

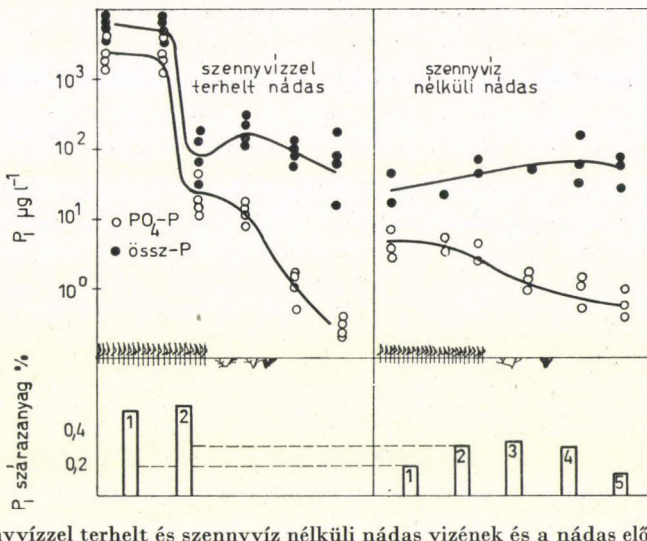
Vízbefolyás	Időpont	Össz-P	Oldott össz-P
Nagy metszés	1971. 9. 14.	875	275
B.-lelle szivattyú telep		425	—
Fonyód-nagyárok		287	—
Nyugati-övesatorna		212	137
Csókakő-patak		2250	—
Lesence-patak		—	400
Világos-patak		225	200
Viszlói-patak		212	25
Tapolca-patak		125	75
Eger-patak		—	137
Burnót-patak		237	162
Pécsely-patak		275	100
Tihanyi szennyvízbefolyó		2550	1400
B. füred szennyvízbefolyó		2203	—
Alsóörs szennyvízbefolyó		2750	1750
Almádi befolyó		2650	—
Kenese, Honvéd üdülő szennyvíz	2600	2050	
Pécsely-patak	1971. 9. 30.	175	137
Aszófői-patak		275	175
Malomvölgyi patak		562	450

Áramlási utak

Makrofita foszfor stabilizáció

A Balatonban az utóbbi években egyre szembeűnőbb a magasabb-rendű vízi növényzet térhódítása. Jelenleg a kolokánnak (*Stratiotes aloides*), a nyílt-víz rovására történő térhódítása játszódik le a szemünk előtt. A kolokán 7–8 évvel korábban botanikai ritkaságnak számított, most egymás után benépesíti az északi part nagy öbleit (Kerekedi-öböl, Paloznaki-öböl, Fűzfői-öböl) (Tóth 1972 a).

A Balaton partját szegélyező, nagyterjedésű, hinarasokkal kísért nádas a tó élő foszfor csapdája. A nádas-hinaras komplexum térhódítása össze-



7. ábra. A szennyvízzel terhelt és szennyvíz nélküli nádas vizének és a nádas előtt húzódó hínár növényzet össz-foszfor és oldott foszfát tartalma (1. *Ceratophyllum submersum*, 2. *Potamogeton perfoliatus*, 3. *Najas marina*, 4. *Stratiotes aloides*, 5. *Myriophyllum spicatum*)

függ a tó foszfor terhelésének a fokozódásával. Védi a víz minőségét, de cserébe jelentős területeket csatol a part övhöz. A vízgyűjtő területről a parti zónába kerülő, illetve a nádas alól lassan kiáramló foszfort a hínár tagjai asszimilálják és egy vegetációs periódusra testükben stabilizálják. A hínár testében megkötött foszfor így elkerüli a gyors anyagcserejű planktontársulást, ahol a fitoplankton az adott foszfor mennyiséget néhány naponként megforgatva állandóan újratermeli a foszfor egyenértéknyi szerves anyagot.

1969-ben és 1972-ben részletesen vizsgáltuk a balatonfüredi, tihanyi és keszthelyi szennyvízzel terhelt nádas és több szennyvízmentes nádas vizének és a nádas előtt húzódó hínár növényzet össz-P és PO₄-P tartalmát (7. ábra). A nádas, a vastag élőbevonatával és a hínárnövényzet még az augusztusi

9. táblázat

Tápanyagok átlagos évi értékei
μg/l

Év	Formált szerves C	Oldott szerves C	Össz szerves C	Formált szerves N	Oldott szerves N	Össz N
1969	—	—	—	251	526	874
1970	—	—	—	198	729	1016
1971	—	—	—	566	911	1588
1972	—	9700	—	400	900	1420
1973	—	9700	—	—	—	1229
1974	4100	8600	12 700	—	—	—

maximális szennyvízterhelés idején is felveszi a parti zónába kerülő foszfátot és a szennyvízbeömlés hatása a nádas nyíltvízi szélétől 100–150 méterre már nem észlelhető. A bakteriális lebontás során keletkező és a szennyvízmentes nádas alól lassan kiáramló foszfát is a nádas előtt húzódó hínárnövényzetbe raktározódik. A hínárnövényzet foszfor tartalmának vizsgálata világosan mutatja, hogy a szennyvízzel terhelt nádas előtti *Ceratophyllum submersum* és *Potamogeton perfoliatus* állomány mintái dupla mennyiségű foszfort tartalmaznak, mint a szennyvízmentes nádas előtt húzódó állományból gyűjtött minták. A hínárállomány foszfor tartalma tehát jól tükrözi a parti zóna magasabb foszfor terhelését (TÓTH 1972 b).

A hínárosok foszfor stabilizációja mennyiségileg jelentős. A Keszthelyi- és Szigligeti-öbölben a hínárállomány évi produkciója 1969–70-ben 75 000 kg volt szárazanyagban (KÁRPÁTI 1970, 1972). Az analízisek alapján a hínár átlagos foszfor tartalmát 0,3 százalékknak véve a két öbölben a hínár biomasszában stabilizált foszfor mennyisége 225 kg volt. HERODEK és TAMÁS (1973) szerint a Balatonban a fitoplankton minden 2,5 napon újratermeli biomasszáját. A szesztion szerves C és P tartalmának ismeretében (9. táblázat) megállapíthatjuk, hogy a Balatonban az algák P tartalma alacsony, 0,1% körüli. Így, ha a foszfor veszteség nélküli forgatásával számolunk (365 nap: 2,5 nap = 147 forgás), a hínárban stabilizált 225 kg foszfor $33 \cdot 10^6$ kg száraz alga megtermelését tenné lehetővé egy évben.

Ez a mennyiség megközelíti a tó évi összalgá termelését. ($45 \cdot 10^6$ kg száraz alga, HERODEK és TAMÁS 1973.) Természetesen a planktonársulásban a foszfor nem veszteség nélkül forog. Egy része a nehezen bomló szervesvegyületekben stabilizálódik, más része kirepülő rovarokkal és a halzsákmánnyal hagyja el a rendszert. A termelés és lebontás évi és átlagos napi mérlege szerint a tóban a megtermelt szerves anyag 95–96 százaléka elég (OLÁH 1975). A foszfor szempontjából ez azt jelenti, hogy a maradék, az évi, illetve az átlagos napi nettó produkció foszfor tartalma a forgásból kiesik az új forrásból pótlódik. A Keszthelyi- és Szigligeti-öböl hínárállományában stabilizált 225 kg foszfor, tehát nem $365 : 2,5 = 147$ termelés-lebontás forgásban venne részt, hanem

(a Keszthelyi-öböl kivételével)

NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	Formált szerves P	Formált szervetlen P	Össz P	Oldott össz-P	PO ₄ -P
97	0	0	—	—	35,4	—	1,5
89	0	0	—	—	49,0	—	1,5
111	0	0	—	—	52,0	18	1,5
120	0	0	—	—	52,0	17	1,5
—	0	0	—	—	43,0	22	1,5
—	0	0	6	12	55,0	37	1,5

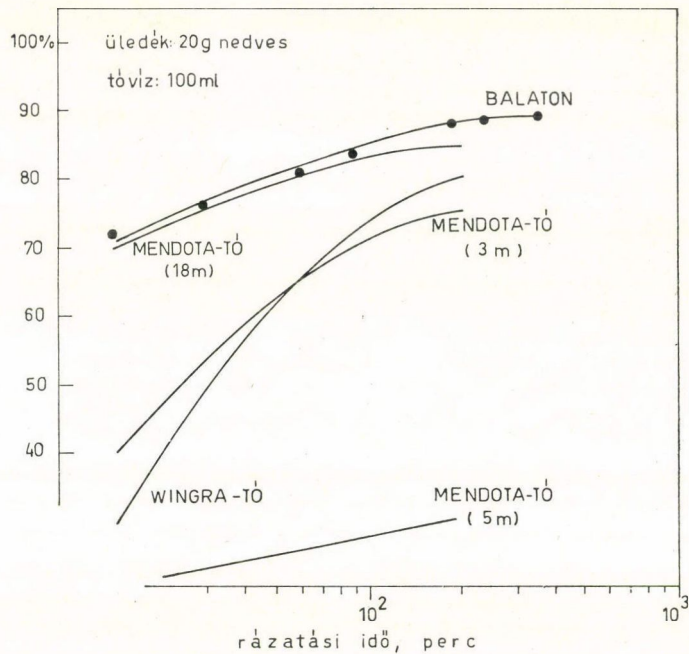
ha 5 százalékos forgásonkénti kieséssel számolunk csupán $100\% : 5\% = 20$ újratermelési ciklusban, azaz $4,5 \times 10^6$ kg száraz alga megtermelésében. Ehhez is azonban a ciklusonkénti foszfor kiesés pótlására van szükség, hisz például a 20. forgásban az eredeti foszfor mennyiségének már csak 5%-a vesz részt.

A hínárban stabilizált foszfor felszabadulása azonban még ezek figyelembevételével is hatalmas mennyiségű alga termést eredményezne. A Balatonban tehát a hínárállomány foszfor stabilizálása fontos szerepet játszik a tó foszfor anyagszerében (TÓTH 1972 b).

Az üledék foszfát adszorpciója

Különböző típusú tavi üledékek foszfát megkötő képessége jól ismert (FATCHICHINA 1939, HEPHER 1958, JITTS 1959, HOLDEN 1961, HARTER 1968, WATTS 1969). A foszfát adszorpció különösen szembetűnő a halastavak műtrágyázásánál. A magas CaCO₃ és kolloid tartalmú üledékek esetében a tóhoz adott foszfát nagy része rövid időn belül megkötődik az üledékben (HARTER 1968). A meszes tavakban a fotoszintézis során keletkező biogén mésszel együtt a tóvízben oldott foszfát is kicsapódik (OTSUKI és WETZEL 1972), ami igen kifejezett foszfát hiányt eredményez (EYSTER 1958). A Balaton, az üledék 50–60 százalékos CaCO₃ tartalmával és intenzív biogén mészképződésével tipikusan meszes tó. Láttuk, hogy a tóvízben oldott foszfát koncentrációja rendkívül alacsony, évszakosan állandó (a jég alatti periódus kivételével), sőt az elmúlt 40 év során sem változott. A sekély, állandóan felkavarodó tóban egyedül télen, jég alatt, felkeveredés és biogén mészképződés hiányában emelkedik meg a foszfát koncentrációja. Ez a foszfát adszorpció fontosságának közvetlen, in situ bizonyítéka.

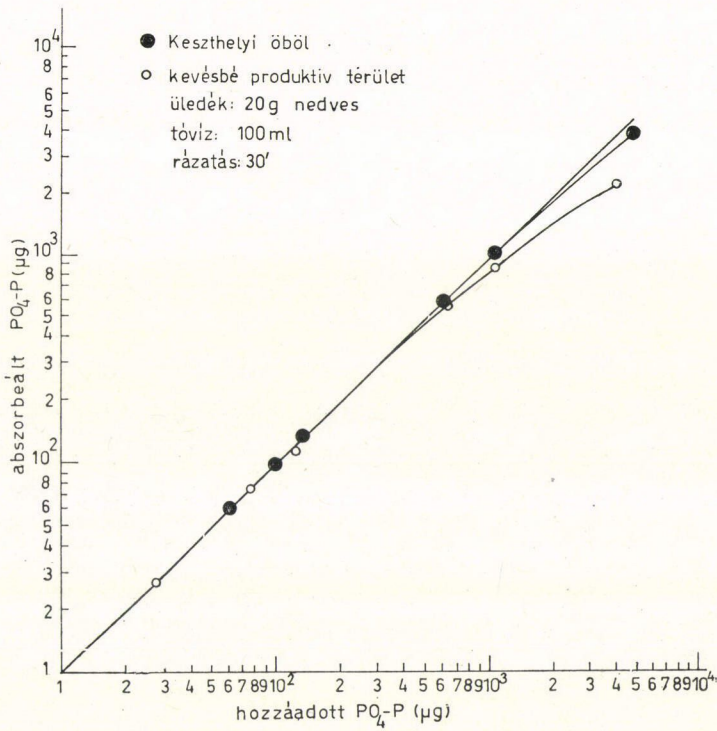
Kísérleteink szerint az üledék foszfor adszorpciója gyors, hatékony (8. ábra). Tízperces rázatás után a tóvízhez adott foszfát 73 százaléka adszorbeálódott. FITZGERALD (1970) vizsgálataiban ez az érték csak 10–30 százaléka, a meszes Mendota-tó mélyebb részéről származó üledék kivételével, ahol a



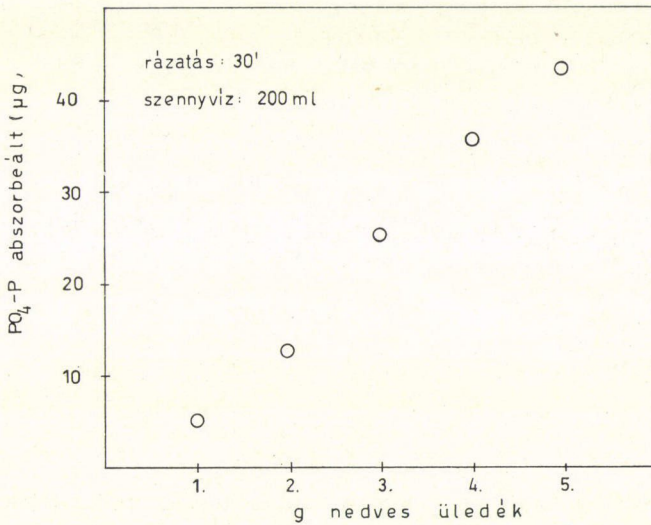
8. ábra. Az üledék foszfát adszorpciója és a rázatási idő közötti összefüggés

százalékos adszorpció, a rázatási idő függvényében a Balatonéval csaknem azonos. A foszfát adszorpció izotermája azt mutatja, hogy az üledék adszorpció kapacitása igen nagy, mind a kevésbé produktív területen, mind pedig az erősen produktív Keszthelyi-öbölben (9. ábra). A Keszthelyi-öbölből származó üledék a tóvízhez adott foszfátot, egészen 1 mg/l-es koncentrációig maradék nélkül adszorbeálta. A Keszthelyi-öböl iszapjának nagyobb adszorpciós kapacitása feltehetően a magasabb vas és alumínium tartalommal magyarázható, amit a Zala közvetlen hatásának tulajdoníthatunk.

Ezekben az adszorpciós kísérletekben alkalmazott 1/5 nedves üledék tóvíz arány természetesen tavi viszonyok mellett erős viharok alkalmával is csak a víz-üledék határon lehetséges. Erős viharok alkalmával a szesztón mennyisége a vízfelszínen eléri a 220 mg/l-t (6. ábra), a mélyebb vízrétegekben pedig több. A tavi viszonyokat megközelítő 1/200-as nedves üledék/tóvíz aránnyal dolgozva is jelentős foszfát adszorpciót mértünk. Ismételt, kismennyiségű üledék hozzáadásával, rázatásával és elvételével az adszorpció lineáris (10. ábra). Az üledék gyakori felkeveredésével és az állandóan képződő biogén formált CaCO_3 jelenlétével tehát az oldott foszfát koncentráció alacsony szinten tartása a tóban is igen hatékony lehet. Az oldott foszfát kicsapódása és adszorpciója a magas foszfát tartalmú szennyvizek tóra káros hatását is jelentős mértékben csökkenti. Adataink szerint (1. és 7. ábrák) a szennyvíz beömlésektől



9. ábra. Az üledék foszfát adszorpciós izotermája



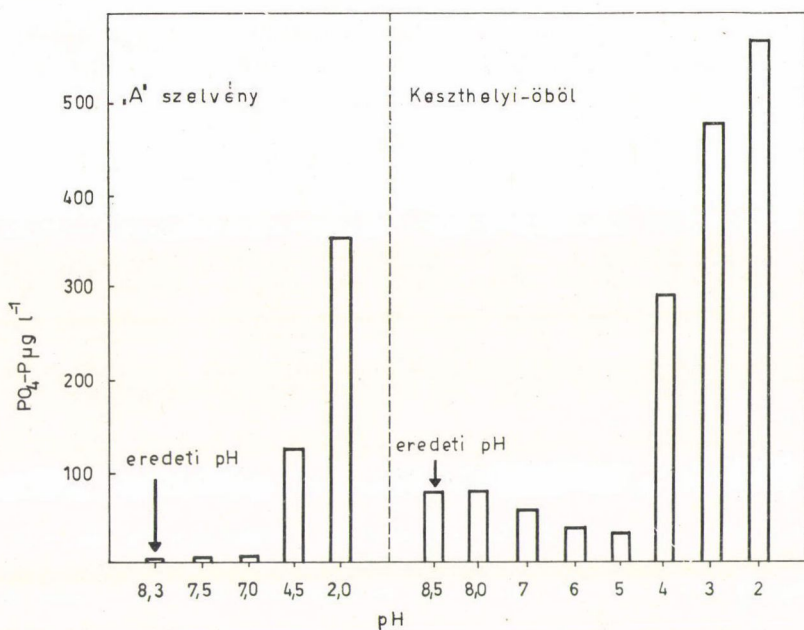
10. ábra. Az üledék foszfát adszorpciója kis mennyiségű üledék hozzáadásával, rázatásával és elvételével

100—200 méterre a tóvíz ugyanolyan kevés oldott foszfátot tartalmaz, mint a nyíltvíz, ami a makrofita növényzet foszfát stabilizációja mellett elsősorban a kicsapódás és adszorpció eredménye, különösen a nádasmentes beömléseknél.

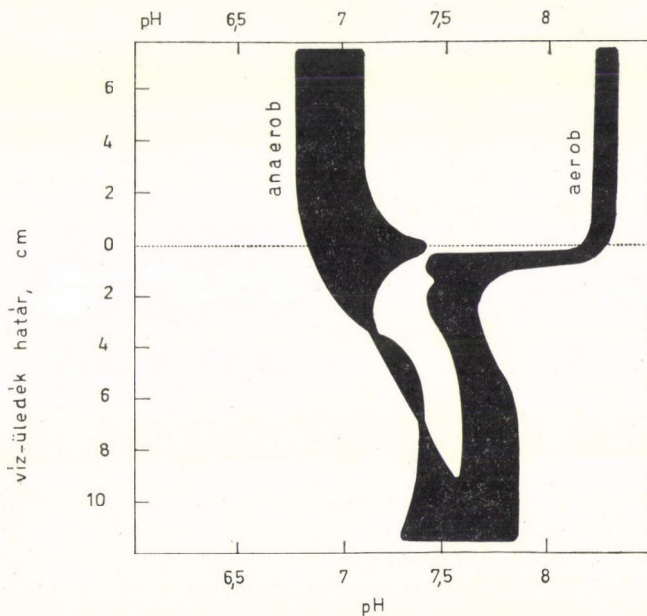
Egyensúlyi foszfát koncentráció

A sekély, gyakran felkeveredő tavakban az oldott foszfát koncentráció kialakításában a víztérbe kerülő, jelentős mennyiségű üledék fontos szerepet játszik. Az ilyen típusú tavakban az üledékkal rázatott tóvízben beálló egyensúlyi foszfát koncentrációt a foszfor anyagcsere fontos mennyiségi jellemzőjének tartjuk. A Balaton nyíltvizében, a Keszthelyi-öböl és környéke kivételével az egyensúlyi foszfát koncentráció rendkívül alacsony, méréseink során mindig $3 \mu\text{g/l}$ alatt volt. Ez azt jelenti, hogy a tó sajátos fiziko-kémiai viszonyai mellett a tóvíz-üledék rendszer minden fölös foszfátbevitel vagy kiadásra az egyensúlyi foszfát koncentráció visszaállítással válaszol. Ezzel magyarázható, hogy a tóvízben a foszfát koncentráció az elmúlt 40 év során nem változott, évszakosan állandó és mindig az egyensúlyi érték alatt van, kivéve a téli, jég alatti periódust, amikor a víz-üledék rendszerből a vastag kovamoszat szőnyeggel borított üledék kikapcsolódik. A Balatonhoz hasonló meszes Mendota-tóban a foszfát koncentráció szintén $3 \mu\text{g/l}$ alatt van (OTSUKI és WETZEL 1972). Sajnos, a Keszthelyi-öbölben, ahol az üledék szerves anyagban gazdagabb (PONYI és mtsai 1972) az üledékkal rázatott tóvíz egyensúlyi foszfát koncentrációja sokkal magasabb, megközelíti a $80 \mu\text{g/l}$ -t. Ismert, hogy a szerves anyag tartalom növekedésével az üledék foszfát adszorpciója az alacsonyabb oldott $\text{PO}_4\text{-P}$ koncentrációknál csökken (HEPHER 1958). A kevésbé produktív területek — amelyek jelenleg a tó nagy részét képviselik — üledékében, a szerves anyag tartalom növekedése az egyensúlyi foszfát koncentráció emelkedéséhez vezet. Az eutróf, oxigén deficités üledékű Erie-tóban az egyensúlyi foszfát koncentráció már a Keszthelyi-öbölben mért értéknél is nagyobb, eléri a $100 \mu\text{g/l}$ -t (GUMERMAN 1970).

A sósavval különböző pH-ra beállított, majd rázatott üledék-tóvíz rendszer egyensúlyi foszfát koncentrációja jelentős mértékben változik (11. ábra). A tó kevésbé produktív területéről származó üledékmintában a pH csökkenésével növekszik az egyensúlyi foszfát koncentráció. Az ekológiai értelemben reális csökkentés pH 7-nél már $8 \mu\text{g/l}$ -re emelte az egyensúlyi foszfát koncentrációt. A magas értékek az egészen savas tartományban a formált CaCO_3 oldódásának az eredménye. Vizsgálataink szerint (12. ábra) a kísérletesen létrehozott anaerob üledékfelszín esetén a víz pH értéke 7 alá is eshet. Az egyensúlyi foszfát koncentráció emelkedése a tóban, az oxigénmentes üledékfelszín pH csökkenéssel is létrejöhet. Anaerob víz-üledék rendszer egyensúlyi foszfát koncentrációja mindig magasabb. OLSEN (1958, 1964) szerint elérheti a 2 mg/l -t.

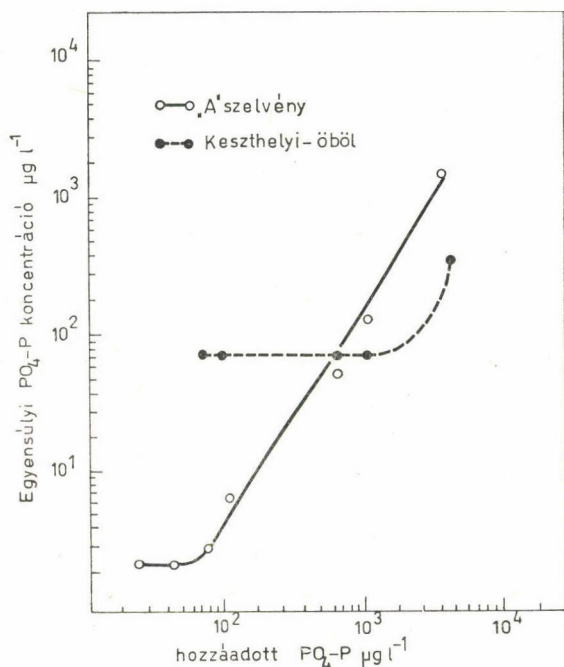


11. ábra. Egyensúlyi foszfát koncentráció különböző pH mellett



12. ábra. Az aerob és anaerób víz-üledék határ pH tartománya

A tavat érő foszfát terhelés szempontjából rendkívül fontos, hogy a különböző foszfát mennyiség hozzáadására hogyan változik az üledékkel rázattott tóvíz egyensúlyi foszfát koncentrációja. A foszfát adszorpciós izoterma szerint (9. ábra) a kevésbé produktív területeken az üledék adszorpciós kapacitása kisebb, mint a Keszthelyi-öbölben. Itt azonban az alacsonyabb egyensúlyi foszfát koncentráció már $100 \mu\text{g/l}$ körüli foszfát hozzáadására emelkedni



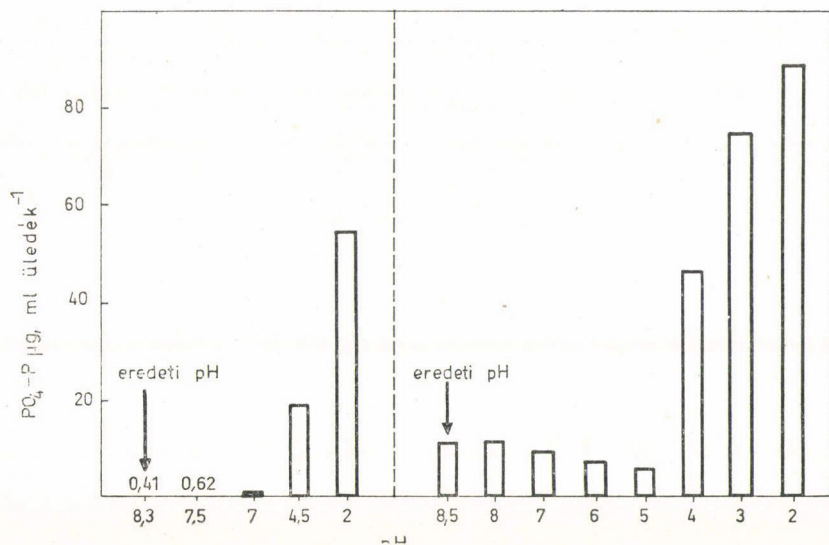
13. ábra. Foszfát hozzáadás hatása az egyensúlyi foszfát koncentrációra

kezd, bár a megemelkedett foszfát koncentráció is lényegesen alacsonyabb a Keszthelyi-öböl eredeti egyensúlyi foszfát koncentrációjánál (13. ábra). A keszthelyi egyensúlyi értéket csak $750\text{--}800 \mu\text{g/l}$ foszfát hozzáadásával éri el. A Keszthelyi-öbölben az egyensúlyi koncentráció csak 1 mg/l foszfát hozzáadás után kezd emelkedni, ami az üledék nagyobb adszorpciós kapacitásával függ össze.

Foszfát felszabadulás az üledékből

Említettük, hogy a víz-üledék rendszer az egyensúlyi foszfát koncentráció fenntartására törekszik. Méréseink szerint a tóvíz foszfát ion tartalma mindig $3 \mu\text{g/l}$ -es egyensúlyi érték alatt van. Így a rendszert, a tó nyíltvizében a foszfát leadási kényszer állapota jellemzi. Az egyensúly alatti foszfát koncent-

ráció állapotát kétségtelenül az élő szervezetek foszfát felvétele tartja fenn. Ugyanakkor ez az állapot biztosítja a foszfát áramlását a szilárd fázisból az élő szervezetek felé. Az élő szervezetek foszfát felvételét és leadását is figyelembe véve tehát az egész rendszer olyan dinamikus egyensúlyi állapotban van, amelyben a társulás feltétel-leadás negatív mérlegét a szilárd és kolloidális fázis foszfát leadása egyenlíti ki. Az üledék tóvízes rázatása során 1 ml üledék átla-



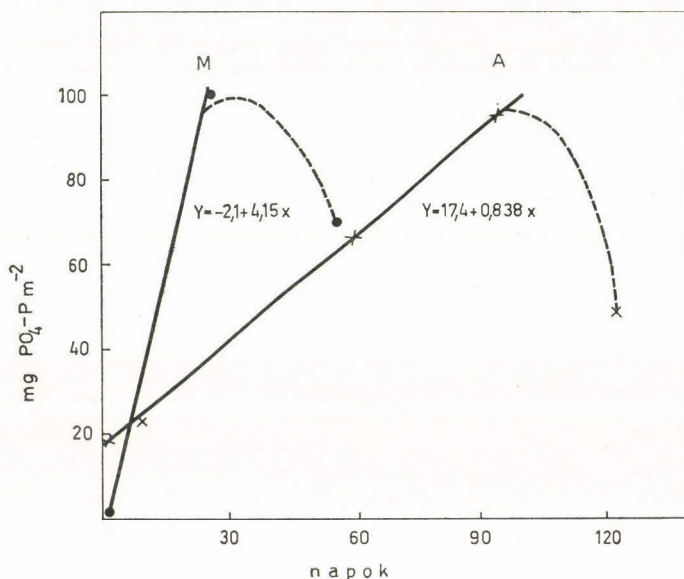
14. ábra. A tóvízben rázatott üledék pH függő foszfor leadása

gosan $0.4 \mu\text{g PO}_4\text{-P}$ adott le. Viharok alkalmával tehát, amikor a vízoszlop szesztion tartalma átlagosan 250 mg/l , 3 méteres vízoszloppal és az üledék 25 százalékos szárazanyag tartalmával számolva 1 m^2 -ről 3 kg nedves üledék keveredik fel, aminek a foszfát leadása $1,23 \text{ mg}$. A Keszthelyi-öbölben ez az érték elérheti a 30 mg -ot. A tóvízben rázatott üledék pH függő foszfor leadása szerint (14. ábra) a kevésbé produktív területen az ekológiai értelemben reális pH csökkentés jelentősen megemelheti az üledék foszfát leadását. pH 7 mellett például a fenti számítás analógiájára, viharok alkalmával $3,6$ foszfát szabadulhat fel négyzetméterenként. Természetesen az egész vízoszlop ilyen mértékű pH csökkenésével még redukált üledékfelszín mellett sem számolhatunk.

Kísérletesen, érintetlen víz-üledék hurkát tartalmazó üveghengerekben, anaerob viszonyok mellett meghatároztuk az üledékből felszabaduló foszfát mennyiségét (15. ábra). Az alacsonyabb trofitású területen a foszfát felszabadulás lényegesen lassúbb, mint a Keszthelyi-öbölben. Átlagosan a Keszthelyi-öbölben naponként 4 mg/m^2 foszfát szabadulhat fel anaerob viszonyok mellett, ugyanakkor a kevésbé produktív területen ez az érték 1 mg alatt van.

Irodalmi adatok szerint az anaerob foszfát felszabadulás a Balatonban mértéknél gyakran lényegesen nagyobb (TESSENOW 1972, BURTON 1973). A háztartási szennyvízzel erősen terhelt Trummen-tóban elérte a 14 mg/m^2 -t (BJÖRK és mtsai 1972).

Ismerve az üledék intersticiális vizében az oldott foszfát koncentrációgradiensét ($155 \text{ } \mu\text{g/l/cm}$) és a $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ diffúziós koefficiensét alkalmazva



15. ábra. Anaerob foszfát felszabadulás az üledékből (M-Keszthelyi-öböl, A-a tó kevésbé produktív területe)

(STUMM és LECKIE 1970) a kevésbé produktív területeken $133 \text{ } \mu\text{g PO}_4\text{-P/m}^2$ naponkénti diffúziós foszfát áramlási értéket kapunk. Ez azt bizonyítja, hogy a foszfát felszabadulása az üledékből, szélmentes periódusban, az üledék felkeveredése nélkül is jelentős lehet.

Foszforhiányos társulás anyagsere

A Balaton foszfor anyagcseréjét csak a többi biogén anyag mennyiségével összehasonlítva, a teljes anyagsere összefüggésében értékelhetjük. A tóvíz szervesetlen és szerves tápanyagainak mennyiségi viszonyait a hatéves vizsgálat évi átlagai mutatják (9. táblázat). Feltűnő, hogy az oldott szerves-C és -N lényegesen meghaladja formált szerves-C és -N mennyiségét. Az oldott szervesetlen N vegyületeket az $\text{NO}_3\text{-N}$ képviseli. A tóvízben $\text{NO}_2\text{-N}$ és $\text{NH}_4\text{-N}$ a jelenleg használatos módszerekkel nem mutatható ki. Az adatok szerint a Balatonban a szervesetlen-C, -N és -P arányok kedvezőtlenek. A szervesanyag

építés és lebontás számára ugyanis az optimális C : N : P atomarány $C_{103}N_{16}P_1$. Ezzel összehasonlítva a Balaton-vízben az oldott szervesetlen biogén elemek atomaránya rendkívül erőteljes foszfor hiányt mutat (10. táblázat). A foszforhiányos rendszerben szintetizált oldott és formált szervesanyag foszfor tartalma is nagyon alacsony. Mindez meggyőzően bizonyítja, hogy a Balatonban, az évszakosan állandó elsődleges termelés (HERODEK és OLÁH 1973, HERODEK

10. táblázat

A Balaton vizének oldott, szerves oldott és szerves formált C : N : P atom arányai

	C:	N:	P
Szervesetlen oldott	86 791	178	1
Szerves oldott	1 496	118	1
Szerves formált	1 766	147	1
Üledék szerves	1 098	155	1

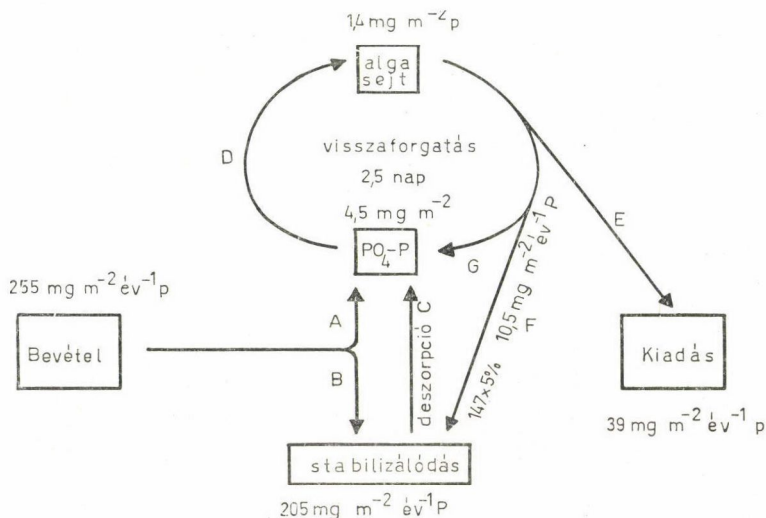
és TAMÁS 1973) a rendkívül alacsony és állandó egyensúlyi foszfát koncentráció eredménye. A természetes vizek döntő többségében az elsődleges termelés limitáló tényezője a foszfor (LEE 1973) és csak ritkán jelenik meg olyan közlemény, amely egyértelműen a nitrogén limitáló szerepéről számol be (RYTHER és DUNSTAN 1971). A Balaton anyagcseréjét jellemző erőteljes foszfor hiány azonban még az irodalomban is feltűnő (KRAMER és mtsai 1972). Kísérleteink szerint ha az alacsony egyensúlyi foszfát koncentrációért felelős fiziko-kémiai viszonyokat megváltoztatom, pl. sósavval a rendszert savanyítom, az egyensúlyi foszfát koncentráció növekszik, a kicsapódott foszfát oldódik, az élő szervezetek számára felvehetővé válik. Ezt bizonyítja a savanyítás hatására megnövekedett fotoszintézis is (FELFÖLDY 1959).

A foszfor-háztartás elemzése

A Balatonban a foszforhiányos anyagcseréért a foszfor hozzáférhetetlensége a felelős. Ezt a következtetést a bevétel — kiadás háztartási mérleg elemzése is alátámasztja (16. ábra). A befolyó vizek foszfor tartalma és vízhozama alapján számított $255 \text{ mg m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ foszfor bevételéből a Zalára 91 mg, a többi kisebb befolyóra 120 mg és a tóba kerülő szennyvizekre 44 mg esik. A $39 \text{ mg m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ foszfor kiadásból a kifolyásra 31 mg, a kirepülő rovarokra 6 mg és a lehalászásra 2 mg esik. A bevétel — kiadás mérleg szerint a foszfor bevétel nagy része minden évben a tóban marad. A foszforhiányos anyagcsere mellett tehát minden évben jelentős mennyiségű foszfor temetődik el a tavi üledékben. Az üledék mért foszfor tartalmával és 1 mm-es évi ülepedéssel számolva az évi

üledék-gyarápodás foszfor-tartalma megközelíti a bevétel—kiadás közti különbséget. Az össz-bevétel mintegy 14 mg-gal haladja meg az össz-kiadás és ülepedés összegét. Ez azzal magyarázható, hogy a befolyások környékén az üledék foszfortartalma magasabb, mint a számításainkhoz használt nyíltvízi érték.

A foszfor bevétel nagy része a tóba kerülés után azonnal stabilizálódik az üledékben, a rendszer szilárd fázisán (B). A bevétel közel 40%-át kitevő



16. ábra. A Balaton foszfor háztartási mérlegének elemzése

PO₄-P közvetlenül adszorbeálódik, kicsapódik a mész-részecskéken, a maradék 60% jelentős része pedig már stabilizálódott szerves vegyületekhez kötött formában kerül a tóba. A foszfor bevétel kis része kerül tehát közvetlenül forgásba (A), nagyobb része a szilárd fázisból másodlagosan kerül felhasználásra (C).

Mértük a tóvízben oldott PO₄-P koncentrációját, a szeszon szerves részének foszfortartalmát, ismerjük a fitoplankton biomasszáját és a biomassza turnover idejét (HERODEK és TAMÁS 1973), a termelés lebontás napi és évi mérlegét. Az 1,4 mg m⁻² foszfort tartalmazó fitoplankton biomassza 2,5 naponként újratermeli önmagát. Ugyanezen periódus alatt a megtermelt szerves anyag 95%-a el is ég a táplálék-hálózat mentén. A maradék 5% foszfortartalma ciklusonként kiesik a forgásból nehezen bomló, stabilizált szerves vegyületek formájában. Ez évente (147 × 5%) 10,5 mg m⁻² P, az évi kiadással (F + E) összesen 49,5 mg m⁻² P.

Ez a mennyiség kapcsolódik ki évente az építés—lebontás forgásból és ugyanezen mennyiség pótlódik évente közvetlenül a bevételből (A) és a szilárd fázison keresztül, deszorpcióval (C). Feltételezésünk szerint az utánpótlás

nagy része a szilárd fázison keresztül történik. A pótlódás számított napi értéke ($49,5 : 365 = 0,135 \text{ mg P m}^{-2}$) hivalkodóan megegyezik a víz-üledék háttár foszfát gradienseből számított napi diffúziós foszfát felszabadulással ($0,113 \text{ mg P m}^{-2}$). Foszfátmentes vizes rázatás, anaerob állapot és savanyítás mellett a szilárd fázisról ennél lényegesen nagyobb deszorpciót mértünk kísérleteinkben. A Balaton sajátos fiziko-kémiai viszonyai mellett azonban a deszorpció, a foszfát áramlása a szilárd fázisból az élő szervezetek felé az alacsony egyensúlyi foszfát koncentrációval szigorúan korlátozott és jelenleg ez a meghatározó tényező az ökoszisztéma egyensúlyi viszonyainak a fenntartásában. Kísérleteink szerint az egyensúlyi koncentráció a tó kevéssé produktív területein már $100 \mu\text{g/l PO}_4\text{-P}$ hozzáadására — ha lassan is — emelkedni kezd. Ez azt jelenti, hogy $300 \text{ mg PO}_4\text{-P m}^{-2}$ bevétel már jelentős mértékben emelheti az egyensúlyi foszfát koncentrációt. A $\text{PO}_4\text{-P}$ bevétel jelenleg mintegy $102 \text{ mg m}^{-2} \text{ év}^{-1}$. Láttuk, hogy a Keszthelyi-öbölben, ahová a foszfor bevétel nagy része koncentrálódik az egyensúlyi foszfát koncentráció már igen magas.

A közvetlenül mért adatok alapján felépített és elemzett foszfor háztartás legkritikusabb kérdése az oldott $\text{PO}_4\text{-P}$ turnover ideje, ami az irodalmi adatok szerint (KRAMER és mtsai 1972) néhány perc, és több nap között változhat. A felépített háztartás szerint a Balatonban ez az érték feltűnően nagy, eléri a nyolc napot. A turnover idő számításához felhasznált adatok azonban módszertanilag nagyon bizonytalanok. A szesztion szerves részének megbízhatóan mért foszfortartalma nagyon alacsony, a szárazanyag $0,07\%$ -a. Jelenleg azonban nincs módszerünk a szesztion fitoplankton komponensében található foszfor közvetlen mérésére, így számításainkhoz a $0,07\%$ -os foszfor tartalmat használtuk, mint a közvetlenül mért legvalószínűbb értéket. Feltehetően a fitoplankton foszfor százaléka valamivel nagyobb, mint az összszerves szesztion foszfor százaléka. Egyre több tény szól amellett (BURNS és ROSS 1971, LEE 1973), hogy a jelenleg használt legérzékenyebb módszer is alkalmatlan az $1 \mu\text{g l}^{-1}$ körüli oldott foszfát mérésére. Ilyen alacsony koncentrációnál a mért érték jelentős részét az algák számára hozzáférhetetlen foszfor frakció képezi. Így a fitoplankton feltehetően nagyobb foszfor tartalma és a lényegesen alacsonyabb oldott foszfát koncentráció a számítottnál sokkal rövidebb turnover időt valószínűsít.

Konklúziók

1. A nyíltvízben az oldott $\text{PO}_4\text{-P}$ koncentrációja nagyon alacsony ($0,12\text{--}2,72 \mu\text{g l}^{-1}$) és közel fél évszázada változatlan, kivéve a téli, jég alatti periódust, amikor az emelkedés elérheti a $10 \mu\text{g l}^{-1}$ -t, illetve a Keszthelyi-öbölben az $50 \mu\text{g l}^{-1}$ -t. A parti zónában a nyíltvízhez hasonló koncentrációt találtunk, kivéve a szennyvízzel terhelt nádast, ahol 4 mg l^{-1} -t is mértünk.

A redukált üledék-zóna ($E_h = -20-100$) intersticiális vizében az oldott PO_4 -P koncentráció $1.2 - 1.3 \text{ mg l}^{-1}$ volt. Lineáris koncentráció gradienst feltételezve a gradiens érték $150 - 160 \mu\text{g l}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

2. A Balatonban az össz-P jelentős részét az oldott össz-P alkotja. A Keszthelyi-öbölben a szokatlanul magas oldott össz-P értékek ($120 \mu\text{g l}^{-1}$) meghaladják az össz-P 50%-át is. A tó foszfát szegény vizében az oldott szerves foszfor sok algafaj teljes foszfor igényét kielégítheti. Az elsődleges termeléshez viszonyítva igen magas a víz össz-P tartalma, ami összefügg az üledék gyakori felkavarodásával, bár az össz-P és a szesztton között a korreláció nem volt szoros.

3. Az irodalmi adatokkal összehasonlítva az üledék össz-P tartalma alacsony ($500-600 \mu\text{g g}^{-1}$ száraz üledék), ami összefügg az üledék alacsony szervesanyag tartalmával. A tavi üledékek többségétől eltérően a balatoni üledékben az alumíniumhoz és vashoz kötött foszfát mennyisége elenyésző a kalciumhoz kötöthöz képest. A jelenség az üledék magas mésztartalmával magyarázható.

4. A Zala és a kisebb befolyók vizében a Balaton-vízzel összehasonlítva magas az oldott foszfát mennyisége. A befolyók hároméves vizsgálata során nyert adatokat használtuk fel a tó össz-P bevételének a becslésénél.

5. A nádas vastag élőbevonatával és a hínárosok még az augusztusi maximális szennyvízterhelés idején is felveszik a parti zónába kerülő foszfátot. Az itt élő *Ceratophyllum submersum* és *Potamogeton perfoliatus* állomány dupla mennyiségű foszfort tartalmaz, mint a szennyvízmentes nádas előtt húzódo állomány. A hínárosok foszfor stabilizációja mennyiségileg jelentős. A foszfor veszteség nélküli forgatásával számolva a Keszthelyi- és Szigligeti-öböl hínarasaiban stabilizált $225 \text{ kg foszfor } 33 \times 10^6 \text{ kg száraz alga}$ megtermelését tenné lehetővé.

6. A Balatonban az üledék állandó felkeveredése és a biogén mészképződés az oldott foszfátot alacsony szinten tartja. A felkeveredés és mészképződés hiányában jég alatt már magas az oldott foszfát mennyisége. A foszfát adszorpció gyors, hatékony. Tízperces rázatás a tóvízhez adott foszfát 70%-át adszorbeálta. A több vasat tartalmazó Keszthelyi-öböl üledékének nagyobb az adszorpciós kapacitása. Az adszorpciós izoterma szerint az adszorpció 1 mg l^{-1} -ig teljes. Viharok alkalmával a szesztton mennyisége eléri a 220 mg l^{-1} -t. Ez az üledékmennyiség már in situ is hatékony adszorpciós tényező.

7. Az üledékekkel rázatott tóvízben beálló egyensúlyi foszfát koncentráció mindig $3 \mu\text{g l}^{-1}$ alatt volt. A Keszthelyi-öbölben az üledékekkel rázatott tóvíz egyensúlyi foszfát koncentrációja már eléri a $80 \mu\text{g/l}^{-1}$. Savanyítás és anaerob állapot hatására a víz-üledék rendszer egyensúlyi koncentrációja magasabb.

8. 1 ml üledék tóvizes rázatása során $0,4 \mu\text{g } PO_4\text{-P-t}$ adott le, ezzel az értékkel számolva viharok alkalmával a foszfát leadás eléri az $1,23 \text{ mg m}^{-2}$ -t. A Keszthelyi-öbölben ugyanez az érték 30 mg . Savanyítás hatására a leadás

növekszik. Az anaerob foszfát felszabadulás naponként 1 mg m^{-2} alatt van, a Keszthelyi-öbölben ugyanez 4 mg . Az üledék intersticiális vizében oldott foszfát koncentráció gradiensét ($155 \mu\text{g l}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) és a $10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ diffúziós koefficienset alkalmazva $133 \mu\text{g PO}_4\text{-P m}^{-2}$ naponkénti diffúziós foszfát áramlási értéket kapunk.

9. A tó biogén elemeinek többéves vizsgálati eredményeinek alapján összeállított C : N : P atomarányok egyértelműen erőteljes foszfor hiányos társulás anyagcserét mutatnak. A tóban az elsődleges termelés limitáló tényezője a foszfor. Savanyítás hatására kicsapódott foszfát hozzáférhetővé válik, a fotoszintézis nő.

10. A mért adatok alapján felépített és elemzett foszfor háztartás legkritikusabb tényezője az oldott $\text{PO}_4\text{-P}$ turnover ideje. A turnover idő pontos megismerését csak a módszerek további tökéletesítése teszi lehetővé.

IRODALOM

1. BARANYI, S.: Állóvizek hidrológiai vizsgálata triciummérések felhasználásával. Tájékoztató az állóvizek hidrológiai feltárásáról, 1971. VITUKI, Budapest (1973).
2. BJÖRK, S., BENGSSON, BERGGEN, H., CRONBERG, G., DIGERFELDT, G., FLEISCHER, S., GELIN, D., LINDMARK, G., MALMER, N., PLEJEMARK, F., RIPL, W. and SWANBERG, O.: Ecosystem studies in connection with the restoration of lakes Verh. Internat. Verein. Limnol. **18**, 397–387 (1972).
3. BRAY, J. T., BRICKER, O. P. and TROUP, B. N.: Phosphate in interstitial waters of anoxic sediments: Oxidation effects during sampling procedure, Science **180**, 1362–1364 (1973).
4. BURNS, N. M. and ROSS, C.: Nutrient relationships in a stratified eutrophic lake. Proc. 14 th Conf. Great Lakes Res. 1971. 749–760 (1971).
5. BURTON, J. D.: Problems in the analysis of phosphorus compounds. Wat. Res. **7**, 291–307 (1973).
6. CHANG, S. C. and JACKSON, M. L.: Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. **84**, 133–144 (1957).
7. COOKE, G. V. and WILLIAMS, R. J. B.: Significance of manmade sources of phosphorus: fertilizers and farming. The phosphorus involved in agricultural systems and possibilities of its movement into natural water. Wat. Res. **7**, 19–33 (1973).
8. ENTZ, B.: Horizontális kémiai vizsgálatok 1950 és 1952 nyarán a Balaton különböző biotópjában és néhány beömlő patak torkolatánál. Annal. Biol. Tihany **21**, 29–48 (1953).
9. ENTZ, B.: Chemische Charakterisierung der bewässer in der Umgebung des Balatonsees (Plattensees) und chemische Verhältnisse des Balatonwassers. Annal. Biol. Tihany **26**, 131–201 (1959).
10. EYSTER, C.: Bioassay of water from a concretion-forming marl lake. Limnol. Oceanogr. **3**, 455–458 (1958).
11. FATCHCHINE, O. E., The absorption capacity of the lake deposits. Proc. Kossino Limnol. Sta. **22**, 5–34 (1939).
12. FELFÖLDY, L.: Experiments with algal cultures for determining some properties of Balaton Lake water. Annal. Biol. Tihany **26**, 211–222 (1959).
13. FELFÖLDY, L.: A biológiai vízminőség. Vízügyi Hidrobiológia **3**, VÍZDOK Budapest, p. 242 (1974).
14. FITZGERALD, G. P.: Aerobic lake muds for the removal of phosphorus from lake waters. Limnol. Oceanogr. **15**, 550–555 (1970).
15. FRANKÓ, A. and PONYI, J.: Seasonal change of the organic carbon content of Lake Balaton during 1972. Annal. Biol. Tihany **40**, 185–195 (1973).
16. FRINK, C. R.: Fractionation of phosphorus in lake sediments: analytical evaluation. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. **33**, 326–328 (1969).

17. GUMERMAN, R. C.: Aqueous phosphate and lake sediment interaction. Proc. 13th Conf. Great Lakes Res. Part 2, 1970, 673—682 (1970).
18. HARGRAVE, B. T. and GEEN, G. H.: Phosphorus excretion by zooplankton. Limnol. Oceanogr. **13**, 332—342 (1968).
19. HARTER, R. D.: Adsorption of phosphorus by Lake sediments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **32**, 514—518.
20. HENDRICKS, A. C. and SILVEY, J. K. G.: Nutrient ratio variation in reservoir sediments. J. Wat. Pollut. Control Fed. **45**, 490—497 (1973).
21. HEPHER, B.: On the dynamics of phosphorus added to fishponds in Israel. Limnol. Oceanogr. **3**, 84—100 (1958).
22. HERODEK, S. and OLÁH, J.: Primary production in the frozen Lake Balaton. Annal. Biol. Tihany **40**, 197—206 (1973).
23. HERODEK, S. and TAMÁS, G.: Primary production of phytoplankton in Lake Balaton April-September 1972. Annal. Biol. Tihany **40**, 207—218 (1973).
24. HOLDEN, A. V.: The removal of dissolved phosphate from lake waters by bottom deposits. Verh. Internat. Verein. Limnol. **14**, 247—251 (1961).
25. HUTCHINSON, G. E.: A treatise on limnology I. Wiley, New York (1957).
26. ILOSVAY, L.: A Balaton vizének kémiai viszonyai. A Balaton Tudományos Tanulmányozásának Eredményei. **1(6)**, 1—28 (1898).
27. JITTS, H. R.: The adsorption of phosphate by estuarine bottom deposits. Aust. J. Mar. Freshwater Res. **10**, 7—21 (1959).
28. JOHANNES, R. E.: Uptake and release of dissolved organic phosphorus by representatives of a coastal marine ecosystem. Limnol. Oceanogr. **9**, 224—234 (1964).
29. JOHANNES, R. E.: Uptake and release of phosphorus by a benthic marine amphipod. Limnol. Oceanogr. **9**, 235—242 (1964).
30. KÁRPÁTI, I.: A Keszthelyi-öböl hínárállományának térképezése és fitomassza-produkciójának mérése. Tájékoztató az állóvizek hidrológia feltárájáról. 1969 VITUKI (1970).
31. KÁRPÁTI, I.: Hínárállományok primér produkciójának kutatása a Szigligeti-öbölben. Tájékoztató az állóvizek hidrológiai feltárájáról. 1970 VITUKI (1972).
32. KORMONDY, D. J.: Concepts of ecology. Prentice Hall. Biol. Sci. Ser. p. 209 (1969).
33. KRAMER, J. R., HERBES, S. E. and ALLEN, H. E.: Phosphorus: analysis of water, biomass and sediment in Nutrients in natural waters. H. E. Allen and J. R. Kramer ed., Wiley-Interscience, p. 51—100 (1972).
34. KRASZINKOVA, V. L.: Himiceszkij szosztáv gruntov ozer Vuokszü, Otradnova i Szudekovszkovo Gosz. Naucsнок-Isszl. Inst. Ozerne, Recsny. Rübh. Horj. **79**, 165—168 (1972).
35. KUENZLER, E. J.: Dissolved organic phosphorus excretion by marine phytoplankton. J. Phycol. **6**, 7—13 (1970).
36. LEE, G. F.: Role of phosphorus in eutrophication and diffuse source control. Wat. Res. **7**, 111—128 (1973).
37. LESENYEI, J. and SZ-MUHITS, M. K.: A Balaton szennyezettségének vizsgálata. Hidrol. Közlöny **33**, 134—148 (1953).
38. McROY, C. P., BARSDATE, R. J. and NEBERT, M.: Phosphorus cycling in an eelgrass (*Zostera marina*) ecosystem. Limnol. Oceanogr. **17**, 58—68 (1972).
39. MOORE, H. B.: The muds of the Clyde Sea Area. I. Phosphate and nitrogen contents. J. Mar. Biol. Ass. U. K. **16**, 595—607 (1929—30).
40. MILLER, S.: Untersuchungen über den Sauerstoffgehalt des Balatonwassers. Magy. Biol. Kut. Munk. **2**, 157—160 (1929).
41. OLÁH, J.: Leaching, colonization and stabilization during detritus formation. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. **39**, Suppl. 105—127 (1972).
42. OLÁH, J.: A Balaton évi energia háztartása. Halászat Tud. Melléklet **1**, (1975).
43. OLSEN, S.: Phosphate adsorption and isotop exchange in lake muds. Verh. Internat. Ver. Limnol. **13**, 915—922 (1958).
44. OLSEN, S.: Phosphate equilibrium between reduced sediments and water. (Laboratory experiments with radioaktive phosphorus.) Verh. Internat. Verein. Limnol. **15**, 333—341 (1964).
45. OTSUKI, A. and WETZEL, R. G.: Coprecipitation of phosphate with carbonates in a marl lake. Limnol. Oceanogr. **17**, 763—766 (1972).
46. PETERSON, G. W. and COREY, R. B.: A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. **30**, 563—565 (1966).
47. PONYI, J., OLÁH, J. and FRANKÓ, A.: Organic matter and bacteria in the open water sediment of Lake Balaton. Annal. Biol. Tihany **39**, 141—148 (1972).

48. RYTHER, J. H., and DUNSTAN, W. M.: Nitrogen, Phosphorus, and eutrophication in coastal marine environment. *Science* 1971, 1008—1013 (1971).
49. SCHINDLER, D. W., ARMSTRONG, F. A. J., HOLMGREN, S. K. and BRUNSKILL, G. J.: Eutrophication of Lake 227, Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *J. Fish. Res. Board Canada* 29, 1763—1782 (1971).
50. SOMMERS, L. E., HARRIS, R. F., WILLIAMS, J. D. H., ARMSTRONG, D. E. and SYERS, J. K.: Determination of total organic phosphorus in lake sediments. *Limnol. Oceanogr.* 15, 301—304 (1970).
51. STANGENBERG-OPOROWSKA, K.: Forms of phosphorus in the bottom of carp ponds. *Acta Hydrobiol.* 12, 125—142 (1970).
52. STUMM, W. and LECKIE, J. O.: Proceedings of the International Water Pollution Research Conference. S. H. Jenkins, Ed. (Pergamon, New York) 1970, III-21/1 — III-26/16 (1970).
53. TESSENOV, U.: Lösungs-, Diffusions- und Sorptionsprozesse in der Oberschicht von Seesedimenten I. Ein Langzeitexperiment unter aeroben und anaeroben Bedingungen im Fliessgleichgewicht. *Arch. Hydrobiol. (Suppl.)* 33, 353—398 (1972).
54. TÓTH, L.: Reeds control eutrophication of Lake Balaton. *Water Research* 6, 1533—1539 (1972a).
55. TÓTH, L.: A Balaton hínarasodásának jelenlegi állapotáról. *Res. in Water Qual. and Techn.* 2, 16—25 (1972b).
56. TÓTH, L.: On the chemical composition of submerged aquatic plants in Lake Balaton. *Res. in Water Qual. and Techn.* 2, 48—55 (1972c).
57. VARGHA, L.: A Balaton és a Tihanyi Belső-tó vizének foszfor-tartalma. *Magy. Biol. Kut. Munk.* 7, 209—210 (1934).
58. WATTS, J. C. D.: Changes in available phosphate (Olsen's) in acid-sulphata pond muds from the Malacca area. *Malaysian Agric. J.* 46, 476—484 (1968).
59. WATTS, J. C. D.: Phosphate retention in acid-sulphate muds from the Malacca area. *Malaysian Agr.* 47, 187—202 (1969).