



TAVI ÜLEDÉKEK ÁSVÁNYAINAK FOSZFORTARTALMA

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Rác Kornél

Kémiai és Környezettudományi Doktori Iskola

Témavezető:

Dr. Pósfai Mihály

Egyetemi tanár

**Pannon Egyetem
Mérnöki Kar, Kémiai és Környezettudományi Doktori Iskola**

**Veszprém
2026**

Bevezetés

Kutatásom célja a tavak eutrofizációjában fontos szerepet játszó foszfor ásványfrakciókhoz való kötődésének meghatározása volt, mind a Balaton üledékében, mind a vízoszlopban.

Az eutrofizáció – azaz a vízi növényzet tápanyag-dúsulás miatti túlzott elszaporodása – egyik közvetlen következménye az algavirágzás. Meszes tavakban az alganövekedés fő korlátozó tápanyaga az oldott foszfor. A sekély, meszes tavak kiváló modellje a Balaton. Az 1980-as években bevezetett vízügyi intézkedések következtében a tó tápanyagterhelése csökkent, így az eutrofizáció mértéke is csökkent. 2019 nyarán azonban váratlan és intenzív algavirágzás következett be a Balaton nyugati területein, amelyet a következő években több kisebb virágzás követett. A 2019-es algavirágzást megelőzően nem mutattak ki a Balatont érő külső foszforterhelésben kiugró változást, ezért a virágzást belső folyamatoknak kellett kiváltania, azaz a foszfor feltehetően az üledékből szabadult fel. Feltételezhető, hogy az üledék redukciója vezetett a foszfor felszabadulásához.

A tavak üledékében a foszfor megkötődését általában sorozatos extrakciós módszerekkel vizsgálják. A módszer az oldhatóságuk alapján frakciókra bontja az üledék különböző foszforfázisait, majd az egyes frakciókat kvantitatívan értékeli. A Balatonhoz hasonló meszes tavak üledékében a foszfor jellemzően karbonátok, vas-oxidok, esetleg szilikátok felületéhez kötődik, vagy foszfátásványokban, például apatitban tárolódik. A klasszikus eutrofizációs modell szerint az üledék redukciójához köthető algavirágzás kialakulása a vas-oxidokon adszorbeált foszfor felszabadulásával magyarázható. Korábbi oldási soros vizsgálatok alapján a foszfor a balatoni üledékben elsősorban karbonátásványokhoz, kisebb részben vas-oxidokhoz kötődik, míg foszfátásványok, például apatit jelenlétét nem mutatták ki. Ugyanakkor a foszfor ásványtani speciációjáról jelenleg nem állnak rendelkezésre mai és közvetlen (nem oldási műveleteken alapuló) adatok.

A foszfortartalmú részecskék ásványtani jellemzése érdekében transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) módszereket alkalmaztam azon fázisok azonosítására és jellemzésére, amelyek foszfortartalma a mikroszkóphoz kapcsolt röntgen-spektrométerrel kimutatható. A TEM az oldási módszereknél közvetlenebb információt szolgáltat a tavi foszforgazdag részecskékről, azonban viszonylag magas a foszfor kimutatási határa ($\approx 0,2$ tömeg%). A vizsgált minták közé tartoztak i) Balatonból gyűjtött üledékminták, ii) algavirágzások idején a tóból gyűjtött lebegőanyag, iii) kis-balatoni üledékminták, valamint iv) laboratóriumi kicsapási és adszorpciós kísérletek termékei. A laboratóriumi kísérletek

célja a tóban lejátszódó folyamatok egyes részleteinek modellezése volt, elsősorban a vas-oxidok foszfor megkötésének vizsgálata érdekében.

Hipotézisek, célkitűzések

1.) A vas-oxidokon kötött foszfor szerepe a Balaton foszforciklusában

Feltételeztük, hogy a 2019-es algavirágzást az üledék redukciója váltotta ki, amely a vas-oxidokon kötött foszfor felszabadulásához vezetett. Vizsgálataim célja a balatoni üledék vas-oxid ásványaihoz kötött foszfor (adszorbeált vagy koprecipitált) jellemzése volt.

2.) Karbonátásványokon megkötött foszfor jellemzése

A balatoni üledék legnagyobb hányadát a karbonátásványok alkotják, azonban a karbonátokon kötött foszfor mennyisége és formája (felületi adszorpció vagy szerkezeti beépülés) nem teljesen ismert. Munkám során TEM módszerekkel kívántam jellemezni a karbonátok foszfortartalmát.

3.) Foszfortartalmú szemcsék jellemzése

A karbonát- és vas-oxid ásványokon kívül a szakirodalom alapján nem volt kizárható más, foszforban gazdag fázisok (például kalcium-foszfátok) jelenléte sem. Kutatásom további célja ezért a balatoni üledék foszfortartalmú részecskéinek felkutatása és azonosítása volt.

4.) Egyéb ásványok szerepe a foszforciklusban

A tavi ásványok a foszfor megkötése mellett más mechanizmusokon keresztül (katalízis, hidrolízis) is részt vehetnek a foszfor körforgalmában. Doktori munkám részét alkotta a foszforciklusban szerepet játszó egyéb ásványok jellemzése.

Új tudományos eredmények (tézisek)

1. Tavi környezetben a vas-oxidok foszfátadszorpciója kalcium-foszfát csapadékkiváláshoz vezethet.

Vizsgáltam a vas-oxidokon adszorbeált foszfát homogenitását. Az irodalomban leírt modellek alapján heterogén felületi adszorpcióra számíhattunk, azonban TEM módszerekkel goethit és lepidokrokit kristályokon homogén adszorpciót észleltem. A ferrihidrit esetén azonban az adszorpció inhomogén volt. A nagy foszforúságú göcpontokon felületi csapadékképződést tapasztaltam, amorf kalcium-foszfát keletkezett.

2. A Balaton üledékének vas-oxidon kötött foszfortartalma elhanyagolható.

Eredményeim megcáfolják a régóta fennálló nézeteket és saját hipotézisemet is a vas-oxidok balatoni foszforciklusban betöltött fontosságáról. A vas-oxid ásványokon megkötött foszfort az üledékes foszfor jelentős frakciójának és a 2019-es algavirágzás egyik fő okozójának tekintik. Elemzéseim azonban kimutatták, hogy nincs jelentős mennyiségű vas-oxid a Balaton üledékében, és a vas-oxidokon adszorbeált foszfor mennyisége elhanyagolható.

3. A kalcium-foszfátok jelentős szerepet játszanak a Balaton foszforciklusában.

Eredményeim ismételten ellentmondanak egy fennálló paradigmának, miszerint a Balaton üledéke nem tartalmaz autigén apatit és más kalcium-foszfát fázisokat. Kimutattam és jellemeztem nanoméretű Ca-foszfát fázisokat az üledékben, beleértve az apatitot is.

4. A mikrobiális polifoszfát fontos komponense a tavak foszforciklusának.

A polifoszfát tavi ökoszisztémákban betöltött szerepe már ismert, de munkámmal elsőként sikerült i) megmérni és összehasonlítani a polifoszfát részecskék összetételét a virágzó algákban és a sejteken kívül is, és ii) összefüggést kimutatni a polifoszfát zárványok, a sejten kívüli és az üledék foszfor gazdag részecskéinek eredete között.

5. A szmektit elősegíti a kalcium-foszfát nanorészecskék megkötődését és átalakulását.

Kimutattam, hogy a kalcium-foszfát és vas-oxid fázisok is agyagásványokhoz, elsősorban a szmektithez kötődnek az üledékben. Valószínű, hogy a szmektit elősegíti a legstabilabb kalcium-foszfát fázis, az apatit képződését, és ezzel a foszfor egy részét kivonja a tavi körforgásból.

Publikációs lista

- Rácz, K.**, Nyirő-Kósa, I., Kövér, R., Molnár, Zs., Somogyi, B., Kovács, A. W., Istvánovics, V., Pósfai, M. (2026). Biogenic origin and clay-assisted sink of 'visible phosphorus' in a shallow, calcareous lake. *Biogeochemistry*, (közlésre elfogadva)
- Pósfai, M., Molnár, Z., Nyirő-Kósa, I., **Rácz, K.**, Pekker, P., & Istvánovics, V. (2024). Carbonate mineral formation in the vicinity of blooming algae in a shallow lake. In *Geomicrobiology: Natural and Anthropogenic Settings* (pp. 261–280). Springer Nature Switzerland. (könyvfejezet) https://doi.org/10.1007/978-3-031-54306-7_13
- Rostási, Á., **Rácz, K.**, Fodor, M., Topa, B., Molnár, Z., Weiszbürg, T., & Pósfai, M. (2022). Pathways of carbonate sediment accumulation in a large, shallow lake. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1067105>
- Mukhtar, S.; Szabó-Bárdos, E.; Óze, C.; Juzsakova, T.; **Rácz, K.**; Németh, M.; Horváth, O. (2025) g-C₃N₄ Modified with metal sulfides for visible-light-driven photocatalytic degradation of organic pollutants. *Molecules*, 30, 253, <https://doi.org/10.3390/molecules30020253>
- Hidalgo, J. S., Mukhtar, S., Horváth, O., Kovacs, N., Hidalgo, L., Vilasó-Cadre, J. E., Reyes-Domínguez, I. A., **Rácz, K.**, Uddin, I., Galambos, I., Fort, C. I., & Turdean, G. L. (2025). Nanocomposite matrix based on gerhardtite-type copper (II) hydroxy nitrate and ZnO/CeO₂ nanoparticles - a sensitive platform for aminomethylphosphonic acid detection. *Electrochimica Acta*, 540, 147255. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147255>
- Hidalgo, J. S., Vilasó-Cadre, J. E., Tamás, K., Galambos, I., Reyes-Domínguez, I. A., Kovács, N., Hidalgo, L., Cuadrado, C., **Rácz, K.**, Boros, A., Machado-García, R., & Arada-Pérez, M. de los A. (2026). An ultrasensitive electrode modified with a molecularly imprinted PEDOT-TiO₂ nanocomposite for voltammetric atrazine detection in environmental samples. *Talanta*, 297, 128780. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128780>

Konferencia előadások és posztterek

- Rácz, K.**, Nyirő-Kósa, I., Pósfai, M. (2025). Pathways of phosphorus cycling and phosphate mineral precipitation in lake sediments, *12th Granada-Münster Discussion Meeting*, Münster, 2025.11. 26-28., előadás
- Rácz, K.**, Nyirő-Kósa, I., Kövér, R., Pekker, P., Pósfai, M. (2025) Foszforgazdag nanorészecskék a Balaton üledékében, *Magyarhoni Földtani Társulat Közép- és Észak-dunántúli Területi Szervezet, Szombathely, 2025.05.16-17. előadóülés*, előadás magyar nyelven
- Rácz, K.**, Nyirő-Kósa, I., Kövér, R., Molnár, Z., Pekker, P., Pósfai M. (2025) Foszforgazdag részecskék a Balaton vizében és üledékében, *Balaton tudományos műhelynap 2025*, Veszprém, 2025.05.13., előadás magyar nyelven
- Rácz, K.**, Molnár, Zs., Nyirő-Kósa, I., Istvánovics, V., Pósfai, M. (2023). 'Visible phosphorus' in shallow, calcareous Lake Balaton (Hungary), *Goldschmidt 2023*, Lyon, 2023.07.09-14., előadás
- Rácz, K.**, Molnár, Zs., Pósfai, M. (2022) Distribution and composition of phosphorus-bearing particles in lake sediments, *9th Granada-Münster Discussion Meeting*, Granada, 2022.11.30-12.02, poszter

Közreműködések konferencia előadásokban és posztterekben

- Nyirő-Kósa, I., Molnár, Zs., **Rácz, K.**, Pósfai, M. (2025). Carbonate phase transitions affected by clay minerals and environmental factors: results from a mesocosm experiment, *12th Granada-Münster Discussion Meeting*, Münster, 2025.11. 26-28. előadás
- Staicu, L. C., Cosmidis, J., **Rácz, K.**, Stolz, J., Pósfai, P. (2025). Insight into biogenic arsenic sulfides: the case of extracellular respiration, *GMBN 2025*, London, 2025.10.07-08., előadás
- Nyirő-Kósa, I., **Rácz, K.**, Molnár, Zs., Pósfai, M. (2025). Mesocosm experiment on carbonate formation in algal blooms, *Goldschmidt 2025*, Prága, 2025.07.06-11., poszter
- Proroková, E., **Rácz, K.**, Falteisek, L., Mikuš, T. (2025). Nanocrystalline features of birnessite, a layered Mn oxide, with high Ca and Zn content, *Goldschmidt 2025*, Prága, 2025.07.06-11., poszter
- Pósfai, M., Nyirő-Kósa, I., Molnár, Zs., **Rácz, K.**, Pekker, P. (2025) Algavirágzások és a karbonátásványok képződésének összefüggései a Balatonban, *Magyarhoni Földtani Társulat Közép- és Észak-dunántúli Területi Szervezet, Szombathely, 2025.05.16-17. előadóülés*, előadás magyar nyelven
- Pósfai, M., **Rácz, K.**, Molnár, Z., Nyirő-Kósa, I., Kövér, R., Pekker, P., Istvánovics, V. (2024). Carbonate formation, particulate phosphorus and algal blooms: Sediment minerals affect life in a shallow lake, *Joint 6th Central European Mineralogical Conference and 9th Mineral Sciences in the Carpathians Conference*, Visegrád, 2024.09.02-04., előadás
- Nyirő-Kósa, I., Molnár, Z., **Rácz, K.**, Pósfai, M. (2024). Modeling carbonate formation in Lake Balaton on a mesocosm scale. *Joint 6th Central-European Mineralogical Conference and 9th Mineral Sciences in the Carpathians Conference*, Visegrád, 2024.09.02-04., előadás

- Nyirő-Kósa I., Molnár Z., **Rácz K.**, Pósfai M. (2024). Balatoni karbonátkiválás mezokozmosz léptékű modellezése. Magyar Mikroszkópos Társaság Konferenciája, Siófok, 2024.05.15-17., előadás magyar nyelven
- Pósfai M., **Rácz K.**, Molnár Z., Nyirő-Kósa I., Kövér R. (2024). Foszforgazdag nanorészecskék a Balaton vizében és üledékében. 19. Téli Ásványtudományi Iskola, Veszprém, 2024.01.18-19., előadás magyar nyelven
- Nyirő-Kósa, I., Molnár, Z., **Rácz, K.**, Pósfai, M. (2024). Modeling of carbonate formation in Lake Balaton at a mesocosm scale. 19. Téli Ásványtudományi Iskola, Veszprém, 2024.01.18-19., előadás magyar nyelven
- Pósfai, M., **Rácz, K.**, Molnár, Z., Nyirő-Kósa, I., Kövér, R., Somogyi, B, Kovács, A., Pekker, P., Istvánovics, V. (2023). Formation of carbonate minerals and phosphorus-rich nanoparticles in association with algal blooms in Lake Balaton. 19th World Lake Conference, Balatonfüred, 2023.11.07-10., előadás
- Pósfai, M., Molnár, Zs., **Rácz, K.**, Pekker, P. (2022). Carbonate precipitation and transformation in a shallow lake during algal blooms and in the sediment. Granada - Münster Discussion Meeting #9, Granada, 2022.11.30-12.02., előadás
- Pósfai, M., Molnár, Zs., **Rácz, K.**, Pekker, P., Istvánovics V. (2022). Precipitation and transformation of carbonate minerals in Lake Balaton, *Geochemistry and Mineralogy of Carbonate Minerals Workshop*, Veszprém, 2022.07.04-05., előadás
- Pekker, P., Molnár, Zs., Kristály, F., Dódony, I., **Rácz, K.**, Pálfi, I., Magyar, E., Pósfai, M., (2022). STEM study of Ca-Mg ordering on atomic scale in protodolomite (experimental aspects and results), *Geochemistry and Mineralogy of Carbonate Minerals Workshop*, Veszprém, 2022.07.04-05., előadás
- Molnár, Zs., **Rácz, K.**, Pekker, P., Dódony, I., Istvánovics, V., Pósfai, M. (2022). Relationships between minerals and microorganisms in Lake Balaton. Annual Meeting of the Hungarian Microscopy Society, Siófok, 2022.05.05-07, előadás magyar nyelven
- Molnár Zs., Pekker P., **Rácz K.**, Dódony I., Istvánovics V., Pósfai M. (2021). Karbonátásványok képződése a Balatonban és lehetséges szerepük a tó foszfor körforgalmában. LXII. Hidrobiológus Napok, Tihany, 2021.10.06-08., előadás magyar nyelven
- Pósfai, M., Molnár, Zs., Pekker, P., **Rácz, K.**, Dódony, I., Pálfi, I., Kristály, F., Meister, P., Frisia, S., Magyar, E. (2021). Protodolomite: structure and formation in lakes. Goldschmidt2021, online, 2021.07.04-09. előadás.