

Tanári Kártya

Foszfor újrahasznosítása szennyvízből



Tartalom

Bevezető	2
Háttérinformáció	2
Tanulási eredmények	6
A kulcskompetenciák európai referenciakerete	7
Az Egyesült Nemzetek Szervezete fenntartható fejlődésre vonatkozó céljai	9
Tartalom – Elméleti alapelvek	10
A laboratóriumi eljárás	10
A tanulási folyamat lépései	11
Értékelés	11
A Tanulói kártyák leírása	12
Felhasznált Irodalom	12
Köszönetnyilvánítás	13

Tanári Kártya

Bevezető

Az emberi kiválasztás termékeként képződő vizelet a városi szennyvizek egyik összetevője. A vizelet az egyik leggazdagabb és legkönnyebben hozzáférhető **foszfor-** és **nitrogénforrás** a struvit (húgykő) előállításához. Ez az anyag egy olyan bázikus kémhatáson történő kicsapási reakcióval nyerhető, amelyet a reakció magnéziumfüggése is elősegít.

Az eszköztár laboratóriumi tevékenységeit **15-19 éves** tanulóknak tervezték. A laboratóriumi tevékenység egy, az oktató irányításával megvalósuló elméleti oktatási és két gyakorlati szakaszból áll. A célja az, hogy a (laborban szintetizált) szennyvizből kivont **struvit formájában foszfor-visszanyerést** valósítsunk meg, általánosan hozzáférhető anyagok felhasználásával. A labortevékenység két modulból áll:

1. Modul: struvit előállítása szintetikus szennyvíz oldatból, figyelembe véve a pH hatást és a felhasznált reagensek koncentrációját.

2. Modul: egyszerű -víztisztító berendezés építése szintetikus szennyvizekből történő struvit kinyerésére és működtetése. A felhasznált anyagok barkácsáruházakban beszerezhetők. A kísérlet célja a **szennyvizből struvit formájában történő P visszanyerés** bemutatása, általánosan hozzáférhető anyagok felhasználásával. A kísérlet felhívja a tanulók figyelmét a szennyvíz újrahasznosítására a természeti erőforrások kiaknázásának mérséklése érdekében.

Ezen túlmenően a diákokat arra ösztönzi, hogy laboratóriumi tevékenységeken keresztül megtanulják, hogy a szennyvizek hatékony tápanyagforrást jelentenek a mezőgazdasági és a környezet számára. Végül a laboratóriumi gyakorlat fejleszti a tudományos kísérleti eszközök megfelelő és biztonságos használatát, a megfigyelési készségeket, a mérések és a tudományos eljárások végrehajtásához szükséges készségeket.

A laboratóriumi tevékenység fejleszti a tanulók azon képességét is, hogy hatékonyan tudjanak együttműködni összetett feladatok elvégzése során, hogy a projektmunkában vegyenek részt, különböző feladatokat lássanak el, valamint hogy bekapcsolódjanak a gondolatmenetekbe és reagáljanak azokra.

További információk ezen a linken érhetők el: <https://ec.europa.eu/easme/en/horizon-2020-societal-challenge-climate-actionenvironment-resource-efficiency-and-raw-materials>

Kulcsszavak:

fenntarthatóság, újrahasznosítás, mezőgazdaság, szennyvíz, körforgásos gazdaság

Háttérinformáció

A **foszfor-** és **foszfát tartalmú kőzeteket kritikus nyersanyagként tartják számon**. Ezek olyan nyersanyagok, amelyek gazdaságilag és stratégiailag fontosak az európai unió gazdasága számára, de ellátásukkal kapcsolatban nagy kockázat merül fel. A **foszfor (P)** minden élő szervezet növekedéséhez nélkülözhetetlen makrotápanyag. Az ásványkincskészletek fokozatos kimerülését a folyamatos emberi kitermelés okozza. A foszforásványok legjelentékenyebb előfordulásai Kínában, Marokkóban, az Egyesült Államokban és

Tanári Kártya

Oroszországban találhatóak (U.S. Geological Survey, 2017). A foszforitok nagy része üledékes (a kitermelés kőzetek 80-90%-a), kisebb része kiömlési, magmás kőzet (a kitermelés 10-20%-a), melyekből a foszfort különböző eljárásokkal kivonják.

A foszfátkőzet kitermelése folyamatosan növekszik. Globális szinten 2017-re a foszfátkőzet kitermelése elérte a 35,7 kg/fő értéket. A feldolgozott foszfort elsősorban műtrágyagyártásra használják, az élelmiszerek iránti növekvő globális kereslet miatt (Stewart et al., 2005). A mezőgazdaság jelenleg a foszfátkőzetből származó foszforra épül, amely nem megújuló erőforrásnak számít. A foszfátok mindössze 17%-a származik megújuló forrásokból, például iszapból, trágyából, élelmiszer-maradványokból és szennyvízből. A globális foszfortartalékok 50-100 éven belül kimerülnek, miközben a foszfor iránti kereslet várhatóan jelentősen növekedni fog. A foszfortermelés globális csúcsa 2030 körül jelentkezik. A műtrágya költsége várhatóan emelkedik majd, miközben a foszfáttartalmú kőzetek el fognak fogyni (Cordell et al., 2009).

Foszfátműtrágyák hiányában drasztikusan csökkenni fog az egységnyi termőfelületre eső termés hozam. A vegyiparban és a fegyveripar 1,2 millió tonna elemi foszforra alakított (P4-ként számított), foszfátkőzetet használnak fel.

Az így nyert foszfor helyettesíthető olyan "másodlagos" forrásból, és amelyet a hasznosítási folyamatok nyersanyagáramaiából nyernek vissza. A foszfor visszanyerése egy gyakorlatban alkalmazott újrahasznosítási folyamat, ami az eutrofizáció megelőzését is segíti (Joint Research Centre, 2018).

A foszfor fenntartható felhasználására való áttérés számos lépésből áll. Az újrahasznosítási potenciál jelentős része a tisztítási folyamatok végtermékeinek kiaknázásából származik. Az Európai Unió közössége másodlagos forrásnak tekinti a szennyvízkezelésből származó maradékok mezőgazdasági újrafelhasználását, mint például a foszfát-visszanyerés „legjobb gyakorlatát”.

A két legfontosabb foszforforrást a szennyvíztisztító telepek és az állattartó létesítmények jelentik. A szennyvíz tisztítás nélkül a környezetbe kerülve szennyezést (eutrofizációt) okoz a nagy mennyiségű foszfor és nitrogéntartalma miatt. Ezért a szennyvíztisztító telepek fontos szerepet játszanak a tápanyagok (az ammónia és foszfor) kivonásában és visszanyerésében.

A foszfor kristályos magnézium-ammónium-foszfát (MAP), más néven struvit formájában nyerhető vissza a szennyvízből, ami környezetbarát műtrágyának számít.

Jogszabályok: az EU műtrágya-szabályozása csak az elsődleges ásványi eredetű foszfortermékeket ismeri el műtrágyának, a visszanyert foszforterméket még nem lehet műtrágyaként címkézni (EU 2003). Jelenleg folyik a jogszabály felülvizsgálata annak érdekében, hogy belevegyék a visszanyert foszformaradékokat, pl. a magnézium-ammónium-foszfátot (MAP), más néven struvitot (Európai Bizottság, 2016).

Mezőgazdaság: a struvit formában visszanyert foszfor biológiailag nagymértékben (kb. 94%) hasznosítható a növények számára, ezért közvetlenül használható lassú hatóanyag-leadású műtrágyaként.

Környezet: a struvit környezetbarát, mert csökkenti az eutrofizációs folyamatokat és az ásványi foszfor-műtrágyákból származó üvegházhatást okozó gázok kibocsátását

Tanári Kártya

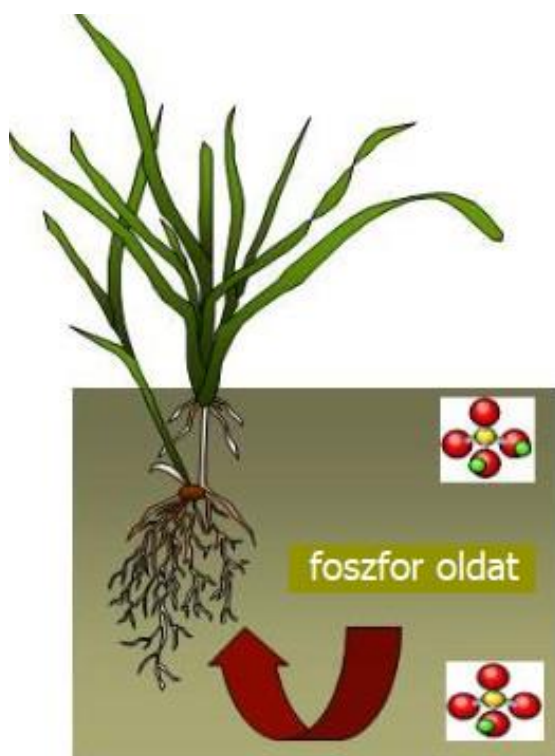
Foszfor a mezőgazdaságban

A foszfor fontos elem a növények és az állatok életében. Alapvető összetevője az ATP-nek, a DNS-nek, RNS-nek és foszfolipideknek (a sejtmembránok fontos összetevőinek).

Fontos szerepe van:

- a fotoszintézisben,
- a nitrogén megkötésében,
- a virágzás, termés és magképzés folyamataiban,
- az érlelésben és termésminőség kialakításában.

A talajban a foszfor nem minden formája hozzáférhető biológiailag a növények számára, ezért kritikus szerepet játszik a mezőgazdaságban. A talaj összes foszfortartalma 0,1-0,2%, melynek kb. fele ($\approx 50\%$) szervetlen formában és kb. 15-80% szerves formában van jelen. A foszfor nagyon kis mértékben oldódik, kb. 0,03 mg foszfor/kg mértékben.



A talajban és a vízben a foszfor oldható formában van jelen, pl. ortofoszfát-ionok: $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$, HPO_4^{-2} és PO_4^{-3} .

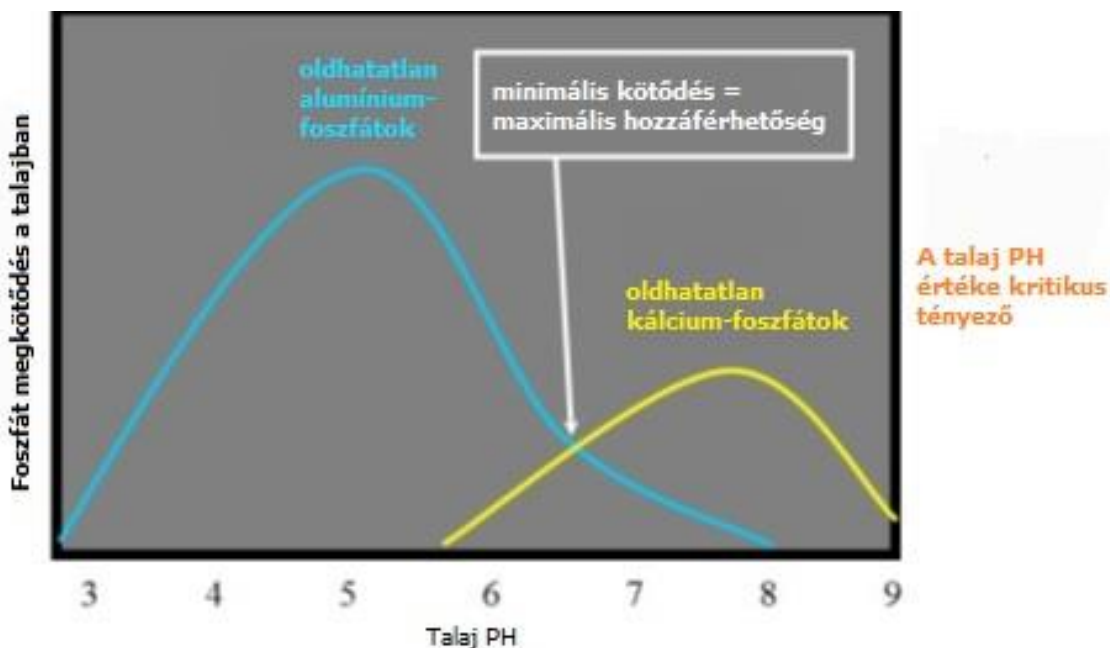
Savas kémhatás (7-nél kisebb) esetén a **primer ortofoszfát** ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$) van túlsúlyban. Ez a molekula két hidrogénatomot tartalmaz, amely két oxigénatomhoz kapcsolódik. A savas környezetet többségben lévő hidrogénatomok jelzik.

Lúgos (7-nél nagyobb) **pH-érték** esetén a **másodlagos ortofoszfát-ion** (HPO_4^{2-}) a gyakoribb előfordulású. Ez a molekula egy hidrogénatomot tartalmaz, ami a lúgos környezetet tükrözi. Enyhén bázikus talajban ($\text{pH} = 7,2$) mindkét ion egyenlő arányban van jelen.

Az oldhatóságot – és így a biológiai hozzáférhetőséget is – a talaj számos tulajdonsága befolyásolja, mint például a jelenlévő **Ca**, **Al** és **Fe** mennyisége, a **szervesanyag-tartalom** vagy a **pH-érték**. Ezek közül a pH a **legkritikusabb tényező**.

A foszfor elérhetőségét csökkentő reakciók a talaj pH-értékének minden tartományában előfordulnak, de nagyon kifejezettek lehetnek lúgos ($\text{pH} > 7,3$) és savas talajokban ($\text{pH} < 5,5$) (1. ábra). A **foszfor elérhetősége** általában **6,0 és 7,0 közötti pH-tartományban maximális** (1. ábra).

Tanári Kártya



1. Ábra: A foszfor viselkedése a talaj különböző pH-értékein. A foszfor csak semleges pH-n hozzáférhető biológiailag.

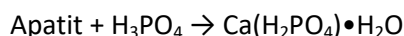
Foszforforrások a termesztett növények számára

Napjainkban a foszfort többnyire foszfátkőzetek bányászatával nyerik. A foszfátkőzetek kontinentális talapzatok tengeri környezetében vagy magmás lerakódásokban keletkeznek, főleg kőzetlemezek széleinél és hasadékvonalakban.

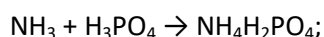
A **foszfátkőzetet** foszforsavvá alakítják. A foszfor-műtrágya túlnyomó részét foszfátkőzet savval (H_2SO_4 , HNO_3) való reakciója során gyártják (6. ábra).

A foszfor-műtrágya fő kiindulási anyagai:

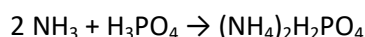
- Az **apatit** ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) a fogak és a csontok alkotóeleme. Savban oldva oldható foszfor-műtrágyává alakul:



- Az **ammónium-foszfátot** 1 mol ammónia és 1 mol foszforsav reakciójával állítják elő:



- A **di-ammónium-foszfátot** úgy állítják elő, hogy 2 mol ammóniát reagáltatnak 1 mol foszforsavval:



A foszfátkőzetek bányászata révén kiaknázható foszfor mennyisége azonban korlátozott és nem megújuló erőforrásnak számít. Emiatt a jövőben a foszfátműtrágyák használatát várhatóan korlátozni fogják.



Tanári Kártya

Vannak-e más foszforforrások?

A két legfontosabb foszforforrást a szennyvíztisztító és az állattartó telepek jelentik. A szennyvíz tisztítás nélkül a környezetbe kerülve szennyezést (eutrofizációt) okoz a magas foszfor és nitrogéntartalma miatt. Ezért a szennyvíztisztító telepek fontos szerepet játszanak a tápanyagok (az ammónia és foszfor) eltávolításában és visszanyerésében.

A foszfor kristályos magnézium-ammónium-foszfátként (MAP), más néven struvitként ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), vagy pellet formájú összetételben nyerhető vissza a szennyvízből, ami környezetbarát műtrágyának számít.

Struvit

A struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) egy fehér por alakú ásványi anyag, amelyet az ammónium, a foszfát és a magnézium egyszerű kicsapási reakciójával nyernek (az alábbi ábra szerint).



A struvit előállítása települési szennyvizekből

A struvit a következő, a növények számára kedvező tulajdonságokkal rendelkezik:

- **biológiai hozzáférhetőség:** a struvitban lévő N, P és Mg könnyen felszívódik a növény számára
- **lassú felszabadulás:** alacsony oldhatósága miatt lassú, de egyenletes tápanyagellátást garantál
- **nagy tisztaság:** a vizeletben előforduló gyógyszerek nem válnak ki a struvittal.

1. Függelék – Foszfor a mezőgazdaságban

Tanulási eredmények

A feladat végén a tanulók:

- tudatosítják a foszfor fontosságát (illetve, hogy milyen tényezők teszik fontossá)
- tudatosítják, hogy a foszfor újrahasznosítása a szennyvizekből csökkenti a természeti erőforrások kiaknázását
- Ismerni fogják a PH hatását a foszfor oldhatóságára és a foszfor oldatban előforduló formáit
- Ismerni fogják a foszforforrásokat

Tanári Kártya

A kulcskompetenciák európai referenciakerete

Szövegértési kompetencia
S1. Képesség szóbeli és írott fogalmak, érzések, tények vagy vélemények megértésére és értelmezésére.
S2. Képesség fogalmak, érzések, tények vagy vélemény írásos és szóbeli kifejezésére.
S4. Képesség bármilyen helyzetben történő megfelelő és kreatív interakcióra.
Idegennyelvi kommunikáció
S1. Képesség szóbeli és írott fogalmak, érzések, tények vagy vélemények megértésére és értelmezésére.
S2. Képesség fogalmak, érzések, tények vagy vélemény írásos és szóbeli kifejezésére.
S4. Képesség bármilyen helyzetben történő megfelelő és kreatív interakcióra.
S5. Szókincs, nyelvtan és nyelv ismerete.
S7. A munkaterületnek megfelelő szaknyelv használatának képessége.
Matematikai, természettudományi és technológiai kompetenciák
S1. Problémamegoldás során minden helyzetben képesség a konstruktív gondolkodásra.
S4. Új területek új problémáinak megoldására való felkészültség.
S6. Képesség mennyiségi adatokból kvalitatív információk kinyerésére.
S8. Képesség kísérleti és megfigyeléses vizsgálatok tervezésére és az azokból származó adatok elemzésére.
S9. Képesség komplex optimalizálási és döntéshozatali problémák megfogalmazására és a problémák eredeti kontextusában a megoldások értelmezésére.
Digitális kompetencia
S1. Az információs technológia kritikus használata a munka során.
S2. Számítástechnikai alapismeretek.
S3. Az IKT mindennapi életben betöltött szerepének, lehetőségeinek és kockázatainak megértése.
S4. Technológiai eszközök, gépek használatának és kezelésének képessége.
A személyes, a szociális és a tanulás elsajátítására vonatkozó kompetencia
S1. Különböző tanulási módok alkalmazásának és tartós követésének képessége.
S2. A rendelkezésre álló lehetőségek azonosítása.
S3. Képesség a karriercélok eléréséhez szükséges folyamatok azonosítására, új ismeretek, készségek és képesítések megszerzésére.


Tanári Kártya

Állampolgári kompetenciák
S1. Más emberekkel történő hatékony interakcióra való képesség.
S2. Képesség a változó helyzethez való alkalmazkodásra, a rugalmasság, képesség nyomás alatti munkavégzésre.
S3. Képesség a hatékony munkavégzésre és más csoporttagokkal való együttműködésre.
A kulturális tudatosság és kulturális kifejezőkészség kompetenciája
S1. A helyi, nemzeti, európai kulturális örökség és a világban elfoglalt helyük tudatosulása.
S2. A kortárs kultúra alapvető ismerete.
S3. A kulturális sokszínűség megértése.
Vállalkozói kompetencia
S1. Képesség ötletek megvalósítására.
S2. Kreativitás / innováció.
S3. Feladatok tervezésének és irányításának képessége.
S4. Függetlenség, motiváció és elszántság.

Tanári Kártya

Az Egyesült Nemzetek Szervezete fenntartható fejlődésre vonatkozó céljai

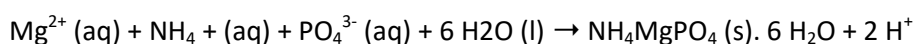
A Fenntartható fejlődési célok egy jobb és fenntarthatóbb jövő megvalósításának tervezetét jelentik mindenki számára. Azokkal a globális kihívásokkal foglalkoznak, amelyekkel szembesülünk, beleértve azokat, amelyek a szegénységgel, az egyenlőtlenséggel, az éghajlatváltozással, a környezetromlással, a békével és az igazságossággal kapcsolatosak. Ehhez a tevékenységhez a következő célok kapcsolódnak:

		Enable access to basic services		Equal access to global expertise	
		Safe medical devices		Sustainable urbanization	
		Access to education			Responsible consumption and production
		Less hardship, more opportunities			Strengthen resilience, reduce disaster impact
		Safe and affordable water			Reduce marine pollution
		Energy – the golden thread			Sustainable use of terrestrial ecosystems
		Safety of workers and economic growth			Promote peaceful and inclusive societies
		Resilient infrastructure and sustainable industrialization			Better access to technology and innovation

Tanári Kártya

Tartalom – Elméleti alapelvek

A vizelet a városi szennyvizek magas foszfor-és nitrogén-tartalmú alkotórésze. A foszfor és a nitrogén ionos formában (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} és NH_4^+) van benne jelen, melyek különböző eredetű biológiai makromolekulák (fehérjék, nukleinsavak, foszfolipidek) bomlása során keletkeznek. Megfelelő kémiai körülmények között a foszfor és a nitrogén egymással reakcióba lépve **struvit** nevű ásványt képezik. A struvit lúgos pH-n képződik, kiválását pedig a reakció magnézium-függősége segíti (lásd a reakciót alább):



a pH-t 8,0-ra állítjuk be

A struvit akkor képződik, ha Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} **ekvimoláris mennyiségben** (1:1:1) van jelen.

1. Függelék – Foszfor a mezőgazdaságban

A laboratóriumi eljárás

1. Modul – A struvit kivonása

A kísérlet célja, hogy a szintetikus szennyvízből **struvit kinyerésével foszfor-újrahasznosítást** valósítsunk meg. Három reagens szükséges a struvit kiváláshoz lúgos pH-n: magnézium (Mg^{2+}), ammónium (NH_4^+) és foszfát (PO_4^{3-}). A struvit körülbelül 3 óra alatt csapadékot képez fehér por formájában. Az így nyert struvit felhasználható kerti vagy cserepes növények trágyázására. Ez a tapasztalat tudatosítja a tanulóknak a természeti erőforrások kiaknázásának mérséklése céljából a szennyvizek újrahasznosításának fontosságát, és következőképp a környezetre gyakorolt előnyös hatását.

2. Modul – A víztisztítás

A kísérlet célja egy egyszerű víztisztító berendezés megépítése és működtetése a laboratóriumban struvit szintetikus szennyvizekből történő kinyeréséhez. A felhasznált anyagok barkácsáruházban beszerezhetők. A részletes kísérleti eljárást, a szükséges eszközök és anyagok listáját és a biztonsági tudnivalókat a 2. modul tartalmazza.

Tanári Kártya

A tanulási folyamat lépései

- 1. lépés (30 perc):** a tanárok egy előkészített PowerPoint prezentáció vagy kisfilm segítségével bevezetik a témát és bemutatják az 1. modul tapasztalatait.
- 2. lépés (60 perc):** a tanulókat (lehetőség szerint) 3-4 fős csoportokba osztják. Minden csapat az 1. modulban kijelölt feladatot végzi el a csapat céljának elérése érdekében.
- 3. lépés (15 perc):** minden csoportnak meg kell osztania a többiekkel a laboratóriumi tevékenység egyes szakaszaiban elért eredményeiket a kisfilm vagy a laboratóriumi jegyzőkönyvek felhasználásával.
- 4. lépés (15 perc):** a tanárok rövid PowerPoint prezentációt tartanak a 2. modulban szereplő víztisztító részeinek összeszereléséről.
- 5. lépés (60 perc):** A tanulókat (lehetőség szerint) 3-4 fős csoportokra osztják. Minden csoportnak össze kell állítania a víztisztító egy részét a 2. modul alapján.

Értékelés



Írd fel a foszfor különböző alakjait az oldatban!

Válasz: a foszfor oldott formája a HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- és PO_4^{3-} ionok.

1. Milyen ionok vesznek részt a struvit képződésében?

Válasz: magnézium (Mg^{2+}), ammónium (NH_4^+) és foszfát (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- és PO_4^{3-}) ionok.

2. Miért képződik struvit a szennyvíztisztítási folyamatban?

Válasz: a szennyvíz nagy mennyiségű ammóniumiont (NH_4^+), foszfátiont (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- és PO_4^{3-}) és magnézium iont (Mg^{2+}) tartalmaz, amelyek mikroorganizmusok, makromolekulák, detergensok és vegyi anyagok bomlása során keletkeznek, és ezek kölcsönhatásba lépve egymással struvit nevű ásvány keletkezik.

3. Mi a különbség a szerves foszfor és az ásványi foszfor között?

Válasz: a szerves foszfor állati és növényi maradványok, például inozitol-foszfátok, nukleinsavak és foszfolipidek származéka. Mikroorganizmusok mineralizálják és ásványi vegyületekké, pl. ortofoszfátokká alakítják. Az ásványi foszfor üledékes vagy magmás kőzetekből származik.

4. Milyen hatással van a pH a foszfor oldhatóságára?

Válasz: a foszfor oldhatóságát csökkentő reakciók minden pH-tartományban előfordulnak, de lúgos ($\text{pH} > 7,3$) és savas ($\text{pH} < 5,5$) körülmények között ezek nagyon kifejezettek lehetnek, bizonyos kationok jelenlététől függően.

5. Ismertesse a laboratóriumi kísérletek során használt nátrium-hidroxid szerepét!

Tanári Kártya

Válasz: a nátrium-hidroxidot az oldat pH-értékének módosítására használják annak érdekében, hogy beállítsák a struvit kicsapódásának elősegítéséhez az ideális pH-értéket.

6. Milyen halmazállapotot vesz fel a csapadék a szárítás után?

Válasz: a struvit fehér szilárd anyag formájában jelenik meg.

7. Miért fontos a magnézium a foszfor visszanyeréséhez?

Válasz: a magnézium egy kétértékű kation, amely jelen van a szennyvízben és a foszfát ionokkal (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- és PO_4^{3-}) kölcsönhatásba lépve struvitot képez.

8. Miért használtunk szelepet az oldat közvetlenül a szűrőn való áthaladásának megakadályozására?

Válasz: a struvit kicsapása több órát vesz igénybe, ezért az oldatot a víztisztító berendezésben kell hagyni a reakció befejeződéséhez.

A Tanulói kártyák leírása

Az eszköztárhoz kapcsolódó tanulói kártyák listája:

1. Tanulói Kártya – 1. Modul – A struvit kivonása
2. Tanulói Kártya – 2. Modul – A víztisztítás

Felhasznált Irodalom

- European Commission, 2016. Circular Economy Package: Proposal for a Regulation of the European Parliament of the Council Laying Down Rules on the Making Available on the Market of CE Marked Fertilizing Products and Amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009.
- European Union, 2003. Regulation (EC) No 2003/2003 of the European parliament and of the Council of 13 October 2003 relating to fertilizers. Off. J. Eur. Union L304, 1e194Cordell D. et al. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change 19, 292-305
- Melia P.M. et al. (2017). Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater. Chemosphere 186, 381-395.
- Stewart W.M., et al. (2005). The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. Agronomy Journal, 97, 1-6.
- AIAM (<http://www.aiamitalia.it/>)
- Weschool (<https://library.weschool.com/>)
- Science Learn (<https://www.sciencelearn.org.nz/>)
- Treccani (<https://www.treccani.it/>)
- Khan Academy (<https://www.khanacademy.org/>)
- U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January (2017)

Tanári Kártya

<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/phosphate-rock-statistics-and-information> .

- Joint Research Centre (European Commission), (2018). Critical raw materials and the circular economy. Background report - Study.
<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d0c609d2-f4ef-11e7-be11-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/sourcesearch>
- Handbook of Environmental Materials Management Ed. Chaudhery Mustansar Hussain, Springer, Cham, January 2018, DOI <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-319-58538-3>
- Website: https://nutriman.net/farmer-platform/technology/id_252

IGLG



Köszönetnyilvánítás

A Bolognai Egyetem köszönetet mond a Liceo Galvani középiskola (Bologna) 2018/2019 tanév 3M osztálya tanulóinak és Prof. Maria Franca Faccendanak az eszköztár fejlesztése és tesztelése során nyújtott értékes együttműködésért.