

Lassú homokszűrő és fordított ozmózis technológiai sor hatékonyságának vizsgálata

Salamon Endre, Dalkó Ilona, Tafner Kitti, Papp Tamás, Goda Zoltán,
Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víztudományi Kar, Vízellátási és Környezetmérnöki Intézet, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky utca 12-14.

Kivonat

A Víztudományi Kar Vízellátási és Környezetmérnöki Intézetében a természetes és a mesterséges vízkezelési folyamatok egymásra hatását demonstráló AquaNES H2020 projekt keretében a parti szűrést követő fordított ozmózis ivóvíztisztítás jellemzőit vizsgáltuk. Az itt közölt eredmények a fordított ozmózis berendezés két éves üzemét mutatják be. Annak ellenére, hogy a fordított ozmózis megoldás alkalmazása a parti szűrés után hazai viszonylatban jelenleg kevés gyakorlati jelentőséggel bír, a vizsgált elrendezés számos előnyös tulajdonságot is ígér. Az üzem ideje alatt vizsgáltuk a lassúszűrő rétegben kialakuló nyomásviszonyokat, a lassú szűrés hatásfokát, a nyersvíz és a fordított ozmózis berendezésre táplált szűrt víz minőségét. A 100 dm³/h permeátum kapacitású fordított ozmózis berendezés vizsgálata során adott kezdő koncentráció oldali fojtás és transzmembrán nyomás mellett vizsgáltuk a membrán eltömődését, a fluxus és a kihozatal csökkenésének ütemét a betáplált víz minőségének függvényében.

A lassú szűrt víz kedvező minősége és a membrán elfogadható hosszúságú szűrés ciklusa, hosszan tartó stabil üzeme a közeli jövő egyik potenciális ivóvíz tisztítási módját ígéri és számos minőségi és mennyiségi probléma megoldását is lehetővé teszi. Az alkalmazás tanulmányozandó kritikus pontjai a fordított ozmózis membrán működésén túl a lassú szűrés folyamat hatásfoka, a fordított ozmózis membránt védő mikroszűrő üzemelési kérdései, illetve a sótalanított víz visszaszórása és a fogyasztók általi elfogadhatósága lesznek a jövőben.

Kulcsszavak

parti szűrés, lassú szűrés, fordított ozmózis, membrán, RO, permeabilitás, AquaNES.

Slow filtration – reverse osmosis drinking water treatment scheme demonstration

Abstract

We have studied the characteristics of reverse osmosis drinking water treatment following bank filtration in the AquaNES H2020 project at the Institute of Water Supply and Environmental Engineering of the Faculty of Water Sciences. The project aims to demonstrate synergies between natural and engineered systems. The data described in this article is the result of two years operation. In spite of that the application of reverse osmosis after bank filtration under the conditions in Hungary has no use whatsoever, the tested configuration shows some beneficial properties. Over the course of the operation we examined the pressure distribution in the slow filter media, the efficiency of the filtration, the quality of the raw and filtered water fed to the reverse osmosis. The analysis of the reverse osmosis equipment with 100 dm³/h permeate flow capacity was conducted by setting an initial transmembrane pressure and throttle on the concentrate side, and monitoring the decline in the membrane flux and recovery ratio under different water quality conditions.

The favorable quality of the slow filtered water, the manageable fouling and long term stable operation of the membrane promises a fine drinking water treatment method to be applied in the near future, which can also solve quality and quantity problems. Critical points to be studied in the future will be the stability of the slow filtration, the operating conditions of the safety micro filter, the carbonation of the desalinated water and its acceptance among consumers.

Keywords:

Bank filtration, slow filtration, reverse osmosis, RO, membrane, permeability, AquaNES.

BEVEZETÉS

A fordított ozmózis berendezéseket a világban manapság már üzemszerűen, nagy kapacitásokkal is alkalmazzák a közműves ivóvíz előállításra, elsősorban tengervíz sótalanításra (*Schaefer és társai, 2005*), illetve ott, ahol közvetett szennyvíz visszaforgatás történik (*Garud és társai, 2011*). Hazánkban a közműves ivóvíz ellátásban fordított ozmózis üzemi léptékű alkalmazására mind ez ideig nem volt szükség, legfeljebb ipari üzemekben, egyedi, házi víztisztító rendszerekben, vízlágyítóknál találkozhatunk velük. Ezért az ivóvíz előállításához kapcsolódóan a fordított ozmózisról viszonylag kevés üzemi tapasztalat áll rendelkezésre. Munkánkban egy 100 dm³/h névleges permeátum kapacitással rendelkező, lassú szűréssel előkezelte felszíni vizet használó berendezéssel kapcsolatos tapasztalatainkat tesszük közzé. Elsősorban a kritikus üzemi paraméterekre, a költségek nagyságrendjére és az előkezelés, a betáplált víz minőségének jellemzőire hívjuk fel a figyelmet.

Előzmények

A 2016 májusában elindult nemzetközi AquaNES H2020 projekt keretében az akkori Eötvös József Főiskola, majd később a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víztudományi Kara többek között azt a feladatrészt kapta, hogy demonstrálja a parti szűrés folyamat fordított ozmózisra gyakorolt kedvező és kedvezőtlen hatásait. Hazai környezetben ez feleslegesnek tűnhet, hiszen hozzászoktunk, hogy a legnagyobb parti szűrésű vízbázisaink a Duna durva kavicsos felsőbb szakaszain közel ivóvíz minőségű vizet szolgáltatnak. Ezeknél csak minimális kezelésre van szükség, fordított ozmózisra semmi esetre sem. Azokban az esetekben pedig, ahol a háttérből érkező felszín alatti víz hányada magas és emiatt vastalanításra, mangántalanításra, ammónium eltávolításra van szükség, a

fordított ozmózis ismét csak feleslegesen, utókezelésként jöhetne szóba. Azonban bizonyos előnyök és az édesvízből történő ivóvíz előállításban elfoglalt újszerű szerepe miatt érdemes a kutatásra.

Tekintve, hogy a Duna mentén kivételes parti szűrésű vízbázisokkal rendelkezünk, e feladat demonstrálására viszonylag könnyen találhatunk megfelelő helyszínt és nagy tapasztalattal rendelkező szakembereket. Úgy véljük, hogy az Egyetem Vízellátási és Környezetmérnöki Intézetének keretein belül sikerült olyan demonstrációs elrendezést kialakítanunk, amely a projekt eredeti koncepciójához is illeszkedik, de a valóságtól mégsem teljesen elrugaskodott. Az eredeti koncepció szerint a fordított ozmózis parti szűrést követő alkalmazásának vizsgálata az alábbiak miatt fontos:

- Az alternatívák pontosabb összehasonlíthatósága érdekében a fordított ozmózist fontos összevetni a hasonló eljárást megvalósító technológiákkal, így elsősorban a nanoszűréssel, ultraszűréssel, aktív szén szűréssel és a fertőtlenítési eljárásokkal (UV, ózon, klórgáz, klór-dioxid) is. Ezzel a tervezés és fejlesztés során a különböző technológiai megoldások közti választást segítenék az eredmények.
- A parti szűrést követő fordított ozmózis megfelelő választás lehet azokban az esetekben, amikor a parti szűrésen áttörnek a rosszul adszorbeálódó szerves és szervetlen komponensek (például nitrát, szulfát, klorid) akár a vízbázis szennyeződése miatt, akár havária eseményeknél, vagy egyszerűen csak kedvezőtlen hidrológiai, vagy hidrobiológiai viszonyok fennállásakor (kisvíz, árvíz, algavirágzás). Ilyenkor, ha nem is a teljes üzemi kapacitással, de egy minimális ellátási szint biztosítására a fordított ozmózis is szóba jöhet. Vészhelyzetekben, a vízellátás megoldására már régóta alkalmazzák a fordított ozmózist (*Padányi és Kállay, 2005*).
- A projekt e feladatkörének indoklása során felmerült az a szempont is, hogy a vizsgálatok eredményei hozzájárulhatnak a döntéstámogatáshoz, amennyiben a jövőben a szerves mikroszennyező anyagok monitorozása szükségessé válik és bekerülnek az Európában alkalmazott vízminőségi követelmények közé. Néhány ilyen anyag (elsősorban peszticidek és PAH-k) már jelenleg is jogszabályi határértékkel rendelkeznek a 201/2001 korm. r. szerint, amelyeket a jövőben például a gyógyszermaradványok követhetnek.

Demonstrációs célkitűzések

A projekt első szakaszában a teljes mértékben felszíni vízzel megtáplált lassú szűrő és az utána sorba kapcsolt fordított ozmózisos rendszer üzemét vizsgáltuk. Ebben az elrendezésben a lassú szűrés hivatott szimulálni az ideális parti szűrés viszonyait, nevezetesen azt, hogy a háttérből nincs talajvíz hozzáfolyás, a szűrési viszonyokat egyedül a felszíni víz és a mederanyag határozza meg. A rövid (1,0-1,5 m) szűrési úthossz miatt a viszonyok végig oxikusak maradnak és ennek megfelelően feltételezzük, hogy a felszíni víz folyóvíz, amely kellő oxigéntelítettséggel rendelkezik. Így a vas-, mangán- és ammónium-ionok koncentrációja eleve alacsony még mielőtt a mederanyagban/szűrőrétegben elkezdődne a szivárgás a kitermelés helye felé.

Az elrendezéstől várt előnyök

Ebben a rendszerben a parti szűréstől azt vártuk, hogy visszatartsa a lebegő anyagokat és a kolloid frakciót, a lassú szivárgás során pedig átalakítsa azokat a szerves, szervetlen anyagokat amelyek a membránon „biofouling”-ot, azaz eltömődést okozó biofilm kialakulást idéznének elő, mint a mikroorganizmusok növekedéséhez szükséges szubsztrátok. Ilyen elrendezést a gyakorlatban medergalériákkal, parti galériákkal, vagy bármilyen, a mederben kialakított szemcsés szűrőközeggel elő lehet állítani. Ettől az elrendezéstől a következő rövid és hosszú távú előnyöket reméltük (hipotézisek):

- A felszíni folyóvíz, mint vízbázis felhasználásának megvan az az előnye, hogy ezzel hosszú távon az értékesebb, lassabb utánpótlódással rendelkező felszín alatti vízkészleteinket kíméljük. Ehhez persze hozzá kell tenni egyrészt, hogy a rétegvíz kitermelés hazai viszonylatban jelenleg sem eltúlzott mértékű, szemben Nyugat-Európával, ahol ez a probléma már felvetődött (*EEA, 1999*). Másrészt a minőségi követelmények szigorodásával a felszín alatti víz sem tekinthető egyértelműen kedvezőbb vízbázisnak összehasonlítva a felszíni vizekkel (például az arzén, ammónium eltávolítás igénye, vas- és mangán oxidáció, törésponti klórozás költségei miatt).
- A fordított ozmózis alkalmazása lehetőséget teremt a befogadóba kibocsátott szennyvíz újbóli felhasználására is, hiszen a patogén mikroorganizmusokkal és a mikroszennyezőkkel szemben is akadályként viselkedik. Sivatagos, vízhiányos területeken erre a megoldásra már létezik példa (*Garud és társai, 2011*).
- A folyó medrében lévő természetes (vagy részben mesterségesen kialakított) lassú szűrést megvalósító réteg kedvező áramlási viszonyok esetén regenerálódik és a kolmatációval sem kell számolni. Szükség esetén a szűrőréteg felülete kotrással, vagy egyszerűen a szemcsék felkeverésével megtisztítható. Ennek persze

feltétele, hogy a lassú szűrés viszonyainak megfelelően csak a felső rétegben alakuljon ki eltömődés, mélységi szűrési folyamatok ne menjenek végbe.

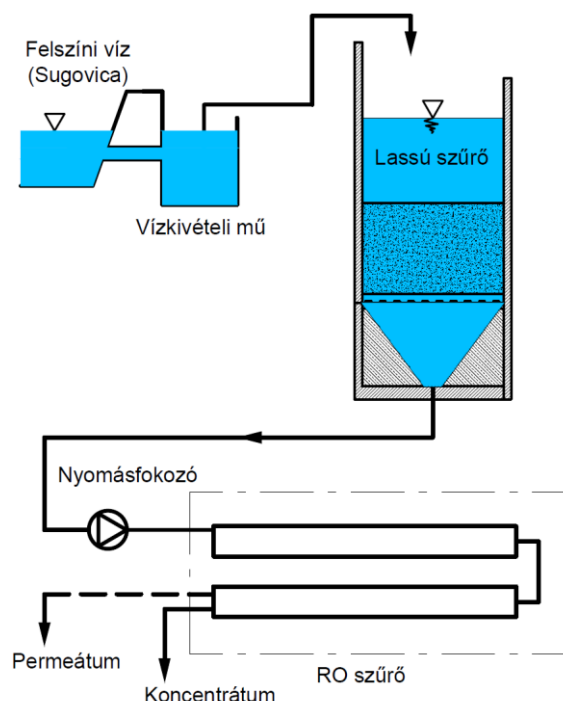
- Az előbb ismertetett, a gyakorlatban is elérhető körülmények között a parti szűréssel kitermelt felszíni víz a tisztítás szempontjából kedvezőbb lehet, mint a felszín alatti. A parti szűréssel a kolloidok eltávolítása és a szerves anyagok, szerves szubsztrátok lebontása megtörténhet, tehát derítésre nem lesz szükség. Ráadásul mindaddig, amíg az oxikus körülmények fennállnak, a felszíni víz eleve kémiai egyensúlyban levő, biológiailag stabil közegként kerül a membránszűrésre, míg egy felszín alól kitermelt vízről ez sokszor nem mondható el (gázkiválás, agresszív szén-dioxid megjelenése, vas- és mangán kicsapódás, szerves szubsztrátok mikroorganizmusoknak, stb.).
- Mindezek miatt (szubsztrátok lebontása, kémiai egyensúlyban levő, oxidáló rendszer) a membrán eltömődése a minimálisra csökkenthető. Ezzel a vegyszeres tisztítás, a tisztítás hulladékvizei (CIP vizek), karbantartási üzemszünetek, membrán elhasználódás és csere költségei is minimalizálódnak.
- A fordított ozmózis ilyen körülmények között robusztus technológiának tekinthető, amely még az előtisztító parti szűrési rendszer sérülése esetén is kiváló vízminőséget képes biztosítani (igaz a membránok kedvezőtlenebb eltömődése árán). Az üzemi paraméterek egyszerű módszerekkel (vezetőképesség, zavarosság) is könnyen monitorozhatók, az automatizálási igény minimális, lényegében a szivattyúk üzemére korlátozódik. Vegyszeradagolás csak a membránok tisztításakor szükséges.
- A fordított ozmózis nem csupán magukat a patogén mikroorganizmusokat tartja vissza nagy határfokkal, hanem a sóatlanított permeátum tápanyagok híján a lehető legnagyobb mértékben a fertőtlenítés erőforrás igényeit is csökkenti. Ezzel nem csak a fertőtlenítéshez szükséges költségek minimalizálhatók, hanem a fertőtlenítési melléktermékek keletkezése is a lehető legnagyobb mértékben kiküszöbölhető. Ez igen fontos szempont lehet olyan túlméretezett és elöregedő, magas vízkorral működő hálózatok esetén, mint a hazaiak, hiszen a hálózati vízminőség romlása ezzel megelőzhető.
- A membránok időszakos cseréjén és tisztításán túl az egyetlen komolyabb költségtényező a nagynyomású szivattyúk működtetéséhez szükséges villamos energia, habár az itt vizsgált édesvizet használó rendszerben ez jóval kisebb, mint a tengervíz sóatlanításra használt nyomástartományok esetén. A sóatlanított víz hosszabb ideig is tárolható másodlagos vízminőség romlás nélkül, ezért megfontolandó a megújuló energia fordított ozmózis révén történő felhasználása tisztított víz előállítására. Alacsony fogyasztású időszakokban, amikor felesleges villamos energia keletkezik megújuló forrásokból, a vízmű üzemel, így lényegében az energia a termékként előállított sóatlanított víz formájában tárolható és több napos távlatban is felhasználható. A fordított ozmózis és a megújuló energia közvetlen kapcsolására már léteznek megoldások a világban (*Schaefer és társai, 2005*). A nagyobb fordított ozmózis rendszereket energia visszanyerési lehetőségekkel („turbo charger”) is felszerelik.

A fordított ozmózis vizszűrés lehetséges hátrányai

Természetesen a fent felsorolt előnyök mindegyike valamilyen mértékben cáfolható is, hiszen a demonstrációs vizsgálatokban feltételezett és megvalósított ideális állapot üzemi körülmények között csak bizonyos mértékig teljesülnek. Várhatóan a kritikus pontok és főbb hátrányok az alábbiak lesznek:

- A felszíni víz minőségének szezonális változása, valamint a szűrőközegben lévő biofilm aktivitásának ingadozása a lassú szűrés hatásfokát erősen befolyásolhatja, így a membrán eltömődése is kedvezőtlen lehet. A demonstrációs feladatunk fő célja éppen ezen, a kedvezőtlenebb vízminőség által a membránra kifejtett hatás mértékének pontosabb vizsgálata.
- Jelenleg a rendelkezésre álló vízbázisok minősége és mennyisége hazánkban nem indokolja a szennyvíz visszaforgatását, sőt a lakossági idegenkedés az ilyen irányú alkalmazást még az igény felmerülése után is sokáig hátráltatni fogja. A visszaforgatáshoz szükséges a forráskontroll és a szigorúbb vízbázis védelem alkalmazása, hogy a szennyezők ne dúsuljanak fel a visszaforgatás révén. A szigorúbb vízbázisvédelem és a védőterületek lehatárolásnak nehézsége a felszíni vizeknél szintén megnehezítheti az alkalmazást.
- A vízminőség és a nem megfelelő mértékű kitermelés miatt a kolmatáció nem feltétlenül korlátozódik a szűrő felső rétegeire. A felszíni víz szennyezése, a vízkémiai viszonyok változása miatt a szűrőközeg belsejében is felléphet visszafordíthatatlan eltömődés.
- A háttérből érkező felszín alatti vizek sem zárhatók ki teljesen, valós körülmények között számolni kell vele, hogy kicsapódásra hajlamos oldott anyagok (vas, mangán, vízkő) elérik a fordított ozmózis membránt.

- Ezek szerint, ha az előtisztítás szerepét betöltő lassú szűrési folyamat nem működik megfelelően, akkor a fordított ozmózis hátrányai azonnal jelentkeznek: gyakoribb vegyszeres tisztítás, több hulladékvíz, az üzemidő csökkenése. Mindezek miatt a membrán élettartama is csökken, gyakoribb csere válik szükségessé. A gyakoribb tisztítás egyúttal a membrán integritásnak sérüléshez is vezethet, a tisztítás hatásfoka, különösen a patogének és a mikroszennyezők tekintetében, leromlik.
- A fordított ozmózis membrán védelme érdekében mindenképpen szükséges mikroszűrő alkalmazása a membrán előtt. Ez elsősorban az esetlegesen a rendszerbe jutó abrazív anyagokkal szemben szolgál védelemként. Pórusmérete igen finom (5 µm), ezért ha a lassú szűrés hatásfoka nem kielégítő, akkor a rajta kiszűrődő anyagok (algák, kicsapódó vas, stb.) gyorsan eltömíthetik, emiatt szintén tisztításra és cserére szorul, holott legalább akkora szűrési ciklussal kellene hogy rendelkezzen, mint maga a fordított ozmózis membrán. Nem megfelelő vízminőség esetén folyamatos vegyszeradagolás („anti-scalant”) is szükséges lehet a kicsapódás megakadályozására.
- A jól működő üzem erősen függ a vezetőképesség, zavarosság, transzmembrán nyomás és kihozatal nyomon követésétől, így a pontos és precíz karbantartási munkák elmaradása az egyébként felügyelet nélkül is sokáig jól működő technológián hosszú távon kedvezőtlen lehet.
- A sóatlanított víz nem fogyasztható ivóvízként, tehát mindenképpen rekarbonálási lépés is szükséges, ami a költségeket jelentősen növeli. A sóatlanított és mesterségesen visszasózott víz fogyaszthatósága, fogyasztói elfogadottsága és organoleptikus tulajdonságai precíz tervezést és odafigyelést igényelnek. A projektben csak a parti szűrés hatásainak vizsgálata szerepelt, így a rekarbonálás kérdéseitől eltekintettünk.
- Az alkalmazott nagynyomású szivattyúk energiafogyasztása jóval nagyobb, mint a hagyományos technológiai szivattyúké. Habár a megújuló energia felhasználható a fordított ozmózis rendszer üzemeltetéséhez, a fogyasztási egyenlőtlenségek kiegyenlítése és az alacsony fogyasztási időszakokra eső üzem komoly villamos infrastruktúrát kíván ami a beruházási költségeket növeli.
- Végül a membrán teljes életciklusát vizsgálva, nem biztos, hogy egy fordított ozmózis rendszer egészében előnyösebbnek lenne tekinthető, mint egy hagyományos tisztítási technológia.



A demonstrációs projekt során vizsgálatainkkal számszerű adatokat, információkat gyűjtöttünk az itt felsorolt, előnyök és hátrányok némelyikének mértékére vonatkozóan. Elsősorban a fordított ozmózis membrán üzemi paramétereit vizsgáltuk egy-egy hosszabb, több hetes, vagy több hónapos szűrési ciklus során. Kiegészítésként rendszeresen mértük a nyers és a lassú szűrt víz egyes komponenseinek koncentrációját, így tájékozódva a membrán eltömődés kialakulásnak sebessége és a betáplált víz minősége közti összefüggésekről. Egyúttal a lassú szűrés hatásfokának változásait is idősorosan felvéve.

AZ ALKALMAZOTT DEMONSTRÁCIÓS TECHNOLÓGIA

A fordított ozmózis megtáplálásához a Vízellátási és Környezetmérnöki Intézet Víztechnológiai Oktatóbázisának fő technológiai berendezései közül a Sugovicára épített vízkivételi művet és a nyitott homokszűrőt vettük igénybe. Az elrendezés vázlatát az 1. ábrán látható.

A technológia működtetése során a nedvesaknás, szívócsöves vízkivételi műből a szűrés sebességétől függően 1-2-3 napos időközökben feltöltésre került a homokszűrő feletti térrész, mintegy 10-15 m³-es adagokban. A homokszűrő szűrőfeneke alól, a zsompban tárolt szűrt vizet egy hidrofors nyomásfokozóval vettük el. A hidrofors a nyomást 3 – 4,5 bar között tartja, a szivattyú üzemideje 5-10 perc, ciklusideje 5-15 perc, a vízkivételtől függően.

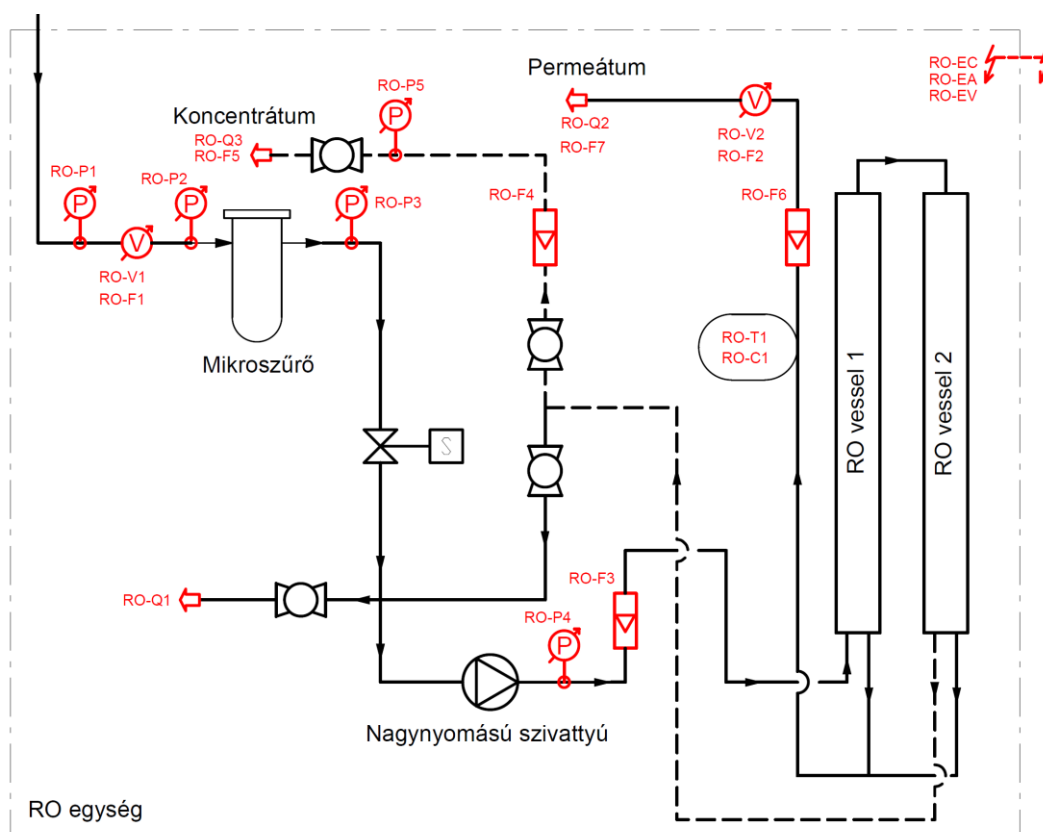
1. ábra Demonstrációs technológia vázlat
Figure 1. Demonstration technology scheme

Ugyanez a rendszer látja el szűrkevízzel az épületet is, de ezek vízfogyasztása elhanyagolható, így a szűrési sebességet érdemben nem befolyásolják.

A szűrési sebesség így a fordított ozmózis berendezés vízfogyasztásától függött. Névleges kapacitásánál, 200 dm³/h esetén 4 cm/h. Az egyéb projektfeladatok miatt töltetes szűrőoszlopok és fertőtlenítési lépések is kapcsolódtak a rendszerhez, de ezek érdemben az itt tárgyalt fordított ozmózis berendezés üzemét nem befolyásolták. A fordított ozmózisról elfolyó koncentrátum és permeátum a mintavételezést lehetővé tevő szabad kifolyást követően elvezetésre került.

A lassú szűrő felülete 5,2 m², a homokréteg vastagsága 1,1 m, 20 cm, 5-10 mm szemcseméretű kavics támasztóréteggel. A homokréteg szemcsemérete jól meghatározott, a szemeloszlás alapján a súlyszázalékok: 87% 0,8-1,5 mm és 11% 0,5-0,8 mm, 1,7% 1,5 mm-nél nagyobb, 0,3% 0,5 mm-nél kisebb. A szűrőben a homokréteg felett 2,15 m-es mélységgel 11,2 m³ víz fér el, illetve a vele összekötésben lévő tároló tartályból mintegy fele ennyi víz még hozzá tudott folyni, ahogy a szűrő felett csökken a vízszint. A szűrőhomokba különböző mélységeken 8 db piezométer cső került beépítésre, amelyek segítségével meg lehet figyelni a szűrés során kialakuló nyomásviszonyokat. A piezométer csövek végét geotextíliával zártuk le, így megakadályozva a szűrőhomok behatolását. A geotextilen megtelepedő biofilm azonban a nyomás kiegyenlítését lassította, így a leolvasásokat megfelelő várakozási idő után, gondosan, odafigyelve kellett elvégezni.

A fordított ozmózis berendezés névlegesen 50%-os kihozatalú, 100 dm³/h permeátum kapacitású berendezés, mely két, egyenként 2,5 m² felületű spiráltekercselt kompozit anyagú TFM (thin-film membrane) membránt tartalmaz. Ez egy poliészter támasztó/ultraszűrő rétegből és egy poliszulfon rétegből áll (Lee és társai, 2011). A fordított ozmózis berendezés részét képezi még egy „poharas” 5 µm-es előszűrő, valamint egy nagynyomású szivattyú. A két membrán modul a berendezésben sorba van kapcsolva, azaz a második membrán az elsőől lejövvő koncentrátumot kapja betáplálásként. A két modulról lejövvő permeátum egy vezetékben egyesül. A berendezés részletes vázlata és a rendszer mintavételi és mérési pontjait (piros színnel) a 2. ábra tünteti fel.



1. ábra. RO berendezés vízkormányozása és mintavételi helyei
Figure 2. Flowlines and sampling points of RO

A főbb mérési pontok és funkcionális egységek a következők voltak: RO-P1: a beérkező nyomás ellenőrzésére szolgáló manométer. RO-V1: a felhasznált víz mennyiségét mérő vízóra, ugyanezen a vízhozam is meghatározható közbözéssel. RO-P2 és -P3: az előszűrőn kialakuló nyomásesést mérő beépített manométerek. Az előszűrőt egy vezérelt mágnes szelep és nyomástávadó követi, melyek a nyomásfokozó szivattyú szárazfutását akadályozzák

meg azzal, hogy ha betáplálási nyomás 2 bar alá csökken, leállítják a nyomásfokozó szivattyút és lezár a mágnes szelep. Ezt követően a nyomásfokozó szivattyúval történik a koncentráció visszavezetése, illetve a membránok vegyszeres tisztításra szolgáló csomagtalálható (RO-Q1 jellel, a koncentrátumból történő mintavételre is alkalmas). A nagynyomású szivattyút az RP-P4 jelű manométer követi, amely a membránokra kerülő tényleges nyomást mutatja, ez szükséges a TMP (transzmembrán nyomás) számításához. RO-F6: rotaméter a membránokra menő vízhozamot jelzi, a piacon kapható berendezésnek nem tartozéka, a recirkulált koncentráció hozamának mérése miatt került beépítésre. A membránokról lejáró permeátum ágon egy beépített hőmérséklet és vezetőképesség mérő található, ez magas vezetőképesség esetén letiltja a rendszer működését, illetve a segítségével lehet a berendezés indításkor a nem megfelelő minőségű „előszűrletet”, a vegyszeres tisztításból, vagy hosszú idejű állásból visszamaradt anyagokat tartalmazó vizet eldobni, kiöblíteni automatikusan. Az elfolyó permeátum hozamát és mennyiségét a beépített RO-F6 jelű rotaméteren, illetve az RO-V2 vízáramon lehet nyomon követni. A membránokról lejáró koncentrátumot egy golyóscsap segítségével lehet különböző mértékben visszavezetni a membránok elé, a nyomásfokozó szivattyú szívóoldalára. A koncentráció hozamának mérése az RO-F4 rotaméter szolgál. Ez után került beépítésre az RO-P5 jelű manométer, amely a membránokat elhagyó koncentráció nyomását méri, ami szintén a TMP számításához szükséges adat. Az ezt követő golyóscsap fojtásával a koncentráció oldal nyomását lehet beállítani, ami a koncentráció recirkulációjának változtatása mellett a kihozatal megadásának egyetlen eszköze. A permeátum oldalra azért nem került fojtási lehetőség és nyomásmérő, mert az adott hidraulikai viszonyok mellett nem volna értelme. Az ésszerű permeátum hozam biztosítása érdekében a permeátum szabad kifolyással távozik a membránról (a minimális magasság különbségeket és szerelvények helyi veszteségeit leszámítva).

Az eddigi mérési ciklusok során kezdetben egy fix fojtással és recirkulációval beállításra került a kezdeti kihozatal, majd több héten és hónapon át figyeltük a kihozatal és a permeátum hozam csökkenésének ütemét. Mindeközben naponta mérésre került a fordított ozmózis berendezés által felhasznált villamos energia is. Eközben a nyersvíz és a lassúsűrű víz minőségét, illetve a lassúsűrű nyomásviszonyait is nyomon követtük.

EREDMÉNYEK

Előzetes vizsgálatok eredményei

Az előzetes vizsgálatok során a fent ismertetett fordított ozmózis berendezés levegőztetésen és vastalanításon (gyorsszűrés) átesett kút vízzel került megtáplálásra. A betápláláshoz szükséges nyomást a kútszivattyú biztosította. A nyers kút víz és a vastalanított víz főbb minőségi adatait az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Kút víz és vastalanított víz minősége az előzetes mérések során
Table 1. Quality of water from well and after iron removal

		Nyers kút víz	Előkezelés (levegőztetés + gyorszűrés)
Vezetőképesség	μS/cm	1000	1000
Vas	mg/dm ³	2 – 4	0,10 – 0,30
Mangán	μg/dm ³	100 – 200	0,10 – 0,20
KOI _{ps}	mg O ₂ /dm ³	1 – 3	1 – 3
Keményesség	mg CaO/dm ³	30 – 35	30 – 35
Ammónium	mg NH ₄ ⁺ -N/dm ³	0,5 – 4	0,5 – 1
Zavarosság	NTU	10 – 20	1 – 2

Az 1. táblázatból látható, hogy a kútból termelt víz erősen felszín alatti jellemzőket mutat, a kút négy hétig tartó folyamatos üzem alatt sem tapasztaltunk bármilyen változást. Az előkezelés, melyet eredetileg a oktatási épület szűrkevízzel való ellátására tervezték csak a víz vastartalmát, ammónium tartalmát és zavarosságát csökkentette.

Ilyen körülmények között a fordított ozmózis berendezés 48 óráig volt képes működni, két nap után a kihozatal és a fluxus olyan meredeken kezdett csökkenni, hogy az üzem azonnali felfüggesztésére volt szükség. Az elő-mikroszűrőn ezen idő alatt mintegy 0,3 bar nyomásnövekedés volt tapasztalható, ami a későbbi eredményekkel összevetve kedvezőtlenül magas ilyen rövid időn belül. A membrán eltömődése hasonlóan kedvezőtlenül alakult, arra utal, hogy elsősorban az előszűrőn átjutó, a fordított ozmózis membránon kiváló oldott anyagok (vas, mangán, kalcium, magnézium) okozták a problémát. Mindez a várakozásnak megfelelően azt mutatja, hogy a felszín alatti víz kitermelés, levegőztetés és előkezelés után még mindig olyan kémiai egyensúlyi viszonyokkal rendelkezik, ami a fordított ozmózis szűrés számára kedvezőtlen.

Lassú szűrés előkezelés eredményei

Ezek után a már ismertett demonstrációs technológiában üzemeltettük a fordított ozmózis berendezést. A rendszer jellemzője, hogy a szivárgási úthossz a csápos kutas megoldáshoz képes rövid (1,3 m) és a felszíni víz a szűrőrétegen függőleges irányban, fentről lefelé szivárog át. Az elrendezéstől olyan működést vártunk el, hogy a szűrőréteg tetején alakul ki egy vékony, biológiailag aktív réteg, amely az alatta levő szemcsés közeggel képes lesz mindazt a tisztítást elvégezni, ami a fordított ozmózis berendezés üzeméhez szükséges. A szűrésre kerülő felszíni (Sugovica) nyersvíz és a lassú szűrt víz minőségét a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat. A nyers-és lassúszűrt víz minősége
Table 2. Quality of raw and slow filtered water

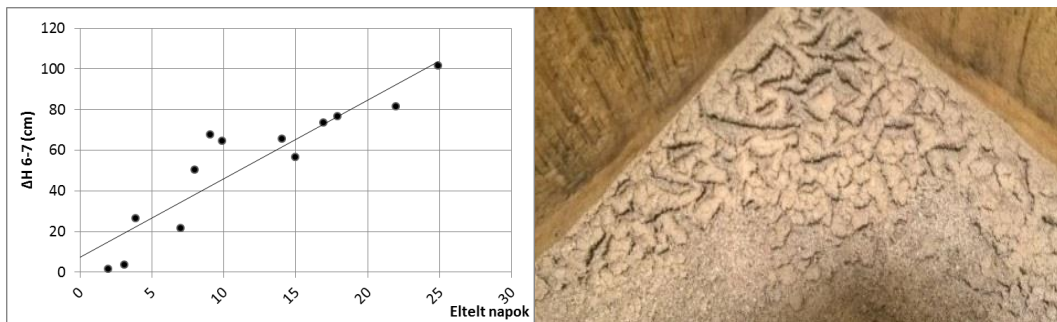
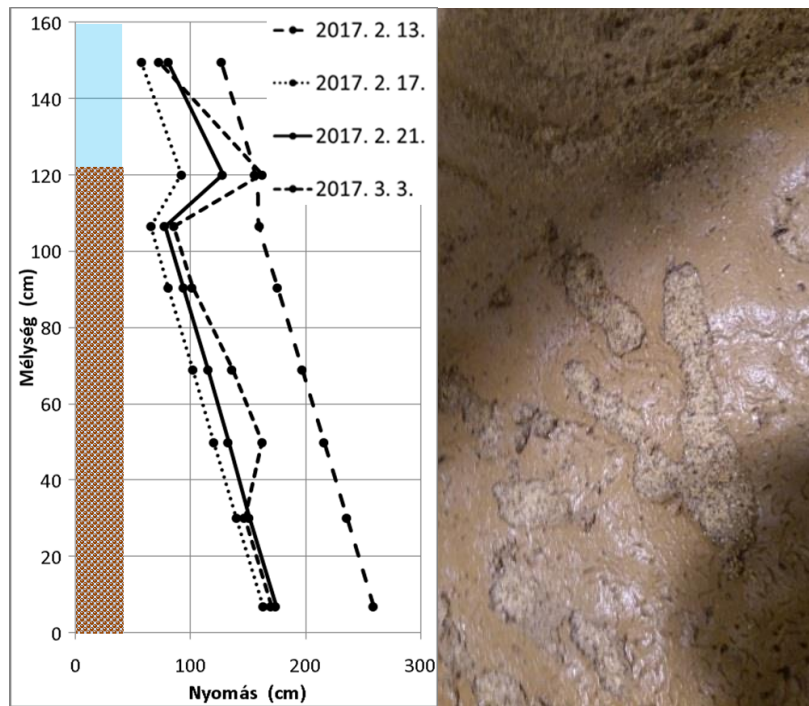
		Nyersvíz	Lassúszűrt víz
Vezetőképesség	$\mu\text{S}/\text{cm}$	400-700	400-600
KOI	$\text{mg O}_2/\text{dm}^3$	3 – 5	1 – 3
Keménység	$\text{mg CaO}/\text{dm}^3$	11 – 25	11 – 25
Ammónium	$\text{mg NH}_4^+-\text{N}/\text{dm}^3$	0,2 – 1,5	0,2 – 1,5
Nitrát	$\text{mg NO}_3^--\text{N}/\text{dm}^3$	4-11	4-11
Nitrit	$\text{mg NO}_2^--\text{N}/\text{dm}^3$	0,001 – 0,09	0,001 – 0,02
Zavarosság	NTU	0,5 – 6	0,01 – 1

A lassú szűrés igen hatékonyan bizonyult a lebegőanyag visszatartásban és a zavarosság csökkentésében. A kémiai oxigénigény erősen ingadozó 10-40%-os csökkenést mutatott, nagyobb eltávolítási időszakok a tavaszi magasabb vízhőmérsékletek és szerves anyag terhelések mellett voltak tapasztalhatók. A nitrifikáció mértéke szintén erősen ingadozott, de mivel végig oxikus körülmények uralkodtak, 0,5-1 mg/dm^3 -nyi mértékben az ammónium nitrogén csökkenése volt megfigyelhető. A nitrát nitrogén növekedését vizsgálva a nitrogénmérlegben kimutatható volt, hogy a nitrát növekedése rendszerint (0,1-0,3 $\text{mg N}/\text{dm}^3$ -el) kevesebb, mint amennyit az ammónium csökkenése alapján várnánk, vélhetően a nitrogén asszimilációja miatt.

A szűrőben a nyomásviszonyokat napról napra nyomon követtük a beépített piezométerek segítségével. A várákosoknak megfelelően a felső rétegben alakult ki az idő elteltével egyre növekvő nyomásvesztés. A növekedés mértéke 4 cm/d érték körül alakult. Az 3. ábrán látható a nyomás eloszlást szemléltető Michau-diagram, illetve a 120 és 127 cm mélységben elhelyezett 6-os és 7-es jelű piezométer közti nyomáskülönbség az idő függvényében.

Az eredményekből látható, hogy a rendszer még 3 hónappal az indulás után is messze volt a vákuum tartomány kialakulásának veszélyétől. A lassú szűrőben a szakaszos feltöltések miatt a vízszint és így a hidrosztatikus nyomásvonal is ingadozott, ahogy a felvízszint csökkent két feltöltés között.

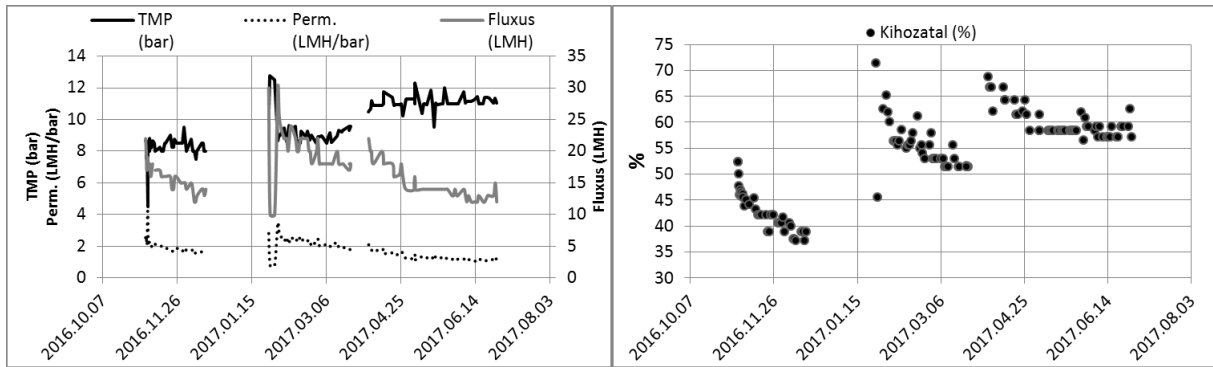
A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a durvább homokszűrő felületén egy egészen vékony, alacsony hézagterfoggal rendelkező réteg alakult ki. Ez részben a felszíni vízzel együtt kitermelt finom szemcséjű lebegtetett hordalékból, iszapból, agyagból, egyéb anyagokból, részben pedig az őket összefogó, kocsonyás biofilmből áll. A szűrőanyag átforgatásával, a felszín minimális megbolygatásával a biofilm okozta nyomásvesztés teljes egészében megszüntethetőnek bizonyult.



2. ábra. Lassú szűrő nyomáseloszlásának Michau-diagramja, a nyomásvesztés növekedésének trendje, a nyomásvesztéget létrehozó biofilm kiszáradt és nedves állapotban
 Figure 3. Pressure distribution and headloss development in the slow filter, caused by a thin biofilm (in dry and moist state)

Hidraulikai paraméterek

A fordított ozmózis berendezés két szűrési ciklusban üzemelt, három vegyszeres tisztítás között. Az első ciklus a berendezés kútról való leszerelését és vegyszeres tisztítását követően 2016. november 3.-tól 2016. december 21-ig tartott, 41 napon át. A második szűrési ciklus szintén vegyszeres tisztítást követően 2017. január 26-tól 2017. június 28-ig tartott 153 napon át, eközben egyszer szükségesség vált az előszűrő cseréje/tisztítása. A négy fő paraméter, a TMP transzmembrán nyomás, a permeabilitás, a fluxus és a kihazatal (recovery) alakulását a 4. ábra mutatja.



3. ábra. Az RO berendezésen mért hidraulikai paraméterek időszora
 Figure 4. Time series data of hydraulic parameters measured on RO equipment

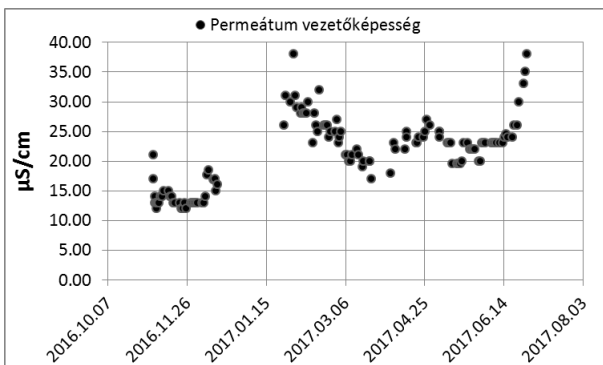
Az első szűrési ciklust 50%-os kihozattal indítottuk, mely a 41 nap után 40%-ra esett vissza. Ennek során a transzmembrán nyomás végig 8-9 bar között maradt, miközben a fluxus és a permeabilitás közel lineáris trendet követve csökkent. Ezután a membrán vegyszeres tisztítást kapott, majd a következő ciklus indításáig sótalánított vízzel feltöltve állt.

A második szűrési ciklus kezdetén látható kiugró értékek az első két napon, a beállítás közben leolvasott adatokból származnak. Kezdetben a kihozattal 70%-ra állítottuk, ez viszonylag gyorsan visszaesett 60% körüli értékre, majd ezután az előző ciklusban tapasztalt trend szerint csökkent 50%-ig, közel állandó transzmembrán nyomás és csökkenő fluxus mellett. 2017. március 21-én szükségessé vált az 5 µm-es előszűrő cseréje, ekkor a berendezés két hétig állt, majd újraindításkor ismét 70%-os kihozattal állítottunk be a koncentrátum oldal fojtásával, a korábbinál magasabb, 11 bar körüli transzmembrán nyomás alkalmazásával. Ezután a kihozatal és a fluxus kezdetben gyorsabban csökkent, majd körülbelül 25 nap után 60% körül állandósult és ezen az értéken dolgozott egészen június 28-ig, amikor is a spiráltekercselt membrán áramlási keresztmetszetének csökkenése miatt a teljes vízmennyiség 210 dm³/h-ról 105 dm³/h-ra csökkent. Ebből kezdetben 150 dm³/h volt a permeátum és 60 dm³/h óra koncentrátum, a szűrési ciklus végén 60 dm³/h a permeátum és 45 dm³/h a koncentrátum. A koncentrátum visszavezetés révén a koncentrátum oldalra vezetett vízhozam kezdetben 700 dm³/h volt, a szűrési ciklus végére ez 650 dm³/h-ra esett vissza.

Az 5 µm-es előszűrőn a nyomásesést nem engedjük 0,5-1 bar fölé emelkedni, ezért a teljes időszakban háromszor volt szükséges az előszűrő tisztítása vagy cseréje. Az előszűrőt külön nem vizsgáltuk, mivel cseréje és tisztítása többnyire egyszerűen megoldható volt. Nagyobb léptékű berendezéseknél azonban a biztonsági előszűrő kérdését sem lehet elhanyagolni.

Permeátum minősége és a rendszer költségei

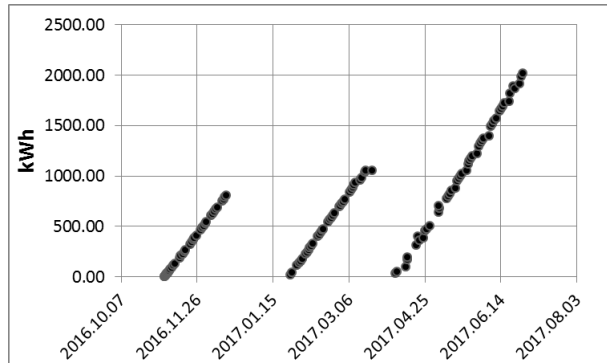
A permeátum minőségét az első két ciklus alatt külön nem vizsgáltuk, a hagyományos, térfogatos és fotometriás analitikai módszerekkel mérhető paraméterek értéke a kimutatási határ alattinak tetelezhető fel. A nemrég elkezdett harmadik ciklus keretében, amely magába foglalja a szűrt víz anoxikus körülmények közti minőségének romlását is, folyamatban van a mikroszennyező anyagok, illetve a patogének jelenlétének vizsgálata.



4. ábra. Permeátum vezetőképességének időszora
 Figure 5. Time series for permeate conductivity

A permeátum vezetőképességének idősorát az 5. ábra szemlélteti. Mindkét ciklus során megfigyelhető a görbe alulról nézve konvex jellege, azaz hogy a szűrési ciklus kezdetén csökken a permeátum vezetőképessége, a szűrési ciklus végén pedig növekedni kezd. Az is jól látható, hogy amíg az első szűrési ciklusban a permeátum vezetőképessége 10-15 µS/cm volt, 20 µS/cm körüli szélsőértékekkel, addig a második ciklusban már 20-25 µS/cm vezetőképességet kaptunk, 30-40 µS/cm szélsőértékekkel a szűrési ciklus kezdetén és végén. A szűrési ciklus végét jelző vezetőképesség növekedés viszonylag gyorsan, rövid, 1-5 napnyi idő alatt jelentkezik. A júliusban, vegyszeres tisztítás után indított szűrési ciklus kezdetén a vezetőképesség már 50 µS/cm körüli értékről indult.

Mindeközben a transzmembrán nyomás és a permeabilitás nem változott drasztikusan, amiből gyanítható, hogy a vezetőképesség ilyen növekedése a membrán integritásnak romlásából, az ismételt vegyszeres kezelésekre miatti tönkremenetelből adódik. A romlási tendencia mértékének megítélésénél azt a tényt is fontos figyelembe venni, hogy a membránok már a projekt kezdete előtt is használtak voltak, sőt az első indítás előtt a tárolás során képződött nagy mennyiségű biofilm és vas lerakódás vegyszeres eltávolítására volt szükség. Így a legóvatosabb becsléssel is azt lehet mondani, hogy várható élettartamuk felénél léptek be a projektbe.



5. ábra. RO berendezés villamos energiafogyasztása
Figure 6. Energy consumption of RO equipment

Az fordított ozmózis berendezés teljes üzemideje alatt mértük a villamos energia fogyasztását. Amint az elfogyasztott összes energia idősorán látható, az összesen felhasznált energia mennyisége az eltelt idővel egyenes arányos, a meredekség mindenkor 20 kWh/nap értékre adódik. A második ciklus közepén látható ugrás az előszűrő cseréjekor történt leállítás miatt van, amikor a fogyasztásmérő is lenullázódott. A fordított ozmózis berendezés legfőbb fogyasztója a nagy nyomású szivattyú, amely mellett a folyamatirányító, illetve a beépített mérőműszerek energiafogyasztása elhanyagolható. A koncentrátum oldal nyomásától és transzmembrán nyomástól független szivattyúzási energiaigény annak a következménye, hogy a szivattyú munkapontja érdemben nem tolódik el, egyrészt a meredek,

vízhozam tartó jellegű görbe, másrészt a koncentrátum visszavezetés rövidre záró hatása miatt.

A második szűrési ciklus 153 napja alatt összesen 3100 kWh-t fogyasztott a berendezés, ami alatt 502 m³ vizet tápláltunk bele, amiből a biztonság javára becslés az átlagos 58%-os kihozatalt 291 m³ permeátumot állítottunk elő. Így egy m³ permeátumra 11 kWh energiát számíthatunk. Ha becslésként a 2016. évi villamos energia átlagos árát vonatkozó adatot (KSH) használunk fel, amely szerint a villamos energia ára 0,0729 EUR = 22,2 Ft/kWh, akkor 244,2 Ft/m³ értéket kapnánk. Ha ehhez hozzávesszük a membránok bekerülési költségeit és feltételezzük, hogy még kétszer ennyi víz megtermelésére használhatóak, akkor további 200 Ft/m³ költség merül fel. Mindehhez hozzávéve a gépészet karbantartását, a membránok vegyszeres tisztítását, a keletkező hulladékvíz kezelési költségeit, durva becslésként 1000 Ft/m³ körüli költséget kapnánk a teljes megtérülésre, a visszaszórás költségei nélkül. Természetesen figyelembe kellene venni a kisebb fertőtlenítési és élömunka igényből származó hasznokat is, ezeket azonban nehéz általánosságban megbecsülni.

ÖSSZEFOGLALÁS

A nyolchónapos üzem eredményei alapján kijelenthető, hogy bizonyos feltételek lehető legszigorúbb teljesülése esetén a parti szűrésből (vagy lassú szűrésből) és fordított ozmózis lépésből összeállított, egyszerű ivóvíz kezelési technológia hosszú távon, stabilan üzemeltethető. A tapasztalatok alapján a következő feltételeket kell biztosítani:

- A fordított ozmózis megtáplálása lehetőleg 100%-ban a felszíni vízből történjen.
- Az anoxikus viszonyokat ki kell küszöbölni és az oldott vasat, mangánt, egyéb sókat tartalmazó talajvíz hozzáfolyását minimalizálni kell, rövid szivárgási úthosszal és szivárgási idővel.
- A lassú szűrést megvalósító szűrőréteg és a felszíni víz határán kialakuló biofilm döntő fontosságú a zavarosságot okozó anyagok visszatartásában és a biofoulingot tápláló szubsztrátok eltávolításában, ezért olyan áramlási viszonyokkal rendelkező helyen kell a szűrést megvalósítani, ami viszonylagos állandóságot biztosít.

Ha ezek a feltételek teljesülnek, akkor a fordított ozmózis egyetlen lépcsőben elvégzi a tisztítást, utána már csak visszaszórásra és utófertőtlenítésre van szükség. Édesvízről lévén szó a kettő-négyszeresére töményedett koncentrátum (50 és 75%-os kihozatalnál) a felszíni vízbe visszavezethető.

Az ilyen fordított ozmózis megoldás költségei egyenlőre magasabbak a hagyományos hazai vízkezelési megoldásokénál, de felülről már közelítik azokat és költségeik összemérhetők. A jövőben a membránok fejlődésével és az ivóvízzel szemben támasztott követelmények szigorodásával az itt vázolt megoldás előnyösnek bizonyulhat.

IRODALOMJEGYZÉK

123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízellátási létesítmények védelméről.

201/2001. (X. 25.) Korm. rendelet az ivóvíz minőségi követelményeiről és az ellenőrzés rendjéről.

European Environment Agency (EEA) (1999). *Groundwater quality and quantity in Europe*. Environmental assessment report No. 3. European Environment Agency, Copenhagen.

Garud R. M., Kore S. V., Kore V. S., Kulkarni G. S. (2011). A Short Review on Process and Applications of Reverse Osmosis. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 1(3), 233-238.

KSH https://www.ksh.hu/docs/hun/eurostat_tablak/tab1/ten00117.html (2017. július 27.)

Lee, K. P., Arnot, T. C. and Mattia, D. (2011) A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370(1-2), 1-22.

Padányi J., Kállay E. (2005). A vízellátás új technikai berendezése, *Katonai Logisztika* 13(2), 190-20.

Schaefer, A., Broeckmann, A. Richards, B. S. (2005). Membranes and renewable energy - A new era of sustainable development for developing countries. *Membrane Technology*, 2005(11), 6-10.

Köszönetnyilvánítás

A mintatechnológia létrehozását, az elvégzett méréseket és az eredmények értékelését az 689450 számú Aquanes H2020 projekt keretében végeztük.

<http://www.aquanes-h2020.eu>



SALAMON ENDRE mérnök-tanár az NKE Víztudományi Karán, környezetmérnöki és építőmérnöki végzettséggel rendelkezik. Doktori tanulmányait 2017-ben kezdte a Katonai Műszaki Doktori Iskolában.

GODA ZOLTÁN

PAPP TAMÁS

ORGOVÁNYI PÉTER

DR. MÁTRAI ILDIKÓ PHD főiskolai tanár, biológia-kémia-környezetvédelem szakos tanári és környezetmérnöki végzettséggel rendelkezik. Közel 30 éves oktatói gyakorlatából 17 évet a műszaki felsőoktatásban töltött. A vízkémia-vízbiológia-mérnök-ökológia tudományterületekre kiterjedő komplex szemléletű kutatásaiban a felszíni vizek és a vizes élőhelyek vizsgálatával, állapotértékelésével, helyreállításával, valamint a szennyvíztisztító telepek befogadókra gyakorolt hatásaival foglalkozik. 2013-2017 között az Eötvös József Főiskola Vízellátási és Környezetmérnöki Intézetének igazgatója volt, jelenleg a Nemzeti Községi Egyetem Víztudományi Karán ugyanezen intézet megbízott intézetvezetője. 2011-2015 között a Magyar Hidrológiai Társaság Vizes élőhely-védelmi szakosztályának titkára, majd 2015-2017 között elnöke volt. 2014-ben "Pro Aqua" elismerésben részesült.