

# Vízminőség változása ivóvízellátó rendszerekben: kísérletek és modellezés

## Change of water quality in water distribution systems: experiments and modeling

HŐS Csaba<sup>1</sup>, MEDVE Dániel<sup>2</sup>, VÁLYI Fanni<sup>2</sup>, HUZSVÁR Tamás<sup>3</sup>,  
TACZMANNÉ BRÜCKNER Andrea<sup>4</sup>, KISKÓ Gabriella<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Egyetemi tanár, BME Gépészmérnöki Kar Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék (BME GPK HDR)  
1111 Budapest Műegyetem rkp. 3, www.hds.bme.hu, hos.csaba@gpk.bme.hu

<sup>2</sup> BSc hallgató, BME GPK HDR

<sup>3</sup> PhD hallgató, BME GPK HDR

<sup>4</sup> Egyetemi docens, PhD hallgató, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Élelmiszertudományi és Technológia Intézet, Élelmiszer-mikrobiológia, -higiéna és -biztonság Tanszék (MATE ÉTTI ÉMHBT)  
1118 Budapest, Somlói út 14-16.

<sup>5</sup> Egyetemi tanár, MATE ÉTTI ÉMHBT

### Abstract

*The primary task of drinking water supply networks is to deliver drinking water of sufficient quality and quantity to domestic and industrial consumers. The usual engineering approach focuses on quantity (hydraulic properties: pressure, flow rate), with less attention paid to water quality, which is typically the responsibility of chemical engineers. However, the two aspects are of course intertwined in a real network: e.g. water velocity has a fundamental influence on residence time, chlorine concentration and other quality characteristics. The present paper describes an experimental set-up in the laboratory of the HDR Department, which allows the investigation of important water quality characteristics (e.g. pH, dissolved oxygen, turbidity, conductivity) under controlled conditions and the determination of microbial concentration. The possibilities of incorporating the data measured with the equipment into water quality simulations are also briefly described.*

**Keywords:** water distribution system, water quality, biofilm modelling, experiment

### Kivonat

*Az ivóvízellátó hálózatok elsődleges feladata a megfelelő minőségű és mennyiségű ivóvíz eljuttatása a lakossági és ipari fogyasztókhoz. A szokásos gépészmérnöki megközelítés a mennyiségre (hidraulikai jellemzők: nyomás, térfogatáram) koncentrál, a vízminőségre kevesebb figyelem jut és jellemzően a vegyészmérnökök feladatának tekintjük. Ugyanakkor a két szempont természetesen összefonódik egy valós hálózatban: pl. a vízsebesség alapvetően befolyásolja a tartózkodási időt, klórkonzentrációt és egyéb minőségi jellemzőket. Jelen dolgozat a HDR Tanszék laboratóriumában felépült kísérleti berendezést mutatja be, amely kontrollált körülmények között teszi lehetővé a fontosabb vízminőségi jellemzők (pl. pH, oldott oxigén, turbiditás, vezetőképesség) vizsgálatát ill. a mikroba koncentráció meghatározáshoz szükséges tenyésztést. Röviden ismertetjük a berendezés segítségével mért adatok beépítésének lehetőségeit is vízminőségi szimulációkhoz.*

**Kulcsszavak:** vízelosztó hálózat, vízminőség, biofilm modellezés, kísérlet

## 1. Bevezetés

Az ivóvízellátórendszerekben kialakuló biológiai aktivitás folyamatos megfigyelése és a megfelelő határértékek között tartása minden víziközmű cég számára elsődleges fontosságú. Az üzemeltető, illetve a hatóság által végzett minimális mintavételi, vizsgálati számát és fajtát a 201/2001. (X.25.) Kormányrendelet írja elő, a vízvizsgálatokhoz felhasznált vízminták vételezését és tartósítását pedig az MSZ ISO 5667-1,2,3

szerint kell végrehajtani. A vonatkozó előírások szigorúhatárértékeket adnak meg mind a mikrobiológiai, mind a kémiai vízminőségi jellemzők tekintetében.

Amennyiben a hálózat egy mintavételi pontjában eltérést tapasztal az üzemeltető, reaktív beavatkozásra van szükség: klórozással vagy egyéb vízkormányzási módszerrel biztosíthatja a megfelelő ivóvízminőséget. A proaktív megközelítés ennél hatékonyabb és biztonságosabb; ilyenkor jellemzően számítógépes modellek segítségével próbáljuk azonosítani a vízminőség szempontjából kritikus területeket és még a határértékek átlépése előtt be tudunk avatkozni.

A mikroorganizmusok mind a víztestben, mind a csövek belső falán kialakuló ún. biofilmben megtalálhatók; a két ökoszisztéma transzportjelenségeken (diffúzió, megtapadás és biofilm leszakadás) keresztül hat egymásra. A biofilm, melyben az extracelluláris mátrixba ágyazva találhatók a mikroorganizmusok, védelmet ad pl. a víztestben jelenlévő klórral szemben, így kiemelt jelentősége van a biofilm-aktivitás előrejelzésének a hálózat egyes pontjaiban [1,2].

A biofilm matematikai előrejelzésére számos modell áll rendelkezésre [3-7], egyszerű analitikus modellektől kezdve az egydimenziós biofilm modellező szoftvereken (pl. AQUASIM, EPANET MSX Toolbox) át a többdimenziós/több fajra kiterjedő specializált szoftverekig. Az analitikus megoldás (1D-A) és az pseudo-analitikus megoldás (1D-PA) esetén csak a limitáló vegyületet számítjuk ki, és a nem limitáló vegyületet az általános sztöchiometria alapján becsüljük. Az egyszerű 1-D numerikus szimulációkat az AQUASIM segítségével végezhetjük el. A Pizarro [8] alapján készült megközelítések többdimenziós algoritmusokat használtak, ahol a biofilmet sík felületi morfológiára korlátozták, és ezért 1 dimenziós megoldássá degenerálódnak. Az AQUASIM-et használó elvégzett szimulációk a szerves szubsztrát és az oxigén kettős Monod kinetikáját vették figyelembe.

A biofilm modellek második csoportja a heterogén biofilm morfológiával kapcsolatos hatásokat veszik figyelembe, miközben az átlagos biofilm vastagságot megtarják. Picioreanu et al. [9] (3D-N) valódi 3D szimulációt alkalmazott. A 3D-N esetében két különböző esetet értékelték ki a határréteg vastagságára vonatkozó különböző feltételezésekkel: a 3D-N(a) esetében azt feltételezik, hogy a maximális biofilm vastagság feletti víztest teljesen elkeveredett, míg a maximális biofilm vastagság alatti pórusvíz stagnált, míg a 3D-N(b) esetében azt feltételezzük, hogy a teljes vízfázis (beleértve a pórusvizet is) teljesen elkeveredett. A heterogén biofilm morfológia hatásainak figyelembevételére szolgáló egyszerűsített megközelítés több 1-D szimuláció kombinációján alapul [10, 11]. Ezeknek az pseudo többdimenziós szimulációknak (P2D-N) az alap gondolata az a feltételezés, hogy még heterogén biofilm morfológiában is a helyi tömegszállítás főként a szubsztrátumra merőlegesen történik. Így a P2D-N-ben a helyi tömegszállítás egydimenziós szimulációja (azaz 1D-N szimulációk alapján) történik, ahol az egyes 1-D szimulációkat az a feltételezés köti össze, hogy az ömlesztett fázis koncentrációjának minden szimulációban azonosnak kell lennie. A teljes rendszer teljesítményét ezután az egyes szimulációk lineáris kombinációja alapján értékelik.

Ezen modellek közös jellemzője, hogy modellparamétereket alkalmaznak, az 1. táblázatban néhány ilyen paramétert soroltunk fel tipikus értékekkel. Ezen paraméter értékekre különböző szakirodalmi forrásokból kiindulva akár nagyságrendileg eltérő értékeket is találhatunk. Jelen munka célja egy olyan laboratóriumi mérőberendezés építése volt, melyben ezen paraméterek kontrollált körülmények között mérhetők.

Paraméter	Jel	Jellemző érték
Maximumális fajlagos anyaghasznosítási ráta	$\mu_{\max}$	6 1/nap
Lysis ráta	$k_H$	0,4 1/nap
Szubsztrát fél-maximum-ráta koncentráció	$K_S$	4 g <sub>CODS</sub> /m <sup>3</sup>
Oxigén fél-maximum-ráta koncentráció	$K_{O_2}$	0.2 g <sub>O<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup>
Valós yield	$Y_H$	0.63 g <sub>CODX</sub> /g <sub>CODS</sub>
Diffúziós tényező tiszta vízben	$D_S$	1x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /nap
Oxigén diffúziós tényező vízben	$D_{O_2}$	2x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /nap
A diffúziós tényezők aránya biofilmben és vízben	$D_{S,F}/D_S$ vagy $D_{O_2,F}/D_{O_2}$	1

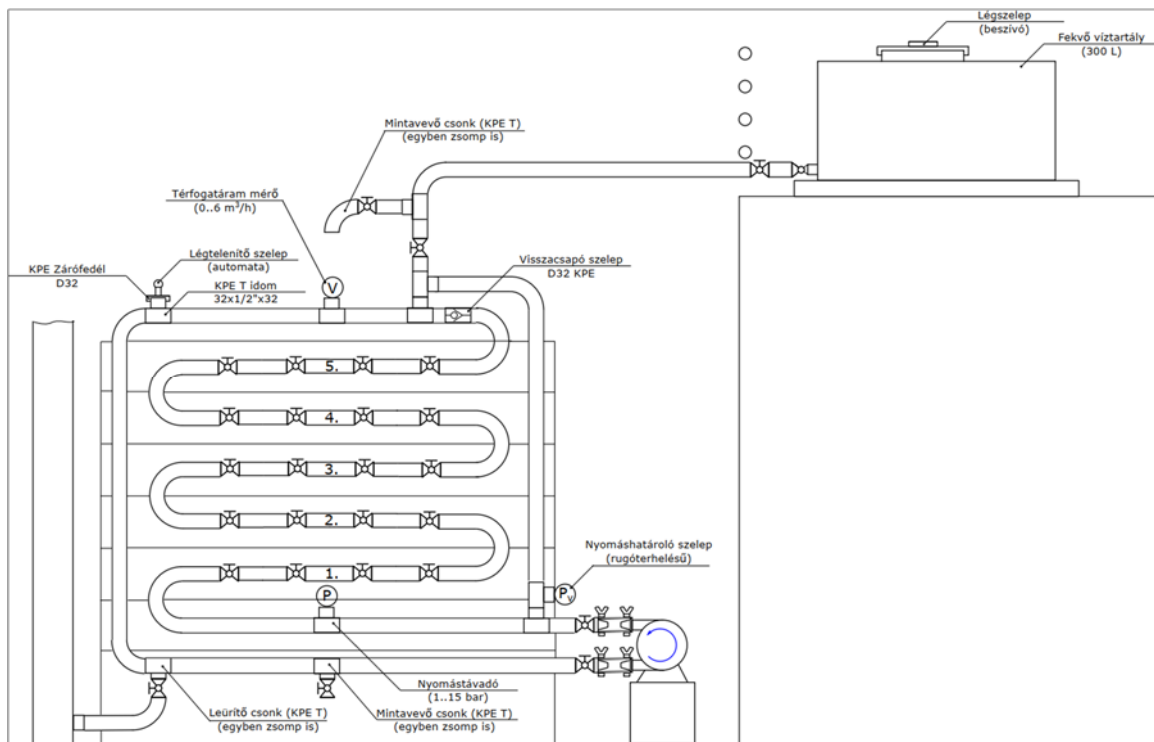
**1. táblázat.** Néhány tipikus paraméter biofilm növekedését leíró modellekhez.

Végezetül megjegyezzük, hogy a biofilmek növekedése során elérünk egy olyan kritikus méretet, melyet már a főáramlás leszakít, így a biofilmben felszaporodott mikroorganizmusok belekerülnek a víztestbe, jelentősen szennyezve azt. A méréseink során szem előtt tartjuk ezt a szempontot is: a berendezésnek alkalmasnak kell lennie arra is, hogy a biofilm leszakadását detektálni tudjuk.

## 2. MÉRŐBERENDEZÉS

Valós ivóvízhálózati problémák megoldására alkalmazható összefüggések megismeréséhez elsőként két mérőberendezés megépítésére volt szükség, amelyekben megfigyelhető, hogyan befolyásolja az eltérő tartózkodási idő a mikroorganizmusok szaporodását, növekedését. Ennek érdekében az egyik legfontosabb szempont az volt, hogy a berendezések kemény polietilén csődarabokból, valamint ezekkel kompatibilis polipropilén csőidomokból épüljenek fel, ezeket használják manapság a legtöbb újépítésű ivóvíz-rendszerben. A mérni tervezett paraméterek időbeli alakulásának vizsgálata érdekében elengedhetetlen szempont volt, hogy azokat a mérési kampány közben is monitorozni lehessen. Ennek érdekében vízmintavételi pontok kialakítására volt szükség, valamint egyes csődarabok menet közbeni eltávolíthatóságának biztosítása is cél volt annak érdekében, hogy a csőfalon képződő biofilmet is elemezni lehessen. Fontos volt még figyelembe venni a tervezett helyszín adottságait, a rendelkezésre álló teret, illetve a későbbi átalakítások bővítések lehetővé tételét.

Az első összeállítás (ld. 1. ábra) keringtetett üzemben volt hivatott működni, ahol egy konkrét vízmennyiség „végtelen” ideig van jelen a zárt rendszerben. Az állandó áramlást egy perisztaltikus szivattyú biztosítja, amelynek fordulatszámát, amely közvetlen kapcsolatban van a szállított térfogatárammal, egy frekvenciaváltóval lehet szabályozni. A rendszer, melyet egy tartályból kell feltölteni, tartalmaz egy leeresztő csontot, egy alsó és egy felső vízminta-vételi pontot, illetve 5 db kivehető csőszegmenst. A térfogatáramot és a nyomást a berendezésben szenzorok segítségével számítógépen lehet nyomon követni.

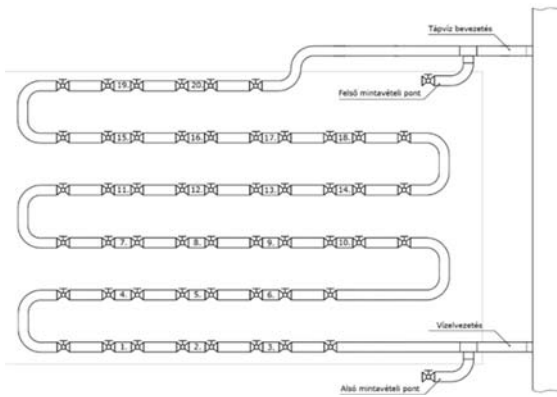


1. ábra

*Keringett berendezés (végtelen tartózkodási idő).*

A második összeállítás (2. ábra) az első ellenpárja, ahol a folyamatosan érkező hálózati víz csupán átfolyik a berendezésen, azután elhagyja azt, és nem tér vissza. Így tehát a tartózkodási ideje zérusnak tekinthető. Mivel a helyszíni vízhálózatból kapott közvetlen betáplálást, így itt nincs szükség szivattyúra. Ez a rendszer is két vízminta-vételi pontot tartalmaz, egy a berendezés tetején a vízbevezetésnél, egy pedig az alján, az elfolyásnál.

Ennek a berendezésnek a kivitelezésénél egy önálló acél vázszerkezetre kerültek fel az OSB falapok, azonban a több rendelkezésre álló helynek köszönhetően nagyobb falfelületet lehetett létrehozni, így több kivehető szegmenst lehetett felhelyezni. Ennél az összeállításnál nem volt szükség légtelenítő, illetve nyomáshatároló szelepre. Nyomás- és térfogatáram-szenzorokból nem állt több rendelkezésre, így előbbi mérésétől eltekintettünk, utóbbi pedig köbözéssel lett beállítva.



2. ábra

Átfolyó berendezés (bal oldal) és a valós berendezések (jobb oldal).

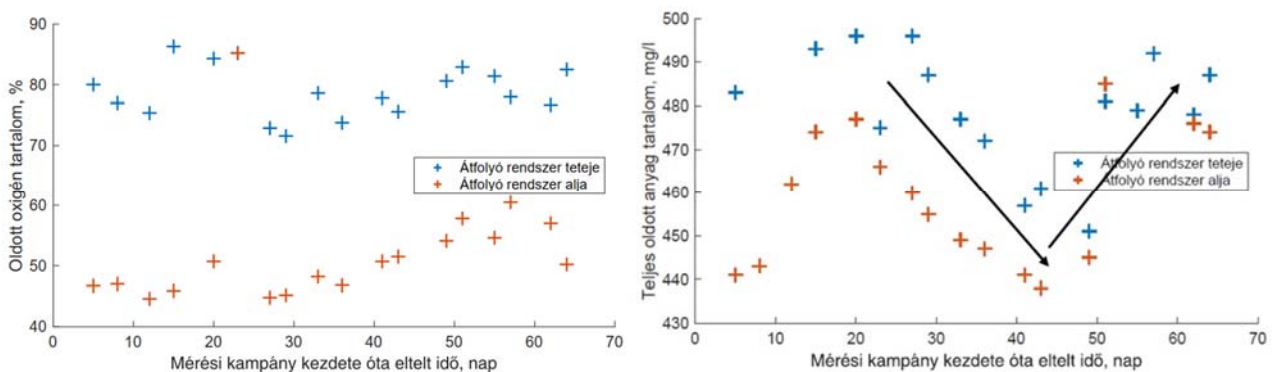
### 3. Mérések, eredmények

A mérést előkészítendő az elkészült keringtetett üzemi rendszer egy vegyszeres oldattal át lett mosva, így biztosítva megfelelő kiindulási állapotot. Ezt követően két héten keresztül szárazon állt a berendezés, majd a tartályon keresztül fel lett töltve csapvízzel. Ekkor az átfolyó üzemi berendezést a hálózati vízforrásra bekötve, illetve a keringtető szivattyú elindításával mindkét rendszer párhuzamosan megkezdte a működését. A következő két hétben folyamatosan, állandó térfogatárammal üzemelt a keringtetett üzemi, mivel a korábbi próbamérésekből megállapítható volt, hogy ennyi időre van szükség ahhoz, hogy detektálható mennyiségben megjelenjenek mikroorganizmusok. Az átfolyó üzemi rendszeren a víz állandó térfogatárammal haladt keresztül az egész mérési kampány során. Két hét elteltével megtörtént az első mintavételezés, ennek eredményei láthatjuk a 2. táblázatban. A mérések kilenc héten keresztül zajlottak, minden héten két alkalommal történt mintavétel mind a négy mintavételi ponton.

Rendszer típusa	Oldott oxigén, %	T, °C	Ellenállás, kΩcm	TDS, mg/l	Sótartalom, mg/l	pH	Turbiditás, FNU/NTU
Átfolyó	67,7	27,8	2,33	429	0,1	7,701	0,5
Keringtetett	54,9	27,4	2,25	445	0,1	7,625	1,23

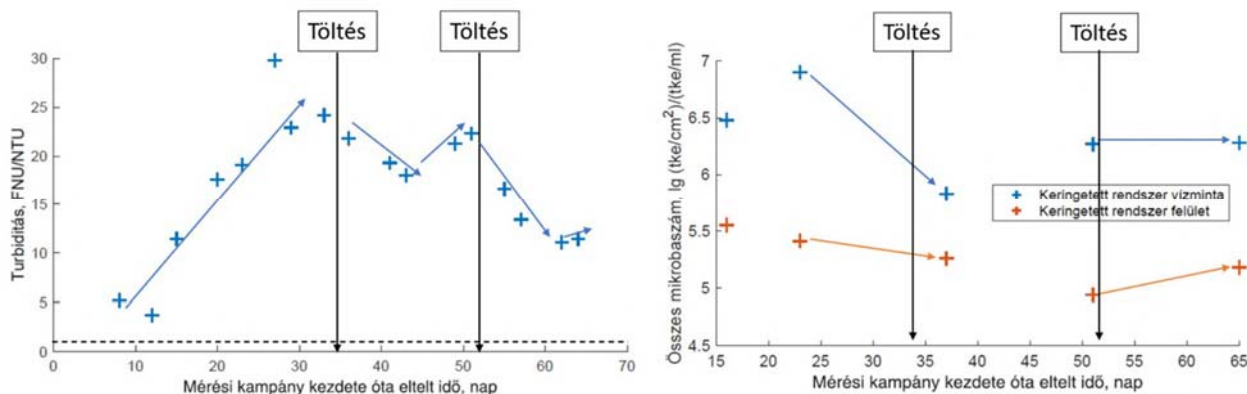
2. táblázat Mért értékek.

A 3. ábra bal oldalán az oldott oxigén tartalmat láthatjuk az átfolyó rendszer tetején (belépés) és alján (kilépés). A két görbe közelítőleg együtt mozog és 30-40%-ot csökken az oxigéntartalom a csővezetékben való áthaladás során. A jobb oldalon a teljes oldott anyag tartalmat láthatjuk, ahol a mérés kb. 45. napjáig megint csak együtt mozognak az adatok és csökkennek az értékek, melyek mikroorganizmusok jelenlétére utalhatnak.



3. ábra

Oldott oxigén és oldott anyag tartalom időbeli változása az átfolyó rendszerben.



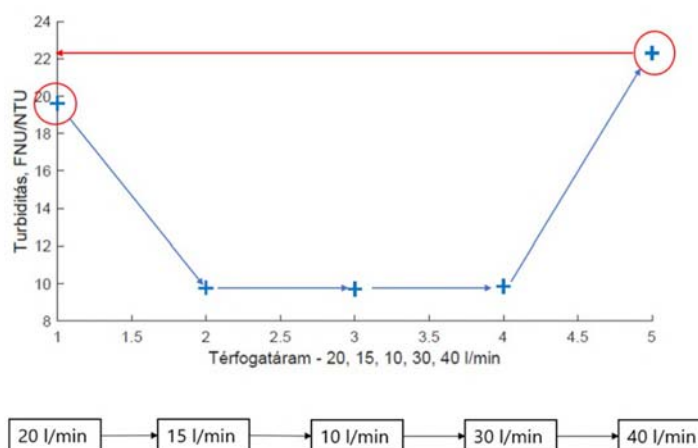
4. ábra

*Turbiditás (bal oldal) és összes mikrobaszám (jobb oldal) az idő függvényében.*

A 4. ábra bal oldalán a turbiditást láthatjuk. Ezt a mennyiséget, mint a mikrobaszám indikátorát tekintjük, azaz a turbiditás növekedése magasabb biológiai aktivitásra enged következtetni. A mérés során kb. a 35. napig bekövetkezett utántöltésig növekszik a turbiditás, majd csökken a 45. napig. Ezután megint növekedésnek indul az újabb töltésig (52. nap), ezután megint csökken. A töltés utáni csökkenést azzal tudjuk magyarázni, hogy a töltéssel bejuttatott újabb mikroorganizmusoknak kb. 10 nap „akklimatizációs” idő szükséges, mielőtt újra növekedésnek indulnának.

Az ábra jobb oldalán a MATE kollégái segítségével kitenyészített mikrobaszámot láthatjuk a víztestben és a cső felületén: a MATE Budai Campus-án található mikrobiológia laborban a rendszerből kivett szegmensek kerültek vizsgálatra. A szegmensekben található víz, illetve a csőfal is mintavételezésre került. Az előkészületek és a mintavételek lamináris fülkében kerülnek elvégzésre, ahol steril és ellenőrzött környezetben végezhetőek el. Itt sajnos a viszonylag ritka mintavétel miatt nem látszik világosan az időjel és a töltés hatása keveredik a fejlődési tendenciákkal.

Végezetül, az 5. ábrán a biofilm leszakadásával kapcsolatos kísérletünket összegezzük. Ennél a sorozatnál a térfogatáramát először csökkentettük 20 l/min-ről 15 és 10 l/perc-re, majd növeltük 30 és 40 l/min-re. Amint az ábrán látható, a turbiditás alacsony értéken maradt egészen 40 l/perc-ig, amikor a biofilm leszakadt és turbiditás megnőtt. A 3. táblázatban meghatároztuk a biofilm leszakadáshoz tartozó áramlási sebességet és becsült fali csúsztatófeszültséget.



5. ábra

*Turbiditás (biofilm leszakadás) és a térfogatáram kapcsolata.*

Térfogatáram, l/min	10	20	30	40
Áramlási sebesség, m/s	0,31	0,63	0,94	1,26
Re, -	8 162	16 324	24 485	32 647
$\tau_w$ , Pa	3,94	15,77	35,48	63,07

**3. táblázat:** Biofilm leszakadás paraméterek.  $D_{cső}=26$  mm, közeg: víz,  $\tau_f=4\lambda \rho/2v^2$ ,  $\lambda=0.02$ .

## 4. Összefoglalás

Az ivóvízellátó rendszerekben folyamatosan jelenlévő biológiai aktivitás előrejelzésére megalkotott numerikus modellek paramétereit csak laboratóriumi mérések alapján tudjuk meghatározni. Jelen közleményben bemutattuk a BME Gépészmérnöki Kar Hidrodinamikai Rendszerek Tanszékén felépült berendezést, mely lehetővé teszi csővezetékben kialakuló biofilm folyamatos mérését mind a víztestben, mind a cső belső felületén. Bemutattuk az első mérési eredményeket. Jelenleg a legígéretesebb eredményünk a biofilm leszakadásával kapcsolatos határ-csúsztatófeszültség meghatározása, mely méréseink szerint  $\tau_f=35$  és  $63$  Pa fal csúsztatófeszültség között helyezkedik el. Víziközmű rendszerek üzemeltetőinek azt javasoljuk, hogy mosatás során legalább  $30\,000$ -es Reynolds számnak megfelelő térfogatáramot alkalmazzanak.

## 5. Köszönetnyilvánítás

A kutatást Dr. Hős Csaba OTKA 135436 számú, „Biztonságos ivóvízellátó rendszerek” c. pályázata támogatta.

## 6. Irodalmi hivatkozások

- [1] Batté, M., Appenzeller, B. M., Grandjean, D., Fass, S., Gauthier, V., Jorand, F., Block, J. C. (2003). *Biofilms in drinking water distribution systems*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2, 147-168. Sandu V., Chiru, A. Automotive fuels, Matrix Rom, Bukarest, 2007.
- [2] Öllös Géza: *Vízminőség-változás a vízelosztó rendszerekben*, Közlekedési Dokumentációs Kft., 2008, ISBN 978-963-552-412-9
- [3] Daniel R. Noguera, Satoshi Okabe, Cristian Picioreanu: *Biofilm modeling: present status and future directions*, Water Science and Technology, Volume 39, Issue 7, 1999, 273-278, ISSN 0273-1223
- [4] Horn, H., Lackner, S. (2014). *Modeling of Biofilm Systems: A Review*. In: Muffler, K., Ulber, R. (eds) Productive Biofilms. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, vol 146. Springer, Cham.
- [5] Chaudhry, M.A.S. and Beg, S.A. (1998), *A Review on the Mathematical Modeling of Biofilm Processes: Advances in Fundamentals of Biofilm Modeling*. Chem. Eng. Technol., 21: 701-710.
- [6] Wanner, O. and Gujer, W. (1986), *A multispecies biofilm model*. Biotechnol. Bioeng., 28: 314-328
- [7] E. Morgenroth, H.J. Eberl, M.C.M. van Loosdrecht, D.R. Noguera, G.E. Pizarro, C. Picioreanu, B.E. Rittmann, A.O. Schwarz, O. Wanner; *Comparing biofilm models for a single species biofilm system*. Water Sci Technol 1 June 2004; 49 (11-12): 145–154.
- [8] Pizarro, G., Griffeth, D. and Noguera, D.R. (2001). *Quantitative cellular automaton model for biofilms*. J. Environ. Eng.-ASCE, 127(9), 782–789.
- [9] Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1998). *Mathematical modeling of biofilm structure with a hybrid differential discrete cellular automaton approach*. Biotech. Bioengr., 58(1), 101–116.
- [10] Morgenroth, E. and Wilderer, P.A. (2000). *Influence of detachment mechanisms on competition in biofilms*. Wat. Res., 34(2), 417–426.
- [11] Morgenroth, E., Eberl, H.J. and van Loosdrecht, M.C.M. (2000a). *Evaluating 3-D and 1-D mathematical models for mass transport in heterogeneous biofilms*. Wat. Sci. Tech., 41(4–5), 347–356.