

ANALIZA BIOFILMA IN SAMOČISTILNI PROCESI V KANALIZACIJSKIH SISTEMIH

ANALYSIS OF BIOFILM AND SELPURIFICATION PROCESS IN THE SEWAGE SYSTEMS

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

joze.panjan@ul-fgg.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, 1000 Ljubljana

doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. teh.

darko.drev@izvrs.si

IZVRS

Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 628.353

Povzetek | V kanalizacijskih sistemih se v omočenem delu cevi in delno nad njim razvije biofilm, ki ima svojo samočistilno sposobnost, podobno kot na čistilnih napravah ali v rekah. Na razvoj in stabilnost biofilma vplivajo številni faktorji. V kanalizacijskem sistemu se dogajajo neprestane spremembe pretokov in kakovosti vode, ki so odvisne od porabe vode, proizvodnje, padavin idr. Na biofilm tako vplivajo odpadna voda, ozračje v kanalu, podlaga, usedline, temperatura, biokemijska in kemijska potreba po kisiku itd. Biofilm je zato zelo heterogen po sestavi, strukturi, zunanjem videzu in odvisen od prevladujočih pogojev v cevi. Zato je tudi samočistilna sposobnost različna. V kanalizacijskih sistemih prevladujejo predvsem heterotrofni mikroorganizmi. Kanalizacijski sistem smo obravnavali kot cevni reaktor. Na dveh različnih sistemih smo opazovali biofilm s TV-kamero in ugotavljali njegovo stanje po določenem času obratovanja le-tega. Izračunali smo masno bilanco kisika na določenem odseku cevne sistema.

Summary | In a dry flow of sewage systems, in a wet part of the pipe and partially above it, there develops a biofilm with self purification ability, similar as in the waste water plants or in rivers. The development and the stability of the biofilm are influenced by numerous factors. The changes of the water flow and water quality appear continually depending on water consumption, production, rainfall, etc. The biofilm is also affected by waste water, the atmosphere in the channel, substrates, sediments, temperature, biochemical and chemical demand of oxygen, etc. Therefore, the biofilm is very heterogeneous due to composition, structure, external appearance and is influenced by the prevailing conditions in the pipe. Thus, self purification is much diversified. In the sewage systems heterotrophic microorganisms, which decompose and form new compounds, prevail. We considered a sewage system as a pipe reactor (plug flow). On two separate sewage systems we monitored a biofilm by TV camera and tried to define its state after a specified time of functioning. In such a way the mass balance of oxygen at a given section of pipe could be calculated.

1 • UVOD

Zaradi obremenjevanja okolja z odpadnimi vodami je pomembno, da spremljamo vsa dogajanja že pri vstopu odpadne vode v kanalizacijski sistem (KS) in jo opazujemo vse do čistilne naprave (ČN) ali izpusta v naravo. V kanalizacijski sistem vstopajo mikroorganizmi že z odpadno vodo, nato se njihovo število vzdolž kanalizacijskega sistema in na čistilni napravi lahko načrtno povečujejo. Mikroorganizmi so lahko v lebdečem stanju ali pritrjeni na podlago. Slednji predstavljajo biofilme, ki se razvijajo povsod, kjer je površina v stiku z vodo. Fizikalni, biološki in kemijski procesi nastopijo in potekajo že med samim transportom odpadne vode. Zato je nujno, da kanalizacijski sistem vključimo kot enakovreden, celosten čistilni proces, ki ima

pomembno funkcijo pri zaščiti voda. Proces razgradnje v KS so večinoma ugodni, ker zmanjšajo vsebnost organskih komponent in s tem obremenitev čistilnih naprav ali predvsem vodotokov. Samočiščenje v KS pa je lahko tudi delno problematično, saj lahko odstrani tudi tisti del biorazgradljivih snovi, ki je koristen na ČN, na primer, ko se delno odstranjujeta dušik in fosfor. Kadar pride do anaerobnih razmer v KS, pa se lahko pojavljajo tudi sulfid, metan in drugi plini, ki povzročajo korozijo na ceveh in druge negativne pojave.

Samočistilni procesi v KS se šele zadnjih nekaj let intenzivno raziskujejo. Kanalizacijske cevi dejansko predstavljajo potencialno velik dodaten volumen in površino za čiščenje odpadne vode. Obravnavali bomo predvsem

stacionarno stanje biofilma v mešanem KS in v kanalih z odpadno vodo pri ločenem sistemu. Čeprav so osnovni kemični in biološki procesi v KS delno že znani iz delovanja na ČN, pa je zaradi boljšega poznavanja medsebojnega delovanja in kvantifikacije potrebno dogajanje preučiti natančneje na mikroravni. Ker je v KS pri samočiščenju najpomembnejši biofilm, je pomembno poznati kinetiko biofilmov in odgovoriti na naslednja vprašanja: kakšna je sestava odpadne vode, katere vrste samočistilnih procesov se odvijajo v kanalizaciji, ali lahko kvantificiramo potek procesov razgradnje, področja kanalizacije in robni pogoji, ki omejujejo proces razgradnje, kakšno vlogo ima biofilmska plast na procese razgradnje, lastnosti biofilmske plasti in usedlin ter erozija biofilma, kisikova bilanca ter kvantificiranje procesov in/ali lahko kanalizacijske samočistilne procese opišemo z matematičnimi modeli idr.

2 • MATERIALI IN METODE

Vse fizikalne, kemijske, biokemijske in biološke procese čiščenja, ki vplivajo na količino, sestavo in lastnosti odpadnih snovi v vodnih sistemih in/ali vodnem okolju, spadajo k procesom samočiščenja (avtopurifikaciji) voda. Danes vemo, da so pri tem ključne energetske in snovne spremembe oziroma kroženje energije in snovi v biotopu. Biofilmsko plast so imeli najprej za sovražno tvorbo, saj je predstavljala stalno nevarnost za oskrbovalce sistemov in splošno higieno. Biofilm je skupina mikroorganizmov, obdanih s sluzjo, ki jo sami izločajo, in so pritrjeni na trdo ali živo podlago. Pri odpadni vodi njihovo možnost izkoriščamo za čiščenje in samočiščenje. V preteklosti so si mikroorganizme v biofilmu predstavljali kot neurejen skupek bakterij, ki niso razvrščene v določeni strukturi ali po določenem vzorcu. Novi mikroskopski postopki povečave biofilmov brez predhodnega razkroja želatinaste strukture so omogočili odkritje kompleksne strukture biofilmov. Čeprav imajo mikroorganizmi – bakterije – v biofilmu popolnoma enako genetsko zasnovo kot njeni prosto plavajoči bratranci, se njihova biokemija zelo razlikuje zaradi prehoda na različno skupino genov, na primer, do 40 % beljakovin stene celic se razlikuje med bakterijami v biofilmu in prosto plavajočimi bakterijami. Biomasa nastaja na račun alohtonih in avtohtonih razgradljivih snovi. Nastajati začne, če je

v vodi dovolj anorganskih hranil, kisika in toplote.

Za mineralizacijo organske snovi ali pa za rast novih celic je treba prevzeti organsko snov v notranjost celice, kjer se odvijajo najpomembnejši biokemijski procesi. Poleg nove celične substance nastajajo produkti mineralizacije, kot je na primer amonijak. Če so bakterije sposobne delovanja samo v navzočnosti kisika, jih imenujemo aerobne bakterije. Nekatere oblike bakterij pa so sposobne življenja tako, da kisik odtegujejo spojinam, ki so bogate na kisikovih spojinah, na primer nitratih, in jih zato imenujemo nitrifikatorji. Druge vrste bakterij pa spremenijo svoj način delovanja pri pomanjkanju kisika v aerobni potek in organske snovi ne oksidirajo več popolnoma, ampak le delno, in tako izločajo kisline ali alkohole. Take bakterije imenujemo fakultativno anaerobne bakterije. Poznamo še obligatne anaerobne bakterije, za katere je raztopljen kisik toksičen, in ki razgradijo organsko snov le do še relativno energetsko bogatih kislin in alkoholov.

Bakterije so sestavljene v pretežni meri iz vode (ca. 80 %), ostanek je organska snov. Ta sestoji približno 50 % iz beljakovin, 10–20 % predstavljajo celične kisline, ostanek pa je razdeljen na maščobe ali maščobam podobne snovi ter polisaharide v membranah in steni celice. Stena celice same vsebuje do

20 % skupne organske snovi. Od elementov prevladuje ogljik, sledijo pa mu kisik, dušik, vodik in fosfor.

Biofilm izkazuje tudi visoko stopnjo organiziranosti, kjer mikroorganizmi tvorijo strukturirane, koordinirane in funkcionalne združbe. Funkcionirajo kot nekakšen rudimentarni večcelični organizmi (kolektivi). Biofilm je sestavljen še iz aerobnih vodnih kanalov in anaerobnega tkiva.

V kanalizacijskih sistemih prevladujejo predvsem heterotrofni mikroorganizmi, ki razgrajujejo in tvorijo nove spojine. Kanalizacijsko cev lahko shematsko razdelimo na 4 podpodročja: kanalizacijsko ozračje, odpadna voda, biofilm in usedline, ki medsebojno vplivajo drug na drugega – slika 1 ((Gardsal, 1994), (Wilderer, 2001)):

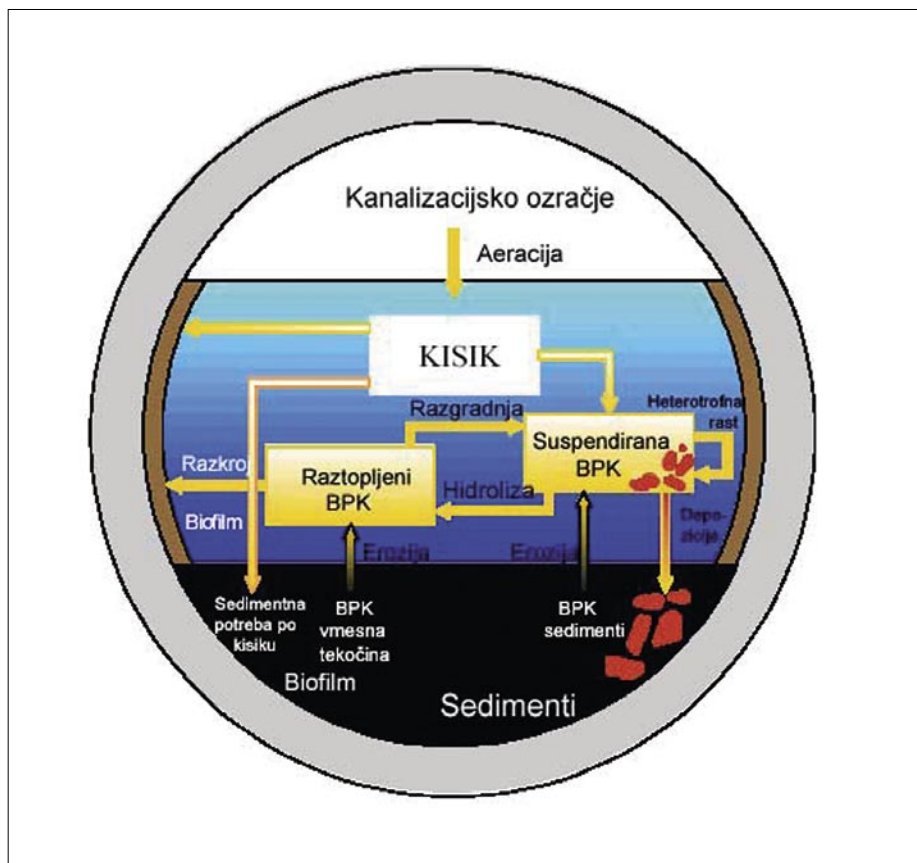
- **Kanalizacijsko ozračje.** Večino volumna ob sušnem vremenu v ceveh predstavlja zračni del. Vsebnost oziroma kakovost zraka je odvisna od kvalitete kanalizacije (učinek dimnika).
- **Odpadna voda.** Ta zavzame večji del leta pri mešanem sistemu približno 10 % celotnega volumna cevi. Seveda se ta odstotek spreminja v odvisnosti od vrste sistema, porabe vode, industrijske proizvodnje, vremenskih razmer itd., kar za biofilm, ki se razvije v omočenem območju odpadne vode in delno nad njim (zaradi zadostne vlažnosti), v ravnotežnem stanju ni več zelo pomembno.
- **Usedline.** Usedline se pojavijo predvsem v primeru premajhne odtočne hitrosti odpadne vode v slabo zgrajenih kanalih in v novih

sosekah, ki še niso »polno« naseljene. Usedline se morajo izpirati bodisi z izpiralnimi vozili ali na drug ustrezen način.

• **Biofilm.** Kanalizacijski biofilm ali biofilmska plast se razteza znotraj kanalizacijskih cevi. Biofilm preprečuje splakovanje bakterij, predstavlja tudi zaščito v primeru izjemnih razmer, kot so suša in bakteriofagi.

Na medsebojno obnašanje omenjenih štirih področij vplivajo tudi naslednji faktorji: dimenzije, padci, nagibi, stenska hrapavost, temperatura ter zračni tlak, dotok odpadnih vod, infiltracija vode in dotoka padavinske vode in dimenzije cevi, topnost kisika, pH, sulfati, metan idr. (Škrbec, 2005). Sestava sveže odpadne vode se razlikuje od odpadne vode, ki potuje po kanalizaciji že več ur. Tako je predvsem zaradi mikrobiološke rasti in dihanja v odpadni vodi in v biofilmski plasti, topljivosti, encimski hidrolizi makromolekul ter hidravličnih strižnih silah, ki nastopajo vzdolž KS. Tako ima gospodinjstva odpadna voda svetlosivo barvo, medtem ko je za razpadajočo vodo značilna temnosiva do črna barva. Popolnoma drugačen vonj in barva sta značilna za industrijsko vodo, pa tudi za odpadno kmetijsko vodo (Panjan, 1999). Na sestavo odpadne vode vplivajo številni faktorji, kot so priključena industrija in obrt, število priključenih prebivalcev ter njihov življenjski standard, priključene prometne površine, količina infiltracijske podzemne vode. Gospodinjstva odpadna voda ima zelo kompleksno sestavo, ki temelji na organskih in anorganskih snoveh. Tako lahko tudi anorganske snovi (pesek, zeoliti ipd.), maščobe in druge snovi (kovine) odločilno vplivajo na lastnosti in delovanje biofilma. Naše raziskave so pokazale, da je razvoj biofilma odvisen tudi od vrste materialov, iz katerih je zgrajen kanalizacijski sistem, ter same konstrukcije kanalizacije. Tako smo izvedli obsežne preskuse rasti biomase na različnih nosilcih. Pri tem smo na primer ugotovili, da se na anorganskih nosilcih, na primer betonskih ceveh, razvije bistveno več biofilma kot na inertnih nosilcih (plastične cevi).

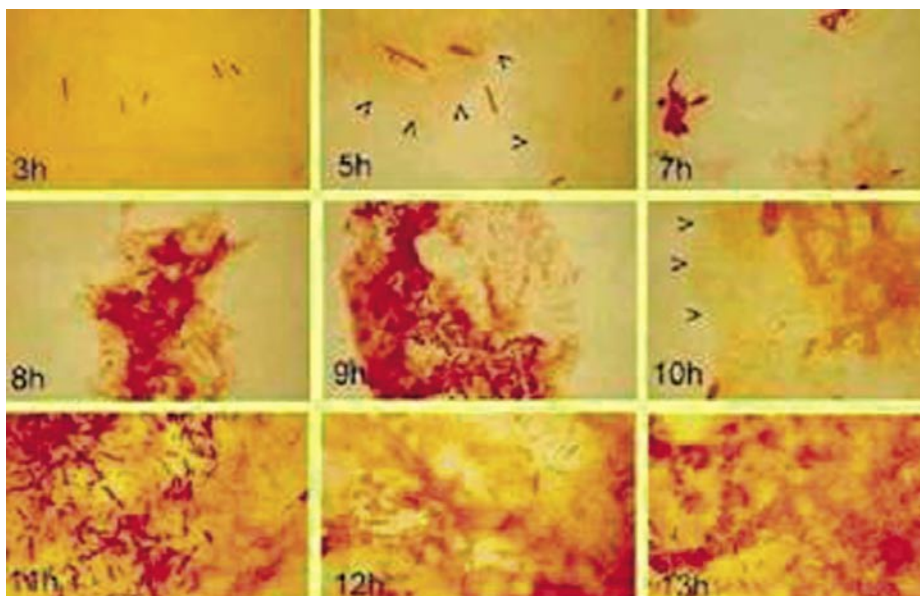
Razvoj biofilma je najbolj odvisen od površine podlage, hrapavosti, hitrosti vode in količine hranil (substrata) itd. Biofilm se zgradi tako, da se takoj po stiku z vodo na površino čiste podlage (cevi) zalepijo organske molekule. Planktonske (prosto plavajoče) bakterije se najprej zalepijo z elektrostatičnimi privlačnimi silami. Tako se najprej stena celice zalepi z elektrostatičnimi privlačnimi silami, nato pa se še nekatere celice trajno zalepijo na površino z ekstracelularnimi (zunajceličnimi)



Slika 1 • Shematski prikaz področij v kanalizacijski cevi (Gardsal, 1994)

polimernimi snovmi ali pa z lepljivimi polimeri. Takemu načinu pritrjevanja pravimo lepljenje »pionirskih« bakterij. Sluz nato nastaja tako, da ekstracelularni polimeri, ki so sestavljeni iz naelektrenih in nevtralnih polisaharidnih skupin, celico cementirajo na steno podlage. Delujejo kot sistem ionske izmenjave za lovljenje in koncentriranje hranljivih snovi iz vode. Akumulacija hranljivih snovi omogoča razmnoževanje in razraščanje pionirskih celic. Hčerinske celice potem izdelajo svoj lastni eksopolimer, kar zelo poveča površino ionske izmenjave. S tem se ustvari precej hitro cvetoča kolonija bakterij. V zrelem biofilmu je večina volumna (75–95 %) zasedena z ohlapno organizirano polisaharidno matriko, ki je napolnjena z vodo. Ta vodena sluz je vzrok želatinaste spolzčnosti površin, pokritih z biofilmom. To je kompleksna, metabolično kooperativna skupnost, sestavljena iz različnih vrst, ki živijo v lastni majhni, po svoji meri izdelani niši, ki je izredno prilagojena »neprijaznemu okolju«. Pod aerobnim biofilmom se lahko razvije anaerobna plast. Z naraščanjem debeline iz mirnega področja na stenah podlage (cevi) v področje bolj turbulentnega pretoka se nekatere celice odlučijo. Te proste

celice lahko potem kolonizirajo nižje ležeče podlage. Za razvoj povsem delujočega biofilma je – odvisno od sistema – potrebnih nekaj ur ali nekaj tednov (Huisman, 2001). Mikroorganizmi potrebujejo za tvorbo biofilmske plasti energijo, hranilne sestavine in življenjski prostor, da jih ne bi povsem odplavilo. Tako se lahko razvijejo tudi počasneje rastoče anaerobne bakterije, kot so metan in žveplo reducirajoče bakterije, ki tvorijo v tem času večjo populacijo mikroorganizmov. Odplaknjena biofilmska plast pa poveča koncentracijo biomase v odpadni vodi dolvodno. Večina mikroorganizmov je pritrjena in raste na površini cevi. Tvorba biofilma, ki, časovno gledano, lahko nastane v nekaj urah kakor tudi v nekaj tednih, se odvija v treh fazah: začetno sprejemanje na podlago, tvorba prvih formacij in razraščanje – slika 2. Premične bakterije plavajo v smeri višjih koncentracij hranilnih snovi, ki se nahajajo na stenah podlage. Številne od njih celo spreminjajo obliko celice, da bi povečale privlačnost površin. Ko celica bakterije doseže površino neke podlage, se zasidra nanjo. Po vezavi na podlago pride do produkcije ekstracelularnega materiala.



Slika 2 • Kronološki prikaz razvoja biofilma, opazovanega s pomočjo mikroskopa

Ekstracelularni biopolimeri so predvsem zgrajeni iz polisaharidov in vode (~90%). Osnovna enota je običajno zgrajena iz dveh ali treh sladkorjev. Divalentni kation lahko tvori elektrostatske mostove med karboksilnimi in sulfatnimi skupinami polisaharidov, kar stabilizira biofilm. Med dozorevanjem se debelina biofilma vse bolj veča in prehaja v turbulentni pretok. To pa navadno povzroči, da se nekatere celice odlučijo, postanejo proste

in lahko kolonizirajo na nižje ležeče podlage (Allison, 2000).

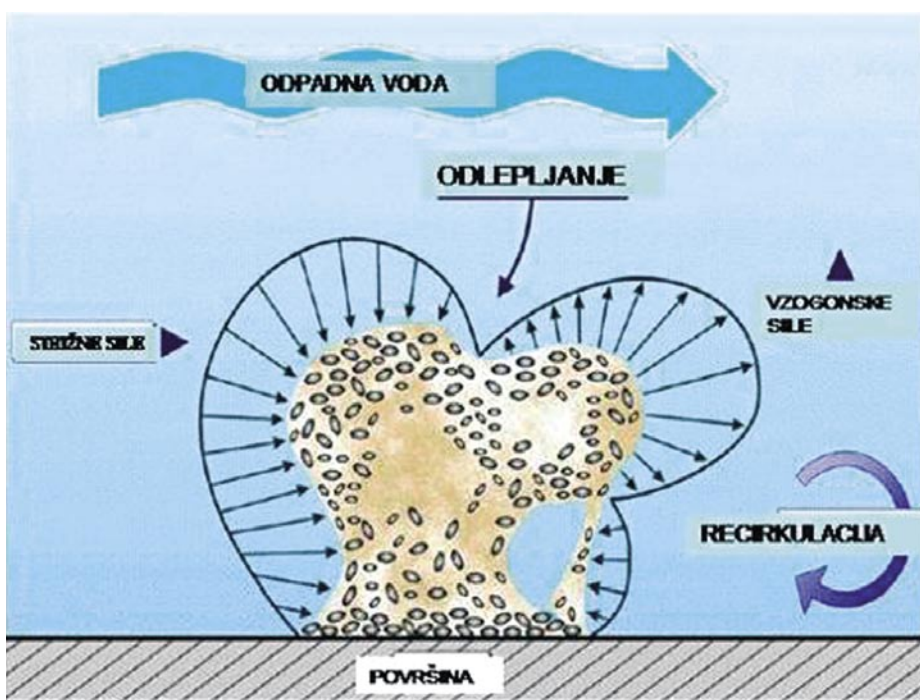
Omejevanje količine razpoložljivih hranljivih snovi zavira rast bakterij, vendar za življenje številnih bakterij zadoščajo majhne količine organske snovi. Teoretično samo 1 ppb organske snovi v vodi zadošča za nastajanje 9500 bakterij/ml. Prav tako za rast zadoščajo že nizke količine kisika. Biofilm doseže ravnotežno debelino, ki je odvisna od hitrosti

tekočine in koncentracije hranljivih snovi. Ob predpostavki, da je dovolj hranljivih snovi, bo debelina biofilma približno enaka globini laminarne plasti tekočine. S povečanim pretokom oziroma hitrostjo upada debelina biofilma. Pri hitrosti 2 m/s se debelina biofilma omeji na 50 μm . Biofilm lahko zraste do 100 plasti posameznih celic bakterij. Aerobne bakterije v bližini zunanjih površin biofilma porabljajo kisik. Če je biofilm debel, se bo kisik porabil in se bo na površini cevi ustvarilo anaerobno področje.

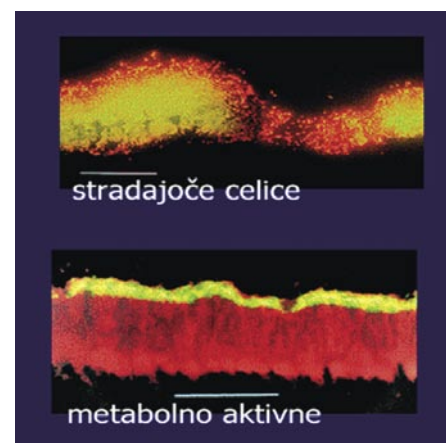
V primerjavi s prosto plavajočimi planktonskimi bakterijami so bakterije v biofilmu lahko od 150- do 3000-krat odpornejše na strupene snovi, kot so npr. prosti klor idr.

Hitrost vode omejuje debelino biofilma. Višja hitrost vode ne preprečuje lepljenja bakterij in tudi ne zadošča za popolno odstranitev obstoječega biofilma. Kljub hitrosti je pretok vode najnižji na površini podlage. Celo takrat, ko je pretok v središču cevi turbulenten, je na površini podloge hitrost vode teoretično enaka ničli. V laminarnem sloju – ob površini podlage – je zato debelina plasti biofilma enaka maksimalni debelini biofilma – slika 3.

V biofilmski plasti najdemo vse reakcije dušikovega cikla, razen fiksacije dušika. Nitrifikacijske bakterije so prisotne v biofilmski plasti, vendar je njihova koncentracija približno 1000-krat manjša od koncentracije heterotrofov. Nitrifikacija igra tako le manjšo vlogo pri biofilmskih procesih. Morfologija biofilma opisuje njegovi fizično obliko in notranjo zgradbo. Pomembna je za razumevanje interakcij z zunanjim okoljem (kot je zunanji masni transport) ter funkcijo biofilma.



Slika 3 • Vpliv hidrodinamičnih sil na biofilm; <http://www.sewer.dk/WATS.htm>

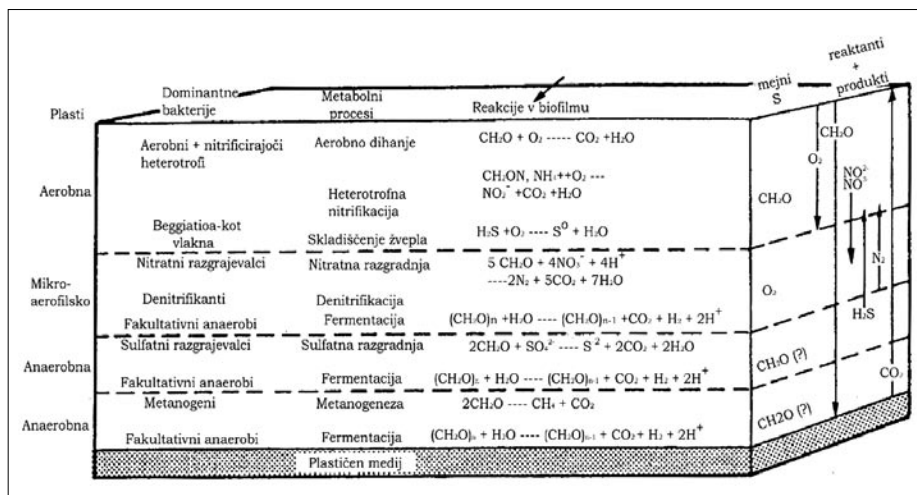


Slika 4 • Metabolna aktivnost celic v biofilmu

3 • ANALIZA DELOVANJA BIOFILMA IN MASNA BILANCA

Zrela biofilmska plast je zelo kompleksna, kar se tiče mikroorganizmov, mikrobiološke zgradbe in procesov. Sestavljena je iz relativno trdne in urejene bazne plasti in manj trdne plasti z nepravilno topografijo. Če pogledamo vertikalno zgradbo, se pojavijo procesi dihanja že nekaj milimetrov pod površino plasti. Z globino se spreminjajo tudi morfologija in dinamika ter vrsta procesov. Splošno je v veljavi naslednji opis topografije (Saldanha, 2002). Na površju biofilma so makropore, ki jih imenujemo tudi vodni kanali. Ti kanali pospešijo in olajšajo prehod snovi skozi biofilm. V gravitacijskih kanalih je biofilmska plast nekaj milimetrov debelejša, njena rast pa je edinstvena v primeru močnega organskega onesačenja in velikih odtočnih hitrosti. Absorpcija kisika ni skoraj nič odvisna od koncentracije le-tega v odpadni vodi, čeprav je prehod kisika velik. Omembe vredno je tudi to, da biofilmska plast ne raste le na steni cevi pod gladino odpadne vode, temveč tudi na stenah kanalizacijskega ozračja (Heydorn, 2000). Tu biofilm lahko obstane zaradi visoke stopnje nasičenja z vlago in aerosolnega dovajanja hranil. Tako je ta vrsta biofilmske plasti najizrazitejša pri kaskadah in drugih delih, ki tvorijo aerosole. Na sliki 5 so prikazani vertikalni sloji biofilmske plasti, dominantne bakterije, metabolni procesi in reakcije in reaktanti.

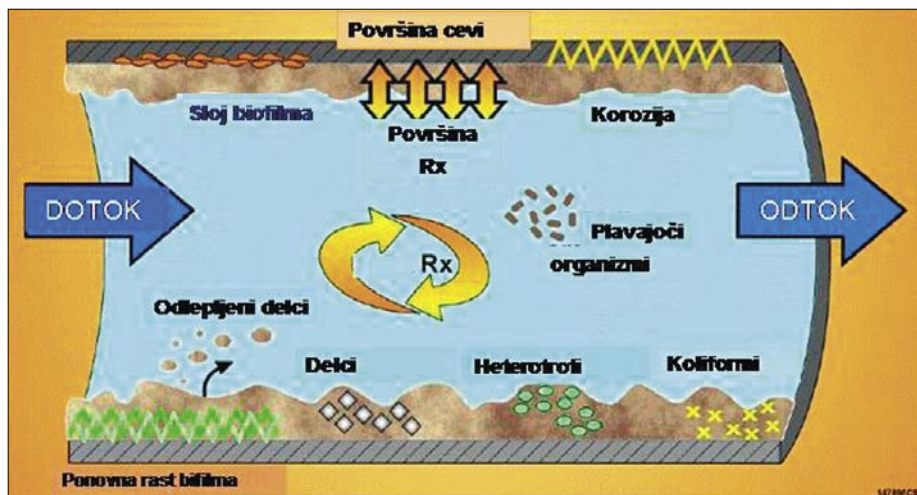
Prostorska razporeditev različnih fizioloških mikroorganizmov odločilno vpliva na lastnosti biofilma. V biofilmu so prisotni večinoma heterotrofni mikroorganizmi, njihova porazdelitev je dokaj konstantna. Število fakultativnih bakterij raste od površja proti globlji plastem. V površinskih slojih biofilma znaša število omenjenih bakterij 10^7 – 10^8 cm^{-3} , medtem ko jih je v globlji plasteh več, 10^9 – 10^{10} m^{-3} . Populacija nitrificirajočih bakterij znaša 10^4 – 10^6 organizmov/ cm^3 . Vse bakterije v zgornjih slojih so aktivne, medtem ko je v spodnjih slojih aktivnih le 15–25 % živih organizmov. Drugi so v fazi mirovanja. Specifična masa biofilma z globino narašča, in sicer od $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ v zgornjih slojih do $97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ suhe mase snovi v globlji plasteh. Poroznost debelejših biofilmov ($> 500 \mu\text{m}$) z globino pada. V zgornjih plasteh biofilma znaša med 83–92 %, v spodnjih plasteh pa 57–64 %. Raziskave kažejo, da je najvišja celotna kanalizacijska poraba kisika $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. S procesom dihanja v odpadni vodi in empiričnim računanjem difuzije kisika iz kanalskega ozračja so lahko določili povprečno biofilmsko stopnjo porabe. Ta



Slika 5 • Vertikalni sloji biofilmske plasti (Huisman, 2001)

znaša približno $8,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ kisika in je odvisna od temperature. V laboratorijskem biofilmskem reaktorju so s pravo odpadno vodo dobili drugačne rezultate. Ti so znašali od 29 do $43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ kisika. Manandhar in Schroeder (Manandhar, 1995) sta testirala obnašanje umetne odpadne vode v pravokotnem kanalu dolžine 90 metrov. Rezultati so pokazali, da se je stopnja nitrifikacije zmanjšala z 1,5 na $0,5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ dušika, ko sta se KPK in skupna dušikova obremenitev povečala s 17 g KPK $\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ in $1,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ dušika na 62 g KPK ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$) in $8 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ dušika. Denitrifikacija pa se je povečala z $0,09 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ dušika na $0,5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ dušika. Treba je omeniti, da je bila temperatura $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Nekoliko drugačen kanalizacijski koncept sta opravila Tanaka in Vollertsen (Hvitved, 1999). Biofilm sta

gojila na polipropilenskih ploščah in ga naknadno vgradila v kanal dolžine 3 metrov. Ker sta za substrat uporabila glukozo, je biomasa za prilagoditev potrebovala nekaj časa. Kmalu nato sta sledili meritvi aktivnosti celotne in delne biomase. Aktivnost biomase biofilmske plasti je znašala od $18 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ kisika pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in $25 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ kisika pri $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Naslednji korak v prepoznavanju naravnih samočistilnih procesov je dodajanje aktivnega blata na začetku kanala in vpihovanje zraka oziroma kisika na določenih točkah. Na ta način se glavni kanal spremeni v sistem cevne reaktorja (plug flow), glej sliko 10. Ker so bakterije izpostavljene višjim količinam substrata kot pri zvezno odtočnih reaktorjih, je hitrost porabe kisika praviloma večja.



Slika 6 • Prikaz sistema kot cevne reaktorja (plug flow)

Razpon aerobnih transformacij je precej odvisen od kvalitete odpadne vode, zunanjih procesov in pogojev v kanalizaciji. V obsežnih raziskavah so ugotovili porabo kisika 2–20 g (m³ · h⁻¹).

Masna bilanca snovi v kanalizacijskem sistemu

Pri masni bilanci nas zanimajo različne snovi, kot so na primer kisik, hranila dušik (N) in fosfor (P), kemijska potreba po kisiku (KPK), biokemijska potreba (BPK₅) itd. Najprej si zapišemo masno bilanco snovi v splošni obliki:

V prvem koraku si oglejmo dinamično in statično stanje kisika.

$$\text{AKUMULACIJA} = \text{VTOK} - \text{IZTOK} - \text{PRETVORBA}$$

$$\text{Akumulacija} = \text{vtok} + \left[\begin{array}{l} \text{površinska} \\ \text{reaeracija} \end{array} \right] - \text{iztok} - \left[\begin{array}{l} \text{pretvorba z} \\ \text{biofilmom} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{pretvorba v} \\ \text{raztopini} \end{array} \right] \quad (1)$$

Dinamično stanje

Na določenem odseku kanalizacije je masna bilanca sestavljena iz naslednjih elementov (Hvitved, 1999):

kjer je:

$$\left(\frac{\partial C_o}{\partial t} \right) = \bar{u} \cdot \left(\frac{\partial C_o}{\partial x} \right) + k_t \cdot \frac{w}{A_{cr}} \cdot (C_o^* + C_o) - r_{o,f}^n \cdot \frac{P_w}{A_{cr}} - r_{o,w} \quad (2)$$

t – čas (s)

\bar{u} – povprečna hitrost (m · s⁻¹)

x – dolžinska koordinata (m)

$r_{o,w}$ – stopnja pretvorbe pri suspendirani biomasi (g_{O₂} · m⁻³ · s⁻¹)

$r_{o,f}^n$ – površinska stopnja biofilmske porabe kisika (g · m⁻² · s⁻¹)

A_{cr} – prerez področja (m²)

A_f – omočeno področje biofilma (m²)

P_w – omočeni obod (m)

k_t – hitrost prenosa mase v tekoči fazi (m · s⁻¹)

w – širina površja (m)

C_o – koncentracija kisika v tekočini (mg · l⁻¹)

C_o^* – koncentracija kisika v ravnotežju z atmosfero (kg · l⁻¹)

Statično ravnotežje

Statično ravnotežje mase je lahko dober približek, ko je akumulacija majhna v primerjavi s transportom in pretvorbo in ko so karakteristični časi meritev veliko krajši od sprememb toka.

Stalna bilanca kisikove mase v kanalizaciji z infiltracijo podtalne vode ali tuje vode (drenažna voda, podtalnice idr., ki lahko vplivajo na ravnotežje mase), a brez akumulacije, je lahko izražena kot sledi (Hvitved, 1999):

V ravnotežnem stanju pa je:

$$\text{VTOK} = \text{IZTOK} + \text{PRETVORBA}$$

$$\text{Vtok} + \left[\begin{array}{l} \text{površinska} \\ \text{reaeracija} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{infiltracija} \\ \text{podtalnice} \end{array} \right] = \text{iztok} + \left[\begin{array}{l} \text{respiracija} \\ \text{biofilma} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{respiracija} \\ \text{suspenzije} \end{array} \right] \quad (3)$$

$$Q_{out} \cdot C_{O,out} + r_{O,f} \cdot A_f + r_{O,w} \cdot \bar{Q} \cdot t = Q_{in} \cdot C_{O,in} + k_t a \cdot (C_o^* - \bar{C}_o) \cdot \bar{Q} \cdot t + Q_{gw,inf} \cdot C_{O,gw} \quad (4)$$

$$\phi_{O,out} + \phi_{O,f} + \phi_{O,w} = \phi_{O,in} + \phi_{O,surf} + \phi_{O,gw} \quad (5)$$

kjer je ϕ_o vnos kisika (kg · d⁻¹) oziroma:

$Q_{out} \cdot C_{O,out} = \phi_{O,out}$ – delež kisika na iztoku (kg · d⁻¹)

$r_{O,f} \cdot A_f = \phi_{O,f}$ – biofilmska respiracijska aktivnost (kg · d⁻¹)

$$r_{O,w} \cdot \bar{Q} \cdot t = \Phi_{O,w} \text{ – respiracija suspendiranih snovi v odpadni vodi (kg \cdot d^{-1})}$$

$$Q_{in} \cdot C_{O,in} = \Phi_{O,in} \text{ – vnos kisika na vtoku (kg \cdot d^{-1})}$$

$$k_{la} \cdot (C_{O}^* - \bar{C}_O) \cdot Q \cdot t = \Phi_{O,surf} \text{ – navzemanje kisika (kg \cdot d^{-1})}$$

$$Q_{gw,inf} \cdot C_{O,gw} = \Phi_{O,gw} \text{ – infiltracija podtalne vode (kg \cdot d^{-1})}$$

kjer so:

\bar{Q} – povprečen odtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Q_{in}, Q_{out} – dotok, odtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)

$Q_{gw,inf}$ – infiltracija podtalnice ($m^3 \cdot s^{-1}$)

A_r – omočeno področje biofilma (m^2)

t_r – čas (s)

k_{la} – koeficient ponovne aeracije (s^{-1}), kjer je a področje površja s specifično izmenjavo ($m^2 \cdot m^{-3}$) = w/A_{cr}

$C_{O,gw}$ – koncentracija kisika v podtalni vodi ($mg \cdot l^{-1}$)

Nihanja kisika v KS so merjena z različnimi metodami. Bilance kisika pod različnimi hidrodinamičnimi pogoji so pokazale, da lahko relativni prispevek biofilma, odpadne vode, ponovne aeracije in vtoka ter iztoka z vodo močno niha. KPK-pretvorba v kanalizaciji bi lahko bila določena iz aerobne aktivnosti. Aerobno aktivnost se da meriti z respirometrom kot stopnjo vsrkanja kisika (r_O).

Spremembe koncentracij posameznih sestavin odpadne vode (ogljikovi hidrati, dušikove

komponente, lipidi in maščobe) nakazujejo procese pretvorbe v kanalizaciji, čeprav nam ne dajejo odločilnih informacij o usodi produktov. Uravnoveženje suspendiranih ali raztopljenih komponent bi moralo vključevati tudi sedimentacijo in fiksacijo v obliki biomase (prirasli ali suspendirani). Ob zdajšnji količini znanja je najbolj informativna spremenljivka za zbiranje podatkov o pretvorbi v kanalizacijskem sistemu pretvorba kisika, ker ima osrednjo vlogo in se jo da z lahkoto izmeriti.

Suspendirana biomasa v odpadni vodi na začetku raste. Ko se količina razpoložljivega substrata zmanjša, se stopnja rasti zmanjša. Po enem dnevu je doseženo ravnotežje. Tako obnašanje se lahko preprosto modelira z modelom poživiljenega blata št. 3 (Gujer, 1991), s heterotrofi kot edino biomaso (rezultati niso prikazani).

Na respiracijo odpadne vode (r_O) lahko vplivajo tudi močne dnevne spremembe v sestavi odpadne vode.

4 • VIZUALNI MONITORING BIOFILMA IN RAČUN MASNE BILANCE KISIKA

4.1 Vizualni prikaz biofilma

Pri pregledu kanalskih cevi sta sodelovali dve podjetji. S TV-kamero je bila pregledana betonska cev premera Φ 600 mm na odseku dolžine 52,76 m. Kanalizacija je bila vgrajena na tem odseku leta 2002 in posneta s

TV-kamero v t.i. »ničelnem« stanju, nato pa še leta 2006 in 27. 12. 2007 – slika 13. Snemana je bila še betonska cev premera Φ 300 mm v dolžini 30,84 m, vgrajena leta 2000 in tudi posneta s TV-kamero v t. i. »ničelnem« stanju, nato pa še 29. 11. 2007. Iz posnetkov se sicer

vidita obod oziroma višina razvoja biofilma po cevi, ne pa tudi struktura, z bližnjimi posnetki pa so vidne kolonije biofilma.

4.2 Primer izračuna bilance kisika

Za kanalski odsek dolžine 1800 m smo na osnovi enačbe 4 za tri različna datumska vzorčenja na štirih lokacijah, ki so podana v preglednici 1, izračunali bilanco kisika, ki je prikazana v preglednici 2.



Slika 8 • Pogled v notranjosti cevi Φ 300 mm in Φ 600 mm

Parameter	Enote		1. vzorčenje	2. vzorčenje	3. vzorčenje
Pretok	(l · s ⁻¹)		16	7	18
Globina vode	(mm)		83	64	89
Hitrost	(m · s ⁻¹)		0,026	0,023	0,027
Infiltr. podtal.	(l · s ⁻¹)		1	0,42	0
Čas toka	(s)	Mesto 1-2	1510	2040	1425
Čas toka	(s)	Mesto 2-3	1600	2130	1545
Čas toka	(s)	Mesto 3-4	1690	2160	1570
Čas toka	(min)	Vsota	79,7	104,7	75,4
Temp.	(°C)		14,8	13,1	13,9
Satur. konc. kisika	(g · m ⁻³)		9,6	10,0	9,8
Konc. kisika	(g · m ⁻³)	Mesto 1	3,33	4,79	3,15
Konc. kisika	(g · m ⁻³)	Mesto 2	2,03	3,83	1,93
Konc. kisika	(g · m ⁻³)	Mesto 3	1,33	3,37	1,24
Konc. kisika	(g · m ⁻³)	Mesto 4	1	3,09	0,71
Povpr. konc. O ₂	(g · m ⁻³)		1,8	3,4	1,6
Koef. reaeracije	(d ⁻¹)		8,96	8,88	8,77

Preglednica 1 • Merjene koncentracije in pretoki na 4 krajih v kanalizaciji (Mourato, 2002)



Slika 9 • Prikaz kolonij biofilma na cevi s TV-kamere (Panjan, 2008)

Kisikova masna bilanca (kg · d ⁻¹)									
Vzorčenje	Vnos kisika (kg · d ⁻¹)				Poraba kisika (kg · d ⁻¹)				Razlika
	Vtok	Reaeracija	Podtalnica	Vsota	Odp. voda	Biofilm	Iztok	Vsota	
1.	4,6	5,3	0,13	10,03	-5,5	-3,6	-1,4	-10,5	0,47
2.	2,9	2,6	0,06	5,56	-0,4	-3,1	-1,9	-5,4	-0,16
3.	4,9	5,9	0	10,8	-5,9	-3,6	-1,1	-10,6	-0,2

Preglednica 2 • Rezultati izračunane masne bilance kisika na kanalskem odseku

Lahko vidimo, da so podnevi (vzorčenje 1 in 3) stopnje biofilmske respiracije in respiracije odpadne vode podobne. Ponoči (vzorčenje 2) se je vsrkavanje kisika v biofilm rahlo zmanjšalo, ko je področje zmočenega biofilma postalo manjše. Biofilmska aktivnost ostane visoka kljub pomanjkanju substrata v

odpadni vodi še nekaj ur, verjetno zaradi prisotnosti shranjenega materiala in delcev substrata. Stopnja respiracije odpadne vode pa se je močno zmanjšala. To je povzročil manjši odtok ponoči, posledično je bila zmanjšana erozija biofilma, pa tudi količina fekalij s pomanjkanjem substrata. Nastala razlika med

masnimi pritoki in odtoki, ki pa ne presega 4 % skupne bilance, je lahko posledica netočnih meritev, možnega puščanja kanalizacije, nezveznih meritev, približkov pri izračunih itd. Same napake pri bilanci kisika pa lahko izmerimo z različnimi metodami.

5 • SKLEP

Ena od pomembnih funkcij, ki se danes vse bolj raziskujejo v kanalizacijskih sistemih, so samočistilni procesi. Vsi kanalizacijski predeli, kanalizacijsko ozračje, odpadna voda in biofilm medsebojno vplivajo drug na drugega. Biološka aktivnost odpadne vode je v razmerju s količino prisotnih organskih delcev.

Aktivnost v odpadni vodi je ponoči manjša, ker jo manjša količina hranil omejuje. Odvisna je od veliko faktorjev (padavine, količina in sestava odpadne vode, lastnosti kanalizacijskega sistema). Tako je na primer zelo pomembna ponovna aeracija preko vodne gladine. Določene biofilmske lastnosti in ak-

tivnost se izmerijo samo direktno v KS, dodatne informacije pa še z laboratorijskimi eksperimenti odpadne vode, suspendiranega biofilma in nedotaknjene biofilma. Eden najpomembnejših faktorjev, ki odločilno vpliva na biofilmsko rast, je koncentracija kisika v odpadni vodi. Aktivnost samega biofilma zajema ponoči približno dve tretjini vse aerobne aktivnosti. Ko pa se koncentracija kisika v odpadni vodi približa ničli, se ustavijo tudi aerobni biofilmski procesi.

Pri nas smo prvič poskušali spoznati biofilm v kanalizacijskih sistemih. S TV-kamero so bili pregledani trije različni odseki kanalov iz betonskih cevi, takoj po zgraditvi kanala in po več letih obratovanja. Ugotovili smo normalen razvoj biofilma. Izračunali smo tudi bilanco kisika na določenem kanalskem odseku pri treh različnih pogojih in vzorčenjih. Izračun kisikove bilance pokaže, da so ob različnih dneh podnevi stopnje biofilmske respiracije in respiracije v odpadni vodi podobne. Ponoči pa se vsrkavanje kisika v biofilm rahlo zmanjša,

ker je področje omočenega dela cevi manjše zaradi manjših pretokov.

Naše raziskave so tudi pokazale, da je razvoj biofilma odvisen od vrste materialov, iz katerih je zgrajen kanalizacijski sistem, ter same konstrukcije kanalizacije. Tako smo izvedli preskuse rasti biomase na različnih nosilcih. Ugotovili smo, da se na anorganskih nosilcih, na primer betonskih ceveh, razvije bistveno več biofilma kot na inertnih nosilcih (plastičnih ceveh).

Članek bazira tudi na rezultatih raziskav razvoja biomase z izboljšanjem procesov

biokemijske razgradnje z dodajanjem specialnih bakterijskih združb in fermentov. Z nekaterimi poskusi z dodajanjem različnih encimskih dodatkov v kanalskih priključkih pred čistilno napravo smo za odpadno vodo iz mlekarne industrije dokazali, da se lahko procesi samočiščenja in čiščenja bistveno povečajo tako v kanalskih sistemih kot na ČN. Zato bodo predmet naših novih raziskav še priključki KS in ČN pri drugih vrstah prehranske in kmetijske predelovalne industrije.

6 • LITERATURA

- Allison, D. G., Gilbert, P., Lappin-Scott, H. M., Wilson M., *Community structure and cooperation in biofilms*, Cambridge University Press, 345 strani, 2000.
- Gardsal, H., Ole, M., Jesper, D., Svend, E. J., *Mouse Trap, Modeling of water quality processes and interaction of sediments and pollutants in sewers*, V: *The Sewer as a Physical, Chemical and biological Reactor*, Environmental Engineering Laboratory, Aalborg University, Denmark, str. 14, 1994.
- Gujer, W. and Henze M., *Activated Sludge Modelling and Simulation*, *Water Science & Technology* 25 (6), str. 257–264, 1991
- Heydorn, A., Nielsen, T. A., Hentzer, M., Sternberg, C., Givskov, M., *Quantification of biofilm structures by the novel computer program COMSAT*, V: *Microbiology*, 146, str. 2395–2407, 2000.
- Hvitved Jacobsen, T., Vollertsen, J., Tanaka, N., *Wastewater quality changes during transport in sewer – An integrated aerobic and anaerobic modelconcept for carbon and sulfur microbial transformation*, V: *Water Science & Technology* 38 (10), str. 257–264, 1999.
- <http://www.sewer.dk/WATS.htm>
- Huisman, J. L., *Transport and transformation processes in combined sewers*, Technical University of Munich, 282 str., 2001.
- Mourato, S., Almeida, M., Matos, J., Hvitved Jacobsen, T., *Modelling in sewer pollutant degradation processes in the Costa do Estoril sewer system*, V: *Sewer processes and networks*, Paris, France, str. 81–88, 2002.
- Panjan, J., *Biofilm v betonskih ceveh in njegova samočistilna sposobnost*, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, IZH, 67 strani, 2008.
- Saldanha Matos, J., *Interactions between sewers, Treatment plants and receiving waters in urban areas*, V: *Water Science & Technology*, IWA publishing, 283 strani, 2002.
- Škrbec, M., *Samočistilni in nekateri vzporedni procesi v kanalizacijskih sistemih, diplomska naloga*, Ljubljana, 97 strani, 2005.
- Wilderer, P., *Innovative technologies in urban drainage*, Technical University of Munich, Editor in Chief Peter Wilderer, 143 strani, 2001.