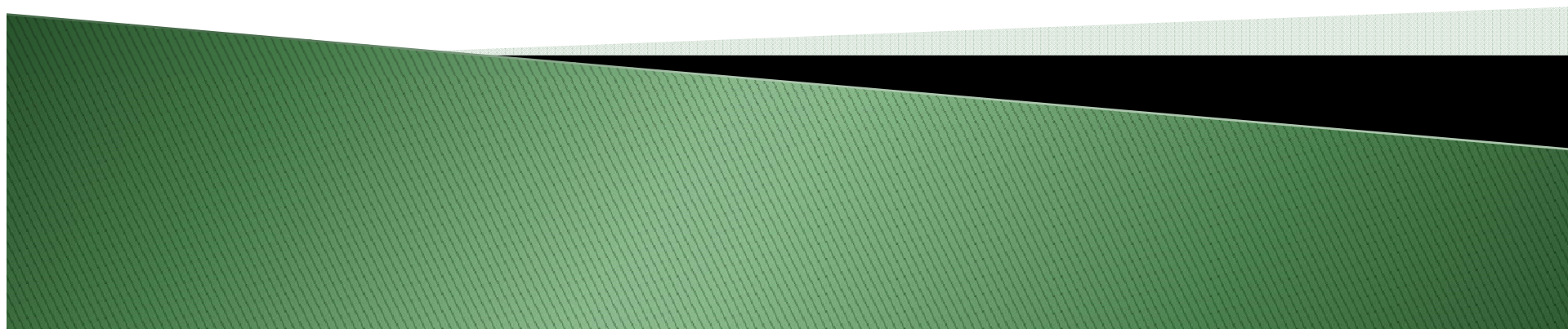


# UKLANJANJE AZOTNIH MATERIJA IZ VODE ZA PIĆE

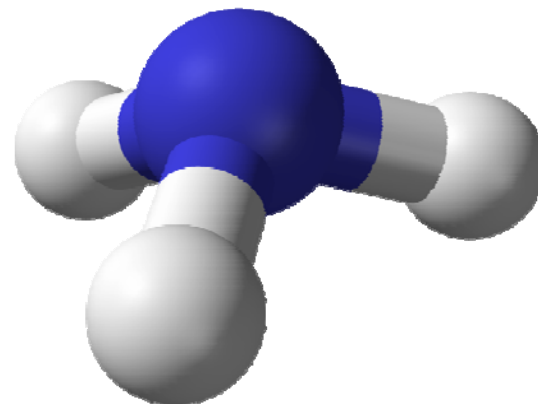
Snežana Maletić, Svetlana Ugarčina Perović, Božo Dalmacija  
Prirodno–Matematički fakultet Novi Sad



## Azotne materije se u vodi nalaze u obliku:

- organskog azota,
- amonijaka,
- nitrita i nitrata.

- ▶ U klasičnoj "higijensko–hemijskoj analizi pijaće vode",  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  i  $\text{NH}_4^+$  služe kao hemijski indikatori zagađenja, koji mogu da ukazuju na prisustvo fekalnog zagađenja.
- ▶ Azotne materije u vodu dospevaju iz nekoliko izvora uključujući:
  - atmosferu,
  - leguminozne biljke,
  - biljni otpad,
  - životinjski ekskrement,
  - kanalizaciju,
  - azotna đubriva i
  - industrijske otpadne vode.



# Uklanjanje amonijaka iz vode za piće

- ▶ Prisustvo amonijaka može biti izvor nekoliko problema vezanih za kvalitet vode za piće:
  - ponovni rast bakterija,
  - stvaranje nitrita nepotpunom oksidacijom amonijaka i
  - pojava nepoželjnog ukusa i mirisa.
- ▶ Za uklanjanje amonijaka prisutnog u vodi za piće mogu se primenjivati:
  - fizičko–hemijski i
  - biološki procesi.



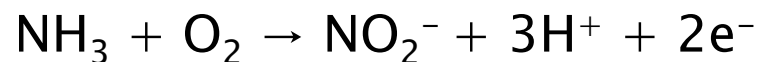
# Fizičko–hemijski procesi uklanjanja amonijaka

- ▶ U fizičko–hemijske procese uklanjanja amonijaka spadaju:
  - izmena jona (prirodni zeolit) i
  - hemijska oksidacija.
- ▶ Najčešće se primenjuje metoda hlorisanja preko prevojne tačke
- ▶ Međutim, pri ovim uslovima često nastaju nepoželjni dezinfekcioni nusproizvodi, kao što su trihalometani.
- ▶ Primenjuje samo za vode sa niskim sadržajem prekursora
  - vode sa niskim sadržajem organske materije i
  - na kraju tretmana, za prečišćene vode.
- ▶ Primenjuje se naročito kao nadoknada nedostatka biološkog tretmana za uklanjanje amonijak.



# Biološki procesi uklanjanja amonijaka

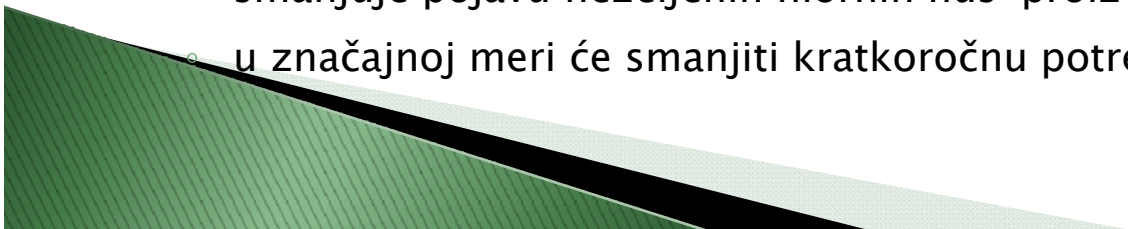
- ▶ Nitrifikacija predstavlja mikrobni proces pri kojem se redukovana azotova jedinjenja uzastopno oksiduju do nitrita i nitrata.
- ▶ Proces nitrifikacije se primarno odvija uz pomoć dve grupe autotrofnih nitrifikacionih bakterija.
- ▶ U prvoj fazi nitrifikacije, amonijak–oksidujuće bakterije oksiduju amonijak do nitrita, kao što je prikazano u jednačini:



- ▶ U drugoj fazi procesa, nitrit–oksidujuće bakterije oksiduju nitrite do nitrata po sledećoj jednačini:

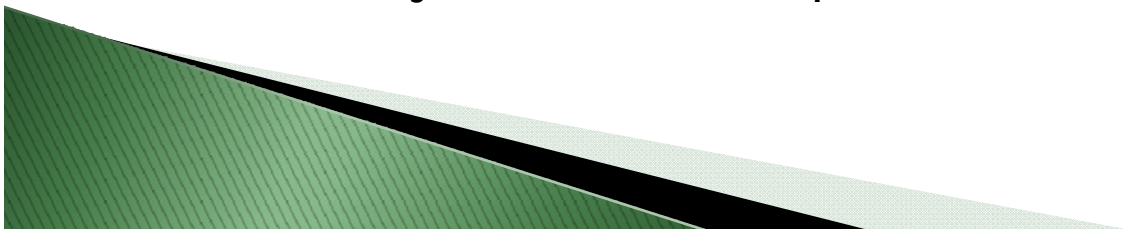


- ▶ Uklanjanje amonijaka pre hlorisanja
  - smanjuje pojavu neželjenih hlornih nus–proizvoda,
  - u značajnoj meri će smanjiti kratkoročnu potrebu hlorom.



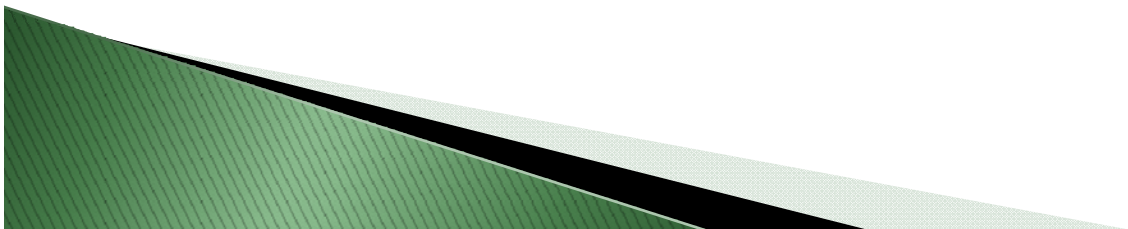
# Filteri sa imobilisanom mikroflorom za uklanjanje amonijaka

- ▶ Za efikasan rad filtera sa imobilisanom mikroflorom za uklanjanje amonijaka neophodno je da su ispunjeni sledeći uslovi:
  - Dovoljan sadržaj kiseonika;
  - Dodatak fosfora u cilju podržavanja bakterijskog rasta;
  - Dovoljan sadržaj ugljenih hidrata;
  - Odgovarajuća pH vrednost ( $> 7,5$ );
  - Dovoljno visoka temperatura: ispod  $8-10^{\circ}\text{C}$  bakterijski metabolizam naglo opada i oksidacija amonijaka se značajno usporava ili dolazi do potpune inhibicije ispod  $4-5^{\circ}\text{C}$ ;
  - Potpuno odsustvo dezinfekcionih reziduala;
  - Pored toga, potrebno je omogućiti 1–3 meseca prirodnog perioda inokulacije filtera kako bi proces bio što efikasniji.



Filteri sa  
imobilisanom  
mikroflorom za  
uklanjanje  
amonijaka

- Biološki filteri sa granulovanim aktivnim ugljem
- Filteri sa pozolanom
- Filteri sa biolitom
- Filteri sa flotantnim filtracionim medijumom

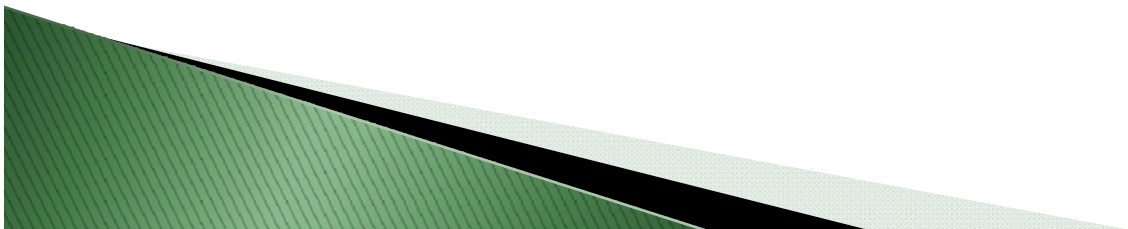


## Biološki filteri sa granulovanim aktivnim ugljem

- ▶ Ustanovljeno je da se filtracijom na biološki granulovanom aktivnom uglju efikasno uklanja biorazgradivi rastvoreni organski ugljenik pri čemu takođe ovaj proces se primenjuje za simultano uklanjanje amonijaka biološkom oksidacijom.

## Filteri sa pozolanom

- ▶ Filteri sa pozolanom su se prvi počeli koristiti za uklanjanje amonijaka, ali sa ozbiljnim ograničenjima:
- ▶ Pozolan ( $> 1 \text{ cm}$ ) se ne može ispirati, čak i sa vazduhom i vodom; prema tome, filteri se moraju isključivati u određenim vremenskim periodima, nakon čega se potapaju u hlorisanu vodu;
- ▶ Svake 2–3 godine, ovaj materijal se mora ukloniti iz filtera i zameniti.



## Filteri sa biolitom

- ▶ Kada je  $1 < \text{NH}_4^+ < 2 \text{ mg/l}$ , uključuje se primena filtera za nitrifikaciju sa ispunom od biolita, kiseonik se uvodi u prethodnoj aeracionoj fazi.
- ▶ Kada je sadržaj amonijum jona toliki da nema dovoljno rastvorenog kiseonika u vodi, onda je neophodna primena reaktora sa aeracijom; kao što je Nitrazur N.

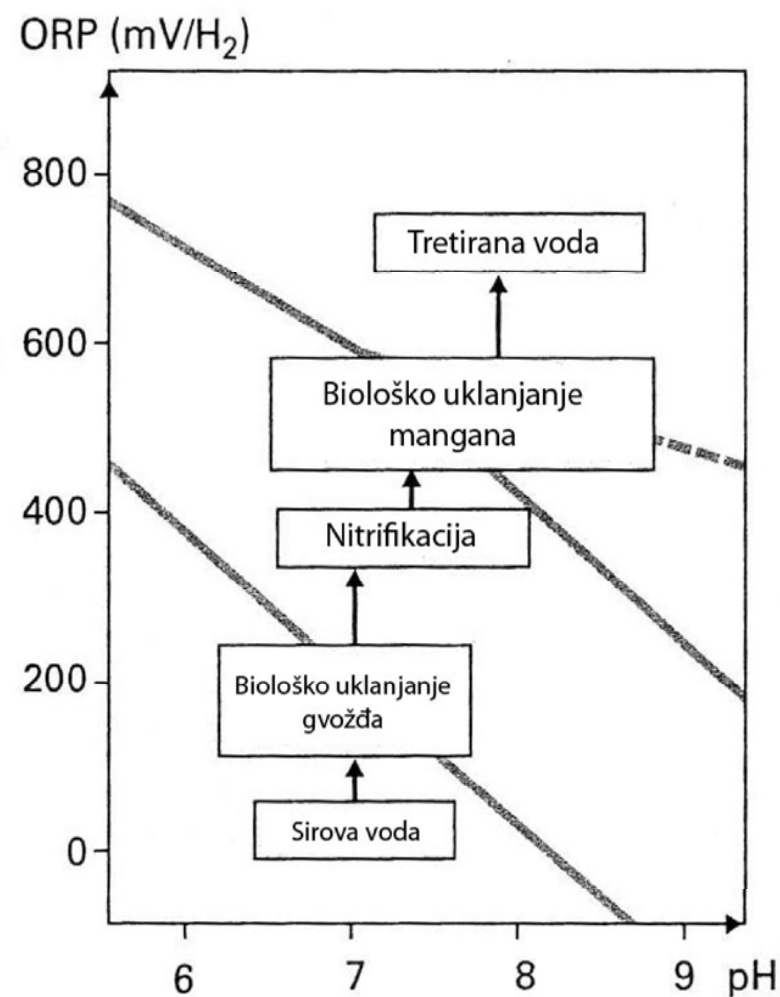
## Filteri sa flotantnim filtracionim medijumom.

- ▶ Filtrazur je privlačna alternativa za prethodno navedene reaktore za nitrifikaciju.
- ▶ Upotreba materijala koji je lakši od vode takođe omogućava da se filtracija odvija sa dna nagore i ako je potrebno protok vazduha nagore.
- ▶ Filtrazur bez aeracije se koristi pri sadržaju  $\text{NH}_4^+$  od 1–1,5 mg/l, dok aeraciona verzija za više koncentracije



# Biološki tretman vode koja sadrži amonijak, gvožđe i/ili mangan

- ▶ Redosled tretmana je prikazan dijagramom stabilnosti na slici
- ▶ Smatra se da gvožđe može biti uklonjeno biološki putem bez nitrifikacije, ali ne i mangan.



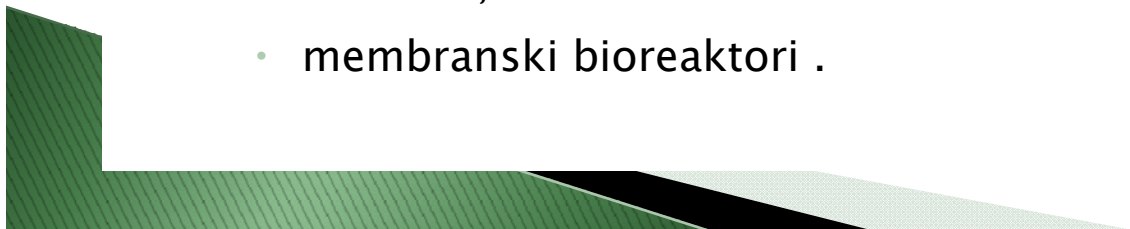
► Zavisno od pojedinačnih sadržaja amonijaka, gvožđa i mangana i ostalih karakteristika vode, moguća je primena nekoliko kombinacija procesa, na primer:

- Nizak sadržaj amonijaka, gvožđa i mangana:
  - fizičko-hemijsko uklanjanje gvožđa,
  - nitrifikacija i biološko uklanjanje mangana na istom filteru;
- Prosečan ili visok sadržaj gvožđa i nizak sadržaj mangana,  $\text{NH}_4^+ < 1,5 \text{ mg/l}$ :
  - biološko uklanjanje gvožđa praćeno intenzivnom aeracijom i
  - filtracija kroz peščani ili filter za nitrifikaciju zavisno od tačnog sadržaja  $\text{NH}_4^+$  i temperature vode;
- Prosečan ili visok sadržaj gvožđa i mangana,  $\text{NH}_4^+ > 1,5 \text{ mg/l}$ : sistem, koji uključuje sledeće tri faze:
  - biološko uklanjanje gvožđa;
  - nitrifikacija uz pomoć Nitrazur N;
  - završna filtracija gde se nitrifikacija i uklanjanje mangana završava istovremeno putem biološkog procesa.



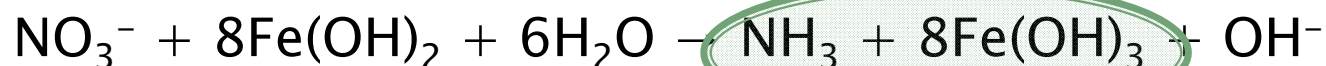
# Uklanjanje nitrata iz vode za piće

- ▶ Povećan nivo nitrata posledica je povećanja primene azotnih đubriva, povećanje irigacije zemljišta sa komunalnom otpadnom vodom i promena svrhe upotrebe zemljišta.
- ▶ Azotna jedinjenja se u zemljištu transformišu mikrobiološkim reakcijama, formiraju se nitrati, veoma mobilni joni koji veoma brzo prolaze kroz zemljište i dolaze do akvifera.
- ▶ Problem kontaminacije nitratima:
  - methemoglobinemija, sindrom plave-bebe,
  - formiranje n-nitrozo jedinjenja potencijalnih kancerogena u digestivnom traktu
- ▶ Metode za uklanjanje nitrata
  - hemijske (hemijska redukcija),
  - fizičke (reverzna osmoza i elektrodijaliza),
  - fizičko-hemijske (jonska izmena),
  - biološke,
  - membranski bioreaktori .

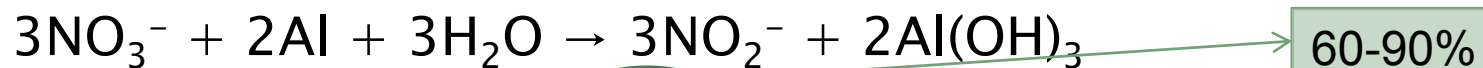


# Hemijsko uklanjanje nitrata iz vode za piće

- ▶ Redukcija se može odvijati pri baznim pH vrednostima
- ▶ Primenom gvžđa prema reakciji:



- ▶ Ili primenom Al praha



- ▶ Ovaj proces se efikasno može koristiti u postrojenjima za tretman vode za piće primenom kreča za omekšavanje vode.
- ▶ Na ovaj način se pH podiže na oko 9,1, tako da su minimalni dodatni troškovi potrebni za podizanje pH do 10,25.

# Fizičko uklanjanje nitrata iz vode za piće

## ► Reversna osmoza.

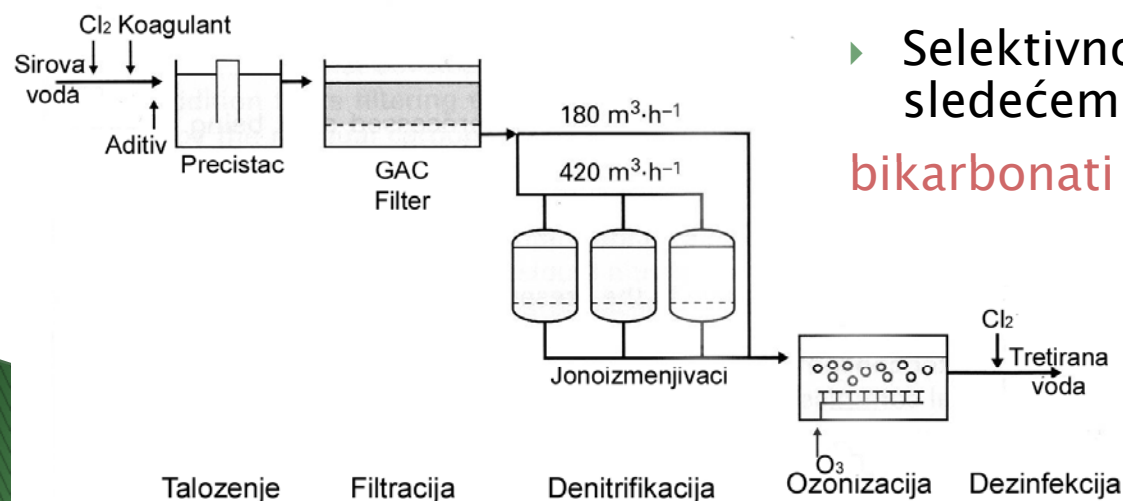
- Joni prisutni u vodi uklanjaju se propuštanjem vode kroz semipermeabilnu membranu koja ne propušta nitrate i druge jone.
- Česti problemi vezani za primenu reversne osmoze su fouling, kompaktiranje i degradacija membrane sa vremenom.
- Ovi problemi su posledica: depozicije rastvornih materija, organskih materija, suspendovanih i koloidnih čestica i drugih kontaminanata, pH varijacija i ekspozicije hlora.

## ► Elektrodijaliza.

- U procesima elektrodijalize joni se transferuju kroz membranu iz manje koncentrovanog do koncentrovanijeg rastvora kao posledica direktne primene struje kroz rastvor.
  - Tretman vode elektrodijalizom zasniva se na selektivnom uklanjanju jona kroz semipermeabilnu membranu.
- Efikasnost uklanjanja nitrata reverznom osmozom i elektrodijalizom je manje više isti.
- Procesi elektrodijalize su ograničeni na primenu u mekim vodama.

# Fizičko-hemijsko uklanjanje nitrata iz vode za piće – jonska izmena

- ▶ Nitratni joni zamnejuju se na anjon–izmenjivačkoj smoli sa hloridnim ili bikarbonatnim jonima.
- ▶ Selektivnost jonoizmenjivačkih smola raste prema sledećem redosledu: **bikarbonati**  $\ll$  **hloridi**  $\ll$  **nitrati**  $\ll$  **sulfati**.
- ▶ Selektivnost prema nitratima može se poboljšati povećavanjem
  - hidrofobnosti matriksa i funkcionalnih grupa,
  - rastojanja između mesta za razmenu jona.

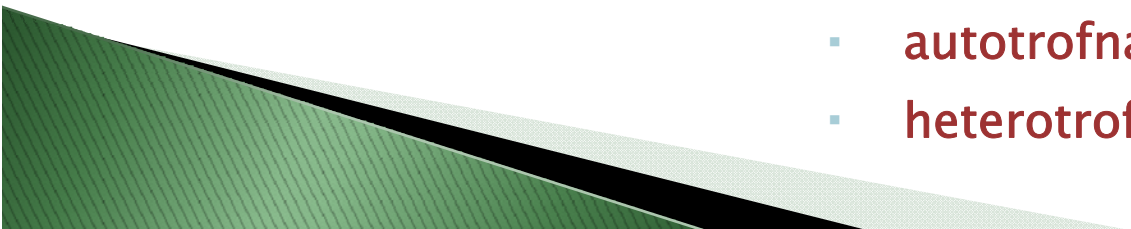


- ▶ Selektivnost ovakve smole raste prema sledećem redosledu:

**bikarbonati**  $\ll$  **hloridi**  $\ll$  **sulfati**  $\ll$  **nitrati**

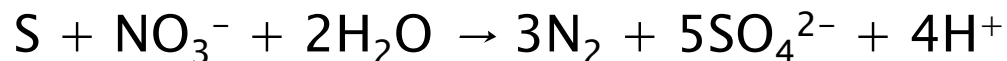
# Biološko uklanjanje nitrata iz vode za piće

- ▶ Biološka denitrifikacija – konverzija nitrata do bezopasnog gasa azota i azot-oksida.
- ▶ Alternativni proces tretmana za prečišćavanje vode zbog
  - visoke specifičnosti denitrifikujućih bakterija,
  - male cene i
  - visoke efikasnosti denitrifikacije.
- ▶ Najčešće se koriste reaktori sa
  - pakovanom–ispunom i
  - fluidizovanom ispunom.
- ▶ U zavisnosti od vrste izvora ugljenika koji denitrifikacione bakterije koriste u svom metaboličkom ciklusu, biološka denitrifikacija može biti:

- autotrofna i
  - heterotrofna.
- 

# Autotrofna denitrifikacija

- ▶ Zasnovana je na korišćenju neorganskog izvora ugljenika ( $\text{CO}_2$ ), i sumpora ili vodonika kao elektron donora potrebnih za metabolički lanac bakterija.



- ▶ Prednosti:

- Niska cena neorganskih supstrata i
- Mala količina formirane biomase.

- ▶ Nedostaci:

- Redukovana sumporna jedinjenja se konvertuju u sulfat,
- Visoke koncentracije sulfata mogu delovati kao laksativ,
- Maksimalno dozvoljena količina sulfata od 400 mg/l.



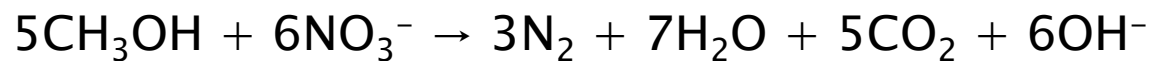
# Autotrofna denitrifikacija

- ▶ Vodonikov gas je idealan energetski supstrat za denitrifikaciju.
- ▶ Potpuno je bezopasan za pijaću vodu,
- ▶ Nisu potrebni ni dodatni tretmani za uklanjanje viška supstrata ili njegovih derivata.
- ▶ Međutim, vodonik gradi zapaljivu i eksplozivnu smešu sa kiseonikom, dodatno njegova rastvorljivost u vodi je niska (1,6 mg/l na 20°C).
- ▶ Proces za tretman vode autotrofnom denitrifikacijom poznat pod nazivom DENITROPUR – Primenjuje se u Nemačkoj.
- ▶ Proces kombinuje inkorporaciju saturacije vodonikom, dodatak fosfata i ugljen-dioksida, četiri reaktora sa pakovanom ispunom u serijama, postaeraciju, dodatak flokulanta, filtraciju i UV filtraciju; reaktor radi pri opterećenju od 0,25 kg N/m<sup>3</sup>d i vreme zadržavanja od 1 do 2 h je potrebno za uklanjanje 11,29 mg N/l.



# Heterotrofna denitrifikacija

- ▶ Heterotrofne bakterije koriste organske supstance kao što su metanol i etanol kao izvor ugljenika, a nitrat kao izvor terminalnog elektron akceptora,



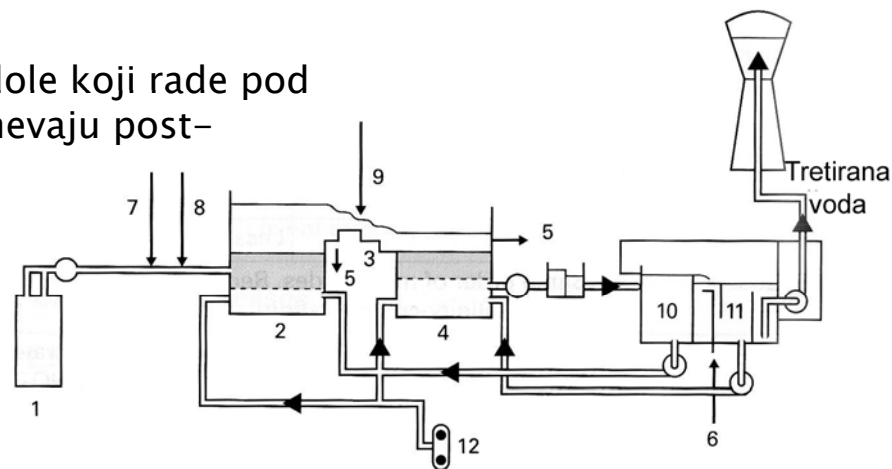
- ▶ Izbor organskog jedinjenja utiče na količinu nastale biomase,
- ▶ Izbor organskih jedinjenja je uglavnom baziran na njihovoj ekonomičnosti (metanol je najjeftiniji primer izvora ugljenika).
- ▶ Glavne karakteristike ovih procesa su:
  - konverzija nitrata u gasoviti azot,
  - višak biomase nakon obrade može se mešati sa muljem nastalim obradom komunalnog otpada,
  - mali uticaj na kalcijum–karbonatni bilans vode,
  - temperaturno senzitivni proces (ispod 7–8°C),
  - ovaj proces je osetljiv na prisustvo rastvorenog kiseonika u sirovoj vodi,
  - inicijacija procesa traje oko mesec dana.



# Heterotrofna denitrifikacija

- ▶ Heterotrofni procesi denitrifikacije se primenjuju u tretmanu vode za piće već 20 godina.
- ▶ Fabrika za preradu vode u Belgija je koristila metanol u reaktoru sa fluidizovanom ispunom.
- ▶ U Nemačkoj, DENIPOR proces koji su se sastoji od reaktora sa fiksnom ispunom sa granularnim ekspanovanim polistirenom.
- ▶ U Austriji Nitrodox – in situ tretman u šljunkovitom akviferu.
- ▶ U Francuskoj, Nitrazur i Biodenit procesi.
  - Nitrazur procesi su procesi sa tokom na gore u kojima se može koristiti sirćetna kiselina,
  - Biodenit procesi, procesi sa tokom na dole koji rade pod pritiskom. Oba ova tretmana podrazumevaju post-tretman sa filterima od aktivnog uglja.

*2-Nitrazur biološki reaktor*



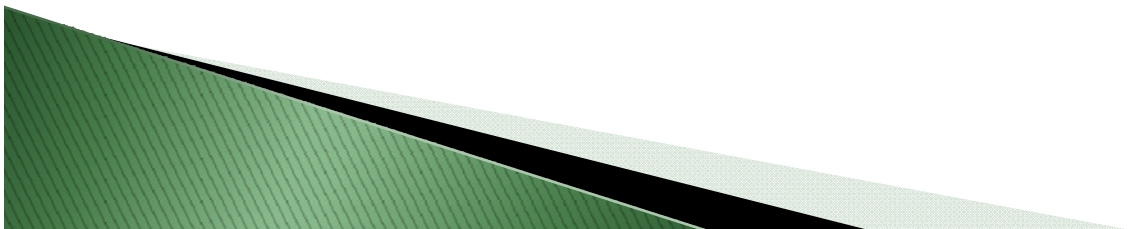
# Membranski bioreaktori

- ▶ Direktan kontakt između biomase i vode kod biološke denitrifikacije predstavlja potencijalni izvor kontaminacije vode za piće.
- ▶ Predložen je inovativni biološki sistem – kombinacija bioloških procesa sa membranskom tehnologijom u obliku membranskog bioreaktora (MBR).
- ▶ Ovakvi reaktori omogućavaju kompletno zadržavanje biomase uz pomoć membrane.
- ▶ Odvajanje biomase od vode odvija se u toku denitrifikacionog procesa.
- ▶ Umesto odvajanja nakon biološkog procesa, na ovaj način je kontakt biomase i vode u potpunosti izbegnut i rizik od kontaminacije značajno smanjen.



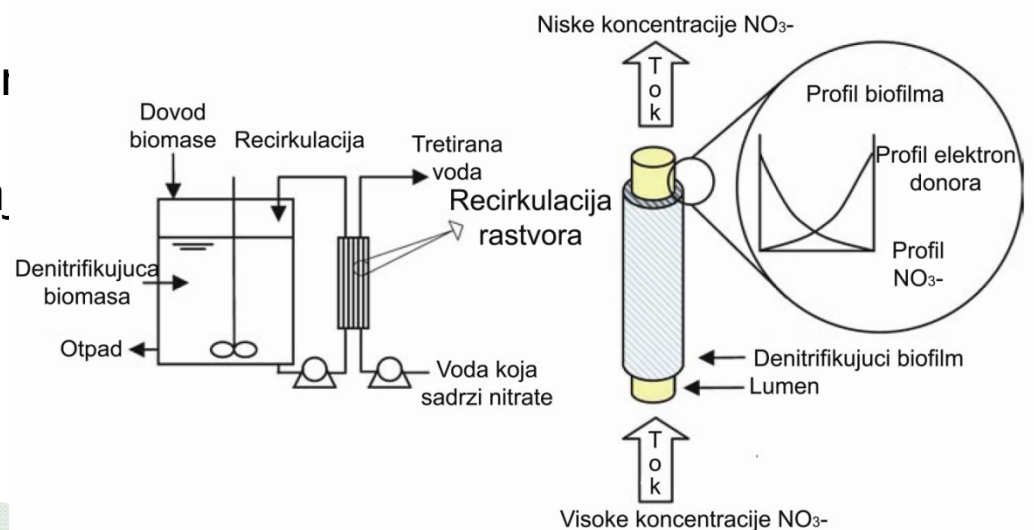
# Membranski bioreaktori

- ▶ Ekstraktivni MBR,
- ▶ MBR sa jonskom izmenom,
- ▶ MBR sa transferom gasa,
- ▶ MBR pod pritiskom,
- ▶ MBR elektrodni biofilm reaktor,
- ▶ MBR pod pritiskom sa transferom gasa.



# Ekstraktivni membranski bioreaktor

- ▶ Nitrati se ekstrahuju iz sirove vode molekulskom difuzijom preko fizičke barijere u rastvor koji sadrži denitrifikujuću biomasu.
  - ▶ Ispitivani su različiti materijali za efikasno odvajanje vode od biofilma.
  - ▶ Membrane u ovom reaktoru mogu biti ili u obliku ploča ili cevi.
- 
- ▶ Prednost – elektron donori i denitrifikujuća biomasa odvojeni od produkovane vode.
  - ▶ Membrana omogućava transport elektron donora, biofilm obezbeđuje njegovo zadržavanje.

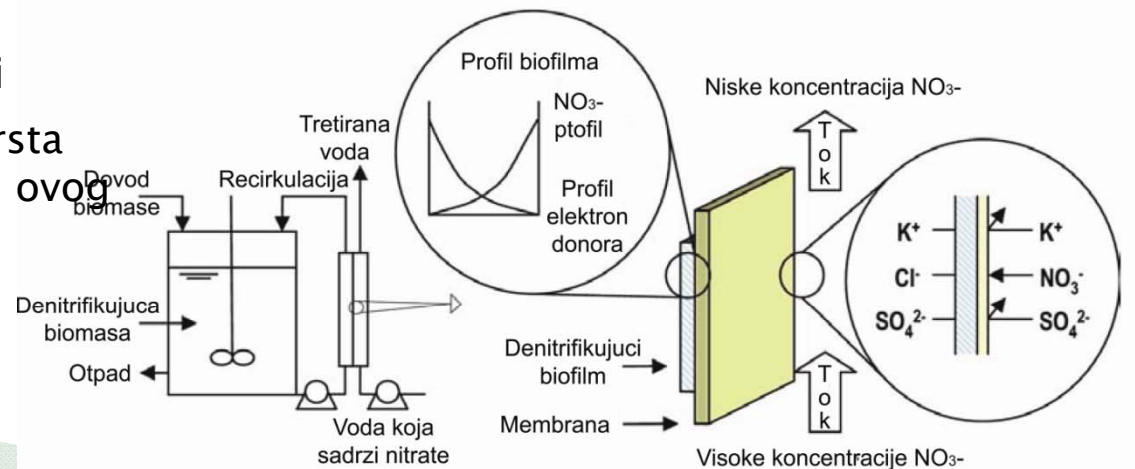


# Membranski bioreaktor sa jonskom-izmenom

- ▶ Membranski bioreaktor sa jonskom izmenom je identičan ekstraktivnom membranskom procesu.
- ▶ Osim što je mikroporozna membranska tehnologija zamenjena sa gustom jono-izmenjivačkom membranom.
- ▶ Prednost ove tehnologije je u tome što neporozna membrana:
  - olakšava selektivniju ekstrakciju nitrata iz sirove vode i
  - sprečava transport organskih i neorganskih kontaminanata prisutnih u biomedijumu.

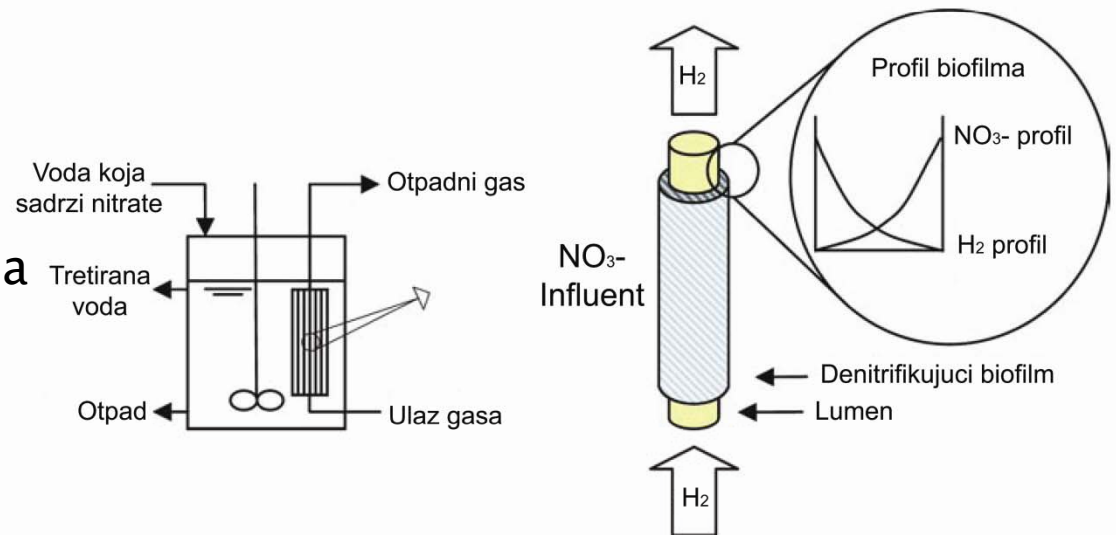
Proces se zasniva na:

- ▶ koncentracionom gradijentu i
- ▶ gradijentu naboja jonskih vrsta koji predstavljaju vučnu silu ovog procesa.



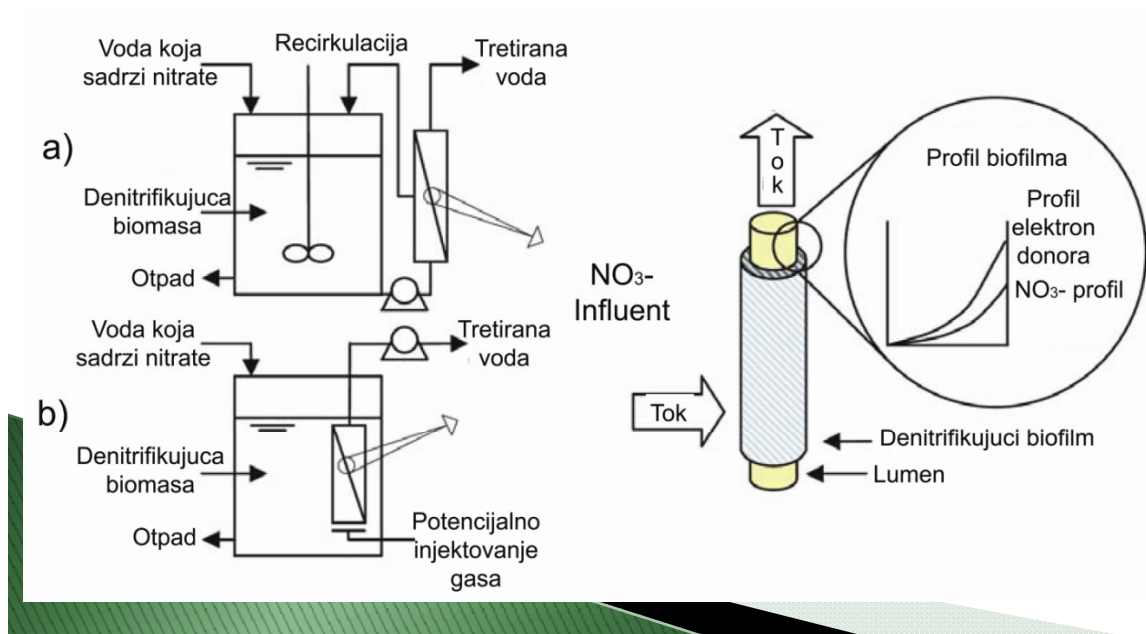
# Membranski bioreaktor sa transferom gasa

- ▶ Da bi se izbegla potencijalna sekundarna kontaminacija vezana za primenu organskog supstrata, vodonik može biti korišćen kao elektron donor kombinovan ili sa ugljen-dioksidom ili bikarbonatom kao izvorom ugljenika za autotrofnu denitrifikaciju.
- ▶ Membranski reaktori sa transferom gasa obično koriste gas permeabilna šuplja vlakna, za dovođenje vodonikovog gasa do lumena denitrifikujućih bakterija koje rastu na spoljnoj strani membrane.
- ▶ Šuplja vlakna za transfer gasa prevazilaze problem male rastvorljivosti s obzirom da se gas doprema direktno do biofilma.



# Membranski bioreaktori pod pritiskom

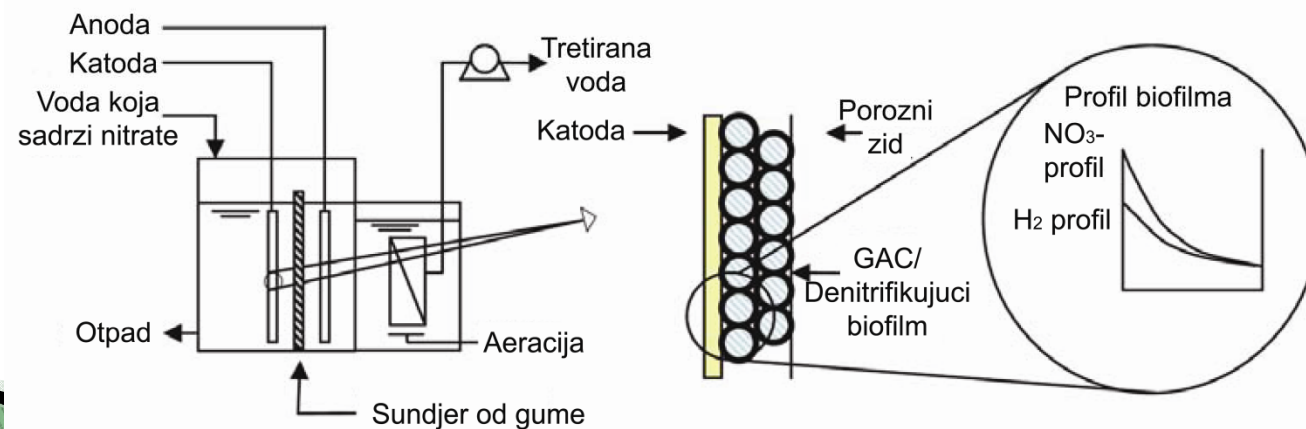
- ▶ Proces se uglavnom oslanja na suspendovanu denitrifikujuću biomasu, a retko kada na razvoj biofilma u sistemu.
- ▶ Prednost mu je produženi kontakt između denitrifikujuće kulture i nitrata u medijumu reaktora.
- ▶ Postoje dva modula ovih bioreaktora:
  - (a) klasični spoljni modul i
  - (b) potapajući
- ▶ Kod spoljnog modula membrana je smeštena sa spoljne strane bioreaktora, i na taj način fizički odbija biomasu i druge nusprodukte.



- ▶ Potapajuće membrane – niži troškovi u pogledu električne energije i poboljšanog transfera mase manifestovanog kroz veću permeabilnost.

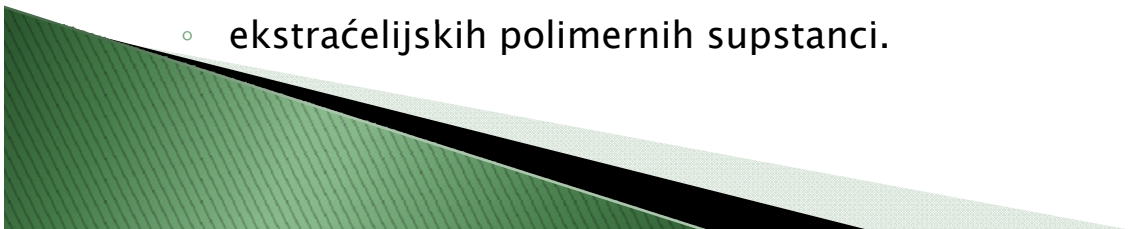
# Elektrodni biofilm reaktor

- ▶ Umesto inkorporiranja gas permeabilnih membrana i da bi se prevazišli problemi rastvaranja vodonikovog gasa.
- ▶ Vodonikov gas proizvodi se elektrolitički *in situ* za obezbeđivanje rasta biofilma na katodi.
- ▶ U cilju povećanja površina za rast biofilma:
  - granulisani aktivni ugalj gusto je pakovan na površini katode i
- ▶ primenjena je potapajuća membranska tehnologija u posebnom reaktoru.



# Membranski reaktori pod pritiskom i sa transferom gasa

- ▶ Najnovija istraživanja su fokusirana na inkorporaciji transfera gasa i potapajućih membrana pod pritiskom u istom reaktoru.
- ▶ Istraživanja su uglavnom bila fokusirana na tretman sa suspendovanom biomasom
- ▶ Isprobana su opterećenja nitratima u opsegu 0,024 – 0,192 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/l, ali je najveće opterećenje rezultovalo 100% uklanjanjem nitrata.
- ▶ Međutim, prosečna koncentracija rastvorenog organskog ugljenika u efluentu je bila oko 8 mg/l.
- ▶ Identifikovano nekoliko mogućih izvora povišene koncentracije DOC – nastajanje i oslobađanje:
  - rastvornih mikrobijalnih produkata,
  - volatilnih masnih kiselina,
  - produkata acetogenih bakterija u biomasi i
  - ekstraćelijskih polimernih supstanci.



| Konfiguracija                               | Prednosti                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Nedostaci                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ekstraktivna</b>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Odvojenost biomase i ugljenika od produkovane vode</li> <li>• Zadržavanje biomase</li> </ul>                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahteva dalju obradu tretirane vode</li> <li>• Proboj ugljenika</li> <li>• Troškovi pumpanja</li> </ul>                                                                                                                                                                                              |
| <b>MBR sa jonskom izmenom</b>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gusta membrana značajno redukuje rizik od proboja ugljenika</li> <li>• Zadržavanje biomase</li> </ul>                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahteva dalju obradu tretirane vode</li> <li>• Potencijalno kompleksan rad</li> <li>• Nepoznat uticaj foulinga</li> <li>• Visoki troškovi za membrane</li> <li>• Troškovi pumpanja</li> </ul>                                                                                                        |
| <b>MBR sa transferom gasa</b>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Netoksični i jeftini elektron donor</li> <li>• Dobro uklanjanje nitrata</li> <li>• Mali sadržaj biomase</li> </ul>                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahteva dalju obradu tretirane vode</li> <li>• Potencijal prema foulingu koji ograničava transfer mase</li> <li>• Zdravstveni i bezbednosni rizik vezan za rastvaranje vodonikovog gasa</li> <li>• Autotrofi, spora adaptacija</li> </ul>                                                            |
| <b>MBR pod pritiskom</b>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zadržavanje biomase</li> <li>• Direktna filtracija smanjuje potrebu za naknadnim tretmanom tretirane vode</li> <li>• Dokazana na industrijskoj skali (uključujući i kontrolu organskih materija)</li> <li>• Niska cena</li> <li>• Jednostavan za rad</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencijal za proboj ugljenika</li> <li>• Ograničeno poznavanje foulinga</li> <li>• Troškovi pumpanja</li> <li>• Troškovi aeracije</li> <li>• Zahteva dalju obradu tretirane vode</li> </ul>                                                                                                         |
| <b>MBR biofilm elektrodni reaktor</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Netoksični i jeftini elektron donor</li> <li>• Potencijal za tačnom kontrolom doze elektron donora</li> <li>• Direktna filtracija smanjuje potrebu za naknadnim tretmanom tretirane vode</li> </ul>                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoki utrošci električne energije</li> <li>• Zdravstveni i bezbednosni rizik vezan za rastvaranje vodonikovog gasa</li> <li>• Mogu se uklanjati nitrati samo u niskim koncentracijama</li> <li>• Kompleksna kontrola</li> <li>• Efikasnost zavisi od koncentracije rastvorenog kiseonika</li> </ul> |
| <b>MBR pod pritiskom sa transferom gasa</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kombinuje prednosti reaktora pod pritiskom i reaktora sa transferom gasa</li> </ul>                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuelno uklanjanje biofilma da bi se održala suspendovana biomasa je intenzivno</li> <li>• Zdravstveni i bezbednosni rizik vezan za rastvaranje vodonikovog gasa</li> <li>• Troškovi aeracije</li> </ul>                                                                                            |

# HVALA NA PAŽNJI

