

Kvaliteetne joogivesi väävlit ja väävlibaktereid sisaldavast põhjaveest

“Keskkonnatehnika” nr 6/06, 2006 a.

Helle Vilu, AS Bioexpert,

Rein Munter, TTÜ keemiatehnika instituut

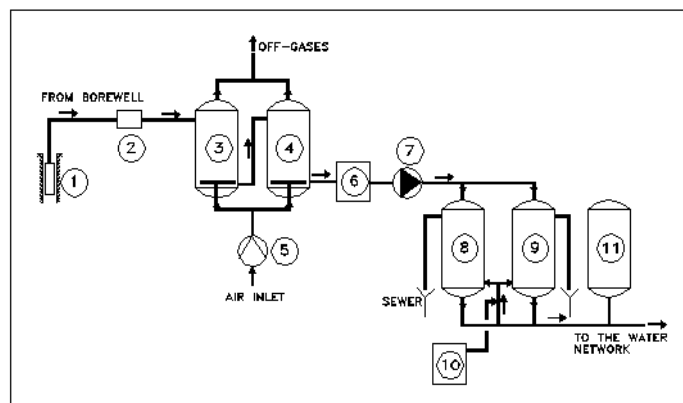
Eestis on põhjavee tavapäraseks töötlemise probleemideks olnud raua, mangaani ja väävelvesiniku eraldamine. Õhustusprotsessi käigus väheneb ka vaba süsihappegaasi sisaldus ning tõuseb pH, mis loob soodsad tingimused raua/mangaani edasiseks oksüdatsiooniks. Väävelvesiniku ja sulfiidide esinemisega puurkaevuvees võib aga kaasneda veel üks palju keerukam probleem - väävlibakteri vohamine. Sellise olukorra näiteks on Ahaste puurkaevuvesi. Antud vee õhustuse ja rauaeralduse protsessi käigus tekib intensiivselt sültjat, limast setet õhustustanki seintele, mehhaanilisse filtrisse, veetorudesse ja veemõõltjatesse, mis ummistab oma teel kõike kuni veetarbijani välja (**Foto 1**). Kogu veetrassi puhastatakse kord või paar kuu jooksul – sültjas mass uhutakse kanalisatsiooni. Sete on tugeva „keemia“ lõhnaga.



Foto 1. Väävlit ja orgaanikasegune limane sete õhustustanki seinalt

Ahaste pumpla veetötlusskeem ja vee kvaliteedi näitajad

Ahaste pumpla (Audru vald, Pärnumaa) uuritav puurkaev nr 6201 on rajatud 1996.aastal sügavusega 50 m ja see avaneb siluri veekompleksi lubjakivis. Puurkaev seisis kuni 2001.a. jaanuarini, mil monteeriti üles praegune õhustusega veepuhastustehnoloogia (**Joonis 1**).



Joonis 1. Ahaste olemasolev põhjavee tötlusskeem: 1 – puurkaev; 2 – magneetiline pehmemidi, 3,4-õhustustankid; 5 – kompressor; 6 – mehaaniline filter; 7 – II astme pump; 8,9 – filtrid (*Manganese Greensand*); 10–KMnO₄ lahuse paak; 11 – hüdrofoor.

Puurkaevust tulev vesi (6 m³/h) suunatakse kahte järjestikku ühendatud atmosfääri rõhul olevasse õhustuspaaki (töömahuga 400-700 L). Paake õhustatakse kompressorite abil läbi peenmullilise taldrikõhusti $d = 200$ mm, tootlikkusega 50 l/min. Õhustatud vesi läbib lihtsa mehaanilise jäme puhastusfiltri ning antakse seejärel II astme pumbaga hüdrofoori ning teine osa läbi katalüütilise rauafiltri (täidis *Manganese Greensand*) trassi. Keskmise tarbimine on 24 m³/ööp. Kui II astme pump seisab, hoiab rõhku trassis hüdrofooris akumulereeritud õhk ja stabiliseeriv veehulk.

Vett õhustatakse seni, kuni algab veetarbimine - vesi läheb torustikku otse õhustustankist. Süsteemis on ka väike 500 liitrine hüdrofoor (kasuliku tarbevee maht ~ 250 liitrit), mis tagab stabiilse rõhu (2,8 – 3,5 at) trassil. Nii on vee õhustamise aeg ebaühtlane ning rauafiltrist voolab vesi ilmselt liiga kiiresti läbi.

Toorvee pehmemdamiseks paigaldati 30. juunil 2004.a. AS Bioexpert poolt püsimagnet Elcla-4 puurkaevust tulevale veetorule (enne aereerimistanki). Ajavahemikus 01. juuli kuni 25. august 2004 (kõige soojemal ajal) aeratsioonisüsteem ei töötanud, kuna sooviti kontrollida setete moodustumise intensiivsuse muutumist õhustamiseta tingimustes. Setteid oligi tunduvalt vähem, kuid vee rauasisaldus hakkas torustiku vees kiirelt tõusma ja seetõttu õhustamine taastati. Rauafiltri paigaldanud firma AS Baltic International andmeil oli puurkaevus aastaid seisnud vesi 2000. aastal roheline, suure raua sisaldusega, mädamuna lõhnaga (H₂S!) ja hägune (**Tabel 1**).

Tabel 1. Ahaste vee kvaliteedinäitajad perioodil 1999-2004

No	Näitaja	Ühik	Toorvesi	Joogivesi	98/83/EU
1.	Värvus	mg/L Pt	7-25	7-10	
2.	Hägusus	NTU	4.5-26	1-8.7	
3.	Lõhn (H ₂ S)	palli	2-4	1-2	
4.	pH	-	7.5-8.0	7.5-8.0	6.5-9.5
5.	KHT _{Mn}	mgO ₂ /L	3.5-9.4	1.8-8.0	5.0
6.	BHT ₇	mgO ₂ /L	2.7	19	
7.	Humiinained	mg/L	1.3		
8.	Kuivjääk	mg/L	378-410	378-410	
9.	Leelisus	mg-equiv/L	6.89-7.38	6.50-6.70	
10.	Üldkaredus	mg-equiv/L	5.8-6.2	5.7-5.8	
11.	Ca ²⁺	mg/L	52-55	49.6-52	
12.	Fe _{üld}	mg/L	0.06-1.5	2.2-10	0.2
13.	Mn ²⁺	mg/L	0.007-0.02	0.02	0.05
14.	H ₂ S	mg/L	0.09-0.36	0.02-0.07	
15.	Sulfiidid	mg/L	0.64-3.4	0.04-0.89	
16.	Kloriidid	mg/L	1.7-13		
17.	Sulfaadid	mg/L	1.0-2.3		
18.	Vaba CO ₂ (10 °C)	mg/L	17.6-20		
19.	Heterotroofsed bakterid(22 °C)	pmü/ml	6	122	
20.	Kolooniate arv (22 °C)	pmü/ml	9	200	100

Mida tuvastasid uuringud ja vee ning sette analüüsid

30. juunil 2004 tutvus AS Bioexpert Ahaste pumplas vee puhastamise tehnoloogiaga, võeti veeproovid puurkaevuveest ja veest, mis oli läbinud õhustustanki. Samuti võeti setteproovid õhustustanki siseseinalt ja mehhaanilise filtri südamikult.

30.juuni 2004.a. veeanalüüsid näitasid puurkaevuvees orgaaniliste ainete ja bakterite vähest olemasolu, mis aeratsiooni käigus suurenes oluliselt (permanganaatne hapnikutarve suurenes 5,3-lt kuni 21,0 mgO/l-ni, biokeemiline hapnikutarve 2,7-lt 19 mgO/l-ni, heterotroofsete bakterite arv 6-lt 122 pmü/ml-ni (22⁰ juures), bakterite kolooniate arv 9-lt 200 pmü/ml-ni (22⁰ juures, kolooniate lubatud piirarv 22⁰ juures on 100 pmü/ml). Seega soodustas õhustamine (eriti suvisel soojal ajal) bakterite elutegevust vees ja võis koos temperatuuri tõusuga olla ka sette moodustumise üheks põhjustajaks. Pumbamajal akent ei ole ning fotosüntees siin rolli ei saanud mängida.

Setete röntgendifraktomeetrilisel uuringul TTÜ Materjaliuuringute Keskuses selgus, et mineraloogiliselt on sette näol tegu puhtalt väävliga, jälgedena leiti ka girvasiiti ($\text{NaCa}_2\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2(\text{PO}_2(\text{OH})_2)\text{CO}_3(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; enne magneti paigaldamist) ja gehleniiti ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$; peale magneti paigaldamist). Sette lõhn vastas samuti väävli lõhnale.

Setete bakterioloogiline uuring Tervisekaitse Inspektsiooni Mikrobioloogia Kesklaboris näitas saprofüütide (floora) olemasolu settes (nende aeroobne kasv oli olemas, kuid mitte massiivne). Puudusid anaeroobsed bakterid, hallitusseened ja bakter *Pseudomonas aeruginosa*.

Tallinna Veepuhastusjaama mikrobioloogia laboris täheldati 400-kordse suurendusega mikroskoopilisel uurimisel, et tegu võib olla väävlibakterite ja vetikate niitide massiga. Niitide läbimõõt oli ca 2 mikronit.

Sette uuring 400-kordse suurendusega polarisatsioonimikroskoobi all Tallinna Tehnikaülikooli Materjaliuuringute Keskuses näitas, et tegemist on niitjate mikroorganismidega ning niidistiku vahel olevate väävlikristallidega (**Foto 2, 3**).

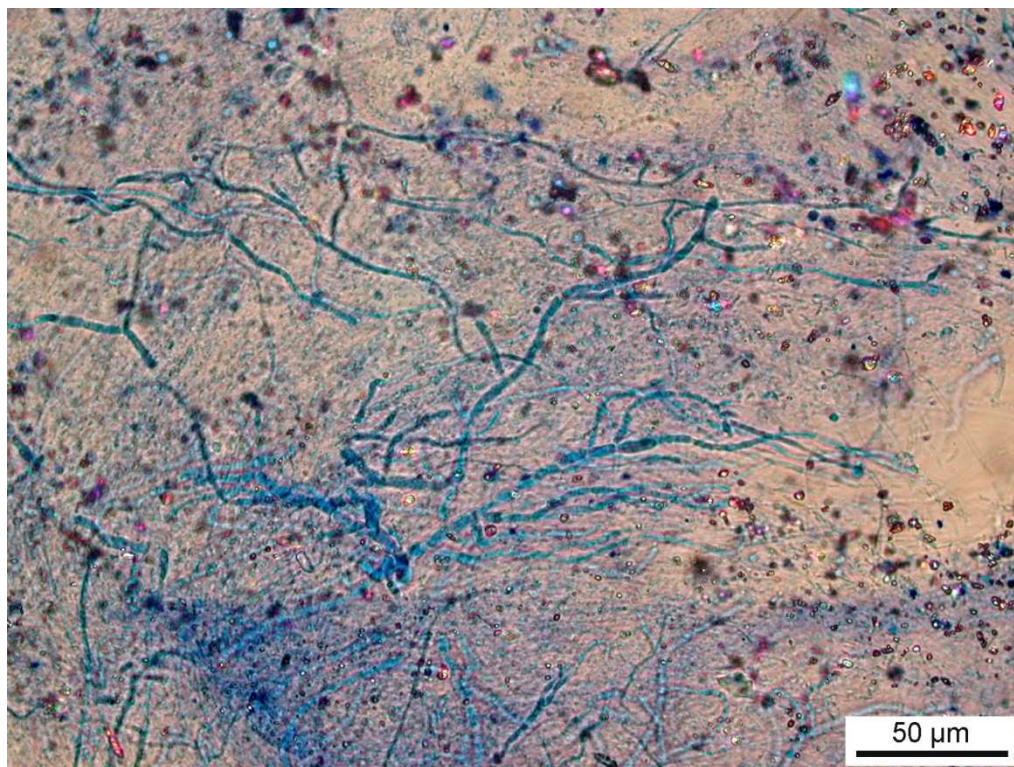


Foto 2. Mikroorganismid ja väävlikristallid, nähtuna polarisatsioonimikroskoobis (TTÜ)

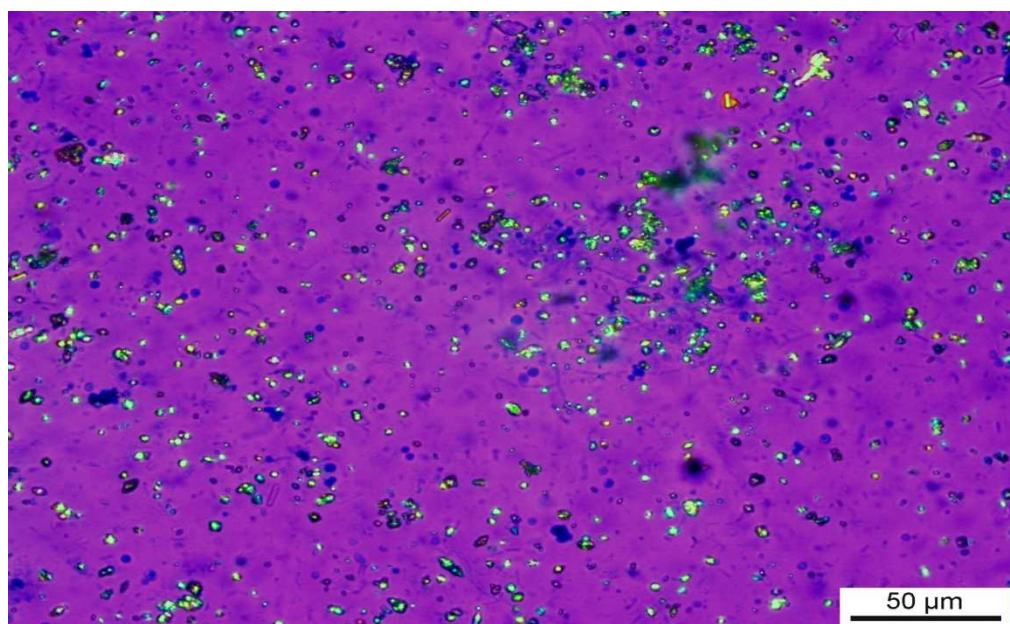


Foto 3. Bakterid (vilkuvad täpikesed) ja väävlikristallid (pidevalt säravad täpid), nähtuna polarisatsioonimikroskoobis (TTÜ)

Tartu Ülikooli geneetikateadur Eeva Heinaru, kes vaatles setetest ja mikroorganismidest tehtud fotosid, sh polarisatsioonimikroskoobi abil tehtuid, järeltas järgmist:

„Tegu on niitjate värvitute väävlidakterite rühma kuuluvate mikroobidega. Need bakterid oksüdeerivad redutseeritud anorgaanilist väävlit, mida, nagu keemilisest analüüsist nähtub, selles vees ka leidub. Vee bioloogiline hapnikutarve – BHT – on tõesti kõrge, kuid see võib olla põhjustatud ka väävelvesiniku oksüdeerumisest.“

Dominantseteks aeroobse või mikroaerofiilse metabolismitüübiga väävlidakteriks on niitjad *Thiothrix* (moodustab rosette, kuid puuduvad limajad tupid) (**Foto 4**), Beggiatoa (tupid olemas), Thioploca (ei hargne) ja küllalt suured ühe-rakulised: *Acromatium*, *Oxaliferum*, *Thiovulum*. **Foto 2** nähtava hargnemise järgi isegi tundub, et vähemalt osa neid niite võib olla *Thiothrix*'i omad, mis on tugevad ummistajad aeglastes puhasvetes ja ka nõrga soolsusega vetes.

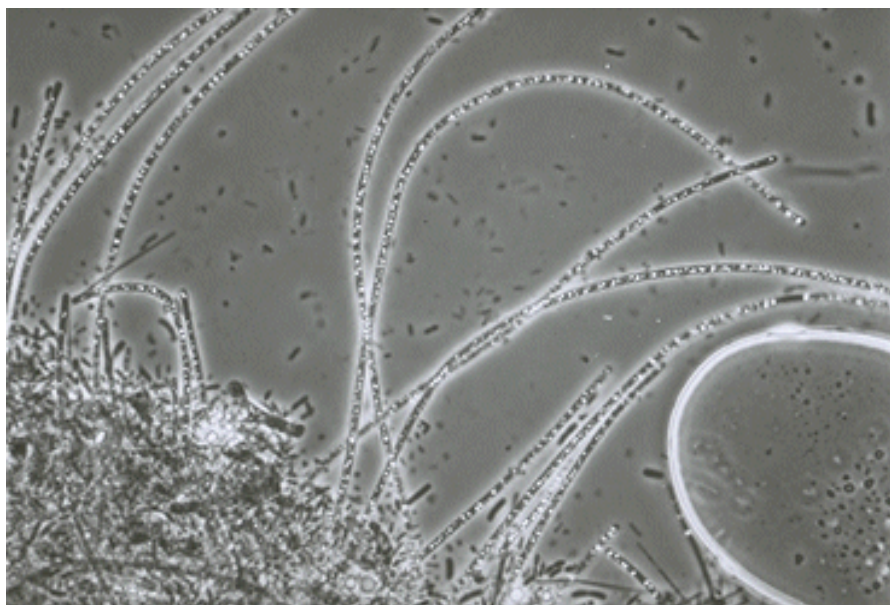


Foto 4. Tüüpiline väävlidakter *Thiothrix* (www.asissludge.com/figures/Thiothrix.gif)

Käesoleva töö ülesanne ei olnud mikroorganismide liiki täpselt määrata. **Seega**, võttes kokku erinevate ekspertide seisukohti, võib igatahes öelda, et sette näol on tegu eelkõige väävlidakterite rühma kuuluvate mikroobidega. Väävlidakterid arenevad tänu soodsa elukeskkonnale: õhuhapnikuga rikastatud vees väävelvesiniku juuresolekul, mida suvel soodustab temperatuuri tõus. Väävel on väävlidakterite elutegevuseks vajalik mineraalne.

Mida on teooriast teada väävelühenditest ja nende reaktsioonidest

Olenevalt lahustunud hapniku hulgast vees tekivad sulfiidide oksüdeerumisel sulfaadid SO_4^{2-} (kõrge hapniku sisalduse puhul) või ehe väävel S^0 (alla 0,1 mg/l hapnikku vees). Ahastes tekib väävlibakterite elutegevuse tulemusel just eheda väävli sete.

Loodusliku vee pH piirides (6-8) on põhilised vees olevad komponendid lahustunud H_2S ja vesiniksulfiid-ioon HS^- . Mida madalam on vee pH, seda rohkem sulfiide esineb gaasilise H_2S kujul. H_2S on 2-3 korda vees rohkem lahustuv kui CO_2 . 25°C ja 760 mmHg juures on H_2S lahustuvus 3380 mg/L. Hea lahustuvuse tõttu on tavalise aeratsiooniga väga raske saavutada H_2S piisavat eraldusastet, et lahti saada ebameeldivast lõhnast ja maitsest.

Kui väävelvesinikku sisaldavat põhjavett õhustada ja lasta seista, siis vette jäänud väävelvesiniku ja lahustunud hapniku üheaegne esinemine vees loob soodsad tingimused väävliit hapendavate bakterite (*Thiobacillus* tüüpi) arenguks. Viimastega kaasneb ka lima moodustumine. S.Vinogradski järgi (Kulski, 1962) võivad need väävlibakterid hapendada väävelvesinikku kuni sulfaatideni kahes etapis. Esimeses etapis moodustub kolloidne väävel, mis muudab vee häguseks:



Teises etapis tekib väävelhape (st sulfaadid):



Tekkiva väävelhappe neutraliseerimine (näiteks, vees olevate karbonaatide ja bikarbonaatide poolt) loob soodsa keskkonna ja viib väävlibakterite elutegevuse intensiivistumiseni. Toodud võrrandid on sisuliselt väävelvesiniku bioloogilise eemaldamise meetodi aluseks veest. Erinevate väävlibakterite esinemist vees olenevalt H_2S ja O_2 kontsentratsioonidest illustreerib hästi nn „*Vinogradski kolonn*” (vt. www.personal.psu.edu/faculty/j/e/jel5/biofilms/winogradsky.html)

On selgunud (Faust, Aly, 1998), et taandatud väävli reaktsioon **õhuhapnikuga** on mitmeastmeline, katalüsaatorite puudumisel aeglane ning olenev pH-st. Arvatakse, et kergelt happelises, neutraalses ning kergelt leelises keskkonnas kulgevad järgmised reaktsioonid:



Viimane reaktsioon näitab, et reaktsioonide käigus tekkinud vaba väävel reageerib vesiniksulfiid-iooniga, andes polüsulfiide. Polüsulfiidse väävli teke avaldub kollakas-valge värvusega suspensiooni moodustumises.

Tavalise õhustusprotsessi läbiviimisel eraldub kõigepealt CO₂, mis on vähem lahustuv kui H₂S. Sellega kaasneb aga vee pH kasv, mis küll soodustab raua/mangaani oksüdatsiooni, kuid halvendab sulfiidse väävli kõrvaldamist, kuna rohkem väävli on lahustunud sulfiididena ja vähem desorbeeritava H₂S gaasina.

Seetõttu pakub sulfiidse väävli kõrvaldamisel kõige suuremat huvi keemilise oksüdatsiooni meetodite kasutamine. Nende protsesside käigus oksüdeeritakse H₂S kiiresti kas vaba väävlini (S⁰) või sulfaatideni (SO₄²⁻). Näiteks, **kloori** kasutamisel kulgevad järgmised reaktsioonid:

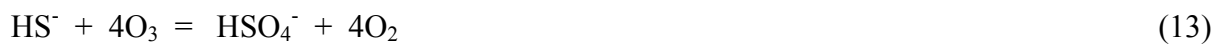


Need reaktsioonid on väga kiired. 8,5 mg Cl₂ kulub 1 mg H₂S kohta tema täielikuks oksüdatsiooniks. Optimaalne pH on piirides 6,5-7,3.

Osoon oksüdeerib sulfiide järgmiste võrrandite järgi (Faust, Aly, 1998):



Ehk summaarselt:



Siit on näha, et osooni kasutamisel kulgeb sulfiidse väavli väga kiire oksüdatsioon kuni sulfaatideni, mis jäävad lahustunud kujul vette.

Praktikas on vee õhustamiseks seni kõige rohkem kasutatud täidisega (puit- või plastelementidega) õhustuskolonne, millede kõrgus olenevalt tootlikkusest võib ulatuda kuni 10-15 m-ni. Antud meetodi puuduseks on suhteliselt suur õhukulu (15-20 m³/m³ vee kohta) ning raua-orgaanika komplekside tekke puhul ka liiga pikk kontaktaeg. Suhteliselt väheintensiivse hüdrodünaamilise režiimi tõttu jäävad desorbeeritavate gaaside jääksisaldused vees kaugele tasakaalulistest.

Toorvee ning töödeldud vee kvaliteedinäitajate alusel (**Tabel 1**) võib teha järelduse, et praeguse tehnoloogilise skeemi suurimateks puudusteks on:

1. ebaefektiivne aeratsioon ning vee liiga pikk viibimisaeg aeratsioonipaakides, mis võib soodustada hapendavate väavlibakterite teket ja paljunemist tänu väävelvesiniku, sulfiidide ning õhuhapniku üheaegsele esinemisele vees .

2. II astme pump töötab läbi katalüütiliste rauafiltrite otse võrku ja seega on vool läbi filtrite olenevalt veetarbest ebaühtlane, filtrid on pandud ebasobivasse tööolukorda, mille tulemusena kord on filtrimise kiirus liiga suur (ca 20 m/h), kord ainult nõriseb vett läbi. Selles olukorras ei moodustu filtris stabiilset filtrivat sademe kihti.

3. bakterite toiduks olevad humiinained ei kõrvaldu süsteemis

4. desinfitseerija puudub täielikult

Nende puuduste kõrvaldamiseks tuleks meie arvates valida tunduvalt intensiivsem ja kiirem toorvee õhustamise tehnoloogia kui on praegu (õhustamine paakides läbi poorse taldriku) ning kindlasti on vajalik mingi desinfitseerija (NaOCl , ClO_2 või O_3) kasutamine skeemis. Teisiti öeldes, tuleks püüda võimalikult kiiresti desorbeerida (eraldada) veest väävelvesinik, rikastades samaaegselt vett õhuhapnikuga ning vältides nende kahe gaasi samaaegset viibimist vees pikema aja jooksul. Kui valida osoon, siis viimane on võimeline täitma kõiki eelpool mainitud funktsioone.

Suurte humiinainete koguste kõrvaldamiseks (näiteks, pinnaveest) kasutatakse tavaliselt koagulante ja flokkulante (Al- ja Fe-sulfaadid või kloriidid koos polüakrüülamiidi või muu kõrgpolümeeriga), mida tuleks vette doseerida enne filtreid. Väiksemate humiinainete koguste puhul, nagu see on tavaliselt põhjavees, on otstarbekam püüda valida vastav filtermaterjal, millel on osaliselt ka aktiivsöe omadused, ning mis on võimeline adsorbeerima enda poorides ka humiinaid.

Mis puutub desinfitseerijatesse, siis nende kasutamist piirab humiinainete sisaldus toorvees. Suure humiinainete sisalduse puhul ($\text{DOC} > 2,0 \text{ mg/L}$) võivad tekkida ebasoovitavad kloororgaanilised ühendid, trihalometaanid (THM). Sel juhul ei ole kloori soovitatav kasutada. Antud juhul on lahustunud orgaanikat suhteliselt vähe ($1,3 \text{ mg/L}$) ning toksiliste oksüdatsiooni kõrvalproduktide moodustumise tõenäosus väike. Tugevamatest oksüdeerijatest moodustab kloordioksiid kloororgaanikat väga vähe ning osoon üldse mitte.

Oksüdeeritud raud ja mangaan filtritakse välja tavalistes rõhu all töötavates liivafiltrites osakeste efektiivse suurusega $0,7\text{-}1,2 \text{ mm}$ või kahekihilistes filtrites hüdroantratsiidi ja liiva kihiga (näiteks, hüdroantratsiit (terade diameetriga $1,4\text{-}2,5 \text{ mm}$; kihi kõrgus $0,6\text{-}1,0 \text{ m}$ ja liiv (terade diameetriga $0,4\text{-}0,8 \text{ mm}$; kihi kõrgus $0,6\text{-}1,0 \text{ m}$). Filtermaterjali kihis terade pinnale tekkiv FeO(OH) kelme on raua oksüdatsiooni nn sisemiseks, isemoodustuvaks katalüsaatoriks.

Väävliit võib samuti välja filtrida teralisest materjalist filtril, mis juhul, kui eelnev sulfiidide oksüdatsioon pole olnud täielik, peaks olema katalüütilise toimega, nagu roheline mangaaniliiv (*Manganese Greensand*) või muu samasse klassi kuuluv materjal. Ehkki roheline mangaaniliiv on võimeline oksüdeerima H₂S ja sulfiidset väävliit, peetakse väävelühendite suuremate sisalduste puhul otstarbekaks kasutada eeloksüdatsiooni klooriga, et kaitsta mangaaniliiva filtrit ummistumiste eest vaba väävliga.

Väga perspektiivseks filtermaterjaliks on Siberi, Kogalõmi linna, uue veepuhastusjaama projekteerimise pilootkatsete ja tööstusliku jaama eksploatatsiooni kogemuste alusel (alates septembrist, 2002) eritüüpi antratsiit *Everzit-SpecialTM*, mis peale oksüdeeritud raua ja mangaani eraldab efektiivselt ka orgaanilisi aineid, orgaanilisi rauakomplekse, trihalometaane (THM) ja teisi kloororgaanilisi aineid (AOX), ammoniumi ja fosfaate.

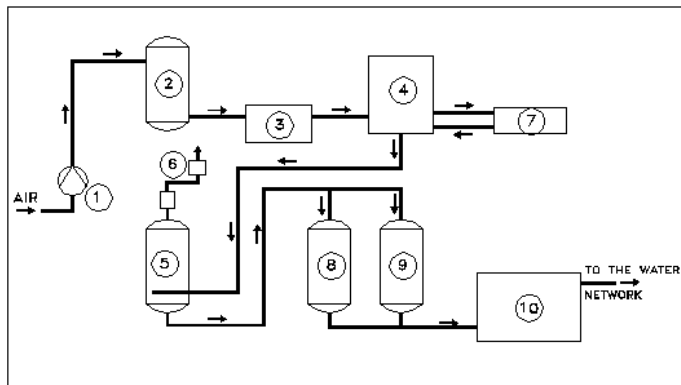
Seejuures ei vajata tugevaid oksüdeerijaid, piisab vees lahustunud hapnikust. Everzit-Special on suhteliselt suure eripinnaga (350 m²/g), mis annab talle aktiivsõe adsorbeerivad omadused. Seega eraldab ta hästi ka erinevate tugevate oksüdeerijate (kloor, osoon, H₂O₂, KMnO₄) eelneval kasutamisel vette eraldunud oksüdatsiooniprodukte. *Everzit-Special*'i osakeste diameeter on 0,6-2,0 mm ning teda kasutatakse samuti koos liivaga (0,4-0,8 mm; kihi kõrgus 0,6-0,8 m.

Parim tehnoloogiline variant Ahaste põhjavee töötlemiseks

Arvestades Ahaste põhjavee olulisi kvaliteedinäitajaid (lahustunud orgaanika, raua, mangaani, väävelvesiniku/sulfiidide ja bakterite sisaldus) võib teha järelduse, et antud toorvett on vaja:

- õhustada ja oksüdeerida koos järgneva filtrimisega raua/mangaani, väävelvesiniku ja sulfiidide kõrvaldamiseks,
- desinfitseerida väävlibakterite hävitamiseks.

Radikaalseks ning meie arvates parimaks võimalikuks lahenduseks Ahaste põhjavee töötlemisel (nn *BAT - best available technology*) oleks osooni kasutamine.



Joonis 2. Uus tehnoloogiline skeem osooni kasutamiseks: 1- kompressor; 2- ressiiver; 3- õhu kuivati; 4- osooni generaator; 5- reaktor; 6- jääkosooni lõhusti; 7- vesijahuti; 8,9-filtrid (*Everzit-Special*); 10-puhta vee reservuaar

Joonisel 2 on näidatud uus tehnoloogiline skeem, kus toorvee samaaegselt õhustamiseks oksüdatsiooniks ja desinfitseerimiseks kasutatakse osoon-õhu segu. Osooni toodetakse kuivatatud õhust generaatoris CFS-3 kontsentratsiooniga 3% (kaal). Osooni ja vee segamine toimub kontakttankis (reaktoris) mahuga 2 m^3 , mis vastab vee viibimisajale ca 20 min. Sellest piisab kõigi reaktsioonide täielikuks kulgemiseks vees. Jääkosoon juhitakse läbi katalüütilise lõhusti. Oksüdeeritud vesi suunatakse läbi *Everzit-SpecialTM* täidisega filtrite ning kogutakse puhta vee reservuaari. Protsessi kontrollitakse vees lahustunud osooni kontsentratsiooni või oksüdatsioon/reduktsioonpotentsiaali (ORP) mõõtmise kaudu.

Osoon täidab üheaegselt mitut ülesannet: hävitab bakterid (osooni tugev bakteritsiidne toime ilmneb juba alates tema kontsentratsioonist vees $> 0,1 \text{ mg/l}$), oksüdeerib kiiresti lahustunud orgaanilisi aineid (humiinaineid), rauda, mangaani ja sulfiide vastavalt eespool toodud reaktsioonide võrranditele. Väävelvesinikust väiksem osa lendub väljapuhutava gaasiga reaktorist, põhiline osa jõuab ära reageerida osooniga, moodustades sulfaat-ioone.

Kuna osoon oksüdeerib kiiresti nii kahevalentse raua, mangaani kui ka sulfiidid, langeb ära vajadus roheline mangaaniliiva kasutamise järele filtri täidisena, mida tuleb perioodiliselt regenereerida KMnO_4 lahusega. Parimaks filtermaterjaliks on siin meie arvates *Everzit-SpecialTM*, millel on ühtlasi aktiivsöe omadused ning mis adsorbeerib hästi ka orgaanilisi ühendeid. Filtritud vesi tuleks suunata puhta vee reservuaari, kuhu doseeritakse ca 1-2 korda kuus NaOCl 11%-list lahust (0,4-0,5 mg/l aktiivkloori järgi) vee bakteritsiiduse säilitamiseks, st bakterite taasarengu vältimiseks.

Kokkuvõte

Tehes kokkuvõtet Ahaste põhjavee töötlemise võimalikest variantidest, võib täie kindlusega väita, et parimaks võimalikuks lahenduseks oleks kasutada selle vee töötlemiseks osooni, mis desinfitseerib vett 99,99%-liselt, oksüdeerib ära vees oleva orgaanika, viib kahevalentse raua ja mangaani kiiresti $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -ks ja MnO_2 -ks ning lahustunud H_2S -i ja väävli sulfaatiooniks.

Kirjandus

Faust, S.D., Aly, O.M., 1998. Chemistry of Water Treatment, pp.420-431, Lewis Publ., Boca Raton, FL, USA.

Kulski, L.A.. 1962. Basics of Physico-Chemical Treatment Methods of Water. Ministry of Municipal Affairs, Moscow, USSR (in Russian).

Tänuavaldus

Autorid avaldavad siirast tänu Dr. Urve Kallavusele TTÜ Materjaliuuringute Keskusest väävlisetete röntgendifraktomeetrilise ja polarisatsioon-mikroskoopilise analüüsi eest, Dr. Anne Menertile ja Dr. Viia Lepasele TTÜ Matemaatika-Loodusteaduskonnast väärtuslike nõuannete eest. Me täname ka Tallinna Veepuhastusjaama laborit ning Tervisekaitse Inspektsiooni mikrobioloogia laborit setete mikrobioloogilise analüüsi eest. „And last, but not least“ - Hr. Peeter Viiki OÜ Auveka'st igakülgse abi, toetuse ja koostöö eest käesoleva huvitava uurimistöö teostamisel.