

# 1 Bioloogiliste protsesside põhialused

Reovee bioloogiline puhastus on protsess, milles reovees leiduvad orgaanilised ained lagundatakse mikroorganismide abil ning mittesöödavad osakesed seotakse biomassi (biomass ehk elusaine hulk on elusaine mass). Tekkinud biomass (koos mittesöödava osaga) lahutatakse hiljem veest setitamise, filtrimise või mõne muu meetodi abil. Kõik reovee puhastamisel kulgevad bioloogilised protsessid leiavad aset ka looduses ning baseeruvad looduslikel ringetel (nt lämmastiktsükkel). Erinevalt biotehnoloogia muudest harudest ei ole reovee puhastamisel võimalik kasutada luksust, mille kohaselt sooritavad soovitud protsesse kindlad (laboris kultiveeritud) mikroorganismide liigid piinlikult kontrollitud tingimustes. Mikroorganismid ehk mikroobid on nii väikesed organismid, et nad on nähtavad vaid mikroskoobis. Nende hulka kuuluvad bakterid, arhed, mikroseened ja algloomad, kuid ka mõningad loomad (nt keriloomad) ja taimed (nt rohevetikad). Kõik reovee biopuhastuses osalevad mikroorganismid sisenevad protsessi reoveega. Reovee bioloogilisel puhastamisel on inseneri ja operaatori peaülesanne soodustada selliste mikroobikoosluste ja liikide arengut ning kasvu, kes suudavad puhastuseesmärke saavutada olemasolevates tingimustes kõige tõhusamal moel.

## 1.1 Reoveepuhasti kui ökosüsteem

Reovee bioloogiline puhasti on bakteritest, arhedest, seentest, algloomadest ning hulkraksetest organismidest koosnev (tehislik) ökosüsteem. Mikroorganismide maailm on väga mitmekesine – neid on palju liike, mis erinevad kujult, toitumisviisidelt ja selle poolest, milliseid orgaanilisi ühendeid üks või teine liik tarbib ja millise kiirusega tarbimine toimub. Üks milliliiter aktiivmuda võib sisaldada kuni triljon ( $10^{12}$ ) mikroorganismi, kellel kõigil on oma nišš ja roll ökosüsteemi kui terviku toimimisel. Pole olemas organisme, kes suudaksid üksinda lagundada kõiki reovees olevaid reoaineid, seetõttu tugineb bioloogiline reoveepuhastus liikide kooslustel. Ökoloogias tähendab nišš liigi sobivust teatud keskkonnatingimustesse ning kirjeldab, kuidas organism või populatsioon reageerib ressursside ja konkurentide jaotusele.

Kuigi reoveepuhastis võib leiduda ka viirusi, ei ole neid siin eraldi käsitletud, sest nende roll reoveepuhastuses on tänaseni teadmata. Ohutuse seisukohalt tasub siiski meeles pidada, et paljud viirused on inimesele ohtlikud ja reovee puhastamisel on isikliku hügieeni jälgimine ääretult oluline.

### 1.1.1 Bakterid

Kõigist reoveepuhastuses osalevatest organismidest on bakterid kõige tähtsamad. Nad on üherakulised eeltuumsed organismid, kes suudavad iseseisvalt paljuneda ja kasvada. Aktiivmudahelbed koosnevad bakterirakkudest ning anorgaanilistest ja orgaanilistest osakestest (eksopolüsahhariididest ja heteropolüsahhariididest molekulmassiga >10000M). Bakterite biomass moodustab osakese orgaanilisest ainest 10–20%. Suurte aktiivmudahelveste sisemus, kus hapnikku on vähe, on anaeroobsete bakterite ja arhede elupaik. Enamik baktereid on alla 2 µm suurused ning seetõttu neid palja silmaga ei näe. Neid leidub kõikjal, nad on biokeemiliselt väga aktiivsed ja täidavad looduse ainerings ülitähtsat osa. Bioloogilise reoveepuhastuse kõigis etappides teevad bakterid suurema osa tööst.

Baktereid klassifitseeritakse mitmeti, kuid reoveepuhastuse seisukohast on olulisemad nende morfoloogiline (kujupõhine) ning ainevahetuspõhine liigitus. Morfoloogiliselt liigituvad bakterid kolme gruppi: a) kokid ehk sfäärilised, b) batsillid ehk pulgakujulised ning c) spirillum- ehk spiraalsed bakterid. Bakterid võivad vabalt ringi ujuda või moodustada klastreid (nt tetraate, helbeid, niite).

Funktsionaalselt on reoveekäitluses olulisemad orgaaniliste ühendite süsinikku eemaldavad, nitrifitseerivad ja fosforit akumulatsioonivõimelised bakterid.

Sõltuvalt reaktsioonist molekulaarsele hapnikule saab bakterid jagada kolme gruppi:

- aeroobid, kes on aktiivsed vaid lahustunud molekulaarse hapniku olemasolul (nt nitrifitseerivad aeroobid);
- fakultatiivsed aeroobid, kes on aktiivsed nii lahustunud molekulaarse hapniku olemasolul kui ka selle puudumisel (nt denitrifitseerivad bakterid, kes tarbivad nii nitraate kui ka lahustunud hapnikku) ning
- anaeroobid, kes on aktiivsed keskkonnas, kus lahustunud molekulaarne hapnik puudub (lahustunud hapnikku sisalduvas keskkonnas obligatoorsed anaeroobid hukkuvad).

Kõige arvukamalt esineb aktiivmudapuhastites baktereid hõimkondadest *Proteobacteria* (30–70%), *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Planctomycetes* ja *Firmicutes*. Aktiivmudas leiduvate peamiste bakteriperekondade arv on ca 250, millest 15 perekonna liike võib leida peaaegu kõigis puhastites [1, 2]. Nende 15 perekonna hulka kuuluvad bakteriliigid (nt *Flavobacterium*, *Novosphingobium* ja *Haliangium*), keda iseloomustab metabolismitüüpide rohkus. Teised laialt levinud bakteriperekonnad on seotud nitrifikatsiooniga (*Nitrosomonas* ja *Nitrospira*), polüfosfaatide akumulatsiooniga (*Tetrasphaera*, *Ca. Accumulibacter*) ja glükogeeni kogumisega rakkudesse (*Ca. Competibacter*). Peamine

nitritioksideerija on perekond *Nitrotoga*, kuid leidub ka teisi (nt perekond *Nitrospira*). Lisaks tuntud kaheastmelist nitrifikatsiooni sooritavatele mikroobidele leidub aktiivmudas perekond *Nitrospira* liike (*Comammox* – COMPLETE AMMONIA OXIDATION), kes tulevad toime täieliku nitrifikatsiooniga.

Harvemini leidub aktiivmudas niitjaid baktereid (*Ca. Microthrix*, *Ca. Promineofilum*, *Ca. Sarcinithrix*, *Gordonia*, *Kouleothrix* ja *Thiothrix*). Denitrifitseerivatest bakteritest saab esile tuua perekondi *Rhodoferax*, *Sulfuritalea* *Zoogloea* ja *Thauera*. Perekonnad *Zoogloea* ja *Thauera* on olulised aktiivmudahelveste moodustumise seisukohast.

### 1.1.2 Arhed

Arhed (*Archaea*) on ainuraksete mikroorganismide riik, mille esindajad on levinud nii veekeskkonnas kui ka mullas. Neil on mõningaid eukarüootidega sarnaseid geneetilisi omadusi, kuid struktuuri ja ainevahetuse poolest sarnanevad nad rohkem bakteritega. Aktiivmudapuhastites leidub arhede liike, mis osalevad sarnaselt nitrifitseerivatele bakteritele ammoniumi oksüdeerimises [3]. Peale selle on arhed reoveepuhastuses olulised selle poolest, et nad on ainsad teadaolevad mikroorganismid, kes toodavad anoksilistes tingimustes metaani.

### 1.1.3 Vetikad

Reoveepuhastites võib mõnikord kohata sini- ja rohevetikaid, ent reaktorites nad reeglina ei elutse (fotosünteesivate organismidena vajavad nad valgust), vaid satuvad sinna kas järelsetitist või mõnest muust valgusele avatud paigast. Küll aga kipuvad nad probleeme tekitama biotiikides, kus nende kasvuks on piisavalt toitaineid ja valgust.

### 1.1.4 Seened

Reoveepuhastuse seisukohalt on olulised kolm seenegruppi: patogeensed, üherakulised ja niitjad seened. Aktiivmudas domineerivad kahe seenehõimkonna liigid – kottseened (*Ascomycota*) ja kandseened (*Basidiomycota*), kusjuures selles elavast üle 600 seeneperekonnast leidub kõige sagedamini perekondi *Penicillium*, *Candida* ja *Geotrichum* [4]. Seened (ingl *fungi*) on metaboolselt väga mitmekesised ja nad toodavad palju rakuväliseid ensüüme (nt peroksüdaasid, laktaasid). Peale selle osalevad niitjad seened aktiivmudaosakeste moodustamisel. Mitu aktiivmudas leiduvat seeneliiki on võimelised lagundama keerukaid orgaanilisi ühendeid (sünteesilisi värve, putukamürke ja ravimijääke).


Patogeenseid seeni on aktiivmudas ligi 50 liiki, kuid operaatorile võivad suuremaid terviseprobleeme tekitada teatud perekonna *Aspergillus* liigid, mis põhjustavad mitmesuguse raskusastmega haigusi – alates allergilistest reaktsioonidest kuni raskete invasiivsete infektsioonideni. Üherakulised ja niitjad seened tarbivad laia süsinikeühendite spektrit (seetõttu kasutatakse ka neid õlletootmisel) ning võivad puhastusprotsessi tõhususele kaasa aidata. Niitjad seened võivad aga põhjustada ka probleeme, halvendades settivust ja muda tahendamist. Niitjad seened pääsevad domineerima tingimustes, kus keskkonna pH on madal (< 6,0) ning lämmastikku on vähe [5].

#### 1.1.5 Ainuraksed ehk algloomad

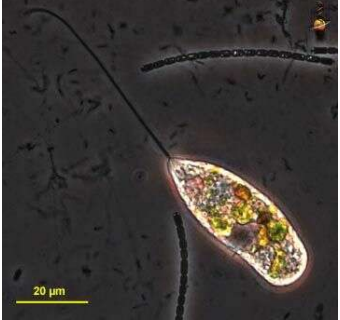



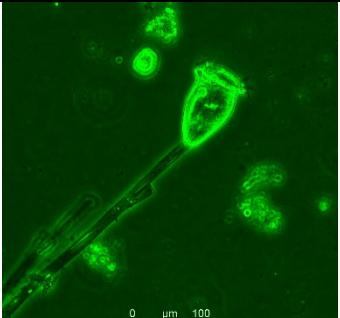
Ainuraksed (ingl *protozoa*) on rühm organisme, millesse arvatakse heterotroofse (mõnel juhul ka miksotroofse) toitumistüübi ning mobiilsuse tõttu varem loomadeks peetud üherakulised organismid, kellel puuduvad taimedele tüüpilised rakusein ja kloroplastid ning kellel erinevalt bakteritest ja arhedest on olemas rakutuum. Heterotroofid on organismid, kes elutegevuseks vajaliku süsiniku saavad toidus sisalduvast orgaanilisest ainest. Miksotroofid on organismid, kes suudavad energia ja/või süsiniku saamiseks kasutada mitut tüüpi allikaid (nt valgusenergiat, orgaanilisi või anorgaanilisi aineid).

Aktiivmudas kõige sagedamini esinevaid algloomi on kirjeldatud tabelis 6.1. Ainuraksed võivad eritada mineraalaineid ning kasvustimulaatoreid, mis soodustavad bakterite elutegevust. Nende suurim kasutegur seisneb siiski selles, et nad toituvad vabalt ujuvatest bakteritest ning aitavad sel moel vett puhastada [6].

Tabel 1.1. Ülevaade ainuraksetest, keda võib leida reoveepuhastis [5, 7]

Algloom	Kirjeldus	
Amööbid	Kõige primitiivsem algloomade tüüp. Toituvad väikestest orgaanilistest osakestest, bakteritest ja vetikatest. Iseloomulikud suurele toitainehulgale aktiivmudaprotsessi käivitamise algfaasis. Pildil: <i>Amoeba</i> (foto: Proyecto Aqua)	



Algloom	Kirjeldus	
Flagellaadid e viburlased	<p>Flagellaadid on tüüpiliselt väikesed ning ovaalse kujuga olendid, kellele on iseloomulik viburi olemasolu. Toituvad peamiselt lahustunud orgaanilistest ainetest. Domineerivad tavaliselt siis, kui baktereid on vähe.</p> <p>Pildil: <i>Peranema</i> (foto: Australian Biological Resources Study)</p>	
Ripsloomad	<p>Ripsloomad on kas osaliselt või täielikult ripsmetega (lad <i>cilia</i>), mida nad kasutavad kas edasiliikumiseks või toitumiseks, kaetud olendid. Toituvad enamasti bakteritest, vetikatest ja pärmidest. Nad on reoveepuhastuses kasulikud, sest aitavad vabaneda vabalt ujuvatest bakterirakkudest.</p> <p>Pildil: <i>Paramecium</i> (foto: J. J. Lee)</p>	
Vabalt ujuvad ripsloomad	<p>Vabalt ujuvad ripsloomad on tavaliselt üleni ripsmetega kaetud. Toituvad peamiselt vabalt ujuvatest bakterirakkudest. Domineerivad tavaliselt siis, kui bakterite arvukus aktiivmudasegus on suur.</p> <p>Pildil: <i>Litonotus</i> (foto: D. Klos)</p>	
Roomavad ripsloomad	<p>Aktiivmudasegus kõige tavalisemad. Nende domineerimine viitab headele tingimustele aktiivmudaprotsessis. Toituvad aktiivmudahelveste välimistest bakterirakkudest.</p> <p>Pildil: <i>Euplotes</i> (foto: W. Bourland)</p>	
Kinnitunud ripsloomad	<p>Meenutavad välimuselt lilli. Toit (bakterid, vetikad, väiksemad algloomad) omastatakse suu ümbrusesse kinnitunud ripsmete abil. <i>Epistilys</i> ja <i>Vorticella</i> olemasolu viitab tõhusale nitrititseeerimisele.</p> <p>Pildil: <i>Vorticella</i> (foto: V. Kõrgmaa)</p>	

### 1.1.6 Hulkraksed organismid (*Metazoa*)

Hulkraksed organismid on reovee puhastamise seisukohalt suhteliselt tähtsusetud, kuigi nad toituvad bakteritest, vetikatest ja algloomadest. Hulkraksete organismide rohkus aktiivmudaprotsessis viitab suurele mudavanusele. Aktiivmudaprotsessis kõige sagedamini esinevad hulkraksed on [7]:

- **keriloomad** – loomahõimkond, millesse kuuluvad mikroskoopilised pseudotsöloomiga loomad. Enamik neist on umbes 0,1–0,5 mm pikad ning nad elavad valdavalt mageveelistes või vähese soolsusega veekogudes;
- **helmindid** – parasiitussid, kes tavaliselt satuvad organismi suu kaudu ja elavad soolestikus, kus nad saavad täiskasvanuks ja hakkavad mune produtseerima. Munad väljuvad organismist koos fekaalidega. Mõned helmindid võivad kahjustada mitte üksnes soolestikku, vaid ka teisi elundeid (kopse, silmi). Inimese tervise seisukohalt tähtsad helmintide põhiklassid on nematoodid (ümarussid), tsestoodid (paelussid) ja trematoodid (imiussid). Kuigi enamik reoveega kaasa tulevaid helmintide munadest sadeneb eelsetitites välja [8], jõuavad mõningad nematoodid siiski aktiivmudaprotsessi. Nad on iseloomulikud stabiilsele aktiivmudaprotsessile, kus mudavanus ja vee lahustunud hapniku sisaldus on suur. Toituvad bakteritest, seentest, väiksematest algloomadest ning vahel ka teistest nematoodidest [5, 7];
- **loimurid** (*Tardigrada*) – nelja paari lülistumata jalgadega kuni 1,5 mm pikkused teadaolevalt kõige vastupidavamad mikroskoopilised loomad. Enamik neist on herbivoorid või bakterisööjad.

### 1.1.7 Kuidas kujunevad kooslused?

Reoveepuhasti on avatud süsteem, s.o pidevas vastastikmõjus väliskeskkonnaga, ning on tänu reovee omaduste varieeruvusele pidevas muutumises. Reoveepuhasti reaktor (seade või anum, kus toimuvad keemilised ja/või bioloogilised protsessid) on äärmiselt toiduküllane elupaik, mille ökosüsteemis on kõige arvukamalt esindatud bakterid, kellest aja jooksul moodustuvad keerukad organismikooslused. Võime moodustada aktiivmudahelbeid või biokilet realiseerub reoveepuhastusprotsessis suuresti tänu keskkonnatingimuste ja toidulaua mitmekesisusele. Reaktoritesse reoveega jõudnud üksikud bakterid on enamasti liikuvad ning kasutavad toidurikast keskkonda kasvamiseks ja paljunemiseks. Hiljem, kui toidu hulk väheneb, hakkavad bakterid energiat kokku hoidma ning nende liikuvus väheneb. Moodustuvad agregaadid, mis hiljem kas liituvad aktiivmudahelvesteks või sobiva pinna olemasolul kinnituvad sellele, moodustades biokile. Agregaatide moodustumisel mängivad olulist rolli nii toidulaud, katioonide olemasolu (positiivse laenguga katioonide abil seotakse negatiivselt laetud

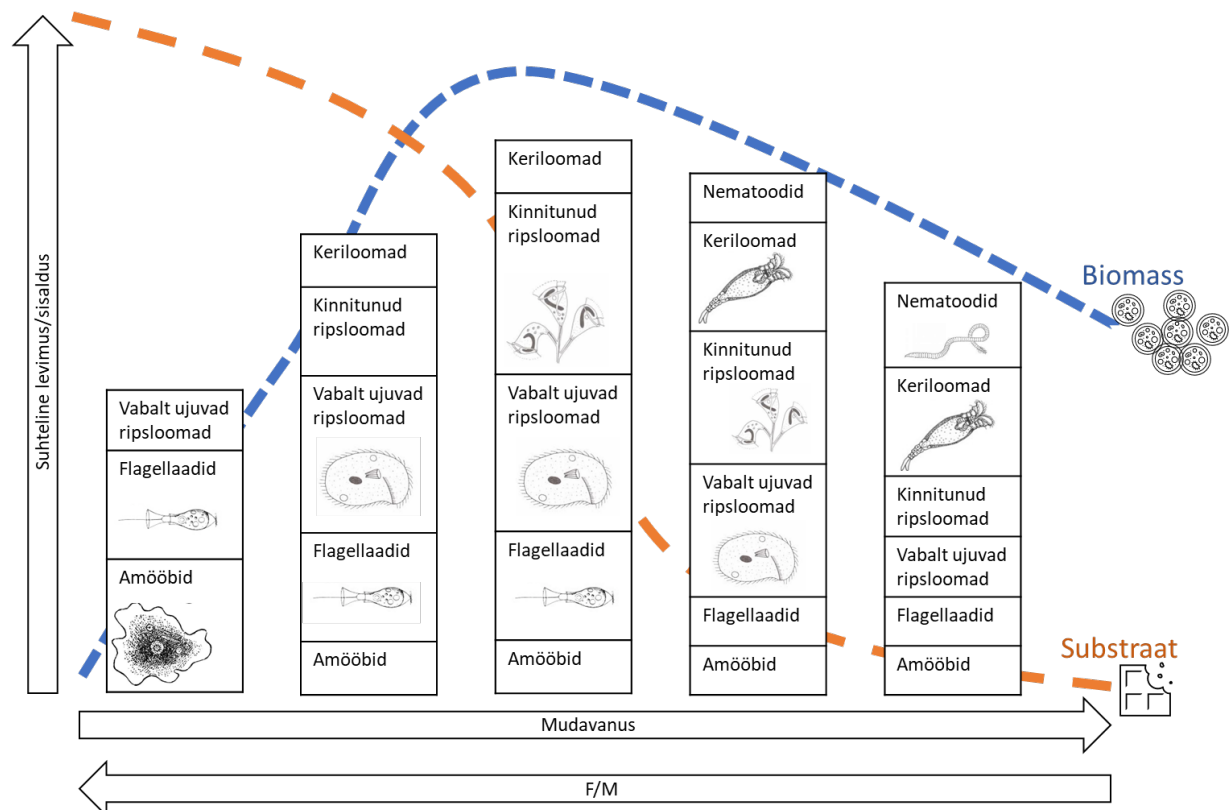
rakuväliste polümeersete ainetega ehk EPS-iga kaetud rakud) kui ka viibeaeg [7, 9, 10]. Kinnitumine annab neile parema vastupanuvõime nii näljale kui ka kahjulikele keskkonnateguritele ning võimaldab omavahelist koostööd. Mikroorganismide toit (substraat) ja saadused võivad liigiti olla väga erinevad ja sageli on ühe mikroobiliigi saadus teisele substraadiks. See omakorda võimaldab agregaatide suurenedes mikroorganismidel paremini oma mikrokeskkonda kontrollida ning tagab tõhusama kaitse kahjulike keskkonnatingimuste suhtes.

Puhastusprotsessis leiduvad mikroorganismid sõltuvad keskkonnatingimusest ning organismide interaktsioonidest:

- **vabalt ujuvad mikroorganismid** ei ole seotud ühegi pinna ega ka teiste rakkude külge ning kanduvad reeglina puhastusprotsessist heitveega välja;
- **helbeid moodustavad mikroorganismid** on aktiivmudapuhastis ülekaalus ning neid saab järelsetitis kõrvaldada. Aktiivmudahelbed on mikroorganismide, rakuväliste polümeersete ainete (EPS) ning adsorbeerunud orgaaniliste ja anorgaaniliste materjalide mass. Helveste struktuur on väga heterogeenne ning sõltuvalt aktiivmudapuhastis valitsevatest tingimustest ja reovee koostisest võivad nende omadused ja morfoloogia väga erinevad olla. Helveste moodustamine pakub mikroorganismidele kaitset pH muutuste ja mikroskoopiliste röövloomade eest ning võimaldab reguleerida mikrokeskkonda ja toitu talletada;
- **biokile moodustavad mikroorganismid** ümbritsevad end limakihiga ning kinnituvad piirpindadele (biokilekandjatele). Nagu aktiivmudahelveste pakub biokile mikroorganismidele kaitset, võimaldab reguleerida mikrokeskkonda ja toitu talletada;
- **niitjad organismid** on bakterid, seened ja vetikad, kelle rakud pärast pooldumist üksteisest ei eraldu. Mõnikord ei saa rakud eralduda neid ümbritseva kesta tõttu, mis ei ole pruugi küll mikroskoobis nähtav. Niitjate organismide kasv on hea näitaja reoveepuhastusprotsesside hindamiseks;
- **algloomad ja hulkraksed mikroorganismid** ei oma reovee puhastamise seisukohalt suurt tähtsust, kuid aitavad sellele siiski kaasa, kuna toituvad vabalt ujuvatest ning nõrgalt kinnitunud bakteritest, arhedest ja seentest. Nende esinemine annab siiski teatava indikatsiooni mudavanuse ning mudakoormuse hindamiseks (nt nematoodid kooruvad munadest suurema mudavanusega toitainevaesemas keskkonnas).

Reaktorit saab kirjeldada kui pidevkultuuri, milles biomass juhitakse tagasi protsessi. Need organismid, kellele kasvutingimused ei sobi, ei ole elujõulised ning nad uhutakse heitveega puhastist välja. Reaktorisse püsima jäänud mikroorganismikooslused (joonis 6.1) sõltuvad peale keskkonnatingimuste ka toidu kättesaadavusest ning koosluse vanusest – kui toitaineid on vähem ja kooslus vanem, jäävad

ellu ka keerulisemad hulkraksed organismid (nt keriloomad ja nematoodid) ning bakterite juurdekasv pidurdub.



Joonis 1.1. Aktiivmudaprotsessis sõltub mikroorganismide kooslus mudavanasest ning limiteeriva toitainete hulgast. Biokile puhul on kooslused tulenevalt kättesaadava substraadi hulgast sarnased. Põhilise osa biomassist moodustavad bakterid ja arhed, tulpades kujutatud organismide puhul (moodustavad kogu biomassist 10–20%) on näidatud nende suhteline levimus.

Nii inseneri kui ka operatori ülesanne on luua tingimused, milles kasvavad just need mikroorganismid, kes on puhastuseesmärkide saavutamisel kõige tõhusamad. Mikroorganismide koosluste mõjutamisel on kolm võtmesõna, millest lähtuda [11–13]:

- **seleksioon** ehk **valik** on protsess, milles toetatakse neid mikroorganisme, kes on antud keskkonnatingimustes kõige elujulisemad ning annavad kõige rohkem järglasi. Reoveepuhastis kasvatatakse reeglina mikroorganisme, kes on seotud kas helvestesse või biokillesse, sest selliseid kooslusi on kerge protsessis hoida (vabalt ujuvad rakud kanduvad reaktorist välja). Seetõttu on mikrobiagregaatide moodustamise või nendeks ühinemisvõime reoveepuhastuses kriitilise tähtsusega;
- **materjalivahetus** – mikroobikooslustel on toiduahelad, mis sarnanevad loomariigi omadega, kuid koosluse seisukohast on olulisem toiduahel, milles ei tarbita rakke, vaid üksteise saadusi. Lihtsustatult: üks rakk vabastab molekuli keskkonda ja teine rakk võtab selle endasse nii, et üks või mõlemad rakud sellest kasu saavad;
- **kohanemine** on igasugune reaktsioon, mis lõpuks viib koosluse stressi kõrvaldama või leidma

viisi oma funktsiooni säilitamiseks stressist hoolimata. Kohanemine võib seisneda nii teatud liigi või mikroorganismirühma kasvu soodustamises, ensüümide reguleerimises, geneetilise teabe vahetamises, pärilikus geneetilises muutuses kui ka oma keskkonna muutmises.

## 1.2 Ainevahetus ja keskkonnatingimused

### 1.2.1 Toitainete vajadus

Reovee bioloogilise käitlemisega kaasnevad protsessid vajavad energiat ja keemilisi elemente, milledest biomass on üles ehitatud. Biomassi peamised elementid on C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, S ja B ning väiksemal määral ka Cu ja Zn. Peamised näitajad, mille põhjal hinnatakse reovee bioloogilise käitluse sobivust, on KHT/BHT ja BHT:N:P. Muid toitaineid reeglina ei jälgita, kuna eeldatakse, et need on suhteliselt vähetähtsad ja nende vajadus on tegelikkuses täidetud. Rusikareegli alusel loetakse toitainete suhet BHT:N:P sobivaks, kui see on (90–100):5:1. Siis on kõik komponendid tasakaalus ning protsessis osalevad N ja P seotakse orgaanilise aine ärastamisel biomassi ning kõrvaldatakse koos liigimudaga. Olmereovees on see suhe reeglina paigast ära ning N ja P on süsinikuallika (BHT) suhtes ülemäära. Sellisel juhul seotakse kõrvaldatavasse biomassi (jäähmuda ja irdunud biokile) ainult osa (umbes 30–35 %) lämmastikust ning fosforist, ülejäänu kandub heitveega keskkonda ning soodustab suubla eutrofeerumist.

Tööstusreovee puhul võib esineda ka lämmastiku ja/või fosfori defitsiiti ning olla vaja puuduvat komponenti juurde anda.

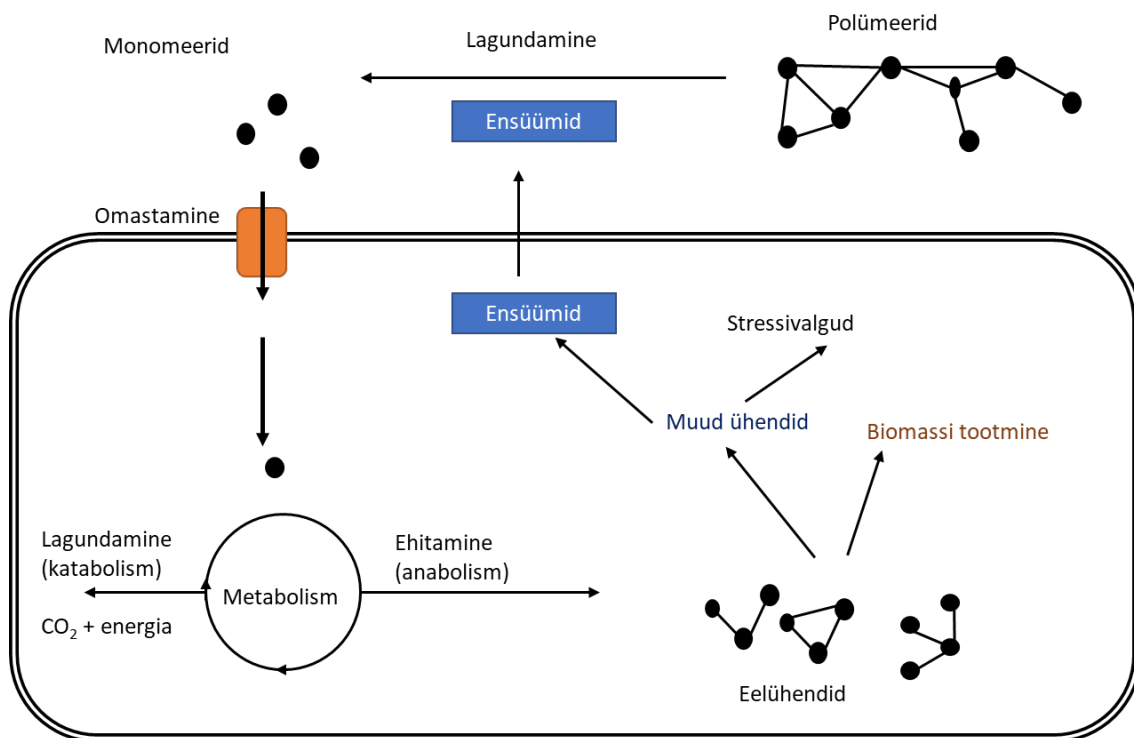
### 1.2.2 Ainevahetusprotsesside alused

Ainevahetus ehk metabolism on organismis aset leidev sünteesi- ja lõhustumisprotsesside kogum, mis tagab organismi aine- ja energiavahetuse ümbritseva keskkonnaga ning on organismi elutegevuse alus. Organismi metabolism hõlmab seedimist, imendumist, rakus toimuvaid metaboolseid radu ja lõpp-saaduste eritumist (joonis 6.2).

Rakusisene metabolism kulgeb metaboolsete radadena, milles ensüümide toimel muunduvad ja tekivad metaboliidid. Ainevahetus jaguneb kahte kategooriasse:

- **katabolism** ehk lagundav ainevahetus on rakus (hapniku kaasabil) toimuv keemiline protsess, milles keerulisematest ainetest tekivad lihtsamad ning vabaneb energia. Vabanev energia talletatakse adenosiintrifosfaadina (ATP);

- **anabolism** ehk ehitav ainevahetus on rakusiseste protsesside kogum, kus lihtsamatest keemilistest ühenditest sünteesitakse keerulisemad ühendid ATP-st saadava energia arvelt.



Joonis 1.2. Raku süsinikuvoogu kirjeldav skeem, mis hõlmab keerulisemate polümeeride lagundamist, substraadi omastamist, anabolismi, katabolismi, biomassi sünteesi ja muude kasvuga mitteseotud ühendite tootmist [14] järgi.

Tulenevalt ainevahetuse iseärasustest liigitatakse mikroorganismid tavaliselt energiaallika (foto- ja kemotroofid), süsinikuallika (auto- ja heterotroofid) ning hapnikuvajaduse (aeroobsed, anaeroobsed ja fakultatiivsed organismid) alusel (tabel 6.2):

- **fototroofid** kasutavad valgusenergiat (päikesenergiat);
- **kemotroofid** saavad energiat keemilise substraadi oksüdeerimisest;
- **autotroofid** kasutavad õhus sisalduvat süsihappegaasi ja moodustavad orgaanilisi aineid (valke, lipiide, süsivesikuid jm). Nende vastandid on **heterotroofid**, kes saavad elutegevuseks vajaliku süsiniku toidus sisalduvast orgaanilisest ainest;
- **litotroofid** on organismid, kes kasutavad elektronidoonorina anorgaanilisi aineid. Nende vastandiks on **organotroofid**, kelle elektronidoonorid on orgaanilised ained.

## 2 Biokilepuhastus

### 2.1 Biokile olemus ja teke

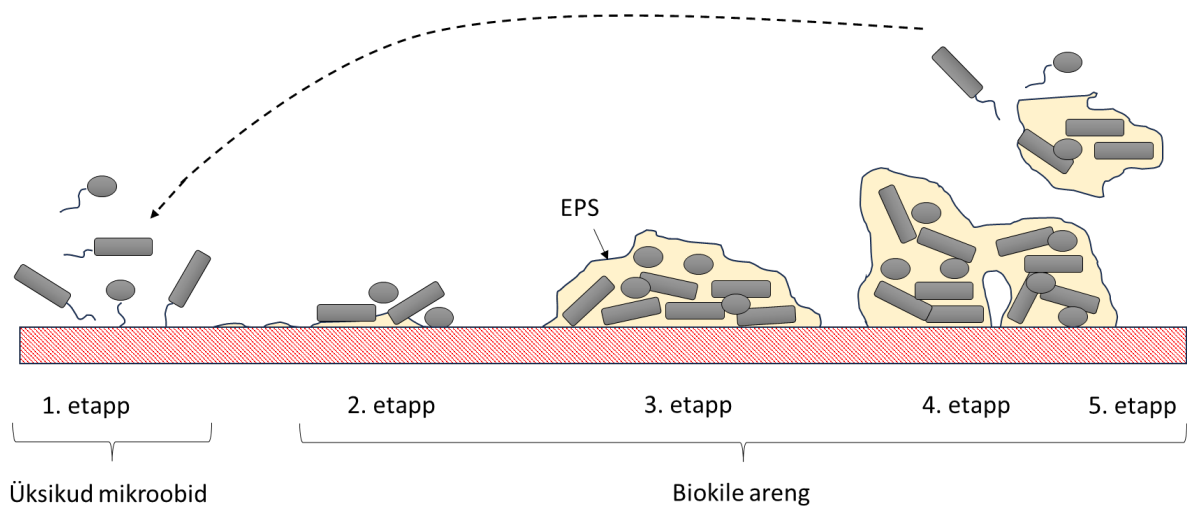
Biokile (ingl *biofilm*) on mikroorganismide kooslus, mida ümbritseb limakiht ehk rakuväline polümeerne substraat (EPS). Biokile tekib looduses ise-eneselikult piirpindadele, millel on soodsad tingimused mikroorganismide kasvuks – enamasti veepinnale ning vee ja tahke aine piirile, sest vesi on mikroorganismide jaoks oluline toitainete edasikandja. Nii leiame loodusest biokilet vette kukkunud puuokstelt, kividelt, taimejuurtelt, veetaimedelt jm ning kodumajapidamises kraanikausist, äravoolutrappidest ja torustikest, aga ka (riknema läinud) toiduainetelt, joogiveefiltritest ja paljudest muudest kohtadest. Ka inimese hammastele tekib biokile, mida tunneme hambakatu nime all [1, 2].

Biokile massist moodustavad 5–25% bakterid, ülejäänud on valdavalt EPS ja vesi. EPS moodustab mikroorganismide ümber kaitsva kihi, mis võimaldab neil omavahel kergemini seonduda ning pakub kaitset keskkonnatingimuste muutuste ning mürgiste ainete eest. Kui üksikbakter on tundlik keskkonnatingimuste muutustele, siis biokiles on ta märksa paremini kaitstud ning eri mikroorganismide koostoimel tekib selles (nt toitainete lagundamisel) sünergia. EPS võib olla ka toitainete allikaks, kuid selle komponendid (eelkõige biopolümeerid) lagunevad aeglaselt. Tänu oma eri funktsioonidele määrab EPS biokile mikrokeskkonnas elavate rakkude vahetud elutingimused, mõjutades poorsust, tihedust, veesisaldust, laengut, sorptsioonimadusi, hüdrofoobsust ja mehaanilist stabiilsust. On leitud, et looduses esineb üle 95% bakteerist biokilena.

Biokile arengu võib lihtsustatult jaotada viieks etapiks (Joonis 2.1) [1 – 3]:

- esimeses etapis toimub üksikute mikroobide esmane kinnitumine piirpinnale (kandjale). Selles etapis on täheldatav veel osakeste pidev korrapäratu nn Browni liikumine, mistõttu mikroobid võivad nt turbulentsi või lõputamise toimele kandjalt kergesti eemalduda;
- teises etapis toimub mikroobide pöördumatu kinnitumine (ja ka esimene jagunemine) piirpinnale, mil bakteritel tekib pinnaga tugev side ning nad lukustuvad EPS-i abil piirpinnale, millele biokile hakkab tekkima. Sellest etapist peale on biokile eemaldamine keeruline ning nõuab mehaanilist jõudu või keemilist töötlemist;
- kolmandas etapis toimub biokile aktiivne kasv ning bakterid moodustavad kolooniaid. Negatiivsete keskkonnamõjude eest kaitseb neid piisavalt paks biokile;

- neljandas etapis jätkub biokile kasv (küpsemine), mille raames moodustuvad toitekanaliid, biokile struktuurid ja tsoonid (aeroobsed, anoksilised ja anaeroobsed). Selles etapis võivad biokillesse lisanduda seened;
- viies etapp on bakterite vabanemine biokilest, mis võib toimuda mitmel põhjusel. Biokile lagunemine ei pea viima selle täieliku hävimiseni, vaid kiles olevate bakterite hulk võib väheneda. Lagunemine võib toimuda nii keskkonnatingimuste toimetel (nt tugevnev veevool) kui ka olla bakterite endi indutseeritud, eritades rakust biosufraktante (bioloogilist päritolu pindaktiivseid aineid), mille toimetel biokile maatriks laguneb. Reoveepuhastuses soovitakse tagada rakendatava puhastustehnoloogia jaoks optimaalset biokile paksust, kusjuures seda aitavad saavutada õiged keskkonnatingimused (hüdraulika, mehaaniline stress jm). Irdud biokile on osa puhastusprotsessis tekkivast liigmudast [1, 2, 3].



Joonis 2.1. Biokile arenguetapid

Biokile tekkeks on esmalt vajalik substraatide (toitainete) olemasolu, seejärel füüsiline pind (ehk kandja), millele bakterid saavad kinnituda, ning kasvuks ja arenguks vajalik elukeskkond. Oma toimefaasi lõpus irdub surnud biokile kandjalt, osaliselt mineraliseerub ja kõrvaldatakse liigmudana reoveepuhastist.

### 2.1.1 Biokiletehnoloogia ülevaade

Bioloogiliste reoveepuhastusprotsesside toimimiseks on vaja:

- reaktoris tekitada sobilike tingimustega (hapnik, pH, temperatuur) keskkond ning sellesse kontsentreerida (kasvatada) piisavas koguses aktiivseid mikroorganisme;
- need aktiivsed mikroorganismid tuleb veest kõrvaldada enne, kui puhastatud heitvesi süsteemist väljub [4].



Erinevalt aktiivmudapuhastist kinnituvad mikroorganismid biokilepuhastis biokilekandjale. Kuna biokilesüsteemides mudatagastus puudub, uhutakse helvestes (suspensioonis) olevad bakterid süsteemist välja, biokilele kinnitunud mikroorganismid on aga väljauhtmise eest kaitstud ning saavad sobilikes tingimustes paljunemist jätkata. See, kas süsteemis hakkab kasvama biokile või suspensioonis olev biomass, sõltub väljauhtumisest ehk tahke aine viibeajast süsteemis. Kui välja uhutava suspensiooni biomassi hulk on selle kasvukiirusest suurem, hakkavad mikroorganismid paljunema biokiles. Kui väljauhtmine on aga väike, saavad kasvueelise aktiivmudahelvestes kasvavad mikroorganismid, kuna neil on nii hapnik kui toitained paremini kättesaadavad kui biokile asukatel, milles toimuvaid protsesse piirab difusioon ehk massiülekanne (vt ka jaotist 6.3.5) [5].

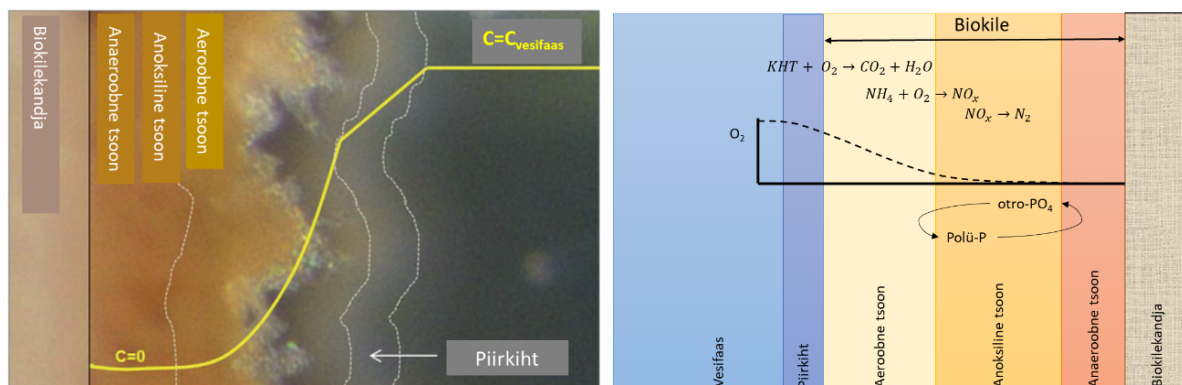
Olenevalt tehnoloogiast võib biokilepuhastites mittelahustuvate osakeste sidumine olla väiksem, st et osa heljumist liigub reaktorist läbi ja jääb vette. Heljumi veest kõrvaldamiseks on siiski üldjuhul vaja omaette puhastusetappi (vt jaotist 15).

Kui aktiivmudapuhastuses moodustuvad aktiivmudahelbed tavaliselt reovees sisalduvate heljumi-osakeste (heljuvaine) ümber ning kõrvaldatakse koos mittelahustuvate osakestega settimisfaasis, siis biokilepuhastis kõrvaldatakse veest peamiselt lahustunud reoained. Valdav osa heljumist liigub reaktorist läbi ja jääb heitvette. Et mudatagastus puudub, on heljumi kõrvaldamiseks heitveest siiski vaja omaette puhastusetappi (järelsetitit), mis arvestab hüdraulilist pinnakoormust. Massi pinnakoormust peab arvestama hübriidsüsteemidel, mille toimimiseks on mudatagastus vajalik.

Biokilepuhastites on üldjuhul vaja reovett tõhusalt eelpuhastada, s.o kõrvaldada mittelahustunud osised enne vee jõudmist bioreaktorisse. Tõhus eelpuhastus loob paremad tingimused mikroorganismide kasvuks biokiles ning vähendab nende osakaalu suspensioonis. Tavaliselt kõrvaldatakse tõhusa eelpuhastusega suurem osa heljumist (sõltuvalt eeltöötlustest 90% ja enamgi, tavaliselt 40–70%) ning seetõttu tekib biokilesüsteemis vähe liigmuda. Biokileprotsessis tekib kahe-sugust liigmuda – protsessi läbiv heljum (SRT tundidest mõne päevani) ja irduv biokile (mille vanus võib olla kümneid või sadu päevi). Protsessi läbinud vee heljumisisaldus on tavaliselt vahemikus (kui kasutatakse eelsetitit, anaeroobset vm eeltöötlust) 150–250mg/l. Et suurema osa liigmudast moodustab protsessi läbiv heljum, tuleb settekäitlusel arvestada, et liigmuda ei ole protsessis stabiliseeritud. See on aga positiivne puhastite puhul, milles rakendatakse metaankääritust, sest stabiliseerimata liigmudast saab märksa rohkem biogaasi [1, 10]. Mudatekke lihtsustatud bilanssi on käsitletud jaotises 10.4.3.

## 2.1.2 Massiülekande mõju ning eri keskkondade teke biokiles

Biokileprotsesside kineetikat mõjutavad väga oluliselt difusioon, s.o ainete liikumine nende sisalduste erinevuse (gradiendi) tõttu. Selle piiravat mõju peab arvestama nii puhastite kavandamisel kui ka käitamisel. Massiülekande mõju on kirjeldatud ka jaotises 6, milles on rõhutatud, et tihedalt kokku pakitud kooslustes mõjutab ainesisalduse gradient nii F/M suhet kui ka toitainete (ning ka lahustunud hapniku) piiratud kättesaadavust. Massiülekande puhul ei ole tegemist ühe konkreetse suurusega (koefitsiendiga), vaid see sõltub paljudest asjaoludest. Peamist rolli mängib küll biokile paksus, kuid seegi ei ole üheselt seadistatav ega defineeritav, vaid sõltub nii reovee omadustest, biokilekandja tüübist, reaktori iseärasustest, mehaanilistest seadmetest ja muudest asjaoludest. Väga oluline on ka biokile ja vesifaasi vaheline piirkiht (voolavas vedelikus oleva jäiga keha pinna lähedane õhuke vedelikukiht, mille paksus on pöördvõrdeline ruutjuurega Reynoldsi arvust), mida loetakse seisva veega kihiks ning seetõttu algab difusiooni mõju juba selles (joonis 10.2). Seetõttu on uputatud biokileprotsessides vajalik hoida tavaliselt suuremat (3–6 mgO<sub>2</sub>/l) lahustunud hapniku sisaldust kui aktiivmudapuhastuses (0,5–2 mgO<sub>2</sub>/l).



Joonis 2.2. Biokiles tekivad eri keskkonnatingimustega tsoonid nii difusioonist tingitud massiülekande piirangute kui ka biokiles toimuvate protsesside tõttu [16]

Kuigi ained käituvad natuke erinevalt, võib rusikareegliks pidada, et ainete difusioonikiirus biokiles moodustab vaid 80% nende difusioonikiirusest vees [6]. See omakorda loob olukorra, kus biokiles võivad areneda eri keskkonnatingimuste ja toitainetesisaldustega tsoonid, sest mikroorganismid jõuavad substraadi ja elektrondonorid kiiremini ära tarbida, kui uusi difusiooni toimet juurde kandub. Biokile kõige välimise tsooni (aeroobse tsooni) asukad on aeroobsed mikroorganismid, kes nõuavad kõige rohkem hapnikku (joonis 10.2). Aeroobses tsoonis asuvad tavaliselt ka nitrifitseerivad mikroorganismid (ammooniumlämmastikku oksüdeerivad bakterid ehk AOB-d ja nitritiiooni oksüdeerivad bakterid ehk NOB-d). Biokile järgmises, anoksilises tsoonis, saavad elada vaid mikroorganismid, kes kasutavad hapnikuallikana ühendeid, milles hapnik on seotud kujul, näiteks denitrifitseerijad või sulfaadi taandajad. Biokile viimases tsoonis, kus hapnikuressursid sisuliselt

puuduvad, elavad anaeroobsed mikroorganismid, kes kasutavad hapnikuvabade ühendite lagundamisel eralduvat energiat. Kuna difusioonikiirus piirab toitainete voogu, jäävad biokiles paremini ellu need mikroorganismid, kes on kohastunud eluks piiratud ressursside tingimustes (K-strateegid).

Võttes aluseks mikroorganismide kasvukiirused, nende stöhhiomeetrilised reaktsioonid (vt ka jaotist 6.3) ning substraadi difusioonikiirused, saab arvutada, kui kaugele vesilahusest ained biokile sees võivad jõuda (defineeritud kriitilise kaugusena  $L_{krit}$ ) [6]:

$$L_{krit} = \sqrt{\frac{D_{bk} \cdot \mu_{max}}{Y \cdot K_S \cdot X_{bk}}} [m],$$

(10.1)

kus  $L_{krit}$  on kriitiline kaugus (m),  $D_{bk}$  – aine difusioonikiirus biokiles ( $m^2/d$ ),  $\mu_{max}$  – mikroorganismide maksimaalne kasvukiirus ( $d^{-1}$ ),  $Y$  – saagisetegur, mis iseloomustab aine (substraadi) tarbimist uute mikroorganismide kasvuks ( $g/g$ ),  $K_S$  – substraadi küllastustegur ( $g/m^3$ ) ja  $X_{bk}$  – mikroorganismide hulk biokiles ( $g/m^3$ ).

Seda, kas biokile sees tekib piirkondi, kuhu ained vesilahusest ei jõua, saab hinnata biokile paksuse ( $L_{bk}$ ) ja kriitilise kauguse ( $L_{krit}$ ) suhte kaudu [6]:

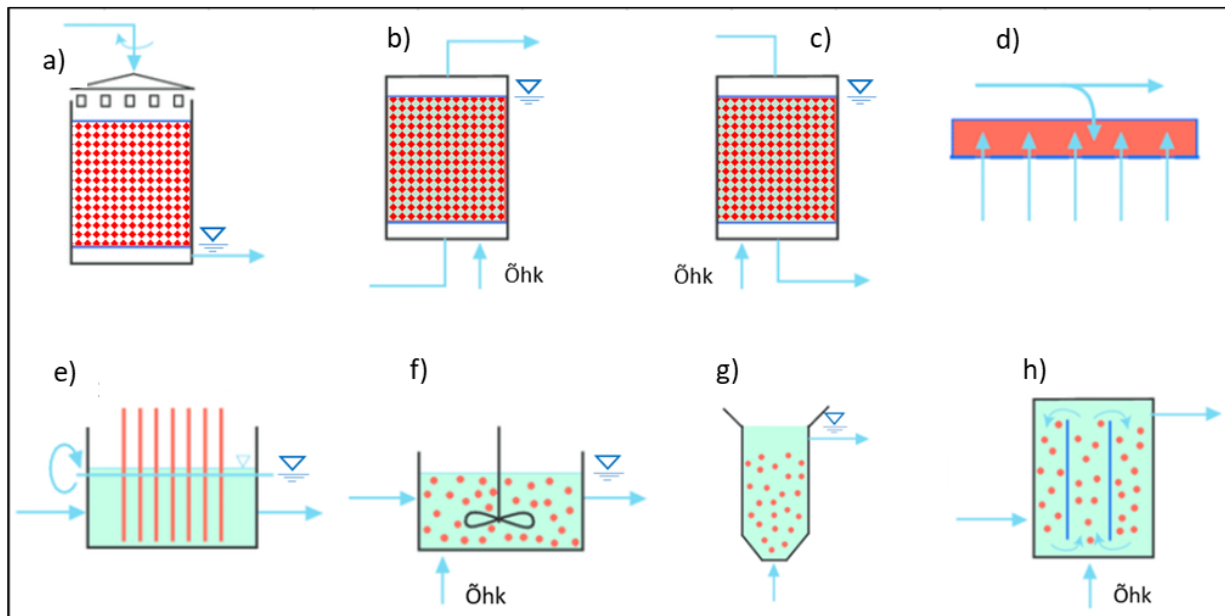
- kui  $L_{bk}/L_{krit} < 0,4$ , jõuab substraat kõigisse biokile osadesse ning difusioonist tingitud piiranguid ei ole;
- kui  $L_{bk}/L_{krit} > 4$ , on biokile niivõrd paks, et eeldada võib difusioonipiirangut ning biokiles tekivad erineva toitaine- ja hapnikusisaldustega tsoonid, milles kasvavad mikroorganismid, kelle nõuded nii elutegevuseks vajalike toitainete kui ka hapniku suhtes on erinevad.

## 2.2 Biokilereaktorite peamised tüübid

Nii nagu muudegi reoveepuhastustehnoloogiate puhul on ka biokilepuhastuses kasutusel palju reaktoritüüpe ja protsessiskeeme. Keskkonnatingimuste järgi jagunevad need eelkõige aerobseteks ja anaerobseteks ning veetaseme ja õhustussüsteemi järgi viimase aja erialakirjanduses järgmisteks reaktoritüüpideks [5]:

- mitteuputatud või osaliselt uputatud, õhuhapniku abil loomulikul moel õhustatavad reaktorid, mille hulka kuuluvad nii nõrgbiofiltrid kui ka biorootorid (joonis 10.3, a ja e);

- kinnitunud biokilekandjaga uputatud reaktorid (joonis 10.3, b ja c), mis erinevad läbivoolu suuna (alt üles või vastupidi) poolest ning mida on vaja sundõhustada ning tavaliselt ka tagasi uhta;
- liikuva biokilekandjaga süsteemid (joonis 10.3, f), mis on uputatud ning mida on vaja sundõhustada ja mehaaniliselt segada;
- keevkihiga biokilereaktorid (joonis 10.3, g ja h), milles biokilekandja (plast, liiv jms) paneb heljuma alt üles suunatud vool. Selliste reaktorite hulka liigituvad ka liivfiltrid, kui nad on bioloogiliselt aktiivsed (traditsiooniliselt nad ainult filtreerivad), millest on arenenud ka graanulmudasüsteemid (joonis 10.3, h).
- membraansüsteemid (joonis 10.3, d), mis on uputatud, sundõhustatud ning milles biokile kasvab membraani küljes ja substraat pääseb sellele ligi nii veest kui ka difundeerudes läbi membraani.



Joonis 2.3. Biokilereaktorid: a – norgbiofilter (ei ole uputatud), b – fikseeritud biokilekandjaga sukelbiofilter, milles vool liigub alt üles (ingl upflow) või c – ülalt alla (ingl downflow), d – membraan-biokilereaktor, e – biorotor, f – liikuva biokilekandjaga reaktor, g – keevkihiga biokilereaktorid (ingl expanded (EBBR) and fluidized (FBBR) bed bioreactor), h – õhktõstukiga graanulmudasüsteem [5].

Biokilepuhastitel on palju alavariante ja teiste tehnoloogiatega hübriidseid lahendusi. Tuntuim on IFAS (ingl *integrated fixed film activated sludge*) – bioloogiline reoveepuhasti, milles rakendatakse koos aktiivmudatehnoloogiat ja heljuvtugimaterjaliga biokilemenetlust. Kasutusel on ka tsüklilise pesuga CFIC (ingl *continuous flow intermittent cleaning reactor*) ja HyVAB (ingl *hybrid vertical anaerobic/aerobic biofilm reactor*) süsteemid ning heljuvtugimaterjaliga biokile- ja membraan-

tehnoloogial baseeruvad membraanbiokilereaktorid MBfR (ingl *membrane biofilm reactor*). Eriala-kirjanduses on kirjeldatud rohkem kui kümnet biokiletehnoogilist reoveepuhastusvõtet.

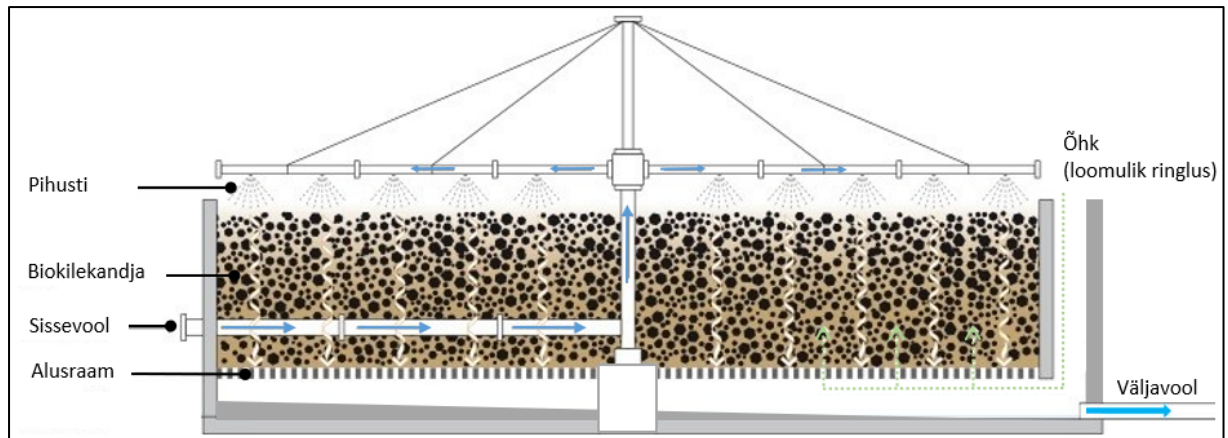
### 2.2.1 Nõrgbiofilter

Nõrgbiofiltrid (ingl *trickling filter*) on kõige vanemad biokilereaktorid, mis võeti kasutusele juba 20. sajandi alguses ning on tänini praktikas (eriti soojas kliimas) levinud. Tegemist on tugimaterjaliga (peamiselt graniitkillustiku, viimasel ajal plastiga) täidetud reaktoriga, mille pinnale ühtlaselt pihustatavad reovesi läbi nõrgub. Tugimaterjal ei ole kunagi üleni vee sees, mistõttu bakterid saavad hapnikku nii õhust kui ka veest. Reovesi juhitakse nõrgbiofiltrisse läbi veejaoturi või pritsitakse vihmutite abil tugimaterjali pinnale. Biokiles elavad mikroorganismid saavad veest toitaineid ja hapnikku. Süsteemi koormus peab olema kavandatud nõnda, et piisaks naturaalsest õhustamisest [5, 7]. Tehakse ka sundõhustusega (ventilatsiooniga) nõrgbiofiltreid.

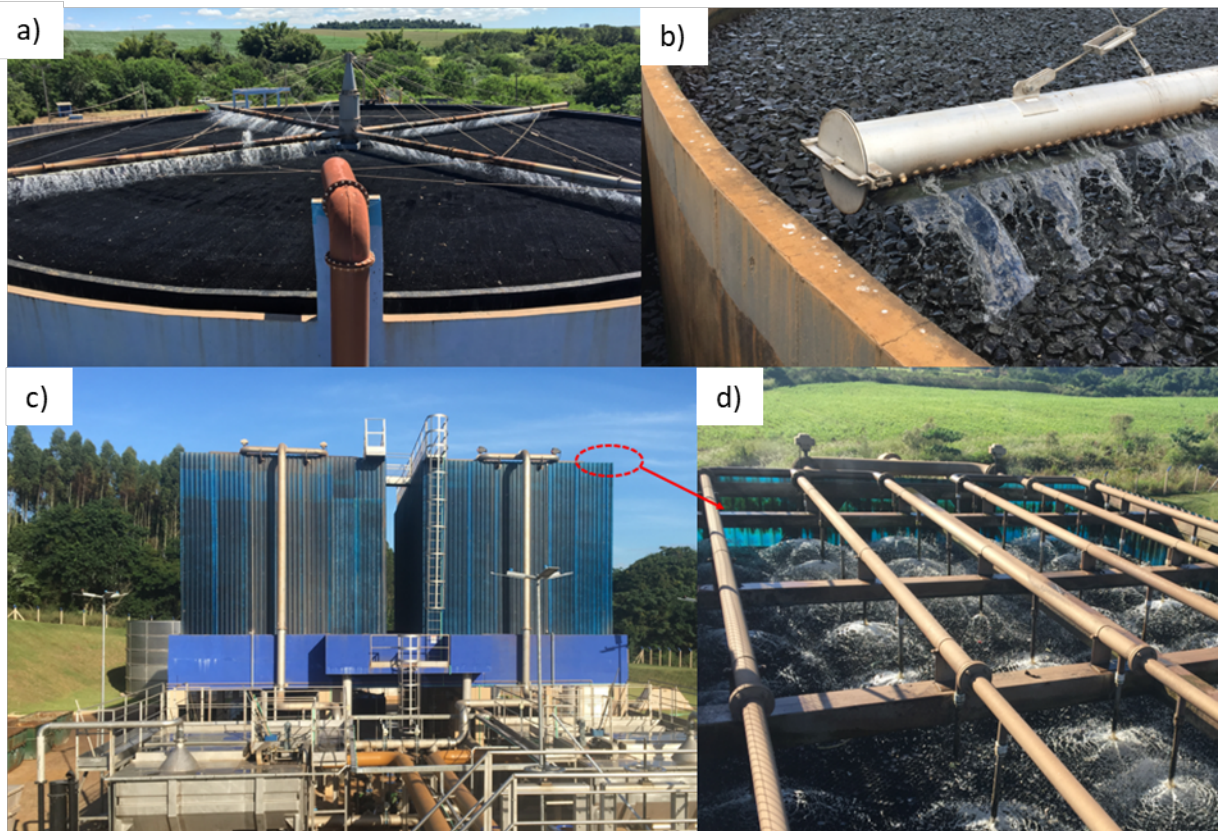
Algselt kasutati nõrgbiofiltrites biokile kandelementidena ainult looduslikke materjale, sh kive, kruusa, killustikku, räbu, puitu, turvast, jämeliiva. Kivide läbimõõt oli tavaliselt 5–10 cm, filtri keha ei võinud olla kõrge, et õhu sissepääs ei oleks takistatud. Kividevaheline, õhu liikumiseks vajalik vaba ruum (kirjeldatakse terminiga tugimaterjali avatus ehk tugimaterjalivaba osa reaktori ruumalast), on kõigest 30–35% üldruumalast, mis ei lubanud ehitada kõrgeid nõrgbiofiltreid. Plastelementidega filtrites on avatuse protsent 90–98%. See, et looduslikud materjalid on kaalult rasked, seadis piiranguid ka rajatise konstruktsioonile, nõnda et kivi- ja killustiktäidisega nõrgbiofiltrite filtri keha tüsedus oli tavaliselt 1,8–2,4 m. Kerged plasttäidised lubavad ehitada oluliselt kõrgemaid torn-nõrgbiofiltreid. Viimase aja nõrgbiofiltrites kasutatakse plastist tugimaterjale eripindalaga 100–300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, ent ka looduslikud materjalid on kasutusel.

Joonisel 10.4 on kujutatud nõrgbiofiltri klassikaline lahendus, milles filtri keha paikneb põhjaavadega raudbetoonmahutis (joonis 10.5, a ja b). Reovesi pihustatakse selle pinnale, nõrgub alla läbi filtri täidise ning voolab puhastist põhjast välja. Kergete tänapäevaste plasttugimaterjali plokkidega nõrgbiofiltreid on võimalik rajada väga lihtsatesse karkassmahutitesse (joonis 10.5, c ja d).



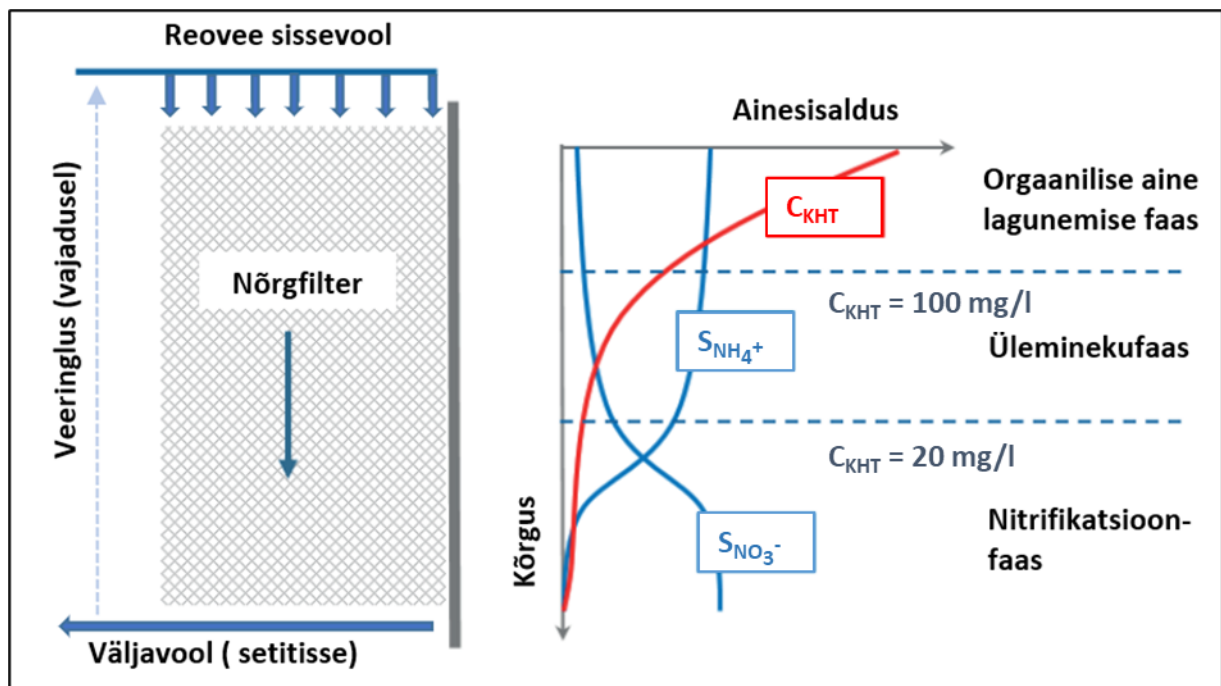


Joonis 2.4 Traditsiooniline nõrgbiofilter [13].



Joonis 2.5. Nõrgbiofiltri lahendusi: a – plasttäidise ja b – kivitäidisega karusell-veejaoturiga raudbetoonmahutid ning c ja d – plasttäidisega karkassmahuti ja sprinklersüsteemiga biofiltrid (Brasiilia, fotod V. Lemmiksoo).

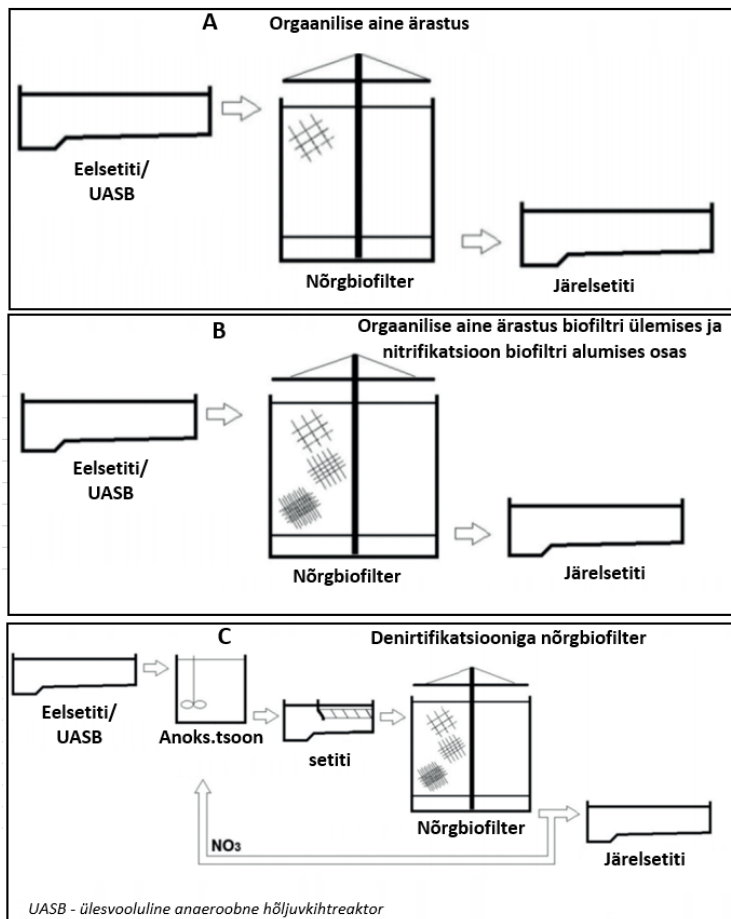
Nõrgbiofilter toimib väljatõrjereaktori põhimõttel: reovesi jaguneb ristlõike ulatuses ühtlaselt ning reaktori sisse- ja väljavoolutsoonide vahel on olemas reovee ainesisalduse selge gradient (joonis 10.6).



Joonis 2.6 Nõrgbiofiltri toimimise massiskeem [10]

Reegliina hoitakse reovee orgaanilise aine sisaldus reoveepihustites (s.o reaktori sissevoolutsoonis) alla 150 mgBHT<sub>7</sub>/l, mille tagamiseks on kindlasti vaja eelpuhastust, aga tavaliselt ka veeringlust (tähtistus RRKI). Reaktori ülemises osas laguneb orgaaniline aine heterotroofsete mikroorganismide abil (joonis 10.6). Sellele järgnevas üleminekufaasis (kui lahustunud KHT sisaldus on väiksem kui 100 mg/l), käivitub esmane nitrifikatsioon. Täiemahuline nitrifikatsioon algab aga alles siis, kui lahustunud KHT sisaldus on alla 20 mg/l [19].

Nõrgbiofiltreid kasutatakse nii orgaanilise aine ärastamiseks (joonis 10.7, a) kui ka nitrititseeerimiseks (joonis 10.7, b) – mõlemad etapid toimuvad ühes mahutis (joonisel 10.7 erinevad lahendused a ja b peamiselt selle poolest, et nitrifikatsiooni korral on reaktori alumises osas suurema eripinnaga kandjad).



Joonis 2.7 Nõrgbiofiltrite konfiguratsioone [10]

Võimalik on ka jadamisi filtritega lahendus, kus ühes nõrgfiltris ärastatakse orgaaniline aine ning nitrifikatsioon toimub teises. Samas biofiltris on biokile sügavamates kihtides võimalik ka samaaegne osaline denitrifitseerimine, mille tõhusus on olnud kuni 10% (ent võib olla ka märksa väiksem). Täiendava veeringlusega võib tõhusust küll teataval määral suurendada, aga denitrifikatsioon toimub ainult neis nõrgfiltrite kohtades, kus on selge hapnikuvaegus. Lahjema reovee korral ei ole denitrifikatsioon sellistes tingimustes võimalik. Mida ülekoormatum on nõrgbiofilter, seda suurem on võimalus samaaegseks denitrifikatsiooniks, kuid siis on ummistumisoht suur ning nitrifikatsioon ja orgaanilise aine ärastuse tõhusus võivad langeda. Rakendatud on ka (kui on vaja olnud rahuldada konkreetseid nõudeid) denitrifikatsiooni jaoks eraldi etappi (nii eel- kui järelnitrifikatsiooni), mida on kujutatud joonisel 10.7, c. Selleks anoksiliseks etapiks võib olla nii aktiivmudapuhasti, sukkelbiofilter jms.

### Nõrgbiofiltrite üldised arvutuspehõimõtted

Nõrgbiofiltrite (nagu enamiku biokiletehnoloogiate) puhul arvutatakse iga protsessietapp eraldi, sest iga neist on oma koormusnäitajad ning heterotroofseid protsesse peab hoidma autotroofsetest lahus,



nagu kujutatud joonisel 10.6. Protsessi etappidel on erinevad ka biokilekandjate eripinna piirid ja koormusnäitajad [7].

Liigmuda tekke suhtes tuleb arvestada, et suur osa sisenevast heljumist jõuab nõrgbiofiltri väljavoolu, mis tuleb sealt kõrvaldada ja juhtida settekäitlusesse. Olmereovee puhul võib arvestada, et liigmuda tekib nõrgbiofiltris 0,75 kgKA sissevooluvee 1kg BHT<sub>5</sub> kohta [7, 8].

Nõrgbiofiltri dimensioneerimiskoormuste suhtes on otstarbekas tugineda Saksa ATV standarditele [7, 8, 9], millele viitab ka enamik käsiraamatuid.

- **Nõrgbiofiltrite mõõtmed ning filtri pinna ja veepihustite hüdrauliline koormus**

Saksamaal on tüüpiliste olmereovee nõrgbiofiltrite kõrgus 3–5 m ja läbimõõt 5–35 m, praktikas on otstarbekaks osutunud 4 m kõrgused biofiltrid. Pinnakoormus  $q_{A,NBF}$  peaks mineraalse täite puhul olema vähemalt 0,4 m/h (arvestades ka ringlust  $RR_{KI}$ ), plasttäite puhul vähemalt 0,8 m/s. Minimaalne pinnakoormus on vajalik selleks, et biokile piisavalt märguks, väiksema koormuse korral võib biokile hakata kuivama ja kaotada tõhusust.

Madalates biofiltrites (2 m on miinimum) peab olema tagatud ühtlane veejaotus ning tuleb hoolikalt valida kandja materjal (nt plast, mille struktuur tahab hea reovee jaotuse) ja vähendada pinnakoormust 0,4 m/h -ni.

Nõrgbiofiltri ummistumisohu vähendamiseks on oluline näitaja veejaotussüsteemi pihustusjõud  $F_F$ , mis on laialt levinud karusell-veejaoturite puhul arvatav valemiga:

$$F_F = q_A \cdot 1000 / (n_{vj} \cdot v_{vj}) \text{ [mm/jaotur]},$$

(10.2)

kus  $q_A$  on nõrgbiofiltri hüdrauliline pinnakoormus (sh ringlus);  $n_{vj}$  – veejaoturite arv ja  $v_{vj}$  – veejaoturite pöörlemiskiirus.

Soovituslik pihustusjõud  $F_F$  on vahemikus 4–8 mm. Mida kõrgem on nõrgbiofilter, seda suurem on ka soovituslik pihustuskoormus, et vähendada filtri ülaosa, kus heterotroofide kasv on intensiivne, ummistumise ohtu.

Retsirkulatsiooni ( $RR_{KI}$ ) kordsus arvatatakse lähtuvalt sissevooluvee BHT-st ( $C_{BHT,SV}$ ) ja referentsväärtusest, et veejaoturist ei pihustuks filtri pinnale rohkem BHT-d kui 150 mg/l:

$$RR_{KI} = \left( \frac{C_{BHT,SV}}{150} \right) - 1.$$

(10.3)

Orgaanilise aine ärastamiseks on vaja:

- biokilekandjaid spetsiifilise eripinnaga 100–150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>;
- BHT<sub>5</sub>-koormust  $R_{BHT_5,SV} \leq 0,4 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ . Soovituslikud ülempiirid  $R_{BHT_5,SV}$  on 0,6 kg/m<sup>3</sup>·d ja eripind kuni 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, millest suuremate korral on ummistumisoht suur;
- vähendada väiksemate (< 1000 ie) reoveepuhastite BHT<sub>5</sub>-koormust väärtuseni 0,2 kg/m<sup>3</sup>·d, kuna selliste puhastite koormustipud ja seinafekti mõju (väiksem reaktor) on suured.

Nitrifikatsiooniks on vaja:

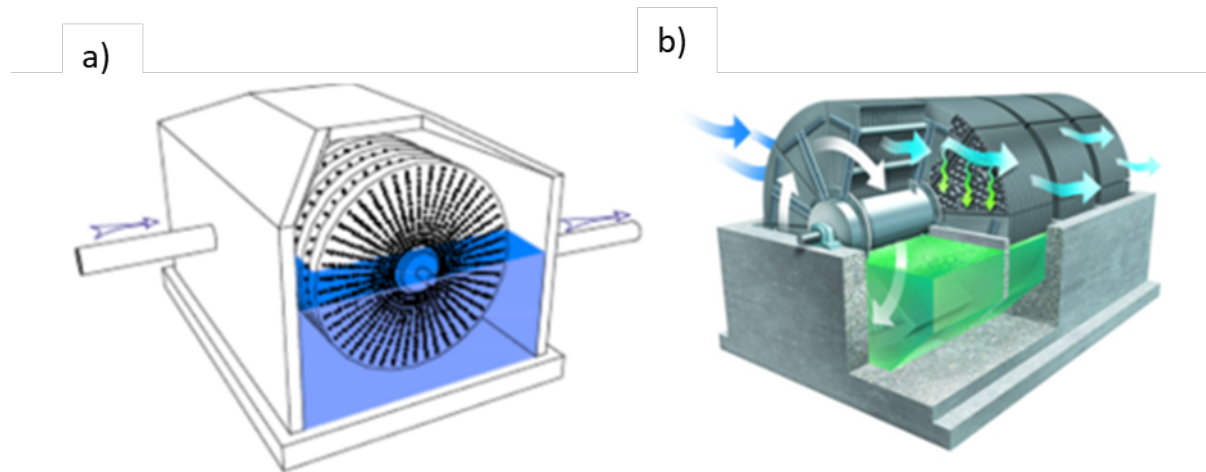
- kindlasti vähendada eelnenud orgaanilise aine ärastuse etapis BHT<sub>5</sub>-koormust:  $R_{BHT_5,SV} \leq 0,4 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ;
- et biokilekandjate spetsiifiline eripind oleks kuni 240 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Kui see on üle 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, peab jälgima, et
  - reovee heljumisisaldus (sisend + retsirkulatsioon) oleks alla 30 mg/l;
  - hüdrauliline koormus oleks (läbi ringluse) >2 m/s, et kogu biokile piisavalt märguks;
- TKN- (Kjeldahli lämmastiku) koormus  $R_{TKN,SV} \leq 0,1 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ;
- väikestel reoveepuhastitel (< 1000 ie) vähendada TKN-koormust:  $R_{TKN,SV} \leq 0,05 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$  (vähendada on vaja ka BHT<sub>5</sub>-koormust).

Denitrifikatsioon saab toimuda ainult neis nõrgbiofiltri osades, kus valitseb hapnikuvaegus, mida tavaliselt vältida püütakse. Nõrgbiofiltri ülekoormamisel on võimalik samaaegne denitrifikatsioon, kuid ummistumisoht on suur ning nitrifikatsiooni ja orgaanilise aine ärastuse tõhusus võivad langeda. Seetõttu ei ole denitrifikatsiooni tõhusust nõrgbiofiltri puhul üldse soovitatav arvestada, vaid kavandatagu selleks eraldiseisev puhastusetapp.

## 2.2.2 Sukelbiofilter

Sukelbiofilter (joonis 10.8 **Error! Reference source not found.**) on biokilepuhasti, mis võeti kasutusele 1960-ndatel alates. Sukelbiofiltri peamine osa on pooleldi (kuni 40% ulatuses) reovees aeglaselt pöörlev trummel. Trumli sees on üksteise kõrvale paigutatud plastkettad (ketasbiorootor) või silindrikujuline korv, mis on täis suure eripinnaga plastelemente (biorootor). Trumli pöörlemisel on osa täidisest ja sellel olevast biokilest veest väljas, osa vee sees. Veest väljas oleku ajal saavad

mikroorganismid hingata ning vees olles toituda. Mahutist, milles trummel pöörleb, voolab vesi järelsetitesse, kuhu settinud irdunud biokile ja sissevooluvees olev heljum pumbatakse liigmudana settikäitlusesse.



Joonis 2.8 Sukelbiofiltrid: a – ketasbiorootor ja b – biorootor [14, 15]

Kuigi biorootorid on lihtsad ja ökonoomsed süsteemid, oli nende kasutamine 90-ndateks aastateks väga oluliselt vähenenud, sest on ette tulnud, et liiga raskeks muutunud kettapak või täidisega trummel on murdnud rootori võlli. Viimasel ajal huvi nende vastu, peamiselt väikepuhastitena, tõusnud, sest konstruktiivsed riskid on suhteliselt väikesed. Tänapäevaste biorootorite ajamid (elektrimootorid koos reduktoriga) on sageli varustatud sagedusmuunduritega, mistõttu on võimalik nende pöörlemiskiirust muuta (et biokile paksust kontrolli all hoida). Sagedusmuunduri abil on võimalik ka pidevalt jälgida mootori koormust ning märgata selle suurenemist [1, 2, 4, 5].

Sukelbiofiltri dimensioneerimine toimub selle eripinna järgi. Samas on täheldatud, et kogu pind ei ole bioloogiliselt aktiivne (on ka sesoonseid erinevusi), mistõttu on soovitatav lugeda töötavaks vaid 30% võrra vähendatud pindala [10]. Tavaliselt arvestatakse, et bioloogiliselt on aktiivne kuni  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , kui just ei ole pilootkatsetega tõendatud, et töötav pind on suurem. Detailsem dimensioneerimine võtab arvesse ka rootori pöörlemiskiiruse, hüdraulilise koormuse, viibeaja, rootori uputamissügavuse ning puhastusetappide arvu. Neile vastavaks tuleb projekteerida mehaanilised seadmed, sealhulgas mootor, reduktor jm. Sukelbiofiltri uputussügavus on orgaanilise aine ärastamise korral ca 40%, denitrifikatsiooni korral (mille jaoks seda rakendatakse harva) suurem.

#### Rootori eripinna valik:

- kui orgaanilise aine pinnakoormus ( $\text{BHT}_5$  baasil)  $q_{\text{KA,BHT}}$  on üle  $20 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , on rootoriketaste minimaalne vahe 18 mm ning eripind kuni  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Koormuse ülempiir on standardite [10, 11, 12] kohaselt  $40 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ;

- kui orgaanilise aine pinnakoormus (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT}$  on alla 20 g/m<sup>2</sup>·d, on rootoriketaste minimaalne vahe 15 mm ning eripind kuni 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>;
- nitrifitseeriva filtri (kui orgaanilise aine ärastusaste on varustatud setitiga, s.o heljum edasi ei pääse), on rootoriketaste minimaalne vahe 10 mm ja eripind kuni 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

### Orgaanilise aine ärastus:

#### Ketasbiorootorite puhul:

- on kaheastmelise kaskaadi puhul orgaanilise aine pinnakoormus (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 8$  g/m<sup>2</sup>·d;
- on kolme- ja neljaastmelise kaskaadi puhul orgaanilise aine pinnakoormus (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 10$  g/m<sup>2</sup>·d;
- on soovitatav väikeste (< 1000 ie) reoveepuhastite orgaanilise aine pinnakoormust vähendada: (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 4$  g/m<sup>2</sup>·d .

#### Muud tüüpi biorootorite puhul:

- on kaheastmelise kaskaadi puhul orgaanilise aine pinnakoormus (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 5,6$  g/m<sup>2</sup>·d;
- on kolme- ja neljaastmelise kaskaadi puhul orgaanilise aine koormus (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 7$  g/m<sup>2</sup>·d;
- on soovitatav väikeste (< 1000 ie) reoveepuhastite orgaanilise aine koormust vähendada: (BHT<sub>5</sub> baasil)  $q_{KA,BHT} \leq 3$  g/m<sup>2</sup>·d .

### Nitrifikatsioon:

#### Ketasbiorootorite puhul:

- on kolmeastmelise kaskaadi  $q_{KA,BHT} \leq 8$  g/m<sup>2</sup>·d ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 1,6$  gN/m<sup>2</sup>·d
- on neljaastmelise kaskaadi  $q_{KA,BHT} \leq 10$  g/m<sup>2</sup>·d ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 2$  gN/m<sup>2</sup>·d;
- on soovitatav väikeste (< 1000 ie) reoveepuhastitel vähendada:  $q_{KA,BHT} \leq 2$  g/m<sup>2</sup>·d ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 1,2$  gN/m<sup>2</sup>·d .

#### Muud tüüpi biorootorite puhul:

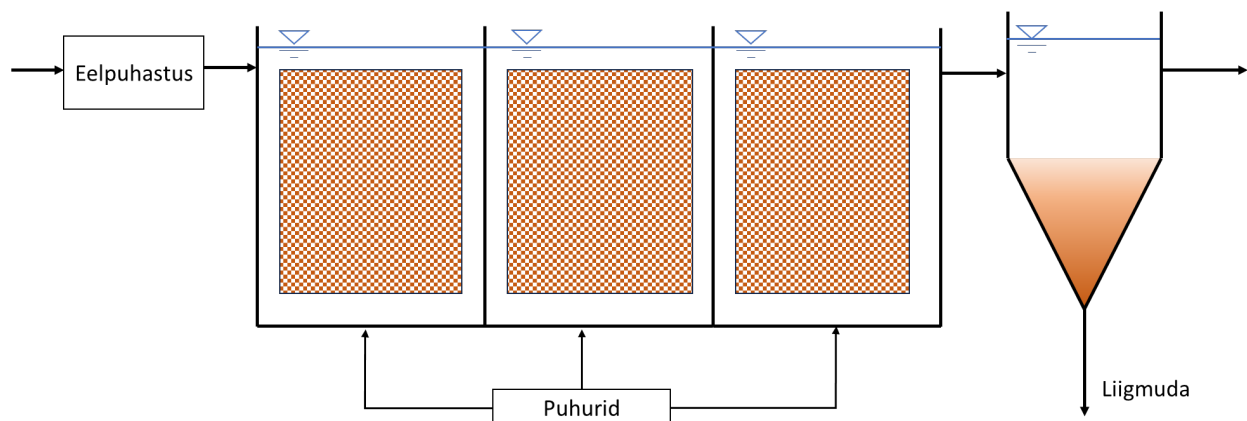
- on kolmeastmelise kaskaadi  $q_{KA,BHT} \leq 5,6 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$  ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 1,1 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{d}$ ;
- on neljaastmelise kaskaadi  $q_{KA,BHT} \leq 7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$  ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 1,4 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{d}$ ;
- on soovitatav väikeste (< 1000 ie) reoveepuhastitel vähendada:  $q_{KA,BHT} \leq 1,4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$  ja lämmastikukoormus  $q_{KA,TKN} \leq 0,85 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{d}$ .

Sukelbiofiltreid kasutatakse denitritifitseerimiseks harva, sest rootori peamine eesmärk on (energiatõhusalt) tagada puhastusprotsessi hapnikuvarustus. Samaaegse nitrifikatsiooni ja denitritifikatsiooni puhul on peale suurema sukeldussügavuse ja koormuse probleemid samad, mis nõrgbiofiltri puhul – suurem ummistumisoht (lisandub võlli purunemise oht) ning nitrifikatsiooni ja orgaanilise aine ärastustõhususe võimalik langus. Denitritifikatsiooni jaoks on soovitatav kavandada eraldi etapp. Arvestada tuleb, et denitritifikatsiooni tagamiseks on vaja süsinikuallikat (nt reovees leiduvat või lisatavat). Parema tulemuse võib anda rootori uputussügavuse suurendamine.

### 2.2.3 Sukeltugimaterjaliga biofilter

Sukeltugimaterjaliga biofilter (ingl *submerged fixed bed biofilm reactor*) on biokilepuhasti, mille tugimaterjal on üleni reovee sees (joonis 10.9). Reovesi siseneb tavaliselt mahuti põhjast (puhastit käitatakse ülesvoolu), ent võimalik on ka allavoolu käitamine. Sukeltugimaterjaliga biofiltrid on varustatud mahuti põhja lähedal paikneva õhustussüsteemiga.

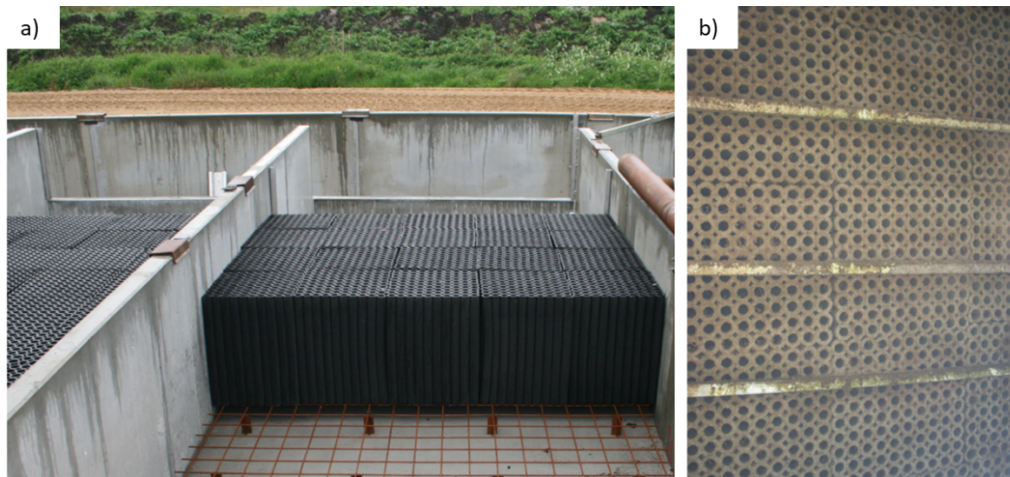
Sukeltugimaterjaliga biofiltri ehitus ja biokilekandjad on peaaegu samasugused kui nõrgbiofiltril, suurim erinevus on selles, et filtermaterjal on uputatud ning süsteemi on vaja sundõhustada. Sundõhustamine peab täitma kaht ülesannet – varustama süsteemi hapnikuga ning minimeerima süsteemi ummistumist irduva biokilega. Seetõttu peab õhustussüsteem olema piisavalt võimas, et süsteemi perioodiliselt (nt 15 min päevas) intensiivselt läbi puhuda ning sel moel tõhustada biokile irdumist. Kasutusel on peamiselt kesk- ja jämemullõhustus, et reaktoris tekitada vajalikku turbulentsi.



Joonis 2.9 Kinnitunud sukeltugimaterjaliga biokilepuhasti põhimõtteskeem.

Tehnoloogiliselt jagunevad sukelfiltrid peale üles- ja allavoolusüsteemide kaheks puhastiliigiks:

- õhustatud sukelfilter (ingl *submerged aerated filter*, SAF), milles on nõrgbiofiltriga sarnased biokilekandjad (joonis 10.9) ning mille väljavooluvett on vaja järelpuhastada (nt järelsetitis). Joonisel 10.10 on kujutatud kalakasvanduse õhustatud sukelfiltrit, mis aga tulenevalt vee väikesest ainesisaldusest järelpuhastust ei vaja. SAF-i edasiarendusena on kasutusele võetud SFBBR (ingl *submerged fixed bed biofilm reactor*), mida kasutatakse Eestis asulareovee puhastamiseks.
- sukелgraanulfilter (ingl *biological aerated filter* (ingl *granular medium*, BAF) või ka *submerged aerated biofilter*, (ingl *granular medium*, SAB), milles on peened suure eripinnaga graanulikandjad ning mis hoiavad kinni ka heljumuda (kaasneb filtrimisefekt), mistõttu nad on varustatud tagasipesuga. Nende väljavooluvesi järelpuhastit ei vaja, sest järelpuhastus toimub sukелgraanulfiltri enda sees.



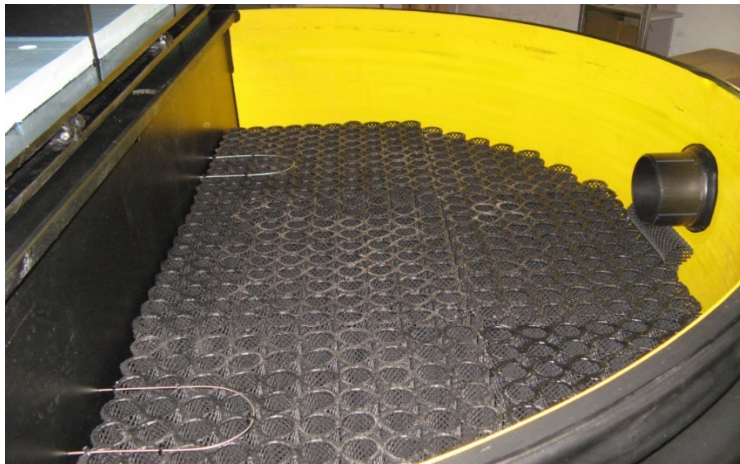
Joonis 2.10. Paiksed biokilekandjaplokid kalakasvanduse biofiltris (a) ja neile kasvanud nitritiseeriv biokile (b) (fotod: T. Leivat ja V. Lemmiksoo).

### Kinnistugimaterjaliga sundõhustatavad biokilereaktorid – SFBBR

SFBBR puhastites paikneb suure eripinnaga ( $100\text{--}300\text{ m}^2/\text{m}^3$ ) plastelementidest tugimaterjal õhustuskambris, mille põhjas olevate pihustite kaudu jõuab õhuhapnik puhastavasse vette ja sealt tugimaterjalil elutseva biomassini. Tugimaterjale on mitmesuguseid, enamasti on kasutusel plastist tugimaterjalid, mis valmistatakse ja paigutatakse õhustuskambritesse blokkidena. Ehitatakse nii aeroobseid kui anaeroobseid SFBBR biokilereaktoreid. SFBBR-i õhustussüsteem peab olema piisavalt tõhus, et tagada veeringlus tugimaterjali sees (tõhus kontakt reovee ja biokile vahel) ning aidata kaasa surnud biokile irdumisele kandeelementidelt. Samuti peab õhustus tagama piisava hapnikusalduse



biokile arenguks. Teatud juhtudel kasutatakse biokilekandjate perioodilist (nt 15 min päevas) intensiivset läbipuhumist tõhustamaks biokile irdumist. Kasutusel on nii peen-, kesk- ja jämepullõhustus.



Joonis 2.11. Kinnistugimaterjaliga FBFR biokilereaktor (foto: Fixtec OÜ)

Joonisel 10.11 kujutatud blokke valmistatakse polüetüleenist, teatud juhtudel ka polüpropüleenist. Normaalingimustes võib fikseeritud tugimaterjalile kasvada kuni 3 mm paksune biokile, mille paksuse peamiseks regulaatoriks on vee intensiivne liikumine õhustamise toime. Väikese eripinnaga (100–200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) tugimaterjale kasutatakse orgaanika ärastamiseks reoveest, suurema eripinnaga (kuni 300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) aga juba ammoniumlämmastiku kõrvaldamiseks nitrifikatsioonietapis. Vee läbivool SFBBR puhasti filtrikehast võib toimuda ülalt alla või vastupidi.

Tehakse nii ühe- kui ka mitmeastmelisi SFBBR-biokilereaktoreid. Neist esimesi kasutatakse peamiselt orgaanika ärastamiseks, mitmeastmeliste SFBBR-reaktoritega on võimalik luua edukaid nitrifitseerimis- ja denitrifitseerimislahendusi lämmastiku kõrvaldamiseks reoveest. Samuti kasutatakse lahendusi, kus SFBBR reaktor täidab ainult ühte ülesannet, näiteks kalakasvanduse vee ammoniumlämmastiku sisalduse vähendamiseks (joonis 10.10).

Orgaanilise aine kõrvaldamiseks:

- on soovitatav kasutada biokilekandjaid eripinnaga kuni 100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (suuremaga vaid siis, kui nende toimekindlus on katsetega tõendatud);
- on soovitatav orgaanilise aine koormus (KHT baasil)  $q_{KA,KHT} \leq 24 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ ; sh on soovituslik vähemalt kaheetapiline protsess;
- on väikestel reoveepuhastitel (< 1000 ie) soovitatav vähendada orgaanilise aine KHT-koormust:  $q_{KA,KHT} \leq 12 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ ;
- ei tohi hapnikusisaldus langeda alla 2 mgO<sub>2</sub>/l.

Nitrifikatsiooniks:

- on soovitatav kasutada biokilekandjaid eripinnaga kuni  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Kui puhasti nitrifikatsioonifaasile eelnev orgaanilise aine ärastuse aste on varustatud nõuetekohase järelsetitiga (heljum edasi ei pääse), võib biokilekandjate eripind olla kuni  $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ;
- kui eelmise puhastusastme orgaanilise aine KHT-koormus  $q_{\text{KA,KHT}} \leq 24 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , peaks nitrifikatsioon olema vähemalt kaheetapiline;
- on vaja, et nitrifikatsioonietapil oleks (TKN baasil)  $q_{\text{KA,TKN}} \leq 1,75 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ;
- on väikestel reoveepuhastitel (< 1000 ie) soovitatav vähendada eelneva puhastusetaapi orgaanilise aine KHT-koormust ( $q_{\text{KA,KHT}} \leq 12 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ) ning nitrifikatsioonietapis (TKN baasil)  $q_{\text{KA,TKN}} \leq 1,20 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ;
- ei tohi hapnikusisaldus langeda alla  $4 \text{ mgO}_2/\text{l}$ .

Denitrifikatsioon saab toimuda ainult neis biofiltri osades, kus valitseb hapnikuvaegus, mida tavaliselt vältida püütakse. Nitrifikatsiooni korral võib eeldada samaaegse denitrifikatsiooni toimumist, mille tõhusus on 30–50% (kõrvaldatud lämmastiku sisaldus on maksimaalselt 5% reaktorisse siseneva KHT sisaldusest) [8]. Kontrollitud denitrifikatsiooniks on soovitatav kavandada eraldi etapp. Arvestada tuleb, et denitrifikatsiooni tagamiseks on vaja (reovees leiduvat või lisatavat) süsinikuallikat.

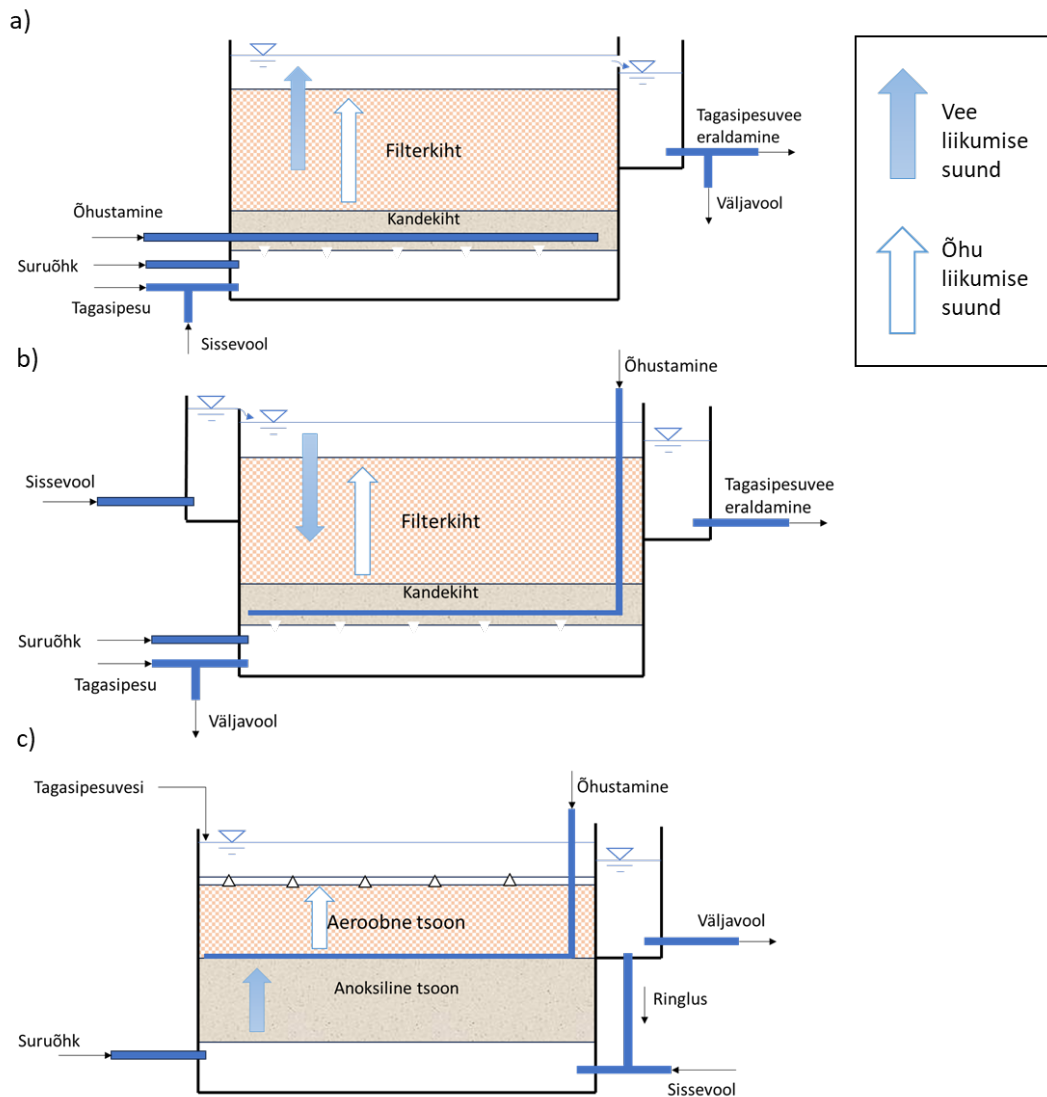
### **Sukelgraanulfilter (BAF või SAB)**

Sukelgraanulfiltrid on alates 1980-ndatest arendatud granulaarsüsteemis, kasutades üleni vees olevaid väikesemõõtmelisi (0,7–8 mm) biokilekandjaid, mille eripind ( $1000\text{--}3600 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) on muude fikseeritud kandjatega võrreldes märksa suurem. Kandjad paiknevad kindlas reaktoriosas, kus tavaliselt tagavad nende ühtlast jaotust perforatsiooniga betoonplaadid. Sel moel moodustub biokilekandjatest filtreeriv kiht ja ühildatud on nii bioloogiline aktiivsus kui ka filtratsioon (joonis 10.12). Tänu filtrimisele heljum süsteemist välja ei pääse, vaid hakkab sinna kogunema. Seetõttu on sukkelgraanulfiltrid varustatud tagasipesusüsteemiga, mis aktiveerub kriitilise surveka (vedelikusamba rõhk 2–2,5m) saavutamise korral või ajapõhise sagedusega (harilikult 24 või 48 tunni järel) [5, 10].

Sukelgraanulfiltrid tarnitakse kompaktilahendustena koos tervikliku automaatikaga. Joonisel 10.11 on kujutatud kolme tootja sukkelgraanulfiltrilahendusi [5]. Et neid kasutatakse nii orgaanilise aine ärastamiseks, nitrifikatsiooniks kui ka denitrifikatsiooniks, on eri lahendused erineva konfiguratsiooniga (biokilekandjate valik ja kihid, kemikaalide annustamine, õhustuse lahendus). Kuna tegemist on firmalahendustega, on puhasti koormusandmed ja kujundus pigem tootja teave ning lahendusi tarnitakse tavaliselt koos tervikliku puhastusprotsessi garantiiga. Tallinna



reoveepuhastusjaamas järelsetitite taga töötav Veolia Biostyr (joonis 10.11, c) on rakendatud tööle järeldenitrifikatsioonifiltrina.



Joonis 2.12 Sukelgraanulfiltrid: a – ülesvoolufilter Biofor, b – allavoolufilter Biocarbone, c – ülesvoolufilter Biostyr [5] järgi.

## 2.2.4 Heljuvtugimaterjaliga biofilter

Esimesed heljuvtugimaterjaliga biokilreaktorid (ingl *moving bed biofilm reactor, MBBR*) võeti kasutusele 1980ndate teises pooles. Seda tehnoloogiat arendati Euroopa (eeskätt Norra) ja Ameerika teadlaste koostöös ning esimesed suuremad MBBR-reoveepuhastid võeti Euroopas kasutusele 1990ndate alguses. Sõltuvalt puhastuseesmärgist kasutatakse heljuvtäidisega biokilreaktoreid nii reovee aerobseks kui ka anaerobseks puhastamiseks (joonis 10.13).

Reaktori sisu on ühtlaselt segunenud ning kandjate liikumine välistab sellised suured ummistused, nagu tuleb ette fikseeritud kandjate puhul, ning seetõttu mahub reaktorisse märksa suurema

eripinnaga kandjaid. Kandjate täituvus on vahemikus 25–70% (üle selle ei ole nende liikumine tagatud) ning optimaalne täituvus sõltub kandjate tüübist (tootjapõhine), aga ka puhastusprotsessist ja sellest tulenevalt reaktori konfiguratsioonist. Liigne osa biokilest irdub liikumise tulemusena ning nõnda säilib selle optimaalne paksus [1, 2, 16].

Biokilekandjate valikut ja iseärasusi käsitletakse jaotises 10.3.2. Ujuvkandjate toimekindlusele avaldab olulist mõju reovee karedus, nt  $\text{CaCO}_3$ -sisaldus:  $\text{CaCO}_3$  hakkab kandjatele kinnituma ning muudab nad ajapikku raskemaks, mistõttu need võivad hakata põhja vajuma. Seetõttu ei ole soovitatav kasutada heljuvkandjasüsteeme, kui reovee  $\text{CaCO}_3$ -sisaldus on üle 200 mg/l.



Joonis 2.13. Heljuvbiokilekandjaga reaktori sisevaade (Veolia ANITA™ Mox tehnoloogia) vasakul, paremal foto protsessi käivitamisest Ljubljana reoveepuhastil (foto: V. Lemmiksoo)

Õhustuskambri põhjas on õhustuselemendid, mille kaudu antakse mikroorganismidele hapnikku ning segatakse heljuväidist, hoides seda pidevas liikumises. Kasutatakse tavaliselt jäme- ja keskmull- (vahel harva ka peenmull-) õhusteid, õhku pumpab kompressor. Võrreldes aktiivmudapuhastusega peab vee hapnikusisaldus reaktoris olema märkimisväärselt suurem (tavapärase vahemik 3–7  $\text{mgO}_2/\text{l}$ ). Suurem õhumull on vajalik ühelt poolt heljuvkandja piisavaks segamiseks, teiselt poolt peab süsteem olema võimalikult hooldusvaba, sest mahuti tühjendamine (ka biokile kõrvaldamine) on väga aeganõudev tegevus, mille käigus võib biokile osaliselt kandjatel lahti kooruda. Biokilele tuleb luua soodsad hoiutingimused (sh hoida niiskena) [1]. Peenmullõhustuse puhul tuleb kindlasti kaaluda ülestõstetavaid süsteeme, mis põhja kinni ei jää.

MBBR-reaktoritest pääseb vesi välja läbi spetsiaalsete võretrude või võrekardina kaudu, et heljuväidist koos veega välja ei kanduks. Reaktori sisu segamiseks on ette nähtud (pigem aeglase

käiguga) segurid. Heljuvtäidisega biokilereaktorites tuleks teatud juhtudel ette näha vahutõrjesüsteemid, kuna vahutamist esineb rohkem.

Heljuvkandjapuhasti kavandamisel peab arvestama, et iga puhastusetapp (orgaanilise aine ärastus, nitrifikatsioon) kulgeks eraldi mahutis (joonis 10.14), vastasel korral hakkavad heterotroofid puhasti esimestes mahutites domineerima nitrifitseerijate (autotroofid) üle. Nitrifikatsioonifaasis võib probleemiks osutuda ka biokile sisemistes kihtides toimuv denitrifikatsioon. Kui nitrifikatsioonietapis on veel piisavalt orgaanilist ainet, kipuvad denitrifitseerijad (heterotroofid) domineerima nitrifitseerijate üle.

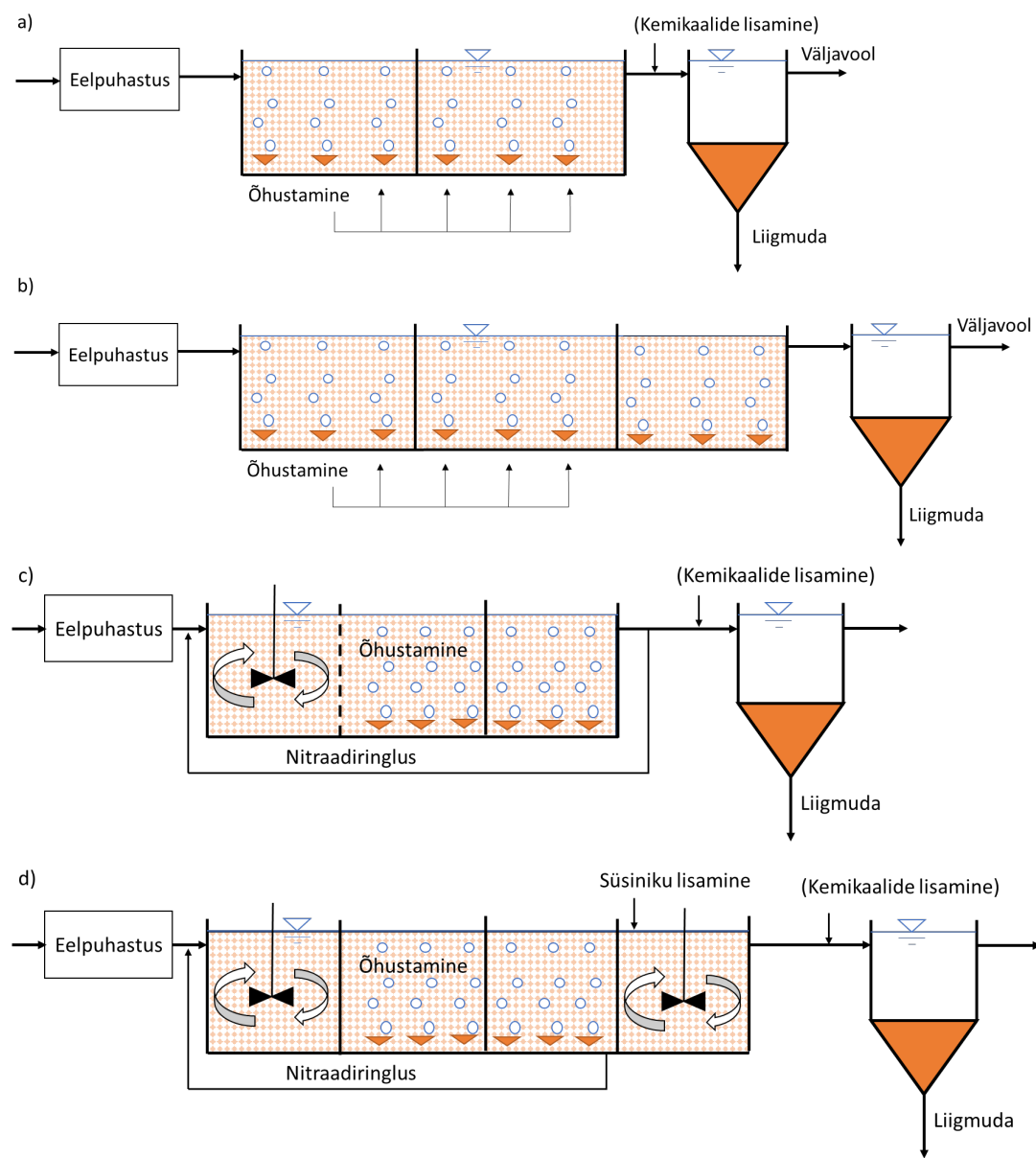
Kuna nitrifikatsioonietapis on õigete käitustingimuste puhul ainult nitrifitseeriv (autotroofne) biokile, siis on nitrifitseerimisastme vajalik maht väiksem kui aktiivmudapuhastis (aktiivmudas on nitrifitseerijaid tavaliselt ca 5% aktiivmuda koguhulgast). Mahuti geomeetria peab olema selline, et õhustusmaht oleks piisav (õhku on vaja rohkem, sest lahustunud hapniku sisaldus peab olema suur).

Lämmastiku ärastamiseks on biokiletehnoloogias võimalik rakendada kas eeldenitrifikatsiooni, järel-denitrifikatsiooni või nende kombinatsiooni (joonis 10.14). Tuleb aga arvestada, et nitrifikatsioon kasutatav suur hapnikusisaldus avaldab negatiivset mõju denitrifikatsioonile, kuna esmalt tarvitatakse ära nitraadiringlusega kaasa tulnud hapnik ning alles seejärel hakatakse nitraate redutseerima. Seetõttu on otstarbekas nitrifikatsioonistme järele kavandada selle jaoks eraldiseisev deaeratsioonitsoon, milles vee hapnikusisaldus väheneb. Nitraatide tagastuse puhul on heljuvkandja puhul soovituslik piir mitte oluliselt rohkem kui 300%, et mitte ületada biokilekandjate vooluhulgakoormust. Kuna tagastatakse ainult reovett, siis ei pruugi tõhusaks denitrifikatsiooniks piisata orgaanilist ainet. Tulenevalt difusiooni piiratusest on biokilesüsteem selgelt vähem tõhus denitrifikatsiooniks vajaliku aeglaselt laguneva KHT kulutamisel. Näiteks eeldenitrifikatsioon on kergesti laguneva KHT puuduse tõttu piiratud (alles on ainult raskemini lagunev osa), mistõttu on vaja enne nitrifikatsiooni täiendavat aeroobset KHT oksüdeerumisastet, et soodustada nitrifikatsiooni toimumist. Seega on juhtudel, kus tavapärase aktiivmudatehnoloogia suudab eeldenitrifikatsiooni nõudeid täita, on biokilepuhastisse vaja anda lisaüsinikku [2].

Tõhustatud bioloogiline fosforiärastus ei ole puhta heljuvkandjatehnoloogia puhul võimalik – seda saab rakendada ainult hübriidlahenduste puhul (vt jaotist 10.2.5).

Põhimõtteliselt on MBBR-i puhul võimalik kasutada kõiki konfiguratsioone, mida aktiivmudalahendustegi puhul (vt jaotist 7), kuid protsessi eelis on see, et biokile on seotud kandjatega ning see muudab mahutid väiksemaks ning käitamise lihtsamaks [10]. Võrreldes teiste

biokilelahendustega on MBBR-i kasutamisel võimalik saavutada paremaid tulemusi lämmastiku kõrvaldamisel, samuti on vähem probleeme biokile kontrollimatu irdumisega [10].



Joonis 2.14. Mõningaid heljuv kandjaga biokilepuhastite lahendusi; a) orgaanilise aine kõrvaldamine, b) orgaanilise aine kõrvaldamine koos nitrifikatsiooniga, c) MLE-lahendus, d) Bardenpho-lahendus [10] järgi.

### MBBR-i üldised arvutuspõhimõtted

Heljuv kandjapuhasti dimensioneerimiskormuste suhtes saab tugineda käsiraamatutele ja näiteks ka Norra projekteerimisjuhenditele [1], milles leiduvad järgmised koormusnäitajad.

#### Orgaanilise aine ärastus:

- $q_{KA,BHT}$  kuni  $8 \text{ gBHT}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$  ja  $10^\circ\text{C}$  puhul, kui kasutusel on kaks jadamisi reaktorit, kusjuures järelkoaguleerimine ega flokuleerimine ei ole kohustuslik;

- $q_{KA,BHT}$  kuni 11,5 gBHT<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d ja 10°C puhul, kui kasutusel on kaks jadamisi reaktorit koos järelkoaguleerimise ja flokuleerimisega.

**Nitrifikatsioon** (soovitav vähemalt kolm jadamisi mahutit):

- esimene etapp on orgaanilise aine ärastus, mis nüüd on vajalik tavalisest märksa väiksemal koormusel, et mitte põhjustada heterotroofsuse kasvu nitrifitseerivas biokiles –  $q_{KA,BHT}$  kuni 4 gBHT<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d (15°C puhul eesmärgiga lahustunud BHT viia alla 5 mgO<sub>2</sub>/l);
- teine etapp on nitrifikatsioon –  $q_{KA,N}$  kuni 0,8 gNH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>·d (15°C puhul, kui lahustunud hapniku sisaldus on 7 mg O<sub>2</sub>/l). Kui on vaja tagada heitvee väga väikest lahustunud ammooniumi sisaldust (nt NH<sub>4</sub>-N alla 3mg/l, mis on tavaliselt ammooniumlämmastiku ülempiiri üldlämmastiku normi 10mg/l garanteerimiseks), tuleb arvestada ka difusiooni mõju nitrifitseerimiskiirusele tulenevalt just väikesest ammooniumisisaldusest (vt jaotist 10.3.5). Siis on vaja ka kolmandat, veelgi väiksema koormusega etappi:
- $q_{KA,N}$  kuni 0,3 gNH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>·d 15°C puhul, kui lahustunud hapniku sisaldus on 7 mg O<sub>2</sub>/l.

### Denitrifikatsioon

Nagu eespool öeldud, sõltub denitrifikatsiooni kiirus sellest, kui kergesti lagunev (kättesaadav) on biokiles oleva biomassi jaoks orgaaniline aine. Tabelis 10.1 on kirjas denitrifikatsiooni kiirused (gNO<sub>3</sub>-N·m<sup>2</sup>/d) sõltuvalt protsessi lisatava süsiniku allikast. Kaldkriipsu järel on näidatud kemikaalikul  $\text{mg KHT-d mg ärastatud NO}_3\text{-N kohta [4]}$ .

Tabel 2.1. Denitrifikatsiooni kiirus sõltuvalt kasutatavast süsinikuallikast [4].

Temperatuur	Denitrifikatsiooni kiirus/kemikaali kulu		
	Metanool	Etanool/Äädikhape	Glükool
≤ 5 °C	0,8–1,2/ 5,0	1,5–2,3/ 5,5	0,9–1,1/ 5,0
10 °C	1,8–1,8/ 4,5	2,7–3,5/ 5,0	1,3–1,7/ 4,5
≥ 15 °C	1,5–2,3/ 4,0	3,2–4,0/ 4,5	1,6– 2,2/ 4,0

Biokilereaktorid ja -kandjad tuleb dimensioneerida lähtuvalt sisendkoormusest (millest arvatakse maha eelpuhastuse, s.o eelsetiti vm toime) iga protsessietapi (orgaanilise aine ärastus, nitrifikatsioon, denitrifikatsioon) kohta eraldi.

Biokilereaktori maht biokilekandja eripinna alusel:

$$V_{MBRR} = R_x \cdot (q_{KA} \cdot A_{bk} \cdot f) \cdot 100 \text{ (m}^3\text{)}, \quad (10.3)$$

kus  $R_x$  on reoainekoormus (g/d);  $q_{KA}$  – massi pinnakoormus (g/m<sup>2</sup>-d);  $A_{bk}$  – biokilekandjate eripind (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ning  $f$  – kandjate täituvus kogumahu suhtes (%).

### 2.2.5 Hübriidsüsteemid

Hübriidsüsteem on aktiivmuda- ja biokiletehnoloogia kombinatsioon. Biopuhasti taristu peab võimaldama mõlema tehnoloogia toimimist:

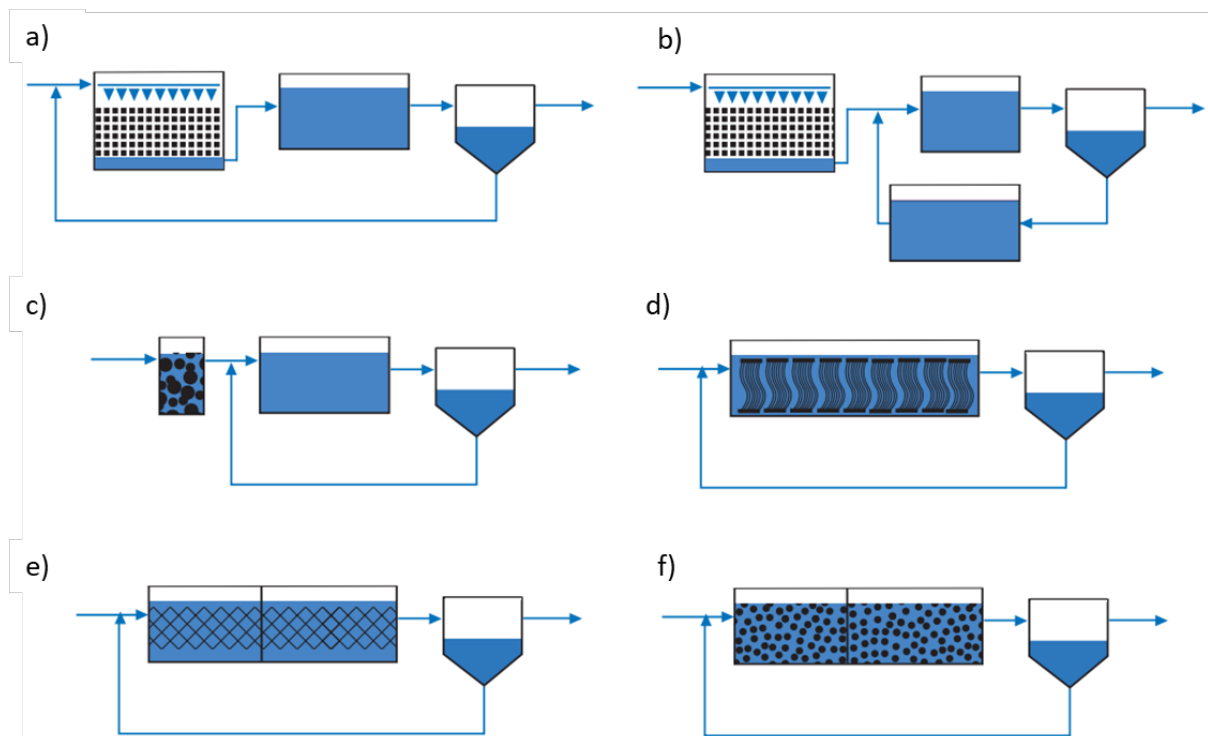
- aktiivmudatehnoloogia jaoks on vaja nõuetekohast järelsetitit ja mudatagastust;
- biokiletehnoloogia jaoks on vaja biokilekandjaid (biokileplokkide, heljuvkanalite koos neid süsteemis hoidvate sõeltega, mida aktiivmuda ei ummista, õhustust (biokile kontrollimiseks ja vee hapnikusisalduse suurendamiseks). Arvestama peab ka hüdraulilist survekadu biokile-süsteemis ning reovee eelpuhastamist (nt peenvõrel, eelsetitis).

Hübriidsüsteemide eri reaktorites on mikroorganismide koostis ühesugune. Biokilesüsteemi kogunevad peamiselt aeglasemalt kasvavad mikroorganismid (nt autotroofid), sest toitainete (ka hapniku) kättesaadavuse poolest on eelis aktiivmudareaktoril. Kui aktiivmuda vanus on väike, siis see nitrifitseerijaid ei sisalda ning need kasvavad biokillesse. Kui aga puhasti koormus langeb ja aktiivmuda vanus suureneb, kanduvad nitrifitseerijad ka aktiivmudasse (mis saab siis eelise biokile ees). Seetõttu on olnud võimalik olemasolevaid aktiivmudapuhastiteid (mis algelt kavandati ainult orgaanilise aine kõrvaldamiseks), reaktorimahtusid suurendamata ümber ehitada nitrifitseerivateks puhastiteks, kuid seejuures tuli seadmestik välja vahetada (sh suurenda õhustusvõimsust) [5, 10].

Hübriidsüsteeme on märksa rohkem, kui on kujutatud joonisel 10.15 [5]. Hübriidsüsteemideks loetakse ka lahendusi, milles aktiivmuda biokileprotsessidega kokku ei puutu, ning eri protsessid kulgevad kaskaadis (joonis 10.15, b), milles nõrgbiofiltril ja aktiivmudapuhastil on ühine järelsetiti ning tagastusmuda juhitakse aktiivmudapuhastisse.

Leidub ka lahendusi, milles aktiivmuda ja biokilekandja on ühes ja samas reaktoris. Kõige levinum hübriidsüsteem on IFAS-protsess (ingl *integrated fixed-film activated sludge*), mis sai alguse biokileplokkide paigutamisest aktiivmudapuhastisse (joonis 10.15, e), et laiendada orgaanilise aine ärastuseks ette nähtud puhastid nitrifitseerivateks. Hiljem rakendati seda tehnoloogiat ka heljuvkanalite (joonis 10.15, f) puhul.





Joonis 10.2.15. Hübriidsüsteemid: a – sundõhustuse ja aktiivmuda tagastusega nõrgbiofilter; b – nõrgbiofilter ja sellele järgnev aktiivmudasüsteem; c – heljuv kandja ja sellele järgnev aktiivmudasüsteem; d – nõrkandja koos aktiivmudaga ühises reaktoris; e – fikseeritud kandja koos aktiivmudaga ühises reaktoris; f – heljuv kandja koos aktiivmudaga ühises reaktoris [5]

Hübriidsüsteemide arvutamisel tuleb arvestada mõlemat protsessietappi – nii biokilekandjate hulka, tüüpi ja eripinda kui ka aktiivmudasisaldust. Kui biokileprotsess on kandjate mahu ja/või eripinna järgi normeeritud, siis aktiivmudaosa kavandamisel tuleb biokilekandjate mahuosa maha arvata. Konkreetseid standardeid süsteemide dimensionerimiseks veel ei ole ning nad on sageli tootespetsiifilised, tuginedes nii aktiivmuda- kui ka biokilestandarditele.

Tavapäraselt kavandatakse hübriidsüsteemid nõnda, et orgaanilise aine ärastus ja denitrifikatsioon (ehk heterotroofsed protsessid) toimuvad aktiivmudas ning nitrifikatsioon biokilekandjatel. Aktiivmuda vanuseks dimensioneeritakse ca 2–5 päeva, mis on ideaalne ka tõhustatud bioloogilise fosforiärastuse tehnoloogia rakendamiseks. Kandjad on kinnitatud nitrifitseerivatesse tsoonidesse ning aktiivmuda liigub läbi terve süsteemi. Kuigi aktiivmuda suhtes difusioon ei mõju, siis vee hapnikusisaldus peab olema selline, et biokilekandjate tsoonis oleks tagatud vajaliku suurusega lahustunud hapniku sisaldus (ca 6 mg/lO<sub>2</sub>) [4, 5, 10].

### 2.3 Biokilepuhasti projekteerimine – eeltingimused ja peamised komponendid

Biokilepuhasti projekteerimisel tuleb arvestada, et üksnes biokilepuhastust käsitlevad standardid ja käsiraamatud puuduvad. Seetõttu tuleb reovee eel- ja järeltöötamise kavandamisel tugineda tavapärastele standarditele ja käsiraamatutele. Oluline on ka teada, et biokilesüsteemides piirab

toitainete kättesaadavust ja nende jõudmist mikroorganismideni massiülekanne. Biokileprotsesside modelleerimisel tuginetakse tavaliselt aktiivmudal (mikrobioloogia on sarnane), võttes arvesse difusiooni mõju. Teisalt on biokilereaktoris oleva baktermassi kogus märksa suurem kui tavapärasel aktiivmudasüsteemis, mistõttu reaktorid võivad väiksemad olla.

### 2.3.1 Reovee omadused ja selle eelkäitluse tähtsus

Looduses on biokilele täheldatav selge veega kiirevoolulistes jõgedes, kus see kasvab nii kividel kui ka vette kukkunud puuokstel. Biokile toitub seal vees lahustunud ainetest ning ei konkureeri heljumisoleva bakterimassiga. Puuduvad setted, mille osakesed kiire vool välja peseb. Seetõttu on biokilele selge eelis just väikese toitainesisalduse (K-strateegid, vt ka jaotist 6.3.5) ning suurema voolukiiruse korral. Suuremate voolukiiruste baasil ongi välja kasvanud granulaarmudasüsteemid.

Väikeste ainesisalduste tõttu (sh stabiilsemad tingimused) on biokiletehnoloogia leidnud laia kasutuspinda:

- reoveepuhastite järelpuhastusetappides (Eestis nt Tallinna RVP järel-denitrifikatsioonifiltrid, mis puhastab järelsetiteid läbinud heitvett);
- retsirkulatsioonipõhistes (RAS) kalakasvandustes, milles puhastatakse (nitrititseeeritakse ammooniumlämmastikku) basseinide vett, et tagada kalade kasvuks vajalik vee kvaliteet.

Reovee eelkäitlusel on puhastusprotsessis väga oluline roll. Tootepõhistes lahendustes seab eeltöötamise nõuded tavaliselt tehnoloogia kavandaja, määrates näiteks mehaanilise puhastusastme võrede tüübi ja võreavade vahekauguse. Reoveest peab kõrvaldama rasva ja õli, milleks on vaja rasvapüünist või mõnda muud (nt füüsikalise-keemilist) puhastusmoodust. Eelpuhastuse nõuded tulenevad biokiletehnoloogiast (sh kandjate valik) ja reovee omadusest. Nii on suurema koormusega (suure erikandjaga MBBR-id, UASB-tüüpi) reaktorsüsteemide puhul tavaliselt nõutud ka suurema tõhususega peenvõresid (võreavade suurus 6 mm, enamasti väiksemgi). Väikese koormusega nõrgbiofiltrite puhul (milles on kasutusel suhteliselt väikese eripinnaga biokilekandjad) võib lõunamaades siiski leida lahendusi, kus mehaanilise puhastina on kasutusel ainult käsivõre. See aga ei tähenda, et kõik käsivõrest läbi pääsenud jäätmed jõuavad bioloogilisse puhastusse. Tavaliselt on biokilepuhastite konfiguratsioonis heljumi kõrvaldamiseks füüsikalise-keemiline puhastusetapp, mis osaliselt korvab võrede tegemata töö, ning jäätmed satuvad toorsettevoogu. Rakendatakse suurema mahuga eelselitust: kemikaalide lisamist, flotatsiooni, anaeroobset eeltöötlust (sh soojas kliimas olmereovee UASB-d) jms. Kui reovees on vähe heljumit (alla 200 mg/l), võib eelselitusetapi ka ära jätta.



Nõrgbiofiltrite ja biorootorite standardlahenduste puhul võib piisata 3 mm suuruste või peenemate avadega peenvõrest [10].

Kõigi biokilepuhastite puhul on oluline, et reoveevoog oleks ühtlane [8, 9] ka suurema koormusega heljuvkandjapuhastite korral, sest lühikene hüdrauliline viibeaeg hakkab mõjutama puhastusprotsessi tõhusust (eriti siis, kui puhasti koormus päeva kestel kõigub ning esineb koormustippe).

### 2.3.2 Biokilekandjate valik, tüübid ja näitajad

Biokilekandjate all mõistetakse füüsilisi pindu – nii sobiliku eripinna, kaalu ja kujuga looduslike materjale nagu killustik ja liiv, aga ka graanuleid, torusid jt spetsiaalselt valmistatud (plastist) kehasid, mille külge mikroorganismid saavad biokile tekitamiseks kinnituda.

Biokilekandja traditsioonilised materjalid oli killustik, mille eripind on ca 50–100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, ning liiv ja basaldipuru eripinnaga ca 4000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Killustikku kasutatakse pigem nõrgfiltris, milles toimub ka reovee õhustamine (peab olema tagatud hapniku juurdepääs), liivfiltrite peamine ülesanne on aga heljuvate osakeste kinnipidamine. Viimastel aastakümnetel on eelistama hakatud plaste, mis on kerged ning millest on valmistada mitmesuguse kuju, tiheduse ja soovivate omadustega biokilekandjaid.

Biokilekandjate olulisemaid tehnilisi näitajaid (mille alusel määratletakse tavaliselt ka reaktorite koormusnäitajaid) on eripind (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), s.o ala, millele saab moodustuda biokile. Plastmaterjalide kasutuselevõttuga kaasnes teatav eripinna suurendamine (sh kandja paksuse vähendamine) võidujooks just liikuvkandjate vallas, et protsessi tõhusust tõsta. Algselt eripinnaga 300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> heljuvkandjate eripinnad on suurenenud üle 5000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ning olnud kasutusel ka juba üle 10 aasta, samas kõige uuemad (sh 2023.a välja antud) käsiraamatud (tabel 10.2) on üldiste projekteerimisjuhiste puhul märksa konservatiivsemad ja soovivad arvestada kandjate töötava eripinnaga kuni 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Täpsemate reoveevoogude analüüsi ja ka konkreetsete pilootkatsete tegemise puhul saab koormusnäitajad igal erijuhul objektiivselt üle täpsustada. Levinud on ka koormusnäitajad kandjate mahuühiku (m<sup>3</sup>) kohta.

Tabelis 10.2 on kokkuvõtte biokilekandja materjalidest, mis on vajalik arvutuste tegemiseks.

Tabel 2.2. Biokile kandjamaterjalide spetsifikatsioon olenevalt biokilereaktorist ja kandjamaterjalist [5, 12].

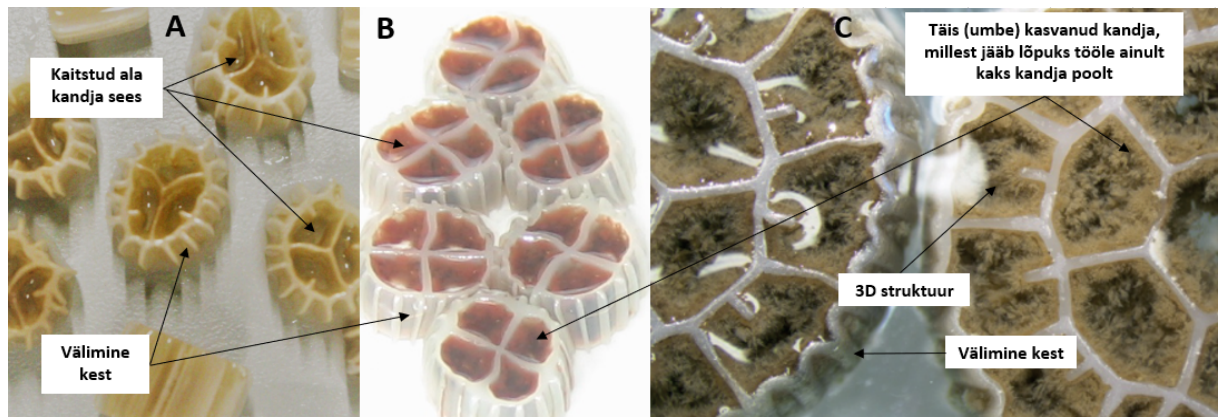
Reaktori tüüp	Kandja materjal	Materjali tükisuurus mm	Materjali eripind (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
Nõrgbiofilter	Kivi	40–80	50–100

	Plast	40-200	100-200
Biorootor (RBC)	Plast		100-200
MBBR*	Plast (K1) 60% täituvus	7-9	300
	Plast (K5) 60% täituvus	3,5-25	480 500
Sukeltugimaterjaliga biofilter	Poorne savi	1,3-8	1000-1400
	Poorne kiltkivi	2-8	1200-1400
	Polüstüreen	3-6	1100
	Antratsiit	2,3-3,5	1900
	Kvartslüiv		3000
	Basalt		3600
Granuleeritud mudaga reaktor (AGS)**	Kandja puudub	-	200-2000
Keevkihiga biokilreaktor	Liiv või basalt	0,2-0,8	3000-4000

\* Viimastel aastatel on tehtud uuringud ja ka tootjad reklaamivad uuemaid suurema eripinnaga liikuvkandjaid. Samas pole veel piisavat tagasisidet (eelretsenseeritud publikatsioon jm), et neid väärtuseid suurendada. \*\* vt jaotist 7.10.

Liikuvkandjate puhul (mille mikrobioloogilist aktiivsust on kõige lihtsam laboratooriumis määrata) märgati kiiresti, et kandjate suuremate mehaaniliste mõjude käes olevale välispinnale bakterid pigem ei kinnitu. Seetõttu tekkis teaduskirjandusse mõiste "kaitstud ala" (ingl *protected surface area, PSA*), mis on kandjate tegelikust eripinnast väiksem. Biokile moodustub 3D-kihina, mida iseloomustab paksusest ja struktuurist olenev aktiivne pindala (ingl *area of biofilm exposed to bulk liquid in the process, ESA*). Tegemist on biokile pindala eeldusliku projektsiooniga (mis on kandja kogupinnast tavaliselt suurem). Veelgi olulisemad on aga reovee koostis (sh päritolu), süsteemi koormustingimused jt aspektid, mis mõjutavad otseselt biokile kandjate mikrobioloogilist kooslust ja selle muutumist aja jooksul (muutuvad koormus või ka keskkonningimused) [11]. Joonisel 10.16 on kolme heljuv kandja lähivaate fotod, millel on näidatud nii kandjate "kaitstud ala" kui ka visuaalselt hinnatu.

Mida suurem on ummistumisoht (nii võõraste kui ka biokile kasvu seisukohalt), seda väiksema eripinnaga biokilekandjaid saab kasutada. Seetõttu on orgaanilise aine ärastamise korral kasutusel väiksema eripinnaga kandjad kui nitrifitseeriva biofiltri puhul (heterotroofsete mikroorganismide kasvuerikiirus on autotroofsete omast suurem). Väga oluline ka puhastusprotsessi etapp (kas tegemist on põhi- või järelpuhastusega) d kandja paksust.



Joonis 2.16. Biokilekandjate visuaalne analüüs: A – õhuke nitrifitseeriv biokile kalakasvanduses; B – deammonifikatsiooniprotsessi umbe kasvanud biokile; C- paks nitrifitseeriv biokile. Fotod Vallo Lemmiksoo ja [11].

Ujuvkandjate arengust annab kõige parema ülevaate kandjad *Veolia AnoxKaldnes*, mille kuju ja mõõtmed on kujutatud joonisel 10.17. Kuigi muutusi võib täheldada kõigis näitajates, siis peamised neist on toimunud just kandja kõrguses, mis on viimastes mudelites järjest vähenenud. Peamine eesmärk on vähendada biokile paksust ja sel moel difusiooni (massiülekanne) mõju, et suurendada energiatõhusust. Paks biokile ja sellest tulenev vastupidavus inhibitsioonidele on pigem jäänud tagaplaanile, sest viimastel aastatel on reoveepuhastite energiatõhusus olnud väga aktuaalne teema. Siin on aga biokilel (tulenevalt just massiülekandest) täheldatud olulisi puudusi.

	K1	K3	K5	BiofilmChip P	BiofilmChip M	Z-series
Eripind:	500m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	500m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	800m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	900m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1200m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1280m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Läbimõõt:	9,1mm	25 mm	25 mm	45mm	45mm	30mm
Kõrgus:	7,2mm	10 mm	3,5 mm	3mm	2,2mm	0,2-0,5mm

Joonis 2.17. Biokilekandjate *Veolia AnoxKaldnes* kandjate areng (vasakult paremale)

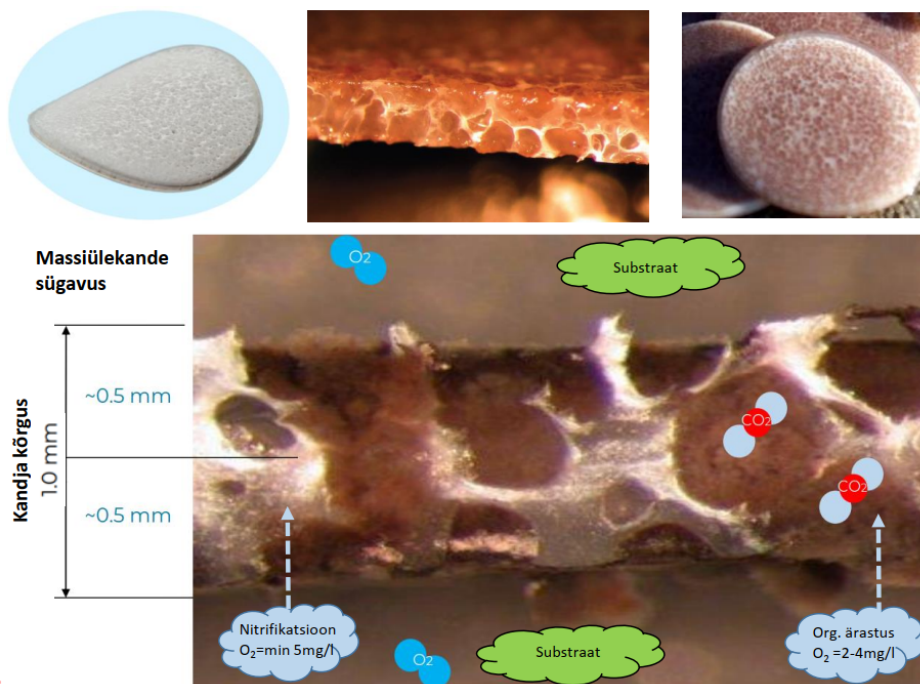
Esimesed suure eripinna ja väikeste mõõtmetega (nt *Veolia K1*) ujuvkandjad olid seest jaotatud sektoriteks (K1 puhul neljaks). Nagu joonisel 10.17 näha, on kandjate välimine kest puhas, st et biokile sinna pigem ei kinnitu, sest mehaaniline stress on seal liiga suur. Biokile kasvab sisemisele pinnale, mis on mehaaniliste mõjude eest paremini kaitstud. Sellest tulenevalt on kandjad muutunud järjest õhemaks. Viimastel aastatel on kandjad arendatud nii õhukeseks, et muudetud on ka nende kuju. Kõige uuemate sadulakujuliste (ingl *saddle-shaped*) kandjate eesmärk on vees heljuda (kuju on lai ja õhuke) ning neid mõjutab vähem füüsiline kokkupuude mahutite seinte või muude pindadega. *Veolia* Z-seeria sadulakujulised kandjad (joonis 10.18) koosnevad tugiraamist (mille kõrgus varieerub) ja võrgust, mille külge biokile kinnitub. Sõltuvalt tugiraami kõrgusest (200–500 µm) on kandjaid neljasuguseid ning nende raami paksus määrab biokile keskmise paksuse. Need kandjad on kujundatud nõnda, et töötavad mõlemad pooled. Reaktoris mõjuva mehaanilise stressi tõttu ei kasva

biokile paksus väga suureks, mistõttu neid kutsutakse ka isereguleeriva kilepaksusega kandjateks. Veolia Z seeria kandja infomaterjalides on toodud sõltuvalt tugiraami paksusest erinevad kandja eripinnad (kuigi kandja mõõdud on samad). Eripinna erinevused on arvutuslikud ja eeldavad biokile paksuse muutust ning sellest tingitud eripinna erinevust. Mida paksem biokile, seda piltlikult “mägisem” on selle struktuur ja seetõttu ka suurem eripind.



Joonis 2.18. Veolia AnoxKaldnes Z-seeria sadulakujulise kandja ehitus. (Allikas: Veolia).

Ka teised tootjad on arendanud õhukesi sadulakujulisi biokilekandjaid: Saksamaalt pärit *Muntag BioChip™* (joonis 10.19, tootja *Multi Umwelttechnologie AG*); *Hel-X Biocarriers* (tootja *Christian Stöhr GmbH & Co*). Mõlema kandja eripinda reklaamitakse nende poorse struktuuri tõttu väga suureks – kuni  $5500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Kuna kandja paksus on 1–1,1 mm, on biokile eeldatav paksus kuni 0,5 mm.



Joonis 2.19. Muntag BioChip™ biokilekandjate kuju ja läbilõige.

Peale tavapärase näitajate (nt eripind, vastupidavus, maksumus) pööratakse viimasel ajal uute kandjate arendamisel aina suuremat tähelepanu ka nende kujule (nt kuidas mõjutab biokile arengut

kandja pooride suurus ja kuju, või kuidas vähendada difusiooni piiravat mõju). Loomulikult ei sõltu mikroorganismide hulk biokileprotsessis üksnes nende kinnituspinnast. Oluline on ka reovee hapnikusisaldus, toitainete kättesaadavus, keskkonnatingimused (pH, temperatuur, valgus) ja ka see, kas reovees leidub toksilisi ühendeid, mis võivad pärssida mikroorganismide elutegevust. Eripind on küll biokilekandja näitaja, ent ei ütle midagi selle toimimise kohta. Kõige olulisem on hoida süsteemis piisavalt suurt hulka aktiivselt toimivat biomassi. See on suurus, mida on võimalik määrata biokile aktiivsustestidega, mõõtes laboratoorsetes tingimustes kindla koguse biokilekandjate toimimise tõhusust.

Sõltuvalt biokilekandja tüübist on oluline arvestada vähemalt järgmisi asjaolusid:

- liikuvkandjate puhul mahutite kuju, nurki ning seinte (nt betooni) kaetust plasti või muu abrasiivsust vähendava kaitsevõõbaga selleks, et pikendada kandjate eluiga, mis antakse tavaliselt tootjapoolse garantiiga;
- biokilekandjate hoiustamise ja reaktorisse paigaldamise tingimusi. Veest kergemad kandjad jäävad algul vee pinnale ujuma, mistõttu tootja annab juhised, kui palju võib neid korruga reaktorisse panna ja millised peavad olema sisestamistingimused (sh reovee temperatuur);
- on vaja teada, milline on biokilekandjate kõrvaldamiseks vajalik seadmestik ja nende hoiustamistingimused reaktorite hoolduse ajal. Reaktorisisese hoolduse intervall peab olema võimalikult pikk.

### 2.3.3 Biokile aktiivsus

Paljudes biokilealastes uuringutes nenditakse, et kandja pindala ei ole objektiivne ühik, mille järgi biokile tõhusust normeerida ja projekteerimisel aluseks võtta. Ometi ei ole ka paremat (täpsemat ning üheselt mõõdetavat) näitajat, sest levinud mahuühik ( $m^3$ ) ei arvesta kandjate eripärasid.

Kõige tähtsam on konkreetse biokile bioloogiline aktiivsus, mida on võimalik laboratooriumis (kus on tagatud ühesugused tingimused, et tulemused oleksid võrreldavad) mõõta. Kui võtta toimivast süsteemist (või pilootseadmest) kindel kogus ujukandjaid, on võimalik määrata nende aktiivust ja avaldada saadud tulemused kandja mõõtühiku (nt  $m^3$ , aga ka  $m^2$  jne) kohta. Seda on võimalik väga hõlpsasti teha ujukandjate puhul (nad on täissegunenud suspensioonis ning võetav proov on seega esinduslik), ent ei ole lihtsasti rakendatav fikseeritud kandja korral. See on ka üks põhjus, miks liikuvkandjasüsteemid on biokile tehnoloogias järjest rohkem levinud.



Tavalisel uutitakse biokile aktiivsust annuskatsena, mõõtes keemiliste näitajate (nt KHT, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>) või biomassi muutust ajas (neid analüüsitakse kas pidevalt või võetakse proovid katse alguses, keskel ja lõpus) ning arvutades saadud tulemuste põhjal kas ainete kõrvaldamise tõhususe või biomassi juurdekasvu kiiruse. Saadud väärtused avaldatakse tavaliselt kas kandja eripinna või kandjate mahu suhtes.

## 2.4 Biokile koormusnäitajad

iokilereaktori sisu segamine ja hüdrauliline koormamine mõjutavad ainesisalduste gradiente, aine ülekande kiirust ja kineetikat (sh piiranguid) ning biokile paksust (biokile kontroll) kogu reaktori ulatuses. Hüdrauliline pinnakoormus, mida mõnikord nimetatakse flitreerumiskiiruseks:

$$q_A = \frac{Q_{SV} + Q_R}{A_r} \quad (\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{h} \text{ või } \text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}),$$

(10.4)

kus  $A_r$  on biokilereaktori ristlõikepind (voolu suunas) ( $\text{m}^2$ ), mis on ümara nõrgfiltri puhul arvutatav reaktori raadiuse kaudu:  $A_r = \pi r^2$ ;  $Q_{SV}$  – reovee sissevooluhulk ( $\text{m}^3/\text{h}$  või  $\text{m}^3/\text{d}$ ) ning  $Q_R$  – ringlusvooluhulk ( $\text{m}^3/\text{h}$  või  $\text{m}^3/\text{d}$ ).

Filtreerumiskiirused reaktori hüdraulilisel koormamisel on kirjas tabelis 10.3.

Tabel 2.3. Filtreerumiskiirused  $q_A$  eri biokilesüsteemides [5].

Reaktori tüüp	Kandja materjal	Filtreerumiskiirus ( $q_A$ ) (m/h)
Nõrgbiofilter	Kivikillustik	0,4–1,0
	Plast	0,6–1,8
Graanulmudareaktor (AGS)	-	1–5
Keevkihiga biokilereaktor	Liiv või basaldipuru	20–40
Sukeltugimaterjaliga biofilter	Poorne savi	2–6 (max 10) süsinikuärastus 10 nitrifikatsioon 14 denitrifikatsioon
	Poorne kiltkivi	2–5 (max 10)
	Polüstüreen	2–6 (max 10)
	Kvartsliv	5–15
	Antratsiit	5–15

Olgu rõhutatud, et tabelis 10.3 toodud kiirused sõltuvad suuresti reovee eeltötlusest, käitluse eesmärgist (puhastusetapist) jt teguritest (nt tagasipesu sagedusest, õhu ja vee suhtest). Nõrgbiofiltrite puhul tuleb selleks pidada minimaalset kiirust, mille puhul on tagatud reovee ühtlane jagunemine reaktoris ning massiülekanne mõju vähenemine. Keevkihtsüsteemides on vaja, et

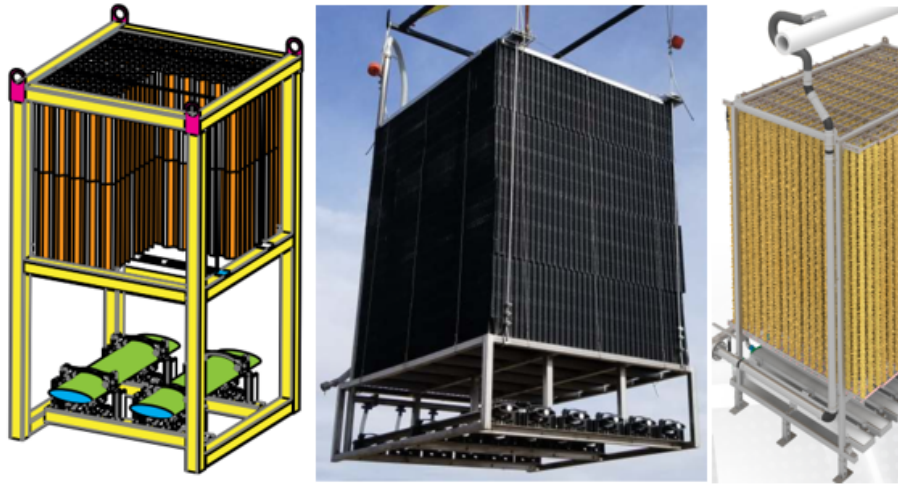
minimaalse filtreerumiskiiruse puhul filtermaterjal heljuks, difusiooni mõju oleks minimaalne ning biomass reaktorist välja ei kanduks. Sukelbiofiltrite puhul (vertikaalne filtreerumine) tuleb teha vahet, kas tegemist on üles- (tõusufilter) või allavoolu toimiva filtriga. Tõusufiltrite kandjad on veest suurema tihedusega (raskemad) ning nende heljumine (ingl *bed expansion*) tagatakse vee maksimaalse voolukiirusega. Allavoolufiltritel kasutatakse veest väiksema tihedusega (kergemaid) kandjaid ning tavaliselt on ka süsteemi rõhukadu suurem kui tõusufiltritel. MBBR-süsteemi puhul saab rääkida horisontaalsest filtreerumiskiirusest, mis mõjub reaktori väljavoolul paiknevatele võresüsteemidele (eesmärk on välistada kandjate väljakannet). Liiga suured koormused põhjustavad kandjate surumist vastu võreseina (pärsib nende heljumist), mis omakorda vähendab süsteemi tõhusust.

#### 2.4.1 Õhustamine ja segamine, difusiooni mõju

Biokilesüsteemides on sõltuvalt puhastustehnoloogiast ja reaktori tüübist levinud nii loomulik (ehk iseeneslik) õhustamine (nõrgbiofiltrid ja biorootor) kui ka sundõhustamine. Et nõrgbiofiltrid ja biorootorid suudaksid eesmärgipäraselt toimida (et loomulikust õhustamisest piisaks), on koormused piiratud ning täidise struktuur peab olema õhuline (nt kandjaid valides, reovett piisavalt eelpuhastades võõrisesisalduse vähendamiseks). Nõrgbiofiltreid ja biorootoreid on mõnikord ka sundõhustatud.

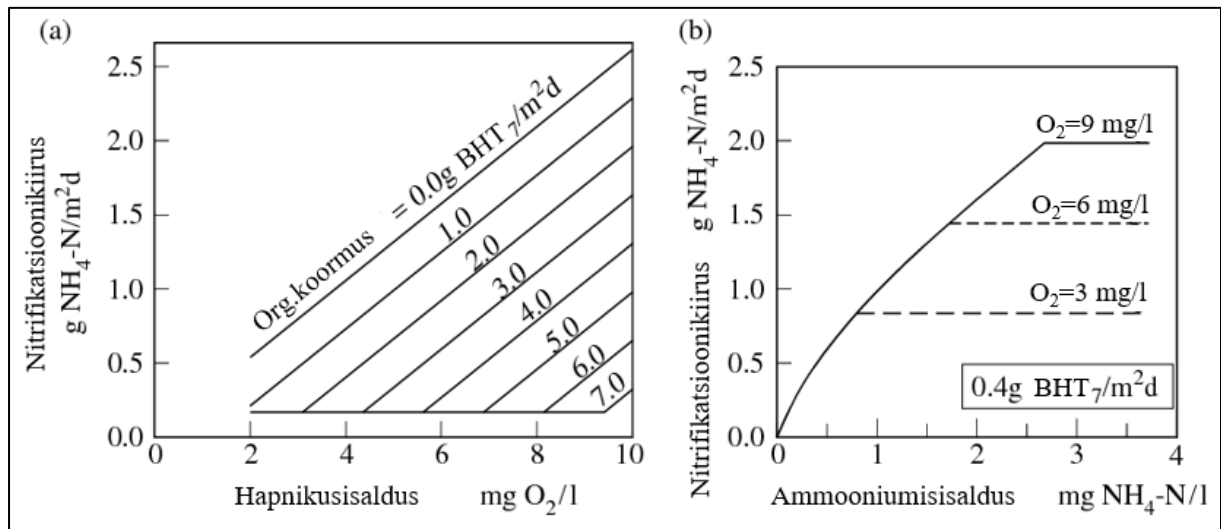
Õhustamisviisidest on levinud jäme- ja keskmullõhustus, teatud juhtudel on kasutusel ka peenmullõhustus. Jäme mull tagab reaktori sisu (sh biokilekandjate) hea segunemise ja vähendab biokilega ummistumise ohtu. Osaliselt võib kompenseerida jämedama õhumulli väiksemat hapniku-ülekannet see, et biokilekandjad lõhuvad mullid peenemaks (sõltub kandja tüübist) ning kandjate kui takistuste tõttu võib mulli viibeaeg mahutis pikeneda. Täpne lahendus sõltub nii kasutatavast biokiletehnoloogiast kui ka kandjatüübist ning on tootespetsiifiline. Nii on suurtootjatel oma reaktori kuju, biokilekandjate kui ka õhustuselementide lahendused (näiteks *Järger Umwelttechnik*'i kompaktsed biokilekandjaplokid koos õhustussüsteemiga, joonis 10.20).





Joonis 2.20. Jäger Umwelttechnik'i kompaktlahendused – biokilekandja koos õhustussüsteemiga. Vasakpoolne ja keskmine on plastkandja-, parempoolne tekstiilkandjaplokk.

Joonisel 10.21 on kujutatud reovee hapnikusisalduse mõju puhastusprotsessi tõhususele (väljendatuna pinnakoormusena), milles kajastub ka biokile difusiooni ehk massiülekanne gradiendi mõju. Mida suurem on reovee lahustunud hapniku sisaldus, seda tõhusamad on biokileprotsessid ning seda väiksemat reaktorit ja biokilekandjate hulka on vaja.



Joonis 10.2.211.  $\text{BHT}_7$ , hapniku ja ammooniumi mõju biokile nitrifikatsiooni kiirusele [5]

Suurem lahustunud hapniku sisaldus (uuemate kandjate puhul on orgaanilise aine ärastusel soovitatav see hoida vahemikus 2–4  $\text{mg O}_2/\text{l}$ , nitrifikatsioonil vähemalt 5  $\text{mg O}_2/\text{l}$ ) tähendab aga märksa suuremat energiakulu. Suuremat hapnikukulu võib heljuv kandjate puhul osaliselt kompenseerida nende iseeneslik õhustumine mahuti pinna kaudu, kuid see sõltub kandjatest (tehnilised näitajad) ja nende hulgast, reovee omadustest ja mahuti kujust. Oma rolli on ka sellel, kas mahuti on pealt avatud või suletud, sest kinnise mahuti piirpinnal võib hapnikusisaldus liiga väike olla. Täiendavalt tuleb arvestada, et biokilesüsteemides tekib ka ammooniumi difusiooni mõju – seda väiksema ammooniumisisalduse (ca 1–3  $\text{mg NH}_4\text{-N/l}$ ) korral.

Biokilesüsteemides on sageli vaja tekitada mehaaniliselt segatavaid tsoone või mahuteid. Segamislahenduse kavandamisel tuleb arvestada kandjate omadusi (mõõtmeid, kuju) ja paiknemistihedust ning lahendus kooskõlastada biokilekandjate tootjaga. Kandjaid, mille tihedus on lähedane vee omale, on lihtsam segada, sest segamisenergia on väiksem kui suurema tihedusega kandjate puhul. Oluline roll on ka kandjate hulgal – mida hõredamalt nad paiknevad, seda paremini nad segunevad [4, 5, 10]. Tavaliselt on kasutusel nii vertikaalsed kui ka horisontaalsed aeglase käiguga sukelsegurid. Seguri laba pöörlemiskiirus on soovitatav hoida alla 150 rpm.

#### 2.4.2 Biokile paksuse ja irdumise kontrollimine.

Biokileprotsesside tõhusaks toimimiseks tuleb tagada optimaalne biokile paksus, mis peale süsteemi ökonoomsuse soodustab selle töökindlust. Ummistunud biokile massiülekanne on väga aeglane ning põhjustab mikrobioloogilise koosluse muutumist (nt denitrifikatsiooni lakkamist) ja puhastustõhususe vähenemist. Ummistuste vähendamisel on oluline roll reovee eelkäitlusel ning puhastusprotsessis on vaja luua biokile jaoks soodsad tingimised (protsess ei tohi olla ülekoormatud, orgaanilise aine voogu olgu kontrollitud). Praktikas püütakse vältida anaeroobse tsooni tekkimist (võib liiga paksus biokiles tekkida massiülekanne piirangute tõttu), kuna siis võib biokile eralduvate gaaside tõttu ulatuslikult irduda [5].

Biokile liikuvkandjate areng on liikunud selles suunas, et biokile optimaalne paksus oleks tagatud võimalikult tavapärase käitamisega, s.o mahuti segamise (õhustus ja segurid) ja voogude liikumisega.

Sukelbiofiltreid (nt *Veolia Biostyr*) on vaja regulaarselt pesta. Liikuv-ja paiksete kandjate puhul tuleb õhustamise või segamise abil tekitada piisav turbulentsus, et biokile pidevalt irduks. See ei ole aga kuigi lihtne. Kaasajal arendatakse kandjaid suunas, et biokile paksust oleks lihtsam kontrollida.

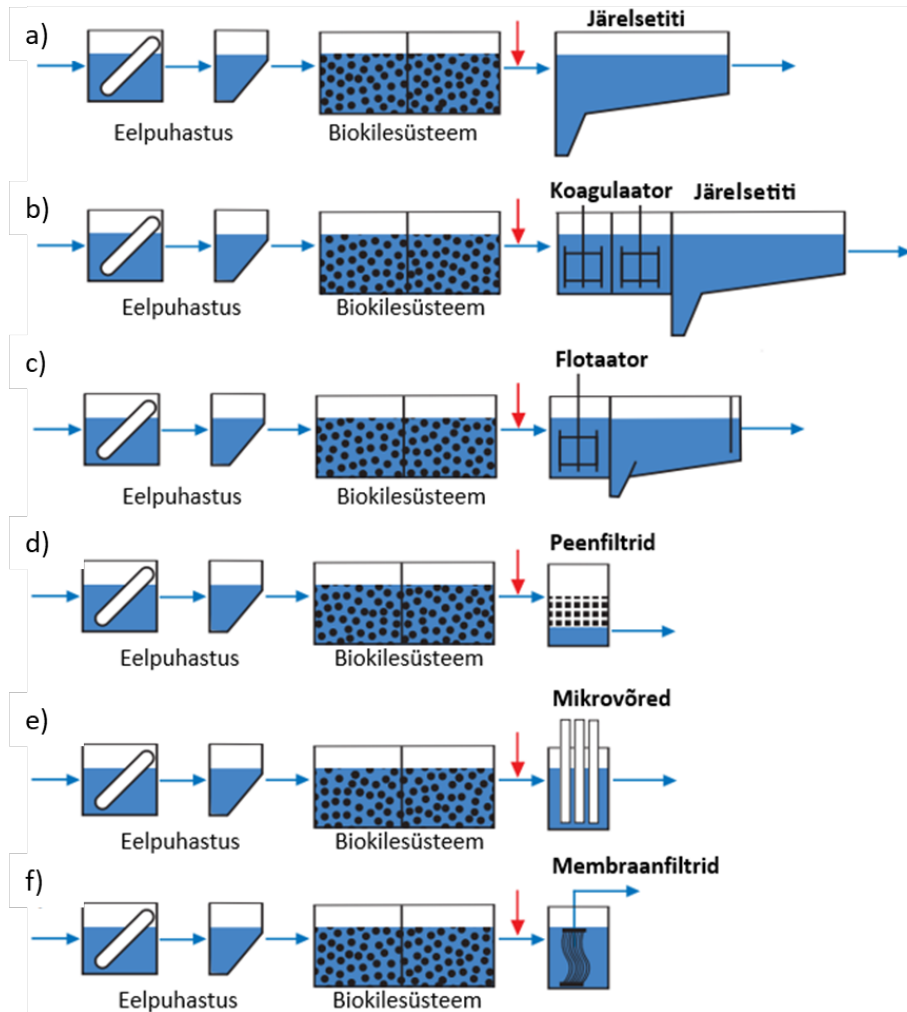
Nõrgbiofiltrid peavad olema piisavalt hüdrauliliselt koormatud. Koormust on võimalik näiteks kuivematel perioodidel reguleerida ka ringluse (kui see on olemas) suurendamisega.

Biorootoritel on võimalik reguleerida rootori pöörlemiskiirust ja uputussügavust (nende kaudu kontrollitakse ka hapniku massiülekanne).

#### 2.4.3 Järelduhastus ja settekäitus

Et biokile reoveega sisenevat heljumit ei seo (erinevalt aktiivmudapuhastist, milles see haaratakse aktiivmudahelbe külge), on järelduhastus väga oluline etapp, mis tuleb biofiltril kavandada (arvestades biokile spetsiifikat) tavapäraste standardite järgi. Seetõttu on vaja nõuetekohast järelsetitit, mis võtab

arvesse muda suhteliselt halbu settimisomadusi eriti nendes lahendustes, milles kasutatakse võimalikult õhukest biokilet. Suurt SVI-d on vaja arvestada ka hübriidsüsteemides, milles tuleb kindlasti arvesse võtta muda tihenemise ja salvestamise tsoone [7]. Heljumi halbade settimisomaduste tõttu on levinud flokuleerimine ja koaguleerimine, flotatsioon ja mitmesugused peenfiltrid (vt joonist 10.22).



Joonis 10.2.22. Heljuv kandjaga biokilesüsteemide järelpuhastuse lahendusi, mis on kohaldatavad ka muudele biokilesüsteemidele [2]. a – tavapärase järelsetiti; b – koagulaatoriga järelsetiti; c – flotatsioon; d – peenfiltrid (nt liivfilter); e – mikrovõred; f – membraanfiltrid [5]. Punane nool näitab kemikaalide annustamist.

Järelpuhastusest loobumine tuleb kõne alla ainult:

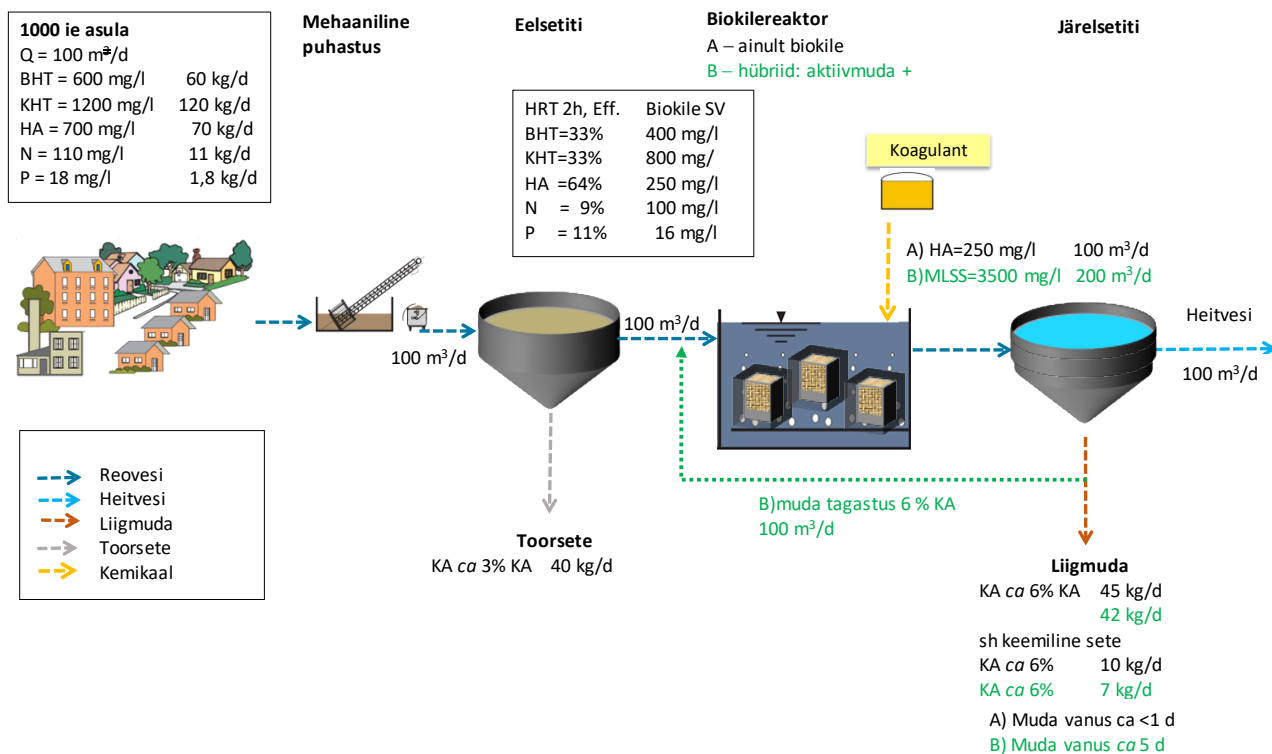
- kõrvalvoogude (nt settevee) käitlemisel, kus väljavooluvesi jõuab koos heljumiga põhipuhastisse ja kõrvaldatakse seal;
- neis järelpuhastustehnoloogiates (nt Tallinna RVP-s kasutatava tehnoloogia *Veolia Biostyr* puhul kõrvaldatakse heljum tagasipesuga), milles väljavooluvees on heljunit märksa vähem kui heitveenormid nõuavad;

- mitmeastmeliste süsteemide astmete vahel, kui heljum järgnevas puhastusetapis probleeme ei põhjusta;
- kalakasvandustes (tavapäraselt), kus heljumit on väga vähe (kõrvaldatakse juba kasvatusbasseinidest) ning biofiltreid regulaarselt tagasi pestakse;
- väga väikese ainesisaldusega vee (sh sademevee), mille heljumisisaldus on piirnormist väiksem, puhastamisel.

Biokilepuhasti settekäitluseosa ei erine oluliselt muudest puhastustehnoloogiatest, mistõttu võib sellele läheneda samade põhimõtete alusel (vt jaotist 17). Tavapäraselt on biokilepuhastil kaks settevoogu – eelsetitist pärinev toorsete ja järelsetitist kõrvaldatav liigmuda. Toorsete koostise ja omaduste poolest erinevusi võrreldes teiste puhastustehnoloogiatega ei ole ning see sõltub otseselt reoveesisendist. Küll aga tuleb biokilepuhasti eelpuhastusetapis (nt eelsetitis) kõrvaldama võimalikult palju heljumit, see mõjub bioloogilisele puhastusele positiivselt. Aktiivmudapuhastil võib aga liigne heljumi kõrvaldamine negatiivselt mõjutada aktiivmuda settimisomadusi [4, 7].

Settekäitluse puhul peab arvestama ka seda, et biokilepuhasti liigmuda (mille peamise osa moodustab puhastusprotsessi läbiv heljum) ei ole üldse stabiliseeritud (sarnaneb toormudale) ning muda vanus võrdub hüdraulilise viibeajaga puhastis. Nõrgfiltritel on see tavaliselt üle päeva, heljuvkandjaga puhastitel aga alla ühe päeva. Erinevus on see hübriidlahendustel, milles liigmudale lisandub ka aktiivmuda (SRT tavaliselt kuni 5 päeva). Biokilepuhastite sette anaeroobsel kääritamisel on biogaasi saagis seetõttu suurem [4].

Joonisel 10.23 on kujutatud biokilesüsteemide lihtsustatud settebilanss ainult biokile kui hübriidlahenduste puhul. Hübriidlahenduste puhul tuleb muuhulgas ka setiti kavandada sarnaselt aktiivmuda puhastile, ehk peab arvestama aktiivmuda mahukoormusega. Sette tekke osas on teatav erinevus tulenevalt hübriidlahenduse võimalustest rakendada tõhustatud fosforiärastust ja seega kasutada vähem sadestuskemikaale, mis vähendab mõnevõrra ka summaarset sette teket.



Joonis 10.2.23. Biokilesüsteemide lihtsustatud settebilanss 1000 ie suuruse koormusega asula näitel

### 3 Aktiivmudapuhastus

Aktiivmudapuhastus on reovee käitlemise kõige levinum tehnoloogiline lahendus, mis on valdavalt kasutusel ka Eesti reoveepuhastites. See tehnoloogia võimaldab peale orgaaniliste ühendite kõrvaldamise ka tõhusat lämmastikuärastust ja bioloogilist fosforiärastust.

Eestis ei ole kehtestatud detailset aktiivmudapuhastuse standardit, mille alusel saaks puhastit projekteerida. Viimastel kümnenditel on meil tuginetud peamiselt Saksamaa reoveeühingu standardile ATV-DVWK A-131E [1], ent on kasutatud ka teiste riikide standardeid (US-EPA, GOST) ning õpikutes ja käsiraamatutes leiduvat teavet.

Aktiivmudapuhasti toimimispõhimõtete rakendamisel ja arvutuste puhul kasutatakse kas BHT- või KHT-põhist lähenemist. Eestis ja ka mujal Euroopas on enamasti lähtutud BHT-põhisest ning puhasti koormus arvutatakse reovee biolaguneva ainesisalduse kaudu. Sealjuures võetakse arvesse ka empiirilisi koefitsiente, mida on keeruline otse bakterite kineetikasse üle kanda. BHT-põhise lähenemise puuduseks võib pidada seda, et lähtuda saab kas 5-päevasest või 7-päevasest BHT väärtusest. Eestis seni reoveepuhastite dimensioneerimisel kõige sagedamini kasutatud ATV standard [1] põhineb BHT<sub>5</sub> väärtustel, laborid aga määravad BHT<sub>7</sub> väärtusi, ning tuleb kasutada üleminekukoefitsiente.

Tänapäeval rakendatakse aktiivmudapuhastuses üha enam matemaatilist modelleerimist, mis võimaldab senisest märksa täpsemalt kasutada mikroorganismide sooritatavate biokeemiliste reaktsioonide kineetilisi näitajaid. Selline lähenemine tugineb aga tavaliselt KHT väärtustel ning eeldab eri KHT fraktsioonide jaotises 2.1.2 käsitletavat hindamist või määramist. Puhasti modelleerimisele tuginev toimimine on õigete lähteandmete puhul väga täpne ning võimaldab tulemusi rakendada nii puhastite käitamisel ja optimeerimisel kui ka projekteerimisel. Projekteerimisel on aktiivmudaprotsessi pikka aega modelleeritud Ameerika Ühendriikides ja Kanadas. Modelleerimine nõuab selle rakendajalt protsessitehnoloogia aluste ja mudeli rakendatavuspiiride väga head tundmist ning täiendavaid juhiseid ja üldisi kokkuleppeid varutegurite suhtes. Viimase aja üldine trend on üleminek BHT-põhiselt lähenemiselt KHT-põhisele. Ka Saksamaa aktiivmudapuhastite dimensioneerimise standardi uus versioon aastast 2016 põhineb KHT-I ja reovee fraktsioneerimisel. Seetõttu tuginetakse käesoleva jaotise aktiivmudapuhasti arvutustele pühendatud osas peamiselt KHT-le, kuid käsitletakse ka BHT-põhist lähenemist.

Käesolevas jaotises käsitletakse aktiivmudapuhastuse üldisi põhimõtteid, mis on orienteeritud peamiselt reovees sisalduvate orgaaniliste ainete lagundamisele, s.o süsinikuühendite ärastamisele. Siin käsitletud põhimõtted on üle kantavad ka järgmistes jaotistes käsitletavatele eledenitrifikatsiooniga tõhustatud lämmastikuärastusele ning bioloogilisele fosforiärastusele.

### 3.1 Aktiivmudapuhastuse põhikomponendid

Aktiivmudapuhastus on protsess, milles reovett puhastavad mikroorganismid toimivad vees heljuvas aktiivmudas. Pärast bioloogilises protsessis osalemist lahutatakse mikroorganisme sisaldav aktiivmuda puhastatud veest ning bioloogilise puhastuse käigus juurde tekkinud muda eraldatakse protsessist. Aktiivmudapuhasti toimimiseks on vaja mikroorganismidele luua orgaanilise aine lagundamiseks või nitrifikatsiooniks vajalikud tingimused: puhastatavas reovees peab olema piisavalt lahustunud hapnikku, vett peab korralikult segama, aktiivmuda tuleb lahutada puhastatud veest ning eraldada tuleb liigmuda.

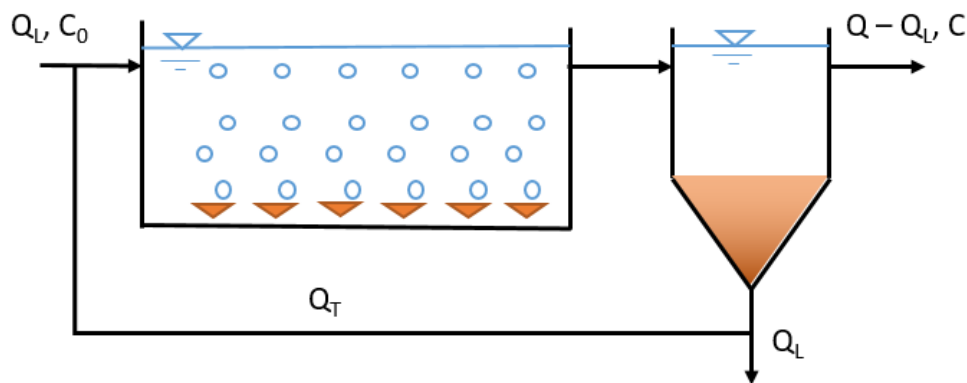
Biopuhastuse toimimiseks aktiivmudasegus peavad õhustuskambris valitsema aeroobsed tingimused ning reovee ja aktiivmuda segu tuleb õhustada ja segada. Õhustusseadmeid käsitletakse käsiraamatu 14. jaotises. Sõltuvalt puhastuse eesmärgist ja tehnoloogilisest lahendusest võib aktiivmudaprotsess toimuda eri reaktorites, milles valitsevad aeroobsed, anoksilised või anaeroobsed tingimused.

Aktiivmuda lahutatakse õhustuskambri väljavooluveest järelsetitis, kusjuures heitvesi peab sisaldama võimalikult vähe heljumit ning settinud aktiivmuda olema piisavalt tihe, et õhustuskambrisse

tagastatuna luua seal vajalik aktiivmudasisaldus. Järelsetiti korralikuks toimimiseks peavad õhustuskambris toimuvate protsesside tulemusel tekkival aktiivmudal olema head settimisomadused. Järelsetiti toimimist käsitletakse detailsemalt jaotises 15.

Tavaliselt käsitletakse aktiivmudapuhastit läbivoolupuhastina, milles bioloogilised protsessid ja järelsetitamine toimuvad eraldi mahutites (joonis 7.1). Liigmuda võib kõrvaldada ka õhustuskambrist. Eri lahendusi (annuspuhasti, membraanpuhasti jt) käsitletakse eraldi jaotistes.

Sisuliselt toimivad kõik aeroobsed reoveepuhastid (biokile-, aktiivmuda-, aeroobne graanulmudapuhasti) samade üldpõhimõtete kohaselt. Põhiline erinevus seisneb tingimustes, milles aeroobsete mikroorganismide kooslus kasvab. Aktiivmudapuhastid erinevad voolurežiimi ning reaktorite kuju, suuruse, arvu ja konfiguratsiooni, reovee segamise intensiivsuse ja hapnikusisalduse, ringlusvoogude ning paljude muude operaatori poolt tahtlikult või tahtmatult tekitatud tingimuste poolest. Puhastis mikroorganismide jaoks loodud tingimustest lähtuvalt kujuneb reoveepuhastis aktiivmuda kooslus, mis määrab bakterite aktiivsuse ja settimisvõime.



Joonis 7. 1. Aktiivmudapuhastite skeem ( $Q$  – puhastisse jõudev vooluhulk,  $Q_T$  – tagastusmuda vooluhulk,  $Q_L$  – liigmuda vooluhulk,  $C_0$  – sissevooluvee reoainesisaldus,  $C$  – väljavooluvee reoainesisaldus).

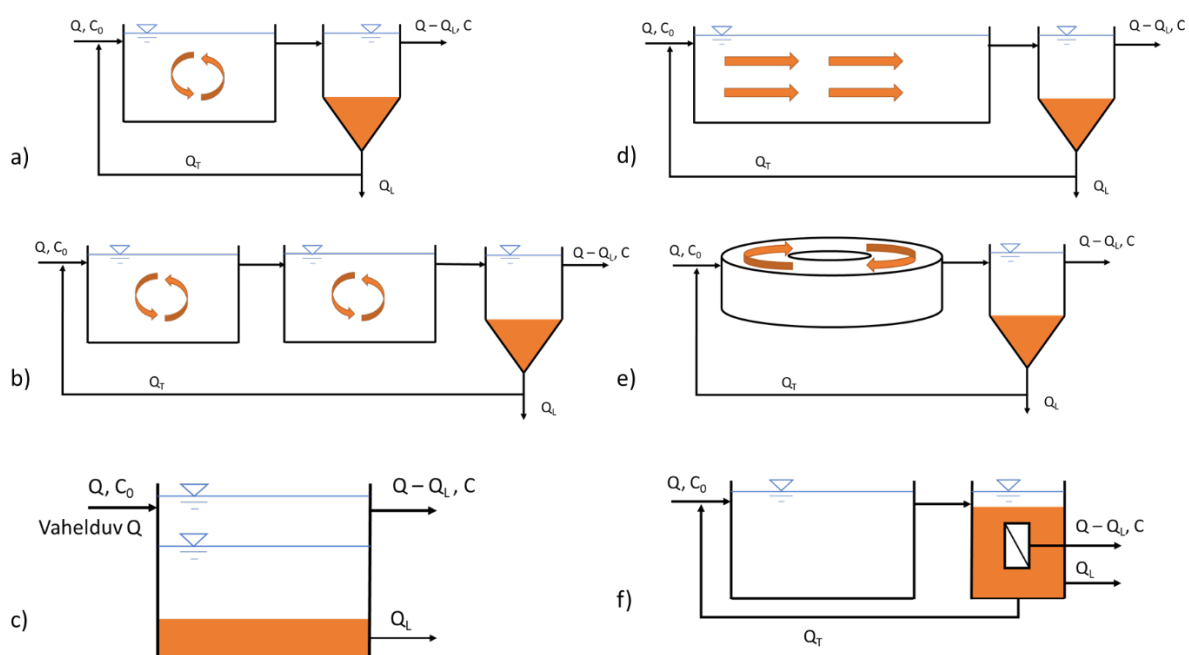
Aktiivmudapuhastite alljärgnevatel jaotistel käsitletavatelt konfiguratsioonidelt ja põhinäitajatest moodustuvad koondtegurid, millest sõltub nii aktiivmuda mikroorganismide kooslus kui ka nende aktiivsus ja settimisomadused.

### 3.2 Aktiivmudapuhastite tehnilised lahendused

Tavapärase aktiivmudapuhastite koosseis koosneb ühest või mitmest reaktorist ja järelsetitist. Reaktor on aktiivmudapuhastite osa, mille tehnoloogiline lahendus ja toimimisrežiim on puhastite biomassi tegevuse suhtes väga olulise tähtsusega. Aktiivmudapuhastite peamised tehnilised lahendused on kujutatud joonisel 7.2.



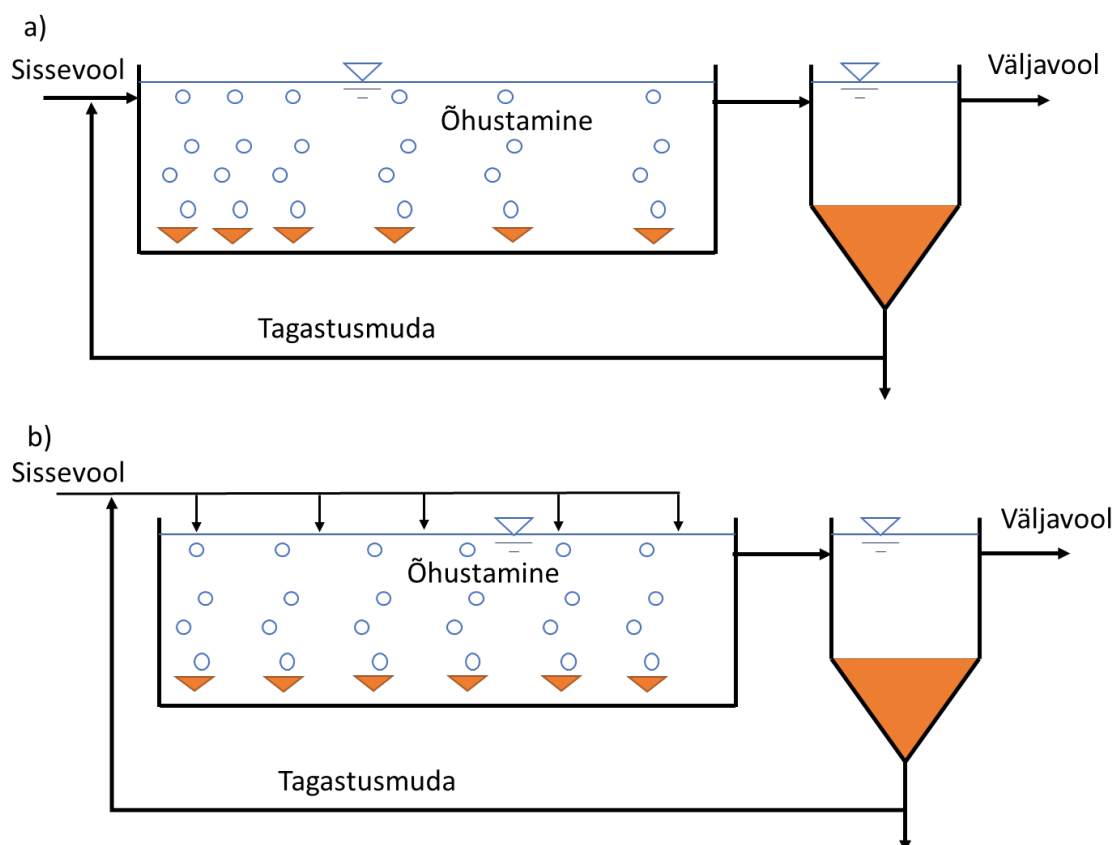
Reoveepuhasti aktiivmudareaktori puhul on oluline, millises hüdraulilises režiimis vedelik mahutis voolab. Kui reaktorisse jõudnud reovesi seguneb kiiresti kogu mahuti piires, nimetatakse see **täissegunenud reaktoriks**. Reovee ainesisaldus on kogu sellises reaktoris ühtlane ning on sissevoolutsoonis ligilähedaselt sama mis väljavooluski (joonis 7.2a). Kuna reoveepuhasti väljavooluvee reoainesisaldus peab vastama piirmäärale ning puhastusprotsess olema lõpuni viidud, kulgeb täissegunenud reaktoris kogu protsess olukorras, milles substraadisisaldus on väike. Selline olukord on levinud läbivoolsetes väikepuhastites, mille väikese mahuga reaktoris on täielik segunemine enamasti tagatud. Enamik vanadest nõukogudeaegsetest puhastitest (nt Bio-50, Bio-100, MRP ja PRP) on täissegunenud reaktori tüüpi.



Joonis 3.2. Aktiivmudapuhasti tehnoloogilised lahendused: a – täissegunenud reaktoriga puhasti, b – täissegunenud reaktorite jada, c – annuspuhasti, d – väljatõrjereaktor, e – ringkanal, f – membraanbioreaktor.  $Q$  – vooluhulk,  $C_0$  – sissevooluvee reoainesisaldus,  $C$  – väljavooluvee reoainesisaldus,  $Q_T$  – tagastusmuda vooluhulk,  $Q_L$  – liigmuda vooluhulk.

Suuremates puhastites, milles reovesi saab voolata reaktori algusest lõpuni (s.o **väljatõrjereaktorites**, mille mahuti voolusuunalise pikkuse ja laiuse suhe on suurem kui 10:1), laguneb reoaine vee ja aktiivmudasuspensiooni voolamise ajal (joonis 7.2d). Sellises puhastis on vee reoainesisaldus mahuti alguses suurem ning saavutab väljavooluvee nõutud piirväärtuse alles reaktori lõpus ning reaktoris tekib reoainesisalduse gradient. Siis toimub protsessi põhiline osa suurema ainesisalduse olukorras, mis on oluline ka aktiivmuda paremate settimisomaduste saavutamiseks (vt jaotisi 6 ja 17). Väljatõrjereaktor tagab sama reaktorimahu korral ka puhasti mõnevõrra suurema puhastustõhususe. Võrreldes täissegunenud reaktoriga on väljatõrjereaktor alati eelistatav. Eestis on väljatõrjereaktoritega aktiivmudapuhastid kasutusel suuremates asulates, nt Põlvas, Tartus ja Kohtla-Järvel.

Väljatõrjereaktorite eripärast tulenevalt toimub aktiivmudaprotsess reaktori eri osades erineva intensiivsusega. Kui kogu reovesi ja tagastusmuda juhtida reaktori algusesse, on hapnikutarve seal suurem kui reaktori lõpus. Seda tuleb arvesse võtta õhustusseadmete projekteerimisel ja käitamisel (**Error! Reference source not found.** 7.3a). Et hapnikutarve jaguneks mahutis ühtlaselt, võib rakendada järgjärgulist sissevoolu (joonis 7.3b). Kuna siis aga kaob reoainesisalduse gradient, ei saa väljatõrjereaktori sellist käitamist soovitada ning tavaliselt kasutatakse sissevooluvee jaotamist ainult lämmastikuärastuse kaskaadtehnoloogias (vt jaotist 8.6).



Joonis 7.2. Aktiivmudapuhasti väljatõrjereaktorite tüübid: a – järgjärguline õhustus, b – sissevooluvee järgjärguline jaotus.

Et ka väiksemates puhastites oleks võimalik kasutada väljatõrjereaktori eelist ja suurendada vee reoainesisaldust puhastusprotsessi alguses, rakendatakse **täissegunenud reaktorite jada**, kus kogu vajalik reaktorimaht jagatakse mitmeks osaks (joonis 7.2b). Kuna ka bioloogilise fosfori- ja lämmastikuärastuse toimimiseks jagatakse puhasti eri tsoonideks, luues eri mahutites erinevad keskkonnatingimused, on ka nende tehnoloogiliste lahenduste puhul täissegunenud reaktorite jada sageli kaudselt kasutusel ning reoainesisaldus on suurem esimestes reaktorites.

Eestis on väikepuhastitena kasutatud **ringkanaleid** (joonis 7.2e). Kuigi ka ringkanalis vedelik puhastusprotsessi ajal voolab, on mahutid enamasti nii väikesed, et ainesisaldusgradienti neis ei teki

ning neid ei saa väljatõrjereaktoriteks pidada. Oma tehnoloogilise lahenduse ja biomassi väljakujunemise seisukohalt liigituvad nad pigem täissegunenud reaktoriteks.

Tavapärase läbivoolse aktiivmudapuhasti alternatiiv on **annuspuhasti** (joonis 7.2c), milles kogu puhastusprotsess toimub ühes mahutis ning kus ei ole võimalik eraldi puhastiosadena eristada reaktorit ja järelsetiiti. Annuspuhastis toimub eri aegadel erinev protsess: täitmisfaas, protsessifaas, settimisfaas ja tühjenemisfaas. Puhastusprotsessi alguses, pärast täitmisfaasi, on vee reoainesisaldus suur, väheneb siis aja jooksul ning saavutab väljavoolu piirmääradele vastava sisalduse enne settimisfaasi. Kuigi annuspuhasti mahutites on aktiivmudasuspensioon täielikult segunenud, sarnaneb annuspuhastus hoopis väljatõrjereaktoritehnoloogiaga (vt jaotist 6.3.4) ning annuspuhastis tekib enamasti heade settimisomadustega aktiivmuda. Annuspuhastit ning aktiivmudapuhastuse tehnoloogia ülekandmist annuspuhastile käsitletakse detailsemalt jaotises 7.9.

Aktiivmudapuhasti tehnilise lahendusena käsitletakse ka **membraanbioreaktorit** (MBR), milles järelsetiiti on asendatud filtratsiooniseadmega. Enamasti paigaldatakse filtratsioonielement kas reaktorisse aktiivmudasuspensiooni sisse või eraldi filtratsioonimahutisse. MBR-puhasteid käsitletakse käsiraamatu jaotises 13.

Tabel 3.1. Mikroorganismide troofiline liigitus [15]

Troofiline rühm	Mikroobirühm	Energiaallikas		Tüüpilised saadused	Süsinikuallikas
		Elektroni-doonor	Elektroni-akseptor		
<b>Kemotroofid</b>					
Organo-troofid	Aeroobsed heterotroofid	Orgaaniline	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Orgaaniline
	Denitritiseerijad	Orgaaniline	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Orgaaniline
	Fermenteerivad organismid	Orgaaniline	Orgaaniline	Lenduvad rasvhapped	Orgaaniline
	Raua taandajad	Orgaaniline	Fe(III)	Fe(II)	Orgaaniline
	Sulfaadi taandajad	Äädikhape	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> S	Äädikhape
	Metanogeenid	Äädikhape	Äädikhape	CH <sub>4</sub>	Äädikhape
Litotroofid	Nitritiseerijad (ammooniumi oksüdeerivad bakterid)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>
	Nitritiseerijad (nitriti oksüdeerivad bakterid)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>
	Annamox	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
	Denitritiseerijad	H <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
	Denitritiseerijad	S	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
	Raua oksüdeerijad	Fe(II)	O <sub>2</sub>	Fe(III)	CO <sub>2</sub>
	Sulfaadi taandajad	H <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
	Sulfaadi oksüdeerijad	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>2</sub>
	Metanogeenid	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
	<b>Fototroofid</b>				
	Vetikad, taimed	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
	Fotosünteesivad bakterid	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	S <sup>0</sup>	CO <sub>2</sub>

### 3.2.1 Keskkonnatingimused

Keskkonnatingimused määravad sageli selle, kuidas ja millised mikrobioloogilised protsessid puhastis toimuvad. Ei tohi unustada, et nende protsesside tulemusena võivad keskkonnatingimused muutuda (nt nitrifikatsiooni käigus võib pH langeda ning fotosünteesi tulemusena tõusta). Selleks et mikroorganismid kasvaksid, peavad keskkonnatingimused olema neile soodsad. Mikroorganismide elutegevust mõjutavad keskkonna temperatuur, soolsus, pH, hapniku olemasolu ja vormid, inhibiitorid jt. Enamik reoveepuhasti mikroorganisme eelistab mõõdukat temperatuuri ja soolasust ning neutraalset pH-d (vahemikus 6,5–8,0). Olenevalt liikidest võivad need piirid ka liikuda kas ühes või teises suunas (näiteks võivad bakterid *Thiobacilli* kasvada väga happelises keskkonnas).

Tulenevalt aine- ning energiavahetuse eripäradest mängib bioloogilises puhastuses olulist rolli **lahustunud hapniku kättesaadavus**. Kui võrrelda keskkonnatingimusi glükoosimolekulist toodetava energia (rakud salvestavad seda ATP-na) näitel, on võimalik ka aru saada, miks on biopuhastuses teatavate keskkonnatingimuste hoidmine eri puhastusetappides ülioluline:

- **aeroobses** keskkonnas on lahustunud hapnik mikroorganismidele vabalt kättesaadav. Aeroobsed mikroorganismid kasutavad raku hingamisel hapnikku substraadi (nt glükoosi) oksüdeerimiseks energiasaamise eesmärgil. Energeetiliselt on mikroorganismide jaoks kõige kasulikum oksüdeerimisprotsessides kasutada lahustunud molekulaarset hapnikku ( $O_2$ ) sest näiteks ühe glükoosimolekuli täielikul lagunemisel on võimalik toota 38 ATP-molekuli;
- **anoksilises** keskkonnas ei ole lahustunud molekulaarne hapnik kättesaadav, kuid hapnikku leidub seal seotud kujul (nt  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ). Denitrifitseerijad kasutavad siis oksüdeerimisprotsessides nitraadi küljes olevat hapnikku, kuigi see on võrreldes aeroobse protsessiga tunduvalt ebatõhusam – ühe glükoosimolekuli lagunemisel on täieliku denitrifikatsiooni puhul võimalik toota 9 ATP-molekuli [16];
- **anaeroobses** keskkonnas ei ole lahustunud hapnik üheski vormis kättesaadav. Sellises keskkonnas ei ole oksüdeerimine võimalik ning glükoos lagundatakse näiteks etanooliks (toodetakse kaks ATP-molekuli).

Kui hapniku ja selle vormide kättesaadavusest oleneb eelkõige see, millised protsessid biopuhastusel toimuvad, siis mikroorganismide kasvu mõjutab otseselt **vee temperatuur**. Normaalsetes tingimustes on mikroobide kasvatamiseks kolm iseloomulikku temperatuuri – minimaalne kasvutemperatuur ( $T_{min}$ ), optimaalne kasvutemperatuur ( $T_{opt}$ ) ja maksimaalne temperatuur ( $T_{max}$ ). Alla  $T_{min}$  või üle  $T_{max}$  mikroorganismid ei kasva või võivad isegi hukkuda. **Vahemikus**  $T_{min}$  kuni  $T_{opt}$  ehk suboptimaalses temperatuurivahemikus suureneb mikroobide kasvukiirus temperatuuri kasvades eksponentsiaalselt, kuid võib maksimumile lähenedes järsult väheneda. Vastavalt kohastumisele liigitatakse mikroorganismid termofiilideks (elavad temperatuurivahemikus 45–80 °C), mesofiilideks (temperatuurivahemik 10–45 °C) ja psührofiilideks (temperatuurivahemik 0–5 °C).

Kui bioloogilisi puhastusprotsesse ei soojendata, toimub bakteriaalne elutegevus meie kliimaatilistes tingimustes psührofiilses temperatuurivahemikus, milles temperatuuri mõju on kirjeldatav võrrandiga:

$$r_T = r_{20} \cdot \theta^{(T-20)}, \quad (6.1)$$

kus  $r_T$  on reaktsiooni kiirus temperatuuril  $T$  °C;  $r_{20}$  – reaktsiooni kiirus temperatuuril 20 °C;  $\theta$  – temperatuuritegur ning  $T$  – temperatuur °C.

Temperatuuriteguri  $\theta$  väärtused on meie aktiivmudapuhastites 1,00–1,08, nõrgbiofiltrites 1,0–1,08 ja õhustatavates biotiikides 1,02–1,08. Nagu näha, on temperatuuri mõjuvahemikud kõigi kolme puhastusmeetodi jaoks peaaegu võrdsed, ent sõltuvus temperatuurist on mõnevõrra suurem biotiikides ja väiksem helvestunud ja kinnitunud kooslustel. See nähtus on seletatav asjaoluga, et biotiikides on organismid kas üksikud või väiksemate kogumikena ning temperatuuri stimuleeriv või limiteeriv mõju on palju vahetum. Helvestesse või biokiledesse koondunud bakterite ainevahetuse kiirust ei määra mitte niivõrd temperatuur, kui toidu hulk biomassiühiku kohta ja hapniku olemasolu. Madalamal temperatuuril toimuvad keemilised protsessid küll aeglasemalt, kuid seda aitavad kompenseerida sügavamates kihtides paiknevad isendid, kes muidu on toiduga varustamise poolest alakoormatud.

Kliimaatilistes tingimustes, milles aastaajad selgesti eristuvad, vahelduvad ka soojad (soodsad) ja jahedad (vähemsoodsad) perioodid. Tänu reovee temperatuuri erinevustele talvel ja suvel võib reoveepuhastites täheldada ka muutusi mudatekkes – talvel on mikroorganismide kasvukiirus väiksem ning muda tekib vähe juurde (seetõttu tuleb ka nitrifikatsiooni tõhususe hoidmiseks mudasisaldust reaktoris suurendada), kuid suvel paljunevad mikroorganismid kiiresti ja ka lagundamisprotsessid toimuvad kiiresti.